Správa z výskumného testu zosuvného ohrozenia s využitím radarovej interferometrie pre Dolný Kubín

Odborný dohľad: Dr. hab. Małgorzata Wistuba

1. *Plán výskumu zahŕňajúci priebeh výskumných prác s rozdelením na terénne a laboratórne práce a uvedením jednotlivých krokov výskumného postupu*

Terénne práce a priestorové overovanie

• Predbežná geomorfologická interpretácia reliéfu a identifikácia evidovaných svahových deformácií v skúmanom území.

• Vymedzenie úsekov svahov, pre ktoré sú dostupné meracie body InSAR a ktoré vykazujú opačné znamienka vertikálnych posunov.

• Naplánovanie terénnej kontroly trhlín, terénnych stupňov, deformácií ciest a prípadných antropogénnych zmien; vykonanie takejto kontroly nebolo v poskytnutých podkladoch zdokumentované.

Analytické práce

• Porovnanie zobrazenia bodových rýchlostí v rozsahoch od −5 do +5, od −10 do +10 a od −40 do +40 mm/rok.

• Interpretácia dostupných časových radov vertikálnych posunov vybraných bodov a ich súvislosti s evidovanými deformáciami.

• Posúdenie smeru a priestorovej variability deformácií a formulovanie predbežných záverov o zosuvnom ohrození.

• Identifikácia obmedzení metódy a odporúčaní pre terénne a geodetické overenie.

1. Opis priebehu výskumných prác so zohľadnením teoretických základov a použitej metódy

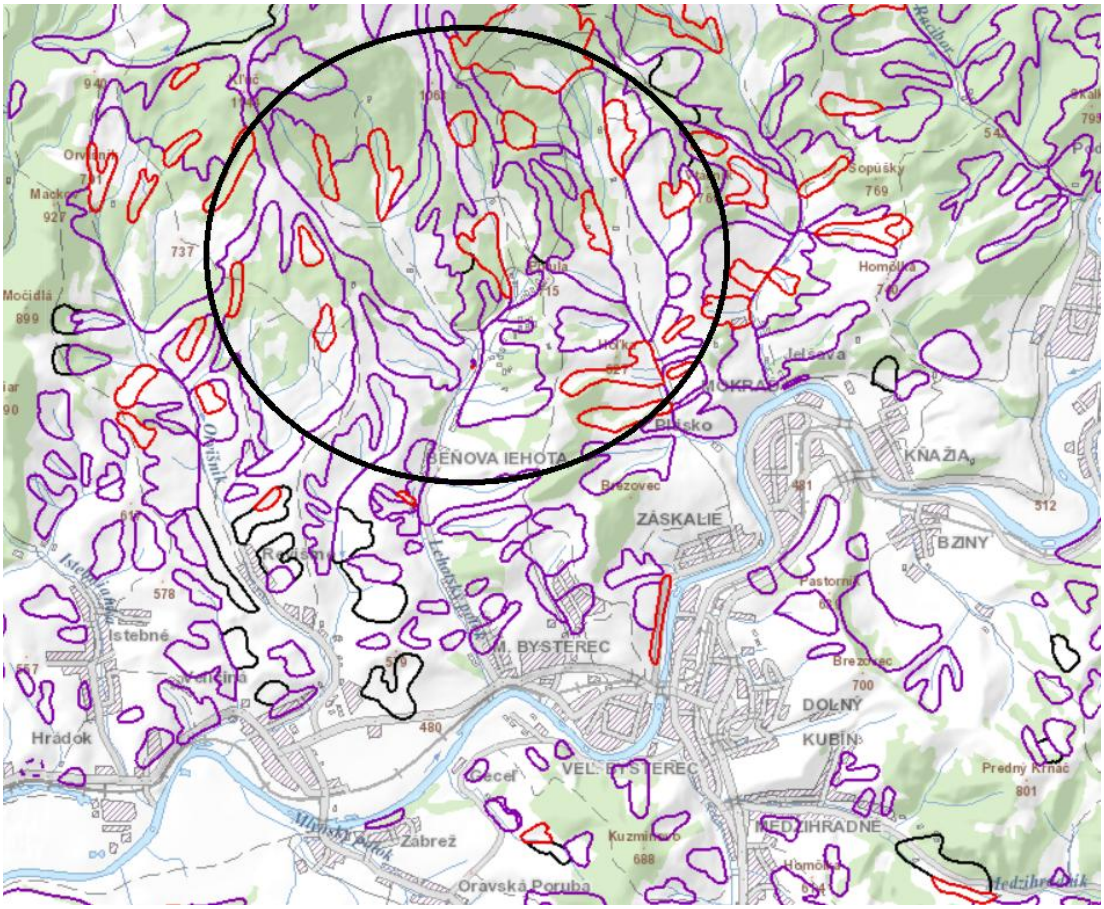
Teoretické základy (InSAR)

