Správa o výskumnom teste týkajúcom sa rizika zosuvov pôdy s využitím radarovej interferometrie InSAR pre zosuvy pôdy na východ a na juh od mesta Bardejov

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 na východ a na juh od mesta Bardejov
- 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.

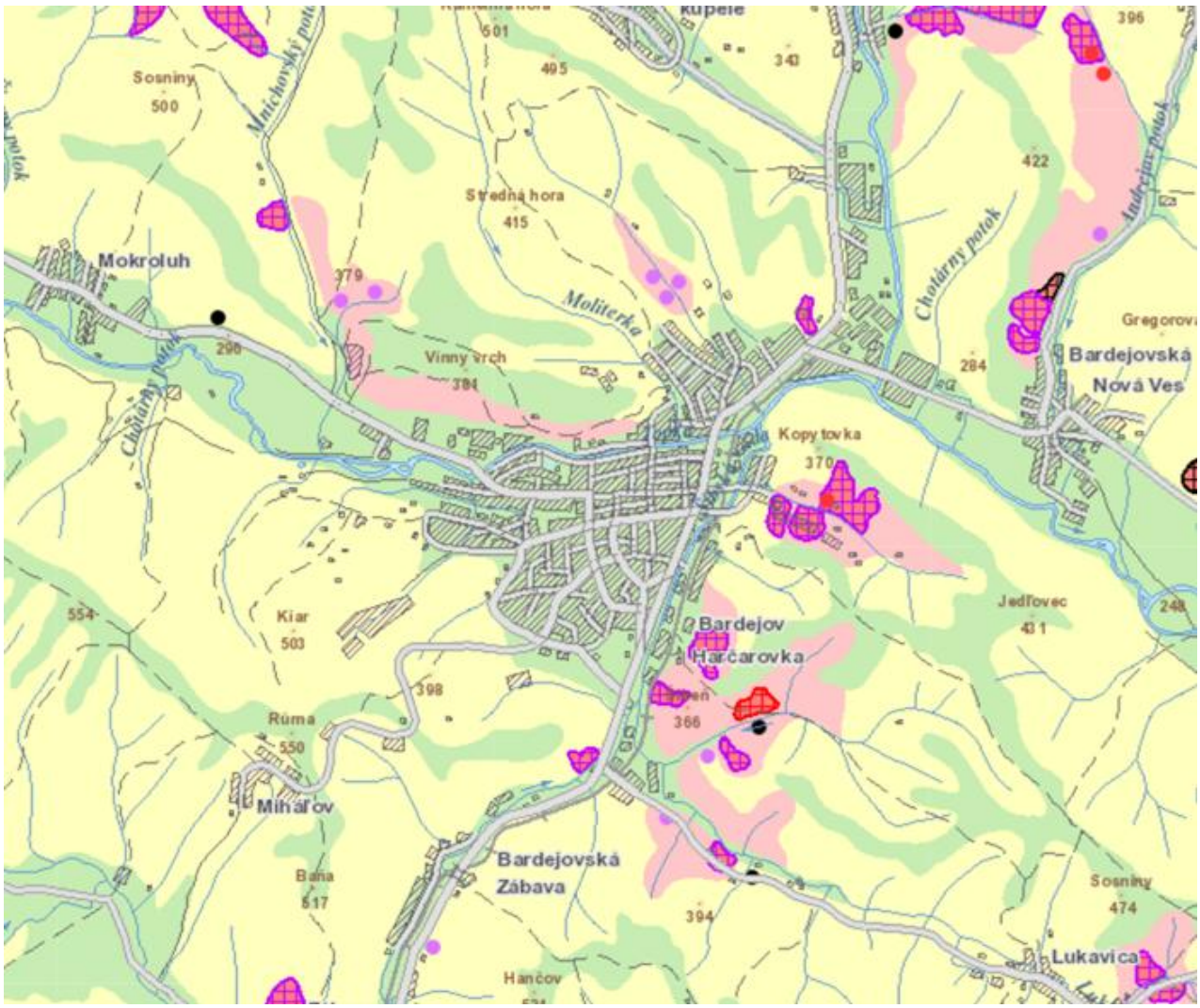
Teoretické predpoklady (radarová interferometria)

