Interreg
Współfinansowany przez UNIĘ EUROPEJSKĄ
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 na východ a na juhozápad od mesta Stropkov

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 na východ a na juhozápad od mesta Stropkov,
- 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)

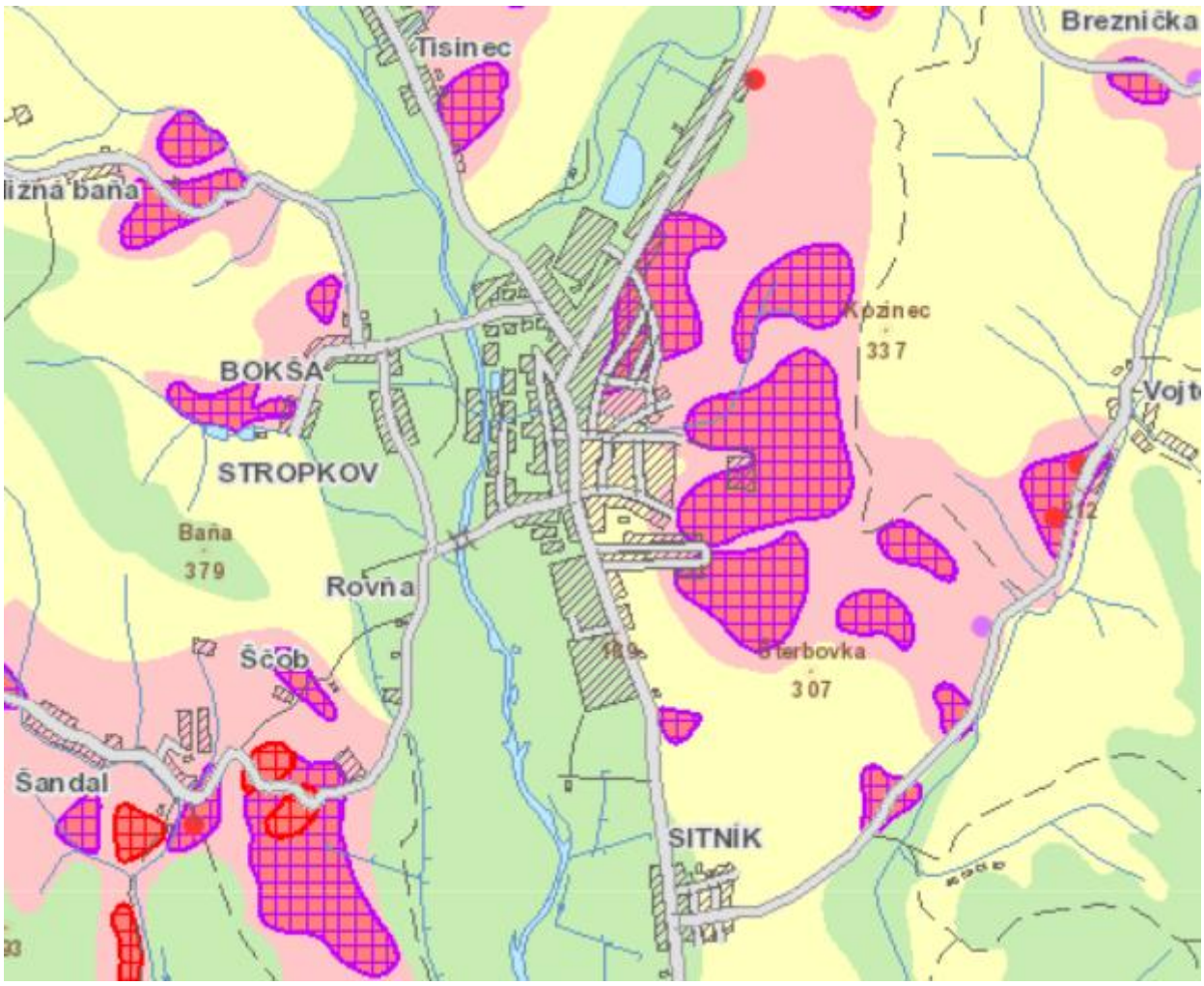
Radarová interferometria (InSAR) patrí medzi najdôležitejšie metódy diaľkového prieskumu Zeme využívané pri monitorovaní a analýze zosuvov pôdy. Je založená na vyhodnocovaní zmien fázy radarového signálu zaznamenaného družicami počas opakovaných preletov nad rovnakým územím. Vďaka satelitným misiám, ako je program Sentinel-1 Európskej vesmírnej agentúry (ESA), je možné dlhodobo sledovať deformácie zemského povrchu na rozsiahlych územiach. Interferogramy vytvorené z radarových dát umožňujú identifikovať vertikálne aj horizontálne pohyby terénu s presnosťou na úrovni niekoľkých milimetrov. Metóda dokáže zachytiť nielen náhle zosuvné udalosti, ale aj pomalé a dlhodobé deformácie, ktoré sú tradičnými metódami často ťažko zistiteľné. Významnú úlohu zohrávajú viaccasové analýzy a technika PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR), ktorá využíva stabilné objekty, napríklad budovy alebo skalné útvary, na presné sledovanie zmien v čase.

