Správa o výskumnom teste týkajúcom sa rizika zosuvov pôdy s využitím radarovej interferometrie InSAR pre zosuvy pôdy okolo mesta Medzilaborce

Odborný dohľad:

Dr Albert Ślęzak

1. Výskumný plán vrátane priebehu výskumu rozdeleného na terénnu a laboratórnu prácu spolu s uvedením ďalších krokov vo výskumnom procese

Terénna práca

- terénna obhliadka s predbežnou analýzou terénu,
- analýza terénu viditeľného na zosuvoch pôdy okolo mesta okolo mesta Medzilaborce),
- identifikácia oblastí potenciálne ohrozených zosuvmi pôdy,
- identifikácia oblasti, ktorú je potrebné analyzovať pomocou radarovej interferometrie,
- určenie hraníc, v rámci ktorých bude na základe radarovej interferometrie vypracovaný diferenciálny model terénu.

Laboratórna práca

- určenie obdobia, v ktorom sa bude vykonávať analýza zosuvov pôdy pomocou radarovej interferometrie,
- výber máp, na základe ktorých sa bude analýza vykonávať,
- výber snímok a bodov pre analýzu zosuvov pôdy pomocou radarovej interferometrie s cieľom identifikovať zmeny v reliéfe terénu,
- plánovanie typov grafov ilustrujúcich zmeny povrchu zeme pomocou radarovej interferometrie,
- určenie zón, v ktorých bola identifikovaná zosuvová aktivita,
- posúdenie zosuvovej aktivity v skúmanej oblasti.

2. Popis výskumného procesu, vrátane teoretických predpokladov, popisu metódy, možného odberu vzoriek v teréne a následných krokov laboratórnej práce.

Teoretické predpoklady (radarová interferometria)

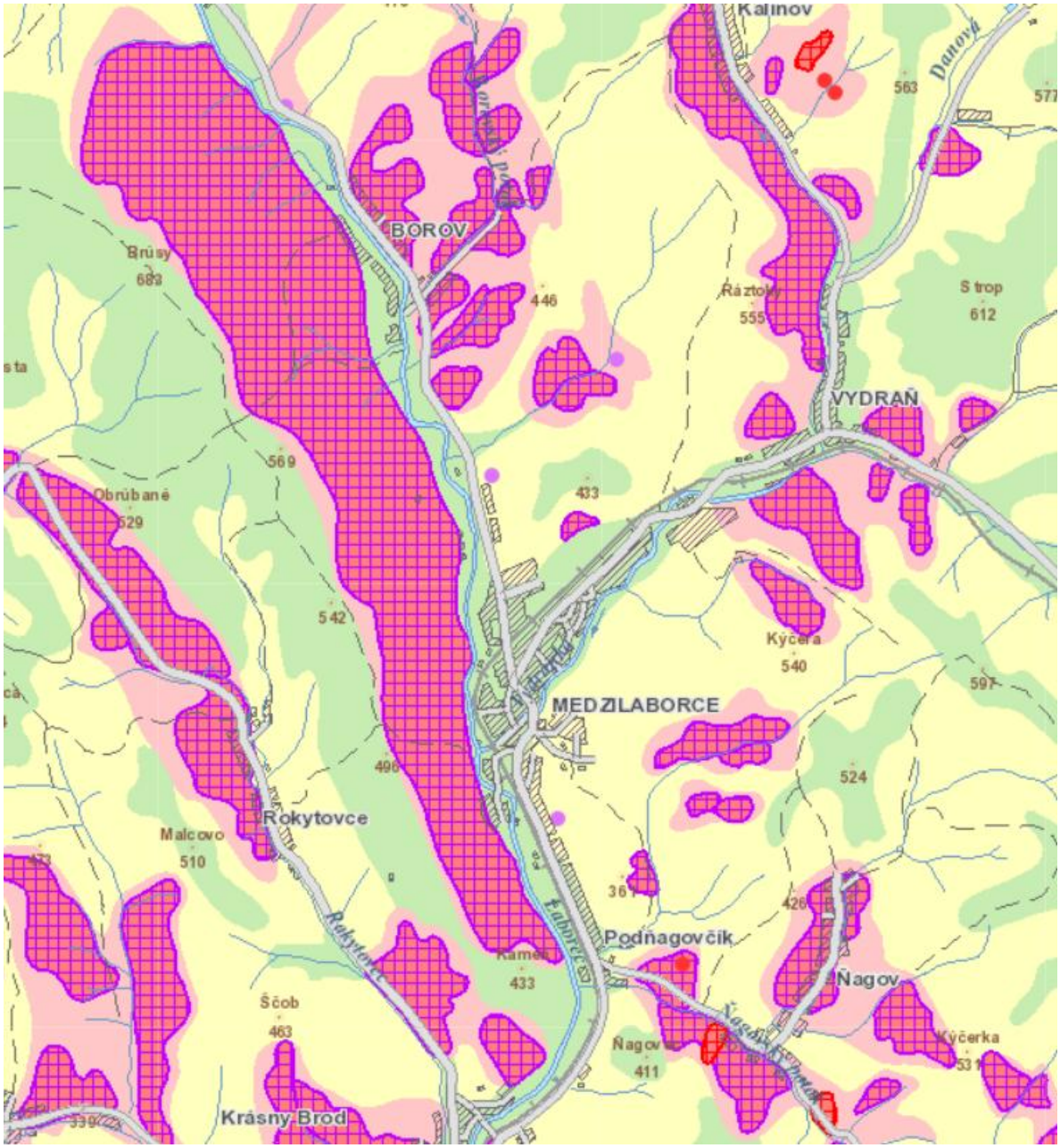
Radarová interferometria (InSAR) predstavuje jednu z najmodernejších a najefektívnejších metód diaľkového prieskumu Zeme využívaných pri monitorovaní a analýze zosuvov pôdy. Jej princíp spočíva vo vyhodnocovaní zmien fázy radarového signálu zaznamenaného družicami počas opakovaných preletov nad tým istým územím. Vďaka satelitným misiám, akou je napríklad program Sentinel-1 Európskej vesmírnej agentúry (ESA), je možné zabezpečiť pravidelné, systematické a dlhodobé sledovanie deformácií zemského povrchu na rozsiahlych územiach. Interferogramy vytvorené z radarových snímok umožňujú detegovať vertikálne aj horizontálne pohyby terénu s veľmi vysokou presnosťou, často dosahujúcou úroveň niekoľkých milimetrov. Pri výskume zosuvných procesov poskytuje InSAR možnosť identifikovať nielen náhle a rýchle pohyby svahov, ale aj pomalé, dlhodobo prebiehajúce deformácie, ktoré bývajú klasickými geodetickými metódami len ťažko zachytiteľné. Významnú úlohu zohrávajú viacčasové interferometrické analýzy, ktoré zvyšujú presnosť meraní a umožňujú sledovať vývoj deformácií v priebehu dlhších časových období. Mimoriadne účinnou technikou je PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR), ktorá využíva stabilné objekty odrážajúce radarový signál, napríklad budovy, skalné útvary, mosty alebo iné prvky infraštruktúry. Táto metóda umožňuje detailne určiť rýchlosť a smer deformácií svahov na základe dlhodobých časových radov meraní a poskytuje cenné informácie o vývoji nestabilných území. V posledných rokoch sa jej význam ešte zvýšil vďaka rastúcej dostupnosti satelitných dát a zdokonaľovaniu algoritmov spracovania radarových snímok. V kombinácii s geografickými informačnými systémami (GIS) umožňuje vytvárať podrobné mapy deformácií a identifikovať oblasti so zvýšeným rizikom vzniku zosuvov.