Radarová interferometria (InSAR) predstavuje jednu z najpokročilejších metód diaľkového prieskumu Zeme využívaných pri monitorovaní a hodnotení zosuvov pôdy. Jej princíp spočíva v analýze zmien fázy radarového signálu zaznamenaného satelitmi počas viacerých preletov nad tým istým územím. Vďaka družicovým misiám, ako je napríklad program Sentinel-1 prevádzkovaný Európskou vesmírnou agentúrou (ESA), je možné systematicky sledovať deformácie zemského povrchu na veľkých plochách počas dlhého časového obdobia. Spracované interferogramy umožňujú detegovať vertikálne aj horizontálne pohyby terénu s presnosťou dosahujúcou niekoľko milimetrov. Pri skúmaní zosuvných javov poskytuje InSAR schopnosť zachytiť nielen rýchle a výrazné pohyby svahov, ale aj postupné deformácie prebiehajúce počas dlhších období, ktoré by tradičné metódy často nedokázali spoľahlivo odhaliť. Významným prínosom sú viaccasové interferometrické prístupy, ktoré zvyšujú kvalitu a dôveryhodnosť výsledkov. Medzi najčastejšie využívané patrí metóda PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR), založená na analýze stabilných objektov odrážajúcich radarové žiarenie, napríklad budov, skalných výchozov alebo prvkov technickej infraštruktúry. Táto technika umožňuje presne určovať rýchlosť deformácií a sledovať ich vývoj v dlhodobých časových radoch. Radarová interferometria nachádza uplatnenie predovšetkým v horských a menej prístupných regiónoch, kde je realizácia klasických geodetických meraní technicky náročná alebo finančne nákladná. Medzi jej hlavné výhody patrí možnosť monitorovať rozsiahle územia bez potreby umiestňovania meracej techniky priamo v teréne. Určitým obmedzením však môže byť hustá vegetácia alebo lesný porast, ktoré spôsobujú dekoreláciu radarového signálu a tým znižujú presnosť získaných údajov. Na minimalizáciu týchto problémov sa využívajú pokročilé postupy, ako sú analýzy trvalých rozptylovačov alebo metóda SBAS (Small Baseline Subset), založená na spracovaní snímok s malými priestorovými a časovými rozdielmi. Interferometrické dáta sa často integrujú s geologickými, geomorfologickými a hydrologickými informáciami, čo umožňuje komplexnejšie hodnotenie príčin a priebehu zosuvných

procesov. Významnú úlohu zohrávajú aj pri skúmaní vplyvu intenzívnych zrážok a klimatických podmienok na aktivitu svahových deformácií. V kombinácii s meteorologickými údajmi môžu slúžiť ako podklad pre systémy včasného varovania, ktoré pomáhajú znižovať riziko škôd a zvyšovať bezpečnosť obyvateľstva. Metóda InSAR sa uplatňuje aj pri posudzovaní stability dopravnej a technickej infraštruktúry v ohrozených oblastiach, vrátane ciest, železničných tratí, mostov či obytných zón. Je obzvlášť dôležitá v urbanizovaných územiach a pozdĺž významných dopravných trás, kde môžu zosuvy vyvolať vážne ekonomické straty a ohroziť bezpečnosť dopravy. Ďalším prínosom radarovej interferometrie je zníženie nákladov na výskum a monitoring, keďže obmedzuje potrebu rozsiahlych terénnych prác a umožňuje efektívnejšie plánovanie monitorovacích programov.

Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa na východ a na juh od mesta Bardejov (obr. 1). Na skúmanom území sa vyskytujú ojedinelé zosuvy situované severne aj južne od mesta. 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/

