

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Správa o výskumnom teste týkajúcom sa rizika zosuvov pôdy s využitím radarovej interferometrie InSAR pre zosuvy pôdy v okolí mesta Martin

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 v okolí mesta Martin,
- 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.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

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 jeden z najdôležitejších nástrojov diaľkového prieskumu Zeme využívaných pri monitorovaní zosuvov pôdy. Táto metóda je založená na analýze fázových rozdielov radarového signálu zaznamenaného satelitmi počas opakovaných preletov nad tou istou oblasťou. Vďaka využitiu údajov z misií, ako je Sentinel-1, je možné vykonávať systematické pozorovania deformácií zemského povrchu. Interferogramy umožňujú detekciu vertikálnych a horizontálnych posunov s presnosťou na úrovni milimetrov. Pri výskume zosuvov pôdy táto technika umožňuje identifikovať náhle presuny, ako aj pomalé, dlhodobé svahové pohyby. Použitie viacčasových interferometrických analýz zvyšuje spoľahlivosť interpretácie výsledkov. Osobitne užitočná je metóda PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR), ktorá využíva stabilné objekty odrážajúce radarový signál. Umožňuje presné určenie rýchlosti deformácie svahov v dlhých časových radoch. Interferometria sa uplatňuje najmä v horských oblastiach, kde sú klasické geodetické merania sťažené. Umožňuje monitorovanie rozsiahlych území bez potreby inštalácie meracích prístrojov v teréne. V podmienkach hustého zalesnenia môže byť účinnosť metódy obmedzená dekoreláciou signálu. V takýchto prípadoch sa používajú techniky založené na trvalých rozptylovačoch alebo na analýze malých základní (SBAS).

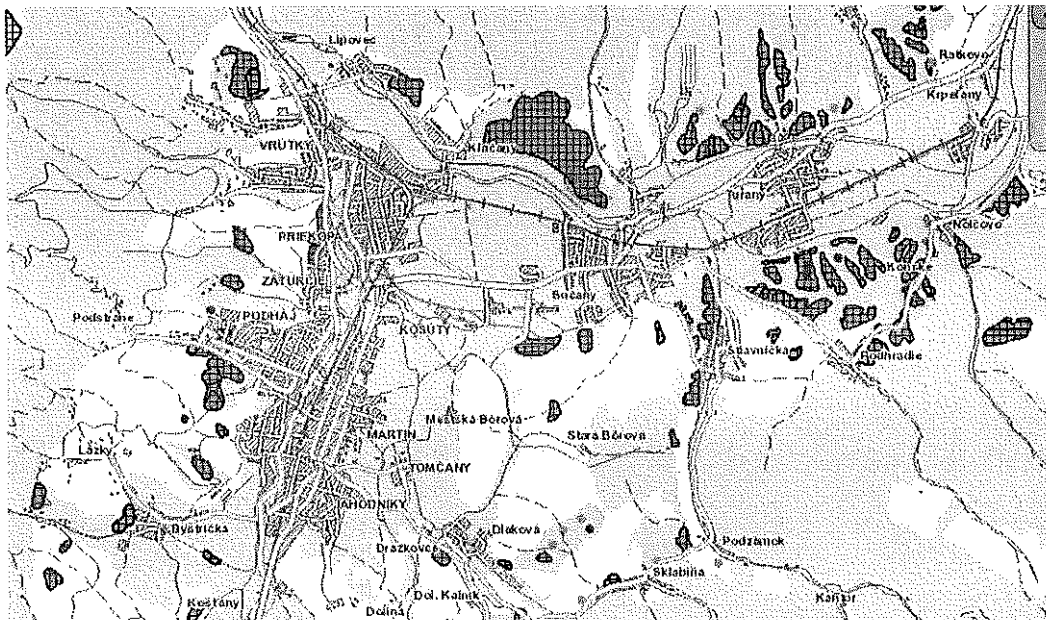
Interferometrické údaje sú často integrované s geologickými a geomorfologickými informáciami. To umožňuje lepšie pochopenie mechanizmu a rozsahu zosuvu. Interferometria taktiež umožňuje hodnotenie vplyvu atmosférických zrážok na aktivitu svahových pohybov. V kombinácii s meteorologickými údajmi podporuje tvorbu systémov včasného varovania. Táto metóda sa využíva aj na hodnotenie stability infraštruktúry nachádzajúcej sa v ohrozených oblastiach. Mimoriadny význam má pri monitorovaní urbanizovaných území a dopravných koridorov. Radarová interferometria prispieva k znižovaniu nákladov na výskum prostredníctvom obmedzenia počtu terénnych meraní. V súčasnosti predstavuje kľúčový prvok integrovaných systémov monitorovania zosuvných rizík.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce v okolí mesta Martin (obrazok 1). V predmetnej oblasti sa nachádza množstvo zosuvov lokalizovaných v bezprostrednej blízkosti budov. 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. Oblasť označená 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/>

