

Ověření výsledků statistického modelu náchylnosti k sesouvání v oblasti Chřibů a severní části Kyjovské pahorkatiny

Verification of the results of the statistical model of susceptibility to landslides in the area of the Chřiby (Highland) and northern part of the Kyjovská pahorkatina (Hilly land)

Vladimíra Krejčí , Dagmar Kašperáková, Oldřich Krejčí, Pavla Tomanová Petrová

Česká geologická služba, Leitnerova 22, 658 69 Brno, Česká republika

Key words:

Chřiby (Highland), Kyjovská pahorkatina (Hilly land), landslides, multivariate statistical method, landslide susceptibility assessment

 vladimira.krejci@geology.cz

Editor:

Aleš Bajer

Abstract

The aim of our work was to use a statistical model to determine the degree of susceptibility assessment in the area of the Chřiby (Highland) and northern part of the Kyjovská pahorkatina (Hilly land) and then compare the results with field verification of their actual occurrence in a part of this previously unmapped area. Studied part with a total area of 353.47 km² is frequently affected by landslides (580 landslides covering 9% of the area). The mapped area and the results comparing with the final landslide susceptibility map showed that more than 85% of the mapped landslides are located in areas of high and very high landslide susceptibility. For locations that were not detected by this statistical method, but where landslides were nevertheless subsequently mapped, it was found that their origin was initiated by phenomena other than the input conditions used for the analysis. The results of the analysis were verified by field research of the territory, which had not previously been comprehensively mapped (south part of the model area). A total of 98 landslides were newly identified or revised, covering a total area of 4 km², corresponding to 7.4% of the area reconnaissanced.

Úvod

Svahové deformace, jež způsobují rozsáhlé škody na majetku, zdraví i lidských životech, jsou celosvětovým problémem. Četné práce zabývající se stanovením náchylnosti území k sesouvání pocházejí z Itálie (Guzzetti et al. 1999). Pozornost společnosti se v současné době upírá na predikci sesuvného nebezpečí a rovněž na včasné varování (<https://nhess.copernicus.org/articles/18/1427/2018/>, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/92018/predicting-landslide-hazards-in-near-real-time>).

Sesuvným hazardem nazýváme pravděpodobnost výskytu potenciálně škodlivého sesuvu určité intenzity v daném prostoru a čase (Varnes 1984; Havlín a Šikula 2017). Lze ho hodnotit různými metodami, jejichž výběr závisí na velikosti studovaného území, kvalitě a množství vstupních dat, na měřítku a mnoha dalších faktorech (Petrydesová 2012). Z takto vzniklých prognózních map je možné odvodit kritická místa, kde se dá v budoucnosti, za předpokladu výskytu příčinných událostí, přednostně očekávat vznik svahových deformací (Bednarik 2014). Statistické zpracování hodnocení nebezpečí sesuvů je založeno na geologickém principu aktualismu, tzn., že sesuvy se budou vyskytovat v místech, kde se vyskytly již v minulosti, resp. v současnosti za podobných aktivačních podmínek (Tornyai a Dunčko 2013).

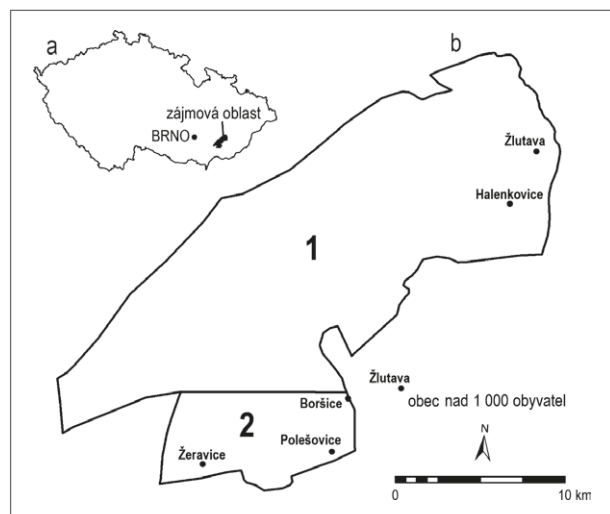
Doporučená citace článku:

Krejčí, V., Kašperáková, D., Krejčí, O., Tomanová Petrová, P. (2023): *Ověření výsledků statistického modelu náchylnosti k sesouvání v oblasti Chřibů a severní části Kyjovské pahorkatiny*. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 30, 1–2, 7–17.

DOI: <https://doi.org/10.5817/GVMS2023-21547>

Příklady použití statistických metod při hodnocení sesuvného hazardu publikovali Carrara (1983, 1988), Carrara et al. (1991), Clerici (2002), Guzzetti et al. (1999), Nandi a Shakoor (2010), Pasang a Kubiček (2020) a další. Buechi et al. (2019) porovnávali přístup mapování indexu stability (SINMAP) s empirickými statistickými modely využívajícími logistickou regresi a model hustoty sesuvů. Na Slovensku se ve svých pracích touto tematikou zabývali Pauditš a Bednarik (2002), Pauditš (2006), Magulová (2009), Bednarik a Pauditš (2010) a Bednarik et al. (2010), Vojteková a Vojtek (2020). Další srovnání z důvodu potřeby vyhodnotit vypovídací hodnotu výsledných map provedli Tornyai a Dunčko (2013), Bednarik et al. (2014) a Holec et al. (2018). Buša et al. (2019) použili bivariační a multivariační analýzu a prostorové rozložení nebezpečí svahových pohybů vypočetli pomocí metod vícerozměrné a bivariační analýzy. Analýzu neuronových sítí aplikoval při hodnocení sesuvného hazardu a výsledky porovnal s bivariační a multivariační statistickou analýzou Tornyai et al. (2016). Hodasová a Bednarik (2021) hodnotili účinek použití různých přístupů k vážení v procesu hodnocení náchylnosti k sesuvům. Přehlednou mapu sesuvného hazardu Slovenska sestavenou bivariační statistickou analýzou na podkladech v měřítku 1 : 100 000 a 1 : 50 000 zkompilovali Bednarik a Liščák (2010).

Z českých autorů tuto tematiku zpracovával Klimeš (2008) na příkladu Vsetínských vrchů, kdy identifikoval nejvíce náchylné části území pomocí modelu náchylnosti SINMAP. Křivka (2009) ve své bakalářské práci porovnával sesuvný hazard v oblasti Chřibů stanovený multivariační a bivariační analýzou. Havlín et al. (2011) využili v případové studii ve střední části pohoří Chřiby pro hodnocení náchylnosti k sesuvům logistickou regresi a analytické nástroje implementované v geografickém informačním systému (GIS). Analýzou rizika sesuvů v oblasti Vnějších Západních Karpat se zabývali Klimeš a Blahůt (2012). Předkládaný příspěvek je zaměřen regionálně a analyzuje v tomto rozsahu i následná řešení



Obr. 1: a – Pozice zájmové oblasti v rámci ČR; b – plošně zmapovaná (1) a plošně nezmapovaná (2) část území.

Fig. 1: a – Position of the area of interest within the Czech Republic; b – mapped (1) and non-mapped (2) part of the area.

včetně podkladových materiálů při rozboru metodického přístupu a následně i ve výsledcích.

Flyšové pásmo Západních Karpat je typické výskytem svahových deformací. Příčinou je geologická stavba flyšových hornin, což znamená střídání pískovců a jílovců, mezi kterými se výrazně mění hydrogeologické a geotechnické vlastnosti. Důležitý je také různý stupeň zvětrávání flyšových hornin.