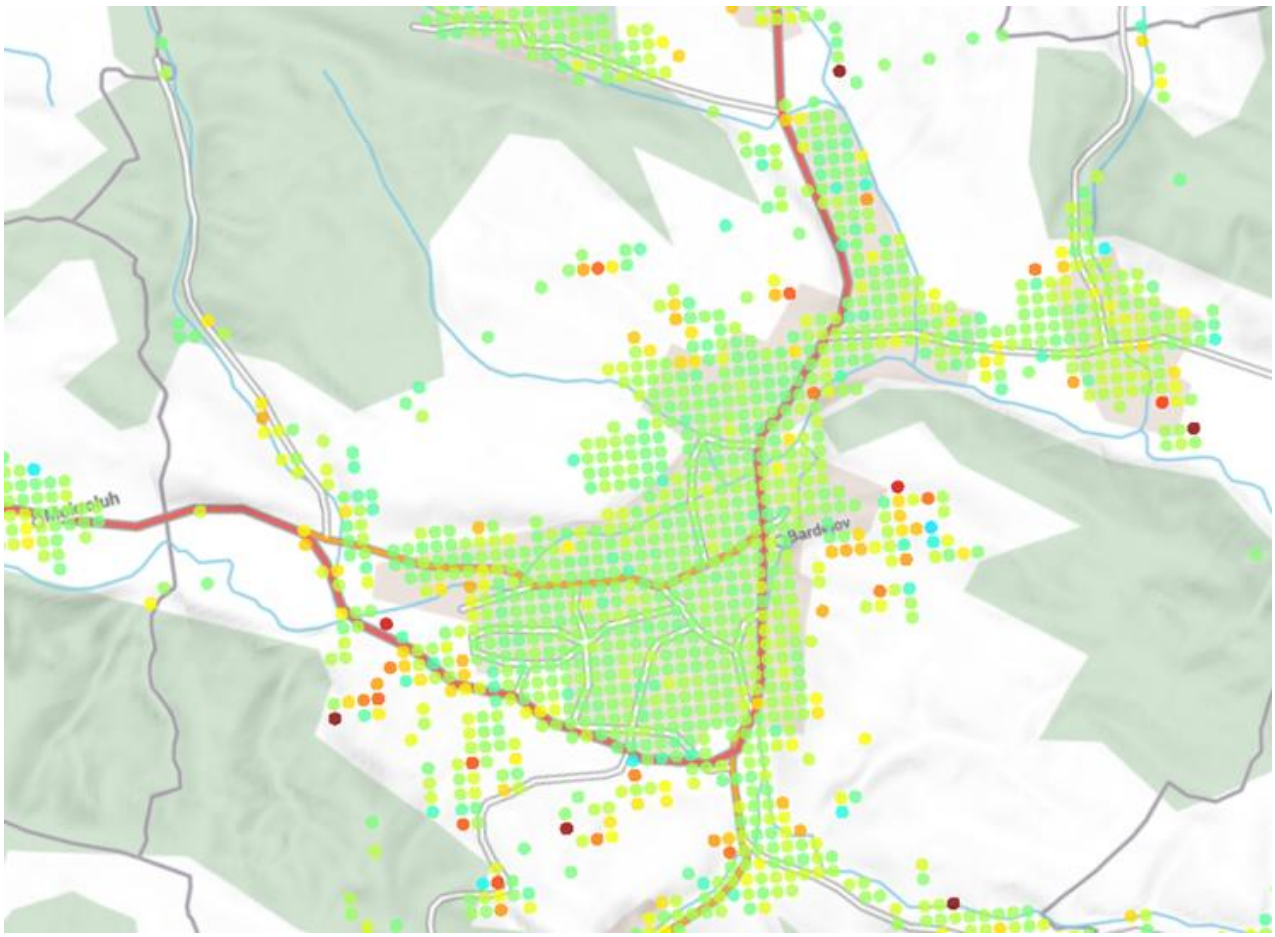
Využitie údajov z radarovej interferometrie umožňuje analýzu pohybu jednotlivých bodov terénu, napr. okrajov striech budov, v období 2019–2023.S cieľom identifikovať zmeny v morfológii terénu v rámci študovanej oblasti bola vykonaná priestorová analýza pomocou radarovej interferometrie. Pre oblasť nachádzajúcu sa na východ a na juh od mesta Bardejov 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.

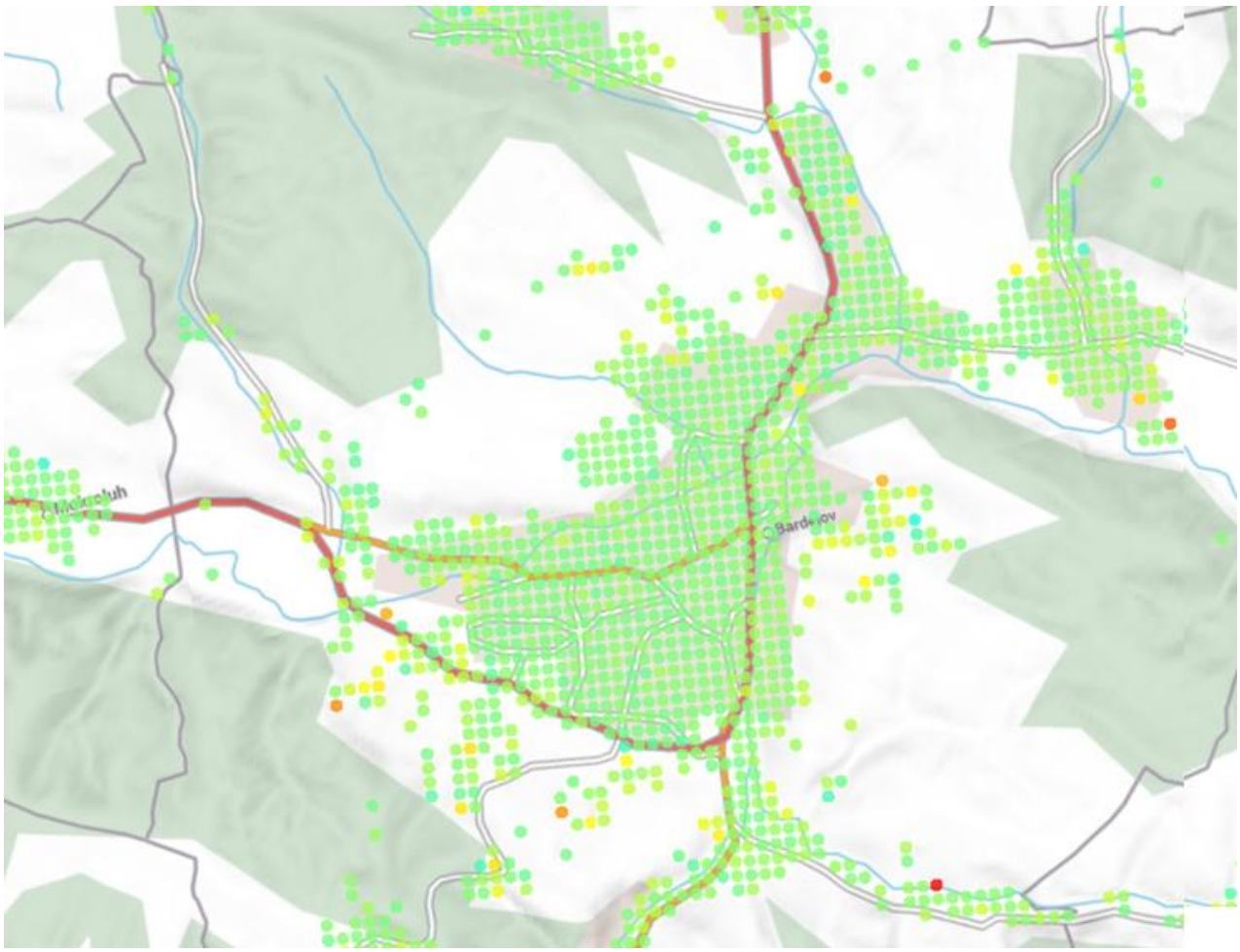
3. Výsledky výskumu v číselnej podobe spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a výkresov.

