



“Die Möglichkeiten
haben keine Grenzen”



**Validierung von satellitengestützten und terrestrischen
Monitoringsystemen für die Messung von Bodenverformungen**

**Deliverable
D.3.02**

**Richtlinien für
Machbarkeitsstudien:
integriertes Monitoring
mittels satellitengestütztem
SAR und terrestrischen
Methoden**

Datum: 02.2014

Das Projekt SloMove wird vom Programm Interreg IV (FESR) kofinanziert
Europäische territoriale Kooperation Italien-Schweiz 2007-2013

www.SloMove.eu

Danksagung

Dank der Unterstützung von folgenden Körperschaften wurde die Ausführung des Projektes erst ermöglicht:

- Kofinanzierung durch das Interreg-Programm IV europäische territoriale Kooperation Italien – Schweiz 2007 – 2013, Convezion ID 27384220;
- Kofinanzierung durch die Autonome Provinz Bozen;
- Kofinanzierung durch die Europäische Akademie Bozen EURAC
- Kofinanzierung durch das WSL -Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Kontakte:

Lead Partner (Management)

Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen, Südtirol

Eggentalerstrasse 48

I-39053 Kardaun (BZ)

Verantwortliche

Claudia Strada

Tel +39 0471 361564

Fax +39 0471 361512

E-Mail: claudia.strada@provinz.bz.it

Wissenschaftliche Koordination

Institut für Angewandte Fernerkundung Europäische Akademie Bozen EURAC

Drususallee 1

I-39100 Bozen (BZ)

Verantwortlicher

Christian Iasio

Tel +39 0471 055387

Fax +39 0471 055389

E-Mail: christian.iasio@eurac.edu

Die Daten und die Informationen, welche in diesem Dokument wiedergegeben werden, zeigen Ideen und Erfahrungen der Autoren. Die Verwaltungsbehörden und Partnerinstitutionen des Projektes sind für die Nutzung der hier wiedergegebenen Informationen nicht Verantwortlich.

Das Projekt SloMove

Die Entstehung des Projektes SloMove beruht auf das Anliegen das heutig technisch zur Verfügung stehende Monitoringpotential für die Messung von Bodenverformungen zu verbinden. Weiters soll es für die Raumreglementierung und -planung eingesetzt werden. Dieses Bedürfnis ist vor allem im grenzüberschreitenden Hochgebirge gefragt, diese Teilen die Sicherung von wichtigen strategischen Verbindungsinfrastrukturen.

Allgemeine Ziele

- Abschätzung von Nutzen und Grenzen von satellitengestützter Radarinterferometrie für das Monitoring von Bodenverformungen im Hochgebirge;
- Optimierung der Monitoringprozeduren indem die durch terrestrischen Methoden erhaltenen Daten zur Validierung der Daten aus satellitengestützter Radarinterferometrie genutzt werden;
- Festigung des Grundwissens der Techniker über die Standardanwendung von SAR- und Geländedaten für das Monitoring von Hangbewegungen.

Spezielle Ziele

- Ausbildung des Personals durch gezielte Fortbildung in die einzelnen Ausarbeitungstechniken von Radardaten und der Implementierung von integrierten Monitoringsystemen, satellitengestützt wie auch terrestrisch;
- Test des integrierten Monitorings auf gut bekannten Untersuchungsgebieten;
- Erstellung eines Protokolls über die Anwendung der Monitoringmethoden (Planung und Prävention). Es sollten die limitierenden Faktoren und Erfordernisse aufgelistet werden, welche in den verschiedenen untersuchten Territorien, vor allem im alpinen Raum auftreten;
- Produktion und Verbreitung der Monitoringmethoden und der Prozeduren für die Anpassung der Verwaltungsverfahren zum Risikomanagement. Dies soll durch das erstellen von Leitfäden und Handbücher für die Techniker der öffentlichen Verwaltung und technischen Büros erfolgen. Dabei soll ein effizienter Informationsfluss garantiert werden zwischen Monitoring- und Planungsphase.

Methoden

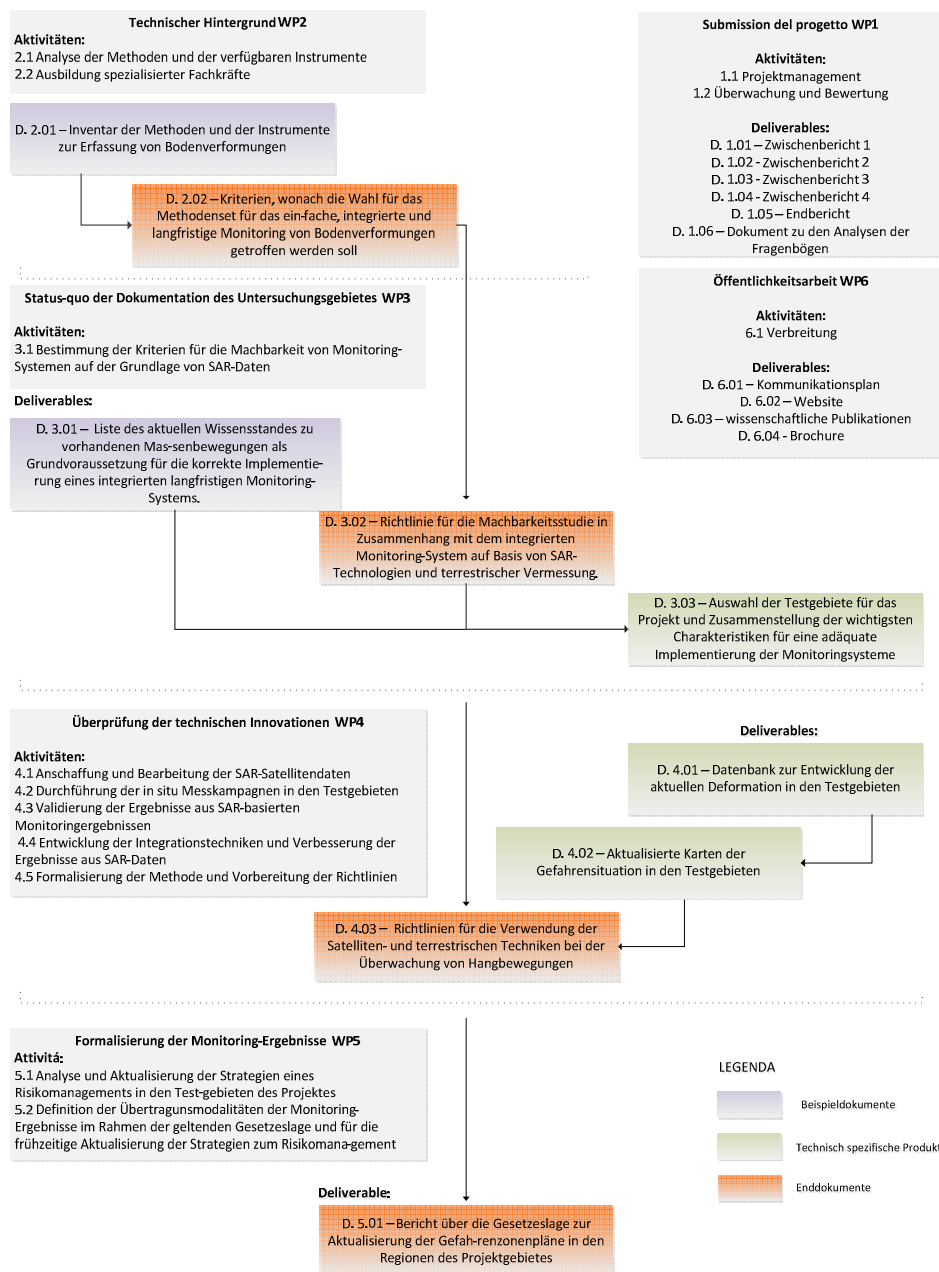
- satellitengestützte SAR Multi-Interferometrie;
- Terrestrial Laser Scanner;
- Differenzieller GPS;
- Auswertung der Daten zwischen Technikern und Administratoren

Dokumentation

Das Projekt besteht aus vier technisch operativen Arbeitspaketen und zwei weiteren Paketen, welche sich um Management und Öffentlichkeitsarbeit kümmern.

