

HODNOTENIE ZOSUVNÉHO HAZARDU S VYUŽITÍM ŠTATISTICKÉHO MODELOVANIA (EFA) VO FLYŠOVEJ OBLASTI ZÁPADNÝCH KARPÁT

Mária BARANČOKOVÁ, Zdena KRŇÁČOVÁ

Ústav krajinej ekológie SAV, Štefánikova 3, P. O. Box 254, 814 99 Bratislava
e-mail: maria.barancokova@savba.sk, zdena.krnacova@savba.sk

Abstract: *The slope deformations are the most frequent geodynamic phenomenon in Slovakia and the flysch area of Kysuce region is one of the most troublesome areas. In this paper, we have observed the quantification of the effect and the degree of significance of the selected presumed natural attributes of the landscape, which condition or trigger the formation of the observed landslide hazard. We have tested our assumption using two methodologies. The first approach deals with the statistical modelling of the relationships and the significance of landscape factors and the occurrence of active, potential and stabilized landslides assessed by exploratory factor analysis (EFA). In the second approach we have assessed the expansion of the landslide occurrence in individual landscape conditions by interval statistical analysis. Based on the results of SVD (single value decomposition) algorithms it shows, that the assessment of the ecosystem with regard to the existing landslide hazard can be quite precisely reproduced using two orthogonal eigenvectors (factors): geological factor and hydrogeological factor. For the geological factor, the variables with the most significant factor loads are: deluvial sediments [GDS] (-0.93), loamy wastes on flysch rocks [GFH] (0.78), for hydrogeological factor the variables with the most significant factor loads are: sand, sandy gravel, gravel floodplains and terraces [HgT] (0.88), slope inclination [Ss] (-0.50), but also filtration coefficient [Kf] (0.93) and transmissivity coefficient [Kp] (0.72). When assessing the area using interval statistical analysis we have found out that active landslides occur mostly in areas with slope inclination 7-17 % with deluvia deposits on semi-deep to deep skeletal, loam soils with typical cambisol.*

Key words: *landslide hazard, statistical methods, Western Carpathians, flysch zone*

Úvod

Flyšové pásmo tvorí rozsiahle územie na severozápade a severe Slovenska a patrí medzi najohrozenejšie územia z hľadiska výskytu svahových deformácií na Slovensku. Na základe Atlasu máp stability svahov Slovenskej republiky sa na Slovensku nachádza 21 190 svahových deformácií. Porušujú územie s rozlohou 257,5 tis. ha, čo predstavuje 5,25 % rozlohy Slovenska. Najväčšie zastúpenie v rámci svahových deformácií majú zosuvy, ktorých bolo zaregistrovaných 19 104, a ktoré predstavujú celkovo 90,2 % všetkých registrovaných svahových deformácií.

Litologické zloženie hornín a z neho vyplývajúce fyzikálno-mechanické vlastnosti horninového prostredia sú veľmi dôležitým vstupným parametrom pri hodnotení zosuvného hazardu. Priestorové rozloženie litologických typov hornín v značnej miere určuje distribúciu svahových deformácií v území, z čoho vyplýva výrazná kladná korelácia medzi počtom svahových deformácií a horninovými typmi vysoko náchylnými na zosúvanie. Dôležitým faktorom pri posudzovaní stability svahov sú inžinierskogeologické vlastnosti hornín – fyzikálne (objemová hmotnosť, priepustnosť) mechanické (súdržnosť, vnútorné trenie). Tieto vlastnosti majú významnú úlohu pri klasifikácii litologického prostredia z hľadiska náchylnosti na zosúvanie.

Významnou mierou stabilitu svahu ovplyvňuje aj sklon svahu, najmä v kombinácii s inými parametrami. Každý svah má svoju kritickú hodnotu veľkosti sklonu, po prekročení ktorej už nie je stabilný a dochádza k zosúvaniu. Hodnota kritického sklonu svahu je ovplyvnená najmä množinou vlastností horninového prostredia ovplyvňujúcich veľkosť aktívnych síl pôsobiacich v svahu (fyzikálne vlastnosti hornín, stav hladiny podzemnej vody, zmeny vplyvom antropogénnej činnosti).

Vyhodnotenie priestorových vzťahov medzi zosuvmi a environmentálnymi faktormi, ktoré ich vyvolávajú, môže byť založené na digitálnych databázach a zahŕňa metódy ako je štatistika, analýza priestorových vzťahov a interaktívne mapovanie (Santacana et al., 2003; Guzzetti et al., 2012; Meten et al., 2015; Prefac et al., 2016; Sakkas et al., 2016). Štatistický histogram, priestorové prekrytie a metódy dynamického mapovania sú navzájom prepojené na interaktívne vyhodnotenie priestorového vzťahu medzi zosuvmi a environmentálnymi faktormi. Hydrologické podmienky, ako sú silné zrážky a infiltrácia a exfiltrácia podzemnej vody, majú veľký vplyv na výskytu zosuvov pôdy (Ronchetti et al., 2009; Krzeminska et al., 2013; Wiedenmann et al., 2016; Lee et al., 2016). Na nestabilných svahoch z jemnozrnných sedimentoch sa vytvára gravitačná deformácia (povrchové šmykové roztrhnutie a napínacie trhliny), ktorých kontinuálne otvorenie môže byť zosilnené zmašťovaním počas suchých období (Bièvre et al., 2012; Bittelli et al., 2012). Geohydraulické parametre v pevných horninách majú svoje špecifické vlastnosti: znižovanie priepustnosti s hĺbkou pod zemským povrchom, špecifický vzťah medzi litologickým charakterom a priepustnosťou hornín, vplyv zóny pripovrchového rozvoľnenia pri vytváraní funkcie hlavnej spojitej zvodne, priestorovú neuniformitu transmisivity v pripovrchovej zóne, atď. (Hanzel, 2003; Malík et al., 2016). Stanovenie týchto hydraulických vlastností hornín patrí medzi ďalšie faktory ovplyvňujúce vznik zosuvov. Hydraulické správanie sa celého systému býva determinované zónou s najvyššou úrovňou priepustnosti.

Existuje množstvo metód hodnotenia a prognózovania zosuvného hazardu, kde významné miesto majú najmä kvantitatívne metódy (napr. štatistické metódy), ktoré sú založené na porovnaní, následnom štatistickom spracovaní vzťahov medzi relevantnými faktormi vplývajúcimi na stabilitu a reálnym výskytom svahových porúch. Pri týchto hodnoteniach sa berie do úvahy priestorová distribúcia rôznych parametrov (geologická stavba, geomorfologické pomery, hydrogeologické pomery, atď.). V práci Barančoková, Kenderessy, (2014) bola hodnotená náchylnosť územia na zosúvanie multivariačnou analýzou, kde vstupnými parametrami boli litologické jednotky, súčasná krajinná

štruktúra, sklon svahov a priemerné ročné úhrny zrážok, tieto parametre predstavovali nezávislé premenné a zosuvy boli závislá premenná.

Veľmi malá preskúmanosť existuje v oblasti riešenia vzťahov kvantifikácie predpokladaných atribútov krajiny a stanovenie latentných signifikantných faktorov vo vzťahu k vzniku svahových deformácií. Ak chápeme, že v krajine existuje zložitý viacúrovňový systém medzi jeho abiotickými zložkami a svahovými pohybmi, tak tu existuje aj množstvo kombinácií sériových a paralelných väzieb a poznanie týchto vzťahov a súvislostí je nevyhnutými predpokladom pre praktické riešenie vo výskume zosuvov v krajine. Pri hodnotení týchto zložitých systémov je vhodné využiť štatistické modelovanie, kde správne postavené modely môžu pomôcť získať hodnoverné výsledky, ktoré je možné využiť aj pri ďalšom výskume. V práci Barančoková et al. (2017a, 2017b) sme kvantifikovali významnosť vplyvu vybraných krajinných faktorov na nestabilné svahy flyšového územia na základe viacrozmernej štatistickej metódy CANOCO.