Radarová interferometria sa využíva najmä v horských a ťažko dostupných oblastiach, kde sú klasické geodetické merania náročné alebo nákladné. Jej hlavnou výhodou je schopnosť monitorovať veľké územia bez potreby inštalácie zariadení priamo v teréne. V oblastiach s hustou vegetáciou môže dochádzať k zníženiu kvality radarového signálu, preto sa využívajú pokročilé metódy, ako PS-InSAR alebo SBAS (Small Baseline Subset). Interferometrické údaje sa často kombinujú s geologickými, geomorfologickými a hydrologickými informáciami, čo umožňuje lepšie pochopiť príčiny a vývoj zosuvov. Metóda je dôležitá aj pri hodnotení vplyvu zrážok a klimatických faktorov na aktivitu svahových pohybov a môže byť súčasťou systémov včasného varovania. Význam radarovej interferometrie rastie aj pri monitorovaní stability ciest, železníc, mostov a ďalšej infraštruktúry nachádzajúcej sa v rizikových oblastiach. V urbanizovaných regiónoch pomáha identifikovať potenciálne nebezpečenstvá ešte pred vznikom závažných škôd. Zároveň znižuje náklady na výskum a umožňuje efektívnejšie plánovanie monitorovacích aktivít. V súčasnosti patrí medzi kľúčové nástroje na hodnotenie zosuvných rizík a ochranu krajiny, infraštruktúry aj obyvateľstva.

# Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa na východ a na juhozápad od mesta (obr. 1). 