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

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 Levoca),
- 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)

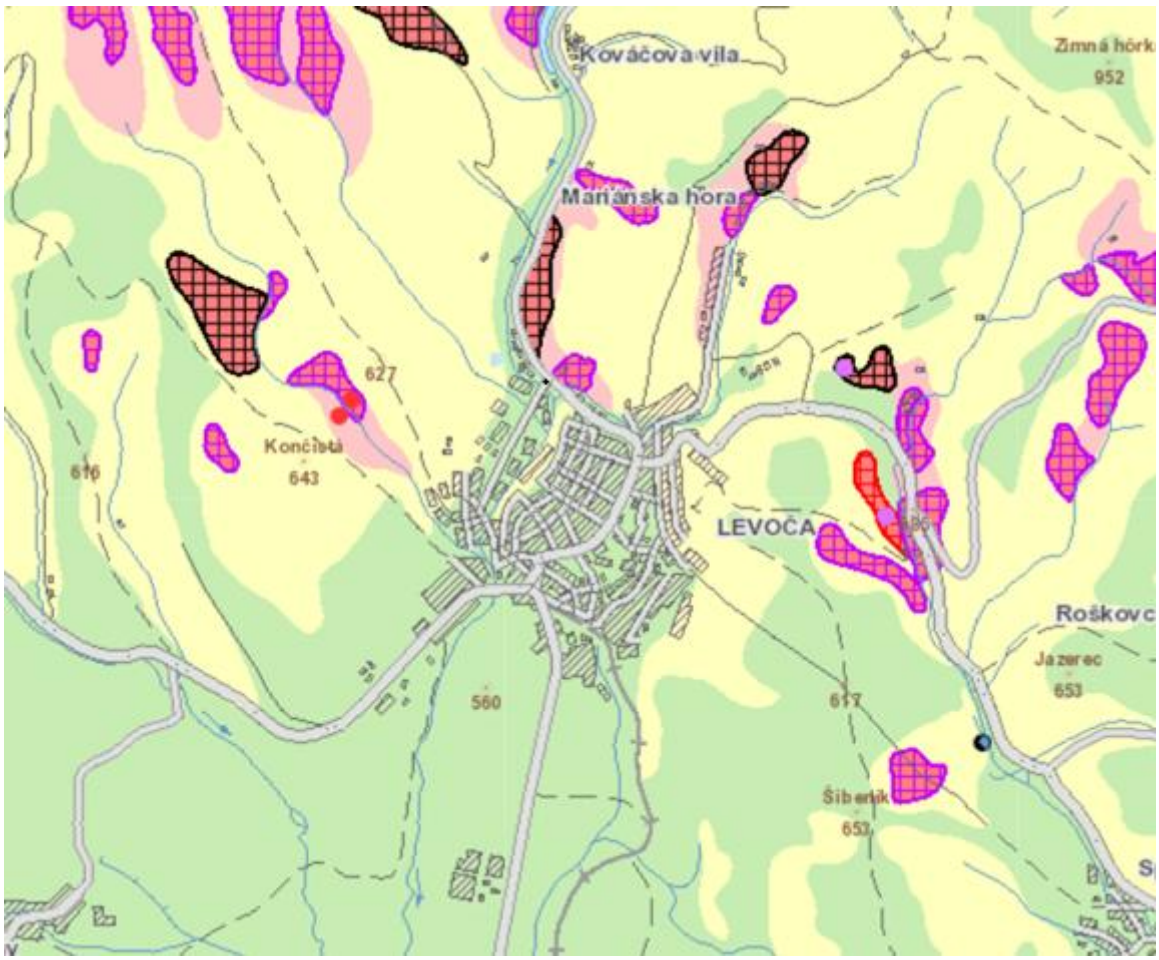
Radarová interferometria (InSAR) patrí medzi najmodernejšie metódy diaľkového prieskumu Zeme používané pri sledovaní a analýze zosuvov pôdy. Táto technológia funguje na princípe vyhodnocovania zmien fázy radarového signálu, ktorý zaznamenávajú satelity počas opakovaných preletov nad rovnakým územím. Vďaka satelitným misiám, akou je napríklad program European Space Agency Sentinel-1, je možné pravidelne monitorovať deformácie zemského povrchu na veľkých plochách. Interferogramy vytvorené z radarových snímok dokážu identifikovať horizontálne aj vertikálne pohyby terénu s veľmi vysokou presnosťou, často až na úrovni milimetrov. Pri výskume zosuvov umožňuje InSAR zachytiť nielen prudké svahové pohyby, ale aj pomalé deformácie, ktoré bývajú pri klasických geodetických meraniach ťažko rozpoznateľné. Významné miesto majú viacčasové interferometrické analýzy, pretože zvyšujú presnosť výsledkov a umožňujú detailnejšie sledovanie dynamiky zosuvných procesov. Mimoriadne účinnou metódou je PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR), ktorá využíva stabilné objekty odrážajúce radarový signál, napríklad budovy, skalné útvary alebo dopravnú infraštruktúru. Táto technika umožňuje presne určiť rýchlosť deformácií svahov v dlhodobých časových radoch a poskytuje dôležité informácie o vývoji nestabilných území.

