

Dlouhodobá prognóza sedání výsypkových těles na základě dat družicové radarové interferometrie (InSAR)

RNDr. Jan Burda, Ph.D.¹, Mgr. Jan Kolomazník²

¹Výzkumný ústav hnědého uhlí a.s., Most, tř. Budovatelů 2830/3, burda@vuhu.cz

²GISAT s.r.o., Praha, Milady Horákové 57, jan.kolomaznik@gisat.cz

Přijato: 31. 1. 2020, recenzováno: 13. a 14. 2. 2020

Abstrakt

Radarová družicová interferometrie je jednou z nejnovějších metod dálkového průzkumu Země. Data ze senzorů evropské konstelace družic Sentinel-1 (ESA, 2020), které systematicky pořizují radarové snímky světové souše ve fixním intervalu a z několika směrů, byly využity pro demonstraci možnosti využití radarové družicové interferometrie při retrospektivním vyhodnocení pohybů zemského povrchu na opuštěných a výsypkových lokalitách stojících obvykle mimo rámec běžného monitoringu. Výsledky ukazují možnosti využití těchto dat při prognóze sedání povrchu výsypky, ať už v linii vybraného profilu nebo ploše zájmu.

Long-term prognosis of soil dump consolidation based on satellite radar interferometry (InSAR) data

Satellite radar interferometry is state-of-the-art method of remote exploration of the Earth. Data from the sensors of European satellite constellation Sentinel-1 (ESA, 2020), which systematically captures radar images of the world's land at fixed intervals and from several directions, was used to demonstrate the capability of using radar satellite interferometry in retrospective evaluation of earth's surface movements on abandoned and dump sites being normally outside the scope of regular monitoring. The results show how these data and method facilitate forecasting when forecasting the consolidation of dump surface, whether in the line of the selected profile or in the zones of interest.

Langfristige Prognose der Setzung von Kippenkörpern auf Basis der Daten von Radar- Satelliten-Interferometrie (InSAR)

Die Radar-Satelliteninterferometrie ist eine der jüngsten Methoden der Fernerkundung der Erde. Die Daten von den Sensoren der europäischen Konstellation von Satelliten Sentinel-1 (ESA, 2020), die Radaraufnahmen des Weltfestlandes in einem fix-intervall und aus mehreren Richtungen systematisch beschaffen, wurden zur Präsentation der Nutzungsmöglichkeiten von Radar-Satelliten-Interferometrie bei der retrospektiven Auswertung der Bewegungen von Erdoberfläche auf den verlassenen und Kippenstandorten, die gewöhnlich über dem Rahmen des geläufigen Monitoring liegen. Die Ergebnisse zeigen Möglichkeit der Nutzung dieser Daten bei der Prognose von Setzungen der Kippenoberflächen, sei schon die Linie des ausgewählten Profils oder die Beschlagnahme der Oberfläche.

Klíčová slova: InSAR, družicová radarová interferometrie, DPZ, sedání, výsypka.

Keywords: InSAR, satellite radar interferometry, remote sensing, ground settlement, dump.

1 Úvod

Cílem elaborátu je demonstrovat možnosti družicové radarové interferometrie (InSAR) na konkrétním případě hodnocení stávajících a prognóze budoucích pohybů povrchu výsypky, kde doposud nebyl plošně realizován konvenční geodetický monitoring.

Jako vhodná lokalita pro demonstraci metody bylo vybráno vnější výsypkové těleso (plocha ca 1950 ha a kubatura

ca 93 mil. m³) v Sokolovské pánvi, kde od r. 2003 probíhají již jen rekultivační práce. Výsypkové těleso je z geotechnického pohledu velice heterogenní, dominují Cyprisové jíly střídané polohami uhelných jíků, uhelných výklizů a porcelanitů (Dykast, 1995). Maximální mocnost výsypkového tělesa dosahuje ca 75 m. Zakládání zemin bylo ukončeno v r. 2003 s tím, že již od r. 1998 zakládání probíhalo jen v dílčí severní části tělesa.

Tab. 1: Citlivosti detekce pohybu z jednotlivých drah družice Sentinel-1 pořízených nad zájmovým územím.

Dráha / Track	Počet snímků	Směr pohledu družice (LOS)		Směrová citlivost (min = 0, max = 1 nebo -1)		
		Incidenční úhel θ [°]	Azimut α [°]	Vertikální	Horizontální východ-západ	Horizontální sever-jih
95 (Sestupná / Descending)	202	42.8	99.6	0.73	0.67	-0.11
44 (Vzestupná / Ascending)	168	39.8	-100.1	0.77	-0.63	-0.11
168 (Sestupná / Descending)	210	34.1	100.6	0.83	0.55	-0.10

Geodetický a geotechnický monitoring nebyl plošně na výsypce realizován, přesto budoucí záměry na výsypce vyžadují zhodnocení průběhu sedání a následnou prognózu pohybů budoucích. Metoda InSAR dálkového průzkumu Země, která umožňuje i několikaletou retrospektivu, je tak ideálním a de facto jediným způsobem, jak pro tuto geotechnickou úlohu získat validní data. Metoda InSAR je dlouhodobě využívána pro mapování stability území i rozmanitých deformačních projevů vlivem důlní činnosti ať již se jedná o poklesy vlivem poddolování (Colesanti et al., 2005) nebo sesuvné projevy na svazích lomů, případně sedání materiálu výsypek či skládek (Baek et al. 2018, Colombo & MacDonald, 2018). Výsledky z analýzy InSAR posloužily jak k prostorovému vyhodnocení aktuálních rychlostí sedání na základě vyhodnocení několikaleté časové řady družicových měření, tak coby kalibrační vstup do geotechnické prognózy sedání výsypky v příštích desetiletích.

2 Metodika

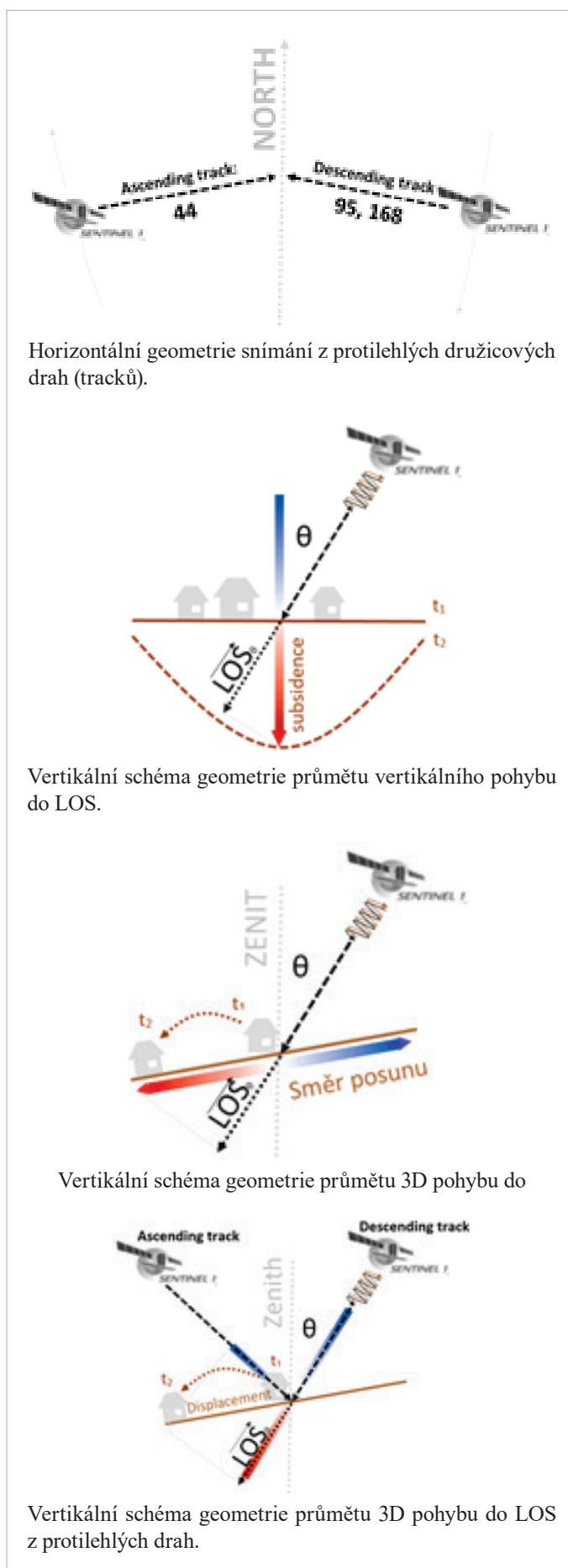
2.1 Vyhodnocení pohybů metodou radarové interferometrie

