

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 východne od mesta Turčianske Teplice

Nadzór merytoryczny:

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 východne od mesta Turčianske Teplice,
- 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 meračích 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.

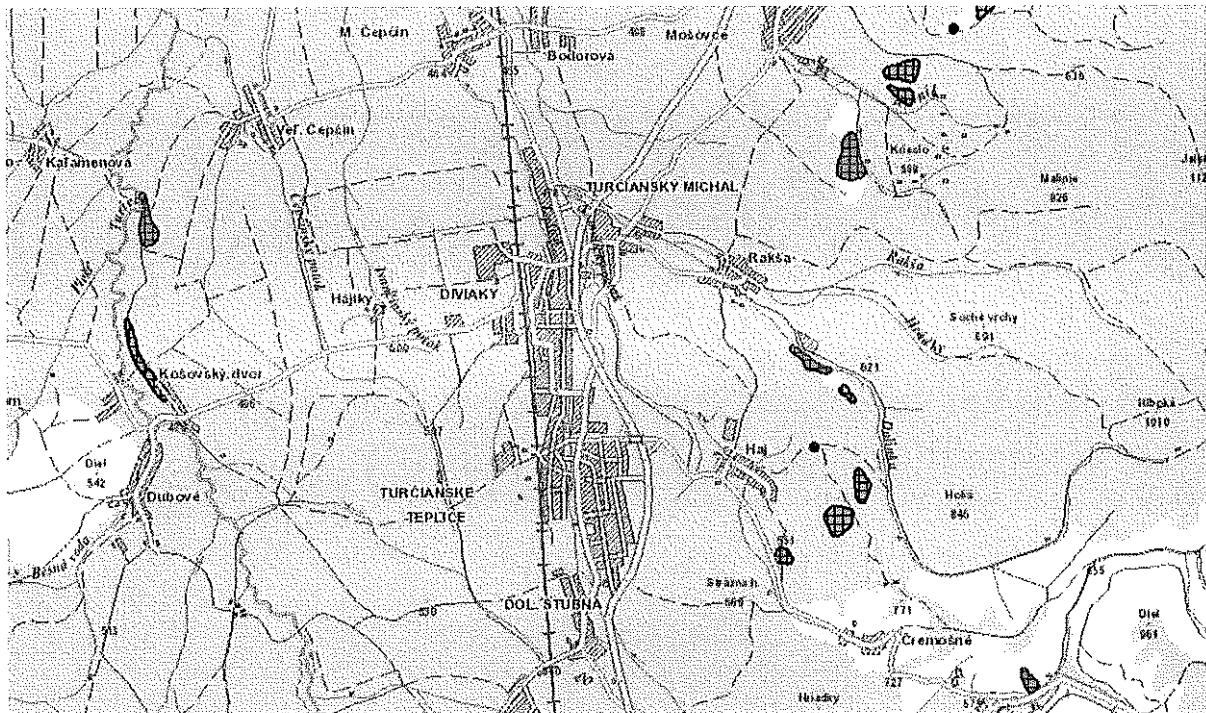
Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa na východne od mesta Turčianske Teplice (obr. 1). V predmetnej oblasti sa nachádza množstvo zosuvov lokalizovaných v bezprostrednej

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

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 na východne od mesta Turčianske Teplice 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

Po východnej strane mesta Turčianske Teplice sa nachádzajú malé zosuvy pôdy. Sú situované vo vyšších častiach svahov. Deformácie svahov sa nachádzajú v okolí obcí Rakša a Háj (obr. 1). Mesto Turčianske Teplice leží v znížene, ktorá je z východnej strany ohraničená nízkymi pahorkami (obr. 2).

