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

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 rámci a v okolí mesta Svidník),
- 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 najvýznamnejšie metódy diaľkového prieskumu Zeme využívané na monitorovanie zosuvov pôdy a ďalších geodynamických procesov. Jej princíp spočíva vo vyhodnocovaní rozdielov vo fáze radarového signálu zaznamenaného družicami počas opakovaných preletov nad rovnakým územím. Porovnaním radarových snímok z rôznych období možno identifikovať aj veľmi malé zmeny polohy zemského povrchu. Vďaka satelitným misiám, ako je program Sentinel-1 Európskej vesmírnej agentúry (ESA), je možné zabezpečiť pravidelné a dlhodobé monitorovanie deformácií rozsiahlych území bez potreby nepretržitej terénnej činnosti. Interferogramy vytvorené spracovaním radarových údajov umožňujú detegovať vertikálne aj horizontálne pohyby povrchu s presnosťou na úrovni niekoľkých milimetrov. Pri výskume zosuvov dokáže InSAR zachytiť nielen náhle pohyby svahov, ale aj pomalé deformácie prebiehajúce počas rokov až desaťročí, ktoré sú klasickými geodetickými metódami často ťažko identifikovateľné. Mimoriadne významné sú viaccasové interferometrické analýzy, ktoré umožňujú sledovať vývoj deformácií v čase a zvyšujú spoľahlivosť výsledkov. Jednou z najefektívnejších metód je PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR), využívajúca stabilné objekty, ako sú budovy, skalné útvary, mosty či komunikácie. Analýza týchto trvalých rozptylovačov umožňuje presne určiť rýchlosť a smer deformácií svahov a identifikovať oblasti s potenciálnou budúcou aktivizáciou zosuvov. Radarová interferometria nachádza široké uplatnenie najmä v horských a ťažko prístupných oblastiach, kde sú tradičné geodetické merania technicky náročné alebo ekonomicky nevýhodné. Jej hlavnou výhodou je možnosť monitorovať rozsiahle územia bez inštalácie meracej techniky priamo v teréne. Obmedzenia sa však prejavujú v oblastiach s hustou vegetáciou alebo lesným pokryvom, kde dochádza k dekorelácii radarového signálu. Na zmiernenie týchto problémov sa okrem PS-InSAR využíva aj metóda SBAS (Small Baseline Subset), založená na analýze snímok s malými časovými a priestorovými rozdielmi, ktorá zvyšuje spoľahlivosť meraní aj v menej priaznivých podmienkach. Interferometrické údaje sa často kombinujú s geologickými, geomorfologickými, hydrologickými a geotechnickými informáciami. Takýto integrovaný prístup umožňuje lepšie pochopiť mechanizmy vzniku zosuvov, identifikovať faktory ovplyvňujúce stabilitu svahov a presnejšie hodnotiť

riziká. Významnú úlohu zohráva InSAR aj pri hodnotení vplyvu intenzívnych zrážok, klimatických zmien a extrémnych meteorologických javov na aktivitu svahových pohybov.

