



## 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 severne od mesta Bytča**

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 severne od mesta Bytča
- 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,

## 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*

---

- 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 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 dekorreláciou signálu. V takýchto prípadoch sa používajú techniky založené na trvalých rozptylovačoch alebo na analýze malých základní (SBAS).

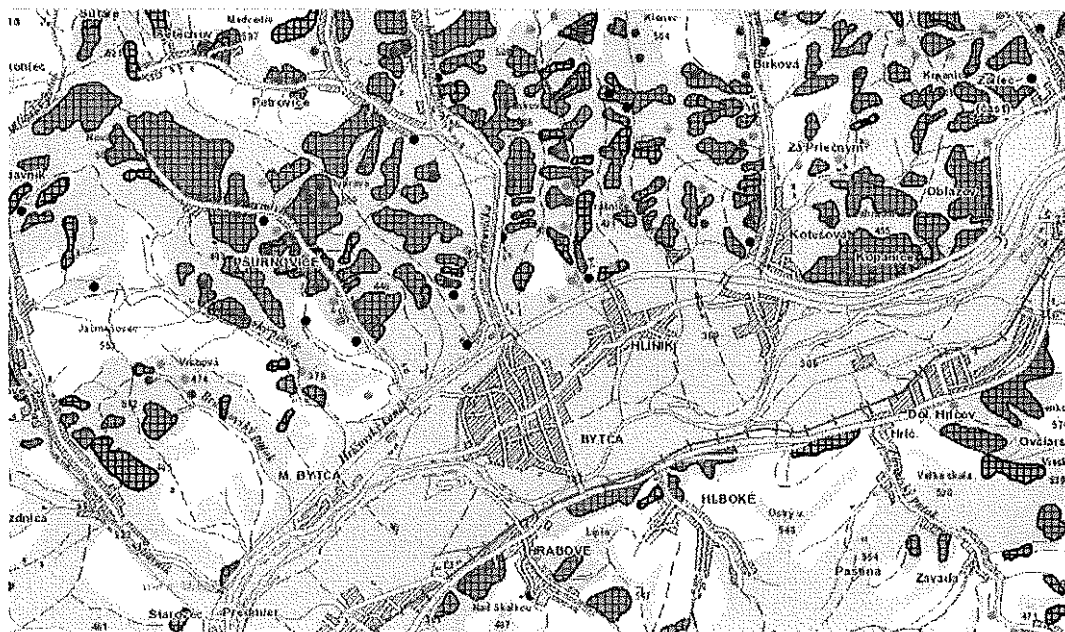
Interferometrické údaje sú často integrované s geologickými a geomorfologickými informáciami. To umožňuje lepšie pochopenie mechanizmu a rozsahu zosuvu. Interferometria taktiež umožňuje hodnotenie vplyvu atmosférických zrážok na aktivitu svahových pohybov. V kombinácii s meteorologickými údajmi podporuje 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 sa severne od mesta Bytča (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. 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/>

## 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 severne od mesta Bytča 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

Mestečko Bytča sa nachádza v blízkosti územia s výskytom zón svahových deformácií. Zosuvy pôdy sa tu vyskytujú pomerne početne najmä na severnej strane mesta (obrázok 1). Z tejto strany do mesta pritekajú aj potoky s relatívne veľkým sklonom. V prípade aktivácie svahových procesov a zvýšeného transportu materiálu by mohli spôsobiť škody v meste, ktoré je situované na dne riečnej doliny (obrázok 2).

