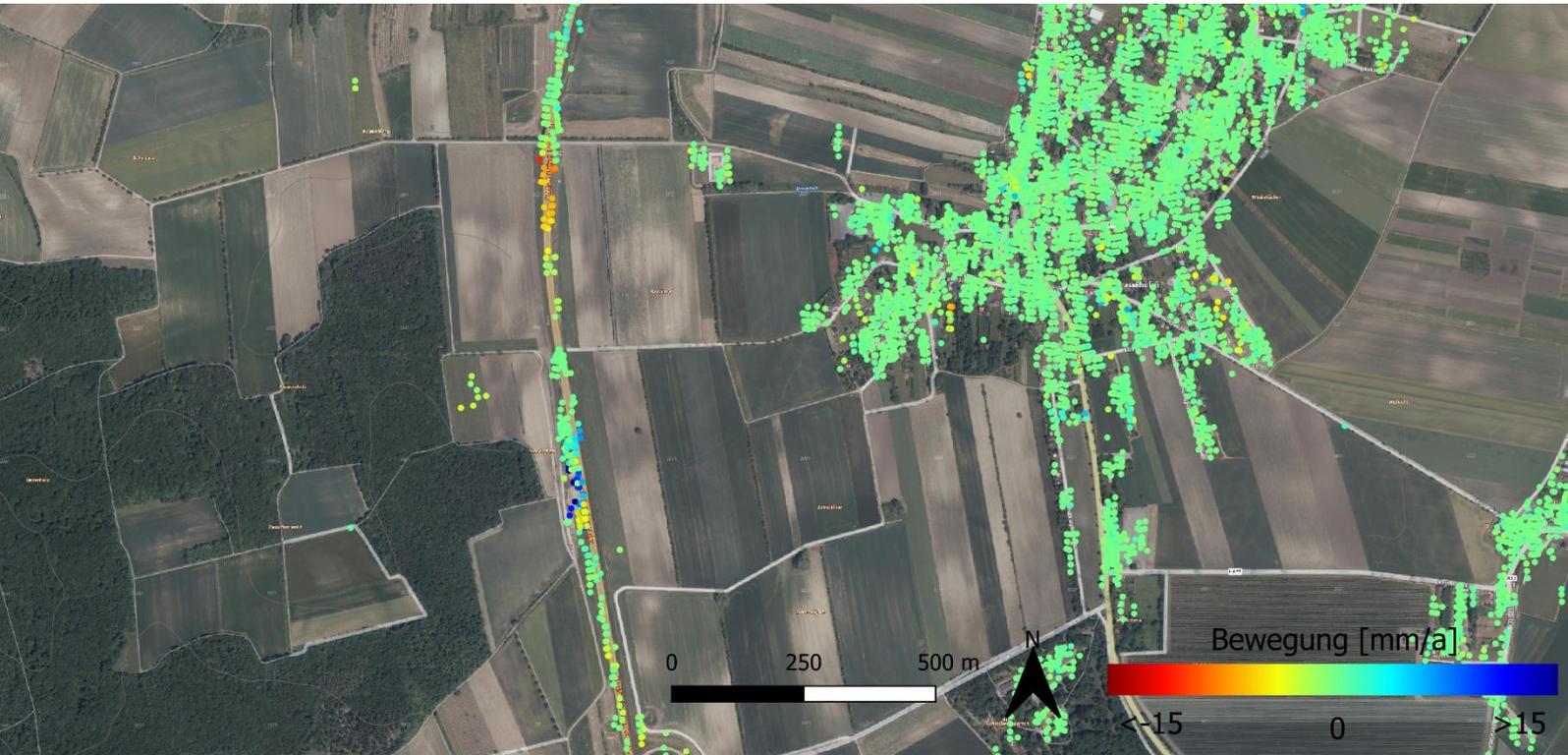




GEORESEARCH

**AUGMENTERRA™**



## Endbericht

InSAR-PSNÖ: Landesweite  
Potentialstudie für die  
kontinuierliche, satelliten-basierte  
Vermessung von Boden- und  
Bauwerksbewegungen



## Imprint

<u>Herausgeber:</u>	AUGMENTERRA GmbH, Techno-Z Wissenspark Urstein, Urstein Süd 15, 5412 Puch bei Hallein, <a href="http://www.augmenterra.com">www.augmenterra.com</a> , GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Techno-Z Wissenspark Urstein, Urstein Süd 15, 5412 Puch bei Hallein, <a href="http://www.georesearch.ac.at">www.georesearch.ac.at</a>
<u>Autoren:</u>	Markus Dörfler, Carolin Köß, Markus Keuschnig
<u>Kunde:</u>	Amt der NÖ Landesregierung, Abteilung Allgemeiner Baudienst, Geologischer Dienst
<u>Projekt:</u>	InSAR-PSNÖ: Landesweite Potentialstudie für die kontinuierliche, satelliten-basierte Vermessung von Boden- und Bauwerksbewegungen
<u>Version:</u>	1.1
<u>Datum:</u>	20.05.2025
<u>Titelbild:</u>	InSAR-Auswertung im Bereich der Nord/Weinviertel Autobahn A5. Bewegungen von Brücken- und Dammbauwerken.

# 1 Zusammenfassung

Diese Studie untersucht das Potenzial der satellitenbasierten Radarinterferometrie (SB-InSAR) zur Überwachung von Bodenbewegungen und Bauwerksdeformationen in Niederösterreich. Durch die Analyse von Sentinel-1 Daten der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) wurden langfristige Bewegungsmuster entlang von Infrastrukturen, insbesondere von Straßen und Bahnstrecken, sowie in Siedlungsbereichen detailliert untersucht. SB-InSAR bietet erhebliche Vorteile gegenüber traditionellen Methoden, da es eine flächendeckende, kontinuierliche Überwachung ermöglicht und selbst kleinste Bewegungen im Millimeterbereich detektieren kann.

Ein wesentlicher Vorteil von SB-InSAR liegt in der Möglichkeit, auf archivierte Satellitendaten zurückzugreifen, wodurch Veränderungen über mehrere Jahre hinweg nachvollzogen werden können. Dies ist besonders für die Identifikation von Bewegungshotspots relevant, da das Erkennen potenzieller Gefahren für Bauwerke und Infrastrukturen ermöglicht werden kann. Die Studie zeigt, dass SB-InSAR zuverlässig sowohl großflächige als auch kleinräumige Deformationen erfassen kann und damit eine wichtige Grundlage für ein vorausschauendes Risikomanagement bildet.

Die Analyse ermöglicht die Identifikation von relevanten Bewegungszonen in Niederösterreich. Besonders in Bereichen mit geogenen Risiken, wie Setzungs- oder Rutschhängen, konnten Verschiebungen von bis zu mehreren Zentimetern pro Jahr nachgewiesen werden. Zudem wurden kleinräumige strukturelle Deformationen an Infrastrukturbauelementen festgestellt, die langfristig zu Schäden führen könnten. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer kontinuierlichen Überwachung, um gezielte Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen frühzeitig einzuleiten.

Ein weiterer zentraler Aspekt dieser Studie ist die technische Umsetzung und Integration der InSAR-Daten in bestehende Systeme. Die Bereitstellung der Daten im GIS-kompatiblen Format (für die Integration in das landesinterne GIS iMap) ermöglicht eine einfache Einbindung in bestehende Monitoring-Konzepte, sowie die effektive Verschneidung mit Komplementärdaten. In Risikogebieten mit geringer natürlicher Reflektivität, etwa in stark bewachsenen Regionen, wird der Einsatz von Corner-Reflektoren als effektive Methode zur Verbesserung der Datenqualität vorgeschlagen. Durch die Kombination von SB-InSAR mit bodengestützten Messverfahren wie GNSS oder IoT-Sensoren kann die Messgenauigkeit weiter erhöht werden.

Trotz der zahlreichen Vorteile weist SB-InSAR auch einige Einschränkungen auf. Vegetationsbedingte Dekorrelation kann in waldreichen Gebieten zu einer geringeren Messpunktdichte führen. Abrupte oder sehr schnelle Bewegungen, etwa durch plötzliche Hangrutschungen, sind möglicherweise nicht vollständig erfassbar. In topografisch komplexen Regionen, insbesondere an steilen Hängen, kann es zu Signalabschattungen oder Messfehlern kommen. Die Interpretation der Daten erfordert daher eine sorgfältige Analyse und die Kombination mit ergänzenden Überwachungsmethoden sowie ein geschultes Fachpersonal. Um dies zu erreichen wurde eine Schulung mit Landesbediensteten verschiedener Fachabteilungen durchgeführt.



Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen, dass die Integration von SB-InSAR in bestehende Monitoringsysteme ein großes Potenzial bietet. Die großflächige, hochpräzise und kontinuierliche Überwachung kann langfristig die Sicherheit erhöhen und Wartungs- bzw. Instandsetzungskosten reduzieren. Durch die Verknüpfung mit konventionellen Messmethoden lassen sich Synergien nutzen, um eine effiziente und resiliente Überwachungsstrategie für die Verkehrsinfrastrukturen und Siedlungsgebiete Niederösterreichs zu entwickeln.