Radarová interferometria nachádza široké uplatnenie najmä v horských a ťažko dostupných regiónoch, kde je realizácia tradičných geodetických meraní technicky náročná alebo ekonomicky nevýhodná. Veľkou výhodou tejto technológie je schopnosť monitorovať rozsiahle územia bez potreby inštalácie meracích zariadení priamo v teréne. V oblastiach pokrytých hustou vegetáciou alebo lesnými porastmi však môže dochádzať k dekorelácii radarového signálu, čo môže negatívne ovplyvniť presnosť výsledkov. Na elimináciu týchto problémov sa využívajú pokročilé postupy založené na trvalých rozptyľovačoch alebo

metódy malých základní známe pod označením SBAS (Small Baseline Subset). Interferometrické údaje sa často kombinujú s geologickými, geomorfologickými, hydrologickými a klimatickými informáciami, čo umožňuje komplexnejšie pochopenie mechanizmov vzniku a vývoja zosuvných procesov. Dôležitou oblasťou využitia radarovej interferometrie je aj hodnotenie vplyvu intenzívnych zrážok, dlhodobých klimatických zmien a extrémnych meteorologických javov na aktivitu svahových pohybov. V spojení s meteorologickými údajmi môže táto technológia podporovať budovanie systémov včasného varovania pred zosuvmi pôdy a významne prispievať k ochrane obyvateľstva. Zároveň sa využíva pri monitorovaní stability dopravnej a technickej infraštruktúry nachádzajúcej sa v rizikových oblastiach, ako sú cesty, železničné trate, mosty alebo obytné zóny. Mimoriadny význam má najmä v urbanizovaných regiónoch a pozdĺž dopravných koridorov, kde môžu zosuvy spôsobovať značné hospodárske škody a ohrozovať bezpečnosť dopravy. Radarová interferometria zároveň pomáha znižovať náklady na výskum a monitoring tým, že obmedzuje potrebu rozsiahlych terénnych prác a umožňuje efektívnejšie plánovanie monitorovacích aktivít. V súčasnosti patrí medzi kľúčové nástroje integrovaných systémov monitorovania zosuvných rizík a zohráva významnú úlohu pri ochrane krajiny, infraštruktúry aj ľudských životov. Navyše poskytuje dôležité podklady pre územné plánovanie a rozhodovacie procesy v oblastiach ohrozených svahovými deformáciami.

Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa okolo mesta Medzilaborce (obr. 1). Ide spravidla o malé geomorfologické formy, pričom len niektoré z nich sa nachádzajú v blízkosti zástavby. Malá časť zosuvných území nachádzajúcich sa južne od mesta bola na mape vyznačená červenými/oranžovými signatúrami a predstavuje **Rajón nestabilných území** (územia svahových deformácií so stredným až vysokým stupňom náchylnosti na aktivizáciu svahových deformácií; svahy s aktívnymi, potenciálnymi a stabilizovanými formami svahových deformácií, s výnimkou stabilizovaných podpovrchových plazivých deformácií a stabilizovaných skalných zrútení). Aktivizácia týchto svahových deformácií je možná v dôsledku prírodných podmienok alebo negatívnych antropogénnych faktorov, prípadne ich kombinácie.
Územia označené ružovou farbou, ktoré sa na skúmanom území vyskytujú pomerne často, taktiež predstavujú **Rajón nestabilných území** s rovnakou charakteristikou stupňa náchylnosti na aktivizáciu svahových deformácií. Ide o svahy s aktívnymi, potenciálnymi a stabilizovanými formami svahových deformácií (s výnimkou stabilizovaných podpovrchových plazivých deformácií a stabilizovaných skalných zrútení), pričom ich opätovná aktivácia môže nastať pôsobením prírodných alebo antropogénnych faktorov.



