Správa o výskumnom teste týkajúcom sa rizika zosuvov pôdy s využitím radarovej interferometrie InSAR pre zosuvy na sever od mesta Vranov nad Topľou

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 sever od mesta Vranov nad Topľou),
- 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) predstavuje jednu z najvýznamnejších metód diaľkového prieskumu Zeme využívaných pri monitorovaní a analýze zosuvov pôdy, ako aj ďalších procesov ovplyvňujúcich stabilitu zemského povrchu. Táto moderná technológia je založená na vyhodnocovaní zmien fázy radarového signálu zaznamenaného družicami počas opakovaných preletov nad rovnakým územím. Porovnávaním radarových snímok získaných v rôznych časových obdobiach je možné identifikovať aj veľmi malé deformácie terénu. Vďaka satelitným misiám, akou je napríklad program Sentinel-1 prevádzkovaný Európskou vesmírnou agentúrou (ESA), možno vykonávať pravidelné a dlhodobé monitorovanie zmien zemského povrchu na rozsiahlych územiach s vysokou časovou aj priestorovou presnosťou. Interferogramy vytvorené z radarových dát umožňujú detegovať vertikálne aj horizontálne pohyby terénu s presnosťou často dosahujúcou niekoľko milimetrov. Táto vlastnosť robí z radarovej interferometrie mimoriadne efektívny nástroj na sledovanie zosuvných procesov. Metóda umožňuje zachytiť nielen náhle a rýchle pohyby svahov, ale aj pomalé a dlhodobé deformácie, ktoré sa vyvíjajú počas mnohých rokov a ktoré by bolo pomocou klasických geodetických metód náročné alebo ekonomicky nevýhodné monitorovať. Významným prínosom sú viacčasové interferometrické analýzy, ktoré zvyšujú spoľahlivosť výsledkov a umožňujú sledovať vývoj deformácií v čase.

Osobitné postavenie medzi interferometrickými metódami má technika PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR), ktorá využíva stabilné objekty dlhodobo odrážajúce radarový signál. Takýmito objektmi môžu byť budovy, skalné výchozy, mostné konštrukcie, komunikácie alebo iné prvky infraštruktúry. Vďaka analýze trvalých rozptyľovačov je možné veľmi presne určiť rýchlosť deformácií svahov a sledovať ich vývoj v rámci dlhých časových radov. Takto získané informácie sú mimoriadne cenné pri identifikácii nestabilných území a hodnotení potenciálneho rizika zosuvov. Radarová interferometria nachádza široké uplatnenie najmä v horských a ťažko dostupných regiónoch, kde je realizácia klasických geodetických meraní komplikovaná, časovo náročná alebo finančne nákladná. Jednou z jej hlavných výhod je schopnosť monitorovať rozsiahle územia bez potreby inštalácie meracích zariadení priamo v teréne. To umožňuje efektívne sledovanie aj

odľahlých oblastí, ktoré by bolo inými metódami len ťažko možné pravidelne kontrolovať. Určité obmedzenia sa však môžu objaviť v oblastiach s hustým lesným porastom alebo výraznou vegetáciou. V takýchto podmienkach dochádza k dekorelácii radarového signálu, čo môže znižovať presnosť výsledkov. Na elimináciu týchto problémov sa využívajú pokročilé techniky spracovania dát, medzi ktoré patrí nielen PS-InSAR, ale aj metóda SBAS (Small Baseline Subset). Táto technika pracuje s radarovými snímkami, ktoré sa od seba líšia len minimálne z hľadiska času a geometrie snímania, čím umožňuje spoľahlivejšie vyhodnotenie deformácií povrchu aj v komplikovanejších podmienkach.

Interferometrické údaje sa často kombinujú s geologickými, geomorfologickými, hydrologickými a geotechnickými informáciami. Takýto komplexný prístup umožňuje lepšie pochopiť mechanizmy vzniku a vývoja zosuvov pôdy a identifikovať faktory, ktoré ovplyvňujú stabilitu svahov. Významnú úlohu zohráva radarová interferometria aj pri hodnotení vplyvu extrémnych zrážok, dlhodobých klimatických zmien či sezónnych výkyvov vlhkosti na aktivitu svahových pohybov. V kombinácii s meteorologickými údajmi môže byť InSAR využívaný ako dôležitý prvok systémov včasného varovania pred zosuvmi. Schopnosť identifikovať deformácie ešte pred vznikom katastrofických udalostí umožňuje prijímať preventívne opatrenia a znižovať riziká pre obyvateľstvo. Tieto informácie sú obzvlášť cenné v oblastiach s hustým osídlením alebo v regiónoch pravidelne postihovaných svahovými pohybmi. Radarová interferometria sa zároveň využíva pri monitorovaní stability infraštruktúry nachádzajúcej sa v rizikových oblastiach. Ide najmä o cesty, železničné trate, mosty, tunely, priemyselné objekty či obytné zóny. Jej význam je mimoriadne veľký v urbanizovaných regiónoch a pozdĺž hlavných dopravných koridorov, kde môžu zosuvy spôsobiť rozsiahle hospodárske škody, narušenie dopravy a ohrozenie bezpečnosti obyvateľov.

