

A műholdradar-interferometria alkalmazásának lehetőségei a kőbányászati szektorban

InSAR applications for quarry monitoring

KOVÁCS ISTVÁN PÉTER,
interferomertriaszakértő, DATelite Kft.,
7621 Pécs Jókai u. 35. E-mail: ikovacs@datelite.hu

RONCZYK LEVENTE,
műholdradar-szakértő, DATelite Kft., Pécs
ADORJÁN ERIK, földmérő mérnök, Colas Északkő Kft., Recsk

KESZTHELYI ÁDÁM, adatmérnök, DATelite Kft., Pécs
KOVÁCS DÁNIEL MÁRTON, tanársegéd, doktorandusz,
Pécsi Tudományegyetem, Térképészeti és Geoinformatikai Tanszék, Pécs

ORBÁN ZOLTÁN, okl. építőmérnök,
Pécsi Tudományegyetem, MIK Szerkezetek Diagnosztikája és Analízise Kutatócsoport, Pécs

KERTÉSZ BOTOND, földtudományi mérnök, Colas Északkő Kft., Recsk



A hazai kő- és kavicsbányászat az elmúlt évtizedekben fokozatos modernizáción ment keresztül. A bányaterek geometriai változásainak megfigyelésére számos, modern és széles körben elterjedt technológiát használnak, amelyek azonban térbeli, időbeli korlátokkal rendelkeznek. A mikrohullámú távérzékelési technológiák folyamatos, szisztematikus mintavételezést tesznek lehetővé, mivel napszaktól, időjárási körülményektől függetlenül minden egyes műholdáthaladás alkalmával biztosított a felszín felvételezése, így ideális monitoringrendszerként kínálnak. Cikkünkben átfogóan ismertetjük a műholdradar-interferometria kőbányászati felhasználásában rejlő lehetőségeket, valamint a technológia előnyein túl bemutatjuk ennek a megoldásnak a korlátait is. A COLAS Északkő Kft. Recsk bányaiüzemének stabilitás vizsgálatához 2017 és 2023 között az Európai Űrügynökség Copernicus programjának keretén belül készült Sentinel-1 műholdradar-felvételeket dolgoztunk fel négy pályageometriában interferometrikus kötegelő eljárásokkal. A feldolgozások alapján megállapítható volt, hogy pontosan mely üzemterületek mutatnak jelentősebb instabilitást, illetve az instabil üzemrészek mozgásai térben és időben hogyan változtak. Munkánk rávilágít arra, hogy a műholdradarmérések jól integrálhatóak a további stabilitás-vizsgálatokba és hozzájárulnak a geotechnikai vizsgálatok hatékony elvégzéséhez.

Kulcsszavak: InSAR, felszínmozgás, kőbánya, üzemeltetés

The mining industry in Hungary has been gradually modernised over the last few decades. State-of-the-art technologies are now used to monitor geometric changes in quarries. However, these technologies have spatial and temporal limitations. Microwave remote sensing technologies, on the other hand, allow for continuous and systematic observations. They provide surface acquisitions at each satellite pass, regardless of day and night or weather conditions. Therefore, they offer an ideal monitoring system. In this article, we provide a comprehensive overview of the potential of satellite radar interferometry for quarry monitoring, highlighting the benefits of the technology as well as its limitations. To monitor the stability of the Recsk mining operation of COLAS Északkő Ltd. between 2017 and 2023, we processed Sentinel-1 satellite radar images acquired within the framework of the European Space Agency's Copernicus programme in four orbital geometries using cutting-edge interferometric stacking techniques. The processing results allowed the identification of unstable parts of the quarry and the observation of their spatial and temporal development. Our research demonstrates that satellite radar measurements can be effectively integrated into stability studies and contribute to efficient geotechnical investigations.

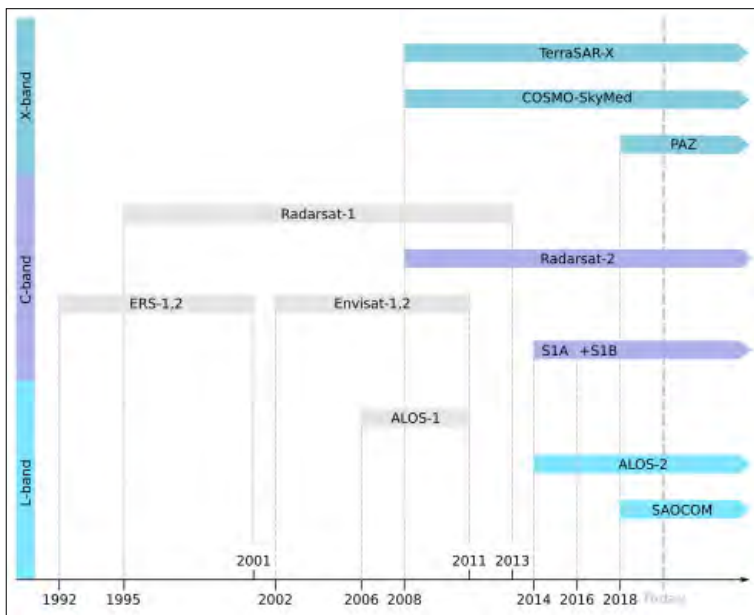
Keywords: InSAR, surface displacements, quarry, operation

1. Bevezetés és célkitűzés

A hazai kő- és kavicsbányászat az elmúlt évtizedekben fokozatos modernizáción ment keresztül. Igaz, ez nem olyan látványos és köztudott, mint az infokommunikációs technológia fejlődése, amely mindennapjaink szerves részévé vált, de ugyanakkor jelentős hatással van az építőipar termelékenységére. A külszíni bányaterekben a felszín átalakításával létrehozott mesterséges lejtők és sík felszínek stabilitása eltér az eredeti környezet állékonyságától, valamint a bányatérben végzett termelés további hatással van az esetleges felszín mozgásokra. A bányaterek geometriai változásainak megfigyelésére éppen ezért számos, mára már általánosan elterjedt technológiát használnak (Segalini et al. 2017), úgymint a földi geodézia, DGPS felmérés, drónokkal történő felvételezés (fotogrammetria), lézershakkelés stb. Emellett számos egyéb olyan tudományterület – pl. a geofizika – eszköztára is rendszeresen alkalmazást nyer, ami hozzájárul a stabilitási kérdések komplex vizsgálatához. Ellenben a felsorolt módszerek nem alkalmasak költségvetékonan minden üzembiztonsági kérdés megválaszolására. Alapvetően a hagyományos mozgásvizsgálati módszerek térbeli, időbeli korlátokkal rendelkeznek, amelyeknek az áthidalása jelentős költségvonzattal jár.

