Správa z výskumného testu týkajúceho sa zosuvného ohrozenia s využitím metódy LiDAR pre zosuvov nachádzajúcich sa 7–8 km severozápadne od mesta Bytča

Odborný dohľad

Dr Albert Ślęzak

Výskumný plán obsahujúci priebeh výskumu s rozdelením na terénne a laboratórne práce vrátane určenia jednotlivých krokov realizácie výskumných prác

Terénne práce

· terénna obhliadka spojená s predbežnou analýzou reliéfu,
· analýza reliéfu zosuvov nachádzajúcych sa 7–8 km severozápadne od mesta Bytča,
· identifikácia území potenciálne ohrozených zosúvaním,
· identifikácia zóny, ktorá by mala byť predmetom analýz s využitím technológie LiDAR,
· určenie hraníc územia, pre ktoré bude na základe údajov LiDAR vypracovaný diferenčný model terénu.

Laboratórne práce

· určenie obdobia, v ktorom bude vykonaná analýza LiDAR,
· určenie časových intervalov, pre ktoré bude vykonaná analýza LiDAR,
· výber modelov terénu a ortofotomáp, na základe ktorých bude vykonaná analýza,

· vytvorenie diferenčného modelu na základe modelov terénu odvodených z údajov LiDAR, umožňujúceho identifikáciu zmien reliéfu spôsobených prípadnými zosuvnými procesmi,
· zosúladenie a prekrytie ortofotomáp a modelov reliéfu získaných z údajov LiDAR,
· návrh typov grafických výstupov zobrazujúcich zmeny povrchu terénu s využitím údajov LiDAR,
· vymedzenie zón, v ktorých bola zistená zosuvná aktivita,
· hodnotenie zosuvnej aktivity skúmaného územia.

1. Opis priebehu výskumných prác so zohľadnením teoretických východísk, opisu metódy, prípadného odberu vzoriek v teréne a následných krokov laboratórnych prác

Teoretické východiská (LiDAR)

Technológia LiDAR (Light Detection and Ranging) predstavuje jednu z najmodernejších metód diaľkového prieskumu Zeme, ktorá sa v súčasnosti využíva pri výskume prírodného prostredia a geomorfologických procesov. Jej fungovanie je založené na vysielaní laserových impulzov smerom k zemskému povrchu a meraní času, za ktorý sa odrazený signál vráti k senzoru. Na základe týchto údajov je možné veľmi presne určiť vzdialenosť medzi meracím zariadením a povrchom terénu, čo umožňuje vytváranie mimoriadne presných modelov reliéfu s vysokým priestorovým rozlíšením. Vďaka vysokej presnosti meraní nachádza technológia LiDAR široké uplatnenie pri analýze geodynamických procesov, najmä pri výskume zosuvov pôdy a svahových pohybov. V kontexte výskumu zosuvov umožňuje LiDAR detailné zobrazenie povrchu terénu aj v ťažko dostupných a husto zalesnených oblastiach. Jednou z najvýznamnejších výhod tejto technológie je možnosť generovania digitálnych modelov terénu (DMT) s vysokým rozlíšením, ktoré umožňujú identifikovať rozsiahle zosuvné formy, ako aj veľmi jemné deformácie povrchu svahov. Vďaka tomu je možné rozpoznávať subtílne morfologické zmeny, ktoré sú často neviditeľné počas tradičných terénnych výskumov alebo na štandardných topografických mapách. Dôležitou výhodou technológie LiDAR je aj schopnosť filtrovať body odrazené od vegetácie, ako sú stromy, kry alebo vysoká bylinná vegetácia. To umožňuje „odhalenie“ skutočného povrchu pôdy a získanie presného obrazu terénu aj v prípade súvislého lesného porastu. Táto vlastnosť má mimoriadny význam najmä v horských a podhorských oblastiach, kde vegetácia veľmi často sťažuje realizáciu klasických geomorfologických pozorovaní. Analýza údajov LiDAR umožňuje presne určiť charakteristické prvky zosuvného reliéfu, ako sú zosuvné niky, prahy, koluviálne jazyky, valy,

trhliny alebo zóny akumulácie horninového a zvetraninového materiálu. Táto technológia taktiež umožňuje detekciu drobných puklín a deformácií terénu, ktoré predstavujú skoré symptómy aktivácie svahových pohybov.