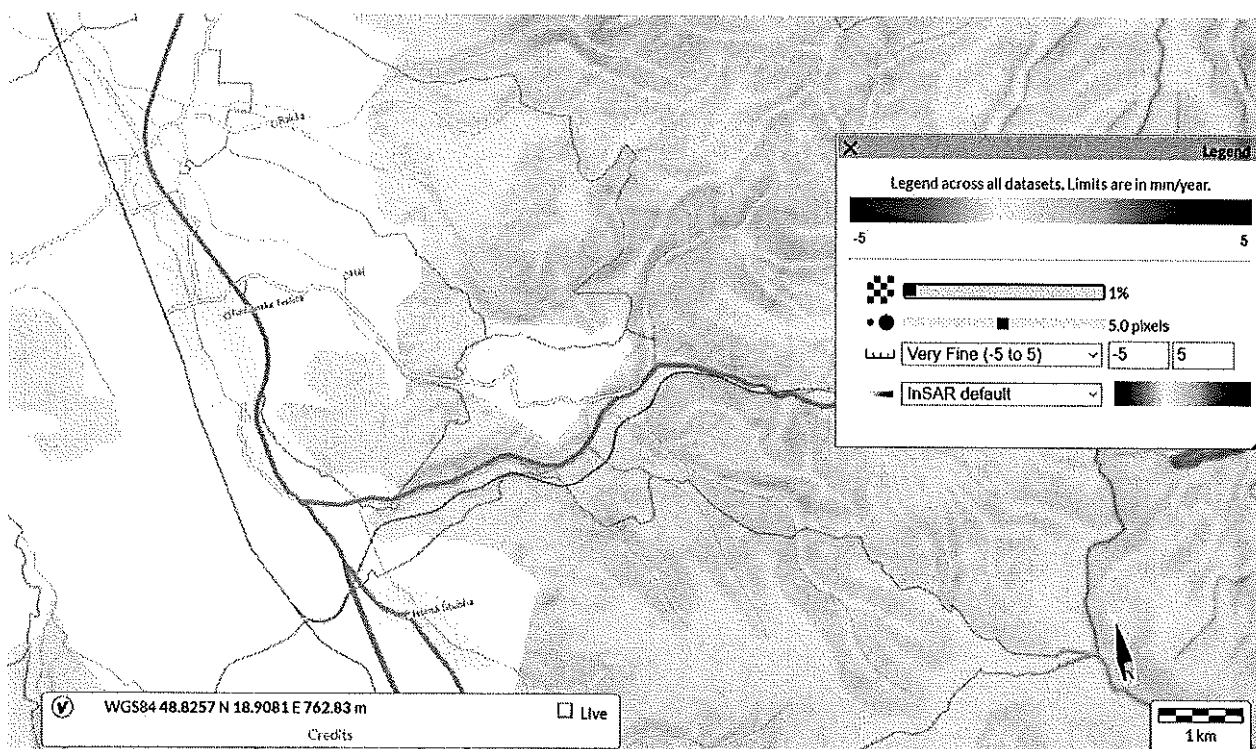
Z analýzy svahových deformácií vyplýva, že nie sú veľké a nemali by predstavovať zosuvné riziko pre mestskú zástavbu. Pri analýze zmien povrchu terénu s maximálnou hodnotou do 5 mm/rok pomocou radarovej interferometrie je však viditeľné, že body nachádzajúce sa vo východnej časti mesta menia svoju výšku (obr. 3). Niektoré body sa pomerne výrazne znižujú, najmä v okolí obce Rakša, kde hodnoty poklesu na niektorých miestach dosahujú maximálne hodnoty. Charakteristické je aj to, že sa tu nachádza množstvo miest, ba dokonca zón, v ktorých sa úroveň terénu zvyšuje. Je to obzvlášť dobre viditeľné na podklade ortofotomapy (obr. 4). Zdá sa, že takéto zmeny povrchu terénu na pomerne malom území môžu svedčiť o aktivite zosuvných procesov. Pri analýze zmien povrchu terénu dosahujúcich do 10 mm/rok je zrejmé, že body nachádzajúce sa východne od mesta nedosahujú maximálne hodnoty – maximálne nasýtenie farieb (obr. 5, 6). Znamená to, že najväčšie hodnoty zmien povrchu terénu v skúmanom území dosahujú približne 12–13 mm/rok. To naznačuje, že v skúmanom území sa vyskytujú zóny aktívnych výškových zmien, avšak relatívne malé. Relatívne malé je aj pokrytie interferometrickými bodmi v oblasti nachádzajúcej sa východne od mesta, čo sťažuje jednoznačné hodnotenie zosuvného ohrozenia v skúmanom území. Interferometrická analýza zmien povrchu terénu odhalila aj zmeny viditeľné pozdĺž železničnej trate prechádzajúcej západnou časťou mesta (obr. 3, 4). Pokles terénu pozdĺž železničnej trate dosahuje hodnoty 7–8 mm/rok. Zmeny povrchu terénu môžu súvisieť s opravami železničnej trate, môžu byť však tiež spojené so zmenami spôsobenými prejazdom vlakov a poškodzovaním koľaje. Ide však o vedľajšiu tému tejto práce a nesúvisí priamo so zosuvmi, avšak v budúcnosti by bolo vhodné venovať zmenám povrchu terénu pozdĺž železničnej trate väčšiu pozornosť, aby sa predišlo problémom spojeným s poškodzovaním železničnej infraštruktúry.