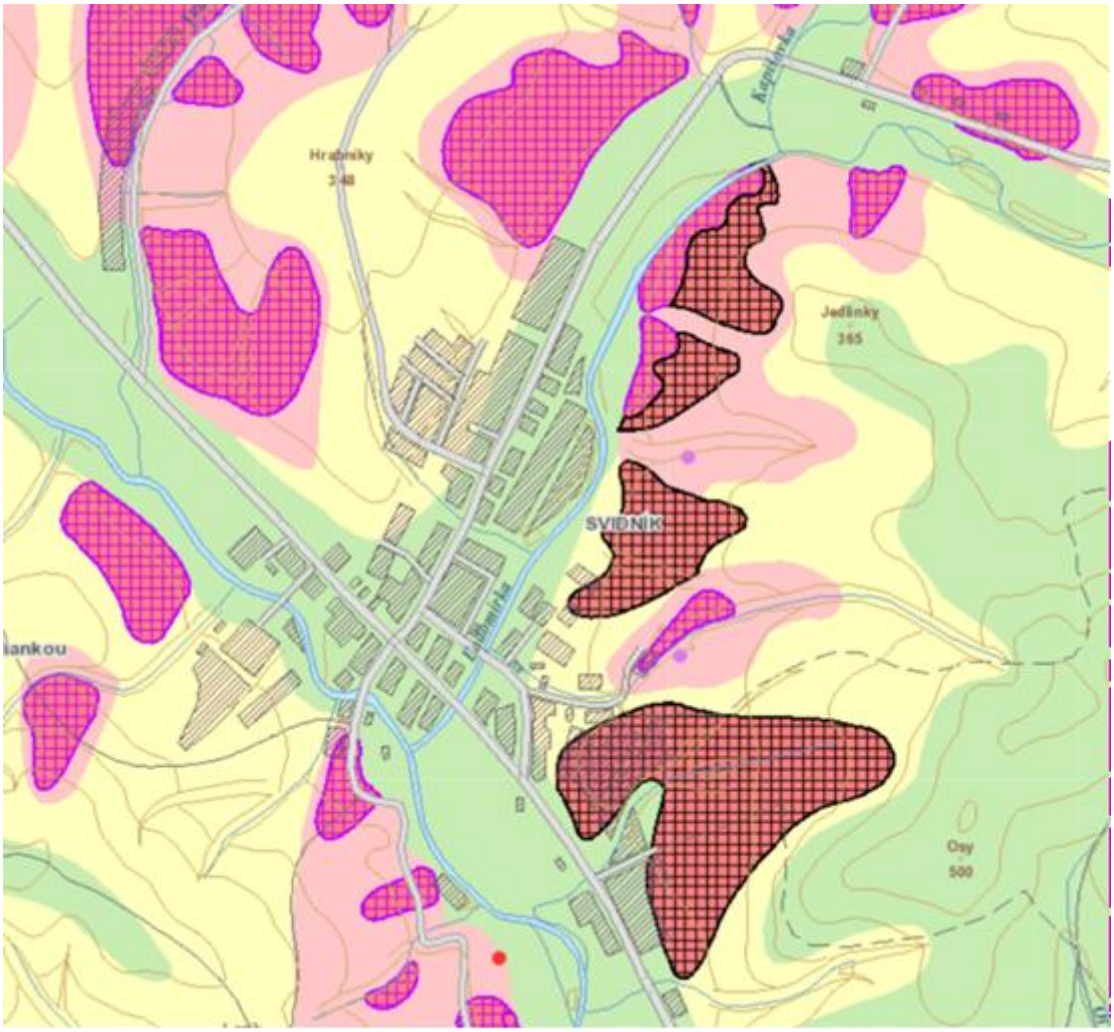
V kombinácii s meteorologickými a hydrologickými údajmi môže byť InSAR súčasťou systémov včasného varovania pred zosuvmi. Včasná identifikácia deformácií povrchu podporuje efektívnejšie riadenie rizík, prijímanie preventívnych opatrení a zvyšovanie bezpečnosti obyvateľstva. Technológia sa využíva aj na monitorovanie stability ciest, železníc, mostov, tunelov, priemyselných areálov a obytných zón v rizikových oblastiach. V porovnaní s rozsiahlymi terénnymi meraniami umožňuje efektívne získavať veľké množstvo údajov na regionálnej úrovni, čím znižuje náklady na monitoring a podporuje optimálne plánovanie monitorovacích aktivít. Radarová interferometria preto patrí medzi kľúčové nástroje monitorovania zosuvných rizík a jej význam naďalej rastie s rozvojom satelitných technológií a dostupnosťou kvalitných radarových údajov.

Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa v rámci a v okolí mesta Svidník (obr. 1). Ide spravidla o malé geomorfologické formy, pričom len niektoré z nich sa nachádzajú v blízkosti zástavby. Na mape zosuvov vypracovanej pre celé Slovensko bola na 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. Táto zóna sa tiahne pozdĺž novovybudovaného obchvatu a zasahuje aj do bezprostredného západného okraja mesta.
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.

Údaje získané radarovou interferometriou umožňujú detailne analyzovať pohyb jednotlivých bodov zemského povrchu, ako sú okraje striech budov, prvky dopravnej infraštruktúry či iné stabilné objekty, v

období rokov 2019–2023. Metóda umožňuje sledovať aj veľmi malé deformácie povrchu s presnosťou na úrovni niekoľkých milimetrov, a preto predstavuje účinný nástroj na monitorovanie svahových procesov a hodnotenie stability územia. Na identifikáciu zmien morfológie terénu bola pre oblasť severne od mesta Svidnik vykonaná priestorová analýza založená na údajoch radarovej interferometrie. Deformácie zemského povrchu boli znázornené prostredníctvom siete pevných bodov, v ktorých sa v rokoch 2019–2023 realizovali interferometrické merania. Tento prístup umožnil zhodnotiť priestorové rozloženie deformácií a identifikovať lokality s potenciálne zvýšenou aktivitou svahových pohybov. Súčasťou štúdie bola aj podrobná analýza troch vybraných bodov hodnotených vo vyššom časovom a priestorovom rozlíšení. Ich výber vychádzal z predbežných výsledkov interferometrických meraní a zahŕňal lokality s najvýraznejšími prejavmi deformácií súvisiacich so zosuvnými procesmi. Detailné sledovanie týchto bodov umožnilo lepšie charakterizovať dynamiku zmien zemského povrchu. Analýza bola vykonaná pre tri úrovne vertikálnych deformácií reliéfu – 5 mm, 10 mm a 20 mm za rok. Takéto rozdelenie umožnilo rozlíšiť oblasti s nízkou, strednou a vysokou intenzitou deformácií a identifikovať zóny so zvýšenou aktivitou svahových procesov. Získané výsledky poskytujú dôležité informácie o priestorovom rozsahu deformácií a predstavujú vhodný podklad pre ďalší výskum, hodnotenie zosuvného rizika i plánovanie monitorovacích opatrení v skúmanom regióne.