2.1.1 Použitá vstupní data

Pro retrospektivní vyhodnocení pohybů zemského povrchu v zájmovém území byla použita data ze senzorů evropské konstelace družic Sentinel-1 (ESA, 2020), které systematicky pořizují radarové snímky světové souše ve fixním intervalu a z několika směrů. První družice konstelace je v operačním provozu od podzimu 2014, druhá družice byla vynesena na oběžnou dráhu na jaře 2016. Prostorové rozlišení snímků ze senzorů Sentinel-1 je ve srovnání s komerčními konstelacemi poměrně hrubé: velikost pixelu dosahuje 5 x 20 m, což nese jisté nevýhody z hlediska určitelnosti zdroje pohybu v případě malých objektů. Tato nevýhoda je ale vyvážena dostupností dat zadarmo a velkým tzv. časovým rozlišením snímků daném frekvencí opakování měření: od jara 2016 jsou snímky pořizovány ve fixním intervalu 6 dní, před tím a od konce roku 2014 jsou v archivu dostupná data s intervalem měření 12 dní. V rámci této studie byly vyhodnoceny snímky z období podzim 2014 – červenec 2019, tedy téměř 5-letá časová řada sestávající ve 2 ze 3 drah z více než ze 2 stovek snímků v časové řadě.

2.1.2 Metoda PS InSAR

Princip sledování pohybů a deformací pomocí radarové interferometrie je založen na vyhodnocení dlouhých časových řad družicových radarových snímků metodou trvalých odrazečů - PS InSAR (Ferretti et al., 2001). Fázové rozdíly vlnové délky mezi 2 měřeními po odstranění systematických, atmosférických a topografických vlivů odpovídají změně polohy objektu nebo plochy, od které se odrazil radarový signál vyslaný a přijatý senzorem na družici. Metoda umožňuje dlouhodobě měřit ty plochy a objekty, které mají v čase konzistentní vlastnosti odrazivosti a koherentní fázovou stabilitu odraženého radarového signálu. Takto detekované tzv. trvalé odrazeče jsou ve výsledku zobrazeny jako diskrétní body, měření se nicméně vztahuje k nejmenší detekovatelné ploše dané rozlišením družicového senzoru a v závislosti na typu a vlastnostech senzoru se může lišit. Pro každý bod lze z časové řady měření zpětně odvodit průběh (tzn. historii) detekovaných pohybů v čase. Na rozdíl od



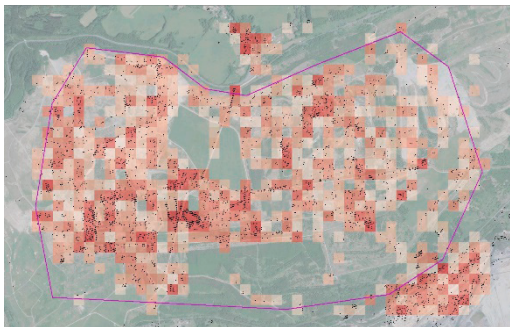
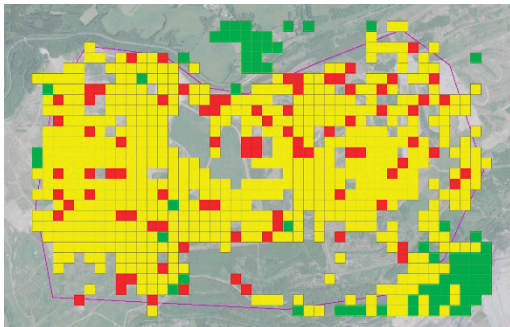
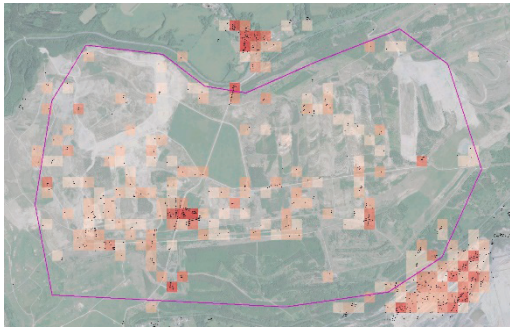
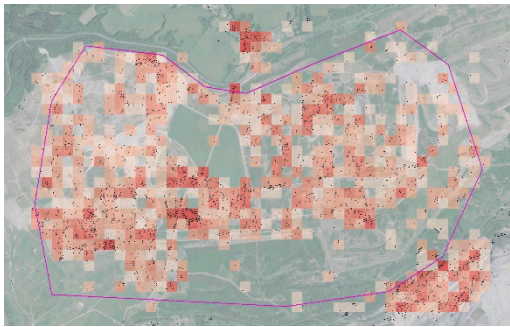
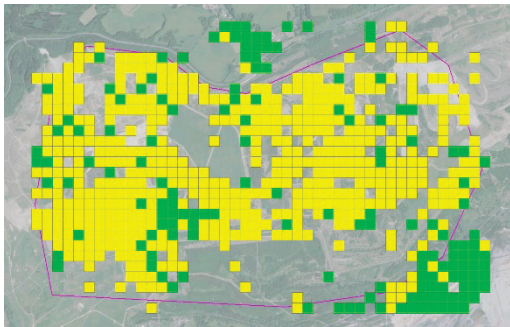
Obr. 1: Schéma geometrie snímání a průmětu vektoru detekovaného posunu do směru LOS.

tradičních metod PS InSAR umožňuje sledování bez nutnosti instalace jakýchkoli přístrojů na místě, a to i zpětně v čase, v závislosti na délce operačního provozu družicového senzoru a přístupnosti archivu družicových měření. Vymezení trvalých odražečů probíhá na základě prahování hodnoty koherence, charakteristiky, která je funkcí fázových reziduí dvojic interferogramů v jejich časové řadě, a která reprezentuje měřítko přesnosti a spolehlivosti. Koherence nabývá hodnot z rozsahu $<0,1>$ (1=nejlepší). Při konzervativním nastavení prahu jsou vyloučeny méně kvalitní body (z hlediska spolehlivosti určení detekované deformace) a výsledek obsahuje nižší hustotu bodů. Benevolentnější nastavení prahu vede ke zvýšení hustoty detekovaných bodů, ale za cenu nižší spolehlivosti některých z nich, např. vlivem hrubých chyb nebo fázových ambiguit. Při dostatečném počtu snímků v časové řadě (minimálně 20-30) a rovnoměrném pohybu odražeče lze detekovat i milimetrové pohyby za rok, s přesností vyjádřenou směrodatnou odchylkou měření v řádu jednotek milimetrů.