Radarová interferometria sa najčastejšie využíva v horských a ťažko dostupných oblastiach, kde sú tradičné terénne merania komplikované alebo finančne náročné. Jej veľkou prednosťou je možnosť sledovať rozsiahle územia bez potreby umiestňovať meracie zariadenia priamo v teréne. V regiónoch s hustou vegetáciou alebo lesnými porastmi však môže dochádzať k znižovaniu koherencie radarového signálu, čo môže negatívne ovplyvniť presnosť meraní. Preto sa v takýchto podmienkach používajú pokročilé metódy založené na trvalých rozptylovačoch alebo na analýze malých základní označovanej ako SBAS (Small Baseline Subset). Interferometrické údaje sa často kombinujú s geologickými, geomorfologickými a hydrologickými informáciami, čím sa dosahuje komplexnejšie hodnotenie príčin a vývoja zosuvov pôdy. Významná je aj schopnosť analyzovať vplyv intenzívnych zrážok a klimatických faktorov na aktivitu svahových deformácií.

V spojení s meteorologickými údajmi môže radarová interferometria slúžiť ako účinný nástroj systémov včasného varovania pred zosuvmi a prispievať k ochrane obyvateľstva. Technológia sa využíva aj pri hodnotení stability infraštruktúry v rizikových oblastiach, ako sú cesty, železnice, mosty či obytné zóny. Mimoriadny význam má najmä v urbanizovaných regiónoch a pri hlavných dopravných koridoroch, kde môžu zosuvy spôsobiť veľké ekonomické škody a ohroziť bezpečnosť dopravy. Radarová interferometria zároveň pomáha znižovať náklady na výskum tým, že obmedzuje potrebu rozsiahlych terénnych meraní a zefektívňuje plánovanie monitoringu. V súčasnosti predstavuje jednu z kľúčových súčastí integrovaných systémov monitorovania zosuvných rizík a významne prispieva k ochrane krajiny, infraštruktúry i ľudských životov.

Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa v okolí mesta Levoča (obr. 1). V okolí mesta, najmä na severe a východe od neho, sa nachádza množstvo svahových deformácií. Časť zosuvných území je 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 svahových deformácií je možná v dôsledku prírodných podmienok alebo negatívnych antropogénnych faktorov, resp. ich kombinácie. Územia vyznačené ružovou farbou 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. Oblasti označené oranžovou farbou s čiernou šrafúrou sú rovnako klasifikované ako **Rajón nestabilných území**, teda územia so stredným až vysokým stupňom náchylnosti na vznik alebo reaktiváciu svahových deformácií. Aktivizácia týchto území je podmienená kombináciou geologických, geomorfologických, klimatických a 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, napríklad okrajov striech budov, v období rokov 2019–2023. S cieľom identifikovať zmeny morfológie terénu v rámci skúmanej oblasti bola vykonaná priestorová analýza pomocou radarovej interferometrie. Pre územie nachádzajúce sa v okolí mesta Levoča boli posuny vizualizované prostredníctvom pevných bodov, v ktorých sa v rokoch 2019–2023 realizovali interferometrické merania. Súčasťou štúdie bola aj analýza zmien polohy troch vybraných bodov vo zvýšenom rozlíšení. V analýze boli použité body charakterizované najvyššou aktivitou zosuvov pôdy. Výskum bol realizovaný pre tri úrovne vertikálnych zmien bodov, a teda aj reliéfu terénu: 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.