Predložená práca sa zaoberá riešením vzťahov vybraných parametrov krajiny a zosuvov vo flyšovej oblasti Západných Karpát. Vstupné údajové matice sme zostavili z parametrov, ktoré boli vyjadrené formou kvantitatívnych a semikvantitatívnych dát s využitím GIS databáz. Tieto boli extrapolované z nameraných bodov do oblastí s výskytom svahových porúch.

Pri modelovaní interakčných väzieb sme využili faktorovú analýzu (EFA), ktorá je zameraná na vytvorenie nových latentných nepozorovateľných premenných, tzv. faktorov, pomocou ktorých sa zredukuje a zjednoduší pôvodný počet vstupných premenných pri zachovaní podstatnej časti informácie. Lineárne kombinácia faktorov aproximuje pôvodné pozorovanie, pričom zachytáva skryté vzťahy medzi pôvodnými premennými.

Použité metódy

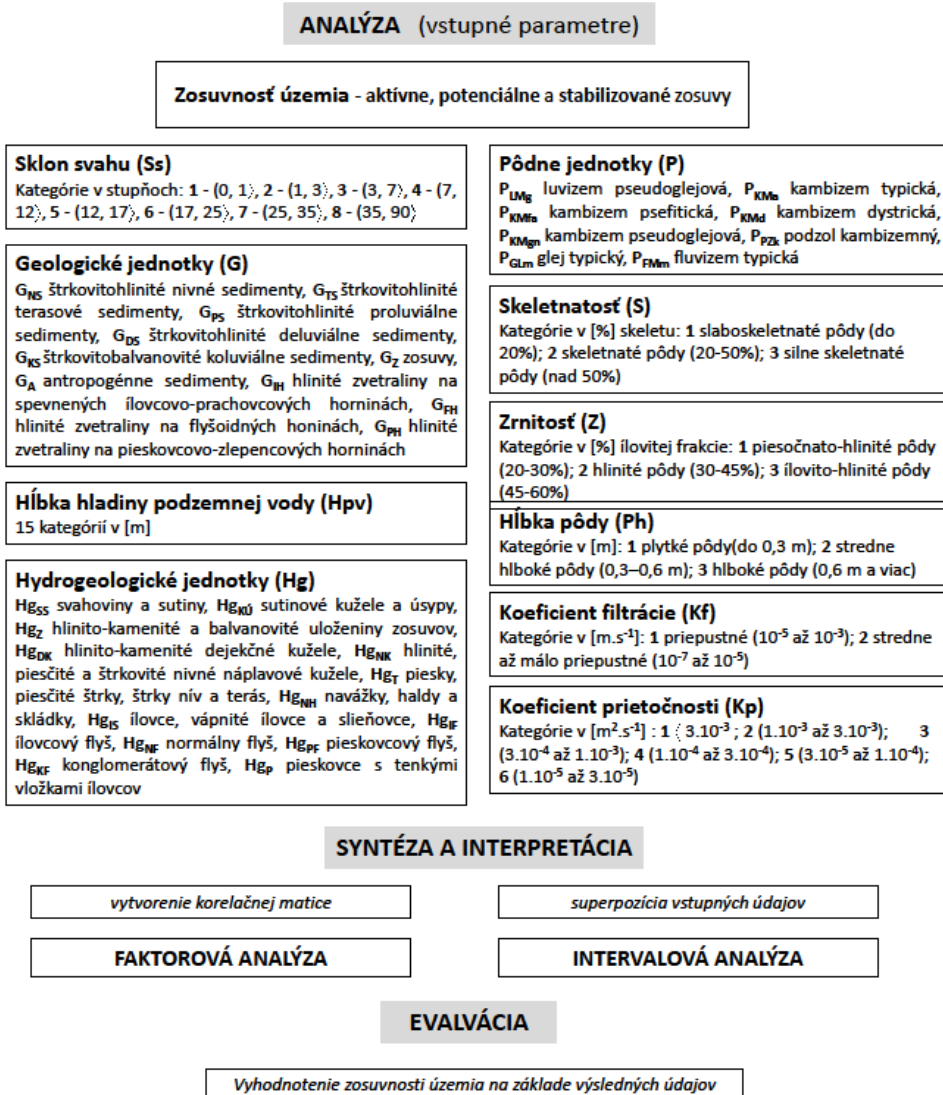
V našej práci sa zaoberáme štatistickým modelovaním ekosystému vybraných vstupných parametrov vo vzťahu k reálnemu výskytu zosuvného hazardu, kde sa modeluje stav originálu k určitému časovému okamihu formou exploratívneho prístupu. Aplikácia exploratívneho modelu sa zdá byť pre počiatočné (iniciálne) štúdium akýchkoľvek systémov vhodnejšia ako konfirmatórne prístupy. Exploratívne modely umožňujú optimalizovať výber vhodných indikátorov v rámci rôznych ekosystémov, čo umožňuje jednotnosť v rámci rôznych ekologických štúdií v rôznych oblastiach.

V práci sme si zvolili dva prístupy hodnotenia. Prvý prístup je zameraný na štatistické modelovanie pri analýze vzájomných väzieb vstupných parametrov v ekosystéme s výskytom zosuvov viacrozmernou štatistickou metódou (EFA). Štatistická podstata využitia modelovania pri analýze vzájomných väzieb v ekosystémoch si vyžaduje pri vytváraní vhodných modelov aplikáciu multivariantných štatistických postupov a formalizmus matematickej štatistiky, pomocou ktorých hľadáme „najvýdatnejšie“ riešenia s ich následnou štatistickou verifikáciou. Druhý prístup je zameraný na vyhodnotenie rozšírenia zosuvov v jednotlivých krajinných prvkoch intervalovou

analýzou. Pri interpretácii a následnom vyhodnotení sme vychádzali z plochy jednotlivých zosuvov v daných prvkoch krajiny v sledovanom území a z najčastejšie sa vyskytujúcich kombinácií (12 069 polygónov) jednotlivých prvkov a zosuvov.

Metodický prístup charakterizujú vstupné parametre, systém hodnotenia a výstupy, ktoré sme využili v našej práci (obr. 1).

Obr. 1: Metodický prístup a prehľad vstupných parametrov hodnotenia zosuvov



Pri realizácii faktorovej analýzy sme postupovali nasledovne:

- 1) Výber vstupných parametrov (Potfaj et al., 2002; Žabková, et al., 2003; Malík et al., 2016; Societas pedologica slovacica, 2014).

