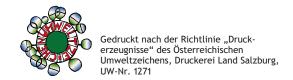


Satelliten-basierte Detektion und Überwachung

von hochalpinen Massenbewegungen im Festgestein mit InSAR





Impressum

Medieninhaber: Land Salzburg

Herausgeber: Abteilung 6 - Infrastruktur und Verkehr

Referat 6/02 - Landesgeologischer Dienst, vertreten durch Gerald Valentin

Autoren: Markus Keuschnig, Gerald Valentin, Christina Rechberger, Ingo Hartmeyer

Titelbild: Georesearch

Umschlaggestaltung: Landes-Medienzentrum

Druck: Druckerei Land Salzburg

Anschrift: Postfach 527, 5010 Salzburg

Downloadadresse: www.salzburg.gv.at/massenbewegungen.pdf

Stand: März 2025



Inhalt

1	Zus	Zusammenfassung5					
2	Abk	kürzu	ngen				
3	Ein	leitu	ng8				
	3.1	Hin	tergrund und Motivation8				
	3.2	Ziel	le9				
4	Gru	undla	gen der InSAR-Technologie10				
	4.1	Ges	schichte10				
	4.2	Mes	ssprinzip11				
	4.2	.1	Reflexion von Radarwellen11				
	4.2	.2	Verschiedene Frequenzbänder für unterschiedliche Anwendungen11				
	4.2	3	Orbit und Aufnahmegeometrie11				
	4.2	.4	Synthetische Apertur				
	4.2	5	Blickrichtung, Einfallswinkel und Sichtlinie (LOS)12				
	4.2	.6	Von SAR zu InSAR14				
	4.2	.7	Verschiebungsvektoren und 2D-Dekomposition				
	4.3	Met	thoden zur InSAR-Prozessierung16				
	4.3	.1	SqueeSAR - Prozessierung von InSAR Messpunkten17				
	4.4	Prä	zision und Genauigkeit17				
	4.5	Mod	dellgüte in InSAR Analysen18				
5	InS	AR-Li	imitationen19				
	5.1	Cor	ner-Reflektoren20				
6	Anv	wend	ungen von InSAR für hochalpine Massenbewegungen21				
	6.1	Vor	- und Nachteile gegenüber traditionellen Methoden21				
7	Fal	lbeis	piele22				
	7.1	Ver	wendete Datensätze23				
	7.1	.1	InSAR				
	7.1	.2	Komplementäre Datensätze23				
	7.2	Fall	beispiel Wasserradkopf26				
	7.2	.1	InSAR-Prozessierung26				
	7.2	.2	InSAR-Verschiebungsraten und Bewegungsverhalten28				
	7.2	3	Erkenntnisse				
	7.3	Fall	beispiel Kitzsteinhorn34				
	7.3	.1	InSAR-Prozessierung35				
	7 3	2	InSAR-Verschiebungsraten und Bewegungsverhalten 36				

3

		7.3.3	Kombination von InSAR und geotechnische Messungen	40
		7.3.4	Erkenntnisse	42
	7	7.4 Fal	lbeispiel Fluchthorn	43
		7.4.1	InSAR-Prozessierung	43
		7.4.2	InSAR-Verschiebungsraten und Bewegungsverhalten	45
		7.4.3	Kombination von InSAR und Strukturgeologie	49
		7.4.4	Erkenntnisse	50
	8	Fazit ur	nd Ausblick	51
	9	Publika	tionen im Rahmen dieses Projekts	52
4	Lite	eratur		53
	Abl	bildunger	1	57
	Tal	oellen		59

1 Zusammenfassung

Die fortschreitende Klimaerwärmung führt zu erheblichen Veränderungen in hochalpinen Gebieten. Steigende Lufttemperaturen und vermehrte flüssige Niederschläge führen zu einer kontinuierlichen Erwärmung des oberflächennahen Untergrundes. In gefrorenen Felsbereichen kann dies zu einem verstärkten Auftauen des Permafrostes und zu einer Abnahme der Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten führen. Eine Folge ist die Zunahme von gravitativen Massenbewegungen wie Fels- und Bergstürzen. Erfahrungsgemäß werden diese oft von sekundären Ereignissen wie Muren oder Überschwemmungen begleitet. Sie stellen somit eine ernstzunehmende Gefahr für die alpine Infrastruktur aber auch die Siedlungsräume dar.

Ziel dieses Projektes ist es, die Anwendungsmöglichkeiten der satellitenbasierten Radarinterferometrie im Risikomanagement für hochalpine Massenbewegungen zu untersuchen. Ausgehend von den technischen Grundlagen werden in dieser Studie die Vor- und Nachteile der InSAR-Anwendung in hochalpinen Regionen anhand von drei Fallstudien analysiert:

- Wasserradkopf (Kärnten, AT)
 - Am Wasserradkopf zeigen InSAR-Daten großflächige Bewegungen bis zu mehreren Dezimeter pro Jahr. Besonders in vegetationsarmen Bereichen liefert InSAR eine hohe Messpunktdichte und präzise Ergebnisse. Limitationen treten in dicht bewaldeten Gebieten und bei schnellen Bewegungen auf.
- Kitzsteinhorn (Salzburg, AT)
 InSAR-Daten aus der Gipfelregion des Kitzsteinhorns wurden mit bodengestützten Messungen (Kluftweitenmessungen mit Fissurometern) kombiniert. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Methoden und weisen auf keine großflächigen Bewegungen hin.
- Fluchthorn (Tirol, AT)

Am Fluchthorn, Schauplatz eines Bergsturzes im Jahr 2023 mit über 1 Mio. m³, zeigen InSAR-Daten großflächige Bewegungen im cm-Bereich bereits im Vorfeld des Ereignisses. Besonders die vertikalen und horizontalen Verschiebungsvektoren liefern wertvolle Erkenntnisse über das Bewegungsmuster. Ein Zusammenhang zwischen einer tektonischen Deckengrenze und dem Versagensmechanismus ist zu vermuten.

Die Fallbeispiele zeigen, dass die Geländeoberfläche trotz unterschiedlicher topografischer, geologischer und geomorphologischer Rahmenbedingungen mit Radar erfasst und analysiert werden kann. Dabei wird das Potenzial der InSAR-Technologie für eine großflächige und präzise Überwachung hochalpiner Massenbewegungen sichtbar. Gleichzeitig werden auch die Grenzen dieser Methodik erkennbar:

- (i) Die Messpunktdichte ist bei dichter Vegetation und auf stark dynamischen Oberflächen (z.B. auf Gletschern) deutlich reduziert.
- (ii) Abrupte, schnelle Bewegungen erschweren die Analyse bzw. werden nicht erkannt.

In Kombination mit bodengestützten Messungen und komplementären Satellitendaten kann InSAR das Prozessverständnis hochalpiner Massenbewegungen deutlich erhöhen. Die InSAR-Technologie bildet eine wertvolle Grundlage für die Gefahrenanalyse hochalpiner Prozesse und zeigt ein großes Potential als integraler Bestandteil moderner Frühwarnsysteme.

6

2 Abkürzungen

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

3 Einleitung

3.1 Hintergrund und Motivation

Die durchschnittliche Jahrestemperatur ist in Österreich seit 1880 um rund 2°C gestiegen (APCC 2014; Olefs et al. 2021). Diese Temperaturerhöhung liegt weit über dem globalen Durchschnitt von 0,86°C (IPCC 2018). Damit einhergehend zeigen Beobachtungen einen generellen Anstieg der Schneegrenze und einen massiven Rückgang der Gletscher- und Permafrostbereiche (IPCC 2019). Weitgehend unabhängig von den Emissionsszenarien ist in Österreich mit einem weiteren Temperaturanstieg von 1,4°C bis 2050 zu rechnen (APCC 2014). Bis zum Jahr 2100 ist im Alpenraum eine Temperaturerhöhung über dem weltweiten Mittel zu erwarten, ein Gesamtanstieg von bis zu 5,8°C ("business as usual" Szenario RCP8.5, Olefs et al. (2021)) ist möglich. Die Erwärmung bewirkt einen weiteren Rückgang der Gletscher- und Permafrostbereiche, einen deutlichen Anstieg der 0°C-Grenze und damit einhergehend Veränderungen des Niederschlagregimes, der Bodenfeuchte sowie der Schneedeckenmächtigkeit und -dauer. Eine Konsequenz ist die Zunahme von hochalpinen Naturgefahren wie Hangrutschungen, Muren, Steinschlägen oder Felsstürzen (Krautblatter et al. 2013; GAPHAZ 2017; Haeberli et al. 2021; Hartmeyer et al. 2020), welche einen relevanten Risikofaktor für Mensch und Infrastruktur darstellen.

In den letzten Jahren haben zahlreiche Fels- und Bergstürze zu erheblichen Schäden an Infrastrukturen und Gebäuden, sowie zu Todesopfern geführt. In Folge des Bergsturzes am Piz Cengalo (2011: 2*10⁶ m³, 2017: 2-4*10⁶ m³) erreichte eine Mure den Talort Bondo (Graubünden) und führte dort zu großen Verwüstungen (Mergili et al. 2020). Acht Personen verloren ihr Leben. Auch im Bundesland Salzburg kam es in den letzten Jahren zu größeren Felsstürzen, wie am Großen Wiesbachhorn (2017: > 5*10⁴ m³), am Hohen Brett (2018: > 5*10⁴ m³) oder am Bambachkopf (2020: > 2*10⁴ m³) (Valentin 2021). 2024 kam es in Salzburg im Oktober gleich zu mehreren großen Ereignissen, wie im Göriachtal (> 1*10⁵ m³), am Hocharn (> 1*10⁵ m³) oder am Großen Schmiedinger (> 8*10⁴ m³). Das Jahr 2025 begann mit einem Felssturz am Nördlichen Glanzkopf (3*10⁵ m³). Ereignisse dieser Größenordnung verfügen oftmals über große Auslaufweiten und bringen demnach großes Schadenspotential mit sich. Begleitende Kaskadeneffekte durch sekundäre Ereignisse wie Muren oder Überflutungen (durch Dammbildungen und Dammbrüche) erreichen in Extremfällen auch dichter besiedelte Haupttäler.

Große Massenbewegungen im Festgestein bewegen sich typischerweise über lange Zeiträume im Millimeterbereich, bevor sie sich beschleunigen und sogar Geschwindigkeiten von bis zu mehreren Metern pro Tag erreichen können (Cruden & Varnes, 1996; Crosta & Agliardi 2003; Helmstetter et al. 2004; Bonzanigo et al., 2007; Hungr et al. 2014; Leinauer et al. 2023; Zangerl et al. 2010). Während sich die meisten schnellen Massenbewegungen wieder verlangsamen und stabilisieren, gibt es auch solche, die plötzlich versagen und/oder sekundäre Prozesse wie z.B. Felsstürze und Felslawinen auslösen (Heim 1932; Kilburn & Petley 2003; Brideau, et al. 2005; Strouth & Eberhardt 2009; Kalenchuk 2010; Zangerl et al, 2019; Rechberger et al., 2021). Die oftmals vorausgehenden, langsamen Bewegungen sind schwer erkennbar und werden meist erst als Reaktion auf bereits eingetretene Ereignisse detaillierter untersucht. Bei kritischen Fällen werden als organisatorische Maßnahme Monitoring- und Frühwarnsysteme eingesetzt. Damit kann das Prozessverständnis verbessert und/oder es können mögliche Interventionen, wie Evakuierungen oder Sperren ausgelöst werden.

3.2 Ziele

Satellitenbasiertes (SB) InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar - Radarinterferometrie) ermöglicht die flächendeckende Messung von Bodenbewegungen mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich (Keuschnig et al. 2022). Ziel dieses Projektes ist es, die Anwendbarkeit von SB-InSAR für die Überwachung von hochalpinen Massenbewegungen im Festgestein zu untersuchen. Die Studie ist an Fachleute und Entscheidungsträger gerichtet und soll ihnen die untersuchte Technologie als mögliche Methode zur Erkennung und zum Monitoring von Fels- und Bergstürzen näher bringen.

4 Grundlagen der InSAR-Technologie

4.1 Geschichte

Satellitenbasiertes (SB) InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ermöglicht Bodenbewegungen (i) präzise (mm-Genauigkeit), (ii) skalierbar (von einzelnen Gebäuden zu großen Flächen) und (iii) über lange Zeiträume hinweg (bis zu 25 Jahre) zu erfassen.

Bei SB-InSAR handelt es sich um eine bewährte Technologie, bereits 1991 wurde der erste ERS-1 Radarsatellit von der European Space Agency (ESA) in Betrieb genommen (ESA 2024a). Limitierende Faktoren waren damals die niedrige Auflösung (30 x 30 m) und die lange Wiederkehrzeit (Wiedererreichung des gleichen Punkts auf der Erdoberfläche) von 35 Tagen. Der deutsche Erdbeobachtungssatellit TerraSAR-X (TSX) erzielte bei seinem Start im Jahr 2008 eine räumliche Auflösung von 1 x 1 m und eine zeitliche Auflösung von 11 Tagen (ESA 2024b). Durch das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus (COPERNICUS 2024; Aschbacher and Milagro-Pérez 2012) sind die Daten der Sentinel Satelliten seit Ende 2014 nahezu weltweit und kostenlos verfügbar. Die Sentinel-1 Satelliten (SNT) erreichen eine Auflösung von 20 x 5 m (IW Modus) und eine Wiederkehrdauer von bis zu 6 Tagen. Aufgrund des Verlusts von Sentinel-1b im Dezember 2021 beträgt die aktuelle Wiederkehrzeit 12 Tage, dessen Ersatz Sentinel-1c ist im Jahr 2025 geplant. Aktuell gibt es rund ein Dutzend InSAR-Satelliten (Abbildung 1) und der Trend ist stark steigend.

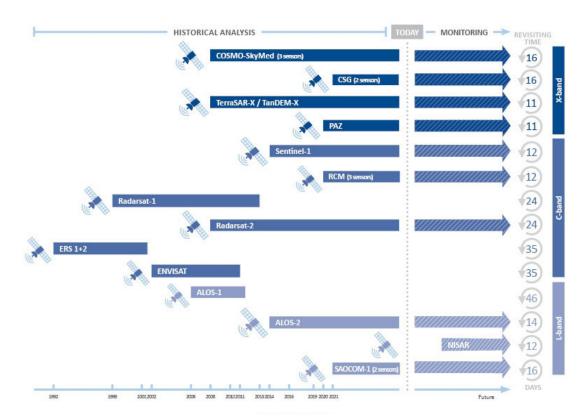


Abbildung 1: Auswahl historischer und aktueller SAR-Satelliten inklusive Wiederkehrzeit (revisting time) und Frequenzbändern (TRE ALTAMIRA, 2024).

Synthetic Aperture Radar (SAR) Satelliten nutzen Radar, um hochauflösende Bilder der Erdoberfläche zu erstellen, unabhängig von Wetterbedingungen oder Tageslicht. Das Funktionsprinzip basiert auf der Aussendung von Mikrowellenimpulsen, die von der Erdoberfläche reflektiert werden. Die reflektierten Signale werden vom Satelliten empfangen und in weiterer Folge zu detaillierten Bewegungsinformationen prozessiert.

4.2.1 Reflexion von Radarwellen

Die Reflexion von Radarwellen folgt den physikalischen Prinzipien der elektromagnetischen Wellenausbreitung. Die zurückgesendete Signalstärke hängt von zwei Hauptfaktoren ab:

- Geometrie des Rückstreuers: Wenn die ausgesendeten Radarwellen in einem geeigneten Winkel reflektiert werden, erreicht ein signifikanter Teil des Signals wieder den Satelliten. Glatte Oberflächen oder bauliche Strukturen begünstigen die Reflexion. Natürliche Oberflächen wie Vegetation oder Schnee streuen die Wellen in viele Richtungen, wodurch nur ein Bruchteil des Signals zurückkehrt.
- Materialeigenschaften der Oberfläche: Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, wie Metalle, reflektieren Radarwellen besonders gut.

