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

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 Kežmarok),
- 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)

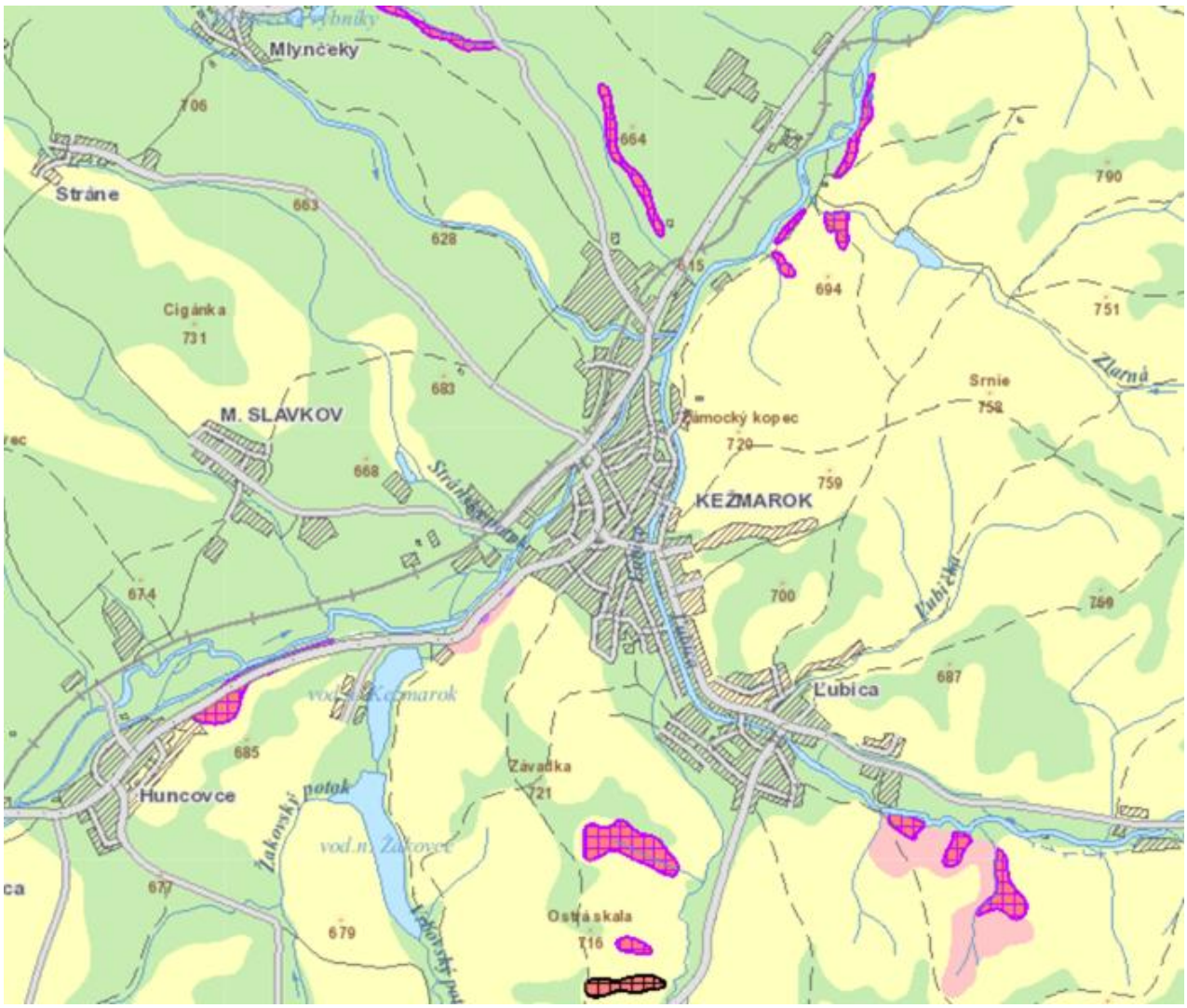
Radarová interferometria (InSAR) patrí medzi najvýznamnejšie metódy diaľkového prieskumu Zeme používané pri sledovaní a analýze zosuvov pôdy. Táto moderná technológia je založená na vyhodnocovaní rozdielov vo fáze radarového signálu, ktorý je zaznamenávaný družicami počas opakovaných preletov nad rovnakým územím. Vďaka satelitným misiám, akou je napríklad European Space Agency program Sentinel-1, možno realizovať pravidelné a dlhodobé monitorovanie deformácií zemského povrchu na veľkých plochách. Interferogramy vytvorené z radarových dát umožňujú identifikovať vertikálne aj horizontálne posuny terénu s veľmi vysokou presnosťou, často až na úrovni niekoľkých milimetrov. Pri výskume zosuvných procesov poskytuje InSAR možnosť zachytiť nielen náhle a dynamické pohyby svahov, ale aj pomalé, dlhodobé deformácie, ktoré by bolo klasickými metódami ťažké odhaliť. Veľký význam majú viacčasové interferometrické analýzy, ktoré zvyšujú presnosť a spoľahlivosť interpretácie výsledkov. Mimoriadne efektívna je metóda PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR), využívajúca stabilné objekty odrážajúce radarový signál, ako sú budovy, skalné útvary alebo infraštruktúrne prvky. Táto technika umožňuje detailné určenie rýchlosti deformácie svahov v rámci dlhodobých časových radov a poskytuje cenné informácie o vývoji nestabilných území.