Výskumy realizované na východ a na juh od mesta Bardejov preukázali pomerne vysokú aktivitu svahových procesov. Body vykazujúce zmeny povrchu terénu sa nachádzali predovšetkým v okolí mesta. V samotnom centre mesta sa v zastavanom území prakticky nezistili žiadne významné deformácie. Zmeny reliéfu sa týkajú najmä oblastí menších vyvýšenín, kde boli zaznamenané tak zóny zdvíhania, ako aj poklesu terénu. Veľmi často sa oblasti zdvíhania nachádzajú v bezprostrednej blízkosti zón poklesu, čo je typický znak zosuvných území a môže naznačovať aktivitu svahových pohybov v skúmanej oblasti. Pomerne výrazné zmeny reliéfu boli zaznamenané na východ od mesta. Sú sústredené do dvoch lokalít, pre ktoré boli dostupné interferometrické analýzy. Prvá z nich sa nachádza bezprostredne pri východnom okraji mesta, zatiaľ čo druhá je situovaná v okolí obce Bardejovská Nová Ves, ležiacej severovýchodne od mesta Bardejov (obrázok 2). V prvej analyzovanej oblasti sú zreteľné zóny zdvíhania aj poklesu terénu s priemernou rýchlosťou približne 5–7 mm/rok. Tieto deformácie sa nachádzajú v území, ktoré je na mape zosuvov Slovenska označené ako náchylné na zosúvanie. Druhá lokalita je na zosuvné procesy citlivá najmä vo svojej severnej časti. Zmeny polohy analyzovaných bodov tu nie sú také výrazné ako v prvom prípade. Priemerná rýchlosť zdvíhania povrchu dosahuje približne 2–3 mm/rok, zatiaľ čo pokles terénu predstavuje približne 5 mm/rok (obrázky 3, 4, 5). Územia postihnuté svahovými deformáciami sa nachádzajú aj južne od mesta. V tejto oblasti sú body získané radarovou interferometriou rozptýlené a pokrývajú len malú časť území vyznačených ako potenciálne zosuvné. V tejto časti bolo zaznamenané zdvíhanie terénu rýchlosťou približne 2–3 mm/rok a zároveň jeho pokles dosahujúci približne 7–8 mm/rok.

