

InSAR JAKO OPERAČNÍ SLOŽKA GTM: PRAKTICKÁ APLIKACE PRO VÝSTAVBU LINKY METRA D V PRAZE

I. Hlaváčová, J. Kolomazník & J. Struhár

GISAT s.r.o., Praha, Czechia

J. Bohátka

SG Geotechnika, a.s., Praha, Cechy

ABSTRAKT: V Praze probíhá výstavba nové trasy linky metra D. Ražba a stavební práce mohou potenciálně ovlivnit stavebně-technický stav budov a infrastruktury v zóně ovlivnění. V rámci geotechnického monitoringu pro výstavbu trasy metra D jsou posuny povrchu a budov sledovány pomocí konvenčních metod a satelitní interferometrie (InSAR). Měření z družic TerraSAR-X/PAZ jsou analyzována pomocí upraveného algoritmu PS-InSAR za účelem zachycení vyvíjejících se deformačních vzorců během výstavby. Kromě toho bylo vyvinuto několik doplňkových metod pro cílenou analýzu trendů a geotechnicky relevantních metrik. Po retrospektivní „etapě pasportizace“ dosud následovalo sedm standardních monitorovacích etap s adaptivní délkou trvání a frekvencí satelitních radarových měření. Nelineární charakteristiky trendů posunů představují pro InSAR výzvu. Zejména u dat snímaných v pásmu vlnové délky X chyby při fázovém rozbíjení komplikují prostorovou interpretaci, zvyšují úroveň šumu a snižují spolehlivost výsledků. Tyto problémy jsou řešeny přizpůsobením metodiky InSAR, včetně pokročilé segmentace časových řad, která zohledňuje statistické významné rozdíly v rychlostech posunů a úrovni šumu. Měření z družic Sentinel-1 z více směrů doplňují hodnocení geotechnických dopadů základních interferometrických výsledků tím, že poskytují údaje o posunech v horizontálním deformačním poli. Validace potvrzuje vysokou shodu mezi trendy posunů měřenými pomocí InSAR a konvenčními geotechnickými metodami.

1. ÚVOD

Výstavba nových tras podzemních drah v hustě zastavěném městském prostředí představuje jednu z nejkompexnějších geotechnických výzev. V případě výstavby linky D pražského metra, konkrétně v úseku I.Dla mezi stanicemi Pankrác a Olbrachtova, je situace komplikována nejen složitými geologickými poměry, ale i přítomností husté povrchové zástavby a stávající infrastruktury. Standardní geotechnický monitoring (GTM), založený na terestrických geodetických metodách (nivelace, trigonometrie), je zde proto doplněn o technologii družicové radarové interferometrie (InSAR).

Jako klíčová doplňková technologie je v tomto projektu využívána družicová radarová interferometrie (InSAR), konkrétně její multitemporální varianta (MT-InSAR). Tato metoda umožňuje měření deformací zemského povrchu a objektů s milimetrovou přesností, a to bez nutnosti fyzického přístupu k měřeným budovám. Integrace InSAR do rutinního geotechnického dohledu byla v minulosti úspěšně doložena u řady významných projektů, například v Turíně (Barla et al., 2016) nebo v Londýně (Milillo et al., 2018), kde data sloužila k odhadu poškození konstrukcí a zpřesnění modelů interakce podloží. Významným přínosem je zejména včasná identifikace rizik prostřednictvím retrospektivních analýz, které umožňují odhalit dříve nezjištěné geotechnické anomálie (Scoular et al., 2020). Vedle samotného měření posunů jsou data využívána k hodnocení zranitelnosti budov, která je závislá na poloze objektu v poklesové kotlině (Saeidi et al., 2009).

Předkládaný příspěvek se zaměřuje na operacionalizaci této technologie v rámci probíhající výstavby v Praze jako integrované součásti komplexního GTM. Pozornost je věnována přechodu od retrospektivního vyhodnocení (pasportizace) k aktivnímu monitoringu, který je realizován v adaptivních etapách. Zdůrazněno je využití InSAR pro detekci geotechnických rizik, jako jsou náklony budov a horizontální posuny, které byly identifikovány díky kombinaci různých družicových systémů a pokročilých algoritmů zpracování.