# Inhalt

1	Zusammenfassung .....	2
2	Abkürzungen .....	5
3	Einleitung .....	6
3.1	Hintergrund und Motivation.....	6
3.2	Ziele.....	6
4	Grundlagen der InSAR-Technologie .....	8
4.1	Geschichte.....	8
4.2	Messprinzip.....	9
4.3	Prozessierung von InSAR Messpunkten.....	14
4.4	Präzision und Genauigkeit.....	14
5	InSAR-Limits.....	16
5.1	Corner-Reflektoren .....	16
6	Potentialstudie – Land Niederösterreich.....	18
6.1	Verwendete InSAR Datensätze .....	20
6.2	SqueeSAR®-Analyse.....	21
7	Fazit und Ausblick.....	23
8	Literatur .....	25
9	Abbildungen.....	25
10	Tabellen.....	26

## 2 Abkürzungen

	Englisch	Deutsch
<b>ASC</b>	Ascending Geometry	Aufsteigende Geometrie
<b>DS</b>	Distributed Scatterer	Verteilter Rückstreuer
<b>DSC</b>	Descending Orbit	Absteigende Geometrie
<b>ESA</b>	European Space Agency	Europäische Raumfahrtagentur
<b>km</b>	Kilometer	Kilometer
<b>LOS</b>	Line of Sight	Sichtlinie
<b>m</b>	Meter	Meter
<b>mm</b>	Millimeter	Millimeter
<b>MP</b>	Measurement Point	Messpunkt
<b>PS</b>	Permanent Scatterer	Permanenter Rückstreuer
<b>RADAR</b>	Radio Detecting and Ranging	Radio Detecting and Ranging
<b>REF</b>	Reference Point	Referenzpunkt
<b>SB-InSAR</b>	Satellite-based InSAR	Satellitenbasiertes InSAR
<b>SAR</b>	Synthetic Aperture Radar	Synthetic Aperture Radar
<b>SNT</b>	Sentinel-1	Sentinel-1
<b>TS</b>	Displacement Time Series	Verschiebung-Zeitreihe
<b>TSX</b>	TerraSAR-X	TerraSAR-X

## 3 Einleitung

### 3.1 Hintergrund und Motivation

Das Land Niederösterreich ist einer der bedeutendsten Infrastrukturbetreiber Österreichs. Allein das Landesstraßennetz erstreckt sich über ca. 13.600 Kilometer und umfasst rund 4.600 Brückenbauwerke (<https://www.noegov.at/noe/Autofahren/Strassenmeistereien-Allgemein.html>). Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, die Betriebszuverlässigkeit und -sicherheit dieser umfangreichen Infrastruktur zu gewährleisten. Dabei ist die frühzeitige Erkennung von Bodenbewegungen oder Bauwerksdeformationen von entscheidender Bedeutung, um kostspielige Reparaturen oder infrastrukturelle Ausfälle zu vermeiden und eine vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance) zu ermöglichen.

Traditionelle Methoden zur Überwachung von Boden- und Bauwerksbewegungen, wie visuelle Inspektionen oder bodengestützte Messverfahren, sind oftmals zeitaufwendig, kostenintensiv und in schwer zugänglichen Gebieten nur eingeschränkt anwendbar. Daher besteht die Notwendigkeit, innovative Technologien einzusetzen, um eine kontinuierliche und flächendeckende Überwachung zu ermöglichen.

Satellitengestütztes InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, Radarinterferometrie) stellt eine vielversprechende Lösung dar. Diese Methode ermöglicht es, Bodenbewegungen und Deformationen mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich zu messen. Sie bietet eine hohe Skalierbarkeit, sodass sowohl einzelne Bauwerke als auch großflächige Gebiete untersucht werden können. Zudem erlaubt SB-InSAR die Analyse historischer Datenbestände und die kontinuierliche Beobachtung über lange Zeiträume hinweg, was eine nachhaltige Infrastrukturplanung und -instandhaltung unterstützt.

Die Methode wird bereits in anderen Regionen Österreichs erfolgreich eingesetzt, unter anderem durch die Länder Vorarlberg & Salzburg, die ASFINAG, die ÖBB sowie die Austrian Power Grid (APG). Angesichts der positiven Erfahrungen und der vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten verfolgt das vorliegende Projekt das Ziel, eine Machbarkeitsstudie zur langfristigen Nutzung von SB-InSAR für die Überwachung geogener Gefahren in Niederösterreich. Im Fokus stehen dabei insbesondere Hangrutschungen und Setzungen bzw. Hebungen in Siedlungsgebieten sowie in Bereichen der Verkehrs- und Bahninfrastruktur.

Durch den gezielten Einsatz von SB-InSAR können langfristig datenbasierte Entscheidungsgrundlagen geschaffen werden, um die Resilienz und Sicherheit der Infrastruktur in Niederösterreich zu verbessern. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Basis für eine strategische Integration dieser Technologie in bestehende Monitoringkonzepte dienen.

### 3.2 Ziele

Ziel dieses Berichts ist es, das Potenzial von SB-InSAR für die landesweite Überwachung von Bodenbewegungen und Bauwerksdeformationen in



Niederösterreich aufzuzeigen. Der Bericht richtet sich speziell an die Abteilung Allgemeiner Baudienst des Landes Niederösterreich, insbesondere an den geologischen Dienst, und soll eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Integration dieser Technologie in bestehende Monitoring- und Wartungsprozesse bieten.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden folgende Kernaspekte behandelt:

- **Datenanalyse:** Durchführung einer hochqualitativen InSAR-Analyse für das gesamte Bundesgebiet Niederösterreichs unter Verwendung von Sentinel-1 Satellitendaten der ESA. Dabei werden Bewegungsmuster der letzten drei Jahre untersucht und visualisiert.
- **Grundlage zur Identifikation von Gefahrengebieten:** Auf Basis der InSAR-Ergebnisse können potenzielle Risikozonen identifiziert werden, insbesondere Hangbewegungen und Setzungen in Siedlungsgebieten sowie im Bereich der Verkehrs- und Bahninfrastruktur.
- **Integration in das landeseigene GIS-System (iMap):** Bereitstellung der InSAR-Daten in einem kompatiblen Format zur nahtlosen Integration in bestehende GIS-Systeme des Landes Niederösterreich.
- **Schulungen:** Schulung von Fachpersonal der Abteilung Allgemeiner Baudienst in der Interpretation und Nutzung von InSAR-Daten, um eine effiziente Integration in bestehende Entscheidungsprozesse zu ermöglichen.
- **Technischer Bericht:** Erstellung eines Abschlussberichts mit detaillierten statistischen Parametern, Ergebnisaufstellungen und Empfehlungen für die langfristige Nutzung von SB-InSAR zur Überwachung von Siedlungsgebieten und Infrastrukturen.

Die Analyse basiert auf einer methodischen Vorgehensweise zur Sicherstellung hoher Qualitätsstandards. Dazu gehören:

- **Datenverarbeitung:** Nutzung spezialisierter Software wie SqueeSAR® zur Analyse großer Datenmengen und zur Quantifizierung von Bewegungsänderungen über die Zeit.
- **Schulungsmaßnahmen:** Vermittlung praxisnaher Kenntnisse zur Interpretation von InSAR-Daten für eine verbesserte Entscheidungsfindung in der geologischen Überwachung.
- **Potentialanalyse:** Untersuchung der langfristigen Integration von SB-InSAR in bestehende geotechnische und infrastrukturelle Monitoring-Systeme und Entwicklung geeigneter Integrationsszenarien.

Durch die Umsetzung dieses Projekts sollen fundierte Entscheidungsgrundlagen geschaffen werden, um die geologische Überwachung, Sicherheit und Resilienz der Siedlungsbereiche und Infrastrukturen in Niederösterreich nachhaltig zu erhöhen.

## 4 Grundlagen der InSAR-Technologie

### 4.1 Geschichte

Satellitenbasiertes (SB) InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ist derzeit die einzige Methode, um Bodenbewegungen und -deformationen (i) präzise und direkt (mm-Genauigkeit), (ii) skalierbar (von einzelnen Gebäuden zu umfangreichen Gebieten) und (iii) über lange Zeiträume hinweg (von weniger als einem bis hin zu 25 Jahren, historische Archive) zu erfassen.

SB-InSAR ist eine bewährte Technologie, der erste ERS-1 Radarsatellit wurde bereits 1991 von der European Space Agency (ESA) in Betrieb genommen (ESA 2024a). Limitierende Faktoren waren damals die niedrige Auflösung (30 \* 30 m) und die lange Wiederkehrzeit von 35 Tagen (Wiedererreichung des gleichen Punkts auf der Erdoberfläche). Der deutsche Erdbeobachtungssatellit TerraSAR-X (TSX) erzielte bei seinem Start im Jahr 2008 eine räumliche Auflösung von 1\*1 m und eine zeitliche Auflösung von elf Tagen (ESA 2024b). Dadurch war der Satellit insbesondere für technische Fragestellungen geeignet. Durch das Erdbeobachtungsprogramm Copernicus (EU, ESA) (COPERNICUS 2024; Aschbacher and Milagro-Pérez 2012) sind die Daten der Sentinel Satelliten seit Ende 2014 nahezu weltweit und kostenlos verfügbar. Die Sentinel-1 Satelliten (SNT) erreichen eine Auflösung von 20 \* 5 m (IW Modus) und eine Wiederkehrdauer von bis zu sechs Tagen. Aufgrund des Verlusts von Sentinel-1b im Dezember 2021 beträgt die aktuelle Wiederkehrzeit zwölf Tage. Aktuell gibt es rund ein Dutzend InSAR-Satelliten (Abbildung 1) und der Trend ist stark ansteigend.