Obrázok 1. Poloha analyzovaných zosuvov pôdy.

Zdroj: https://app.geology.sk/atlassd/

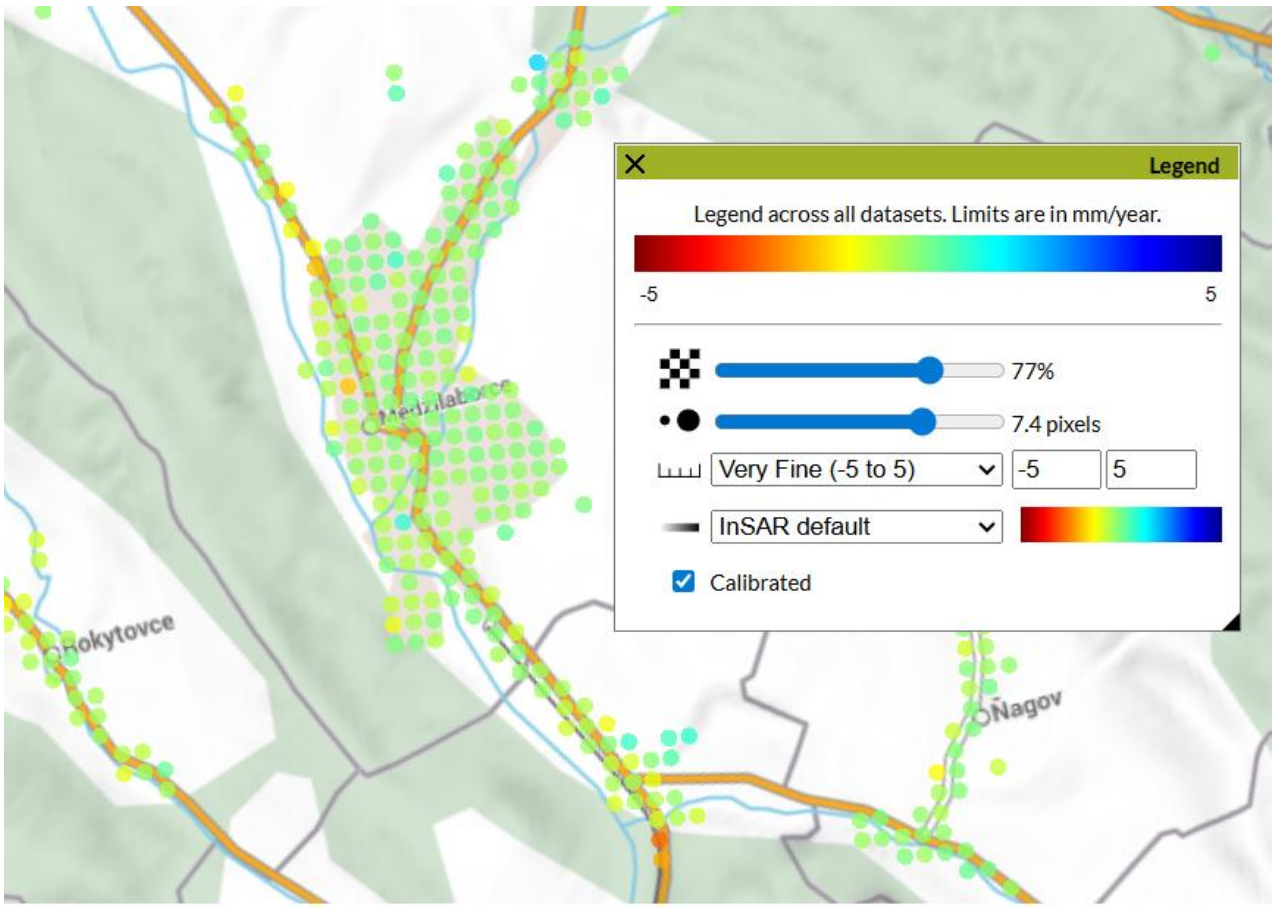
Využitie údajov z radarovej interferometrie umožňuje analýzu pohybu jednotlivých bodov terénu, napr. okrajov striech budov, v období 2019–2023.S cieľom identifikovať zmeny v morfológii terénu v rámci študovanej oblasti bola vykonaná priestorová analýza pomocou radarovej interferometrie. Pre oblasť nachádzajúcu sa v okolo mesta Medzilaborce boli posuny vizualizované pomocou pevných bodov, v ktorých boli v rokoch 2019–2023 vykonané interferometrické merania. Okrem toho bola do štúdie pridaná analýza zmien polohy troch vybraných bodov vo zvýšenom rozlíšení. Pre štúdiu boli použité body s najvyššou aktivitou zosuvov pôdy. Analýza bola vykonaná pre tri úrovne vertikálnych zmien bodov, a teda reliéfu terénu, pre 5 mm, 10 mm a 20 mm za rok.