Az elmúlt három évtized tudományos és technológiai fejlődésének köszönhetően napjainkban már elérhetőek azok az űrtávérzékelési technológiák, amelyek hatékonyan hozzájárulhatnak a bányaterek alakváltozásának monitoringozásához. Külön ki kell emelni egy megoldást, a mikrohullámú távérzékelést, amely folyamatos, szisztematikus mintavételezést tesz lehetővé, mivel napszaktól, időjárási körülményektől függetlenül, minden egyes műholdáthaladás alkalmával biztosított a felszín felvételezése, így ideális monitoringrendszerként kínál. A SEASAT műhold 1978-as

rövid működését követően csak az 1990-es évek elejétől kezdve végeztek megfigyeléseket olyan speciális szintetikus apertúrájú radarok (SAR), amelyek segítségével a földfelszín milliméteres/centiméteres nagyságrendű elmozdulásai térképezhetővé váltak. Ezek közül az Európai Űrügynökség (ESA) European Remote Sensing Satellite (ERS) műholdcsaládja a '90-es években, majd annak utódja, az Envisat műholdcsalád a 2000-es években rendszeresen pásztázta a földfelszínt. A mikrohullámú felvételeik napjainkban is jól használhatóak retrospektív elemzésekhez, ha egy adott terület, bánya vagy egyedi objektum több évtizedre visszanyúló mozgástörténetét szeretnénk feltárni (Dobos et al. 2022). 2014-ben, a Copernicus program kereteiben felbocsátott Sentinel-1 műhold örökölte az ERS és Envisat műholdak C hullámhosszon (5,4 GHz) működő, már továbbfejlesztett szenzorát (Kovács et al. 2022). Az új műhold(család) immáron nagyobb térbeli felbontással (15 m) és frekvenciát (6–12 napos) visszatérési idővel, két (le- és felszálló) pályageometriából rendszeresen felvételezi hazánk teljes területét. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az ország egy adott tetszőleges pontját már több százszor felvételezték a Sentinel-1 műholdak (Ronczyk et al. 2022). Az ESA adatdisszeminációs politikájának köszönhetően mára ezek a felvételek szabadon hozzáférhetőek, akár csak a korábbi szenzorok adatai is. A 2000-es évektől megjelenő nagyobb térbeli felbontást biztosító (X és L hullámhosszon dolgozó) szenzorok felvételezése ezzel szemben csak néhány frekvenciát helyen rendszeres hazánkban, és a felvételek beszerzése jelentős költséggel is jár (1. ábra). Elmondható, hogy a kezdeti tudományos (Proof of Concept) küldetést az ERS műhold képviselte. Ennek biztató eredményei több kereskedelmi és katonai műhold pályára állítását eredményezték. A technológiát továbbfejlesztő a Sentinel-1 műhold után, napjainkban egyre



1. ábra. A napjainkban elérhető, szabadon hozzáférhető és kereskedelmi műholdak

több vállalkozás épít kereskedelmi műholdradarflotákat.

A felvételezést végző szenzorok innovatív megoldásai mellett a feldolgozási technikák és algoritmusok szintén jelentős fejlődésen mentek keresztül. A '90-es években kifejlesztett interferometrikus eljárásokkal (SAR interferometria = InSAR) domborzatmodellek (DEM) készültek, valamint nagy kiterjedésű és általában több centiméteres elmozdulásokat térképeztek (differenciálinterferometria = DInSAR). A DInSAR-eljárások továbbfejlesztett változataiként születtek meg azok a kötegelő eljárások, amelyeket

ma a felszín kismértékű, lassú (maximum néhány cm/éves sebességgel mozgó) elmozdulásainak nagy pontosságú (az éves mozgássebesség pontossága gyakran szubmilliméteres) meghatározásához használunk. Ezek közül két legalapvetőbb kötegelési eljárás az állandó szórópontok módszere (Persistent Scatterers = PS) és az osztott szórópontok módszere (Small BAseline Subset). Ezeket azóta már számos, a fentiek kedvező tulajdonságait ötvöző hibrid algoritmus (SqueeSAR, E-PS, E-SBAS stb.) fejlesztése követte. Azonban a PS és SBAS eljárások napjainkban is elfogadott sztenderdek, amelyek használata széles körben elterjedt.

Cikkünk célja, hogy átfogóan ismeresse a műholdradar-interferometria kőbányászati felhasználásában rejlő lehetőségeit, valamint a technológia előnyeinek túl bemutatassuk ennek a megoldásnak a korlátozottságát azzal a szándékkal, hogy a szakma minél részletesebb betekintést kapjon a mindennapi felhasználásról.

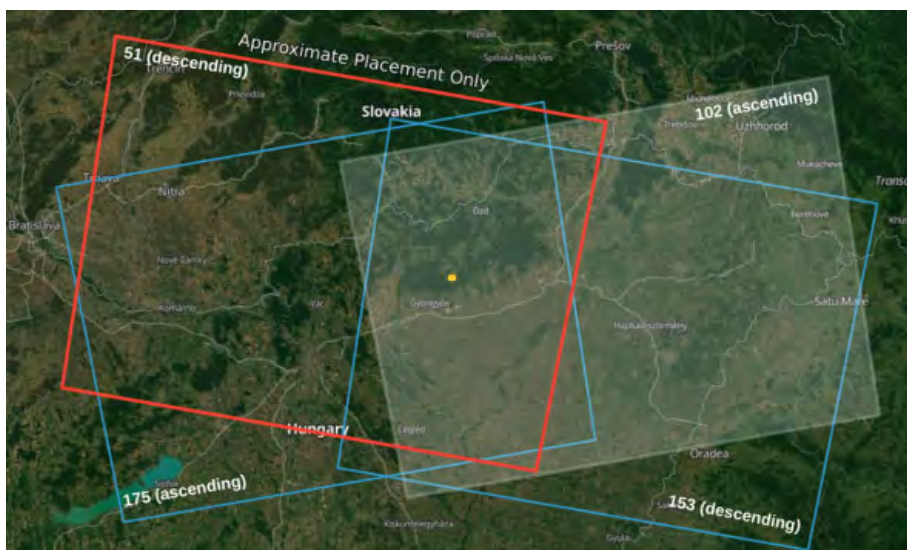
2. Módszertan

2.1. A vizsgálati terület bemutatása és problémafelvetés

A Colas Északkő Kft. az elmúlt években jelentős felszínmozgást észlelt a recski bányüzemében (2. ábra), amely befolyásolta annak mindennapi működését és a megnövelte a karbantartási költségeket. Az üzemet