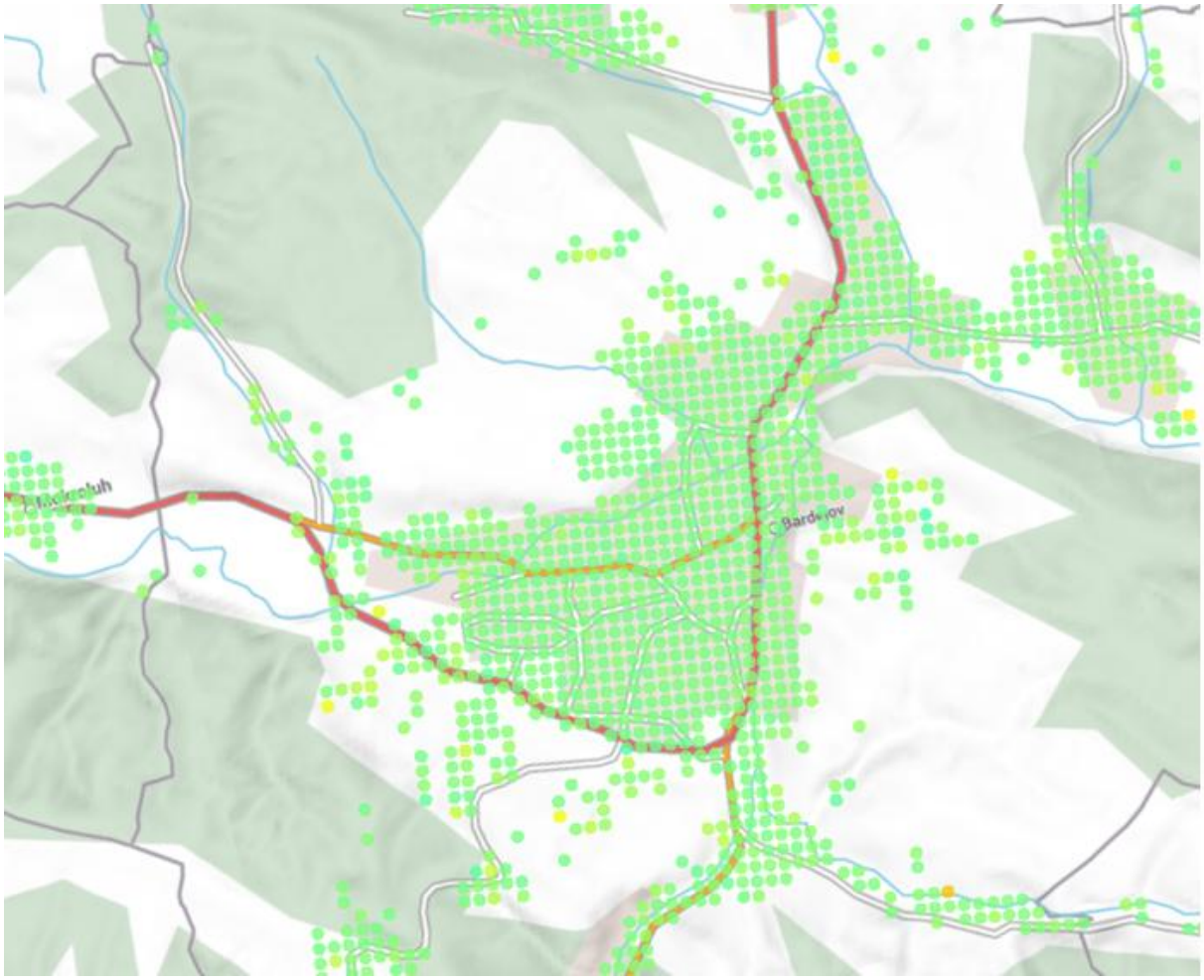
Analýza zmien polohy vybraných meracích bodov v skúmanom území ukázala, že pokles terénu bol pomerne výrazný a počas štvorročného obdobia 2019–2024 dosiahol približne 30 mm (obrázky 6, 9). Výsledky zároveň poukazujú na pomerne významné zdvíhanie povrchu, ktoré počas rovnakého obdobia dosiahlo približne 15 mm (obrázky 7, 8). Tieto zistenia naznačujú, že v skúmanej oblasti prebiehajú aktívne deformácie svahov, ktoré môžu súvisieť s vývojom zosuvných procesov.