Der Fortschritt dieser Aktivitäten wird in vier Zwischenberichten und einem Endbericht wiedergegeben.

Die Produkte aus Forschung, Entwicklung und methodologischer Innovation werden in folgender Weise wiedergegeben: vier Dokumenten bzw. Leitlinien zur generellen Veranschaulichung, zwei Beispieldokumente mit Datenbanken und aktuellen Kartenmaterial des Testgebietes. Die Verbindung zwischen den einzelnen Dokumenten wird im Diagramm dargelegt:



Partner & Autoren

Italien

Lead Partner

Amt für Geologie und Baustoffprüfung
Autonome Provinz Bozen

Volkmar Mair
Claudia Strada
David Mosna

Partner 1

Institut für Angewandte Fernerkundung
Europäische Akademie Bozen EURAC

Christian Iasio
Giulia Chinellato

Schweiz

Partner 3

WSL -Institut für Schnee- und Lawinenforschung
SLF

Marcia Phillips
Robert Kenner

Partner 4

Abenis A.G. Ingenieure und Planer

Andreas Zischg

Inhaltsverzeichnis

1. EINFÜHRUNG	9
1.1 Integriertes Monitoring und Validierung - technologische Integration	9
1.2 Zielsetzungen des Dokuments und allgemeine Aspekte	10
2. BESCHREIBUNG DER ANGEWENDETEN TECHNOLOGIEN.....	12
2.1 Radarsatellitendaten	12
2.1.1 DInSAR	15
2.1.2 Multitemporale Interferometrie mit der Persistent-Scatterers-Methode.....	18
2.1.3 Multitemporale Interferometrie mit der SBAS-Methode	22
2.2 Daten aus terrestrischen Messungen: GPS, Positionierungstechniken und Methoden.....	25
2.2.1 GPS: Die relative Positionierung	28
2.2.2 Die Rapid-Static-Methode	28
2.3. Daten aus terrestrischen Aufnahmen: Terrestrischer Laser-Scanner (M. Phillips, SLF, CH).....	30
3. INTEGRATION DER MESSMETHODEN	34
4. ANWENDBARKEIT DER GEWÄHLTEN TECHNOLOGIEN: TECHNISCHE EINSCHRÄNKUNGEN.....	37
4.1 Grenzen der multitemporalen Interferometrie	37
4.1.1 Sichtbarkeit des Satelliten	37
4.1.2 Sichtbarkeit: Konfiguration des Satelliten	39
4.1.3 Eigenschaften der Oberfläche	39
4.1.4 Kinematik des Phänomens	41
4.1.5 Zugänglichkeit, Einschränkungen und Sicherheit.....	43
4.2 Beschränkungen der Messungen mit Differential-GPS	45
4.2.1 Sichtbarkeit des Satellitensignals	45
4.2.2 Zugänglichkeit, Einschränkungen und Sicherheit.....	46
4.3 Grenzen des Terrestrischen Laserscanners (TLS).....	48
4.3.1 Sichtbarkeit.....	48
4.3.2 Eigenschaften der Oberfläche	49
4.3.3 Zugänglichkeit, Einschränkungen und Sicherheit.....	49
5. VALIDIERUNG DER DATEN	51

6. FÄHIGKEIT ZUR DURCHFÜHRUNG EINES LANGFRISTIGEN INTEGRIERTEN MONITORINGS:	
Kostenvariabilität	52
6.1 <i>Allgemeine Faktoren</i>	52
6.1.1 Zugänglichkeit.....	53
6.1.2 Datenausgabe/Ausgabe der Messdaten	54
6.1.3 Lebensdauer und Wartung der Ausrüstung	55
6.2 <i>Spezifische Faktoren</i>	56
6.2.1 Datensammlung.....	56
6.2.2 Datenverarbeitung.....	58
6.3 <i>Interpretation der Daten</i>	59
6. Referenzunterlagen	60

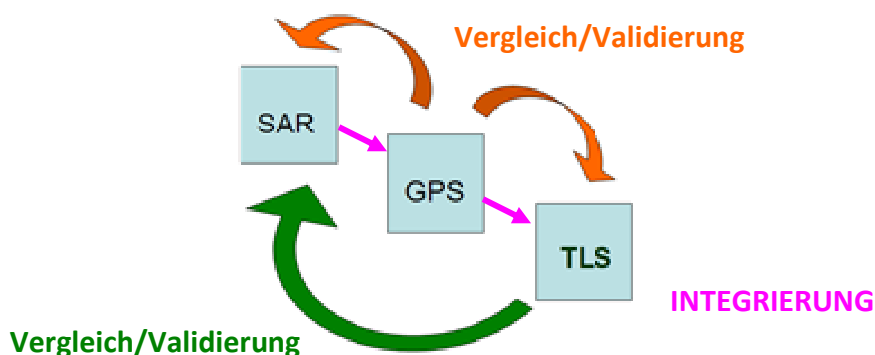
1. EINFÜHRUNG

1.1 Integriertes Monitoring und Validierung - technologische Integration

Das integrierte Monitoring ermöglicht es, die besonderen Stärken der angewandten Technologien, sowohl der ferngesteuerten als auch der terrestrischen, zu nutzen.

Jede der drei im Rahmen des Projektes eingesetzten Technologien, also die Multi-Interferometrie mit Satellitenradar, das differentielle GPS (Global Positioning System) und der TLS (Terrestrial Laser Scanner), weist unterschiedliche Eigenschaften auf, die eine wichtige Rolle in Hinblick auf die Komplementarität der endgültigen Ergebnisse spielen. Die von den Satelliten empfangenen Daten decken sehr große Bereiche ab und sind sehr kosteneffizient, wobei die Bilder allerdings mit niedriger Frequenz aufgenommen werden. Die durch terrestrische Messungen mit GPS- oder Lasergeräten ermittelten Daten können hingegen sehr genau sein und die Frequenz der Aufnahmen wird von den Technikern festgelegt; die Kosten sind jedoch sehr hoch. Das Projekt will eine optimierte Anwendung beider Monitoring-Ansätze durch Kumulierung der jeweiligen Vorteile und Überwindung der jeweiligen Grenzen erreichen. Die Integrierbarkeit der Monitoringmethoden für natürliche Ereignisse bzw. Naturphänomene bedeutet einerseits die volle Ausnutzung der mit Satelliten ermittelten Daten, solange die Geschwindigkeit der Bodenverformung unter einer gewissen Schwelle bleibt, und andererseits die Möglichkeit, ein genaueres und häufigeres Monitoring im Gelände durchzuführen, welches eine Bewertung des Risikos beinahe in Echtzeit ermöglicht. Die Ergebnisse eines integrierten Monitorings können als Entscheidungsgrundlage bei der Raumplanung und zur Verwaltung von Risikosituationen verwendet werden, mit dem zusätzlichen Ziel, die Monitoring-Techniken in den Nachbarländern zu vereinheitlichen, um Vergleiche und gemeinsame Entscheidungen zu ermöglichen. Die möglichen, zeitlich linearen oder nicht linearen Verfahren für die geodätische Vermessung von langsamen Bodenverformungen (unter 1 cm/Jahr) umfassen die multitemporale Interferometrie und die GPS-Vermessungen. Dank der unterschiedlichen räumlichen Auflösung und Genauigkeit ergänzen sich die zwei Technologien optimal: das GPS bietet eine ausgezeichnete Genauigkeit

bei den drei räumlichen Komponenten und der zeitlichen Auflösung, die multitemporalen SAR-Techniken bieten grundsätzlich Informationen zur vektoriellen Bewegung entlang einer einzigen Sichtlinie bei gleichzeitiger Maximierung der räumlichen Deckung. Durch Nutzung der dritten Technologie, des Terrestrial Laser Scanner (TLS), wird im Projekt darauf abgezielt, das Thema der Integration von Methoden zur Überwachung von natürlichen Prozessen zwecks Monitoring und Erarbeitung von Warnsystemen zu vertiefen.