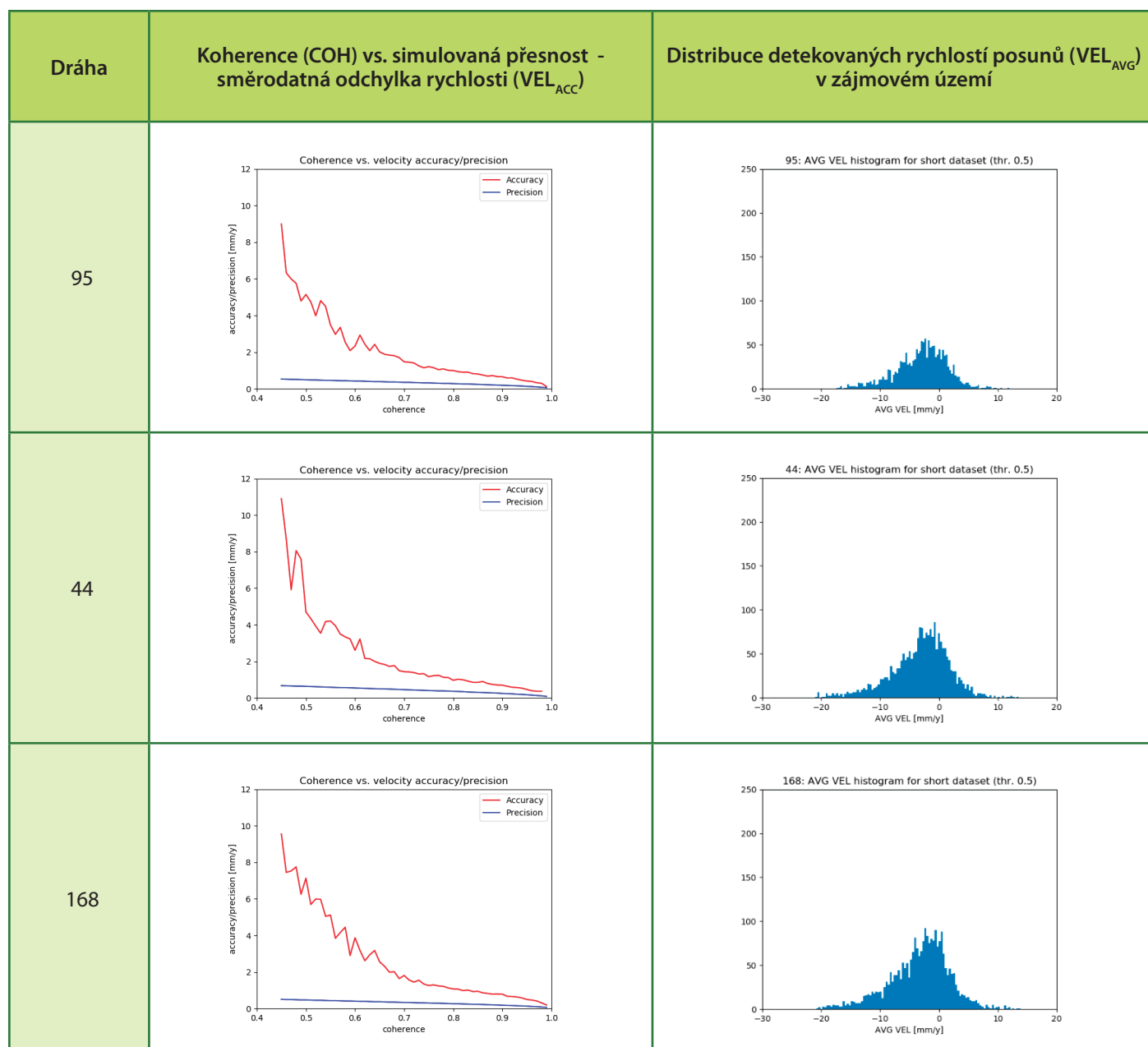
Pohyb trvalých odražečů detekovaných na zemském povrchu je vztažen přímo k pohybům povrchu, resp. jeho podloží (z

důvodu nestability geologických vrstev, sedání půdy, svahových pohybů atd.). Pohyby trvalých odražečů detekovaných na objektech se vztahují buď k pohybům podloží (objekt se hýbe spolu s povrchem), nebo k deformacím samotného objektu (dilatace, strukturální nestabilita, náklon, průvès mostního pole atd.).

Pohyby jsou detekovány ve směru pohledu radarového signálu (LOS – line of sight), detekují tedy průmět vektoru z reálného směru pohybu do roviny LOS. LOS je definován vodorovným úhlem (azimut, měřen od severu s kladnými hodnotami rostoucími ve směru hodinových ručiček) a vertikálním úhlem (incidenční úhel, měřen od zenitu) signálu mezi povrchem a družicí. LOS je fixní pro danou orbitální dráhu družice a danou lokalitu, která je obvykle pokryta družicovými snímky pořízenými z 2-4 protilehlých orbitálních drah (vzestupné – Ascending, nebo sestupné – Descending). Hodnoty azimutu a inklinace pro jednotlivé družicové dráhy nad zájmovým územím na Sokolovsku jsou uvedeny v tabulce 1. Trvalé odražeče s blízkými sousedy (body) pořízenými z rozdílné dráhy umožňují odhadnout reálný (3D) směr pohybu. Přepočítá se

Délka čas. ř. / Práh koherence (COH)	Hustota detekovaných trvalých odražečů	Směrodatná odchylka rychlosti (VEL_{ACC})
56 měsíců COH > 0.4		
56 měsíců COH > 0.5		
39 měsíců COH > 0.5		

Obr. 2: Schéma geometrie snímání a průmětu vektoru detekovaného posunu do směru LOS.



Obr. 3: Empirický vztah koherence a přesnosti a výsledné rozložení detekovaných rychlostí (v LOS).

požadovaného směru lze provést trigonometricky pomocí hodnot citlivosti uvedených také v tabulce 1. Metoda není citlivá pro pohyby ve směru kolmém na LOS, tedy přibližně Sever > Jih, resp. Jih > Sever.

Metoda je relativní, pohyby jsou vztaženy vzhledem k vybranému trvalému odražeči (referenčnímu bodu) nebo vztažné soustavě referenčních bodů, u kterých platí předpoklad polohové stability. Je-li nutné naplnit požadavek nezávislého měření stability vztažného referenčního bodu, je možné vytvořit ho uměle – instalací tzv. umělého koutového odražeče, jehož po-loha může být měřena paralelně jak pomocí metody PS InSAR, tak geodeticky (Hlaváčová et al., 2016, Kolomazník et al., 2016).

Výsledkem analýzy je pro každý z detekovaných bodů trvalých odražečů řada asociovaných vlastností buď přímo měřených, nebo odvozených z naměřených průběhů pohybu. Standardně se jedná především o průměrnou rychlost pohybu

vel_{AVG} s jednotkou mm/rok, která je spočítaná pomocí modelu (lineárního) pohybu z průběhů celé časové řady, případně kumulativní velikost posunu d_{CUM} s jednotkou mm vyjadřující celkovou deformaci za celé sledované období. Posuny je možné odvodit i pro úzeji vymezené časové úseky. Tyto vlastnosti jsou ve výsledcích prezentovány jako atributy pro každý z detekovaných bodů. Časové řady relativních poloh bodu definují trend detekované deformace na analyzovaném časovém úseku, který bývá vykreslen do grafu. Rychlost a posuny jsou uvedeny v mapách a grafech v kapitole 4. Detekované vektory pohybů byly trigonometricky převedeny ze směru LOS specifického pro každou dráhu do vertikálního směru.

2.1.3 Výběr optimálních výsledků

Mezi hlavní faktory, které ovlivňují přesnost metody PS InSAR, patří přítomnost vysoké vegetace nebo zásadní změny vlastností nebo výšky povrchu např. přeoráním, splazem nebo

navážkou. Ve všech případech dojde k tzv. dekorelaci radarového signálu. V případě jednorázové změny lze začít se sledováním znovu, ale v případě výskytu husté vegetace nebo častých změn je sledování znemožněno. Na zájmové výsypce probíhala biologická i technická rekultivace, současně zde na řadě míst probíhají přirozené procesy, které souběžně vedou k relativně náhlým nebo rychlým změnám vlastností povrchu. Výsledky z analýzy InSAR jsou proto zatíženy značným výskytem šumu, který by při standardním nastavení analýzy vedl k vyloučení značného počtu méně kvalitních trvalých odražečů.

Proto bylo třeba přistoupit k optimalizaci metodiky i výběru výsledných trvalých odražečů na základě prahování hodnot koherence. Bylo vyhodnoceno několik variant s ohledem na dosažení kompromisu ve smyslu maximalizace hustoty detekovaných bodů a současně dosažení přijatelné přesnosti a spolehlivosti výsledků.

Nežádoucí efekty vlivem dekorelace jsou zvláště patrné na dlouhé časové řadě (56 měsíců měření), proto byly vyhodnoceny i varianty zpracování dat z kratšího časového úseku (39 měsíců, počítáno zpětně od července 2019).