4.2.2 Verschiedene Frequenzbänder für unterschiedliche Anwendungen

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

- L-Band: f=1-2 GHz, λ=ca.24 cm. Wird häufig für land- und forstwirtschaftliche Überwachungen und zum Umweltmonitoring verwendet, da es tiefer in die Vegetation und den Boden eindringen kann.
- C-Band: f=4-8 GHz, λ=ca.6 cm. Ist das am häufigsten verwendete Band für Erdbeobachtungssatelliten. Es bietet eine gute Balance zwischen Auflösung und Eindringtiefe und ist weniger anfällig für atmosphärische Störungen.
- X-Band: f=8-12 GHz, λ=ca.3 cm. Wird für bautechnische und militärische Überwachungen verwendet. Es kommt mit einer hohen Auflösung, ist bei Vegetation aber nur bedingt geeignet.

4.2.3 Orbit und Aufnahmegeometrie

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

11

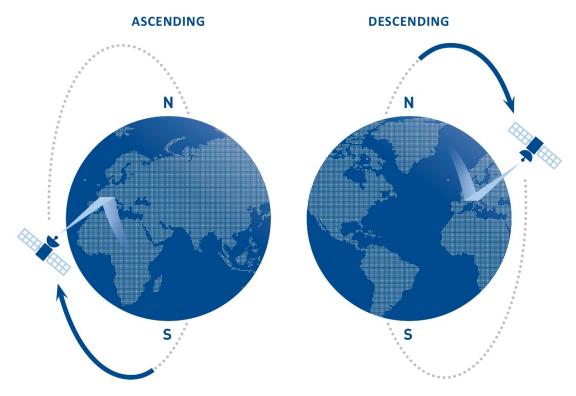


Abbildung 2: Aufsteigende (ascending - ASC) und absteigende (descending - DSC) Geometrie (TRE ALTAMIRA, 2024).

4.2.4 Synthetische Apertur

Ein Synthetic Aperture Radar (SAR) ist ein Radarsystem, das den Weg des Satelliten ausnutzt, um eine große Antenne oder Strahlaustrittsfläche (Apertur) elektronisch zu simulieren. Eine SAR-Antenne sendet und empfängt pro Sekunde tausende Radarimpulse. Die Sende- und Empfangsdaten mitsamt den Positionsdaten beim Flug um die Erde werden als Grunddaten für die spätere Prozessierung gespeichert.

4.2.5 Blickrichtung, Einfallswinkel und Sichtlinie (LOS)

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

Der Einfallswinkel (B) bezeichnet den Winkel zwischen der vertikalen Linie zur Erdoberfläche und der Richtung des einfallenden Radarstrahls (Abbildung 3). Dieser Winkel ist variabel und abhängig vom Satellitensystem (Sentinel ca. 20 - 46°, TerraSAR-X ca. 20 - 60°), wobei ein kleinerer Einfallswinkel direkt unter dem Satelliten (Nadir-Punkt) und ein größerer Einfallswinkel weiter entfernt vom Nadir-Punkt auftritt. Der Einfallswinkel spielt eine wichtige Rolle bei geländebezogenen Abschattungen, der Lagegenauigkeit von Messpunkten (z.B. multiple Reflexionen von unterschiedlichen Höhenlagen, Verzerrungen) und der detaillierten Analyse von Bewegungsrichtungen.

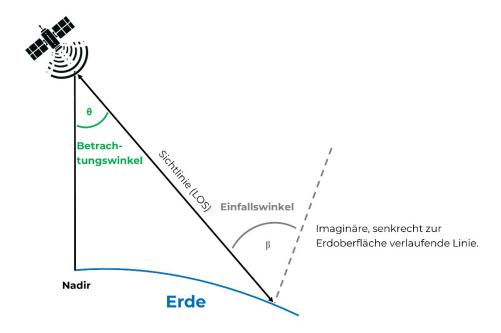


Abbildung 3: Einfallswinkel und Sichtlinie (LOS).

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

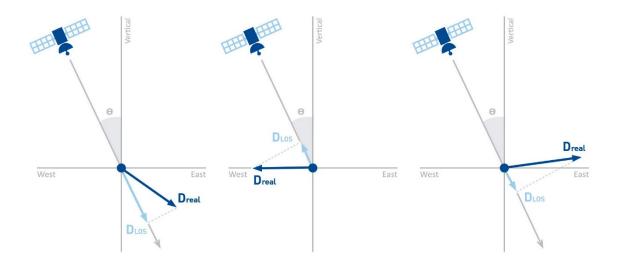


Abbildung 4: Beispielhafte Projektion von realen Bodenbewegungen D_{real} auf die Sichtlinie D_{LOS} (TRE ALTAMIRA, 2024).

4.2.6 Von SAR zu InSAR

Da SAR-Satelliten die Erde kontinuierlich umkreisen, nehmen sie im Laufe der Zeit zahlreiche Bilder desselben Gebiets auf und geben so Einblicke in die Entwicklung der Erdoberfläche (Shimada 2019). Bei jeder SAR-Erfassung liefert das zurückgestreute Radarsignal zwei wichtige Informationsteile: (a) Amplitude und (b) Phase. Die Amplitude ist abhängig von der Energie des zurückgestreuten Signals (siehe Kapitel 4.2.1). Die Phase bezieht sich auf den Abstand zwischen Sensor und Ziel und wird bei interferometrischen Anwendungen verwendet (Abbildung 5).

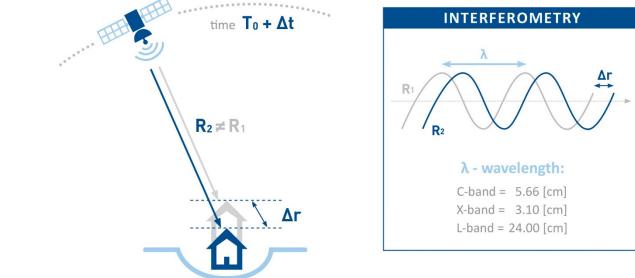


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Funktionsweise von InSAR. Die Phasenverschiebung $(\Delta r=R_2-R_1)$ ergibt sich aus der Phaseninformation (R) von zwei oder mehreren Bildern desselben Gebiets zu verschiedenen Zeitpunkten oder unterschiedlichen Positionen (TRE ALTAMIRA, 2024).

Bei jeder InSAR-Messung werden mindestens zwei SAR-Bilder desselben Gebiets aufgenommen, entweder zu verschiedenen Zeitpunkten (temporal) oder aus leicht unterschiedlichen Positionen (räumlich). Die Phaseninformationen (R) dieser Bilder, die durch die Laufzeit der reflektierten Radarwellen bestimmt werden, werden miteinander verglichen. Die Phasendifferenz (Δr) zwischen den Bildern, auch Interferogramm genannt, enthält Informationen über Änderung des Abstands zwischen dem Satelliten und der Erdoberfläche. Mit diesen Phasendifferenzen lassen sich langsame Bewegungen der Erdoberfläche, wie sie bei Rutschungen, Erdbeben oder auch Gebäudesetzungen auftreten, millimetergenau messen.

4.2.7 Verschiebungsvektoren und 2D-Dekomposition

Bei SB-InSAR werden Verschiebungen direkt entlang der Sichtlinie (Kapitel 4.2.4) gemessen. Der daraus resultierende Verschiebungsvektor liefert präzise Informationen über die Bewegungen in Richtung des Satelliten (positive Verschiebungen) oder von ihm weg (negative Verschiebungen). Um Informationen zu vertikalen oder horizontalen Bewegungen zu erhalten, ist eine 2D-Dekomposition erforderlich. Sie kombiniert Daten aus den ASC- und DSC-Geometrien und berechnet die Bewegungsanteile in West-Ost-Richtung (positive Verschiebungen in Richtung Osten) und Vertikalrichtung (positive Verschiebungen nach oben)(Abbildung 6). Die 2D-Dekomposition erfolgt innerhalb eines vorgegebenen Rasters (z.B. 10 x 10 m). Die daraus resultierenden (Pseudo-)Messpunkte weisen neben einer verminderten Lagegenauigkeit auch eine geringere Messpunktdichte auf, da speziell in steilen Hanglagen aufgrund von Abschattungen oft nur eine Aufnahmegeometrie verfügbar ist.

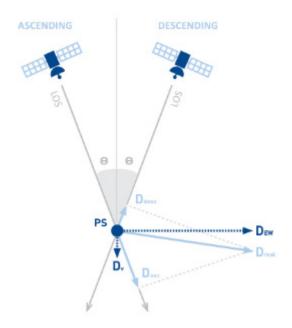


Abbildung 6: Schematische Darstellung der 2D-Dekomposition unter Verwendung der ASC- und DSC-Satelliten-Geometrien (TRE ALTAMIRA, 2024).

4.3 Methoden zur InSAR-Prozessierung

Die Verarbeitung von SAR-Daten zur Erzeugung von InSAR-Daten ist hoch komplex, da sie neben atmosphärischen Störfaktoren stark von der Topographie, Oberflächenbeschaffenheit etc. der untersuchten Gebiete und dem gewünschten Ziel der Analyse abhängt. Für eine Prozessierung stehen mehrere Algorithmen zur Verfügung welche auf unterschiedliche Anforderungen zugeschnitten sind. Zu den gängigsten Methoden gehören D-InSAR, SBAS, PS-InSAR oder SqueeSAR. Jede dieser Methoden weist spezifische Vor- und Nachteile auf und ist für bestimmte Anwendungsfälle besonders geeignet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Ausgewählte Methoden zur InSAR Prozessierung.

Methode	Merkmale	Anwendungsfälle	Vorteile	Nachteile
D-InSAR	Basistechnologie. Verwendet zwei SAR-Bilder für die Differenzanalyse	Zeitlich schnelle, diskrete Ereig- nisse, z.B. Erdbeben	Einfache Anwen- dung, geringe Da- tenanforderung	Störanfällig bei atmosphäri- schen Effekten und für Dekor- relation
SBAS	bewegungen, z.B. bei Grundwasser-schwankungen Identifizierung stabiler Rücks-treuer (Permanent		Minimierung von Dekorrelation und Atmosphä- reneffekten, prä- zise Bewegungs- analyse	Geringere räumliche Auflösung
PS-InSAR			Hohe Präzision, resistent gegen Dekorrelation	Begrenzte An- wendung auf stabile Reflek- toren, bedingt geeignet für Vegetations- gebiete
DS-InSAR	Verwendet verteilte Rückstreuer (Distributed Scatterers, DS), Konzentration auf kohärente Flächen, die aus mehreren benachbarten Pixeln bestehen	Geologische Überwachung, besonders geeig- net für Hangbe- reiche, wo we- nige bis keine stabilen Rücks- treuer vorhanden sind	Für Regionen mit geringer punktu- eller Kohärenz	Geringere Präzision und Genauigkeit im Vergleich zu PS-InSAR und SqueeSAR
Squee- SAR	Kombination von PS- und DS-InSAR	Heterogene Ge- ländeoberfläche und städtische Gebiete	Höhere Mess- punkt-Dichte und Genauigkeit, ver- bessert Dekorre- lation	Hohe Rechen- leistung erforderlich, lizenzierte Technologie

4.3.1 SqueeSAR - Prozessierung von InSAR Messpunkten

Im vorliegenden Projekt wurden die SAR-Daten mit dem Multi-Interferogramm-Verfahren Squee-SAR prozessiert (Ferretti et al. 2011). SqueeSAR ist eine vom Unternehmen TRE ALTAMIRA patentierte Methode und ermöglicht im Vergleich zu herkömmlichen InSAR-Methoden die Phasendekorrelation in heterogenen Gebieten mit Vegetation oder städtischen Gebieten zu minimieren. Squee-SAR kombiniert Informationen von sogenannten Persistent Scatterers (PS) und Distributed Scatterers (DS) um hohe räumliche Messpunktdichten zu erreichen.

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

4.4 Präzision und Genauigkeit

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

Die Präzision von InSAR-Ergebnissen kann bestimmt werden durch die

- Lage der Messpunkte
- Verschiebungs-Zeitreihen

Die Lagekoordinaten jedes Messpunktes hängen von dessen SAR-Koordinaten und dessen Höhe ab, die aus der InSAR-Analyse abgeleitet wird. Mit einer hohen räumlichen Auflösung des in der Analyse verwendeten Satellitensensors verbessert sich die Präzision der Geokodierung. Tabelle 2 gibt die typischen Präzisionswerte für die UTM-Koordinaten von Messpunkten in mittleren Breiten an.

Tabelle 2: Typische Präzisionswerte für die UTM-Koordinaten von Messpunkten in mittleren Breiten (SqueeSAR). Die Werte beziehen sich auf einen MP in weniger als 1 km Entfernung vom Referenzpunkt und einen Datensatz von mindestens 30 SAR-Bildern (AUGMENTERRA, 2024).

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

Die Präzision der Verschiebungs-Zeitreihe für jeden Messpunkt wird durch die Standardabweichung der durchschnittlichen Verschiebungsrate sowie durch die Standardabweichung (Standard Deviation, σ) der Einzelmessungen beschrieben. Die Standardabweichung misst die Streuung der Messwerte um ihren Mittelwert und definiert damit die Präzision der Messungen. Ein niedriger Wert

der Standardabweichung zeigt an, dass die Messungen eng um den Mittelwert gruppiert sind, während eine hohe Standardabweichung darauf hinweist, dass die Messungen über einen größeren Wertebereich verteilt sind. Bei SqueeSAR-Messungen bezieht sich die Standardabweichung auf die durchschnittliche Verschiebungsrate in Bezug auf einen Referenzpunkt (REF). Ähnlich wie in traditionellen geodätischen Netzen nimmt die Präzision mit zunehmender Entfernung vom Referenzpunkt ab.

In einem Datensatz von mindestens 30 Bildern, die über einen Zeitraum von zwei Jahren aufgenommen wurden, zeigte ein Messpunkt, der weniger als 1 km vom Referenzpunkt entfernt ist, eine typische Standardabweichung von weniger als 1 mm/a. Die Standardabweichung einer Einzelmessung liegt im Durchschnitt bei ±5 mm. Während die Präzision von InSAR-Messpunkten statistisch berechnet wird, unterliegt die messtechnische Genauigkeit keiner systematischen Bewertung. Die Genauigkeit von InSAR kann durch die Verwendung von ergänzenden "Ground-Truth"-Daten, wie z.B. bodengestützten geodätischen Messungen, erfasst werden und liegt in der Regel im unteren mm-Bereich (TRE ALTAMIRA, 2024).

4.5 Modellgüte in InSAR Analysen

Die Modellgüte beschreibt die Fähigkeit eines Modells, gemessene Daten präzise abzubilden und verlässliche Vorhersagen zu treffen. In InSAR-Analysen wird sie anhand der Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Bodenbewegungen bewertet. Bei der Beurteilung, wie gut ein Modell zu einem Datensatz passt, ist es sinnvoll, sowohl das Bestimmtheitsmaß (R²) als auch den RMSE-Wert zu berechnen. Der RMSE ist ein Maß für die durchschnittliche Abweichung der Datenpunkte von einer Regressionsgeraden, welches größere Fehler stärker gewichtet und in derselben Einheit wie die Daten selbst angegeben wird. Der R² ist ein Maß dafür, wie gut die Regressionsgerade die Variation der beobachteten Daten erklärt und gibt an, welcher Anteil der Streuung durch das Modell erklärt wird.