Cílem naší práce bylo pomocí statistického modelu určit míru náchylnosti ke svahovým deformacím na vybraném území (plocha 1+2 na obrázku 1b) a výsledky pak následně porovnat s terénním ověřením jejich skutečného výskytu v části této dříve plošně nezmapované oblasti (plocha 2 na obrázku 1b). Pro toto hodnocení bylo účelově vybráno území zahrnující Chřiby a část Kyjovské pahorkatiny o celkové rozloze 353,47 km², resp. oblast račanské jednotky vnějšího flyšového pásma Západních Karpat a vídeňské pánve. Jedná se o oblast, kde se hojně vyskytují svahové deformace, především typu sesouvání, a kde bylo provedeno zaměstnanci České geologické služby (ČGS) jejich plošné mapování v měřítku 1 : 10 000 (oblast 1 na obrázku 1b).

Přehled předchozích výzkumů v oblasti Chřibů

Oblast Chřibů byla z hlediska sesuvů a jejich sanace zkoumána zejména v souvislosti s projekty a provozem liniových staveb ať už silničních nebo produktovodů. Jednalo se o projektovanou dálnici Praha–Zlín, jejíž stavba byla v roce 1939 zahájena, ale v průběhu 2. světové války byla přerušena (Lídl a Janda 2006) a později již nebyla obnovena, mj. z důvodu výskytu rozsáhlých svahových deformací v plánované trase (Čížek et al. 1982; Provazník 1980). Hlavním dopravním koridorem v oblasti Chřibů je silnice I/50, která je významnou spojnici mezi Českou a Slovenskou republikou. V rámci inženýrskogeologických a geotechnických průzkumných prací byly místně zpracovány laboratorní analýzy zastižených zemin a hornin, ve většině případů však užívali autoři (například Provazník 1980) pouze směrné normové charakteristiky dle ČSN 73 6133, dnes již neplatné. Celou trasu silnice I/50 z hlediska výskytu svahových deformací zhodnotil a provedl její inženýrskogeologickou rajonizaci Woznica (2001). Zprávy o geologických průzkumných pracích jsou v ČGS evidovány v Databázi archivu zpráv a posudků (ASGI, <http://www.geology.cz/app/asgi/>).

Po roce 1997 zde probíhalo systematické mapování svahových deformací v měřítku 1 : 10 000 (Krejčí et al. 2008a, b), kdy byly postupně dokumentovány nové sesuvy nebo byly překlasifikovány sesuvy staré. Rovněž se uskutečnil inženýrskogeologický průzkum a monitoring vybraných sesuvů jako modelových lokalit za účelem poznání obecných kritérií spojených se vznikem sesuvů, např. sesuv v Halenkovicích (Krejčí et al. 2002; Bíl et al. 2014). Území Chřibů bylo významně postiženo během sesuvných událostí spojených s vysokými hodnotami srážek v letech 2006 a 2010 (Baldík et al. 2006 a Krejčí et al. 2010). Určením sesuvného hazardu a hodnocením náchylnosti části vybraného území k sesouvání se zabýval Havlín (2010) a Havlín et al. (2011, 2013).

Geologie zájmového území

V reliéfu studovaného území výrazně vystupuje geomorfologický celek vrchovinného charakteru Chřibů, který charakterizují sevřená údolí, strmé svahy a časté ostré vrcholy. Jižní svahy Chřibů přecházejí do tektonické sníženiny Vídeňské pánve (Boháč a Kolář 1996; Demek a Mackovčín, eds 2014).

Na geologické stavbě tohoto území se podílejí příkrovové jednotky flyšového pásma magurské flyšové skupiny. V jižní části na flyšových sedimentech spočívá svrchní miocén a pliocén vídeňské pánve. Značná část území je překryta kvartérními sedimenty pleistocénu a holocénu. Geologická stavba oblasti byla popsána z podkladů geologického mapování 1 : 25 000 (Chmelík et al. 1973), 1 : 50 000, listy Bučovice a Uherské Hradiště (Havlíček a kol. 1994; Stráník 1998) a přehledné geologické mapy 1 : 500 000 (Cháb et al. 2007).

Račanská jednotka zahrnuje sedimenty o stratigrafickém rozsahu svrchní křída–spodní oligocén (Picha et al. 2006 a Stráník et al. 2021).

Kaumberské souvrství stáří cenoman–maastricht je v zájmové oblasti nejstarším zjištěným vrstevním členem. Charakterizují je rudohnědé jílovce doprovázené křemito-vápnitými pískovci. Soláňské souvrství v jeho nadloží je členěno na ráztocké a lukovské vrstvy. Ráztocké vrstvy jsou typické středně rytmickým flyšovým charakterem se střídáním pískovců a šedých, často tmavě skvrnitých jílovců. Stáří vrstev je maastricht až spodní paleocén. Lukovské vrstvy představují hrubě písčité flyš s častými tělesy a polohami blokových slepenců. Belovežské souvrství má drobně rytmický flyšový vývoj s převahou jílovců, ve spodních polohách s rudými jílovci. Stratigraficky odpovídají vyššímu paleocénu až spodnímu eocénu.

Zlínské souvrství je nejmladším vrstevním členem račanské jednotky. V severní části Chřibů má v celé své mocnosti charakter středně rytmického flyše s převahou vápnitých jílovců s typicky střepovitým rozpadem. Doprovázejí je pískovce zpravidla glaukonitické. Tento vývoj zlínského souvrství je označován jako vsetínské vrstvy. V jižní části Chřibů jsou ve spodní části zlínského souvrství vyvinuta tělesa a polohy arkózových a křemených pískovců středního eocénu. Popisovaná litofacie je označována jako luhačovické vrstvy.

Neogenní sedimenty vídeňské pánve jsou rozšířeny v j. části Chřibů svými svrchnomiocenními a pliocenními členy hradištského příkopu (Stráník et al. 2021). Vyšší sarmat (bílovické souvrství) transgreduje na magurský flyš písčitémi šterky, které do nadloží přecházejí v jíly až jílovce s vložkami uhelných jílu. Sedimenty pannonu (bzenecké souvrství) se místy vyvíjejí z vyslazených jílu vyššího sarmatu nástupem mocných klastik spodních zón pannonu (zóna A, B) a světlých prachových písků s bohatou makrofaunou, doprovázených kyjovskou uhelnou slojí. V nadloží kyjovské sloje jsou vyvinuty prachové písky s hojnou makrofaunou zóny C. Do nadloží přecházejí v jílovité sedimenty zóny D, které představují prohloubení sedimentačního prostředí.

Kvartérní pokryv tvoří eolické sedimenty pleistocénu značně rozšířené zejména v nižších výškových

úrovních mírně modelovaného morfologického reliéfu. Pleistocenního stáří jsou rovněž fluvialní šterky v terasách vodních toků. Holocén je reprezentován především svahovými a splachovými sedimenty a fluvialní výplní niv.

Stavbu flyšových příkrovů a miocénu hradištského příkopu porušují systémy příčných i podélných zlomů. Koncem svrchního miocénu, pliocénu a v pleistocénu zaznamenává převážná část území trvalý výzdvih.

Geologická stavba je zobrazena v mapové aplikaci <https://mapy.geology.cz/geocr50/>.