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

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 v okolí mesta Martin 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

Mesto Martin sa nachádza v dolinnej depresii a je obklopené niekoľkými zónami svahových deformácií. Menšie deformácie svahov sa vyskytujú západne od mesta. Výraznejšie deformácie svahov sa nachádzajú aj severne od obce Sučany, ktorá leží východne od mesta Martin (obr. 1). Mesto Martin je situované v riečnej doline a najmä jeho severná časť je potenciálne vystavená zvýšenej depozícii svahového materiálu počas erózných procesov a aktivácie svahových sedimentov vo forme zosuvov (obr. 2).

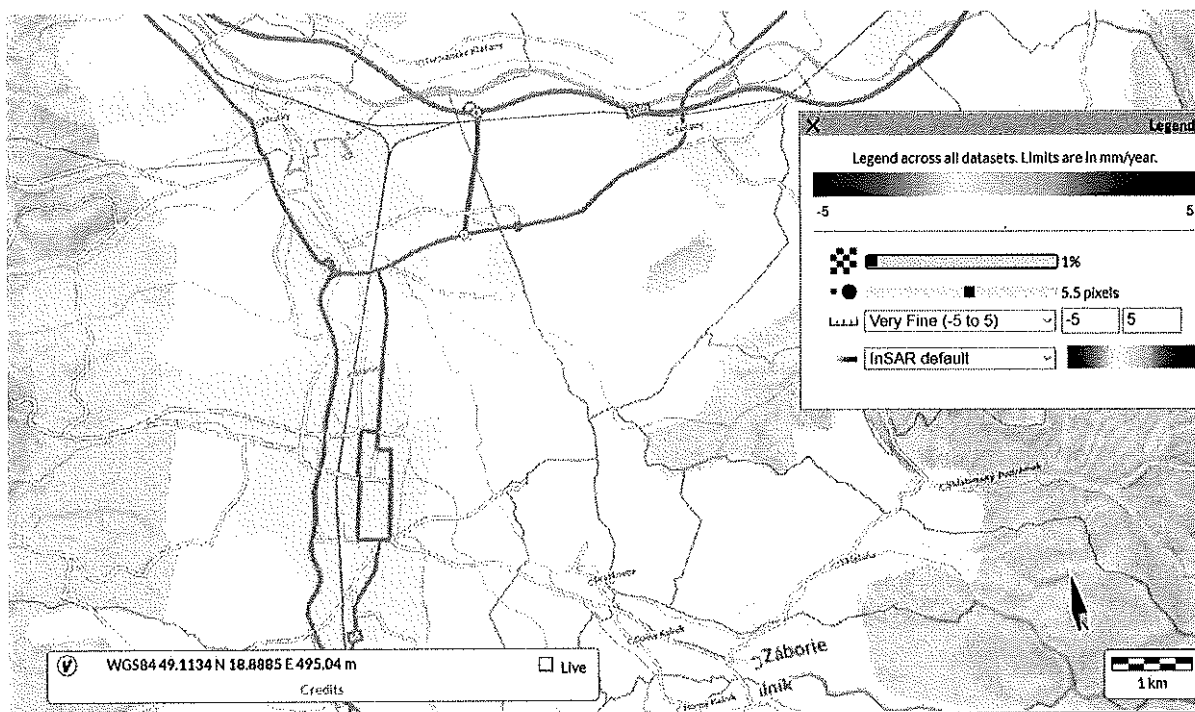
Z analýzy obrazov získaných pomocou radarovej interferometrie vyplýva, že skúmané územie nie je vystavené výrazným svahovým pohybom. Analýza posunov bodov s maximálnou hodnotou do 5 mm/rok ukazuje, že body s väčšími deformáciami sa nachádzajú najmä na okrajoch mesta, už na svahoch (obr. 3). Zmeny výšky bodov do 5 mm/rok sú veľmi dobre viditeľné na mape posunov bodov v kombinácii s podkladom ortofotomapy (obr. 4). Je zrejmé, že body s najväčšími deformáciami sú rozptýlené, čo môže súvisieť skôr s hospodárskou činnosťou človeka než s procesmi svahových pohybov. Na druhej strane sa body so zmenami výšky nachádzajú v zónach, kde je relatívne malý počet bodov radarového odrazu, čo môže vytvárať dojem, že ide o jednotlivé body, hoci v skutočnosti môže dochádzať k poklesu väčších území. Najväčší počet bodov vykazujúcich pokles sa nachádza v severozápadnej časti skúmaného územia a taktiež v jeho južnej časti (obr. 3 a 4). Tieto body sú situované v riečnych dolinách a pravdepodobne súvisia s drobnými presunmi svahového materiálu. Pozorovateľná je aj asymetria medzi poklesom a zdvihom bodov. V západnej časti skúmaného územia dochádza skôr k miernemu zdvíhaniu bodov, zatiaľ čo vo východnej časti je pozorovaný prevažne pokles povrchu (obr. 4). Takéto rozdiely môžu mať tektonický charakter. Na území Slovenska sa vyskytujú zemetrasenia a ide o seizmicky aktívnu oblasť, kde sa na mnohých miestach po seizmických udalostiach zaznamenávajú malé zmeny povrchu terénu.