2. ábra. A COLAS Északkő Kft. recski bányüzeme és annak területi felosztása



3. ábra. A felvételek által lefedett terület és relatív pályaaazonosítójuk

2016 végén korszerűsítették, jelenlegi formájában 2017 áprilisa óta működik. Az átalakítás során megújult a teljes bányauzem, a feldolgozó berendezések, az osztályozó és a futószalagpályák. Átalakult a depó tér, a szervizutak és új mérlegház került kialakításra. A szinte mindenre kiterjedő terep- és üzemrendezés sokkal hatékonyabb termelést és működést tett lehetővé. Az átfogó változások új térszerkezetet eredményeztek a bányauzemben, aminek a felmérése, dokumentálása a hatályos szabályozások szerint megindult. Az új kompakt technológia megbízható működése mellett elkezdtek jelentkezni olyan nem technológiai eredetű problémák, amelyeket az üzemeltető a bányatelek földtani, geotechnikai állapotával hozott kapcsolatba.

A működési rendellenességek a bányatelek technológiával érintett térszínein jelentek meg, növelve az alapanyag-termelés költségeit és kockázatát. Az észlelt kedvezőtlen változások sok esetben nem közvetlenül jelentkeztek, és nem voltak olyan egyértelmű jelek, amelyek rávilágítottak volna e változások valódi okára. A szerteágazó bizonytalanságok kezelésére a hagyományos módszerek nem voltak alkalmasak, mert nem volt olyan hatékonyan bevethető módszer, amely a teljes bányauzemre megbízható méréseket, számszerű adatokat eredményezett volna, és mindemellett képes lett volna a 2017-től kezdődő folyamatok, problémák térbeli és időbeli dinamikáját átfogó-

an feltárni. Ilyen kihívások esetén a műholdradarok által biztosított InSAR-felmérés képes érdemi adatokat szolgáltatni, és olyan támogatást nyújtani, ami problémák szisztematikus kezelését segít elő. Ennek a felismerésnek köszönhető a Sentinel-1 műholdradar alkalmazása a bányauzem stabilitásvizsgálata során. A fő elvárás egy térben minden üzemszre kiterjedő, időben pedig az új bányauzem kialakításáig visszamenő felmérés volt.

2.2. SAR-adatfeldolgozás

2.2.1. Az InSAR-elemzéshez használt adatok

Az InSAR-elemzéshez a Sentinel-1 műhold (S1) C-sávon készült felvételeit használtuk két felszálló (műholdpálya-azonosító: 175 és 102) és két leszálló (műholdpálya-azonosító: 51 és 153) geometriában (3. ábra). A felvételeket az Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/>) Vertex szerveréről töltöttük le. Az adatok idősora körülbelül 5,9 évet ölelt fel (1. táblázat).

A felvételek az idősor kezdetén hatnaponta készültek, azonban a Sentinel-1B műhold 2021.12.23-i meghibásodása után a felvételezési gyakoriság 12 napra csökkent. Ez utóbbi tényről függetlenül a felvételek időbelisége ideálissá teszi az adatokat az InSAR-elemzéshez.

1. táblázat. Az elemzés során felhasznált felvételek adatai

Műholdpálya száma	Kezdő dátum	Végdátum	Időbeli lefedettség	Felvételek száma
51	02. 04. 2017	12. 02. 2023	~5.9 év	307
102	05. 04. 2017	15. 02. 2023		318
153	03. 04. 2017	27. 03. 2023		311
175	04. 04. 2017	08. 02. 2023		320

2.2.2. Az InSAR-adatfeldolgozás módszertana

A recski bányauzemben zajló elmozdulások elemzéséhez a fent említett SAR-felvételeken az SBAS és PS kötegelő eljárásokat futtattunk. A két algoritmus alkalmazása nagyban függ a helyszíni körülményektől és a vizsgált objektumoktól. A bánya összetett szerkezete és a megrendelő speciális, különböző típusú célpontokra fókuszáló igénye miatt mindkét eljárást igénybe vettük. Ezek a módszerek a különböző típusú szórópontok (állandó, osztott) detektálásán keresztül jól kiegészítik egymást, együttes alkalmazásukkal a bányaterek komplexen térképezhetőek.

A legkorábban kifejlesztett kötegelő algoritmus az állandó szórópontok (persistent scatterers = PS) módszere (Ferretti et al. 2000, Ferretti et al. 2001). Az eljárás olyan PS szórópontokat azonosít, amelyek jól meghatározható geometriával rendelkeznek és fázisstabilitásuk hosszú távon fennáll (Pasquali et al. 2014). Ezek általában az épített környezet elemei (házak, egyéb épületek, szállítószalagok stb.) vagy stabil növényzettel nem borított felszínek, szálban álló kőzetkibukkanások stb. Az algoritmus eredményként a vizsgált terület szórópontjainak vektoros ponttérképe és az egyes pontok mozgástörténete kerül előállításra.

A Small-BASeline Subset (SBAS) algoritmust a PS megjelenését követően fejlesztették ki (Berardino et al. 2002). Az SBAS nagy pontossággal képes mérni a geometriailag kevésbé jól definiálható pixelek elmozdulását is (osztott szórópontok = distributed scatterers, DS). Tipikusan ilyen osztott szórópontként jelentkeznek a bányaterek növényzettel nem borított felszínei (bányaudvar, szervízutak, depóniák stb.).