Ďalšou významnou výhodou tejto technológie je znižovanie nákladov na výskum a monitoring. V porovnaní s rozsiahlymi terénnymi meraniami umožňuje získavať veľké množstvo údajov na regionálnej úrovni efektívnym spôsobom, čo podporuje lepšie plánovanie monitorovacích aktivít a efektívnejšie využívanie finančných prostriedkov. V súčasnosti preto radarová interferometria predstavuje jednu z kľúčových súčastí integrovaných systémov monitorovania zosuvných rizík a zohráva významnú úlohu pri ochrane krajiny, technickej infraštruktúry aj ľudských životov. S pokračujúcim rozvojom satelitných technológií a zvyšujúcou sa dostupnosťou radarových dát možno očakávať ďalšie rozširovanie jej využitia v oblasti hodnotenia prírodných rizík a monitorovania zmien zemského povrchu.

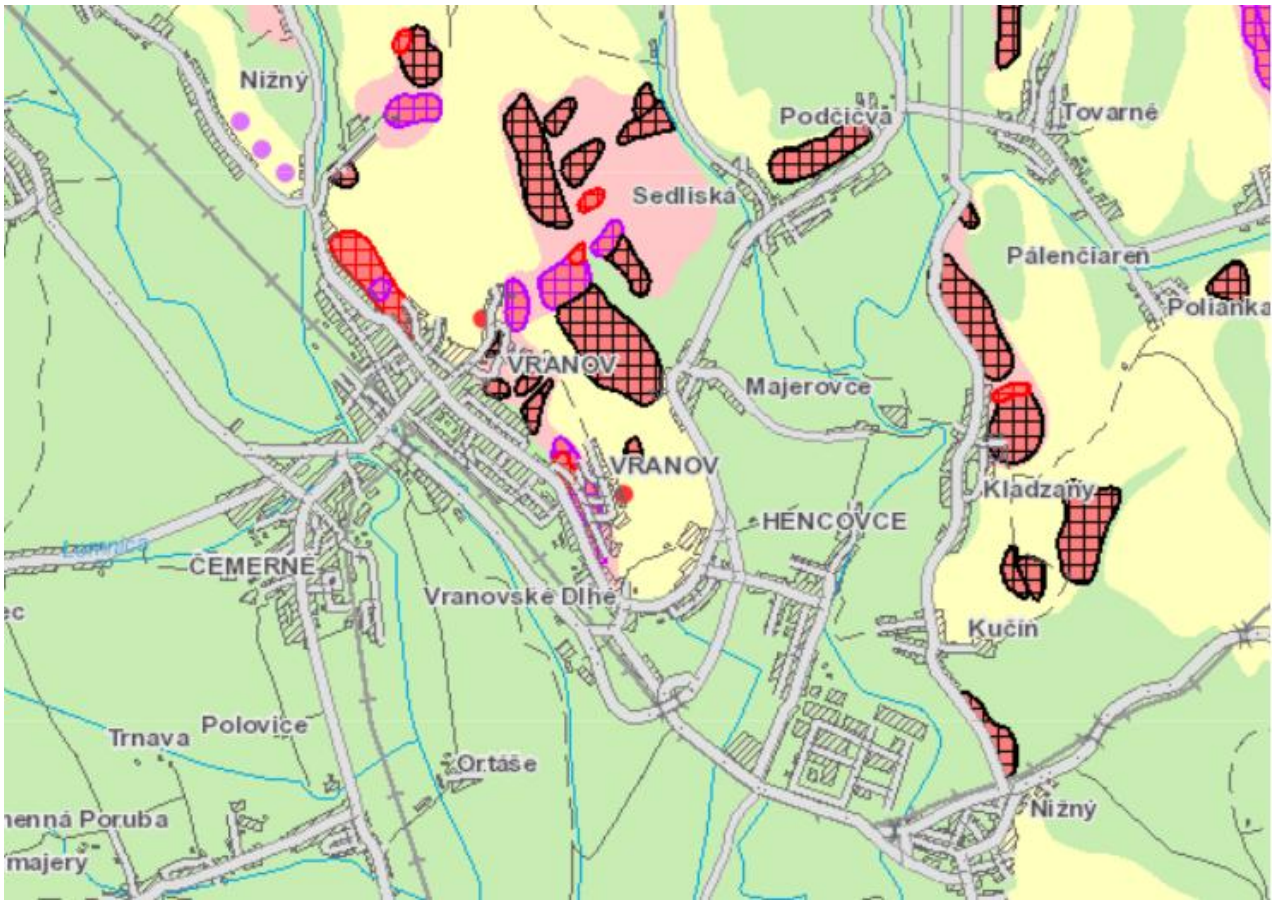
Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa na sever od mesta Vranov nad Topľou (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.

