



MAKING MOTION **VISIBLE**



InSAR Handbuch

Dieses Handbuch beschreibt die physikalischen Grundlagen, die Methodik sowie Grenzen und Unsicherheiten der InSAR-Technologie.



Imprint

Herausgeber: AUGMENTERRA GmbH, Techno-Z Wissenspark Urstein,
Urstein Süd 15, 5412 Puch bei Hallein,
www.augmenterra.com

Autoren: Markus Keuschnig, Markus Dörfler, Alexander Standteiner

Version: 1.1

Datum: 24.10.2025

Vertraulichkeit

Dieses Dokument enthält vertrauliche und geschützte Informationen und ist ausschließlich für den Empfänger bestimmt. Der Inhalt dieses Dokuments, einschließlich Informationen zur Methodik und zum Know-how von AUGMENTERRA, darf weder ganz noch teilweise an Dritte weitergegeben noch für andere Zwecke verwendet werden, ohne die ausdrückliche schriftliche Genehmigung der AUGMENTERRA GmbH.



Inhalt

1	Einleitung	4
1.1	Hintergrund und Motivation.....	4
1.2	Ziele.....	4
2	Grundlagen der InSAR-Technologie	5
2.1	Geschichte.....	5
2.2	Messprinzip.....	6
2.3	Datenprozessierung.....	12
2.4	Präzision und Genauigkeit.....	13
3	InSAR-Limitationen.....	16
3.1	Corner-Reflektoren	16
4	Literatur.....	18
5	Abbildungen.....	20
6	Tabellen	20
7	APPENDIX – InSAR Messpunkte – Attribute	21
7.1	Überblick	21
7.2	Attributbeschreibung	21
7.3	Attributgruppen	22
7.4	Hinweise zur Interpretation.....	22



Abkürzungen

	Englisch	Deutsch
ALOS	Advanced Land Observing Satellite	Fortschrittlicher Landbeobachtungssatellit
ASC	Ascending Geometry	Aufsteigende Geometrie
AOI	Area of Interest	Untersuchungsgebiet
DEM	Digital Elevation Model	Digitales Höhenmodell
DS	Distributed Scatterer	Verteilter Rückstreuer
DSC	Descending Orbit	Absteigende Geometrie
DSM	Digital Surface Model	Digitales Oberflächenmodell
DTM	Digital Terrain Model	Digitales Geländemodell
ESA	European Space Agency	Europäische Weltraumorganisation
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globales Navigationssatellitensystem
IW	Interferometric Wide Swath	Interferometric Wide Swath
IoT	Internet of Things	Internet der Dinge
GPS	Global Positioning System	Global Positioning System
km	Kilometer	Kilometer
LOS	Line of Sight	Sichtlinie
m	Meter	Meter
mm	Millimeter	Millimeter
MP	Measurement Point	Messpunkt
OSM	Open Street Maps	Open Street Maps
PAZ	PAZ	PAZ (spanisch für „Frieden“)
PS	Permanent Scatterer	Permanenter Rückstreuer
RADAR	Radio Detecting and Ranging	Radio Detecting and Ranging
REF	Reference Point	Referenzpunkt
RMSE	Root Mean Square Error	Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme
SB-InSAR	Satellite-based InSAR	Satellitenbasiertes InSAR
SAR	Synthetic Aperture Radar	Synthetic Aperture Radar
SNT	Sentinel-1	Sentinel-1
TS	Displacement Time Series	Verschiebungszeitreihe
TSX	TerraSAR-X	TerraSAR-X



1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die kontinuierliche Überwachung von Bauwerk- und Bodenbewegungen ist heute wichtiger denn je – sei es im Kontext des Klimawandels, zunehmender Extremwetterereignisse oder in dicht besiedelten Ballungsräumen. Klassische Messverfahren stoßen dabei schnell an ihre Grenzen: Sie sind punktuell, arbeitsintensiv und oft nur eingeschränkt skalierbar.

Moderne Fernerkundungstechnologien wie das satellitenbasierte InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) eröffnen hier neue Möglichkeiten. Sie erlauben eine flächendeckende, wetterunabhängige und millimetergenaue Erfassung von Bauwerks- und Bodenbewegungen – weltweit verfügbar und rückblickend über mehrere Jahre hinweg. InSAR liefert belastbare Entscheidungsgrundlagen für ein breites Anwendungsspektrum: vom geotechnischen Monitoring über das Infrastrukturmanagement bis hin zu risikoorientierten Bewertungen.

AUGMENTERRA nutzt diese Präzision aus dem All und kombiniert sie mit intelligenter Datenverarbeitung, um komplexe Bewegungsmuster sichtbar und verstehbar zu machen. Damit schaffen wir Sicherheit für Bauwerke und Menschen – heute und in Zukunft.

1.2 Ziele

Dieses Handbuch bietet eine kompakte und zugleich fundierte Einführung in die Welt der satellitengestützten InSAR-Technologie – verständlich für EinsteigerInnen, nützlich für EntscheiderInnen und praxistauglich für FachanwenderInnen. Es verfolgt drei zentrale Ziele:

- **Orientierung bieten:** Was ist InSAR – und was kann es leisten?
- **Verständnis schaffen:** Welche physikalischen Grundlagen, Datenquellen und Verarbeitungsverfahren stehen hinter den Ergebnissen?
- **Einordnung ermöglichen:** Wo liegen die Grenzen der Methode – und wie lassen sich Unsicherheiten einschätzen?

2 Grundlagen der InSAR-Technologie

2.1 Geschichte

Satellitenbasiertes (SB) InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ermöglicht Bodenbewegungen und -deformationen (i) präzise und genau (mm-Bereich), (ii) skalierbar (von einzelnen Gebäuden zu umfangreichen Gebieten) und (iii) über lange Zeiträume hinweg (bis zu 25 Jahren, historische Archive) zu erfassen (Keuschnig et al. 2022).

Bei SB-InSAR handelt es sich um eine bewährte Technologie, bereits 1991 wurde der erste ERS-1 Radarsatellit 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 x 5 m (IW Modus) und eine Wiederkehrdauer von bis zu 6 Tagen. Aufgrund des Verlusts von Sentinel-1b im Dezember 2021 beträgt die aktuelle Wiederkehrzeit 12 Tage, dessen Ersatz Sentinel-1c ist im Jahr 2025 geplant. Aktuell gibt es rund ein Dutzend InSAR-Satelliten (Abbildung 1) und der Trend ist stark ansteigend.