Mindkét eljárás esetén az egyes szórópontok mért elmozdulásai az első felvételhez képest (referenciámérés 0 mm elmozdulással) kerülnek meghatározásra. Ezek az értékek a műholdpályához viszonyítva értelmezhetőek (látóirányú, sugárirányú elmozdulás = LOS). Amennyiben a fel- és leszálló pályageometriában detektált szórópontok között térbeli kapcsolat van, akkor ezek kombinációjából a kelet–nyugati és függőleges elmozdulások ugyancsak meghatározhatóak. A radarok geometriája miatt (azimut irányú haladás) az észak–déli elmozdulások kevésbé, csekély mértékben észlelhetők, csak a műholdpályára merőleges mozgáskomponensek rendelkeznek megfelelő karakterisztikával. Mindkét módszer szubmilliméteres pontosságot ér el az éves sebességértékek meghatározásában és ca. 5 mm-es pontosságot az idősoron belüli egyes műholdas mérések közötti elmozdulások vonatkozásában (Cigna et al. 2021).

A képfeldolgozáshoz az ENVI 5.6.3 szoftver SARscape 5.6.1 (sarmap SA, Caslano, Svájc) modulját, illetve az ebben elérhető PS és SBAS algorit-

musokat használtuk fel. A mérések pontosításához a bánya fotogrammetriai eljárásokkal előállított nagy felbontású domborzatmodelljét az általánosan alkalmazott SRTM-1 domborzatmodellbe integráltuk, és ezt a javított hibrid domborzatmodellt használtuk az elemzésekhez.

A térbeli lefedettség és az eredmények minőségének megőrzése érdekében az InSAR-méréseket összevetettük a bányauzem részegységeivel, és csak a legjobb eredményeket biztosító műholdpálya adataival folytattuk a vizsgálatokat. Mint említettük, ezek a két algoritmus különböző célpontok detektálására használatosak, ennek megfelelően a bányaudvar és a depótér elmozdulásának felmérése SBAS alapú, míg a technológia deformációit PS algoritmussal vizsgáltuk. A szervízút esetében mindkét megközelítés eredményeit figyelembe vettük.

3. Eredmények

3.1. Az InSAR-feldolgozások eredményeinek általános áttekintése

Az InSAR-feldolgozások eredményeit áttekintve, világossá vált, hogy a 153-as műholdpálya felvételei egyik megközelítéssel sem szolgáltatnak kielégítő térbeli lefedettséget. Mivel van egy olyan leszálló pálya (51-es), amely ráadásul sokkal jobb PS és DS pontsűrűséget biztosít, a 153-as műholdpálya felvételeit és az azokból számított eredményeket a továbbiakban nem vettük figyelembe. Az összes többi geometriát és feldolgozást megtartottuk további elemzésre (2. táblázat).

3.2. A technológiai terület elmozdulásainak felmérése

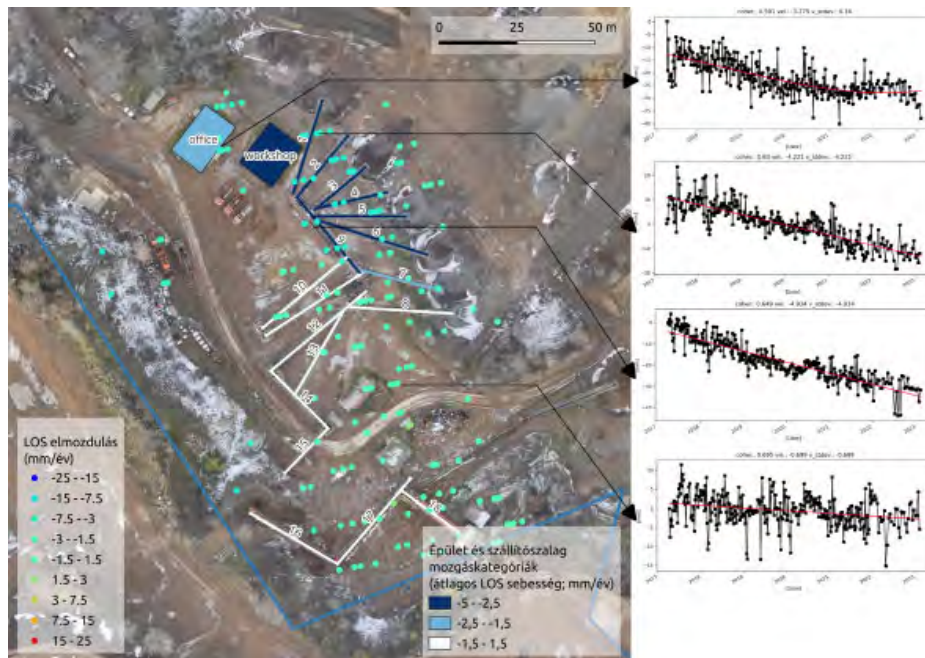
A vizsgálat során a bánya technológiai területe állt az ügyfél figyelmének középpontjában, mivel itt jelentős elmozdulásokat észleltek, amelyek mind az épületeket (iroda és műhely), mind pedig a szomszédos szállítószalagokat érintették. A helyszínt csak a 102-es és 175-ös felszálló geometriájú PS pontok fedik le, ezért itt csak LOS- (sugárirányú) adatok állnak rendelkezésre. Az 102-es és 175-ös geometriai adatai jól mutatták, hogy az éves PS sebességek +2 és –6 mm/év között váltakoznak, és a negatív elmozdulások (műholdtól való távolodás) gyakoriak a helyszínen.

Jól látható, hogy a szállítószalag-rendszer északi része intenzíven mozog, míg a déli része sokkal stabilabb (4. ábra). A LOS-sebességértékek itt –4 és –6 mm/év érték között ingadoznak. A szórópontok időbeli változását figyelembe véve megállapítható, hogy az irodaépület 2017 és 2020 között intenzíven mozgott, de a következő években stabilizálódott. Sajnos az idősor végén a szerkezet elmozdulásának ismételt gyorsulása mutatható ki (4. ábra), azonban egy a ké-

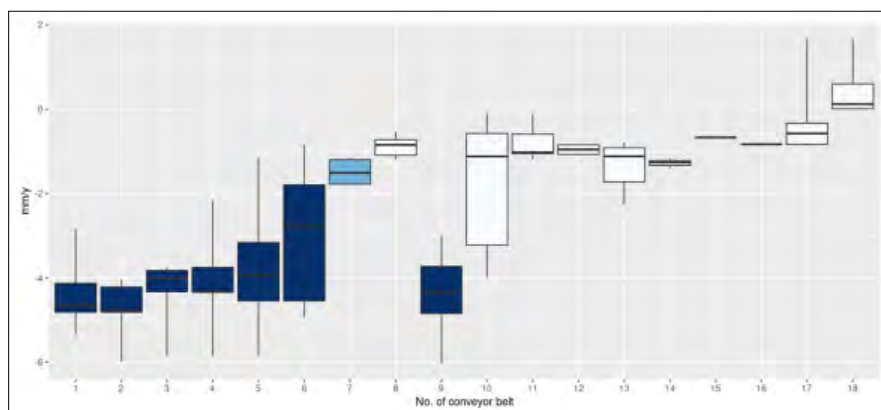
2. táblázat. A bánya különböző helyszínein alkalmazott InSAR-megoldások, és a felhasznált adatok