- RMSE (Root Mean Square Error): Der RMSE ist die Quadratwurzel des Durchschnitts der quadrierten Abweichungen zwischen den vom Modell vorhergesagten und den tatsächlichen Werten und hat die gleiche Einheit wie die gemessenen Daten (z.B. mm). Ein niedriger RMSE-Wert deutet auf eine hohe Modellgenauigkeit hin.
- R² (Bestimmtheitsmaß): R² gibt den Anteil der Varianz der abhängigen Variable an, der durch das Regressionsmodell erklärt wird. Werte liegen zwischen 0 und 1 (prozentual), wobei ein Wert nahe 1 auf eine gute Anpassung hinweist.

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

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

5 InSAR-Limitationen

Limitationen der InSAR-Technologie ergeben sich u.a. durch Oberflächen, deren Reflexion sich zwischen aufeinanderfolgenden Radarbildern stark ändert. Dazu gehören insbesondere starke Vegetation, Wasser, Schnee und Eis. Abhängig von der Wellenlänge (z.B. C-Band) führen solche Bereiche in der Regel zu geringen Messpunktdichten und/oder ungenauen Messungen. Zudem ist InSAR kein geeignetes Verfahren, um plötzliche Bodenbewegungen festzustellen. Die maximal messbare Verschiebung entspricht der halben Wellenlänge des Radarsignals in dem Zeitintervall, das zum Vergleich der Radarbilder verwendet wird. Die maximal messbare Verschiebung beträgt z.B. bei Sentinel-1 mit 5,6 cm Wellenlänge etwa 2,8 cm in sechs oder zwölf Tagen.

In der Regel werden für die Bewegungsanalysen viele Bildpaare mit unterschiedlichen Zeitintervallen verwendet. Aufgrund von Datenlücken - meistens im Winter, hervorgerufen durch Schneebedeckung - können keine Gebiete überwacht werden, die sich um mehr als 100 mm/Jahr oder mit stark nichtlinearen Geschwindigkeiten bewegen. In städtischen Gebieten können Mehrwegeffekte und geometrische Verzerrungen auftreten, wenn das Radarsignal von mehreren Oberflächen reflektiert wird. Topografische Probleme wie stark geneigte Geländeoberflächen können neben Abschattungen zu Verzerrungen oder Überlagerungen im SAR-Bild führen. In diesen Fällen erfordern Analyse und Interpretation von InSAR-Daten spezifische Fachkenntnisse.

Tabelle 3: Limitationen von InSAR.

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

20

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

Ein Corner-Reflektor besteht typischerweise aus drei metallischen Flächen, die in einem 90°-Winkel zueinander angeordnet sind (Abbildung 7). Es wird das Prinzip der Mehrfachreflexion genutzt: Wenn eine Radarwelle eine der drei orthogonal angeordneten Flächen trifft, wird sie reflektiert und trifft nacheinander auf die beiden anderen Flächen. Diese Mehrfachreflexion sorgt dafür, dass die Welle exakt in die Richtung des Radar-Sensors zurückkehrt.

Durch die gezielte Reflexion erzeugt ein Corner-Reflektor ein starkes Rückstreusignal. Dies macht ihn zu einem idealen künstlichen Persistent Scatterer (PS), der in SAR-Bildern leicht identifiziert werden kann. Dies liegt daran, dass das Signal eines Corner-Reflektors um ein Vielfaches stärker als das von natürlichen Oberflächen ist.



Abbildung 7: Corner Reflektor für die Überwachung einer Hangrutschung (Marte et al., 2024).

Um eine optimale Reflexion zu gewährleisten muss ein Corner-Reflektors stabil installiert und korrekt ausgerichtet sein. Zum Schutz gegen Schnee und Eis empfiehlt sich eine Abdeckung aus Fiberglas, ein Material welches die Radarstrahlung nicht beeinflusst. Damit sich Corner-Reflektoren nicht gegenseitig beeinflussen wird ein Abstand von rund 50 m empfohlen (Sentinel-1). Ausgestattet mit z.B. 360°-Targets, GNSS-Modulen oder Inklinometern können Corner-Reflektoren als Referenzpunkte in terrestrische Vermessungsnetze integriert werden. Abhängig von der Konstruktion der Corner Reflektoren können diese gleichzeitig für mehrere Aufnahmegeometrien (ASC und DSC Geometrie) und auch unterschiedliche SAR-Satelliten verwendet werden (z.B. X- und C-Band).

6 Anwendungen von InSAR für hochalpine Massenbewegungen

In hochalpinen Regionen spielt die Überwachung instabiler Areale eine zentrale Rolle im Risikomanagement von Naturgefahren, da diese aufgrund ihrer geologischen, geomorphologischen und klimatischen Bedingungen besonders anfällig auf Sturz- und Rutschprozesse sind. Satellitenbasierte InSAR-Technologien haben sich als wichtiges Instrument zur Überwachung dieser Phänomene erwiesen (Solari et al. 2020; Bekaert et al. 2020), da sie großflächige und präzise Messungen im Millimeterbereich ermöglichen. Dadurch können Bewegungen frühzeitig erkannt und Risiken präventiv analysiert werden.

6.1 Vor- und Nachteile gegenüber traditionellen Methoden

InSAR bietet für die Überwachung von Bodenbewegungen im Vergleich zu traditionellen Methoden folgende Vorteile:

- Großflächige Abdeckung: InSAR ermöglicht die Überwachung großer Gebiete (>1.000 km²),
 was mit punktbasierten Methoden wie Nivellierung oder GNSS-Messungen nicht möglich ist.
- Hohe Präzision: InSAR kann Bewegungen im Millimeterbereich detektieren, was eine sehr hohe Genauigkeit im Vergleich zu vielen anderen Methoden bietet.
- Zeitliche Kontinuität: Da InSAR-Daten regelmäßig von Satelliten erfasst werden, ist ein Monitoring der Geländeoberfläche über lange Zeiträume möglich.
- Unabhängigkeit von Wetter- und Lichtbedingungen: InSAR nutzt Radarwellen, die von Regen und Schnee nicht beeinträchtigt werden und auch in der Nacht funktionieren.
- Fernerkundung: InSAR erfordert keine Installation von Messgeräten vor Ort und reduziert dadurch die Notwendigkeit von Feldarbeiten. Es ermöglicht die Überwachung von Gebieten, die schwer zugänglich oder gefährlich sind.
- Langzeitarchivierung und historische Analyse: Satelliten sammeln seit Jahren InSAR-Daten, was den Zugang zu historischen Informationen ermöglicht. Die Datenarchive erlauben es, rückblickend Veränderungen zu analysieren und langfristige Trends zu erkennen.

Zu den Nachteilen zählen:

- Line-of-Sight Limitation: InSAR misst Verschiebungen nur entlang der Sichtlinie des Satelliten. Bewegungen, die schräg dazu verlaufen, werden nur eingeschränkt detektiert.
- Räumliche Auflösung: Die räumliche Auflösung von InSAR ist geringer als die punktgenaue Erfassung durch GNSS, Fissurometer oder Extensometer.
- Indirekte Messung: "Wahre" oder reale Bodenbewegungen werden aufgrund der Aufnahmegeometrien (Sichtlinien) nicht direkt erfasst.
- Begrenzte Echtzeitfähigkeit: Aufgrund der Satelliten-Wiederkehrzeit von mehreren Tagen und der aufwendigen Datenprozessierung sind Echtzeit-Bewegungsanalysen sehr teuer und dadurch nur eingeschränkt möglich.

7 Fallbeispiele

Die in diesem Projekt behandelten Fallbeispiele (1) am Wasserradkopf in Kärnten, (2) am Kitzsteinhorn in Salzburg und (3) am Fluchthorn in Tirol demonstrieren die Anwendung und das Potential von InSAR in von Permafrost beeinflussten Regionen. Die Auswahl dieser Gebiete ermöglicht eine differenzierte Analyse der Anwendbarkeit von SB-InSAR unter unterschiedlichen geologischen und geomorphologischen Bedingungen für die Überwachung von hochalpinen Massenbewegungen im Festgestein.

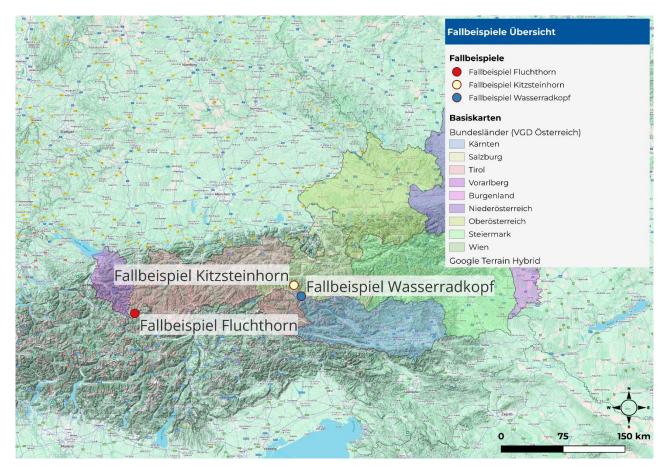


Abbildung 8: Lage der Fallbeispiele.

Tabelle 4: Fallbeispiele und deren Charakteristika.

Fallbeispiel	Lithologie	Prozess- typ	Charakteristik	Infrastruktur
Wasserradkopf (Kärnten, AT)	Kalkglimmer- schiefer, Glocknerdecke	Felsglei- tung (>3 Mio. m³)	Hochalpines Gelände; durch sporadischen Permafrost beeinflusst.	Straßeninfrastruktur
Kitzsteinhorn (Salzburg, AT)	Kalkglimmer- schiefer, Glocknerdecke	"Stabile" Verhält- nisse	Hochalpines Gelände; durch Permafrost und Gletscher beeinflusst.	Seilbahnanlagen
Fluchthorn (Tirol, AT)	Orthogneise, Silvrettadecke	Bergsturz (>1 Mio. m³)	Hochalpines Gelände; durch Permafrost und Gletscher beeinflusst.	Wanderwege

7.1 Verwendete Datensätze

7.1.1 InSAR

Für die ausgewählten Fallbeispiele wurden C-Band Sentinel-1-Satelliten (SNT) verwendet, die Teil des europäischen Copernicus-Programms der ESA sind. Die Prozessierung erfolgte mit dem Squee-SAR Algorithmus. Diese Methode wurde gewählt, um die in Kapitel 4 beschriebenen Herausforderungen wie Dekorrelation in hochalpinen Regionen zu minimieren. Sentinel-1A und -1B bieten seit ihrem Start im Jahr 2014 Daten mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 5 x 20 m, die für die Prozessierung der Fallbeispiele verwendet wurde. Die Sentinel-1-Satelliten zeichnen sich durch eine Wiederkehrrate von sechs Tagen (seit Ausfall von Sentinel-1B: zwölf Tage) aus und ermöglichen regelmäßige sowie zeitlich gut aufgelöste Datenaufnahmen zur Analyse von Bodenbewegungen.

Für die Fallstudien wurden sowohl aufsteigende (ASC) als auch absteigende (DSC) Orbit-Geometrien genutzt und somit beide Blickwinkel betrachtet. Für das Fallbeispiel am Fluchthorn wurden beide Geometrien für eine 2D-Dekomposition verwendet, um Bewegungen in der Horizontalebene (Ost-West) und Vertikalrichtung zu bestimmen. Für die Fallbeispiele am Wasserradkopf und Kitzsteinhorn wurden ergänzend Daten aus dem EGMS (siehe 7.1.2) verwendet.

7.1.2 Komplementäre Datensätze

Neben den mit SqueeSAR prozessierten InSAR-Daten wurden in dieser Studie auch komplementäre Datensätze herangezogen (Tabelle 5), um eine umfassendere Analyse der Bodenbewegungen zu ermöglichen. Hierzu gehören hochauflösende Geländemodelle (Digital Terrain Models, DTMs) und Oberflächenmodelle (Digital Surface Models, DSMs), die eine präzise Darstellung der topographischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebiets bieten. Ergänzend wurden Orthofotos verwendet, um visuelle Informationen über die Oberfläche zu erhalten. Diese Luft- und Satellitenbilder ermöglichen eine detaillierte Überprüfung der Oberflächenbedingungen und helfen bei der Interpretation der InSAR-Daten, insbesondere in Bezug auf die Identifizierung von Vegetation(sveränderungen) oder baulichen Eingriffen.

Darüber hinaus wurden komplementäre InSAR Daten vom European Ground Motion Service (EGMS) verwendet. Der EGMS ist Teil des Copernicus-Programms und bietet europaweit und kostenfrei InSAR-Daten zur Überwachung von Bodenbewegungen an. EGMS-Daten ermöglichen eine großflächige Abdeckung und konsistente Langzeitüberwachung und sind besonders für großflächige Bewegungen geeignet. Im Vergleich zu regionalen InSAR-Prozessierungen erschweren eine geringere Messpunktdichte und Präzision der EGMS-Daten die Analyse kleinräumiger Bewegungen (Abbildung 9). Trotz dieser Limitationen bietet EGMS wertvolle Ergänzungsdaten. Für die Fallbeispiele am Wasserradkopf und Kitzsteinhorn wurden die Vektoren aus der 2D-Dekomposition für die Analyse horizontaler und vertikaler Bewegungen herangezogen.

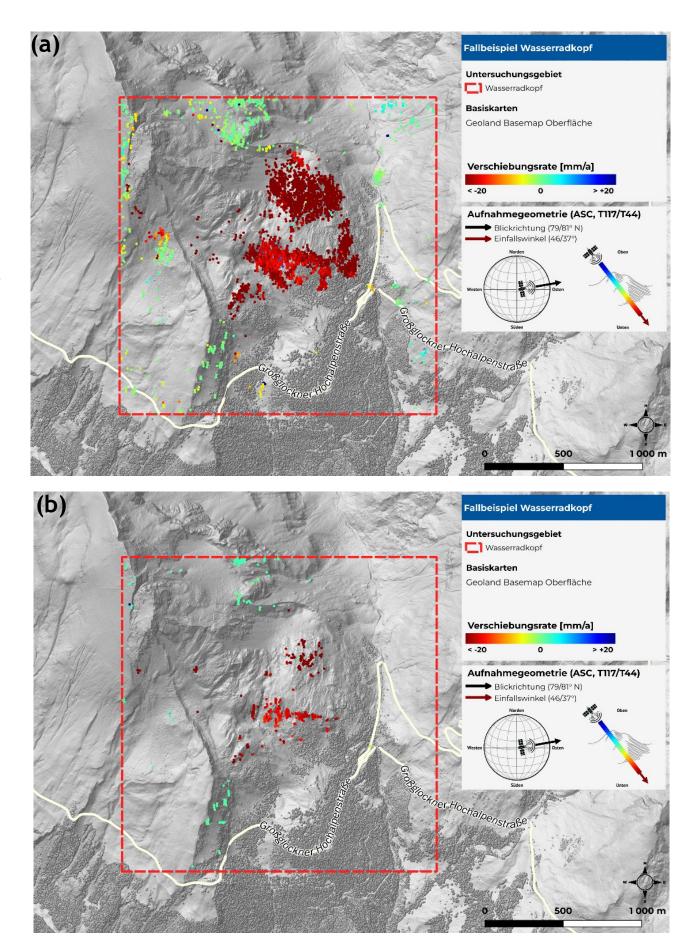


Abbildung 9: Vergleich Messpunktdichte von (a) SqueeSAR und (b) EGMS.

Tabelle 5: Verwendete Komplementärdaten.