Metodika hodnocení sesuvného hazardu

Pro zvolené zájmové území byla pro modelování náchylnosti k sesouvání zvolena multivariační statistická metoda, která kombinuje několik vstupních parametrů současně a následně je porovnává s výskytem svahových deformací na daném území (Carrara 1983; Bednarik et al. 2014). V našem případě se jedná o 7 vstupních parametrů, které mají vliv na stabilitu svahů/vznik a vývoj svahových pohybů: geologie (ovlivňuje geomorfologické a hydrogeologické poměry území a je tak určující podmínkou vzniku svahových pohybů), využití území, nadmořská výška (ovlivňuje klimatické poměry oblasti, jako např. množství srážek nebo teplotu), sklon svahů, orientace ke světovým stranám, křivost reliéfu a výskyt svahových deformací. Při této analýze nevstupuje do hodnocení geohazardu proces vážení (Havlín – Šikula 2017). Pro přípravu dat byla použita datová sada ZABAGED – ZM 10, polohopis a výškopis. Tato data byla poskytnuta v rámci nevýhradní licenční smlouvy mezi Zeměměřickým úřadem a Ministerstvem životního prostředí. Pro každý parametr byla z těchto dat vytvořena parametrická mapa (obr. 2).

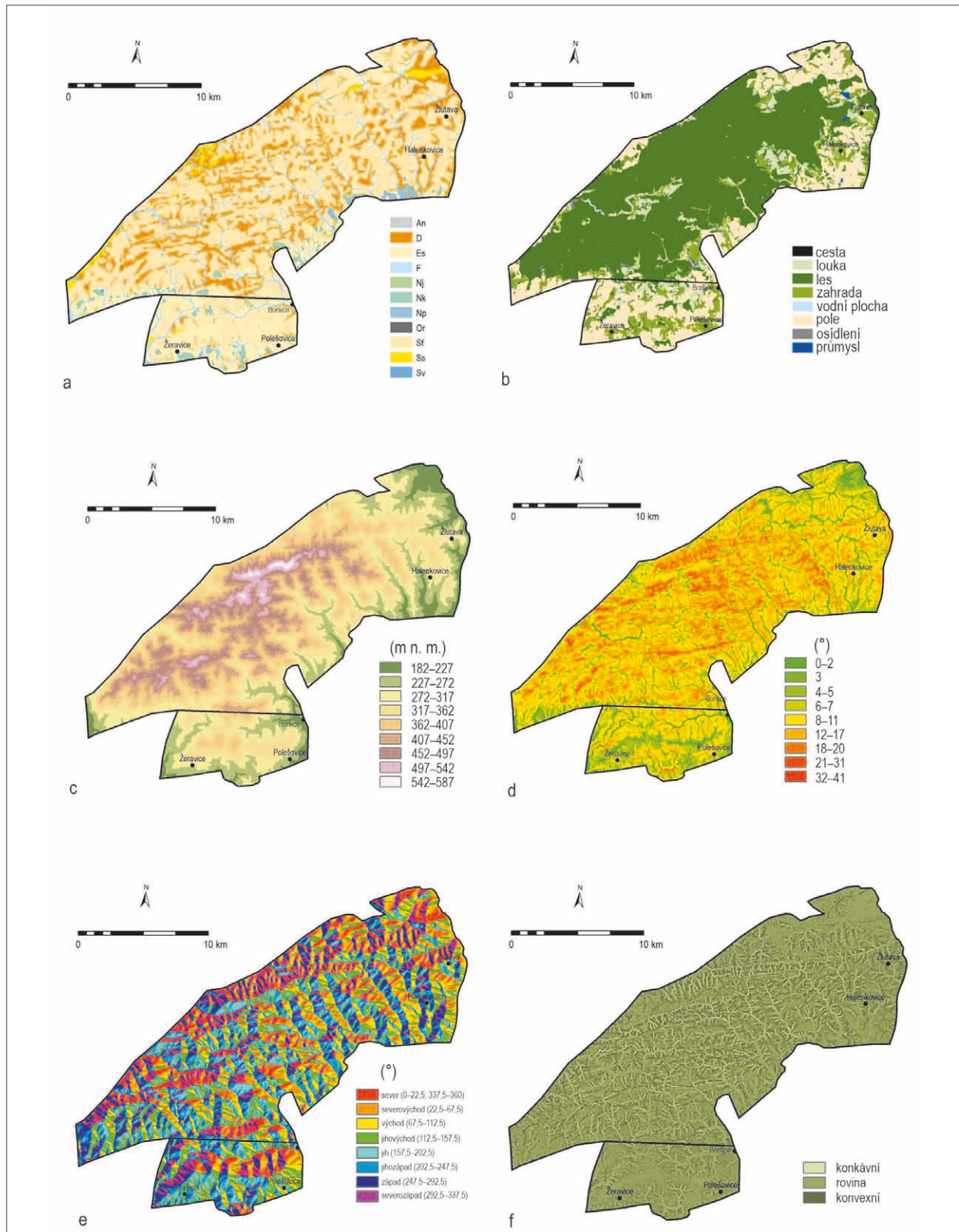
Parametrická mapa geologie byla vytvořena rozčleněním jednotlivých položek z geologické mapy 1 : 50 000 do 11 tříd podle metodiky pro inženýrskogeologické rajonování (Hanžl et al. 2009). Jednotlivé rajóny byly vymezeny na základě geneticko-litologické podobnosti (obr. 2a).

Parametrická mapa využití území – vytvořená z digitálních dat ZABAGED® – polohopis a rozčleněná do 8 tříd podle Metodiky určování sesuvného hazardu v prostředí ohroženém svahovými nestabilitami (Havlín a Šikula 2017) – obr. 2b.

Parametrická mapa nadmořských výšek – vytvořená z digitálních dat ZABAGED® – výškopis a rozčleněná do 9 tříd v konstantních intervalech po 45 výškových metrech. Nejnižší bod zájmového území se nachází v nadmořské výšce 182 m, nejvyšším bodem je vrch Brdo – 587 m n. m. Výškový rozdíl mezi těmito body činí 405 m (obr. 2c).

Parametrická mapa sklonů svahů – vytvořená z digitálních dat ZABAGED® – výškopis pomocí nástroje Slope a rozdělená podle Hrašny (1980) do 9 tříd (obr. 2d).

Parametrická mapa orientace ke světovým stranám – vytvořená z digitálních dat ZABAGED® – výškopis pomocí nástroje Aspect a rozčleněná do 9 tříd po stupních, přičemž u kategorie 1 se jedná o ploché území bez vztahu ke světovým stranám (obr. 2e).



Obr. 2: Parametrické mapy pro jednotlivé parametry. a – geologie [An – antropogenní uloženiny; D – deluviální a deluviofluviální sedimenty; Es – spraše až sprašové hlíny; F – náplavy toků; Nj – jílovito-prachovité sedimenty; Nk – střídající se jemnozrnné, písčité a štěrkovité sedimenty; Np – písčité sedimenty; Or – organické sedimenty; Sf – flyšoidní (anizotropní) horniny; Ss – pískovcové a slepencové horniny; Sv – vápencové a dolomitické horniny]; b – využití území (dle Corine Land Cover); c – nadmořská výška (v m n. m.); d – sklon svahu; e – orientace ke světovým stranám; f – křivost reliéfu.

Fig. 2: Parametric maps for individual parameters. a – geology [An – anthropogenic deposits; D – deluvial and deluviofluvial sediments; Es – loess and loess loam; F – alluvia of streams; Nj – clayey-silty sediments; Nk – alternating fine-grained, sandy and gravelly sediments; Np – sandy sediments; Or – organic sediments; Sf – flysch (anisotropic) rocks; Ss – sandstone and conglomerate rocks; Sv – limestone and dolomitic rocks]; b – land use (after Corine Land Cover); c – altitude (in m a. s. l.); d – slope; e – aspect; f – curvature.