1.2 Zielsetzungen des Dokuments und allgemeine Aspekte

Das Ziel des gegenständlichen Dokuments ist es, die Phasen der Bewertung der Machbarkeit eines integrierten Monitorings der Bodenverformungen durch den synergischen Einsatz der multitemporalen Interferometrie, des differentiellen GPS und des Terrestrial Laser Scanner zu beschreiben.

Jede dieser Methode weist Einschränkungen in Bezug auf ihre Anwendbarkeit auf. In der Folge werden hier die Fragen der Anwendbarkeit der ausgewählten Technologien in Zusammenhang mit den untersuchten Naturphänomenen und den umwelt- und sachtechnischen Elementen behandelt; auf der Grundlage der bisherigen Erfahrungen werden die Parameter beschrieben, welche für die Festlegung (auch in der Planungsphase) der geeigneten Ermittlungsmethoden zu berücksichtigen sind.

Nach einer kurzen Einführung werden im **Kapitel 2** die im Projekt eingesetzten Messtechnologien zusammengefasst; im **Kapitel 3** werden die Faktoren untersucht, welche die technisch-operationelle Anwendbarkeit der Ermittlungsmethode im Hochgebirge zur Ermittlung von langsamen Bodenverformungen beeinflussen. In den **Kapiteln 4 und 5** wird die



Wichtigkeit der Integration der Ermittlungsmethoden sowie die Auswirkung, vor allem die langfristige Auswirkung, der Kosten auf das Monitoring behandelt.

2. BESCHREIBUNG DER ANGEWENDETEN TECHNOLOGIEN

2.1 Radarsatellitendaten

Alle Radarsysteme funktionieren nach dem gleichen Prinzip, und zwar mit einem Sender, der eine elektromagnetische Welle ausstrahlt; wenn diese Welle Objekte trifft, die mindestens die gleiche Größe wie die Wellenlänge aufweisen, unterliegt die Welle einer unregelmäßigen Lichtbeugung, auch Diffusionsstreuung oder **Scattering** genannt. Ein Teil des gestreuten Lichtes wird zurück zum Sender reflektiert, der auch für den Empfang ausgestattet ist, wo die jeweiligen physikalischen Eigenschaften (Wellenamplitude und -phase) gemessen werden. Das Gerät kann eine elektromagnetische Zielmarke orten (**Detection**), die sich entlang der Zielrichtung der Antenne (**Range-Richtung**) befindet, und durch Messen des Zeitabstandes zwischen Sendung und Empfang wird der genaue Abstand des Objektes ermittelt (**Ranging**). Aufgrund des Abstandes zwischen Sender und Ziel gilt: je größer die Antenne, desto enger wird der entsprechende Footprint (Ausleuchtungszone) und desto genauer kann folglich die Ortung der Zielmarke erfolgen. Wenn sich jedoch, wie im Fall der satellitengestützten Fernerkundung, das Ziel in weiter Entfernung vom Sender befindet, ist es physikalisch unmöglich, eine Antenne mit den geforderten Ausmaßen zu errichten, welche die Ortung der Zielmarke mit einer räumlich ausreichenden Auflösung ermöglichen.

Das Grundprinzip des SAR (Synthetic Aperture Radar) ermöglicht es, diese Begrenzung zu umgehen, und zwar durch einen Kompromiss zwischen Auflösung und Ausdehnung des erkundeten Gebietes. Durch die kohärente Kombination (d.h. unter Berücksichtigung der Höhe und der Phase des SAR-Signals) der vom Sensor in den jeweils erreichten Lagen gesammelten Daten wird mit einer komplexen Auswertung des Signals eine "künstliche" und sehr große Antenne gebildet, die "synthetische Apertur" genannt wird.

Die parallele Richtung zur Umlaufbahn des Satelliten heißt **Azimut** und entspricht in etwa der Nord-Süd Richtung. Die Richtung der Achse zwischen Sensor und Ziel (die auf der zur Kreisbahn senkrechten Ebene liegt und mit einem θ **Winkel** - der so genannte off-nadir - zur Vertikalen geneigt ist) wird **Slant Range** (Querrichtung) oder auch **Range** (Entfernung) genannt, oder **Line Of Sight** (LOS - Sichtlinie). Für beide Richtungen kann eine Auflösung (die

Fähigkeit, zwei Zielmarken trennscharf als deutlich unterschiedliche Objekte anzuerkennen) von wenigen Metern erreicht werden. Die Radar-Bilder erstrecken sich also entlang der Range- und Azimutrichtungen, die gewöhnlich SAR-Koordinaten genannt werden (**Abb. 1**).

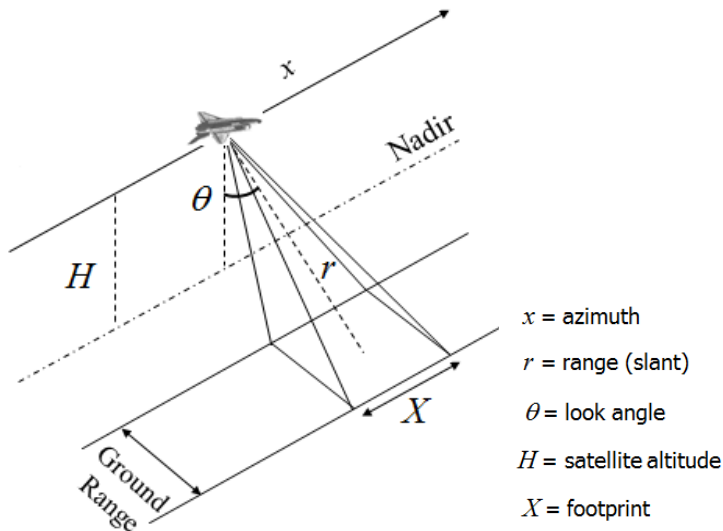


Abbildung 1: Geometrie des SAR-Systems

Die Beobachtung der Erdoberfläche ergibt sich aus der Kombination der Satellitenbahn entlang der Meridiane (entspricht fast der polaren Umlaufbahn) mit der Erddrehung auf der Äquatorialebene.

Im Zuge der diversen Umläufe entlang des gleichen Satellitenorbits weichen die Satelliten leicht von ihrer nominalen Ausrichtung ab. De facto bestehen Abweichungen in einer Größenordnung von einigen hundert Metern im Vergleich zum geometrischen Baseline-Parameter; aus diesem Grund ändert sich die Aufnahmegeometrie für das gleiche Gebiet von Mal zu Mal um geringfügig andere Winkel. Somit werden Pixel-Raster geschaffen, die nicht der gleichen Empfangszelle am Boden entsprechen.

Um die Analyse von mehreren Bildern des gleichen Gebietes am Boden durchzuführen, muss die gleiche Empfangszelle den homogenen Pixeln in den unterschiedlichen Aufnahmen entsprechen; dieses Verfahren beginnt also mit einer Datenverarbeitungsphase, die Wiederholungsprobennahme (oder Neuerprobung) genannt wird. Unter Anwendung von angemessenen Kriterien wird unter allen Aufnahmen ein so genanntes *Master*-Bild als Bezugsaufnahme ausgewählt, wobei alle anderen Aufnahmen, die so genannten *Slaves*, auf

der Grundlage der geometrischen Eigenschaften des *Master*-Bildes neu beprobt werden, damit das gleiche Bezugsraster für alle Satellitenfahrten zur Anwendung kommt.