V samotnom meste sa nachádza viacero bodov, v ktorých boli vykonané merania zmien povrchu terénu pomocou radarovej interferometrie. Analýza zmien polohy bodov pri maximálnom rozdiel do 5 mm/rok ukázala, že územie podliehalo pomerne malým deformáciám, predovšetkým v oblasti nachádzajúcej sa v blízkosti cesty spájajúcej Bytča s obcou Kotešová (obrázok 3). Žiaľ, v zóne postihnutej svahovými pohybmi, ktorá sa nachádza severne od mesta, je pokrytie bodmi získanými z interferometrickej analýzy pomerne slabé. Z tohto dôvodu nie je možné vyvodiť jednoznačné závery o zosuvnej aktivite v tejto oblasti. Pokles povrchu terénu rýchlosťou približne 2–3 mm/rok sa vyskytuje prevažne v jednotlivých bodoch a pravdepodobne ho nemožno považovať za významné zosuvné riziko. Jednotlivé body, v ktorých bol zaznamenaný pokles povrchu, skôr naznačujú vplyv hospodárskych alebo stavebných činností než svahových procesov. Výnimku predstavujú dve menšie zóny deformácií. Jedna sa nachádza severne a južne od obce Kotešová, druhá je situovaná severovýchodne od obce Hlboké nad Váhom. Tieto zóny sú dobre viditeľné na obrázku zobrazujúcom zmeny povrchu terénu s rýchlosťou približne 5 mm/rok na podklade ortofotomapy (obrázok 4).

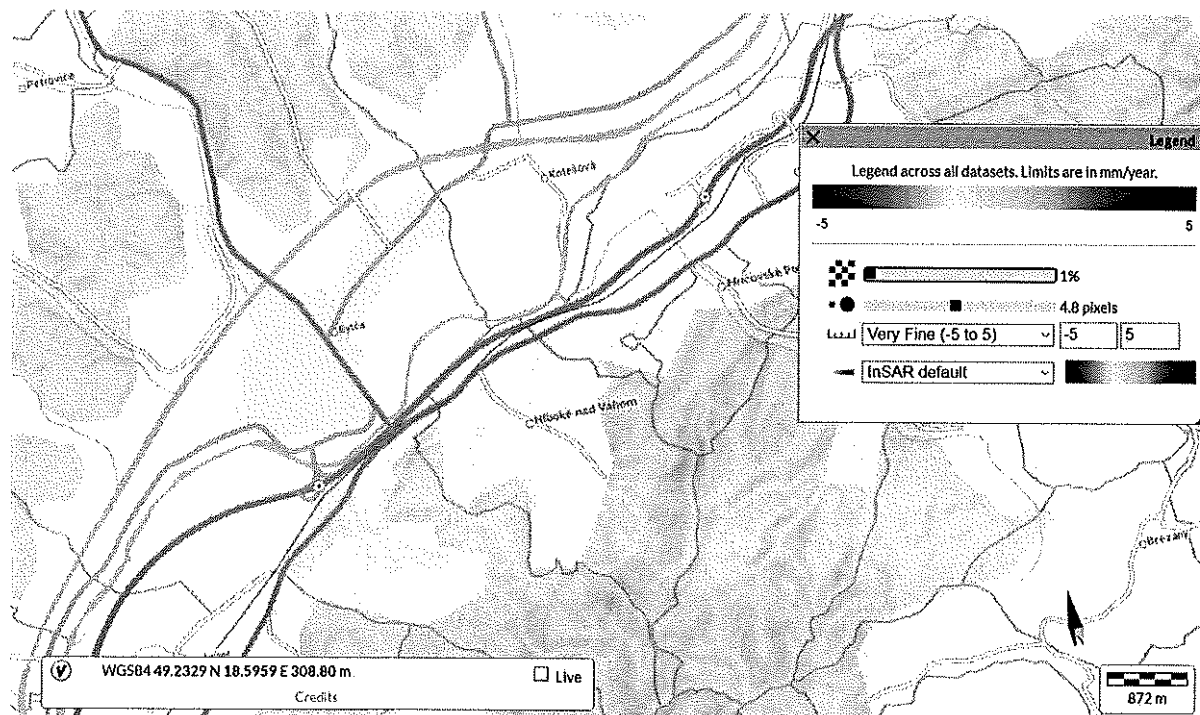
Na obrázku zobrazujúcom zmeny povrchu terénu s priemernou hodnotou 10 mm/rok neboli zaznamenané výraznejšie deformácie reliéfu, s výnimkou jedného bodu nachádzajúceho sa severne od mesta smerom k obci Kotešová, kde pokles povrchu môže súvisieť s hospodárskou alebo stavebnou činnosťou (obrázky 4, 5). To znamená, že maximálne zaznamenané poklesy terénu v skúmanej oblasti neprekračujú hodnotu 10 mm/rok.

