Správa o výskumnom teste týkajúcom sa rizika zosuvov pôdy s využitím radarovej interferometrie InSAR pre zosuvy pôdy okolo mesta Humenne

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 okolo mesta Humenne),
- 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 a analýzu zosuvov pôdy. Táto moderná technológia je založená na analýze rozdielov vo fáze radarového signálu zaznamenaného družicami počas opakovaných preletov nad rovnakým územím. Vďaka satelitným misiám, ako je program European Space Agency **Sentinel-1**, je možné pravidelne, systematicky a dlhodobo sledovať deformácie zemského povrchu na rozsiahlych územiach. Interferogramy vytvorené z radarových údajov umožňujú identifikovať vertikálne aj horizontálne posuny terénu s veľmi vysokou presnosťou, ktorá často dosahuje úroveň niekoľkých milimetrov. Takáto presnosť robí z metódy InSAR mimoriadne cenný nástroj pri výskume geodynamických procesov prebiehajúcich v prírodnom prostredí aj v oblastiach výrazne ovplyvnených ľudskou činnosťou. Pri skúmaní zosuvných procesov dokáže zachytiť nielen náhle a dynamické pohyby svahov, ale aj pomalé a dlhodobé deformácie, ktoré by bolo klasickými geodetickými metódami alebo periodickými terénnymi meraniami len ťažko možné odhaliť. Mimoriadny význam majú viacčasové interferometrické analýzy, ktoré zvyšujú presnosť a spoľahlivosť výsledkov elimináciou vplyvu atmosférických porúch a ďalších zdrojov chýb. Veľmi účinnou technikou je **PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR)**, ktorá využíva stabilné objekty odrážajúce radarový signál, napríklad budovy, skalné útvary, technické stavby alebo prvky dopravnej infraštruktúry. Táto metóda umožňuje presne určiť rýchlosť deformácie svahov v dlhodobých časových radoch a identifikovať oblasti vykazujúce postupnú stratu stability. Získané údaje poskytujú cenné informácie o vývoji nestabilných území a významne podporujú hodnotenie rizika budúcich zosuvných procesov.

Radarová interferometria nachádza široké uplatnenie predovšetkým v horských a ťažko prístupných oblastiach, kde je realizácia tradičných geodetických meraní náročná z technického aj ekonomického hľadiska. Významnou výhodou tejto technológie je možnosť monitorovať rozsiahle územia bez potreby inštalácie meracích zariadení priamo v teréne, čo výrazne znižuje náklady a zároveň umožňuje pravidelné sledovanie zmien povrchu. Satelitné údaje možno získavať aj z lokalít, do ktorých je prístup obmedzený alebo nebezpečný, čím sa rozširujú možnosti monitorovania rizikových oblastí. V regiónoch s hustou

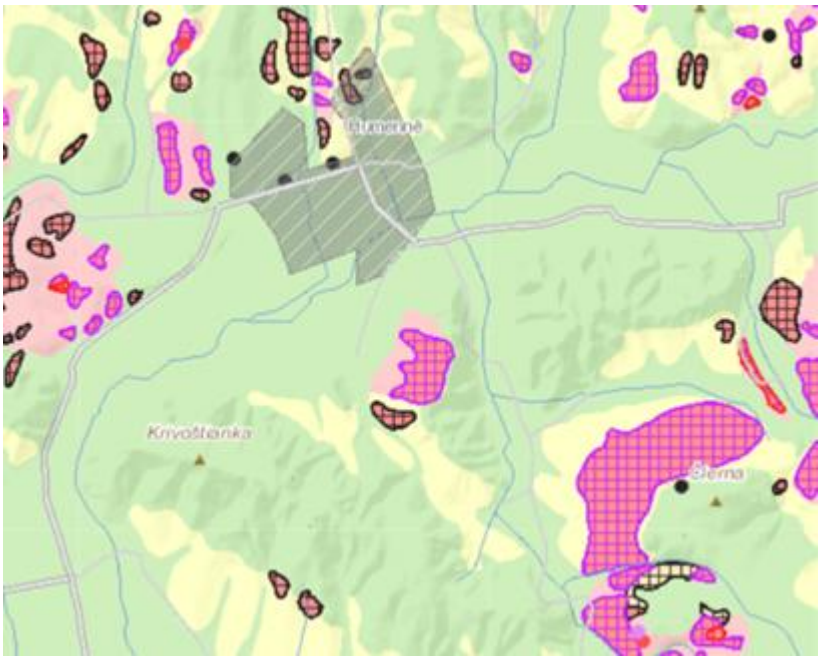
vegetáciou alebo súvislým lesným porastom však môže dochádzať k dekoherencii radarového signálu, čo negatívne ovplyvňuje presnosť meraní a sťažuje interpretáciu výsledkov. V takýchto prípadoch sa využívajú pokročilé metódy založené na trvalých rozptyľovačoch alebo technika **SBAS (Small Baseline Subset)**, ktorá využíva analýzu malých základní a prispieva k zvýšeniu kvality spracovaných údajov. Interferometrické dáta sa často kombinujú s geologickými, geomorfologickými, hydrologickými a geotechnickými informáciami, čo umožňuje komplexnejšie pochopiť mechanizmy vzniku a vývoja zosuvov. Významnú úlohu zohrávajú aj pri hodnotení vplyvu intenzívnych zrážok, kolísania hladiny podzemných vôd a klimatických faktorov na aktivitu svahových pohybov. V spojení s meteorologickými údajmi a numerickými modelmi môže radarová interferometria podporovať budovanie systémov včasného varovania pred zosuvmi a prispievať k ochrane obyvateľstva i majetku. Táto technológia sa využíva aj pri posudzovaní stability infraštruktúry nachádzajúcej sa v rizikových oblastiach, ako sú cestné komunikácie, železničné trate, mosty, vodné stavby či obytné zóny. Mimoriadne dôležitá je v urbanizovaných regiónoch a pozdĺž hlavných dopravných koridorov, kde môžu zosuvy spôsobiť rozsiahle hospodárske škody, narušiť dopravu a predstavovať priame ohrozenie života a zdravia obyvateľov. Radarová interferometria zároveň prispieva k znižovaniu nákladov na výskum tým, že obmedzuje potrebu rozsiahlych terénnych meraní a umožňuje efektívnejšie plánovanie monitorovacích aktivít aj sanačných opatrení. V súčasnosti tvorí jednu z hlavných súčastí integrovaných systémov monitorovania zosuvných rizík, podporuje činnosť odborných inštitúcií zodpovedných za krízové riadenie, územné plánovanie a ochranu životného prostredia. S pokračujúcim rozvojom satelitných technológií a zdokonaľovaním metód spracovania radarových údajov sa očakáva, že význam interferometrie radarovej pri monitorovaní geologických rizík bude aj naďalej narastať a stane sa ešte dôležitejším nástrojom moderného sledovania deformácií zemského povrchu.

Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa v okolí mesta Humenne (obr. 1). Najmä niekoľko kilometrov juhovýchodne od mesta Humenné sa nachádza zóna svahových deformácií. Menšie zosuvné územia sa vyskytujú aj západne od mesta. Tieto lokality predstavujú súčasť oblastí zaznamenaných na mape zosuvov pre celé Slovensko, 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 podrobnú analýzu pohybu jednotlivých bodov zemského povrchu, napríklad okrajov striech budov alebo iných stabilných objektov, v sledovanom období rokov 2019–2023. S cieľom identifikovať priestorové zmeny morfológie terénu v rámci skúmanej oblasti bola vykonaná analýza založená na interferometrických radarových údajoch. Pre územie nachádzajúce sa v okolí mesta Humenne boli deformácie povrchu vizualizované prostredníctvom siete

pevných bodov, v ktorých boli počas rokov 2019–2023 realizované interferometrické merania. Následne bola analýza rozšírená o podrobné hodnotenie zmien polohy troch vybraných bodov vo zvýšenom priestorovom rozlíšení, ktoré reprezentovali lokality s najvyššou zaznamenanou aktivitou zosuvných procesov. Hodnotenie bolo vykonané pre tri úrovne priemerných ročných vertikálnych zmien reliéfu, konkrétne 5 mm, 10 mm a 20 mm za rok, čo umožnilo porovnať intenzitu deformácií v jednotlivých častiach skúmaného územia.
Získané výsledky poskytli prehľad o priestorovom rozložení deformácií a umožnili identifikovať oblasti s najvýraznejšími prejavmi svahových pohybov. Takto spracované údaje predstavujú významný podklad pre hodnotenie stability územia, plánovanie ďalšieho monitorovania a prijímanie opatrení zameraných na znižovanie rizika vzniku alebo aktivácie zosuvov pôdy.

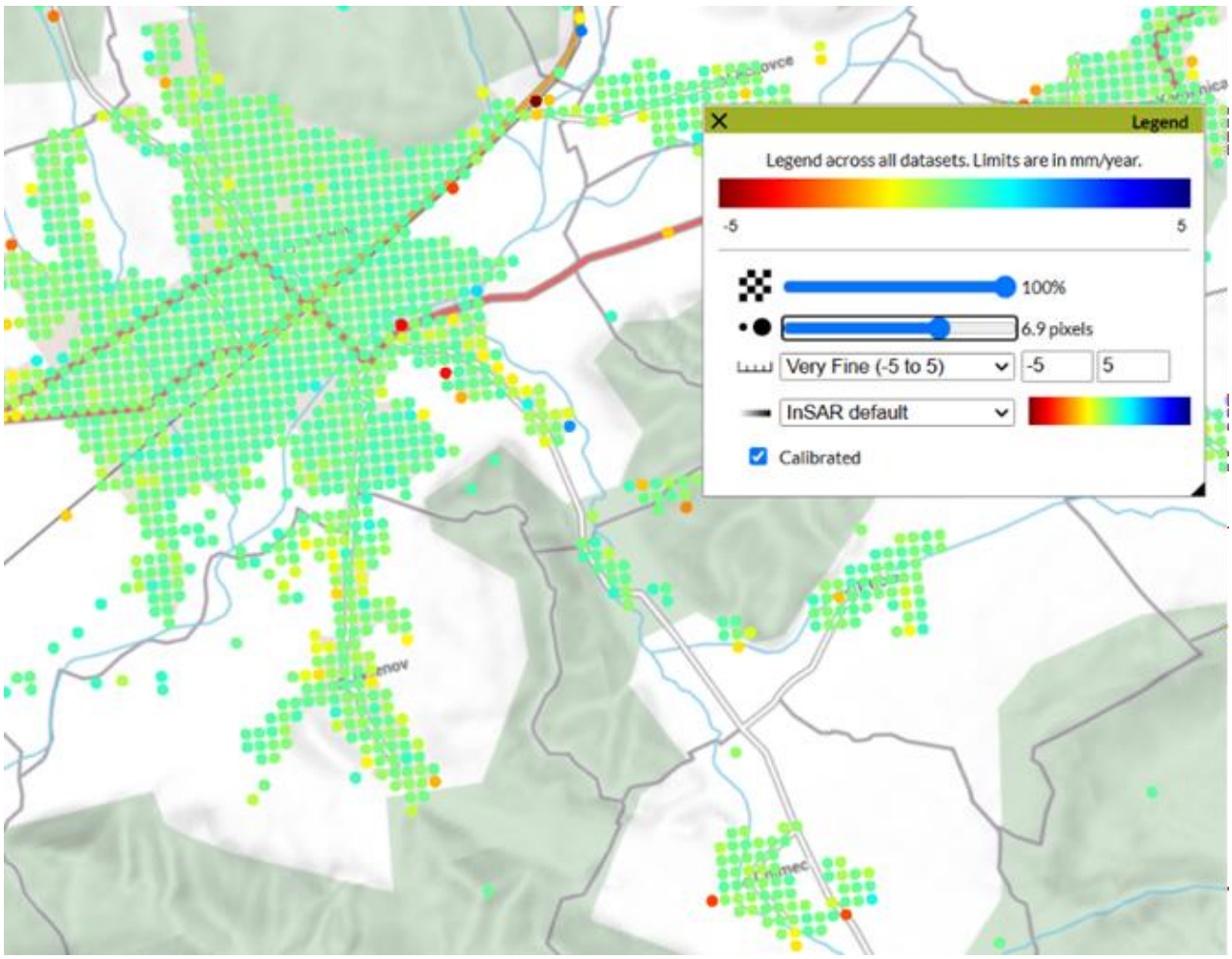
3. Výsledky výskumu v číselnej podobe spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a výkresov.