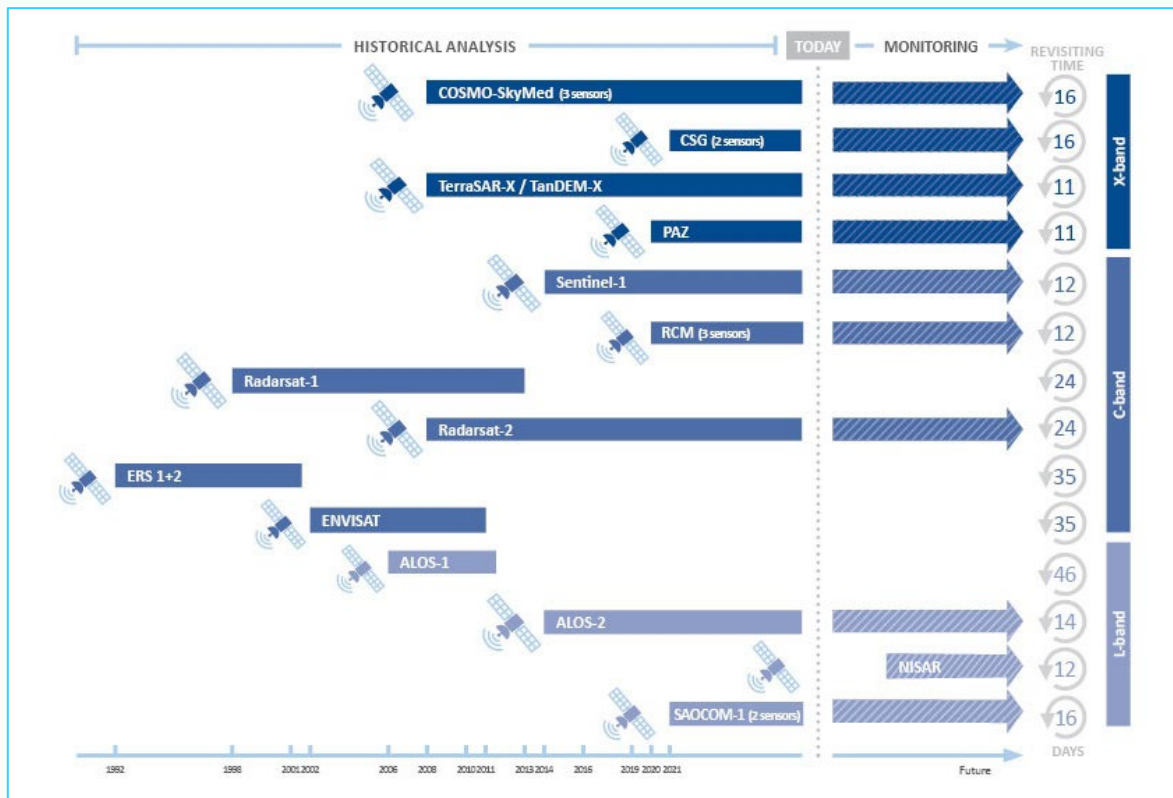


Abbildung 1: Auswahl historischer und aktueller SAR Satelliten inklusive Wiederkehrzeit (revisiting time) und Frequenzbändern (TRE ALTAMIRA, 2025).

2.2 Messprinzip

Ein SAR (Synthetic Aperture Radar) kann aus einer Umlaufbahn in mehreren Hundert Kilometern Entfernung sehr detailreiche Bilder der Erdoberfläche erzeugen. Im Gegensatz zu optischen Sensoren arbeitet Radar als aktives Verfahren:

Der Satellit sendet elektromagnetische Pulse im Mikrowellenbereich zur Erde, empfängt das reflektierte Echo und verarbeitet es zu einem Radarbild. Da das System sein eigenes Signal aussendet, funktioniert es unabhängig von Tageslicht oder Wetterbedingungen.

Das Radar misst, wie viel der ausgesendeten Energie zur Antenne zurückkehrt. Diese Rückstreuung hängt von der Form und den Materialeigenschaften der Oberfläche ab:

- **Geometrie des Rückstreuers:** Treffen Radarwellen unter einem geeigneten Einfallswinkel auf eine Oberfläche, wird ein Teil des Signals in Richtung des Satelliten zurückgeworfen. Glatte oder kantige Strukturen – etwa metallische Flächen, Gebäudekanten oder technische Anlagen – erzeugen besonders starke Rückstreusignale.
- **Materialeigenschaften der Oberfläche:** Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, wie Metalle, reflektieren Radarwellen sehr effizient. Natürliche Oberflächen wie Vegetation, Boden, Schnee oder Wasser streuen die Wellen diffus in verschiedene Richtungen, sodass nur ein geringer Anteil des Signals den Satelliten erreicht.

Das besondere Messprinzip von InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) besteht darin, mehrere SAR-Aufnahmen derselben Region zu vergleichen, die in einem zeitlichen Abstand aufgenommen wurden (Abbildung 2).

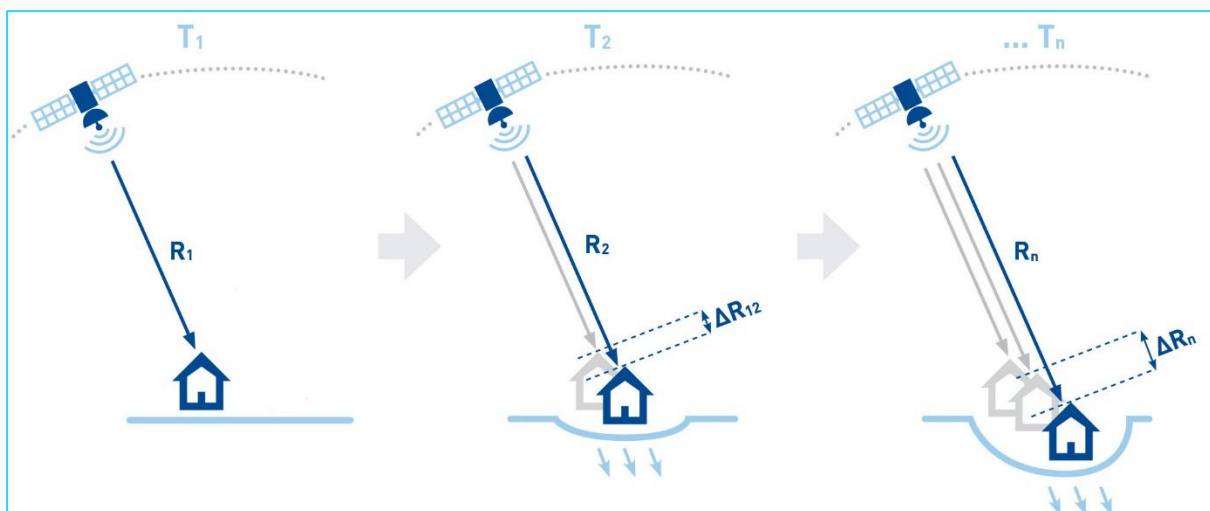


Abbildung 2: Prinzip der interferometrischen SAR-Auswertung (verändert nach TRE ALTAMIRA, 2025).

Wenn sich in dieser Zeit ein Objekt auf der Erdoberfläche – etwa ein Gebäude oder ein Hangabschnitt – leicht bewegt hat, ändert sich die Laufzeit der reflektierten Radarwellen geringfügig – entsprechend einer Distanzänderung im Millimeterbereich. Diese winzige Veränderung bewirkt eine Phasenverschiebung im zurückgesendeten Signal.



Durch den Vergleich der Phasenwerte aus mehreren Aufnahmen können selbst kleinste Distanzänderungen zwischen Satellit und Erdoberfläche erkannt werden. Diese Phasendifferenzen werden zu einem sogenannten Interferogramm kombiniert. Ein Interferogramm zeigt farbige Muster, die Bereiche mit gleicher Bewegung markieren. Jede Farbe steht dabei für eine bestimmte Veränderung entlang der Sichtlinie des Satelliten: Je enger die Farbringe beieinander liegen, desto stärker ist die gemessene Bewegung.