Využitie údajov získaných pomocou radarovej interferometrie umožňuje detailnú analýzu pohybu jednotlivých bodov zemského povrchu, napríklad okrajov striech budov, prvkov dopravnej infraštruktúry alebo iných stabilných objektov, v období rokov 2019–2023. Táto metóda poskytuje možnosť sledovať aj veľmi malé zmeny polohy bodov s presnosťou na úrovni niekoľkých milimetrov, čo je mimoriadne dôležité pri monitorovaní svahových deformácií a hodnotení stability územia. Vďaka pravidelnému získavaniu radarových snímok je možné sledovať vývoj deformácií v čase a identifikovať oblasti, v ktorých dochádza k postupným zmenám reliéfu terénu. S cieľom identifikovať zmeny morfológie terénu v rámci skúmanej oblasti bola vykonaná priestorová analýza založená na údajoch radarovej interferometrie. Pre územie nachádzajúce sa na sever od mesta Vranov nad Topľou boli deformácie zemského povrchu vizualizované prostredníctvom siete pevných bodov, v ktorých boli v rokoch 2019–2023 realizované interferometrické merania. Takýto spôsob spracovania údajov umožnil získať prehľad o priestorovom rozložení deformácií a identifikovať lokality vykazujúce zvýšenú aktivitu svahových procesov alebo iné prejavy nestability terénu. Súčasťou štúdie bola aj podrobnejšia analýza zmien polohy troch vybraných bodov vo zvýšenom priestorovom a časovom rozlíšení. Na tento účel boli vybrané body nachádzajúce sa v oblastiach s najvýraznejšími prejavmi zosuvnej aktivity, identifikovanými na základe predbežného vyhodnotenia interferometrických údajov. Detailné sledovanie týchto bodov umožnilo lepšie pochopiť dynamiku deformácií a ich časový priebeh, ako aj určiť, či ide o krátkodobé alebo dlhodobo pretrvávajúce procesy.

Analýza bola realizovaná pre tri úrovne vertikálnych zmien bodov, a teda aj reliéfu terénu, konkrétne pre hodnoty 5 mm, 10 mm a 20 mm za rok. Takéto rozdelenie umožnilo rozlíšiť oblasti s nízkou, strednou a vysokou intenzitou deformácií a zároveň identifikovať lokality s potenciálne zvýšeným rizikom svahových pohybov. Výsledky analýzy poskytujú dôležité informácie o rozsahu a intenzite deformácií v skúmanom území a predstavujú cenný podklad pre ďalší výskum, hodnotenie zosuvného ohrozenia a plánovanie monitorovacích opatrení zameraných na ochranu krajiny a infraštruktúry.



Obrázok 1. Poloha analyzovaných zosuvov pôdy.

Zdroj: https://app.geology.sk/atlassd/

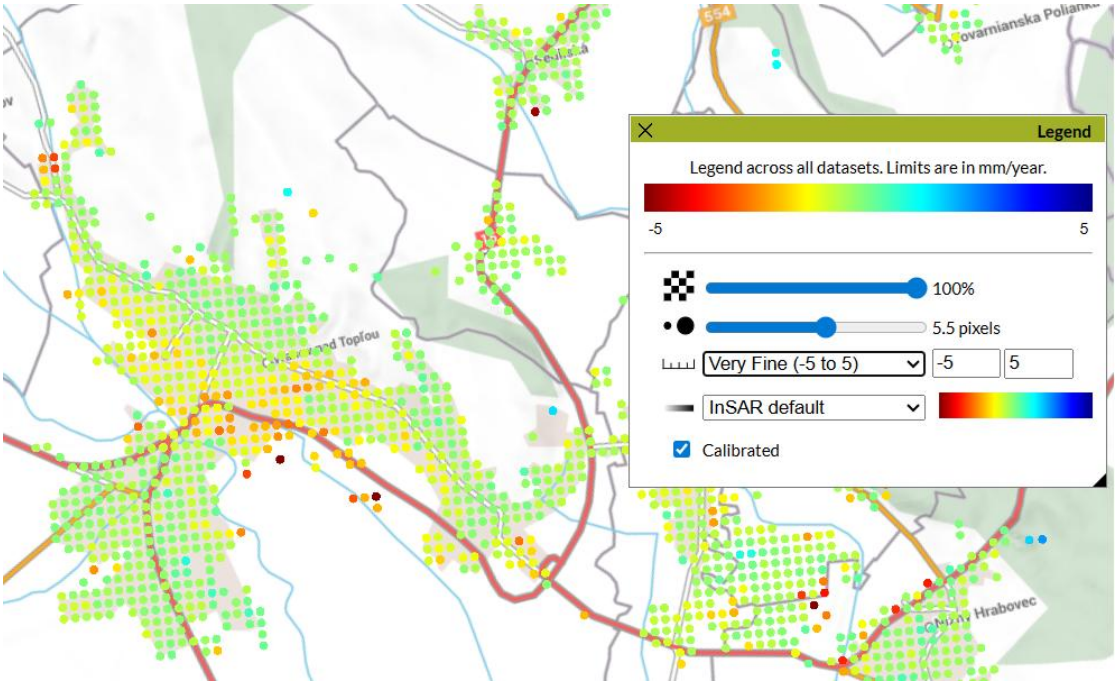
3. Výsledky výskumu v číselnej podobe spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a výkresov.