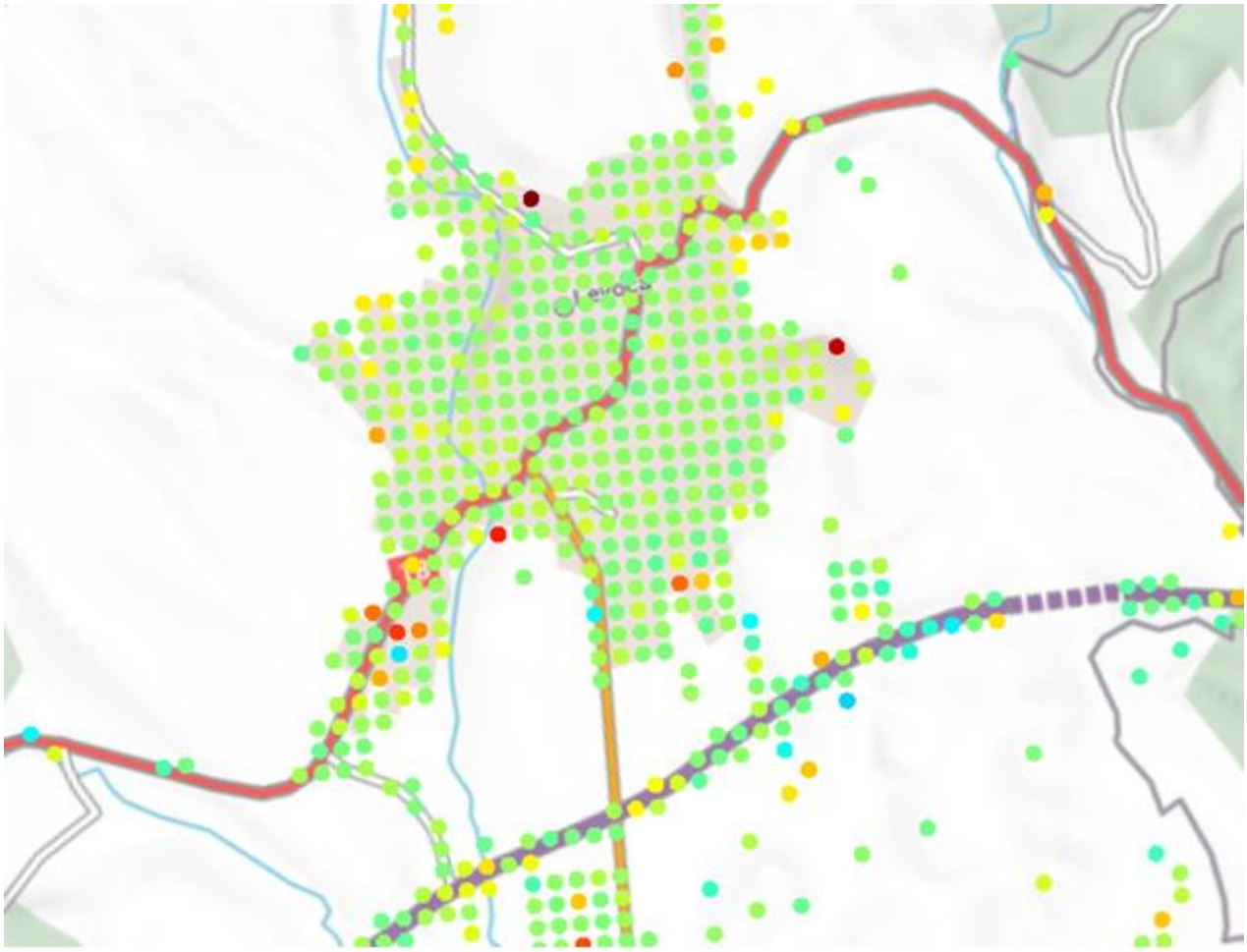
Oblasti zosuvov pôdy zahrnuté do výskumu boli iba čiastočne pokryté bodmi disponujúcimi interferometrickými údajmi. Radarová interferometria zahŕňa predovšetkým územia nachádzajúce sa južne od mesta Levoča, zatiaľ čo oblasti ležiace severne od mesta, kde sa taktiež vyskytujú potenciálne svahové deformácie, neboli do analýzy zahrnuté. Výskum realizovaný pomocou radarovej interferometrie umožnil potvrdiť, že v analyzovanom území dochádza k svahovým deformáciám alebo – čo sa javí ako pravdepodobnejšie – k zmenám povrchu terénu súvisiacim s hospodárskou činnosťou človeka a lokálnymi infraštruktúrnymi úpravami. Analýzy boli vykonané pre obdobie rokov 2019–2024, čo umožnilo hodnotenie dlhodobých zmien prebiehajúcich na zemskom povrchu.

