



Walter



Hein



Schröder

Erfolgreiche Implementierung eines flächendeckenden und effektiven Monitorings für das Lausitzer Braunkohlenrevier unter Einsatz der Radarinterferometrie

Dr.-Ing. Diana Walter, Senior Geospatial Solutions, TRE ALTAMIRA S.L.U., Barcelona, Spanien
Markscheider, Dipl.-Ing. Marko Hein, Leiter Markscheiderei, Lausitz Energie Bergbau AG, Cottbus

Markscheider, Dipl.-Ing. Cordula Schröder, Leiterin Geodatenmanagement, Lausitz Energie Bergbau AG, Cottbus

1. Einleitung

Zur Erfassung von Bodenbewegungen existiert eine Vielzahl geodätischer Messverfahren, sowohl terrestrische als auch satellitengestützte. Klassische terrestrische Methoden wie das Nivellement sind jedoch, insbesondere beim großflächigen Monitoring, mit hohem personellem und zeitlichem Aufwand verbunden. Angesichts steigender Personalkosten sowie einer sinkenden Verfügbarkeit von Fachkräften und Ingenieurdienstleistern (was die Verfahren kostenintensiv macht), gewinnt der Einsatz eines effizienten, flächendeckenden Monitorings zunehmend an Bedeutung.

Die satellitengestützte Radarinterferometrie (Interferometric SAR, kurz: InSAR) hat sich in den letzten 10 bis 15 Jahren weltweit in Bereichen wie Bergbau und Infrastrukturen als präzises Messverfahren etabliert, das eine kontinuierliche und aus der Ferne kontaktlose Überwachung von Bodenbewegungen ermöglicht. Ra-

darsatelliten können daher als unsere Vermesser von heute betrachtet werden.

Trotz der ständig wachsenden Zahl verfügbarer Radarsatellitenkonstellationen und der herausragenden, stetigen Weiterentwicklung der InSAR-Technologie in den letzten 25 Jahren bestehen bei einigen Nutzern weiterhin Bedenken hinsichtlich der Operationalität dieser „innovativen“ Messtechnik. Die rasche technologische Entwicklung und vor allem die Komplexität des Messverfahrens, aber auch die große Menge an Messdaten und daraus resultierenden Interpretationsmöglichkeiten, sind meist eine große Herausforderung für viele Anwender. Häufig genannte Gründe hierfür sind technologische Beschränkungen, hohe Datenkosten (insbesondere bei hochauflösenden Satellitendaten) und nicht selten auch unzureichende Nutzerkenntnisse. Infolgedessen kommen viele potenzielle InSAR-Nutzer

Das Lausitzer Braunkohlenrevier befindet sich im Wandel von der Braunkohlegewinnung zur Sanierung und Rekultivierung. Die effektive Überwachung dieses knapp 4.000 km² großen Gebietes ist für die tägliche Arbeit der Markscheiderei und der Abteilung Geotechnik des zuständigen Bergbauunternehmens von entscheidender Bedeutung. Um der Komplexität und den steigenden Anforderungen an die Überwachung, insbesondere zur frühzeitigen Erkennung von Gefahren, gerecht zu werden, werden seit mehreren Jahren interferometrische Messungen auf der Grundlage der Sentinel-1 Radarsatelliten des europäischen Copernicus-Programms durchgeführt. Die Messungen liefern wertvolle und präzise Informationen zu Bodenbewegungen in der gesamten Region. Die Ergebnisse werden für verschiedene operative Aufgaben und interne Fragestellungen genutzt, einschließlich Vorhersagen, die mit geotechnischen Modellvorhersagen verglichen werden können. Die Kombination von radarinterferometrischen Daten mit anderen Überwachungsinformationen und Expertenwissen ermöglicht verlässliche Entscheidungen, z. B. die frühzeitige Einleitung von Sicherheitsmaßnahmen. In diesem Beitrag werden Fallbeispiele vorgestellt, die den erheblichen Mehrwert der Radarinterferometrie für eine effektive Überwachung demonstrieren.

Successful implementation of area-wide and effective monitoring for the Lusatian Lignite Mining Region using radar interferometry

The Lusatian Lignite Mining Region is undergoing a transformation from lignite extraction to remediation and recultivation. Effective monitoring of this area, spanning nearly 4,000 km², is crucial to the daily work of the surveying and geotechnical department of the responsible mining company. To address the complexity and increasing demands of monitoring, especially for early hazard detection, interferometric measurements from the Sentinel-1 radar satellites of the European Copernicus program have been carried out for several years. The measurements provide valuable and precise information on ground movements across the entire region. The results are used for various operational tasks and internal questions, including predictions that can be compared with geotechnical model forecasts. The combination of radar interferometric data with other monitoring information and expert knowledge enables reliable decisions, e.g., the early initiation of safety measures. This article presents case studies that demonstrate the significant added value of radar interferometry for effective monitoring.

Schlagworte Keywords

Radarinterferometrie
Radar interferometry

Sentinel-1
Sentinel-1

Bodenbewegungen
Ground movements

Monitoring
Monitoring

Lausitzer
Braunkohlenrevier
*Lusatian Lignite
Mining Region*

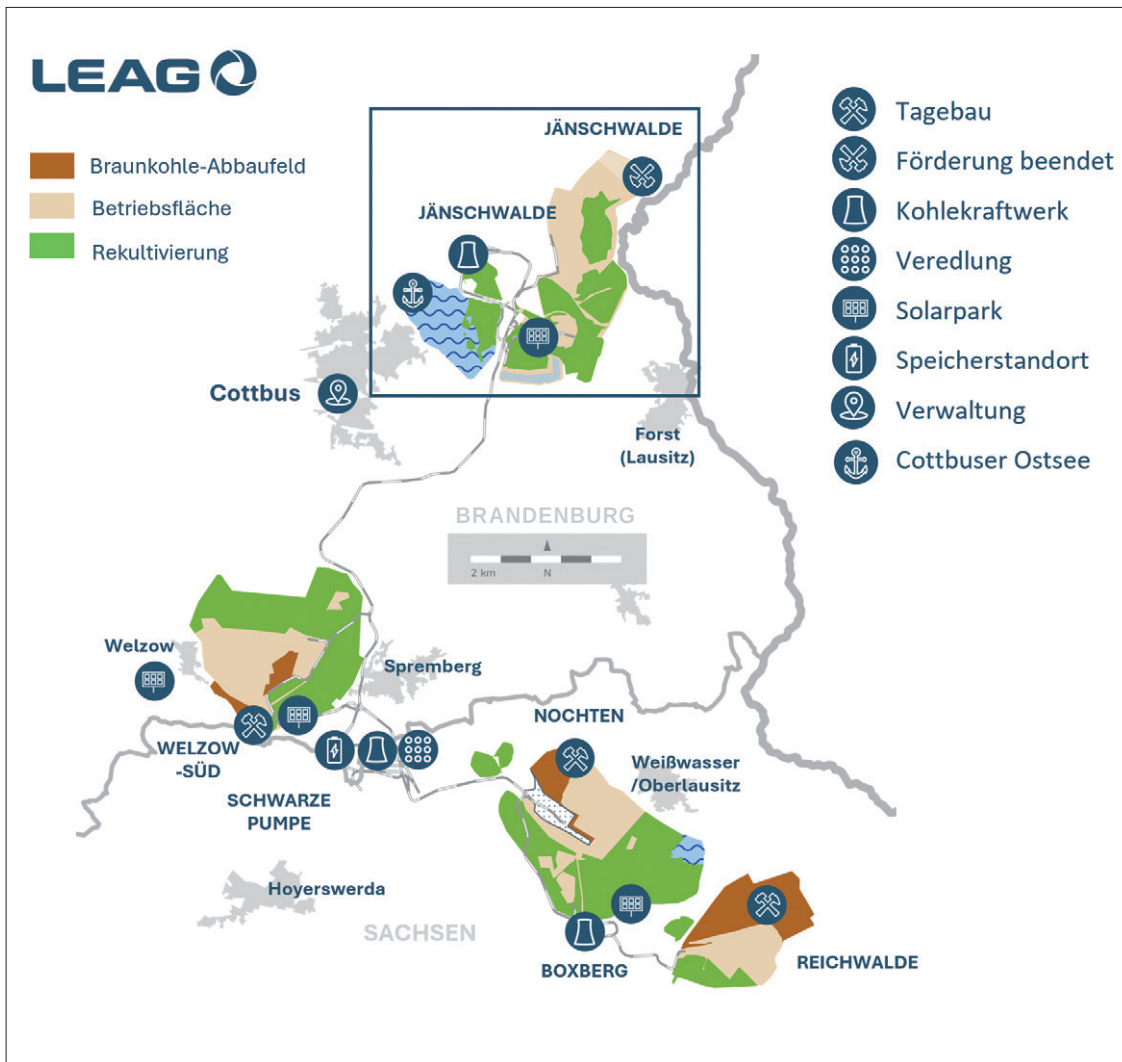


Abb. 1:
Betriebsflächen
und Energie-
Standorte der
LEAG in der Lausitz
(Stand: August
2025, © LEAG).

nicht über die Pilotprojektphase hinaus, was eine erfolgreiche Operationalisierung, d. h. die vollständige Implementierung in den Regelbetrieb, verhindert.