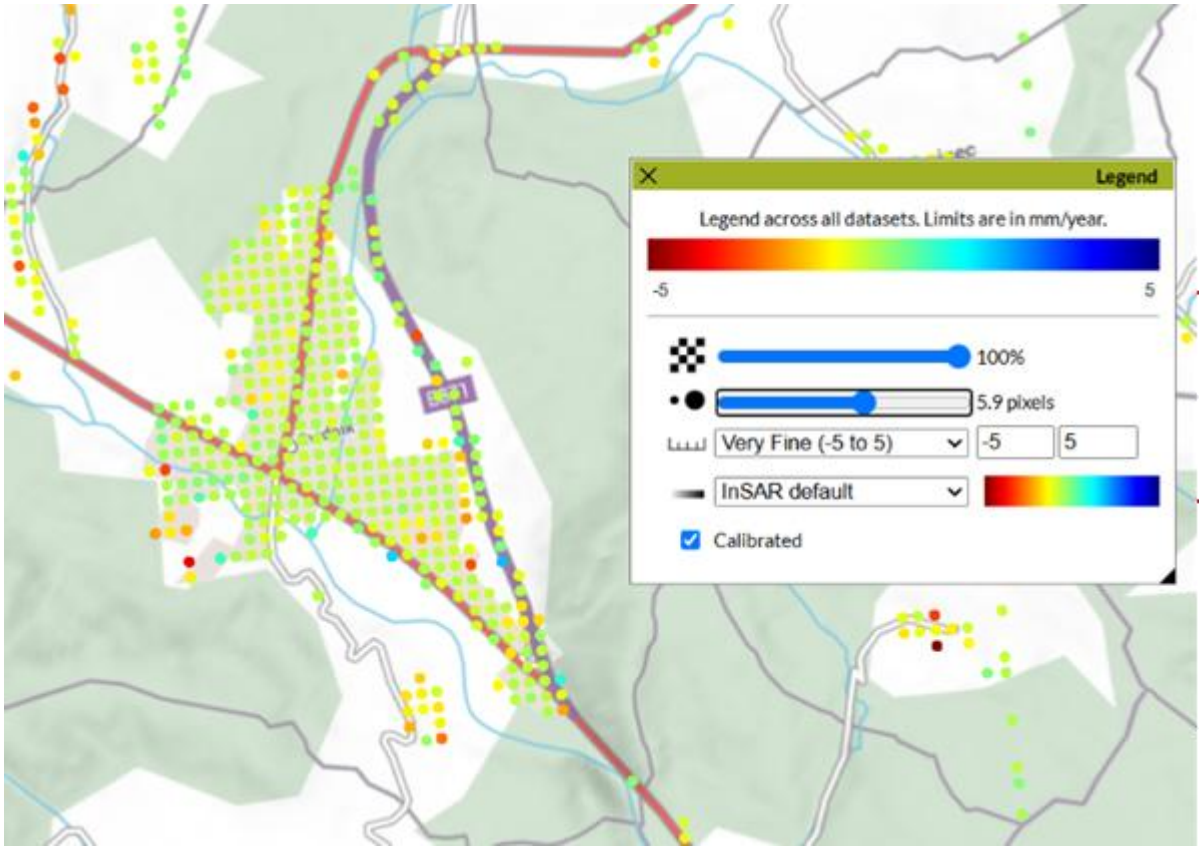
Obrázok 1. Poloha analyzovaných zosuvov pôdy.

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

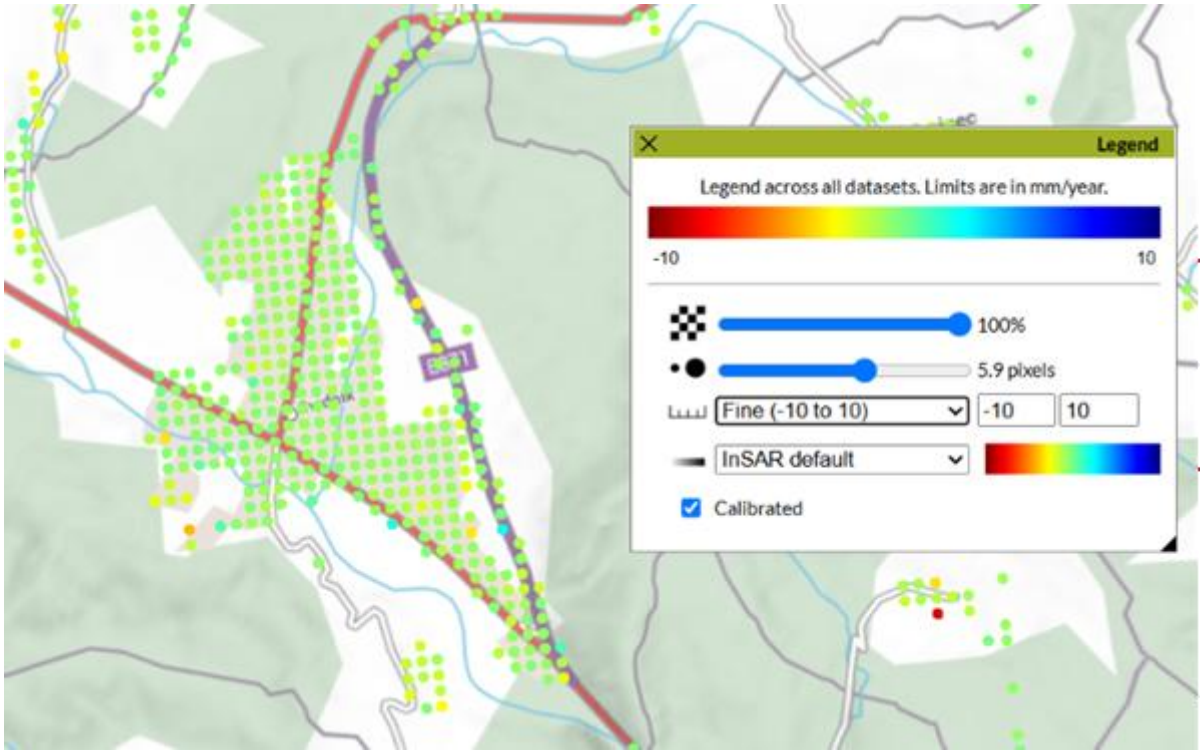
3. Výsledky výskumu v číselnej podobe spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a výkresov.