Najvýraznejšie zmeny povrchu terénu boli identifikované v južnej časti analyzovaného územia. V tejto zóne však mapa svahových deformácií Slovenska neuvádza možnosť výskytu svahových pohybov ani zosuvov pôdy. Môže to naznačovať, že deformácie zistené južne od mesta Levoča súvisia predovšetkým s činnosťou človeka, napríklad s rozvojom cestnej infraštruktúry, zemnými prácami alebo lokálnymi stavebnými investíciami. Zmeny povrchu terénu susedia s priebehom ciest a zahŕňajú zóny poklesu aj zdvíhania terénu. Tieto zóny sa nachádzajú bezprostredne vedľa seba, pričom časť ležiaca viac na východ vykazuje výraznejšiu tendenciu k zdvíhaniu povrchu terénu (obrázky 2, 3, 4). V analyzovanej oblasti dosahujú zmeny povrchu priemerné hodnoty približne 3–4 mm/rok, pričom na niektorých miestach bolo zaznamenané znižovanie terénu až do približne 5 mm/rok.

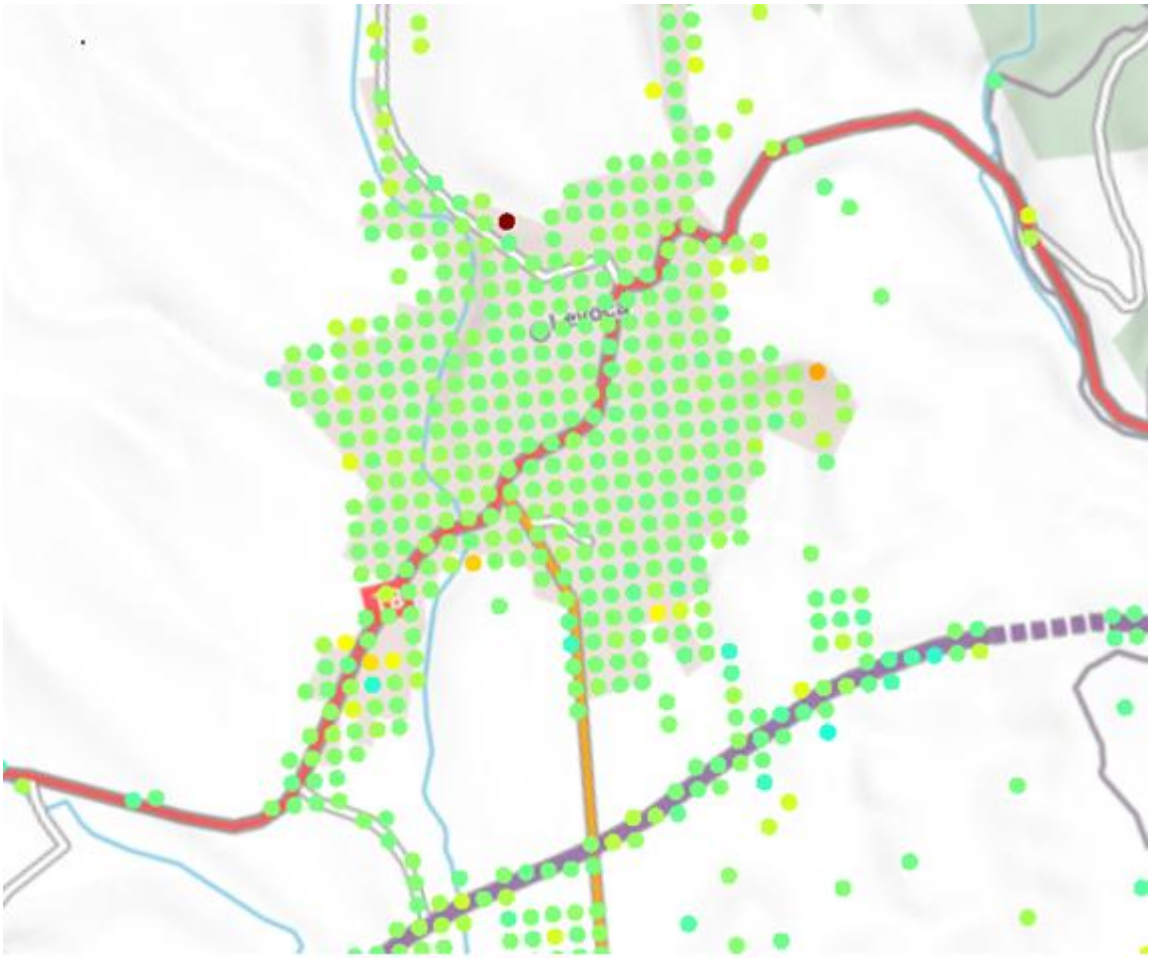
Výrazné deformácie terénu boli identifikované aj v južnej časti hlavnej cesty prechádzajúcej mestom. Aj v tejto oblasti je viditeľné susedstvo zón poklesu a zdvíhania terénu, čo môže naznačovať lokálne zmeny podložia spojené s využívaním dopravnej infraštruktúry. Pokles povrchu tam prebieha tempom približne 5 mm/rok, zatiaľ čo zdvíhanie terénu má menší rozsah a dosahuje v priemere približne 2–3 mm/rok. Charakter týchto zmien skôr naznačuje pomalé a dlhodobé deformácie než náhle svahové pohyby typické pre aktívne zosuvy pôdy.