Für einen erfolgreichen operativen Einsatz der InSAR-Messtechnologie sind in der Praxis die kontinuierliche Aktualisierung der Messdaten, die sofortige Integration in bestehende Monitoringsysteme und die stetige, fachübergreifende Nutzung der Daten für unterschiedliche Fragestellungen entscheidend. Darüber hinaus stellen regelmäßige Schulungen der Datennutzer bezüglich der Weiterentwicklung von InSAR-Produkten und Bereitstellungsplattformen (Webportalen) – verbunden mit einer gewissen Portion Geduld sowie Technologie- und Innovationsbegeisterung – Schlüsselfaktoren für die Implementierung und Akzeptanz der Radarinterferometrie dar.

Dieser Artikel thematisiert die Herausforderungen für ein effektives geodätisch-geotechnisches Monitoring bei der Lausitz Energie Bergbau AG (LEAG) im Lausitzer Braunkohlenrevier und stellt gleichzeitig erste Erfolge bei der Implementierung der Radarinterferometrie in verschiedene operative Aufgaben vor.

2. Eine Landschaft im Wandel

Das Lausitzer Braunkohlenrevier (kurz: Lausitzer Revier) liegt im Osten Deutschlands und erstreckt sich

vom Südosten Brandenburgs bis in den Nordosten Sachsens (Abbildung 1), wobei es Teile der Ober- und Niederlausitz umfasst. Seit über 150 Jahren wird in dieser Region industriell Braunkohle gewonnen und verarbeitet. Der Abbau erfolgt aktuell noch in den drei aktiven Tagebauen Welzow-Süd (Brandenburg), Nochten und Reichwalde (Sachsen) durch die Lausitz Energie Bergbau AG (LEAG). Ende 2023 wurde im Tagebau Jänschwalde der reguläre Betrieb beendet und mit der Restraumgestaltung begonnen.

Nordöstlich von Cottbus befindet sich der ehemalige Tagebau Cottbus-Nord (1975–2015), der seit seiner Stilllegung zum größten See Brandenburgs, dem Cottbuser Ostsee, umgestaltet wird. Die Flutung, die seit April 2019 mittels Spreewasser (ca. 80 %) und Grundwasser (ca. 20 %) erfolgt, erreichte im Dezember 2024 infolge überdurchschnittlicher Regenfälle und einer entsprechend hohen Wasserführung in der Spree erstmals den Zielwasserstand von 62,5 m NHN. Damit gilt der Ostsee mit einer Fläche von etwa 19 km² und 26 km Uferlinie als vollständig geflutet.

Der landschaftliche Wandel in den Gebieten Cottbus-Nord und Jänschwalde wird in Abbildung 2 exemplarisch anhand von Sentinel-2 Satellitenaufnahmen des europäischen Copernicus-Programms dargestellt.

Die LEAG-Flächen unterliegen seit mehreren Jahren einem konsequenten Transformationsprozess: von der

Abb. 2:
Veranschaulichung
des strukturellen
Wandels anhand
von optischen
Satellitenbildern
vom 19.05.2017
und 12.08.2025
(© Copernicus
Sentinel data
[2025], Sentinel-2
L2A Daten) im
Bereich Cottbus-
Nord und
Jänschwalde (Lage
vgl. Abb. 1).



Kohlegewinnung hin zur Sanierung und Rekultivierung der Bergbauflächen, um diese durch nachhaltigen Umbau in einen nachbergbaulich nutzbaren Zustand zurückzuführen. Mit dem 2020 beschlossenen Kohleausstiegsgesetz endet auch die Braunkohlenförderung in der Lausitz spätestens bis 2038. Das übergeordnete Ziel dieser Transformation ist der nachhaltige Umbau der Flächen, Anlagen und Infrastrukturen zugunsten einer zukunftsorientierten Energieversorgung mit flexiblen Lösungen in einem skalierbaren Energiemix, der sogenannten Gigawatt Factory. Erste Bausteine sind bereits realisiert: Dazu zählen die Installation und Inbetriebnahme von Windparks und Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) zur Stromerzeugung sowie der Aufbau von Batterie-Großspeichern als flexible Kapazitäten für die Stromversorgung, wie in Abbildung 1 veranschaulicht.

3. Herausforderungen einer effektiven Überwachung

Die LEAG führt im Lausitzer Revier ein intensives Flächenmonitoring über eine Fläche von etwa 25.000 Hektar durch. Dies dient unter anderem als Grundlage für bergbauliche Stellungnahmen sowie zur Begleitung des Transformationsprozesses. Die Überwachung erstreckt sich auf über 100 bergbauliche Anlagen sowie auf zahlreiche Flächen, auf denen aktuell Windparks und PV-Anlagen mit einer Leistung von rund 270 MW (Quelle: LEAG, August 2025) errichtet werden. Eine effektive Überwachung eines so großen Areals ist für die tägliche Arbeit der Markscheiderei und der Abteilung Geotechnik der LEAG von essenzieller Bedeutung. Dabei ist insbesondere die Überwachung der Bodenstabilität und möglicher Bodenbewegungen mit Herausforderungen verbunden, die im Folgenden näher beleuchtet werden.

3.1 Fläche und Ressourcen

Im Lausitzer Revier führen die Abbau-, Sanierungs- und Wiedernutzbarmachungstätigkeiten zu charakteristisch sehr unterschiedlichen Bodenbewegungen. Deren Erfassung erfordert Messungen auf verschiedenen räumlichen (großräumig, objektbezogen) und zeitlichen (kontinuier-

lich, diskret) Skalen. Für ein Gesamtflächenmonitoring ist in der Praxis der Einsatz verschiedener Messsysteme sowie ein generell hoher Mess- und je nach Verfahren ein erheblicher personeller Aufwand notwendig. Angesichts der zunehmenden Personal- und Budgetbeschränkungen kann die Datenerfassung jedoch unzureichend sein. Um Gefahren frühzeitig zu erkennen und Risiken durch geeignete Gegenmaßnahmen zu minimieren, muss die Datenerfassung unter Kosten-Nutzen-Aspekten optimiert werden. Im Falle möglicher Schadensereignisse sind historische Messdaten oft von unschätzbarem Wert, um das Ursache-Wirkungs-Prinzip (Kausalität) nachzuweisen. Zudem erfordert die Bereitstellung von Informationen bei einem Ereignisfall meist höchste Dringlichkeit, was ein effizientes Monitoringsystem gewährleisten muss.

3.2 Zuverlässigkeit und Integration

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Datenerfassung ist die Zuverlässigkeit des Messsystems und der daraus gewonnenen Daten, was eine hohe Präzision unabdingbar macht. Beim Flächenmonitoring sind zudem die Qualitätsaspekte der räumlichen und zeitlichen Vollständigkeit von großer Relevanz, um beispielsweise bisher unbekannte oder auch nicht prognostizierte Bewegungsbereiche sicher zu erfassen. Zur Erfüllung dieser komplexen Anforderungen ist die Kombination verschiedener terrestrischer, luft- und satellitengestützter Messverfahren notwendig. Der eigentliche Nutzen der Daten entfaltet sich erst durch ihre Interpretierbarkeit (trotz der Datenkomplexität) und die integrierte Analyse in Verbindung mit Prognosemodellen. Dies ermöglicht einerseits die Verbesserung der Modelle und Vorhersagen und trägt andererseits zur Minimierung von Risiken bei.