2. DRUŽICOVÁ DATA A METODIKA

2.1 POUŽITÉ DATOVÉ SADY

Pro účely monitoringu výstavby linky metra D byla zvolena kombinace komerčních a volně dostupných radarových dat. Primárním zdrojem jsou snímky z družicového systému TerraSAR-X/PAZ (pásmo X, vlnová délka 31 mm). Tyto snímky v módu StripMap poskytují vysoké prostorové rozlišení 3x3 m, což je kritické pro identifikaci měřených bodů - trvalých odražečů (Persistent Scatterers – PS) na jednotlivých prvcích městské zástavby, jako jsou střechy, fasády či římsy.

Doplňkově jsou využívána data z družic Sentinel-1 (pásmo C, vlnová délka 56 mm). Ačkoliv disponují nižším rozlišením (20x5 m), jejich přínos spočívá v dostupnosti měření z protilehlých drah (vzestupná i sestupná). Větší incidenční úhel u těchto družic navíc zvyšuje citlivost na horizontální posuny ve směru východ-západ, což je nezbytné pro komplexní analýzu deformačního pole.

Tabulka 1: Základní parametry použitých družicových systémů

| Družicový systém | Rozlišení [m] | Vlnová délka [mm] | Typický interval [dny] |
|------------------|---------------|-------------------|------------------------|
| TerraSAR-X / PAZ | 3 x 3 | 31 (X-band) | 11-33 |
| Sentinel-1 | 20 x 5 | 56 (C-band) | 6-12 |

2.2 ZPRACOVÁNÍ PS-INSAR A SEGMENTACE ČASOVÝCH ŘAD

Zpracování bylo realizováno pomocí algoritmu PS-InSAR, který vyhodnocuje fázové rozdíly signálu u bodů s vysokou stabilitou odrazu v čase. Standardní postup byl modifikován zavedením pokročilé segmentace časových řad. Vzhledem k tomu, že ražba tunelů vyvolává nelineární pohyby (náhlé poklesy následované stabilizací nebo zdvihy v důsledku injektáží), není konstantní model rychlosti pohybu v čase dostačující.

Každá časová řada byla rozdělena na úseky, v rámci kterých byla statisticky testována konstantní rychlost a úroveň šumu. Tento přístup umožňuje eliminovat chyby při fázovém rozbalování (phase unwrapping), které jsou v pásmu X u velkých gradientů posunů častým problémem. Pro každý segment je odhadnuta aktuální rychlost, na kterou je při interpretaci geotechnických rizik kladen hlavní důraz. Výsledky byly referencovány ke stabilní oblasti města mimo zónu ovlivnění stavbou.

V rámci zpracování byly testovány různé konfigurace nastavení algoritmu PS-InSAR za účelem generování optimální hustoty detekovaných PS bodů: standardní (tisíce bodů na km²) – zahuštěné (více než 10 000 bodů na km²). Použití adaptované varianty algoritmu PS-InSAR, která umožňuje detekovat tzv. přechodně (dočasně) koherentní odražeče, umožňuje udržovat vysokou hustotu bodů v jednotlivých etapách monitoringu v prostředí s častými změnami povrchu (např. v důsledku stavebních prací).

2.3 ODVOZENÍ GEOTECHNICKÝCH HAZARDŮ

Pro odhad geotechnického rizika byly testovány a implementovány metriky vycházející z nerovnoměrného sedání a tenzních stavů. Hodnocení zranitelnosti budov (Peduto et al., 2021) využívá parametry jako diferenciální sedání a relativní rotaci, které jsou počítány z mračna PS bodů v rámci polygonů budov. Pro vyšší objekty byl navržen index náklonu založený na korelaci mezi odhadovanou výškou PS bodu a jeho rychlostí posunu. Komplexní přístup integruje InSAR data s geotechnickými informacemi o postupu ražeb, což umožňuje stanovit skóre hazardu relevantní pro inženýrskou praxi (Saeidi et al., 2009; Ezquerro et al., 2020).