Satelitná radarová interferometria (InSAR) umožňuje zisťovať zmeny polohy zemského povrchu porovnávaním fázy radarového signálu zaznamenaného počas opakovaných preletov satelitov. Viaccasové analýzy umožňujú určiť priemerné rýchlosti a časové rady posunov vybraných bodov so stabilnými odrazovými vlastnosťami. Táto technika je vhodná na monitorovanie pomalých svahových pohybov, poklesov a zdvihov zemského povrchu, najmä pri kombinovaní výsledkov s geomorfologickým mapovaním a geologickými údajmi. Poskytnuté podklady boli označené ako „Vertical“ a uvádzajú priemerné vertikálne rýchlosti v mm/rok. Záporné hodnoty predstavujú vertikálnu zložku smerujúcu nadol a kladné hodnoty zložku smerujúcu nahor v použitom referenčnom systéme. Bez doplňujúcich údajov nemožno tieto hodnoty priamo stotožňovať s rýchlosťou zosuvného pohybu po svahu. Pri interpretácii treba zohľadniť kvalitu časových radov, referenčný bod, prípadnú sezónnosť, hustotu meracích bodov a geometrické obmedzenia satelitných pozorovaní.

Poloha a hlavné charakteristiky skúmaného územia

Skúmané územie sa nachádza severne od Dolného Kubína na severnom Slovensku. Na mape evidovaných svahových deformácií je čiernym kruhom vyznačené územie medzi okrajom doliny Oravy a svahmi v okolí obce Beňova Lehota s početnými polygónmi svahových deformácií. Priestorové rozloženie ich hraníc naznačuje dlhodobú nestabilitu svahov, samotná evidencia však nedokazuje súčasnú aktivitu každého z vyznačených objektov (obrázok 1).

Územie sa vyznačuje členitým reliéfom svahov rozčlenených menšími dolinami a sieťou vodných tokov a ciest. Meracie body InSAR sa sústreďujú predovšetkým v koridoroch s priaznivými vlastnosťami radarového odrazu; v zalesnených oblastiach je ich pokrytie obmedzené. To treba zohľadniť pri vyvodzovaní záverov o rozsahu aktívnych svahových pohybov.



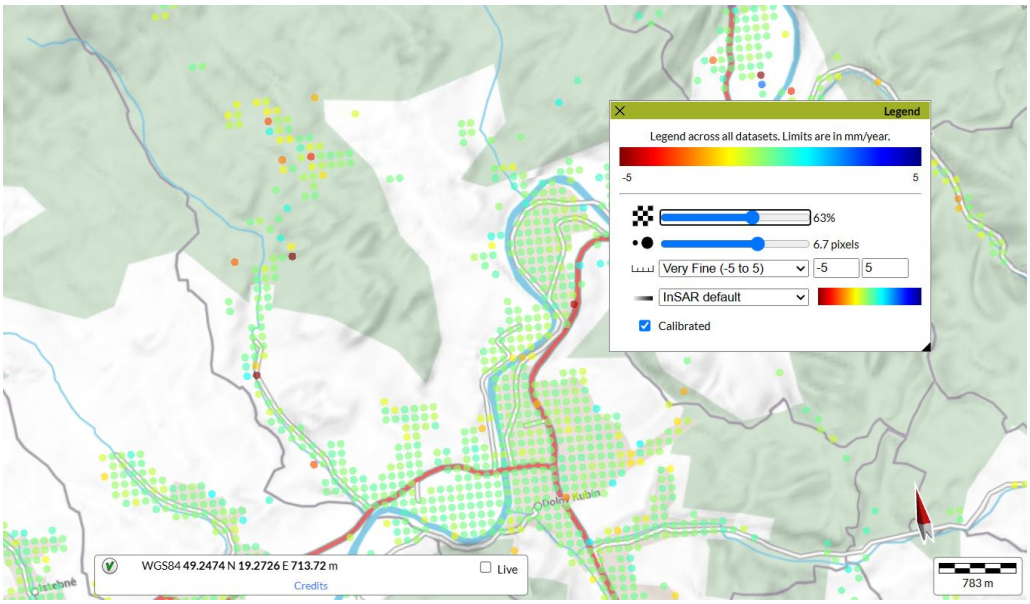
Obr. 1. Evidované svahové deformácie severne od Dolného Kubína; skúmané územie je vyznačené čiernym kruhom.