V skúmanej oblasti je zároveň identifikovaná malá zóna s veľmi výrazným poklesom terénu. Nachádza sa východne od severnej časti mesta a pokles tu presahuje 100 mm/rok. S veľkou pravdepodobnosťou ide o malé územie spojené s ťažobnou alebo exploatačnou činnosťou. Ak sa tento lokálny exploatačný priestor nezohľadní, ostatné analyzované body vykazujú pokles maximálne do 5 mm/rok. Potvrďuje to aj analýza zmien výšky bodov na mape znázorňujúcej deformácie do 10 mm/rok, kde

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

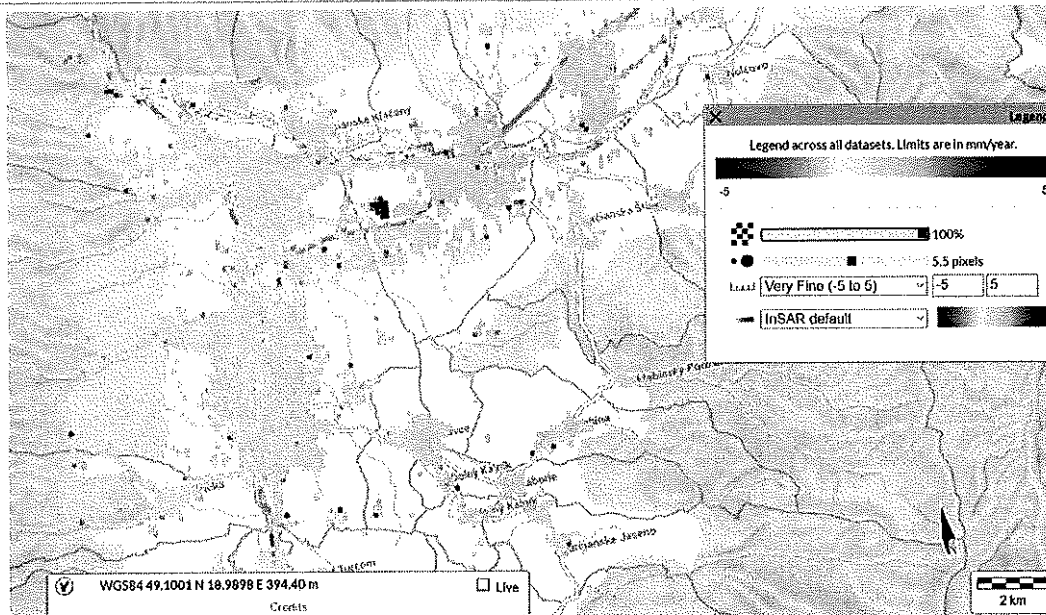
body nedosahujú maximálne hodnoty farebnej škály (obr. 5, 6). Na detailnejšiu analýzu zmien výšky bodov boli vybrané tie body, ktoré vykazovali najväčšie zmeny, pričom nebola zohľadnená ťažobná zóna nachádzajúca sa východne od mesta. Maximálne zdvihnutie bodov bolo relatívne malé a v období 2019–2023 dosiahlo približne 8 mm (obr. 7, 8). Odrazové body boli však veľmi rozptýlené a variabilné, čo je obzvlášť dobre viditeľné na obr. 8. Naznačuje to, že zmeny polohy bodov pravdepodobne nesúvisia so zosuvnými procesmi, ale skôr s vývojom vegetačného pokryvu. Naopak, pokles povrchu dosiahol väčšie hodnoty než zdvih a vo vybraných bodoch dosiahol približne 20 mm v období rokov 2019–2023 (obr. 9, 10).