Veľký význam má aj možnosť porovnávania údajov LiDAR získaných v rôznych časových obdobiach. Viaccasové analýzy umožňujú monitorovať dynamiku zmien prebiehajúcich na svahoch a určovať rýchlosť a smer premiestňovania horninového materiálu. Vďaka tomu je možné sledovať aktivitu zosuvov a hodnotiť ich vývoj v čase. Takýto typ výskumu poskytuje mimoriadne cenné informácie o stabilite svahov a potenciálnom riziku vzniku nových svahových pohybov. V praxi umožňuje odhaliť aj veľmi malé výškové zmeny, ktoré môžu predchádzať rozsiahlejším a nebezpečnejším zosuvným procesom. Technológia LiDAR sa v súčasnosti široko využíva nielen vo vedeckom výskume, ale aj pri aktivitách súvisiacich s manažmentom geologických rizík a ochranou obyvateľstva. Údaje získané z digitálnych modelov terénu tvoria základ pre tvorbu máp zosuvného ohrozenia a máp náchylnosti území na svahové pohyby. Takéto podklady majú zásadný význam pre územné plánovanie, projektovanie infraštruktúry a prijímanie investičných rozhodnutí. Umožňujú znižovať riziko umiestňovania budov, ciest či inžinierskych sietí na územiach obzvlášť náchylných na destabilizáciu svahov.

Osobitný význam má LiDAR v oblastiach s komplikovaným reliéfom, kde sa tradičné meracie metódy ukazujú ako časovo náročné a menej efektívne. Možnosť rýchleho získavania veľmi presných údajov pre rozsiahle územia výrazne zvyšuje možnosti realizácie geomorfologických analýz. Ďalšou výhodou je možnosť integrácie údajov LiDAR s inými zdrojmi informácií, ako sú letecké snímky, satelitné dáta, geodetické merania či geologické a hydrologické informácie. Takéto prepojenie rôznych výskumných metód umožňuje získať komplexnejší obraz o procesoch prebiehajúcich v prírodnom prostredí. Čoraz väčší význam sa pripisuje aj využívaniu LiDAR-u v monitorovacích systémoch a systémoch včasného varovania pred zosuvnými hrozbami. Pravidelné merania umožňujú odhaľovať zmeny terénu predchádzajúce aktivácii zosuvu, čo umožňuje včasné prijatie ochranných opatrení. V dôsledku toho predstavuje táto technológia mimoriadne účinný nástroj podporujúci identifikáciu prírodných hrozieb, zvyšujúci bezpečnosť obyvateľov ohrozených území a znižujúci potenciálne materiálne a infraštruktúrne škody.