Datensatz	Datum	Quelle		
DTM	2024	Geoland Basemap Gelände (BASEMAP.AT 2024)		
DSM	2024	Geoland Basemap Oberfläche (BASEMAP.AT 2024)		
EGMS	07.01.2019 - 18.12.2023	European Ground Motion Service (EGMS 2025)		
Orthofotos	2024	Geoland Basemap Orthofoto (BASEMAP.AT 2024)		
Fissurometer	2021 - 2023	GEORESEARCH Forschungsgesell- schaft mbH (GEORESEARCH 2024)		
Geologie - Tektonik	2021	Geodaten - Blatt 170 Galtür (1:50.000) (GBA 2021)		

7.2 Fallbeispiel Wasserradkopf

Die Felsgleitung am Wasserradkopf ist ein typisches Beispiel für die Herausforderungen bei der Überwachung gravitativer Massenbewegungen in hochalpinen Regionen. Die Hanginstabilität befindet sich an der Südostflanke des 3.032 m hohen Wasserradkopfes in der Glocknergruppe, eingebettet in eine von Gletschern und Permafrost geprägte Umgebung (Abbildung 10). Das Untersuchungsgebiet am Wasserradkopf wird von Gesteinen der Glocknerdecke aufgebaut. Hauptsächlich sind Kalkglimmerschiefer und Serpentinite der Bündnerschiefer-Gruppe aufgeschlossen, wobei erstere im Glockner-Deckensystem dominieren (Simma 2023). Die Felsgleitung wurde bereits 1934 als Bergsturz beschrieben: "Der bedeutendste ist der von dem S-Ende des Wasserradkopf-Kammes niedergebrochene, welcher das N-Gehänge des Mölltales ob Heiligenblut als 2 km langer Trümmerstrom (Serpentin und Kalkglimmerschiefer) bedeckt" (Cornelius and Clar 1934). Die Felsgleitung erstreckt sich über eine Fläche von ca. 3 km² und weist ein Volumen von mehreren Millionen m³ auf. Diese Hanginstabilität birgt aufgrund der darunter querenden Glockner Hochalpenstraße ein potenzielles Risiko für die Straßen-Infrastruktur.

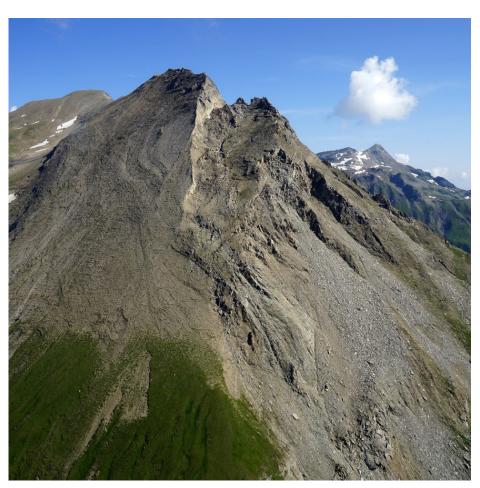


Abbildung 10: Wasserradkopf mit Blick Richtung Norden (Foto: 12.08.2020, Valentin, G.).

7.2.1 InSAR-Prozessierung

Für die Datenprozessierung wurden alle verfügbaren Satellitenbahnen (Tracks) aus der SNT-Mission verwendet und in aufsteigender (ASC) und absteigender (DSC) Geometrie verarbeitet. Die zeitliche Verteilung der Bildaufnahmen wird in Tabelle 6 und Abbildung 11 dargestellt, die räumliche Ausdehnung bzw. das Untersuchungsgebiet in Abbildung 12.

Satellit	Geo- metrie	Satelli- tenbahn	Blickrich- tung φ [° N]	Einfallswin- kel β [°]	# Bilder	Aufnahme- zeitraum
SNT	ASC	T117	79	46	116	05.10.2020 - 27.09.2023
SNT	ASC	T44	81	37	127	06.10.2020 - 27.09.2023
SNT	DSC	T95	282	39	122	04.10.2020 - 19.09.2023

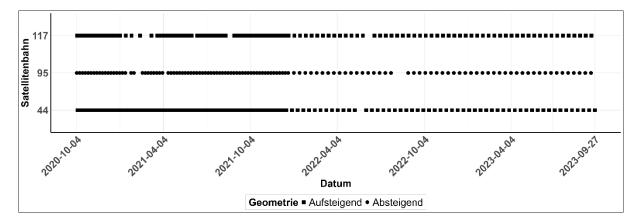


Abbildung 11 Aufnahmezeitraum und Geometrie (Aufsteigend = ASC, Absteigend = DSC) der verwendeten SNT-Satelliten am Wasserradkopf.

Die folgenden SqueeSAR-Analysen wurden für die ASC- und DSC-Geometrie durchgeführt:

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

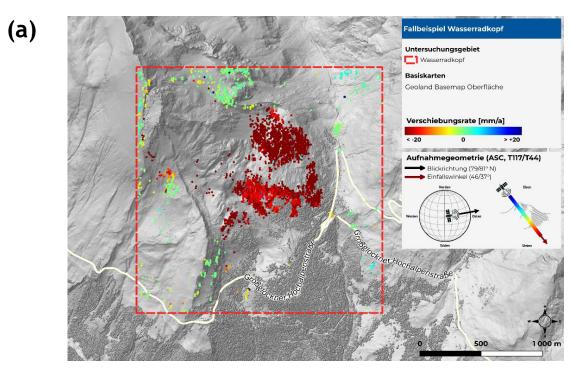
Insgesamt wurden mehr als 5.000 Messpunkte identifiziert mit einer Messpunktdichte von bis zu 514 MP/km². Die durchschnittliche Standardabweichung der Verschiebungsraten variiert zwischen 0,7 und 1,0 mm/a (*Tabelle 7*).

Tabelle 7: Anzahl Messpunkte (MP), MP-Dichte und Standardabweichung der analysierten InSAR-Datensätze.

Satellit	Geometrie	Satellitenbahn	MP [#]	MP/km ²	Ø St. Dev. [mm/a]
SNT	ASC	T117	1.846	462	1,0
SNT	ASC	T44	2.057	514	1,0
SNT	DSC	T95	1.755	439	0,7

7.2.2 InSAR-Verschiebungsraten und Bewegungsverhalten

Sowohl die LOS-Vektoren (ASC und DSC, Abbildung 12) als auch die vertikalen und horizontalen Vektoren des EGMS (Abbildung 13) zeigen signifikante Bewegungen, vorwiegend im Bereich oberhalb der Großglockner Hochalpenstraße. Die Messpunkte konzentrieren sich auf die Bereiche oberhalb der Waldgrenze. In den Waldgebieten selbst sind nur wenige Messpunkte vorhanden (Kapitel 3).



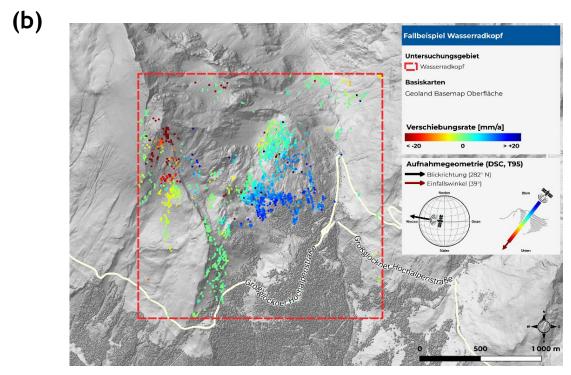
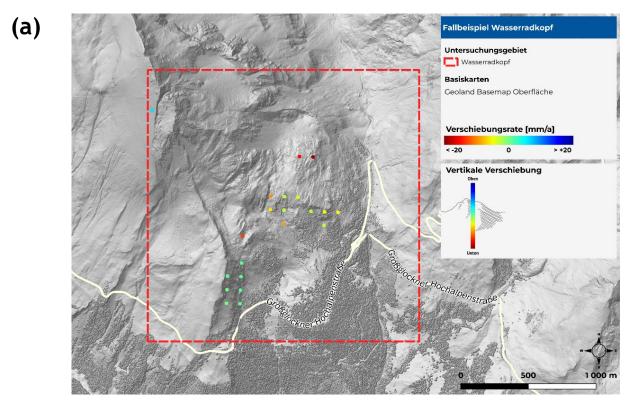


Abbildung 12: Verschiebungsraten (mm/a) in (a) ASC-Geometrie, (b) DSC-Geometrie an der Südostflanke des Wasserradkopfes.



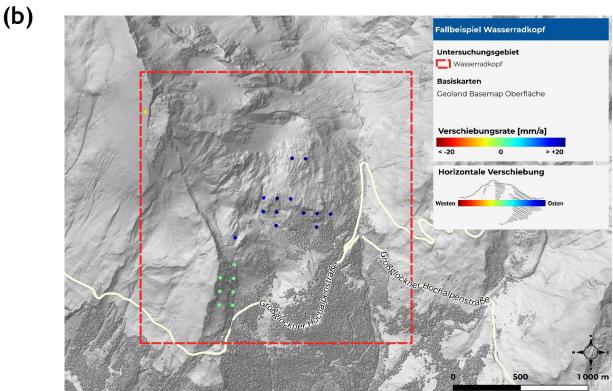


Abbildung 13: Verschiebungsraten (mm/a) in (a) vertikaler und (b) horizontaler Richtung an der Südostflanke des Wasserradkopfes.

Aufgrund der Südost-Exposition der untersuchten Hangflanke ist für die Bewegungsanalyse die ASC-Geometrie am besten geeignet. Die Sichtlinie (LOS) ist hangabwärts gerichtet und spiegelt somit sehr gut die tatsächliche Bodenbewegung wider. Für detaillierte Bewegungsanalysen wurden vier gleichgroße Fokusbereiche (A - D, 500 x 500 m) ausgewählt (Abbildung 14).

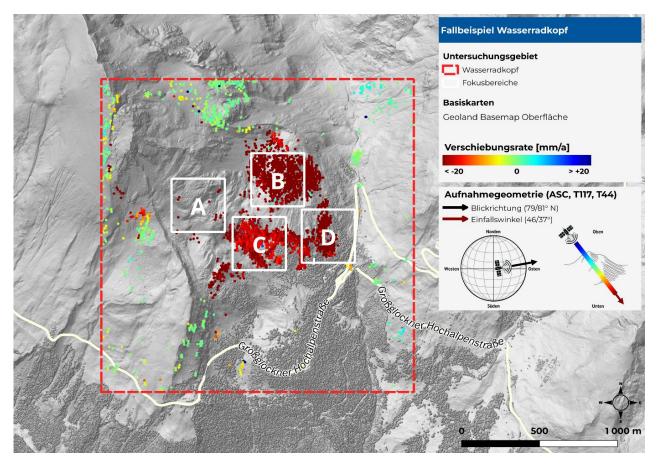


Abbildung 14: Verschiebungsraten in LOS (mm/a) der ASC-Geometrie mit Fokusbereichen A bis D $(wei\beta)$.

In Abbildung 14 sind beide analysierten Satellitenbahnen (T117, T44) dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Einfallswinkel (46/37°), werden für die nachfolgenden Detailanalysen (pro Fokusbereich) die Satellitenbahnen getrennt betrachtet. Insgesamt wurden 2.360 Messpunkte analysiert. Die maximale durchschnittliche Verschiebungsrate (-41,3 mm/a) wie auch die höchste Gesamtverschiebung (-123,7 mm) befindet sich im Fokusbereich A. Die Minima liegen im Fokusbereich C (Tabelle 8). Im Allgemeinen nehmen die Verschiebungen von A nach C (von oben nach unten) ab, in Fokusbereich D - unmittelbar oberhalb der Großglockner Hochalpenstraße - ist wieder eine Zunahme der Bewegungen erkennbar.

Tabelle 8: Gesamtverschiebung (mm) und Verschiebungsrate (mm/a) pro Fokusbereich im Messzeitraum Oktober 2020 bis September 2023. Rot: Maxima, grün: Minima.

Fokusbereich		Satelliten- bahn	Gesamtverschiebung [mm]			Verschiebungsrate [mm/a]		
Name	# MP		Ø	Max.	St. Dev.	Ø	Max.	St. Dev.
А	11	44	-115,0	-193,4	45,7	-39,5	-68,5	16,8
А	7	117	-123,7	-204,3	57,9	-41,3	-67,9	19,2
В	528	44	-79,5	-182,1	22,4	-27,4	-61,8	7,4
В	456	117	-78,9	-177,4	22,3	-27,4	-62,3	7,5
С	382	44	-50,8	-139,0	12,1	-17,7	-48,8	4,1
С	474	117	-57,2	-86,8	17,4	-18,9	-28,2	6,0
D	265	44	-99,3	-185,6	35,6	-33,8	-64,3	11,5
D	237	117	-101,8	-183,3	37,8	-33,1	-57,5	12,4

Die Fokusbereiche A-D sind durch kontinuierliche, gleichmäßige Bewegungsverhalten charakterisiert (Abbildung 15). Die hohen R²-Werte (0,99 - 1) und geringen RMSE-Fehler (1,1 - 2,76 mm) weisen auf eine hohe Modellgüte und Aussagekraft der Regressionsmodelle hin. Die Abweichungen der Verschiebungs-Zeitreihen zwischen den Satellitenbahnen ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Einfallswinkel zu erklären.

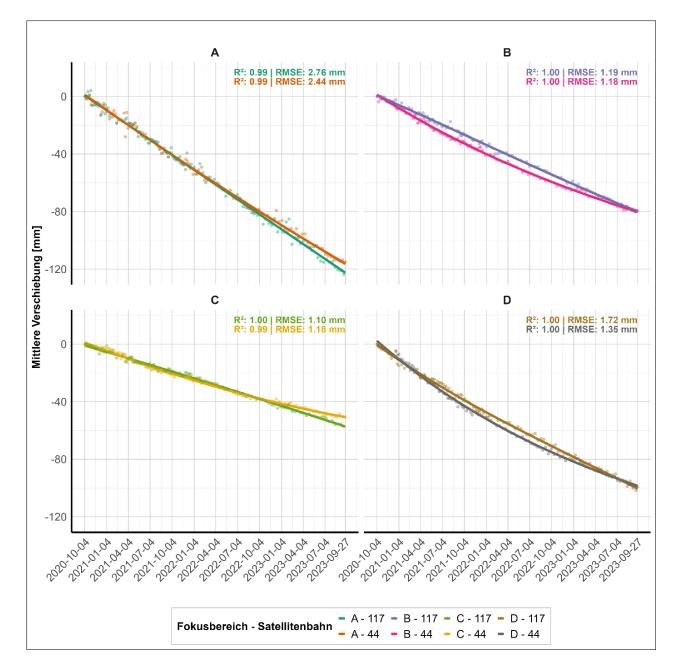


Abbildung 15: Verschiebungs-Zeitreihen für die Fokusbereiche A - D, aufgeteilt nach Satellitenbahn.

In den Waldbereichen im unteren Bereich des Wasserradkopfes ist die Messpunktdichte sehr gering (Abbildung 16, Gebiet A). Trotz guter Voraussetzungen für Radar-Reflexionen (wenig Vegetation, Oberflächenrauigkeit, keine Abschattungen) sind auch im oberen Bereich der Felsgleitung (Abbildung 16, Gebiet B), kaum Messpunkte vorhanden. Die wahrscheinlichste Ursache dafür sind zu große Verschiebungsraten, welche mit der gewählten Methodik (C-Band, Prozessierungs-Algorithmus) nicht detektierbar sind (Details dazu in Kapitel 5).

