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

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 Sabinov),
- 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 a najmodernejších metód diaľkového prieskumu Zeme využívaných na monitorovanie a analýzu 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 získaných v rôznych časových obdobiach je možné identifikovať aj veľmi malé zmeny polohy zemského povrchu. Vďaka satelitným misiám, akou je napríklad program Sentinel-1 realizovaný Európskou vesmírnou agentúrou (ESA), je možné zabezpečiť pravidelné, systematické a dlhodobé sledovanie deformácií terénu na rozsiahlych územiach bez potreby nepretržitej prítomnosti meracích tímov v teréne.
Interferogramy vytvorené spracovaním radarových údajov umožňujú detegovať vertikálne aj horizontálne pohyby zemského povrchu s mimoriadne vysokou presnosťou, ktorá často dosahuje úroveň niekoľkých milimetrov. Pri výskume zosuvných procesov poskytuje technológia InSAR možnosť zachytiť nielen náhle a rýchle pohyby svahov, ale aj pomalé a dlhodobé deformácie, ktoré sa vyvíjajú počas rokov alebo desaťročí a ktoré by bolo pomocou klasických geodetických metód náročné identifikovať. Mimoriadny význam majú viacčasové interferometrické analýzy, ktoré umožňujú sledovať vývoj deformácií v čase a zvyšujú presnosť aj spoľahlivosť interpretácie získaných výsledkov. Jednou z najefektívnejších techník je metóda PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR), ktorá využíva stabilné objekty schopné dlhodobo odrážať radarový signál. Ide najmä o budovy, skalné útvary, mosty, komunikácie alebo iné prvky infraštruktúry. Analýza takýchto trvalých rozptylovačov umožňuje veľmi presné určenie rýchlosti a smeru deformácií svahov v rámci dlhých časových radov. Výsledkom sú podrobné informácie o vývoji nestabilných území a identifikácia oblastí, kde môže v budúcnosti dôjsť k aktivizácii zosuvných procesov.
Radarová interferometria nachádza široké uplatnenie predovšetkým v horských a ťažko prístupných regiónoch, kde je realizácia tradičných geodetických meraní technicky komplikovaná, časovo náročná alebo ekonomicky nevýhodná. Veľkou výhodou tejto technológie je schopnosť monitorovať rozsiahle územia bez potreby inštalácie meracích zariadení priamo v teréne. Vďaka tomu je možné sledovať aj odľahlé oblasti s

obmedzenou dostupnosťou a získavať údaje s vysokou časovou frekvenciou. Určité obmedzenia však vznikajú v oblastiach s hustou vegetáciou alebo súvislým lesným pokryvom. V takýchto podmienkach môže dochádzať k dekorelácii radarového signálu, ktorá znižuje kvalitu a presnosť interferometrických meraní. Na prekonanie týchto problémov sa využívajú pokročilé metódy spracovania dát, medzi ktoré patrí okrem PS-InSAR aj technika SBAS (Small Baseline Subset). Táto metóda je založená na analýze radarových snímok s malými časovými a priestorovými rozdielmi, čím umožňuje spoľahlivejšie vyhodnocovať deformácie aj v menej priaznivých podmienkach.

Interferometrické údaje sa často kombinujú s geologickými, geomorfologickými, hydrologickými a geotechnickými informáciami. Takýto integrovaný prístup umožňuje komplexnejšie pochopiť mechanizmy vzniku a vývoja zosuvov pôdy, identifikovať hlavné faktory ovplyvňujúce stabilitu svahov a lepšie hodnotiť potenciálne riziká. Významnú úlohu zohráva radarová interferometria aj pri skúmaní vplyvu intenzívnych zrážok, dlhodobých zmien klímy či extrémnych meteorologických javov na aktivitu svahových pohybov.