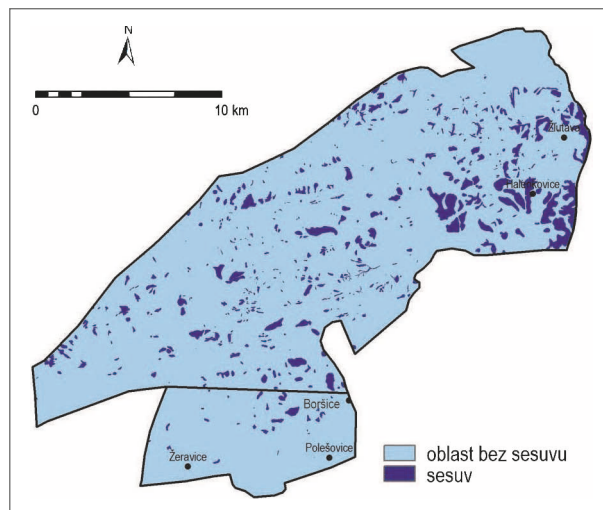
Parametrická mapa křivosti reliéfu – vytvořená z digitálních dat ZABAGED® – výškopis pomocí nástroje Curvature s rozčleněním do 3 tříd (obr. 2f).

Pro parametrickou mapu sesuvů (obr. 3) – byly vybrány plošné svahové deformace (sesuvy, jejichž alespoň jeden rozměr dosahuje 50 m a v mapě jsou zobrazeny jako polygony) z Registru svahových nestabilit – https://mapy.geology.cz/svahove_nestability/, které byly již dříve plošně zmapovány v měřítku 1 : 10 000 na území o rozloze 300 km², což je téměř 85% z celkové plochy zájmového území (plocha č. 1 na obrázku 1b). Jedná se o 580 sesuvů, které zde pokrývají 9% území. Pro potřeby modelování byly dílčí sesuvy, které jsou součástí stejného složeného sesuvného území, spojeny vždy do jednoho polygonu. Zbylá část území (plocha č. 2 na obrázku 1b) byla doplněna sesuvy z registrační databáze ČGS, (dříve odboru Geofond), která vznikla mapováním v celostátním měřítku v letech 1961–1963 (Špůrek 1978, 1983) či v rámci posudkové činnosti ČGS. Tím byla parametrická mapa doplněna o 27 dalších zákresů. Přítomnosti sesuvu v mapě byla přiřazena hodnota 1, absenci sesuvu hodnota 0.

Význam každého parametru je dán jeho četností a opakováním třídy parametru ve více kombinacích v rámci UCU (unique condition units). Tato metoda částečně zohledňuje i vzájemné interakce mezi jednotlivými vstupními faktory (Paudits 2006). Příprava parametrických map a následné modelování bylo provedeno v programu ArcGIS, verze 10.6.1 s využitím nadstaveb Spatial Analyst a 3D Analyst.

Část parametrických map (geologie, využití území a sesuvů) pak byla převedena do rasteru tak, aby všechny získaly jednotnou podobu a následně byly reklasifikovány. Pro tuto reklasifikaci byl použit nástroj Reclassify. Velikost buňky byla zvolena 10 × 10 m, což odpovídá 3 011 × 2 532 buňkám na celé ploše území.

K o m b i n a c í reklasifikovaných



Obr. 3: Parametrická mapa sesuvů.

Fig. 3: Parametric map of landslides.

parametrických vrstev byly vymezeny kvazihomogenní jednotky (UCU) se všemi kombinacemi hodnot parametrů, které se na daném území vyskytují. Tyto byly následně



Obr. 4: Výsledná mapa náchylnosti k sesouvání s vyznačenými sesuvy. Velmi nízký stupeň náchylnosti k sesouvání – hodnota 0; nízký stupeň náchylnosti k sesouvání – interval hodnot 0–0,02745098; střední stupeň náchylnosti k sesouvání – interval hodnot 0,02745098–0,070588235; vysoký stupeň náchylnosti k sesouvání – interval hodnot 0,070588235–0,149019608; velmi vysoký stupeň náchylnosti k sesouvání – interval hodnot 0,149019608–1.

Fig. 4: Final landslide susceptibility map with marked landslides. Very low rate of susceptibility to landslides – value 0; low rate of susceptibility to landslides – interval of values 0–0,02745098, moderate rate of susceptibility to landslides – interval of values 0,02745098–0,070588235, high rate of susceptibility to landslides – interval of values 0,070588235–0,149019608, very high rate of susceptibility to landslides – interval of values 0,149019608–1.

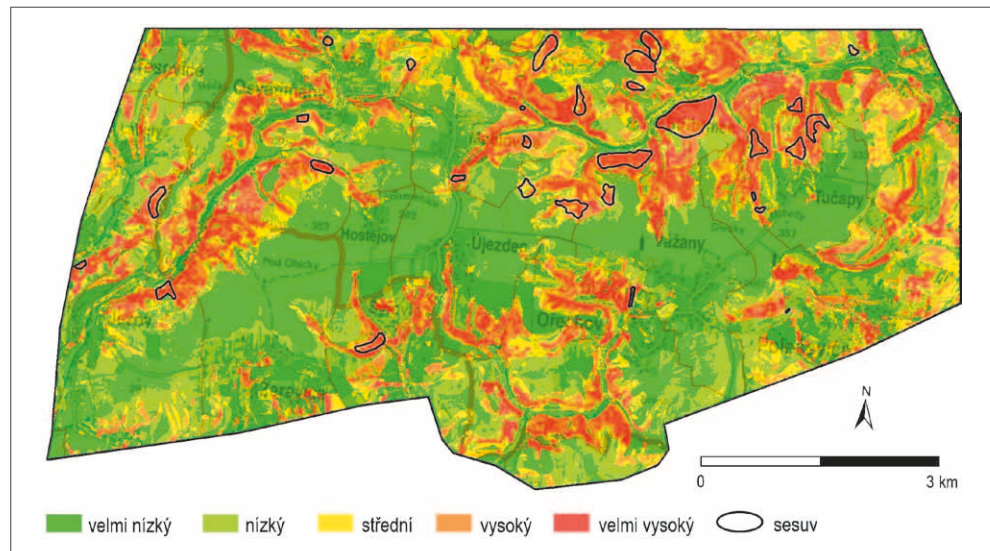
porovnány s vrstvou sesuvů a statistickými postupy byla určena míra náchylnosti, která se pohybuje v rozmezí hodnot 0 až 1, kde hodnota 0 znamená území stabilní a hodnota 1 území maximálně náchylné ke vzniku sesuvů. Výslednou vrstvu bylo nutné z důvodu vizuální reprezentace reklasifikovat do několika tříd. Pro tuto klasifikaci jsme zvolili metodu kvantilů, při které jsou prvky rozděleny do kategorií bez ohledu na hodnoty do jednotlivých skupin rovnoměrně, což v modelovém území vykazovalo nejlepší shodu s výskytem sesuvů. Mapa byla následně klasifikována s barevným rozlišením do jednotlivých tříd – nejnižší stupeň náchylnosti je zobrazen zelenou a nejvyšší stupeň červenou barvou (obr. 4).