Radarová interferometria nachádza široké uplatnenie predovšetkým v horských a ťažko dostupných oblastiach, kde je realizácia tradičných geodetických meraní komplikovaná alebo finančne náročná. Výhodou tejto technológie je možnosť monitorovať rozsiahle územia bez potreby inštalácie meracích zariadení priamo v teréne. V oblastiach s hustou vegetáciou alebo lesným pokryvom však môže dochádzať k dekorelácii radarového signálu, čo znižuje presnosť meraní. V takýchto prípadoch sa využívajú pokročilé techniky založené na trvalých rozptylovačoch alebo metódy analýzy malých základní, známe ako SBAS (Small Baseline Subset). Interferometrické údaje bývajú často kombinované s geologickými, geomorfologickými a hydrologickými informáciami, čo umožňuje komplexnejšie pochopenie mechanizmov vzniku a vývoja zosuvov pôdy. Významnú úlohu zohráva aj pri hodnotení vplyvu intenzívnych zrážok a klimatických faktorov na aktivitu svahových pohybov. V spojení s meteorologickými údajmi môže radarová

interferometria podporovať tvorbu systémov včasného varovania pred zosuvnými procesmi a prispievať k zvyšovaniu bezpečnosti obyvateľstva. Táto technológia sa využíva aj pri posudzovaní stability infraštruktúry nachádzajúcej sa v rizikových oblastiach, napríklad ciest, železníc, mostov či obytných zón. Mimoriadne dôležitá je v urbanizovaných regiónoch a pozdĺž dopravných koridorov, kde môžu zosuvy spôsobiť značné hospodárske škody a ohrozenie dopravy. Radarová interferometria zároveň pomáha znižovať náklady na výskum tým, že obmedzuje potrebu rozsiahlych terénnych meraní a umožňuje efektívnejšie plánovanie monitorovacích aktivít. V súčasnosti predstavuje jednu z kľúčových súčastí integrovaných systémov monitorovania zosuvných rizík a zohráva významnú úlohu pri ochrane krajiny, infraštruktúry aj ľudských životov.

Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa v okolí mesta Kežmarok (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/

