

Markscheidewesen

Bergbauplanung
Genehmigungsverfahren
Raumordnung
Lagerstättenmanagement
Erneuerbare geogene Energien
Bergvermessung
Bergmännisches Risswerk
Geoinformation
Boden- und Gebirgsbewegungen
Bergschäden
Bergbauliche Umweltauswirkungen
Altbergbau und Stilllegungen

*Mine Planning
Authorization Procedures in Mining
Regional and Area Planning
Mineral Resources Management
Unconventional Geogenic Energies
Mine Surveying
Mine Plans
Geographic Information
Ground and Rock Movements
Mining-induced Subsidence Damages
Mining and Environmental Impacts
Abandoned Mines and Mine Closures*

Arbeitskreis Radarinterferometrie des DMV:

Radarinterferometrie (InSAR)

Grundsätze zur Erfassung von Bodenbewegungen mithilfe
der Radarinterferometrie

Hinweis der Autorinnen und Autoren:

Der DMV folgt den orthographischen Empfehlungen des Rats für deutsche Rechtschreibung und ist ebenfalls der Auffassung, dass alle Menschen gendergerecht und sensibel angesprochen werden sollen. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Veröffentlichung auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Formulierungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Mitwirkende im Arbeitskreis Radarinterferometrie des DMV:

Anderssohn, Jan
Benndorf, Jörg
Busch, Wolfgang
Isaac, Martin
Lohsträter, Oliver (Vorsitzender)
Reitze, Andreas (stellv. Vorsitzender)
Rudolph, Tobias
Spreckels, Volker
Walter, Diana
Wenzig, Elisabeth
Zimmermann, Karsten

Bildquellen:

Der DMV dankt TRE ALTAMIRA für die Bereitstellung der in diesem Dokument verwendeten InSAR Graphiken, insbesondere für die Abbildungen 1-11, 13 und 16; gleiches gilt für RAG (14,15, 17, 18) und MIBRAG (12).



Bergbauplanung · Genehmigungsverfahren · Raumordnung · Lagerstättenmanagement · Erneuerbare geogene Energien · Bergvermessung · Bergmännisches Risswerk · Geoinformation · Boden- und Gebirgsbewegungen · Bergschäden · Bergbauliche Umweltauswirkungen · Altbergbau und Stilllegungen

Mine Planning · Authorization Procedures in Mining · Regional and Area Planning · Mineral Resources Management · Unconventional Geogenic Energies · Mine Surveying · Mine Plans · Geographic Information · Ground and Rock Movements · Mining-induced Subsidence Damages · Mining and Environmental Impacts · Abandoned Mines and Mine Closures

Sonderdruck 1/2025

Vormals *Mitteilungen aus dem Markscheidewesen* (1885–1978)
Das Markscheidewesen (1979–2002)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
1 Grundlagen	3
1.1 Charakteristik der Bodenbewegungen	3
1.2 Radarinterferometrie	3
1.2.1 Grundprinzip	3
1.2.2 Messpunkt	4
1.2.3 Messwert und abgeleitete Parameter	5
1.2.4 Radarsatelliten	6
1.2.5 Aufnahmegeometrie	8
1.2.6 Auswerteverfahren	9
1.2.7 Referenzpunkt	11
1.2.8 Künstliche Radarreflektoren	11
2 Kriterien zur Qualitätssicherung von InSAR-Messungen	14
2.1 Spezifikation der Aufgabenstellung	14
2.2 Anwendungsorientierte Qualitätsmerkmale	14
2.2.1 Qualitätsmerkmale der InSAR-Ergebnisse	14
2.2.2 Qualitätsmerkmale des Auswerteprozesses	16
2.3 Grenzen der Anwendbarkeit	17
3 Messgenauigkeiten	18
3.1 Lage- und Höhengenaugigkeit der Messpunkte	18
3.2 Genauigkeit der Messwerte	19
3.3 Genauigkeit der abgeleiteten Bewegungskomponenten	20
3.4 Verknüpfung von Messdaten über Multisensorstationen	20
4 Dokumentation	21
5 Zusammenfassung des Bearbeitungsablaufs	22
5.1 Vorbereitung	22
5.2 Ausschreibung und Auftragsvergabe	22
5.3 Externe Bearbeitungsphase	22
5.4 Kontrolle und Ergebnisaufbereitung	22
5.5 Dokumentation	22
6 Literatur	25
7 Abkürzungsverzeichnis	25

Seit der Jahrtausendwende ist die InSAR-Technologie (Interferometric Synthetic Aperture Radar), die allgemein als Radarinterferometrie bezeichnet wird, sukzessive aus der Forschung in die operationelle Anwendung übergegangen. So hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten die Zahl der InSAR-Dienstleistungs- bzw. der InSAR-Softwareunternehmen stetig erhöht. Die SAR-Interferometrie entwickelt sich zunehmend zu einer messtechnischen Dienstleistung, auch im Markscheidewesen. Im Zuge der Etablierung dieser Technik zur Bestimmung von Bodenbewegungen (Oberflächenverformungen) wurden unterschiedliche Verfahren, Methoden und Algorithmen entwickelt. Die unterschiedlichen Angebote und Algorithmen sowie die Komplexität dieser Technik stellen potentielle Nutzer vor die Herausforderung, den Nutzwert der Radarinterferometrie sowie die Plausibilität und Belastbarkeit der abgeleiteten Bodenbewegungen zu beurteilen. Dieses Verfahren unterscheidet sich signifikant von den im Markscheidewesen geläufigen geodätischen Messverfahren, was eine besondere Aufmerksamkeit bei der Entscheidung für einen Einsatz sowie bei der Interpretation der Ergebnisse erfordert.

Diese Grundsätze haben nicht den Anspruch eines Lehrbuchs, sondern sollen vielmehr ein grundlegendes Verständnis für die Nutzung der Technologie für Anwenderinnen und Anwender ohne vertiefte InSAR-Kenntnisse vermitteln. Für eine detaillierte Beschreibung der Radarinterferometrie wird auf die umfangreiche Fachliteratur verwiesen, wie z. B. Hanssen 2001. Die Definitionen von vereinheitlichten Begriffen, validierten Verfahren oder Standards sind in dem DIN-Normungsverfahren „InSAR – Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung“ (Adam et al. 2020) zusammengestellt worden.

Mit den vorliegenden Grundsätzen sollen Interessierte, Anwender sowie Entscheidungstragende aus Unternehmen und Behörden sowie Verbänden aus dem Bereich des Markscheidewesens und angrenzender Fachbereiche unterstützt werden, InSAR-Messungen besser zu verstehen, Projekte ergebnisorientiert zu

planen und Ergebnisse fachgerecht zu interpretieren. Sie stellen eine Überarbeitung des 2013 vom DMV veröffentlichten Positionspapiers „Grundsätze zum Einsatz von satellitengestützten Verfahren der Radarinterferometrie zur Erfassung von Höhenänderungen“ (DMV 2013) dar und tragen somit der technologischen Weiterentwicklung Rechnung. Die jetzt erarbeiteten Grundsätze basieren auf dem derzeitigen Stand der Technik und sollen bei weiteren Entwicklungen entsprechend angepasst werden.

Der Vorstand des DMV hat das Thema Radarinterferometrie in den letzten zwei bis drei Jahren erneut aufgegriffen und im Jahr 2021 eine Expertengruppe mit der Erarbeitung des vorliegenden Leitfadens betraut. Er entspricht damit u. a. auch dem Wunsch des ad-hoc Arbeitskreises Markscheidewesen des Länderausschusses Bergbau der Bergbehörden.

Ziele der vorliegenden Grundsätze zur radarinterferometrischen Erfassung von Bodenbewegungen sind:

- Schaffung eines besseren grundsätzlichen Verständnisses aller Beteiligten zum Thema InSAR,
- Aufklärung über Nutzen und Grenzen der Radarinterferometrie,
- Erarbeitung von Kriterien zur besseren Beurteilung der Anwendbarkeit sowie Qualität (wie Genauigkeit und Fehlerbetrachtung) und der Interpretation sowie Validierung von InSAR-Ergebnissen – auch im Hinblick auf Ausschreibungs- und Vergabeverfahren und
- Stimulation des Dialogs über Nutzen, Anwendbarkeit und Akzeptanz von InSAR bei Behörden, u. a. auch bei der Risswerkführung, und somit eine weitere Etablierung der Radarinterferometrie im Bereich Markscheidewesen.

Der DMV-Vorstand dankt den Mitgliedern des Arbeitskreises Radarinterferometrie für die geleistete Arbeit und den beteiligten Firmenmitgliedern für die Überlassung von firmenspezifischen Informationen, Daten und Abbildungen, die einen essentiellen Bestandteil dieser Grundsätze bilden.

Radarinterferometrie (InSAR)

Grundsätze zur Erfassung von Bodenbewegungen mithilfe der Radarinterferometrie

1 Grundlagen

1.1 Charakteristik der Bodenbewegungen

Für die Planung einer messtechnischen Erfassung von Bodenbewegungen ist das Verständnis über deren raumzeitliche Charakteristika von grundlegender Bedeutung. Das erfordert vor allem Kenntnisse über die Ursachen ihrer Entstehung sowie ihrer Auswirkungen auf das Deckgebirge und dessen Grenzfläche, die Tagesoberfläche.

Die Ursachen für Bodenbewegungen können sowohl natürlicher, insbesondere geogener, als auch anthropogener Natur sein. Beispiele für geogene Ursachen sind Lösungsvorgänge im Karstgebirge, natürliche Kompaktion von Sedimentschichten oder saisonale/langfristige Änderungen im Grundwasserregime. Anthropogene Ursachen ergeben sich bei der Gewinnung und Speicherung von festen, flüssigen und gasförmigen Bodenschätzen aus dem bzw. im Untergrund. Hierzu gehören auch Umlagerungsprozesse im Kontext von Wassergewinnungen aus dem Untergrund. Weitere Ursachen können die Schaffung von Hohlräumen (Infrastruktureinrichtungen) im Untergrund sein. Die durch den Gebirgsdruck bedingte Konvergenz der geschaffenen untertägigen Hohlräume bzw. deren mögliche Expansion wird durch das Deckgebirge übertragen und ist als Bodenbewegung an der Tagesoberfläche beobachtbar. Darüber hinaus sind auch Bodenbewegungen infolge der Sumpfungmaßnahmen bei Lockergesteinstagebauen zu beobachten.

Maßgebend für die Größe anthropogener Bewegungen bei der Rohstoffgewinnung sind die Lage und Ausdehnung der geschaffenen Hohlräume im Untergrund sowie die zeitliche Änderung ihrer Eigenschaften. In Abhängigkeit von der Tiefe, der räumlichen Ausdehnung, der Nutzungsdauer und zeitlichen Änderungen ergeben sich in Verbindung mit den geologischen und geomechanischen Verhältnissen des umschließenden Gebirgskörpers Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche. Diese Bodenbewegungen treten meist als dreidimensionale Verformungen (Deformationen) der ursprünglichen Tagesoberfläche über die Einwirkungszeit auf. In der Praxis werden diese räumlichen Verformungen, an der Schwerkraft und/oder einem Bezugssystem orientiert, durch eine vertikale Komponente (Höhenänderung) sowie zwei horizontale Komponenten in Ost-West- und Nord-Süd-Richtung (horizontale Verschiebung) beschrieben.

Für die Auswahl geeigneter Verfahren und die messtechnische Planung zur Erfassung und Analyse dieser flächenhaften und zeitlich variierenden Verformungen sollten die bekannten oder prognostizierten Eigenschaften der zu erfassenden Bodenbewegungen

berücksichtigt werden. Charakteristische und für die Erfassung wichtige Merkmale der Bodenbewegung sind:

- Lage und Ausdehnung des Bodenbewegungsgebietes (kleinräumig, großräumig),
- Zeitraum der Verformungen (spontan ablaufend, dauerhaft),
- Geschwindigkeit der Bewegungen und Deformationen,
- Größenordnung der Bewegungen im Untersuchungszeitraum,
- Richtung der Bodenbewegung (vertikale und horizontale Bewegungskomponente),
- Räumliche und zeitliche Inhomogenitäten.

Hieraus lassen sich, unter Berücksichtigung weiterer spezifischer Aufgabenstellungen und Qualitätsanforderungen, die notwendige räumliche Dichte der zu gewinnenden Informationen (Punktdichte) sowie der zeitliche Abstand aufeinanderfolgender Messungen ableiten.

1.2 Radarinterferometrie

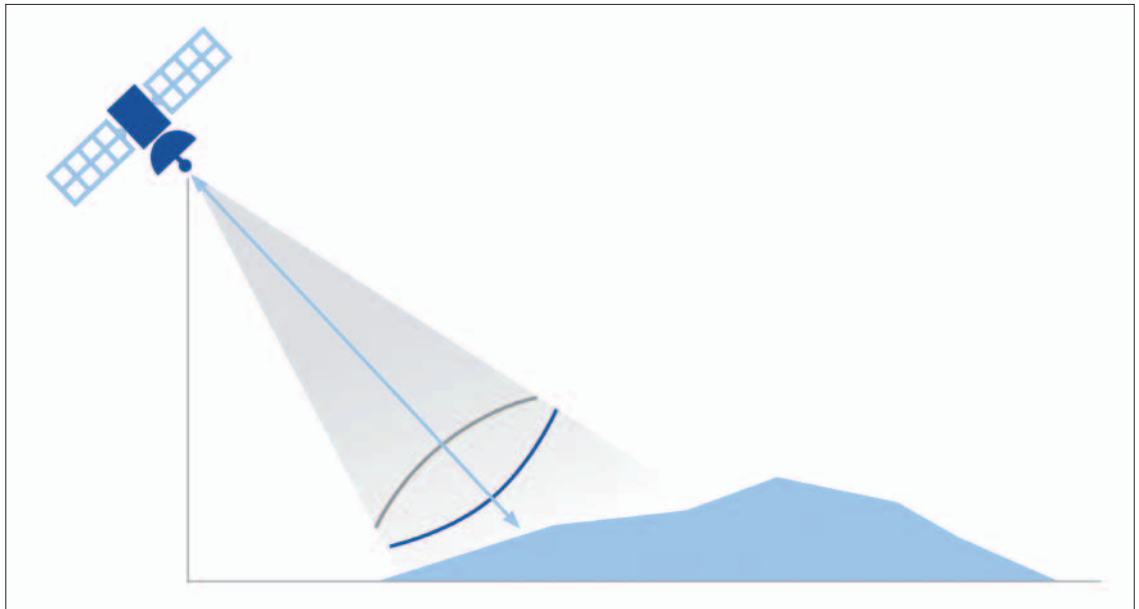
1.2.1 Grundprinzip

Radarinterferometrie steht für die interferometrische Prozessierung von mindestens zwei Radaraufnahmen (z. B. Satellitenszenen). Als Ergebnis können Höhenmodelle oder, unter Verwendung einer Vielzahl von Radaraufnahmen (Datenstapel), Zeitreihen von Bodenbewegungen der Erdoberfläche und der mit ihr verbundenen Objekte ermittelt werden.

Die notwendigen Radaraufnahmen werden durch ein Radarmesssystem in einem Schrägsicht-Aufnahmeverfahren gewonnen. Bei der satellitengestützten Radarinterferometrie befindet sich dieses Messsystem auf einem Satelliten, der die Erde umkreist und Informationen über einen Teil der Erdoberfläche mit einer bestimmten Breite, die als Schwadbreite (swath width) bezeichnet wird, erfasst.

Dafür werden elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge im Radarbereich unter einem bestimmten Blickwinkel vom Satelliten zur Erdoberfläche ausgesendet (Abbildung 1). Das an der Erdoberfläche bzw. an Objekten reflektierte/zurückgestreute Radarsignal wird vom Radarsensor wieder empfangen und aufgezeichnet. Die Dimension eines aus den empfangenen Signalen erzeugten Radarbildes ergibt sich aus den Laufzeiten der Signale in Ausbreitungsrichtung (Range) und Flugrichtung (Azimut).

Abbildung 1:
Vereinfachte
Darstellung des
Schrägsicht-
Aufnahme-
verfahrens eines
Radarsatelliten.



1.2.2 Messpunkt

Die von einem Radarsensor ausgesandten elektromagnetischen Impulse werden in Teilen von der Erdoberfläche und den darauf befindlichen Objekten zum Sensor zurückreflektiert. Diese rückstreuenden Oberflächenelemente bzw. Objekte an der Erdoberfläche werden auch als Rückstreuer (engl. scatterer) bezeichnet. Es wird generell zwischen zwei verschiedenen Signalreflexionen unterschieden (siehe auch Abbildung 2):

- Punktstreuer oder Persistent Scatterer (PS), bei denen die Messung von einem stark reflektierenden Objekt (z. B. einem Gebäudeteil) innerhalb der Auflösungszelle dominiert wird, dessen physikalische Rückstreuereigenschaft sich über den Betrachtungszeitraum nicht verändert.
- Flächenstreuer oder Distributed Scatterer (DS), bei denen viele Rückstreuerelemente innerhalb einer Auflösungszelle verteilt sind, die ein geringes, aber homogenes Rückstreusignal aufweisen (z. B. vegetationsfreie, unbebaute Flächen).