Výsledky

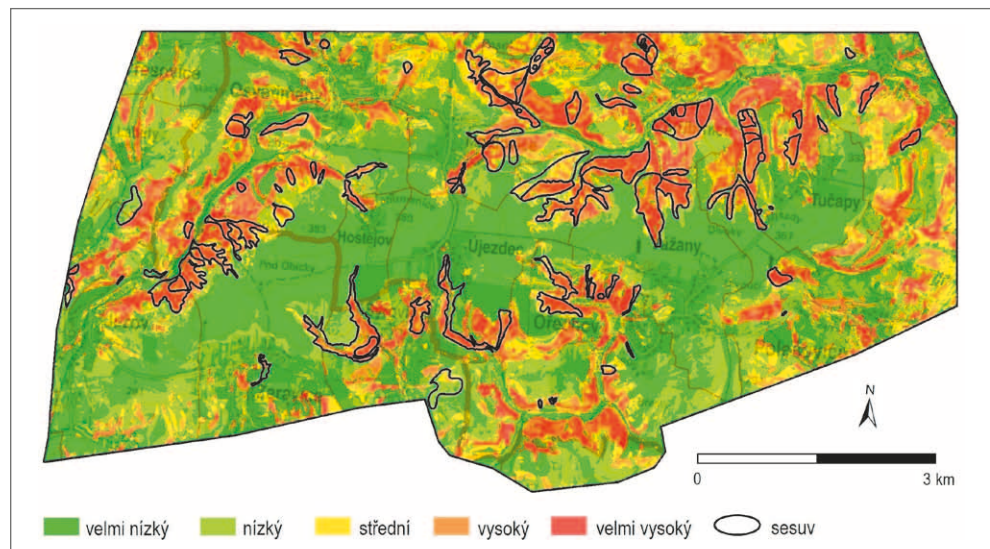
Výsledná mapa byla verifikována pro vyhodnocení její výpovědní hodnoty. K ověření úspěšnosti byl použit nejjednodušší způsob verifikace a to mapové, resp. rastrové překrytí registrovaných sesuvů s prognózní mapou (Bednarik et al 2014; Nandi a Shakkor 2010). Certifikovaná „Metodika určování sesuvného hazardu v prostředí ohroženém svahovými nestabilitami“ Havlína a Šikuly (2017) uvádí pro multivariální analýzu úspěšnost větší jak 80 %, to znamená, že víc jak 80 % aktuálně registrovaných svahových nestabilit se nachází ve třídách 4 a 5, tedy ve třídách s vysokým, resp. velmi vysokým stupněm sesuvného hazardu. Na námi studovaném

Tab. 1: Shrnutí jednotlivých tříd náchylnosti k sesouvání s rozlohou a procentuálním zastoupením.
Tab. 1: Summary of the individual landslide susceptibility classes with area and their percentages.

Třída náchylnosti	Celková plocha území (km ²)	%	Plocha verifikovaného území (km ²)	%
1	78,88	22,32	23,67	44,06
2	77,83	22,02	11,44	21,30
3	63,64	18,00	5,46	10,16
4	63,25	17,89	6,30	11,73
5	69,87	19,77	6,85	12,75
součet	353,47	100,00	53,72	100,00



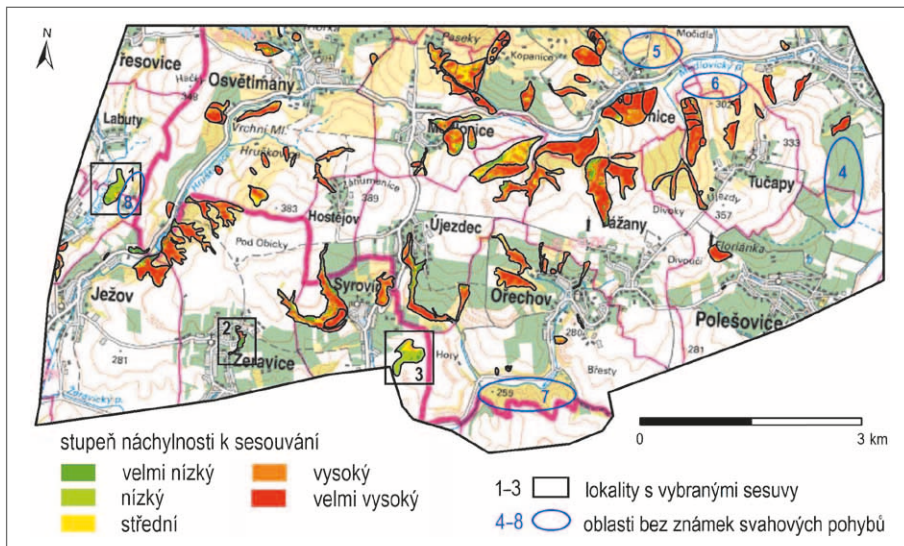
Obr. 5: Jižní, předem plošně nezmapovaná část zájmového území. Legenda viz obr. 4.
Fig. 5: South, previously unmapped part of the area of interest. Legend see Fig. 4.



Obr. 6: Stejná část zájmového území s nově vymapovanými sesuvy. Legenda viz obr. 4.
Fig. 6: Part of the area of interest with newly mapped landslides. Legend see Fig. 4.

území vyšla po verifikaci úspěšnost 85,96 %, což dokládá správnost zvolené analýzy.

Z výsledků analýzy vyplynulo, že zastoupení jednotlivých tříd ploch je poměrně vyrovnané. Z celkové plochy zájmového území se největší část nalézá v kategorii s velmi nízkým (22,32 %) a nízkým stupněm náchylnosti (22,02 %), střední stupeň je reprezentován 18 %, vysoký 17,89 % a nejvyšší stupeň náchylnosti k sesuvům zaujímá



Obr. 7: Přehled lokalit s vybranými sesuvy k bližšímu zkoumání a oblastmi bez známek svahových pohybů.

Fig. 7: View of sites with selected landslides for detailed analysis and areas with no signs of slope movements.

19,77%. Jednotlivé třídy s plochami a procentuálním zastoupením jsou uvedeny v tabulce 1.

Výsledky analýzy byly ověřeny terénní rekognoskací území, které předtím nebylo plošně zmapováno (obr. 5). Jedná se o j. část modelového území o rozloze necelých 54 km², což je přibližně 15% z celkové plochy použité pro modelování. Zde bylo nově identifikováno či zrevidováno 98 svahových deformací (včetně jejich dílčích částí) o celkové ploše 4 km², což odpovídá 7,4% rekognoskovaného území (obr. 6).

Jak je z obrázku 6 patrné, vyskytují se zde lokality, kde byly zmapovány sesuvy, ale multivariační analýzou byly vyhodnoceny jako území s nízkým či velmi nízkým stupněm rizika k sesouvání. Na tyto lokality jsme se

zaměřili, abychom zjistili, čím je výsledek způsoben (lokality 1–3 na obrázku 7). Sesuv byl stabilizován v roce 2011.