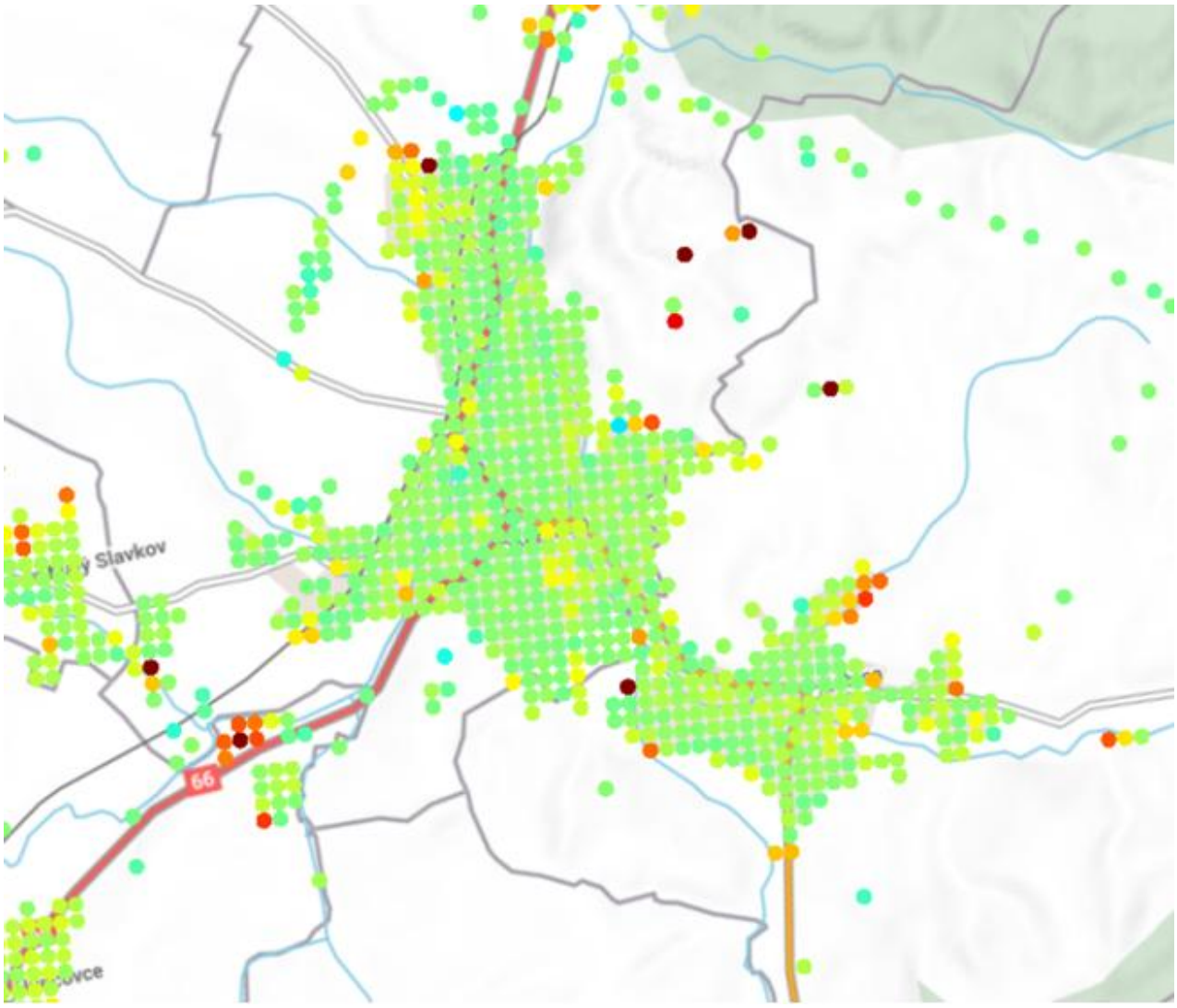
Využitie údajov z radarovej interferometrie umožňuje analýzu pohybu jednotlivých bodov terénu, napr. okrajov striech budov, v období 2019–2023.S cieľom identifikovať zmeny v morfológii terénu v rámci študovanej oblasti bola vykonaná priestorová analýza pomocou radarovej interferometrie. Pre oblasť nachádzajúcu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

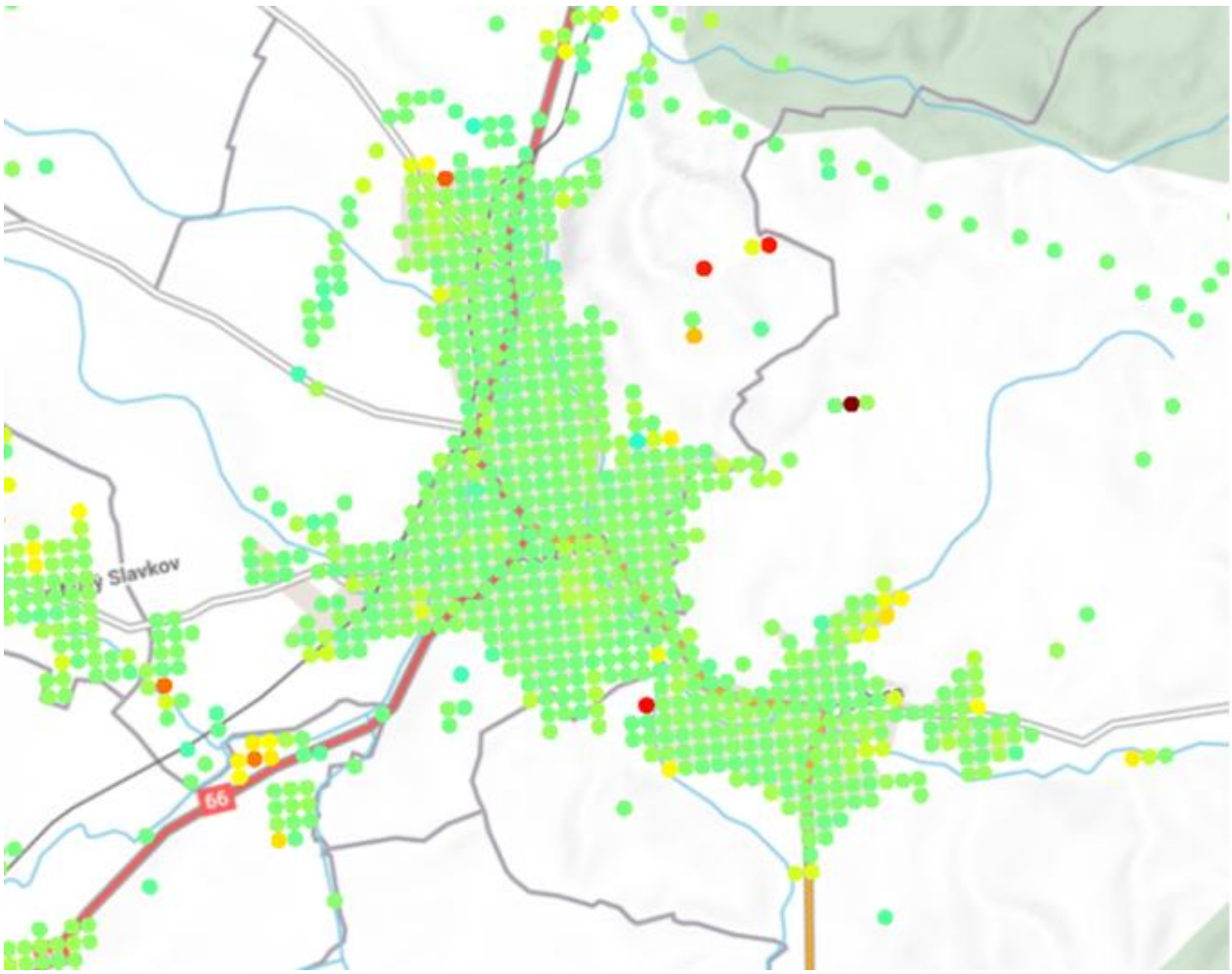
3. Výsledky výskumu v číselnej podobe spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a výkresov.