2. Poloha a hlavné charakteristiky skúmaného územia

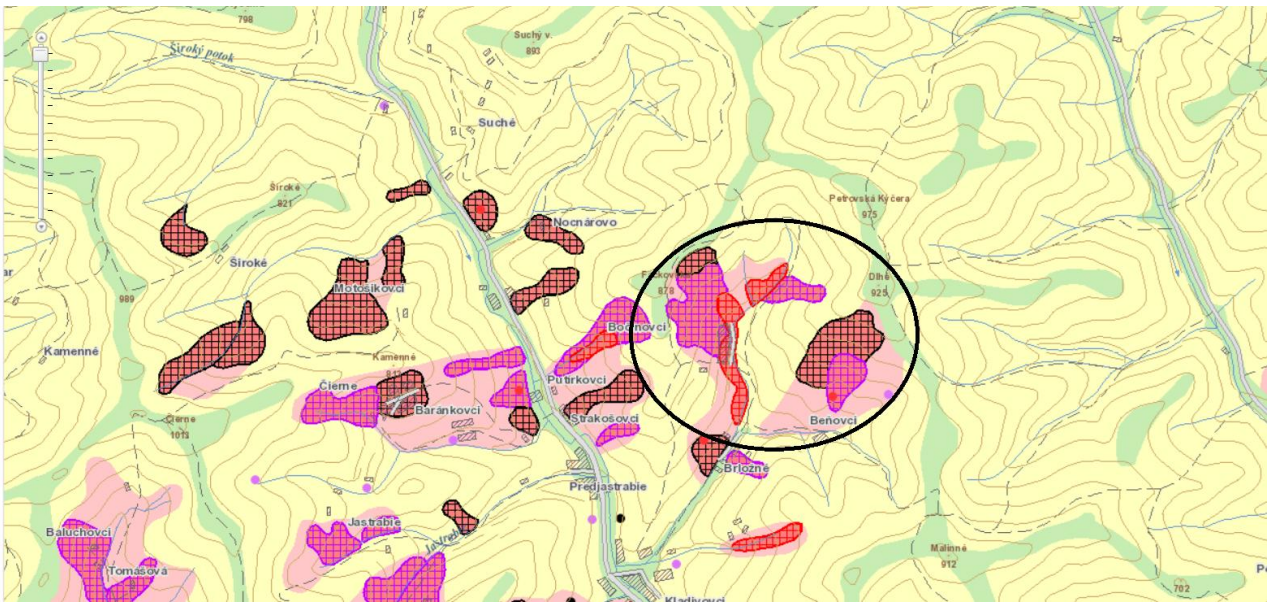
Výskumný test bol vykonaný pre zosuvy nachádzajúce sa 7–8 km severozápadne od mesta Bytča. Analyzovaná bola aktivita troch zón postihnutých svahovými deformáciami (Obrázok 1). Súbor zosuvných foriem sa nachádza v pramennej oblasti ľavostranného prítoku potoka Štiavnik, severne od obce Kladivovci (Obrázok 1). Prvý súbor skúmaných foriem sa nachádza bezprostredne

východne od osady Bocinovci. Pozostáva z oblastí s tromi rôznymi signatúrami vyznačenými na mape svahových deformácií Slovenska. Najsevernejšia časť tejto oblasti predstavuje malú neaktívnu zónu, v ktorej existuje možnosť opätovnej aktivácie zosuvu (čierna šrafúra na oranžovom podklade) (Obrázok 1). Druhá zóna prvej oblasti sa nachádza v jej centrálnej časti a je označená ako trvalo potenciálne aktívna zóna (ružová šrafúra na oranžovom podklade) (Obrázok 1). Posledná zóna tejto oblasti sa nachádza v jej južnej časti a je na mape jednoznačne označená ako aktívna (oranžová šrafúra na oranžovom podklade) (Obrázok 1).