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, entstehen PS oft durch Reflexionen an anthropogenen Strukturen. Die empfangenen Radarsignale weisen eine starke (dominierende) und gleichbleibende Rückstreuung über

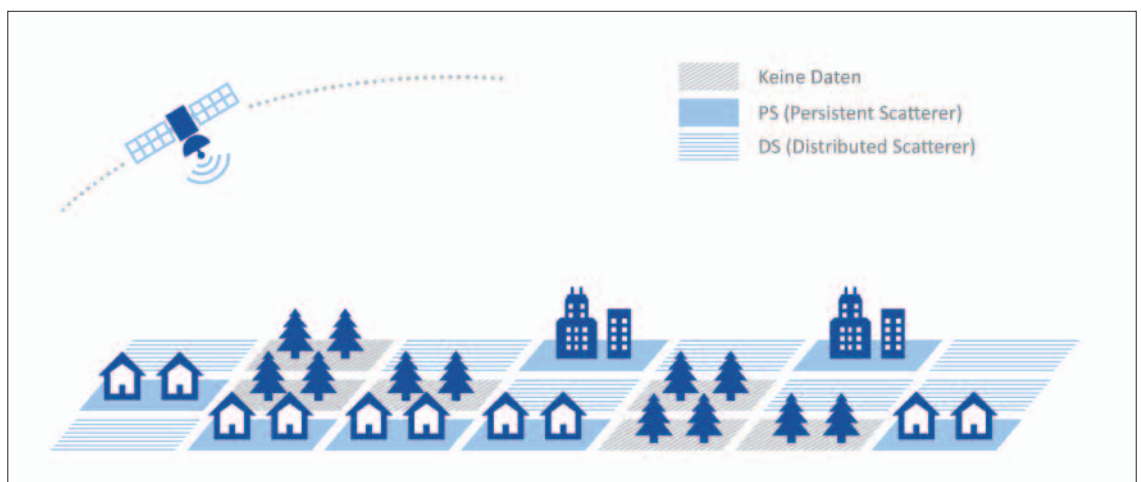
längere Zeit auf. DS zeichnen sich durch räumlich ähnliche (flächenhafte) Rückstreuereigenschaften aus und werden oft von Flächen gleicher Rauigkeit/Oberflächeneigenschaft hervorgerufen.

Aus diesen Rückstreuern können Messpunkte abgeleitet werden, sofern sie gewisse Kriterien, wie z. B. eine ausreichend unveränderte physikalische Rückstreuereigenschaft im Laufe der Zeit (temporale Kohärenz), erfüllen. PS sind Messpunkte, deren Phasenzentrum Subpixel-genau bestimmt werden kann, während DS Repräsentanten für Flächen sind. Die absolute Lage des Phasenzentrums eines PS ist in der Realität nicht bekannt. Eine Ausnahme bilden auf der Erdoberfläche installierte aktive und passive Radarreflektoren (Kapitel 2.2.8), deren Signale vom Radarsatelliten erfasst werden.

Die Lage dieser Messpunkte lässt sich bestimmen und damit im Kontext zu anderen topographischen Objekten darstellen. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die resultierende Messpunktverteilung für eine InSAR-Auswertung von TerraSAR-X Stripmap (SM) Descending Daten mit einer Bodenauflösung von 3 m x 3 m.

Die Lage und Anordnung der Messpunkte spiegelt die notwendige unveränderte physikalische Rückstreu-

Abbildung 2:
Schematische
Darstellung
der möglichen
Rückstreuer
innerhalb der
Auflösungszellen.



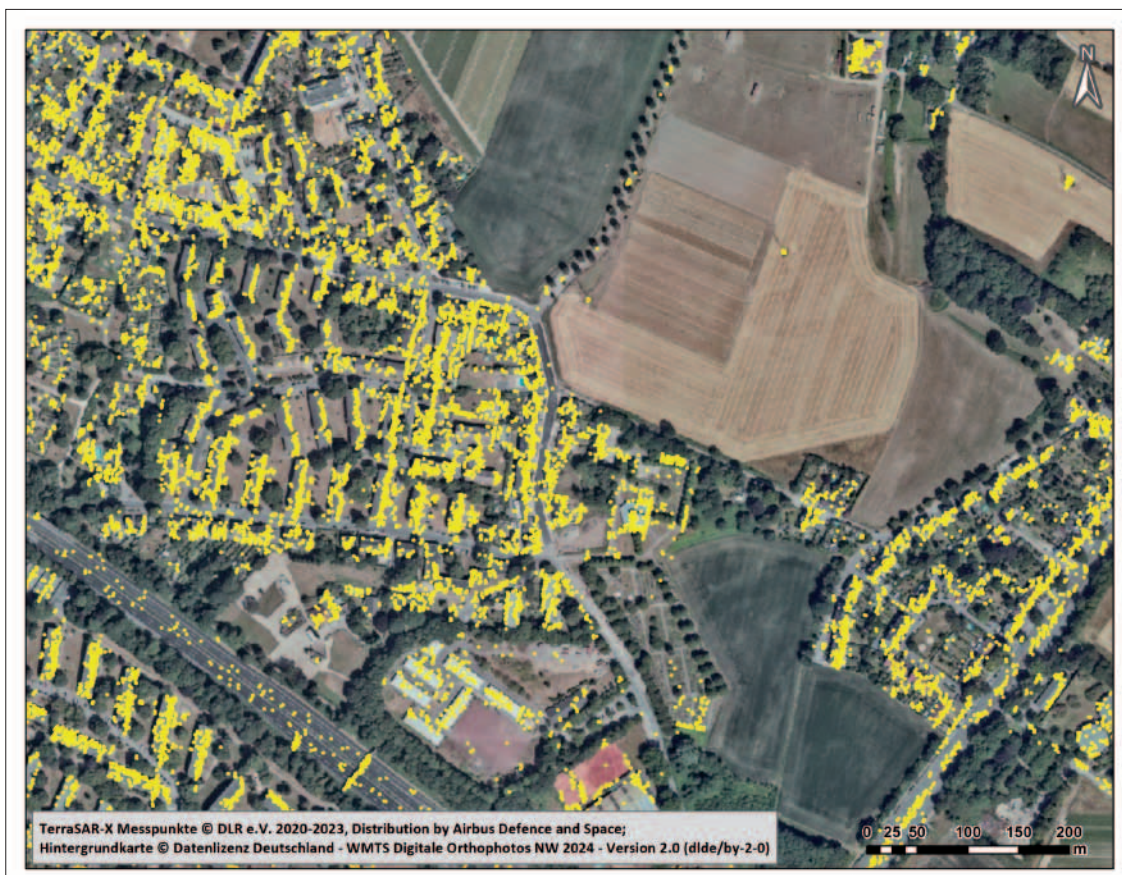


Abbildung 3:
Beispiel der
Messpunktver-
teilung für eine
Auswertung
von TerraSAR-X
SM Descending
Daten (3 m x 3 m
Bodenauflösung).

eigenschaft wider: über Vegetationsflächen wie Wäldern, Feldern und Wiesen, existieren keine Messpunkte, jedoch für einzelne Infrastrukturen innerhalb dieser Flächen, wie z. B. Strommasten. In den Siedlungsgebieten sind viele Messpunkte an der dem Satelliten zugewandten Seite der Häuser angeordnet. Die Rückseite eines Hauses befindet sich im Radarschatten und kann keine Messpunkte generieren. Entlang der Autobahn (in Abbildung 3 unten links) gibt es eine Vielzahl an Messpunkten, hervorgerufen durch den Straßenbelag und/oder die Leitplanken. Für eine aktive Baustelle (starke Veränderungen an der Oberfläche) existieren nur wenige bzw. keine Messpunkte, aufgrund der stark veränderten Rückstreueigenschaften.

Das Vorhandensein von Vegetation sowie starken Veränderungen an der Erdoberfläche führen zu Einschränkungen bei der Bewegungsmessung mittels der

Radarinterferometrie. In dessen Folge können nur sehr wenige bis keine Messpunkte abgeleitet werden. Zur Erhöhung der Messpunktdichte können bei Bedarf künstliche Corner-Reflektoren (CR) im Interessensgebiet installiert werden (Kapitel 1.2.8).

1.2.3 Messwert und abgeleitete Parameter

1.2.3.1 Messwert

Der Messwert einer radarinterferometrischen Prozessierung von Satellitendaten ist, bezogen auf einen Referenzzeitpunkt und einen räumlichen Referenzpunkt (Kapitel 1.2.7), ein eindimensionaler Verschiebungswert [mm] in Blickrichtung des Satelliten (LOS – Line-of-Sight), siehe Abbildung 4.

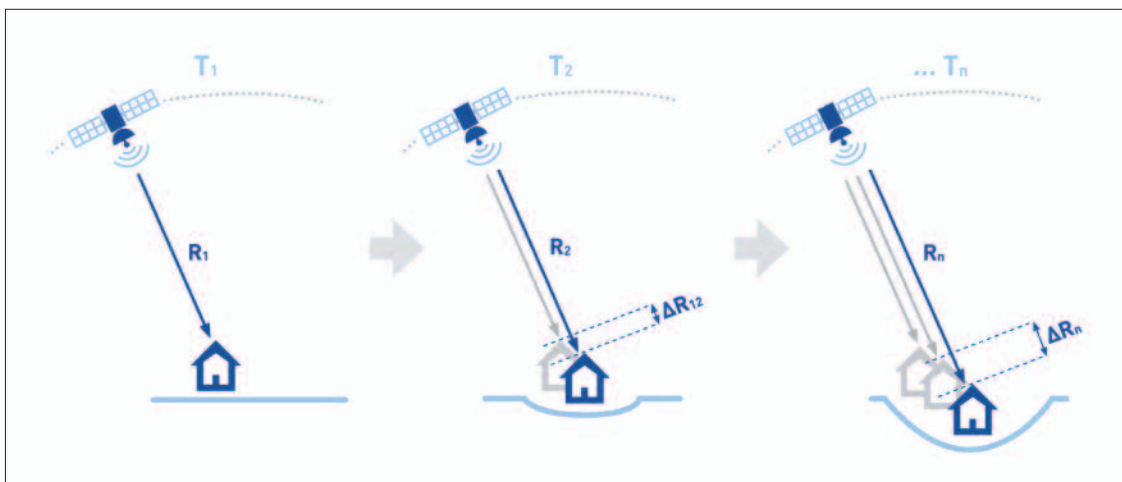
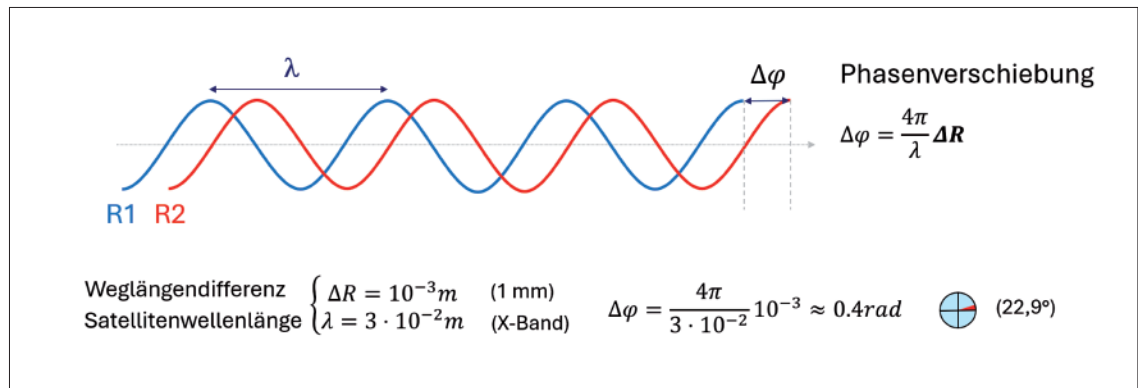


Abbildung 4:
Prinzip der
Messung der
bewegungs-
bedingten
Weglängendifferenz
 ΔR_n durch
wiederholte
Radaraufnahmen
zu den Zeitpunkten
 T_1 bis T_n in
Blickrichtung des
Sensors.

Abbildung 5:
Ermittlung der
Phasenverschiebung
durch
Interferometrie
(λ = Wellenlänge
des Radarsignals).
Beispielrechnung
zur Bestimmung
einer
Weglängendifferenz
von einem
Millimeter.



Die Bestimmung des Verschiebungswertes (Weglängendifferenz ΔR) geschieht indirekt über die Messung der Phasenlage des zurückgestreuten und empfangenen elektromagnetischen Signals. Die Differenzen der Phasenlage zwischen den jeweiligen Aufnahmen ergeben sich aus der Phasenverschiebung $\Delta\phi$, welche proportional zur gesuchten Größe der Weglängendifferenz ist (Abbildung 5). Unter Berücksichtigung der Wellenlänge λ kann die Weglängendifferenz ermittelt werden.

Die Sensitivität der Phasenmessung ist u. a. vom Radarinstrument an Bord des Satelliten abhängig. Aktuelle Radarsensoren können Phasenlagen und damit auch Phasenverschiebungen kleiner als ein Radiant erfassen. Somit ist es theoretisch möglich, Weglängendifferenzen und daher Verschiebungswerte im Millimeterbereich zu ermitteln.

Der Messwert (Verschiebungswert in LOS [mm]) beschreibt somit den aktuellen Bewegungsstand des Messpunktes, bezogen auf den Referenzzeitpunkt und in Blickrichtung des Satelliten, zum jeweiligen Zeitpunkt der Satellitendatenaufnahme. Durch die Wiederholung der Satellitendatenaufnahmen entsteht eine Zeitreihe von LOS-Messwerten. Die Zeitreihe der LOS-Messwerte beinhaltet Informationen über die zeitlich variierende Bewegung des Messpunktes und deren Fehleranteile.

1.2.3.2 Abgeleitete Parameter

Durch die Analyse der Zeitreihe der LOS-Messwerte können Parameter zur Charakterisierung des Bewegungsverlaufes über die Zeit abgeleitet werden. Voraussetzung für die Ableitung von Zeitreihenparametern ist eine vollständige, bestmögliche Beschreibung der zeitlich-variierenden Bewegungen (lineare, nichtlineare, zyklische) über den Beobachtungszeitraum mittels geeigneter funktionaler Modelle. In der InSAR-Praxis haben sich beispielsweise folgende Zeitreihenparameter bewährt und werden zur Interpretation der InSAR-Zeitreihen genutzt:

- Geschwindigkeit [mm/Jahr], zur Beschreibung der mittleren Bewegungsrate im Beobachtungszeitraum (linearer Trend).
- Beschleunigung [mm/Jahr²] zur Beschreibung von Geschwindigkeitsänderungen.
- Lineare und nichtlineare Bewegungskomponenten eines bestangepassten Polynommodells zur Beschreibung aperiodischer Bewegungsverläufe.

- Periodische Bewegungstrends mit Angaben zu Amplituden, Frequenzen und Phasenlagen (zeitlicher Abstand zur Nullmessung).

1.2.4 Radarsatelliten

Die für die Radarinterferometrie notwendigen Radaraufnahmen (Satellitendaten) werden von entsprechenden Radarsatelliten aufgenommen. In Abbildung 6 ist eine Auswahl bekannter Radarsatelliten im operationellen Umfeld dargestellt, die für InSAR-Analysen geeignet sind. Hauptsächlich unterscheiden sich die Radarsatelliten durch ihre Wellenlänge bzw. deren Frequenzband (X-, C- und L-Band), die verfügbaren Aufnahmemodi sowie ihren nominellen Wiederholzyklus (zeitliche Auflösung). Der Aufnahmemodus bestimmt u. a. den räumlichen Abdeckungsbereich an der Erdoberfläche, die räumliche Auflösung (Bodenaufklärung) der Daten sowie den Blickwinkel und die Blickrichtung der Aufnahme.

Radarsatelliten decken immer nur einen gewissen Bereich der Erdoberfläche während eines Überfluges ab. Diese Abdeckungsfläche (ground footprint) und die sich ergebende Szenengröße sind definiert durch die Schwadbreite und die Aufzeichnungsdauer in Flugrichtung. Sie ist abhängig vom Satelliten und dem Aufnahmemodus. Abbildung 7 stellt beispielhaft eine Sentinel-1 Interferometric Wide (IW) Swath Szene mit einer Abdeckung am Boden von etwa 250 km x 180 km einer Aufnahme von TerraSAR-X im High-Resolution Spotlight (HS) Modus (Standardszene 5 km x 5 km) gegenüber.

Typische Bodenaufösungen von gängigen Radarsatelliten unter Verwendung ihres Standard-Aufnahmemodus über Land betragen 5 m x 20 m (mittlere Auflösung, z. B. Sentinel-1, IW-Modus), 3 m x 3 m (hohe Auflösung, z. B. TerraSAR-X, SM-Modus) und reichen bis unter 1 m x 1 m (höchstauflösend, z. B. TerraSAR-X, HS-Modus). Die Bodenaufklärung bestimmt, inwieweit sich die Rückstreusignale von zwei reflektierenden Objekten, projiziert auf den Boden, voneinander trennen lassen. Je geringer die Bodenaufklärung ist, umso geringer wird auch die ableitbare Messpunktdichte im finalen Ergebnis sein (Abbildung 3). Besonders kleine und schmale Infrastrukturen, wie Straßen oder Gleise, können mit hochauflösenden Satelliten detaillierter beobachtet werden. Wegen der Erhöhung der Messpunktdichte können Aussagen über die räumliche

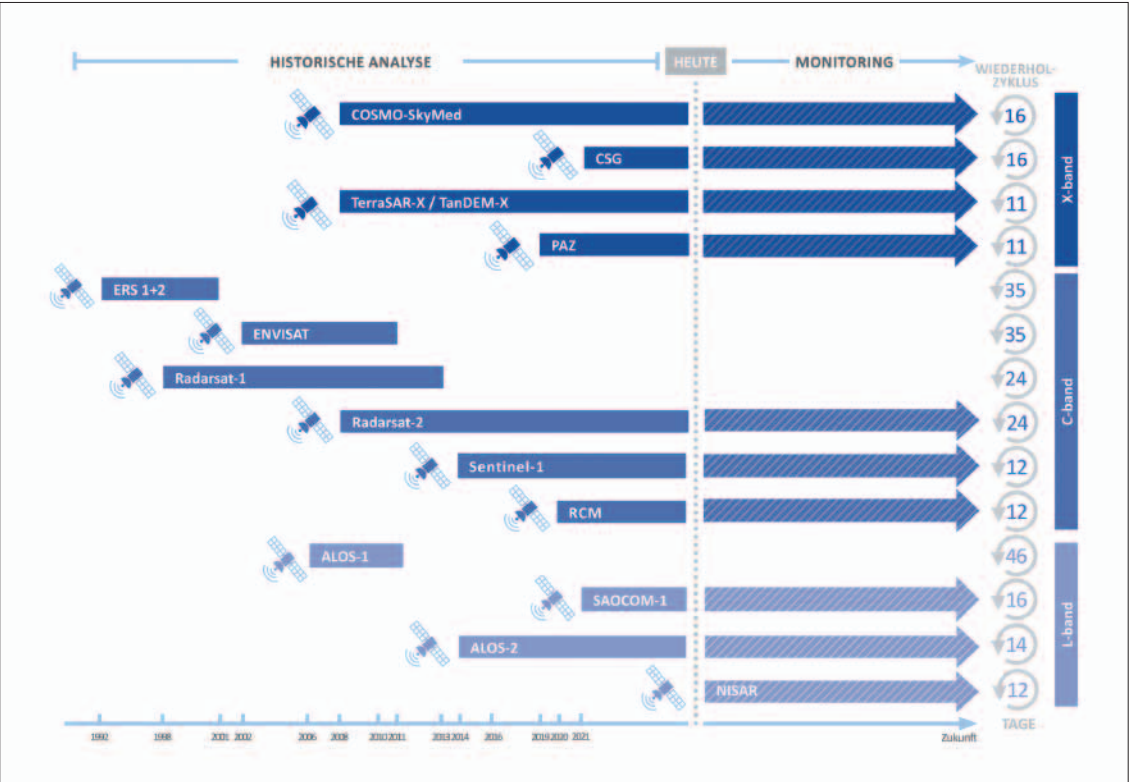


Abbildung 6:
Auswahl der verfügbaren SAR-Satelliten mit InSAR-Fähigkeiten, historisch und aktuell, sortiert nach deren Frequenzbereich (X-, C- und L-Band) und Angabe des nominellen Wiederholzyklus.