Zmeny povrchu terénu boli analyzované aj v jednotlivých bodoch. Na tento účel boli vybrané body, v ktorých pokles alebo zdvih povrchu (vyskytujúci sa sporadicky) dosahoval najvyššie hodnoty. V bode č. 1 a 2 je pozorovateľný pokles povrchu terénu, ktorý v rokoch 2019–2023 dosiahol približne 20 mm. Tento

## 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*

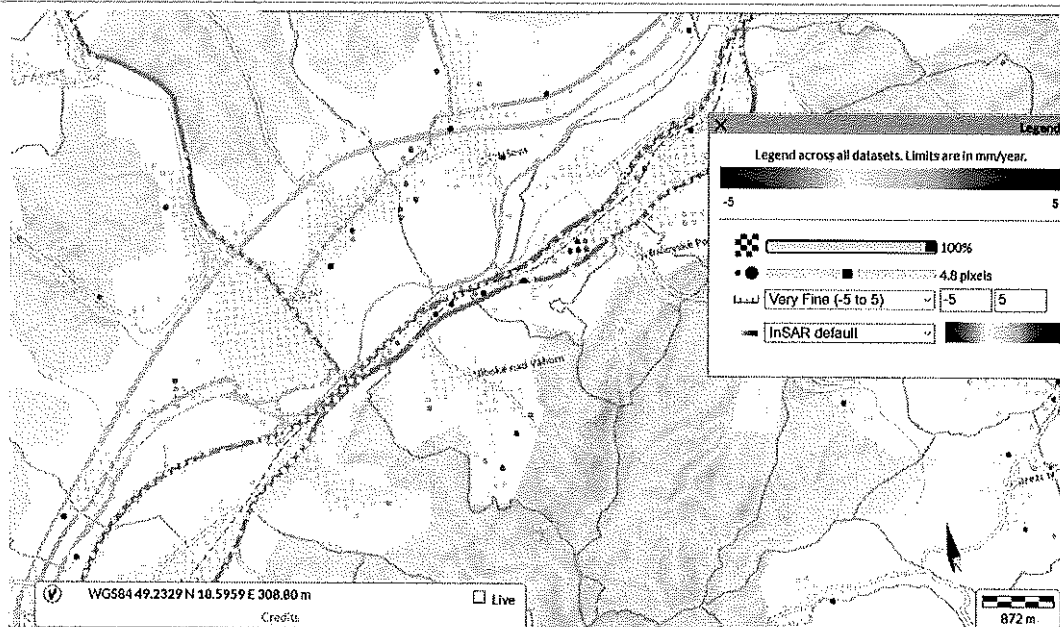
pokles má však skokovitý charakter; výrazné zrýchlenie tempa poklesu bolo zaznamenané najmä v rokoch 2024 a 2025. Takýto priebeh môže naznačovať zosuvný charakter deformácií povrchu terénu (obrázky 6, 7). V bode č. 3 dosiahol pokles približne 8 mm a prebiehal pomerne rovnomerne, pričom podobný priebeh sa opakoval každý rok. Je možné, že ročná variabilita je spôsobená postupným rastom a následným odumieraním vegetácie v danom bode. To by znamenalo, že tento bod sa nachádza v oblasti lúčnej alebo poľnej vegetácie, kde sa sezónne zmeny výšky odrazovej plochy môžu prirodzene vyskytovať (obrázok 8). V poslednom analyzovanom bode bol zaznamenaný mierny zdvih povrchu terénu, ktorý sa v priebehu roka menil podobne ako v prípade bodu č. 3. Môže to naznačovať, že interferometrická analýza bola v tomto bode vykonaná v prostredí lesného alebo lúčneho porastu (obrázok 9).