V skúmanom území nebolo možné analyzovať zmeny polohy bodov na základe interferometrických meraní v oblastiach vzdialených od zastavaných území. Radarová interferometria nachádza uplatnenie predovšetkým v zastavaných oblastiach, kde je možné identifikovať stabilné body charakterizované nemenným spôsobom odrazu radarového signálu zo satelitu, ako sú napríklad okraje striech, prvky technickej infraštruktúry alebo iné stabilné antropogénne objekty. V oblastiach pokrytých lesmi alebo poľnohospodársky využívaných územiach je počet takýchto bodov obmedzený, čo výrazne sťažuje spoľahlivú analýzu deformácií zemského povrchu. Z tohto dôvodu sa získané výsledky vzťahujú predovšetkým na zastavané územia a ich bezprostredné okolie. Analýza bola vykonaná za obdobie rokov 2019–2023, počas ktorého bolo hodnotené priemerné tempo zmien polohy vybraných bodov, zahŕňajúce ich zdvíhanie aj pokles. Súčasne boli analyzované aj celkové deformácie povrchu pre vybrané body za celé sledované obdobie, čo umožnilo zhodnotiť dlhodobé trendy zmien a ich časovú variabilitu. Pomerne výrazné zmeny polohy boli zaznamenané pri bodoch nachádzajúcich sa vo východnej časti mesta Humenné. V tejto zóne boli zistené zmeny povrchu terénu pozdĺž cesty smerujúcej na juh. Vyskytujú sa tu zóny poklesu aj zdvíhania terénu, čo poukazuje na rozdielny charakter prebiehajúcich procesov. Mimoriadne dobre je to viditeľné pri analýze deformácií povrchu do 5 mm/rok (obrázok 2), kde sa vedľa seba nachádzajú oblasti s opačným smerom deformácie. Tieto zmeny však nedosahujú hodnoty 10 ani 20 mm/rok, čo znamená, že ich intenzita je pomerne nízka a deformácie prebiehajú postupne (obrázky 3 a 4). Možno predpokladať, že analyzované deformácie povrchu sú dôsledkom svahových pohybov, predovšetkým vzhľadom na súčasný