Interferometrická analýza bola vykonaná pre územia nachádzajúce sa v okolí mesta Svidník. Podľa celoštátnej mapy zosuvných území Slovenska sa táto oblasť vyznačuje výskytom početných svahových deformácií, pričom zóny náchylné na svahové pohyby sa najčastejšie nachádzajú pozdĺž ciest a v ich bezprostrednom okolí, ako aj v blízkosti vodných tokov. Prítomnosť hydrografickej siete spolu s antropogénnymi zásahmi súvisiacimi s výstavbou cestnej infraštruktúry podporuje lokálnu destabilizáciu svahov a môže viesť k aktivizácii zosuvných procesov. Analýza bola realizovaná pre obdobie rokov 2019 – 2023 a získané výsledky potvrdili aktivitu svahových procesov prostredníctvom zaznamenaných zmien polohy časti analyzovaných meracích bodov. Interferometrické údaje naznačujú, že na skúmanom území prebiehajú súčasné deformácie zemského povrchu, ktorých charakter môže súvisieť tak s prirodzenými geomorfologickými procesmi, ako aj s antropogénnou činnosťou. Výskum zmien polohy bodov na povrchu terénu bol realizovaný v dvoch hlavných zónach. Prvá skúmaná oblasť sa nachádza v juhovýchodnej časti mesta, v blízkosti menšieho vodného toku. V tejto zóne boli zaznamenané pomerne výrazné pohyby pôdy, ktoré poukazujú na aktivitu svahových procesov. Časť analyzovaných bodov vykazovala zdvíhanie terénu na úrovni približne 7 – 8 mm/rok, zatiaľ čo iné body zaznamenali pokles terénu s rýchlosťou približne 6 – 7 mm/rok (obr. 2, 3, 4). Mimoriadne významným zistením je, že zóny zdvíhania a poklesu sa nachádzajú v bezprostrednej blízkosti, čo predstavuje charakteristický znak aktívnych zosuvných území. Takéto priestorové rozloženie deformácií naznačuje premiestňovanie zvetraného materiálu v rámci svahov a svedčí o prebiehajúcich procesoch redistribúcie horninového materiálu. Tieto výsledky sú v súlade s celoštátnou mapou svahových deformácií Slovenska, na ktorej je analyzované územie klasifikované ako aktívna zosuvná oblasť. Zhoda výsledkov radarovej interferometrie s existujúcimi kartografickými podkladmi potvrdzuje spoľahlivosť vykonanej interpretácie. Druhou analizovanou oblasťou bola zóna nachádzajúca sa pozdĺž novovybudovaného obchvatu vo východnej časti mesta. Pozdĺž komunikácie boli identifikované početné deformácie zemského povrchu zahŕňajúce pokles aj zdvíhanie terénu (obr. 2, 3, 4). To znamená, že počas piatich rokov interferometrických pozorovaní dochádzalo na jednotlivých úsekoch komunikácie k rozdielnym vertikálnym pohybom. Maximálne hodnoty zdvíhania aj poklesu dosahovali približne 7 mm/rok. Takéto zmeny povrchu v telese komunikácie môžu poukazovať na postupnú konsolidáciu podložia po ukončení výstavby, lokálne sadanie násypov alebo deformácie spôsobené prevádzkou cestnej infraštruktúry. Nie je však možné jednoznačne potvrdiť súvislosť týchto zmien so svahovými procesmi, keďže na priľahlých svahoch nebol identifikovaný dostatočný počet interferometrických bodov umožňujúcich posúdenie ich aktivity. Z tohto dôvodu je potrebné interpretovať zaznamenané deformácie s opatrnosťou a zohľadniť prirodzené aj antropogénne faktory.