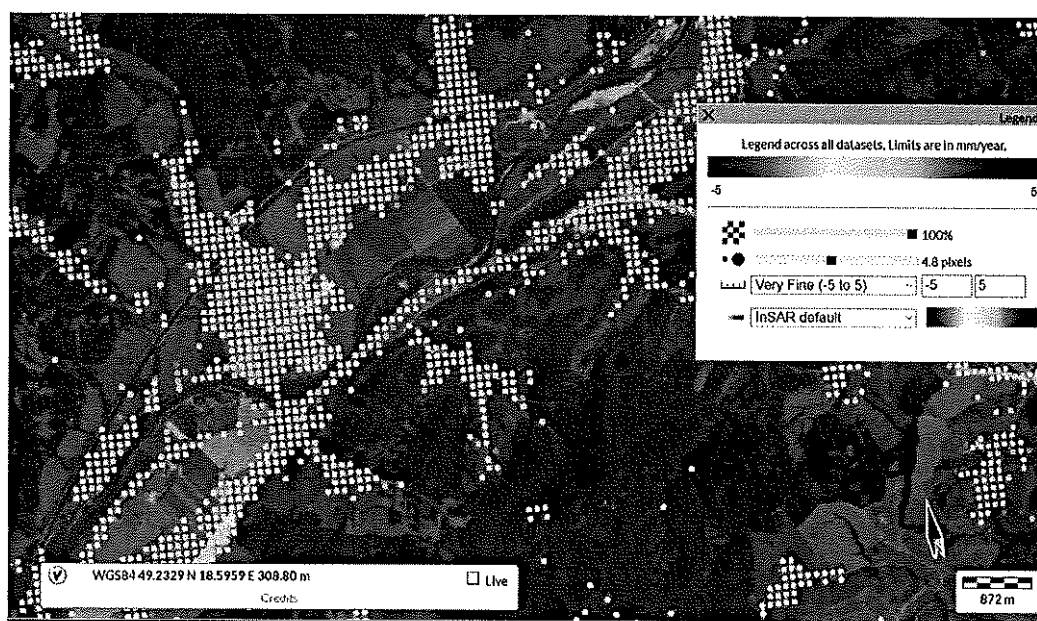
Obrázok 2. Poloha mesta Bytča v údolnej kotline.

## 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*



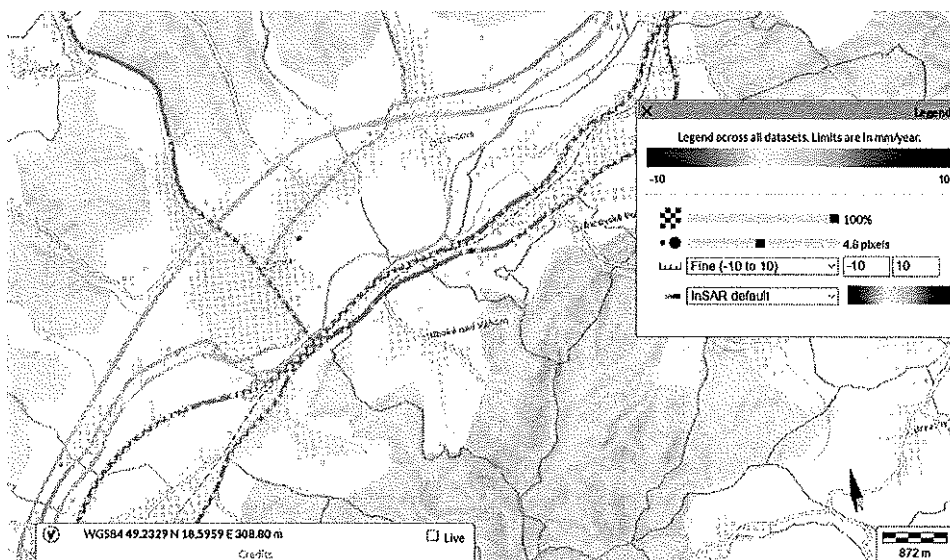
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