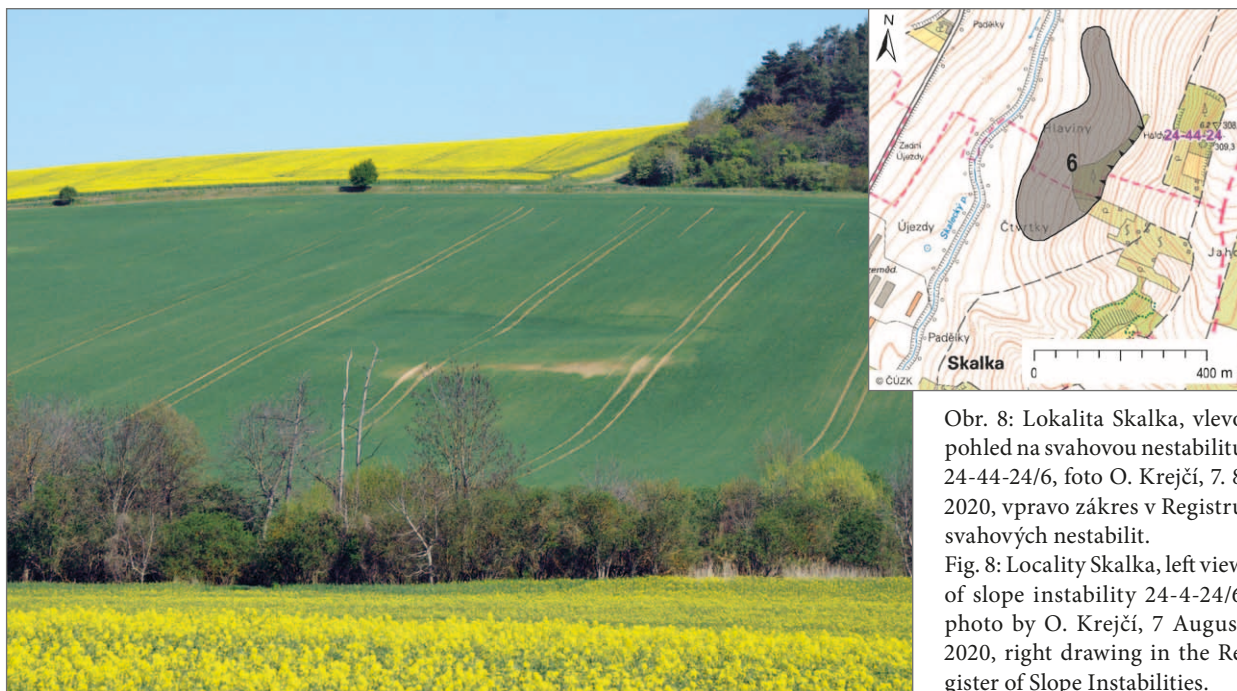
Lokalita 3 (obr. 10) – frontální sesuv v polích v blízkosti obce Syrovín o rozměrech 325 × 530 m, svah zde má sklon 8–11°. V podloží se nacházejí klastické sedimenty pannonu vídeňské pánve, překryté spraší. Sesuv vznikl následkem nadměrných úhrnů srážek v roce 1997, oživen byl v roce 2010.

Z obrázku 6 je dále zřejmé, že se zde vyskytují oblasti, které vykazují vysoký či velmi vysoký stupeň náchyllosti k sesouvání, přesto se zde sesuvy téměř nevyskytují. Tyto konkrétní oblasti (obr. 7) se odlišují od zbytku území

zaměřili, abychom zjistili, čím je výsledek způsoben (lokality 1–3 na obrázku 7).

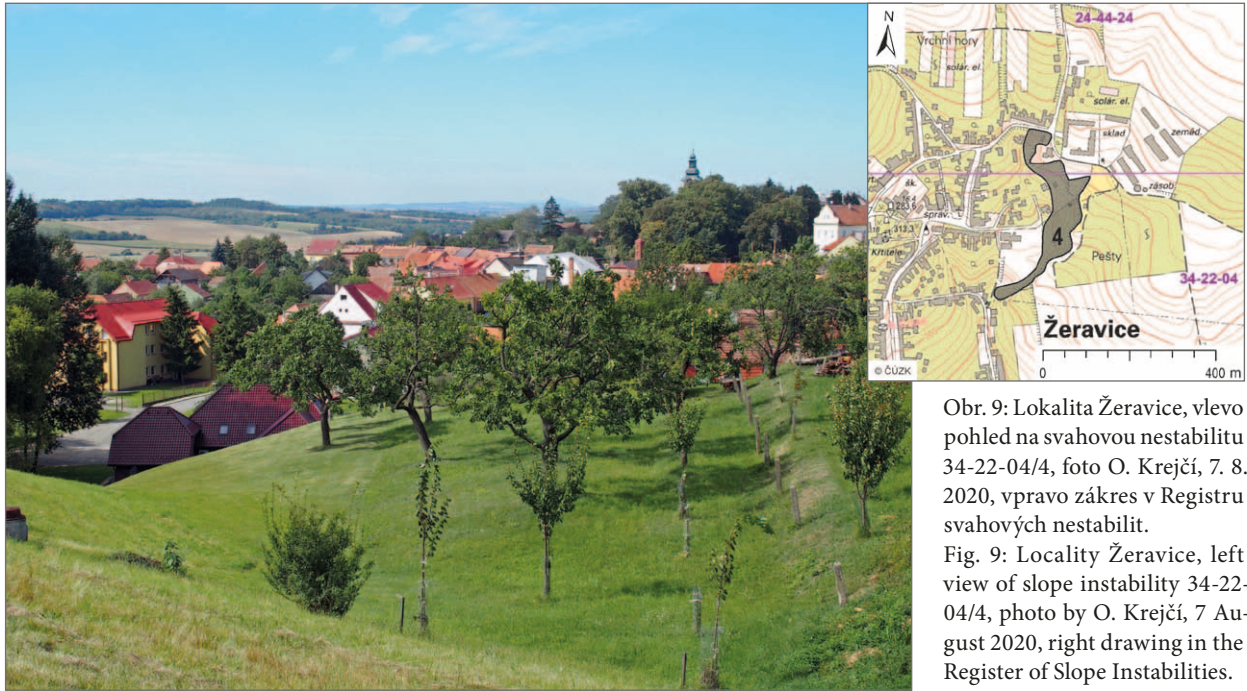
Lokalita 1 (obr. 8) – frontální sesuv nacházející se sv. od obce Skalka o rozměrech 220 × 520 m. Vznikl na sedimentech neogénu vídeňské pánve (nezpevněné písky a jíly bzeneckého souvrství pannonu). K aktivaci sesuvu došlo v roce 2010 po povodních, v roce 2020 byl oživen. Příčinou byly lokální vysoké úhrny srážek.

Lokalita 2 (obr. 9) – sesuv o rozměrech 100 × 430 m se nachází na svazích jz. od zemědělského družstva v obci Žeravice. Vznikl na místě rozsáhlé skládky. V podloží se nachází belo-



Obr. 8: Lokalita Skalka, vlevo pohled na svahovou nestabilitu 24-44-24/6, foto O. Krejčí, 7. 8. 2020, vpravo zakres v Registru svahových nestabilit.

Fig. 8: Locality Skalka, left view of slope instability 24-4-24/6, photo by O. Krejčí, 7 August 2020, right drawing in the Register of Slope Instabilities.



Obr. 9: Lokalita Žeravice, vlevo pohled na svahovou nestabilitu 34-22-04/4, foto O. Krejčí, 7. 8. 2020, vpravo záznam v Registru svahových nestabilit.

Fig. 9: Locality Žeravice, left view of slope instability 34-22-04/4, photo by O. Krejčí, 7 August 2020, right drawing in the Register of Slope Instabilities.

buď provedenými stabilizačními opatřeními, nebo nepřítomností kvartérních svahových sedimentů. Oblast 4 na V od Tučap byla již dříve stabilizována výstavbou teras pro zemědělskou činnost. V oblasti 5 na SV od Stříbrnic, v oblasti 6 vjv. od Stříbrnic, v oblasti 7 jjz. od Ořechova a v oblasti 8, která lemuje svahovou deformaci 24-4-24/6 u obce Skalka, se svahové nestability nevyskytují z důvodů geologické stavby. V případě oblastí 5 a 6 se jedná o svahy přímo na skalních výchozech podkladu vsetínských vrstev zlínského souvrství. Oblasti 7 a 8 jsou na svazích se skalním podkladem odolných luhačovických vrstev zlínského souvrství.