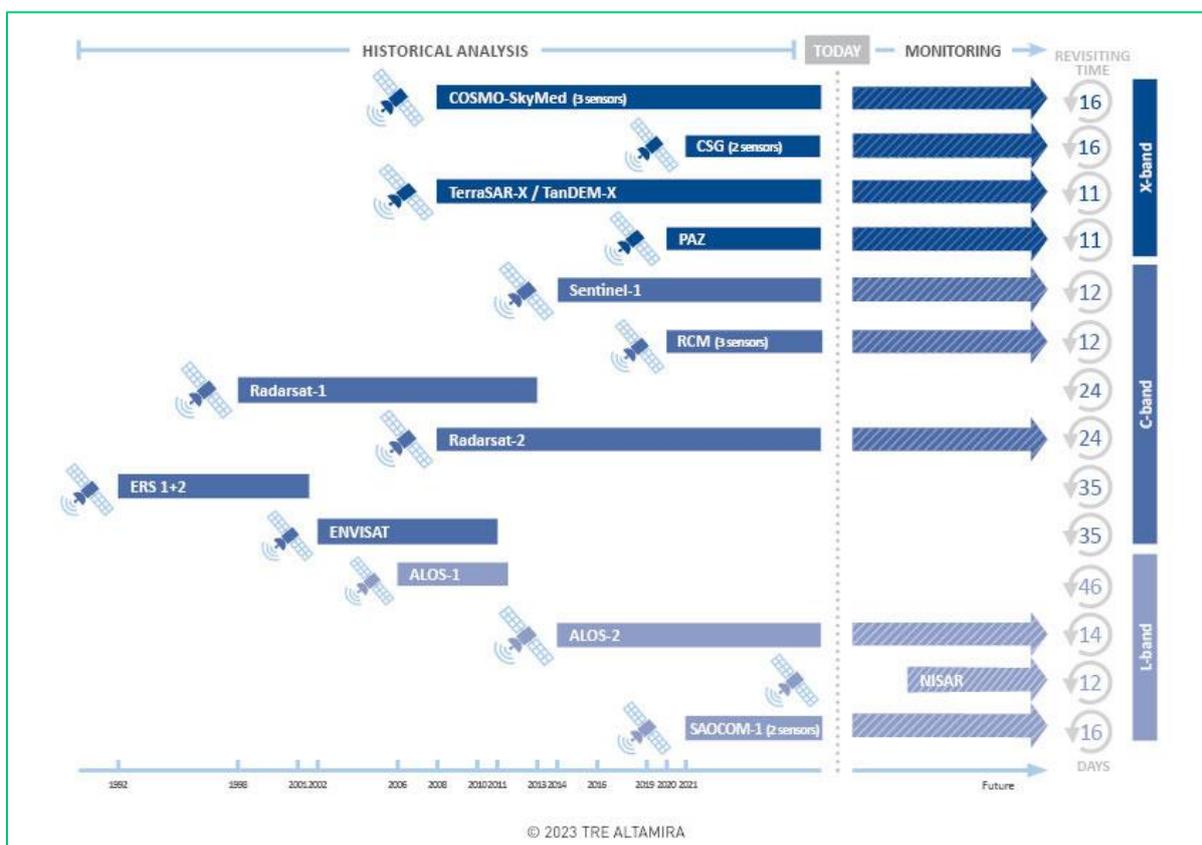


Abbildung 1: Auswahl aktueller SAR Satelliten inklusive Wiederkehrzeit und Frequenzbändern.



## 4.2 Messprinzip

Synthetic Aperture Radar (SAR) Satelliten nutzen Radar, um hochauflösende Bilder der Erdoberfläche zu erstellen, unabhängig von Wetterbedingungen oder Tageslicht. Das Funktionsprinzip basiert auf der Aussendung von Mikrowellenimpulsen, die von der Erdoberfläche reflektiert werden. Die reflektierten Signale werden vom Satelliten empfangen und durch komplexe Signalverarbeitung zu detaillierten Bildern zusammengesetzt.

### 4.2.1 Verschiedene Frequenzbänder für unterschiedliche Anwendungen

Die Satelliten verwenden verschiedene Frequenzbänder (Abbildung 1) um unterschiedliche Anwendungen zu ermöglichen. Zu den wichtigsten gehören:

- **L-Band:** 1-2 GHz, wird häufig für landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche und Umweltüberwachungsanwendungen verwendet, da es tiefer in die Vegetation eindringen kann.
- **C-Band:** 4-8 GHz, das am häufigsten verwendete Band für Erdbeobachtungssatelliten wie Sentinel-1. Es bietet eine gute Balance zwischen Auflösung und Eindringtiefe und ist weniger anfällig für atmosphärische Störungen.
- **X-Band:** 8-12 GHz, wird für hochauflösende Anwendungen wie geotechnisches Monitoring und militärische Überwachung verwendet. Es bietet eine hohe räumliche Auflösung, aber geringere Eindringtiefe in Vegetation.

### 4.2.2 Orbit und Aufnahmegeometrie

SAR-Satelliten operieren in einem polaren oder sonnensynchronen Orbit, bei dem sie die Erde in Nord-Süd-Richtung überfliegen, während sich die Erde darunter von West nach Ost dreht. Dieser Orbit führt dazu, dass der Satellit sowohl in einer aufsteigenden (ascending - ASC) als auch in einer absteigenden (descending - DSC) Aufnahmegeometrie operiert (Abbildung 2).

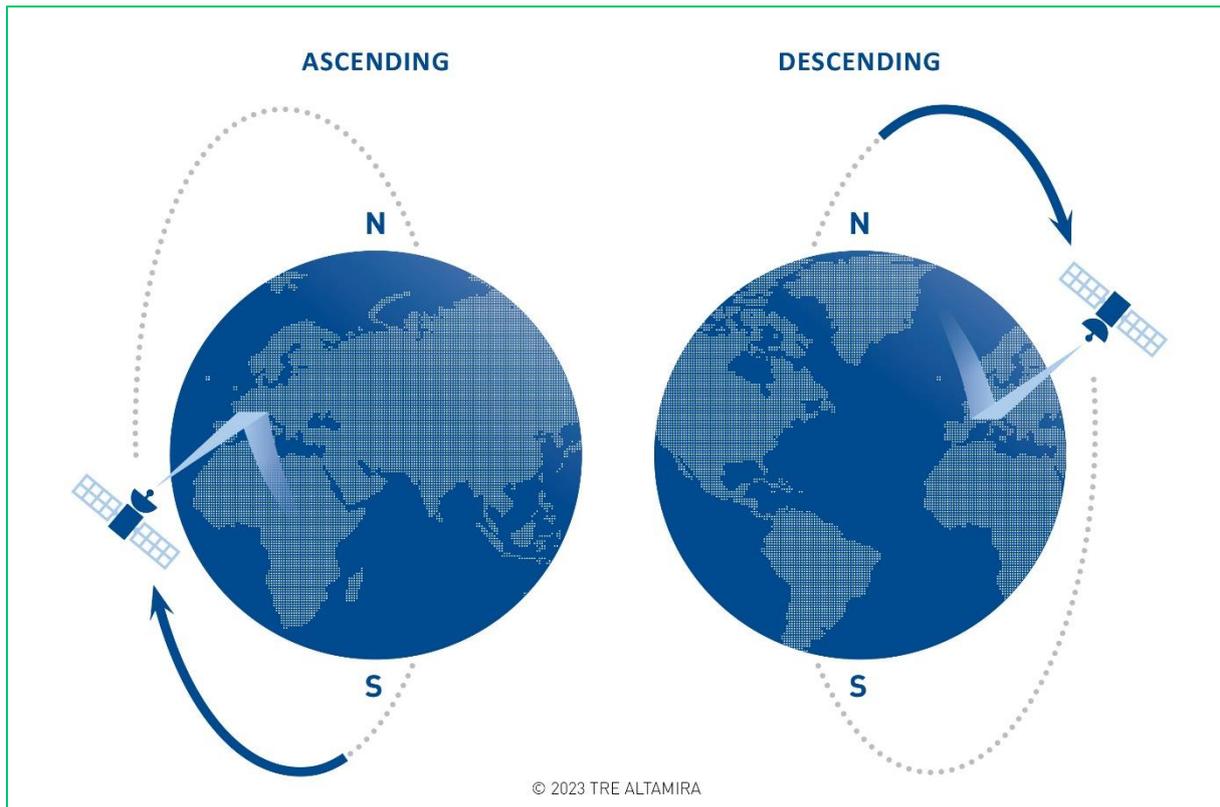


Abbildung 2: Aufsteigende (ascending – ASC) und absteigende (descending – DSC) Geometrie.

In der aufsteigenden Geometrie bewegt sich der Satellit vom Südpol in Richtung Nordpol, während er sich in der absteigenden Geometrie vom Nordpol in Richtung Südpol bewegt.

### 4.2.3 Blickrichtung, Einfallswinkel und Sichtlinie (LOS)

Die Blickrichtung ( $\varphi$ ) des SAR-Systems ist in der Regel seitlich ( $90^\circ$ ) zur Flugbahn des Satelliten ausgerichtet und wird in  $^\circ$  N angegeben. In der ASC-Geometrie blickt der Satellit typischerweise nach rechts (östlich) der Flugbahn, während er in der DSC-Geometrie in die entgegengesetzte Richtung blickt (westlich). Diese seitliche Ausrichtung der Blickrichtung ermöglicht eine kontinuierliche Abtastung der Erdoberfläche, wobei das SAR-System die relative Bewegung des Satelliten zur Erde nutzt, um eine synthetische Apertur zu erzeugen (SAR). Dadurch wird eine hohe Auflösung der erfassten Bilder erreicht, unabhängig davon, ob der Satellit sich in der aufsteigenden oder absteigenden Geometrie befindet.

Der Einfallswinkel ( $\theta$ ) bei SAR bezeichnet den Winkel zwischen der vertikalen Linie zur Erdoberfläche und der Richtung des einfallenden Radarstrahls (Abbildung 3). Dieser Winkel ist variabel und abhängig vom Satellitensystem (bei Sentinel ca.  $20 - 46^\circ$ , TerraSAR-X  $20 - 60^\circ$ ), wobei ein kleinerer Einfallswinkel nahe dem Nadir-Punkt (direkt unter dem Satelliten) und ein größerer Einfallswinkel weiter entfernt vom Nadir-Punkt auftritt. Der Einfallswinkel beeinflusst die Art und Weise, wie die reflektierten Signale interpretiert werden, und spielt eine wichtige Rolle bei Geländebezogenen Abschattungen, der Lagegenauigkeit von Messpunkten (z.B. multiple Reflektionen von unterschiedlichen Höhenlagen, Verzerrungen) und der Analyse von Bewegungsrichtungen.