- 2) Syntéza vektorových vrstiev pre hodnotené parametre v GIS
- 3) Zostavenie vstupnej dátovej matice a kvantifikácia premenných
- 4) Aplikácia štatistického modelu EFA
- 5) Výber počtu signifikantných faktorov podľa SVD (single value decomposition)
- 6) Interpretácia latentných premenných (faktorov) popisujúca model interakcií vstupných premenných
- 7) Interpretácia a hodnotenie vybraných atribútov krajiny a zosuvov intervalovou štatistickou analýzou

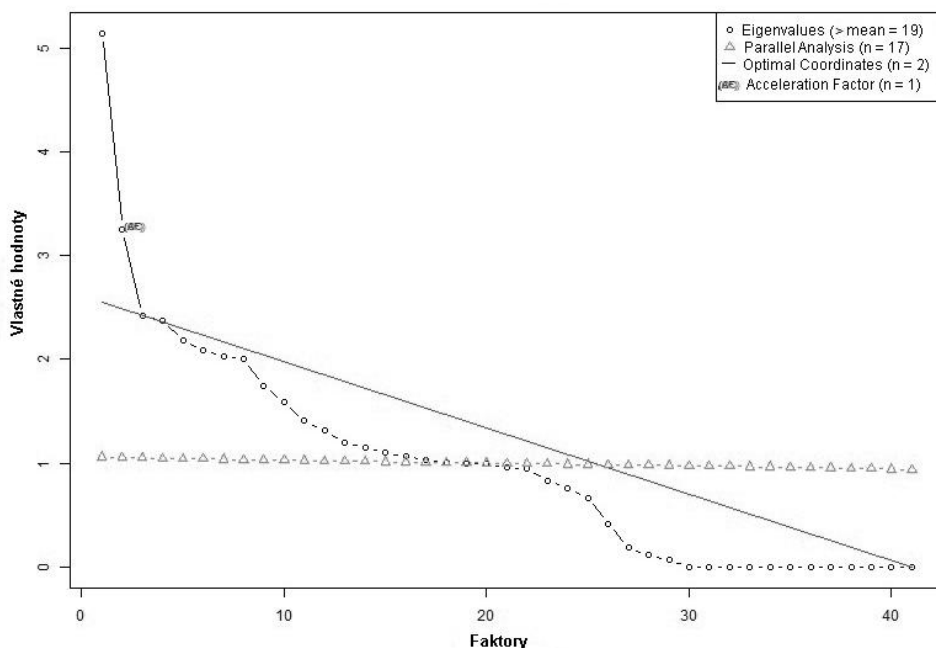
Vektorové vrstvy jednotlivých prírodných parametroch sme prekryli vektorovou vrstvou reálne vyskytujúcich sa zosuvov. Zosuvy sú registrované v databázach Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra (Šimeková, Martinčeková et al., 2006; <http://apl.geology.sk/atlassd/>) a ich poloha bola verifikovaná v teréne. Podľa aktivity boli zosuvy rozdelené do troch kategórií: aktívne, potenciálne a stabilizované. Aktívny (živý) zosuv je taký, ktorý je v súčasnosti v pohybe. Ak je pohyb v súčasnosti upokojený, ale príčiny jeho vzniku sa môžu za vhodných podmienok obnoviť, vtedy ide o potenciálny (dočasne upokojený) zosuv. V stabilizovanom (trvalo upokojenom - neaktívnom) zosuve príčiny vzniku pohybu zanikli, prípadne sa ľudskými zásahmi odstránili. Ich význam je z celospoločenského hľadiska v súčasnosti nižší, nemožno však vylúčiť ich opätovnú aktivizáciu v súvislosti s rôznymi činnosťami – napr. výstavbou nových objektov. Monitoring na týchto lokalitách má prevažne udržiavací charakter, ale v prípade potreby sa môže jeho rozsah i frekvencia zvýšiť a lokality môžu byť preradené do vyššej kategórie významnosti.

Pri štúdiu štruktúr akýchkoľvek ekosystémov sa používajú početné varianty exploratívnych a konfirmatórnych techník modelov s latentnými premennými (Krnáč, Krnáčová, 1994). Faktorová analýza (EFA) sa dá veľmi dobre využiť na zistenie základnej štruktúry veľkého množstva premenných. Tento štatistický test redukuje dáta na menšie súbory prehľadných premenných. Na stanovenie prehľadných premenných (faktorov) bol použitý Scree test a Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) test. Test KMO meria primeranosť vzorkovania pre každý faktor v modeli. Závislosť medzi testovanými premennými bola vykonávaná korelačnými maticami. Matica faktorových váh identifikuje vzťahy medzi spoločnými faktormi a indikátormi. Vstupnými údajmi pre analýzu bola dátová matica s 34949 riadkami a 41 stĺpcami. Pri hodnotení sa využívala metóda obyčajných najmenších štvorcov (ordinary least squares OLS) na nájdenie minimálneho reziduálneho riešenia. Použila sa kosouhlá (šikmá) metóda "oblmin" pre rotáciu faktorov s výsledkom navzájom korelovaných faktorov (R Core Team, 2017). Pre potreby matematického modelovania interakčných väzieb medzi prvkami ekosystému a zosuvným hazardom sa používajú všetky dostupné údaje, ktoré by mohli súvisieť s danou problematikou, pričom podmienka používania dát kvantitatívneho alebo kvantitatívneho typu musí byť zachovaná.

Faktorizácia modelu je založená na rozklade redukovanej výberovej korelačnej matice vytvorenej z dátovej matice indikátorov do systému vlastných hodnôt a vlastných vektorov. Podľa SVD (single value decomposition) riešenia sa v ďalšom kroku stanovuje

počet signifikantných vlastných hodnôt, ktorý určuje počet extrahovaných faktorov, v našom prípade sú to dva faktory (obr. 2).

Obr. 2: Redukovaná korelačná matica



Najvhodnejšia rozlišovacia úroveň faktorových záťaží pre naše hodnotenie je rozdelená na tri kategórie (Krnáčová, Krnáč, 1996):

- **primárne korelačné väzby** (významné) medzi faktormi a vstupnými indikátormi sú hodnoty faktorových záťaží v **intervale 0.6 – 1.0**,
- **sekundárne korelačné väzby** (menej významné) sú hodnoty faktorových záťaží v **intervale 0.3 – 0.59**,
- **na hranici signifikantnosti korelačných väzieb** sú hodnoty faktorových záťaží v **intervale 0.29 – 0,1**.

Cieľom modelu je teda podať popis a v istom zmysle vysvetlenie manifestných premenných a ich vzájomných závislostí. Svojou povahou je to model štatistický. Dáta, na ktoré je aplikovaný, majú väčšinou charakter simultánnych pozorovaní vektora náhodných veličín. Pomocou vektorov záťaží v stĺpcoch matice faktorových záťaží je možné identifikovať a interpretovať význam jednotlivých extrahovaných faktorov. Interpretácia dovoľuje v ďalšom postupe uskutočniť dva významné kroky:

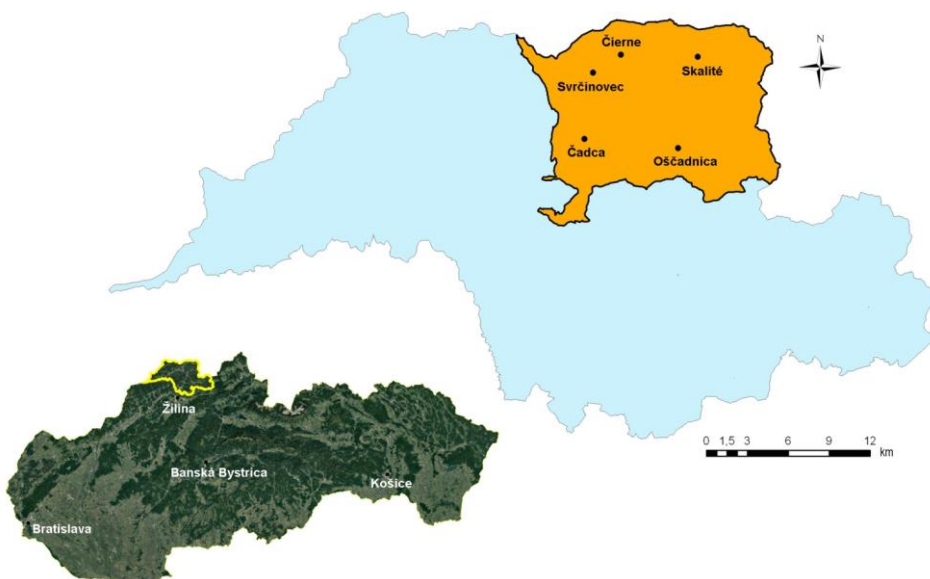
- verifikáciu získanej faktorovej štruktúry vzhľadom na známe empirické skúsenosti a prijaté teoretické zákonitosti,

- použitie extrahovaných faktorov ako hodnotiacich kritérií v ďalšom procese hodnotenia environmentálnych hazardov v rámci ekosystémov vzhľadom na výhodné ortogónálne vlastnosti latentných premenných.