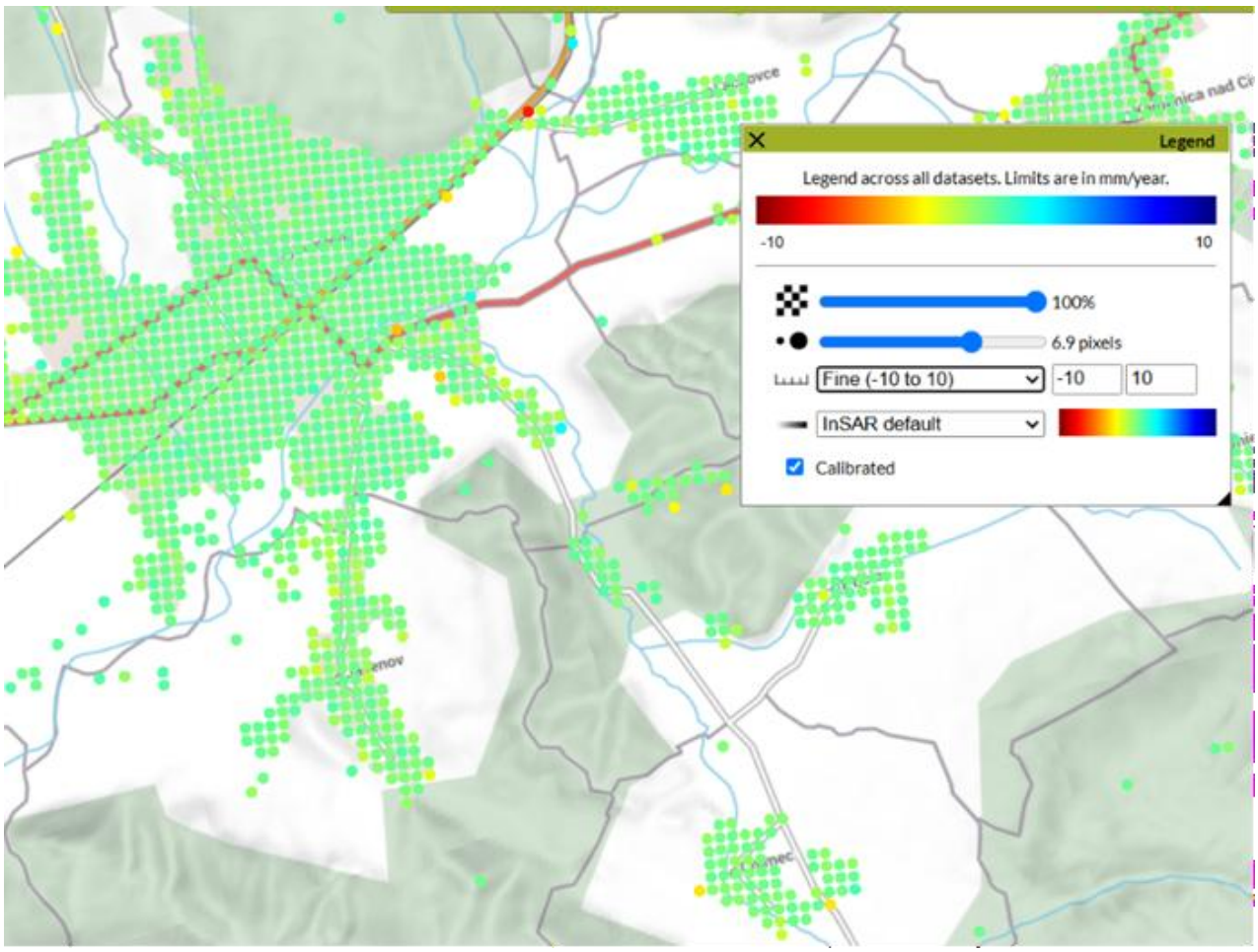
výskyt lokálnych poklesov a vyvýšení terénu, ktoré sú typické pre aktívne zosuvy alebo pomalé svahové deformácie. Nie je však možné vylúčiť ani vplyv lokálnych zemných prác alebo rozvoja infraštruktúry.

V oblasti nachádzajúcej sa niekoľko kilometrov juhovýchodne od mesta Humenné boli taktiež zaznamenané deformácie zemského povrchu (obrázok 2). Aj tu sa vyskytujú zóny zdvíhania aj poklesu terénu, pričom výrazne prevažujú oblasti s poklesom. Povrch sa miestami zdvíha približne o 2 mm/rok, zatiaľ čo inde klesá rýchlosťou až 5 mm/rok. Body meniace svoju výšku sa nachádzajú prevažne na okrajoch zastavaných území, kde susedia so svahmi. Takáto poloha môže naznačovať možnosť výskytu zosuvných pohybov, najmä preto, že deformácie sú sústredené v oblastiach s členitejším reliéfom. Na druhej strane je potrebné zohľadniť skutočnosť, že okrajové časti mesta sú miestom intenzívneho rozvoja obytnej zástavby a technickej infraštruktúry, preto časť zaznamenaných deformácií môže súvisieť aj s hospodárskou činnosťou, zemnými prácami alebo zmenami vo využívaní územia. Analýza poklesu štyroch vybraných bodov ukázala, že tempo týchto zmien bolo v čase výrazne nerovnomerné a nemalo lineárny charakter. Pokles povrchu sa výraznejšie zosilnil od roku 2021 (obrázky 5 a 8), čo môže svedčiť o dočasnom zvýšení aktivity svahových procesov. Naopak, zdvíhanie povrchu prebiehalo podstatne rovnomernejšie a vykazovalo menšie výkyvy v jednotlivých rokoch sledovania (obrázky 6 a 7). Maximálne zaznamenané zdvíhanie dosiahlo približne 14 mm počas piatich rokov (2019–2024), zatiaľ čo pokles povrchu bol výraznejší a miestami dosiahol až 30 mm. Táto asymetria medzi tempom zdvíhania a poklesu môže naznačovať prevahu degradačných procesov nad kompenzačnými procesmi prebiehajúcimi na svahoch.