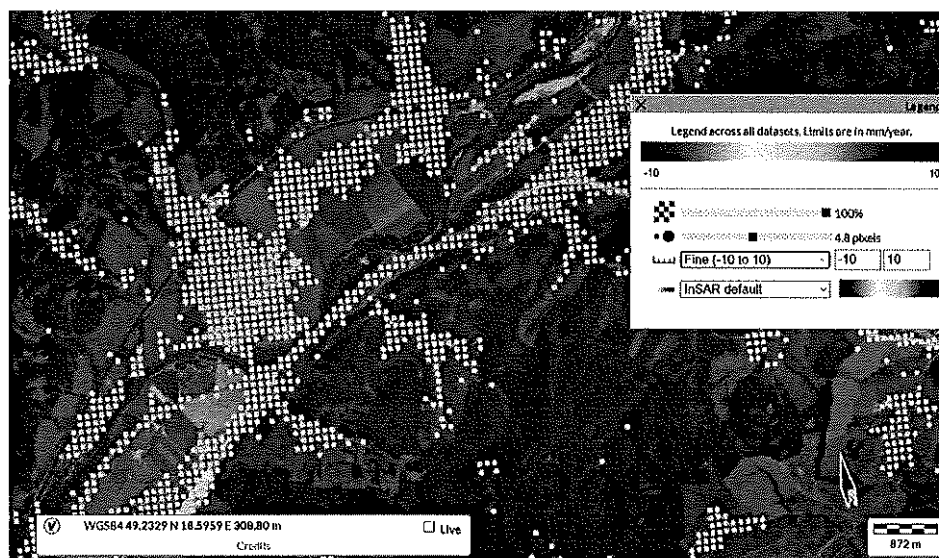
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie na pozadí ortofotomapy.

## 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*



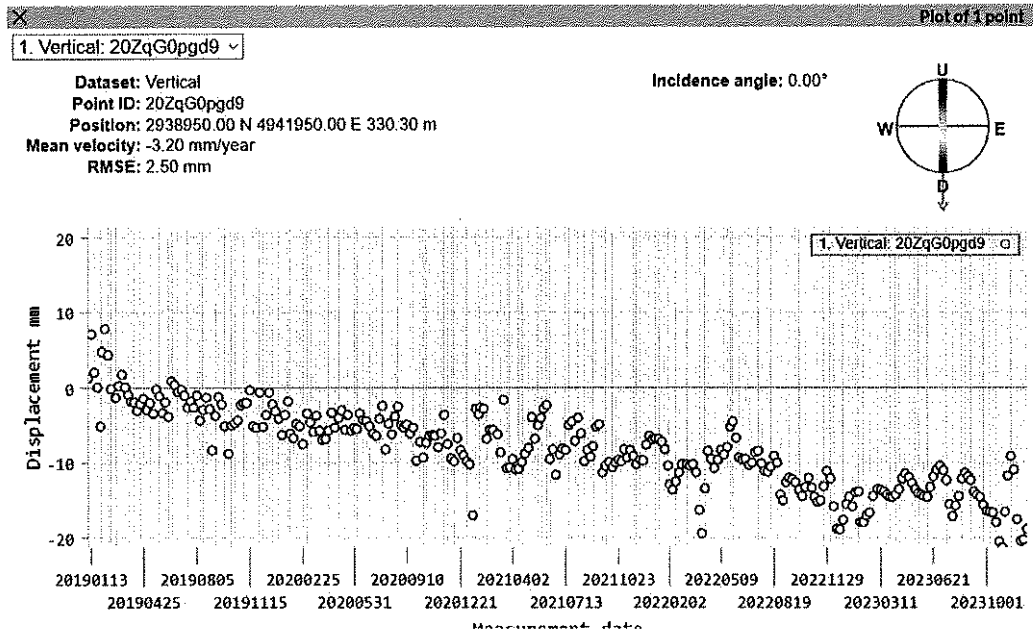
Obrázok 5. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