Analýza pohybov terénu vykonaná v jednotlivých bodoch ukázala, že po východnej strane mesta sa nachádzajú zóny, kde sa terén jednoznačne znižuje, zatiaľ čo v iných oblastiach dochádza k jeho zdvíhaniu. Na analýzu boli vybrané body, v ktorých bol zaznamenaný maximálny pokles a zdvih terénu. V bode 1,

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

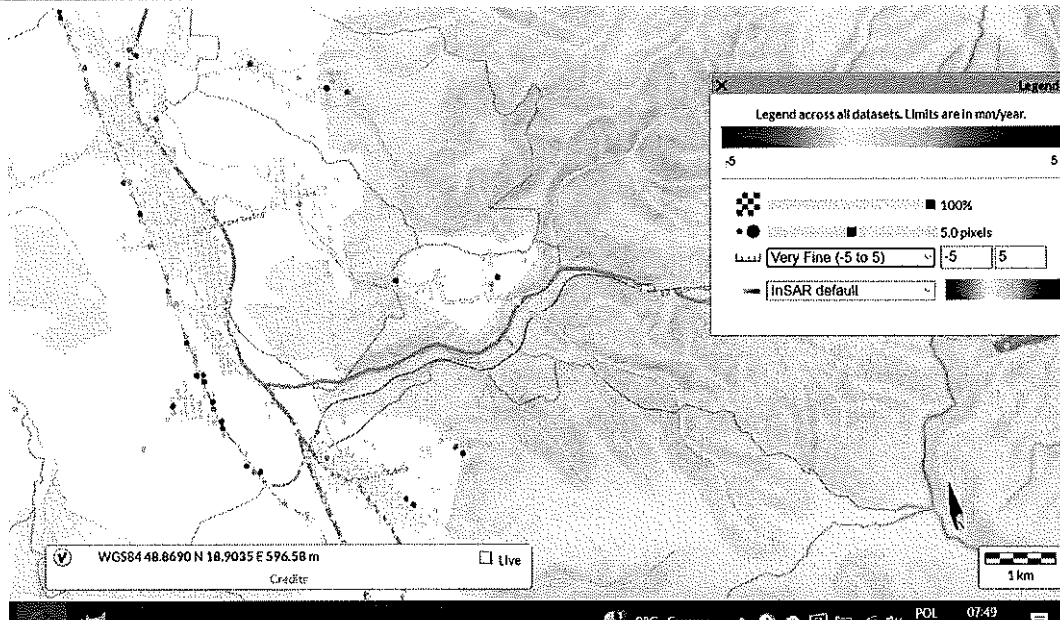
nachádzajúcom sa v obci Rakša, sa terén v rokoch 2019–2023 zdvihol o 8 mm, zatiaľ čo v bode 2, nachádzajúcom sa v blízkosti bodu 1, sa terén znížil približne o 15 mm (obr. 7, 8). Ďalšie dva body nachádzajúce sa juhovýchodne od mesta taktiež predstavujú zóny, kde na jednej strane dochádza k zdvihaniu a na druhej strane k poklesu terénu (obr. 9, 10). V bode 3 bol zaznamenaný pokles terénu do 20 mm v období 2019–2023, zatiaľ čo v bode 4 došlo k zdvihnutiu približne o 10 mm.