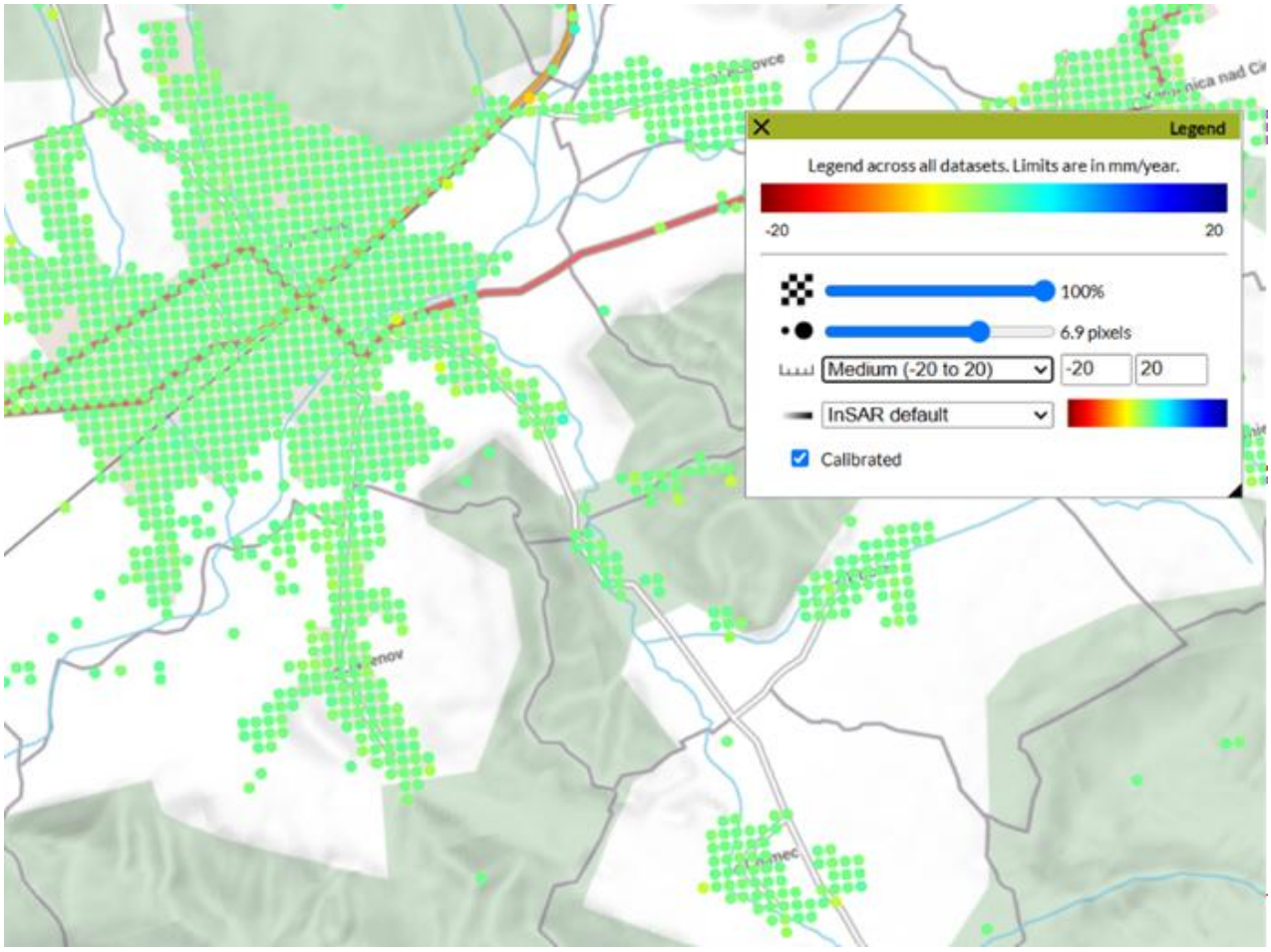
Pozorované zosilnenie poklesu povrchu od roku 2021 môže súvisieť so zvýšenou aktivitou zosuvných procesov vyvolanou intenzívnejšími atmosférickými zrážkami a vyššou vlhkosťou svahových sedimentov. Zvýšený obsah vody v horninovom prostredí vedie k zníženiu jeho šmykovej pevnosti a podporuje aktiváciu zosuvných procesov. Nie je však možné vylúčiť, že faktorom zosilňujúcim pozorované deformácie bola aj zvýšená tektonická aktivita. Územie Slovenska sa vyznačuje pomerne častým výskytom slabších až stredne silných zemetrasení, ktoré môžu viesť k aktivizácii svahových procesov, najmä na svahoch nachádzajúcich sa v stave hraničnej stability. Hoci si vplyv seizmickej aktivity na analyzované deformácie vyžaduje ďalší výskum, je potrebné ju zohľadniť ako jeden z potenciálnych faktorov podporujúcich aktivizáciu svahových pohybov. Bez ohľadu na priamu príčinu pozorovaných deformácií možno konštatovať, že v skúmanom území prebiehajú aktívne svahové procesy, ktorých intenzita sa mení v priestore aj čase, pričom radarová interferometria umožnila účinne identifikovať zóny vyžadujúce ďalší geodynamický monitoring.