Relatív orbit (pályageometria-azonosító)	Algoritmus típusa	Technológia	Szervizút	Bányaudvar	Depótér
102	PS	✓	✓		
	SBAS				✓
175*	PS	✓	✓		
	SBAS		✓	✓	✓
153	PS				
	SBAS				
51*	PS		✓		
	SBAS			✓	✓

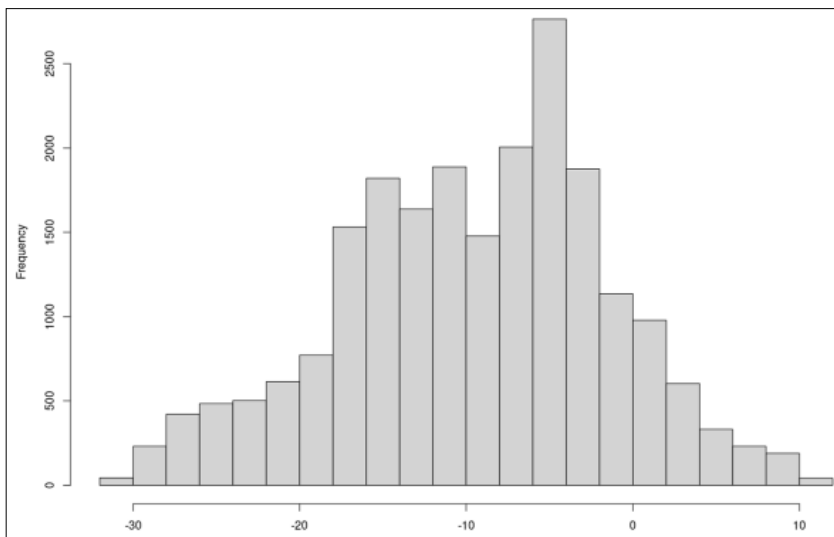
* A szervizúton az 51-es és 175-ös geometriájú adatok PS pontjait, míg a bányaudvarban ugyanezen geometriák SBAS LOS-adatait kombináltuk, így kelet–nyugati és függőleges elmozdulási adatok is rendelkezésre állnak.



4. ábra. A technológiai helyszín látóirányú elmozdulásai és a különböző szerkezetek elmozdulási kategóriái (LOS-adatok a 175 és 102 felszálló műholdpálya PS pontjai alapján)



5. ábra. A szállítószalagok éves elmozdulásának boxplotja. (Az ábra x tengelye a szalagok számozását mutatja, míg azok térbeli helyzete a 4. ábrán látható)



6. ábra. A technológiai helyszín kumulatív LOS-elmozdulásának hisztogramja (102 és 175 geometriájú PS pontok alapján)

sőbbi feldolgozás rávilágíthat majd arra, hogy ennek az elmozdulásnak a mértéke szignifikáns-e vagy sem. A területen mozgásban lévő egyéb elemek nem mutatnak további gyorsulási trendeket.

A szállítószalagokra eső szórópontok sebességének várható értéke alapján (5. ábra) jól azonosíthatók azok a szalagok, amelyek az elmúlt években intenzívebben mozogtak.

A szállítószalaghoz hasonlóan az irodát és a műhelyt is érintik az elmozdulások, és ezek jelentősen mozgó épületenként azonosítottuk.

Az éves elmozdulási sebességeken túl a szórópontok által megtett abszolút elmozdulások is jól tükrözik a technológia mozgástörténetét. Itt az elmúlt kb. 6 év kumulatív elmozdulásai -40 mm és $+10$ mm közé tehetőek (6. ábra). A legjelentősebb elmozdulási zóna a szállítószalag-rendszer északi részén alakult ki (7. ábra). Mivel csak látóirányú adatokat vizsgáltunk, az elmozdulások rendelkezhetnek vízszintes és függőleges komponensekkel is, melyek a tényleges elmozdulás mértékét befolyásolhatják.

Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a -30 mm-es érték kelet–nyugati elmozdulásra vagy süllyedésre egyaránt utalhatnak. Ez utóbbi sokkal valószínűbb, de nem bizonyítható teljes mértékben a leszálló geometriában detektálható PS pontok hiánya miatt. A további elmozdulási zónák kevésbé köthetőek a technológiát ténylegesen érintő mozgásokhoz, csak helyi jelentőséggel bírnak. A $+10$ mm-es elmozdulású déli zónában felszín kompaktálódása zajlik, a nyugati negatív elmozdulási zónát pedig valószínűleg a talajkúszás okozza.

3.3. A bányaudvarban zajló elmozdulások felmérése

A bányaudvar területe ideális volt az SBAS-mérésekhez a nyílt terep és a növényzet hiánya miatt.

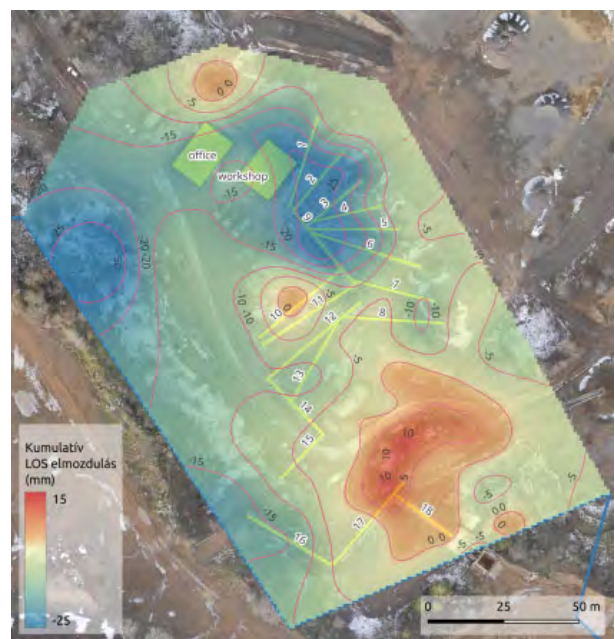
Mindkét geometriában számos mérési pontot azonosítottunk. A két geometria jó átfedésének köszönhetően a kelet–nyugati és függőleges elmozdulások kiszámítása is sikeresen megtörtént. A kelet–nyugati elmozdulások nagysága kevésbé tekinthető jelentősnek a bányaudvar területén. A függőleges elmozdulások a bányaudvarban -100 és $+30$ mm között fluktuálnak, míg az átlagos függőleges elmozdulás -30 mm körüli értéket mutat (8. ábra).