Výskum realizovaný metódou radarovej interferometrie na sever od mesta Vranov nad Topľou umožnil zhodnotiť aktivitu oblastí, v ktorých sa vyskytujú svahové deformácie a potenciálne zosuvné procesy. Analýza bola vykonaná pre päťročné obdobie rokov 2019–2024. Počas tohto obdobia bola hodnotená aktivita celých území postihnutých svahovými deformáciami, ako aj zmeny polohy jednotlivých meracích bodov nachádzajúcich sa v rámci týchto zón. Využitie radarovej interferometrie umožnilo identifikovať aj veľmi malé zmeny výšky zemského povrchu, čo poskytlo podrobný obraz o súčasnej dynamike svahových procesov.V skúm anom území boli vyčlenené dve oblasti, v ktorých sa nachádzali body umožňujúce hodnotenie výškových zmien pomocou interferometrických údajov. Prvá zóna sa nachádzala medzi mestom Vranov nad Topľou a obcou Majerovce. V tejto oblasti sa vyskytujú svahové deformácie, avšak počet bodov vhodných na interferometrickú analýzu bol pomerne obmedzený. Výskum bol založený len na šiestich meracích bodoch, čo do určitej miery obmedzuje možnosti interpretácie získaných výsledkov. V analyzovanej zóne neboli identifikované výrazné oblasti aktívneho poklesu terénu, boli však zaznamenané zóny vykazujúce zdvíhanie povrchu. Niektoré body dosahovali tempo zdvihu približne 3–4 mm za rok (obr. 2, 3, 4).

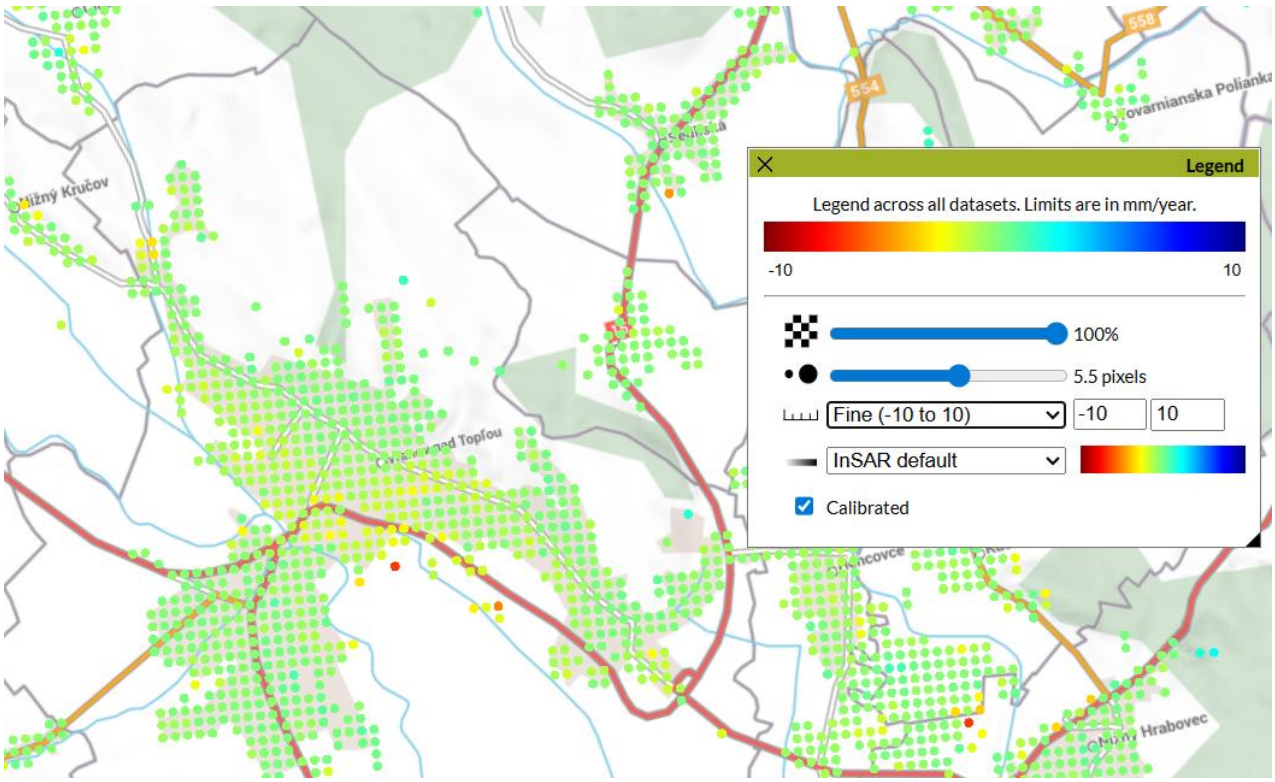
Absencia zaznamenaných zón poklesu môže súvisieť s malým počtom interferometrických bodov rozmiestnených v skúmanom území. Nemožno vylúčiť, že takéto zóny sa v oblasti nachádzajú, avšak neboli zachytené dostupnými meraniami. V prípade ich výskytu by mohli susediť s oblasťami zdvíhania terénu a vytvárať charakteristický model deformácií typický pre aktívne zosuvné územia. Takýto vzťah medzi zónami poklesu a zdvihu býva často pozorovaný na svahoch postihnutých gravitačnými pohybmi. Na základe dostupných údajov však nemožno jednoznačne potvrdiť prítomnosť aktívnych zosuvov v tejto časti skúmaného územia, preto je potrebné túto interpretáciu považovať iba za hypotézu vyžadujúcu ďalší výskum. Druhá analyzovaná zóna sa nachádza v obci Sedliská. V tomto prípade bol zaznamenaný postupný pokles povrchu terénu s intenzitou približne 2–3 mm/rok (obr. 2, 3, 4). Neboli tu identifikované body vykazujúce zdvíhanie povrchu. Takýto obraz deformácií sťažuje jednoznačnú interpretáciu procesov prebiehajúcich v tejto oblasti. Na jednej strane môže pozorovaný pokles naznačovať pomalé svahové pohyby a postupnú destabilizáciu svahov, na druhej strane však nemožno vylúčiť ani vplyv antropogénnych faktorov. Časť zaznamenaných zmien môže súvisieť s ľudskou činnosťou, zemnými prácami alebo zmenami vo využívaní