Vliv nastavení prahu na hustotu detekovaných trvalých odražečů a přesnost danou směrodatnou odchylkou odhadu rychlosti (byla simulována empirickým vztahem mezi směrodatnou odchylkou a koherencí) je demonstrován pro dvě délky časové řady na obrázku č. 2 pro trvalé odražeče detekované z dráhy 168. Výsledky pro dráhy 44 a 95 jsou velmi podobné.

Jako optimální varianta pro další vyhodnocení a vstup do prognózy byla vyhodnocena kratší časová řada s délkou 39 měsíců a koherenčním prahem 0.5. Empirický vztah mezi koherencí a přesností, a rozložení detekovaných rychlostí pro polygon zájmového území jsou ukázány na obrázku č. 3.

2.1.4 Validace

Protože v zájmovém území v období 2014–2019 neproběhlo geodetické nebo jiné geotechnické měření, pro retrospektivní analýzu InSAR nebylo možné provést externí validaci nezávislým měřením. Byla provedena tzv. interní validace, která využívá faktu, že ač jsou měření z různých drah pořízena stejným senzorem a vyhodnocena shodnou metodou, díky oddělenému zpracování a časovému posunu snímání mohou být považována za nezávislá měření.

Po převedení měření z LOS do VERT směru byly k dispozici 3 páry měření ve shodném směru, které mohly být navzájem statisticky porovnány ve vztahu master – slave. Pro každý bod trvalého odražeče v master datasetu z daného páru byly vybrány body v blízkém okolí a byl proveden test hypotézy na shodnost středních hodnot distribucí detekovaných posunů vlivem sedání na dané hladině spolehlivosti ($\alpha \sim 5\%$). Nulová hypotéza o shodnosti středních hodnot je obvykle vyvrácena v případě výskytu hrubých chyb, případně v páru, kde figuruje vzestupná a sestupná dráha, její vyvrácení indikuje přítomnost pohybu s významnou horizontální komponentou pohybu. To obvykle nastává v případě svahových pohybů a řada takto indikovaných bodů se na výsypce nachází v lokalitách s vyšším sklonem. Dalším vysvětlením může být přítomnost velmi variabilních (směrově protilehlých) pohybů na malém prostoru – např. zvedáním úrovně povrchu vlivem postupné akrece

sypkého materiálu na úpatí svahů.

2.2 Dlouhodobá prognóza sedání povrchu výsypky

Vaníček et al. (1996) vymezuje tři základní složky sedání, které ovlivňují výslednou deformaci povrchu výsypkového tělesa:

- i) sedání podzákladí výsypky vlivem jeho zatížení,
- ii) sedání vlastního výsypkového tělesa spojené s postupným poklesem mezerovitosti,
- iii) celkové sedání, které je součtem obou předchozích.

Tato východiska jsou v souladu i dřívějšími závěry (Dykast, 1993), přičemž podíl všech složek závisí vždy na konkrétních podmínkách a vlastnostech jak podzákladí, tak výsypkových zemin. Obecně lze předpokládat, že sedání podzákladí je vždy rychlejší a dynamičtější proces, a vyznívá v prvních letech (cca do 10 let). Sedání výsypkových zemin je naopak proces dlouhodobý, v závislosti na charakteru a mocnosti sypaniny probíhá řádově v horizontu prvních desítek let, přičemž jeho dynamika je závislá na srážkových úhrnech (Vaníček et al., 2008).

Dlouhodobá prognóza sedání povrchu je založena na několika metodách:

- i) empirické, která vychází z úměry celkového sednutí v čase z prosté závislosti na mocnosti výsypky,
- ii) na základě výpočtu MKP z geotechnického modelu výsypky,
- iii) matematickým vztahem, který zohledňuje rychlost předchozího sedání výsypky (Dykast, 1993).

Empirická metoda je vhodná spíše k prvotnímu odhadu rozsahu možného sednutí nového tělesa, druhá metoda výpočtu vyžaduje znalost pevnostních a přetvárných charakteristik, a prostorově věrný geotechnický model výsypky, což je u velkých výsypkových těles komplikované (až nereálné) z důvodů jejich značné prostorové heterogenity a komplikovanosti a výpočtové náročnosti konečného modelu. U velkých výsypkových těles Mostecké a Sokolovské pánve se tak osvědčila metoda vycházející z logaritmického vztahu (1):

$$S = a + b \times \ln t \quad (1)$$

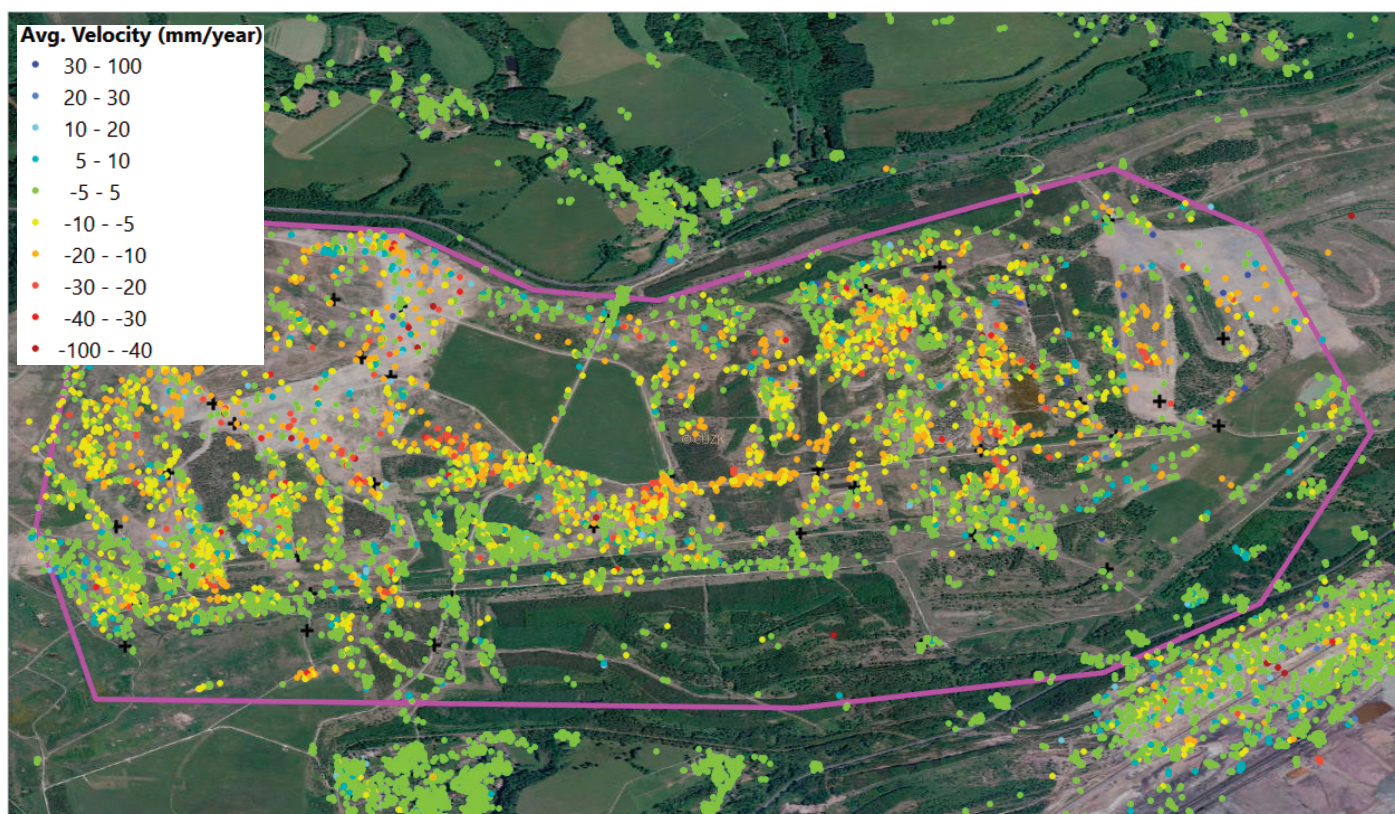
S - hodnota celkového sednutí v čase t,
a, b - koeficienty vypočtené z rychlosti stávajícího sedání,
t - čas (v letech) od počátku sedání.