3.3 Sicherheit und Pflichten

Das Thema Sicherheit ist ein zentraler Schwerpunkt der LEAG. Wie bereits dargelegt, ist die frühzeitige Erkennung instabiler Zonen sowie kritischer Bewegungsänderungen und Anomalien unerlässlich. Dies ist ein wichtiger Baustein für die sichere und zukunftsorientierte Wiedernutzbarmachung der Bergbaufolgeflächen. Das

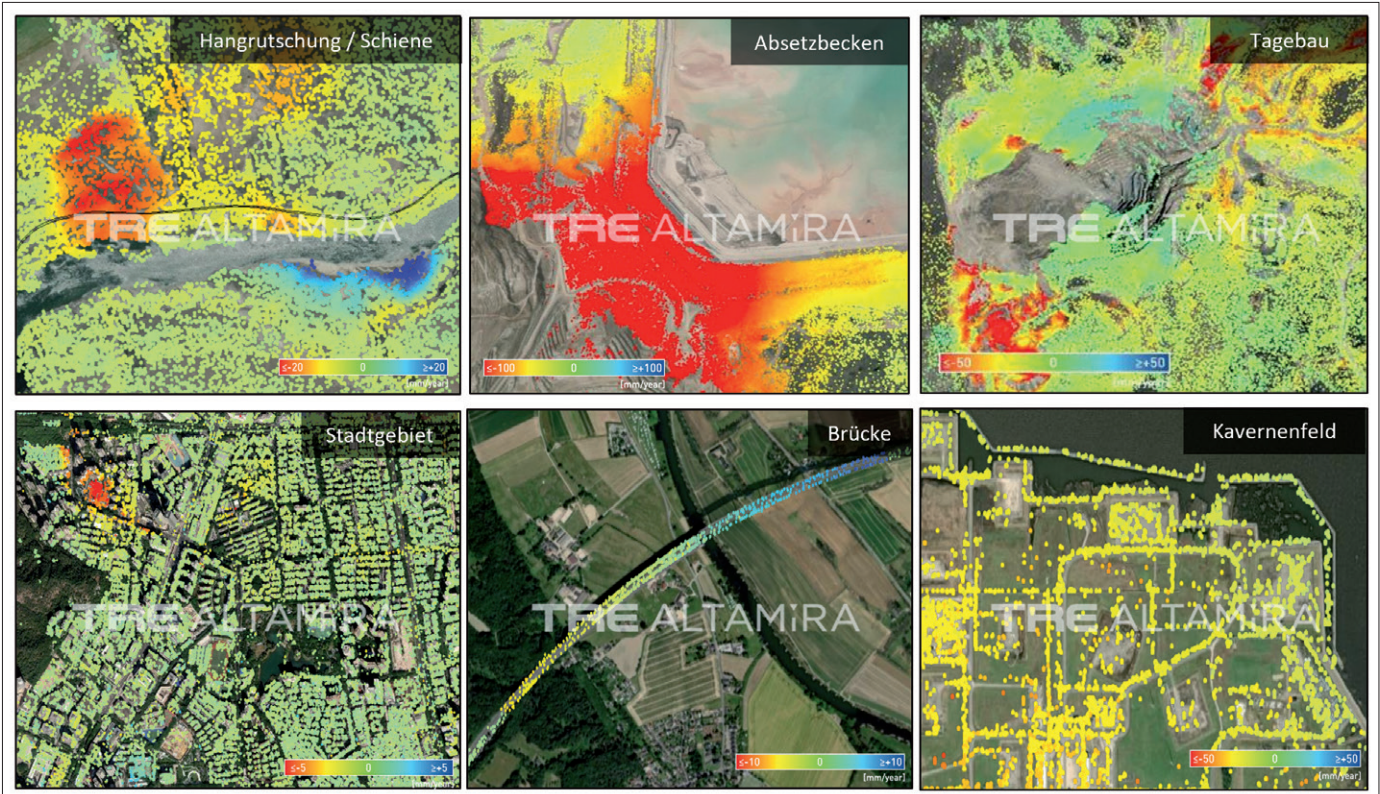


Abb. 3: Anwendungsbeispiele der Radarinterferometrie zur Überwachung von Bodenbewegungen.

Flächenmonitoring bildet die Grundlage für die operativen Tätigkeiten im Betrieb, insbesondere für die Dokumentation, die Risswerksführung und die Planungsverfahren. Angesichts zunehmender behördlicher Anfragen und Stellungnahmen ist der Bedarf an Monitoringdaten in den letzten Jahren gestiegen.

4. Radarinterferometrische Überwachung

4.1 Aktueller Stand zur InSAR-Technik

Die Radarinterferometrie (InSAR) hat sich in den letzten Jahren als effizientes Verfahren zur hochpräzisen und flächenhaften Erfassung von Bodenbewegungen etabliert. Aktuell sind mehr als 50 % der weltweiten Datennutzer Energie- und Bergbauunternehmen, die InSAR-Daten kontinuierlich auswerten lassen und zur Überwachung von Tagebauen und deren Anlagen sowie Absetzbecken (Tailings Ponds) sowie den Einwirkungsbereichen untertägiger Speicher- und Gewinnungsaktivitäten (z. B. Kavernenfelder) nutzen. Darüber hinaus hat sich die InSAR-Messtechnik in den letzten Jahren auch bei der Überwachung von kritischen Infrastrukturen (Verkehr, Wasser, Energie und Kommunen) als wichtiges Instrument für die Erfassung von Boden- und Objektverformungen etabliert. Sie kommt sowohl in der Planungs-, Vorbereitungs- und Bauphase als auch im laufenden Betrieb zum Einsatz (vgl. Abbildung 3). Die zunehmende Verfügbarkeit von Radarsatelliten, insbesondere seit dem Beginn des Copernicus-Programms der Europäischen Union im Jahr 2014 und die Bereitstellung von unter anderem frei zugänglichen Sentinel-1-Radardaten, haben die Nutzung von InSAR-Messungen stark gefördert, vor allem zur Überwachung ganzer Regionen und Länder. In gebirgigen

und alpinen Regionen ist InSAR zudem mittlerweile für die kontinuierliche und großflächige Überwachung von Rutschgebieten unverzichtbar.

Die InSAR-Messtechnik ist ein satellitengestütztes Fernerkundungsverfahren. Mithilfe aktiver Radarsensoren (SAR-Satelliten) misst sie Verformungen und Verschiebungen des Bodens und darauf befindlicher Objekte. Der Satellit sendet dazu ein Radarsignal aus und empfängt die zurückgestreuten Echos. Durch den Vergleich dieser Echos aus zwei zeitlich versetzten Überflügen desselben Gebiets (Repeat-Pass) lassen sich Bewegungen in Blickrichtung des Satelliten (Line-of-Sight, LOS) ableiten. Dies geschieht für verschiedene Messpunkte, genauer gesagt für Radarrückstreuer (Permanent Scatterer, Distributed Scatterer).

Die Sensitivität der Bewegungserfassung ist von der Frequenz der Satellitensignale abhängig. Aufgrund der generell relativ hohen Frequenzen und der daraus resultierenden kleinen Wellenlängen im Bereich von meist wenigen Zentimetern sind kleinste Bodenbewegungen mit Millimeterpräzision messbar (Abbildung 4).