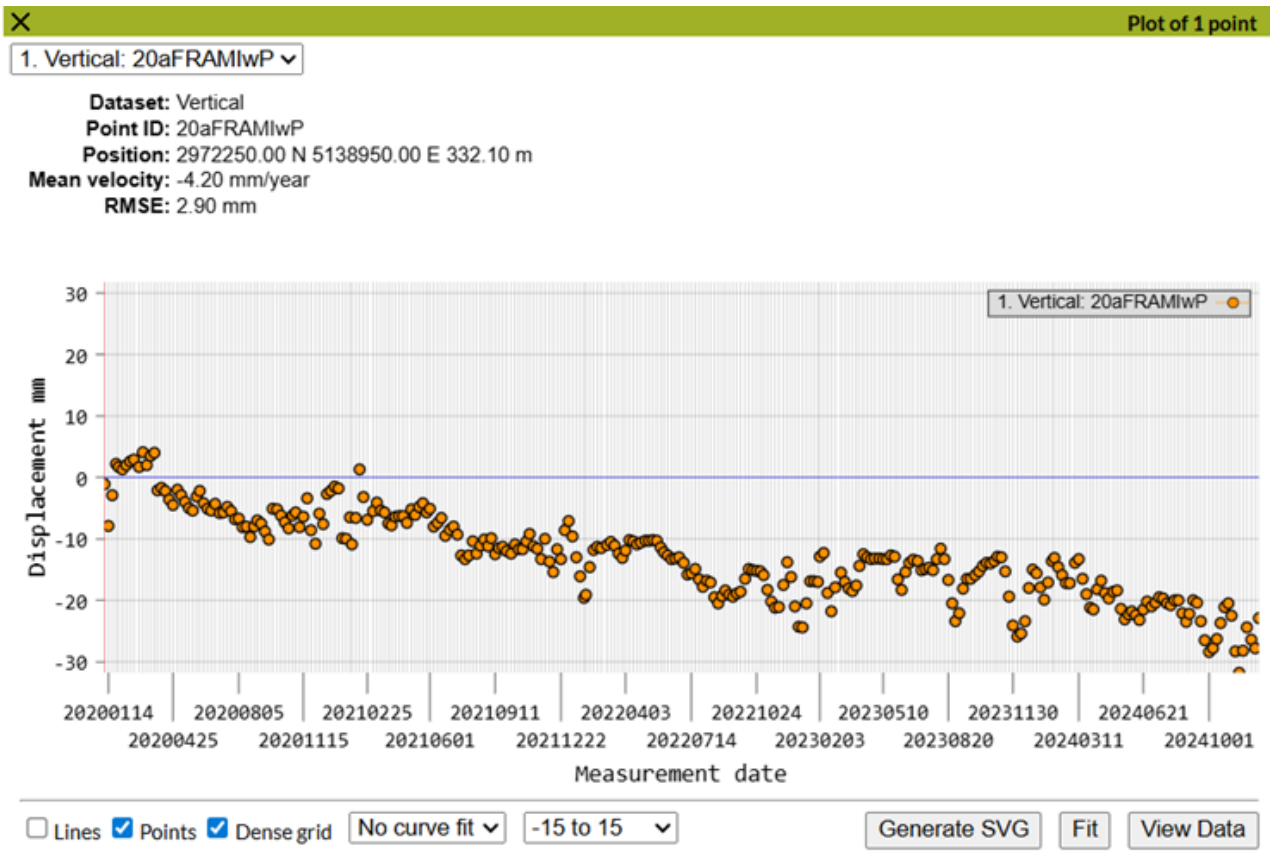
Obrázok 2. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



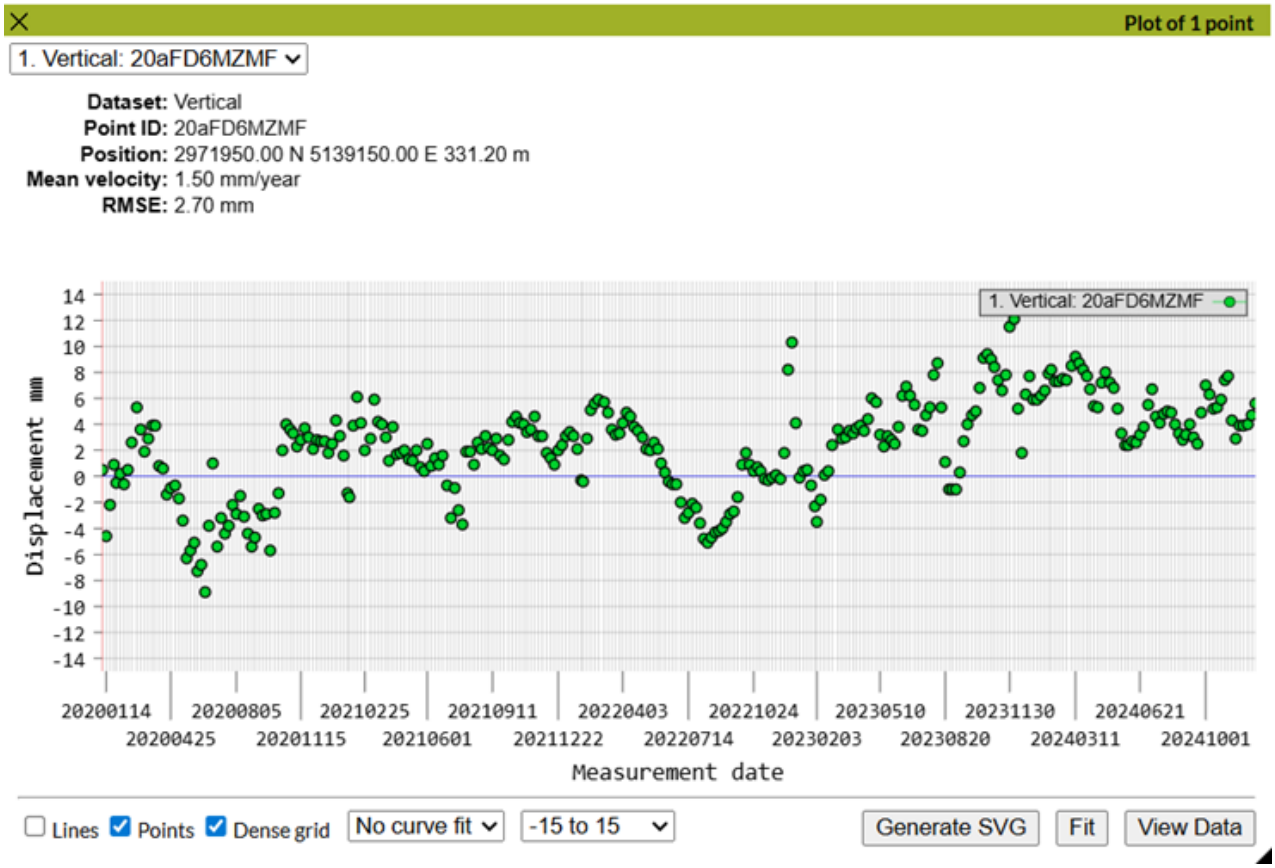
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