2. *Opis priebehu výskumných prác so zohľadnením teoretických východísk, opisu metódy, prípadného odberu vzoriek v teréne a jednotlivých krokov laboratórnych prác.*

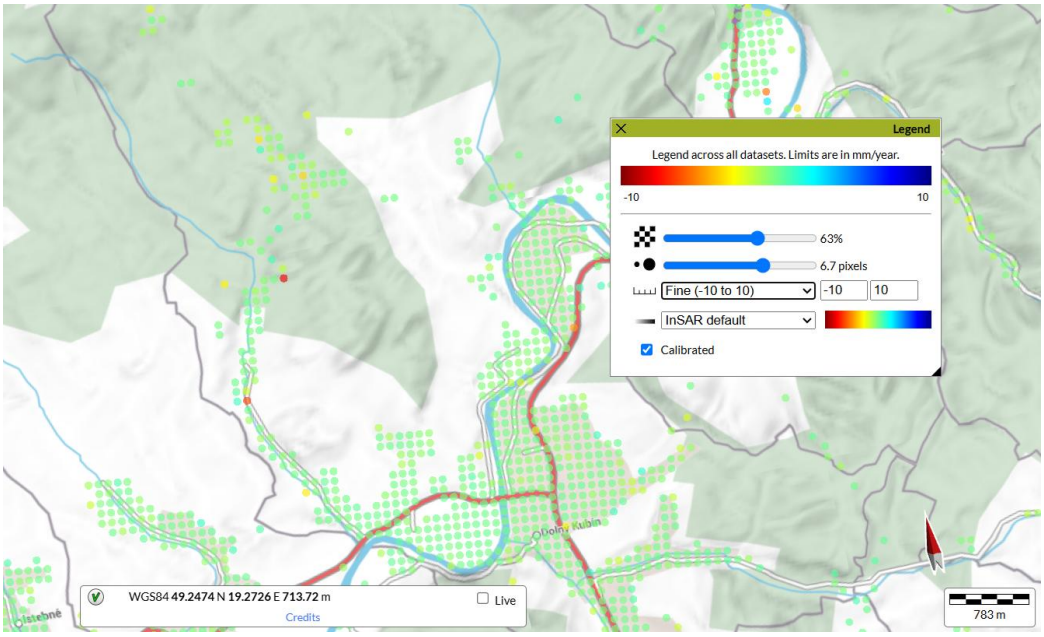
Priestorová interpretácia vertikálnych rýchlostí posunov

V úzkom rozsahu od −5 do +5 mm/rok sú viditeľné menšie priestorové kontrasty medzi bodmi so zápornými a kladnými vertikálnymi rýchlosťami. Väčšina zobrazených bodov má zelenú alebo žltozelenú farbu, miestami sa vyskytujú oranžové a červené body, ako aj bodové zóny s tyrkysovými a modrými odtieňmi. Znamená to, že v skúmanej zóne dochádza tak k poklesom, ako aj k zdvihom zemského povrchu, pričom prevládajú lokálne klesajúce oblasti (obrázok 2).