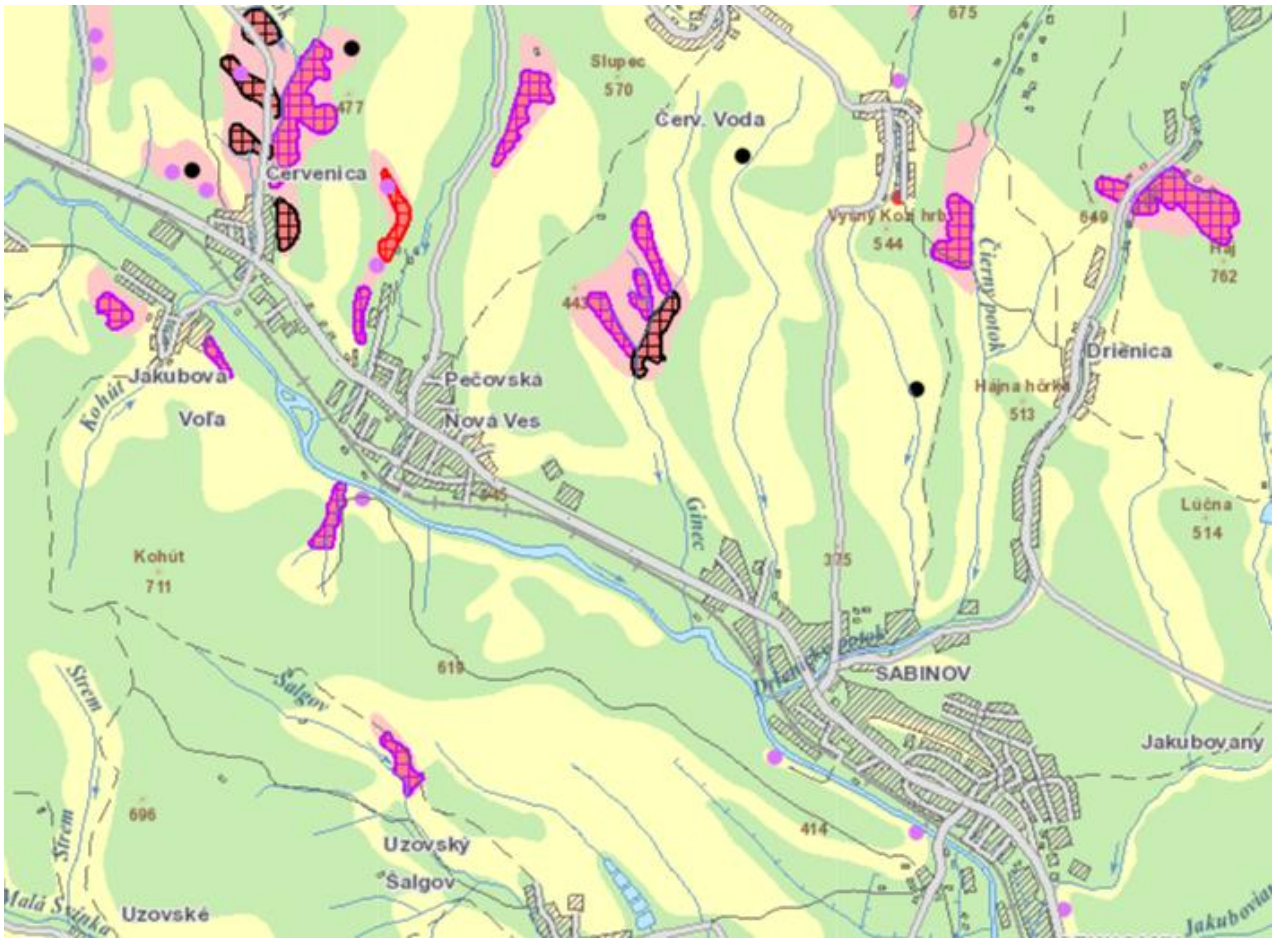
V spojení s meteorologickými a hydrologickými údajmi môže byť InSAR využívaný ako súčasť systémov včasného varovania pred zosuvnými procesmi. Včasná identifikácia deformácií povrchu umožňuje efektívnejšie riadenie rizík, prijímanie preventívnych opatrení a zvyšovanie bezpečnosti obyvateľstva. Tieto informácie sú mimoriadne cenné najmä v oblastiach s vysokou hustotou osídlenia alebo v regiónoch pravidelne postihovaných svahovými deformáciami. Radarová interferometria sa zároveň využíva pri hodnotení stability infraštruktúry nachádzajúcej sa v rizikových oblastiach. Monitorované môžu byť cesty, železničné trate, mostné objekty, tunely, priemyselné areály alebo obytné zóny. Osobitný význam má v urbanizovaných regiónoch a pozdĺž významných dopravných koridorov, kde môžu zosuvy spôsobiť rozsiahle hospodárske škody, prerušenie dopravy a ohrozenie bezpečnosti obyvateľov. Ďalšou významnou výhodou tejto technológie je znižovanie nákladov na výskum a monitoring. V porovnaní s rozsiahlymi terénnymi prácami umožňuje získavať veľké množstvo údajov na regionálnej úrovni efektívnejším spôsobom, čím podporuje lepšie plánovanie monitorovacích aktivít a optimalizáciu využívania finančných zdrojov. 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. Jej význam neustále rastie s rozvojom nových satelitných technológií a zvyšovaním dostupnosti kvalitných radarových údajov, ktoré umožňujú ešte presnejšie sledovanie dynamiky zemského povrchu.

Poloha a hlavné charakteristiky skúmanej oblasti

Realizovaný výskumný test zahŕňa územie nachádzajúce sa na sever od mesta Sabinov (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 deformácie povrchu s presnosťou na úrovni niekoľkých milimetrov, čím predstavuje cenný nástroj pri monitorovaní svahových procesov a hodnotení stability územia. S cieľom identifikovať zmeny morfológie terénu v rámci skúmanej oblasti bola realizovaná priestorová analýza založená na údajoch radarovej interferometrie. Pre územie nachádzajúce sa na sever od mesta Sabinov boli deformácie zemského povrchu vizualizované prostredníctvom siete pevných bodov, v ktorých boli v rokoch 2019–2023 vykonané interferometrické merania. Takýto prístup umožnil získať prehľad o priestorovom rozložení deformácií a identifikovať lokality s potenciálne zvýšenou aktivitou svahových pohybov.Súčasťou štúdie bola aj podrobnejšia analýza zmien polohy troch vybraných bodov, ktoré boli vyhodnotené vo vyššom časovom a priestorovom rozlíšení. Výber týchto bodov bol založený na predbežných výsledkoch interferometrických meraní, pričom boli zvolené lokality vykazujúce najvýraznejšie prejavy deformácií súvisiacich so zosuvnými procesmi. Podrobné sledovanie ich vývoja umožnilo lepšie pochopiť dynamiku zmien povrchu a charakter deformácií prebiehajúcich v skúmanom území. Analýza bola vykonaná 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 zóny, v

ktorých môže dochádzať k zvýšenej aktivite svahových procesov. Výsledky analýzy poskytujú dôležité informácie o priestorovom rozsahu deformácií a môžu slúžiť ako podklad pre ďalší výskum, hodnotenie zosuvného rizika a plánovanie monitorovacích opatrení v skúmanom regióne.