Postup výpočtu, který je podrobně popsán Vaníčkem (1996) a Dykastem (1993), vyžaduje existující monitoring, o jehož výsledky se výpočet opírá. V tomto případě nebyly výstupy konvenčních geodetických metod k dispozici, a tak se jako podklad pro výpočet dlouhodobé prognózy sedání použila dostupná InSAR data. V tomto konkrétním případě je prognóza počítána v pro každý bod trvalého odražeče po pětiletých cyklech až do r. 2043, pro každý bod je tedy stanoveno jeho celkové sednutí v r. 2023, 2028, 2033, 2038 a 2043. Rozdílem hodnoty celkového sednutí v jednotlivých letech lze spočítat i roční rychlost sedání každého bodu trvalého odražeče.

3 Výsledky

3.1 InSAR

Výsledek z vybrané optimální varianty je zobrazen na obrázku

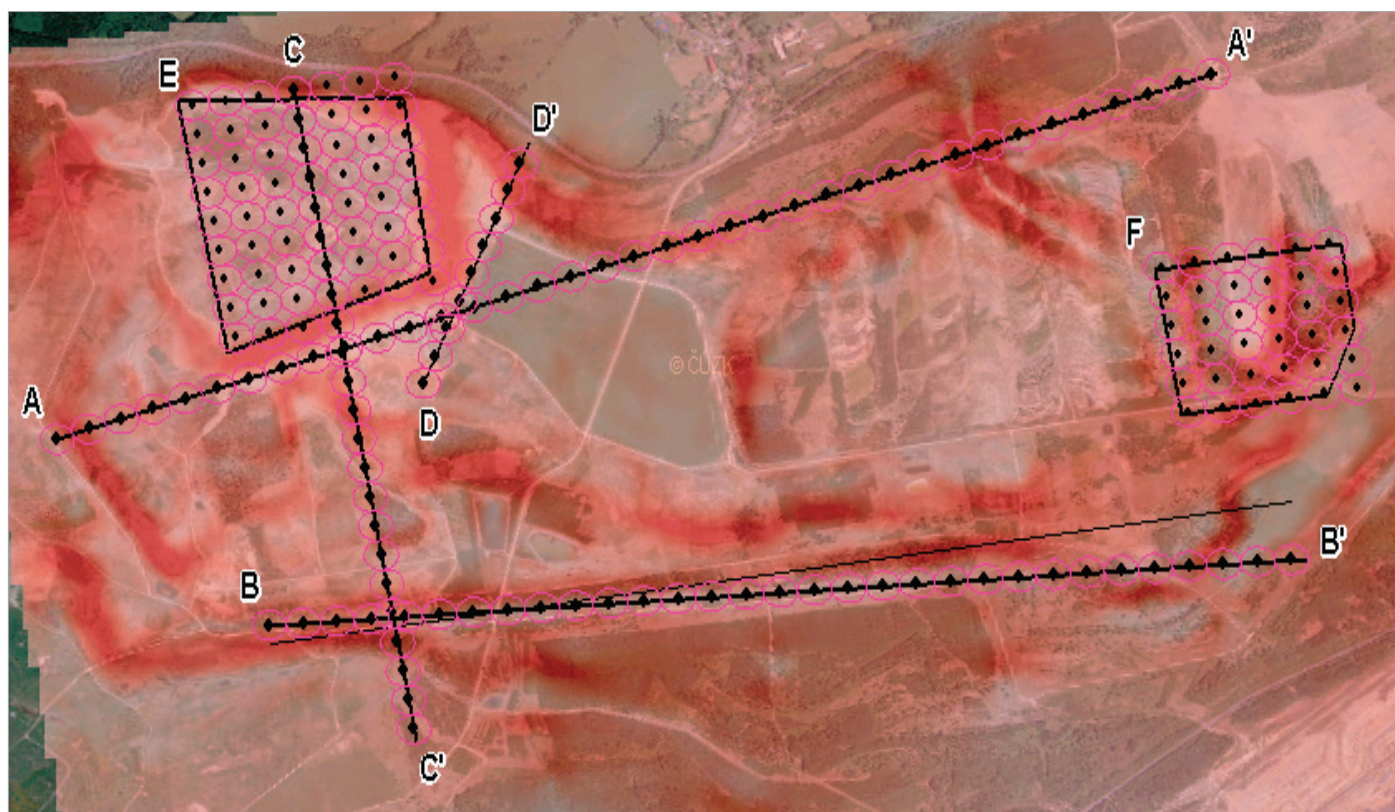


Obr. 4. Výsledná mapa sedání (průměrné rychlosti za rok ve vertikálním směru) ze všech třech zpracovaných drah.

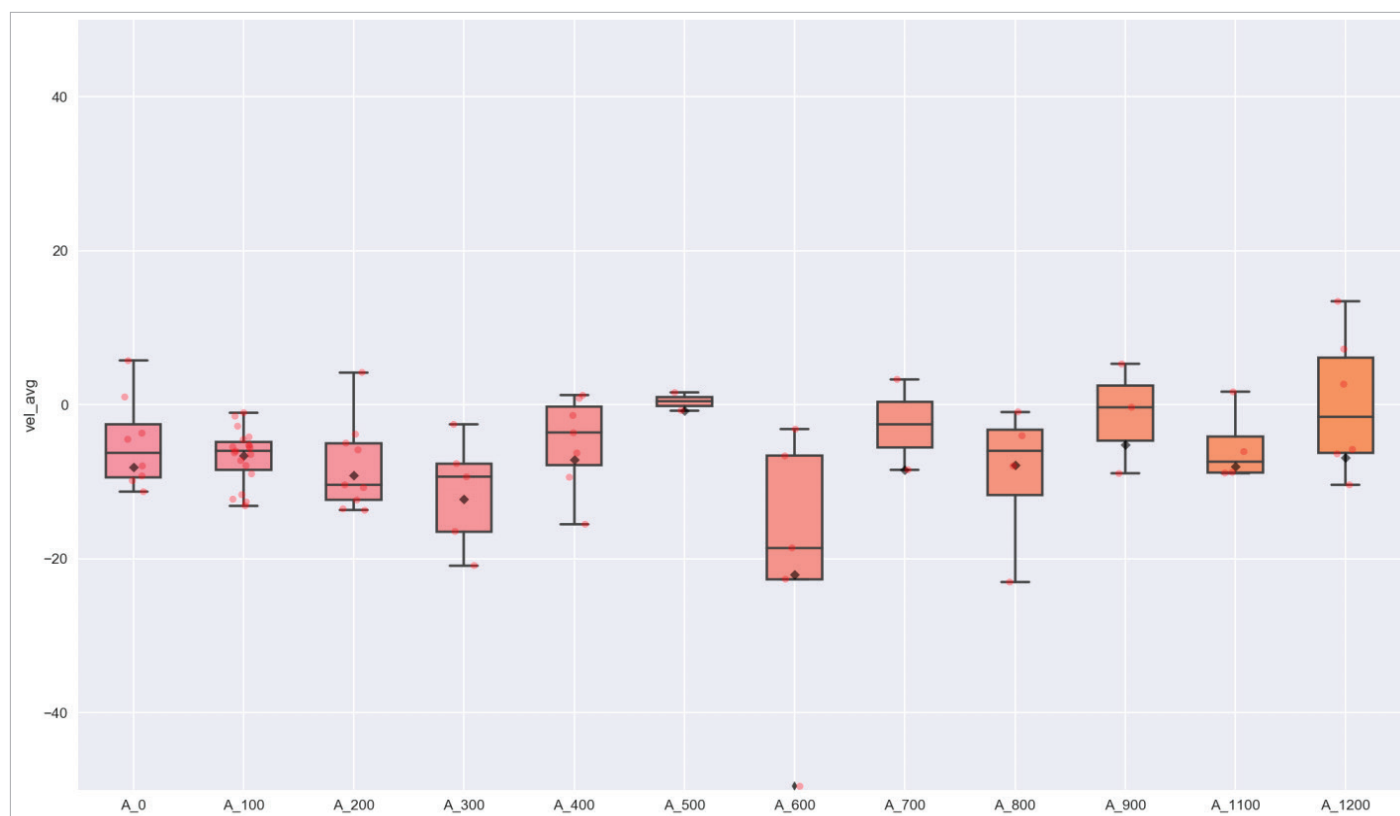
č. 4. Pohyby ve směru od družice (obvykle se jedná o pokles, ale může se jednat i o pohyb s výraznou horizontální komponentou ve směru, na který je LOS citlivá) je v mapě znázorněn odstíny žluté až červené barvy, pohyby ve směru k družici pak odstíny

modré barvy. Mapa zobrazuje spojené výsledky ze všech tří zpracovaných drah po jejich převodu do vertikálního směru.