Pri analýze tempa zmien povrchu terénu v skúmanom území bolo zistené, že iba v ojedinelých prípadoch presahuje hodnota deformácií mierne 5 mm/rok. Okrem toho boli analyzované zmeny povrchu pre tri vybrané meracie body lokalizované v južnej časti skúmanej oblasti. Výsledky ukázali, že procesy poklesu

aj zdvíhania terénu majú pomerne nízku intenzitu a počas celého štvorročného obdobia 2019–2024 dosiahli maximálne približne 10–15 mm (obrázky 5, 6, 7).



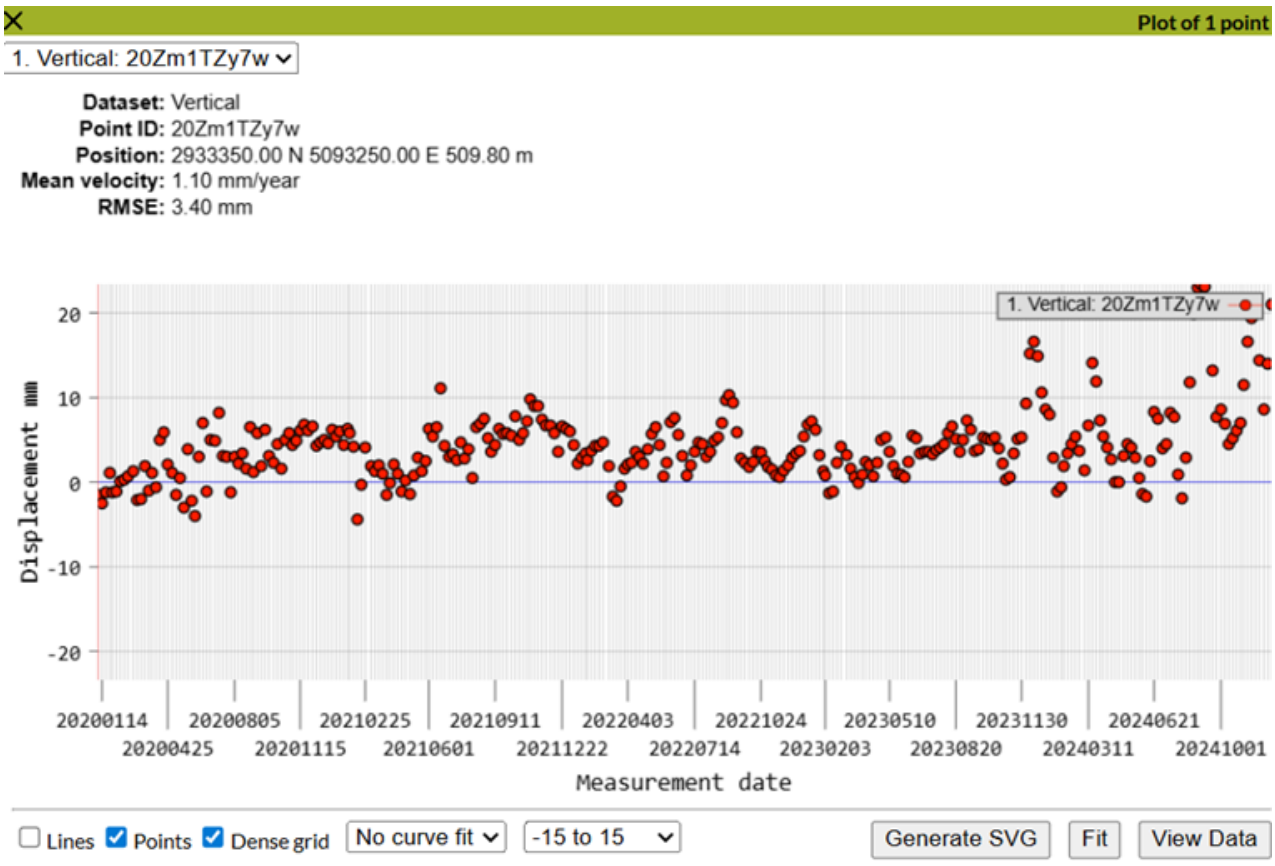
Obrázok 2. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