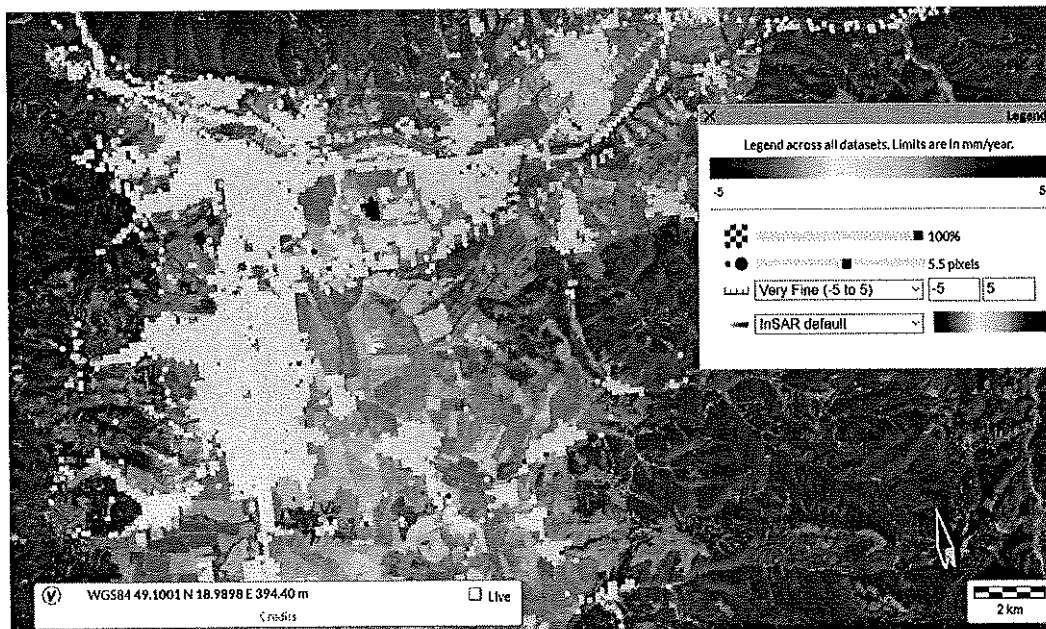
Obrázok 2. Poloha mesta Martin.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