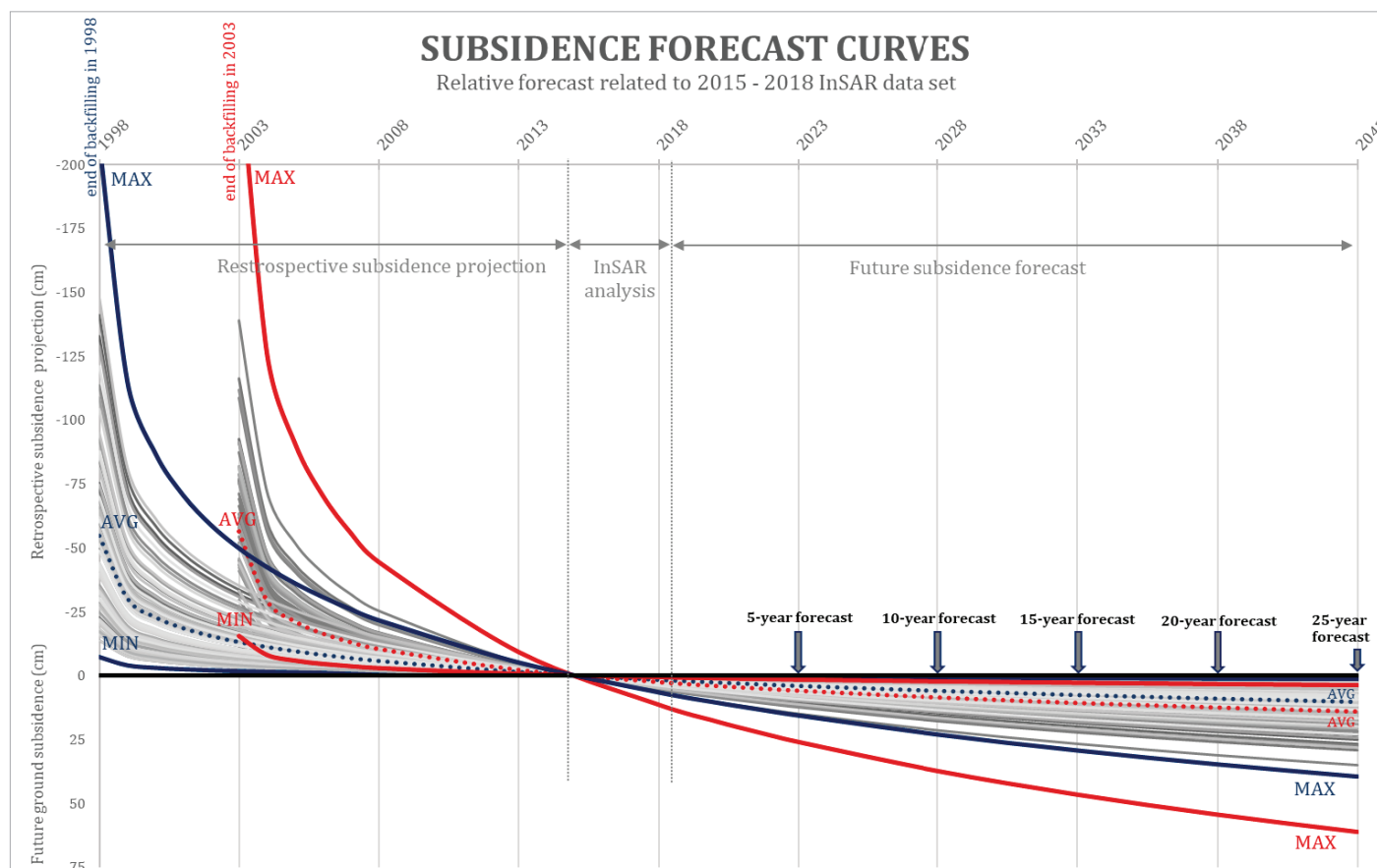
Klastry bodů v červených, oranžových, ale i modrých



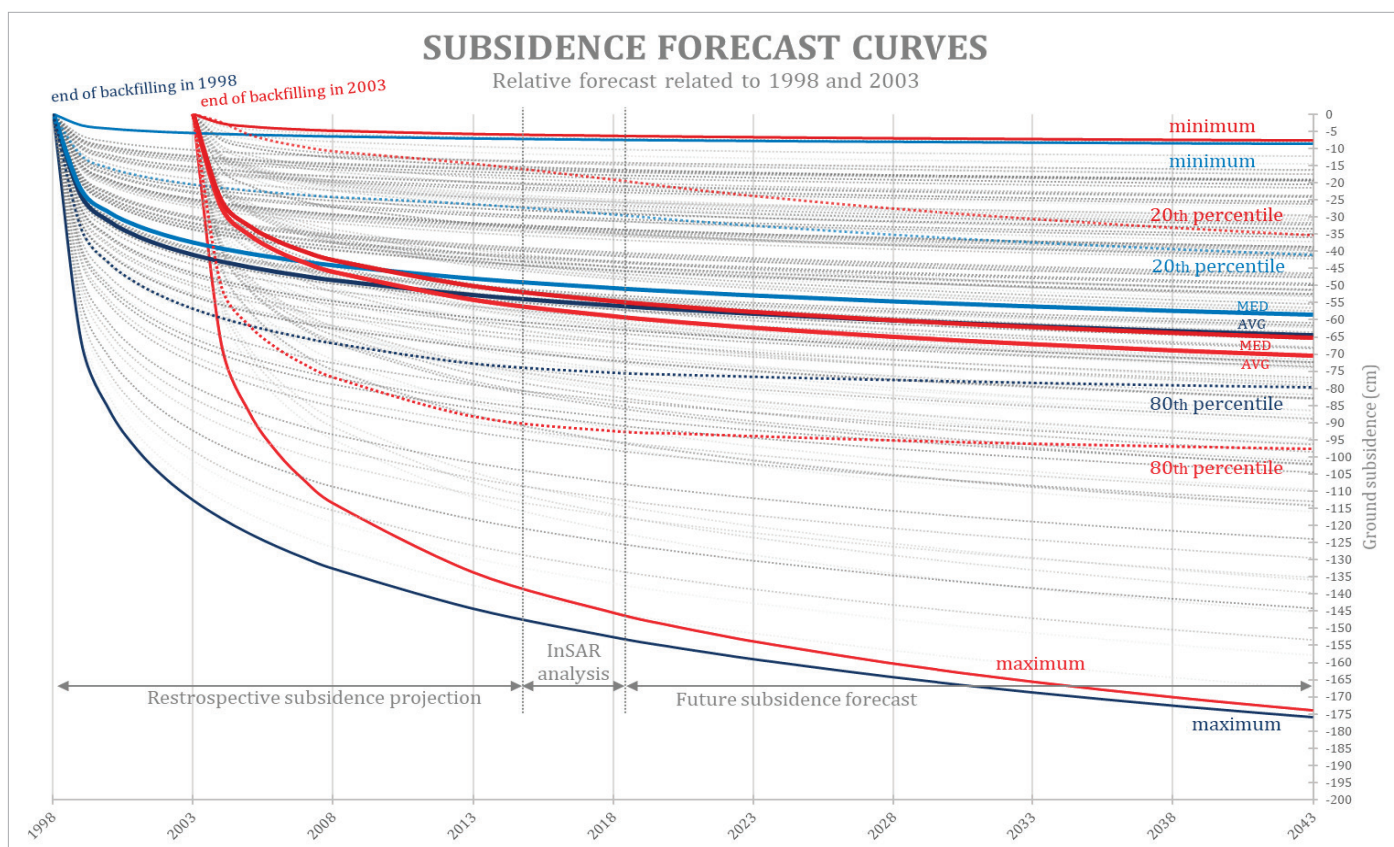
Obr. 5: Příklad vymezení transektů (A až D) a ploch zájmu (E a F) se znázorněním jednotlivých buněk analytických jednotek o průměru 50 m. Sklonitost je zobrazena na podkladu zobrazena s průhledností v odstínech červené barvy.