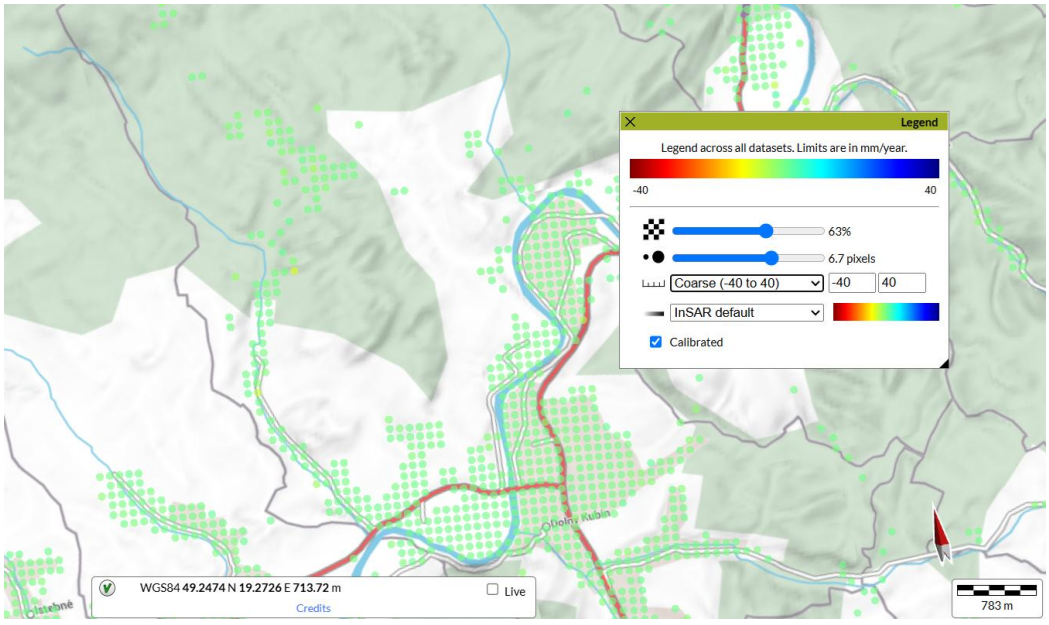
Pri rozšírení rozsahu na −10 až +10 mm/rok sa rozdiely na mape vizuálne zmenšujú; v intervale −40 až +40 mm/rok sa väčšina bodov nachádza blízko stredu farebnej škály. Ide o rovnaké priestorové údaje zobrazené s rôznym nastavením legendy, nie o tri nezávislé merania. To znamená, že priemerné ročné zmeny zemského povrchu v skúmanej oblasti sú menšie než 40 mm a väčšina z nich nepresahuje 10 mm (obrázky 3 a 4).



Obr. 2. Vertikálne rýchlosti posunov InSAR zobrazené v rozsahu od −5 do +5 mm/rok



Obr. 3. Obr. 2. Vertikálne rýchlosti posunov InSAR zobrazené v rozsahu od −10 do +10 mm/rok



Obr. 4. Obr. 2. Vertikálne rýchlosti posunov InSAR zobrazené v rozsahu od −40 do +40 mm/rok