krajiny.V skúmanom regióne bola zároveň vykonaná detailná analýza zmien výšky vybraných meracích bodov. Jeden z nich sa nachádzal v prvej analyzovanej zóne. Výsledky ukázali, že počas päťročného obdobia 2019–2024 sa jeho výška zvýšila približne o 15 mm (obr. 5). V druhej zóne boli analyzované tri body vykazujúce pokles povrchu s rôznou intenzitou. Prvý z nich poklesol približne o 8 mm, druhý o 15 mm a tretí až o 25 mm (obr. 6, 7, 8). Získané výsledky poukazujú na značnú priestorovú variabilitu deformácií aj v rámci relatívne malej oblasti.

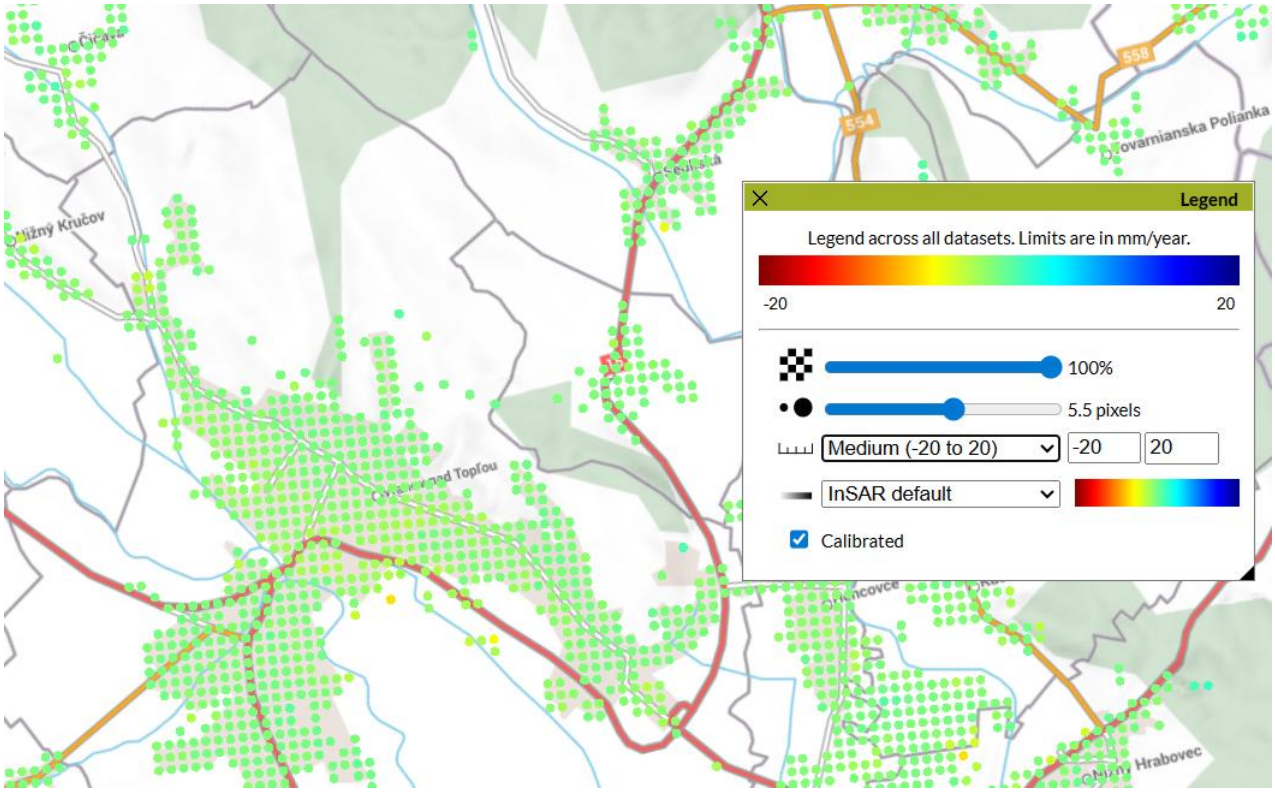
Rozdielna intenzita zaznamenaných posunov môže súvisieť s lokálnymi geologickými podmienkami, stavbou svahov, mierou zavodnenia podložia alebo s aktivitou zosuvných procesov. Výsledky naznačujú, že v niektorých častiach skúmaného územia môžu prebiehať súčasné gravitačné pohyby, dostupné údaje však neumožňujú ich jednoznačné potvrdenie. Na záver možno konštatovať, že určenie aktívnej zosuvnej činnosti v analyzovaných zónach je pomerne komplikované. V žiadnej z hodnotených oblastí totiž neboli identifikované susediace zóny zdvíhania a poklesu terénu, ktoré patria medzi najcharakteristickejšie indikátory aktívnych zosuvov. Z tohto dôvodu je potrebné výsledky považovať za indíciu možného výskytu svahových procesov, ktorá si vyžaduje ďalšie overenie prostredníctvom podrobnejších interferometrických analýz a terénneho výskumu.