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 získaných pomocou radarovej interferometrie umožňuje podrobne analyzovať pohyb jednotlivých bodov zemského povrchu, napríklad okrajov striech budov, komunikácií alebo iných stabilných objektov, v období rokov 2019–2023. S cieľom identifikovať zmeny morfológie terénu v skúmanej oblasti bola vykonaná priestorová analýza založená na interferometrických radarových údajoch. Pre územie nachádzajúce sa na východ a na juhozápad od mesta Stropkov boli deformácie povrchu vizualizované pomocou siete pevných bodov, pre ktoré boli v rokoch 2019–2023 dostupné interferometrické merania.

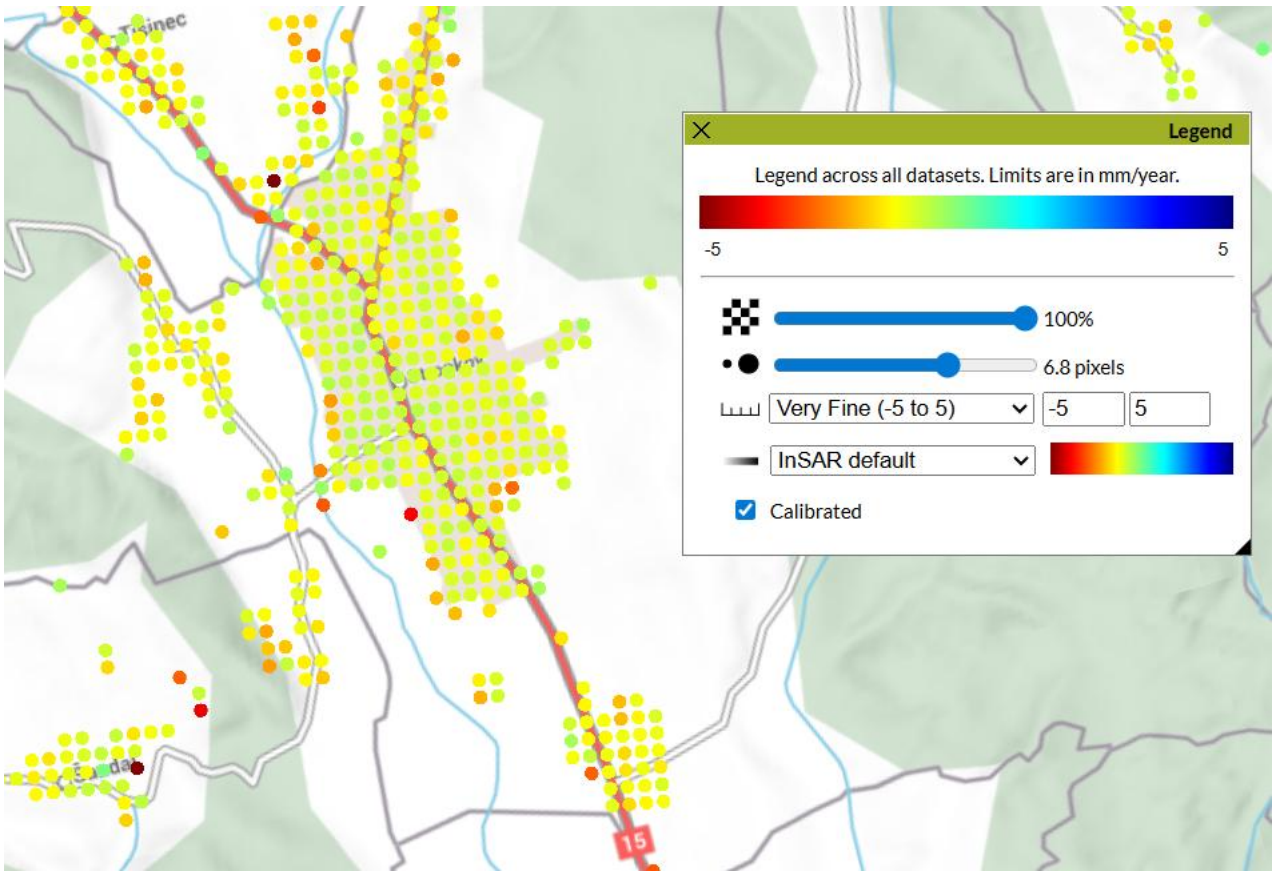
Následne bola do štúdie zaradená aj detailnejšia analýza zmien polohy troch vybraných bodov vo zvýšenom časovom a priestorovom rozlíšení. Na tento účel boli vybrané body nachádzajúce sa v lokalitách s najvýraznejšími prejavmi svahových deformácií a potenciálnou aktivitou zosuvných procesov.
Analýza bola realizovaná pre tri úrovne vertikálnych zmien bodov, a teda aj zmien reliéfu terénu, konkrétne pre hodnoty 5 mm, 10 mm a 20 mm za rok. Takýto prístup umožnil identifikovať oblasti s rozdielnou intenzitou deformácií a lepšie vyhodnotiť priestorové rozloženie svahových pohybov. Získané výsledky poskytli dôležité informácie o súčasnej dynamike zmien zemského povrchu a vytvorili podklad pre podrobnejšie hodnotenie zosuvného ohrozenia v skúmanej oblasti. Navyše umožnili porovnať intenzitu deformácií medzi jednotlivými lokalitami a určiť územia, ktoré si vyžadujú zvýšenú pozornosť v rámci ďalšieho monitorovania.