Variabilität im Bewegungsverhalten verbessert werden.

In der Regel gilt, nach jetzigem Stand der Technik, je höher die Bodenauflösung ist, umso kleiner ist auch die Radarszenen-Abdeckung und umgekehrt. Daraus ergibt sich, dass die Wahl des Radarsatelliten und des Aufnahmemodus maßgeblich durch die Aufgabenstellung (Gebietsgröße, Bodenauflösung, usw.) bestimmt werden.

Die Wellenlängen der Radarsatelliten liegen typischerweise im Bereich von ca. 23 cm (L-Band), ca. 6 cm

(C-Band) und ca. 3 cm (X-Band). Diese Größe hat einen entscheidenden Einfluss auf die Sensitivität der Messung der Bodenbewegung sowie die Eindringtiefe der Radarstrahlen, z. B. bei Vegetationsbewuchs. Je kürzer die Wellenlänge, desto kleinere Bewegungen können erfasst werden (Kapitel 2.2.1).

Weiterhin zu berücksichtigen ist die Lebensdauer und damit Verfügbarkeit der Radarsatelliten (Abbildung 6). Nur solange ein Satellit im operationellen Betrieb ist, können Radardaten aufgenommen werden.

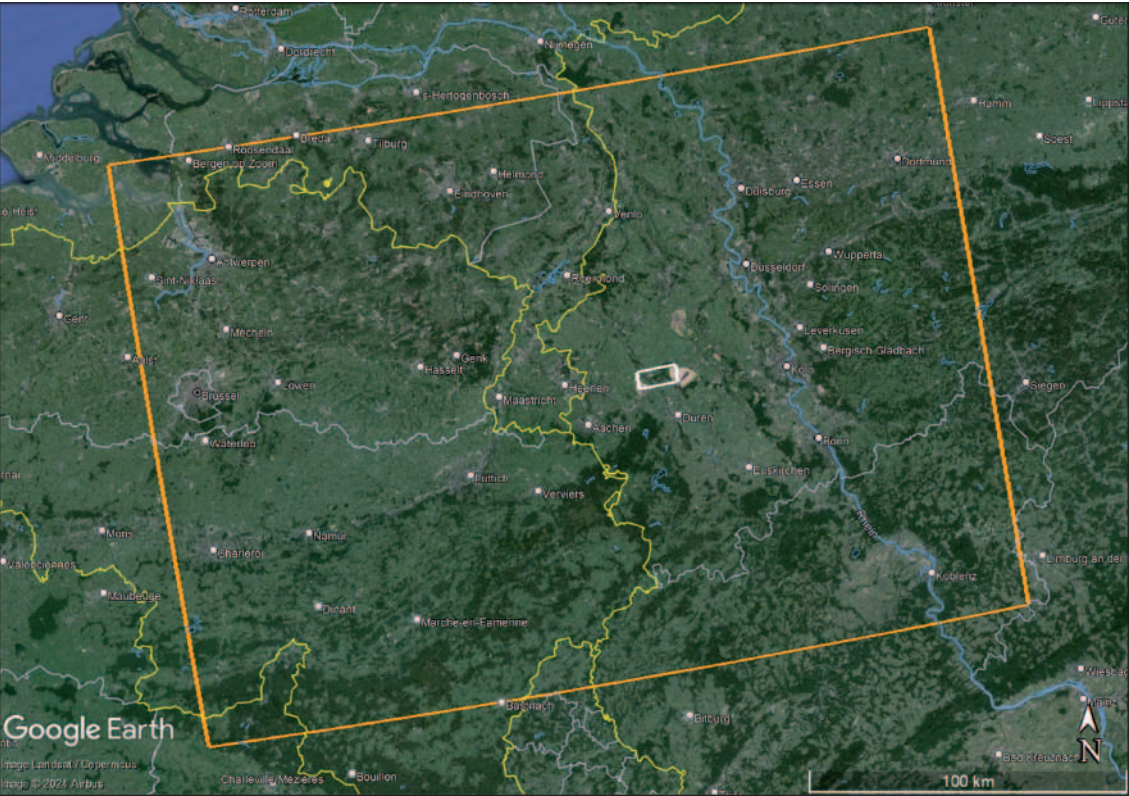


Abbildung 7:
Beispielhafte Darstellung für eine Radarszenen-Abdeckung mit unterschiedlichen Satelliten und Aufnahmemodi; Weiß = TerraSAR-X High-Resolution Spotlight (HS), Orange = Sentinel-1 Interferometric Wide (IW) Swath.

Hinzu kommen die unterschiedlichen Aufnahmepläne der Radarsatelliten. Während Sentinel-1 einen festen, regelmäßig aktualisierten, Überflugplan zur Erfassung des europäischen Festlands hat, zeichnen andere, meist kommerzielle Radarsatelliten, nur nach vorheriger Bestellung bei einem Satellitenbetreiber oder Datenprovider Radardaten auf. Im Fall kommerzieller Satelliten ist die Verfügbarkeit von historischen und zukünftigen Radaraufnahmen im Allgemeinen nur durch eine Bestellung gewährleistet.

1.2.5 Aufnahmegeometrie

Bezogen auf die Flugrichtung des Satelliten sendet das Radarmesssystem üblicherweise seine Strahlung nach rechts blickend (Blickrichtung) auf die Erdoberfläche. Die radarinterferometrischen Messungen erfolgen eindimensional in dieser Blickrichtung des Satelliten (LOS) und in Schrägsicht (Abbildung 1). Diese eindimensionalen LOS-Messungen können aus gegensätzlichen Satellitenflugrichtungen (Ascending oder Descending) erfolgen. Befindet sich ein Radarsatellit in einer Orbitbahn von Süden nach Norden erfolgt eine Ascending (aufsteigende) Aufnahme. Bei einer entgegengesetzten Flugrichtung erfolgen die Aufnahmen in der Descending (absteigenden) Aufnahmegeometrie. In Abbildung 8 sind diese beiden Aufnahmegeometrien mit nahezu polarer Umlaufbahn skizziert.

Für die sachgerechte Interpretation von LOS-Messungen zur Ableitung von Bodenbewegungen ist es notwendig, die Besonderheit dieser eindimensionalen Schrägsichtmessungen aus Ascending und Descending zu verstehen. Es gilt, dass die dreidimensionale Verschiebung eines Messpunktes vom Radarsensor als orthogonale Projektion vom Raumbezugssystem auf den eindimensionalen LOS-Vektor erfasst wird. Ein positiver LOS-Wert bedeutet, dass sich die LOS-Distanz zwischen dem Sensor und dem Messpunkt verkleinert, während ein negativer LOS-Wert einer Vergrößerung der Distanz entspricht. Bewegungen von Messpunkten orthogonal zur LOS-Richtung können nicht erfasst werden.

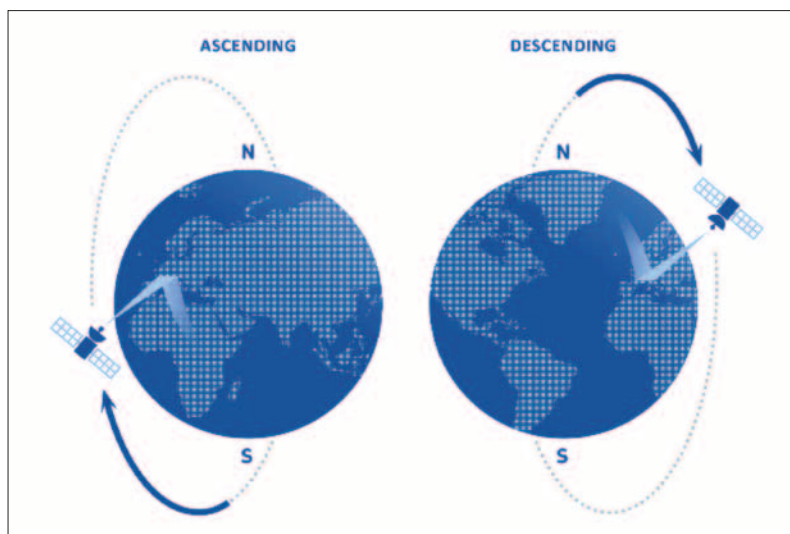


Abbildung 8: Darstellung einer aufsteigenden (links) und absteigenden (rechts) Satellitenumlaufbahn.

Abbildung 9 stellt die beiden LOS-Messungen in Ascending und Descending Blickrichtung für ein Beispiel einer Bewegungsmessung gegenüber. In dieser vektoriellen Darstellung, bezogen auf eine Projektionsebene in vertikaler und in Ost-West Richtung, ergibt sich die gleiche zu messende reale Punktbewegung (D_{real}) zusammengesetzt aus einer vertikalen und einer Ost-West gerichteten horizontalen Bewegungskomponente. Erkennbar ist, dass in der Ascending Blickrichtung die Punktbewegung D_{real} weg vom Satelliten erfolgt, und somit zu einer negativen LOS-Verschiebung führt (rötliche Darstellung), während die gleiche reale Bewegung in der Descending Blickrichtung zu einer gemessenen positiven Bewegung hin zum Satelliten (bläuliche Darstellung) führt.

Um aus diesen eindimensionalen LOS-Bewegungswerten dreidimensionale Bodenbewegungen ableiten zu können, ist es notwendig, die gemessenen LOS-Verschiebungen zu kombinieren und in einem definierten Koordinatensystem in 3D-Bewegungskomponenten (z. B. vertikal) zu zerlegen (Dekomposition). Zur Lösung des inversen Problems der Dekomposition sind somit räumlich und zeitlich übereinstimmende Beobachtungen in mindestens drei unterschiedlichen Blickrichtungen erforderlich.

Aufgrund der aktuell verfügbaren Radarsatelliten in polnahen Umlaufbahnen und ähnlichen Sichtgeometrien stehen derzeit nur maximal zwei unabhängige Radardatensätze mit entgegengesetzter Blickrichtung (Ascending und Descending) für die Deformationsüberwachung eines Gebietes zur Verfügung. Durch die Kombination von LOS-Messungen in Ascending und Descending Blickrichtung, über dem gleichen Gebiet und im gleichen Zeitraum, wird die Bestimmung von zwei Bodenbewegungskomponenten ermöglicht. Die Abbildung 10 verdeutlicht das Prinzip der sogenannten 2D-Dekomposition, bei der die LOS-Messwerte aus Ascending und Descending in eine vertikale (D_v) und eine Ost-West gerichtete horizontale (D_{ow}) Bewegungskomponente zerlegt werden. Da alle aktuellen Radarsatelliten eine polare Umlaufbahn aufweisen und seitwärts blicken, ist es technisch nicht möglich, mit der Radarinterferometrie Bewegungen in Flugrichtung zu erfassen. Eine Bestimmung der horizontalen Nord-Süd Bewegungskomponente ist bei dieser Konstellation mit einer Qualität, wie bei den beiden anderen Komponenten, nicht möglich. Erst durch die Hinzunahme von Satelliten mit verschränkten Umlaufbahnen (nicht polar) könnte diese Einschränkung zukünftig bei entsprechender Satellitenverfügbarkeit reduziert werden.

Die Berechnung der Bodenbewegungskomponenten aus den LOS-Bewegungen in Ascending- und Descending-Blickrichtung erfolgt für definierte Gitterelemente, Rasterzellen oder Bereiche ähnlicher Bewegung, in denen sich die Messpunkte befinden. Größe und Orientierung dieser geometrischen Berechnungselemente, sowie das Verfahren zur Berechnung der auf die Elemente bezogenen Ascending-/Descending Zeitreihen sind anzugeben. Für Berechnungselemente, in denen Messpunkte aus nur einer Blickrichtung verfügbar sind, ist die Dekomposition nicht möglich.

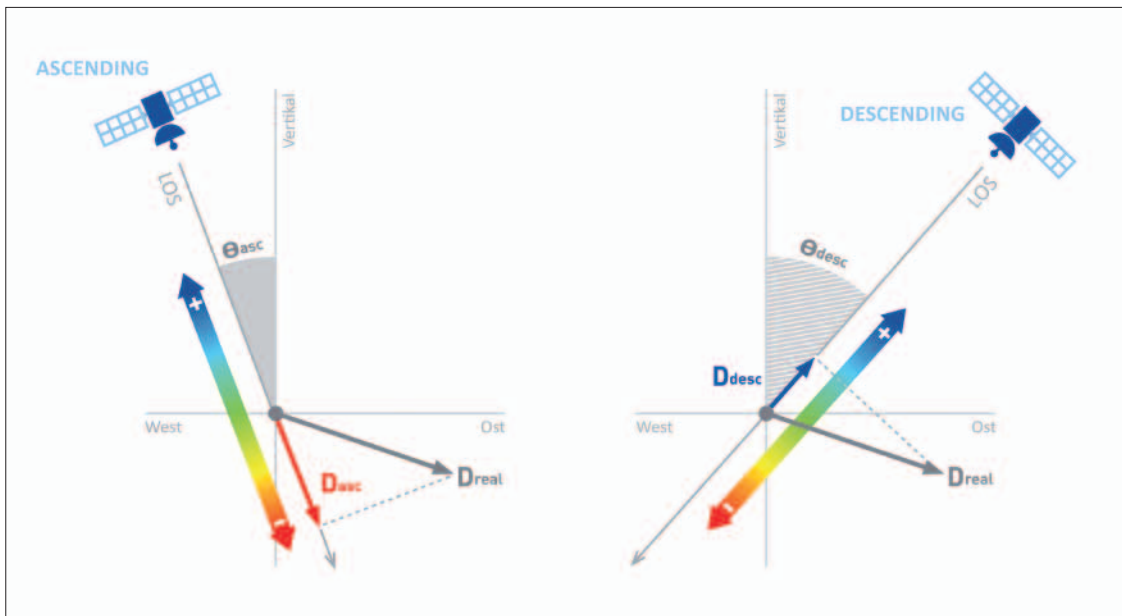


Abbildung 9: Schematische Darstellung der eindimensionalen LOS-Messung in der Ascending (links) und Descending (rechts) Aufnahmegeometrie.

Die durch die Dekomposition berechneten Werte sind Verschiebungen [mm] in definierten Bewegungsrichtungen. Als Repräsentanten der Berechnungselemente dienen Pseudo-Messpunkte, denen Lagekoordinaten und die Zeitreihen der berechneten Bewegungskomponenten zugeordnet sind. Vergleichbar zu Abschnitt 1.2.3.2 können verschiedene Zeitreihenparameter zur Charakterisierung der Zeitreihen der Bewegungskomponenten an den Pseudo-Messpunkten abgeleitet werden.

1.2.6 Auswerteverfahren

Grundlage der interferometrischen Auswerteverfahren sind Phaseninformationen, die von mindestens zwei Radarbildern stammen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten über demselben Gebiet aufgenommen wurden. Die Ableitung von Verschiebungen an der Erdoberfläche (in LOS) erfolgt basierend auf den Phasendifferenzbildern, den sog. Interferogrammen. Das Auswerteverfahren wird allgemein als Differentielle Radarinterferometrie (DInSAR – Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar) bezeichnet. Bei der klassischen DInSAR-Methode werden einzelne Interferogramme genutzt, um Aussagen zu Bewegungen im Beobachtungszeitraum abzuleiten. Die Anwendbarkeit ist jedoch beschränkt auf zeitlich und geometrisch kohärente Bereiche mit geringen Phasen- und Amplitudenänderungen (Hanssen 2001), die in Abhängigkeit der Aufnahmebedingungen zeitlich und räumlich variieren können. Weitere Einschränkungen bei der Anwendung der DInSAR-Methode bestehen u. a. durch atmosphärische Einflüsse.