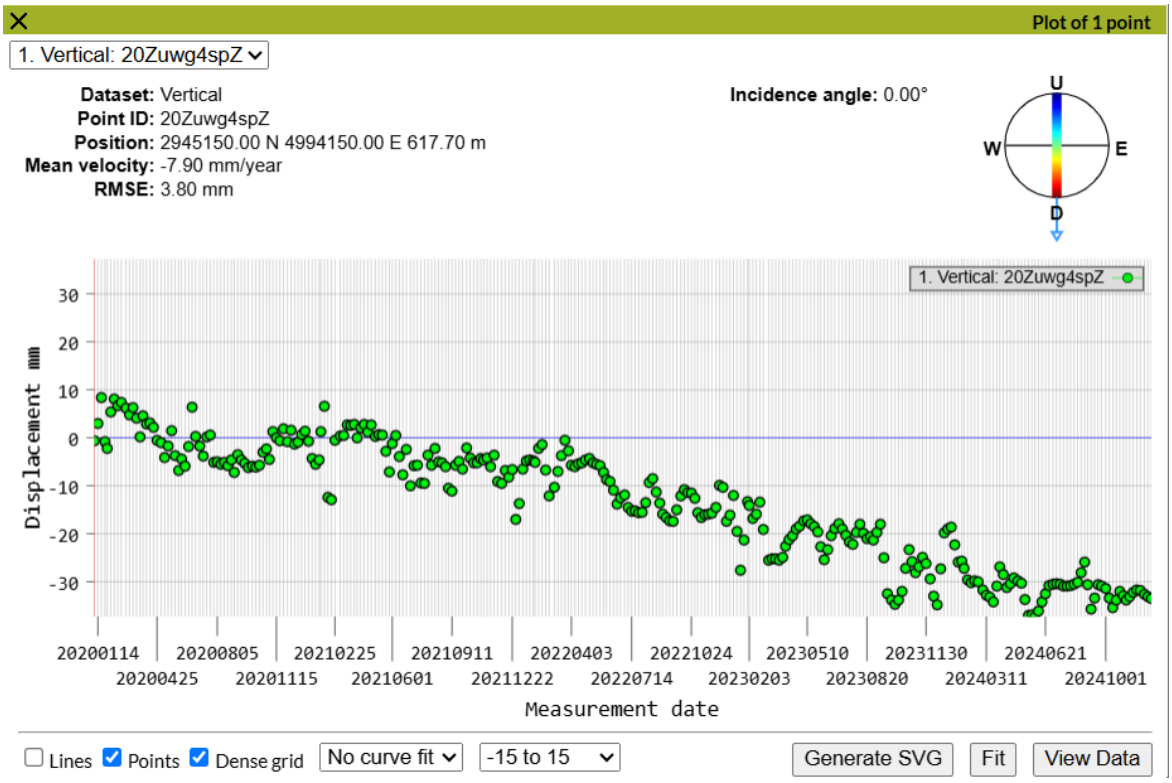
Analýza bodových časových radov

Priložené grafy časových radov približne pokrývajú obdobie od januára 2020 do konca roka 2024 (tabuľka 1). Zaznamenané hodnoty a priemerné rýchlosti sa vzťahujú na vertikálnu zložku posunov InSAR. Grafy vykazujú rozptyl jednotlivých pozorovaní a krátkodobé výkyvy, preto treba celkový trend hodnotiť vzhľadom na priemernú rýchlosť a RMSE.

Tabuľka 1. Zmeny zemského povrchu v skúmaných bodoch v rokoch 2020 až 2024.

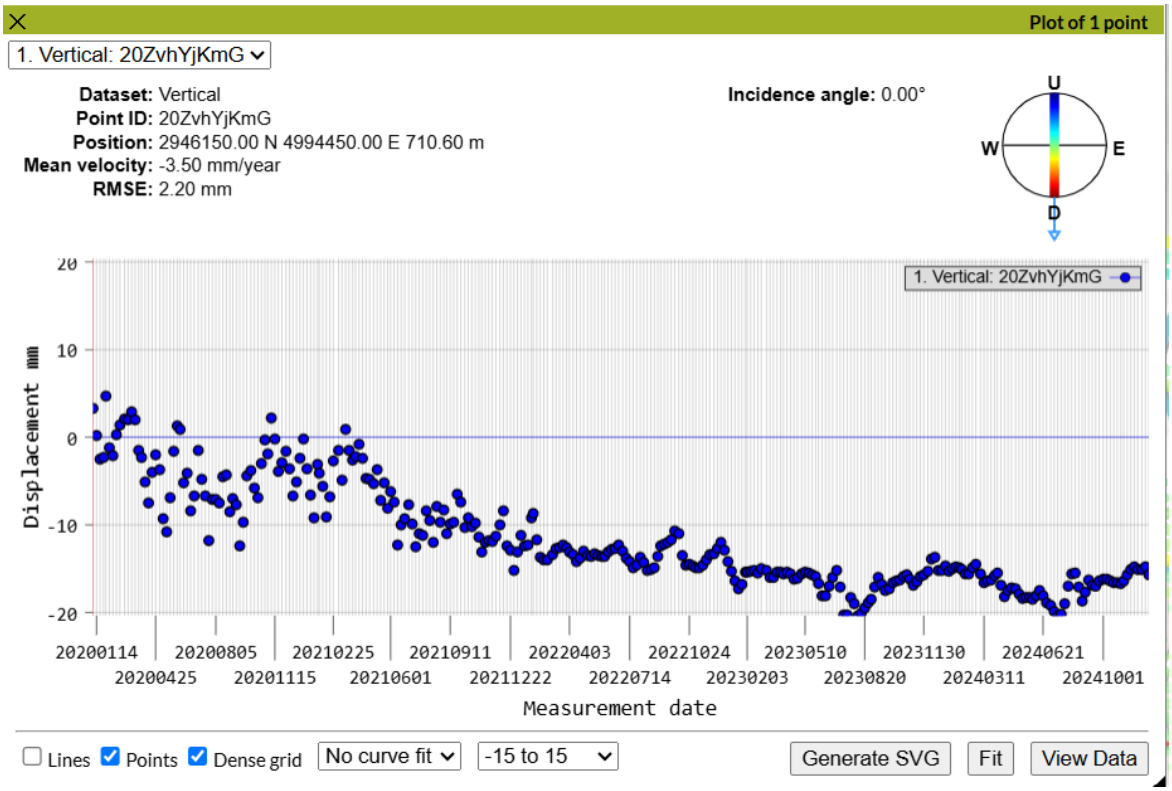
Identifikátor bodu	Vertikálna rýchlosť	RMSE	Interpretácia
20Zuwg4spZ	−7,90 mm/rok	3,80 mm	výrazný trend poklesu
20ZvhYjKmG	−3,50 mm/rok	2,20 mm	slabší trend poklesu
20Zv63PNDg	+0,90 mm/rok	3,20 mm	slabý trend zdvihu