3. OPERACIONALIZACE MONITORINGU

3.1 ETAPA 0: DRI PASPORTIZACE

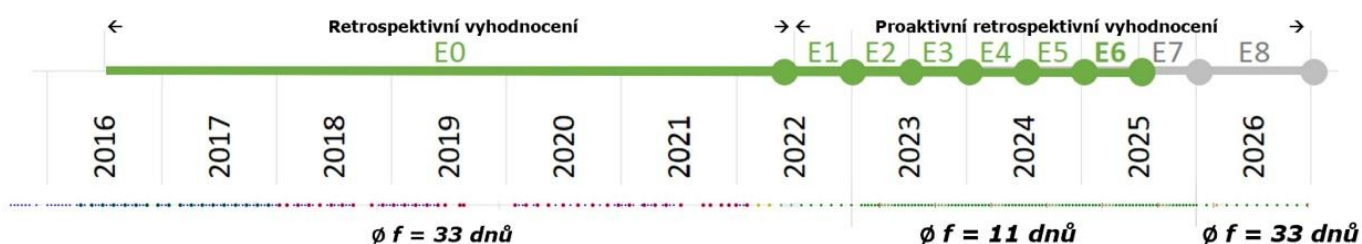
V roce 2022 byla provedena retrospektivní analýza archivních dat od roku 2016 do dubna 2022. Tato etapa, označovaná jako pasportizace, sloužila ke zdokumentování výchozí stability území. Bylo zjištěno, že některé plochy a objekty v zájmovém území vykazovaly poklesy již v předstihu, což bylo dáváno do souvislosti s jejich konsolidací nebo průzkumnými ražbami prováděnými v roce 2020. Stanovení „nulového stavu“ je nezbytné pro objektivní posouzení vlivu ražby a řešení případných sporů o příčiny poškození staveb.

3.2 ADAPTIVNÍ MONITOROVACÍ ETAPY

Aktivní monitoring probíhá v navazujících etapách (k 1.5.2026 bylo dokončeno 7 etap). Délka etapy a frekvence pořízení radarových snímků jsou nastavovány adaptivně podle postupu ražeb a očekávané intenzity ovlivnění povrchu.

- **Intenzivní monitoring:** V obdobích s nejvyššími rychlostmi postupu ražby je frekvence měření nastavena na 11 dní.
- **Standardní dohled:** V klidnějších fázích je frekvence snížena na 22 nebo 33 dní pro optimalizaci nákladů.

Uspořádání jednotlivých fází je patrné z časového rozvržení na Obrázku 1. Celková plocha monitorovaného území zahrnuje jádrou zónu ovlivnění (AOI) o rozloze cca 0,5 km² a širší okolí s půlkilometrovým pásmem. Součástí dodávky výsledků na konci každé etapy je i jejich interferometrická a geotechnická interpretace provedené v součinnosti s dodavatelem komplexního GTM.