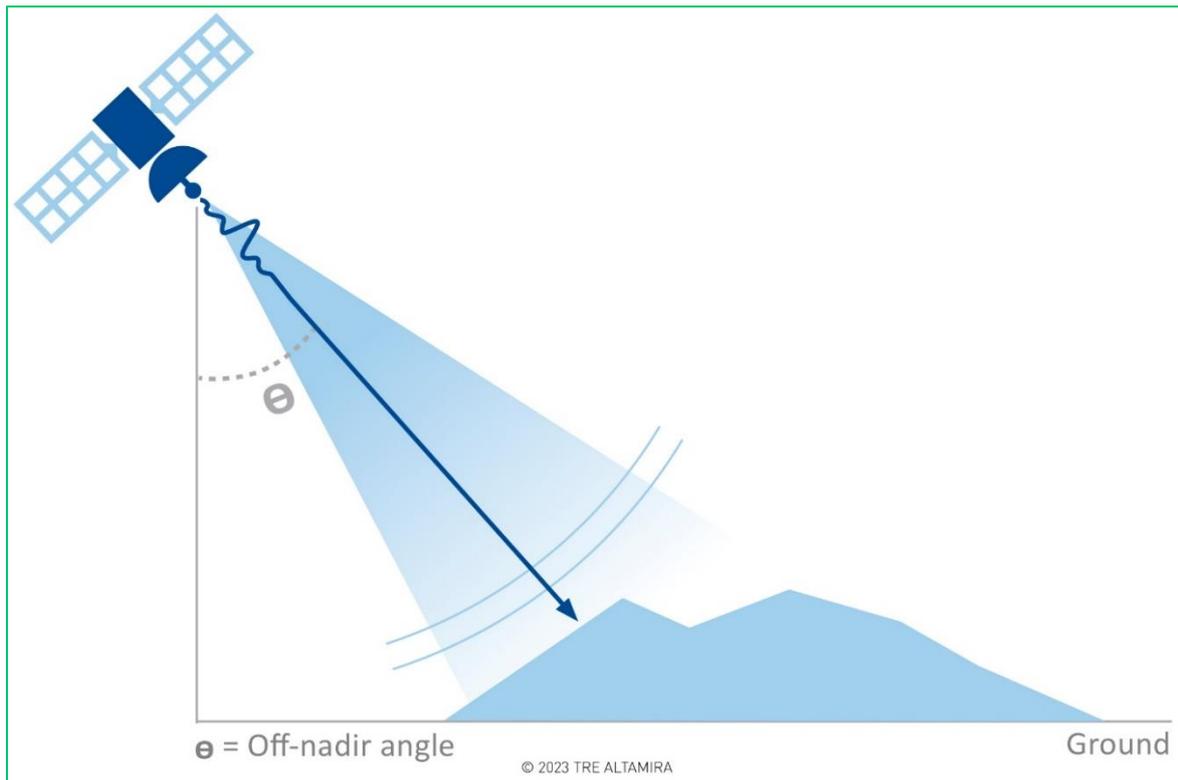


Abbildung 3: Einfallswinkel  $\theta$ .

InSAR misst Bodenbewegungen also nicht direkt in geografischen Koordinaten wie Nord-Süd oder Vertikal, sondern entlang der Line of Sight (LOS) – also der Sichtlinie zwischen dem Satelliten und der Erdoberfläche. Diese Sichtlinie verläuft je nach Satellitenorbit schräg zur Erdoberfläche, entweder in aufsteigender (Ascending, ASC) oder absteigender (Descending, DSC) Geometrie.

In der aufsteigenden Geometrie (ASC) bewegt sich der Satellit von Süd nach Nord und blickt seitlich nach Osten. In der absteigenden Geometrie (DSC) fliegt der Satellit von Nord nach Süd und blickt nach Westen. Dadurch ergibt sich eine schräge Sichtlinie, die sowohl vertikale als auch ost- bzw. westgerichtete Bewegungen erfasst – jedoch keine Nord-Süd-Bewegungen, da diese senkrecht zur LOS verlaufen. In der Nord-Süd Bewegung kann ausschließlich die vertikale Komponente der Bewegung gemessen werden.

Ein zentrales Merkmal der InSAR-Technologie ist, dass ausschließlich der Anteil einer Bewegung erfasst wird, der parallel zur LOS verläuft. Bewegungen senkrecht zur LOS – etwa exakt vertikal oder quer zur Blickrichtung – werden hingegen nur anteilig (in der Regel geringer als die reale Bewegung) detektiert. Das bedeutet: Wenn sich ein Objekt beispielsweise vertikal hebt oder senkt, erscheint diese Bewegung in den InSAR-Daten je nach Einfallswinkel des Radars abgeschwächt. Rein horizontale Bewegungen in Ost-West-Richtung wirken sich unterschiedlich auf ASC- und DSC-Daten aus: Eine Ostbewegung erscheint als positives Signal in ASC, aber als negatives Signal in DSC; bei einer Westbewegung ist es umgekehrt.

Die reale Bodenbewegung wird daher in SAR-Bildern entlang der Sichtlinie (Line of Sight – LOS) abhängig von der Blickrichtung und dem Einfallswinkel projiziert, was bedeutet, dass nur der Anteil der Bewegung erfasst wird, der entlang LOS-Vektors verläuft (Abbildung 4).

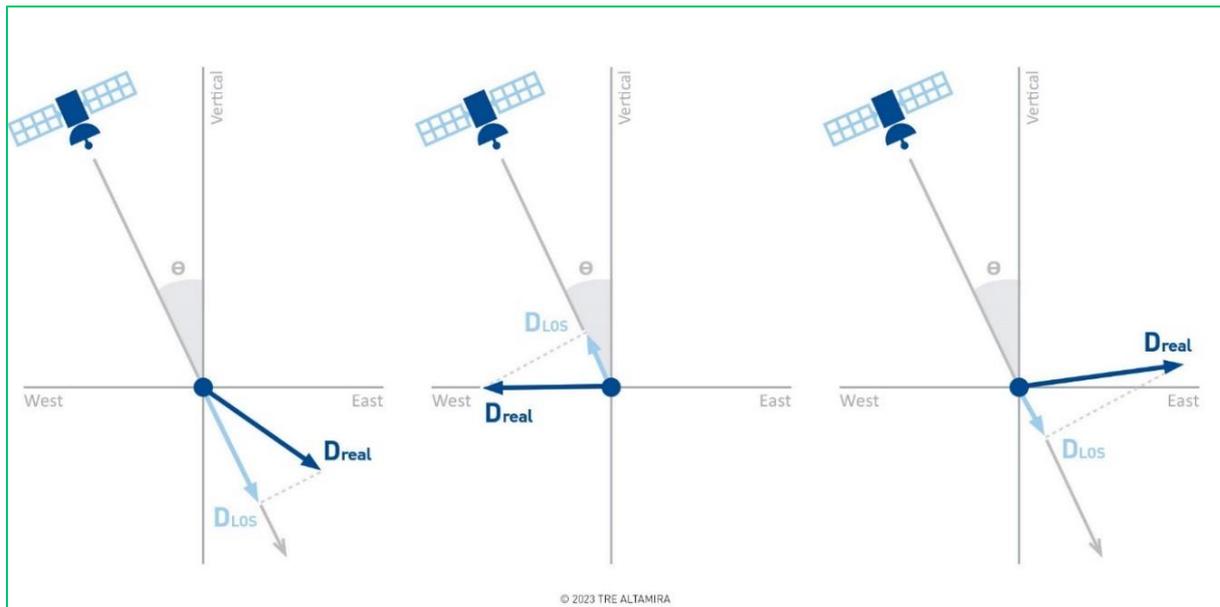


Abbildung 4: Projektion der realen Bodenbewegung auf die LOS.

### 4.2.4 Von SAR zu InSAR

Da SAR-Satelliten die Erde ununterbrochen umkreisen, erfassen sie im Laufe der Zeit zahlreiche Bilder desselben Gebiets, die wertvolle Einblicke in die Entwicklung der Erdoberfläche bieten (Shimada 2019). Jede SAR-Erfassung liefert zwei entscheidende Informationsteile: Phase und Amplitude. Die Phase, verbunden mit dem Abstand zwischen Sensor und Ziel, ist eine Schlüsseleigenschaft, die bei interferometrischen Anwendungen verwendet wird (InSAR – SAR Interferometry, Abbildung 5).

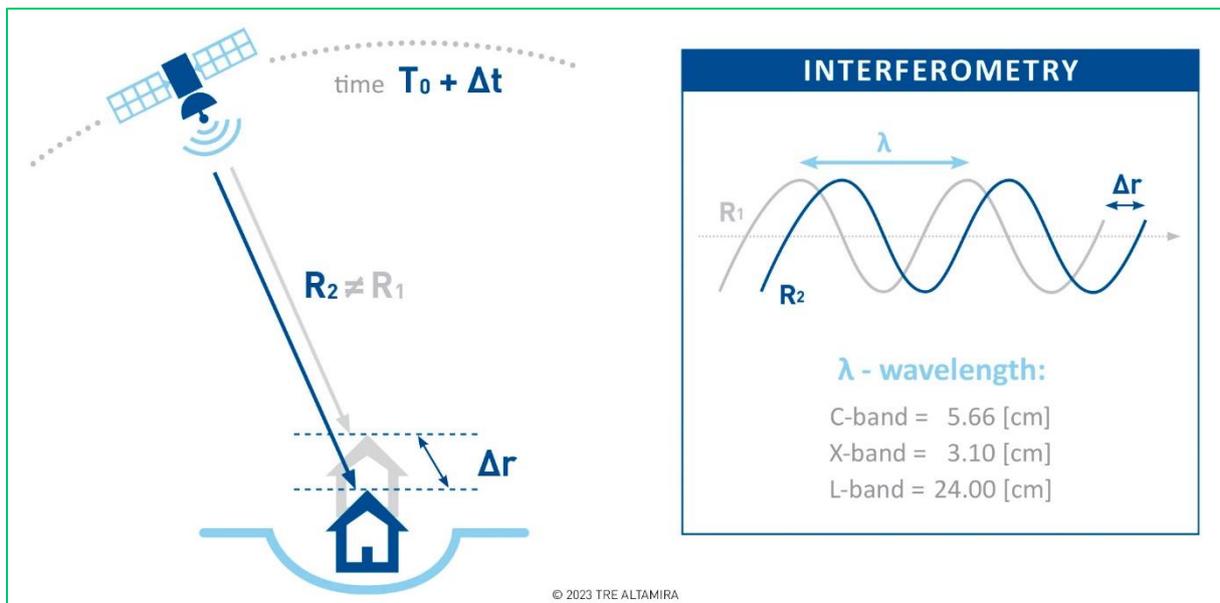


Abbildung 5: SAR-Satelliten erfassen im Lauf der Zeit zahlreiche Bilder desselben Gebiets. Die Phasenverschiebung wird für interferometrische Anwendungen verwendet.