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

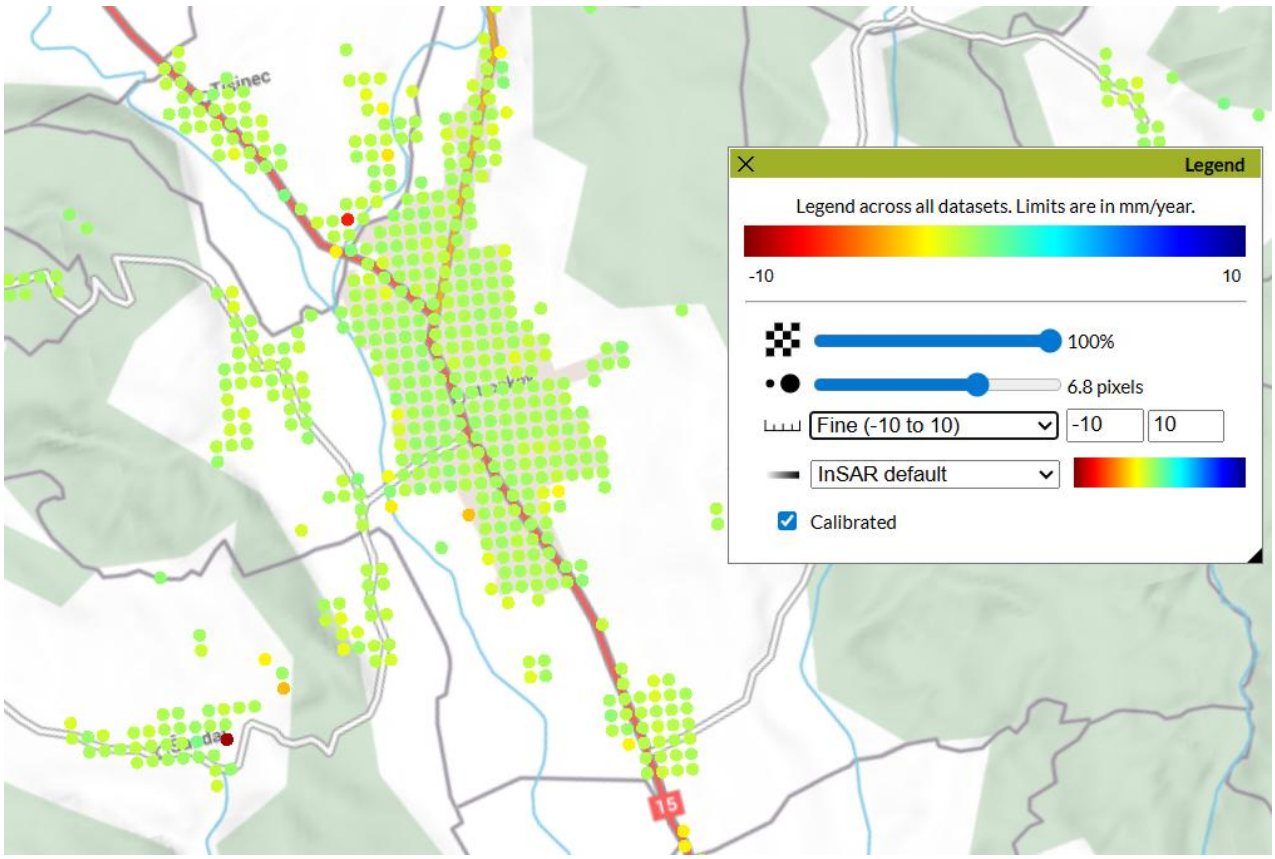
Interferometrická analýza bola vykonaná na základe údajov zhromaždených počas päťročného obdobia pozorovaní v rokoch 2019–2024. Počas tohto obdobia bolo skúmané územie pravidelne monitorované pomocou satelitnej radarovej interferometrie, čo umožnilo hodnotiť zmeny polohy zemského povrchu a identifikovať potenciálne deformácie súvisiace so svahovými procesmi. V analyzovanej oblasti sa interferometrické body nachádzali predovšetkým v zastavaných územiach, kde sa vyskytujú stabilné objekty zabezpečujúce kvalitný odraz radarového signálu. Podstatne menší počet bodov pokrýval nezastavané plochy, čo obmedzovalo možnosti podrobnej interpretácie zmien prebiehajúcich mimo sídelných zón.
V skúmanom území boli vyčlenené dve zóny, pre ktoré bola vykonaná podrobná analýza zmien povrchu terénu na základe interferometrických údajov. Prvá skupina bodov zahŕňala územie nachádzajúce sa juhozápadne od mesta Stropkov, v obci Sandal a jej bezprostrednom okolí. V tejto zóne boli identifikované oblasti vykazujúce pokles aj zdvíhanie povrchu terénu. Priemerné tempo poklesu dosahovalo približne 4–5 mm/rok, pričom v jednom z analyzovaných bodov boli zaznamenané výrazne vyššie hodnoty, až okolo 15 mm/rok (obr. 2, 3, 4). Takéto vysoké tempo deformácií môže naznačovať lokálnu aktivitu svahových procesov alebo pôsobenie iných faktorov ovplyvňujúcich stabilitu podložia. Súčasne bolo v tej istej zóne zaznamenané aj mierne zdvíhanie terénu dosahujúce približne 2–3 mm/rok (obr. 2, 3, 4). Súbežný výskyt zón poklesu a zdvíhania môže naznačovať deformácie typické pre územia ohrozené svahovými pohybmi.

Druhá analyzovaná zóna sa nachádza na východ od mesta Stropkov. Táto oblasť sa vyznačuje vysokým stupňom zalesnenia a nízkym podielom zástavby, čo výrazne obmedzuje počet bodov vhodných na interferometrickú analýzu. Z tohto dôvodu bol počet dostupných pozorovaní pomerne nízky. V bodoch, kde bolo možné vykonať analýzu, bolo zaznamenané zdvíhanie povrchu terénu približne o 2–3 mm/rok (obr. 2, 3, 4). Neboli však identifikované body vykazujúce výrazný pokles povrchu. Absencia takýchto pozorovaní môže súvisieť s obmedzeným počtom meracích bodov a menej priaznivými podmienkami pre radarové pozorovania v zalesnených oblastiach. Preto nie je možné jednoznačne potvrdiť, že za pozorované výškové zmeny sú zodpovedné zosuvné procesy alebo iné formy svahových pohybov.