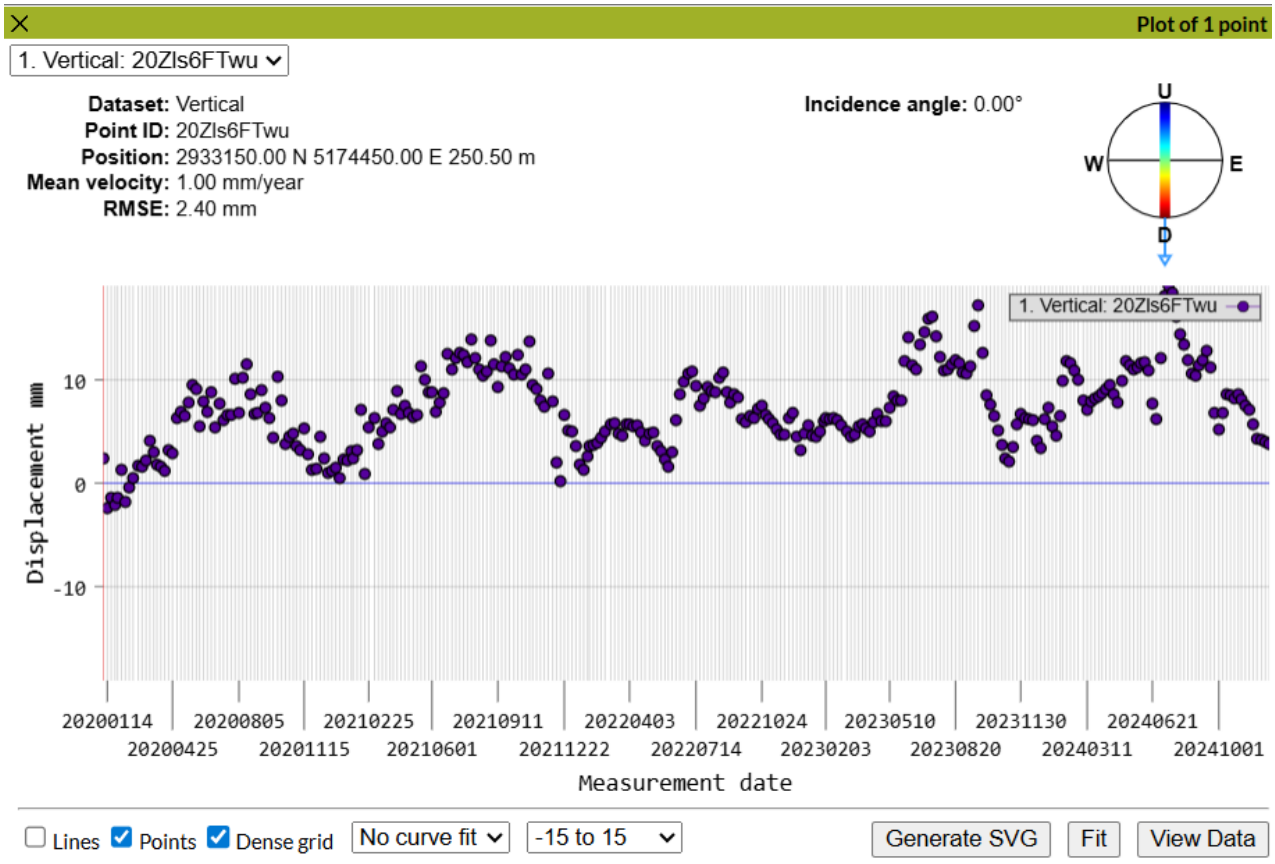
Obrázok 2. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



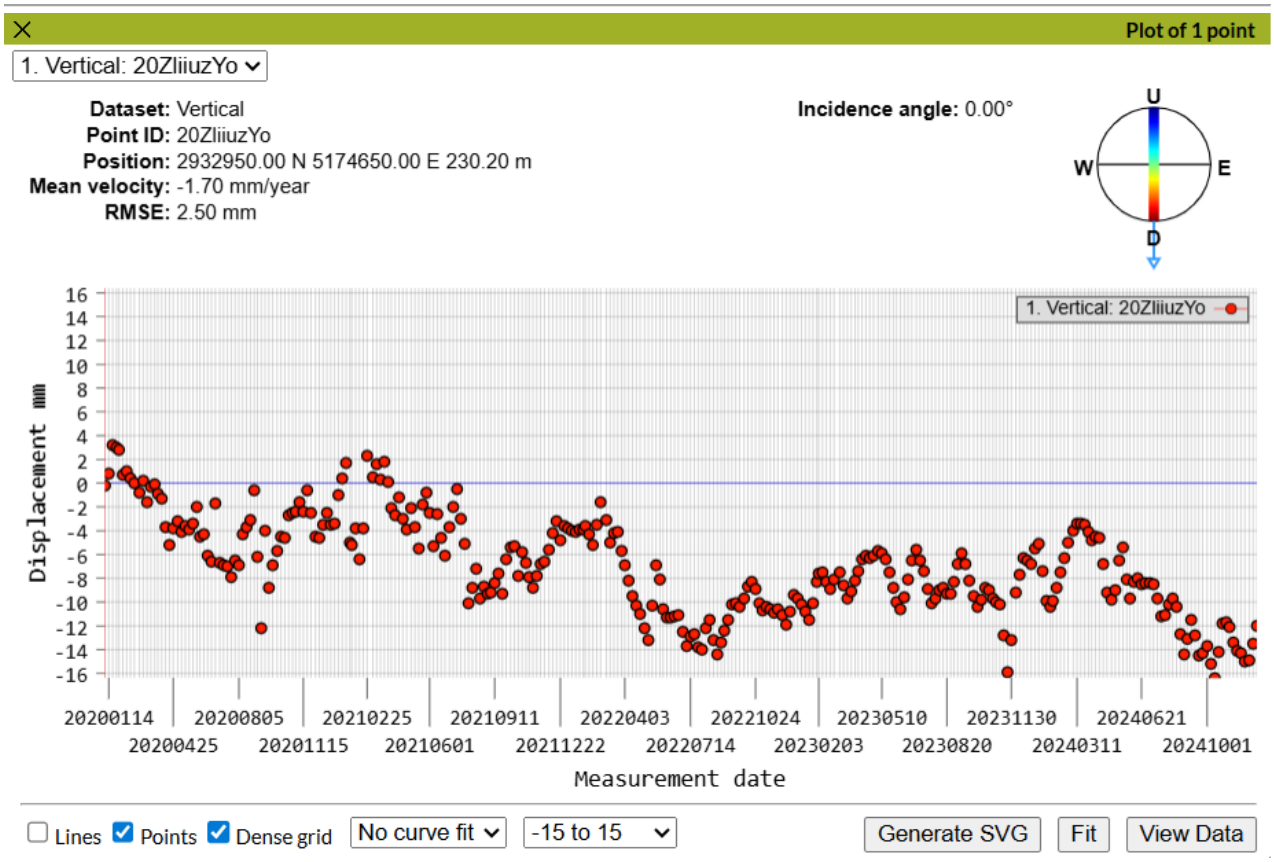
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