Obrázok 1. Poloha analyzovaných zosuvov pôdy.

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

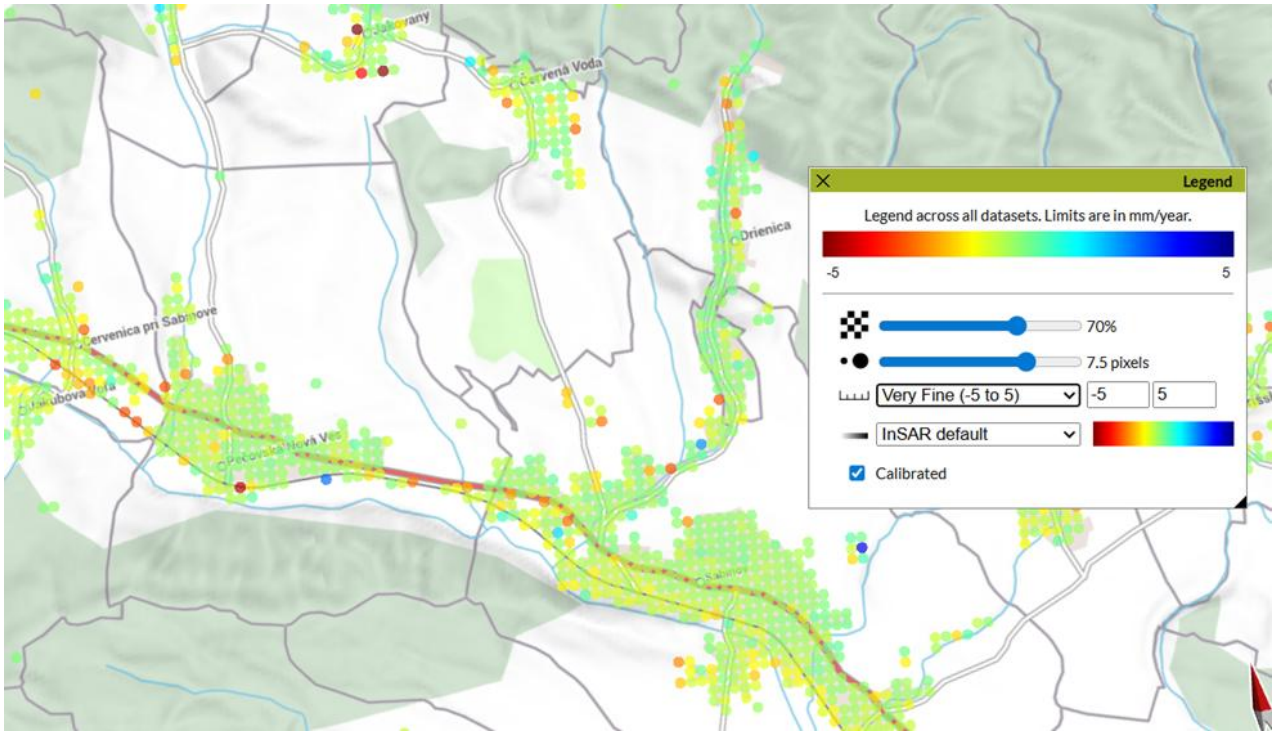
3. Výsledky výskumu v číselnej podobe spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a výkresov.

Interferometrická analýza bola vykonaná pre územia nachádzajúce sa na sever od mesta Sabinov. Táto oblasť sa vyznačuje výskytom početných svahových deformácií, pričom zóny náchylné na zosúvanie sa najčastejšie nachádzajú pozdĺž riečnych dolín a menších vodných tokov. Prítomnosť povrchových vôd podporuje eróziu podložia a destabilizáciu svahov, čo môže viesť k rozvoju 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 v skúmanom území prebiehajú súčasné deformácie zemského povrchu, ktoré môžu súvisieť s pomalými svahovými pohybmi.