Zur Ableitung von Zeitreihen der LOS-Bewegungen wurden seit den 1990er Jahren sogenannte Multi-Basislinien-Verfahren (Ferretti et al. 1997; Zhu et al. 2018) entwickelt, bei denen eine Vielzahl von unabhängigen Beobachtungen, d. h. Interferogramme mit unterschiedlichen räumlichen Basislinien infolge leicht veränderter Orbitpositionen, sowie unterschiedlichen zeitlichen Abständen genutzt werden. Grundlage

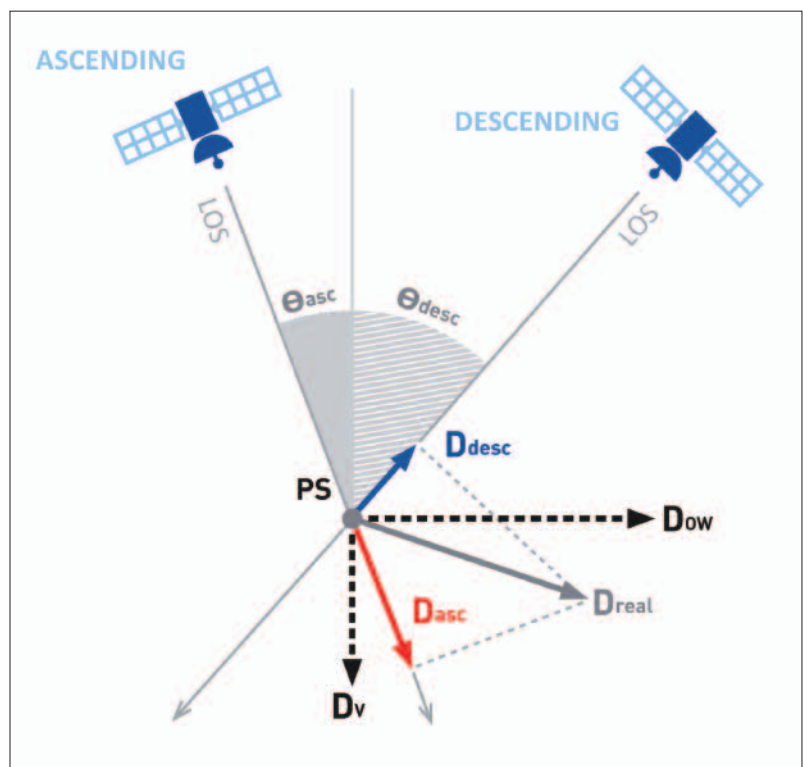
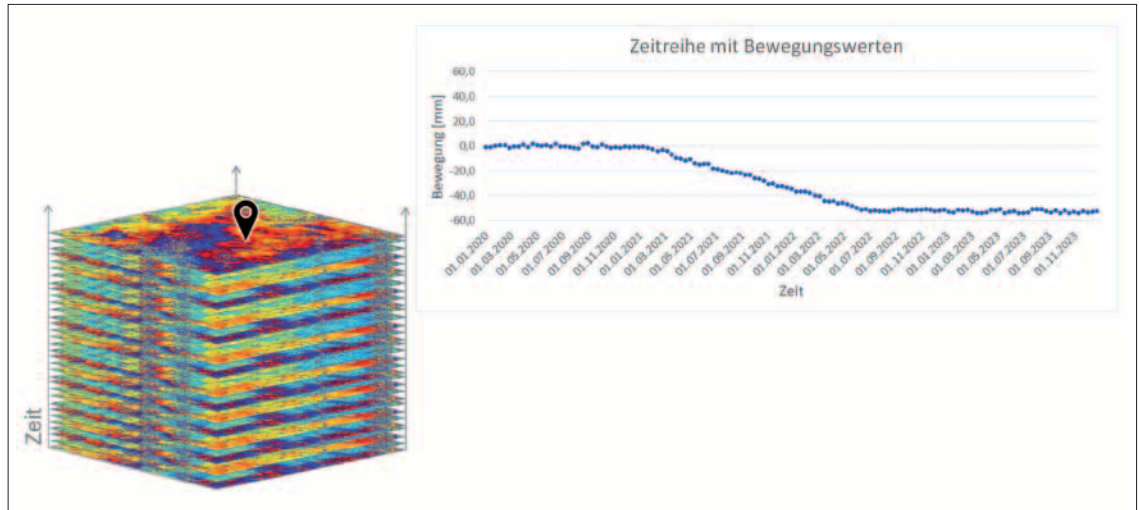


Abbildung 10: Prinzip-Darstellung der zweidimensionalen Zerlegung der Ascending/Descending LOS-Messwerte (D_{asc} , D_{desc}) in eine vertikale (D_v) und eine Ost-West gerichtete horizontale (D_{ow}) Bewegungskomponente.

dieser Verfahren ist ein statistischer Auswerteprozess eines Stapels von Interferogrammen (Abbildung 11). Dieser erlaubt es, die durch Bewegungen an der Erdoberfläche erfassten Phasendifferenzen von anderen Phasenkomponenten (Atmosphäre, Orbitfehler, topographische Fehler, Rauschen) zu trennen. Im Gegensatz zur klassischen DInSAR-Analyse können somit systematische Fehler in den abgeleiteten LOS-Bewegungszeitreihen reduziert bzw. idealerweise nahezu vollständig eliminiert werden.

Bei den Multi-Basislinien-Verfahren haben sich im Laufe der Zeit zwei generelle Auswertetechniken in der Anwendung durchgesetzt, die Persistent Scatterer

Abbildung 11:
Stapel von
Interferogrammen
(links) zur
statistischen
Auswertung und
Beispiel einer
Zeitreihe der
Bewegung in LOS
(rechts).



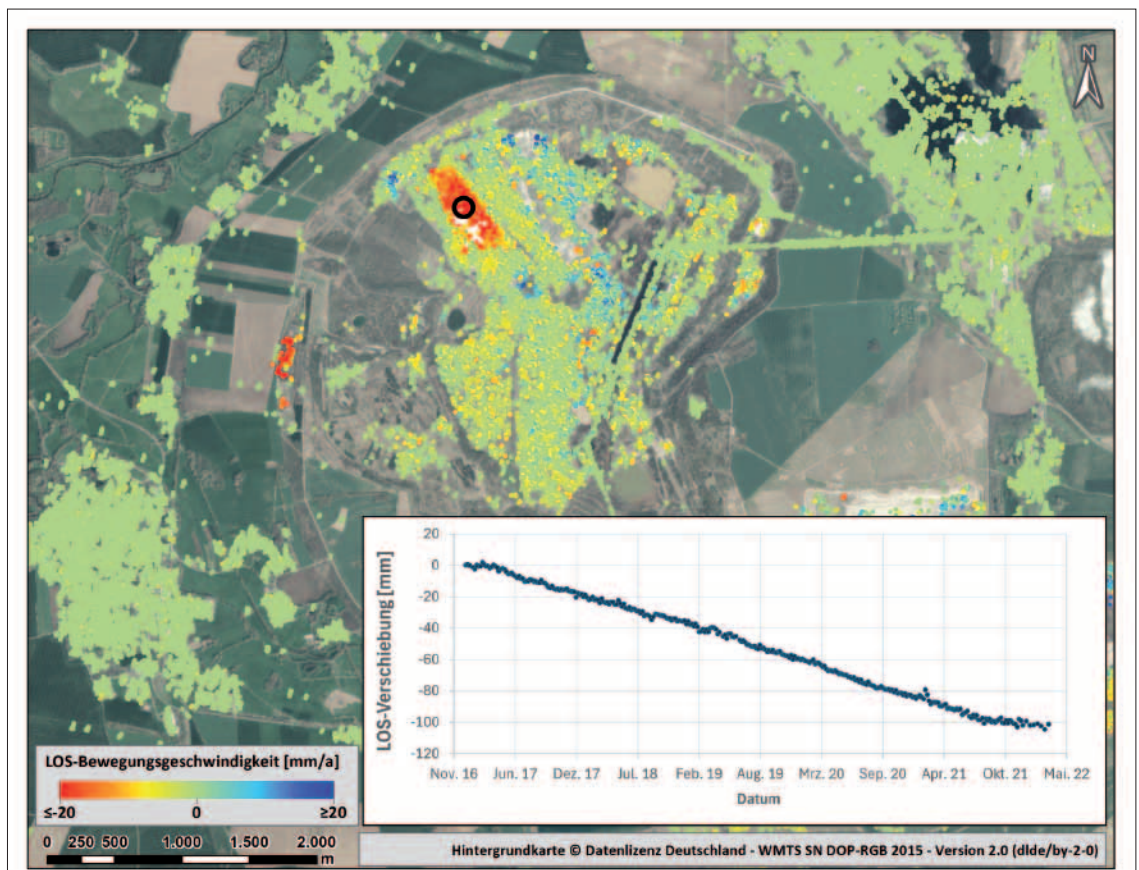
Interferometry (PSI) und die Small-Baseline-Subset Methode (SBAS). Beide Techniken werden bis heute stetig weiterentwickelt und erweitert, um beispielsweise die Schätzgenauigkeit der Parameter, die Geokodierung der Messpunkte sowie die Dichte an Messpunkten besonders in Gebieten mit geringer Kohärenz (schlechteren Rückstreuungseigenschaften) zu verbessern. Die ursprüngliche PSI-Technik, einschließlich der Permanent Scatterer Technik, wie sie von Ferretti et al. (2000, 2001) erstmalig vorgeschlagen wurde, basiert auf der Analyse der Persistent Scatterer (PS) (Kapitel 2.2.2). Bei den erweiterten PSI-Algorithmen werden neben den PS auch die DS ausgewertet. Die SBAS-Algorithmen fokussieren auf der Annahme einer räumlich korrelierten Bewegung und der Ähnlichkeit der Radar-Rückstreuungseigenschaft benachbarter Rückstreuer. In Crosetto et al. (2016) sind

die Entwicklung der PSI- und SBAS-Methode, die wichtigsten in der Literatur veröffentlichten Algorithmen, verschiedene technische Aspekte, einschließlich der Besonderheiten und Unterschiede der verschiedenen Auswertetechniken, zusammenfassend dargestellt. In Li et al. (2022) ist eine detaillierte Darstellung der Entwicklung der SBAS-Algorithmen zu finden.

Die interferometrischen Auswertelgorithmen können anhand der folgenden Prozessierungskriterien grundsätzlich charakterisiert und unterschieden werden (Crosetto et al. 2016):

- Konfiguration der räumlichen und zeitlichen Basislinien
- Nutzung von voll aufgelösten Daten oder Multi-looking-Daten
- Pixelauswahlkriterien; Nutzung von PS und DS

Abbildung 12:
Exemplarische
Darstellung
der Ergebnisse
einer radar-
interferometrischen
Bodenbewegungs-
messung
basierend auf
mittel-aufgelösten
Sentinel-1 IW
Satellitendaten.



- Nutzung flexibler und adäquater Bewegungsmodelle (linear, nichtlinear)
- Räumliche und zeitliche Phasenabwicklungsalgorithmen
- Schätzung der atmosphärischen Phasenkomponenten; Verwendung von Zusatzdaten (numerische Wettermodelle, GNSS etc.)
- Nutzung aktueller Digitaler Höhenmodelle (DEM)
- Schätzung der residualen topographischen Phasenkomponente
- Geokodierung in Range und Azimut
- Referenzpunktwahl
- Fähigkeit der Wide-Area-Prozessierung

Die interferometrische Prozessierung ist insgesamt ein sehr komplexer Ablauf und abhängig von verschiedenen Faktoren. Neben der Leistungsfähigkeit des Auswertalgorithmus bestimmen der verwendete Radarsensor und Aufnahmemodus, die Anzahl der verwendbaren Radaraufnahmen, die ableitbare Messpunktdichte, die Bewegungscharakteristik etc. die Qualität der InSAR-Ergebnisse (Kapitel 3) sowie auch die Anwendungsmöglichkeiten. Für eine verbesserte räumliche Abtastung von lokalen Bewegungsbereichen und/oder Inhomogenitäten im Bewegungsfeld wird die punktweise PSI-Methode unter Verwendung von voll aufgelösten Radardaten empfohlen (Cigna et al. 2021; Crosetto et al. 2016). Vergleiche und Validierungen von PSI- und SBAS-Ergebnissen mit GNSS und Nivellements-Messungen von Cigna et al. (2021) zeigen zum einen, dass PSI- und SBAS-Ergebnisse trotz sehr unterschiedlicher Verarbeitungsschritte sehr ähnlich sein können bzw. sind, zum anderen jedoch auch Unterschiede in den erzielten Genauigkeiten auftreten.

Als Ergebnis liefern die InSAR-Auswertungen für jeden Messpunkt eine Zeitreihe seiner Bewegungen in LOS (Abbildung 11 und Abbildung 12). Somit können für jeden Messpunkt die Gesamtbewegungen [mm] in LOS über den Untersuchungszeitraum oder die Geschwindigkeit [mm/Jahr] dieser Bewegung, in Bewegungs- oder Geschwindigkeitskarten farbkodiert und in ihrer räumlichen Lage dargestellt werden (Abbildung 12).

1.2.7 Referenzpunkt

Die InSAR-Messmethode liefert Messwerte der Verschiebung [mm] in Blickrichtung des Satelliten, je nach Verfahren relativ zu einem oder mehreren räumlichen Referenzpunkten. Ein Referenzpunkt ist ein ausgewählter Bildpunkt in den Radarszenen, der einem reflektierenden Radarziel in der Realität entspricht. Ein Corner-Reflektor (Kapitel 1.2.8) kann ebenfalls als Referenzpunkt verwendet werden, sofern er in allen verwendeten Radardaten im Beobachtungszeitraum zu sehen ist.

Dabei sollten Referenzpunkte grundsätzlich folgende Anforderungen erfüllen:

1. Geringes Phasenrauschen

Ein Referenzpunkt (Messpunkt) muss über ein geringes Amplituden- und Phasenrauschen über den

gesamten Beobachtungszeitraum verfügen. Die zeitliche Kohärenz kann als Maß zur Auswahl eines Referenzpunktes verwendet werden.

2. Lage- und Höhenstabilität

Ein Referenzpunkt muss vor dem Hintergrund von natürlichen und anthropogenen Beeinflussungen lage- und höhenstabil sein und darf auch keine zyklischen Bewegungen im Beobachtungszeitraum aufweisen. Seine Stabilität sollte durch unabhängige geodätische Messverfahren im Lagegebiet überprüft und nachgewiesen werden. Sofern keine weiteren Informationen zur Stabilität verfügbar sind, kann der Nachweis durch eine/mehrere unabhängige InSAR-Prozessierungen mit Referenzpunkten in unterschiedlichen Bereichen des Auswertungsgebiets erbracht werden. Sind nachweislich keine bewegungsfreien Referenzpunkte wählbar, besteht die Möglichkeit, die InSAR-Ergebnisse nachträglich anhand von mehreren geodätisch bestimmten Punkten mit einem dokumentierten Verfahren zu kalibrieren.

3. Höhenfehlerfreiheit

Bei Verwendung eines externen DEM im InSAR-Auswerteprozess sollte die Höhe des Referenzpunktes mit der Höhe im DEM übereinstimmen, also der DEM-Fehler minimal sein. Mit Blick auf die Auswahl möglichst höhenfehlerfreier Referenzpunkte empfiehlt sich generell deren Lage in einem flachen, bebauten Bereich mit geringer Höhenvariabilität.

4. Nähe zum Untersuchungsgebiet

Der Referenzpunkt sollte sich in unmittelbarer Nähe zum Untersuchungsgebiet befinden, unter Berücksichtigung einer bewegungsfreien Lage. Die Genauigkeiten der radarinterferometrischen Messergebnisse verschlechtern sich mit zunehmender Distanz zum Referenzpunkt (Kapitel 3.2).

1.2.8 Künstliche Radarreflektoren

Ein künstlicher Radarreflektor ist ein nahezu idealer Radarrückstreuer mit hoher Rückstreuintensität und geringem Signalrauschen, definiertem Radarrückstreuquerschnitt (Radar Cross Section, RCS), mit festem Phasenzentrum und hoher Phasenstabilität. Ein solcher künstlicher Radarreflektor kann u. a. sinnvoll als künstlicher Objektpunkt in einem Überwachungsgebiet mit wenigen Rückstreuern zur hochpräzisen Bewegungsmessung und als Referenzpunkt genutzt werden. Ausgestattet mit weiteren Messmarken und/oder Sensoren kann der Radarreflektor auch zur Einbindung in übergeordnete Netze sowie zur Validierung und Kalibrierung verwendet werden.

Es wird zwischen aktiven und passiven Radarreflektoren unterschieden. Aktive Radarreflektoren werden als Transponder und passive als Corner-Reflektoren bezeichnet.

1.2.8.1 Passive Radarreflektoren (CR)

Die CR sind i. d. R. trihedrale (dreiseitige) Winkelreflektoren (Tripelspiegel), mit elektrisch leitenden Flächen, deren Seiten zueinander exakt im Winkel von 90° stehen. CR sind vergleichbar mit den Tripelprismen der elektro-optischen Entfernungsmessung, allerdings vom Material und der Größe her angepasst an den Mikrowellenbereich der Radarsensoren. Mit den CR wird die eintreffende Mikrowellenstrahlung über Zwei- oder Dreifachreflektion phasensynchron in jene Richtung reflektiert, aus der sie gesendet wurde (Abbildung 13).

Die Größe eines CR zur Bewegungserfassung richtet sich nach der Wellenlänge des Radarsensor-Bandes. Als Erfahrungswert sollte die Kantenlänge des CR etwa das 10-fache der Wellenlänge betragen, z. B. beim X-Band 30 cm und C-Band 60 cm.

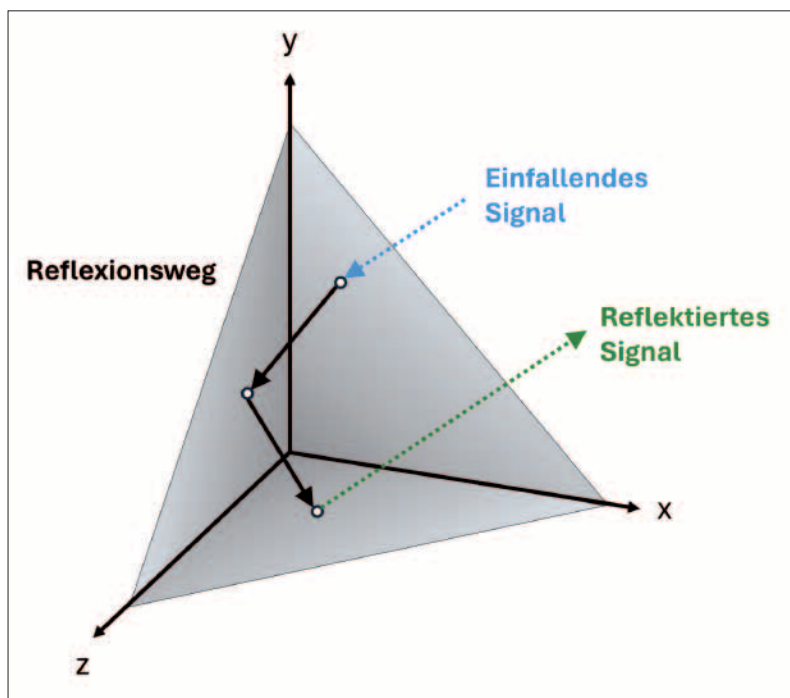


Abbildung 13: Phasensynchrone Dreifachreflektion bei einem trihedralen CR.