Nach der Berechnung eines Interferogramms wird die Information weiterverarbeitet, um die gemessenen Phasenunterschiede in reale Bewegungen umzuwandeln. Dazu werden die Phasen rechnerisch „entfaltet“ und mit der bekannten Wellenlänge des Radars in Entfernungsänderungen übersetzt. Alle Messpunkte werden anschließend auf einen stabilen Referenzpunkt bezogen. Werden viele Aufnahmen über längere Zeit ausgewertet, entstehen Zeitreihen, die zeigen, wie sich ein Ort über Wochen, Monate oder Jahre hinweg bewegt.

So entstehen aus den gemessenen Phasenunterschieden präzise Bewegungsmessungen, die mit SqueeSAR® berechnet und durch MatchSAR® Bauwerken und Infrastrukturen zugeordnet werden können (siehe Kapitel 2.3).

2.2.1 Verschiedene Frequenzbänder für unterschiedliche Anwendungen

Die Satelliten verwenden verschiedene Frequenzbänder (Abbildung 1) um unterschiedliche Anwendungen zu ermöglichen. Sie wichtigsten sind:

- **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.

2.2.2 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 um die Polachse 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).

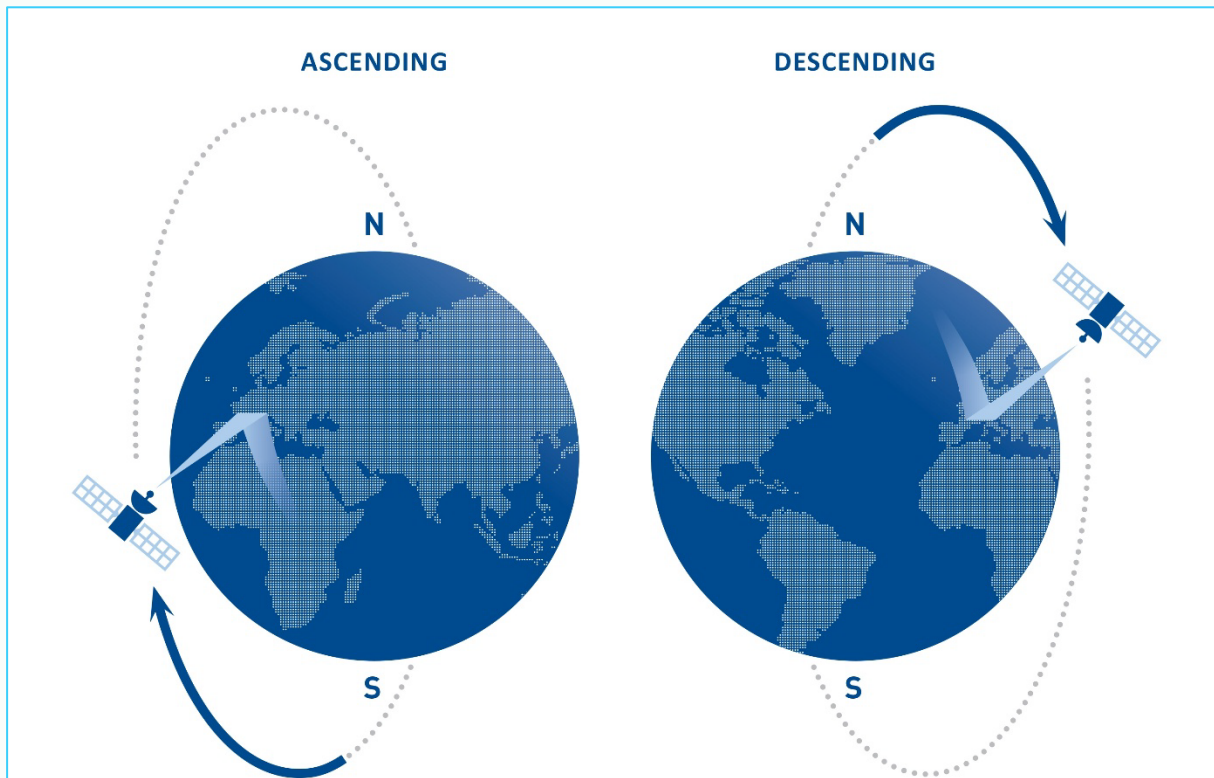


Abbildung 3: Aufsteigende (ascending – ASC) und absteigende (descending – DSC) Geometrie (TRE ALTAMIRA, 2025).

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.

2.2.3 Blickrichtung, Einfallswinkel und Sichtlinie (LOS)

Die Blickrichtung des SAR-Systems ist in der Regel seitlich (90°) zur Flugbahn des Satelliten ausgerichtet und wird in ° N angegeben. Der Satellit blickt in der Regel nach rechts und somit in der ASC-Geometrie nach Osten, während er in der DSC-Geometrie in die entgegengesetzte Richtung nach Westen blickt. Diese seitliche Ausrichtung der Blickrichtung ermöglicht eine kontinuierliche Abtastung der Erdoberfläche, wodurch das vom Radar ausgesendete Signal von unterschiedlichen Objekten auf der Erde, zu unterschiedlichen Zeiten vom Sensor empfangen wird.

Der Einfallswinkel (β) 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°, TerraSAR-X 20 – 60°) und der Topografie, wobei ein kleinerer Einfallswinkel nahe dem Nadir-Punkt (direkt unter dem Satelliten) und ein größerer

Einfallswinkel weiter entfernt vom Nadir-Punkt auftritt. Der Einfallswinkel spielt eine wichtige Rolle bei geländebezogenen Abschattungen, der Lagegenauigkeit von Messpunkten (z.B. multiple Reflexionen von unterschiedlichen Höhenlagen, Verzerrungen) und der detaillierten Analyse von Bewegungsrichtungen.