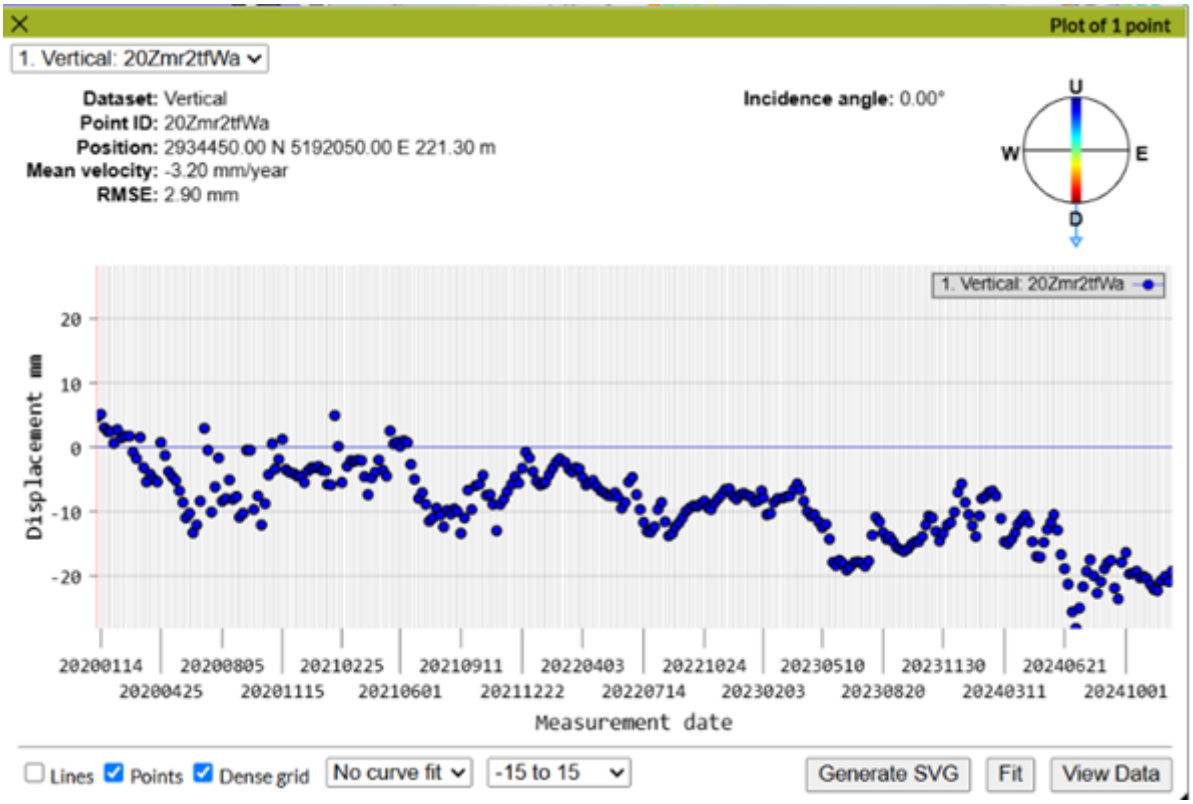
Obrázok 2. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



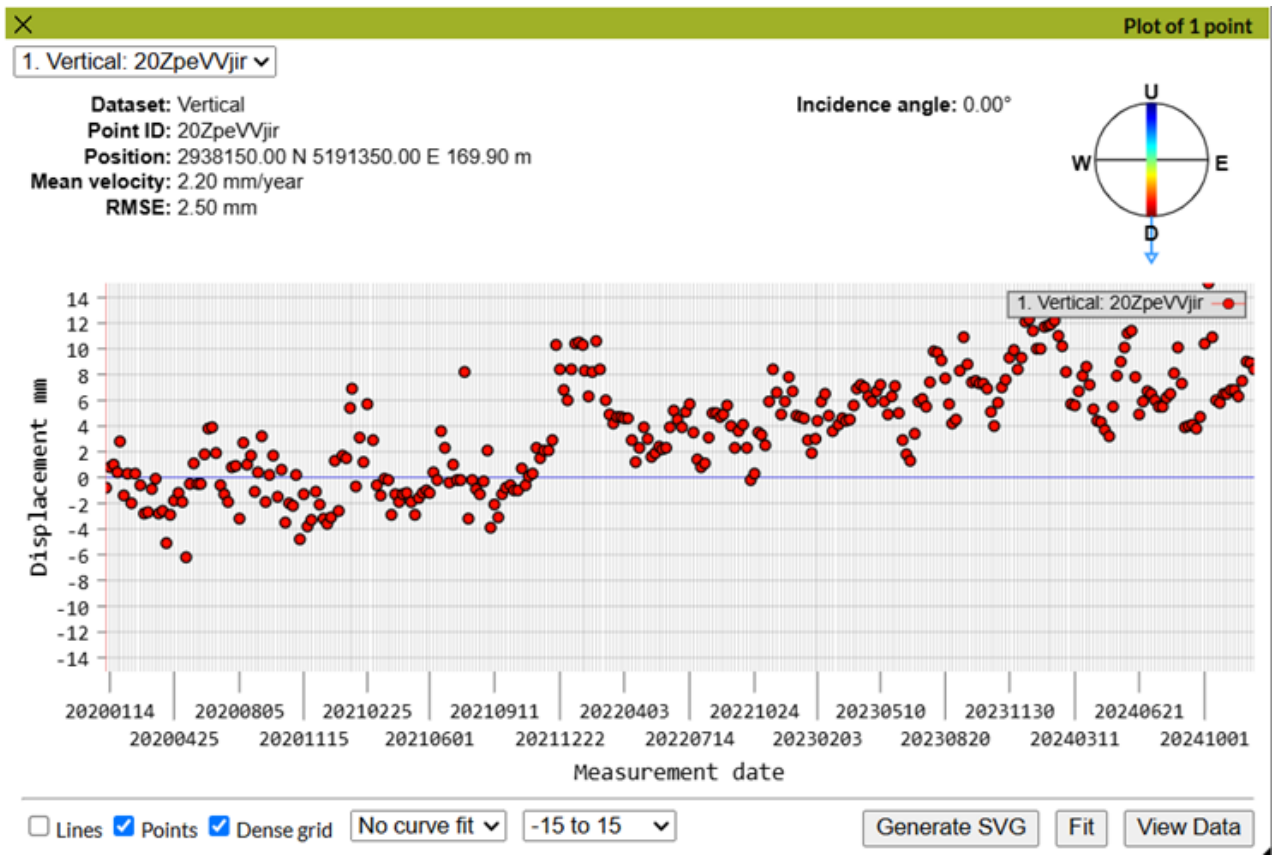
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