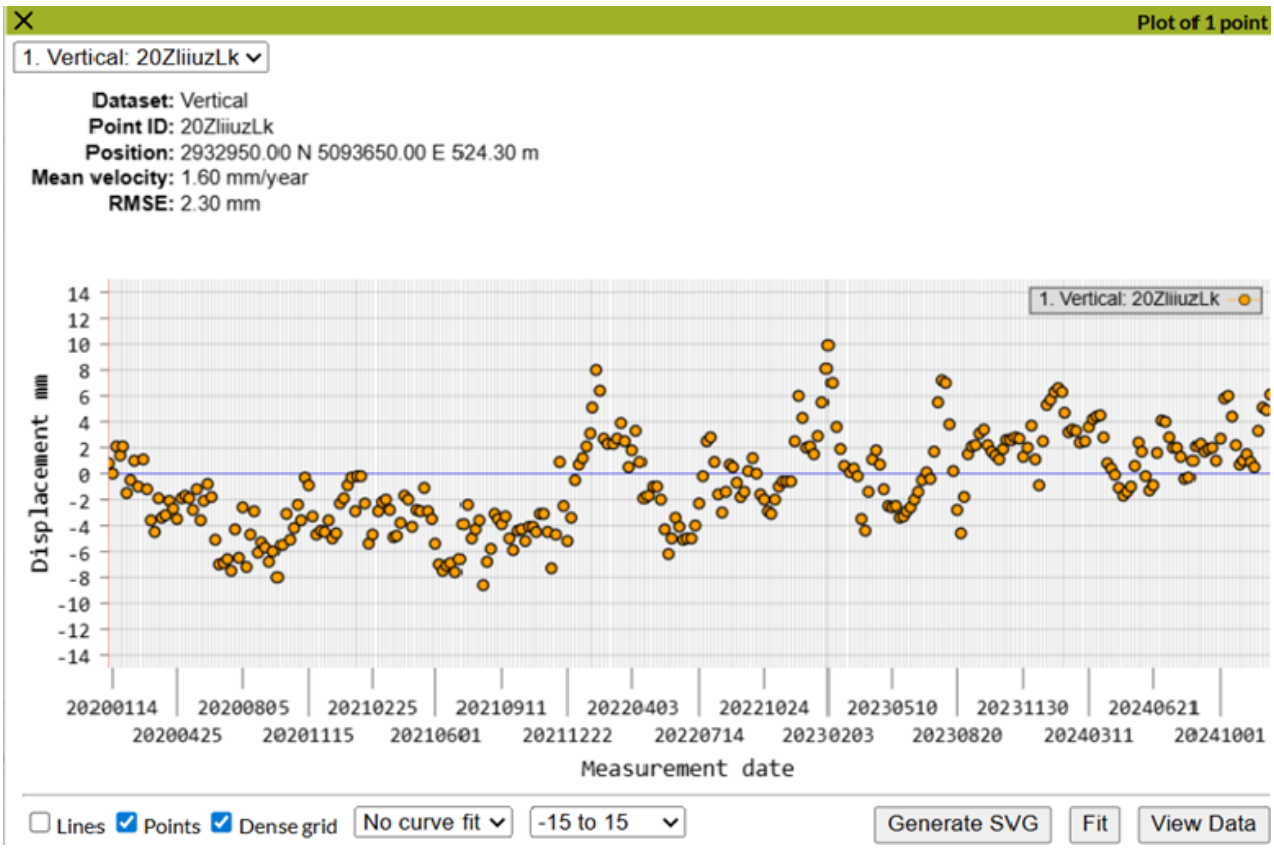
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