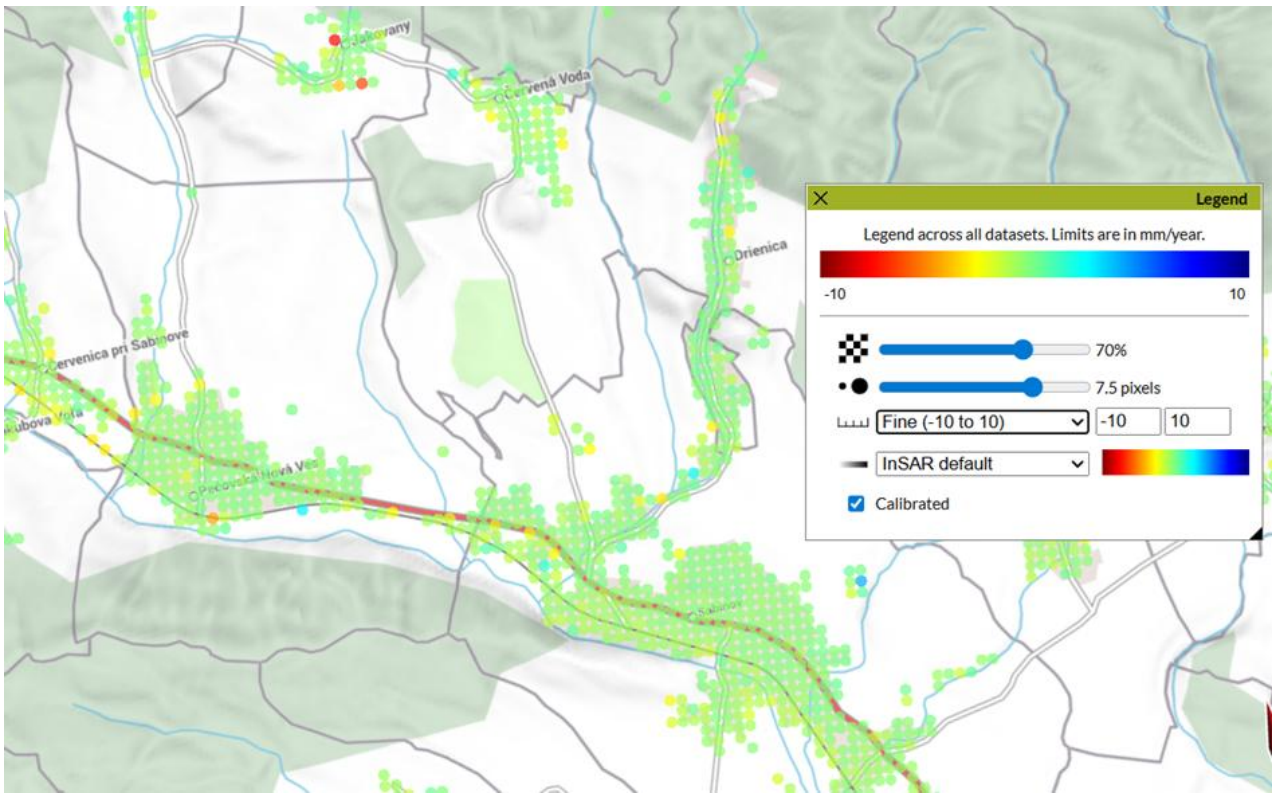
Výskum zmien polohy bodov na povrchu terénu bol realizovaný v dvoch hlavných zónach nachádzajúcich sa severne od mesta Sabinov. Prvá skúmaná oblasť sa nachádza v okolí obce Drienica, ležiacej severovýchodne od Sabinova. V tejto zóne boli zaznamenané pomerne výrazné pohyby pôdy, ktoré poukazujú na aktivitu svahových procesov. Časť analyzovaných bodov vykazovala zdvíhanie terénu na úrovni približne 6–7 mm/rok, zatiaľ čo iné body zaznamenali pokles s rýchlosťou približne 5–6 mm/rok (obr. 2,3,4). Mimoriadne významné je, že zóny zdvíhania a poklesu sa nachádzajú v bezprostrednej blízkosti, čo je charakteristický znak aktívnych zosuvných území. Takéto rozloženie deformácií naznačuje premiestňovanie zvetraného materiálu v rámci svahov. Pravdepodobnou príčinou týchto zmien je bočná erózia potoka, ktorý podrezáva pätu svahu, spôsobuje stratu jeho stability a vedie k vzniku menších plytkých zosuvov. Druhou analyzovanou oblasťou bola zóna nachádzajúca sa medzi obcami Pečovská Nová Ves a Drienica. Aj v tomto prípade sa vyskytujú územia náchylné na zosúvanie, ktoré súvisia s prítomnosťou vodných tokov a lokálnych eróznych dolín. Vzhľadom na obmedzený počet bodov dostupných na interferometrickú analýzu však boli možnosti interpretácie menšie než v prvej skúmanej oblasti. Väčšina analyzovaných bodov vykazovala pokles terénu v rozsahu približne 2–4 mm/rok (obr. 5,6,7,8). Neboli však identifikované body s výrazným zdvíhaním povrchu. Z tohto dôvodu nemožno jednoznačne potvrdiť zosuvnú aktivitu v tejto časti územia, hoci pozorované deformácie môžu naznačovať pomalé procesy súvisiace s postupnou prestavbou svahov.