Závěr

Naše práce ukázala, že multivariační statistickou analýzu lze úspěšně použít pro vyhodnocení náchylnosti

území k sesouvání pro oblast flyšových jednotek Západních Karpat, která je ve velké míře postižena svahovými pohyby. Na území, které bylo plošně zmapováno a výsledky porovnány s výslednou mapou sesuvného hazardu vyšlo, že více než 85 % zmapovaných sesuvů se nachází v oblastech s vysokým a velmi vysokým stupněm náchylnosti k sesouvání. U lokalit, které tato statistická metoda neodhalila, ale sesuvy zde byly přesto následně zmapovány, bylo zjištěno, že jejich vznik byl iniciován jinými jevy, než jsou vstupní podmínky, které byly využity pro analýzu. V případě lokalit Skalka a Syrovín to byl nadměrný úhrn srážek, v obci Žeravice byl sesuv způsobem skládkou. Vždy se jednalo o činitele místního charakteru, a proto je nelze zahrnout do vstupních parametrů určených pro modelování celého území. V opačném případě, kdy výsledný model ukázal vysoký či velmi



Obr. 10: Lokalita Syrovín, vlevo pohled na svahovou nestabilitu 34-22-04/1, foto O. Krejčí, 7. 8. 2020, vpravo záznam v Registru svahových nestabilit.

Fig. 10: Locality Syrovín, left view of slope instability 34-22-04/1, photo by O. Krejčí, 7 August 2020, right drawing in the Register of Slope Instabilities.

vysoký stupeň náchylnosti k sesouvání, ale ten následně nebyl při rekognoskaci prokázán skutečným výskytem sesuvů, bylo zjištěno, že v těchto konkrétních oblastech vzniku sesuvů bránila odlišná geologická stavba či byl terén proti sesouvání upraven lidskou činností.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen v rámci interního projektu č. 321070, který je součástí DKRVO/ČGS (2018–2022), Oblast výzkumu 5: Výzkum geologických rizik. Autoři děkují editorovi doc. Mgr. Aleši Bajerovi, Ph.D., recenzentovi doc. RNDr. Karlovi Kirchnerovi, CSc., a anonymnímu recenzentovi za podnětné připomínky.

Literatura

- Baldík, V., Havlín, A., Kašperáková, D., Kirchner, K., Klimeš, J., Krejčí, O., Repková, H., Slavík, M. (2006). Svahové nestability vzniklé jako důsledek jarního tání v březnu a dubnu 2006. – MS Archiv ČGS Praha. 2 str.
- Bednarik, M., Liščák, P. (2010). Landslide susceptibility assessment in Slovakia. – *Mineralia Slovaca*, 42, 193–204.
- Bednarik, M., Magulová, B., Matys, M., Marschalko, M. (2010). Landslide susceptibility assessment of the Kraľovany-Liptovský Mikuláš railway case study. – *Physics and Chemistry of the Earth*. 35, 3–5, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.12.002>
- Bednarik, M., Paudiš, P. (2010). Different ways of landslide geometry interpretation in a process of statistical landslide susceptibility and hazard assessment: Horná Suča (Western Slovakia) case study. – *Environmental Earth Sciences*, 61, 733–739. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0387-8>
- Bednarik, M., Paudiš, P., Ondrášik, R. (2014). Rôzne spôsoby hodnotenia úspešnosti máp zosuvného hazardu: bivariačný verzus multivariačný štatistický model. [Various techniques for evaluating landslide hazard maps reliability: bivariate vs. multivariate statistical model]. – *Acta Geologica Slovaca*, 6, 1, 71–84.
- Bíl, M., Krejčí, O., Bílová, M., Kubeček, J., Sedoník, J., Krejčí, V. (2014). A chronology of landsliding and its Impacts on the Village of Halenkovice, Outer Western Carpathians, Czech Republic. – *Geografie Prague*, 119, 4, 342–363. <https://doi.org/10.37040/geografie2014119040342>
- Boháč, P., Kolář, J. (1996). Geografické názvoslovné seznamy OSN-ČR. Vyšší geomorfologické jednotky České republiky. – Český úřad zeměměřický a katastrální. 1–54.
- Bueechi, E., Klimeš, J., Frey, H., Huggel, C., Strozzi, T., Cochachin, A. (2019). Regional-Scale Landslide Susceptibility Modelling in the Cordillera Blanca, Peru - A Comparison of Different Approaches. – *Landslides*, 16, 395–407. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1090-1>
- Buša, J., Tornyai, R., Bednarik, M., Greif, V., Rusnák, M. (2019). Hodnotenie zosuvného hazardu pomocou multivariačnej a bivariačnej štatistickej analýzy v Košickej kotline (Západné Karpaty). – *Geografický časopis/Geographical journal*, 71, 4, 383–405. <https://doi.org/10.31577/geogrcas.2019.71.4.20>
- Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. – *Mathematical Geology*, 15, 3, 403–427.
- Carrara, A. (1988). Landslide hazard mapping by statistical method: A „Black Box“ approach. – In: *Proceedings of workshop on Natural Disaster in European Mediterranean Countries*, Consilio Nazionale delle Ricerche, Perugia, Italy, 205–224.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. – *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 5, 427–445. <https://doi.org/10.1002/esp.3290160505>
- Clerici, A. (2002). A GRASS GIS based shell script for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. – In: Ciolli, M., Zatelli, P. (eds): *Proceedings of the Open source GIS GRASS users conference*, Trento, Italy.
- Čížek, P., Jurášová, F., Menčík, E., Novák, Z., Pešl, V., Pešlová, H., Plička, M., Stráník, Z. (1982). Zpráva o geologických poměrech území pro výstavbu dálnice D1 Brno - Trenčín ve Chřibech (Brno, Cetechovice, Chřiby, Staré Hutě, Střílky, Trenčín). – MS Archiv ČGS. Praha.
- Demek, J., Mackovčín, P. (eds) a kol. (2014). *Zeměpisný lexikon ČR. Hory a nížiny*. – 1–595, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multicase study, central Italy. – *Geomorphology*, 31, 181–216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Hanzl, P., Čech, S., Čurda, J., Doležalová, Š., Dušek, K., Gürtlerová, P., Krejčí, Z., Kycl, P., Man, O., Mašek, D., Mixa, P., Moravcová, O., Pertoldová, J., Petáková, Z., Petrová, A., Rambousek, P., Skácelová, Z., Štěpánek, P., Večeřa, J., Žáček, V. (2009). *Směrnice pro sestavení Základní geologické mapy České republiky 1 : 25 000*. Praha. 1–36. – Česká geologická služba, Ministerstvo životního prostředí ČR, MS Archiv ČGS. Praha.
- Havlíček, P., Novák, Z., Krejčí, O. (1994). Geologická mapa ČR 1 : 50 000, list 25-33 Uherské Hradiště. – Český geologický ústav. Praha.
- Havlín, A. (2010). Hodnocení náchylnosti k sesouvání ve střední části Chřibů. – *Geotechnika* 13, 3–4, 3–9.
- Havlín, A., Bednarik, M., Magulová, B., Vlčko, J. (2011). Použití logistické regrese pro hodnocení náchylnosti k sesouvání ve střední části Chřibů (Česká republika). – *Acta Geologica Slovaca*, 3, 2, 153–161.
- Havlín, A., Magulová, B., Bednarik, M. (2013). Využití map sesuvného hazardu k plánování trasy liniových staveb v prostředí náchylném ke vzniku svahových deformací. – *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2012*, 46, 323–327.
- Havlín, A., Šikula, J. (2017). Metodika určování sesuvného hazardu v prostředí ohroženém svahovými nestabilitami. Česká republika. – MS Archiv ČGS. Praha.
- Hodosová, K., Bednarik, M. (2021). Effect of using various weighting methods in a process of landslide susceptibility assessment. – *Natural Hazards*, 105, 481–499. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04320-1>
- Holec, J., Bednarik, M., Liščák, P., Žilka, A., Vitovič, L. (2018). Assessment of debris flow susceptibility using bivariate and multivariate statistical analyses and verification based on catastrophic events from 2014 in the Krivanska Fatra Mountains, Slovakia. – *Acta Geologica Slovaca*, 10, 1–19.
- Hrašna, M. (1980). Inžinierskogeologické hodnotenie krajinného prostredia. – *Záverečná výskumná správa*, 1–220. MS, Geologický ústav PFUK. Bratislava.
- Cháb, J., Stráník, Z., Eliáš, M. (2007). *Geological map of the Czech Republic 1 : 500 000*. Czech Geological Survey, Prague.
- Chmelík, F., Čtyrkoký, P., Dornič, J., Eliáš, M., Havlíček, P. (1973). Vysvětlující text k základní geologické mapě 1 : 25 000, list M33-107-D-c Polešovice. – MS Archiv ČGS. Praha.
- Klimeš, J. (2008). Deterministický model náchylnosti území ke vzniku svahových deformací ve Vsetínských vrších. – *Geografie-Sborník ČGS*, 113, 1, 48–60. <https://doi.org/10.37040/geografie2008113010048>