Die Aufnahmemodalität mit einem Blickwinkel θ , der nicht senkrecht zum Boden ist, und die Topographie des Bodens verursachen perspektivische Verformungen (**Abb. 2**). Daraus ergeben sich, je nach Neigung des Bodens, drei unterschiedliche Arten der Verformung:

1. **Foreshortening:** die Verkürzung ergibt sich, wenn die Neigung des Bodens senkrecht zur Sensor-Ziel-Achse (positive Neigung, die dem off-nadir-Winkel von θ entspricht) fällt; in diesen Fällen werden die Signalkomponenten von mehreren Punkten in wenigen Zellen konzentriert, was in Bezug auf die Amplitude stark leuchtende Pixel erzeugt.
2. **Layover:** die Überkippung ergibt sich, wenn die Boden­neigung höher als der Winkel θ ist; das führt zu einer starken Verzerrung der Aufnahmen, wodurch die korrekte Interpretation sowie jede quantitative Analyse des Signals behindert wird.
3. **Shadowing:** Radarschatten kommen vor, wenn einige Gebiete vom Radar-Impuls nicht beleuchtet werden können, weil sie von anderen Objekten abgeschirmt werden; es werden also in Bezug auf die Amplitude sehr dunkle Aufnahmen (im Schatten) erzeugt.

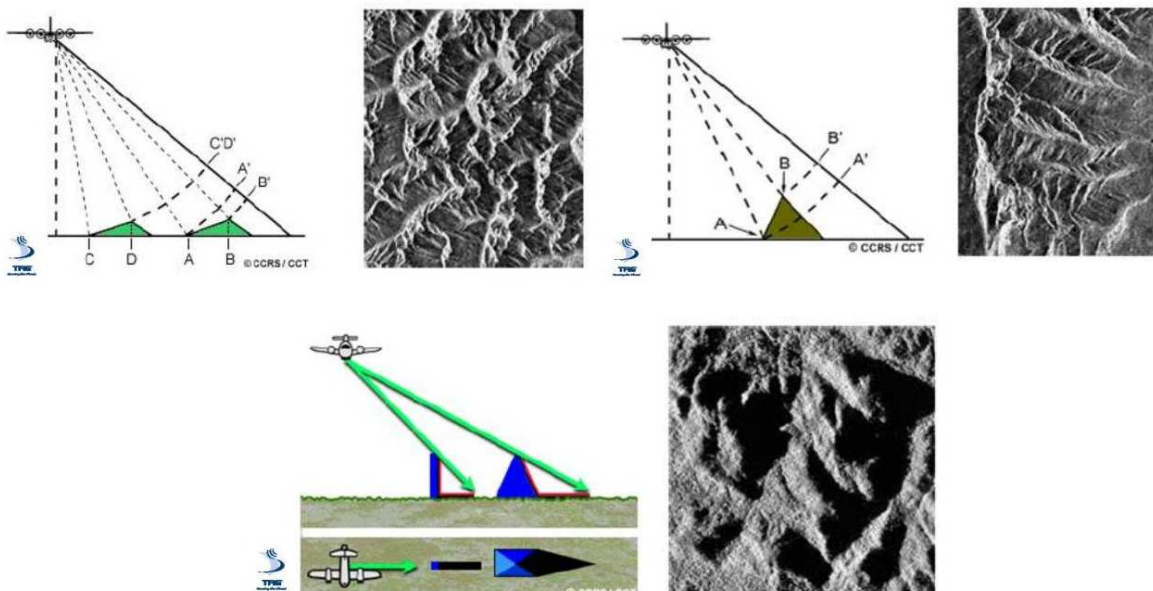
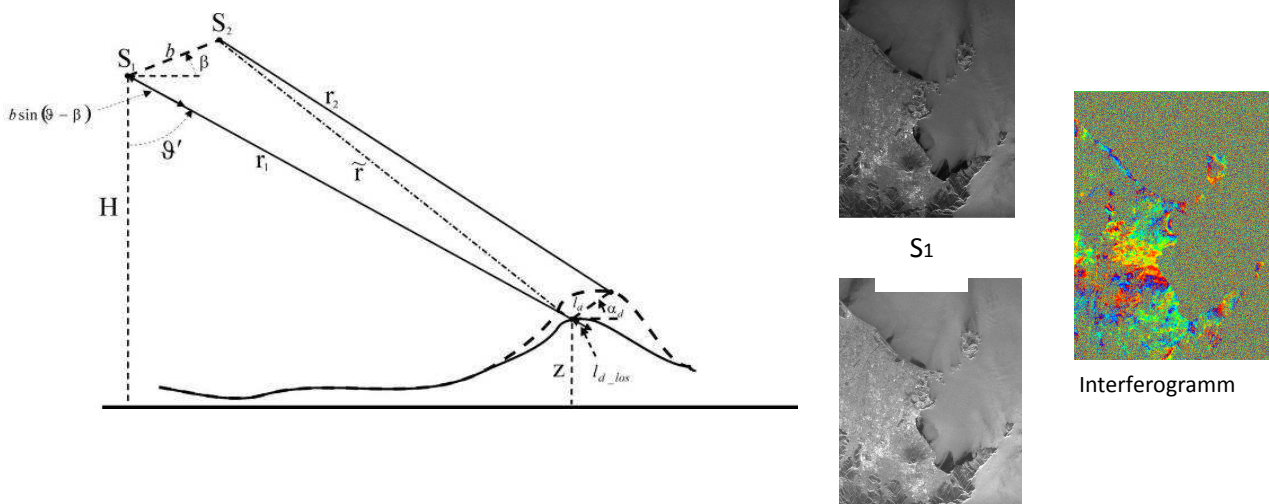


Abbildung 2: Perspektivische Verformungen - Foreshortening (Verkürzung der dem Sensor zugewandten Hänge), Layover (Überkippung) und Shadowing (Radarschatten) sowie die daraus resultierenden Verformungen in den SAR-Aufnahmen (aus T.R.E. - TeleRilevamento Europa)

2.1.1 DInSAR

Die übliche Methode, um SAR-Daten zur Messung von Bodenverformungen zu verwenden, ist die **differentielle Interferometrie (DInSAR)**, welche auf der Analyse der Phasenänderungen zweier unterschiedlicher Aufnahmen fußt, indem eventuelle von Verformungen, Vermessungen oder Wetterstörungen verursachte Unterschiede hervorgehoben werden (Massonnet und Feigl 1998, Rosen et al. 2000). Das Ziel der interferometrischen Technik ist es, die tatsächlichen Phasenkomponenten, die von der Bewegung des Zieles und nicht von Störfaktoren verursacht werden, zu isolieren, d.h. den ausschließlich von den Bodenverformungen entlang der Sichtlinie verursachten Unterschied zwischen den optischen Pfaden r von zwei hintereinander gesendeten und vom Ziel am Boden reflektierten elektromagnetischen Wellen genau zu ermitteln. Die Phase einer einzigen SAR-Aufnahme ist de facto nicht brauchbar, denn es ist unmöglich, die einzelnen Signalkomponenten voneinander zu unterscheiden. Wenn jedoch zwei Aufnahmen des gleichen Gebietes vorliegen, die genau auf den gleichen Bezugsraster registriert sind, können die darin enthaltenen Informationen verwendet werden. In diesem Fall wird ein Interferogramm erzeugt, indem eine Phase einer Aufnahme von jener einer anderen subtrahiert wird (Abb. 2).