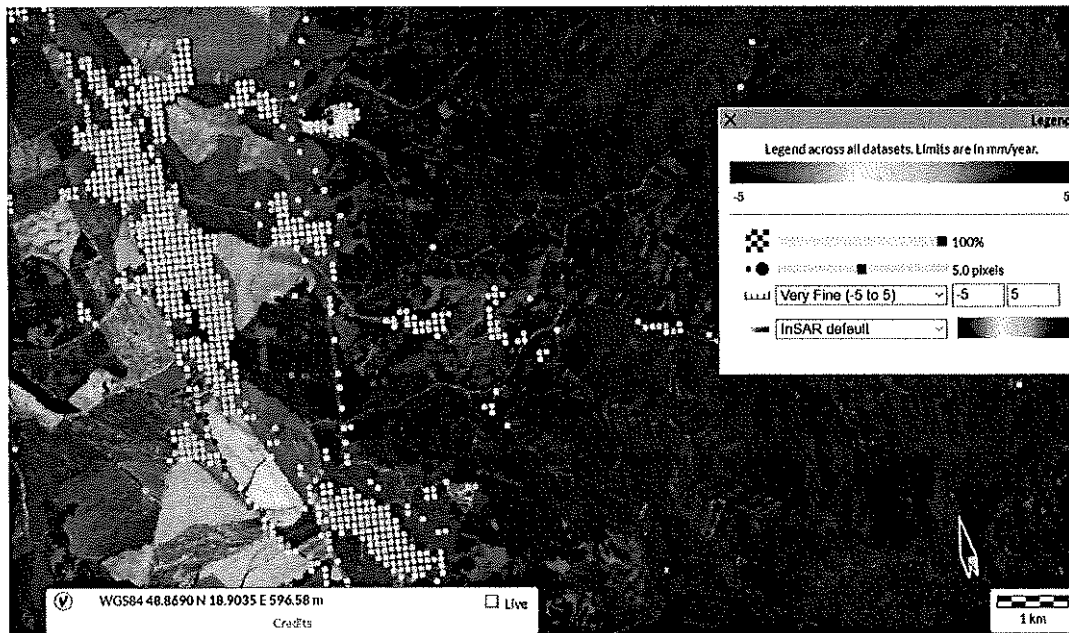
Obrázok 2. Poloha Turčianskych Teplic.

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



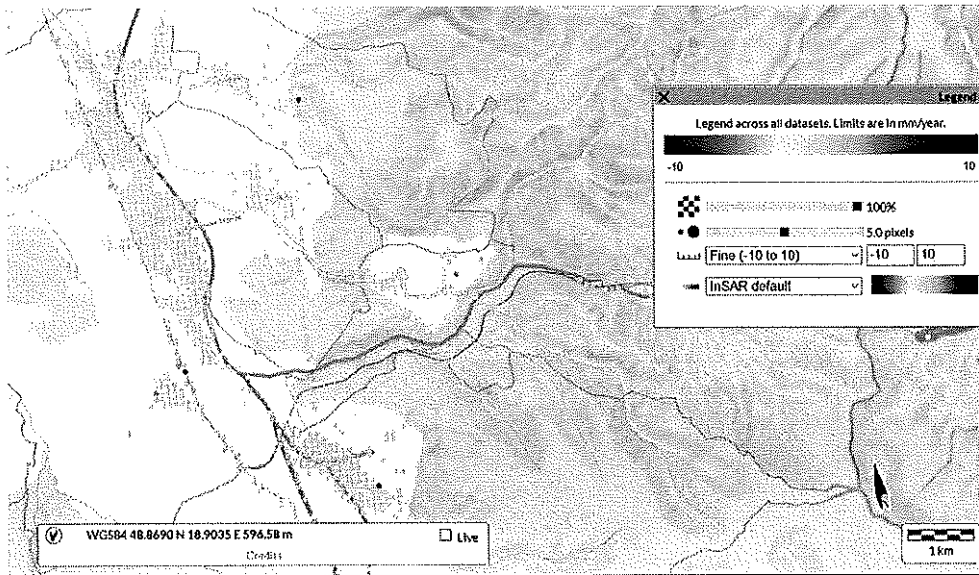
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