Bei einer InSAR-Messung werden mindestens zwei SAR-Bilder desselben Gebiets aufgenommen, entweder zu verschiedenen Zeitpunkten (temporal) oder aus leicht unterschiedlichen Positionen (räumlich). Die Phaseninformationen dieser Bilder, die durch die Laufzeit der reflektierten Radarwellen bestimmt werden, werden



miteinander verglichen. Die Phasendifferenz zwischen den Bildern, auch Interferogramm genannt, enthält Informationen über Veränderungen in der Entfernung zwischen dem Satelliten und der Erdoberfläche. Diese Phasendifferenzen können genutzt werden, um Bewegungen der Erdoberfläche, wie sie bei Erdbeben, Vulkanausbrüchen oder langsamen Bodenbewegungen auftreten, millimetergenau zu messen.

#### 4.2.5 1D- und 2D-Vektorberechnungen

Die Berechnung von 1D- und 2D-Vektoren aus InSAR-Daten bildet die Grundlage für die Analyse von Bodenbewegungen, bringt jedoch jeweils spezifische Vor- und Nachteile mit sich.

Die **1D-Vektorberechnung** konzentriert sich auf die Bestimmung von Verschiebungen entlang der Line of Sight (LOS) des Satelliten (siehe Abbildung 4). Diese Methode liefert präzise Informationen über die Bewegungen in der Richtung des Radarstrahls, entweder in Richtung auf den Satelliten zu oder von ihm weg. Die 1D-Analyse ist relativ einfach durchzuführen und bietet eine hohe Präzision bei der Bestimmung von Bewegungen entlang einer Achse. Sie eignet sich gut für Anwendungen, bei denen Bewegungen hauptsächlich in eine Richtung erfolgen (z.B. gravitative Bewegungen).

Die **2D-Vektorberechnung** erweitert die Analyse auf zwei Dimensionen, indem sie Daten aus aufsteigenden (ASC) und absteigenden (DSC) Orbit-Geometrien kombiniert. Diese Methode ermöglicht es, die Bewegungen in der Horizontalebene (nur Ost-West aufgrund der Satelliten-Orbits – siehe 2.2.2) sowie in der Vertikalrichtung zu bestimmen. Durch die Entkopplung der LOS-Bewegungen und die Vektorzerlegung können Bewegungen in unterschiedlichen Richtungen detailliert erfasst und dargestellt werden, was eine umfassendere Analyse von Deformationsprozessen ermöglicht.

Jedoch gibt es einige Nachteile der 2D-Vektorberechnung. Einerseits führt die Kombination von Daten aus unterschiedlichen Orbit-Geometrien zu einer geringeren Lagegenauigkeit der Messpunkte im Vergleich zur 1D-Analyse. Kleine Ungenauigkeiten in der Positionsbestimmung können die Präzision der berechneten Bewegungsvektoren beeinflussen, insbesondere in Gebieten mit komplexer Topografie oder variierenden Beobachtungsbedingungen. Andererseits ist die Messpunktdichte bei 2D-Vektorberechnungen geringer als bei 1D-Analysen. Da die 2D-Berechnung auf der Kombination und Übereinstimmung von Messpunkten aus verschiedenen Aufnahmegeometrien basiert (ASC und DSC), reduziert sich die Anzahl der verfügbaren, konsistenten Messpunkte, was die räumliche Auflösung der Ergebnisse beeinflussen kann (insbesondere in Hanglagen). Diese geringere Messpunktdichte erfordert eine sorgfältige Interpretation der Daten, insbesondere in Gebieten mit kleinskaligen Bewegungen. Trotz dieser Einschränkungen bleibt die 2D-Vektorberechnung ein wertvolles Werkzeug, insbesondere wenn eine umfassende Analyse der Bewegungsdynamik in mehreren Richtungen erforderlich ist.

### 4.3 Prozessierung von InSAR Messpunkten

Alle SAR-Daten wurden mit dem Multi-Interferogramm-Verfahren SqueeSAR<sup>®</sup> prozessiert (Ferretti et al. 2011). SqueeSAR<sup>®</sup> ist vom Unternehmen TRE ALTAMIRA (TRE ALTAMIRA 2024) patentiert und wurde entwickelt, um die Begrenzungen herkömmlicher InSAR-Methoden zu überwinden, insbesondere in Bezug auf die Phasendekorrelation in heterogenen Gebieten mit Vegetation oder städtischen Umgebungen. SqueeSAR<sup>®</sup> kombiniert - auf Basis multitemporaler SAR-Satellitenbilder - Informationen von sogenannten Persistent Scatterers (PS) und Distributed Scatterers (DS), um präzisere und zuverlässigere Ergebnisse zu erzielen.

Für das Erreichen einer hohen Präzision und Genauigkeit (siehe 4.4) benötigt SqueeSAR<sup>®</sup> einen SAR-Datensatz von mindestens 15 bis 20 Bildern, die über dasselbe Gebiet mit demselben Aufnahmemodus und derselben Geometrie aufgenommen wurden. Durch die Integration von PS, die stabile und punktuelle Radarreflektoren sind, und DS, die eine diffuse Streuung von Signalen darstellen, kann SqueeSAR<sup>®</sup> auch in Gebieten mit geringer Signalstabilität zuverlässige Bewegungsinformationen extrahieren und so eine umfassende Überwachung von Bodenbewegungen ermöglichen.

### 4.4 Präzision und Genauigkeit

Die Präzision der SqueeSAR<sup>®</sup>-Ergebnisse kann bestimmt werden durch:

- - Die Lage der Messpunkte (MP).
- - Die Verschiebungs-Zeitreihen.

Die Lagekoordinaten jedes MP hängen von dessen SAR-Koordinaten und dessen Höhe ab, die aus der InSAR Analyse-geschätzt wird. Je höher die räumliche Auflösung des in der Analyse verwendeten Satellitensensors ist, desto besser ist die Präzision der Geokodierung. Tabelle 1 gibt die typischen Präzisionswerte für die UTM-Koordinaten von MP in mittleren Breiten an.

*Tabelle 1: Typische Präzisionswerte für die UTM-Koordinaten von MP in mittleren Breiten. Die Werte beziehen sich auf einen MP in weniger als 1 km Entfernung vom REF und einen Datensatz von mindestens 30 SAR-Bildern.*

Richtung	C-Band SNT [m]	X-Band TSX [m]	L-Band ALOS [m]
Nord	± 8	± 1	± 2
Ost	± 8	± 3	± 7
Vertikal (Höhe)	± 8	± 1.5	± 2

Die Präzision der Verschiebungs-Zeitreihe für jeden Messpunkt (MP) wird durch die Standardabweichung der durchschnittlichen Verschiebungsrate sowie durch die Standardabweichung der Einzelmessungen beschrieben. Die Standardabweichung misst die Streuung der Messwerte um ihren Mittelwert und gibt somit Aufschluss über die Präzision der Messungen. Ein niedriger Wert der Standardabweichung zeigt an, dass die Messungen eng um den Mittelwert



gruppiert sind, während eine hohe Standardabweichung darauf hinweist, dass die Messungen über einen größeren Wertebereich verteilt sind. Unter der Annahme, dass das Rauschen der Messungen normalverteilt (gaußförmig) ist, liegen bei einer Standardabweichung ( $\sigma$ ) 95 % der Messwerte innerhalb eines Bereichs von  $\pm 2 \sigma$  um den Mittelwert. Bei SqueeSAR®-Messungen bezieht sich die Standardabweichung auf die durchschnittliche Verschiebungsrate in Bezug auf einen Referenzpunkt. Ähnlich wie in traditionellen geodätischen Netzen nimmt die Präzision mit zunehmender Entfernung vom Referenzpunkt ab.

In einem Datensatz von mindestens 30 Bildern, die über einen Zeitraum von zwei Jahren aufgenommen wurden, zeigte ein Messpunkt, der weniger als 1 km vom Referenzpunkt entfernt ist, eine typische Standardabweichung von weniger als 1 mm/a. Die Präzision der einzelnen Verschiebungswerte liegt im Durchschnitt bei  $\pm 5$  mm (Tabelle 2).

*Tabelle 2: Typische Werte für die Standardabweichung eines Messpunktes weniger als 1 km vom REF entfernt unter Verwendung eines Datensatzes von mindestens 30 Szenen, die einen Zeitraum von zwei Jahren abdecken.*

<b>Verschiebung (LOS)</b>	<b>Standardabweichung der durchschnittlichen Verschiebungsrate</b>	<b>Standardabweichung einer Einzelmessung</b>
Präzision	< 1 mm/a	< 5 mm

Während die Präzision von InSAR-Messpunkten statistisch berechnet wird, wird die Genauigkeit typischerweise nicht systematisch bewertet. Die Genauigkeit von InSAR kann durch die Verwendung ergänzender „Ground-Truth“-Daten, wie z.B. bodengestützte geodätische Messungen, geotechnische Bewertungen oder intelligente InSAR-Corner Reflektoren, bewertet werden. Genauigkeitsanalysen vorangegangener Studien zeigen Genauigkeiten im unteren mm-Bereich.