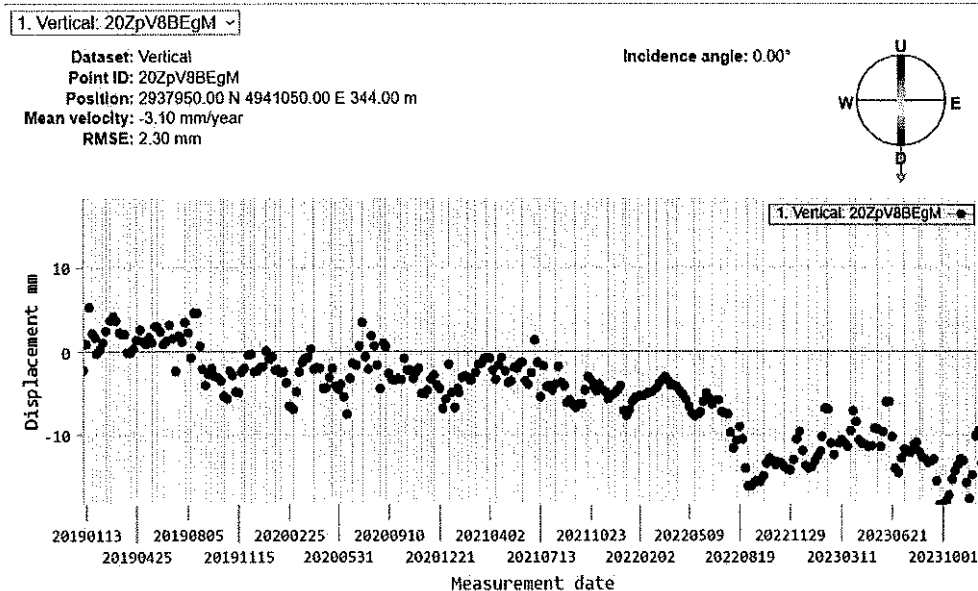
Obrázok 6. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie na pozadí ortofotomapy.

## 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*



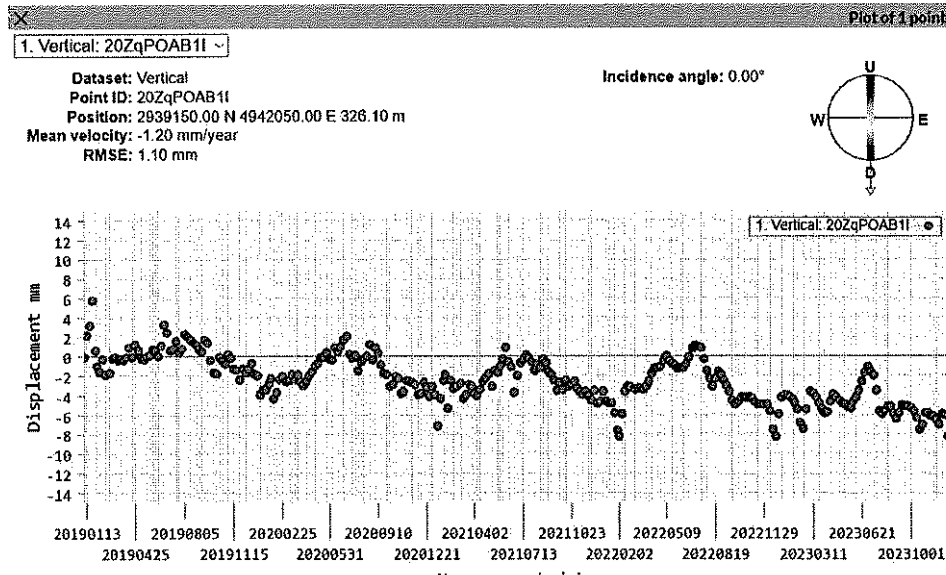
Obrázok 7. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