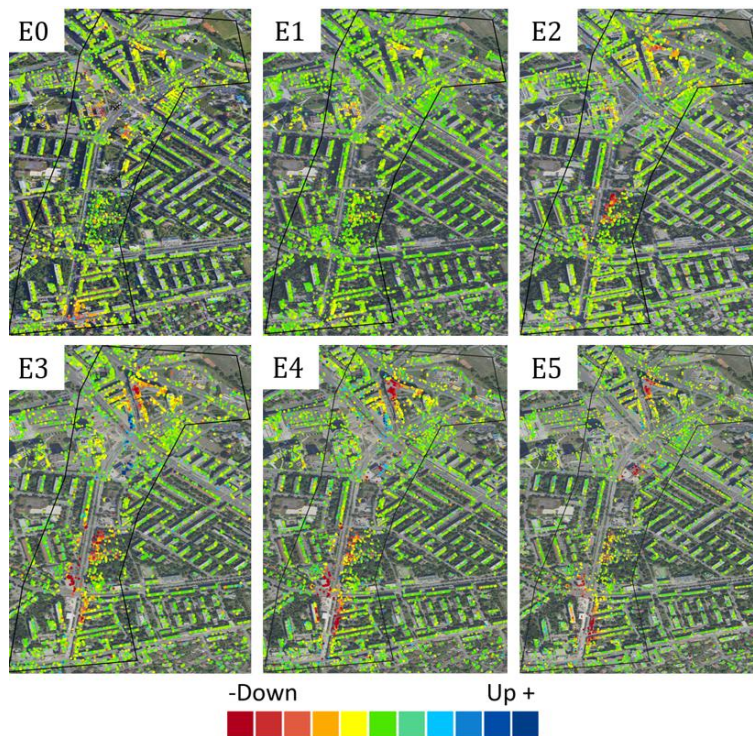


Obrázek 1: Časové rozvržení etap DRI monitoringu a frekvence radarových měření v průběhu výstavby.

4. VÝSLEDKY A DETEKCE GEOTECHNICKÝCH RIZIK

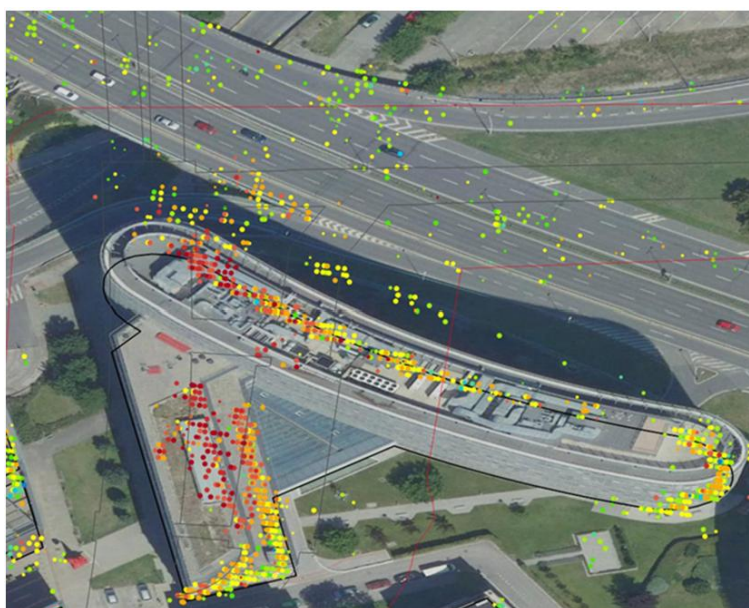
4.1 VERTIKÁLNÍ DEFORMAČNÍ POLE (TERRASAR-X/PAZ)

Na konci každé monitorovací etapy jsou vyhodnoceny mapy rychlostí pohybů v linii pohledu (LoS) ze systému TerraSAR-X/PAZ. Tyto výsledky dokumentují prostorový rozsah a dynamiku poklesových kotlin vyvolaných ražbou hlavních traťových tunelů. Výsledky dokládají, že v oblastech nad čelbou dochází k nárůstům rychlostí poklesů, které po průchodu ražby postupně odeznívají. Analýza nulté etapy navíc zpětně odhalila oblasti lokálních nestabilit souvisejících s dřívějšími ražbami šachet a štol (Obrázek 2).



Obrázek 2: Mapy rychlostí pohybů v LoS z TSX/PAZ pro etapu 0 a monitorovací etapy 1-5 dokumentující vývoj svislých deformací.

Vysoká hustota detekovaných PS bodů je klíčová pro spolehlivou detekci nerovnoměrného sedání v rámci půdorysu budov, a následné odvození geotechnických rizik. Příklad rozložení bodů na konkrétním stavebním objektu je uveden na Obrázku 3.



Obrázek 3: Vizualizace PS bodů na budově 11.B15 v zahuštěné variantě zpracování z TSX/PAZ pro analýzu diferenciálního sedání.