Analýza zmien polohy vybraných meracích bodov v okolí obce Drienica ukázala, že v období rokov 2019–2024 sa niektoré body znížili približne o 14 mm. Identifikované boli aj body, pri ktorých celkový pokles dosiahol približne 8 mm. Tieto hodnoty poukazujú na postupný, ale dlhodobo pretrvávajúci charakter deformácií prebiehajúcich v rámci svahov. V druhej skúmanej oblasti, nachádzajúcej sa medzi obcami Pečovská Nová Ves a Drienica, dosiahlo maximálne zaznamenané zníženie terénu približne 20 mm počas päťročného obdobia pozorovaní (obr. 5,6,7,8). To naznačuje, že deformačné procesy prebiehajú aj v tejto časti regiónu, hoci ich priestorový obraz je menej zreteľný v dôsledku obmedzeného počtu meracích bodov. Všetky analyzované body vykazovali výraznú sezónnu variabilitu. Znamená to, že ich poloha sa menila v závislosti od ročného obdobia, čo je typické pre územia pokryté vegetáciou. Tento jav môže súvisieť so

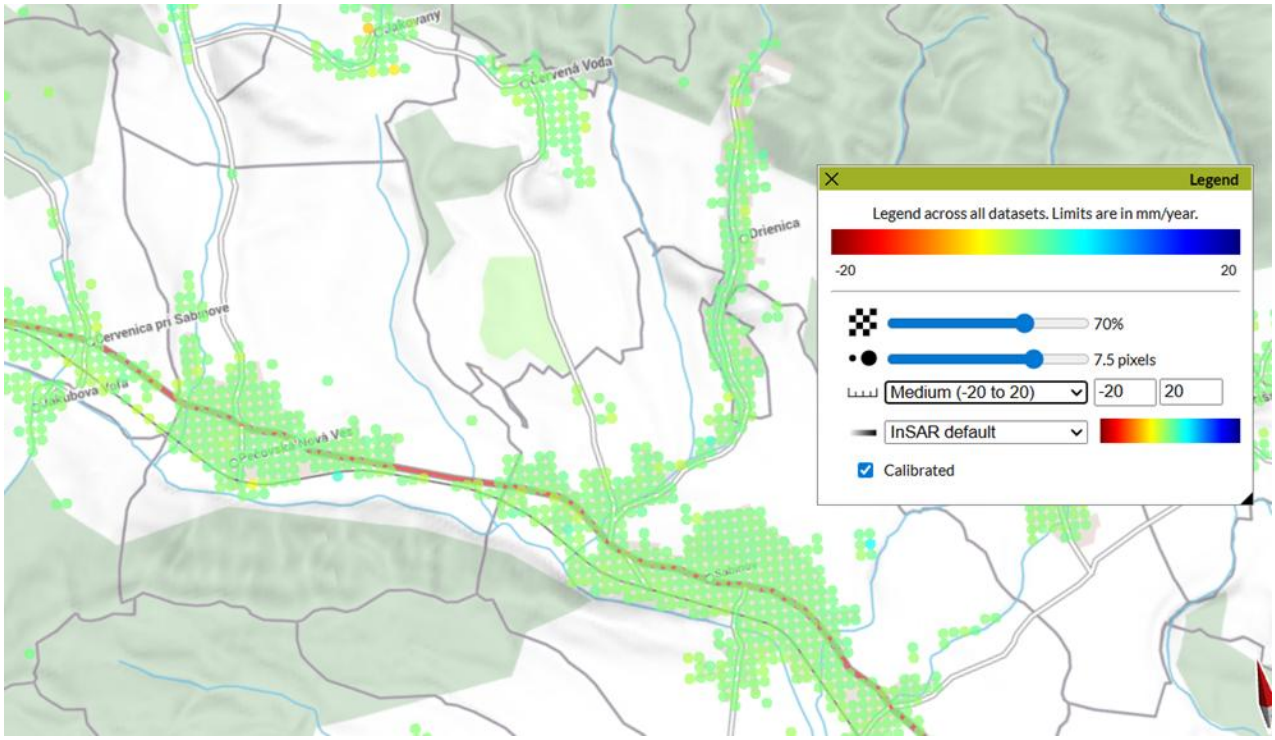
zmenami vlhkosti pôdy, ako aj s vplyvom vegetačného pokryvu na kvalitu radarového signálu. Napriek týmto obmedzeniam výsledky radarovej interferometrie naznačujú, že územie severne od Sabinova je geomorfologicky aktívne a pozorované deformácie môžu predstavovať prejavy súčasných svahových procesov rozvíjajúcich sa pozdĺž miestnych riečnych dolín a vodných tokov.