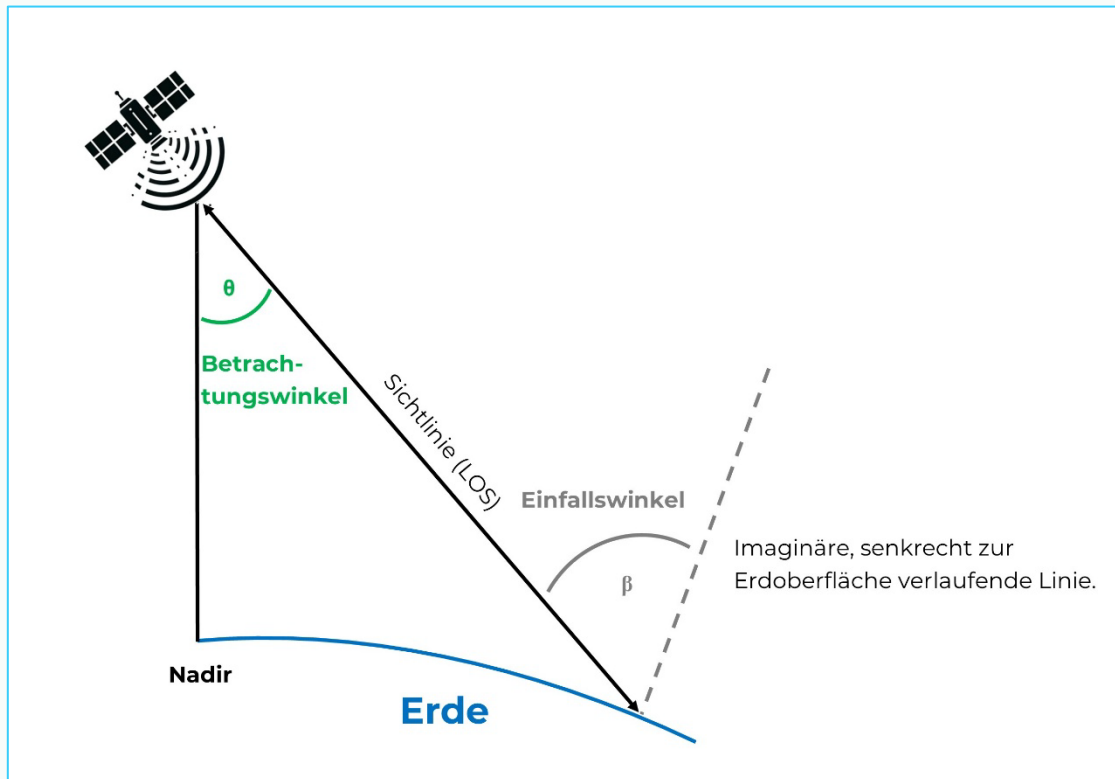


Abbildung 4: Einfallswinkel und Sichtlinie (LOS).

Die reale Bodenbewegung wird in SAR-Bildern entlang der Sichtlinie (Line of Sight – LOS) abhängig von der Blickrichtung und dem Einfallswinkel projiziert. Das bedeutet, dass nur der Anteil der Bewegung erfasst wird, der parallel zur LOS verläuft (Abbildung 4). Eine Bewegung senkrecht zur LOS wird nicht detektiert, während eine Bewegung entlang der LOS vollständig erfasst wird. Daher erscheint eine gemessene Bewegung in SAR-Daten geringer als die reale Bodenbewegung, wenn diese nicht exakt in Richtung der LOS erfolgt.

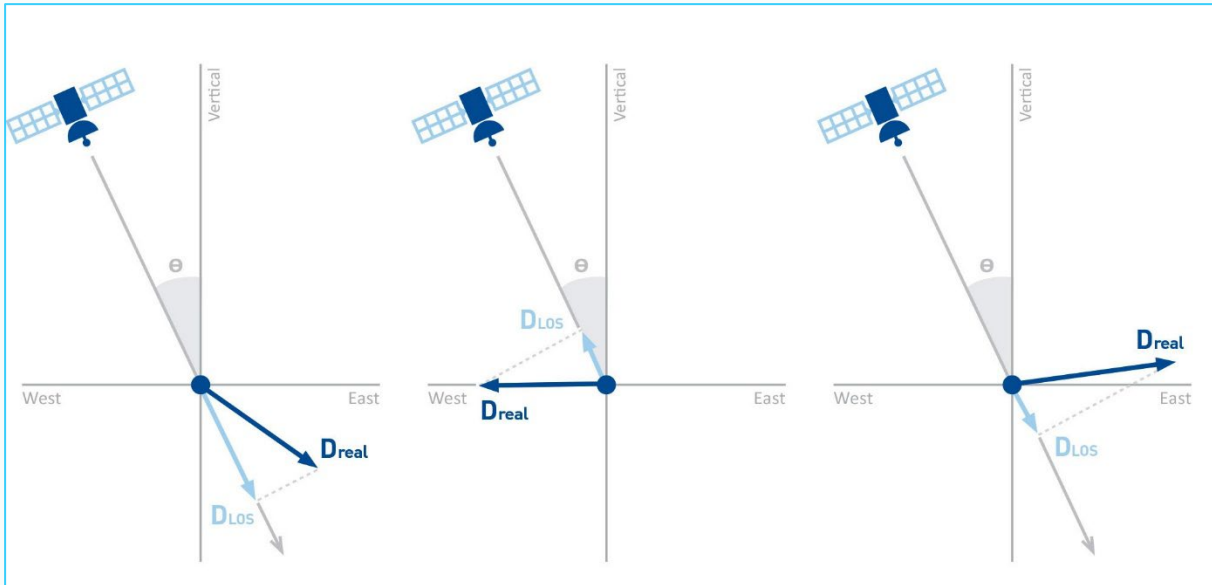


Abbildung 5: Beispielhafte Projektion von realen Bodenbewegungen D_{real} auf die Sichtlinie D_{LOS} (TRE ALTAMIRA, 2025).

2.2.4 Von SAR zu InSAR

Da SAR-Satelliten die Erde kontinuierlich umkreisen, nehmen sie im Laufe der Zeit zahlreiche Bilder desselben Gebiets auf und geben so Einblicke in die Entwicklung der Erdoberfläche (Shimada 2019). Bei jeder SAR-Erfassung liefert das zurückgestreute Radarsignal zwei wichtige Informationsteile: (a) Amplitude und (b) Phase. Die Amplitude ist abhängig von der Energie des zurückgestreuten Signals (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Phase bezieht sich auf den Abstand zwischen Sensor und Ziel und wird bei interferometrischen Anwendungen verwendet (Abbildung 5).

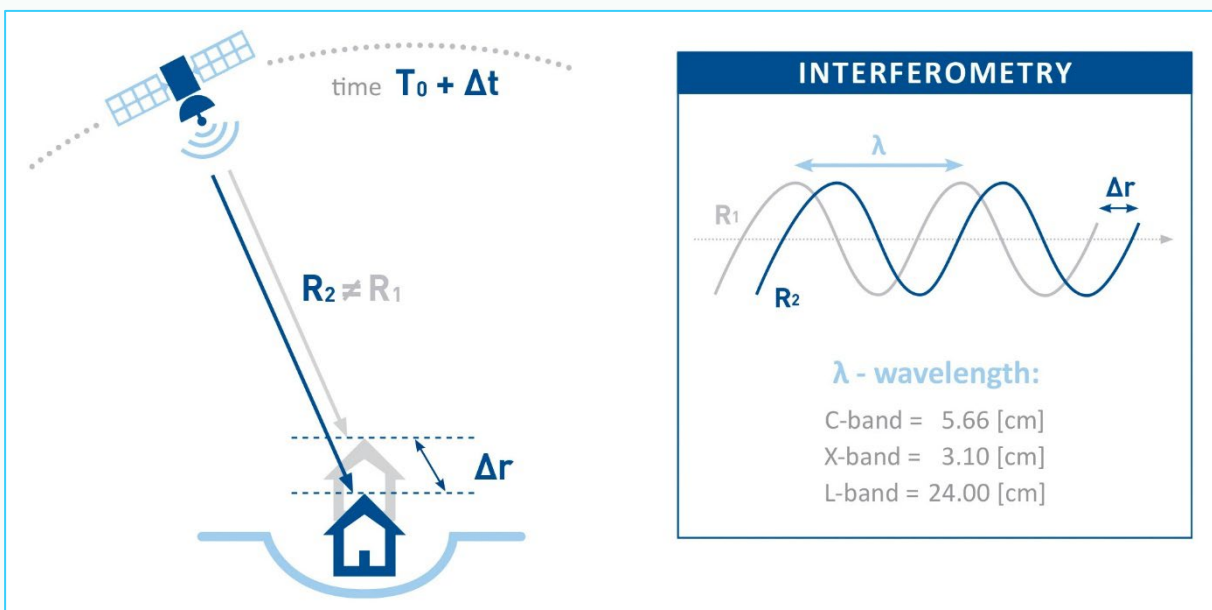


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Funktionsweise von InSAR (Interferometrisches SAR). Die Phasenverschiebung ($\Delta r = R_2 - R_1$) ergibt sich aus der Phaseninformation (R) von zwei oder mehreren Bildern desselben Gebiets zu verschiedenen Zeitpunkten und unterschiedlichen Positionen (TRE ALTAMIRA, 2025).