3. Výsledky výskumu v číselnej podobe spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a výkresov.

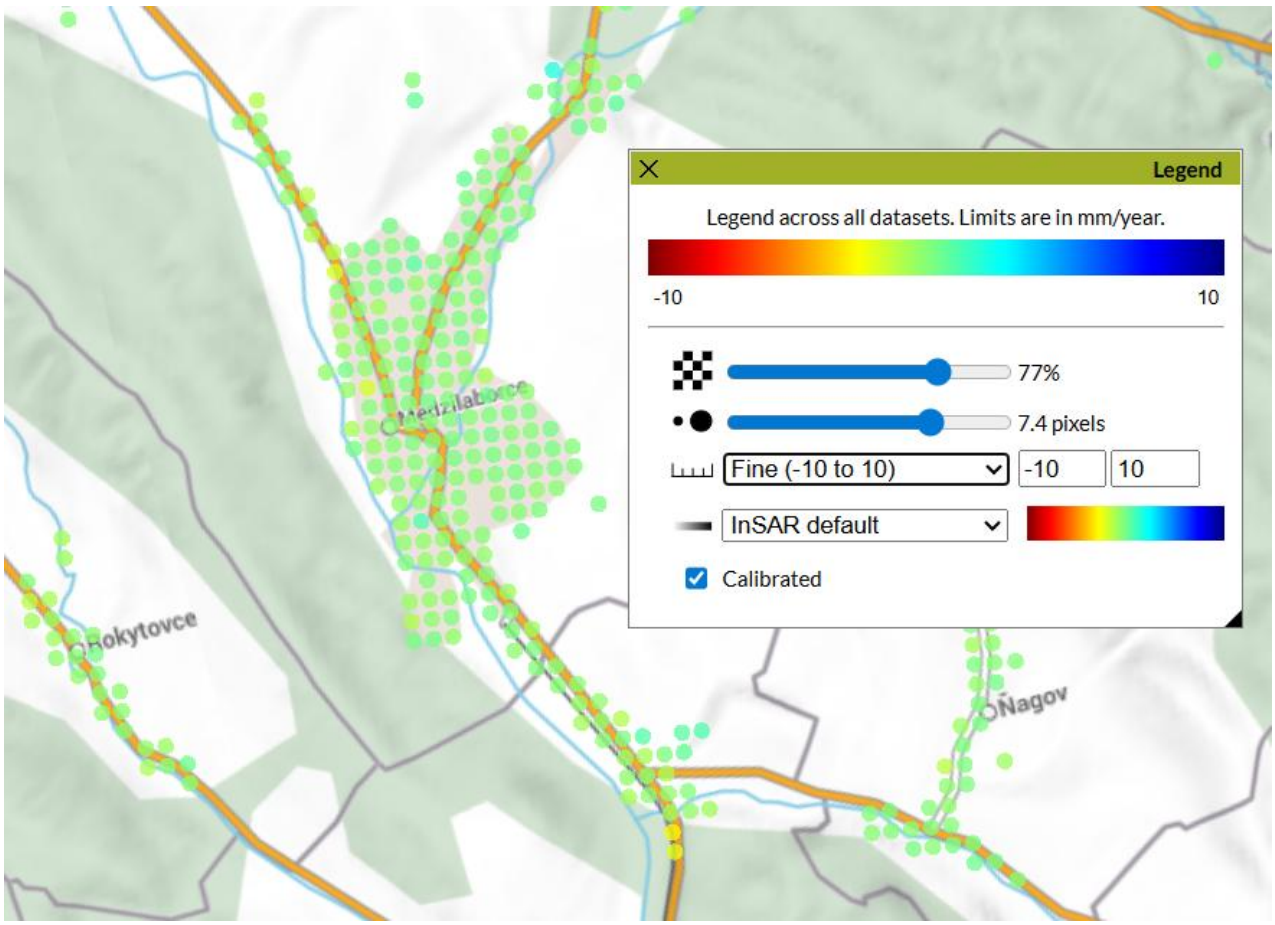
Výskum aktivity zosuvných pohybov v okolí mesta Medzilaborce bol realizovaný na základe analýzy zmien povrchu terénu pomocou radarovej interferometrie (InSAR). Body zahrnuté do analýzy sa nachádzali v zónach vyznačených na mapách aktivity zosuvných procesov pre celé územie Slovenska ako oblasti potenciálne ohrozené svahovými deformáciami. Hoci radarová interferometria dosahuje najlepšie výsledky predovšetkým v zastavaných územiach, kde sa nachádzajú stabilné objekty zabezpečujúce kvalitný odraz radarového signálu, v skúmanom regióne bolo možné analyzovať aj viaceré body situované mimo súvislej zástavby. Analýza bola vykonaná na základe údajov zhromaždených počas päťročného obdobia rokov 2019–2024. Počas tohto obdobia bolo skúmané územie pravidelne monitorované radarovými satelitmi, čo umožnilo hodnotiť zmeny výšky zemského povrchu a identifikovať deformácie súvisiace so svahovými procesmi. Získané výsledky umožnili určiť smer aj intenzitu pohybov povrchu v jednotlivých častiach skúmaného územia. Analýza bola realizovaná v dvoch hlavných skúmaných oblastiach. Prvá z nich sa nachádzala severne od mesta Medzilaborce v okolí obce Borov (obr. 1). V tejto oblasti boli identifikované zóny vykazujúce zdvíhanie aj pokles povrchu terénu. Tempo zdvíhania dosahovalo približne 2 až 4 mm/rok, zatiaľ čo pokles povrchu sa pohyboval v rozmedzí 2 až 3 mm/rok (obr. 2, 3, 4). Mimoriadne dôležitým zistením je výskyt susediacich zón zdvíhania a poklesu, ktoré predstavujú typický prejav aktivity svahových procesov. Takéto usporiadanie deformácií môže naznačovať pomalý pohyb horninového a zvetraninového materiálu na svahoch. Rozsah zaznamenaných zmien však naznačuje, že intenzita týchto procesov je pomerne nízka a má skôr dlhodobý než náhly charakter. Druhá analyzovaná oblasť sa nachádzala južne od mesta Medzilaborce. Aj v tomto priestore boli zaznamenané zóny poklesu aj zdvíhania povrchu terénu. Pokles

dosahoval približne 2–3 mm/rok, zatiaľ čo zdvíhanie sa pohybovalo v rozmedzí 3–4 mm/rok (obr. 2, 3, 4). Tieto hodnoty sú veľmi podobné výsledkom získaným v severnej časti skúmaného regiónu. V oboch oblastiach sa deformácie vyznačujú podobnou intenzitou a súčasný výskyt pozitívnych aj negatívnych zmien výšky môže naznačovať aktivitu svahových pohybov. Hoci zaznamenané deformácie nie sú výrazné, ich priestorové rozloženie poukazuje na možnú prítomnosť pomalých zosuvných procesov, ktoré sa podieľajú na formovaní reliéfu územia.