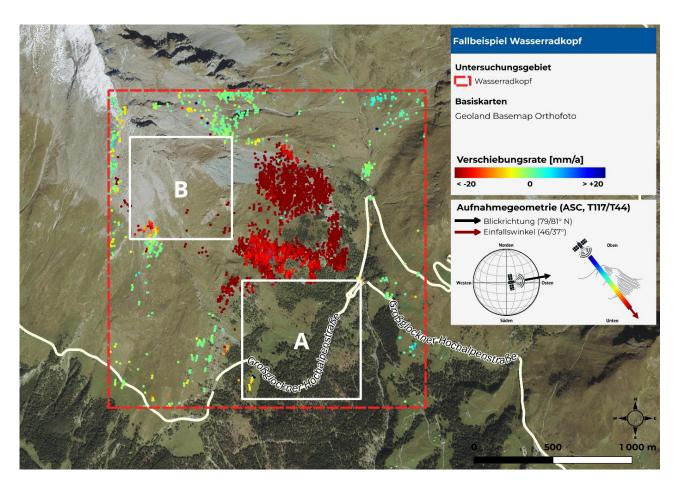


Abbildung 16: Geringe MP-Dichte in Gebieten mit hoher Vegetationsdichte (A) und zu schneller Bewegung (B).

7.2.3 Erkenntnisse

Mit Hilfe von InSAR-Daten können die Verschiebungsraten und das Bewegungsmuster der Felsgleitung am Wasserradkopf erfasst werden. Die großräumige Hanginstabilität zeigt im Wesentlichen ein lineares Bewegungsverhalten für den beobachteten Messzeitraum Oktober 2020 bis September 2023. Im Detail konnten vier Fokusbereiche mit unterschiedlichen Bewegungsraten analysiert werden. Limitationen bzw. geringe Messpunktdichten ergeben sich im oberster Bereich der Felsgleitung wahrscheinlich durch zu hohe Bewegungsraten und im unteren Bereich, wo der Wald keine Reflexionen der Radarwellen zulässt.

Folgende Erkenntnisse können angeführt werden:

- >2.000 InSAR-Messpunkte im Bereich der Felsgleitung.
- Bewegungsbereiche mit unterschiedlichen Bewegungsverhalten sind gut detektierbar.
- Der gesamte Bewegungsbereich ist mit Hilfe von Komplementärdaten wie zum Beispiel mit Schummerungskarten (Hillshades) gut abgrenzbar.
- Innerhalb weniger Zehnermeter lassen sich Bereiche unterschiedlicher Bewegungsraten erkennen.
- Es gibt kaum Messpunkte in Gebieten mit dichter Vegetation oder mit Bewegungsraten über 70 mm/a.

für qualitative Vergleiche mit InSAR Daten.

In der Gipfelregion des Kitzsteinhorns (Salzburg, Österreich) wurde seit 2010 ein Forschungsstandort für das Monitoring hochalpiner Klimawandelfolgen aufgebaut. Auf Grund der Höhenlage (Vergletscherung & Permafrost), der Topografie (isolierte Gipfelpyramide) und der Infrastruktur (Seilbahn) ist der Standort sehr gut für die Erforschung hochalpiner Umweltänderungen geeignet. Basierend auf der Beobachtung von Atmosphären-, Oberflächen- und Untergrundbedingungen werden
im "Open-Air-Lab Kitzsteinhorn" klimawandelinduzierte Veränderungen untersucht, stabilitätsrelevante Einflüsse erfasst und potenziell kritische Schwellenwerte identifiziert. Die Kombination
aus optimalen naturräumlichen Bedingungen (hochalpine Lage), modernster Messtechnik und guter
Erreichbarkeit bildet die Grundlage des Monitorings und trägt zu dessen Laborcharakter bei (GEORESEARCH 2024).

In diesem Projekt ist der nordexponierte, durch Permafrost beeinflusste Bereich der Gipfelstationsflanke auf rund 3.000 m Seehöhe von besonderem Interesse. Die Felsflanke besteht auf Kalkglimmerschiefern der Glocknerdecke, diese sind glazial überprägt und fallen hangparallel in Richtung Gletscherrandkluft ein. Durch die Erwärmung des Permafrosts nehmen die Druck- und Scherfestigkeiten des Gesteins ab und das Gebirge wird zunehmend geschwächt (ARGE ALP, 2020). Als Folge des Auftauens der gefrorenen Klüfte kommt es zu einer höheren Wasserdurchlässigkeit, flüssiges Wasser aus der Schneeschmelze und aus Niederschlägen kann verstärkt infiltrieren, was die Erwärmung im Gebirge beschleunigt und hydrostatische Drücke induziert. Im Jahr 2023 lag das Maximum der Permafrost-Auftaumächtigkeit bei 3,5 m. Trendanalysen zeigen eine mittlere Zunahme der maximalen Auftaumächtigkeit von 3 bis 5 cm pro Jahr. Aktuell liegen die Permafrost-Temperaturen knapp unter -1 °C, die Extrapolation der aktuellen Erwärmung lässt in den wärmeren Gebieten ein komplettes Auftauen des Permafrosts in den 2030er-Jahren erwarten. In den kühleren Gebieten (, z.B. N-Expositionen, höhere Lagen) ist dagegen mit Permafrost über das Jahr 2050 hinaus zu rechnen (GEORESEARCH 2024). Um sich an die schnell verändernden Bedingungen betrieblich gezielt anpassen zu können wurde ein umfangreiches geotechnisches Monitoring installiert. Für die systematische, flächendeckende Überwachung der Oberflächenveränderungen und Bewegungen werden Satelliten- und Drohnen-basierte Methoden wie InSAR, LiDAR (Light Detection and Ranging - Laserscanning) oder Photogrammetrie verwendet. Boden-gestütze Kluftweitenmessungen (Fissurometer) und Neigungsmesser (Tiltmeter) ergänzen punktuell die Fernerkundungsmessungen. Die Oberflächenmessungen werden mit Methoden zur Überwachung des Untergrunds ergänzt. Dazu gehören Bohrloch-basierte Temperatur-, Inklinometer- und Piezometer-Messungen, geophysikalische Methoden wie Geoelektrik und Seismik sowie dauerregistrierende Anker-Messge-

ber zur Messung von Ankerlasten (Abbildung 17). Besonders die vor Ort durchgeführten, vollautomatischen Kluftweitenmessungen (Schwingsaiten-Fissurometer) bieten eine gute Voraussetzung

34

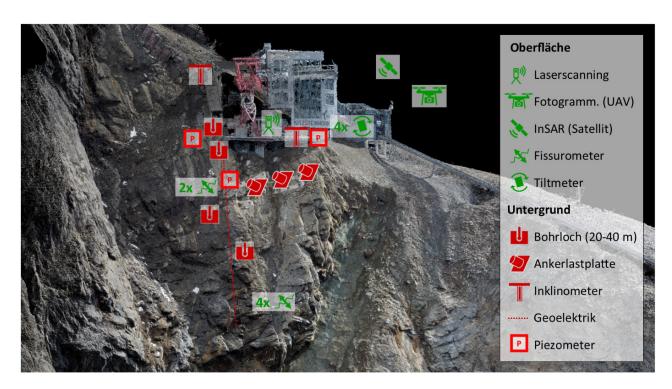


Abbildung 17: Oberflächennahes (grün) und unterirdisches (rot) Monitoring am Kitzsteinhorn.

7.3.1 InSAR-Prozessierung

Für die Datenprozessierung wurden alle verfügbaren Satellitenbahnen (Tracks) der SNT-Mission verwendet und in aufsteigender (ASC) und absteigender (DSC) Geometrie verarbeitet. Die zeitliche Verteilung der Bildaufnahmen wird in *Tabelle 9* und Abbildung 18 dargestellt.

Tabelle 9: Verwendete InSAR-Datensätze.

Satellit	Geo- metrie	Satelli- tenbahn	Blickrich- tung φ [° N]	Einfallswin- kel ß [°]	# Bilder	Aufnahme- zeitraum
SNT	ASC	T117	79	45	116	05.10.2020 - 27.09.2023 -
SNT	ASC	T44	81	36	127	06.10.2020 - 27.09.2023 -
SNT	DSC	T95	282	39	122	04.10.2020 - 19.09.2023 -

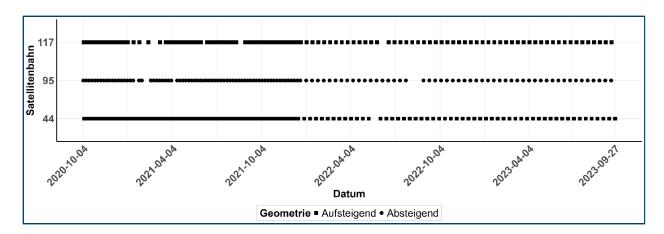


Abbildung 18: Aufnahmezeitraum und Geometrie (Aufsteigend = ASC, Absteigend = DSC) der verwendeten SNT-Satelliten.

Die folgenden SqueeSAR®-Analysen wurden für die ASC- und DSC-Geometrie durchgeführt:

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

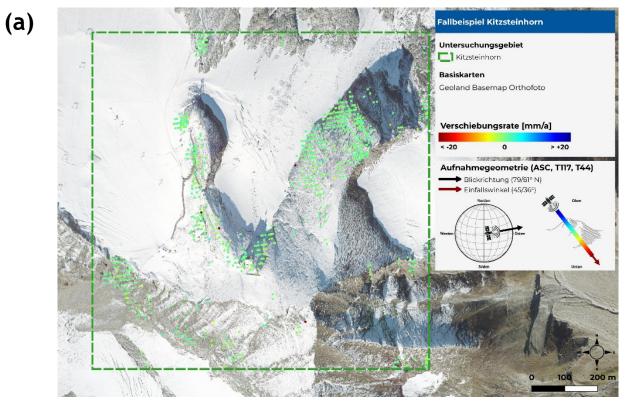
Insgesamt wurden mehr als 2.000 Messpunkte identifiziert mit einer Messpunktdichte von bis zu 1.072 MP/km². Die durchschnittliche Standardabweichung (Ø St. Dev.) der Verschiebungsraten variiert zwischen 1,2 und 2,7 mm/a.

Tabelle 10: Anzahl Messpunkte (MP), MP-Dichte und Standardabweichung der analysierten InSAR-Datensätze.

Satellit	Geometrie	Satellitenbahn	MP [#]	MP/km²	Ø St. Dev. [mm/a]
SNT	ASC	T117	789	789	2,7
SNT	ASC	T44	270	270	1,2
SNT	DSC	T95	1.072	1.072	1,6

7.3.2 InSAR-Verschiebungsraten und Bewegungsverhalten

Die LOS-Vektoren (ASC und DSC), wie auch die vertikalen und horizontalen Vektoren (West-Ost Ebene) des EGMS, zeigen keine großen Bewegungen im Bereich des Kitzsteinhorns (Abbildung 19, Abbildung 20). Die Messpunkte konzentrieren sich auf die eisfreien Felsbereiche und Bauwerke. Auf den Gletscheroberflächen selbst gibt es kaum Messpunkte, was auf das schnelle Abschmelzen der Gletscheroberfläche zurückgeführt werden kann.



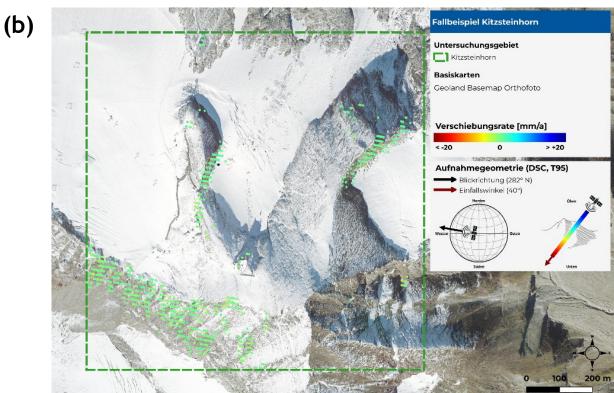
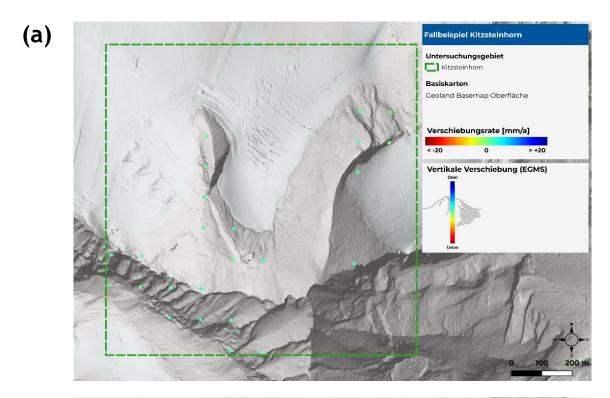


Abbildung 19: Verschiebungsraten der (a) ASC-, und (b) DSC-Geometrien.

38



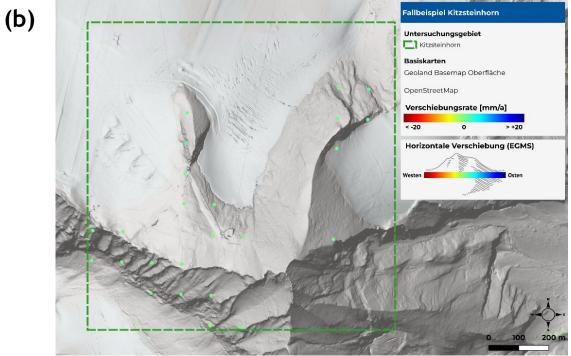


Abbildung 20: Verschiebungsraten in (a) vertikaler und (b) horizontaler Richtung.

Trotz ungünstiger Nord-Exposition der untersuchten Flanke zeigt besonders die ASC-Aufnahmegeometrie eine für die Analyse geeignete Messpunktdichte (Abbildung 19a). Da in vielen Bereichen entweder nur ASC- oder DSC-Messpunkte vorliegen, ist die Anzahl an vertikalen und horizontalen Vektoren begrenzt (Abbildung 20); diese werden in weiterer Folge nicht berücksichtigt. Für detaillierte Bewegungsanalysen wurde der Felsbereich unmittelbar unter der Gipfelstation ausgewählt (Abbildung 21, A). Bereiche mit Lockermaterialbedeckung wurden nicht betrachtet.

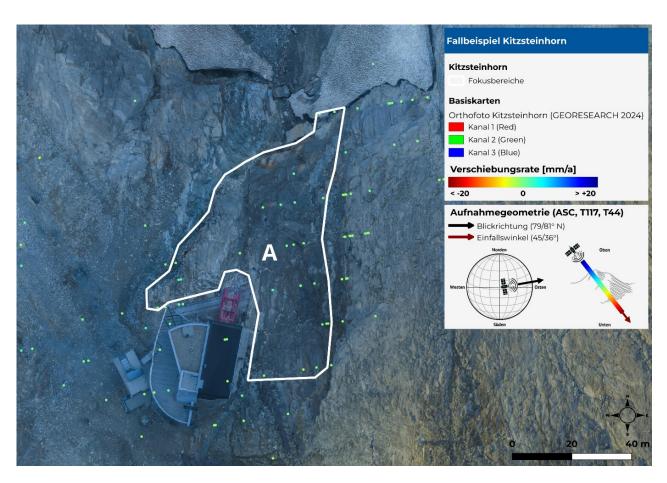


Abbildung 21: Verschiebungsraten am Kitzsteinhorn. Der Fokusbereich A (weiß) wurde für detaillierte Bewegungsanalysen ausgewählt.

In Abbildung 21 sind die Auswertungen beider Satellitenbahnen (117, 44) dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Einfallswinkel (45/36°), werden für die nachfolgenden Detailanalysen, die Satellitenbahnen getrennt betrachtet. Insgesamt wurden 25 Messpunkte analysiert. Die maximale durchschnittliche Verschiebungsrate beträgt 2,1 mm/a, die größte durchschnittliche Gesamtverschiebung erreicht 4,4 mm. Die meisten gemessenen Durchschnittswerte befinden sich innerhalb der Standardabweichungen, somit kann von keiner signifikanten Bewegung ausgegangen werden (Tabelle 11).