Da die Radarmessung nur eine eindimensionale Messung in LOS-Richtung liefert, ist zunächst nicht ersichtlich, ob die erfasste Bewegung eine rein vertikale, eine rein horizontale oder eine kombinierte Komponente beinhaltet. Durch die Verknüpfung von Auswertungen auf Basis von Daten aus mehreren Orbits mit unterschiedlichen Flugrichtungen (aufsteigend – Ascending, absteigend – Descending) und Blickwinkeln können mittels der 2D-Dekomposition jedoch Vertikal- und Ost-West-Horizontalbewegungen abgeleitet werden (Abbildung 5). Weiterführende Details zum Grundprinzip, den Messpunkten und -werten sowie zum aktuellen Stand der InSAR-Technik sind beispielsweise in [1] zu finden.

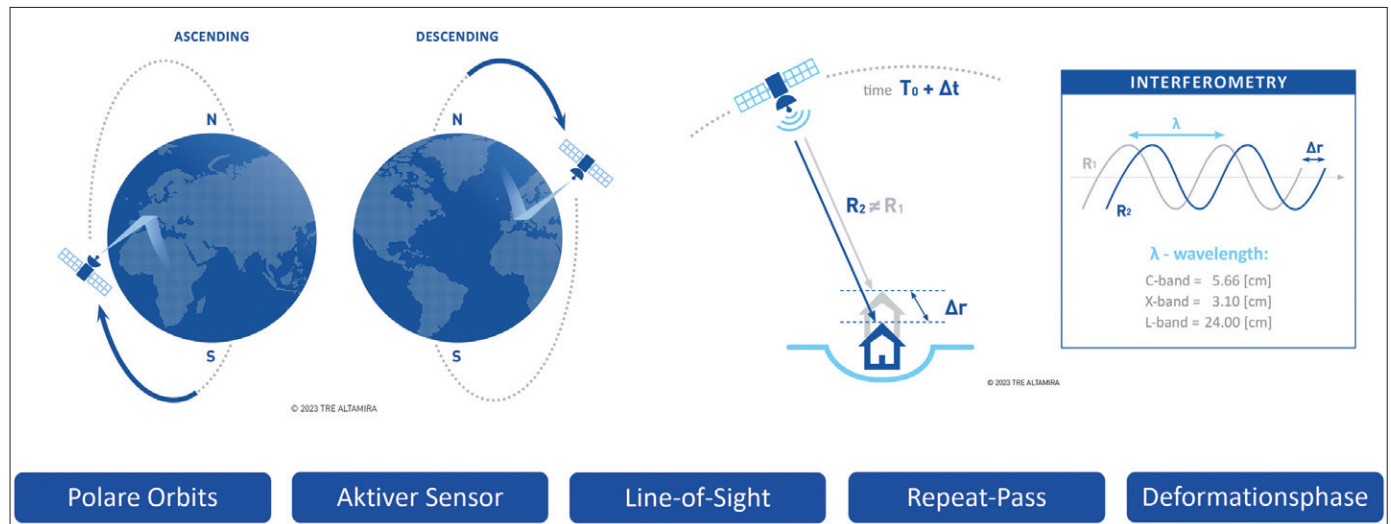
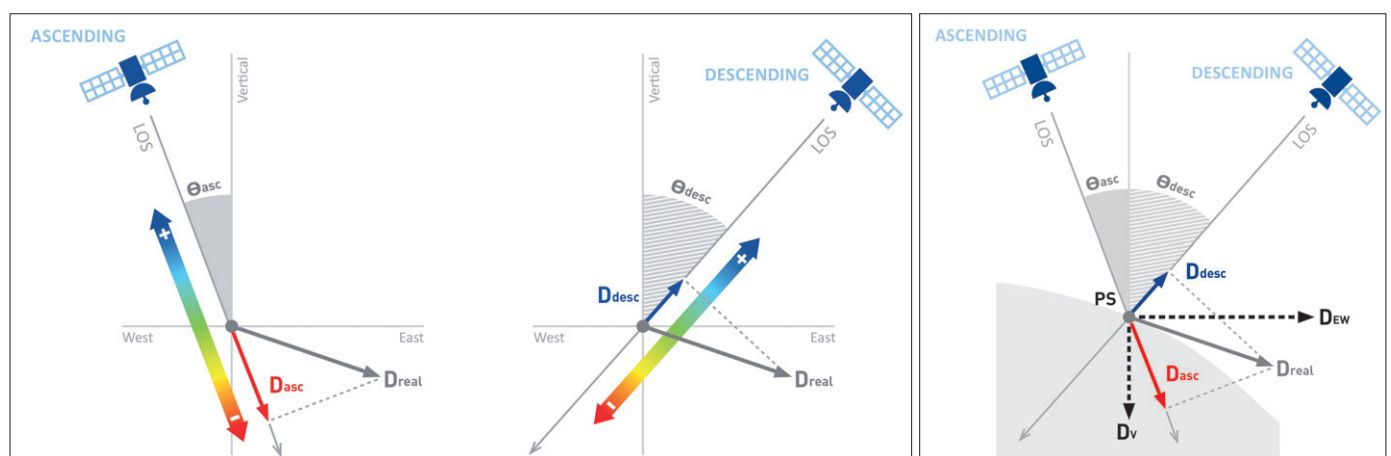


Abb. 4: Radarinterferometrisches Aufnahmeprinzip zur Erfassung von Bodenbewegungen (© TRE ALTAMIRA).

Abb. 5: Links: Projektion einer realen Bewegung (D_{real}) in die 1D-Blickrichtung des Satelliten (LOS) bei einer Ascending bzw. Descending Aufnahme. Rechts: Prinzip der Bewegungsdekomposition (© TRE ALTAMIRA).

4.2 SqueeSAR® WAP-Analyse

Für eine recheneffiziente, großflächige und blattschnittfreie InSAR-Analyse ist eine Wide-Area-Prozessierung (WAP) notwendig. TRE ALTAMIRA setzt hierfür auf eine optimierte SqueeSAR®-Analyse, die nach einer WAP-Strategie und einem Multi-Burst-Ansatz zur interferometrischen Verarbeitung von Großgebieten wie dem Lausitzer Revier erfolgt. SqueeSAR® stellt die zweite Generation und die jüngste Weiterentwicklung des PSInSAR-Algorithmus dar [2]. Die Grundlagen des SqueeSAR®-Algorithmus werden in [3] näher erläutert. Der *Multi-Burst*-Ansatz ist eine von TRE ALTAMIRA entwickelte Prozesskette, die es InSAR-Spezialisten ermöglicht, alle verfügbaren Daten eines Aufnahme-streifens (Tracks) innerhalb eines Auswertgebietes zu verarbeiten, selbst wenn einzelne Teilgebiete eines Tracks durch eine unterschiedliche Anzahl von Aufnahmen erfasst wurden. Dieser Ansatz gewährleistet durch die Anwendung eines einheitlichen atmosphärischen Modells pro Track ein Gesamtergebnis der Bewegung und reduziert dabei Diskontinuitäten zwischen den Teilgebieten. Im Ergebnis liefert die SqueeSAR® WAP-Analyse ein räumlich konsistentes und für große Flächen optimiertes Resultat.

4.3 WAP-Ergebnisse

Seit 2022 führt TRE ALTAMIRA fortlaufend viertel-, halb- oder ganzjährliche InSAR-Analysen für das knapp 4.000 km² große Lausitzer Revier durch. Als Grundlage dienen die frei verfügbaren Copernicus Sentinel-1 Interferometric Wide Swath (SNT-1 IW) Radardaten, die eine Bodenauf Auflösung von etwa 20 Metern und einen Wiederholzyklus der Satellitenkonstellation von 6 bis 12 Tagen bieten. Für jede Analyse werden jeweils ein Ascending- und ein Descending-Datenstapel ausgewertet und deren Ergebnisse kombiniert, um vertikale und horizontale (Ost-West) Messwerte zu ermitteln. In Abbildung 6 sind die jüngst abgeleiteten Vertikalgeschwindigkeiten von 2019 bis 2025 farblich kodiert dargestellt.

Die Ergebnisse ermöglichen die Erfassung verschiedener Arten von Bodenbewegungen (Abbildung 7):

In den Innenkippen der Tagebaue lassen sich Setzungen mit Geschwindigkeiten von bis zu 22 cm/Jahr feststellen.