## 5 InSAR-Limits

InSAR ist eine leistungsfähige Technologie zur Überwachung von Boden- und Bauwerksbewegungen, doch gibt es einige Einschränkungen (Tabelle 3). Eine der Hauptbegrenzungen ist die Sensitivität gegenüber Vegetation und anderen dynamischen Oberflächen, die das reflektierte Radar-Signal verändern können, was zu Dekorrelation (keine Messpunkte) oder ungenauen Messungen führt (hier können Corner-Reflektoren helfen – siehe 5.1). Zudem können schnelle oder abrupte Bewegungen, wie bei schnellen Hangrutschungen, einen Phasensprung bewirken und nicht erfasst werden. Bauwerke in dicht bebauten städtischen Gebieten können ebenfalls Herausforderungen darstellen, da Mehrwegeeffekte und geometrische Verzerrungen auftreten können, wenn das Radar-Signal von mehreren Oberflächen reflektiert wird. Topografische Probleme wie stark geneigte Geländeoberflächen oder steile Hänge können ebenfalls zu Abschattungen, Verzerrungen oder Überlagerungen im Radarbild führen, was die genaue Erfassung von Bewegungen erschwert. Schließlich erfordert die Interpretation der InSAR-Daten spezialisierte Kenntnisse, um Bewegungen präzise zu analysieren und zwischen natürlichen und durch den Menschen verursachten Veränderungen zu unterscheiden.

Tabelle 3: Limits von InSAR-Messungen.

Einschränkung	Beschreibung
<b>Dekorrelation durch Vegetation</b>	Dichte Vegetation kann zu Phasendekorrelation führen, wodurch die Messpunktdichte und Genauigkeit der Messungen abnehmen.
<b>Erfassung schneller Bewegungen</b>	Schnelle oder abrupte Bodenbewegungen können über den typischen InSAR-Zyklus hinausgehen (Phasensprung, abhängig von der Wellenlänge) und daher entweder nicht erfasst oder ungenau sein.
<b>Geometrische Verzerrungen</b>	Mehrwegeeffekte und geometrische Verzerrungen in städtischen Gebieten können die Datenqualität beeinträchtigen.
<b>Topografische Probleme</b>	Stark geneigte Flächen oder steile Hänge können zu Abschattungen, Überlagerungen und Verzerrungen im Radarbild führen. Die MP-Dichte auf N- und S-exponierten Hängen ist aufgrund der Aufnahmegeometrien vermindert (siehe 4.2.2).
<b>Interpretationsschwierigkeiten</b>	Die Analyse der InSAR-Daten erfordert spezialisiertes Wissen, um korrekte Schlüsse zu ziehen.

### 5.1 Corner-Reflektoren

Corner-Reflektoren werden vorrangig dort eingesetzt, wo keine "natürlichen" Persistent Scatterers (PS) vorhanden sind, um stabile und verlässliche Referenzpunkte für Radar-Messungen zu schaffen. Diese speziellen Vorrichtungen bestehen aus drei rechtwinklig zueinander angeordneten reflektierenden Flächen, wodurch sie Radarwellen sehr effizient und gezielt zurück zum Sender reflektieren

(Abbildung 6). In der InSAR-Technologie erzeugen Corner Reflektoren ein starkes und gut definiertes Radar-Echo, das es ermöglicht, präzise Verschiebungsmessungen durchzuführen. Sie sind besonders nützlich in Gebieten, in denen natürliche Reflektoren instabil oder unzureichend sind, und tragen dazu bei, die Genauigkeit und Konsistenz der Bewegungsdaten der Erdoberfläche oder Bauwerke zu verbessern.



Abbildung 6: Corner Reflektor inkl. GNSS-Antenne und Messspiegel zur Verbesserung des Radar-Echos (Hangrutschungs-Monitoring, Salzburg AG, Hintermuh).

Darüber hinaus können Corner-Reflektoren mit zusätzlichen Komponenten wie Messspiegeln, GNSS Systemen oder IoT-Sensoren wie Inklinometern ausgestattet. Mit diesen Konfigurationen wird es ermöglicht, Corner-Reflektoren als Referenzpunkte auch in Boden-gebundene Vermessungsnetze zu integrieren. IoT-Sensoren ermöglichen zusätzlich Informationen zu den Corner-Standorten und können für Qualitätskontrollen der InSAR-Daten verwendet werden.

## 6 Potentialstudie – Land Niederösterreich

Das Bundesland Niederösterreich verfügt über eine weitreichende und vielfältige Infrastruktur, die sowohl urbane als auch ländliche Regionen umfasst. Die Region wird von einem dichten Netz an Verkehrswegen durchzogen, darunter zahlreiche Straßen, Bahntrassen und Brücken, die essenzielle Verbindungen für den Personen- und Güterverkehr darstellen. Besonders bedeutend sind die Hauptverkehrsachsen, die Niederösterreich mit den anderen Bundesländern Österreichs sowie mit den Nachbarstaaten verbinden. Die geologischen und geomorphologischen Gegebenheiten, geprägt durch hügelige Landschaften, Flussniederungen und geogenen Prozessen wie Setzungen oder Hangbewegungen, stellen dabei besondere Herausforderungen für die Instandhaltung und Überwachung der Infrastrukturen und Siedlungsbereiche dar.

Die klimatischen Bedingungen, insbesondere periodische Dürreperioden, Hochwasserereignisse, Frost-Tau-Zyklen und die langsame, aber stetige Bewegung von Bodenmaterial, erhöhen das Risiko von Setzungen, Rutschungen und infrastrukturellen Schäden. Dies erfordert innovative Überwachungstechnologien, um potenzielle Gefahren frühzeitig zu identifizieren und die langfristige Sicherheit von Bauwerken und Verkehrswegen zu gewährleisten. Das Untersuchungsgebiet (Abbildung 7) umfasst das gesamte Landesgebiet von Niederösterreich mit einer Fläche von ca. 19.200 km<sup>2</sup>.

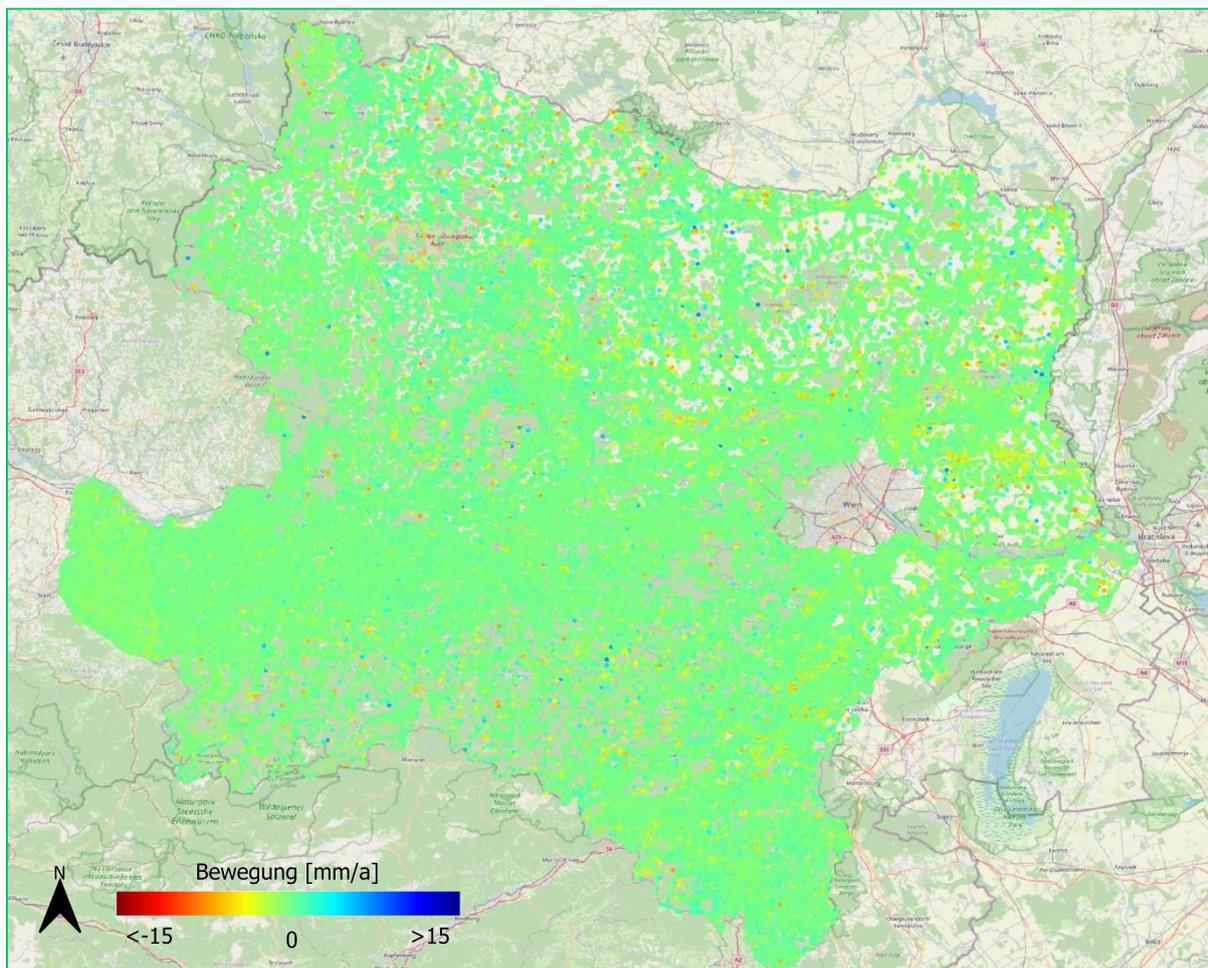


Abbildung 7: InSAR-MP Abdeckung im Untersuchungsgebiet.