- Klimeš, J., Blahůt, J. (2012). Landslide risk analysis and its application in regional planning: an example from the highlands of the Outer Western Carpathians, Czech Republic. – *Natural Hazards*, 64, 1779–1803. DOI 10.1007/s11069-012-0339-6. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0339-6>
- Krejčí, O., Bíl, M., Jurová, Z., Kirchner, K., Hubatka, F. (2002). Some examples of deep-seated landslides in the Flysch Belt of the Western Carpathians. – In: Rybář, J., Stemberk, J., Wagner, P. (eds): *Landslides*, 373–380. A. A. Balkema Publishers, Lisse, Netherlands. <https://doi.org/10.1201/9780203749197-51>
- Krejčí, O., Kycl, P., Baroň, I., Šikula, J., Čoupek, O., Moravcová, O., Petrová, V., Krejčí, Z., Zemková, M., Kašperáková, D., Poul, I., Rybář, J., Kirchner, K., Klimeš, J., Hubatka, F., Nešvara, P., Sekyra, Z., Bíl, M., Bílová, M. (2008a): Podprogram „ISPROFIN“ č. 215124-1 Dokumentace a mapování svahových pohybů v ČR. Přehled provedených prací. – MS Archiv ČGS. Praha. 1–114.
- Krejčí, O., Baroň, I., Hubatka, F., Kirchner, K. (2008b). Podprogram „ISPROFIN“ č. 215124-1 Dokumentace a mapování svahových pohybů v ČR. Hodnocení svahových nestabilit ve flyšovém pásmu Karpat. – MS Archiv ČGS. Praha. 1–95.
- Krejčí, O., Havlín, A., Kašpárek, M., Klimeš, J., Petrová, V., Šikula, J. (2010). Hodnocení svahových nestabilit ve Zlínském kraji po extrémních srážkách v květnu a červnu 2010. Závěrečná zpráva. – MS Archiv ČGS. Praha. 1–18.
- Křivka, T. (2009). Geostatistická analýza sesuvného hazardu v oblasti severních Chřibů. – MS, Bakalářská práce. MS UJEP Olomouc. 1–56.
- Lídl, V., Janda, T. (2006). Stavby, kterým doba nepřála. Výstavba dálnic v letech 1938–1950 na území Čech a Moravy. – MS, Ředitelství silnic a dálnic, a.s. Praha. 1–120.
- Magulová, B. (2009). Použitie GIS pre tvorbu map geohazardov ako podkladov pre urbanizačne planovanie. – *Acta Geologica Slovaca*, 1, 25–32.
- Nandi, A., Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. – *Engineering Geology*, 110, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.10.001>
- Pasang, S., Kubiček, P. (2020). Landslide Susceptibility Mapping Using Statistical Methods along the Asian Highway, Bhutan. – *Geosciences* 10, 11, 430. <https://doi.org/10.3390/geosciences10110430>
- Pauditš, P. (2006). Hodnotenie náchylnosti územia na zosuvanie s využitím štatistických metod v prostredí GIS. – *Geologické práce, Správy*, 112, 41–58.
- Pauditš, P., Bednarik, M. (2002). Using GIS in evaluation of landslide susceptibility in Handlovska kotlina basin. – In: *Proceedings of the 1st European conference on landslide*. – Lisse, Praha (Swets & Zeitlinger), 437–441. <https://doi.org/10.1201/9780203749197-61>
- Petrýdesová, L. (2012). Hodnotenie zosuvného hazardu medzi mestami Hlohovec–Sereď. – In: *Člověk, stavba a územní plánování VI*. 129–133. Fakulta stavební, ČVUT Praha.
- Picha, F. J., Stráník, Z., Krejčí, O. (2006). Geology and Hydrocarbon Resources of the Outer West Carpathians and their Foreland, Czech Republic. – In: Golonka, J., Picha, F. J. (eds): *The Carpathians: Geology and Hydrocarbon Resources*. AAPG Memoir 84, 49–175. <https://doi.org/10.1306/985607M843067>
- Provazník, J. (1980). Závěrečná zpráva o předběžném inženýrskogeologickém průzkumu trasy dálnice D1 Brno–Trenčín. – MS Archiv ČGS. Praha. 1–55.
- Stráník, Z. (1998). Geologická mapa ČR 1 : 50 000, list 24-44 Bučovice. – Český geologický ústav. Praha.
- Stráník, Z., Bubík, M., Gilíková, H., Tomanová Petrová, P. (2021, eds.): *Geologie Vnějších Západních Karpat a jihovýchodního okraje Západoevropské platformy v České republice*. Praha: Česká geologická služba. 1–319. 2021.
- Špůrek, M. (1978). Využití výpočetní techniky při registraci sesuvů v ČSR. – *Geologický průzkum*, 20, 2, 44–46.
- Špůrek, M. (1983). Sto let výzkumu sesuvů na území ČSSR (1878–1978). – *Geologický průzkum*, 25, 1, 21–23.
- Tornyai, R., Bednarik, M., Havlín, A. (2016). Application of neural network to assess landslide hazard and comparison with bivariate and multivariate statistical analyses. – *Acta Geologica Slovaca*, 8, 1, 2016, 109–118.
- Tornyai, R., Dunčko, M. (2013). Použitie bivariablej a multivariablej analýzy na hodnotenie zosuvného hazardu Kysuckého regiónu (Západné Karpaty). – *Acta Geologica Slovaca*, 5, 2, 179–193.
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. UNESCO, Paris, 1–63.
- Vojteková, J., Vojtek, M. (2020). Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia. – *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11, 1, 131–148. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1713233>
- Woznica, L. (2001). Geotechnická studie sesuvů v trase silnice I/50 třídy E 50 na území přírodního parku Chřiby. MS pro Centrum dopravního výzkumu, v.v.i. Brno Woznica – kancelář inženýrské geologie a geotechniky, Brno.
- ZABAGED® – Výškopis – DMR 5G. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace. <https://ags.cz/ags.cz/geoprohlizec/shlednuto> (2022)
- ASGI – Databáze archivů zpráv a posudků. <http://www.geology.cz/app/asgi/> shlednuto (2022)
- Geologická mapa 1 : 50 000, Klad listů ZM50. In: *Geovédní mapy 1 : 50 000* [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>.
- Mapované svahové nestability, Oblasti mapování svahových nestabilit, Registrační záznamy. In: *Svahové nestability* [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/svahove_nestability/.