Im Bereich des Cottbuser Ostsees wurden infolge der Flutung an den Außenrandböschungen Hebungen mit kurzzeitigen Raten von bis zu 7 cm/Jahr gemessen.

Im Umfeld der Tagebaue sind vorwiegend durch Grundwasseränderungen bedingte Senkungen oder Hebungen an der Tagesoberfläche zu beobachten.

Die flächenhafte Erfassung der Bewegungen durch die InSAR-Messdaten hat wesentlich dazu beigetra-

gen, unbekannte Bewegungsbereiche, Anomalien sowie (plötzliche) Beschleunigungen frühzeitig zu detektieren.

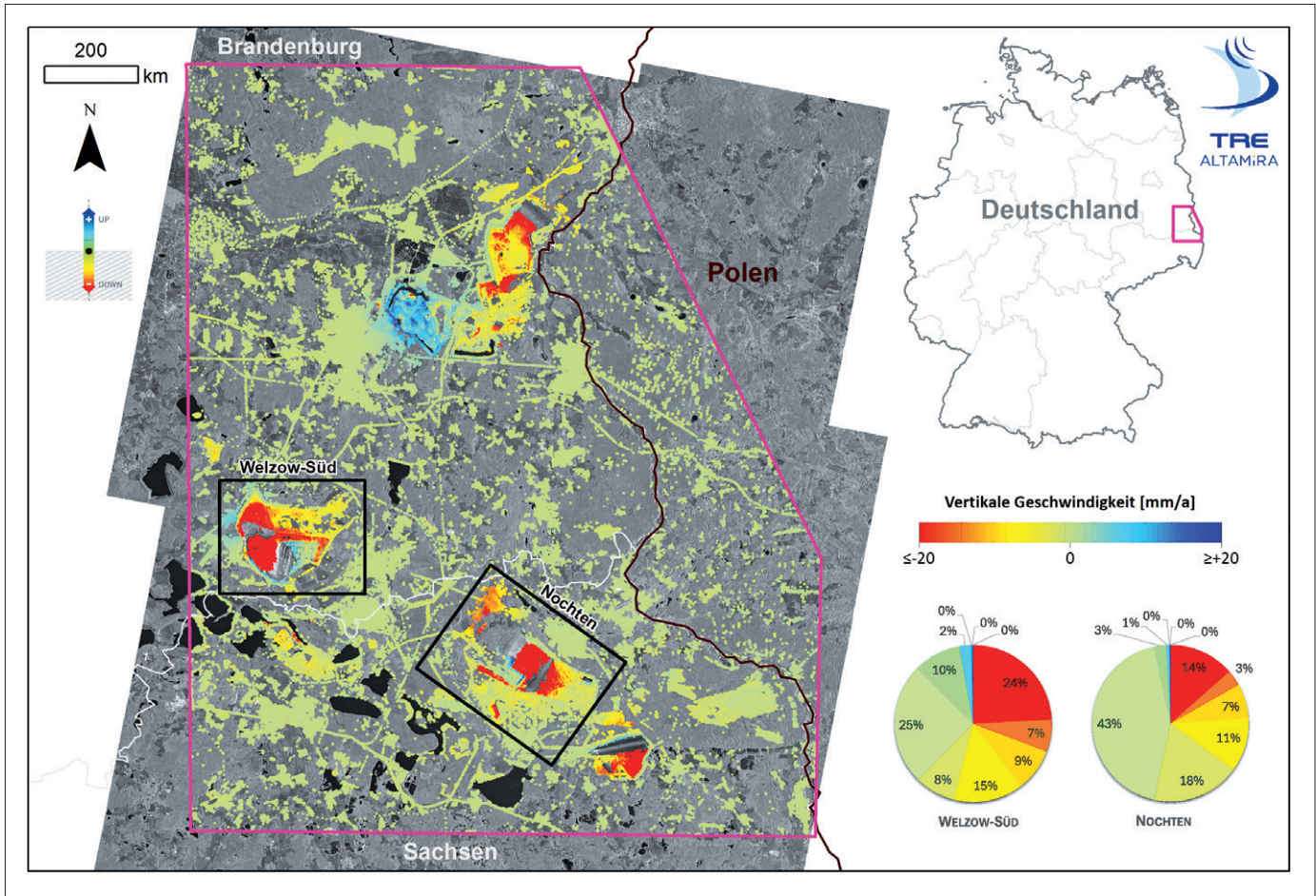


Abb. 6: Vertikale Bewegungsgeschwindigkeiten 2019–2025 als Ergebnis der SqueeSAR® WAP-Analyse von Sentinel-1 Daten im Bereich des Lausitzer Braunkohlenreviers in Deutschland.

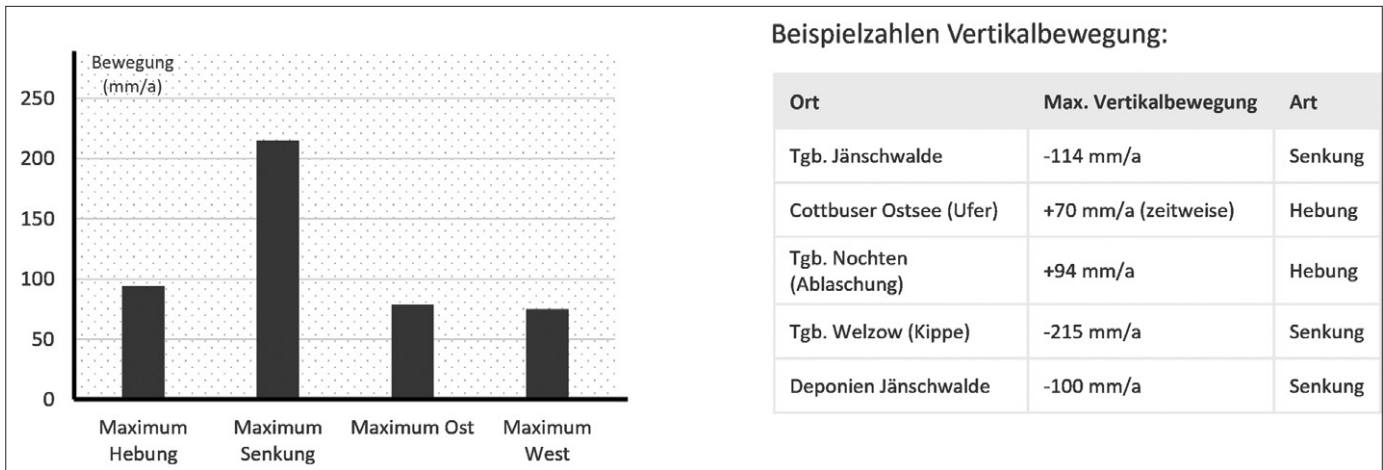


Abb. 7: Maximal erfasste vertikale Bewegungsgeschwindigkeiten der Höhenänderungen.

5. Praxisrelevanz

Die InSAR-Messungen sind für die LEAG im Rahmen der Dokumentation und Überwachung von Bodenbewegungen im Lausitzer Revier von erheblicher Bedeutung. Dies betrifft insbesondere den Bereich des ehemaligen

Tagebaus Cottbus-Nord (den heutigen Cottbuser Ostsee) sowie den Tagebau-Restraum Jänschwalde.