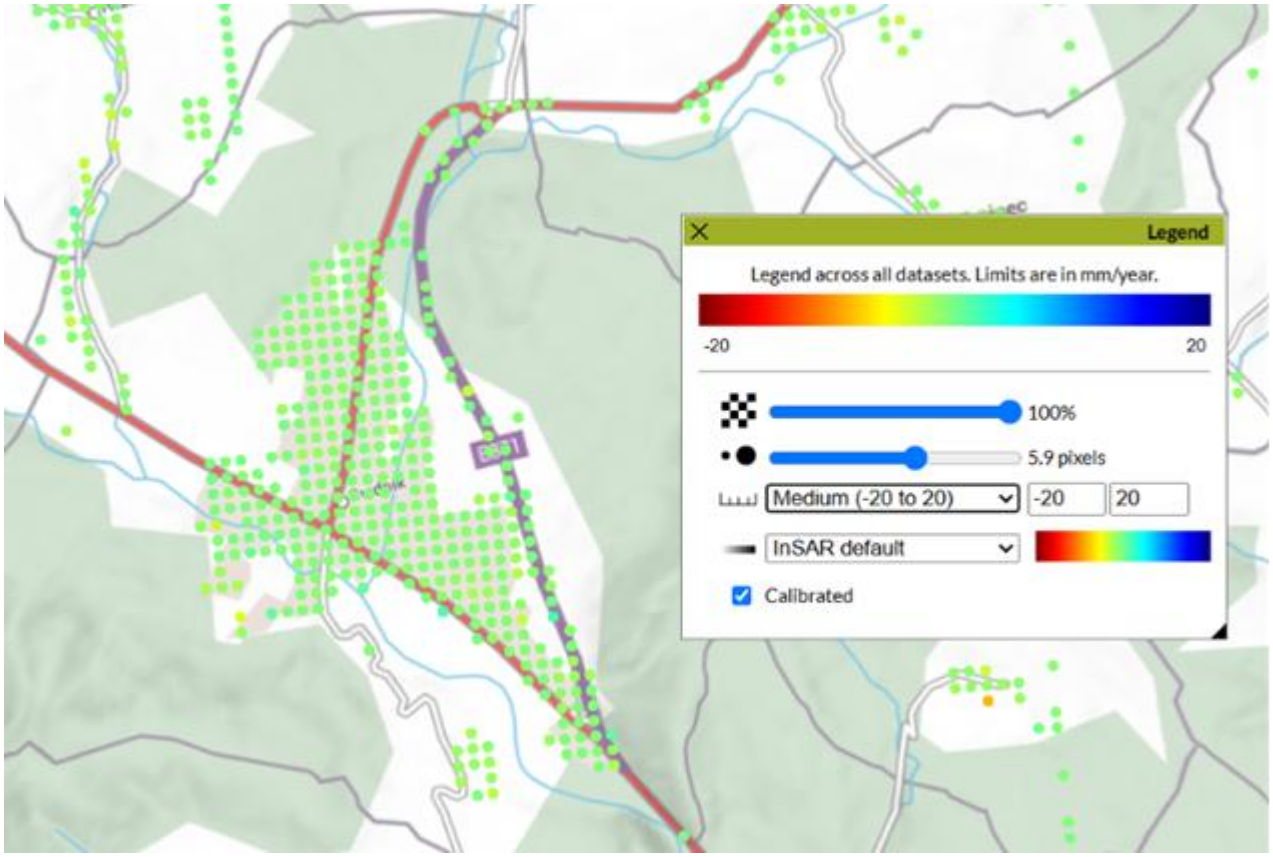
Analýza zmien polohy vybraných meracích bodov v juhovýchodnej časti mesta Svidník ukázala, že v období rokov 2019 – 2024 sa niektoré body znížili až o približne 30 mm (obr. 5). Zdvíhanie povrchu bolo menej výrazné a dosiahlo maximálne približne 10 mm (obr. 6). Osobitnú pozornosť si zasluhuje skutočnosť, že amplitúda zmien výšky analyzovaných bodov sa v priebehu času postupne zväčšovala, čo môže naznačovať zosilňovanie procesov zodpovedných za deformácie zemského povrchu. Tento jav môže súvisieť s intenzifikáciou atmosférických zrážok vedúcou k zvýšeniu vlhkosti horninového prostredia a zníženiu stability svahov, ale aj s lokálnou seizmickou aktivitou alebo inými geodynamickými faktormi ovplyvňujúcimi rozvoj svahových pohybov. Aj v zóne nachádzajúcej sa pozdĺž obchvatu mesta Svidník boli zaznamenané výrazné deformácie zemského povrchu. Maximálne zdvíhanie dosiahlo približne 14 mm, zatiaľ čo maximálny pokles predstavoval približne 20 mm v období rokov 2019 – 2024 (obr. 7, 8). Priestorové rozloženie deformácií poukazuje na rozdielnu dynamiku vertikálnych pohybov, avšak ich genézu je veľmi ťažké jednoznačne určiť. Môžu byť dôsledkom antropogénnych procesov súvisiacich s výstavbou a prevádzkou cestnej infraštruktúry, ako je sadanie násypov alebo zmeny vlastností podložia, ale zároveň môžu súvisieť aj s prirodzenými zosuvnými procesmi prebiehajúcimi v horninovom prostredí. Na jednoznačné určenie príčin pozorovaných deformácií by bolo potrebné vykonať doplňujúce terénne výskumy a rozšíriť interferometrickú analýzu o geologické, geotechnické a hydrogeologické údaje.