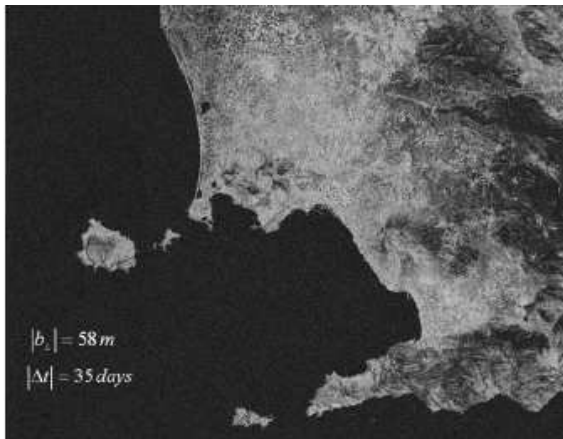
$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = \frac{4\pi}{\lambda}(\tilde{r} - r_1) + \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - \tilde{r}) = \\ &= \Delta\Phi^{flat} + \Delta\Phi^{topo} + \Delta\Phi^{def}\end{aligned}$$

S2

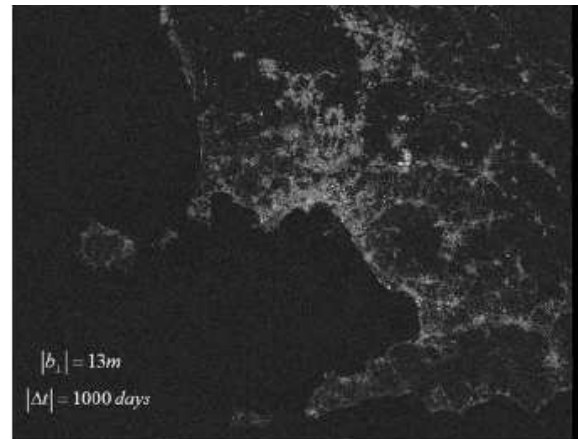
Abbildung 2: Erzeugung eines Interferogramms (die berechnete Phasendifferenz $\Delta\Phi$ ergibt sich nicht nur aus den Bodenverformungen, sondern auch aus dem Flat-Earth-Effect und aus der Topographie (*topo*)).

Wenn sich keine besonderen Änderungen der Eigenschaften des untersuchten Gebietes im Zeitraum zwischen den zwei Aufnahmen ergeben, hängt die Phase des Interferogramms nur von der Distanz zwischen Sensor und Ziel und demzufolge von den eventuellen Bewegungen ab, welche im Zeitraum zwischen der zwei Aufnahmen stattgefunden haben (abgesehen von den verfälschten Signalkomponenten, welche auf Atmosphäre und Lärm zurückzuführen sind). Diverse Effekte vermindern die Qualität der mit der DInSAR-Analyse ermittelten Daten (oder beeinträchtigen diese sogar). An erster Stelle finden wir die **zeitliche Dekorrelation (Abb. 3)**. Dieses Phänomen ist eine Folge der Wechselhaftigkeit der elektromagnetischen Eigenschaften (Reflektierbarkeit) der Radar-Ziele an unterschiedlichen Aufnahme-Tagen, die vom Parameter der zeitlichen Baseline angegeben werden; in diesem Fall wird die Hypothese, dass die "Reflektierbarkeit des Zieles" bei Erzeugung des Interferogramms aufgehoben wird, nicht mehr bestätigt.

Die vegetationsbedeckten Gebiete, die häufig der Windwirkung ausgesetzt sind und deren Erscheinungsbild sich saisonbedingt ändert, verursachen oft Dekorrelationseffekte, während Stadtgebiete und/oder aufgeschlossene Felsformationen im Laufe der Zeit eher stabil bleiben (Änderungen können auch durch andere Witterungsbedingungen, wie Regen oder Schnee verursacht werden).



(a)



(b)

Abbildung 3: Links eine Kohärenzkarte für ein interferometrisches Datenpaar mit kleiner räumlicher Baseline; rechts eine Kohärenzkarte für ein interferometrisches Datenpaar mit kleiner räumlicher Baseline und hoher zeitlicher Baseline

Die Qualität des Interferogramms hängt auch von der Distanz zwischen den beiden tatsächlichen Umlaufbahnen des Sensors während der Aufnahme der zwei Bilder ab (welche als geometrische **Baseline** bezeichnet wird). Diese Störung wird als geometrische oder räumliche Dekorrelation bezeichnet (**Abb.4**). Es kann bewiesen werden, dass - je größer der absolute Wert der normalen Komponente der **Baseline** ausfällt, desto enger ist die den zwei Signalen gemeinsame „Band“ und desto niedriger ist das Signal-Lärm-Verhältnis in Bezug auf das von diesen Signalen erzeugte Interferogramm.

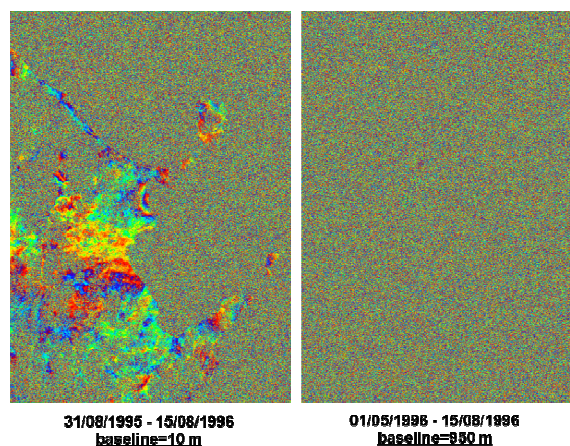


Abbildung 4: Links kohärentes Interferogramm mit kleiner zeitlicher und räumlicher Baseline; rechts zeitliche Dekorrelation

Die Interpretation der interferometrischen Daten kann durch die **verschiedenen Witterungsverhältnisse** zwischen den zwei Aufnahmen noch weiter erschwert werden; diese können eine weitere Signalkomponente (α) erzeugen, die von der bewegungsbedingten Phasenkomponente nur schwer zu unterscheiden ist. Die wetterbedingten Störungen (die bei zwei unterschiedlichen Aufnahmen nie gleich sind) können präzise durch eine gemeinsame Analyse der zeitlichen Serien eines Bildes geschätzt werden.

Eine genaue Analyse der Literatur führt zum Schluss, dass die traditionelle SAR-Interferometrie die Schätzung von Bewegungen mit einer Genauigkeit im Zentimeter-Bereich (Größenordnung der elektromagnetischen Wellenlänge) ermöglicht; weiters können meist keine punktuellen Schätzungen durchgeführt werden, sondern nur allgemeine Analysen, um fortdauernde makroskopische Bewegungen (Ausdehnung $> 0.2 \text{ km}^2$) zu ermitteln. Anders formuliert, kann die Schätzung der Verformungsmessungen nur in Gebieten erfolgen, wo die dekorrelationsbedingten Störungen im Interferogramm (**Abb. 3**) begrenzt sind. In solchen Gebieten ist der so genannte **Kohärenz**-Parameter sehr hoch.

2.1.2 Multitemporale Interferometrie mit der Persistent-Scatterers-Methode

Eine multi-interferometrische oder Multi-Bild-Analyse verwendet eine lange Serie von Radar-Aufnahmen desselben Gebietes, in dem einige fixe **Radar-Ziele** festgelegt werden, mit welchen die Bewegungen mit großer Genauigkeit (in der Größenordnung weniger Millimeter) erfasst werden können. Anders als bei der differentiellen interferometrischen Methode (DInSAR), welche nur Aufnahmepaare mit niedrigen räumlichen *Baseline*-Werten verwendet, was auch die Anzahl der verwendbaren Bilder reduziert, können unter Anwendung der multitemporalen Techniken fast alle vom Sensor aufgenommenen SAR-Bilder im Untersuchungsgebiet ausgewählt werden. Dank der Verfügbarkeit großer Datenarchive der Weltraumbehörden, welche die SAR-Daten aufnehmen, können durch diese Techniken bessere Ergebnisse erzielt werden, als es die konventionellen interferometrischen Methoden erlauben, sowohl in Hinblick auf die Qualität der (millimetergenauen) Verformungsmessungen, da die

Dekorrelations- und Wetterstörungsfragen gelöst werden, als auch durch die Möglichkeit, die zeitliche Entwicklung der untersuchten Bewegung zu verfolgen. Diese Möglichkeit ist natürlich sowohl durch die Anzahl als auch durch die zeitliche Verteilung der möglichen Aufnahmen begrenzt. Aus einer interferometrischen Multi-Bild-Analyse wird eine **Datenbank von Punkten** im Untersuchungsgebiet mit den jeweils entsprechenden Verformungswerten erzeugt, welche im Zeitraum der ausgewählten und für die Analyse bestimmten Aufnahmen (Zeitreihen) gemessen wurden. Wie bereits hervorgehoben, entsprechen diese Punkte Radar-Zielen, die im Verlauf der Zeit die gleichen spektralen Informationen aufweisen und als **permanente Reflexionsobjekte** definiert werden können (**Persistent Scatterers, PS**): diese Objekte zeigen bei unterschiedlichen Aufnahmegeometrien und unterschiedlichen Wetterbedingungen immer die gleiche "elektromagnetische Signatur" in allen Bildern; die Phaseninformationen werden also im Verlauf der Zeit aufbewahrt (**Abb. 5 und Abb. 6**).