4.2 ANALÝZA NÁKLONŮ BUDOV

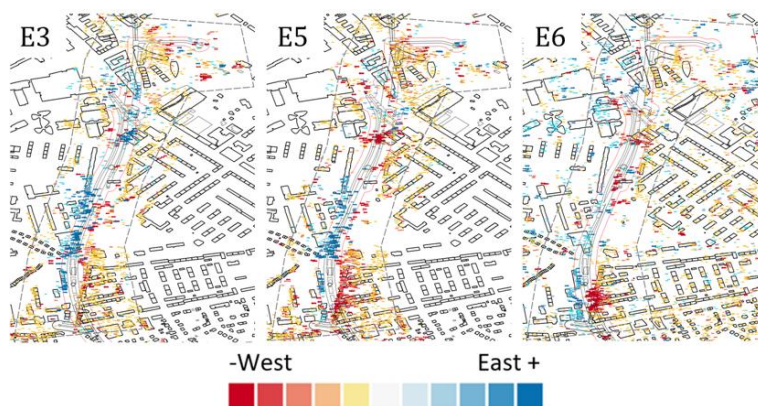
Významným rizikem při ražbě v městské zástavbě je diferenciální sedání, které může vést k náklonům budov. Pro detekci tohoto jevu byl vyvinut speciální indikátor založený na korelaci mezi výškou InSAR bodu na objektu a jeho rychlostí pohybu. U budov, které jsou vystaveny náklonu, je patrný statisticky významný rozdíl mezi posuny měřenými u paty objektu a na jeho střeše či horních podlažích.

Tento efekt byl pozorován zejména u několika patrových budov v ulici Na Strži. Vzhledem ke geometrii snímání z družice TerraSAR-X, která má strmý úhel pohledu, se náklon budovy směrem od satelitu projevuje jako zdánlivý nárůst svislého poklesu, a obráceně při náklonu směrem k satelitu. Tento

poznatek byl klíčový pro správnou interpretaci dat, kdy čistě geometrický přepočít měřené rychlosti z LoS do vertikálního směru vedl k nadhodnocení reálného sedání o několik milimetrů.

4.3 HORIZONTÁLNÍ DEFORMAČNÍ POLE

Doplňkové zpracování dat z družice Sentinel-1 umožnilo dekompozici vektoru posunu na vertikální a horizontální (východo-západní) složku. Horizontální deformační pole bylo analyzováno na konci vybraných etap. Výsledky potvrdily, že objekty umístěné na hranách poklesové kotliny jsou vystaveny horizontálním pohybům (Obrázek 4) a že rozsah zón vystavených horizontálních pohybů se v čase (mezi etapami) mění.



Obrázek 4: Vybrané mapy horizontálních rychlostí pohybů odvozené dekompozicí měření z družice Sentinel-1 pro etapy 3, 5 a 6.

4.4 GEOTECHNICKÉ SKÓRE RIZIKA

Na základě naměřených dat bylo pro každou budovu v AOI vypočteno agregované skóre geotechnického rizika. Toto skóre zohledňuje:

- Nerovnoměrnost sedání.
- Aktuální rychlost pohybu na konci etapy.
- Akceleraci pohybu mezi segmenty časové řady.

Tyto metriky jsou integrovány do mapových výstupů v online aplikaci InSARviz, která slouží pro interaktivní práci s výsledky DRI z jednotlivých etap monitoringu.