Eine der identifizierten Hotspot-Regionen in Niederösterreich ist in Abbildung 8 dargestellt. Zu erkennen sind Hebungszone(n) (blaue Messpunkte) im Gemeindegebiet von Dürnkrot, gelegen an der östlichen Landesgrenze Niederösterreichs. Die auffälligen Hebungen verlaufen in Nord-Süd-Richtung entlang der March und weisen eine Hebung weniger Millimeter pro Jahr auf. Als mögliche Ursache wird eine Infiltration von Wasser aus der March in den regionalen Grundwasserkörper vermutet. Diese Hypothese bedarf jedoch weiterführender Untersuchungen, um verifiziert bzw. falsifiziert zu werden.

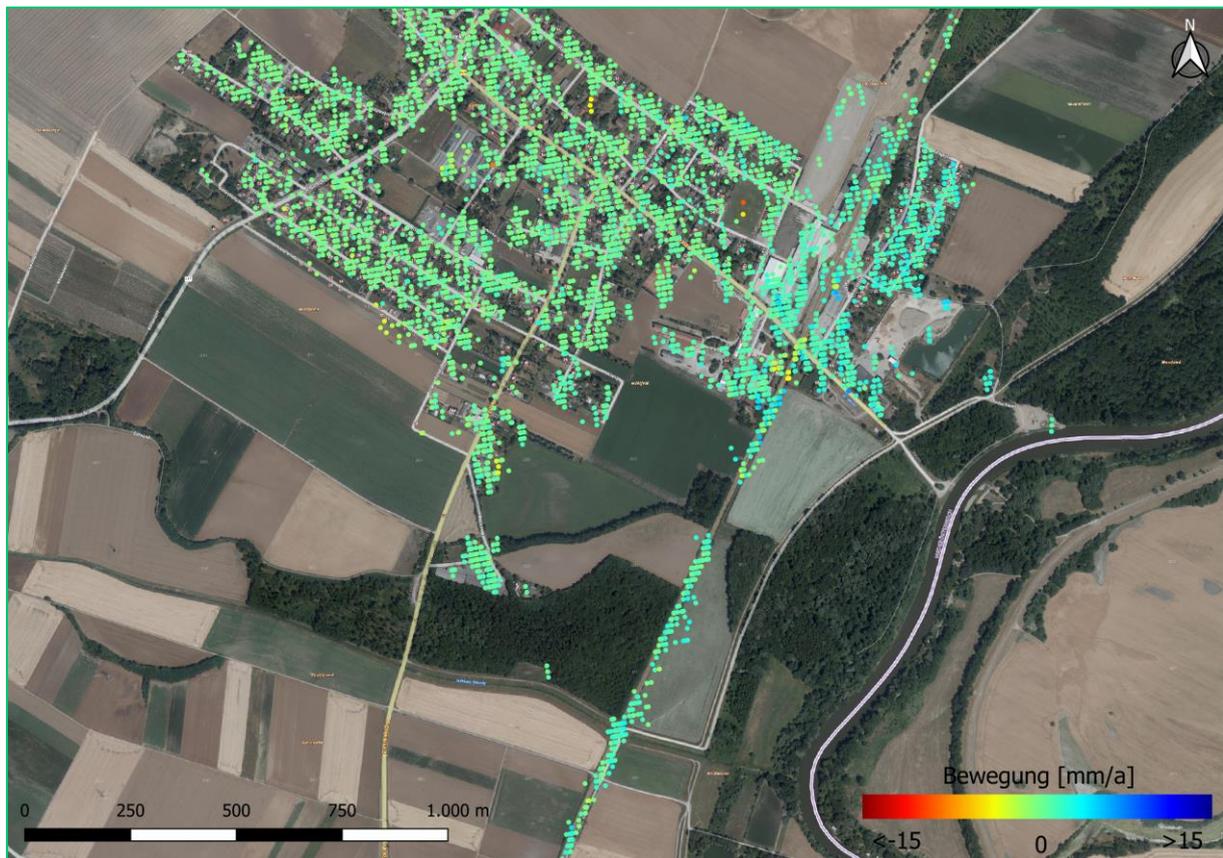


Abbildung 8: Hebungen im Gemeindegebiet Dürnkrot.

Abbildung 9 zeigt die typische Charakteristik der InSAR-Ergebnisse auf Basis von Sentinel-1-Daten. Deutlich sichtbar ist die hohe Messpunktdichte insbesondere in Bereichen mit Bauwerken wie Gebäuden, Straßen, Hochspannungsmasten oder Windkraftanlagen.

In deutlichem Kontrast dazu stehen landwirtschaftlich genutzte Flächen sowie Waldgebiete (vgl. Abbildung 8), in denen kaum oder keine InSAR-Messpunkte vorliegen. In diesen Arealen ist die Kohärenz des Radarsignals über längere Zeiträume hinweg unzureichend, sodass selbst bei mehrjährigen Auswertungen keine qualitativ belastbaren Aussagen getroffen werden können.

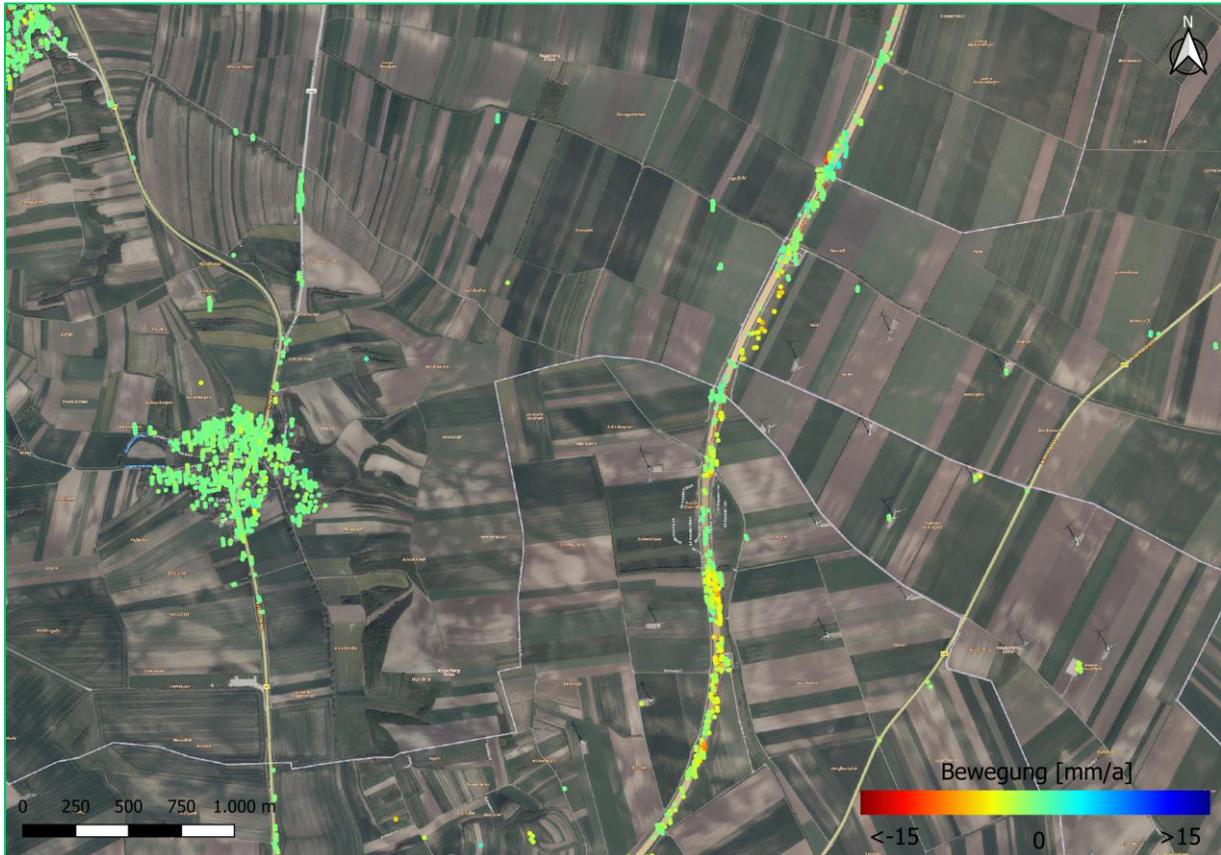


Abbildung 9: Charakteristik der InSAR-Auswertungen im ländlichen Raum.

## 6.1 Verwendete InSAR Datensätze

Die vorliegende Studie wurde unter Verwendung von Sentinel-1-Satellitendaten durchgeführt, die im Rahmen des Copernicus-Programms der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) zur Erdbeobachtung bereitgestellt werden. Sentinel-1 ist eine Reihe von Radar-Satelliten, die seit 2014 im Einsatz sind und eine präzise Erdbeobachtung mit synthetischer Aperturradar-Technologie (SAR) ermöglichen. Diese Satelliten bieten eine räumliche Auflösung von 5x20 m (im Interferometrie-Modus) und eine zeitliche Abdeckung mit einer Wiederholrate von bis zu sechs Tagen, was für die Analyse von Bodenbewegungen besonders vorteilhaft ist.

Für die Analyse in dieser Studie wurden ausschließlich Sentinel-1 Daten verwendet, die im Interferometrie-Modus (IW) verarbeitet wurden. Die Sentinel-1 Mission umfasst zwei Satelliten (Sentinel-1A und Sentinel-1B), die in einer gemeinsamen Umlaufbahn operieren und eine hohe zeitliche, sowie räumliche Abdeckung erreichen. Die Daten wurden in aufsteigender (ASC) und absteigender (DSC) Geometrie verarbeitet, um die Genauigkeit der Verschiebungsmessungen zu maximieren und eine vollständige Analyse von Bodenbewegungen in verschiedenen Richtungen zu gewährleisten. Darüber hinaus wurden alle überlappenden Satelliten Tracks jeweils vollständig prozessiert.

Die zeitliche Verteilung der Sentinel-1 Bildaufnahmen und die zugehörigen Metadaten wie die Flugrichtung und den Einfallswinkel der Satelliten werden in Tabelle 4 dargestellt, um die Grundlage für die Analyse und Interpretation der Bodenbewegungen zu bieten.