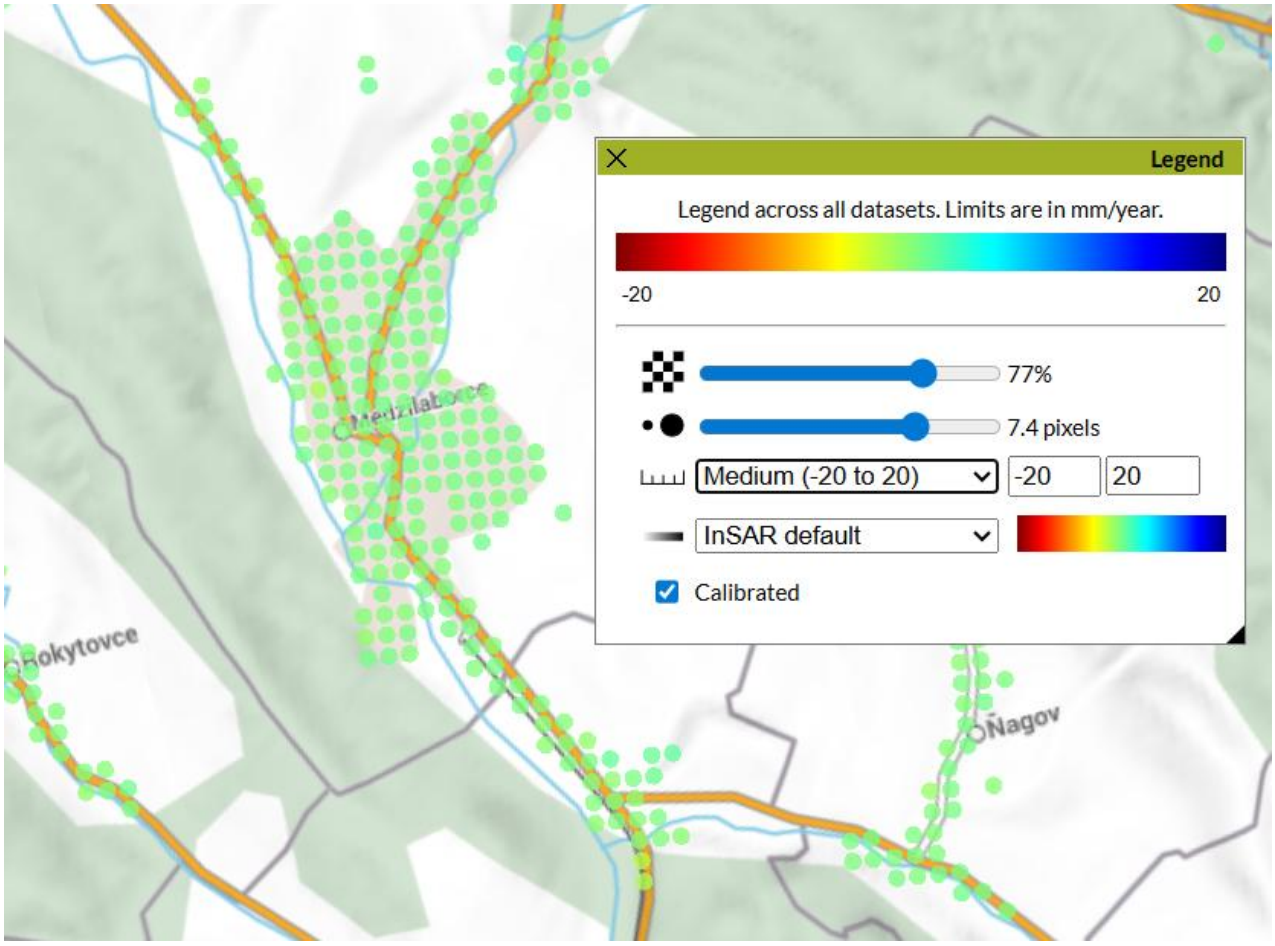
Súčasťou výskumu bola aj podrobná analýza zmien polohy vybraných monitorovaných bodov reprezentujúcich obe skúmané oblasti. V zóne nachádzajúcej sa južne od Medzilaboriec vykázal jeden z bodov zvýšenie výšky približne o 14 mm počas rokov 2019–2024, zatiaľ čo druhý bod poklesol približne o 8 mm. V severnej oblasti pri obci Borov bol jeden z analyzovaných bodov zdvihnutý približne o 15 mm počas päťročného obdobia pozorovania, zatiaľ čo druhý zaznamenal pokles o približne 6–7 mm. Tieto výsledky potvrdzujú existenciu lokálnych deformácií zemského povrchu a poukazujú na výraznú priestorovú variabilitu zmien aj na relatívne malých vzdialenostiach. Získané údaje naznačujú, že severná aj južná časť skúmaného územia sú geomorfologicky aktívne a zaznamenané deformácie môžu súvisieť s pomalými zosuvnými procesmi prebiehajúcimi na svahoch v okolí mesta Medzilaborce.