Bei jeder InSAR (Interferometrisches SAR)-Messung werden mindestens zwei SAR-Bilder, zu verschiedenen Zeitpunkten, desselben Gebiets aufgenommen.

Die Phaseninformationen (R) dieser Bilder, die durch die Laufzeit der reflektierten Radarwellen bestimmt werden, werden miteinander verglichen. Die Phasendifferenz (Δr) zwischen den Bildern, auch Interferogramm genannt, enthält Informationen über Änderung des Abstands zwischen dem Satelliten und der Erdoberfläche. Mit diesen Phasendifferenzen lassen sich langsame Bewegungen der Erdoberfläche, wie sie bei Rutschungen, Erdbeben oder auch Vulkanausbrüchen auftreten, millimetergenau messen.

2.2.5 Verschiebungsvektoren und 2D-Dekomposition

Bei SB-InSAR werden Verschiebungen direkt entlang der Sichtlinie (LOS, Kapitel 2.2.3) gemessen. Der daraus resultierende Verschiebungsvektor liefert präzise Informationen über die Bewegungen in Richtung des Satelliten (positive Verschiebungen) oder von ihm weg (negative Verschiebungen). Um weitere Vektoren zu vertikalen oder horizontalen Bewegungen zu erhalten, ist eine 2D-Dekomposition erforderlich. Eine gängige Methode zur 2D-Dekomposition nutzt Daten aus ASC- und DSC-Geometrien (Abbildung 7). Durch die Kombination dieser Messungen können die Bewegungsanteile in der West-Ost (positive Verschiebungen in Richtung Osten) und Vertikalrichtung bestimmt (positive Verschiebungen nach oben - Hebung) werden. Die Nord-Süd-Komponente kann mangels Sensitivität des InSAR-Systems für diese Richtung (Kapitel 2.2.2) oft nur mit zusätzlichen Daten, etwa aus GNSS-Messungen oder Modellierungen, ergänzt werden.

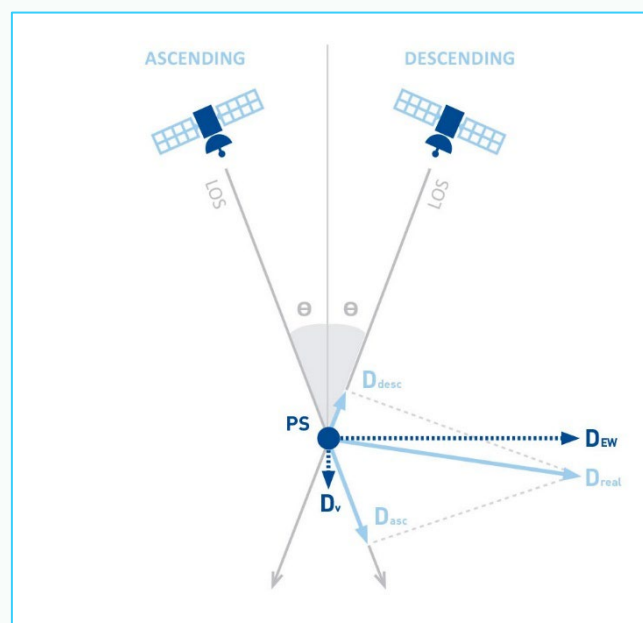


Abbildung 7: Schematische Darstellung der 2D-Dekomposition unter Verwendung der ASC- und DSC-Satelliten-Geometrien (TRE ALTAMIRA, 2025).

Die 2D-Dekomposition benötigt beide Aufnahmegeometrien und erfolgt innerhalb eines vorgegebenen Rasters (z.B. 10 x 10 m). Die daraus resultierenden (Pseudo-) Messpunkte weisen neben einer verminderten Lagegenauigkeit auch eine geringere Messpunktdichte auf, da speziell in steileren Hanglagen oft nur eine Aufnahmegeometrie verfügbar ist (z.B. aufgrund von Abschattungen).



2.3 Datenprozessierung

2.3.1 SqueeSAR® - Prozessierung von InSAR Messpunkten

Alle SAR-Daten wurden mit dem Multi-Interferogramm-Verfahren SqueeSAR® prozessiert (Ferretti et al. 2011). SqueeSAR® ist vom Unternehmen TRE ALTAMIRA (TRE ALTAMIRA 2024b) 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® 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 benötigt SqueeSAR® 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® auch in Gebieten mit geringer Signalstabilität zuverlässige Bewegungsinformationen extrahieren und so eine umfassende Überwachung von Bodenbewegungen ermöglichen.

2.3.2 MatchSAR® – Transformation von InSAR Messpunkten in Objekte

In Zusammenarbeit mit TRE ALTAMIRA hat AUGMENTERRA den MatchSAR®-Algorithmus entwickelt. MatchSAR® transformiert österreichweit hunderte Millionen von InSAR-Messpunkten und gleicht sie mit physischen Objekten wie Gebäuden, Strommasten, Dämmen, Straßen oder Eisenbahnstrecken ab.

Der Transformationsprozess umfasst mehrere Schritte: Zuerst wird eine räumliche Analyse und Qualitätskontrolle aller verfügbaren InSAR-Messpunkte durchgeführt, um Bodenbewegungen korrekt den betroffenen Objekten zuordnen zu können. Darüber hinaus integriert der Algorithmus die InSAR-Daten mit anderen Gelände- und Bauwerks-bezogenen Datenquellen und schafft so eine umfassende und mehrdimensionale Sicht auf jedes Bauwerk. Darauf aufbauend weist jedes von MatchSAR® prozessierte Objekt eine Verschiebungs-Zeitreihe auf, die sich über mindestens zwei bis drei Jahre erstreckt. Dies ermöglicht weitergehende Analysen zum Bewegungsverhalten (z.B. gleichmäßige oder beschleunigte Bewegung).

Der MatchSAR®-Algorithmus ist integraler Bestandteil der Software-as-a-Service (SaaS)-Plattform AUGMENTERRA-Observer. Der AUGMENTERRA-Observer bietet eine Browser-basierte Plattform mit modernster 3D Visualisierung, auf die mit unterschiedlichen Endgeräten wie PC, Smartphone oder Tablet zugegriffen werden kann. Informationen zu Boden- und Bauwerksbewegungen können ortsbasiert und innerhalb von wenigen Sekunden abgerufen werden. Aktuell werden alle zugrundeliegenden (Bewegungs)-Daten zweimal im Jahr vollautomatisch aktualisiert.

2.4 Präzision und Genauigkeit

Die Datenverarbeitung bzw. Prozessierung von SAR-Daten zur Erzeugung von InSAR-Daten kann komplex und herausfordernd sein, da sie stark von den Eigenschaften der untersuchten Gebiete und der gewünschten Analyse der Bewegungsdynamik abhängt. Zahlreiche Algorithmen sind verfügbar, die auf unterschiedliche Anforderungen und Herausforderungen in der InSAR-Analyse zugeschnitten sind. Zu den gängigsten Methoden gehören D-InSAR, SBAS, PS-InSAR oder SqueeSAR. Jede dieser Methoden weist spezifische Vor- und Nachteile auf und ist für bestimmte Anwendungsfälle besonders geeignet.