Charakteristika územia

Sledované územie sa nachádza v severnej časti Slovenska v lokalite Kysuckého regiónu. Tvorí ho päť katastrálnych území (Čadca, Oščadnica, Svrčinovec, Čierne a Skalité) a charakteristické je rôznorodosťou abiotických a biotických zložiek krajiny (obr. 3). Na základe členenia Slovenska do geomorfologických jednotiek (Mazúr, Lukniš, 1986) patrí územie do troch oblastí: Stredné Beskydy s celkami Kysucká vrchovina a Kysucké Beskydy, Západné Beskydy s celkami Moravsko-sliezske Beskydy, Jablunkovské medzihorie a Turzovská vrchovina a Slovensko-moravské Karpaty s celkom Javorníky.

Obr. 3: Sledované územie



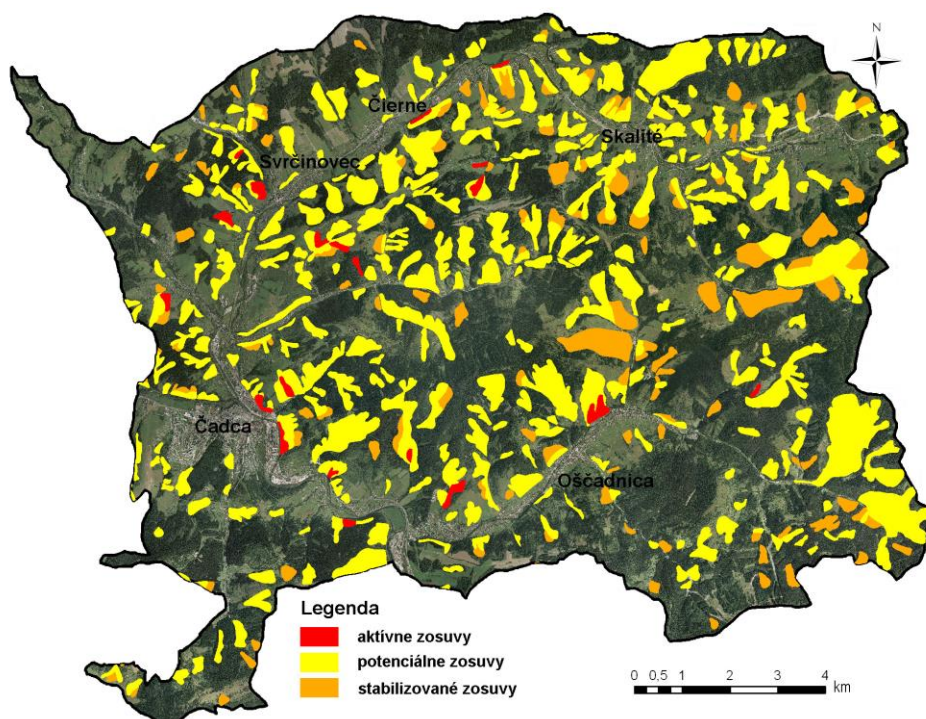
Najrozšírenejším geomorfologickým celkom v území sú Kysucké Beskydy, zaberajú až 100 km² a Jablunkovské medzihorie, 52 km². Územie má rozlohu 185 km² a väčšinou vrchovinový až hornatinový charakter s nadmorskou výškou od 500 m do 1236 m n. m. Najväčšiu plochu zaberajú svahy so sklonom od 12° do 17° (36,8 %) a od 7° do 12° (26,1 %). Z geologického hľadiska územie buduje normálny flyš, z ktorého najväčšie zastúpenie majú najmä vsetínske vrstvy (bystrické ílovcy, pieskovce s glaukonitom, arkózové pieskovce a zlepenec) s plochou 75,5 km², oščadnické vrstvy (zelenosivé ílovcy, arkózové, kremenné a drobové pieskovce) s plochou 14,5 km² a kýčerské vrstvy (drobové pieskovce, menej ílovcy) s plochou 12,4 km². Z pôd má najväčšie zastúpenie kambizem dystrická, zaberá 44,0 % plochy a kambizem modálna s 31,1 % plochy územia. V území sú najrozšírenejšie lesy, pokrývajú až 56,0 % plochy územia, z toho

ihličnaté lesy zaberajú 39,9 % územia. Lúky a pasienky pokrývajú 21,6 % plochy a trvalé trávne kultúry 13,4 %.

Z hľadiska zrážok patrí územie do vlhkej klimatickej oblasti. Priemerné ročné úhrny zrážok z lokality Čadca, od roku 1994 do 2016 dosahujú 700 – 1 110 mm. Najvyššie priemerné mesačné úhrny zrážok sa vyskytujú v máji až v júli. Od roku 2000 do 2017 bol júlový mesačný úhrn zrážok 130 mm.

V tomto území sa nachádza až 475 evidovaných zosuvov, čiže ide o veľmi zraniteľné územie z hľadiska výskytu environmentálnych hazardov. Zosuvy zaberajú takmer ¼ územia (42 km²). Najviac je potenciálnych zosuvov, 331 (34 km²), potom stabilizovaných, 124 (7 km²) a 20 aktívnych (1 km²). Potenciálne zosuvy zaberajú 80 % plochy zo všetkých zosuvov. Najväčšie potenciálne zosuvy (1,5 km² a 0,9 km²) sa nachádzajú v katastri obce Oščadnica (obr. 4).

Obr. 4: Výskyt zosuvov v sledovanom území



Výsledky

Interpretácia a hodnotenie vybraných faktorov krajiny a zosuvov faktorovou štatistickou analýzou (EFA)

Štruktúru hodnôt faktorových záťaží pre dvojfaktorové riešenie prezentujeme v tab. 1, pričom za primárne (významné) hodnoty faktorových záťaží považujeme korelačné väzby medzi faktormi a premennými v intervale od 0.6 do 1.0, sekundárne (menej významné)

väzby v intervale od 0.3 do 0.59 a na hranici signifikatnosti sú väzby v intervale od 0.29 do 0.1.

Podľa SVD algoritmu vyplýva, že hodnotenie ekosystému vzhľadom na vyskytujúce sa environmentálne hazardy možno dostatočne presne reprodukovat' pomocou dvoch ortogonálnych faktorov: geologický faktor a hydrogeologický faktor.