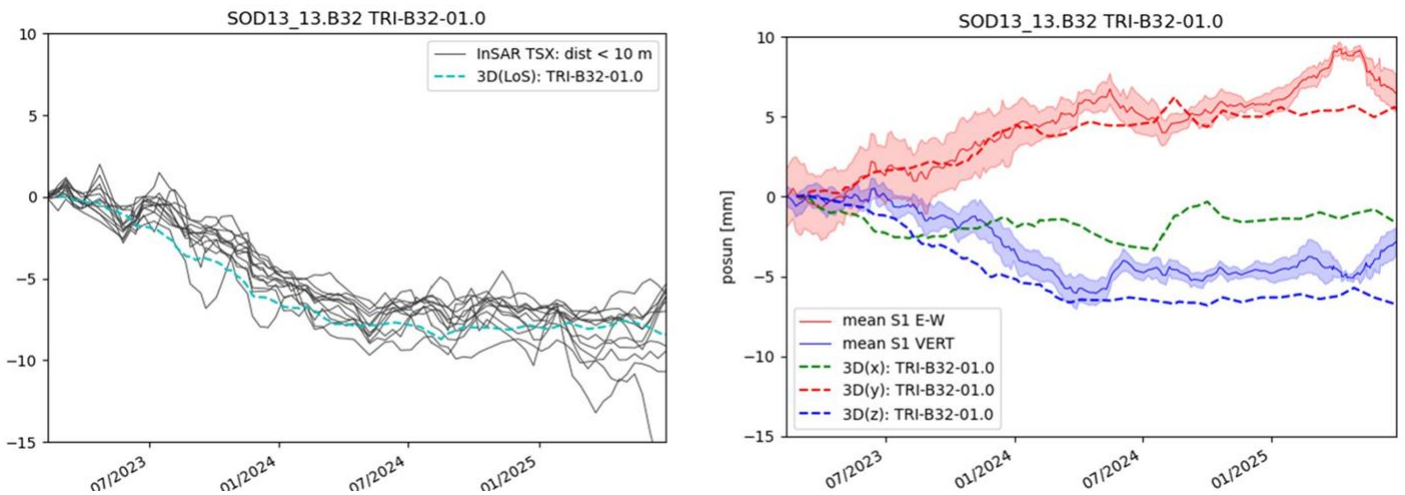
5. VALIDACE VÝSLEDKŮ

5.1 POROVNÁNÍ S PŘESNOU NIVELACÍ

Validace InSAR měření geodetickými metodami byla prováděna průběžně. Při srovnání poklesů odvozených z InSAR s daty z přesné nivelace byla zjištěna shoda v trendech, avšak s lokálními odchylkami. U budov na východní straně zóny ovlivnění v ulici Na Strži činily nesrovnalosti až 3–4 mm / rok ve vertikální rovině. Analýzou bylo potvrzeno, že tyto odchylky jsou způsobeny vlivem horizontálních posunů a náklonů budov, které metoda InSAR detekuje na úrovni střech, zatímco nivelační značky jsou osazeny u paty objektů.

5.2 SROVNÁNÍ S 3D TRIGONOMETRIÍ

Kvantitativní shoda byla potvrzena i porovnáním s trigonometrickým měřením. Příkladem je objekt 13.B32, kde časové řady InSAR věrně kopírují průběh pohybů naměřených geodeticky (viz Obrázek 5). Rozdíly v absolutních hodnotách jsou vysvětlovány odlišnou výškovou polohou měřících bodů. InSAR body na horní části fasády a střechy vykazují výraznější vodorovné pohyby (náklony) než body v úrovni prvního nadzemního podlaží, kde jsou osazeny trigonometrické značky.



Obrázek 5: Časové řady pohybů z TSX/PAZ a 3D trigonometrie po převodu do směru LoS; S1 a 3D trigonometrie ve směrech x. y. z pro objekt 13.B32

6. DISKUSE A ZÁVĚRY

Nasazení MT-InSAR v rámci výstavby metra D potvrdilo, že tato technologie je plnohodnotným doplňkovým měřicím nástrojem s unikátními vlastnostmi. Komplexní vyhodnocení dosavadních etap dovedlo k formulaci řady klíčových benefitů:

- **Synoptičnost a plošný rozsah:** Na rozdíl od bodových geodetických měření poskytuje InSAR ucelený obraz o deformacích a umožňuje jejich reálné vymezení v rozsáhlém území. Bylo doloženo, že metoda je schopna detekovat poklesové kotliny i mimo oblast primární zóny projektovaného ovlivnění. Tyto poklesy často souvisí se změnou hydrogeologických poměrů v důsledku ražeb a stavebních prací, a mohou se projevit ve značné vzdálenosti od místa ražby.
- **Retrospektiva a pasportizace:** Schopnost „vrátit se v čase“ a vyhodnotit archivní data od roku 2016 umožnila objektivně zpětně stanovit nulový stav území. Tato pasportizace je zásadní pro odlišení vlivů stavby od dřívějších deformačních procesů, případně může vnést cenné poznatky o stabilitě území před konvenční pasportizací již ve fázi projektování tunelové stavby.
- **Hustota a detail měření:** Využití vysokého rozlišení dat TerraSAR-X a přesnost měření dovoluje sledovat reakce jednotlivých stavebních objektů a detekovat lokální anomálie uvnitř půdorysu budov, které by standardní měření u paty objektů nemusela podchytit.
- **Ekonomická efektivita a škálovatelnost:** Metoda nenahrazuje, ale doplňuje konvenční metody měření. Možnost adaptivního nastavení frekvence snímání v závislosti na postupu ražby, hustota měření a synoptičita mohou pomoci zefektivnit řízení nákladů v rámci komplexního GTM. při zachování schopnosti zachytit dynamické trendy. DRI monitoring okrajových částí designované plochy ovlivnění nebo mimo ní může indikovat nutnost nasazení přesných konvenčních metod až v případě detekce významných pohybů nebo jejich zrychlení.
- **Detekce horizontálních složek:** Kombinace různých drah a dekompozice vektoru posunu poskytuje komplexní informaci o chování objektů, včetně náklonů a horizontálních napětí na hranách poklesových kotlin.

Integrace InSAR do geotechnického přispívá k lepšímu porozumění interakci mezi ražbou a nadloží v urbanizovaném prostředí díky rozšíření prostorového a časového kontextu. Nasazení v rámci GTM metra D prokázalo, že je metoda vhodná pro rutinní nasazení v náročných projektech podzemního stavitelství, a je doporučena pro rutinní nasazení i v dalších etapách rozvoje pražské dopravní infrastruktury.

LITERATURA

BARLA, G. et al. (2016). InSAR monitoring of tunnel induced ground movements. *Geomechanics and Tunnelling*. roč. 9, č. 1, s. 15-22.

EZQUERRO, P. et al. (2020). Vulnerability Assessment of Buildings due to Land Subsidence Using InSAR Data in the Ancient Historical City of Pistoia (Italy). *Sensors*. roč. 20, č. 10, 2749.

MILILLO, P. et al. (2018). Multi-temporal InSAR structural damage assessment: The London crossrail case study. *Remote Sensing*. roč. 10, č. 2, s. 287.

PEDUTO, D. et al. (2021). Full integration of geomorphological, geotechnical, A-DInSAR and damage data for detailed geometric-kinematic features of a slow-moving landslide in urban area. *Landslides*. roč. 18, s. 961-977.

SAEIDI, A., DECK, O. a VERDEL, T. (2009). Development of building vulnerability functions in subsidence regions from empirical methods. *Engineering Structures*. roč. 31, č. 10, s. 2275-2286.

SCOULAR, J. et al. (2020). Retrospective InSAR analysis of East London during the construction of the Lee Tunnel. *Remote Sensing*. roč. 12, č. 5, s. 749.

Titul, jméno, příjmení autora: Mgr. Jan Kolomazník

Pracoviště: GISAT s.r.o.

E-mail adresa: jan.kolomaznik@gisat.cz

Titul, jméno, příjmení autora: Ing. Ivana Hlaváčová, Ph.D.

Pracoviště: GISAT s.r.o.

E-mail adresa: ivana.hlavacova@gisat.cz

Titul, jméno, příjmení autora: Ing. Juraj Struhár, Ph.D.

Pracoviště: GISAT s.r.o.

E-mail adresa: juraj.struhar@gisat.cz

Titul, jméno, příjmení autora: Jakub Bohátka

Pracoviště: SG Geotechnika a.s.

E-mail adresa: Jakub.Bohatka@geotechnika.cz