Bedingt durch die einfache Bauart, die Versorgungsfreiheit (kein Strombedarf) und den geringen Wartungsaufwand liefern diese CR auch eine gute Möglichkeit, in Gebieten mit schlechteren Rückstreuereigenschaften zusätzliche Messpunkte zu schaffen.

Je nach Anwendungszweck gibt es unterschiedliche Realisierungen der CR bezüglich der Bauform und -art, der Größe und des Materials. Zudem können sie als einzelner CR für eine Aufnahmegeometrie oder als Doppel-CR für die Erfassung der Signale aus den Ascending und Descending Orbits genutzt werden.

Form und Bauart

Die Form und die Bauart eines fest installierten CR sollen garantieren, dass er langlebig und wartungsarm ist sowie dauerhaft ein gleichbleibendes Rückstreusignal liefert.

Bei der Form von trihedralen CR ist es wichtig, dass alle Seiten streng senkrecht aufeinander stehen und die Flächen plan sind. Die Seiten bestehen meistens aus Dreiecken, Quadraten, Kreissektoren oder Fünfecken (Abbildung 14). Die Bauart kann universell sein, für den Einsatz verschiedener Satelliten und Orbits, oder speziell für einen Satelliten und dessen Orbit.

Als Material für CR werden witterungsbeständige und langlebige Materialien, wie z. B. Weißblech-, Aluminium- oder Stahlbleche, massiv oder gelocht, verwendet.

Die Wahl der Form, des Materials und der Konstruktion der CR richtet sich nach deren Zweck und Aufgabe sowie weiteren Anforderungen, wie z. B. Standort, Transportmöglichkeit, Witterungsbeständigkeit, Schutz gegen Zerstörung oder der geplanten Nutzungsdauer.

Mit den Jahren wird sich die Oberfläche der CR durch z. B. Verschmutzungen und Oxidation verändern, wodurch die Stärke des Rückstreusignals vermindert wird. Zum Schutz vor Verschmutzung können z. B. radardurchlässige Folien oder Kunststoffhauben verwendet werden (Abbildung 14D).

Standortwahl und Installation

Bei der Standortwahl für CR sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- Fester Aufstellort in Abhängigkeit von Geologie und Bodenbeschaffenheit
- Geschützter Aufstellort hinsichtlich Vandalismus, aber auch Windlast
- Sichtfreiheit zum Satelliten
- Ausreichender Abstand zu anderen reflektierenden Objekten zur Vermeidung von Signalüberlagerungen am CR.

Je nach Verwendungszweck (Referenz- oder Objektpunkt) können unterschiedliche Arten und Tiefen von Gründungen, Fundamente (ähnlich geodätischer Vermarkung) und Verbindungsstücke zum CR verwendet werden.

1.2.8.2 Doppel-CR und Multisensorstation

Doppel-CR ermöglichen, bei entsprechender Ausrichtung, die Rückstreuung von Radarsignalen aus Ascending und Descending Blickrichtungen (Abbildung 15). Abbildung 16 zeigt schematisch das Wirkprinzip eines sogenannten Doppel-CR für Satellitenaufnahmen aus der Ascending (aufsteigender Orbit) und Descending (absteigender Orbit) Blickrichtung (Kapitel 1.2.5). Bei Erweiterung eines Doppel-CR um einen GNSS-Empfänger etc. ergibt sich eine Multisensorstation (Abbildung 15, rechts). Bei Multisensorstationen (MSS) ist eine Stromversorgung notwendig. Über eine MSS können die Daten mehrerer Messsysteme miteinander verknüpft und verglichen werden (Kapitel 3.4).



A [© NRSC, ISRO]



B [© Commonwealth of Australia, (Geoscience Australia) 2021]



C [© TU Clausthal]



D [© TRE ALTAMIRA]

Abbildung 14: Bauformen von trihedralen CR mit Vierecksflächen (A), Dreiecksflächen (B), pentagonalen Flächen (C) und als Doppel-CR mit Kunststoffhaube (D).

1.2.8.3 Aktive Radarreflektoren

Aktive CR sind im eigentlichen Sinne keine Reflektoren, sondern Transponder, die einen Radarimpuls empfangen und einen Impuls auf der gleichen Frequenz zurücksenden. Sie sind derzeit nur für einen Orbit und ein Radar-Band einsetzbar (Abbildung 17, oben), so dass beispielsweise für den Ascending und den Descending Orbit eines C-Band-Satelliten zwei Transponder nötig sind (Abbildung 17, unten). Zum Betrieb von aktiven Transpondern ist eine Stromversorgung notwendig und eine Datenübertragung zu empfehlen.

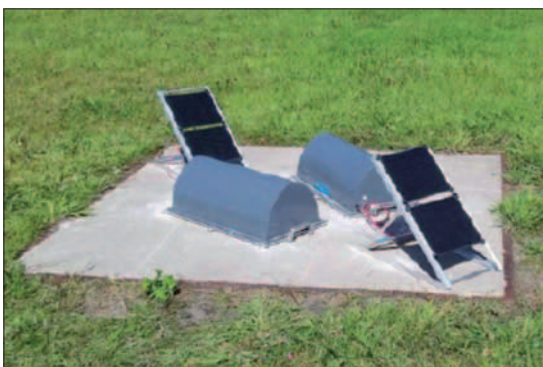


Abbildung 17: Radar-Transponder. Oben für einen Orbit (© RAG), unten ausgerichtet für Ascending und Descending Orbits (© TU Delft).



Abbildung 15: Doppel-CR mit Kunststoffhauben (links; © TRE ALTAMIRA) und Multisensorstation (rechts; © RAG, ALLSAT).

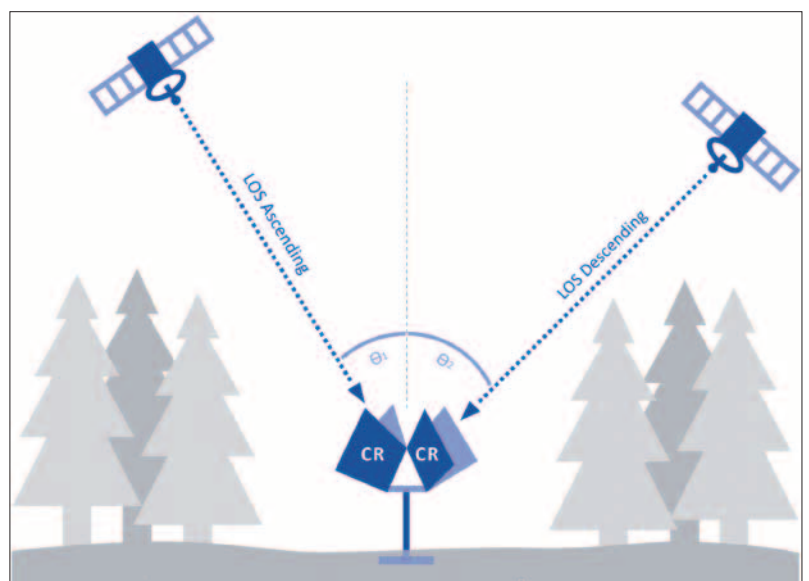


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Doppel-CR für Ascending und Descending Satellitenaufnahmen (LOS – Blickrichtung).

2 Kriterien zur Qualitätssicherung von InSAR-Messungen

2.1 Spezifikation der Aufgabenstellung

Bedingt durch die Komplexität des InSAR-Aufnahme- und Auswertverfahrens sowie des damit verbundenen Analyseaufwandes gilt es, verschiedene Faktoren in der Praxis zu berücksichtigen, die über die Qualität und Aussagekraft der abzuleitenden Bewegungsmesswerte entscheiden. Die Qualitätsanforderungen an ein InSAR-Ergebnis hängen von der jeweiligen Anwendung und dem Messobjekt (Überwachungsbereich) sowie deren Konkretisierung durch den Auftraggeber/Nutzer ab. Die Bandbreite von InSAR-Anwendungsfällen erstreckt sich zum einen von der hochauflösenden Einzelobjektüberwachung (Gebäude, Infrastrukturelemente) bis hin zur lokalen, regionalen und auch nationalen Erfassung von Bodenbewegungen. Zum anderen stellt sich die Frage, welche Art von Bewegungen in dem Untersuchungszeitraum stattfanden und/oder erfasst werden sollen. Sind sehr starke dynamische Bewegungen, auch mit veränderten Geschwindigkeiten, für ein Objekt an der Tagesoberfläche zu untersuchen oder weisen die zu erfassenden Bewegungen geringe Geschwindigkeiten auf? In der Praxis empfiehlt es sich, die Aufgabenbeschreibung vor Auswertebeginn durch folgende Punkte zu konkretisieren:

- Allgemeine Aufgabenstellung, d. h. Motivation und Ziel der InSAR-Messung, Beschreibung der Lage und räumlichen Ausdehnung des Überwachungsbereiches sowie Festlegung des Überwachungszeitraumes
- Angabe der zu erfassenden Bewegungen und ihre Parameter (Kapitel 1.1)
- Qualitätsanforderungen, wie z. B. räumliche und zeitliche Auflösung, innere und äußere Messgenauigkeiten
- Festlegungen zum Bezugssystem und ggf. Einbindung in Referenznetze (Kapitel 3.4)
- Angabe von stabilen Bereichen im Hinblick auf die Auswahl eines Referenzpunktes (Kapitel 1.2.7)
- Nennung von Besonderheiten, die für die Auswertung und Qualität der Messung von Bedeutung sind (z. B. hinsichtlich der Topographie, Tektonik, Landnutzung, räumlich-zeitliche Veränderungen durch Bauarbeiten, Überflutungsereignisse, Schneebedeckung etc.)

2.2 Anwendungsorientierte Qualitätsmerkmale

Die Qualität des Mess- und Auswerteprozesses (prozessbezogene Qualität) ist entscheidend für ein optimales Messergebnis. Dafür sind Kenntnisse zu den verfügbaren Radarsatelliten (Kapitel 1.2.4) und deren Aufnahmefähigkeiten (Messsystem/-instrument, Messprogramm und Programmierbarkeit, nomineller Wiederholzyklus, Aufnahmegeometrie etc.) sowie Unterschiede zwischen aktuellen Auswerteverfahren (Kapitel 1.2.6) notwendig. Die Beurteilung der Qualität des InSAR-Ergebnisses und der daraus abgeleiteten Produkte (produktbezogene Qualität) kann schließlich durch verschiedene Qualitätsmerkmale (Vollständig-

keit, Korrektheit, Genauigkeit etc.) und durch eine unabhängige Kontrolle der Ergebnisse erfolgen.

Nachfolgend wird zunächst auf die Qualitätsmerkmale der InSAR-Ergebnisse der radarinterferometrischen Auswertung eingegangen, die von den bereitgestellten Satellitendaten abhängig sind. Anschließend werden qualitätsrelevante Faktoren des Auswerteprozesses aufgelistet und teilweise näher erläutert.

2.2.1 Qualitätsmerkmale der InSAR-Ergebnisse

In Tabelle 1 sind einige grundlegende Zusammenhänge zwischen dem Messobjekt (Überwachungs-/Untersuchungsbereich) und dem zu verwendenden Radarsatelliten und dessen Aufnahmeeigenschaften zusammengefasst. Daraus lässt sich die Qualität der InSAR-Ergebnisse anhand verschiedener Qualitätsmerkmale bewerten. Eine im Sinne der Aufgabenstellung optimale InSAR-Messung zeichnet sich im Ergebnis dadurch aus, dass die zu erfassende Bewegung unabhängig von ihrer Größe, Richtung und ihrem zeitlichen Verlauf weitestgehend vollständig (räumlich und zeitlich), korrekt, präzise und zuverlässig bestimmt wird. Die Messung ist je nach Wahl des Sensors und dessen Aufnahmekonfiguration optimierbar. Im Folgenden wird daher exemplarisch auf einige in Tabelle 1 aufgeführte Zusammenhänge zwischen dem auszuwählenden Messsystem, welches die Datengrundlage liefert, und unterschiedliche Anwendungsfälle (Messobjekt) eingegangen. Am Ende von Tabelle 1 ist exemplarisch ein Lesebeispiel für die tabellarisch dargestellten Zusammenhänge zu finden. Auf die Grenzen der Anwendbarkeit, d. h. die Nichterfüllung von Qualitätsanforderungen entsprechend Tabelle 1, wird in Kapitel 2.3 näher eingegangen. Das Thema Messgenauigkeiten, als eines der unten genannten Qualitätsmerkmale, wird aufgrund der größeren Bedeutung für viele Anwender in Kapitel 3 separat und ausführlich behandelt.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der InSAR-Messungen haben neben der verwendeten Auswertalgorithmik die Radarsatelliten-Daten. Im Folgenden werden deshalb wesentliche Merkmale der nutzbaren Satellitensensoren und ihrer Aufnahmekonfiguration näher beschrieben. Die sich ergebenden Zusammenhänge sowie Empfehlungen zur Verwendung sind auch in Tabelle 1 zusammenfassend wiederzufinden und dienen ebenfalls dem Leseverständnis.

Radarsatellit und Aufnahmemodus

Radarsatelliten können in einem oder mehreren Aufnahmemodi mit unterschiedlicher Bodenabdeckung und -auflösung operieren. Zur Überwachung kleinräumiger Objekte (z. B. Gebäude, Infrastruktureinrichtungen) sowie kleinräumiger Bewegungsgebiete sind hochauflösende Sensoren und Aufnahmemodi empfehlenswert, um zum einen eine möglichst hohe Messpunktdichte zu erzielen, zum anderen, um unterschiedliche Bewegungen an benachbarten Messpunkten erfassen zu können. Radarsatelliten, die

Tabelle 1: Einflussparameter auf die Qualität eines InSAR-Ergebnisses.

Qualitätsmerkmal	Messobjekt-Eigenschaften	Messsystem-Eigenschaften	Auswirkungen auf das InSAR-Ergebnis
Räumliche Vollständigkeit	Geographische Lage & Größe des Überwachungsbereichs	Größe des Aufnahmestreifens, Szenengröße	Vollständigkeit der räumlichen Abdeckung
Hauptbewertungskriterien: Punktzahl, Punktdichte	Relative Lage & Größe benachbarter Einzelobjekte (z. B. Gebäude) im Überwachungsbereich	Räumliche Auflösung (abhängig vom Aufnahmemodus), Pixelgröße, Blick-/Einfallswinkel	Trennbarkeit und Sichtbarkeit von Einzelobjekten
	Zeitweise Vegetations- oder Schneebedeckung	Wellenlänge	Eindringtiefe bis zur Erdoberfläche; Signal- und Messwertverluste
	Rückstreuungseigenschaft, Objektraugigkeit	Blick-/Einfallswinkel, Wellenlänge, Polarisation	Stärke der Signalintensität und -kohärenz bestimmen Anzahl und Dichte der Messpunkte
	Hohe Bewegungsgeschwindigkeit	Wellenlänge, Wiederholzyklus	Messpunktverlust infolge der Limitierung der zeitlichen Phasenabwicklung aufgrund zeitlicher Dekorrelation
	Starke räumliche Bewegungsunterschiede (Bewegungsgradienten)	Wellenlänge, räumliche Auflösung, Wiederholzyklus	Messpunktverlust infolge der Limitierung bzgl. der maximal detektierbaren räumlichen Bewegungsgradienten
	Veränderungen der Oberflächenstruktur (z. B. Baumaßnahmen) im Untersuchungszeitraum		Signalverluste, die zum Wegfall von Messpunkten führen
Zeitliche Vollständigkeit/Verfügbarkeit		Missionsdauer eines Satelliten	Zeitlich beschränkte Nutzbarkeit, z. B. 1-20 Jahre
Hauptbewertungskriterien: Messzeitraum, Anzahl der Messwerte einer Zeitreihe		Verfügbarkeit historischer Aufnahmen	Erfassung von Bewegungen in der Vergangenheit
		Vom Satellitenbetreiber vorab festgelegter Aufnahmeplan	Messwerte zu den festgelegten Messzeitpunkten
		Keine oder eingeschränkte Programmierbarkeit des Sensors (inkl. Orbitauswahl)	Beschränkte Abdeckung des geplanten Messzeitraums
		Sensorausfälle (kurzzeitig, dauerhaft)	Unvollständige Messzeitreihen
	Kurzzeitige, saisonale Ereignisse, z. B. Schneebedeckung, Überflutung, Baumaßnahmen		Zeitweise oder vollständige Signalverluste bzw. starke Signalveränderungen, die zu zeitlichen Lücken in Messzeitreihen führen
Korrektheit	Topographische Situation (Gelände, Bauwerke etc.)	Blick-/Einfallswinkel	Lagefehler der Messpunkte infolge geometrischer Verzerrung (Layover, Foreshortening)
Hauptbewertungskriterien: Keine systematischen und groben Fehler		Räumliche Basislinien, Orbitfehler, topographische Phasenteile	Lage-/Geokodierungsfehler
	Große schnelle Bewegung	Wellenlänge, Wiederholzyklus	Zeitliche Phasenabwicklungsfehler; Limitierung der zeitlichen Erfassbarkeit der Bewegung
	Bodenfeuchte	Wellenlänge, zeitliche Basislinien	Systematische Verfälschung von Bewegungszeitreihen
	Höhenänderung, Ost-West-Horizontalbewegung	Blickwinkel der LOS-Messung (eindimensional)	Systematische Verfälschung der abgeleiteten Vertikal- bzw. Ost-West-Horizontalbewegung bei 1D-Transformation der LOS-Messwerte; bei Nutzung von Ascending und Descending LOS-Werten und 2D-Dekomposition, deutliche Verringerung der systematischen Fehler (Restfehler durch unbekannte Nord-Süd-Bewegungskomponente)
Sensitivität	Sehr kleine Bewegungen	Wellenlänge, Systemrauschen	Je kleiner die Wellenlänge, umso bessere Detektierbarkeit von kleinen Bewegungen
		Wiederholzyklus, (Beobachtungszeitraum)	Je mehr Aufnahmen pro Zeiteinheit verfügbar sind, umso bessere Detektierbarkeit von kleinen Bewegungen
	Räumliche Bewegungsunterschiede	Räumliche Auflösung, (Wellenlänge)	Je höher die Bodenaufklärung eines Sensors, umso besser ist die räumliche Differenzierung von Bewegungen
Genauigkeit	Topographische Unterschiede, Geländerauigkeit, Landnutzung	Anzahl der Aufnahmen (>20) im nominellen Wiederholzyklus, Aufnahmeflächen, nicht nutzbare Aufnahmen, räumliche und zeitliche Basislinien	Systematische Fehler und Standardabweichungen in Abhängigkeit des verwendeten Auswertalgorithmus und -prozesses (Kapitel 1.2.6)
	Atmosphärische Veränderungen (räumlich-zeitlich)		