Tab. 1: Matica faktorových záťaží pre dvojfaktorové riešenie

	Geologický faktor	Hydrogeologický faktor	h2	u2
Hĺbka pôdy	0.40	-0.09	0.18	0.82
Zrornosť	0.11	0.04	0.01	0.99
Sklon svahu	-0.50	0.15	0.29	0.71
Skeletnosť	-0.45	-0.02	0.20	0.80
Hladina podzemnej vody	0.07	0.11	0.02	0.99
Koeficient prietochnosti	0.72	-0.45	0.82	0.18
Koeficient filtrácie	-0.24	0.93	0.98	0.02
Potenciálne zosuvy	-0.06	-0.07	0.01	0.99
Stabilizované zosuvy	-0.05	-0.04	0.00	1.00
Aktívne zosuvy	0.03	-0.04	0.00	1.00
G _{NS}	0.22	0.09	0.83	0.17
G _{DS}	-0.93	-0.89	0.77	0.23
G _{TS}	0.19	-0.01	0.04	0.96
G _{KS}	0.03	-0.10	0.01	0.99
G _Z	0.04	-0.15	0.03	0.98
G _{IH}	-0.01	0.03	0.00	1.00
G _{FH}	-0.19	0.78	0.69	0.31
G _{PH}	-0.07	0.07	0.01	0.99
G _{PS}	0.06	-0.04	0.01	0.99
G _A	0.03	0.00	0.00	1.00
Hg _T	0.88	0.07	0.77	0.23
Hg _{SS}	-0.23	-0.89	0.77	0.23
Hg _{DK}	0.07	-0.05	0.01	0.99
Hg _Z	0.04	-0.15	0.03	0.98
Hg _{IS}	-0.01	0.03	0.00	1.00
Hg _{NF}	-0.13	0.54	0.33	0.67
Hg _{IF}	-0.05	0.20	0.05	0.96
Hg _P	-0.07	0.07	0.01	0.99
Hg _{KF}	0.00	0.00	0.00	1.00

	Geologický faktor	Hydrogeologický faktor	h2	u2
Hg _{NK}	0.06	-0.04	0.01	0.99
Hg _{KU}	0.00	-0.09	0.01	0.99
Hg _{PF}	-0.05	0.16	0.03	0.97
Hg _{NH}	0.03	0.00	0.00	1.00
P _{KMgn}	-0.02	-0.11	0.01	0.99
P _{FMn}	0.88	0.05	0.76	0.24
P _{KMn}	-0.12	-0.06	0.02	0.98
P _{KMd}	-0.16	0.14	0.05	0.95
P _{KMfs}	-0.02	0.01	0.00	1.00
P _{GLm}	0.03	-0.04	0.00	1.00
P _{PZk}	-0.08	0.00	0.01	0.99
P _{LMg}	0.00	-0.01	0.00	1.00

h2 – communality

u2 – uniqueness

Geologický faktor

V uvedenom faktore má primárne faktorové záťaž premenná [G_{DS}] (-0.93) čo môžeme interpretovať, že dominantný výskyt zosuv je viazaný na štrkovitohlinité deluviálne sedimenty. Tieto sa vyskytujú prevažne v oblasti vsetínskych vrstiev (bystrické ílovce, pieskovce s glaukonitom, arkózové pieskovce a zlepenec). Vysoké hodnoty faktorových záťaží boli zistené ale aj v premennej [Hg_T] (0.88). Premenná [Hg_T] predstavuje piesky, piesčité štrky, štrky nív a terás, čo indikuje, že erózne procesy sú indikované aj v oblasti výskytu týchto geologických jednotiek. Piesky štrky nív sú významným kolektorom vody. Vplyvom brehovej erózie v nivách tokov dochádza k podmývaniu svahov, tvorbe šmykových plôch a následne k ich postupným zosuvom. Hodnota premennej koeficient prietochnosti [Kp] má v geologickom faktore signifikantnú hodnotu (0.72), čo indikuje silnú koreláciu s druhom a stratografiou geologického podložia. V týchto oblastiach je zaznamenaný výskyt už spomínaných vsetínskych a ošľadnických vrstiev, ktoré sa vyznačujú rytmickým striedaním pieskovcov a ílovcov. resp. s prevahou pieskovcov v niektorých častiach súvrstvia, t. j. striedanie hornín s kolektorskými vlastnosťami a s izolátormi, ktoré obmedzujú cirkuláciu, alebo prietochnosť povrchových a podzemných vôd v komplexe. Tieto sedimenty majú miernu alebo dosť slabú priepustnosť (Hanzel, 2003). Striedanie geologických vrstiev s rôznymi hydrogeologickými parametrami pri intenzívnych zrážkach vo flyšových oblastiach sú faktorom spúšťajúcich zosuvy. Sklon svahu [Ss] je štatisticky významnou premennou vo vzťahu ku výskytu svahových pohybov, ale pôsobenie pri skúmanom jave má sekundárny charakter, jeho hodnota v matici faktorových záťaží má hodnotu (-0,50). Hodnota premennej hĺbka pôdy [Ph] (0,40) sa pohybuje v intervale sekundárnych faktorových záťaží. Z toho vyplýva, že zosuvné procesy nastávajú najmä pri pôsobení gravitačných síl na nespevnených

svahoch hlinitých zvetralín flyšoidných hornín a štrkovitohlinitých sedimentoch s dostatočnou prietočnosťou (napr. pri dlhšie trvajúcich dažďoch, alebo v dôsledku topenia snehu).

Hydrogeologický faktor

V uvedenom faktore primárne faktorové záťaže sú u premenných [Kf] (0.93), [G_{DS}] (-0.89), [Hg_{SS}] (-0.89) a [G_{FH}] (0.78). Premenné [G_{DS}] a [Hg_{SS}] predstavujú štrkovitohlinité deluviálne sedimenty a hydrologické jednotky svahovín a sutín, kde boli reálne sa vyskytujúce časté zosuvy podľa registrovaných databáz zosuvov (Šimeková, Martinčeková et al., 2006) a premenná [Kf] charakterizuje, že toto prostredie je dostatočne priepustné na to, aby tu mohli vzniknúť svahové pohyby. Sekundárne faktorové záťaže u premennej [Hg_{NF}] (0,54) (normálny flyš – ílovce/slieňovce) a koeficient prietočnosti [Kp] (-0,45) poukazujú na častý výskyt erózných procesov na uvedenom hydrogeologickom podloží.

Interpretácia a hodnotenie vybraných atribútov krajiny a zosuvov intervalovou štatistickou analýzou

Výskyt zosuvov v rámci vybraných faktorov krajiny je znázornený na obr. 5. Geologické jednotky (G) majú najväčšie zastúpenie vo forme G_{FH} (hlinité zvetraliny na flyšoidných horninách). Zaberajú až 58,79 % z celého územia (108,82 km²). Najväčšiu plochu v tejto kategórii zaberajú potenciálne zosuvy, pokrývajú 16,88 km² plochy, aktívne zosuvy zaberajú 0,31 km² a stabilizované zosuvy takmer 4 km².

Ak zoberieme do úvahy jednotlivé krajinné faktory a ich vzťah k zosuvom na základe plochy, ktorú zaberajú patrí sklon svahu medzi sekundárne faktory ovplyvňujúce zosuvnosť územia. V sledovanom území sa zvýšená zosuvnosť prejavuje najmä pri sklone nad 7°. V kategóriách od 7° do 25° (87,04 % celého územia) zaberajú zosuvy 40,27 km², pričom najväčšiu plochu zaberajú potenciálne zosuvy, až 32,30 km², aktívne zosuvy takmer 1 km² a stabilizované zosuvy 7,03 km².

Ďalším faktorom, ktorý vplýva na zosuvnosť územia sú hydrogeologické vlastnosti územia (Hg). V sledovanom území má najväčšie zastúpenie Hg_{NF} (územie budované normálnym flyšom), zaberá až 40,92 % z celkovej plochy územia. V rámci tejto kategórie zaberajú najväčšiu plochu potenciálne zosuvy 13,02 km² (čo predstavuje 17,18 % v danej kategórii a 7,04 % z celkovej plochy územia). Aktívne zosuvy tu pokrývajú 0,28 km² územia a stabilizované takmer 3 km².

Najrozšírenejším pôdnym druhom (P) v území sú kambizeme, tvoria 92,14 % (170,54 km²) z celkovej plochy územia. Kambizem dystrická (P_{KMD}) zaberá 44,08 % (81,58 km²) územia. V tejto kategórii prevažujú najmä potenciálne zosuvy, ktoré zaberajú až 16,70 km².