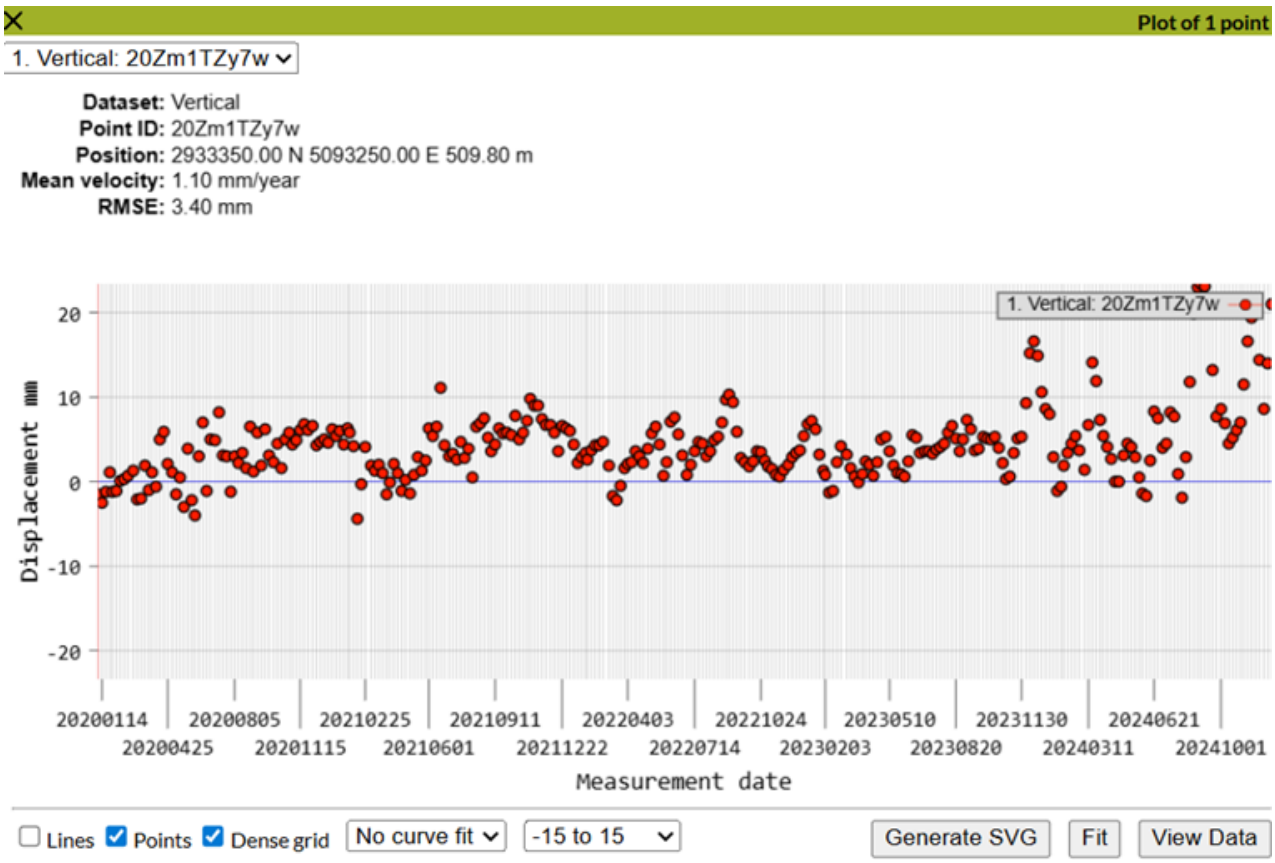
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 20 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