Lesebeispiel: Die „Räumliche Vollständigkeit“ (1. Spalte, Qualitätsmerkmal) eines InSAR-Ergebnisses ist abhängig von der Charakteristik des Beobachtungsgebietes (2. Spalte, Messobjekt-Eigenschaften) zu den Zeitpunkten der Satellitenaufnahmen und den Eigenschaften des verwendeten Radarsensors bzw. deren Aufnahmekonfiguration (3. Spalte, Messsystem-Eigenschaften). Das Zusammenspiel von Sensor- und Objekteigenschaften wirkt sich auf die Qualität der InSAR-Messung (4. Spalte, Auswirkung auf das InSAR-Ergebnis) aus. Beispielsweise kann ein Untersuchungsgebiet nur vollständig mit der InSAR-Technik überwacht werden, wenn die verfügbaren Radarszenen groß genug sind, um das ausgewählte Gebiet räumlich und geographisch vollständig abzudecken. Treten sehr schnelle Bewegungen auf, die größer als ein Viertel der Sensor-Wellenlänge zwischen zwei Aufnahmen (abhängig vom Wiederholzyklus) sind, kommt es zu zeitlichen Signalverlusten (Dekorrelationen) und Phasenabwicklungsfehlern. Dies führt wiederum zur Nichtauswertbarkeit der interferometrischen Zeitreihen und zum Wegfall der Messpunkte.

Aufnahmemodi mit großen Schwadbreiten besitzen (Kapitel 1.2.4) und mit jedem Überflug große Gebiete abdecken können, eignen sich besonders für großflächige Monitoring-Aufgaben.

Die Wellenlänge eines Radarsensors bestimmt u. a. die Sensitivität gegenüber kleineren Bewegungen, aber auch die Erfassbarkeit größerer Bewegungen. Da aktuelle Radarsatelliten nur mit einer Trägerfrequenz arbeiten, können die Vorteile von langwelligen Radarsensoren (z. B. L-Band), wie z. B. die Erfassung größerer Bewegungen, nicht mit hoch-sensitiven Sensoren (X- und C-Band) zur Erfassung kleinerer Bewegungen auf einer Satellitenplattform kombiniert werden. Jedoch kann generell durch die Auswahl eines Radarsatelliten mit kleinem Wiederholzyklus die zeitliche Abtastung erhöht und damit auch die Erfassung von schnellen Bewegungen durch Sensoren mit kleinen Wellenlängen ermöglicht werden.

Anzahl der Radaraufnahmen

Da es sich bei der radarinterferometrischen Analyse um einen statistischen Auswerteprozess handelt, sind möglichst viele „Beobachtungen“ (Radaraufnahmen) im Untersuchungszeitraum zu nutzen, um die unbekannten Bewegungen präzise bestimmen zu können. Für die Erzielung hoher Genauigkeiten sind in der Regel mindestens 20-30 Aufnahmen im nominellen Wiederholzyklus des Satelliten notwendig. Die Verwendung von weniger Radaraufnahmen führt zu geringeren Genauigkeiten, da systematische Fehlereinflüsse (z. B. durch Atmosphäre, Topographie) nur eingeschränkt minimiert bzw. eliminiert werden können. Die Radaraufnahmen sollten kontinuierlich im nominellen Wiederholzyklus eines Satelliten erfolgen. Je kürzer der Wiederholzyklus ist, umso höhere Bewegungsgeschwindigkeiten können erfasst werden. Größere zeitliche Lücken von mehreren Wochen verhindern nicht nur die Messung von Bewegungen im nicht abgedeckten Zeitraum, sondern können, in Abhängigkeit vom Bodenbewegungsgeschehen, auch zu Fehlbestimmungen der Bodenbewegungen insgesamt führen. So können schnelle Bewegungen im Zeitraum größerer zeitlicher Lücken Phasenmehrdeutigkeiten (Unterabtastung von Zeitreihen) hervorrufen, die zu einer Über- oder Unterschätzung des gesamten, ermittelten Bewegungsverlaufes führen. Auf diesen Zusammenhang sollte der Auftragnehmer im Vorfeld einer Prozessierung den Auftraggeber hinweisen.

Mit wachsender Anzahl der Radaraufnahmen im Untersuchungszeitraum steigen bei Verwendung kommerzieller (kostenpflichtiger) Satellitendaten auch die Kosten für die Datenbeschaffung. Ferner können mit wachsender Anzahl der Radaraufnahmen auch die Kosten der InSAR-Prozessierung und Datenanalyse zunehmen. Da sich je nach Anwendungsfall mit einer Zunahme der Anzahl der Radaraufnahmen auch die Qualität der InSAR-Messungen verbessert, sollte, in Abhängigkeit von der Anwendung, eine Beratung durch den Auftragnehmer erfolgen, um eine anforderungsgerechte Abwägung zwischen der Qualität und den Kosten zu erreichen.

Aufnahmegeometrie und Einfallswinkel

Im Hinblick auf die geforderte Qualität der zu erfassenden Bodenbewegungen ist in Abhängigkeit des zeitlich-räumlichen Bewegungsverhaltens (Größe, Richtung, Geschwindigkeit etc.) die Eignung bzw. Optimierbarkeit der Aufnahmegeometrie (Blickrichtung, Einfallswinkel) zu prüfen. Wie in Kapitel 1.2.5 beschrieben, wird zwischen Ascending und Descending Orbits unterschieden. So sollte zum Beispiel zur Erfassung von Horizontalverschiebungen bei Hangrutschungen die Blickrichtung des Sensors in Bewegungsrichtung verlaufen. Generell ist zu bedenken, dass InSAR-Auswertungen von Ascending oder Descending Daten nur eindimensionale Messwerte in LOS liefern. Im 3D-Raum stattfindende reale Bewegungen können deshalb mit eindimensionalen LOS-Messungen nur teilweise und unter Annahmen bestimmt werden. Jedoch ist durch die Kombination von LOS-Messungen aus einem Ascending und Descending Orbit die Ableitung der vertikalen Bodenbewegungskomponente sowie der Ost-West-Horizontalbewegungskomponente möglich (Kapitel 1.2.5).

Die Einfallswinkel der Radarstrahlen an der Oberfläche bestimmen u. a. die Sensitivität eines Sensors gegenüber einer Bewegungsrichtung. Je kleiner (steiler) die Blick- bzw. Einfallswinkel (Abbildung 9) sind, umso höher ist die Sensitivität gegenüber (sehr kleinen) Vertikalbewegungen und umso geringer sind auch typische Abschattungen im Radarbild. Flachere (größere) Blickwinkel ermöglichen dagegen die Erfassung größerer Vertikalbewegungen, jedoch mit geringer Qualität, und erhöhen die Sensitivität bei der Ableitung von Horizontalverschiebungen in Ost-West-Richtung.

Die Aufnahmen in der Ascending und Descending Geometrie erfolgen nicht nur an unterschiedlichen Tagen, sondern auch zu unterschiedlichen Tageszeiten. Descending Szenen werden weltweit in den frühen Morgenstunden und die Ascending Szenen am späten Nachmittag/Abend aufgenommen. In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung und deren Anforderungen ist dies im Hinblick auf Atmosphäreneinflüsse, thermale Verformungen von Objekten infolge der Sonneneinstrahlung, oder die eingeschränkte freie Sicht auf Objekte z. B. durch hohes Verkehrsaufkommen im Bereich von Infrastruktureinrichtungen zu berücksichtigen, um mögliche Störeffekte zu vermeiden.

Zusammengefasst gilt, je kleiner der zu überwachende Bereich ist und je mehr Kenntnisse über das Überwachungsobjekt vorhanden sind (Bewegungsverhalten etc.), umso besser können Optimierungen hinsichtlich der Aufnahmekonfiguration (Bodenauflösung und -abdeckung, Wiederholrate, Wellenlänge, Blickwinkel) und der InSAR-Prozessierung erfolgen.

2.2.2 Qualitätsmerkmale des Auswerteprozesses

Grundsätzlich ist hinsichtlich der Gewährleistung hoch qualitativer InSAR-Ergebnisse für alle Auswerteschritte die Leistungsfähigkeit des Auftragnehmers und dessen Fachpersonals von Bedeutung:

- InSAR-Erfahrungen und Qualifikationen
- Fachgerechte Bedienung der Auswertesoftware
- Internes Qualitätsmanagement (ggf. ISO-zertifiziert)
- Anwendungsspezifische Analyseerfahrungen und -kompetenzen
- Ressourcen-Verfügbarkeit (Hard- und Software, Personal) über die gesamte Projektlaufzeit

Die Qualität der InSAR-Ergebnisse in LOS wird durch eine Vielzahl von einzelnen Prozessschritten beeinflusst. Zusammengefasst kann der interferometrische Auswerteprozess in folgende, nacheinander auszuführende Schritte unterteilt werden:

1. Beschaffung und Prüfung der Satellitendaten
2. InSAR-Prozessierung
3. Qualitätssicherung der InSAR-Ergebnisse in LOS
4. Optional:

Ableitung der Bodenbewegungskomponenten (2D-Dekomposition, Kapitel 1.2.5 und 3.3),

Validierung (Vergleich mit terrestrischen Messergebnissen, Kapitel 3),

Kalibrierung (Einbindung in Referenznetze, Kapitel 3.4)

Beschaffung und Prüfung der Satellitendaten

Die Beschaffung von SAR-Daten, die für interferometrische Analysen geeignet sind, erfordert Kenntnisse über die Zugangsportale, aber auch die Aufnahmeparameter sowie Datenformate etc. der in Katalogen verfügbaren Archivdaten. Um Daten vor der Aufnahme (Neuaufnahmen) in einer bestimmten Aufnahmekonfiguration zu bestellen, sind weiterführende Kenntnisse notwendig. Aus den genannten Gründen erfolgt die Satellitendatenbeschaffung für gewöhnlich über den Auftragnehmer, der die Daten entweder über frei zugängliche Datenportale abrufen oder über einen Satellitenbetreiber bzw. Datenprovider käuflich erwirbt. Zur Beschleunigung des Datenbeschaffungsprozesses bei zeitkritischen Überwachungsaufgaben sind Schnittstellen zu Satellitendaten-Providern von Vorteil. Der Auftragnehmer prüft die bereitgestellten SAR-Daten auf Vollständigkeit und Korrektheit.

InSAR-Prozessierung

Die Qualität der InSAR-Prozessierung und deren Ergebnisse wird neben der o. g. Leistungsfähigkeit des Anbieters hauptsächlich durch die Leistungsfähigkeit der verwendeten InSAR-Software, aber auch der verfügbaren Hardware beeinflusst. Folgende Punkte beeinflussen die Qualität der InSAR-Prozessierung:

- Auswertelgorithmus und Auswertesoftware (Version, Zertifikate etc.)
- Auswertung von PS oder gemeinsam mit DS
- Prüfung der verwendeten Szenen hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit
- Korrekte Durchführung aller relevanten Prozessierungsschritte (z. B. Reduzierung von Atmosphäreinflüssen) und Berücksichtigung nichtlinearer Bewegungen bei der Phasenabwicklung

- Fehleranfälligkeit und Fehlerbehebung, Integration lernbasierter Verfahren

Die Unterscheidungsmerkmale der verschiedenen existierenden Auswertelgorithmen sind in Kapitel 1.2.6 zusammengefasst und können im Detail bei dem Auftragnehmer abgefragt werden.

Qualitätssicherung

Entscheidend für die Bereitstellung von hoch qualitativen Ergebnissen an den Auftraggeber ist die Durchführung von verschiedenen Qualitäts- und Plausibilitätsanalysen und Datenbereinigungsschritten, um die Richtigkeit der abgeleiteten Ergebnisse zu gewährleisten. Ein Auftragnehmer verpflichtet sich, bei Nachfrage des Auftraggebers, alle Schritte der Qualitätssicherung (Kapitel 3) detailliert im Sinne der Aufgabenstellung zu erläutern. Typische quantitative Qualitätsmerkmale umfassen u. a. Richtigkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Eine Überprüfung der Richtigkeit der InSAR-Messwerte kann mittels unabhängiger Messdaten, die vom Auftraggeber bereitgestellt werden, vereinbart und vom Anbieter oder Auftraggeber durchgeführt werden (äußere Genauigkeit, Kapitel 3.2).

2.3 Grenzen der Anwendbarkeit

Wie jedes Messverfahren weist auch das InSAR-Messverfahren Grenzen hinsichtlich der Anwendbarkeit bei der Erfassung von Boden-/Objektbewegungen auf. Die hauptsächliche Anwendungsbeschränkung des InSAR-Messverfahrens liegt in der nicht flächendeckenden Verfügbarkeit von Messpunkten, z. B. infolge der Landnutzung und der Charakteristik der Bodenbewegung. Die meisten Einschränkungen sind vor allem anwendungsspezifisch und sollten für jedes Überwachungsgebiet bereits im Vorfeld einer Messung, d. h. vor Auswahl eines geeigneten Aufnahmesensors und dessen Aufnahmekonfiguration, diskutiert werden. Einige Limitierungen können durch eine Optimierung der Aufnahmekonfiguration (z. B. Sensor, Modus, Blickwinkel, Wiederholzyklus) und Wahl des am besten geeigneten Auswerteverfahrens reduziert werden (Kapitel 2.2.1).

Anwendungsspezifische Einschränkungen des InSAR-Messverfahrens nehmen durch folgende Faktoren, in Bezug auf die Charakteristik des Überwachungsgebietes und der zu beobachtenden Bewegungen, generell zu:

- Sehr geringe oder sehr hohe Bewegungsgeschwindigkeiten (Tabelle 2)
- Sehr geringe oder sehr hohe räumliche Bewegungsgradienten (Tabelle 2)
- Abrupte Bewegungen
- Bewegungsrichtung quer zur jeweiligen Blickrichtung (d. h. Bewegungen in Nord-Süd-Richtung)
- Bodenbedeckung (Vegetation, Schnee, Wasser / Überflutung, Objekte mit geringer Signalarückstreuung)
- Topographische Gegebenheiten, die z. B. zur Abschattung führen

Die Stärke und Richtung einer Bewegung und ihre zeitlich-räumliche Veränderung (Komplexität des Be-

wegungsprozesses) können zu Einschränkungen der Anwendbarkeit der Radarinterferometrie führen. In Abhängigkeit von der Bodenauflösung, Wellenlänge, und Wiederholrate eines Satelliten führen schnelle oder abrupte Bewegungen unter Umständen zu Messpunktverlusten und Phasenabwicklungsfehlern. Die Grenzwerte der minimal und maximal erfassbaren LOS-Bewegungen sind vorrangig durch die Wahl des Sensors gegeben, jedoch auch vom interferometrischen Auswerteverfahren abhängig. Tabelle 2 gibt exemplarisch die theoretischen Grenzwerte der zeitlichen Bewegungserfassung (maximale zeitliche Phasenverschiebung an einem Messpunkt) und der räumlichen Bewegungserfassung (maximale Phasenfeldänderung zwischen zwei Messpixeln) basierend auf den Sensoreigenschaften an.

Wie bereits in Kapitel 1.2.5 erläutert, ist die Erfassung aller 3D-Bewegungskomponenten aus einer LOS-Messung nicht möglich. Diese wesentliche Einschränkung lässt sich durch die 2D-Dekomposition von LOS-Messungen in Ascending und Descending Blickrichtung reduzieren. So ist durch Kombination von Ascending und Descending Ergebnissen anhand der aktuell verfügbaren Satelliten die Ableitung von vertikalen und Ost-West-horizontalen Bewegungen möglich, jedoch nicht der Nord-Süd-Horizontalbewegungen. Durch Vernachlässigung möglicher realer Nord-Süd-Bewegungen treten systematische Fehler in den beiden abgeleiteten Bewegungskomponenten in Abhängigkeit der Aufnahmegeometrie auf, die jedoch durch Verwendung von Modellen quantifiziert angegeben werden können.

Eine Einschränkung der Anwendbarkeit von X- und C-Band Sensoren entsteht durch Vegetationsbedeckung infolge einer geringen Eindringtiefe der Radarstrahlung. Je größer der Flächenanteil der Vegetation ist, umso geringer ist die Anzahl der ableitbaren Messpunkte in dem Untersuchungsgebiet. Für die Messbarkeit von Bewegungen hat ebenso die Topographie Einfluss. Radartypische Effekte, wie Abschattung und geometrische Verzerrung, können und müssen im Vorfeld berücksichtigt werden. Bei der Überwachung von Hängen und Böschungen ist die Bewegungsrichtung entscheidend. In Regionen mit Schneebedeckung über längere Perioden können SAR-Daten temporär unbrauchbar sein und zu größeren Datenlücken sowie systematischen Fehlern in den Zeitreihen führen.