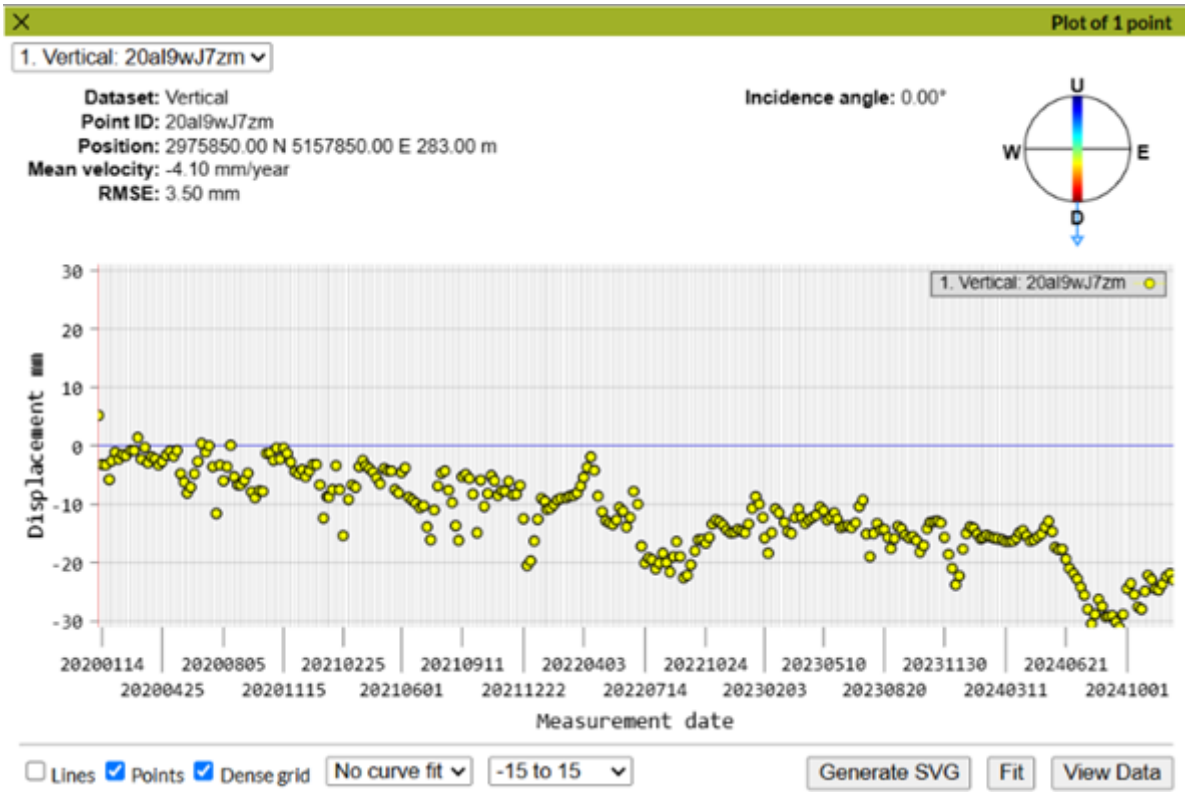
Obrázok 2. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



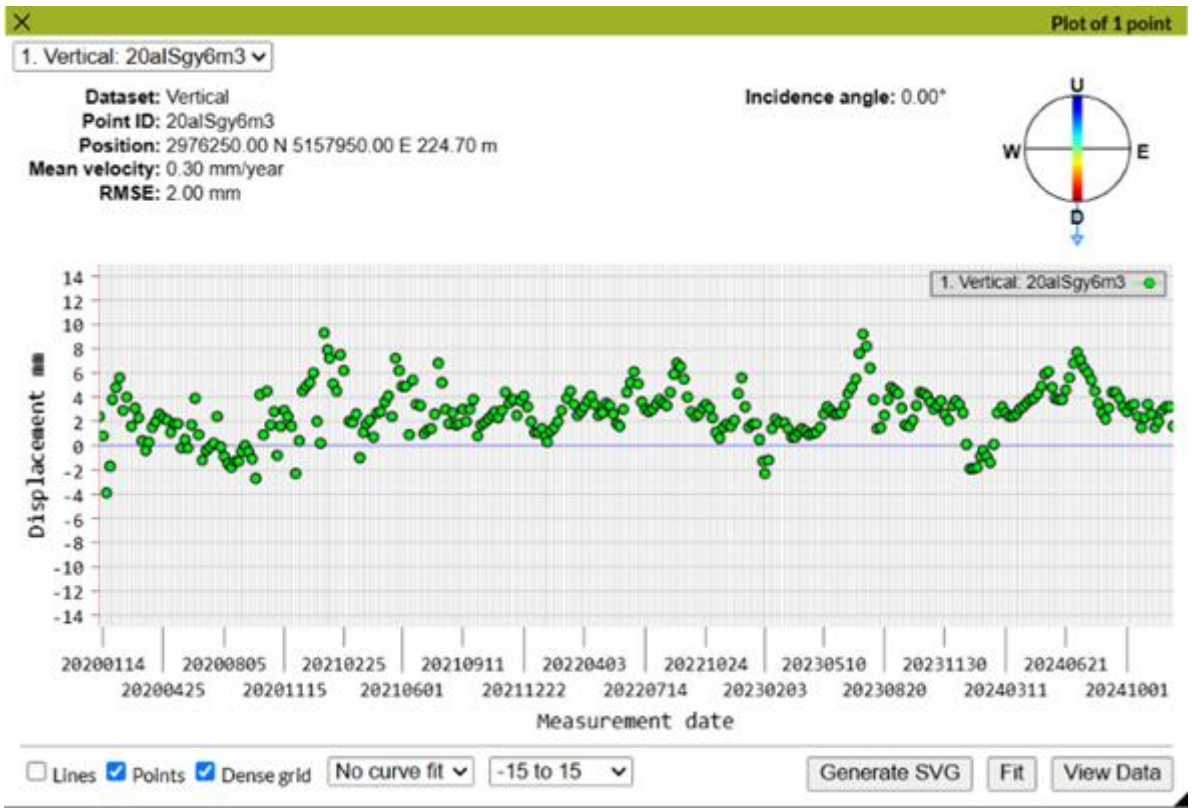
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