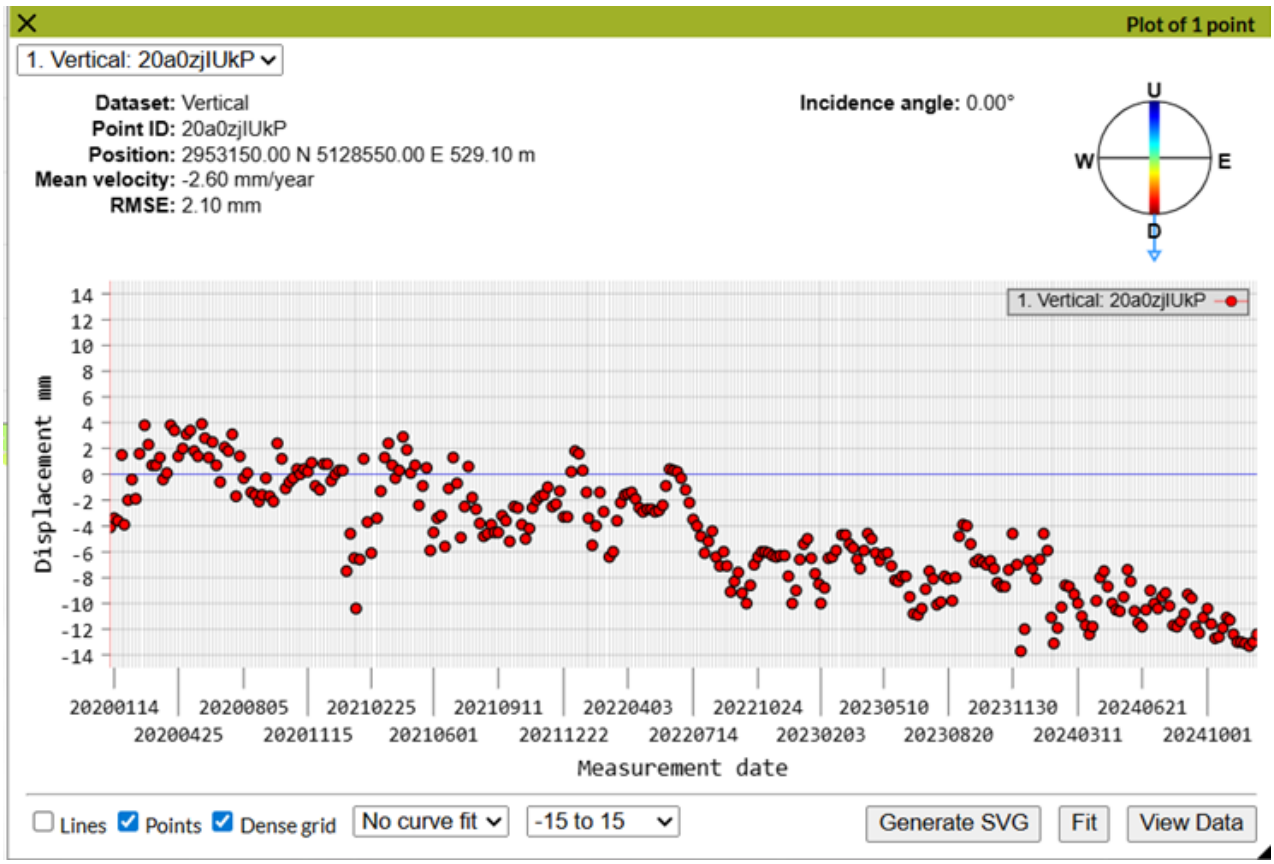
Obrázok 2. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 5 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



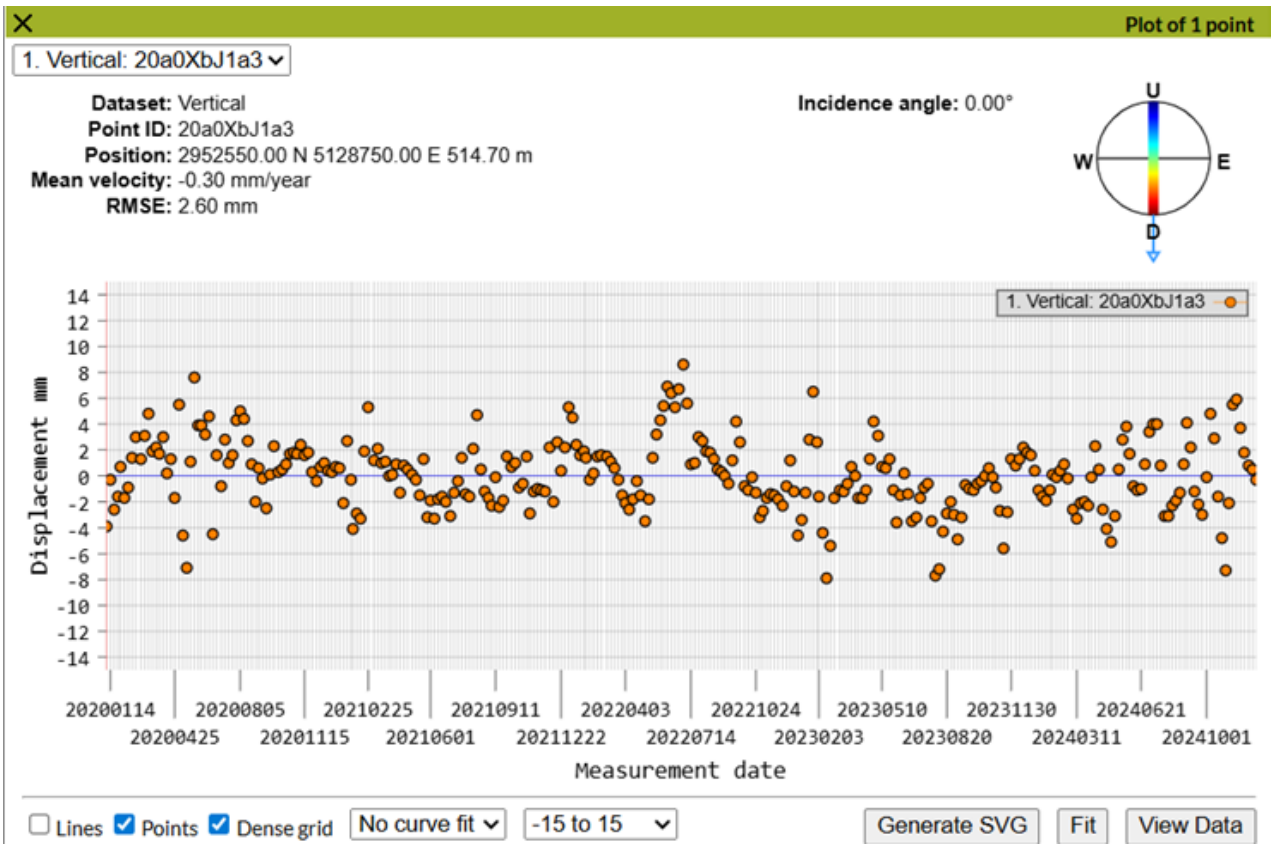
Obrázok 3. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 10 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