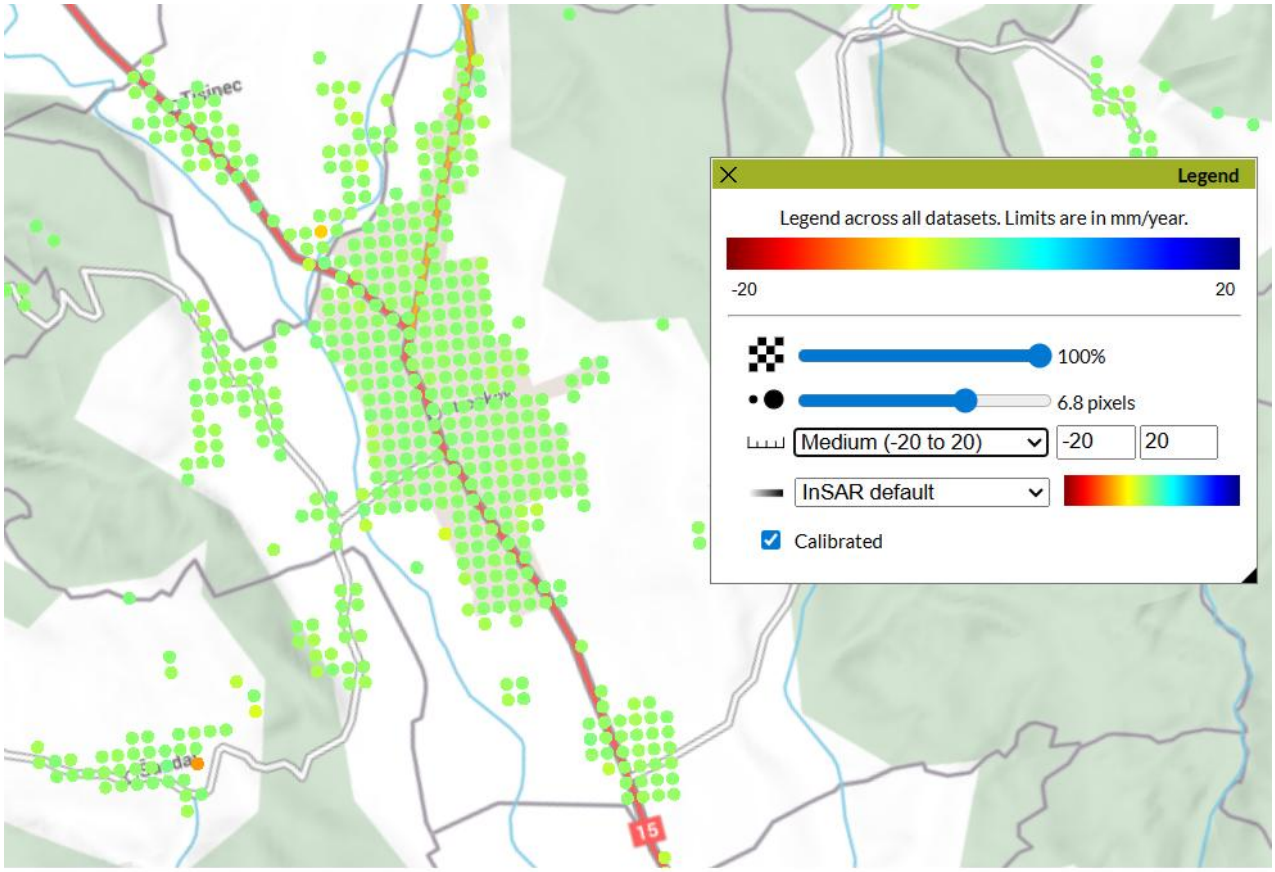
Dodatočne boli analyzované aj zmeny výšky vybraných meracích bodov počas celého sledovaného obdobia. V zóne nachádzajúcej sa juhozápadne od mesta Stropkov vykázali analyzované body pokles približne o 20 mm v rokoch 2019–2024 (obr. 5, 6, 7, 8). Tieto hodnoty poukazujú na postupný, ale zreteľný proces deformácie zemského povrchu. V druhej zóne sa naopak nepreukázala trvalá tendencia ani k poklesu, ani k zdvíhaniu analyzovaných bodov (obr. 5, 6, 7, 8). Zmeny ich polohy mali charakter miernych výkyvov, ktoré nenaznačujú výskyt výrazných deformačných procesov. Môže to znamenať, že územie je z hľadiska svahových pohybov relatívne stabilné alebo že počet monitorovaných bodov bol príliš nízky na spoľahlivé vyhodnotenie skutočného rozsahu zmien. Z tohto dôvodu je potrebné získané výsledky považovať za predbežné hodnotenie geomorfologickej aktivity, ktoré si vyžaduje ďalšie overenie pomocou väčšieho množstva interferometrických údajov a terénnych pozorovaní.