2.4.1 SqueeSAR®

Präzision und Genauigkeit sind zwei zentrale Konzepte in der Messtechnik. Die Präzision gibt an, wie konsistent bzw. wiederholbar eine Messung ist. Eine Messreihe ist präzise, wenn wiederholte Messungen unter gleichen Bedingungen ähnliche Werte liefern – unabhängig davon, ob diese nahe am wahren Wert liegen. Die Genauigkeit hingegen beschreibt, wie nah das Messergebnis am tatsächlichen (wahren) Wert liegt. Eine Messung ist genau, wenn sie nur geringe systematische Fehler aufweist.

Die Präzision von InSAR-Ergebnissen kann bestimmt werden durch die:

- Lage der Messpunkte
- Verschiebungs-Zeitreihen

Die Lagekoordinaten jedes MP hängen von dessen SAR-Koordinaten und dessen Höhe ab, die aus der InSAR Analyse abgeleitet 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 wird durch die Standardabweichung der durchschnittlichen Verschiebungsrate sowie durch die Standardabweichung (σ) 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. Bei SqueeSAR-Messungen bezieht sich die Standardabweichung auf die durchschnittliche Verschiebungsrate in Bezug auf einen Referenzpunkt (REF). 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 (Tabelle 2). Die Standardabweichung einer Einzelmessung liegt im Durchschnitt bei ± 5 mm. Während die Präzision von InSAR-Messpunkten statistisch berechnet wird, wird die messtechnische Genauigkeit typischerweise nicht systematisch bewertet. Die Genauigkeit von InSAR kann durch die Verwendung ergänzender „Ground-Truth“-Daten, wie z.B. bodengestützte geodätische Messungen, bewertet werden und liegt in der Regel im unteren mm-Bereich.

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.

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

2.4.2 MatchSAR®

Die Präzision des MatchSAR®-Algorithmus hängt ab von der:

- Präzision und Genauigkeit der verwendeten InSAR-Messpunkte (z.B. SqueeSAR®).
- Präzision und Genauigkeit der kartierten Objekte je nach Datenquelle (z.B. OSM (Open Street Maps)).

Die Präzision und Genauigkeit von InSAR-Messpunkten wurden bereits in Kapitel 2.4 dieses Dokuments behandelt. Die Bewertung der Präzision und Genauigkeit für kartierte Objekte stellt jedoch eine kompliziertere Herausforderung dar, da sie maßgeblich von den gewählten Datenquellen abhängt. OpenStreetMap (OSM, (OpenStreetMap contributors 2024)) ist ein gemeinschaftliches Projekt, zu dem eine weltweite Gemeinschaft Daten zu verschiedenen Merkmalen wie Gebäuden und Straßen beisteuert und aktualisiert. Diese Plattform zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass sie sich auf lokales Wissen stützt. Die OSM-Mitarbeiter setzen Methoden wie Luftaufnahmen, GPS-Geräte (Global Positioning System) und direkte Erhebungen vor Ort ein, um die Genauigkeit und Aktualität der Daten zu gewährleisten. Forschungsarbeiten wie die Studie von El-Ashmawy (2016) zeigen, dass OSM-Daten im Allgemeinen zuverlässig sind, wenn es darum geht, Gesamtpläne von Objekten und planimetrische Karten in Maßstäben von 1:5000 oder größer zu erstellen, wobei Positionsgenauigkeiten von unter 2 m erreicht werden. Zu den wichtigsten Einschränkungen im Zusammenhang mit



OSM-Daten gehören jedoch die gelegentliche Unvollständigkeit bestimmter Merkmale, z. B. von Gebäuden, und das Fehlen detaillierter Metadaten zu den Datenerfassungsprozessen.

Sofern nicht anders angegeben, verwendet der MatchSAR®-Algorithmus die InSAR-Daten des SqueeSAR®-Algorithmus zusammen mit OSM-Daten und gleicht sie mit physischen Strukturen wie Gebäuden, Strommasten, Dämmen, Straßen und Eisenbahnlinien ab (siehe 2.3.2).

2.4.3 Modellgüte in InSAR Analysen

Die Modellgüte beschreibt die Fähigkeit eines Modells, gemessene Daten präzise abzubilden und verlässliche Vorhersagen zu treffen. In InSAR-Analysen wird sie anhand der Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Bodenbewegungen bewertet. Bei der Beurteilung, wie gut ein Modell zu einem Datensatz passt, ist es sinnvoll, sowohl den R^2 als auch den RMSE-Wert zu berechnen, da jede Metrik etwas anderes aussagt. Der RMSE ist ein Maß für die durchschnittliche Abweichung der Datenpunkte von einer Regressionsgeraden, das größere Fehler stärker gewichtet und in derselben Einheit wie die Daten selbst angegeben wird. Der R^2 ist ein Maß dafür, wie gut die Regressionsgerade die Variation der beobachteten Daten erklärt, und gibt an, welcher Anteil der Streuung durch das Modell erklärt wird:

- **RMSE** (Root Mean Square Error): Der RMSE ist die Quadratwurzel des Durchschnitts der quadrierten Abweichungen zwischen den vom Modell vorhergesagten und den tatsächlichen Werten und hat die gleiche Einheit wie die gemessenen Daten (z.B. mm). Ein niedriger RMSE-Wert deutet auf eine hohe Modellgenauigkeit hin.
- **R^2** (Bestimmtheitsmaß): Gibt den Anteil der Varianz der abhängigen Variable an, der durch das Regressionsmodell erklärt wird. Werte liegen zwischen 0 und 1 (prozentual), wobei ein Wert nahe 1 auf eine gute Anpassung hinweist.

Zusätzlich kann die Standardabweichung genutzt werden, um die natürliche Variabilität der gemessenen Bodenbewegungen zu quantifizieren.

Eine hohe Modellgüte ist entscheidend, um präzise Aussagen über Bodenbewegungen zu ermöglichen. Sie hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit und Genauigkeit der Eingangsdaten, den gewählten Prozessierungsalgorithmen sowie der Korrektur von Störfaktoren wie atmosphärischen Einflüssen ab. In heterogenen Topografien, insbesondere in hochalpinen Regionen, spielt die Modellgüte eine zentrale Rolle als Qualitätsmaß für Prognosen.