Interferometrická analýza nepokrývala celé skúmané zosuvné územia, avšak bolo možné analyzovať niekoľko bodov nachádzajúcich sa v zosuvných oblastiach, zvyčajne v blízkosti zástavby, teda tam, kde sa najlepšie uplatňuje interferometrická metóda. Analýza bola vykonaná pre obdobie rokov 2019–2023 a preukázala aktivitu svahových procesov potvrdenú zmenou polohy niektorých skúmaných bodov. Pomerne výrazné zmeny reliéfu terénu ukázala analýza posunov pôdy do 5 mm/rok. Výrazné zmeny sú viditeľné najmä na okrajoch mesta Kežmarok a v jeho okolí, teda tam, kde sa vyskytujú svahové deformácie. Výrazné znižovanie terénu sa vyskytuje pozdĺž cesty číslo 66 v blízkosti obce Huncovce, nachádzajúcej sa juhozápadne od mesta Kežmarok (obrázok 2). Nachádzajú sa tu body poklesávajúce približne o 10 mm/rok. Nad zónou poklesu sa vyskytuje oblasť, v ktorej bolo zaznamenané zdvíhanie terénu do približne 2–3 mm ročne; pravdepodobne ide o svahové deformácie. Nemožno však vylúčiť ani hospodársku činnosť realizovanú v tejto oblasti v rokoch 2019–2023. Pomerne výrazné deformácie pôdy boli zistené aj v obci Ľubica, nachádzajúcej sa juhovýchodne od mesta Kežmarok. Jednotlivé body tu poklesávajú približne o 2–3 mm/rok. V ich blízkosti sa nachádzajú body zdvíhajúce sa približne o 1–2 mm/rok. Na tomto mieste maximálne tempo poklesu a zdvíhania terénu nepresahuje 5 mm/rok (obrázky 2, 3).