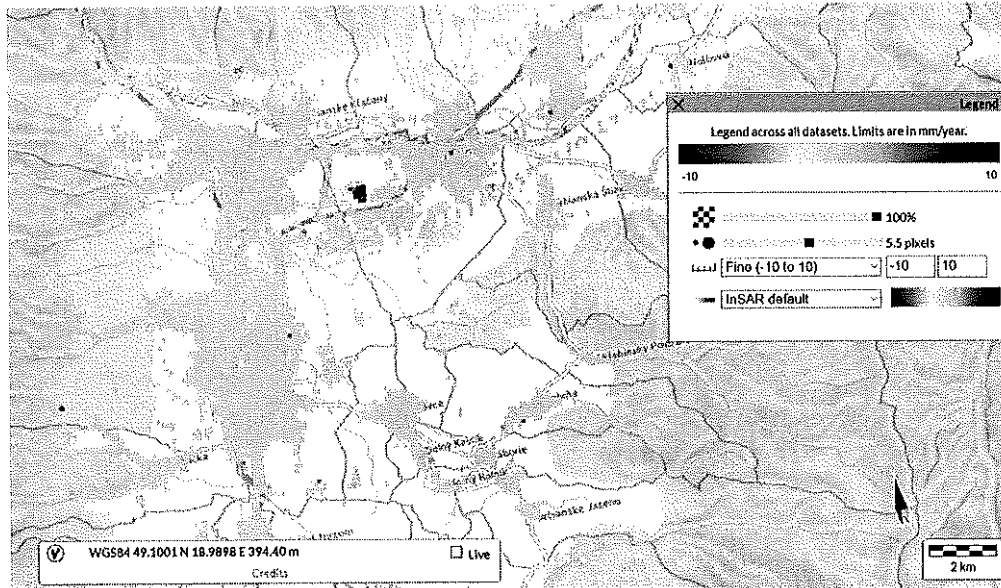
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



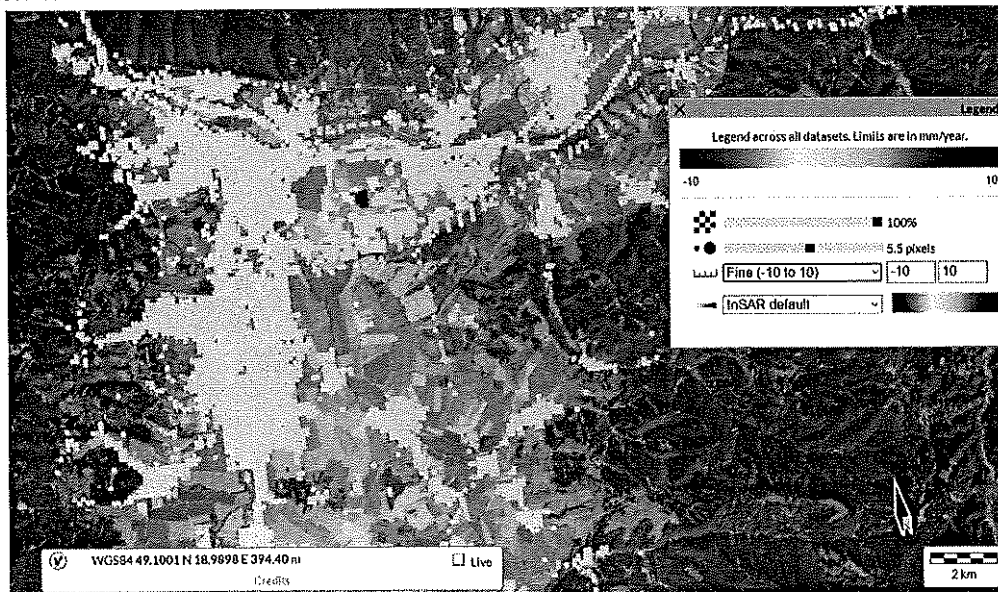
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie na pozadí ortofotomapy.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



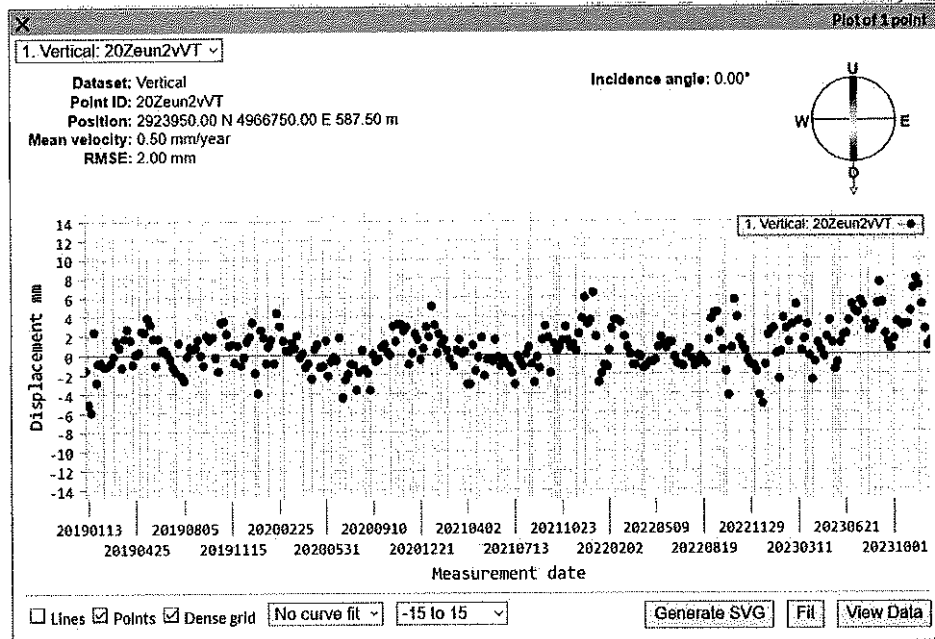
Obrázok 5. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