V území sme charakterizovali 6 tried koeficientu prietočnosti (Kp), od nepatrnej po veľmi vysokú prietočnosť. Najväčšiu plochu zaberajú horniny s veľmi nízkou prietočnosťou (5. kategória), majú 78,61 km² a horniny so strednou prietočnosťou (3. kategória)

so 48,74 km². V týchto dvoch kategóriách majú aj najväčšie zastúpenie potenciálne zosuvy. Na horninách s veľmi nízkou prietochnosťou sa ich vyskytuje 17,95 % (7,62 % z celého územia) a na horninách so strednou prietochnosťou 27,40 % (7,23 % z celého územia).

Na základe koeficientu filtrácie (Kf) máme horniny v území rozdelené len do dvoch kategórií – priepustné a stredne až málo priepustné. Takmer 67 % plochy územia zaberajú horniny stredne až málo priepustné. Na nich je až 10,7 % z celkovej plochy územia potenciálnych zosuvov (19,81 km²) a 4,56 km² stabilizovaných zosuvov. Na stredne priepustných horninách dochádza najmä k potenciálnym zosuvom (13,75 km²) a stabilizovaným zosuvom (2,92 km²).

Z pôdnych vlastností, v území prevládajú hlinité (98,59 %), skeletnaté (95,01 %) a stredne hlboké (83,74 %) pôdy.

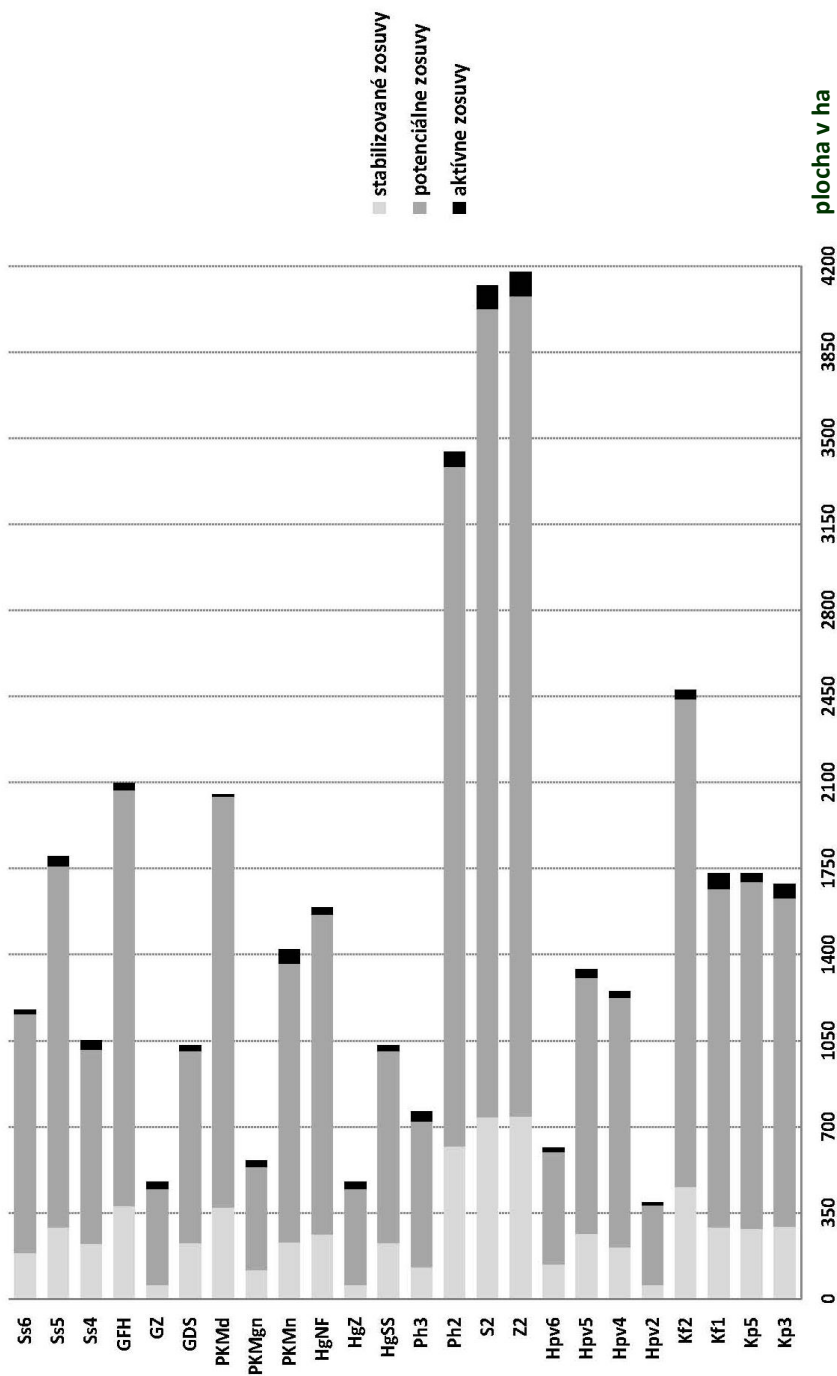
Posledným krajinným faktorom, ktorý sme hodnotili z hľadiska zosuvnosti územia je hydrogeologický parameter – úroveň hladiny podzemnej vody pod terénom (Hpv). Z 15 kategórií, takmer 98 % územia tvorí len 6 kategórií (2 – 7 kategória), Hpv sa pohybuje v rozmedzí 1,0 – 8,0 m. Potenciálne zosuvy sa viažu najmä na 4. a 5. kategóriu (Hpv je 2,0 – 4,0 m), zaberajú 20,55 km², stabilizované zosuvy 4,76 km² a aktívne 0,62 km². Ak zoberieme do úvahy celú plochu územia, najväčšiu prevahu (takmer 30 %) má územie s Hpv od 4,0 do 6,0 m, tu však nie je zosuvnosť taká výrazná.

Kombináciou vstupných parametroch a zosuvnosti sme zistili, že aktívne zosuvy sa vyskytujú najčastejšie v území so sklonom 7-17° tvoreným zosuvnými delúviami (materiál je nehomogénny s meniacim sa litologickým zložením a fyzikálno-mechanickými vlastnosťami materiálu) na stredne hlbokých až hlbokých, skeletnatých, hlinitých pôdach s P_{KMn}. Hpv sa tu pohybuje v rozmedzí 3 – 4 m, Kp je v kategórií 3,10⁻⁴ až 1,10⁻³, čo zodpovedá strednej prietochnosti a Kf sa pohybuje od 1,10⁻⁵ až 1,10⁻³, čo charakterizuje priepustné sedimenty.

Potenciálne zosuvy predstavujú najčastejšiu kombináciu krajinných parametrov. Vyskytujú sa najmä v území so sklonom svahu 12 – 25°, buduje ho normálny flyš (bridlice, pieskovce, slieňovce, ilovce), P_{KMn} a P_{KMd}, stredne hlboké, skeletnaté, hlinité pôdy, Hpv sa pohybuje v rozmedzí 2 – 4 m, Kp je v kategórií 3,10⁻⁵ až 1,10⁻⁴, čo zodpovedá veľmi nízkej prietochnosti a Kf sa pohybuje od 1,10⁻⁷ až 1,10⁻⁵, čo charakterizuje stredne až málo priepustné sedimenty.