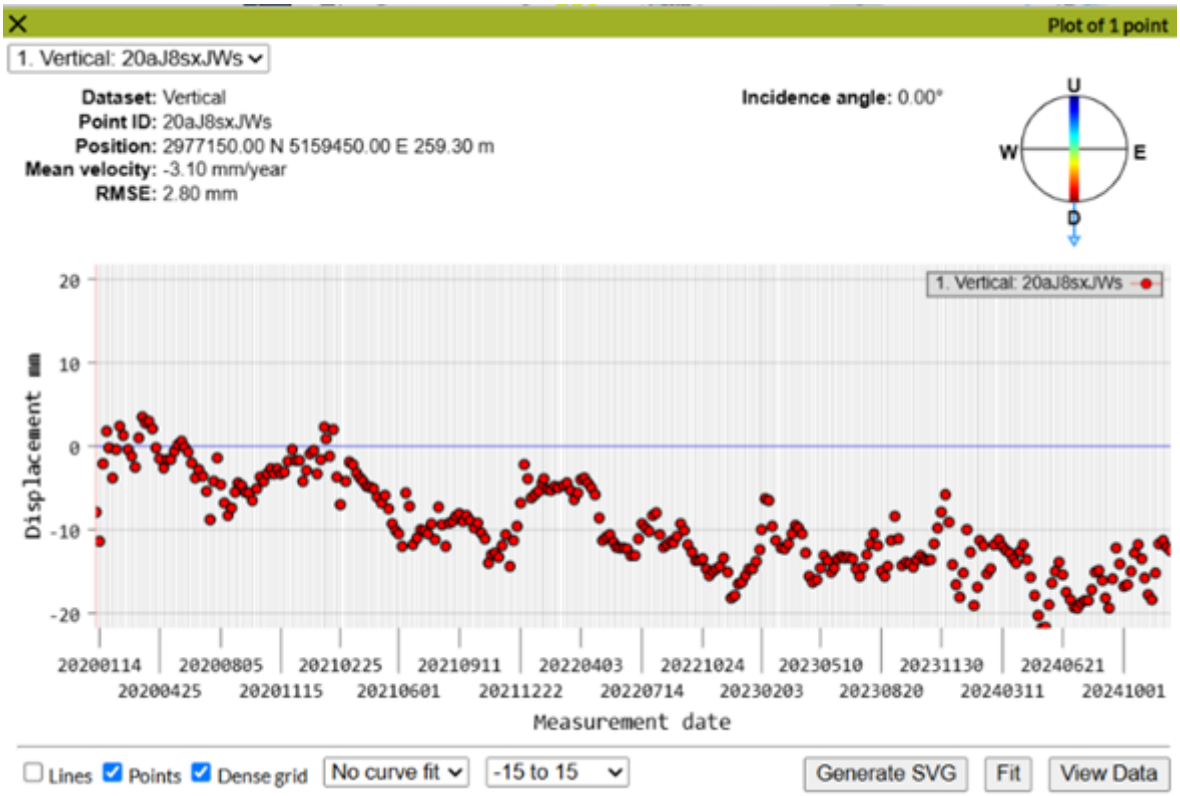
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 20 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



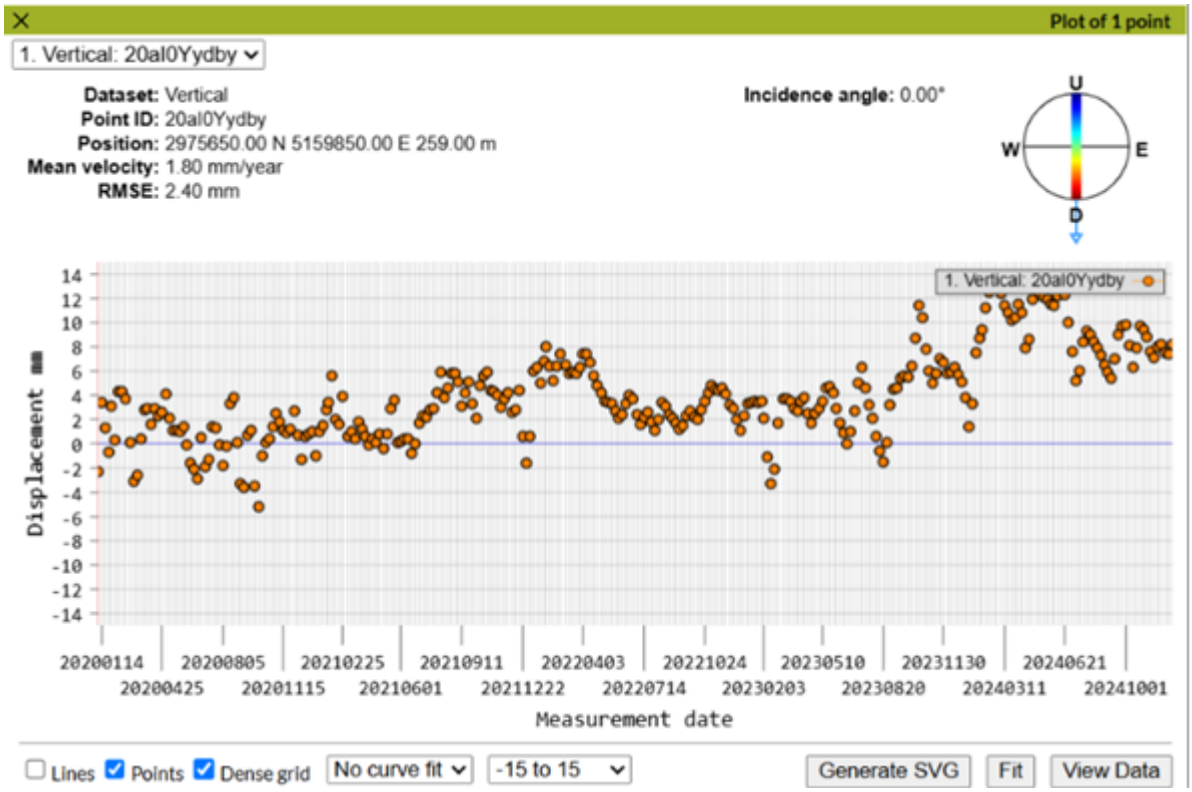
Obrázok 5. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