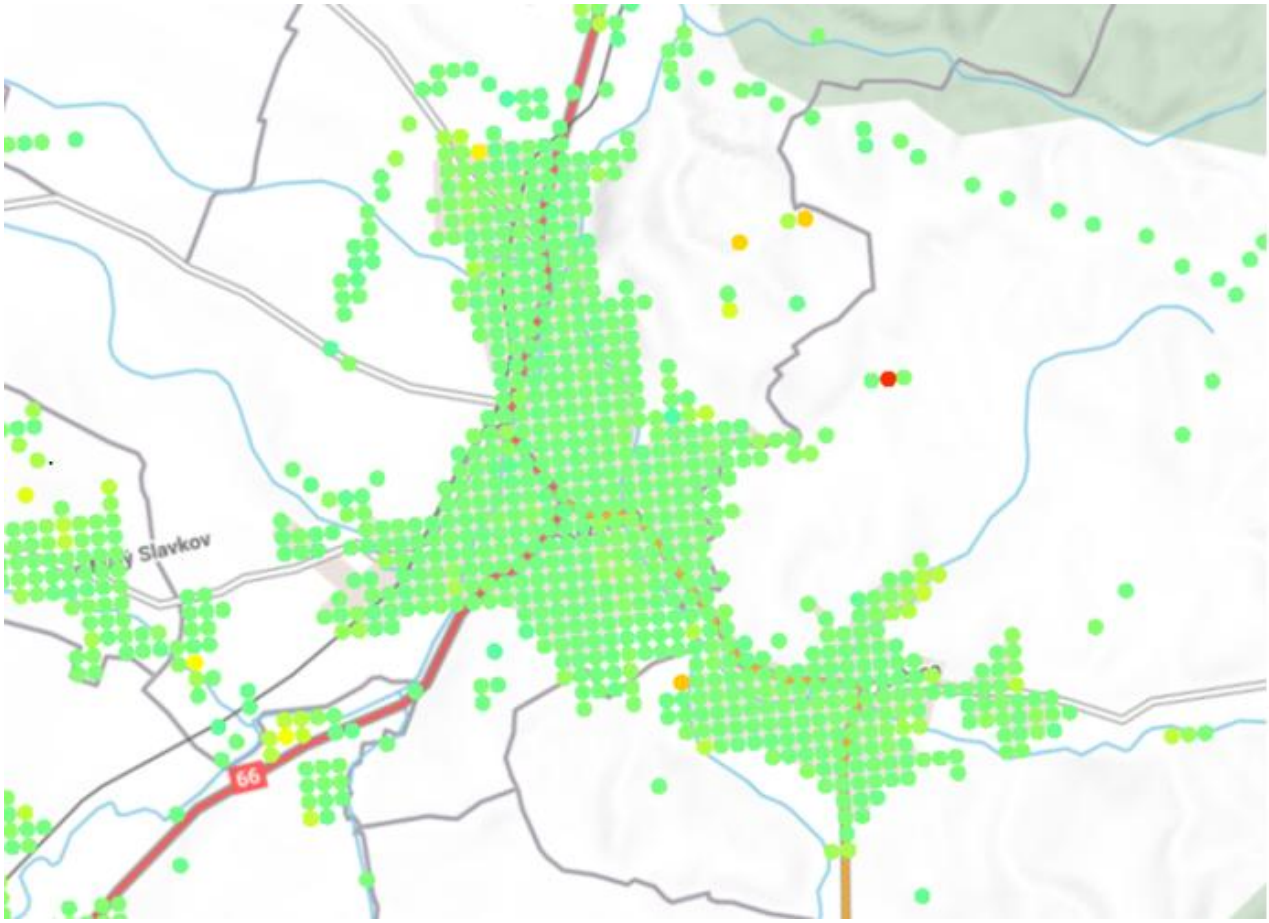
Zmeny povrchu terénu sú viditeľné aj v severnej časti mesta Kežmarok, avšak tu prevláda skôr zóna mierneho zdvíhania terénu. Lineárne sa tu vyskytuje pásmo zdvíhania do približne 5 mm/rok (obrázky 2, 3, 4). Vyššie položený terén sa mierne znižuje a lokálne dosahuje tempo do 10 mm/rok. Analýza poklesu štyroch vybraných bodov ukázala, že tempo týchto zmien bolo vo všetkých prípadoch v čase nerovnomerné a maximálne posuny v skúmanej oblasti dosiahli v severnej časti do 15 mm za 4 roky (2019–2024) (obrázky 5, 6), zatiaľ čo v južnej časti približne 20 mm/rok (obrázky 7, 8). V severnej aj južnej časti vykazujú body, ktoré sa zdvíhajú, výraznú sezónnu variabilitu zdvíhania meniacu sa počas jednotlivých ročných období (jar – leto – jeseň – zima). To naznačuje, že tieto body boli určené v zónach s výskytom vegetácie. Naopak, pri bodoch vykazujúcich pokles bolo od roku 2021 pozorované zosilnené znižovanie terénu, ktoré môže súvisieť so zvýšenou aktivitou svahových deformácií spôsobenou intenzívnymi zrážkami v tomto období.