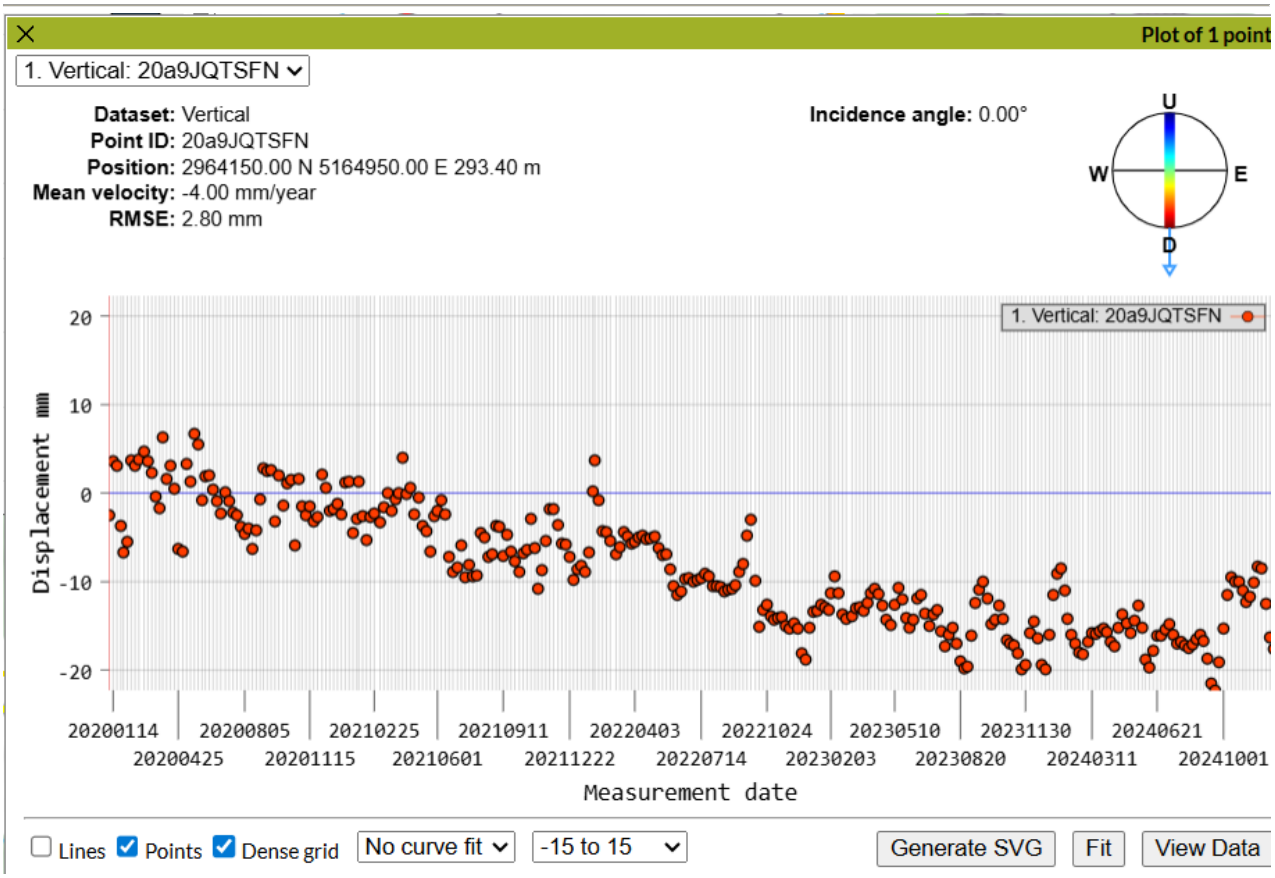

Obrázok 2. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



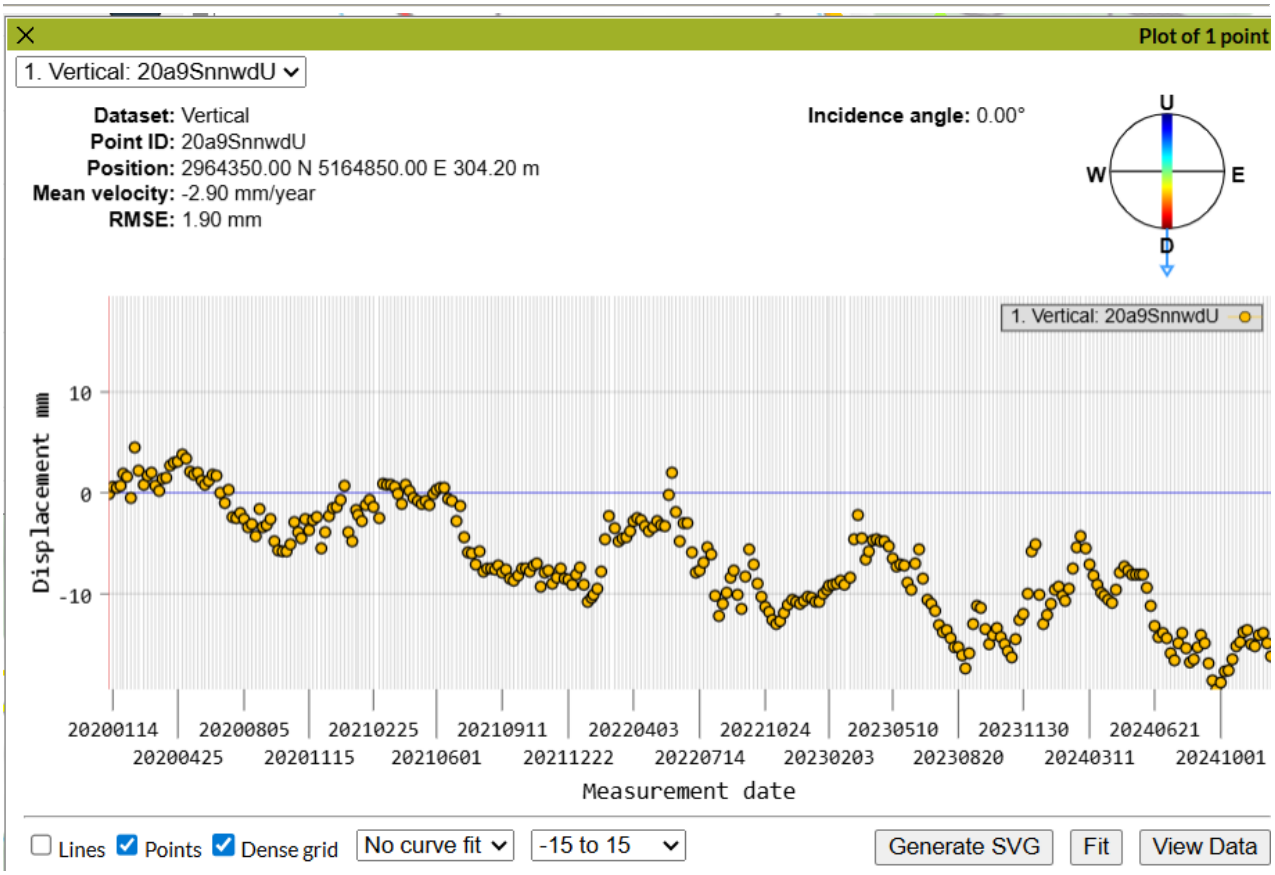

Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