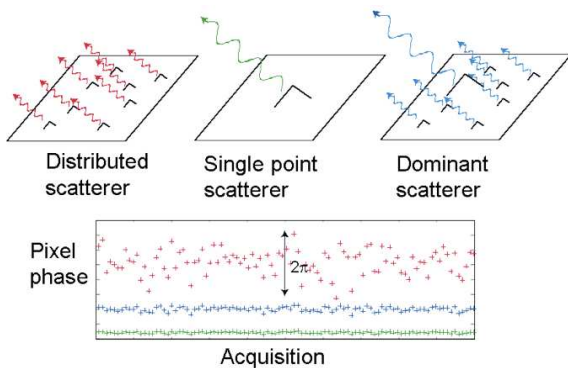


Abbildung 5: Streuungsmechanismus des Radar-Signals für eine SAR-Musterzelle am Boden: distributed (rot), einzelnes Idealsignal (grün) und Persistent Scatterers (blau). Die Pixel mit Streuern des Typs PS (persistent scatterer) weisen eine Phasenvariation im Vergleich zu den Pixeln mit Streuern des Typs „distributed“ auf. Scattering mechanism models for a SAR sampling cell on the ground -

distributed (red), ideal single (Shanker 2010)

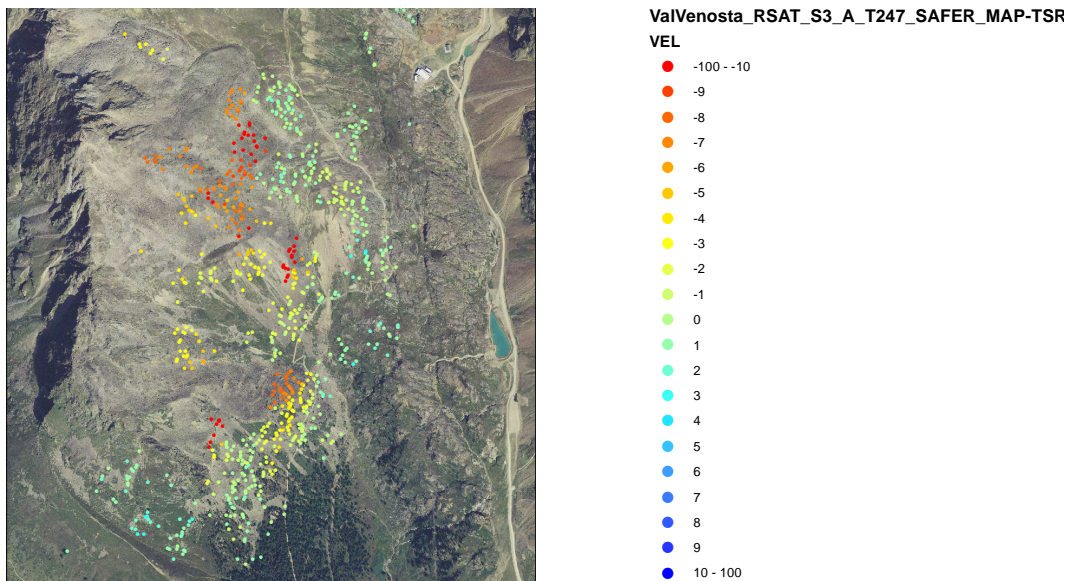


Abbildung 6 - Daten von Radarsat ascending Orbit (2003-2006) - SAFER Projekt

Permanent Scatterers sind typischerweise Teile von Gebäuden, Metallstrukturen, aufgeschlossene Felsformationen, bereits bestehende Strukturen am Boden, deren elektromagnetische Eigenschaften sich von Aufnahme zu Aufnahme nicht merklich ändern, was hingegen beispielsweise für vegetationsbedeckte Bereiche nicht zutrifft. Die Dichte der festgelegten PS ist meist in Städten oder steinigen Gebieten sehr hoch und in vegetations- oder schneebedeckten Bereichen hingegen extrem niedrig. Die Gesamtheit der Radar-Ziele in einem Gebiet stellt ein natürliches Netz von "Radar-Festpunkten" dar, die dem Konzept nach einem permanenten GPS (Global Positioning System)-Netz ähnlich sind.

Colesanti et al. (2003) beschreiben die sich aus der Analyse von jedem Persistent-Scatterer-Punkt ergebenden Ausgangsdaten:

- Verformungs-Zeitreihen entlang der Sichtlinie; zeitlich auf das Master-Bild bezogen;
- Hohes Genauigkeitsniveau bei der Schätzung der Höhe: die Phasenunterscheidung für jeden PS-Punkt ermöglicht es, die vermessungsbedingte Phasenkomponente für jeden PS aufgrund der geringen Genauigkeit der für die Erzeugung der differentiellen Interferogramme verwendeten DEM einzuschätzen.

Die wesentlichen Einschränkungen in Hinblick auf die Bewegungsmessungen sind die gleichen wie jene aller sonstigen interferometrischen Methoden:

- die PS-Methode kann Streckenänderungen des Radarsignals nur in eine Richtung, und zwar entlang der Sichtlinie (LOS), bemessen. Mit einer einzigen Projektion der dreidimensionalen Bewegungen entlang der Sichtlinie des Satelliten ist es nicht möglich, den vollen Vektor-Verlauf zu ermitteln (Perski et al. 2010);
- um die senk- und waagerechten Komponenten des Verformungsfeldes zu erfassen, sind die Geometrien der aufsteigenden und absteigenden Laufbahnen im gleichen Gebiet erforderlich (Tamburini et al. 2010, Peltier et al. 2010, Klemm et al. 2010);
- die Umlaufbahn des Satelliten (ca. N-S) erlaubt kein Monitoring der N-S-Bewegungen (Notti et al. 2009).

in Gebieten, wo keine oder wenige "natürliche" Radar-Zielmarken vorkommen, können künstliche Reflektoren, auch Winkelreflektoren genannt, installiert werden, welche stabile Signalreflexionspunkte im Bild gewährleisten. Winkelreflektoren bestehen aus Metallflächen, deren Größe von der **Sendefrequenz** des angewendeten SAR abhängt. Der Radarquerschnitt (engl. radar cross section, RCS) gibt die Messbarkeit eines Gegenstandes durch ein Radar an und hängt von der Ausrichtung des Winkelreflektors in Bezug auf die Aufnahmegeometrie und von der Größe des Winkelreflektors ab. Die Winkelreflektoren, die für die C-Band verwendet werden, können auch 70 cm groß sein, während jene für X-Band auch nur 24 cm groß sein können. (Abb. 7).



Abbildung 7: künstliche Winkelreflektoren für die C-Band (links) und die X-Band (rechts) (Projekt Lawina).

2.1.3 Multitemporale Interferometrie mit der SBAS-Methode

Die im Rahmen des Projektes SloMove verwendete Methode fußt auf dem multi-interferometrischen Ansatz SBAS, d.h. Small BAseline Subset, einem Algorithmus, der es ermöglicht, die durchschnittlichen Verformungsgeschwindigkeiten zu kartieren und die zeitliche Entwicklung der Bewegung einzelner Punkte im Bild zu verfolgen.