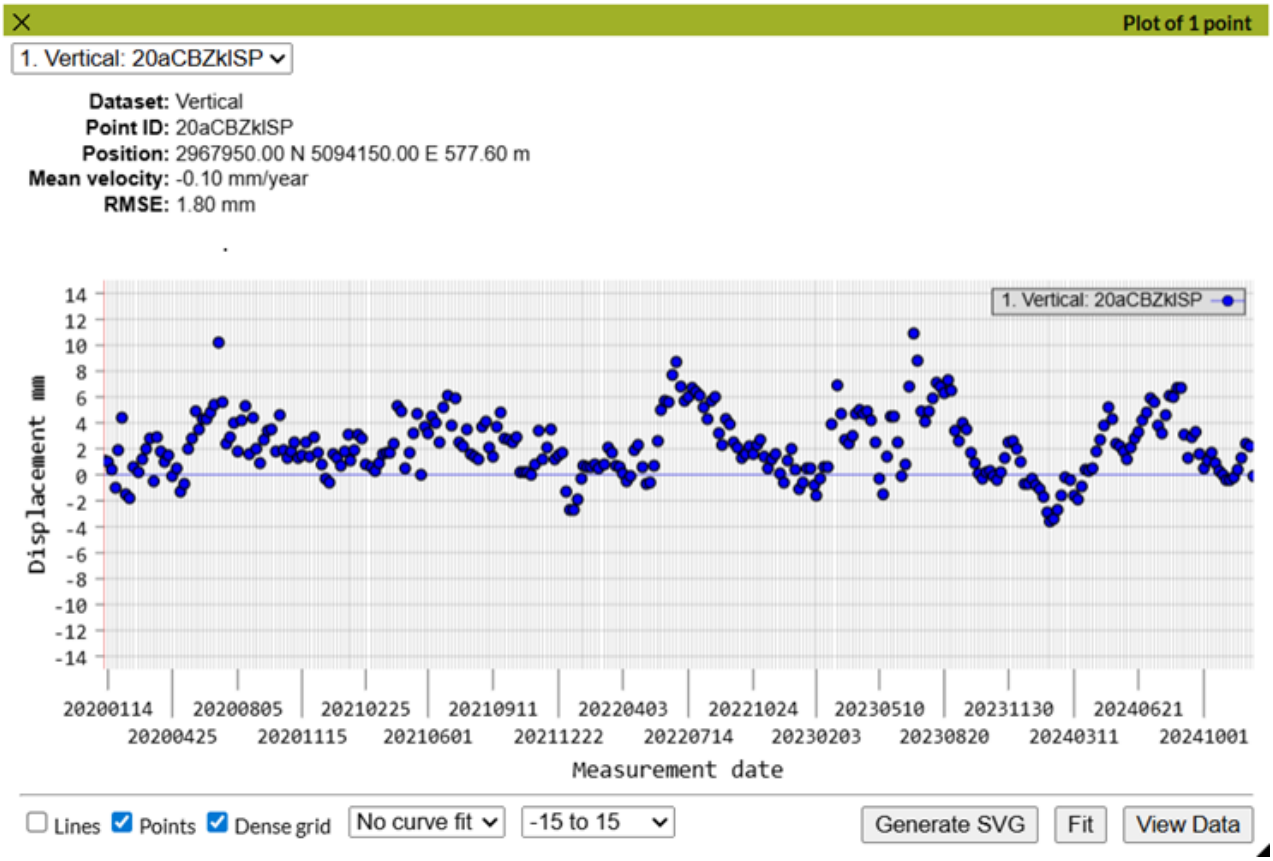
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 20 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