Tabelle 11: Gesamtverschiebung (mm) und Verschiebungsrate (mm/a) für den Fokusbereich (A) im Messzeitraum Oktober 2020 bis September 2023. Rot: Maxima.

Fokusbereich		Satelliten- bahn	Gesamtverschiebung [mm]			Verschiebungsrate [mm/a]		
Name	# MP		Ø	Max.	St. Dev.	Ø	Max.	St. Dev.
Α	3	44	4,4	10,1	5,0	2,1	2,6	0,6
Α	22	117	0,3	11,1	6,0	-0,3	-2,0	0,9

Die Analyse des Bewegungsverhaltens bestätigt einen kaum bewegten Untersuchungsbereich. Der Fokusbereich A zeigt abhängig von der Satellitenbahn entweder eine (i) geringe Verschiebungszunahme (Satellitenbahn 44, Abbildung 22) oder (ii) keine Verschiebung mit einer saisonunabhängigen, leichten Langzeit-Schwankung (Satellitenbahn 117). Bei lateralen Trends/Stagnationen führen bereits kleine Abweichungen von der Regressionsgeraden zu einem niedrigen R² (0,07 bzw. 0,18). Der höhere RMSE von 3,84 mm (Satellitenbahn 44) erklärt sich dadurch, dass beim RMSE durch die Quadrierung größere Messpunkt-Abweichungen stärker gewichtet werden.

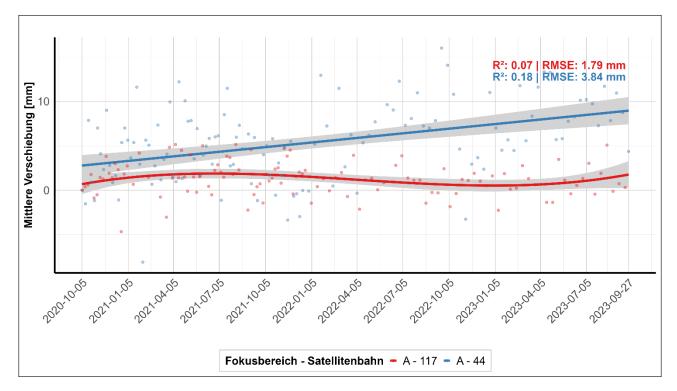


Abbildung 22: Verschiebungs-Zeitreihen inkl. Regressionsmodelle und deren Güte für den Fokusbereich A, aufgeteilt nach Satellitenbahn. Der graue Bereich um die Regressionsmodelle zeigt das 95% Konfidenzintervall.

7.3.3 Kombination von InSAR und geotechnische Messungen

Die Kombination von InSAR-Daten und geotechnischen Messungen liefert Einblicke in die Oberflächenbewegungen und geomechanischen Prozesse am Kitzsteinhorn. Eine direkte Validierung der InSAR-Daten durch Kluftweitenmessungen ist jedoch nicht möglich, da die Methoden unterschiedliche Messgrößen und räumliche Bezugssysteme verwenden. Während InSAR Bewegungen entlang der Sichtlinie (Line of Sight) des Satelliten misst, erfassen Fissurometer Veränderungen der Kluftweite in meist unterschiedlichen Richtungen.

Für die kombinierte Analyse werden daher jene Kluftweitenmessungen verwendet, die repräsentativ für eine hangabwärts gerichtete Bewegung sind. Die Kluftweitenänderungen im InSAR-Beobachtungszeitraum Oktober 2020 bis September 2023 bewegen sich im Bereich von 0,0 - 1,4 mm. Die Messgenauigkeit der Schwingsaiten-Fissurometer liegt im Sub-mm Bereich. Fissurometer 1 zeigt im Vergleich zu Fissurometer 2 und 3 eine ausgeprägte Saisonalität mit einer totalen Verschiebung von 0,7 mm und einer mittleren Verschiebungsrate von 0,2 mm/a.

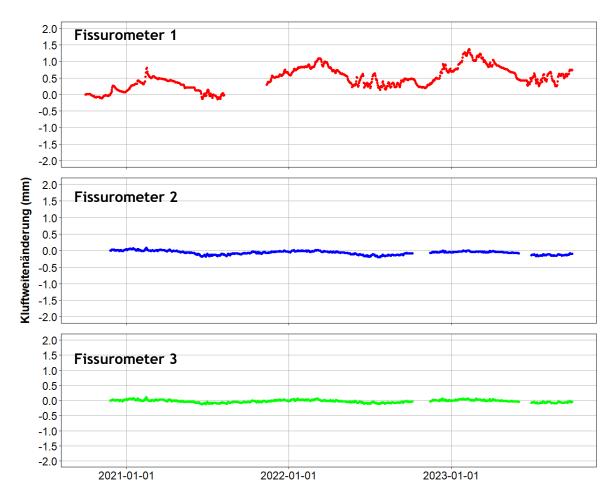


Abbildung 23: Kluftweitenänderungen im Zeitraum 01.10.2020 bis 30.09.2023.

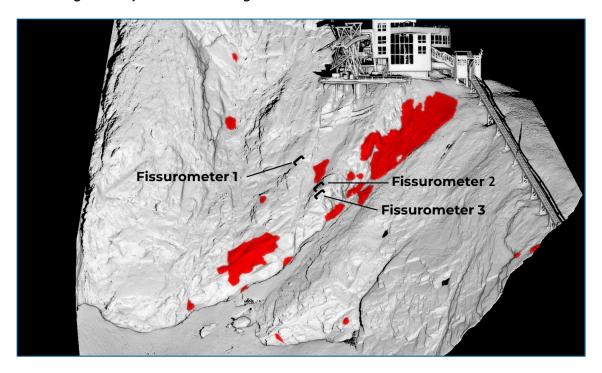


Abbildung 24: Lage der Fissurometer und Laserscan-Differenzanalyse (terrestrisch) für den Zeitraum 26.08.2020 bis 24.08.2023. Rote Flächen visualisieren Oberflächenänderungen durch Fels- und Lockermaterialablösungen.

Die Verschiebungsrate von Fissurometer 1 (0,2 mm/a), Fissurometer 2 und 3 (< 0,1 mm/a) ist in ähnlicher Größenordnung wie jene der InSAR-Messungen von -0,3 mm/a (Fokusbereich A, Satellitenbahn 117). Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Punktmessung am Fissurometer einem flächenhaften Durchschnitt (InSAR) gegenübergestellt wird. In Steinschlagablösebereichen sind aufgrund der großen Geländeveränderungen keine Messpunkte vorhanden (Abbildung 24).

Auf Grund der unterschiedlichen räumlichen Bezugssysteme - eine Absolutmessung (InSAR) wird einer Relativmessung (Fissurometer) gegenübergestellt - ist ein direkter Vergleich der Methoden, wie bereits oben erwähnt, nicht zulässig. Die hohe Ähnlichkeit der Werte liefert dennoch ein Indiz für die Validität der im Fallbeispiel Kitzsteinhorn analysierten InSAR-Daten. Das Fehlen signifikanter, irreversibler Kluftweitenänderungen an den drei Fissurometer-Standorten deutet punktuell auf stabile Felsverhältnisse hin. In Kombination mit den InSAR-Analysen konnten keine relevanten Felsbewegungen (z.B. Hinweise auf eine langsame Felsgleitung) detektiert werden.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass mögliche Abweichungen zwischen Fissurometer-Messungen (oder ähnlichen Insitu-Messungen) und InSAR-Auswertungen keinen Widerspruch bedeuten müssen. Eine in InSAR-Auswertungen gut sichtbare, großflächige und tiefgreifende Felsgleitung kann ohne maßgeblicher Bewegungen in oberflächennahen Klüfte ablaufen. Niedrige Fissurometer-Werte würden in diesem Fall hohen InSAR-Verschiebungen gegenüberstehen. Der Vergleich von Messwerten unterschiedlicher Bezugssysteme muss daher immer unter Berücksichtigung der lokalen, kinematischen Disposition erfolgen.

7.3.4 Erkenntnisse

In diesem Beispiel werden InSAR-Daten als komplementäre Daten zu boden-gebundenen geotechnischen Messungen verwendet. Während Kluftweitenmessungen nur punktuell möglich sind, decken InSAR-Messungen ganze Flächen ab. Dadurch besteht die Möglichkeit, punktuelle Informationen in größerem Kontext zu analysieren oder auch von der Fläche auf einen Punkt zu schließen. Folgende Erkenntnisse können angeführt werden:

- InSAR-Messpunkte existieren auch im Bereich einer nordexponierten, steilen Felsflanke.
- Der Vergleich von InSAR und punktuellen geotechnischen in-situ Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung.
- InSAR in Kombination mit in-situ Messungen (Multi-Methoden-Ansatz) ermöglicht Interpretationen auf größerer Skala.
- Spontane Gesteins-Ablösungen und schnelle Gletscherbewegungen können nicht detektiert werden.

7.4 Fallbeispiel Fluchthorn

Am 11.06.2023 ereignete sich am Südlichen Fluchthorn (Tirol) ein Bergsturz. Mit einem Volumen von mehr als 1 Mio. m³ und einer Auslauflänge von mehr als 2 km, ist dies eines der größten dokumentierten Bergsturz-Ereignisse in Österreich seit dem Bergsturz am Dobratsch im Jahr 1348. Das Südliche Fluchthorn liegt mit einer Höhe von nunmehr 3.396 Metern in der Silvretta-Gruppe. Geomorphologisch ist das Gebiet geprägt von steilen Felswänden, schroffen Graten und ausgeprägten Gletscher-Karen, die durch die letzte Kaltzeit stark überprägt wurden. Der 400 m hohe Gipfelbereich besteht hauptsächlich aus Orthogneisen (Silvretta Decke), welcher auf weicheren Bündner Schiefern in den Wandfußbereichen und Karen aufliegt (Engadiner Decke). Bis auf vereinzelte Steinschläge, im Vorfeld des Bergsturzes, waren keine größeren Felsbewegungen bekannt. Das Hauptziel dieser Studie war es, mögliche Felsbewegungen vor dem Ereignis zu detektieren und deren Bewegungsmuster zu analysieren.

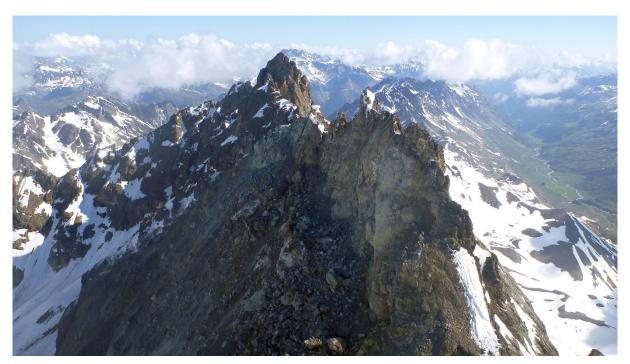


Abbildung 25: Kollabierter Gipfel des Südlichen Fluchthorns (Foto: 12.06.2023, Land Tirol).

7.4.1 InSAR-Prozessierung

Für die Datenprozessierung wurden alle verfügbaren Satellitenbahnen (Tracks) aus der SNT-Mission verwendet und in aufsteigender (ASC) und absteigender (DSC) Geometrie verarbeitet. Die dreijährige Datenreihe endet unmittelbar vor dem Bergsturz-Ereignis. Die zeitliche Verteilung der Bildaufnahmen wird in Tabelle 12 und Abbildung 26 dargestellt.

Tabelle 12: Verwendete InSAR-Datensätze.

Satellit	Geo- metrie	Satelli- tenbahn	Blickrich- tung φ [° N]	Einfallswin- kel ß [°]	# Bilder	Aufnahme- zeitraum
SNT	ASC	T117	79	34	128	01.06.2020 - 04.06.2023
SNT	ASC	T15	80	44	137	06.06.2020 - 09.06.2023
SNT	DSC	T66	281	31	134	04.06.2020 - 01.06.2023
SNT	DSC	T168	280	41	131	05.06.2020 - 08.06.2023

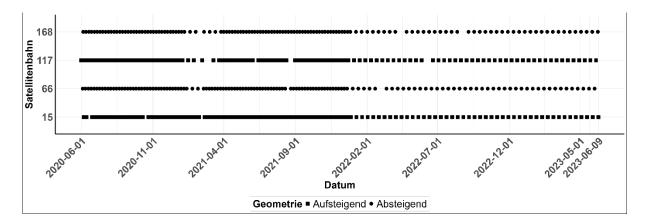


Abbildung 26: Aufnahmezeitraum und Geometrie (Aufsteigend = ASC, Absteigend = DSC) der verwendeten SNT-Satelliten.

Die folgenden SqueeSAR-Analysen wurden für die ASC- und DSC-Geometrie durchgeführt:

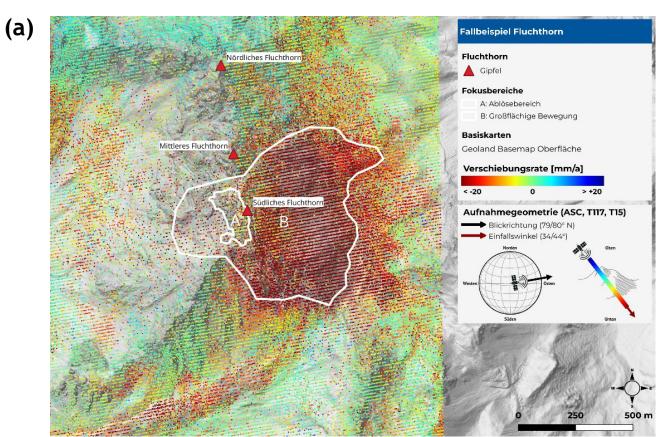
- Bestimmung der Messpunkte an der Erdoberfläche: Identifikation permanenter (PS) und verteilter Rückstreuer (DS).
- Berechnung der jährlichen Verschiebungsrate: Für jeden PS und DS in [mm/a] entlang der Satelliten-Blickrichtung (LOS).
- 2D-Dekomposition der horizontalen (West Ost) und vertikalen Verschiebungsrate: Für jeden PS und DS in [mm/a].
- Ermittlung der Verschiebungs-Zeitreihe: Für jeden PS und DS entlang der LOS in [mm].

Aus den mehr als 400.000 identifizierten Messpunkten resultierte eine Messpunktdichte von bis zu 19.257 MP/km². Die durchschnittliche Standardabweichung der Verschiebungsraten variiert zwischen 6,6 und 10,9 mm/a.

Satellit	Geometrie	Satellitenbahn	MP [#]	MP/km²	Ø St. Dev. [mm/a]
SNT	ASC	T117	96.867	16.145	10.9
SNT	ASC	T15	122.175	18.235	7.3
SNT	DSC	T66	106.662	15.919	6.1
SNT	DSC	T168	129.022	19.257	6.6

7.4.2 InSAR-Verschiebungsraten und Bewegungsverhalten

Beide LOS-Vektoren (ASC und DSC) sowie die vertikalen und horizontalen Vektoren (West-Ost Ebene), zeigen vor dem Bergsturz großflächige Bewegungen im Bereich um das Südliche Fluchthorn. Die Messpunkte konzentrieren sich auf den anstehenden Felsen und auf die schuttbedeckten Eisflächen. Aufgrund der hohen MP-Dichte in den ASC- und auch den DSC-Geometrien konnten mittels 2D-Dekomposition vertikale und horizontale Verschiebungen mit einer hohen MP-Dichte generiert werden. Dazu wurden alle Satellitenbahnen verwendet, nach Geometrie gemittelt und auf Basis eines 20 x 20 m Rasters die Vektor-Berechnungen durchgeführt.