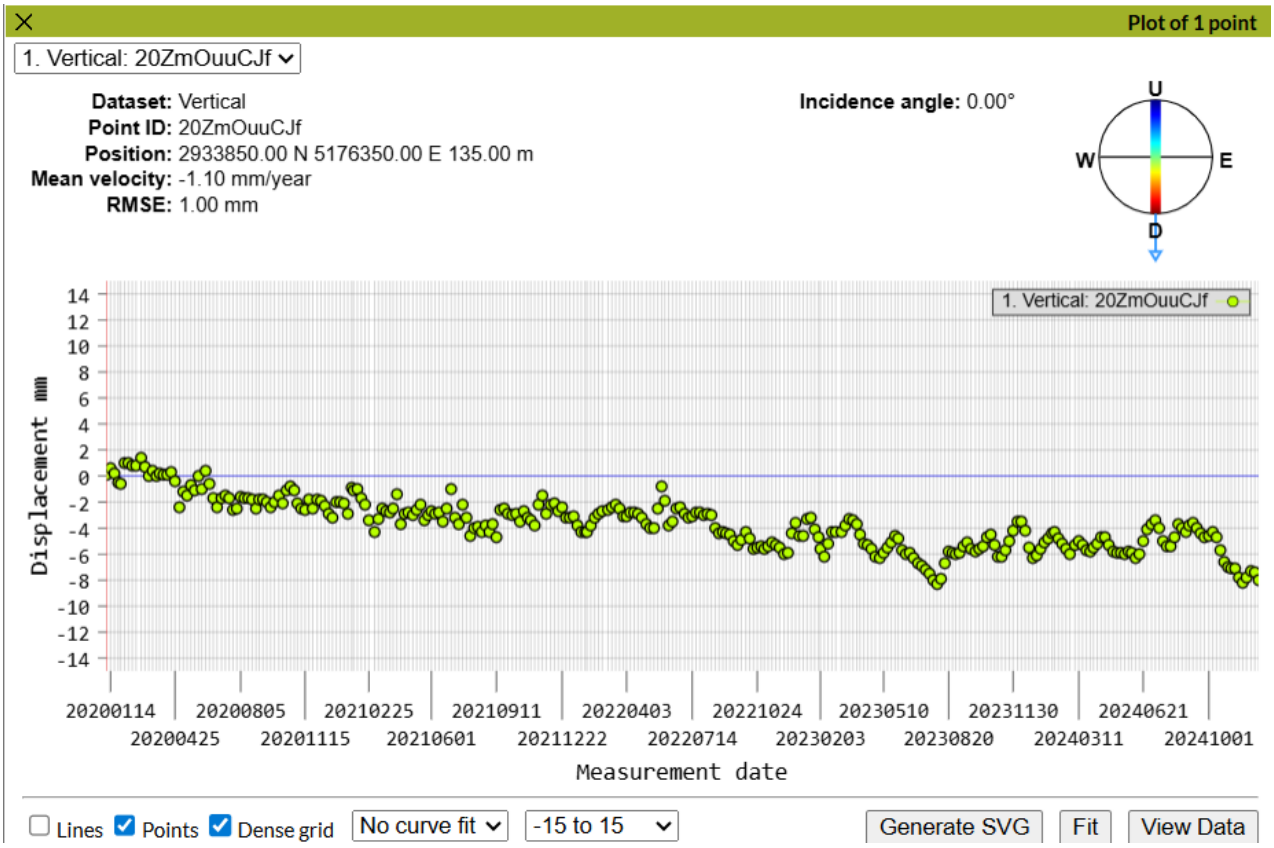
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 20 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