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).

Analizę interferometryczną przeprowadzono dla obszarów położonych wokół miasta Svidník w okresie 2019–2023. Badany teren charakteryzuje się licznymi deformacjami stokowymi, szczególnie w pobliżu dróg oraz cieków wodnych. Wyniki potwierdziły występowanie współczesnych deformacji powierzchni terenu związanych z procesami stokowymi i działalnością antropogeniczną. Pierwszy analizowany obszar zlokalizowany był w południowo-wschodniej części miasta, gdzie zarejestrowano zarówno wypiętrzanie terenu (7–8 mm/rok), jak i jego obniżanie (6–7 mm/rok). Bliskie sąsiedztwo stref wypiętrzania i obniżania wskazuje na aktywność procesów osuwiskowych. Uzyskane wyniki są zgodne z krajową mapą deformacji stokowych Słowacji, która klasyfikuje ten obszar jako aktywny. Drugim analizowanym obszarem była strefa wzdłuż nowo wybudowanej obwodnicy we wschodniej części miasta. W jej obrębie stwierdzono zarówno obniżanie, jak i wypiętrzanie powierzchni terenu o wartościach dochodzących do około 7 mm/rok, co może być związane z osiadaniem podłoża lub eksploatacją drogi. W latach 2019–2024 maksymalne obniżenie powierzchni w południowo-wschodniej części miasta osiągnęło około 30 mm, natomiast wypiętrzanie około 10 mm. Wzdłuż obwodnicy odnotowano maksymalne wypiętrzenie wynoszące około 14 mm oraz obniżenie dochodzące do 20 mm. Zaobserwowano stopniowe zwiększanie amplitudy deformacji, co może wskazywać na nasilanie się procesów odpowiedzialnych za przemieszczenia powierzchni. Jednoznaczne określenie genezy obserwowanych zmian wymaga jednak uzupełnienia badań interferometrycznych o analizy geologiczne, geotechniczne i hydrogeologiczne.

Katowice, 31.07.2026

Dr hab. Jerzy Cabała

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).

Analizę interferometryczną przeprowadzono dla obszarów położonych wokół miasta Svidník w okresie 2019–2023. Badany teren charakteryzuje się licznymi deformacjami stokowymi, szczególnie w pobliżu dróg oraz cieków wodnych. Wyniki potwierdziły występowanie współczesnych deformacji powierzchni terenu związanych z procesami stokowymi i działalnością antropogeniczną. Pierwszy analizowany obszar zlokalizowany był w południowo-wschodniej części miasta, gdzie zarejestrowano zarówno wypiętrzanie terenu (7–8 mm/rok), jak i jego obniżanie (6–7 mm/rok). Bliskie sąsiedztwo stref wypiętrzania i obniżania wskazuje na aktywność procesów osuwiskowych. Uzyskane wyniki są zgodne z krajową mapą deformacji stokowych Słowacji, która klasyfikuje ten obszar jako aktywny. Drugim analizowanym obszarem była strefa wzdłuż nowo wybudowanej obwodnicy we wschodniej części miasta. W jej obrębie stwierdzono zarówno obniżanie, jak i wypiętrzanie powierzchni terenu o wartościach dochodzących do około 7 mm/rok, co może być związane z osiadaniem podłoża lub eksploatacją drogi. W latach 2019–2024 maksymalne obniżenie powierzchni w południowo-wschodniej części miasta osiągnęło około 30 mm, natomiast wypiętrzanie około 10 mm. Wzdłuż obwodnicy odnotowano maksymalne wypiętrzenie wynoszące około 14 mm oraz obniżenie dochodzące do 20 mm. Zaobserwowano stopniowe zwiększanie amplitudy deformacji, co może wskazywać na nasilanie się procesów odpowiedzialnych za przemieszczenia powierzchni. Jednoznaczne określenie genezy obserwowanych zmian wymaga jednak uzupełnienia badań interferometrycznych o analizy geologiczne, geotechniczne i hydrogeologiczne.

PREZES ZARZĄDU
Oddział Górnośląski, Polskie Towarzystwo Fizyczne
dr hab. Jerzy Cabała