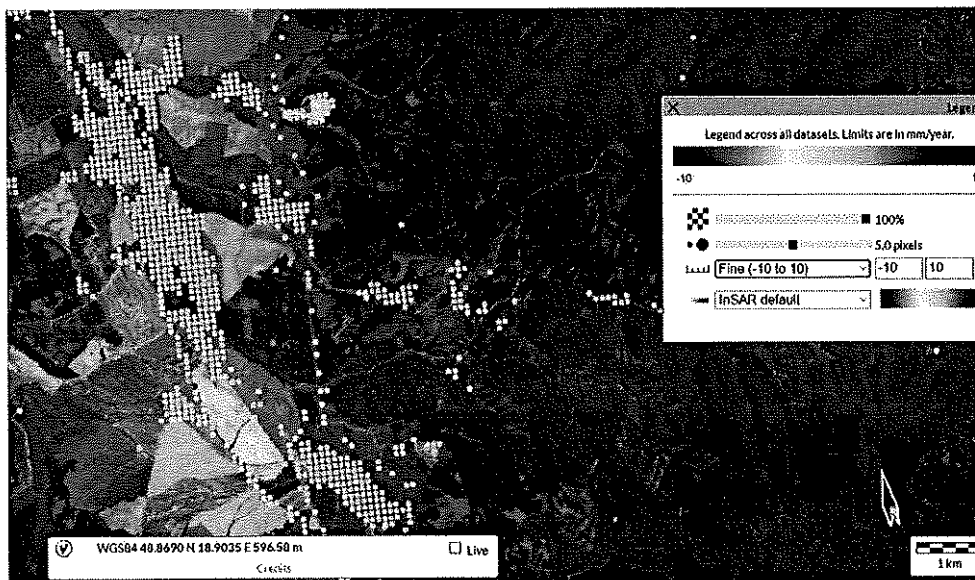
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie na pozadí ortofotomapy.

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



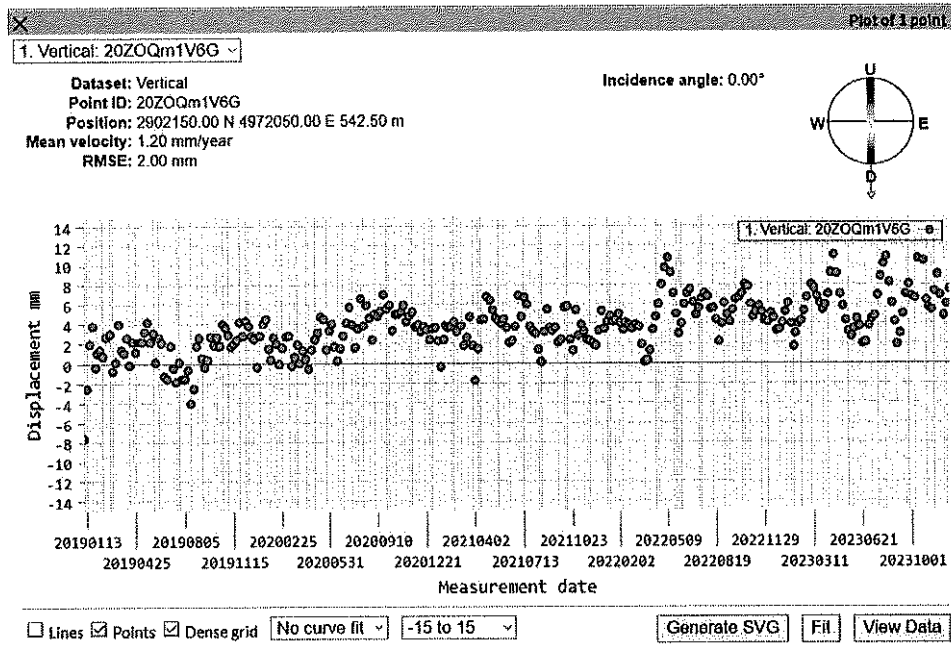
Obrázok 5. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