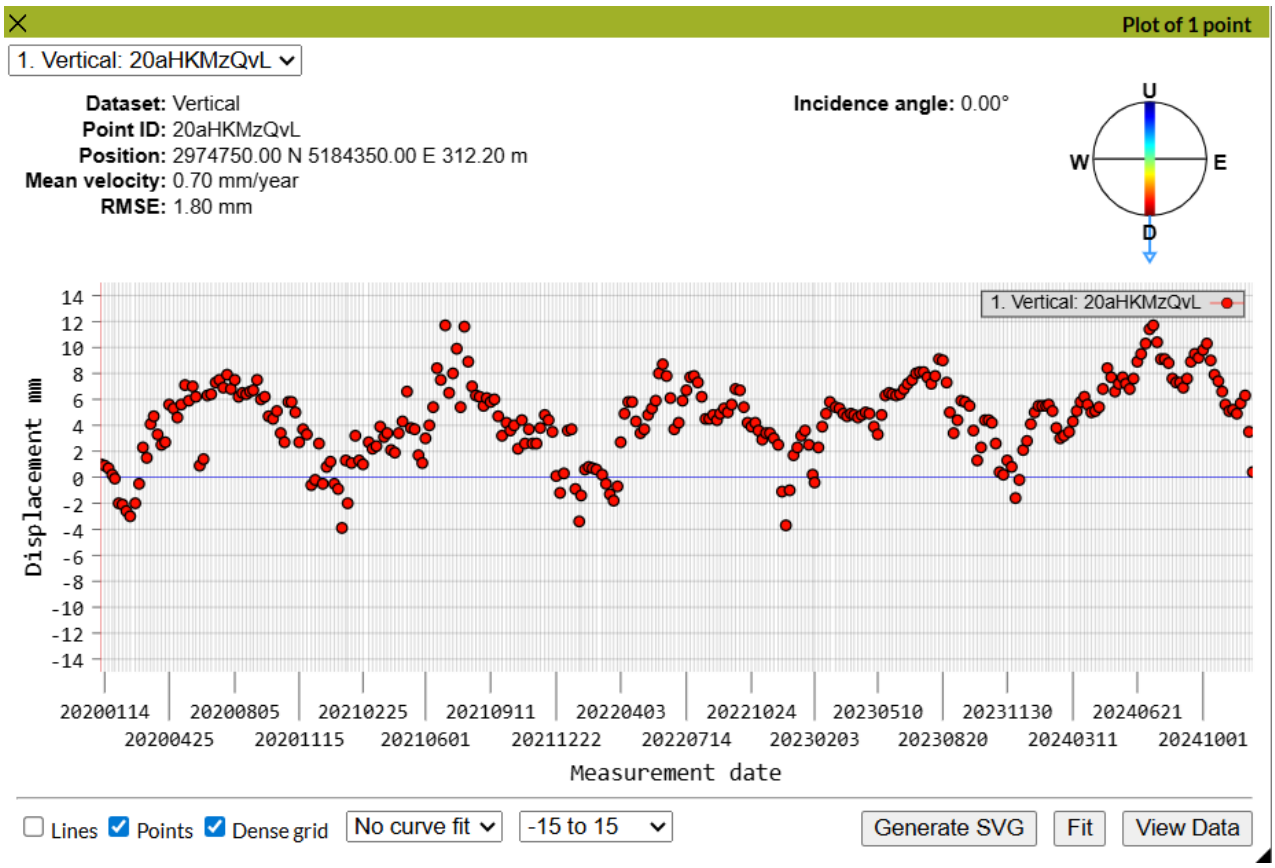
Obrázok 2. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