Bedingt durch Verzögerungen bei der Datenbereitstellung, u. a. durch die begrenzten Downlink-Kapazitäten der Satelliten, die InSAR-Prozessierung und Ergebnisaufbereitung eignet sich InSAR nach aktuellem

Stand nicht für „Real Time“ oder „Near Real Time“ Überwachungsaufgaben.

3 Messgenauigkeiten

Genauigkeitsangaben zu InSAR-Messungen können unterschieden werden in die Lage- und Höhengenaugkeit der Messpunkte (3D-Koordinate), sowie die Genauigkeit der Messwerte und die Genauigkeit der abgeleiteten Bewegungskomponenten. Die Lage- und Höhengenaugkeit der satellitengestützten InSAR-Messpunkte liegt im Meter-Bereich. Die InSAR-Analyse von Radardaten erlaubt unter Einhaltung bestimmter Aufnahmebedingungen (Kapitel 2.2.1) die Messung von Bewegungen an der für Radarsensoren sichtbaren Erdoberfläche mit Genauigkeiten im Millimeter-Bereich.

3.1 Lage- und Höhengenaugkeit der Messpunkte

Die Lagegenauigkeit eines jeden Messpunktes ist von dessen Radarbild-Koordinate (Range, Azimut) und dessen Höhe, die bei der InSAR-Analyse z. B. über ein zugrundeliegendes Digitales Höhenmodell (DEM) ermittelt und (neu) geschätzt wird, abhängig. Es wird empfohlen, hierfür ein radarinterferometrisch abgeleitetes Oberflächenmodell zu nutzen, z. B. das Copernicus DEM. Je höher die Bodenauflösung des verwendeten Satellitensensors und die Bodenauflösung/Güte, Aktualität und Ähnlichkeit des DEM mit der Rückstreuoberfläche, desto besser ist die Lagegenauigkeit der InSAR-Messpunkte. Die Genauigkeit der Höhe eines Messpunktes ist im Wesentlichen von der Größe und Verteilung der räumlichen Basislinien (Abstand der Satellitenpositionen im Orbit) eines InSAR-Datensatzes sowie der Genauigkeit und Vollständigkeit des verwendeten DEM abhängig.

Die relative Lagegenauigkeit der Messpunkte liegt generell in der Größenordnung von mehreren Metern in Abhängigkeit vom Sensor und dessen Bodenauflösung, der Genauigkeit der Höhenschätzung, der Distanz zum Referenzpunkt (Kapitel 1.2.7) und der Anzahl der verwendeten Radaraufnahmen. In Tabelle 3 sind typische Genauigkeitswerte für die Lage und Höhe eines Messpunktes für ausgewählte Satelliten und Aufnahmemodi angegeben. Die Präzision der Höhe wird in der InSAR-Praxis für jeden Messpunkt anhand der einfachen Standardabweichung in Metern angegeben und ist wesentlich zur Beurteilung der Präzision des Rechts-/Ostwertes. Die Präzision des Hoch-/Nordwertes ergibt sich hauptsächlich durch die Auflösung in Flugrichtung (Azimut).

Tabelle 2:
Maximal erfassbare
LOS-Bewegungen
(zeitlich und
räumlich) in
Abhängigkeit
der Sensor-
eigenschaften.

Satellit Eigenschaften	Bewegung pro Zeitintervall [mm/Zyklus]	Räumlicher Bewegungsunterschied [mm/m] *
TerraSAR-X Wiederholzyklus: 11 Tage Range Pixel: 0.45 – 1.36 m	8	16 - 31
Sentinel-1 Wiederholzyklus: 6-12 Tage Range Pixel: 2.3 m	14	8 - 11

* In Abhängigkeit vom Aufnahmemodus

Tabelle 3: Typische Präzisionswerte (1 Sigma) für die UTM-Koordinaten eines Messpunktes in mittleren Breiten mit einer Entfernung kleiner als 1 km vom Referenzpunkt und einem Datensatz von mindestens 30 Radaraufnahmen. Quelle: TRE ALTAMIRA.

	C-Band Sentinel-1 IW Modus	X-Band TerraSAR-X SM Modus
Rechts-/Ostwert	12 m	3 m
Hoch-/Nordwert	8 m	1 m
Höhe	8 m	1,5 m

Da alle InSAR-Messungen sich jeweils auf einen Referenzpunkt beziehen (Kapitel 1.2.7), ist die absolute Lagegenauigkeit der Messpunkte von der Lage des gewählten Referenzpunktes abhängig. Zur Überprüfung der absoluten Lage des Referenzpunktes sowie der Messpunkte, um u. a. systematische Lageverschiebungen zu erfassen, können, wenn die Vergleichbarkeit gegeben ist, unabhängige terrestrischen Messungen in dem zugrundeliegenden geodätischen Raumbezugssystem genutzt werden (Kapitel 3.4).

Zur Sicherstellung der Qualität der Messpunktlage sind generell Plausibilitäts- und Qualitätskontrollen durchzuführen und zu dokumentieren (Absatz „Qualitätssicherung“ in Kapitel 2.2.2). Messpunkte mit grobem Lage-/Höhenfehler, z. B. aufgrund von Amplitudenmehrdeutigkeiten infolge von Mehrfachreflexionen, können durch geeignete automatisierte Verfahren und visuelle Kontrollen detektiert und entfernt werden.

3.2 Genauigkeit der Messwerte

Für InSAR-Messungen werden in der Praxis eine Reihe von Qualitätsindikatoren verwendet, die sich in ihrer Quantität und Aussagekraft unterscheiden (van Leijen 2014, S. 112ff). Dabei ist zu beachten, dass bislang keine verbindlichen, einheitlichen Begrifflichkeiten im englisch- und deutschsprachigen Raum vorliegen!

Zur Beurteilung der Qualität von InSAR-Messungen können Genauigkeitsmaße aus der Ingenieurvermessung empfohlen werden, die in der Maßeinheit [mm] angegeben werden. Metrische Angaben erleichtern im Vergleich zu bestimmten Faktoren (z. B. Kohärenzschätzer) die Interpretation der Ergebnisse.

Im Folgenden werden Maße für die Präzision (innere Messgenauigkeit) vorgestellt, die sich für InSAR-Messungen in der Praxis bewährt haben und deren Verwendung empfohlen wird.

- Die Standardabweichung der Messwerte (Kapitel 1.2.3.1), σ_0 (Sigma Null) [mm], ist definiert als die einfache Standardabweichung, abgeleitet aus den Residuen zwischen einem funktionalen Bewegungsmodell und den Messwerten. Sie ist ein quantitatives Maß für die Präzision und beschreibt die Streuung der Messwerte gegenüber dem funktionalen Bewegungsmodell. Bei vollständiger funktionaler Beschreibung der InSAR-Zeitreihe ergibt sich σ_0 aus dem Phasenrauschen (zufällige Abweichungen), in Abhängigkeit vom Aufnahmesensor und den Aufnahmebedingungen, sowie den unvollständig korrigierten Phaseneinflüssen und -abwicklungsfehlern (systematische Abweichungen).

Die erzielbare Standardabweichung der Messwerte in LOS liegt bei Verwendung aktueller SAR-Satelliten (Kapitel 1.2.4) in einer Größenordnung von kleiner als 5 mm.

- Die Standardabweichung der Geschwindigkeit, σ_{x1} (Sigma x1) [mm/Jahr], beschreibt die Unsicherheit des ermittelten linearen Bewegungstrends (Bewegungsrate). Sie ist ein Maß für die Streuung der InSAR-Messwerte um eine Regressionsgerade und spiegelt die Nichtlinearität des zeitlichen Bewegungsverlaufes sowie das Rauschen der Zeitreihe wider. Sie ist abhängig von der Länge des Aufnahmezeitraums, der Anzahl der Aufnahmezeitpunkte und dem Abstand des Messpunktes vom Referenzpunkt (Kapitel 1.2.7). Die erzielbare Standardabweichung der Geschwindigkeit liegt bei Verwendung aktueller SAR-Satelliten (Kapitel 1.2.4) und der Einhaltung bestimmter Aufnahmekriterien (> 30 Aufnahmen, Beobachtungszeit > 2 Jahre, Abstand zum Referenzpunkt < 1 km) sowie einem überwiegend linearen Bewegungsverlauf in einer Größenordnung von etwa 1 mm/a.

Bei der Angabe weiterer Zeitreihenparameter (Kapitel 1.2.3.2) ist auch deren Genauigkeit (einfache Standardabweichung) und Maßeinheit mit anzugeben.

Die äußere Messgenauigkeit der InSAR-Messungen, d. h. Richtigkeit der Messwerte in LOS, kann durch einen Vergleich mit anderen Messverfahren nach Umrechnung in LOS bestimmt werden. Durch den Vergleich mit Messwerten anderer Messverfahren werden systematische Messabweichungen erkennbar. Bei InSAR-Messungen ist die Erzeugung von Vergleichsbedingungen zur Ermittlung der äußeren Messgenauigkeit nur eingeschränkt möglich. In Tabelle 4 sind die Besonderheiten des InSAR-Messverfahrens aufgeführt, die bei der Ableitung von Genauigkeiten besonders zu beachten sind. Zusätzlich werden Möglichkeiten zur Erfüllung von Vergleichsbedingungen vorgeschlagen. Die Nutzung von Multisensorstationen (Kapitel 3.4), wie z. B. die „Integrierte geodätische Referenzstation“ von Hanssen et al. (2018) mit einem Radarreflektor und integrierter GNSS-Antenne, erfüllt die Anforderungen zur Genauigkeitsbestimmung.

Zur Sicherstellung der Qualität der Messwerte sind generell Plausibilitäts- und Qualitätskontrollmessungen durchzuführen und zu dokumentieren (Absatz „Qualitätssicherung“ in Kapitel 2.2.2). Die Messwerte und der Messwertverlauf innerhalb einer Zeitreihe sind automatisiert und visuell auf grobe Messfehler, z. B. Phasenabwicklungsfehler, zu prüfen. Die angewendeten Prüfverfahren und die mit ihnen erzielten Ergebnisse sind zu dokumentieren.

Tabelle 4: Besonderheiten bei der Bestimmung der äußeren Genauigkeit von InSAR-Messungen.

Vergleichsbedingung	Verfahrensspezifische Besonderheiten von InSAR	Möglichkeiten zur Genauigkeitsbestimmung unter Vergleichsbedingungen
Messpunkt	Ein InSAR-Messpunkt ist keinem physikalischen Punkt in der Realität eindeutig zuordenbar und somit nicht durch geodätische, terrestrische Messverfahren messbar, mit Ausnahme von Radarreflektoren bzw. MSSt	Nutzung von Radarreflektoren bzw. MSSt oder anderen Objekten, deren Phasenzentrum bekannt ist.
Messwert	InSAR liefert eindimensionale Messwerte in LOS-Richtung.	Nutzung von ergänzenden 3D-Messverfahren (z. B. GNSS) und Transformation ihrer Messwerte in LOS-Bewegungsvektoren.
Messzeitpunkt	Die Wiederholungsrate von InSAR-Messungen beträgt mehrere Tage. Die Aufnahmen aus einem Orbit finden immer zur gleichen Tageszeit (UTC) statt.	Nutzung von möglichst kontinuierlichen Messverfahren, mit vergleichbaren Aufnahmezeitpunkten.

3.3 Genauigkeit der abgeleiteten Bewegungskomponenten

Zur Ermittlung der Unsicherheit der abgeleiteten Bewegungskomponenten (Kapitel 1.2.3.2) sind die Standardabweichungen der LOS-Messwerte, die Orientierung des Bezugsrahmens und (wenn möglich) dessen Abweichung von der realen Bewegungsrichtung sowie die Stärke der Bewegung zu berücksichtigen. Bei Anwendung einer 2D-Dekomposition können aufgrund des Varianzfortpflanzungsgesetzes die Standardabweichungen der Ost-West-Horizontalbewegungskomponente und der vertikalen Bewegungskomponente unterschiedlich sein.

Als Genauigkeitswerte für die abgeleiteten Komponenten eines Bewegungsmodells sind die empfohlenen Präzisionswerte analog zu Kapitel 3.2 zu verwenden.

Die Richtigkeit der abgeleiteten Bewegungskomponenten der Dekomposition ist mit vergleichbaren Ergebnissen unabhängiger Messverfahren zu prüfen. Bei einem Vergleich unabhängig ermittelter Werte für die Bewegungskomponenten ist zu beachten, dass die für die Dekomposition verwendeten Gitterelemente, Rasterzellen oder Bereiche ähnlicher Bewegung die Lage der resultierenden Pseudo-Messpunkte beeinflussen. Bei Anwendung einer 2D-Dekomposition führt das Fehlen der dritten unabhängigen Aufnahmegeometrie (Unterbestimmung) zu systematischen Abweichungen bei den abgeleiteten Bewegungskomponenten, je nach Lage des Pseudo-Messpunktes zum Gebiet des Bodenbewegungsgeschehens.

Generell ist zu beachten, dass auch die abgeleiteten Bewegungskomponenten der Dekomposition Fehler enthalten können. Sie lassen sich unterteilen in:

- Zufällige Fehler (Abweichungen), die durch Varianzfortpflanzung des Messrauschens sowie ungenügend korrigierte atmosphärische Einflüsse in den originären LOS-Messungen entstehen.
- Systematische Fehler, die durch systematische Fehler in den LOS-Messwerten und Bewegungen der Referenzpunkte sowie durch die Unterbestimmung bei der Dekomposition hervorgerufen werden.
- Grobe Fehler, die durch unentdeckte und unkorrigierte Phasenabwicklungsfehler (Kapitel 3.3) in den originären LOS-Messungen hervorgerufen werden.

Im Hinblick auf die Erfüllung der Anforderungen an Vermessungsarbeiten sind die benutzten Verfahren

zur Aufdeckung und Behebung systematischer und grober Fehler zu erläutern und die Ergebnisse bzw. resultierenden Verfahrensschritte anzugeben. Durchgeführte Qualitäts- und Plausibilitätskontrollen und ihre Ergebnisse sind zu dokumentieren. Die abschließende Angabe von Genauigkeitsmaßen ist nur aussagekräftig, wenn zuvor eine Fehlerreduktion und -bereinigung erfolgt ist.

3.4 Verknüpfung von Messdaten über Multisensorstationen

Über eine Multisensorstation (MSSt) können die Daten mehrerer Messsysteme miteinander verknüpft und verglichen werden (siehe z. B. Spreckels & Engel 2022). So kann ein einzelner CR oder Doppel-CR mit einer GNSS-Station, ein oder mehreren Messpunkten zum Anschluss an ein Höhen- und/oder Überwachungsnetz sowie weiterer Sensorik ausgestattet werden. Zweck der MSSt ist es, terrestrische und satellitengeodätische Messungen mit InSAR-Messungen über eindeutig identifizierbare und identische Messpunkte zu verknüpfen. Sie können somit auch als Referenzpunkte und/oder zur Einbindung von InSAR-Messungen in Referenznetze, z. B. übergeordnete Netze der Landesvermessung, genutzt werden. Zur Einbindung der InSAR-Ergebnisse über MSSt in Referenznetze ist eine geeignete räumliche Verteilung der MSSt im Überwachungsbereich sowie eine ausreichende Anzahl an installierten MSSt in Abhängigkeit der Gebietsgröße notwendig.

Zusätzlich können diese MSSt auch zur Validierung von InSAR-Messungen genutzt werden. Für die Validierung von InSAR-Messungen aus jeweils einem Orbit (LOS, 1D) sind 3D-Messungen (z. B. GNSS) notwendig. Durch eine Transformation der 3D-Messungen in die LOS-Aufnahmegeometrie werden, gemäß Kapitel 3.2, die Vergleichsbedingungen zur Genauigkeitsbestimmung eingehalten. Werden durch eine 2D-Dekomposition vertikale und horizontale Verschiebungswerte in Ost-West-Richtung abgeleitet, können diese mit den abgeleiteten Bewegungswerten einer zeitgleichen terrestrischen Höhenmessung bzw. Lagemessung in Ost-West-Richtung, unter Berücksichtigung der vernachlässigten Nord-Süd-Bewegungskomponente (Kapitel 3.3), verglichen werden (Abbildung 18).

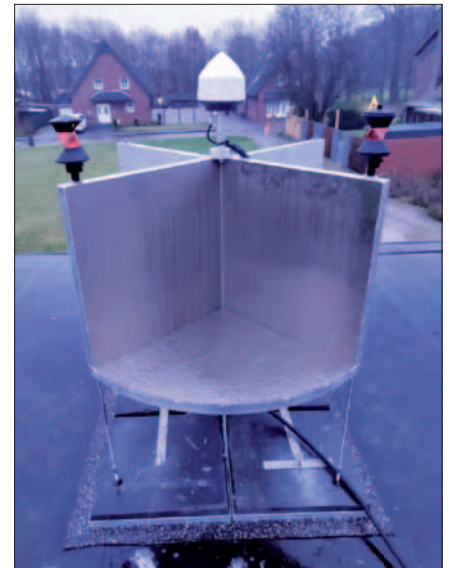
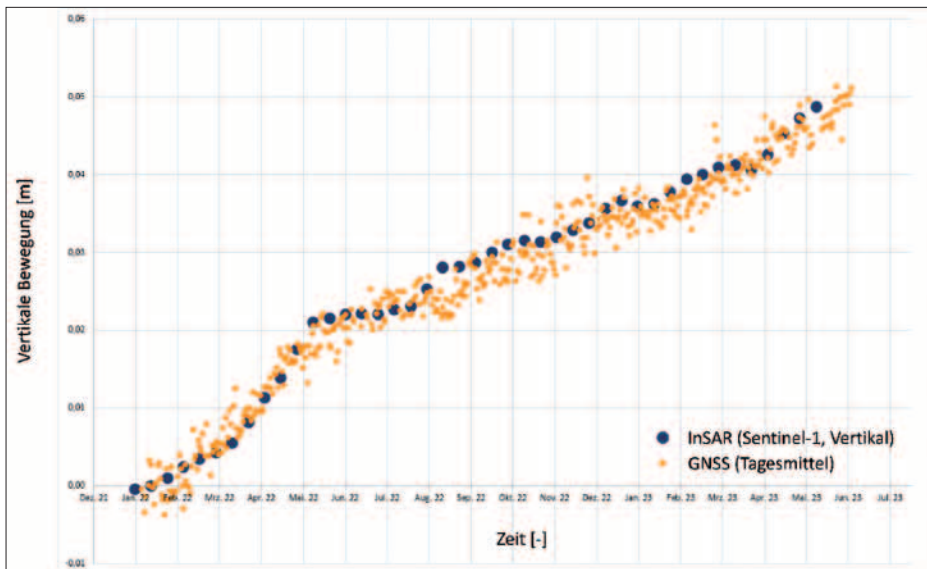


Abbildung 18: Höhenänderungen einer Multisensorstation, abgeleitet aus Sentinel-1 Ascending/Descending Messungen (blau) und gemessen durch eine permanent registrierende GNSS-Station (orange) [©RAG, ALLSAT, SkyGeo].