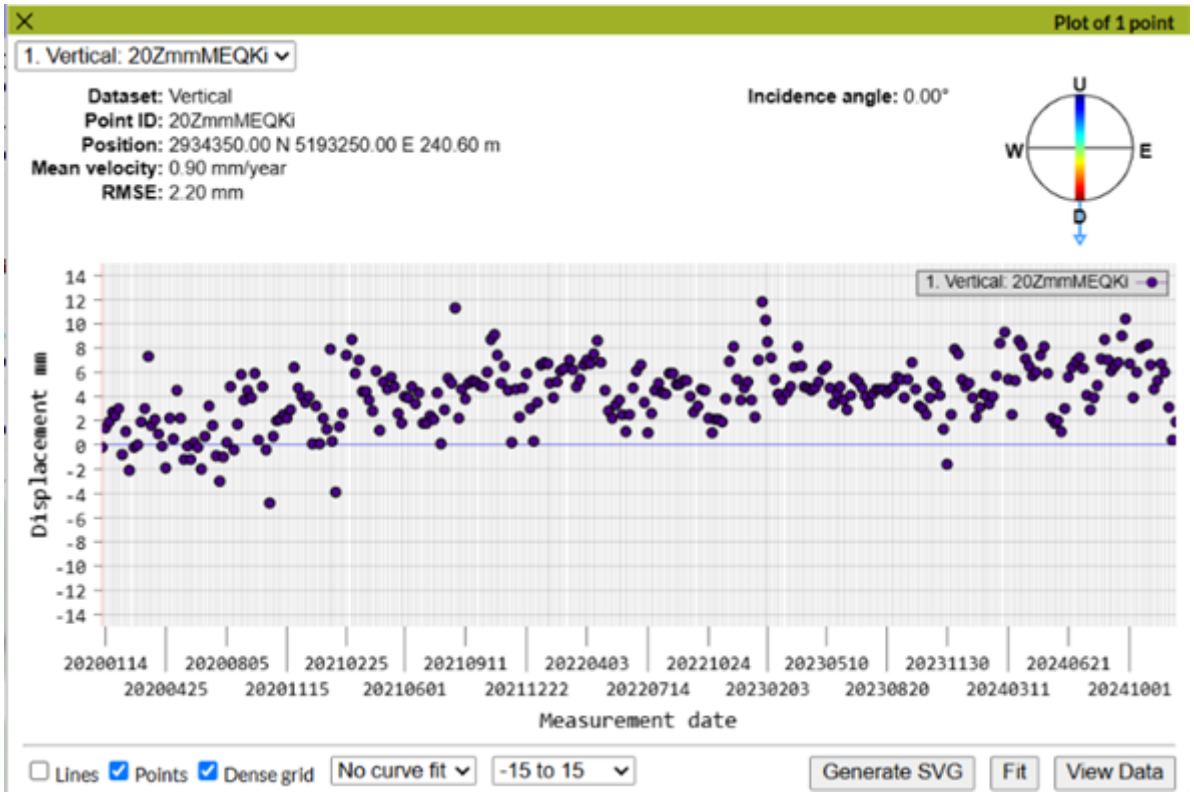
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 20 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



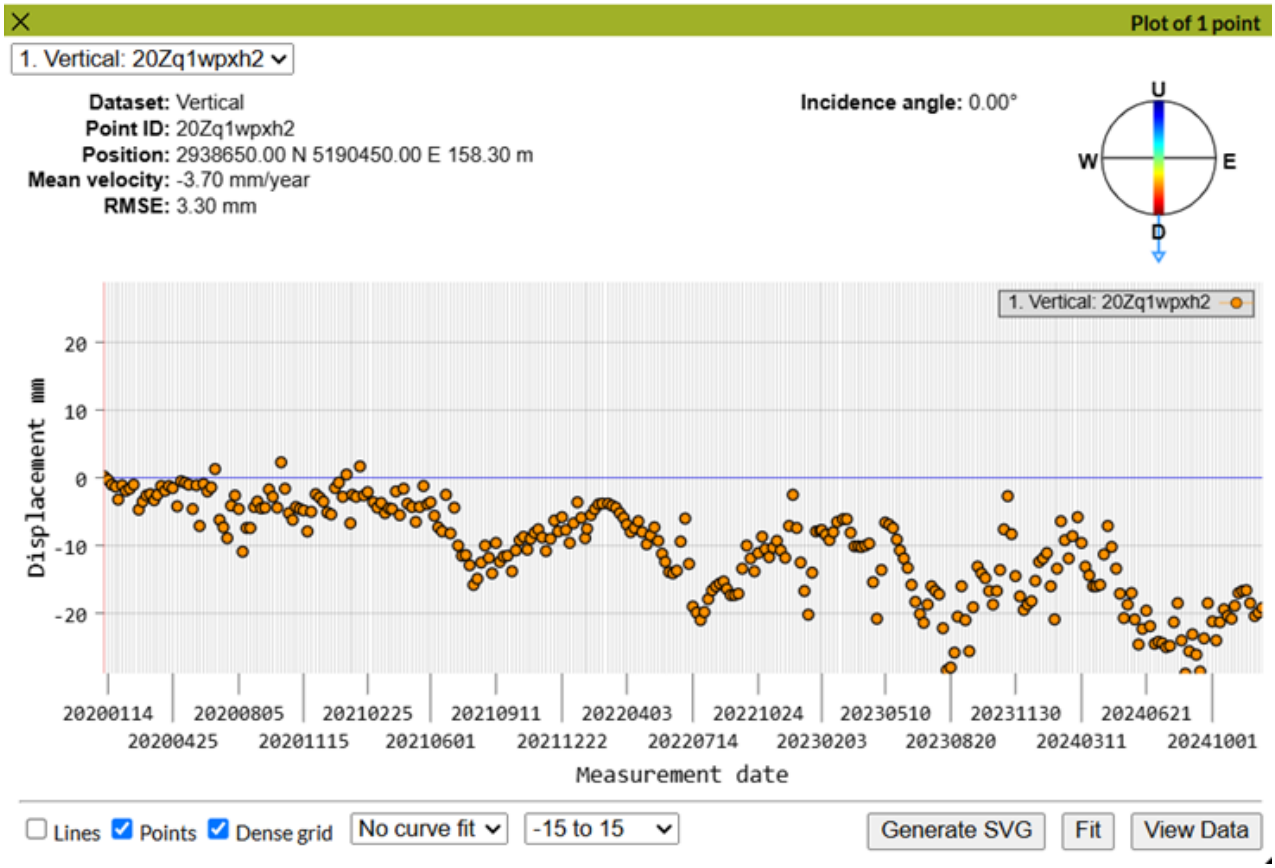
Obrázok 5. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