Tabelle 4: Verwendete InSAR Datensätze.

Satellit	Geometrie	Track Nr.	$\Phi$ [° N]	$\theta$ [°]	# Szenen	Aufnahmezeitraum
SNT	ASC	T44	81	45	97	01.10.2021 – 21.09.2024
SNT	ASC	T73	78	32	98	03.10.2021 – 23.09.2024
SNT	ASC	T146	80	41	99	02.10.2021 – 28.09.2024
SNT	DSC	T22	280	37	97	06.10.2021 – 20.09.2024
SNT	DSC	T95	281	32	95	05.10.2021 – 25.09.2024
SNT	DSC	T124	279	46	95	01.10.2021 – 27.09.2024

## 6.2 SqueeSAR<sup>®</sup>-Analyse

Die folgenden SqueeSAR<sup>®</sup>-Analysen wurden für die ASC- und DSC-Geometrie durchgeführt:

- Bestimmung der Messpunkte an der Erdoberfläche: Identifikation permanenter (PS) und verteilter Rückstreuer (DS).
- 1D-Berechnung der jährlichen Verschiebungsrate: Für jeden PS und DS in [mm/a] entlang der Satelliten-Blickrichtung (LOS).

Tabelle 5 zeigt die Statistik zu jedem analysierten InSAR-Datensatz in Bezug auf das gesamte Untersuchungsgebiet. Insgesamt wurden mehr als 13.000.000 Messpunkte, mit einer Messpunktdichte von bis zu 156 MP/km<sup>2</sup> identifiziert. Die durchschnittliche Standardabweichung der Verschiebungsraten variiert zwischen 0,37 und 0,72 mm/a. Die durchschnittliche Standardabweichung einer einzelnen Messung variiert zwischen 2,37 und 2,44 mm.



Tabelle 5: Anzahl Messpunkte (MP), MP Dichte und Standardabweichungen der analysierten InSAR Datensätze.

Satellit	Geometrie	Track Nr.	MP [#]	MP/km <sup>2</sup>	Ø St. Dev. [mm/a]	Ø Std. Dev [mm]
SNT	ASC	T44	115.195	97	0,72	2,43
SNT	ASC	T73	2.892.566	114	0,48	2,37
SNT	ASC	T146	3.666.374	122	0,49	2,41
SNT	DSC	T22	3.266.589	99	0,39	2,42
SNT	DSC	T95	132.745	24	0,44	2,44
SNT	DSC	T124	3.082.850	156	0,37	2,39

## 7 Fazit und Ausblick

Diese Studie untersuchte die Anwendung von satellitengestütztem InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) zur Überwachung geogener Gefahren und infrastruktureller Veränderungen in Niederösterreich. Durch die Analyse von Sentinel-1 Daten konnten Bodenbewegungen in Siedlungsgebieten, entlang von Verkehrsinfrastrukturen wie Straßen und Bahntrassen sowie in geologisch relevanten Zonen (u.a. auch oberhalb der Waldgrenze) identifiziert werden. Dabei wurde sowohl das Auftreten großflächiger Setzungs- und Hebungsprozesse als auch kleinräumiger Deformationen untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass C-Band basiertes InSAR insbesondere in urbanen und infrastrukturell geprägten Gebieten eine hohe Messpunktdichte aufweist, wodurch Bodenbewegungen zuverlässig detektiert und bewertet werden können. In Bereichen mit dichter Bebauung, entlang von Bahnstrecken und Hauptverkehrsstraßen, insbesondere Autobahnen, konnten stabile und aussagekräftige Messzeitreihen gewonnen werden. Diese ermöglichen eine fundierte Identifikation von Setzungen und anderen Bewegungsmustern, die für die Infrastrukturüberwachung von hoher Relevanz sind.

Herausforderungen bestehen in ländlichen und bewaldeten Gebieten sowie auf landwirtschaftlichen Flächen, wo die Messpunktdichte aufgrund der geringeren Radarreflektivität deutlich reduziert ist (vgl. Abbildung 9). Besonders in landwirtschaftlich genutzten Flächen treten vereinzelt Messpunkte mit fehlerhaften Setzungsraten auf, die mit Vorsicht zu interpretieren sind. Dies unterstreicht die Notwendigkeit ergänzender Methoden oder einer gezielten Installation von Reflektoren, um die Datendichte in diesen Regionen zu erhöhen.

Zusammenfassend die wichtigsten Erkenntnisse:

- **Hohe Datenqualität in bebauten und infrastrukturell relevanten Gebieten:** InSAR zeigt eine verlässliche Erfassung von Bodenbewegungen in Städten, entlang von Bahnstrecken sowie auf Hauptverkehrswegen.
- **Begrenzte Datendichte im ländlichen Raum:** In unbebauten Gebieten wie Wäldern oder landwirtschaftlichen Flächen ist die Messpunktzahl deutlich reduziert, was die Interpretation erschwert.
- **Erkennung von relevanten Bewegungsmustern:** Setzungen, Rutschungen und Hangbewegungen in urbanen Bereichen sowie entlang der Infrastruktur konnten detailliert erfasst und analysiert werden.
- **Erweiterungspotenzial durch Integration in bestehende Systeme:** Die gewonnenen Daten lassen sich in das landeseigene GIS-System (iMap) integrieren und mit bodengestützten Messmethoden kombinieren.

Die Untersuchung belegt das Potenzial von InSAR als leistungsfähiges Werkzeug für die langfristige geotechnische und infrastrukturelle Überwachung in Niederösterreich. Durch die Kombination mit bestehenden Monitoring-Systemen, in situ Daten oder ergänzenden geographischen bzw. geologischen Informationen können Synergieeffekte genutzt werden.

Für die Zukunft wird empfohlen, die Analyse kontinuierlich mit aktualisierten Sentinel-1 Daten fortzuführen, um zeitliche Trends und langfristige Bewegungsmuster präziser abzubilden. Die gezielte Ergänzung durch



bodengestützte Messverfahren, insbesondere in Regionen mit geringer Messpunktdichte, könnte die Aussagekraft weiter erhöhen. Zudem könnte die Installation von Corner-Reflektoren in kritischen Bereichen helfen, die Verlässlichkeit der Messungen zu verbessern.

Die Integration von InSAR in bestehende Monitoring- und Wartungsprozesse bietet eine kosteneffiziente Möglichkeit zur großflächigen Überwachung der Infrastruktur und geologischer Risiken. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern eine wertvolle Grundlage für zukünftige Planungen und Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit und Resilienz der Infrastruktur in Niederösterreich.

## 8 Literatur

Aschbacher, Josef; Milagro-Pérez, Maria Pilar (2012): The European Earth monitoring (GMES) programme: Status and perspectives. In *Remote Sensing of Environment* 120, pp. 3–8. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.028.

COPERNICUS (2024): Copernicus - Earth observation component of the European Union's Space programme. European Union. Available online at <https://www.copernicus.eu>, updated on 1/29/2024, checked on 1/29/2024.

ESA (2024a): ERS Mission. European Space Agency. Available online at <https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers>, updated on 1/29/2024, checked on 1/29/2024.

ESA (2024b): TerraSAR-X and TanDEM-X Mission. European Space Agency. Available online at <https://earth.esa.int/eogateway/missions/terrasar-x-and-tandem-x>, updated on 1/29/2024, checked on 1/29/2024.

Ferretti, Alessandro; Fumagalli, Alfio; Novali, Fabrizio; Prati, Claudio; Rocca, Fabio; Rucci, Alessio (2011): A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. In *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 49 (9), pp. 3460–3470. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465.

Shimada, Masanobu (2019): Imaging from spaceborne and airborne SARs, calibration, and applications. Boca Raton, FL: Taylor & Francis (SAR remote sensing). Available online at <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315282619>.

TRE ALTAMIRA (2024): TRE ALTAMIRA. Company. TRE ALTAMIRA. Available online at <https://site.tre-altamira.com/>, updated on 8/16/2024, checked on 16.08.2024.29.01.2024.

## 9 Abbildungen

Abbildung 1: Auswahl aktueller SAR Satelliten inklusive Wiederkehrzeit und Frequenzbändern. ....	8
Abbildung 2: Aufsteigende (ascending – ASC) und absteigende (descending – DSC) Geometrie. ....	10
Abbildung 3: Einfallswinkel $\theta$ . ....	11
Abbildung 4: Projektion der realen Bodenbewegung auf die LOS. ....	12
Abbildung 5: SAR-Satelliten erfassen im Lauf der Zeit zahlreiche Bilder desselben Gebiets. Die Phasenverschiebung wird für interferometrische Anwendungen verwendet. ....	12
Abbildung 6: Corner Reflektor inkl. GNSS-Antenne und Messspiegel zur Verbesserung des Radar-Echos (Hangrutschungs-Monitoring, Salzburg AG, Hintermuhr). ....	17
Abbildung 7: InSAR-MP Abdeckung im Untersuchungsgebiet. ....	18
Abbildung 8: Hebungen im Gemeindegebiet Dürnkrut. ....	19
Abbildung 9: Charakteristik der InSAR-Auswertungen im ländlichen Raum. ....	20



## 10 Tabellen

Tabelle 1: Typische Präzisionswerte für die UTM-Koordinaten von MP in mittleren Breiten. Die Werte beziehen sich auf einen MP in weniger als 1 km Entfernung vom REF und einen Datensatz von mindestens 30 SAR-Bildern.....	14
Tabelle 2: Typische Werte für die Standardabweichung eines Messpunktes weniger als 1 km vom REF entfernt unter Verwendung eines Datensatzes von mindestens 30 Szenen, die einen Zeitraum von zwei Jahren abdecken. ....	15
Tabelle 3: Limits von InSAR-Messungen. ....	16
Tabelle 4: Verwendete InSAR Datensätze.....	21
Tabelle 5: Anzahl Messpunkte (MP), MP Dichte und Standardabweichungen der analysierten InSAR Datensätze.....	22