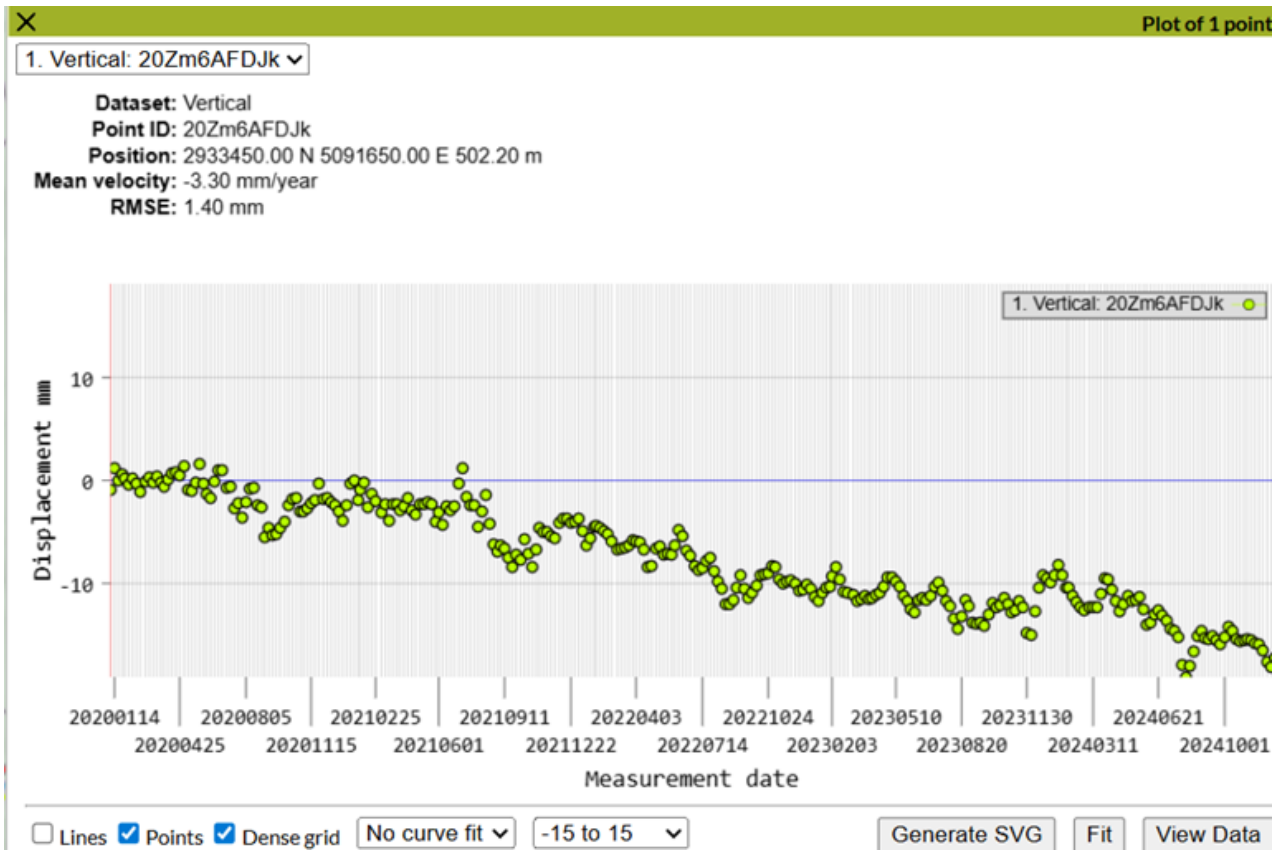
Obrázok 5. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



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).

Oblasti zosuvov pôdy zahrnuté do výskumu boli iba čiastočne pokryté bodmi s interferometrickými údajmi. Radarová interferometria zahŕňala najmä územia nachádzajúce sa južne od mesta Levoča, zatiaľ čo severné oblasti neboli do analýzy zahrnuté. Výskum realizovaný v rokoch 2019–2024 preukázal výskyt deformácií zemského povrchu. Pravdepodobnejšie však je, že tieto zmeny súvisia s hospodárskou činnosťou človeka než s aktívnymi zosuvmi pôdy. Najväčšie deformácie boli identifikované v južnej časti analyzovaného územia, kde mapa svahových deformácií Slovenska neuvádza výskyt zosuvných procesov. Zmeny povrchu terénu tam susedia s priebehom ciest a zahŕňajú zóny poklesu aj zdvíhania terénu. Hodnoty deformácií dosahujú spravidla približne 3–4 mm/rok a lokálne až 5 mm/rok. Výrazné zmeny boli identifikované aj v južnej časti hlavnej cesty prechádzajúcej mestom. Analýza troch vybraných bodov ukázala, že pokles aj zdvíhanie terénu dosiahli v období 2019–2024 maximálne približne 10–15 mm. Získané výsledky naznačujú pomalý a postupný charakter deformácií zemského povrchu.

Katowice, 25.03.2026

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

dr hab. Jerzy Cabała