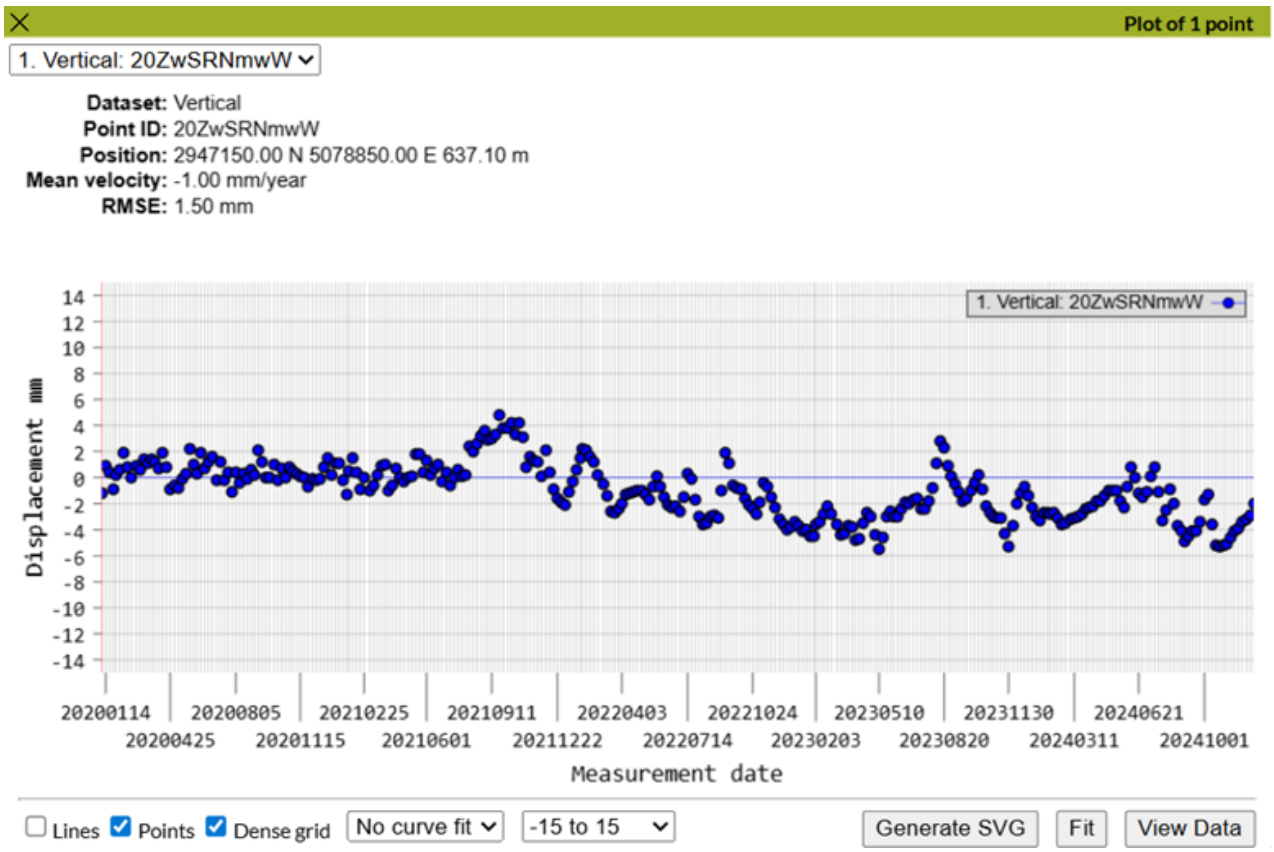
Obrázok 2. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



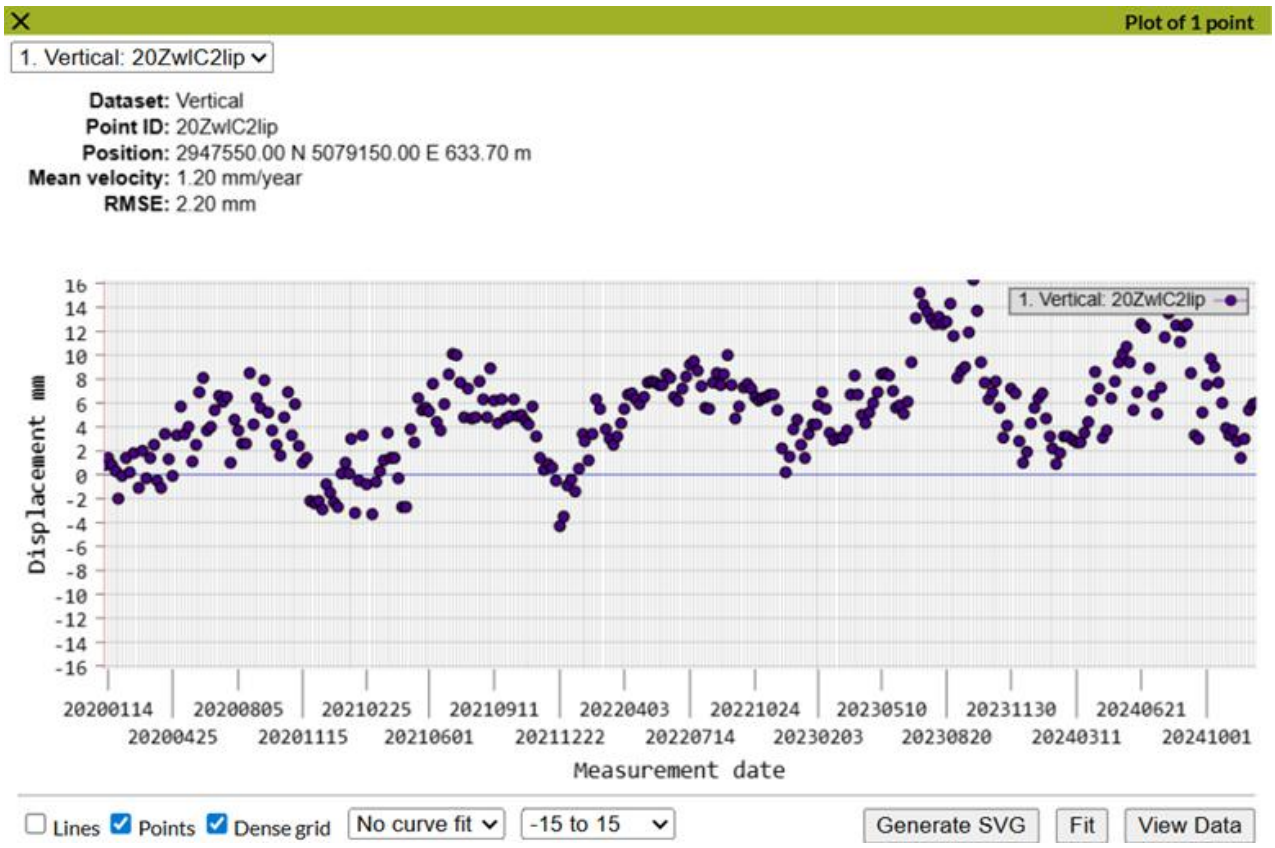
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