Die Relevanz der InSAR-Messungen in der Praxis wird durch folgende wesentliche Aspekte gewährleistet:

- **Kosteneffizienz:** Durch die Nutzung kostenfreier Copernicus Sentinel-1 Radarsatellitendaten, die seit 2015 alle 6 bis 12 Tage überfliegen, ist das Verfahren äußerst kosteneffizient. Die Messpunktdichte in der Lausitz erreicht dabei durchschnittlich 600 Punkte pro km² (vgl. Abbildung 8).
- **Kontinuität:** SNT-1 Daten stehen seit 2015 lückenlos zur Verfügung. Mit dem erfolgreichen Start der Nachfolgesatelliten Sentinel-1C (Dezember 2024) und -1D (November 2025) ist auch zukünftig die Datenversorgung gesichert. Durch die kontinuierliche Analyse der SNT-1 Daten – mindestens im jährlichen Rhythmus – wird eine stetige Dokumentation und Überwachung von Bodenbewegungen ermöglicht.
- **Langzeitmonitoring:** Die hohe Wiederholrate der Messungen erlaubt die Ableitung von zeitlich hochauflösenden Bewegungszeitreihen. Über lange Beobachtungszeiträume verbessert sich die Parameterschätzung, was die Messgenauigkeit erheblich steigert und zur Optimierung der Messpunktdichte beitragen kann (vgl. Abbildung 8). InSAR eignet sich somit sowohl für schnelle, kosteneffiziente Kurzzeitbeobachtungen als auch speziell für das hochpräzise Langzeitmonitoring von Bodenbewegungen.
- **Entwicklung:** Durch permanente Neu- und Weiterentwicklungen der InSAR-Algorithmen, auch mit KI-Unterstützung, wird bei TRE ALTAMIRA stetig die Optimierbarkeit und Anpassung der Auswertestrategie für den Anwendungsfall geprüft und bei Bedarf umgesetzt.
- **Handlungsfähigkeit:** Eine der wichtigsten Anforderungen an ein Monitoring ist die zeitnahe Bereitstellung von Informationen, um Risiken frühzeitig zu erkennen und notwendige Sicherungsmaßnahmen einleiten zu können. Hochentwickelte InSAR-Algorithmen wie SqueeSAR® WAP und recheneffiziente Prozessierungen liefern qualitätsgeprüfte und hochpräzise InSAR-Messungen für das Lausitzer Revier mit kurzen Lieferzeiten von wenigen Wochen.
- **Zugänglichkeit:** Durch die Bereitstellung der InSAR-Messergebnisse über die webbasierte Visualisierungs- und Analyseplattform TREmaps® werden die Daten vielen autorisierten Mitarbeitenden aus verschiedenen Fachabteilungen für deren betriebliche Aufgaben zugänglich gemacht.
- **Frühwarnung und Risikobewertung:** Die Fokussierung auf ausgewählte Schwerpunktbereiche und die Hervorhebung von Messergebnissen (Beschleunigungen,

Bewegungsanomalien etc.) in technischen Berichten machen Informationen schnell verfügbar. Diese können effizient weiterverarbeitet und als Entscheidungsgrundlage, z. B. zur Einleitung von Sicherungsmaßnahmen, genutzt werden.

Das Beispiel in Abbildung 8 veranschaulicht die Veränderung der Messpunktdichte im Bereich eines aktiven Tagebaus. In einigen Bereichen nimmt die Anzahl der Messpunkte infolge der jährlichen Aktualisierung der Zeitreihen ab. Dies liegt an starken Veränderungen der Rückstreusignale, die bis zum Signalverlust führen können, beispielsweise durch Abbau- oder Gewinnungstätigkeiten. Auch in ländlichen Gebieten mit Vegetation (Ackerflächen, Wald) bewirken jahreszeitlich bedingte, starke Veränderungen der Rückstreueigenschaften (temporale Dekorrelation) einen Verlust an Messpunkten. Im Gegensatz zu diesem kohärenzbedingten Punktverlust verbessert sich die Messpunktdichte (MP-Dichte) in einigen lokalen Bereichen. Dies ist auf die verbesserte Parameterschätzung zurückzuführen, die mit einer steigenden Anzahl an Messzeitpunkten bei fortlaufender Satellitenbilddaufnahme einhergeht. Die erreichbare Messgenauigkeit (Präzision) der Bewegungsmessung variiert somit unter anderem in Abhängigkeit vom Beobachtungszeitraum, der Anzahl der Messzeitpunkte und der Topographie.

Tabelle 1 fasst die mittleren und maximalen Standardabweichungen der Messergebnisse aller bis 2025 durchgeführten InSAR-Analysen für das Lausitzer Braunkohlenrevier zusammen. Im Durchschnitt lassen sich Höhenänderungen in diesem Gebiet bei Nutzung von Sentinel-1 Daten mit einer Präzision von etwa 2 bis 3 mm erfassen.

6. Demonstration des Mehrwerts

Im Folgenden werden anhand zweier Fallbeispiele der Mehrwert und die Einsatzmöglichkeiten von InSAR-Messungen zur effektiven Überwachung von Bodenbewegungen im Lausitzer Revier detailliert verdeutlicht.

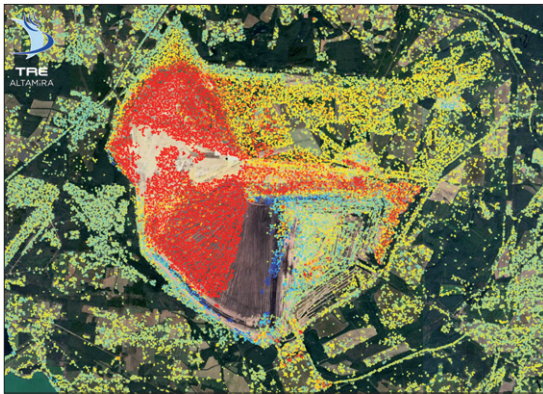
6.1 Böschungsüberwachung Cottbuser Ostsee

Das vierteljährliche InSAR-Monitoring für den Cottbuser Ostsee begann bereits im Mai 2022. Die Überwachung konzentrierte sich auf die gesamte Randböschung, insbesondere auf den südwestlichen Bereich entlang des Lärmschutzdamms Schlichow, da dort bereits 2022 seeseitig sichtbare Böschungsumbildungen aufgetreten waren (vgl. Abbildung 9 oben links).

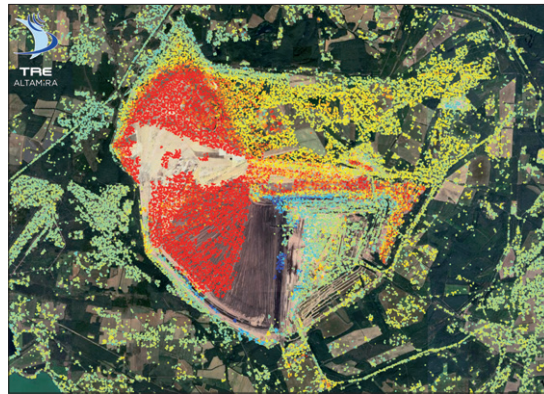
Eine Erstausswertung der Sentinel-1 Daten von Mai 2020 bis Mai 2022 zeigte, dass weiter nordwestlich entlang der Randböschung zwischen November 2021

Tabelle 1: Erzielte mittlere und maximale Standardabweichungen der Messwerte der Vertikal- und EW-Horizontalbewegung für alle bis 2025 durchgeführten Analysen im Untersuchungsraum.

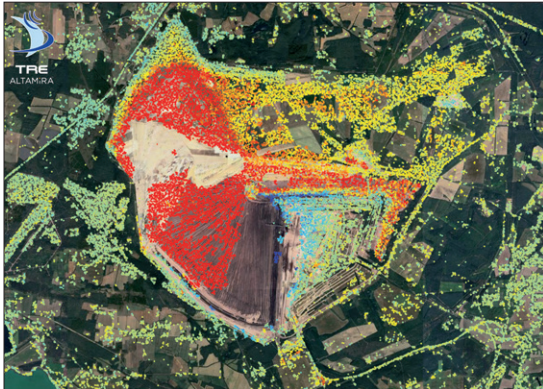
Komponente	Median Standardabweichung	Maximum Standardabweichung
Vertikalbewegung	2,0 – 2,7 mm	8,1 – 17,0 mm
EW-Horizontalbewegung	2,5 – 3,4 mm	7,8 – 14,7 mm