Bod 20Zuwg4spZ (súradnice v zobrazenom lokálnom/projektovanom systéme: 2 945 150; 4 994 150; nadmorská výška 617,70 m) vykazuje priemernú rýchlosť −7,90 mm/rok. V jeho časovom rade prevláda trend poklesu, pričom ku koncu analyzovaného obdobia dosahuje približne −30 mm voči referenčnej úrovni grafu. Táto hodnota nepredstavuje celkový absolútny pokles od vzniku zosuvu (obrázok 5).



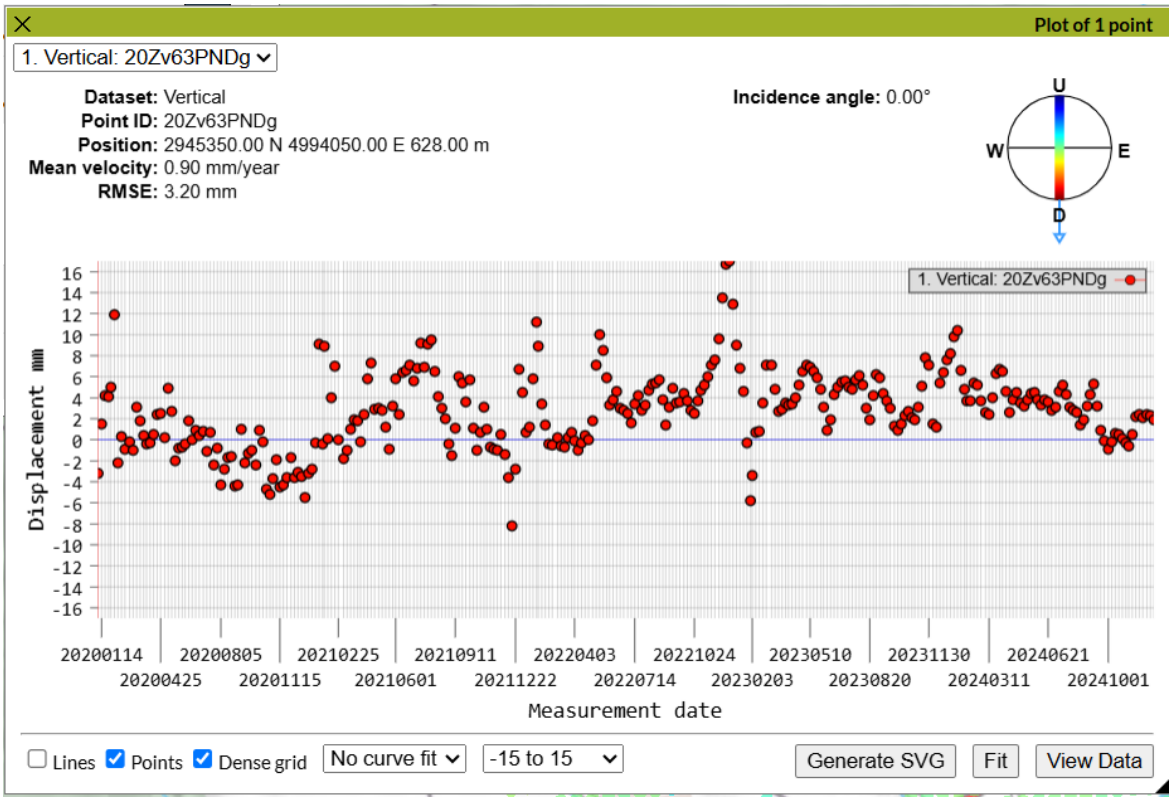
Obr. 5. Časový rad vertikálneho posunu bodu 20Zuwg4spZ; priemerná rýchlosť −7,90 mm/rok, RMSE 3,80 mm.