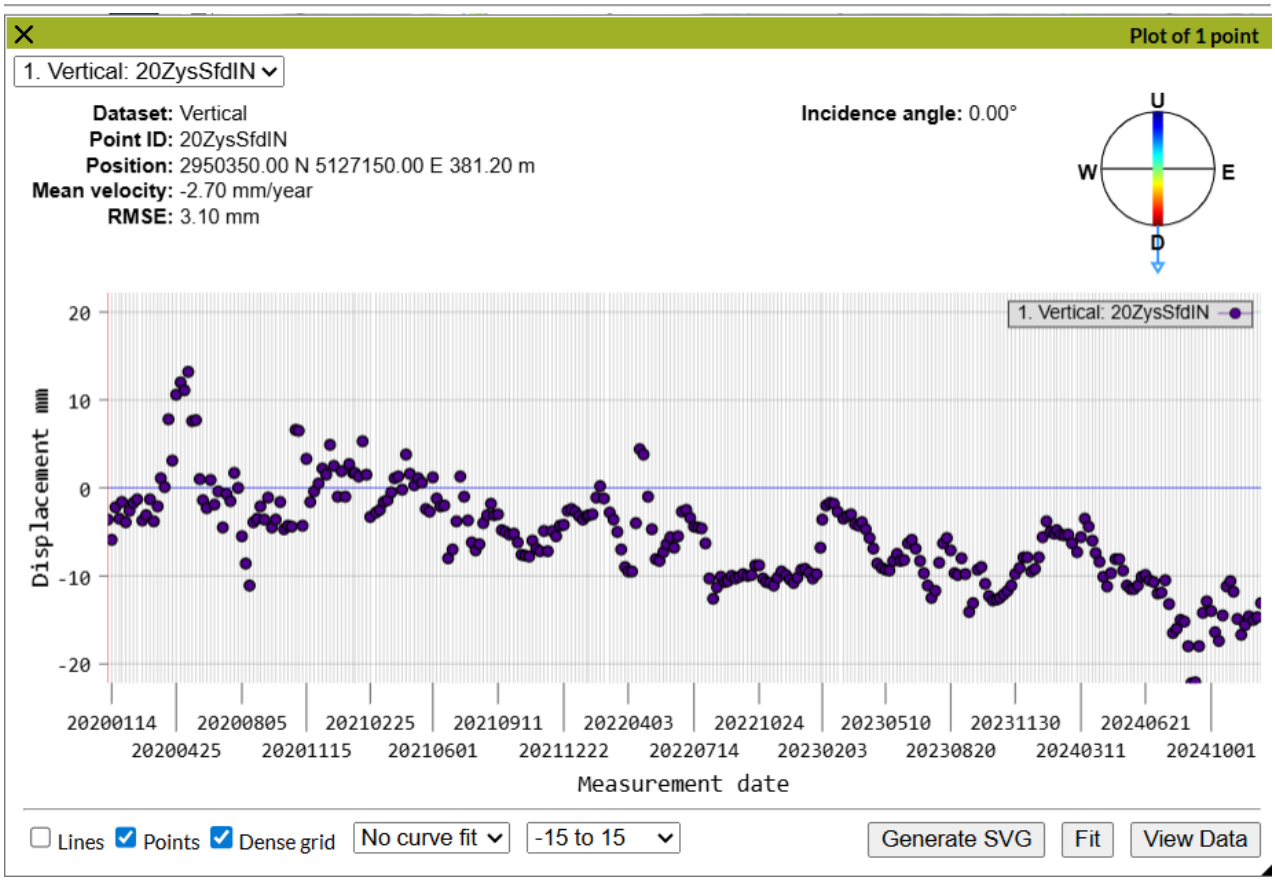
Obrázok 4. Posuny bodov v študovanej oblasti do výšky 20 mm identifikované pomocou radarovej interferometrie.