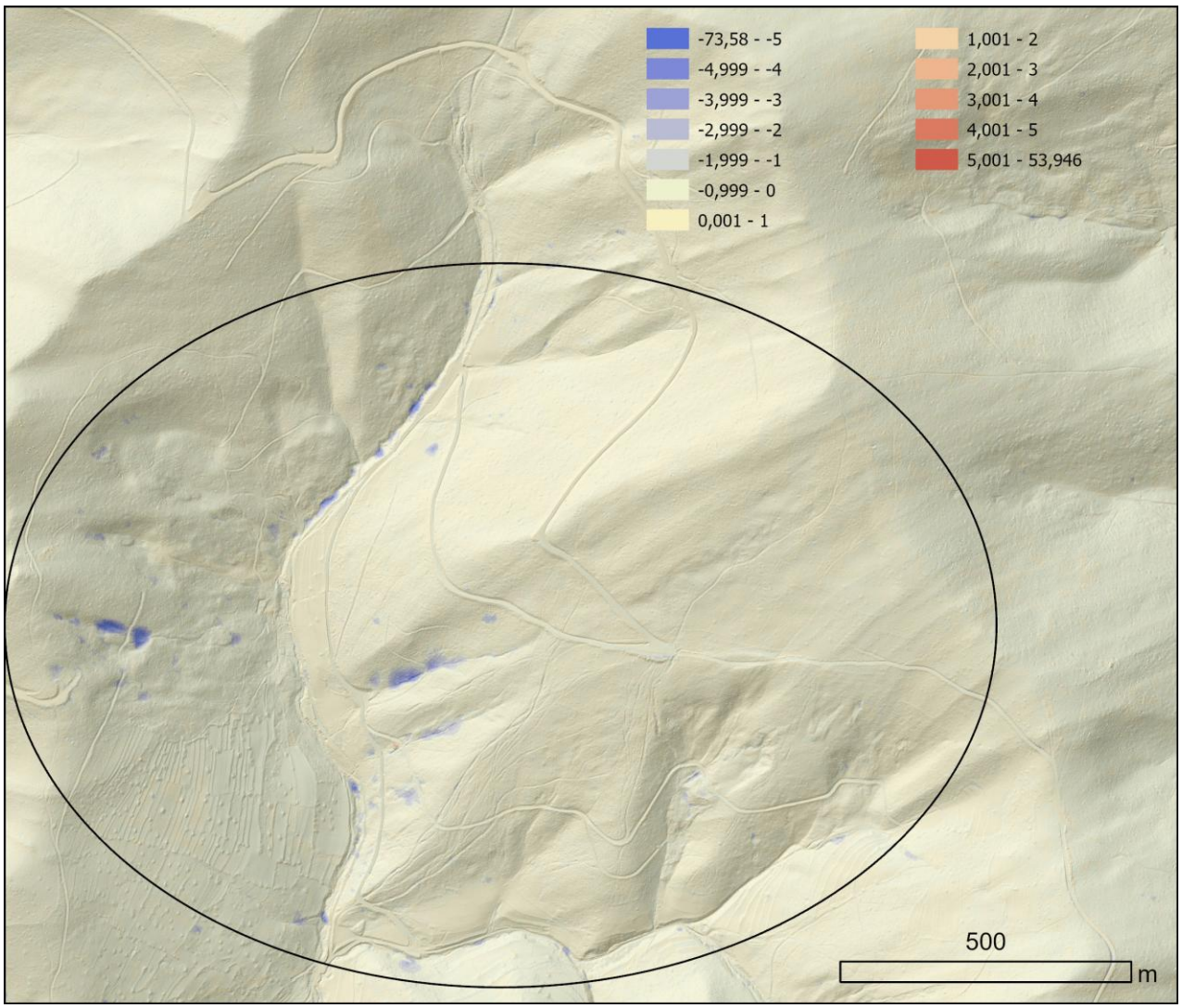
Druhá zo skúmaných oblastí sa nachádza v centrálnej časti územia, mierne posunutej smerom na sever. Pozostáva z dvoch zón. V severozápadnej časti sa nachádza jednoznačne aktívna zóna označená oranžovou šrafúrou na oranžovom podklade (Obrázok 1). Severovýchodná časť predstavuje potenciálne aktívnu zónu (ružová šrafúra na oranžovom podklade) (Obrázok 1). Posledná z analyzovaných oblastí sa nachádza vo východnej časti skúmaného súboru svahových deformácií. Táto oblasť leží severne od osady Benovci (Obrázok 1). V jej severnej časti sa nachádza neaktívna zóna s možnosťou opätovnej aktivácie (čierna šrafúra na oranžovom podklade), zatiaľ čo južná časť predstavuje potenciálne aktívnu zónu (ružová šrafúra na oranžovom podklade). To znamená, že z teoretického hľadiska je súčasnými svahovými pohybmi najviac ohrozená oblasť nachádzajúca sa v centrálnej časti skúmaného územia, prebiehajúca pozdĺž malého vodného toku (Obrázok 1). Na digitálnom modeli terénu sú viditeľné deformácie povrchu naznačujúce prítomnosť zosuvných oblastí (Obrázok 2). Vyskytujú sa tu malé konvexné aj konkávne formy reliéfu.

Na účely podrobného rozpoznania zmien prebiehajúcich v morfológii analyzovaného územia bola vykonaná porovnávacia analýza digitálnych modelov terénu (DMT) vytvorených na základe údajov získaných pomocou technológie LiDAR (Light Detection and Ranging). V rámci výskumu boli použité dva súbory výškových údajov: najstarší dostupný model a najnovší model zodpovedajúci stavu v roku 2024. Porovnanie oboch modelov umožnilo vytvoriť diferenčný model terénu, ktorý kvantitatívne znázorňuje zmeny reliéfu povrchu. Vysoká výšková presnosť a vysoké priestorové rozlíšenie údajov LiDAR umožnili identifikovať aj veľmi malé lokálne deformácie povrchu terénu, ktoré môžu svedčiť o aktivite zosuvných procesov.