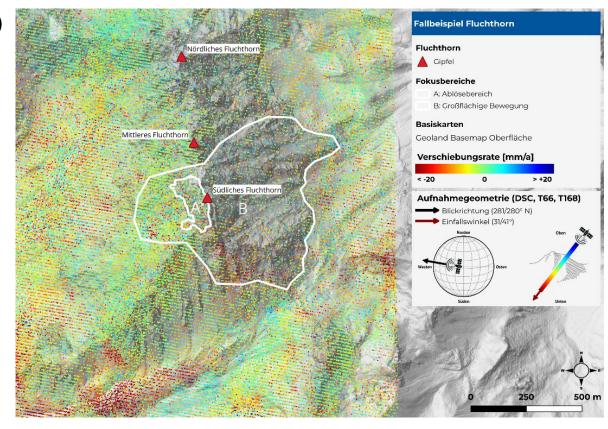
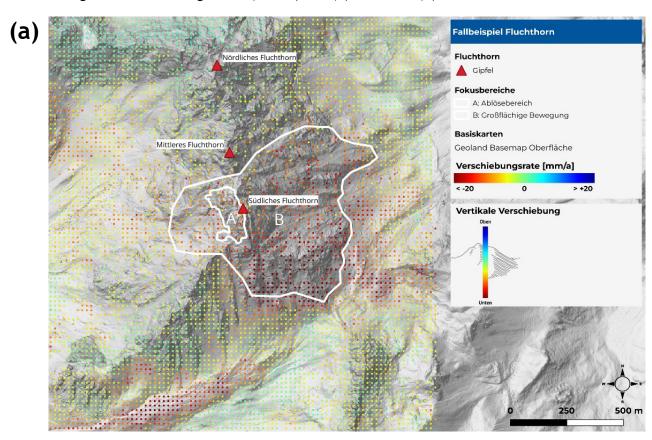


Abbildung 27: Verschiebungsraten (mm/a) der (a) ASC- und (b) DSC-Geometrien.



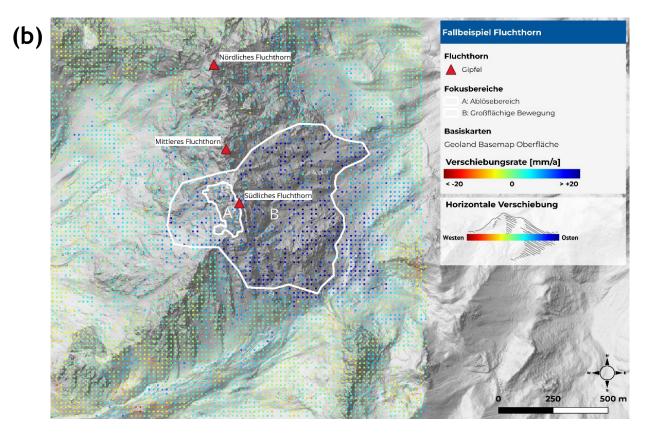


Abbildung 28: Verschiebungsraten (mm/a) in (a) vertikaler und (b) horizontaler Richtung.

Auffallend sind die großflächigen Bodenbewegungen im Bereich des Südgipfels (Fokusbereich B) mit einer durchschnittlichen Verschiebungsrate von bis zu -28,1 mm/a und einer durchschnittlichen Gesamtverschiebung von bis zu -82,6 mm (ASC Geometrie). Um Ungenauigkeiten durch die Lockermaterialbedeckung zu vermeiden wurde dieser Bereich anhand sichtbarer Felsbereiche ausgegrenzt. Im Bereich des Bergsturz-Ablösebereichs (Fokusbereich A) wurde ein ähnliches Verschiebungsmuster aber mit geringeren Werten festgestellt (Tabelle 14).

Tabelle 14: Gesamtverschiebung (mm) und Verschiebungsrate (mm/a) pro Fokusbereich im Messzeitraum Juni 2020 bis Juni 2023. Rot: Maxima, grün: Minima.

Fokusbereich		Satelliten- bahn	Gesamtverschiebung [mm]			Verschiebungsrate [mm/a]		
Name	# MP		Ø	Max.	St. Dev.	Ø	Max.	St. Dev.
Α	384	15	-23.4	-87.5	20.6	-7.8	-26.4	6.9
Α	105	66	-19.2	-84.0	19.1	-5.6	-25.3	5.9
Α	66	117	-70.2	-137.1	24.2	-24.6	-44.4	8.0
Α	496	168	0.0	-56.0	20.9	-2.7	-20.7	6.3
В	10860	15	-40.2	-135.7	24.9	-13.9	-45.4	8.2
В	2558	66	-15.2	-90.8	20.1	-3.7	-26.6	6.7
В	10557	117	-82.6	-188.6	29.3	-28.1	-63.2	9.6

В	4426	168	-2.9	-75.2	21.0	-3.6	-30.0	6.4
Α	29	vertikal	-28.0	-41.0	7.4	-11.3	-14.6	2.4
Α	29	horizontal	25.5	42.5	10.5	9.3	15.1	3.3
В	496	vertikal	-37.6	-92.8	16.1	-14.3	-32.2	5.4
В	496	horizontal	36.0	72.6	12.9	13.5	24.5	4.5

Die Bewegungen sind in beiden Fokusbereichen vorwiegend nach Osten bzw. vertikal nach unten gerichtet. Die aus der ASC- und DSC-Geometrie erzeugten vertikalen und horizontalen Verschiebungsvektoren (insgesamt 525 Messpunkte) zeigen im Gipfelbereich (Fokusbereich A und B) folgendes: Eine mittlere vertikale Verschiebungsrate von -14,3 mm/a und eine mittlere horizontale Rate von 13,5 mm/a. Die max. Setzung beträgt -32,2 mm/a und die max. Bewegung in Richtung Osten 24,5 mm/a. Die Ablösung des Bergsturzes erfolgte interessanterweise in Richtung Westen, wobei keine auffälligen Verschiebungen in diese Richtung, auch nicht in der DSC-Geometrie (Satellitenbahnen 168, 66), feststellbar sind (Abbildung 29).

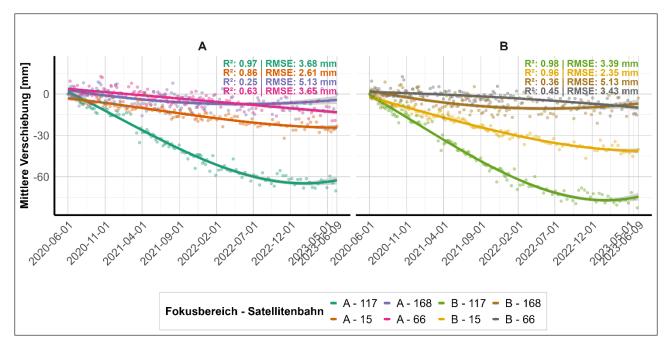


Abbildung 29: Verschiebungs-Zeitreihen inkl. Regressionsmodelle und deren Güte für den Fokusbereich A und B, aufgeteilt nach Satellitenbahn. Der graue Bereich um die Regressionsmodelle zeigt das 95% Konfidenzintervall.

Alle zeitlichen Bewegungsverhalten in LOS (Abbildung 29), horizontaler und vertikaler Richtung (Abbildung 30) sind ungleichmäßig bzw. nicht linear. Eine Abnahme der horizontalen wie vertikalen Bewegung ist spätestens mit September/Oktober 2022 zu erkennen, viele Monate vor dem Bergsturz im Juni 2023 (Abbildung 30).

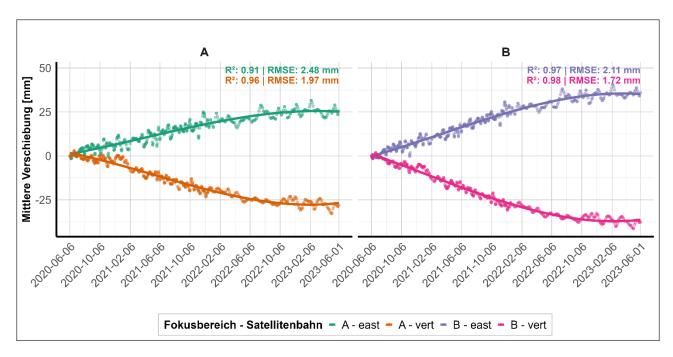
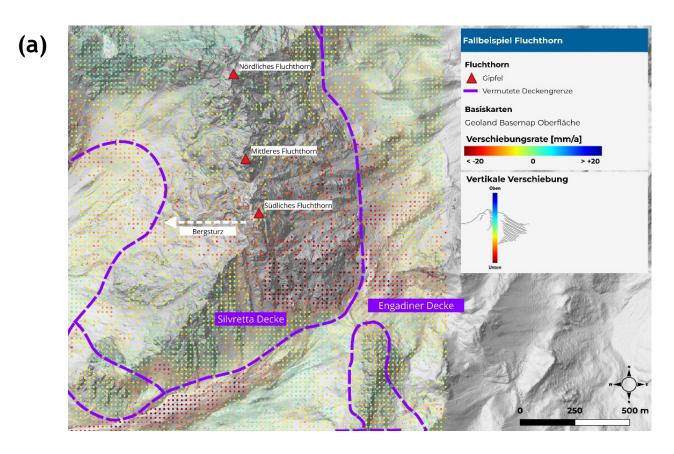


Abbildung 30: Bewegungsverhalten in vertikaler und horizontaler Richtung für die Fokusbereiche A und B.

7.4.3 Kombination von InSAR und Strukturgeologie

In Kombination der InSAR-Daten mit strukturgeologischen Informationen zeigt sich, dass die detektierten Verschiebungen hauptsächlich an die "harten" Orthogneise der Silvretta Decke gebunden sind, die auf den "weichen" Bündner Schiefern der Engadiner Decke aufliegen (Abbildung 31).



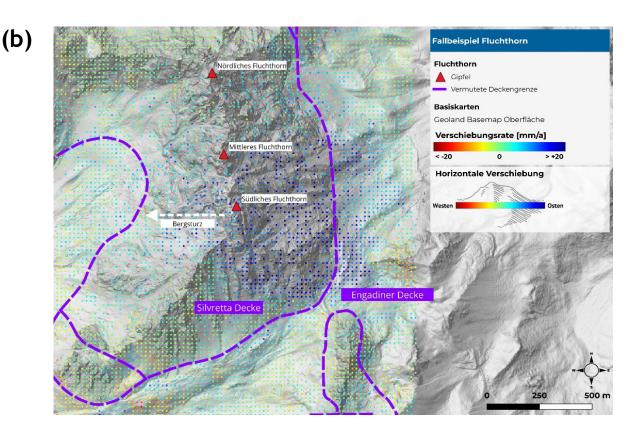


Abbildung 31: Vertikale (a) und horizontale Verschiebungen (b) im Bereich der vermuteten Deckgrenze zwischen Silvretta Decke und Engadiner Decke (GBA 2021). Weißer Pfeil: Richtung des Bergsturzes.

7.4.4 Erkenntnisse

In diesem Beispiel werden InSAR-Daten zur nachträglichen Analyse eines Bergsturzes verwendet. Um potenzielle Versagensmechanismen bereits im Vorfeld detektieren zu können ist eine dreijährige SAR-Datenreihe verwendet worden. Folgende Erkenntnisse können angeführt werden:

- Tausende InSAR-Messpunkte im Bereich eines hochalpinen Berggipfels.
- Die vertikalen und horizontalen Verschiebungsvektoren zeigen großflächige Verschiebungen am Südlichen Fluchthorn.
- Die Hauptbewegung ist nach Osten gerichtet.
- Das Bewegungsverhalten ist gut detektierbar, Monate vor dem Bergsturz ist eine Bewegungsabnahme bzw. ein Stillstand erkennbar.
- Die Kombination mit strukturgeologischen Daten ermöglicht eine Modellannahme des Versagensmusters: "Harte Orthogneise" der Silvretta Decke bewegen sich auf "weichen" Bündner Schiefern der Engadiner Decke.

8 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Studie verdeutlicht die Eignung der InSAR-Technologie als Instrument zur Überwachung hochalpiner gravitativer Massenbewegungen. Besonders hervorzuheben ist die Fähigkeit, Bewegungen mit millimetergenauer Präzision großflächig und kontinuierlich zu detektieren. Bei geeigneten Rahmenbedingungen kann InSAR eine wertvolle Grundlage für die Erkennung und Beurteilung hochalpiner Prozesse liefern und in Zukunft eine zentrale Rolle im Risikomanagement und bei der Entwicklung von innovativen Frühwarnsystemen spielen.

Bei den Fallbeispielen Wasserradkopf und Fluchthorn konnten deutliche Bewegungen mit z.T. unterschiedlichen Verhalten detektiert und analysiert werden. Am Kitzsteinhorn lassen die InSAR-Daten "stabile" Felsverhältnisse vermuten. Der Einsatz von InSAR in Kombination mit bodengestützten, geotechnischen Messungen oder anderen komplementären Daten erhöht das Anwendungspotenzial, schafft eine robuste Datenbasis und unterstützt die Interpretation von Massenbewegungen.

Die Ergebnisse zeigen aber auch methodische Limitationen. Die wichtigsten sind: (i) Die Messpunktdichte ist in dichten Vegetationszonen und auf stark dynamischen Oberflächen wie Schnee und Eis reduziert. (ii) Abrupte, schnelle Bewegungen führen zu Phasensprüngen, die die Analyse erschweren bzw. unmöglich machen.

Die Weiterentwicklung der InSAR-Technologie und die Einführung neuer Satelliten mit höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung werden die Anwendungsmöglichkeiten in der Zukunft maßgeblich erweitern. Die zunehmende Automatisierung der Datenanalyse durch künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen wird die Effizienz und Genauigkeit bei der Erkennung von Bewegungsmustern signifikant steigern. Zudem bieten künftige Vernetzungen von Sensoren und Messinstrumenten vielversprechende Perspektiven für eine noch genauere Erfassung und Validierung der Daten. Der Trend und Forschungsbedarf gehen in Richtung "Echtzeit"-Überwachung und dynamischer Frühwarnsysteme, welche die Möglichkeit bieten, rechtzeitig eine Alarmierung auszulösen.

Dieses Projekt unterstreicht zusammenfassend das Potenzial von InSAR, als integraler Bestandteil eines modernen, datenbasierten Risikomanagements zu fungieren. Die fortlaufende Anpassung an technologische Fortschritte und die Verstärkung interdisziplinärer Kooperationen werden sicherstellen, dass diese Technologie in Zukunft einen Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen durch den Klimawandel leistet.

52

9 Publikationen im Rahmen dieses Projekts

Gerstner, R., Keuschnig M., Severin, S., Valentin, G., Goldschmidt, F., Zangerl, C. (2025): Deconstructing the Wasserkopf rockslide. (Austrian Journal of Earth Science) - in submission.

Krautblatter, M., Weber, S., Dietze, M., Keuschnig, M., Stockinger, G., Brückner, L., Beutel, J., Figl, T., Trepmann, C., Hofmann, R., Rau, M., Pfluger, F., Barbosa Mejia, L., and Siegert, F. (2025): The Fluchthorn massive permafrost rock slope failure. (Nature Communications) - in submission.

Otto, J.-C., Schroeckh, T. R., and Keuschnig, M. (2025): Assessing rock glacier activity in the Austrian Alps using radar interferometry and image correlation techniques. (Geomorphology) - in subsmission.

Krautblatter, M., Weber, S., Dietze, M., Keuschnig, M., Stockinger, G., Brückner, L., Beutel, J., Figl, T., Trepmann, C., Hofmann, R., Rau, M., Pfluger, F., Barbosa Mejia, L., and Siegert, F. (2024): The 2023 Fluchthorn massive permafrost rock slope failure analysed, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14-19 Apr 2024, EGU24-20989, https://doi.org/10.5194/egushere-egu24-20989, 2024.