A bányaudvar északi részén lévő depónia 40 – 50 milliméternyit süllyedt, ami a felhalmozott anyag tömörödéséből fakadhat. A függőleges falak mentén (20 – 40 mm) a süllyedést ismét a falak

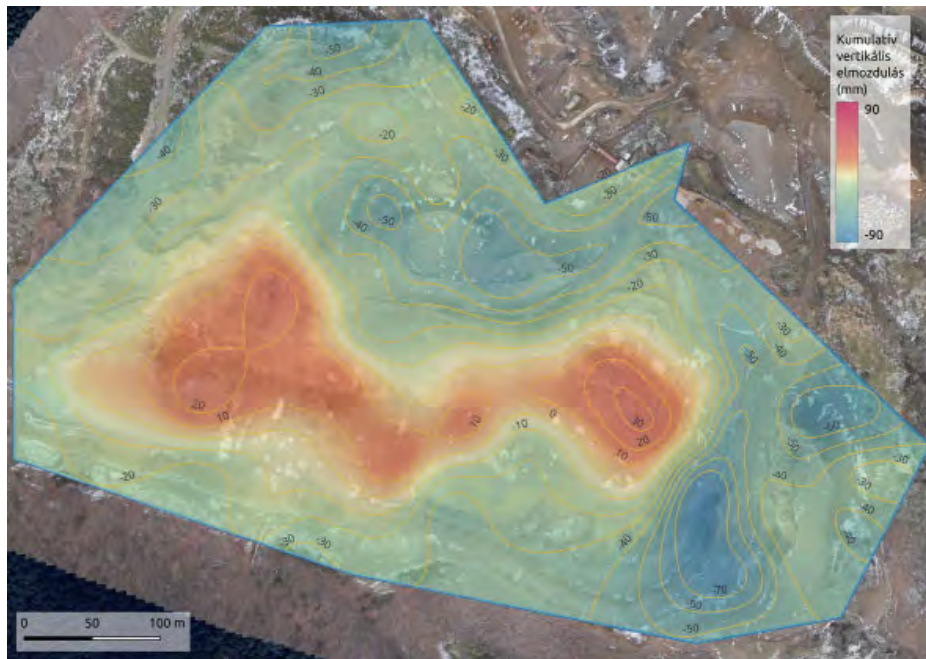
degradálódása okozhatja. A bánya délkeleti része azonban ezeknél gyorsabban (50 – 70 mm) süllyed. Érdekes jelenség, hogy a bányaudvar középső része 10 – 20 mm-t emelkedett az elmúlt hat évben. Ezen a terület az alapkőzet a felszínre bukkan, a detektált mozgást valószínűleg duzzadó agyagok okozzák.

3.4. A szervízút elmozdulásainak felmérése

A technológiai területen tapasztalt mozgásokon túl, a szervízút elmozdulásai voltak a legjelentősebbek a bányaudvarban. Az intenzív elmozdulások nyomain a terepi megfigyelések során is láthatóak; a felszín egye-



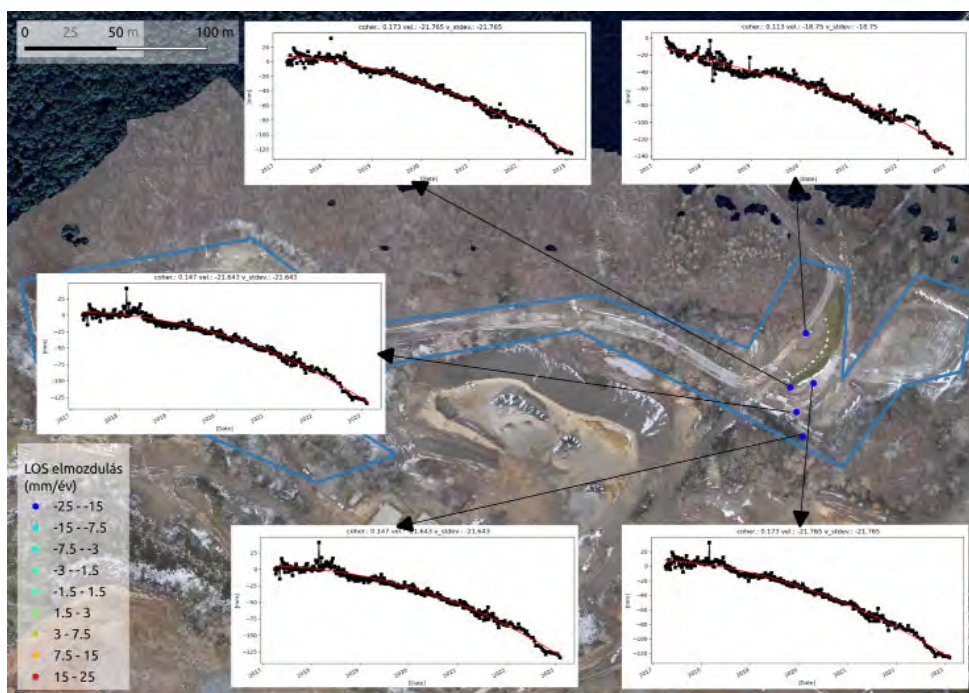
7. ábra. A technológiai telephely kumulatív látóirányú elmozdulása (102 és 175 geometriájú PS szórópontok alapján). A szállítószalagok sárga színnel vannak kiemelve