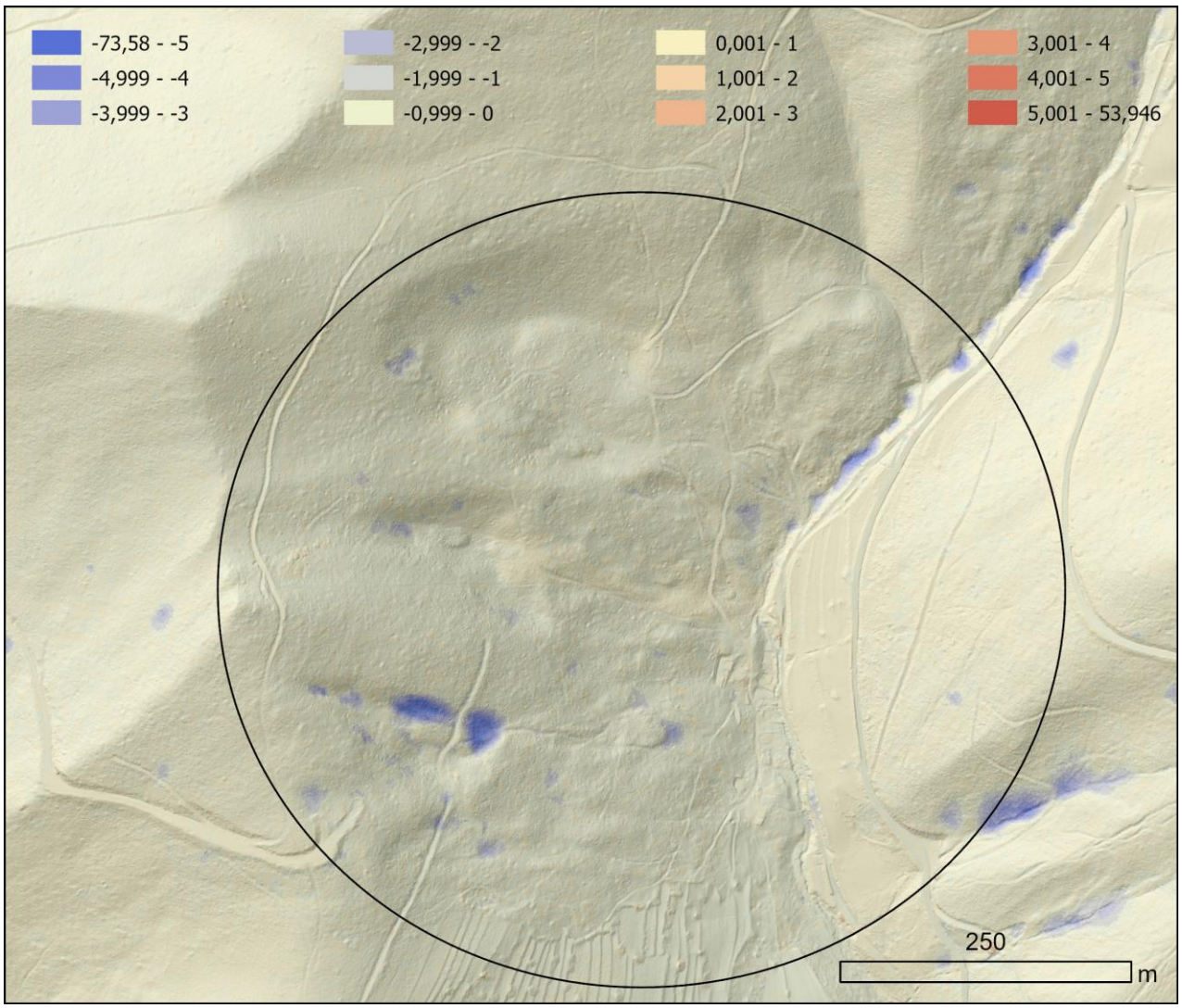
Výsledky získané počas analýzy boli navyše porovnané s modelom reliéfu terénu vypracovaným pre rok 2024, taktiež založeným na údajoch LiDAR, čo významne uľahčilo interpretáciu priestorového rozloženia identifikovaných zmien. Analýza priestorového rozmiestnenia diferenčných hodnôt umožnila vyčleniť oblasti charakterizované najvyššou intenzitou zmien povrchu terénu. Vykonané výpočty zároveň umožnili určiť rýchlosť prebiehajúcich posunov a smery pohybu zemných más v jednotlivých častiach skúmaného územia. Na základe získaných výsledkov bolo možné formulovať závery týkajúce sa dynamiky zosuvných procesov a charakteru prebiehajúcich svahových pohybov.