Kombináciu krajinných faktorov a zosuvov pri stabilizovaných zosuvoch tvoria najmä územia so sklonom svahu 7 – 17°, budované štrkovitohlinitými deluviálnymi sedimentami s P_{KMn}, a P_{KMd}, stredne hlboké, skeletnaté, hlinité pôdy, Hpv sa pohybuje v rozmedzí 1 – 4 m, Kp je v kategórií 3,10⁻⁴ až 1,10⁻³, čo zodpovedá strednej prietochnosti a Kf sa pohybuje od 1,10⁻⁵ až 1,10⁻³, čo charakterizuje priepustné sedimenty.

Obr. 5: Výskyt zosuvov na vybraných faktoroch krajiny v rámci sledovaného územia



Diskusia a záver

Z výsledkov štúdie vyplýva, že náchylnosť svahu k zosuvným procesom je dominantne daná geologickou štruktúrou, hydrogeologickými pomermi a morfológickým stavom územia, čo potvrdzujú aj mnohé iné štúdie z tejto oblasti (Záruba, 1987; van Westen et al., 2003; Ciampalini et al., 2016; Tseng et al., 2015; Safaei et al., 2012).

Autori (Pauditš, 2005; Havlín et al., 2011; Tornyai, Dunčko, 2013) vo svojich prácach uvádzajú, že najpriaznivejšie podmienky pre vznik svahovej deformácie vytvárajú deluviálne sedimenty so sklonom svahu 11 – 17°. V našom výskume sme najvyššiu hodnotu faktorovej záťaže vo vzťahu k zosuvným procesom identifikovali tiež v podmienkach výskytu deluviálnych sedimentov. Uvedená premenná $[G_{DS}]$ sa v oboch faktoroch pohybovala v intervale primárnych faktorových záťaží, t.j. (-0.93) a (-0.89). Nízkou náchylnosťou na zosúvanie sa vyznačujú paleogénne sedimenty s prevahou pieskocov, potvrdzujú to aj nami vypočítané hodnoty faktorových záťaží premenných $[G_{PS}]$ (0.06) a (-0.04), ktoré považujeme za hodnoty pod hranicou signifikantnosti. Paleogénne sedimenty s prevahou ílovcov sú stredne až vysoko náchylné na zosúvanie (Havlín et al., 2011). Táto skutočnosť sa nám potvrdila v geologickom faktore, kde faktorová záťaž u premennej $[G_{FH}]$ nadobudla hodnoty v intervale primárnych korelačných väzieb (0.78).

Zosuvnosť územia môžu ovplyvňovať aj fyzikálne vlastnosti pôdy (najmä jej štruktúra) (Heshmati et al., 2011), potvrdzujú to aj nami vypočítané hodnoty sekundárnych faktorových záťaží pre premenné skeletnosť $[S]$ (-0.45) a hĺbka pôdy $[Ph]$ (0.40).

Za sekundárny geomorfologický faktor, ktorý významnou mierou ovplyvňuje stabilitu svahu považujeme veľkosť sklonu svahu, predurčujú ho k tomu aj jeho hodnoty v intervale sekundárnych korelačných väzieb $[Ss]$ (-0.50).

Geohydraulické parametre v pevných horninách majú svoje špecifické vlastnosti: znižovanie priepustnosti s hĺbkou pod zemským povrchom, špecifický vzťah medzi litologickým charakterom a priepustnosťou hornín, vplyv zóny pripovrchového rozvoľnenia pri vytváraní funkcie hlavnej spojitej zvodne, priestorovú neuniformitu transmisivity v pripovrchovej zóne konštatované v prácach autorov Hanzel (2003) a Malík et al. (2016). Stanovenie týchto hydraulických vlastností hornín patrí medzi ďalšie faktory, ktoré sme hodnotili. V našom hodnotení tieto parametre predstavujú hodnoty, ktoré sa pohybujú v intervale primárnych faktorových záťaží: koeficient prietočnosti $[Kp]$ (0.72) a koeficient filtrácie $[Kf]$ (0.93).

Hodnoty faktorových záťaží pri premenných zrnitosť $[Z]$ a hladina podzemnej vody $[Hpv]$ sú pod hranicou signifikantnosti, čo poukazuje na to, že tieto faktory neboli v hodnotenom území významné.

Naše výsledky poukazujú na to, že za relevantné faktory odrážajúce priaznivé podmienky pre vznik zosuvov je možné považovať najmä geologickú stavbu, hydrogeologické pomery, sklon svahu, ale aj koeficient filtrácie a prietočnosti. Z faktorovej analýzy vyplýva, že v sledovanom území majú primárne faktorové záťaže premenné štrkovito-hlinité

deluviálne sedimenty (G_{DS}), hlinité zvetraliny na flyšoidných horninách (G_{FH}), svahoviny a sutiny (Hg_{SS}), piesky, piesčité štrky nív a terás (Hg_T). Sklon svahu (S_s) a hĺbka pôdy (Ph) sú významné premenné a v hodnotení zosuvov majú sekundárny vplyv.

Pri hodnotení územia intervalovou štatistickou analýzou sme zistili, že aktívne zosuvy sa vyskytujú najmä v území so sklonom $7 - 17^\circ$ so zosuvnými delúviami na stredne hlbokých až hlbokých, skeletnatých, hlinitých pôdach s kambizemou typickou. Hladina podzemnej vody sa tu pohybuje v rozmedzí 3 – 4 m, koeficient prietochnosti je v kategórii stredná prietochnosť a koeficient filtrácie charakterizuje priepustné sedimenty. Potenciálne zosuvy sa vyskytujú najmä v území so sklonom svahu $12 - 25^\circ$. Toto územie buduje normálny flyš s kambizemou typická a kambizemou dystrickou. Ide o stredne hlboké, skeletnaté, hlinité pôdy, kde sa hladina podzemnej vody pohybuje v rozmedzí 2 – 4 m pod povrchom, koeficient prietochnosti je v kategórii veľmi nízka prietochnosť a koeficient filtrácie charakterizuje stredne až málo priepustné sedimenty.

Naša práca predstavuje štúdium vybraného environmentálneho hazardu v krajine, vyhodnoteného pomocou metód štatistického modelovania. Uvedené modelovanie kvantifikuje vplyv sledovaných prírodných faktorov na sledované priestorové javy a pomocou intervalovej štatistiky v prostredí GIS reálne zachytáva rozsah plochy výskytu zosuvov vzhľadom na atribúty krajiny Západných Karpát vo vybranom regióne Kysúc. Táto metodika môže byť východiskom pre vyhodnotenie vzťahu zosuvov k faktorom krajiny nielen pre územie Slovenska. Každé územie je špecifické vzhľadom na prírodné podmienky, preto je vždy potrebné vypracovať pre neho vhodnú predikčnú štúdiu. Výsledky prezentované v tejto práci sú relevantné pre celé územie flyšové pásma Západných Karpát.

Hodnotenie príčin a kvantifikácie vplyvu vybraných prírodných faktorov na zosuvné procesy môže poskytnúť užitočné informácie na vyhodnotenie ekonomických a ekologických dôsledkov antropogénnych zásahov na prírodné prostredie a pomôcť pri tvorbe a usmernení využívania krajiny a udržateľné územné plánovanie.

PodĎakovanie

Tento príspevok vznikol s podporou grantového projektu VEGA 2/0132/18 "Historické a súčasné zmeny krajinej diverzity a biodiverzity vplyvom pôsobenia prírodných a antropogénnych faktorov".

Literatúra

BARANČOKOVÁ, M., KENDERESSY, P., 2014: Assessment of landslide risk using GIS and statistical methods in Kysuce region. *Ekológia (Bratislava)*, 33, 1, p. 26 – 35.