3 InSAR-Limitationen

Limitationen (Tabelle 3) der InSAR-Technologie ergeben sich u.a. durch Oberflächen, deren Reflexion sich zwischen aufeinanderfolgenden Radarbildern stark ändert. Dazu gehören insbesondere dichte Vegetation, landwirtschaftliche Flächen, Wasser, Schnee und Eis. Abhängig von der Wellenlänge (z.B. C-Band) führen solche Bereiche in der Regel zu geringen Messpunktdichten und/oder ungenauen Messungen. Zudem ist InSAR kein geeignetes Verfahren, um plötzliche Bodenbewegungen festzustellen. Die maximal messbare Verschiebung entspricht der halben Wellenlänge eines Satellitensensors in dem Zeitintervall, das zum Vergleich der Radarbilder verwendet wird. Das heißt, die maximal messbare Verschiebung beträgt etwa 2,8 cm in sechs Tagen (bei Sentinel-1, 5,6 cm Wellenlänge). In der Regel werden für die Bewegungsanalysen viele Bildpaare mit unterschiedlichen Zeitintervallen verwendet. Aufgrund von Datenlücken – meistens im Winter, hervorgerufen durch Schneebedeckung – können daher keine Gebiete überwacht werden, die sich um mehr als 100 mm/Jahr oder mit stark nichtlinearen Geschwindigkeiten bewegen. In städtischen Gebieten können Mehrwegeeffekte und geometrische Verzerrungen auftreten, wenn das Radarsignal von mehreren Oberflächen reflektiert wird. Topografische Probleme wie stark geneigte Geländeoberflächen (steile Hänge) können zu Abschattungen, Verzerrungen oder Überlagerungen im SAR-Bild führen. In diesen Fällen erfordern Analyse und Interpretation von InSAR-Daten spezifische Fachkenntnisse.

Tabelle 3: Limitationen von InSAR.

Limitationen	Beschreibung
Vegetation, Wasser, Schnee und Eis	Stark veränderliche Oberflächen führen zu niedrigen Kohärenzen, Messpunktdichten oder ungenauen Messungen.
Erfassung schneller Bewegungen	Schnelle oder abrupte Bodenbewegungen können einen Phasensprung bewirken. Die maximal messbare Verschiebung entspricht der halben Wellenlänge eines Satellitensensors in dem Zeitintervall, das zum Vergleich der Radarbilder verwendet wird.
Geometrische Verzerrungen	Mehrwegeeffekte und geometrische Verzerrungen in städtischen Gebieten können die Datenqualität beeinträchtigen.
Ungünstige Topografische	Stark geneigte Flächen oder Geländeformen (steile Hänge) können zu Abschattungen, Überlagerungen und Verzerrungen im SAR-Bild führen. Die Messpunktdichte auf N- und S-exponierten Hängen ist aufgrund der Aufnahme-Geometrien (West-Ost-Richtungen) vermindert.

3.1 Corner-Reflektoren

Radar-Corner-Reflektoren sind spezielle Vorrichtungen, die verwendet werden, um Radarwellen gezielt zurück zum SAR-Satelliten zu reflektieren. Sie werden vorrangig dort eingesetzt, wo keine "natürlichen" Persistent Scatterers (PS)

vorhanden sind, um stabile und verlässliche Referenzpunkte für Radar-Messungen zu schaffen.

3.1.1 Prinzip eines Corner-Reflektors

Ein Corner-Reflektor besteht typischerweise aus drei metallischen Flächen, die in einem 90°-Winkel zueinander angeordnet sind (Abbildung 8). Es wird das Prinzip der Mehrfachreflexion genutzt: Wenn eine Radarwelle eine der drei orthogonal angeordneten Flächen trifft, wird sie reflektiert und trifft nacheinander auf die beiden anderen Flächen. Diese Mehrfachreflexion sorgt dafür, dass die Welle exakt in die Richtung des Radar-Sensors zurückkehrt. Durch die gezielte Reflexion erzeugt ein Corner-Reflektor ein starkes Rückstreusignal. Dies macht ihn zu einem idealen künstlichen Persistent Scatterer (PS), der in SAR-Bildern leicht identifiziert werden kann. Dies liegt daran, dass das Signal eines Corner-Reflektors um ein Vielfaches stärker als das von natürlichen Oberflächen ist.



Abbildung 8: Corner Reflektor für die Überwachung einer Hangrutschung.

3.1.2 Limitationen und Potentiale

Die Effektivität eines Corner-Reflektors hängt von seiner korrekten Installation und Ausrichtung ab. Er muss stabil und präzise montiert werden, um eine optimale Reflexion zu gewährleisten. Zudem können Umwelteinflüsse wie Schnee, Eis oder Vegetation die Sichtbarkeit und Funktion des Reflektors beeinträchtigen. Damit sich Corner-Reflektoren nicht gegenseitig beeinflussen wird ein Abstand von rund 50 m empfohlen (Sentinel-1). „Smarte“ Reflektoren, ausgestattet mit 360°-Targets, GNSS-Modulen oder Inklinometern, können als Referenzpunkte in terrestrische Vermessungsnetze integriert werden. Abhängig von der Konstruktion der Corner Reflektoren können diese gleichzeitig für mehrere Aufnahmegeometrien (ASC und DSC Geometrie) und auch unterschiedliche SAR-Satelliten verwendet werden (z.B. X- und C-Band).



4 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.

Aswathi, J.; Binoj Kumar, R. B.; Oommen, T.; Bouali, E. H.; Sajinkumar, K. S. (2022): InSAR as a tool for monitoring hydropower projects: A review. In *Energy Geoscience* 3 (2), pp. 160–171. DOI: 10.1016/j.engeos.2021.12.007.

Bauer M., Spaun G. (1996): Anthropogene Veränderungen am Stubnerkogel in Badgastein (Salzburg, Österreich) und ihr Einfluß auf das Vermurungspotential. In *Tagungspublikation Interpraevent 1996* (Band 2), pp. 203–212.

Bayramov, Emil; Buchroithner, Manfred; Kada, Martin (2020): Radar Remote Sensing to Supplement Pipeline Surveillance Programs through Measurements of Surface Deformations and Identification of Geohazard Risks. In *Remote Sensing* 12 (23), p. 3934. DOI: 10.3390/rs12233934.

Bekaert, David P.S.; Handwerger, Alexander L.; Agram, Piyush; Kirschbaum, Dalia B. (2020): InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: An application to Nepal. In *Remote Sensing of Environment* 249, p. 111983. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111983.

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.

El-Ashmawy, Khalid I. A. (2016): Testing the positional accuracy of OpenStreetMap data for mapping applications. In *Geodesy and cartography* 42 (1), pp. 25–30. DOI: 10.3846/20296991.2015.1160493.

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): PAZ Mission. European Space Agency. Available online at <https://earth.esa.int/eogateway/missions/paz>, updated on 8/17/2024, checked on 8/17/2024.

ESA (2024c): 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.

Farneti, Elisabetta; Cavalagli, Nicola; Costantini, Mario; Trillo, Francesco; Minati, Federico; Venanzi, Ilaria; Ubertini, Filippo (2022): A method for structural monitoring of multispan bridges using satellite InSAR data with uncertainty quantification and its pre-collapse application to the Albiano-Magra Bridge in Italy. In *Structural Health Monitoring* 22 (1), pp. 353–371. DOI: 10.1177/14759217221083609.

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.

Intrieri, Emanuele; Raspini, Federico; Fumagalli, Alfio; Lu, Ping; Del Conte, Sara; Farina, Paolo et al. (2018): The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data. In *Landslides* 15 (1), pp. 123–133. DOI: 10.1007/s10346-017-0915-7.

Keuschnig, M.; Dörfler, M.; Hartmeyer, I. (2022): Satellite-based detection of ground motion for monitoring torrent catchments and protective structures. In *Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering*, pp. 78–86.

Laimer, J. (2024): Salesengrabenbrücke, Schadensmeldung. E-Mail to M. Keuschnig, 2024.