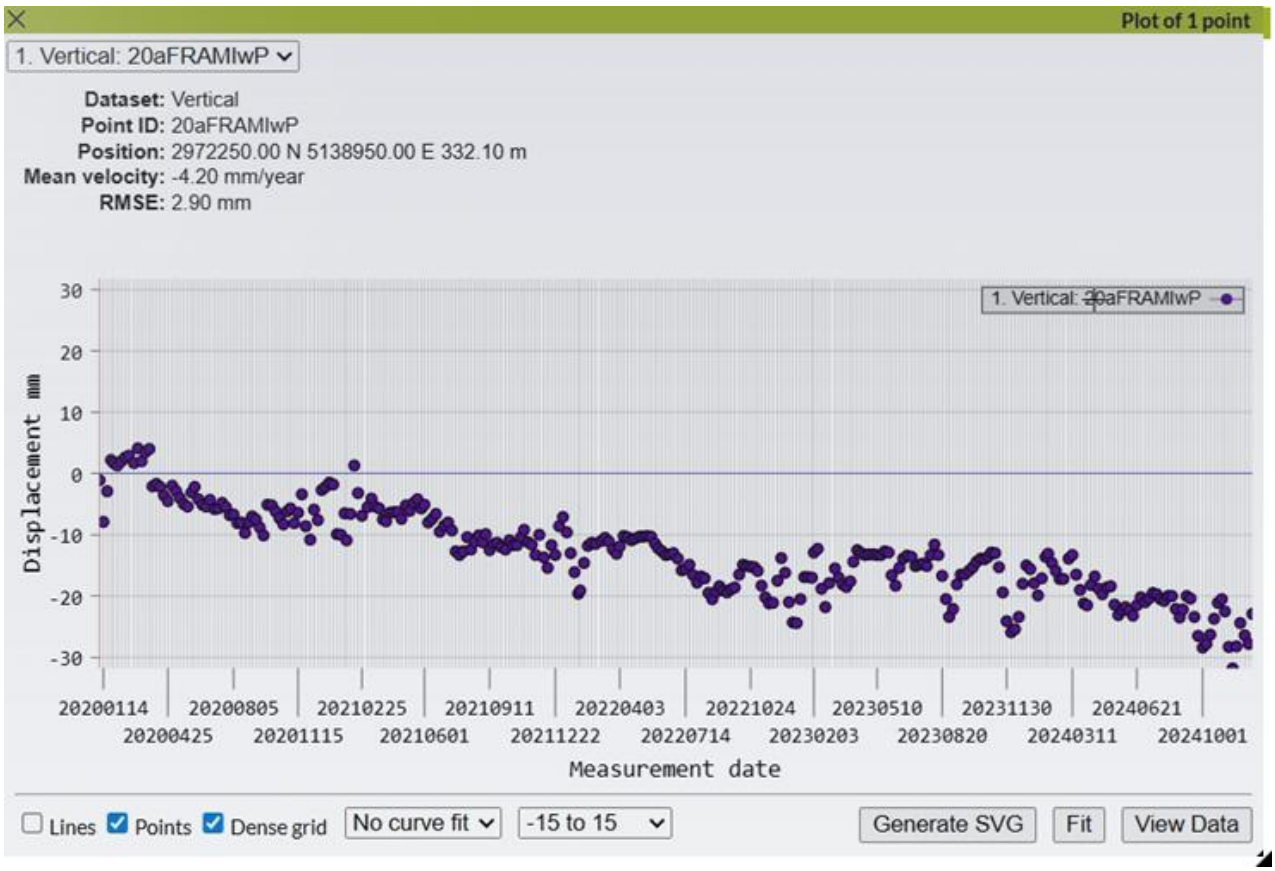
Obrázok 5. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



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 realizovaný na východ a na juh od mesta Bardejov preukázal výraznú aktivitu svahových procesov. Zmeny povrchu terénu boli zaznamenané najmä v okolí mesta, zatiaľ čo v zastavanom centre sa významné deformácie neprejavili. Na menších vyvýšeninách sa vyskytovali zóny zdvíhania aj poklesu terénu. Striedanie oblastí zdvíhania a poklesu je typické pre zosuvné územia a môže naznačovať aktivitu svahových pohybov. Najvýraznejšie deformácie na východ od mesta boli sústredené do dvoch lokalít analyzovaných pomocou radarovej interferometrie. Prvá lokalita, nachádzajúca sa bezprostredne na východ od mesta, vykazovala zdvíhanie aj pokles terénu s priemernou rýchlosťou 5–7 mm za rok. Druhá lokalita v okolí Bardejovská Nová Ves vykazovala miernejšie deformácie, pričom zdvíhanie dosahovalo 2–3 mm/rok a pokles približne 5 mm/rok. Svahové deformácie boli zaznamenané aj južne od mesta, kde však boli meracie body rozptýlené a pokrývali iba malú časť potenciálne zosuvných území. V tejto oblasti bolo zaznamenané zdvíhanie terénu do 2–3 mm/rok a pokles dosahujúci 7–8 mm/rok. Analýza údajov z rokov 2019–2024 ukázala maximálny pokles terénu približne 30 mm a zdvíhanie do 15 mm, čo potvrdzuje prebiehajúcu aktivitu svahových procesov v skúmanom regióne.

PREZES ZARZĄDU
Oddział Górnośląski Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
dr hab. Jerzy Cabała

Katowice, 25.05.2026
Dr hab. Jerzy Cabała