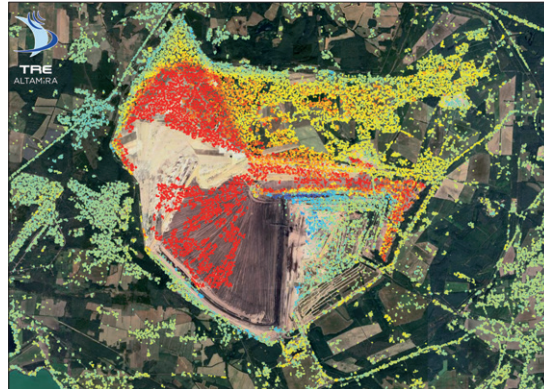
A) 2019-2021



B) 2019-2022



C) 2019-2023

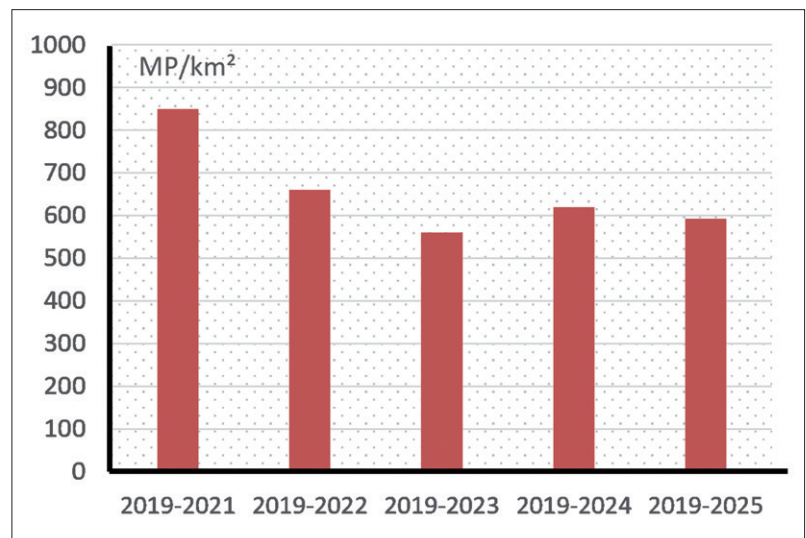


D) 2019-2024



E) 2019-2025

Abb. 8: Vergleich der SqueeSAR® Sentinel-1 Ascending Messpunktdichte im Bereich Welzow-Süd bei fortschreitender Aktualisierung der Zeitreihen ab 2019 (A-E) mit Zusammenfassung der Ergebnisse im Säulendiagramm (F).



F) Durchschnittliche Messpunktdichte pro km²

und April 2022 deutlich beschleunigte Hebungen stattfanden. Die anschließende Aktualisierung der InSAR-Zeitreihen bis Juli 2022 erfasste hingegen nur geringe Bewegungen durch die Radarsatelliten. Weitere vierteljährliche InSAR-Überwachungen zeigten jedoch, dass ab September 2022 erneut lokale Hebungsbeschleunigungen mit Geschwindigkeiten von 1 cm pro Monat auftraten. Im März 2023 wurden sehr lokal maximale Hebungsgeschwindigkeiten registriert (vgl. Abbildung 9 unten). Ab Dezember 2022 wurde in den technischen Berichten zu den InSAR-Messungen ausdrücklich auf diese Bewegungsanomalien hingewiesen. Eine Befahrung im Mai 2023 bestätigte in unmittelbarer Nähe der detektierten Bewegungsanomalie eine erneute Böschungsumbildung mit einer Abrisslänge von ca. 40 m und einer Abrisstiefe von ca. 20 m ins Uferprofil (vgl. Abbildung 9).

Im Ergebnis einer Ursachenanalyse wurde festgestellt, dass die geotechnischen Modellprognosen mit den Sentinel-1 SqueeSAR® Beobachtungen sehr gut übereinstimmen. Diese interferometrischen Ergebnisse ermöglichten es, den Risikobereich frühzeitig und räumlich präzise zu bestimmen, selbst ohne fachspezifische Vorkenntnisse in diesem Gebiet.

6.2 Post-hoc-Analysen zur Beschleunigungsdetektion

Die Bereitstellung von InSAR-Daten über eine webbasierte Analyseplattform hat sich als eines der effektivsten

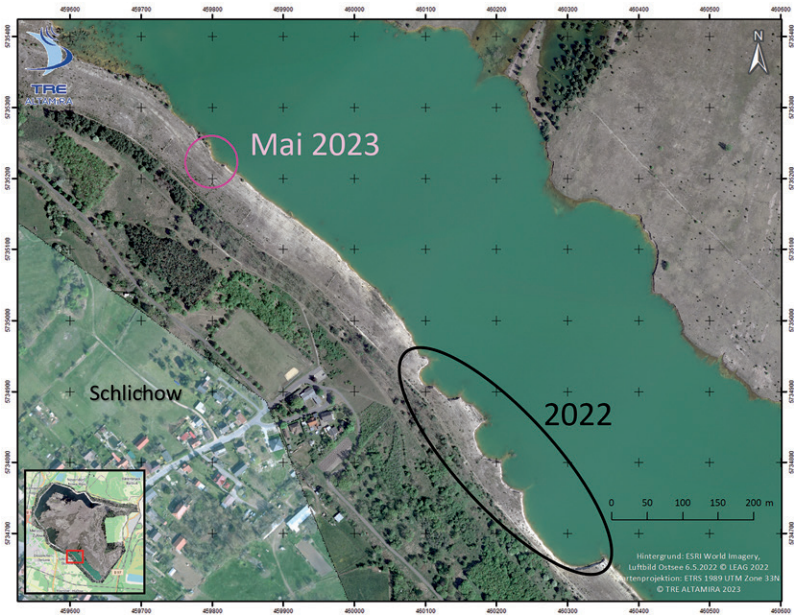


Abb.9: Prozess einer Böschungsumbildung im Mai 2023 am Cottbuser Ostsee, der mittels InSAR-Messungen dokumentiert wurde.

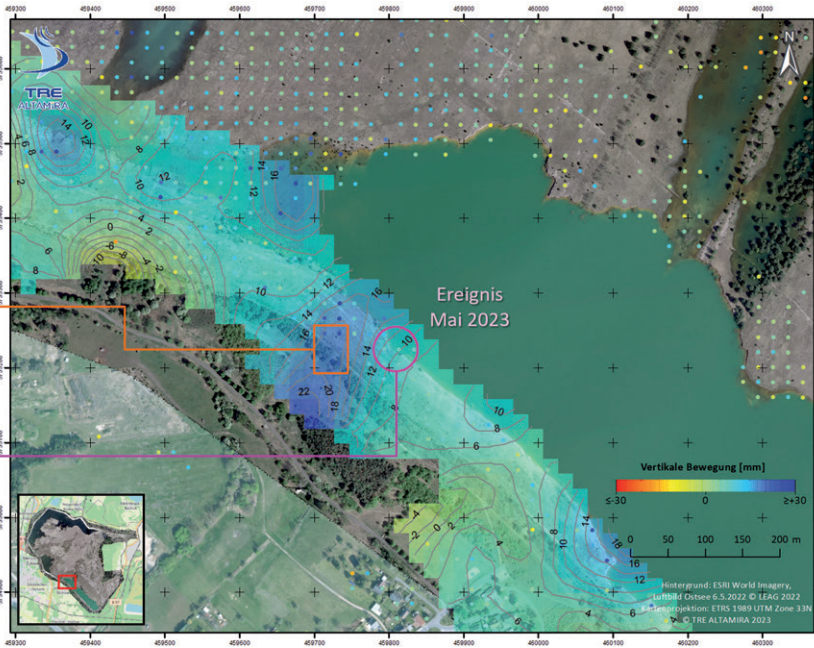
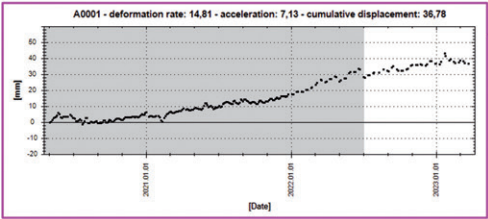
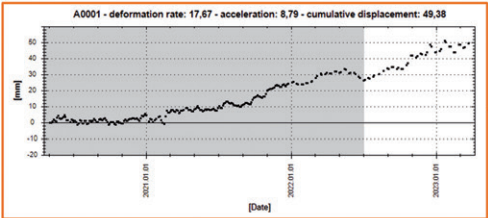
Instrumente für Post-hoc-Analysen erwiesen. Ein Webportal ermöglicht autorisierten Nutzern den ortsunabhängigen Zugriff auf die InSAR-Messdaten und erlaubt ihnen, diese nutzerspezifisch und vertiefend zu analysieren – und das ohne die Notwendigkeit, spezielle GIS-Software installieren zu müssen. Für die Analyse der InSAR-Ergebnisse im Lausitzer Revier nutzt die LEAG ergänzend zu ihren eigenen GIS-Systemen das Webportal TREmaps®. TREmaps® ist eine Webplattform von TRE ALTAMIRA, die Kunden zur Visualisierung und Analyse der gelieferten InSAR-Daten bereitsteht. Sie bietet Funktionen und Werkzeuge zur räumlichen und zeitlichen Datenanalyse, einschließlich sogenannter „On-the-Fly“ (OTF)-Berechnungen für ausgewählte Zeitreihenparameter und Zeiträume.