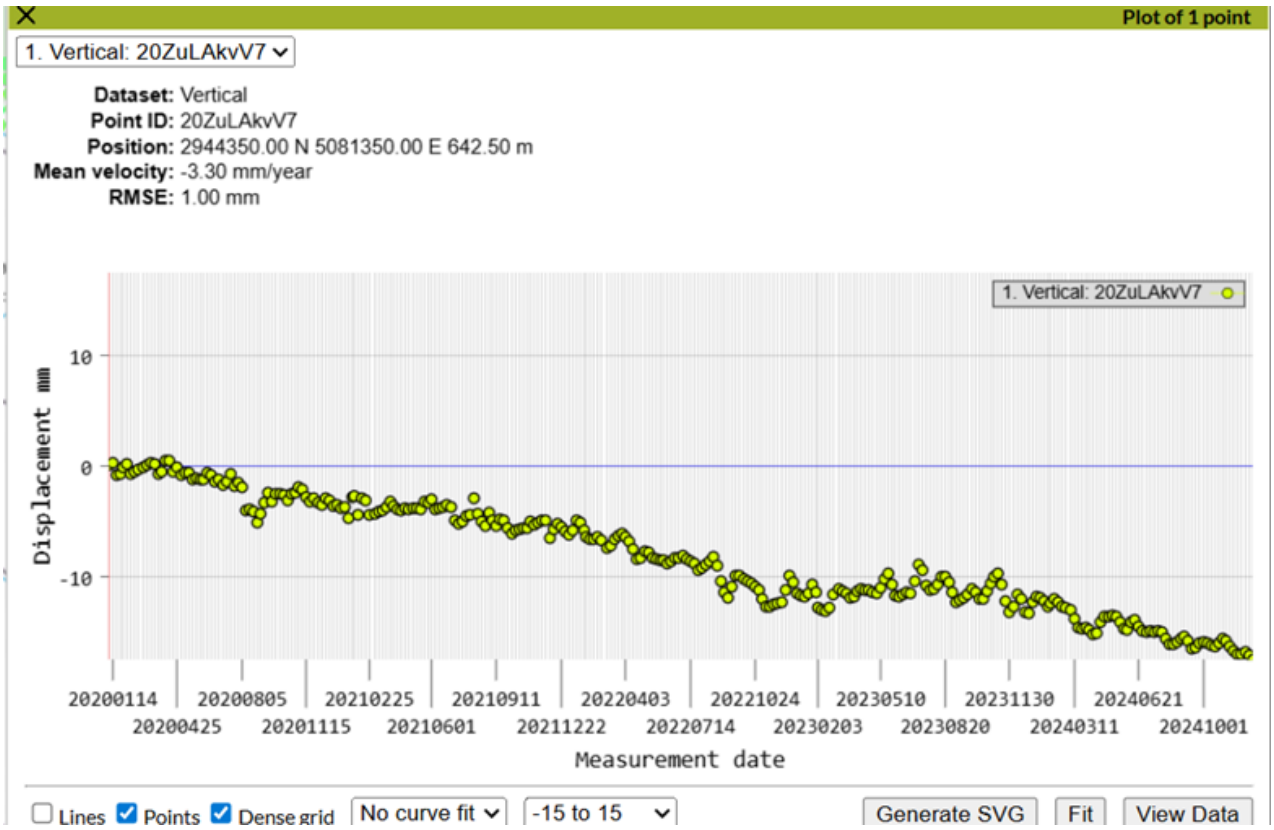
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 20 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