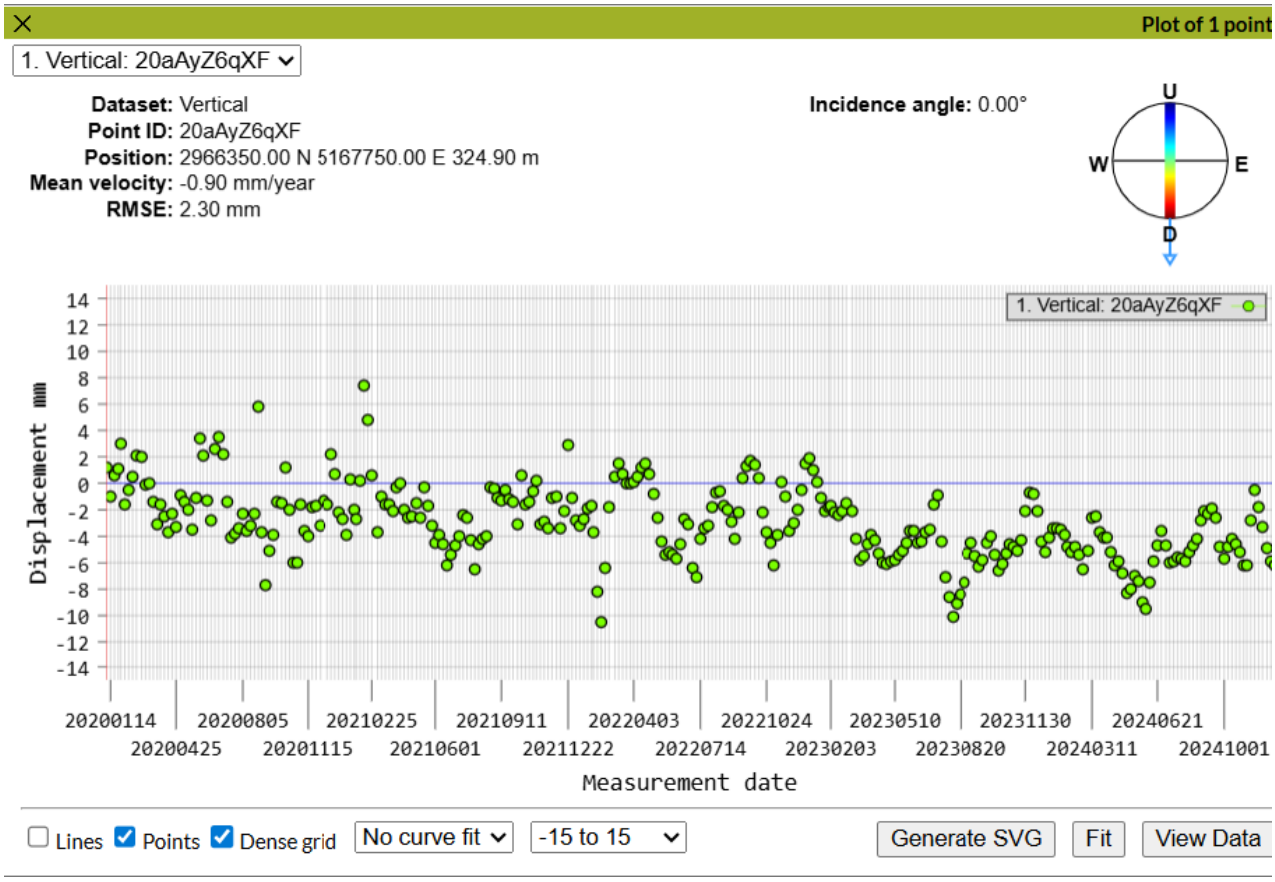

Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 20 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