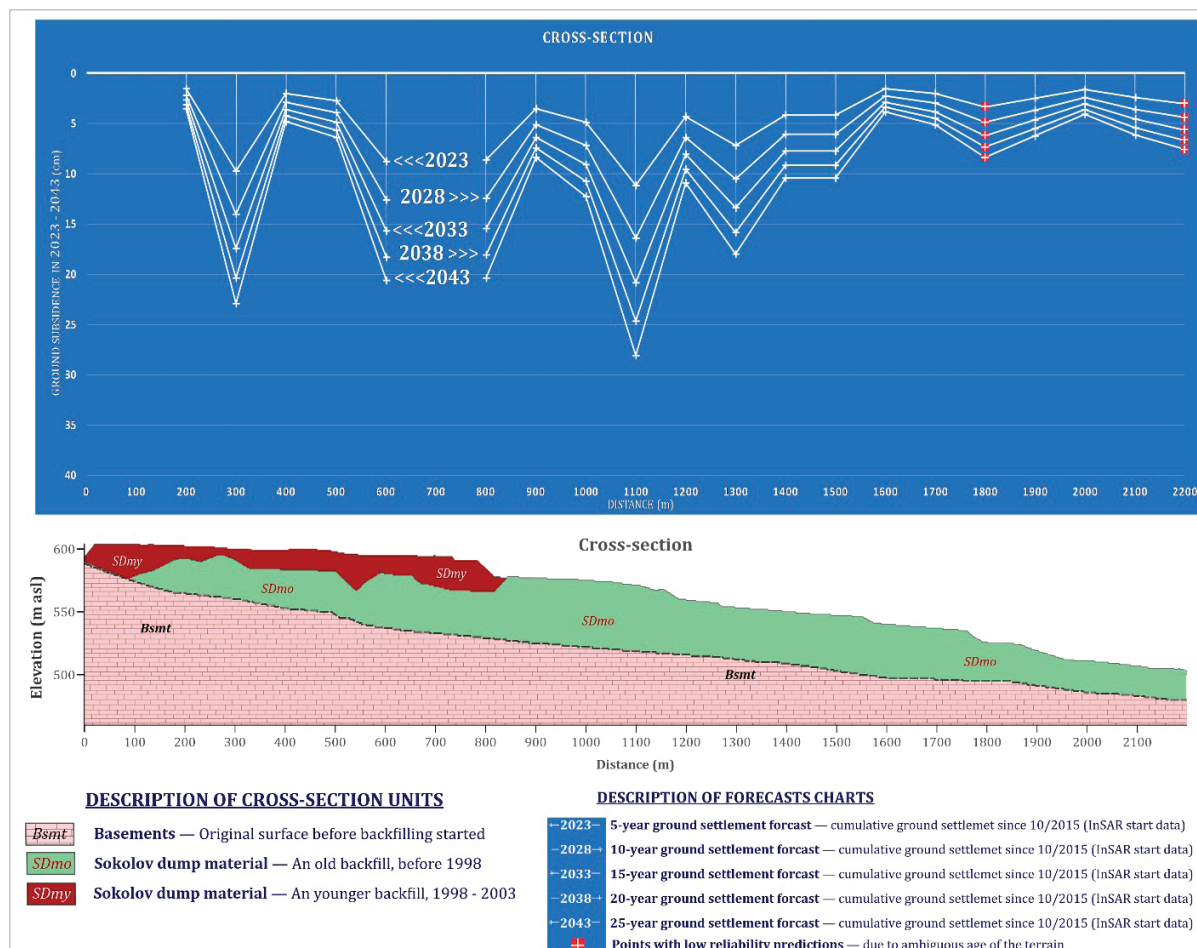
Obr. 6: Příklad variability detekovaných hodnot rychlosti pohybu ve vertikálním směru po agregaci v buňkách analytických jednotek v transektu A.



Obr. 7: Prognóza sedání buněk analytických jednotek v pětiletých intervalech ve všech transektech a plochách zájmu, včetně retrospektivní projekce sedání před r. 2015 (tedy před analyzovaným souborem InSAR dat). Při výpočtu bylo zohledněno rozdílné stáří výsypky před r. 1998 a do r. 2003 (převzato: Burda a Kolomazník, 2019).



Obr. 8: Prognóza celkového kumulativního sedání buněk analytických jednotek ve všech transektech a plochách zájmu. Při výpočtu bylo zohledněno rozdílné stáří výsypky před r. 1998 a do r. 2003 (převzato: Burda a Kolomazník, 2019).



Obr. 9: Prognóza kumulativního sedání v linii transektu C (převzato: Burda a Kolomazník, 2019).

odstínech indikují plochy, kde s velkou pravděpodobností dochází k sedání nebo svahovým pohybům v plošnějším rozsahu. Solitérní nebo vzhledem k blízkému okolí vychýlené body mohou také indikovat problematické zóny, nelze ale ověřit spolehlivost takto detekovaného pohybu.

Před vstupem do prognózy bylo třeba výsledky dále prostorově agregovat. V zájmovém území byly vymezeny transepty a plochy zájmu, a na nich byly v pravidelných rozestupech rozmístěny kruhové buňky s konstantním poloměrem 50 m (obrázek č. 5). Takto vymezené analytické jednotky (plošky) posloužily k prostorovému výběru detekovaných bodů trvalých odrazečů a na tomto výběru byla po vyloučení odlehklých hodnot, zdvihů a bodů s nízkou koherencí spočtena vážená průměrná rychlost poklesu, kde váha byla reprezentována koherencí, resp. VEL_{ACC} . Ukázka výsledku přepočtená pro jeden z transektů je na obrázku č. 6.

3.2 Prognóza budoucích pohybů

V momentě, kdy byla k dispozici dostatečně robustní časová a prostorová analýza pohybů povrchu výsypky z let 2015–2019, byly její výsledky dosazeny do vzorce (1) a pro každou

analytickou buňku v transektech spočítána prognóza budoucího vývoje sedání povrchu výsypky.