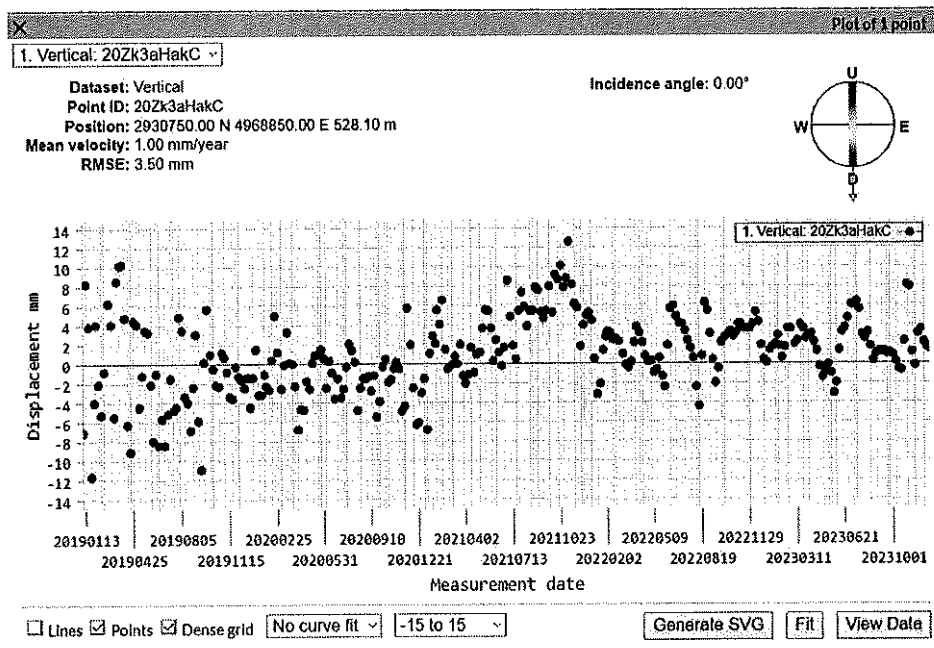
Obrázok 6. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie na pozadí ortofotomapy.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



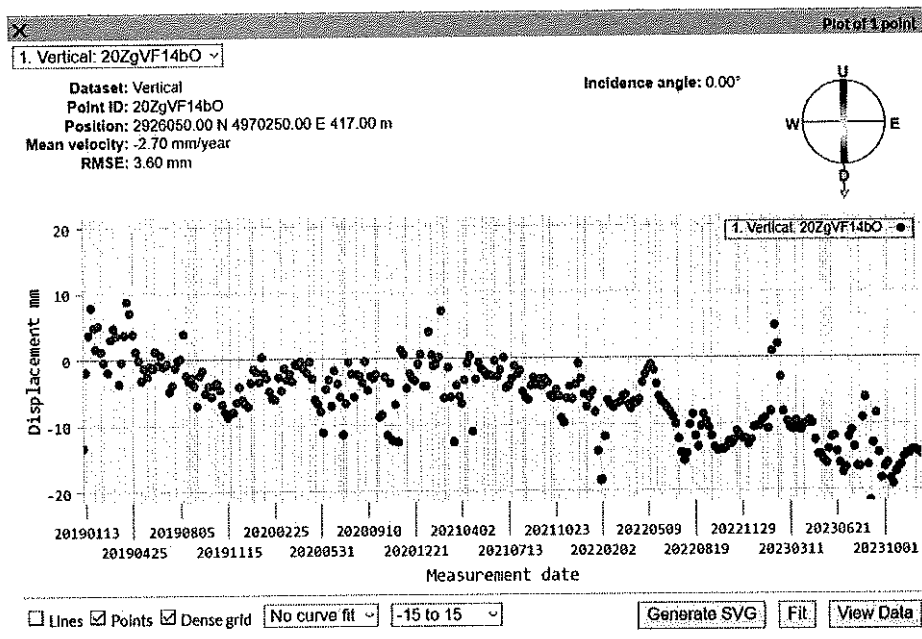
Obrázok 7. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