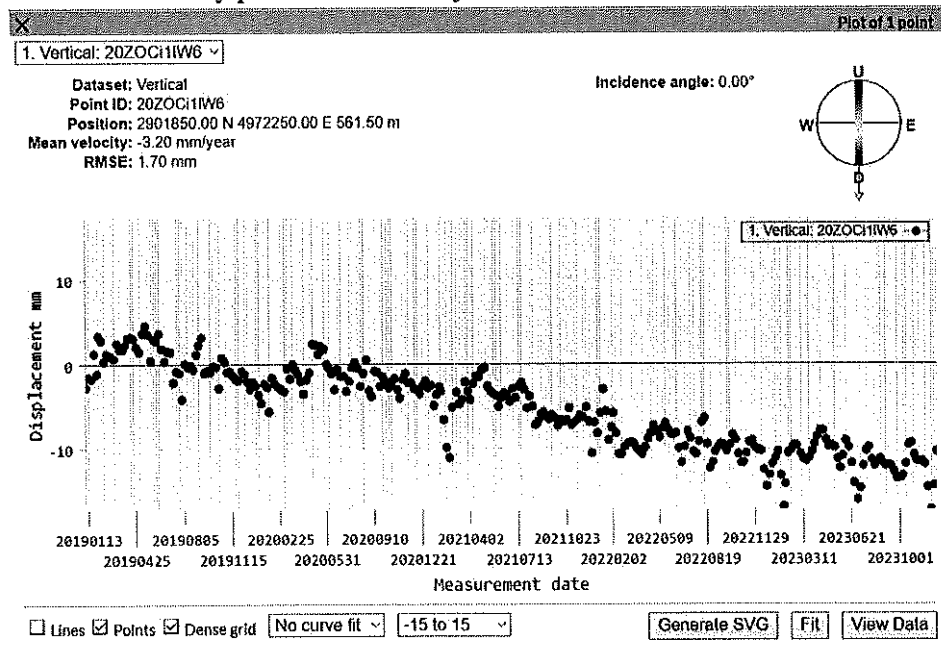
Obrázok 6. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie na pozadí ortofotomapy.

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



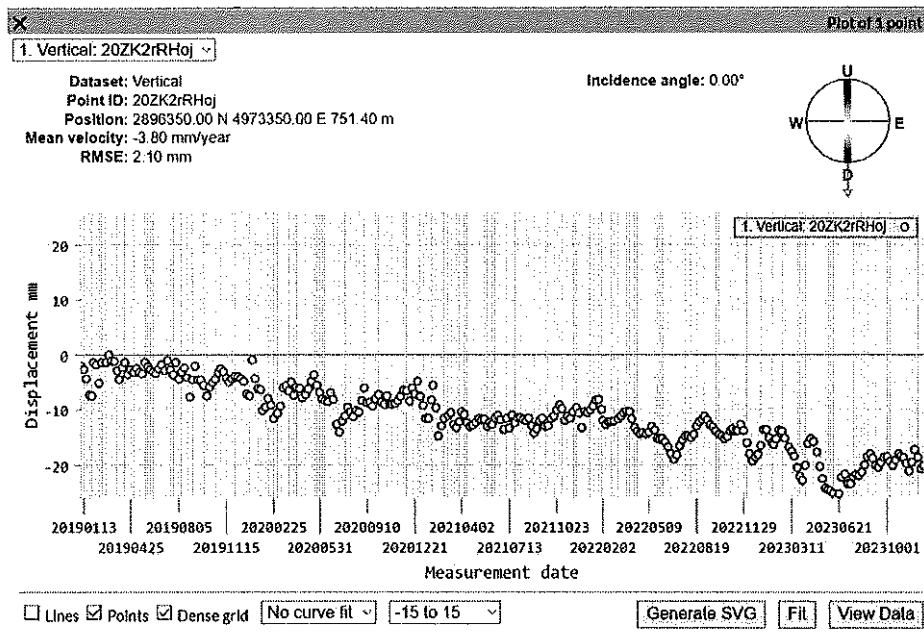
Obrázok 7. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