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 v skúmanom území možná iba v zastavaných oblastiach, kde sa nachádzajú stabilné body vhodné na radarové merania. Analýza bola vykonaná za obdobie rokov 2019–2023 a hodnotila priemerné tempo zdvíhania a poklesu vybraných bodov, ako aj ich celkové deformácie. Najvýraznejšie zmeny boli zaznamenané vo východnej časti mesta Humenné, kde sa pozdĺž cesty smerujúcej na juh striedajú zóny poklesu a zdvíhania terénu. Väčšina zaznamenaných deformácií neprekročila hodnotu 5 mm/rok. Podobné deformácie boli zistené aj juhovýchodne od mesta Humenné, pričom tu prevládajú oblasti s poklesom povrchu. Miestami bolo zaznamenané zdvíhanie terénu do 2 mm/rok a pokles do 5 mm/rok. Deformácie sa nachádzajú najmä na okrajoch zastavaných území, kde môžu súvisieť so svahovými deformáciami alebo s antropogénnou činnosťou. Analýza časového vývoja ukázala, že pokles povrchu sa výraznejšie zosilnil po roku 2021, zatiaľ čo zdvíhanie prebiehalo rovnomernejšie. Maximálne zdvíhanie dosiahlo približne 14 mm a maximálny pokles až 30 mm počas obdobia 2019–2024. Zvýšená intenzita poklesu môže súvisieť s vyššími úhrnmi zrážok a následnou aktivizáciou zosuvných procesov. Nie je však možné vylúčiť ani vplyv tektonickej aktivity, ktorá môže podporovať vznik svahových deformácií. Výsledky potvrdzujú, že v skúmanom území prebiehajú aktívne svahové procesy a radarová interferometria predstavuje vhodný nástroj na ich monitorovanie.

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).

Interferometrická analýza bola v skúmanom území možná iba v zastavaných oblastiach, kde sa nachádzajú stabilné body vhodné na radarové merania. Analýza bola vykonaná za obdobie rokov 2019–2023 a hodnotila priemerné tempo zdvíhania a poklesu vybraných bodov, ako aj ich celkové deformácie. Najvýraznejšie zmeny boli zaznamenané vo východnej časti mesta Humenné, kde sa pozdĺž cesty smerujúcej na juh striedajú zóny poklesu a zdvíhania terénu. Väčšina zaznamenaných deformácií neprekročila hodnotu 5 mm/rok. Podobné deformácie boli zistené aj juhovýchodne od mesta Humenné, pričom tu prevládajú oblasti s poklesom povrchu. Miestami bolo zaznamenané zdvíhanie terénu do 2 mm/rok a pokles do 5 mm/rok. Deformácie sa nachádzajú najmä na okrajoch zastavaných území, kde môžu súvisieť so svahovými deformáciami alebo s antropogénnou činnosťou. Analýza časového vývoja ukázala, že pokles povrchu sa výraznejšie zosilnil po roku 2021, zatiaľ čo zdvíhanie prebiehalo rovnomernejšie. Maximálne zdvíhanie dosiahlo približne 14 mm a maximálny pokles až 30 mm počas obdobia 2019–2024. Zvýšená intenzita poklesu môže súvisieť s vyššími úhrnmi zrážok a následnou aktivizáciou zosuvných procesov. Nie je však možné vylúčiť ani vplyv tektonickej aktivity, ktorá môže podporovať vznik svahových deformácií. Výsledky potvrdzujú, že v skúmanom území prebiehajú aktívne svahové procesy a radarová interferometria predstavuje vhodný nástroj na ich monitorovanie.

PREZES ZARZĄDU
Oddział Górnośląski Polskiego
Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
Katowice, 31.07.2026
Dr hab. Jerzy Cabała
dr hab. Jerzy Cabała