Obrázok 1. Lokalizácia zosuvov, pre ktoré bola vykonaná analýza. Zosuvy sa nachádzajú 7–8 km severozápadne od mesta Bytča.



Obrázok 2. Digitálny model terénu spolu s diferenčnými údajmi získanými na základe LiDAR dát, zobrazujúci reliéf terénu v rámci zosuvnej formy, pre ktorú bol vykonaný výskumný test (zobrazená je celá analyzovaná zóna).



Obrázok 3. Digitálny model terénu spolu s diferenčnými údajmi získanými na základe LiDAR dát, zobrazujúci reliéf územia v rámci zosuvnej formy, pre ktorú bol vykonaný výskumný test (na modeli je zobrazená iba najsevernejšie položená zóna).

3. Výsledky výskumu v numerickej forme spolu s nevyhnutnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a obrázkov.

Analiza modelu terenu na podstawie danych LiDAR

Zmeny reliéfu v rámci zosuvu neboli v sledovanom období výrazné. Morfologické transformácie terénu sa vyskytli predovšetkým v najsevernejšie položenej časti, pričom sa zohľadnili tri vyčlenené zóny opísané v kapitole o polohe a hlavných charakteristikách skúmaného územia (Obrázky 1, 2, 3). V tejto zóne je na mape deformácií pre celé Slovensko vyznačená aktívna zosuvná činnosť. Tá bola zaznamenaná najmä v dolných častiach svahu, zatiaľ čo vykonaná analýza odhalila zmeny povrchu terénu predovšetkým v horných častiach skúmanej oblasti (Obrázky 2 a 3). Tieto zmeny sú lokalizované hlavne v líniových eróznych ryhách, ktoré predstavujú oblasti epizodicky odvodňované počas intenzívnych dažďových zrážok. Zdá sa, že ide o zóny pretvárané najmä eróznymi procesmi, pričom podiel svahových pohybov je v tomto prípade menší. Možno predpokladať, že periodické zvýšenie povrchového odtoku podporuje koncentráciu denudačných procesov práve v týchto miestach.

Na analyzovanom modeli sú viditeľné prakticky výlučne zóny, v ktorých dochádza k odnosu materiálu (modré zóny znižovania povrchu), pričom neboli identifikované oblasti, v ktorých by dochádzalo k jeho akumulácii (zóny, ktoré by mali byť vyznačené žltou a červenou farbou). Môže to znamenať, že materiál podliehajúci erózii bol transportovaný po svahu nadol a nakoniec sa dostal do riečneho koryta. Na druhej strane sú úbytky materiálu pomerne veľké a miestami dosahujú až 4 m (Obrázky 2 a 3). To môže naznačovať, že počas realizácie leteckého LiDAR snímkovania a interpretácie bodového mračna sa vyskytli chyby nezávislé od spracovateľa analýzy. Je totiž ťažké predstaviť si také výrazné zníženie povrchu terénu bez súčasnej prítomnosti zreteľných akumulačných foriem na svahu. Nie je vylúčené ani to, že časť pozorovaných rozdielov súvisí s obmedzenou presnosťou použitých údajov alebo s rozdielnymi podmienkami ich získania.