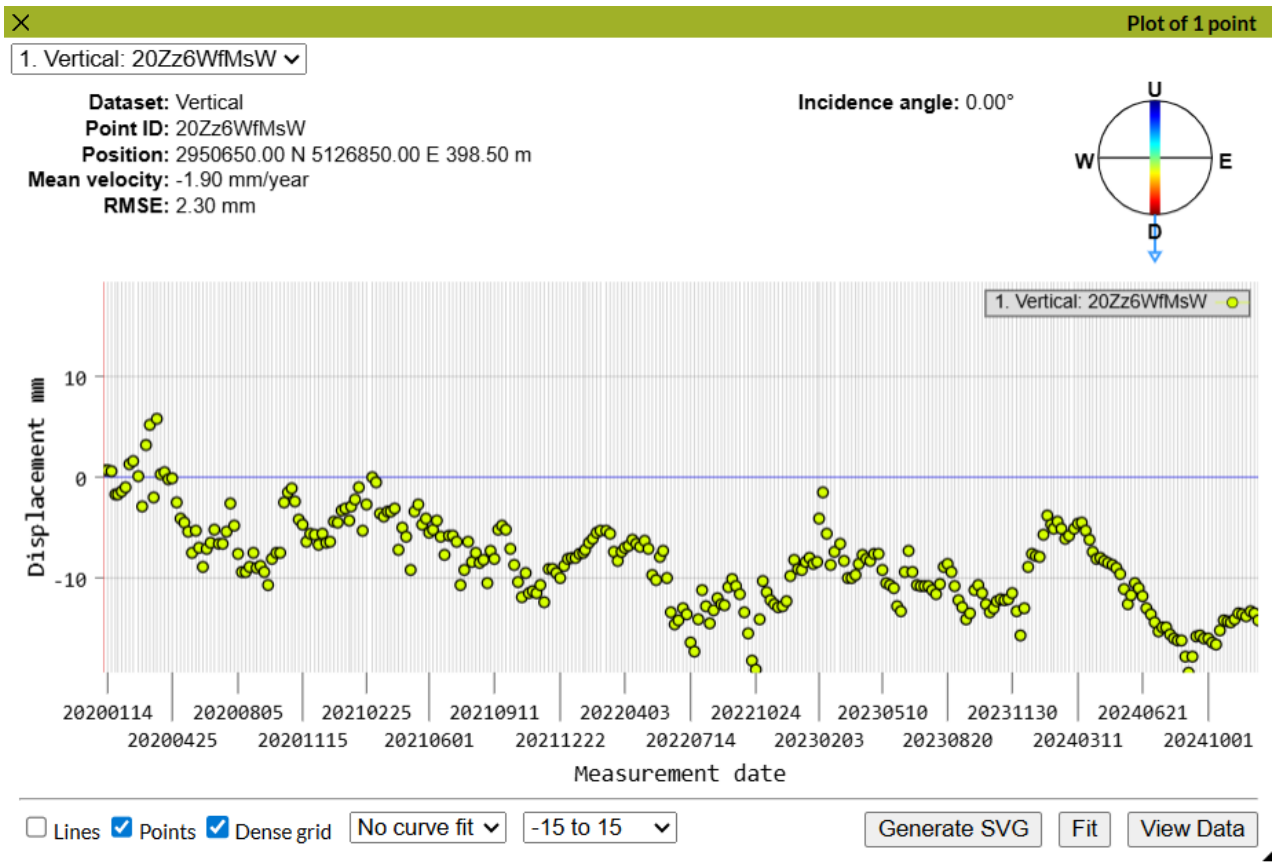
Obrázok 5. Pokles zaznamenaný pomocou radarovej interferometrie v bode 1.



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 územia nachádzajúce sa na sever od mesta Sabinov, kde sa vyskytujú početné svahové deformácie. Oblasti náchylné na zosúvanie sú viazané najmä na riečne doliny a menšie vodné toky. Výskum realizovaný v období rokov 2019–2023 potvrdil aktivitu svahových procesov prostredníctvom zmien polohy analyzovaných bodov. Prvá skúmaná oblasť sa nachádzala v okolí obce Drienica, kde bolo zaznamenané zdvíhanie terénu rýchlosťou približne 6–7 mm/rok, ako aj jeho pokles v rozsahu 5–6 mm/rok. Susedstvo zón zdvíhania a poklesu poukazuje na zosuvnú aktivitu a premiestňovanie zvetraného materiálu na svahoch. Tieto procesy pravdepodobne súvisia s eróziou potoka podrezávajúceho pätu svahu, čo vedie k lokálnej strate stability svahu. Druhá skúmaná oblasť, nachádzajúca sa medzi obcami Pečovská Nová Ves a Drienica, vykazovala predovšetkým pokles terénu s rýchlosťou približne 2–4 mm/rok. V tejto časti neboli zistené výrazné prejavy zdvíhania povrchu, preto nebolo možné jednoznačne potvrdiť aktívne zosuvné procesy. V období rokov 2019–2024 dosiahol maximálny pokles terénu približne 14 mm v okolí Drienice a približne 20 mm medzi Pečovskou Novou Vsou a Drienicou. Všetky analyzované body vykazovali sezónnu variabilitu a získané výsledky naznačujú súčasnú aktivitu svahových procesov rozvíjajúcich sa pozdĺž miestnych riečnych dolín a vodných tokov.

PREZES ZARZĄDU
Katowice, 25.01.2026
Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
dr hab. Jerzy Cabała