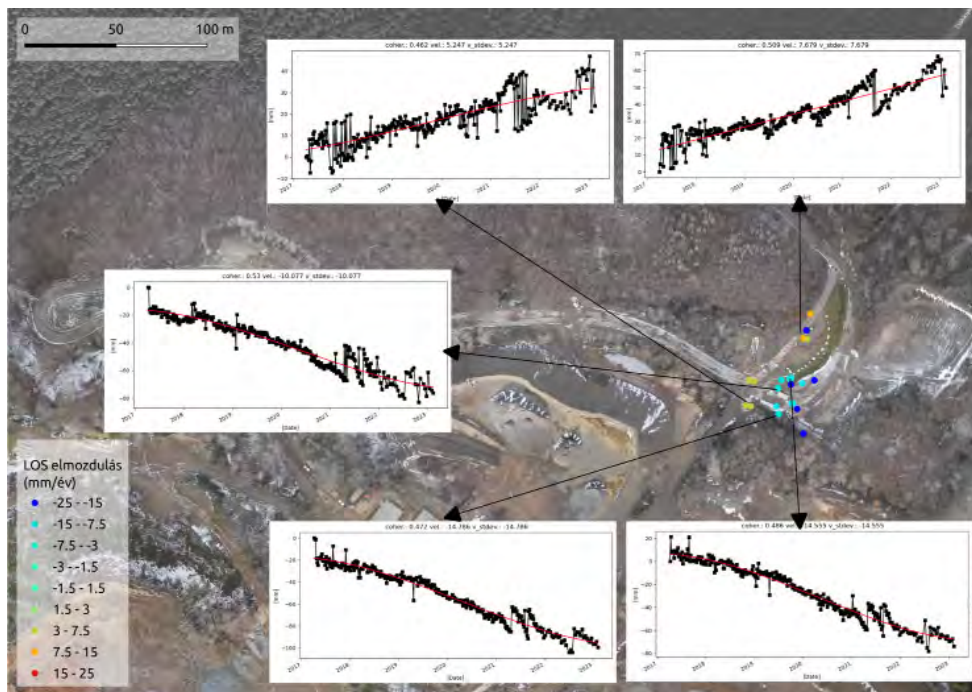
8. ábra. A kumulatív kelet–nyugati elmozdulások ábrázolása a bányaudvarban (az 51-es és 175-ös műholdpálya adatainak SBAS-feldolgozásai alapján)

netlenségei, valamint kiterjedt repedései gyakoriak voltak a mérlegház környezetében. Az S1 175 pályájának felvételeiből számított DS pontok egyértelműen mutatják ezeket az elmozdulásokat. Az éves DS sebességek -18 és -30 mm/év közötti értéket vesznek fel. A DS pontok relatív stabilitása 2018-ban megváltozott, és a mozgások ezt követően felgyorsultak. 2022 első negyedétől egy második gyorsulási szakasz is megfigyelhető, amely a közelmúltig tart (9. ábra).

A PS algoritmusnak köszönhetően a PS pontok itt is elérhetők a 102-es, 175-ös felszálló és az 51-es leszálló geometriában. Ugyanakkor fontos megemlíteni, hogy a PS-mérés pontossága itt rendre alatta marad az SBAS-énak. Jól látható, hogy az elmozdulásban kimutatható gyorsulási fázisokat a PS algoritmus nem tudta lekövetni, és így több fázisugrás is jelen van az idősorokban (10. ábra). Ezek a fázisugrások kontrollmérésekkel (pl. terepi felmérés) visszafejthetőek.



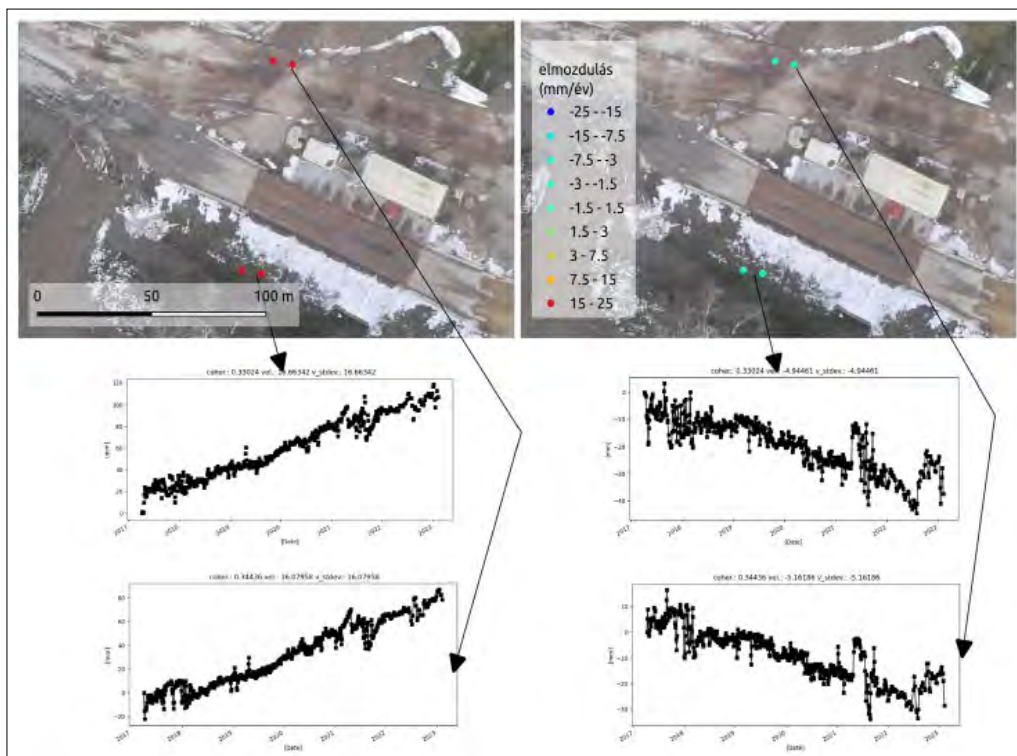
9. ábra. A szervizút DS szórópontjainak LOS-elmozdulásai (éves sebességértékek és idősorok a 175-ös felszálló műholdpálya felvételeinek SBAS-feldolgozása alapján)



10. ábra. A szervizút PS pontjainak LOS-elmozdulásai (éves sebességértékek és idősorok, a 175, 102 felszálló és 51 leszálló geometria alapján)

A fent említett mérések alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a legjelentősebb mozgások a mérlegháztól északra detektált keleti irányú elmozdulások (11. ábra). Ezek mintegy háromszor nagyobbak (összesen 120 mm-es mozgás kelet felé a teljes

vizsgált időszakban), mint a legnagyobb mért süllyedés (–40 mm). Továbbá, a keleti irányú csúszás is több mint kétszer nagyobb (összesen 80 mm), mint a süllyedés (–30 m), a mérlegházról délre eső területen. Ezek alapján a keleti irányú elmozdulások mértéke és



11. ábra. A kelet–nyugati (bal oldalon) és függőleges elmozdulások (jobb oldalon) a mérlegház körül (éves sebességértékek idősorai mm/év-ben) a szervizút PS pontjai alapján (175, 102 felszálló és 51-es leszálló geometriák adataiból összesítve). Az értékek alulbecsültek lehetnek

jelentősége még akkor is egyértelműen bizonyítható, ha figyelembe vesszük, hogy a mért értékek alulbecsültek lehetnek.