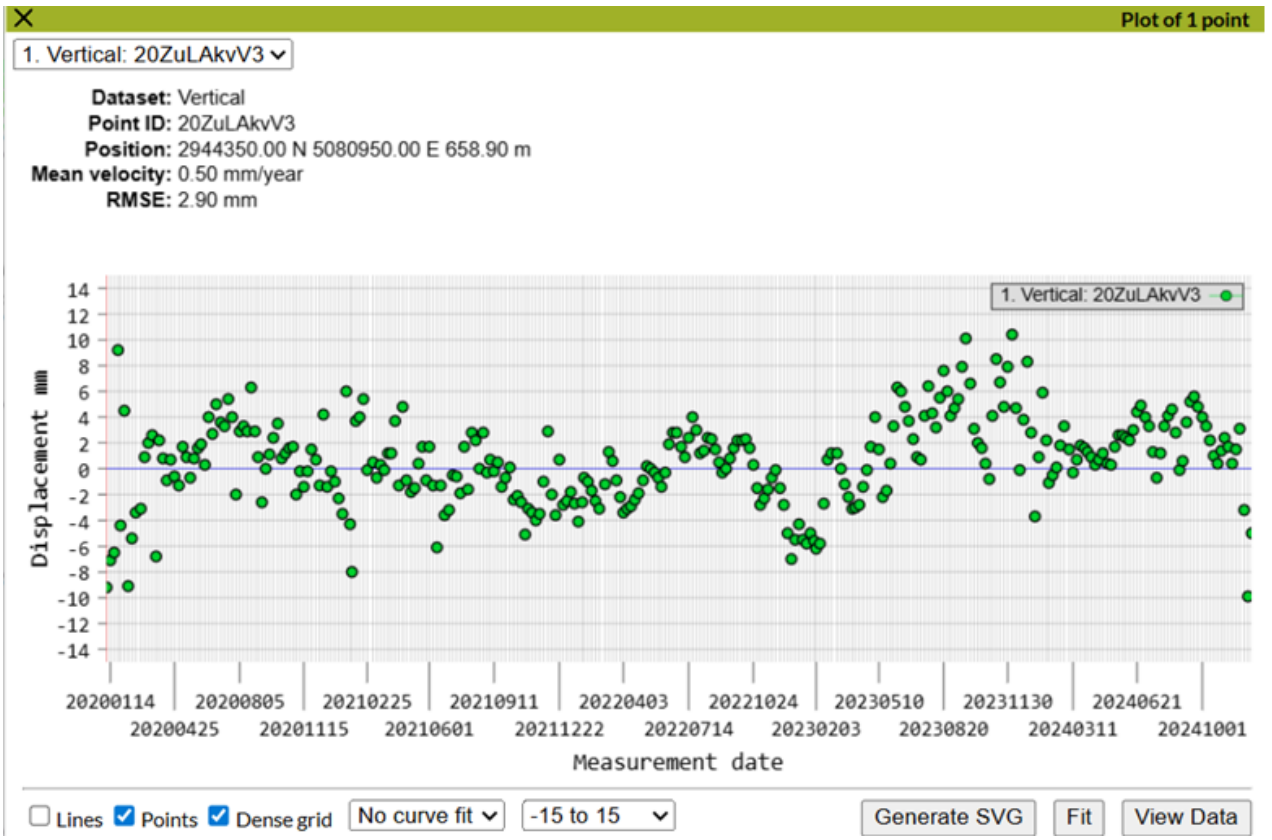
Obrázok 5. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



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).

Interferometrická analýza nepokrývala celé zosuvné územie, ale umožnila skúmať niekoľko bodov nachádzajúcich sa najmä v blízkosti zástavby. Výskum bol realizovaný pre obdobie rokov 2019–2023 a potvrdil aktivitu svahových procesov prostredníctvom zmien polohy analyzovaných bodov. Najväčšie zmeny reliéfu terénu boli zaznamenané pri analýze posunov do 5 mm/rok. Výrazné deformácie sa vyskytovali najmä na okrajoch mesta Kežmarok a v jeho okolí. V blízkosti obce Huncovce pri ceste číslo 66 bolo zaznamenané poklesávanie terénu dosahujúce približne 10 mm/rok. Nad zónou poklesu sa nachádzali oblasti zdvíhania terénu s hodnotami približne 2–3 mm/rok, čo môže naznačovať svahové deformácie alebo hospodársku činnosť. Významné deformácie boli pozorované aj v obci Ľubica, kde tempo zmien neprekračovalo 5 mm/rok.
V severnej časti mesta Kežmarok dominovali zóny mierneho zdvíhania terénu, lokálne dosahujúce 5 mm/rok, pričom sa súčasne vyskytovali poklesy do 10 mm/rok. Analýza štyroch vybraných bodov ukázala nerovnomerné tempo posunov a maximálne hodnoty dosiahli do 15 mm na severe a približne 20 mm na juhu skúmaného územia. Zvýšené poklesávanie terénu pozorované od roku 2021 môže súvisieť so zvýšenou aktivitou svahových deformácií vyvolanou intenzívnymi zrážkami.

Katowice, 25.05.2026

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