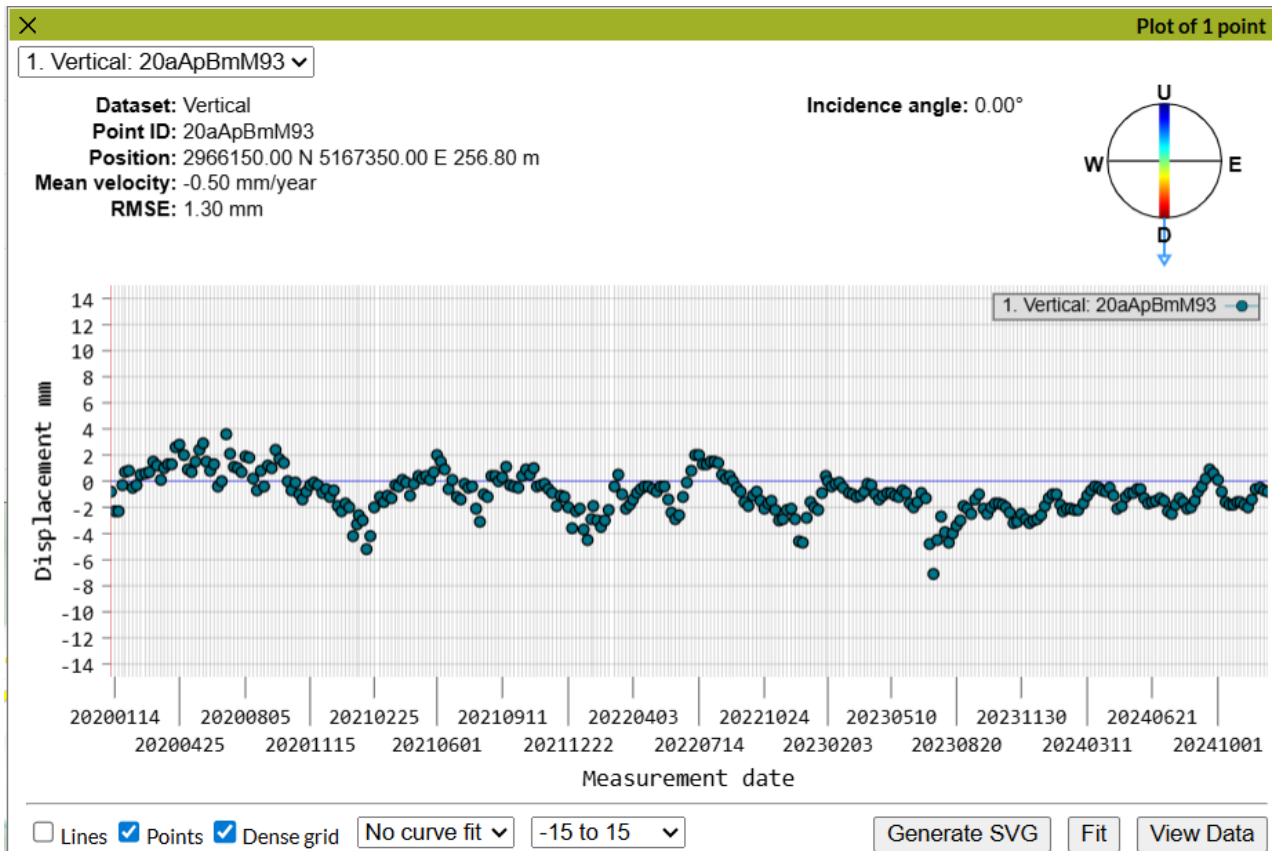

Obrázok 5. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.




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 bola vykonaná pre územie monitorované v rokoch 2019–2024. Meracie body sa nachádzali prevažne v zastavaných oblastiach, kde sú podmienky na radarové pozorovania najvhodnejšie. Boli vyčlenené dve skúmané zóny: na juhozápad od mesta Stropkov a na východ od mesta Stropkov. V prvej zóne, zahŕňajúcej okolie obce Sandal, boli identifikované oblasti so znižovaním aj zdvíhaním terénu. Priemerné tempo poklesu povrchu dosahovalo 4–5 mm/rok, pričom lokálne dosiahlo až 15 mm/rok. Súčasne bolo zaznamenané aj zdvíhanie povrchu na úrovni približne 2–3 mm/rok. Druhá zóna, nachádzajúca sa na východ od Stropkova, sa vyznačovala malým počtom meracích bodov v dôsledku rozsiahleho lesného pokryvu. V tejto oblasti bolo zaznamenané iba zdvíhanie terénu približne o 2–3 mm/rok, bez výskytu výrazných zón poklesu. Analýza zmien výšky vybraných bodov ukázala, že v prvej zóne sa terén v rokoch 2019–2024 znížil približne o 20 mm. V druhej zóne neboli zistené trvalé deformačné trendy, preto nebolo možné jednoznačne potvrdiť aktivitu svahových pohybov alebo zosuvných procesov.

Katowice, 25.05.2026

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