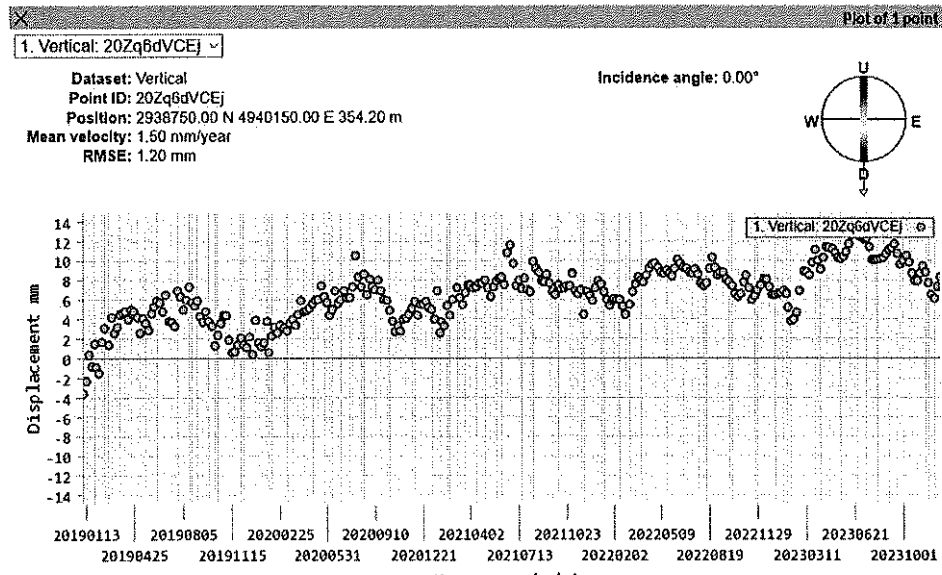
Obrázok 8. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 2.

## 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).**

Vzhľadom na malý počet bodov, v ktorých bolo možné použiť radarovú interferometriu na analýzu zosuvných procesov, je ťažké jednoznačne určiť mieru zosuvného ohrozenia v skúmanej oblasti. Platí to najmä preto, že veľmi málo meracích bodov sa nachádza v severnej časti analyzovaného územia, teda tam, kde sú lokalizované svahové deformácie. Zistené bolo, že v okolí mesta Bytča sa nachádzajú malé zóny, v ktorých dochádza k poklesu terénu rýchlosťou približne do 5 mm/rok. Maximálne zmeny povrchu terénu dosiahli v období rokov 2019–2023 hodnotu približne 20 mm. Ostatné body, v ktorých bol zaznamenaný pokles povrchu, sú v skúmanom území rozmiestnené veľmi rozptýlene. Tento jav môže súvisieť skôr s hospodárskou alebo stavebnou činnosťou v miestach, kde boli realizované interferometrické merania. Okrem toho sa v analyzovanom území vyskytujú vyvýšené oblasti len sporadicky, zatiaľ čo pre zosuvné územia je typické striedanie zón poklesu a zdvihu terénu. Na druhej strane analýza zmien povrchu v jednotlivých bodoch ukázala, že deformácie môžu mať pulzačný charakter. Takýto priebeh by však mohol naznačovať prítomnosť zosuvných procesov. Z uvedených dôvodov sa navrhuje vykonať pre analyzované územie doplňujúce výskumy s využitím ďalších metód. Vhodným prístupom by mohli byť napríklad analýzy numerických modelov terénu založené na údajoch získaných technológiou LiDAR alebo, za priaznivých podmienok, aj dendrochronologické analýzy.

PREZES ZARZĄDU  
Oddział Górnośląski, Polskie  
Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi  
Katowice, 26.02.2026  
dr hab.   
Dr hab. Jerzy Cabała