BARANČOKOVÁ, M., KRNÁČOVÁ, Z., CHASNÍKOVÁ, S., 2017a: Quantification of the natural factors impact effectiveness on environmental hazards - slope

movements in the flysch areas of the Kysuce region. *Ekológia (Bratislava)*, 36, 3, p. 197 – 213.

BARANČOKOVÁ, M., KRNÁČOVÁ, Z., CHASNÍKOVÁ, S., 2017b: Kvantifikácia významnosti vplyvu prírodných vlastností krajiny na nestabilné svahy vo flyšovom území Kysúc. *Ekologické štúdie*, 8, 1, p. 17 – 28.

BIÈVRE, G., JONGMANS, D., WINIARSKI, T., ZUMBO, V., 2012: Application of geophysical measurements for assessing the role of fissures in water infiltration within a clay landslide (Trieves area, French Alps). *Hydrological Processes* 26, p. 2128 – 2142.

BITTELLI, M., VALENTINO, R., SALVATORELLI, F., ROSSI PISA, P., 2012: Monitoring soil-water and displacement conditions leading to landslide occurrence in partially saturated clays. *Geomorphology* 173 – 174, p. 161 – 173.

CIAMPALINI, A., RASPINI, F., LAGOMARSINO, D., CATANI, F., CASAGLI, N., 2016: Landslide susceptibility map refinement using PSInSAR data. *Remote Sensing of Environment* 184, p. 302 – 315.

GUZZETTI, F., MONDINI, A. C., CARDINALI, M., FIORUCCI, F., SANTANGELO, M., CHANG, K., 2012: Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews* 112, p. 42 – 66.

HANZEL, V., 2003: Hydrogeológia regiónu Kysúc. *Podzemná voda IX* (2), p. 46-65.

HAVLÍN, A., BEDNARIK, M., MAGULOVÁ, B., VLČKO, J., 2011: Použití logistické regrese pro hodnocení náchylnosti k sesouvání ve střední části Chřibu (Česká republika). *Acta geologica Slovaca* 3 (2), p. 153 – 161.

HESHMATI, M., ARIFIN, A., SHAMSHUDDIN, J., MAJID, N. M., GHAITURI, M. 2011: Factors affecting landslides occurrence in agro-ecological zones in the Merek catchment, Iran. *Journal of Arid Environments* 75, p. 1072 – 1082.

KRNÁČ, Š., KRNÁČOVÁ, Z., 1994: Study of ecosystem by factor analysis. *Ekológia (Bratislava)*, 13 (4), p. 349 – 360.

KRNÁČOVÁ, Z., KRNÁČ, Š., 1996: Aplikácia faktorovej analýzy na vybraných riešeniach kvantifikácie vzájomných väzieb medzi vlastnosťami abioty a formami využitia zeme (*Acta Environmentalica Universitatis Comenianae (Bratislava)*, 7, p. 93 – 105.

KRZEMINSKA, D. M., BOGAARD, T. A., MALET, J. P., VAN BEEK, L. P. H., 2013: A model of hydrological and mechanical feedbacks of preferential fissure flow in a slow-moving landslide. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, p. 947 – 959.

LEE, M. J., PARK, I., WON, J. S., LEE, S. 2016: Landslide hazard mapping considering rainfall probability in Inje, Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7 (1), p. 424 – 446.

MALÍK, P., ŠVASTA, J., GREGOR, M., BAČOVÁ, N., BAHNOVÁ, N., PAŽICKÁ, A., 2016: Slovak basic hydrogeological maps at a scale of 1 : 50 000 – compilation

methodology, standardised GIS processing and contemporary country coverage. Slovak Geological Magazine 16 (1), p. 7 – 48.

MAZÚR, E., LUKNIŠ, M., 1986: Geomorfologické členenie SSR a ČSSR. Časť SSR. 1 : 50 000. Slovenská kartografia, Bratislava.

METEN, M., PRAKASH BHANDARY, N., YATABE, R., 2015: Effect of Landslide Factor Combinations on the Prediction Accuracy of Landslide Susceptibility Maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia. Geoenvironmental Disasters 2 (9), p. 1 – 17.

PAUDITŠ, P., 2005: Hodnotenie náchylnosti územia na zosúvanie s využitím štatistických metód v prostredí GIS. PriF UK, dizertačná práca, 153 pp.

POTFAJ, M., MAGLAY, J., ŠLEPECKÝ, T., TETĀK F. (Eds.), 2002: Geologická mapa regiónu Kysúc. 1 : 50 000. Bratislava: ŠGÚDŠ.

PREFAC, Z., DUMITRU, S., CHENDEŞ, V., SÎRODOEV, I., CRACU, G., 2016: Assessment of landslide susceptibility using the certainty factor model: Râşcuţa catchment (Curvature Subcarpathians) case study. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences 11 (2), p. 617 – 626.

R CORE TEAM, 2017: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>.

RONCHETTI, F., BORGATTI, L., CERVI, F., GORGONI, C., PICCININI, L., VINCENZI, V., CORSINI, A., 2009: Groundwater processes in a complex landslide, northern Apennines, Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences 9(3), p. 895 – 904.

SANTACANA, N., BAEZA, B., COROMINAS, J., DE PAZ, A., MARTURIÁ, J., 2003: A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). Natural Hazards 30, p. 281-295.

SAFAEI, M., OMAR, H., HUAT, B.K., YOUSOF, Z. B. M., 2012: Relationship between Lithology Factor and landslide occurrence based on Information Value (IV) and Frequency Ratio (FR) approaches - Case study in North of Iran. Electronic journal of geotechnical engineering 17, p. 79 – 90.

SAKKAS, G., MISAILIDIS, I., SAKELLARIOU, N., KOUSKOUNA, V., KAVIRIS, G., 2016: Modeling landslide susceptibility in Greece: a weighted linear combination approach using analytic hierarchical process, validated with spatial and statistical analysis. Natural Hazards 84, p. 1873 – 1904.

SOCIETAS PEDOLOGICA SLOVACA, 2014: Morfogenetický klasifikačný systém pôd Slovenska. Bratislava: NPPC – VUPOP.

ŠIMEKOVÁ, J., MARTINČEKOVÁ, T. et al., 2006: Atlas máp stability svahov SR v mierke 1 : 50 000. Záverečná správa. Geofond, MŽP SR, Bratislava, 155 pp.

TORNYAI, R., DUNČKO, M., 2013: Použitie bivariačnej a multivariačnej analýzy na hodnotenie zosuvného hazardu Kysuckého regiónu (Západné Karpaty) Acta geologica Slovaca 5 (2), p. 179 – 193.

TSENG, C. M., LIN, C. W., HSIEH, W. D., 2015: Landslide susceptibility analysis by means of event-based multi-temporal landslide inventories. Natural Hazards Earth System Sciences Discussion 3, p. 1137 – 1173.

VAN WESTEN, C. J., RENGERS, N., SOETERS, R., 2003: Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. Natural Hazards 30, p. 399 – 419.

WIEDENMANN, J., ROHN, J., MOSER, M., 2016: The relationship between the landslide frequency and hydrogeological aspects: a case study from a hilly region in Northern Bavaria (Germany). Environmental Earth Sciences 75 (7), p. 1 – 16.

ZÁRUBA, Q., MENCL, V., 1987: Sesuvy a zabezpečování svahu. Academia, Praha, 221 pp.

ŽABKOVÁ, E., GREŇČÍKOVÁ, A., VRÁBEL, P., SLUKA, V., FRLIČKOVÁ, M., MOLČAN, T., LENKOVÁ, M., BUČEK, L., FLIMMEL, J., 2003: Povodie Kysuce – svahové deformácie. Geofond, MŽP SR, Bratislava, 85 pp.

<http://apl.geology.sk/atlassd/>