Das Beispiel in Abbildung 10 veranschaulicht die Bereitstellung von OTF-Layern in Echtzeit mit Höhenänderungen für zwei aufeinanderfolgende Jahresscheiben. Das Zeitreihenbeispiel zeigt, dass im Zeitabschnitt B beschleunigte Hebungen festgestellt werden können. Die Kartenansichten veranschaulichen die räumliche Ausbreitung des Hebungs- bzw. Beschleunigungsbereichs. Um aktuelle Geschwindigkeitszunahmen in Bereichen kontinuierlicher Bewegungen zu detektieren, werden zum einen OTF-Daten der Beschleunigung (Acceleration) genutzt. Zum anderen kommen Filterungen durch die Eingabe von Schwellenwerten für bestimmte Parameter zum Einsatz. Durch diese Filterungen und OTF-Berechnungen werden nutzerrelevante Informationen sowie potenzielle Risikobereiche schnell und übersichtlich sichtbar.



Ergebnis: Vertikal

Zeitraum: 02.07.2022 – 23.03.2023



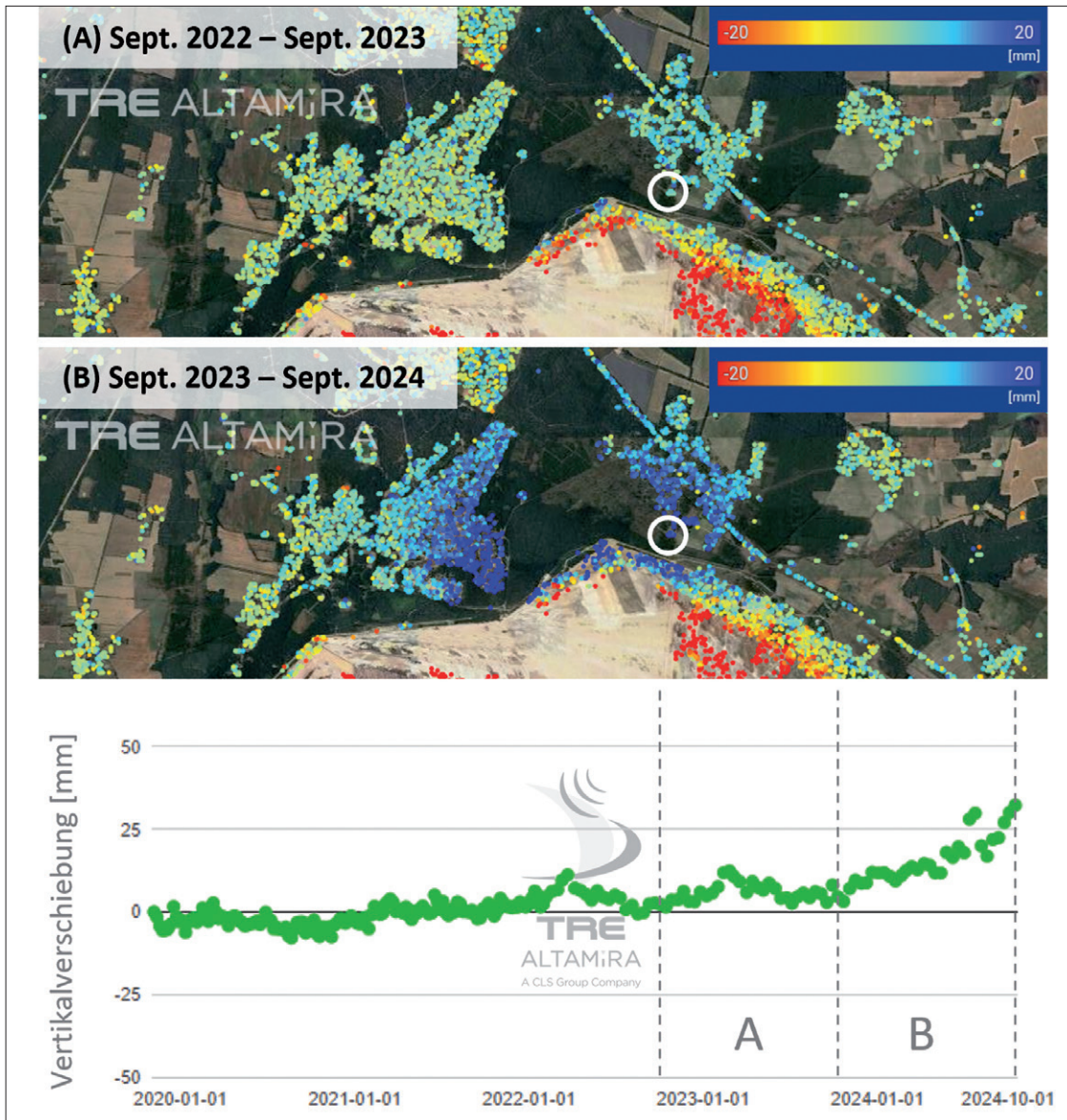


Abb. 10: Beispiel einer Hebungsbeschleunigung am Tagebaurand.

7. Fazit

Das Lausitzer Braunkohlenrevier befindet sich in einem tiefgreifenden Wandel, bei dem die Herausforderungen einer effektiven Überwachung der großflächigen Bergbaufolgefleichen und Anlagen stetig zunehmen. Die erfolgreiche Implementierung der satellitengestützten Radarinterferometrie (InSAR) unter Einsatz der frei verfügbaren Sentinel-1 Daten des Copernicus-Programms hat sich für die Lausitz Energie Bergbau AG (LEAG) als entscheidender Baustein zur Bewältigung dieser Komplexität erwiesen. Die InSAR-Messtechnik liefert hochpräzise und flächendeckende Informationen über Bodenbewegungen in der gesamten Region und ermöglicht eine effektive Überwachung von nahezu 4.000 km². Die Praxisrelevanz der InSAR-Messungen für die LEAG wird durch die Schlüsselaspekte Kosteneffizienz, Kontinuität und Langzeitmonitoring, Frühwarnung und Handlungsfähigkeit sowie Zugänglichkeit gesichert. Zusammenfassend stellt die Radarinterferometrie ein unverzichtbares Instrument für ein zukunftsorientiertes und sicheres Flächenmonitoring im Lausitzer Braunkohlenrevier dar

und trägt maßgeblich zur sicheren und nachhaltigen Wiedernutzbarmachung der Bergbaufolgefleichen bei.

8. Literatur

- [1] Arbeitskreis Radarinterferometrie des DMV (2025): Radarinterferometrie (InSAR) - Grundsätze zur Erfassung von Bodenbewegungen mithilfe der Radarinterferometrie. Sonderdruck Markscheideweisen 1/2025, DMVe.V., <https://e-docs.geo-leo.de/server/api/core/bitstreams/4bb000d9-5874-4f3e-b791-f9a57eb4c746/content>.
- [2] Ferretti, A., Prati, C., Rocca (1999): Permanent scatterers in SAR interferometry. In: *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99* (Cat. No.99CH36293), Hamburg, Germany, 1999, vol. 3, pp. 1528-1530, doi: 10.1109/IGARSS.1999.772008.
- [3] Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A (2011): A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 9, pp. 3460-3470, Sept. 2011, doi: 10.1109/TGRS.2011.2124465.