3.5. A depótér elmozdulásainak felmérése

Az inaktív depótér esetén a DS szórópontok elhelyezkedése egyenetlen teljes térbeli lefedettséget egyik algoritmus használatával sem tudtunk elérni, ezért a két geometria kombinációja nem lehetséges a bányüzem ezen részén. A LOS éves elmozdulási sebességek -60 és $+20$ mm/év között ingadoznak, a negatív értékek nyilvánvaló dominanciájával, amelyek mindkét geometriában megmutatkoznak. Van azonban egy délkeleti fekvésű lejtő, ahol pozitív irányultságú elmozdulásokat detektáltunk leszálló (51) geometriában. Ez utóbbit feltételezhetően az anyag lejtőn történő mozgása okozza, míg más DS pontok értékei tükrözhetik a deponált anyagok kompaktálódását vagy kúszását is.

4. Összefoglalás

Egyértelműen kijelenthetjük, hogy a műholdradar-interferometria érdemi hozzájárulást adott a bányüzemben zajló felszínmozgások térbeli kiterjedésével és időbeli dinamikájával kapcsolatban. Az InSAR-feldolgozások után megállapítható, hogy pontosan mely üzemterületek mutatnak jelentősebb instabilitást. Ezeknek változik-e a trendje; lineáris vagy gyorsuló, lassuló-e az elmozdulás. Ezek összegzésével következtethetünk arra, hogy melyek az üzemterület legkritikusabb pontjai. Az így kapott területeken milyen egyéb adatgyűjtési eljárásokkal tudunk hozzájárulni a bányában zajló felszínmozgások további pontosításához. A műholdradar segít tisztázni, hogy milyen cselekvési tervre van szükség ahhoz, hogy egy geotechnikus szakértő komplex felmérést tudjon végrehajtani a döntéshozók számára. Fontos kiemelni, hogy a vizsgálatból egyértelműen megállapítható, hogy a lejtős tömegmozgások nem veszélyeztetik a környező településeket. A legközelebbi lakott épületek a recski bánya esetében 1300 méterre vannak a bányüzemtől.

Ebből a nézőpontból nem maguk a recski üzembe tett megállapítások a lényegesek, hanem hogy egy új technológia hogyan épül be a kőbányászattal foglalkozó vállalat irányítási folyamatokba. További kutatás tárgyát kell képeznie annak, hogy a műholdradar adatok hogyan integrálhatóak egy már létező problémakezelési módszertanba. A mozgásadatok figyelembevételével egy bányüzem, milyen többlet információhoz jut a beavatkozások költségét, ütemezést tekintve. Példánkkal arra kívánunk rávilágítani, hogy egy összetett kihívás feltérképezésében minden egyes új megoldás – amely információt hordoz egy átfogó jelenség fő jellemzőivel kapcsolatban – hasznos eszköz lehet.

Mindemellett nem szabad elfelejteni, hogy az InSAR-monitoring rendszerrel adatvagyonot építünk, ami egyre komplexebb elemzésekre ad majd lehetőséget az adattudomány fejlődésével (művelési, meteorológiai, IoT-adatok fúziója). Gyakorlatban olyan intelligens bányüzemeltetési rendszerek fejleszthetők, amelyek hosszú távon képesek tárolni, integrálni és biztosítani a szakmai háttérrel egy cég fenntartható működéséhez. Az üzem működése nem egy-egy alkalmazott személyes tudásához kötődik, hanem mind horizontálisan, mind vertikálisan könnyen elérhető digitális rendszerben rögzítik az adatokat a cégen belül.

Végezetül megállapíthatjuk, hogy a műholdradar mérései geofizikai feltárással párhuzamosan, képesek olyan komplex képet kialakítani, amelyre alapozva a geotechnikai vizsgálat megindulhat a bányaterületen. Kizárhatók a stabil térszínek, így a költségesebb terepi munkák célzottabban kivitelezhetőek, gyorsabban megvalósíthatóak, mintha a teljes bányüzemet kellené feltárni.

IRODALOM

- Berardino P. et al. (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383.
- Cigna F. et al. (2021): Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR displacement velocities against GNSS and geodetic leveling monitoring data. *Remote Sensing*, 13, 4800.
- Dobos E. et al. (2022): Surface deformation monitoring and risk mapping in the surroundings of the Solotvyno Salt mine (Ukraine) between 1992 and 2021. *Sustainability*, 14, 7531. <https://doi.org/10.3390/su14137531>
- Ferretti A. et al. (2000): Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212.
- Ferretti A. et al. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- Kovács I. P. et al. (2022): Do we need a higher resolution? Case study: Sentinel-1-based change detection of the 2018 Hokkaido landslides, Japan. *Remote Sensing* 14, 1350. <https://doi.org/10.3390/rs14061350>
- Pasquali P. et al. (2014): Mapping of ground deformations with interferometric stacking techniques. In: *Land Applications of Radar Remote Sensing*. Holecz F., Pasquali P., Milisavljevic N. (eds.) InTechOpen: London, UK, pp. 231–258.
- Ronczyk L. et al. (2022) Nationwide, operational Sentinel-1 based InSAR monitoring system in the cloud for strategic water facilities in Hungary. *Remote Sensing* 14, 3251. <https://doi.org/10.3390/rs14143251>
- Segalini A., Carri A., Savi R. (2017): The role of geotechnical monitoring: state of the art and new perspectives. *Geotechnical Society of Bosnia and Herzegovina GEO-EXPO 2017 Sarajevo, October 26th and 27th, 2017.*