Bod 20ZvhYjKmG (2 946 150; 4 994 450; 710,60 m n. m.) vykazuje slabší, ale zreteľný záporný trend s priemernou rýchlosťou −3,50 mm/rok. Graf naznačuje približne 15–20 mm záporného posunu oproti počiatočnej úrovni, s lokálnymi výkyvmi a epizódami relatívnej stabilizácie. Porovnanie týchto dvoch bodov poukazuje na priestorovo nerovnomerné vertikálne deformácie (obrázok 6).



Obr. 6. Časový rad vertikálneho posunu bodu 20ZvhYjKmG; priemerná rýchlosť −3,50 mm/rok, RMSE 2,20 mm.

Bod 20Zv63PNDg (2 945 350; 4 994 050; 628,00 m n. m.) sa vyznačuje kladnou priemernou vertikálnou rýchlosťou +0,90 mm/rok a hodnotou RMSE 3,20 mm. Záznam obsahuje sezónne a krátkodobé oscilácie i ojedinelé výraznejšie odchýlky, dlhodobý trend je však slabý. Dva priložené obrázky označené ako body zdvihu dolnej a hornej časti zosuvu uvádzajú totožný identifikátor, súradnice aj časový priebeh; ide teda o jeden jedinečný časový rad, nie o dva nezávislé body (obrázok 7).



Obrázok 7. Časový rad bodu 20Zv63PNDg s priemernou rýchlosťou +0,90 mm/rok a RMSE 3,20 mm. Súbor označený ako horná časť obsahuje totožný graf.

3. *Výsledky výskumu vo forme výpočtov spolu s potrebnou dokumentáciou v podobe tabuliek, grafov a obrázkov*

Súčasný výskyt záporných a mierne kladných vertikálnych rýchlostí na rozsiahlejšom území s početnými evidovanými zosuvmi zodpovedá možnosti priestorovo diferencovaných deformácií svahov. Výraznejší pokles v jednom bode a slabší pokles vo vyššie položenom bode môžu odrážať rozdielne správanie jednotlivých častí zosuvov. Bez poznania geometrie šmykovej plochy, horizontálnej zložky posunov a nezávislého overenia však nemožno jednoznačne potvrdiť aktiváciu konkrétneho zosuvu.

Výsledky ukazujú, že skúmané svahy severne od Dolného Kubína vykazujú merateľné, priestorovo diferencované vertikálne deformácie. Vo vybraných bodoch dosahujú priemerné rýchlosti poklesu −7,90 a −3,50 mm/rok, zatiaľ čo ďalší bod vykazuje mierny kladný trend +0,90 mm/rok. Zmeny sa zaznamenávali približne v rokoch 2020–2024; zodpovedajú možnosti pretrvávania lokálnych deformácií povrchu. Vzhľadom na početné svahové deformácie zobrazené na inventarizačnej mape nemožno celé územie jednoznačne považovať za stabilné. Zároveň by bolo metodologicky neodôvodnené interpretovať každý pokles ako dôkaz aktívneho zosúvania alebo stanoviť vysokú mieru ohrozenia iba na základe troch vybraných časových radov. Súčasné údaje umožňujú predbežne označiť územie za lokalitu vyžadujúcu zvýšenú pozornosť a podrobné overenie aktivity. Odporúča sa získať úplný export bodov InSAR spolu s informáciami o kvalite údajov, analyzovať horizontálnu zložku posunov, vykonať kontrolné terénne mapovanie a preskúmať súvislosť deformácií so zrážkami a vodným režimom. Vhodná je aj integrácia InSAR s digitálnym modelom terénu LiDAR, ktorá umožní prepojiť súčasné deformácie s geomorfologickým vývojom jednotlivých zosuvov. Zhrnutie: dostupné údaje poukazujú na lokálne vertikálne zmeny polohy zemského povrchu, kvantitatívne určenie zosuvného ohrozenia pre konkrétne cesty či budovy si však vyžaduje podrobnejšiu analýzu geometrie pohybu a doplňujúce terénne práce.

Katowice, 25.09.2026

Ireneusz Malik