Stredná zóna sa podobne ako vyššie opísaná oblasť vyznačuje prítomnosťou úbytkov materiálu, ktoré sa tiahnu pozdĺž líniových eróznych ryh, pričom na svahu chýbajú stopy akumulácie (Obrázok 2). Aj v tomto prípade mohla prebiehať erózia, v dôsledku ktorej bol materiál odvádzaný do riečneho koryta, alebo sú pozorované zmeny čiastočne výsledkom chýb modelu nezávislých od spracovateľa. Priestorový charakter týchto zmien je podobný ako v severnej časti územia, čo môže naznačovať podobný mechanizmus ich vzniku. Zóna situovaná na východe je naopak prakticky bez akýchkoľvek zmien reliéfu (Obrázok 2), čo poukazuje na jej vysokú stabilitu počas sledovaného obdobia a absenciu výraznejšej aktivity svahových procesov.

4. Závery z vykonaných výskumov vo forme správy obsahujúcej podrobné analýzy spolu s odhadom rizika vyskytujúceho sa v skúmanej oblasti (zosuvného, povodňového alebo súvisiaceho so znečistením ovzdušia v závislosti od typu vykonaného výskumného testu).

Analýza ukázala, že najsevernejšia časť analyzovanej zóny je aktívna, pričom určitú mieru aktivity vykazovala aj stredná zóna. Naopak, najvýchodnejšie položená zóna sa ukázala ako neaktívna. Aktivita svahu sa prejavovala predovšetkým znižovaním povrchu terénu, ktoré bolo spôsobené najmä eróznymi procesmi, čo potvrdzuje absencia identifikovaných vypuklých akumulačných foriem spojených s presunom zosuvného materiálu. Zníženie povrchu terénu dosahovalo miestami až niekoľko metrov. Tieto zmeny sa sústreďovali najmä v oblastiach líniových eróznych rýh a zón periodického odtoku zrážkových vôd, čo ďalej poukazuje na významnú úlohu eróznych procesov pri modelovaní analyzovaného svahu.

Na základe vykonanej analýzy je však veľmi ťažké vyvodiť jednoznačné závery týkajúce sa charakteru a rozsahu prebiehajúcich procesov. Na jednej strane môže prítomnosť prejavov erózie na svahu svedčiť o intenzívnych zmenách povrchu spôsobených odnosom materiálu počas období zvýšených zrážok. Na druhej strane sa takéto výrazné úbytky materiálu javia ako málo pravdepodobné. Rozsah eróznych procesov by musel byť v skúmanej oblasti mimoriadne veľký, aby viedol k zníženiu povrchu terénu o niekoľko metrov. Táto možnosť sa však zdá byť málo pravdepodobná vzhľadom na skutočnosť, že na svahu neboli identifikované ani malé akumulačné zóny, v ktorých by sa mohol erodovaný materiál ukladať. Možno predpokladať, že odnesený materiál bol úplne transportovaný do riečneho koryta, avšak aj takýto scenár by si vyžadoval veľmi vysokú intenzitu transportných procesov.

Nie je možné vylúčiť ani to, že časť pozorovaných zmien vyplýva z obmedzení samotných vstupných údajov. Je možné, že pri spracovaní údajov LiDAR nebola dostatočne vykonaná filtrácia bodového mračna získaného skenovaním, čo mohlo ovplyvniť presnosť zobrazenia povrchu terénu. Rovnako je možné, že k chybám došlo pri tvorbe digitálnych modelov reliéfu pre skúmanú oblasť. Rozdiely v presnosti jednotlivých modelov, odlišné podmienky získavania údajov alebo lokálne vplyvy vegetačného pokryvu mohli viesť k vzniku zdanlivých výškových zmien. Z tohto dôvodu by mala byť interpretácia získaných výsledkov vykonávaná s veľkou opatrnosťou. Ich overenie

pomocou doplnkových terénnych meraní alebo nezávislých údajov by mohlo prispieť k spoľahlivejšiemu a jednoznačnejšiemu hodnoteniu aktivity analyzovaného zosuvu.

Katowice, 19.05.2026

PREZES ZARZĄDU
Oddział Górnośląski, Polskie Towarzystwo Badań Czwartorzędu
dr hab. Jerzy Cabała

dr hab. Jerzy Cabała