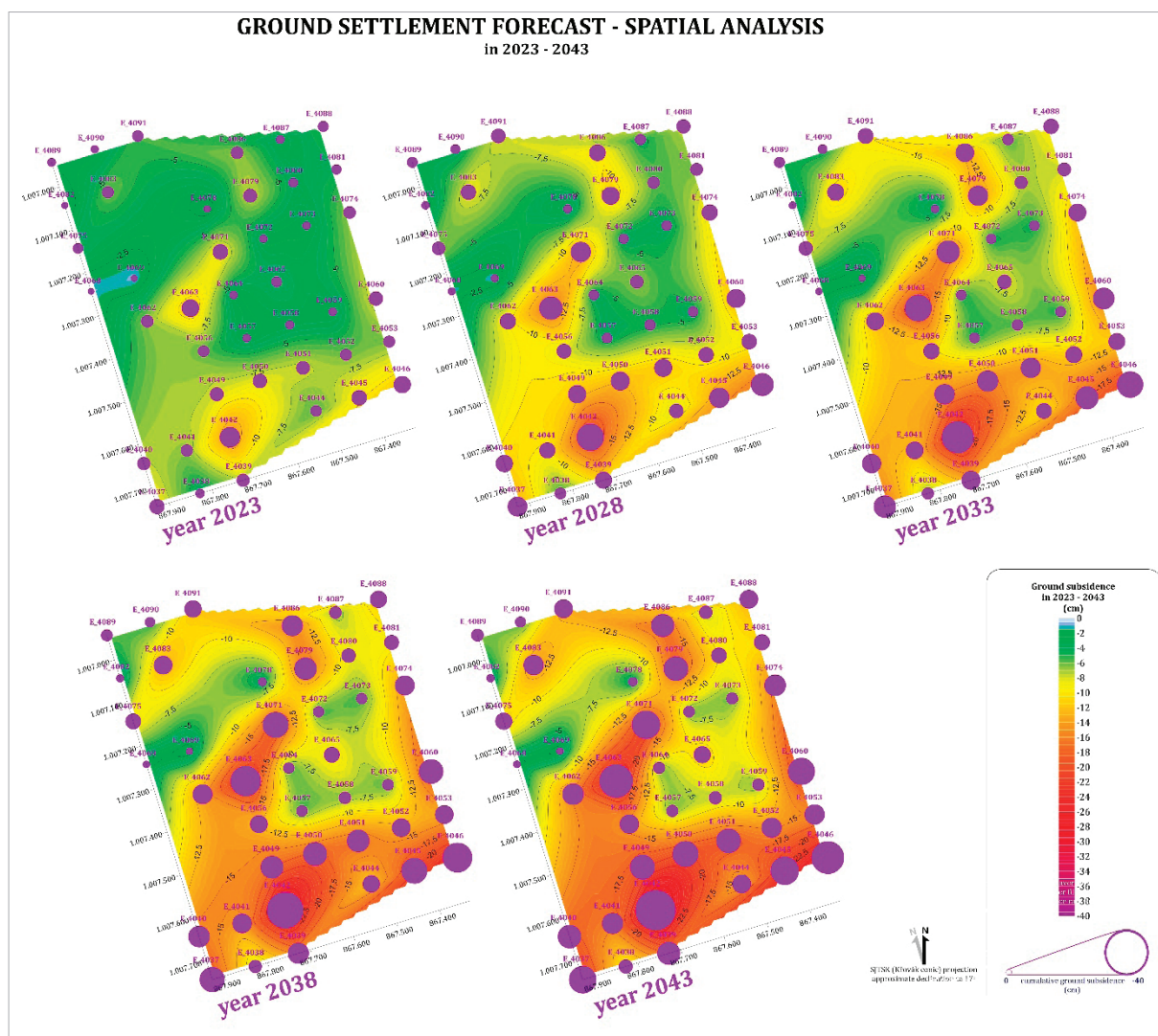
Maximální hodnota prognózovaného sednutí k r. 2043 je 396 mm a minimální hodnota 13 mm – dva způsoby možné interpretace těchto výsledků jsou demonstrovány na obrázcích č. 7 a 8, jejichž součástí jsou i minimální, maximální, průměrné a střední hodnoty, stejně tak jako 80% a 20% percentil.

Výsledky prognózy pohybů lze prostorově promítnout do řezu výsypkou v linii transektu (obrázek č. 9) tak, aby bylo možné hodnotit budoucí vývoj výsypky jako celku, tak v jejích dílčích částech.

U zájmové plochy lze výsledky spočtené pro jednotlivé buňky analytických jednotek zobrazit opět v linii dílčích transektů, nebo interpolovanou mapou s izoliniemi poklesů (obrázek č. 10).

4 Závěr

Jako každá metoda dálkového průzkumu má i metoda InSAR svá omezení a vyžaduje sofistikovaný interpretační pre- i post-procesingový aparát. V rámci výsypkových lokalit, které dnes



Obr. 10: Příklad prostorové prognózy sedání výsypky v pětiletých intervalech – zájmová plocha E (převzato: Burda a Kolomazník, 2019).

z větší části představují rozsáhlé zatravněné či zalesněné plochy, je nutné volit kompromis z hlediska hustoty pokryvnosti vůči spolehlivosti; metodou vážení průměru došlo k potlačení vlivu odlehklých hodnot s nízkou spolehlivostí. Klíčové je i stanovení velikosti analytických jednotek (variabilita naměřených deformací povrchu v rámci buněk), které může vychýlit průměrnou hodnotu, ale současně reflektuje velkou prostorovou variabilitu jevů sedání na výsypce. Příliš velké buňky by tuto variabilitu použitím průměru potlačily. Velikost analytických jednotek by měla reflektovat reálné prostorové vzorce sedání – tedy na základě terénního šetření, lokální znalosti báňsko-geologických poměrů. K vymezení optimistického, resp. pesimistického scénáře prognózy lokalit lze navíc použít i další metriky z agregace hodnot rychlosti posunu na vymezených analytických jednotkách (např. průměr, min, max).

Tento elaborát pouze nastiňuje základní možnosti metody při využití relativně krátkého datasetu měření z družice Sentinel-1. Metoda umožňuje využívat i družicová data ze senzorů s delší vlnovou délkou, která jsou méně citlivá na přítomnost vegetace, případně data s větším rozlišením, která obvykle poskytují výsledky s vyšší hustotou detekovaných trvalých odrazečů. Pro retrospektivní analýzu lze rovněž analyzovat data z dnes již operačně nefunkčních družicových senzorů, které snímaly území před rokem 2015. Napojení časových řad z historických měření s nižší spolehlivostí (dané nízkou frekvencí měření) na časovou řadu měření z družice Sentinel-1 je sice problematické, ale metodicky možné.

V každém případě, při metodicky správném interpretačním aparátu představuje využití InSAR dat unikátní a mocný nástroj nejen k retrospektivnímu vyhodnocení sedání a poklesů na lokalitách, které jsou dlouhodobě stranou pozornosti a monitoringu, ale v další fázi také nástroj umožňující jak kontinuální monitoring povrchu výsypky (např. jako „alert system“ s vymezením rizikových a varovných stavů), tak průběžnou kalibraci modelu sedání výsypky, nebo geotechnický monitoring báňských lokalit v intervalech dle požadavků zákazníka.

Literatura

- [1] BAEK, W.-K., JUNG, H.-S., JO, M.-J., LEE, W.-J., ZHANG, L.: Ground subsidence observation of solid waste landfill park using multi-temporal radar interferometry, *International Journal of Urban Sciences*, 23:3, 406-421, 2019.
- [2] BÁRTA, Z., BRUS, Z., HURNÍK, S., TOBĚRNÁ, V., TYRNER, P.: *Příroda Mostecka*. Severočeské nakladatelství, Ústí n. Labem, 208 s., 1973.
- [3] BURDA, J., KOLOMAZÍK, J. eds.: Analysis of ground subsidence in Sokolov dump area. Final report, VUHU, Most, GH-034/19, 53 s., 2019.
- [4] COLESANTI, C., MOUELIC, S.L., BENNANI, M., RAUCOULES, D., CARNEC, C., FERRETTI, A.: Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique: a case study in the east of France. *International Journal of Remote Sensing*, 26 (1), 201-207, 2005.
- [5] COLOMBO, D., MACDONALD, B.: Using advanced InSAR techniques as a remote tool for mine site monitoring. *Slope Stability Proceeding 2015*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2018.
- [6] DYKAST, I.: Vlastnosti výsypek v SHR z hlediska jejich zástavby. Kandidátská disertační práce, ČVUT, Praha, 126 s., 1993.
- [7] DYKAST, I.: Podkrušnohorská výsypka – stabilitní posouzení severních svahů proti obci Dolní Nivy, Výzkumná zpráva, VÚHU, Most, č. 33/95, 1995.
- [8] ESA Sentinel Online – Sentinel-1 [online]. Evropská kosmická agentura, © 2020 [cit. 30.1.2020]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>.
- [9] FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (1):8-20, 2001.
- [10] HLAVÁČOVÁ, I., HALOUNOVÁ, L., STANISLAV, P.: Sentinel-1 INSAR processing of corner reflector information in the northern-bohemian coal basin. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B7, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic.
- [11] KOLOMAZNÍK, J., HLAVÁČOVÁ, I., LAZECKÝ, M., PELANT, M.: Metodika vyhodnocení proveditelnosti sledování nežádoucích pohybů a deformací dopravních infrastruktur prostřednictvím radarové interferometrie. Certifikovaná metodika. TAČR, 2016.
- [12] VANÍČEK, I., VANÍČEK, M.: *Earth structures in Transport, Water and Environmental Engineering*. Springer, ISBN: 978-1-4020-3963-8, 637 s., 2008.
- [13] VANÍČEK, I.: *Mechanika zemin*. Vyd. 3., přeprac. Praha, ČVUT, ISBN 80-01-01437-1, 229 s., 1996.