Otto, J.-C., Schroeckh, T. R., and Keuschnig, M. (2024): Assessing rock glacier activity in the Austrian Alps using radar interferometry and image correlation techniques, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14-19 Apr 2024, EGU24-13150, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-13150, 2024.

Gerstner, R., Frießenbichler, M., Avian, M., Maschler, A., Fey, C., Valentin, G., Keuschnig, M., Mair, V., Goldschmidt, F., and Zangerl, C. (2024): High-alpine rock slides controlled by pre-existing geological structures and brittle rock mass fracturing, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14-19 Apr 2024, EGU24-1670, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-1670, 2024.

Gerstner, R., Severin, S., Valentin, G., Keuschnig, M., Goldschmidt, F., Zangerl, C. (2023): Internal deformation of an active, deep-seated, multi-slab rock slide and its control on secondary rock fall processes - case and numerical modelling study of the Wasserradkopf rock slide, 6th World Landslide Forum, Nov 14-17, Florence, Italy, 2023.

Keuschnig M., Markus D., Hartmeyer I. (2022): Satellite-based detection of ground motion for monitoring torrent catchments and protective structures. Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering, 86. Jahrgang, Heft Nr. 190, 78 - 86, ISBN: 978-3-9504924-4-6.

Literatur

APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Edited by Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Wien, Österreich.

AUGMENTERRA (2024): InSAR Handbook. AUGMENTERRA Company. Puch bei Hallein, Österreich.

ARGE ALP (2020): Der Einfluß von Gletscher-Randklüften auf Felsstürze. Land Salzburg, p.58. www.salzburg.gv.at/randkluefte.pdf

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

BASEMAP.AT (2024): Austrian OGD basemap. Raster Interface WMTS. Edited by Stadt Wien und Österreichische Länder bzw. Ämter der Landesregierung (Vienna city administration and Austrian province governments). Available online at https://basemap.at/en/, checked on 11/30/2024.

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

Bonzanigo L.; Eberhardt E.; Loew S. (2007): Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Part I. Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide. Can Geotech J 44:1157-1180. https://doi.org/10.1139/T07-043

Brideau MA.; Stead D.; Kinakin D.; Fecova K. (2005): Infuence of tectonic structures on the Hope Slide, British Columbia, Canada. Eng Geol 80:242-259. https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2005.05.004

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

Cornelius, H. P.; Clar, E. (1934): Erläuterungen zur geologische Karte des Großglocknergebietes 1:25.000. Augenommen im Auftrage des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins. Edited by Geologische Bundesanstalt (GBA). Wien.

Crosta GB.; Agliardi F. (2003): Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. Can Geotech J 40(1):176-191. https://doi.org/10.1139/t02-085

Cruden DM.; Varnes DJ. (1996): Landslide types and processes. In: Tuner AK.; Schuster RL. (eds) Landslides: Investigation and Mitigation, vol 247. Transportation Research Board Special Report, pp 36-75

EGMS (2024): European Ground Motion Service. European Environment Agency. Available online at https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service, updated on 1/30/2025, checked on 1/30/2025.

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

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

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

GAPHAZ (2017): Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions - Technical Guidance Document. Edited by Allen, S., Frey, H., Huggel, C. Standing Group on Glacier and Permafrost Hazards in Mountains (GAPHAZ) of the International Association of Cryospheric Sciences (IACS) and the International Permafrost Association (IPA). Zurich, Switzerland / Lima, Peru.

GBA - Geologische Bundesanstalt Österreich (2021): TETHYS - Research Data Repository. Geodaten - Blatt 170 Galtür (1:50.000). Edited by Geologische Bundesanstalt (GBA). Wien. Available online at https://doi.tethys.at/10.24341/tethys.80, updated on 12/18/2024, checked on 1/30/2025.

GEORESEARCH (2024): Open Air Lab Kitzsteinhorn. Available online at https://www.georesearch.ac.at/de/home-de/open-air-lab-kitzsteinhorn-de/, checked on 11/6/2024.

Haeberli, Wilfried; Whiteman, C. A.; Shroder, John F. (2021): Snow and ice-related hazards, risks, and disasters. Second edition. Amsterdam: Elsevier.

Hartmeyer, I.; Delleske, R.; Keuschnig, M.; Krautblatter, M.; Lang, A.; Schrott, L.; Otto, J.-C. (2020): Current glacier recession causes significant rockfall increase: The immediate paraglacial response of deglaciating cirque walls. In Earth Surface Dynamics Discussions 2020, pp. 1-25. DOI: 10.5194/esurf-2020-8.

Heim A. (1932): Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich. Fretz and Wasmuth, p 218.

Helmstetter A.; Sornette D.; Grasso JR.; Andersen JV.; Gluzman S.; Pisarenko V. (2004): Slider block friction model for landslides: application to Vajont and La Clapière landslides. J Geophys Res 109(B02409):1-15. https://doi.org/10.1029/2002JB002160

Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L.; 2014. The Varnes Classification of landslide types, an update. Landslides 11, 167-194. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y

IPCC (2018): Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

IPCC (2019): High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

Kalenchuk K. (2010): Multi-dimensional analysis of large, complex slope instability. Queen's University, p 412 (Doctoral thesis)

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

Kilburn CR.; Petley DN. (2003): Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy. Geomorphology 54(1-2):21-32. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00052-7

Krautblatter, Michael; Funk, Daniel; Günzel, Friederike K. (2013): Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space. In Earth Surf. Process. Landforms 38 (8), pp. 876-887. DOI: 10.1002/esp.3374.

Leinauer, Johannes; Weber, Samuel; Cicoira, Alessandro; Beutel, Jan; Krautblatter, Michael (2023): An approach for prospective forecasting of rock slope failure time. In Commun Earth Environ 4 (1). DOI: 10.1038/s43247-023-00909-z.

Lieb, Gerhard Karl; Bauer, Christian (2022): Dobratsch: Landslides and Karst in Austria's Southernmost Nature Park. In Christine Embleton-Hamann (Ed.): Landscapes and Landforms of Austria. With assistance of Christine Embleton-Hamann. Cham: Springer (World Geomorphological Landscapes), pp. 445-455.

Marte, R.; Keschnig, M.; Neureiter, P.; Ramoser, H.; Valentin, G. (2024): Exploring the integration of InSAR data into climate-driven creep models to assess slow-moving landslide dynamics. Geomechanics and Tunnelling 17, No. 5, pp. 518-526. https://doi.org/10.1002/geot.202400037

Mergili, M.; Jaboyedoff, M.; Pullarello, J.; Pudasaini, S. P. (2020): Back calculation of the 2017 Piz Cengalo-Bondo landslide cascade with r.avaflow: what we can do and what we can learn. In Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 20 (2), pp. 505-520. DOI: 10.5194/nhess-20-505-2020.

Olefs, M.; Formayer, H.; Gobiet, A.; Marke, T.; Schöner, W.; Revesz, M. (2021): Past and future changes of the Austrian climate - Importance for tourism. In Journal of Outdoor Recreation and Tourism, p. 100395. DOI: 10.1016/j.jort.2021.100395.

Rechberger C.; Fey C.; Zangerl C. (2021): Structural characterisation, internal deformation and kinematics of an active deep-seated rock slide in a valley glacier retreat area. Eng Geol 286:106048. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106048

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

Simma, S. J. (2023): Ingenieurgeologische Erkundung, Deformations- und Prozessanalyse einer tiefgrundigen Felsgleitung in hochalpiner Umgebung (Wasserradkopf, Nationalpark Hohe Tauern). Master Thesis. Universität Wien, Wien.

Solari, Lorenzo; Del Soldato, Matteo; Raspini, Federico; Barra, Anna; Bianchini, Silvia; Confuorto, Pierluigi et al. (2020): Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy. In Remote Sensing 12 (8), p. 1351. DOI: 10.3390/rs12081351.

Strouth A.; Eberhardt E. (2009): Integrated back and forward analysis of rock slope stability and rockslide runout at Afternoon Creek, Washington. Can Geotech J 46(10):1116-1132. https://doi.org/10.1139/T09-048 TRE ALTAMIRA (2024): TRE ALTAMIRA. Company. TRE ALTAMIRA. Available online at https://site.tre-altamira.com/, updated on 8/16/2024, checked on 16.08.202429.01.2024.

Valentin, G. (2021): Felsstürze im Bundesland Salzburg, Großes Wiesbachhorn, Bambachkopf to M. Keuschnig. Salzburg, 2021.

Zangerl, C.; Eberhardt, E.; Perzlmaier, S. (2010): Kinematic behaviour and velocity characteristics of a complex deep-seated crystalline rockslide system in relation to its interaction with a dam reservoir. In Engineering Geology 112 (1), pp. 53-67. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.01.001.

Zangerl C.; Fey C.; Prager C. (2019): Deformation characteristics and multi-slab formation of a deep-seated rock slide in a high alpine environment (Bliggspitze, Austria). Bull Eng Geol Environ 78:6111-6130. https://doi.org/10.1007/s10064-019-01516-z

Abbildungen

Abbildung: Auswahl historischer und aktueller SAR-Satelliten inklusive Wiederkehrzeit (revisting time) und Frequenzbändern (TRE ALTAMIRA, 2024)10
Abbildung 2: Aufsteigende (ascending - ASC) und absteigende (descending - DSC) Geometrie (TRE ALTAMIRA, 2024)
Abbildung 3: Einfallswinkel und Sichtlinie (LOS)13
Abbildung 4: Beispielhafte Projektion von realen Bodenbewegungen D _{real} auf die Sichtlinie D _{LOS} (TRE ALTAMIRA, 2024)
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Funktionsweise von InSAR (Interferometrisches SAR). Die Phasenverschiebung ($\Delta r=R_2-R_1$) ergibt sich aus der Phaseninformation (R) von zwei oder mehreren Bildern desselben Gebiets zu verschiedenen Zeitpunkten oder unterschiedlichen Positionen. (TRE ALTAMIRA, 2024)
Abbildung 6: Schematische Darstellung der 2D-Dekomposition unter Verwendung der ASC- und DSC-Satelliten-Geometrien. (TRE ALTAMIRA, 2024)15
Abbildung 7: Corner Reflektor für die Überwachung einer Hangrutschung (Marte et al., 2024). 20
Abbildung 8: Lage der Fallbeispiele22
Abbildung 9: Vergleich Messpunktdichte von (a) SqueeSAR und (b) EGMS24
Abbildung 10: Wasserradkopf mit Blick Richtung Norden (Foto: 12.08.2020, Valentin, G.)26
Abbildung 11 Aufnahmezeitraum und Geometrie (Aufsteigend = ASC, Absteigend = DSC) der verwendeten SNT-Satelliten am Wasserradkopf27
Abbildung 12: Verschiebungsraten (mm/a) in (a) ASC-Geometrie, (b) DSC-Geometrie an der Südostflanke des Wasserradkopfes
Abbildung 13: Verschiebungsraten (mm/a) in (a) vertikaler und (b) horizontaler Richtung an der Südostflanke des Wasserradkopfes29
Abbildung 14: Verschiebungsraten in LOS (mm/a) der ASC-Geometrie mit Fokusbereichen A bis D (weiß)30
Abbildung 15: Verschiebungs-Zeitreihen für die Fokusbereiche A - D, aufgeteilt nach Satellitenbahn
Abbildung 16: Geringe MP-Dichte in Gebieten mit hoher Vegetationsdichte (A) und zu schneller Bewegung (B)
Abbildung 17: Oberflächennahes (grün) und unterirdisches (rot) Monitoring am Kitzsteinhorn. 35
Abbildung 18: Aufnahmezeitraum und Geometrie (Aufsteigend = ASC, Absteigend = DSC) der verwendeten SNT-Satelliten
Abbildung 19: Verschiebungsraten der (a) ASC-, und (b) DSC-Geometrien37
Abbildung 20: Verschiebungsraten in (a) vertikaler und (b) horizontaler Richtung38
Abbildung 21: Verschiebungsraten im Bereich der Bergstation. Der Fokusbereich A (weiß) wurde für detaillierte Bewegungsanalysen ausgewählt39
Abbildung 22: Verschiebungs-Zeitreihen inkl. Regressionsmodelle und deren Güte für den Fokusbereich A, aufgeteilt nach Satellitenbahn. Der graue Bereich um die Regressionsmodelle zeigt das 95% Konfidenzintervall
Abbildung 23: Kluftweitenänderungen im Zeitraum 01.10.2020 bis 30.09.202341

	Abbitaung 24: Lage der Fissurometer und Laserscan-Differenzanatyse (terrestrisch) für den Zeitraum 26.08.2020 bis 24.08.2023. Rote Flächen visualisieren Oberflächenänderungen durch Fels- und Lockermaterialablösungen41
	Abbildung 25: Kollabierter Gipfel des Südlichen Fluchthorns (Foto: 12.06.2023, Land Tirol)43
	Abbildung 26: Aufnahmezeitraum und Geometrie (Aufsteigend = ASC, Absteigend = DSC) der verwendeten SNT-Satelliten
	Abbildung 27: Verschiebungsraten (mm/a) der (a) ASC- und (b) DSC-Geometrien46
58	Abbildung 28: Verschiebungsraten (mm/a) in (a) vertikaler und (b) horizontaler Richtung47
	Abbildung 29: Verschiebungs-Zeitreihen inkl. Regressionsmodelle und deren Güte für den Fokusbereich A und B, aufgeteilt nach Satellitenbahn. Der graue Bereich um die Regressionsmodelle zeigt das 95% Konfidenzintervall
	Abbildung 30: Bewegungsverhalten in vertikaler und horizontaler Richtung für die Fokusbereiche A und B
	Abbildung 31: Vertikale (a) und horizontale Verschiebungen (b) im Bereich der vermuteten Deckgrenze zwischen Silvretta Decke und Engadiner Decke (GBA 2021). Weißer Pfeil: Richtung des Bergsturzes

Tabellen

Tabelle 1: Ausgewählte Methoden zur InSAR Prozessierung16	ó
Tabelle 2: Typische Präzisionswerte für die UTM-Koordinaten von Messpunkten in mittleren Breiten (SqueeSAR). Die Werte beziehen sich auf einen MP in weniger als 1 km Entfernung vom Referenzpunkt und einen Datensatz von mindestens 30 SAR-Bildern (AUGMENTERRA, 2024)17	7
Tabelle 3: Limitationen von InSAR19)
Tabelle 4: Fallbeispiele und deren Charakteristika22	2
Tabelle 5: Verwendete Komplementärdaten25	5
Tabelle 6: Verwendete InSAR-Datensätze am Wasserradkopf27	7
Tabelle 7: Anzahl Messpunkte (MP), MP-Dichte und Standardabweichung der analysierten InSAR- Datensätze	
Tabelle 8: Gesamtverschiebung (mm) und Verschiebungsrate (mm/a) pro Fokusbereich im Messzeitraum Oktober 2020 bis September 2023. Rot: Maxima, grün: Minima31	1
Tabelle 9: Verwendete InSAR-Datensätze35	5
Tabelle 10: Anzahl Messpunkte (MP), MP-Dichte und Standardabweichung der analysierten InSAR-Datensätze36	ó
Tabelle 11: Gesamtverschiebung (mm) und Verschiebungsrate (mm/a) für den Fokusbereich (A) im Messzeitraum Oktober 2020 bis September 2023. Rot: Maxima)
Tabelle 12: Verwendete InSAR-Datensätze44	4
Tabelle 13: Anzahl Messpunkte (MP), MP-Dichte und Standardabweichung der analysierten InSAR-Datensätze	5
Tabelle 14: Gesamtverschiebung (mm) und Verschiebungsrate (mm/a) pro Fokusbereich im Messzeitraum Juni 2020 bis Juni 2023. Rot: Maxima, grün: Minima47	7