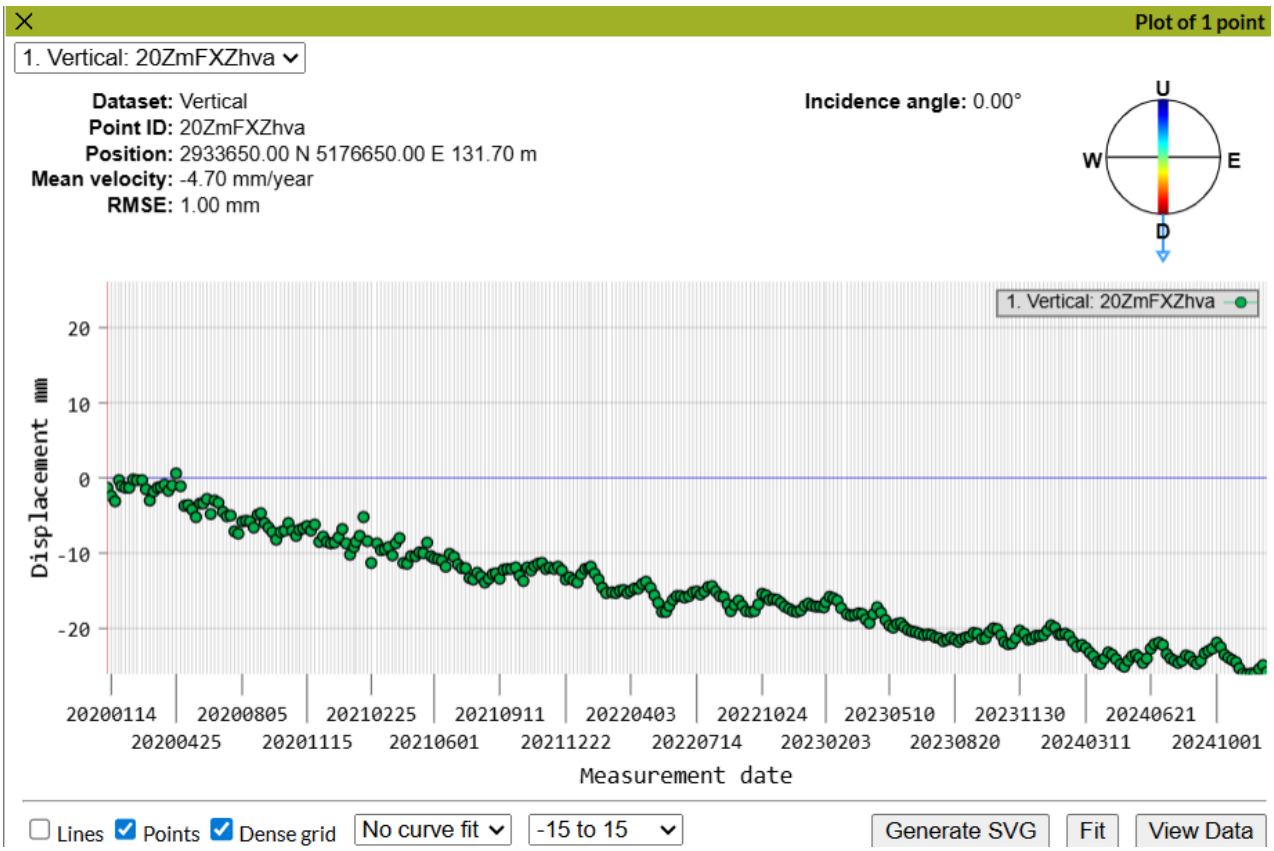
Obrázok 5. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



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).

Interferometrický výskum realizovaný na sever od mesta Vranov nad Topľou zahŕňal obdobie rokov 2019–2024 a jeho cieľom bolo zhodnotenie aktivity svahových deformácií. Analyzované boli zmeny polohy jednotlivých bodov aj celých zón potenciálne ohrozených zosuvmi. V prvej skúmanej oblasti, nachádzajúcej sa medzi mestom Vranov nad Topľou a obcou Majerovce, bolo možné využiť iba šesť meracích bodov. Nebolo tu zaznamenané znižovanie terénu, avšak bola identifikovaná zóna zdvíhania povrchu s rýchlosťou približne 3–4 mm/rok. Obmedzený počet bodov však neumožňuje jednoznačne potvrdiť aktivitu zosuvných procesov v tejto oblasti. Druhá skúmaná zóna, nachádzajúca sa v obci Sedliská, vykazovala pokles terénu približne o 2–3 mm/rok. Zóny zdvíhania povrchu tu neboli identifikované, čo sťažuje interpretáciu pozorovaných deformácií. Podrobná analýza vybraných bodov ukázala zdvih približne o 15 mm v prvej oblasti a poklesy v rozsahu od 8 do 25 mm v druhej oblasti počas päťročného obdobia pozorovaní. Rozdielna intenzita deformácií môže súvisieť s geologickými podmienkami, stupňom zavodnenia podložia alebo aktivitou svahových procesov. Napriek zaznamenaným deformáciám sa nepodarilo jednoznačne potvrdiť aktívne zosúvanie, keďže neboli identifikované typické susediace zóny zdvíhania a poklesu terénu charakteristické pre aktívne zosuviská.

Katowice, 25.05.2026

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

dr hab. Jerzy Cabała