4 Dokumentation

Für die Erfüllung von marktscheiderischen und sonstigen vermessungstechnischen Arbeiten nach § 1 Nr. 1 MarkschBergV dürfen gemäß § 8 Absatz 1 MarkschBergV Ergebnisse und Auswertungen von amtlichen und nichtamtlichen bzw. nach § 8 Absatz 3 MarkschBergV von fachkundigen Stellen übernommen werden. Diese Unterlagen sind gemäß § 8 Absatz 4 MarkschBergV auf Plausibilität zu prüfen und als solche zu kennzeichnen.

Um diese Plausibilitätsprüfung der radarinterferometrischen Auswertungen durchführen zu können, sind im Rahmen der Auswertung seitens des Auftragnehmers verschiedene Aspekte zu dokumentieren und mit den Ergebnissen zu übergeben.

Die Dokumentation der InSAR-Ergebnisse muss insbesondere folgende Punkte enthalten:

1. Grundlegende Projektinformationen

- Aufgabenstellung mit Qualitätsanforderungen
- Überwachungs-/Untersuchungsbereich
- Betrachtungszeitraum
- Festlegungen zum Raumbezugssystem
- Namen der Ausführenden und der Kontrollierenden, Firmenname
- Auflistung der für die Auswertung genutzten Daten und Unterlagen, deren Herkunft sowie Nutzungsrechte

2. Angaben zu den verwendeten Satellitendaten (SAR-Szenen)

- Name, Aufnahmemodus, Bodenauflösung, Wellenlänge und Wiederholrate des Satelliten
- Parameter der Aufnahmegeometrie (z. B. Blickrichtung und -winkel)
- Angabe und Begründung von zeitlichen Lücken im Satellitendatensatz
- Liste der verwendeten und nicht verwendeten Satellitenszenen mit Aufnahmedatum und Uhrzeit sowie Begründung bei Nichtnutzung von Szenen

- InSAR-relevante Aufnahmebedingungen (Vegetation, Schnee etc.)
- Datum der gewählten Referenzszenen(n) mit Begründung der Auswahl

3. Angaben zum Referenzpunkt (Kapitel 1.2.7)

- Lagebeschreibung
- Angaben über die Lage- und Höhenstabilität im Umfeld des Referenzpunktes und im Beobachtungszeitraum
- Hinweise auf Veränderungen des Referenzpunktes gegenüber InSAR-Vormessungen

4. Eigenschaften des verwendeten Digitalen Höhenmodells (bspw. Produkttyp, Aktualität, Bodenauflösung, Genauigkeit)

5. Auswertemethodik

- Verwendetes interferometrisches Auswerteverfahren mit Verarbeitungsschritten (Kapitel 1.2.6 und 2.2.2)
- Erläuterung der angewendeten 2D-Dekomposition (Kapitel 1.2.5)
- Erläuterung der Ableitung von Zeitreihenparametern (Kapitel 1.2.3.2)

6. Angewendete Verfahren und Ergebnisse der Qualitätssicherung und Plausibilitätskontrollen zur Ermittlung und Elimination systematischer und grober Fehler sowie zur Prüfung der Vollständigkeit und Richtigkeit (Kapitel 2.2)

- bspw. Phasenabwicklungsfehler, Atmosphärenkorrektur, Ausreißersuche
- sofern erforderlich: Validierung mit unabhängigen Messverfahren (z. B. Nivellement, GNSS-Messungen) und Angaben zur äußeren Genauigkeit
- ggf. Nutzung von CR

7. Einbindung in Referenznetze (Kapitel 3.4)

- Informationen zu den verwendeten Referenznetzdaten
- Beschreibung der Prozessschritte der Einbindung

8. Angaben für jeden Messpunkt

- Messpunkttyp (PS oder DS)
- Koordinaten der Lage und Höhe unter Angabe des verwendeten Raumbezugssystems
- Lage- und Höhengenaugigkeit (Kapitel 3.1)
- Messwerte der Verschiebung in LOS und/oder abgeleitete Messwerte der 2D-Dekomposition
- Abgeleitete Zeitreihenparameter (z. B. Geschwindigkeit, Beschleunigung) (Kapitel 1.2.3.2)
- Innere Genauigkeit der Messwerte und Zeitreihenparameter (Kapitel 3.2 und 3.3)

5 Zusammenfassung des Bearbeitungsablaufs

Die Bearbeitung eines radarinterferometrischen Projektes lässt sich in fünf Phasen untergliedern (vgl. Tabelle 5):

Unterkapitel	Phase	Beteiligte
5.1	Vorbereitung	Auftraggeber
5.2	Ausschreibung und Auftragsvergabe	Auftraggeber / Auftragnehmer
5.3	Externe Bearbeitung	Auftragnehmer
5.4	Kontrolle und Ergebnisaufbereitung	Auftraggeber / Auftragnehmer
5.5	Interne Dokumentation	Auftraggeber

Tabelle 5: Phasen eines radarinterferometrischen Projekts

In den folgenden Unterkapiteln sind die für die o. g. Phasen wichtigsten, relevanten Themen bzw. Fragestellungen aufgeführt, welche für den Auftraggeber eines radarinterferometrischen Projektes von Bedeutung sein können. Soweit sinnvoll sind diese mit Verweisen auf den Text (Kapitelnummer) versehen.

5.1 Vorbereitung (Auftraggeber)

Zur Definition eines konkreten Projektes, zur Vorbereitung der Ausschreibung und zur Durchführung sollten folgende Informationen beschafft bzw. Sachverhalte im Vorfeld geklärt werden (vgl. Tabelle 6). Auf der Grundlage dieser Informationen lassen sich dann die richtigen Anforderungen ableiten, die an das durchführende Unternehmen (Auftragnehmer) zu stellen sind.

5.2 Ausschreibung und Auftragsvergabe (Auftraggeber / Auftragnehmer)

Auf Basis der Ergebnisse aus der Vorbereitungsphase sollten vor einer Auftragserteilung mit einem potenziellen Auftragnehmer die folgenden Fragen / Themen abgeklärt werden. Ziel ist aus Sicht von Auftraggeber und -nehmer eine projektbezogene, maßgeschneiderte Dienstleistung (Betreuung, Berichtswesen) (vgl. Tabelle 7).

5.3 Externe Bearbeitungsphase (Auftragnehmer)

Im beiderseitigen Einvernehmen zwischen Auftragnehmer und -geber sind nicht nur technische Rahmenbedingungen oder Vorgaben zu klären, sondern auch organisatorische Aspekte abzustimmen (vgl. Tabelle 8).

5.4 Kontrolle und Ergebnisaufbereitung (Auftraggeber / Auftragnehmer)

Bereits während der Bearbeitungsphase sollte ein projektbegleitender Informationsaustausch praktiziert werden. Die Kontrolle der InSAR-Ergebnisse sollte frühestmöglich und auf jeden Fall vor Fertigstellung des Ergebnisberichtes durch den Auftragnehmer einsetzen (vgl. Tabelle 9).

5.5 Dokumentation (Auftraggeber)

Die Dokumentation der InSAR-Ergebnisse sollte mit Blick auf Umfang und Inhalt der in Kapitel 4 beschriebenen Struktur folgen. Insbesondere bei Verwendung für marktscheiderische Arbeiten ist eine vollständige und lückenlose Dokumentation erforderlich, da diese die Basis für die obligatorische Plausibilitätsprüfung ist (vgl. Tabelle 10).

Teilaufgabe / Thema	Fragestellungen / Beschreibung E: Empfehlungen, H: Hinweise	Kapitel
Aufgabenstellung/ Zielsetzung	Was soll überwacht werden? - Starres Einzelobjekt? - Mehrere starre Einzelobjekte? - Eine Fläche? Wie soll überwacht werden? - großflächig, kleinräumig, hochauflösend, ... Welche Bodenbewegungen werden erwartet? - Größenordnung, Dynamik, ... Monitoring zur flächigen Überwachung? Zur Verfügung stehende Ressourcen?	2.1
Zeitraum	Wie lang soll der Untersuchungszeitraum (nicht Projekt-/ Beauftragungszeitraum!) sein? E: mindestens 6-12 Monate H: Zeiträume unter einem Jahr bergen die Gefahr, dass saisonale Effekte die Aussagekraft von fortlaufenden Bodenbewegungen verzerren! H: Saisonale Effekte können erst nach 2-3 Jahren zuverlässig ermittelt werden! H: Sind die erwartbaren Bewegungen im gewählten Zeitraum messbar? Fortlaufende Aktualisierung als begleitendes Monitoring? H: Es muss eine Mindestanzahl an Radaraufnahmen in Abhängigkeit des gewählten Sensors verfügbar sein.	./.
Räumliche Ausdehnung	Größe des Untersuchungsgebietes? H: Trassen, kleinräumige (Infra-)Strukturen, lokale, regionale bis nationale Überwachung E: Randbereiche berücksichtigen und großflächige Bewegungen beachten	./.
Referenzpunkt	E: Angabe stabiler Bereiche	1.2.7
Referenznetz	H: Angabe zur Einbindung in ein Referenznetz	3.4
Ergebnisse und Fehlerangaben	Welche Ergebnisse werden benötigt? E: a) Bewegungswerte [mm] b) Bewegungsrate [mm/a] c) Beschleunigung [mm/a ²] d) Saisonale Amplitude [mm] E: Für alle Zeitreihenparameter sollten Standardabweichungen ermittelt und bereitgestellt werden.	3.2

Tabelle 6:
Teilaufgaben
in der
Vorbereitung
eines
radarinter-
ferometrischen
Projekts

Teilaufgabe / Thema	Fragestellungen / Beschreibung E: Empfehlungen, H: Hinweise	Kapitel
Satellitendaten	Welche Satellitendaten (L-Band, C-Band, X-Band) müssen zur Erfüllung der Anforderungen gewählt werden: H: Vegetationsbedeckung, Wellenlänge, Wiederholrate, Genauigkeitsanforderung betrachten H: Verfügbarkeit von Szenen / Kosten H: Bodenauflösung: Wahl von Sensor und Modus (ScanSAR (100 m) bis Starring Spotlight (0,25 m))	1.2.4
Anzahl der verwendeten SAR-Szenen	E: mindestens 20-25 Szenen	2.2.1
Aufnahmegeometrie	H: Vorbetrachtung und Wahl der Orbitgeometrie (Ascending und/oder Descending) und des Einfallswinkels; Berücksichtigung der gegebenen Topografie (Sensitivität der Messung) E: Berücksichtigung typischer Radareffekte (z.B. Layover, Foreshortening, Shadow)	1.2.5 2.2.1
Auswertemethodik	Welches InSAR-Auswerteverfahren soll verwendet werden? H: Je nach Algorithmus ist die Ableitung von PS und/oder DS möglich. H: 2D-Dekomposition zur Ableitung vertikaler und horizontaler (Ost-West) Bewegungen	1.2.6 1.2.5

Tabelle 7:
Teilaufgaben
bei der
Ausschreibung
bzw. Vergabe
eines
radarinter-
ferometrischen
Projekts

Tabelle 8:
Organisatorische
Rahmen-
bedingungen
bei externer
Vergabe eines
radarinter-
ferometrischen
Projekts

Teilaufgabe / Thema	Fragestellungen / Beschreibung E: Empfehlungen, H: Hinweise	Kapitel
Projektdauer	H: Die Prozessierungszeiten sowie die Projektdauer sollten besonders bei der Verwendung von vielen SAR-Szenen (> 200) und über große Gebiete (> 1000 km ²) die Größenordnung von wenigen Wochen bis Monaten nicht überschreiten. H: Gemeinsame Abstimmung von regelmäßigen Sachstandsberichten/Austauschterminen	./.

Tabelle 9:
Hinweise zur
Kontrolle und
Ergebnis-
aufbereitung
eines
radarinter-
ferometrischen
Projekts

Teilaufgabe / Thema	Fragestellungen / Beschreibung E: Empfehlungen, H: Hinweise	Kapitel
Ergebnisbericht	H: Abgestimmte Ergebnispräsentation H: Transparente Qualitätsbeurteilung durch abgestimmte Parameter (u.a. Standardabweichungen der Zeitreihenparameter) H: Umfassendes und ergebnisorientiertes Berichtswesen (Grundlage der Dokumentation) H: Durch den Auftraggeber sollte eine Validierung mit lokalen Geodaten erfolgen (ggf. mit Unterstützung des Auftragnehmers)	2.2.2
Ergebnisbereitstellung	H: Abgestimmte, digitale Datenformate der Lieferdateien und physische Übergabe der Dateien an Auftraggeber H: Bereitstellung und Zugriff/Verfügbarkeit von Analysetools, und Zugriff über ein Webportal (Berücksichtigung und Klärung der zeitlichen Verfügbarkeit des Webportals)	

Tabelle 10:
Hinweise zur
Dokumentation
der Ergebnisse
eines
radarinter-
ferometrischen
Projekts

Teilaufgabe / Thema	Fragestellungen / Beschreibung E: Empfehlungen, H: Hinweise	Kapitel
Verwendung für markscheiderische Arbeiten	H: Die Ergebnisse stellen fremde Unterlagen im Sinne des § 8 Markscheider-Bergverordnung dar und dürfen erst nach Überprüfung und Plausibilitätsprüfung für markscheiderische Arbeiten verwendet werden.	4

6 Literatur

- Adam, N., Reulke, R., Spreckels, V. 2020. Neues Normungsverfahren „InSAR – Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung“. In: 40. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 4.-6. März 2020 in Stuttgart; 197-204, Publikationen der DGPF, Band 29, 2020.
- Cigna, F., Esquivel Ramírez, R., Tapete, D., 2021. Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data. *Remote Sens.* 2021, 13, 4800. <https://doi.org/10.3390/rs13234800>.
- Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa, B., 2016. Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 115, Pages 78-89, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>.
- DMV, 2013. Grundsätze zum Einsatz von satellitengestützten Verfahren der Radarinterferometrie zur Erfassung von Höhenänderungen. Deutscher Markscheider-Verein e.V., Arbeitsgruppe Radarinterferometrie, Herne.
- Ferretti, A., Monti Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., 1997. Multi-Baseline Interferometric Techniques and Applications. ERS SAR interferometry, Proceedings of the Fringe 96 Workshop, held in Zurich, Switzerland, 30 September-2 October 1996. Edited by T.-D. Guyenne and D. Darnesy. ESA SP-406. Paris: European Space Agency, 1997., p.243.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE TGRS* 38 (5), 2202–2212.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE TGRS* 39 (1), 8–20.
- Hanssen, R. F., 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Hanssen, R. F., van der Marel, H., van Leijen, F. J., Kamphuis, J., 2018. Integrated Geodetic Reference Station (IGRS) – A new device for datum connection in the observation space. Presentation, EUREF 2018 Symposium, Amsterdam, The Netherlands, May 31, 2018, 35 pages. Last access: 2023-11-02. URL: <http://www.euref.eu/symposia/2018Amsterdam/03-08-Hanssen.pdf>
- Li, S., Xu, W., Li, Z., 2022. Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics*, Volume 13, Issue 2, 2022, Pages 114-126, ISSN 1674-9847, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.09.007>.
- Spreckels, V., Engel, Th., 2022. Set-up and application of multisensor-referencestations (MSST) for levelling, GNSS and InSAR in the former mining regions Saarland and Ruhrgebiet within Germany. Proceedings of 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 20-22 June 2022, Valencia, Spain.
- van Leijen, F., 2014. Persistent Scatterer Interferometry based on geodetic estimation theory. Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology. <https://doi.org/10.4233/uuid:5dba48d7-ee26-4449-b674-caa8d-f93e71e>.
- Zhu, X. X. und Wang, Y., Montazeri, S., Ge, N., 2018. A Review of Ten-Year Advances of Multi-Baseline SAR Interferometry Using TerraSAR-X Data. *Remote Sensing*, 10 (9), Seiten 1374-1405. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/rs10091374 <<https://doi.org/10.3390/rs10091374>>. ISSN 2072-4292.

7 Abkürzungsverzeichnis

1D	Eindimensional
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
CR	Corner-Reflektor
DEM	Digital Elevation Model
DInSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
DMV	Deutscher Markscheider-Verein e. V.
DS	Distributed Scatterer
GNSS	Global Navigation Satellite System
HS	High-Resolution Spotlight
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IW	Interferometric Wide
MSSt	Multisensorstation
LOS	Line-of-Sight (dt. Satellitenblickrichtung)
PS	Persistent Scatterer
PSI	Persistent Scatterer Interferometrie
RCS	Radar Cross Section
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Small-Baseline-Subset
SM	Stripmap
UTC	Universal Time Coordinated

**Mitgliedschaften
und Kooperationen**



International Society for Mine Surveying



Vereinigung Rohstoffe und Bergbau e.V.



Gesellschaft der
Metallurgen und Bergleute e.V.



Deutscher Dachverband für Geoinformation e.V.



Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.



Ring Deutscher Bergingenieure e.V.