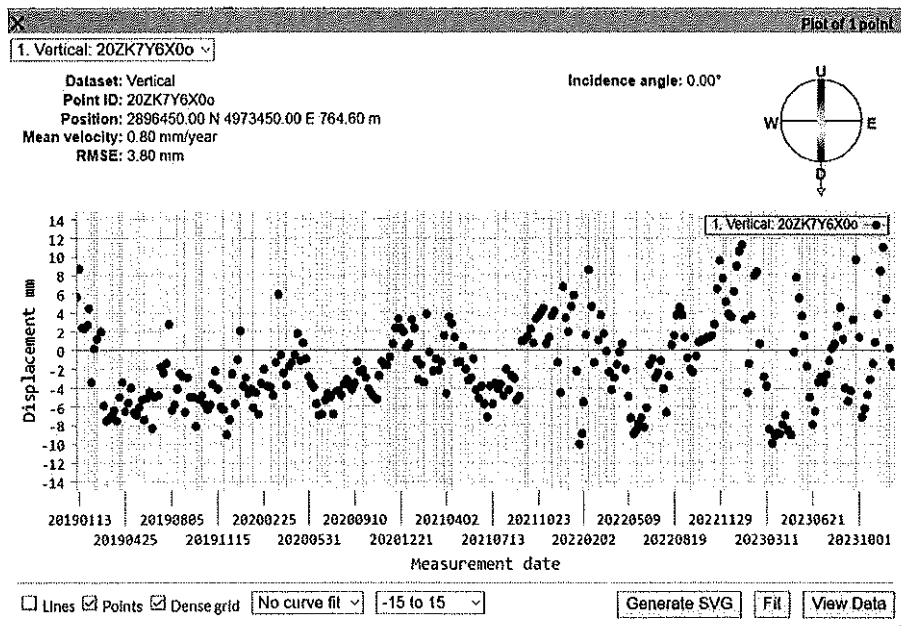
Obrázok 8. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 2.

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. Závěry 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 analyzovanom území existuje mierne riziko výskytu svahových pohybov, o čom svedčí zosuvná aktivita svahov nachádzajúcich sa na východnej strane mesta Bytča. Táto aktivita nie je výrazná a zaznamenané zmeny povrchu terénu dosahujú približne 12–13 mm za rok. V analyzovaných zónach dochádza zároveň k poklesu aj zdvihu povrchu terénu, čo môže naznačovať prítomnosť aktívnych zosuvných procesov na východnej strane mesta. Na druhej strane sa vo východnej časti mesta nachádza pomerne malý počet bodov, v ktorých boli analyzované zmeny povrchu terénu pomocou radarovej interferometrie. Z tohto dôvodu je objektívne posúdenie zosuvného ohrozenia v skúmanej oblasti pomerne obmedzené. Odporúča sa preto vykonať doplnkové výskumy s využitím ďalších metód, napríklad analýzu numerických modelov reliéfu na základe údajov získaných technológiou LiDAR, ako aj dendrochronologické analýzy.

Zároveň sa odporúča analyzovať zmeny povrchu terénu pozdĺž železničnej trate prechádzajúcej mestom, a to v kontexte ich pôvodu. Tieto zmeny môžu mať antropogénny charakter, ale môžu byť tiež spôsobené prirodzenými deformáciami vznikajúcimi počas železničnej dopravy. V druhom prípade by bolo potrebné zvážiť prijatie primeraných technických opatrení na obmedzenie alebo stabilizáciu týchto deformácií.

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

dr hab. Jerzy Cabała
Dr hab. Jerzy Cabała