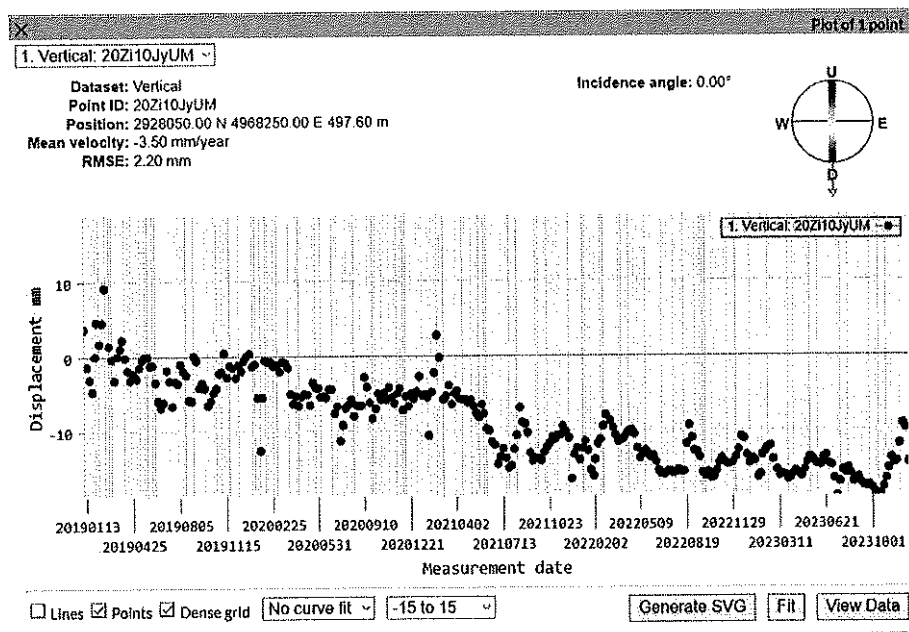
Obrázok 8. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 2.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Obrázok 9. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 3.



Obrázok 10. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 4.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

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).

V skúmanom území neboli identifikované výrazné zmeny povrchu terénu, ktoré by mohli svedčiť o aktívnych zosuvných procesoch. V oblasti výskumu prevládal mierny pokles povrchu, ktorý sa vyskytoval skôr rozptýlene a nenaznačoval existenciu súvislých zosuvných pohybov. Zdvih povrchu bol taktiež rozptýlený, pričom väčšie zdvíhanie bolo zaznamenané vo východnej časti skúmaného územia, čo môže mať tektonické príčiny. Najvyššia rýchlosť poklesu terénu dosiahla približne 5 mm/rok. To naznačuje, že aktivita svahových procesov je v skúmanom území nízka. V jednotlivých bodoch dosiahlo zdvihnutie povrchu hodnotu približne 8 mm v období rokov 2019–2023, zatiaľ čo pokles dosahoval maximálne približne 20 mm za rovnaké obdobie. Malé zmeny povrchu terénu identifikované pomocou interferometrickej metódy nenaznačujú prítomnosť aktívnych zosuvov, ktoré by predstavovali hrozbu pre infraštruktúru v skúmanom území. Napriek tomu sa odporúča doplniť výskum aj o ďalšie metódy, napríklad analýzu digitálnych modelov reliéfu založených na údajoch LiDAR alebo dendrochronologické analýzy. To je dôležité najmä v zónach obklopujúcich Martin, kde je hustota bodov využitých na interferometrické merania relatívne nízka.

PREZES ZARZADU
Oddział Górnośląski, Polskie
Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
Katowice, 26.02.2026

dr hab. 
Dr hab. Jerzy Cabała