Eine Besonderheit der SBAS-Methode ist die Möglichkeit, die für satellitäre Aufnahmesysteme typische großflächige Deckung beizubehalten und Verformungskarten für jedes Pixel mit einem guten Kohärenzgrad zu erhalten. Zu diesem Zweck wird in SBAS eine Kombination von Interferogrammen verwendet, die auf der Grundlage von Satellitendaten gebildet werden, die aus ausreichend nahen Umlaufbahnen (mit begrenzten räumlichen Baselines) stammen und niedrige Wiederkehrzeiten (begrenzte zeitliche Baselines) aufweisen (**Abb. 8**), und somit auch begrenzte Dekorrelationseffekte verursachen.

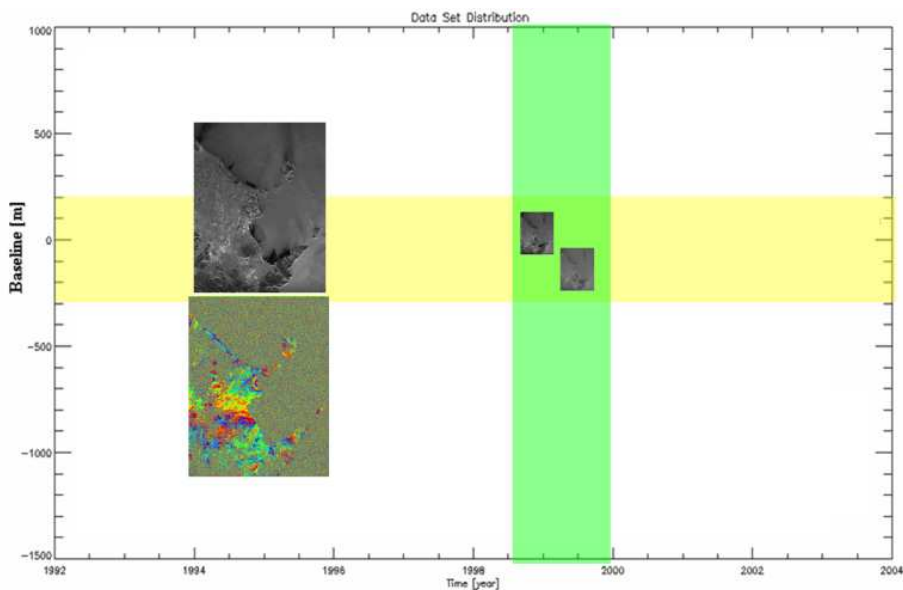


Abbildung 8: Beispiel für Baseline, Kohärenz und Interferogramm, wie sie im SBAS-Algorithmus verwendet werden

Diese Eigenschaften erlauben es, einige "datenstörende" Effekte (Rauschen aus räumlicher und zeitlicher Dekorrelation) zu minimieren, indem die Anzahl der Punkte pro Gebietseinheit

erhöht wird, in welchen die Verformung zuverlässig bemessen werden kann. Die erzeugten Daten sind von einer hohen Dichte an Beobachtungspunkten gekennzeichnet, die einen Genauigkeitsgrad von ca. 1 mm/J in Bezug auf die durchschnittlichen Verformungsgeschwindigkeiten und von ca. 5mm/J für die Verformungsmessungen (Casu et al. 2006) ermöglichen.

Die Anwendung der mathematischen Singulärwertzerlegung (SWZ) erlaubt es, unabhängig erfasste SAR-Data-Sets, die voneinander von großen Baseline-Werten getrennt sind, miteinander in Verbindung zu bringen und die zeitliche Aufnahmerate somit zu erhöhen, was eine angemessene Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Verformungen ermöglicht. Die Verfügbarkeit von räumlichen und zeitlichen Informationen in den verarbeiteten Daten wird dann zur Ermittlung und zum Ausschließen von wetterbedingten Signalkomponenten verwendet (Abb. 9).

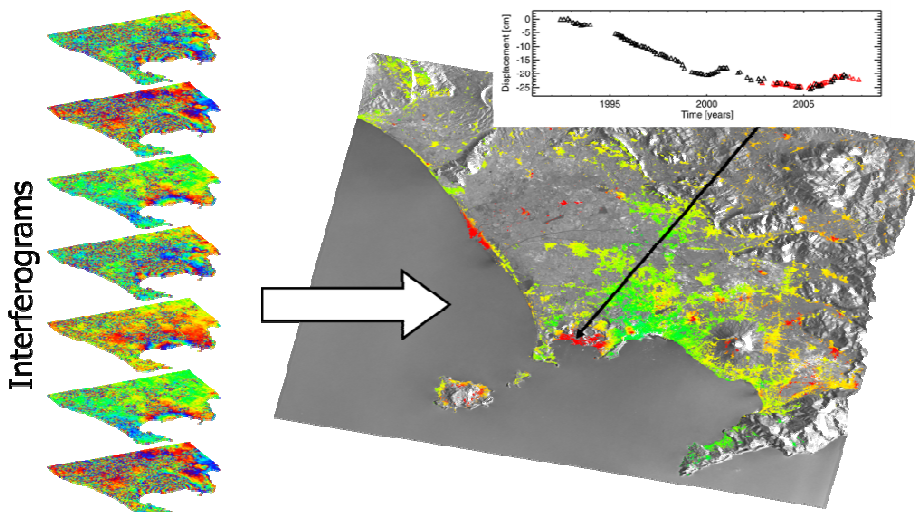


Abbildung 9. Beispiel einer Analyse mit Multi-Interferometrie SBAS

Die typische Flächenausdehnung des Untersuchungsgebietes (mit einer mittleren räumlichen Auflösung) liegt in der Größenordnung von 100x100 km, aber diese Methode hat sich auch für viel größere Gebiete als anwendbar erwiesen. Eine erweiterte Version des SBAS-Algorithmus kann Geschwindigkeitskarten und historische Verformungsserien in sehr ausgedehnten Gebieten (in der Größenordnung von einigen Zehntausenden km²) generieren sowie

Informationen über die räumlichen und zeitlichen Eigenschaften der ermittelten Verformungen liefern und zwar mit einem Genauigkeitsgrad, der dem konventionellen SBAS-Algorithmus entspricht.

Eine weitere Entwicklung der oben beschriebenen Technik, die für ein andauerndes Monitoring der Verformungen an der Oberfläche besonders wichtig ist, ist **die Möglichkeit, mehrere von unterschiedlichen Sensoren aufgenommene Datenserien gleichzeitig zu verwenden, wenn diese die gleiche Beleuchtungsgeometrie (SBAS Multi-Sensor) aufweisen**. Die einzelnen Data-Sets werden getrennt verarbeitet und anschließend mit der SWZ-Methode kombiniert.

Grundlegend für die SBAS-Technik, so wie für andere multi-interferometrische Methoden auch, ist die Auswahl der Aufnahmegeometrie und der Anzahl der zu verarbeitenden Daten. Hinsichtlich der Aufnahmegeometrie sollten Satellitenaufnahmen mit einem für das Beleuchten des Untersuchungsgebietes passenden Einfallswinkel gewählt werden. Auf der Grundlage dieses Einfallswinkels werden auch die benutzten Winkelreflektoren ausgerichtet. Hinsichtlich der Aufnahmeanzahl soll jedes Datenset aus mindestens 15-20 Daten bestehen, um eine zuverlässige Messung der Verformungen zu liefern.

2.2 Daten aus terrestrischen Messungen: GPS, Positionierungstechniken und Methoden

Das GPS (Global Position System) ist ein hocheffizientes Positionierungssystem, das die Bemessung von geodätischen Netzen und das Durchführen von detaillierten Ermittlungen mit einem hohen Genauigkeitsgrad ermöglicht. Das System ermöglicht die Positionierung von Zielmarken an der Erdoberfläche, d.h. die Ortung der betroffenen Punkte in einem festgelegten Referenzsystem.

Die GPS-Positionierung erfolgt dreidimensional und betrifft somit sowohl die Lage als auch die Höhe.

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt von der angewendeten Aufnahmetechnik, von der Satellitenkonfiguration zum Zeitpunkt der Messkampagne, von der Netzgeometrie, von den Wetterbedingungen, welche die Verbreitung des Signals auf dem Weg vom Satelliten zum Empfangssensor verzögern und von der Sichtbarkeit der Satelliten ab.