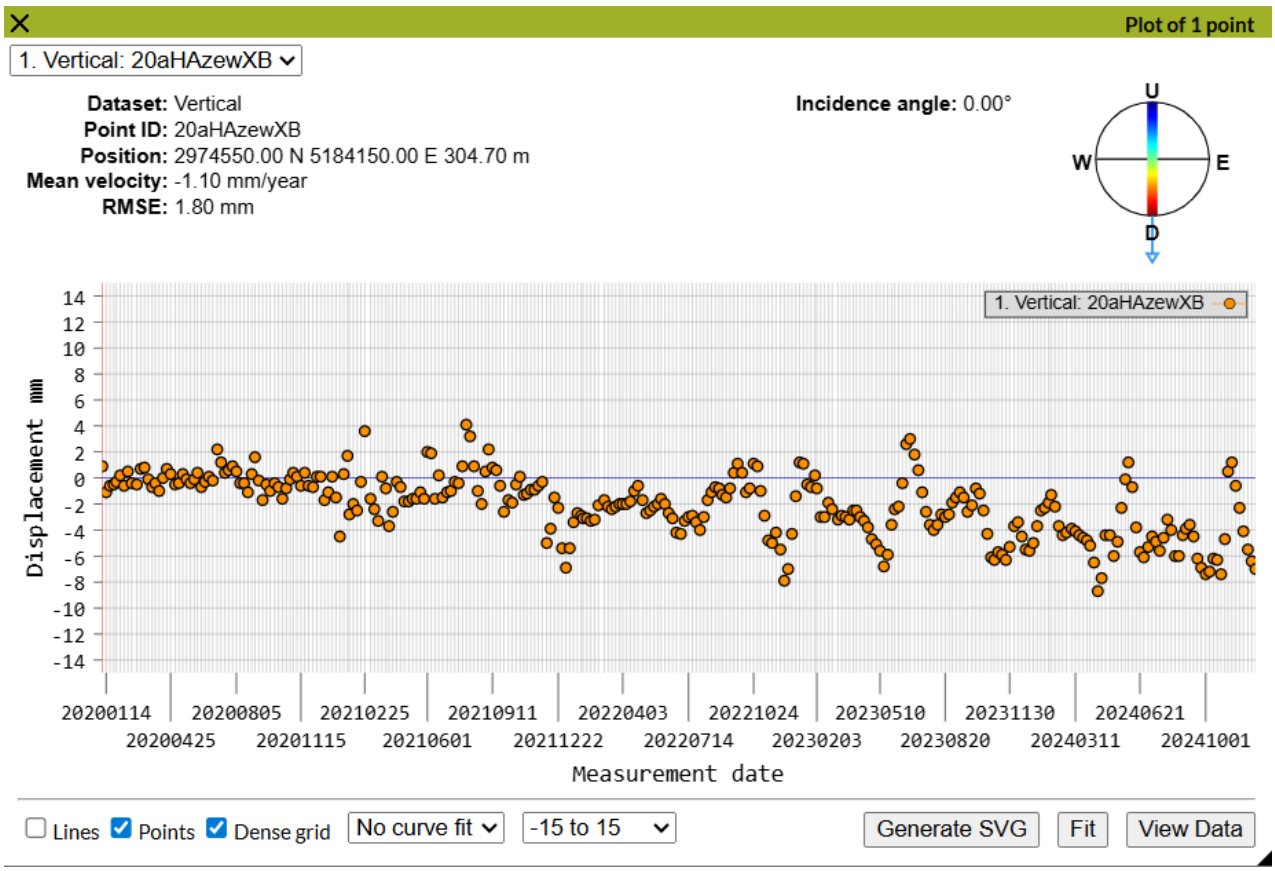
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



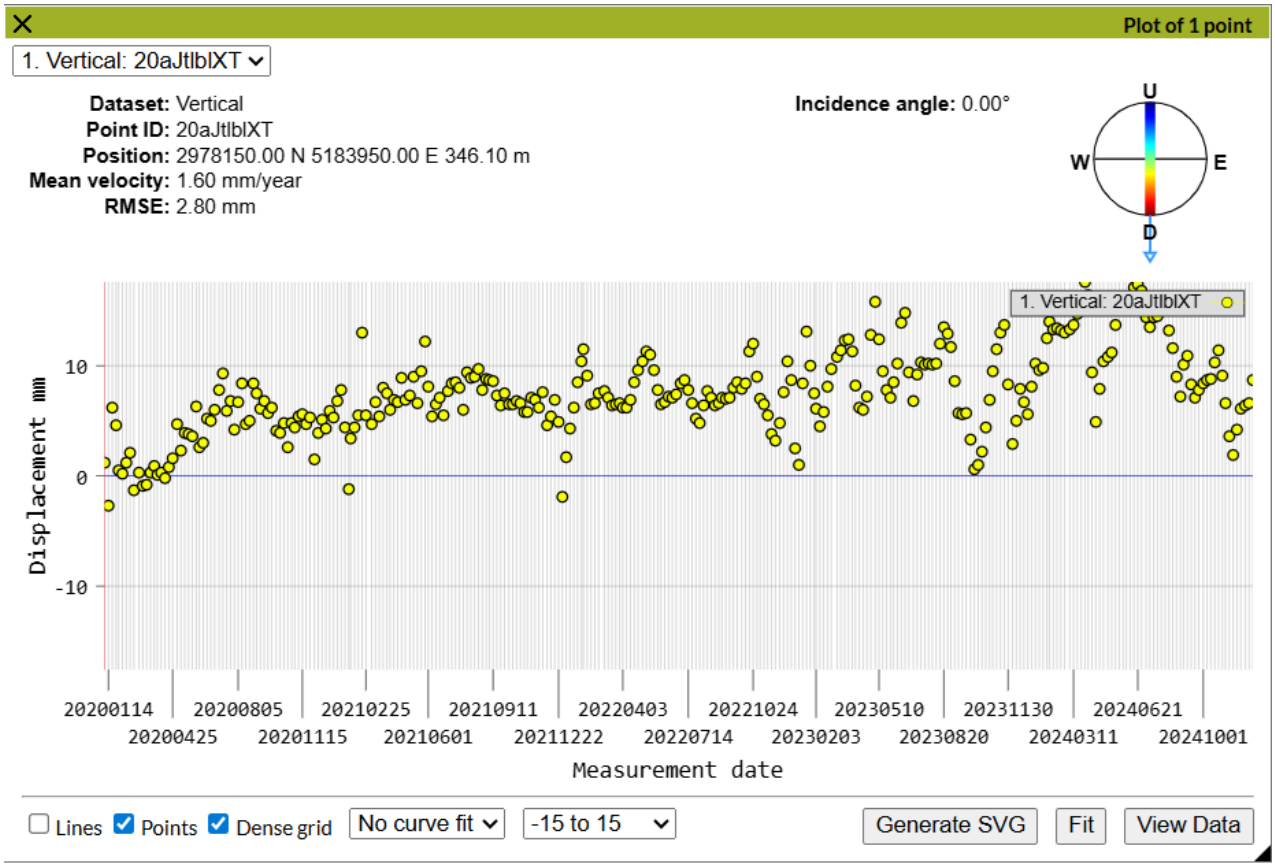
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 20 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