Macchiarulo, Valentina; Milillo, Pietro; Blenkinsopp, Chris; Reale, Cormac; Giardina, Giorgia (2023): Multi-temporal InSAR for transport infrastructure monitoring: recent trends and challenges. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering* 176 (2), pp. 92–117.

Nardini, Olga; Confuorto, Pierluigi; Intrieri, Emanuele; Montalti, Roberto; Montanaro, Thomas; Robles, Javier Garcia et al. (2024): Integration of satellite SAR and optical acquisitions for the characterization of the Lake Sarez landslides in Tajikistan. In *Landslides* 21 (6), pp. 1385–1401. DOI: 10.1007/s10346-024-02214-y.

OpenStreetMap contributors (2024): OpenStreetMap. Available online at <https://www.openstreetmap.org>, checked on 2/29/2024.

Perissin, Daniele; Wang, Zhiying; Lin, Hui (2012): Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 73, pp. 58–67. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002.

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.

Unterberger, M. (2023): Monitoring Stubnerkogel Hangrutschung 10_2023. Zivilgeometer DI M. Unterberger.

Weissgerber, Flora; Colin-Koeniguer, Elise; Nicolas, Jean-Marie; Trouvé, Nicolas (2017): 3D Monitoring of Buildings Using TerraSAR-X InSAR, DInSAR and PolSAR Capacities. In *Remote Sensing* 9 (10). DOI: 10.3390/rs9101010.

WIKIPEDIA (2024): Tauernbahn. Available online at <https://de.wikipedia.org/wiki/Tauernbahn>, updated on 8/17/2024, checked on 8/17/2024.

Yang, Kui; Yan, Li; Huang, Guoman; Chen, Chu; Wu, Zhengpeng (2016): Monitoring Building Deformation with InSAR: Experiments and Validation. In *Sensors* 16 (12). DOI: 10.3390/s16122182.



5 Abbildungen

Abbildung 1: Auswahl historischer und aktueller SAR Satelliten inklusive Wiederkehrzeit (revisiting time) und Frequenzbändern (TRE ALTAMIRA, 2025).	5
Abbildung 2: Prinzip der interferometrischen SAR-Auswertung (verändert nach TRE ALTAMIRA, 2025).	6
Abbildung 3: Aufsteigende (ascending – ASC) und absteigende (descending – DSC) Geometrie (TRE ALTAMIRA, 2025).	8
Abbildung 4: Einfallswinkel und Sichtlinie (LOS).	9
Abbildung 5: Beispielhafte Projektion von realen Bodenbewegungen D_{real} auf die Sichtlinie D_{LOS} (TRE ALTAMIRA, 2025).	10
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Funktionsweise von InSAR (Interferometrisches SAR). Die Phasenverschiebung ($\Delta r = R_2 - R_1$) ergibt sich aus der Phaseninformation (R) von zwei oder mehreren Bildern desselben Gebiets zu verschiedenen Zeitpunkten und unterschiedlichen Positionen (TRE ALTAMIRA, 2025).	10
Abbildung 7: Schematische Darstellung der 2D-Dekomposition unter Verwendung der ASC- und DSC-Satelliten-Geometrien (TRE ALTAMIRA, 2025).	11
Abbildung 8: Corner Reflektor für die Überwachung einer Hangrutschung.	17

6 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.	13
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.	14
Tabelle 3: Limitationen von InSAR.	16
Tabelle 4: Attributbeschreibungen.	21



7 APPENDIX – InSAR Messpunkte – Attribute

7.1 Überblick

Die nachfolgende Tabelle beschreibt alle standardisierten Attribute, wie sie in der AUGMENTERRA-Verarbeitungskette und in der Observer-Plattform verwendet werden. Alle Positions- und Höhenangaben beziehen sich auf das WGS 84-Referenzellipsoid (EPSG 4326). Bewegungs- und Geschwindigkeitswerte werden in der Radar-Sichtlinie (Line-of-Sight, LOS) angegeben.

7.2 Attributbeschreibung

Tabelle 4: Attributbeschreibungen

Einheit	Einheit	Beschreibung
track	-	Sentinel-1-Orbitnummer (auf- oder absteigend).
los	-	Sichtlinie der Satellitenmessung (A = aufsteigend / D = absteigend).
height	m	Topographische Höhe des Messpunktes, bezogen auf das WGS 84-Ellipsoid.
h_stdev	m	Standardabweichung der Höhenbestimmung.
vel	mm / a	Mittlere Verschiebungsgeschwindigkeit in LOS-Richtung. Positive Werte = Bewegung zum Satelliten, negative = vom Satelliten weg.
v_stdev	mm / a	Standardabweichung der Verschiebungsgeschwindigkeit.
acc	mm / a ²	Beschleunigung – zeitliche Änderung der Geschwindigkeit.
a_stdev	mm / a ²	Standardabweichung der Beschleunigung.
season_amp	mm	Mittlere Amplitude der saisonalen Bewegungskomponente.
s_amp_std	mm	Standardabweichung der saisonalen Amplitude.
season_phs	Tag	Mittlere Phase der saisonalen Bewegung (Zeitpunkt der maximalen Verschiebung im Jahreszyklus).
s_phs_std	Tag	Standardabweichung der saisonalen Phase.
coherence	0 – 1	Index zwischen 0 und 1, der sich auf das Phasenrauschen des Messpunktes bezieht und auf die Fähigkeit des verwendeten Bewegungsmodells, das Verhalten des Messpunktes abzubilden.



Einheit	Einheit	Beschreibung
incidence_angle	°	Einfallswinkel der Radarwelle am Messort.
eff_area	m ²	Effektive Fläche [m ²], die den Bereich beschreibt, der von Distributed Scatterers (DS) erfasst wird. Für Permanent Scatterers (PS) wird der Wert mit 0 angegeben.
dYYYYMMDD	mm	Felder, die die kumulative Verschiebung [mm] für einzelne Aufnahmedaten (z. B. d20220410) enthalten, jeweils bezogen auf die erste verfügbare Szene.

7.3 Attributgruppen

- Kinematische Attribute: vel, v_stdev, acc, a_stdev
- Qualitätsindikatoren: coherence, eff_area
- Geometrische Attribute: height, h_stdev, incidence_angle
- Saisonale Attribute: season_amp, s_amp_std, season_phs, s_phs_std
- Zeitliche Attribute: alle Felder dYYYYMMDD (zeitliche Verschiebungsreihe)

Interne Identifikationsfelder wie code, id, file_id dienen ausschließlich der Datenverwaltung und sind in exportierten Nutzer-Datensätzen nicht enthalten.

7.4 Hinweise zur Interpretation

- vel und acc beziehen sich ausschließlich auf die Line-of-Sight-Richtung und bilden keine vollständigen 3D-Bewegungsvektoren ab.
- Positive Werte zeigen Bewegungen zum Satelliten, negative Werte Bewegungen vom Satelliten weg.
- Saisonale Parameter werden durch harmonische Regression der Zeitreihe bestimmt.
- coherence beschreibt die Signalstabilität: hohe Werte (z.B. > 0,7) stehen für zuverlässige Messpunkte.
- eff_area dient der Gewichtung bei der Aggregation von Distributed Scatterers.
- Die Felder dYYYYMMDD liefern die vollständige zeitliche Verschiebungsreihe und bilden die Grundlage für Trend-, Beschleunigungs- und saisonale Analysen.