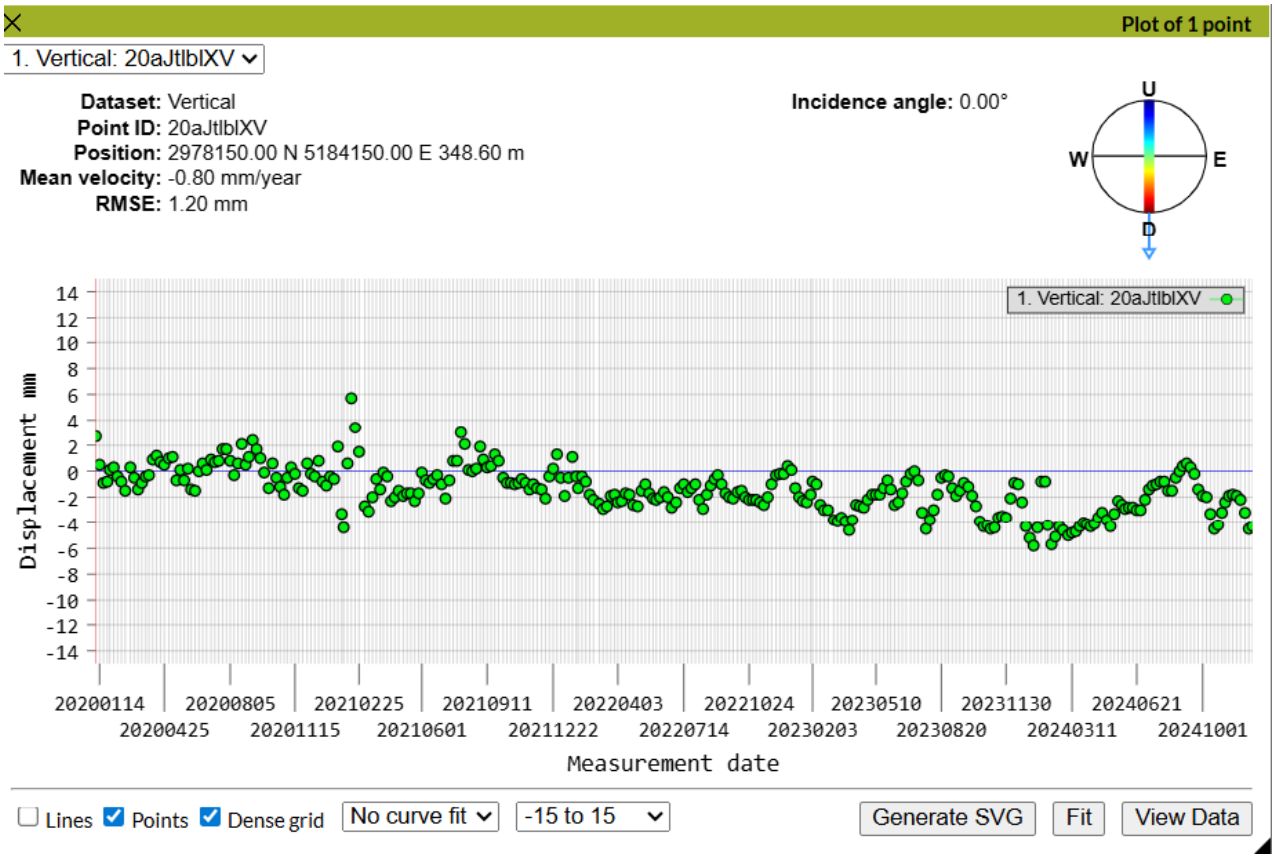
Obrázok 5. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



Obrázok 6. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 2.



Obrázok 7. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 3.



Obrázok 8. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 4.

4. Závery z výskumu vykonaného vo forme štúdie obsahujúcej podrobné analýzy spolu s hodnotením rizika vyskytujúceho sa v testovanej oblasti (zosuvy pôdy, povodne, znečistenie ovzdušia, v závislosti od typu výskumného testu).

Výskum aktivity zosuvných pohybov v okolí mesta Medzilaborce bol realizovaný pomocou radarovej satelitnej interferometrie (InSAR) pre obdobie rokov 2019–2024. Analyzované body sa nachádzali v oblastiach označených na slovenských mapách zosuvného ohrozenia ako územia potenciálne vystavené svahovým pohybom. Výsledky umožnili určiť smer a intenzitu deformácií zemského povrchu a posúdiť aktivitu svahových procesov. Prvá skúmaná oblasť, nachádzajúca sa severne od Medzilaboriec v okolí obce Borov, vykazovala zdvíhanie aj pokles povrchu terénu. Tempo zdvíhania dosahovalo 2–4 mm/rok, zatiaľ čo tempo poklesu predstavovalo 2–3 mm/rok. Susediaci výskyt zón zdvíhania a poklesu naznačuje prítomnosť aktívnych, hoci málo intenzívnych zosuvných procesov. Podobné hodnoty deformácií boli zaznamenané aj v druhej oblasti nachádzajúcej sa južne od mesta Medzilaborce, kde pokles terénu dosahoval 2–3 mm/rok a zdvíhanie 3–4 mm/rok. Analýza vybraných bodov preukázala zvýšenie výšky približne o 14–15 mm a pokles o približne 6–8 mm počas piatich rokov pozorovania. Zaznamenané deformácie potvrdzujú existenciu lokálnych pohybov povrchu s rozdielnou intenzitou. Výsledky naznačujú, že severná aj južná časť skúmaného územia zostávajú geomorfologicky aktívne a pozorované zmeny môžu súvisieť s pomalými zosuvnými procesmi.

PREZES ZARZĄDU
Oddział Górnośląski Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi

Katowice, 25.05.2026

dr hab. Jerzy Cabała