Das GPS-System besteht aus drei Elementen:

- Im Weltraum befindet sich eine Gruppe von Satelliten, die auf zwei Frequenzen senden; eine heißt L1 und arbeitet typischerweise auf 1575,42 MHz und die andere L2 (1227,6 MHz).

Das von den GPS-Satelliten ausgesendete Signal wird in Frames und Sub-Frames aufgeteilt: grundsätzlich enthalten diese Einheiten Informationen zur Entfernung zwischen Empfänger und Satelliten, Daten und Korrekturen betreffend die Satelliten-Uhren, Ephemeriden betreffend die Umlaufbahnen, Informationen zur Funktionsfähigkeit der Satelliten, usw.

- Das Kontrollelement besteht aus der Master-Station in Colorado Springs (USA) und elf weiteren Stationen, welche die Umlaufbahn- und Zeitdaten der einzelnen Satelliten kontinuierlich erfassen, die Umlaufbahnen und Zeiten korrigieren und diese Informationen dann den Satelliten zusenden.
- Das Nutzungselement besteht aus den unterschiedlichen GPS-Empfängern, die für unterschiedliche Zwecke verwendet werden. Wenn der Empfänger das Signal von mindestens 4 Satelliten erhält, hängt die Genauigkeit der Daten von der Messmethode

und dem angewendeten Empfänger ab; weiters gilt: je mehr Satelliten vom Empfänger aus sichtbar sind, desto besser ist der Standort.

Die Ermittlung der Entfernung zwischen Empfängern und Satelliten kann mit zwei unterschiedlichen Methoden erfolgen, welche sich voneinander sowohl konzeptuell als auch in Bezug auf die erreichbare Genauigkeit unterscheiden:

- A) A) Das **"POINT-POSITIONING-VERFAHREN"** (absolute Positionsbestimmung eines Einzelpunktes im festgelegten Referenzsystem mit einem einzelnen Empfänger), mit welchem heutzutage die Position mit Genauigkeit im Zentimeterbereich (mit einem höheren Genauigkeitsgrad auf der Horizontalen als auf der Vertikalen) ermittelt werden kann; es geht also um eine Präzisionstechnik, die für die Navigation oder für die Verfolgung von Sendungen (mit so genannten "Pathfinder"-Geräten), nicht aber für vermessungstechnische Anwendungen (**Abb. 10**) ausreichend ist.

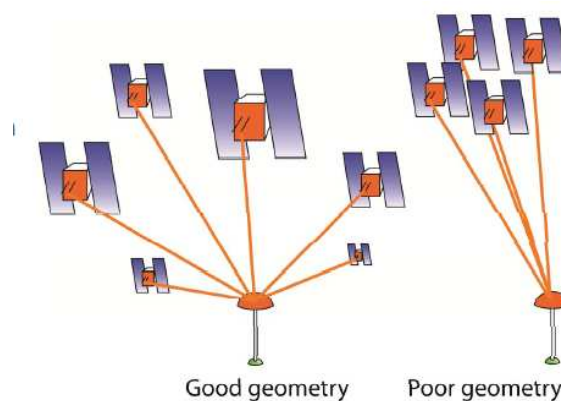


Abbildung 10: Die Genauigkeit der Positionierung des Empfängers hängt nicht nur von Signalfehlern (Ephemeriden, Uhrenabweichung, wetterbedingte Signalverzögerungen), sondern auch von der Geometrie der Satelliten im Vergleich zum Empfänger ab.

Es stehen Korrekturen zur Verfügung, welche die Genauigkeit auf 1 - 2 cm erhöhen. Die Dauer der Messperiode kann eine Erhöhung der Genauigkeit mit sich bringen: mit einer statischen Positionierung von ca. 1 h schwankt dieser Parameter zwischen 1 und 5 m, je nach Qualität des verwendeten Sensors.

- B) Das **"DIFFERENTIAL-POSITIONING-VERFAHREN"**, auch **"RELATIVE POSITIONING"** genannt, mit welchem die Position eines Punktes im Vergleich zu einem anderen, bereits bekannten Punkt ermittelt wird. Praktisch gesehen wird der relative

Positionsvektor der **Baseline** zwischen den zwei Punkten mit seinen drei Komponenten in einem dreidimensionalen kartesischen System ermittelt. Die mit diesen drei relativen Koordinaten erzielbare Genauigkeit liegt in der Größenordnung von einigen Millionsteln der Entfernung, also gleich oder höher als bei klassischen geodätischen Verfahren, die mit höchster Genauigkeit durchgeführt werden (**Abb. 11**).

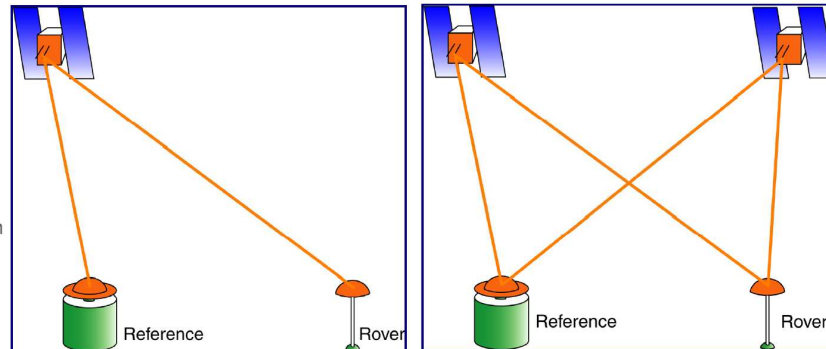


Abbildung 11: Single differences (SD, Unterschiede zwischen 2 gleichzeitigen Aufnahmen von zwei Empfängern für den gleichen Satelliten) und Double Differences (Unterschiede zwischen zwei gleichzeitigen einzelnen Unterschieden, die sich auf zwei Satelliten beziehen)

Das GPS-System besteht heute aus 31 Satelliten auf 6 Umlaufbahnen und ist so geplant, dass die Sichtbarkeit von mindestens 4 Satelliten aus jedem Punkt auf der Erdoberfläche für eine Zeitspanne von 1 bis 6 Stunden, alle 24 Stunden, gewährleistet ist.

Die Zeitfenster für die Aufnahmen in einem bestimmten Gebiet an einem bestimmten Tag können im Voraus mit spezifischen von den Herstellern von GPS-Empfängern entwickelten Programmen oder Open-Source-Programmen ermittelt werden; somit können auch die Messperioden geplant werden. Die Vorbereitungssoftware liefert auch Informationen zur geometrischen Anordnung der Satelliten (die Satelliten dienen praktisch als trigonometrische Referenzpunkte und müssen so gleichmäßig wie möglich im Himmel verteilt sein), indem diese mit dem **PDOP**-Parameter (Position Dilution Of Precision, d.h. Genauigkeitsverlust in der dreidimensionalen Positionierung) quantifiziert wird. Dieser Parameter (zusammen mit anderen, die eine geringfügig andere Bedeutung haben, wie z. B. der HDOP, der sich nur auf die Komponenten der Flächenlage bezieht, oder der VDOP, der nur die Höhenlage betrifft)

stellt den Beitrag der Komponente "geometrische Anordnung der Satelliten" zum durchschnittlichen quadratischen Fehler der Positionierung dar; damit diese zufriedenstellend sein kann, **darf der Wert nur wenige Einheiten betreffen**. Bei der Festlegung der Zeitfenster für die Aufnahmen muss also nicht nur die Anzahl der Satelliten, sondern auch der Wert des PDOP berücksichtigt werden.

2.2.1 GPS: Die relative Positionierung

Das so genannte "differentielle" Messverfahren, das im vorigen Kapitel kurz beschrieben wurde und bei welchem die Ortung der Position mit dem GPS-System nicht mit einzelnen Punkten, sondern mit Zielpaaren erfolgt, braucht mindestens zwei Empfänger, welche an die zwei Enden der **Baseline** gestellt werden und gleichzeitig für die ganze Dauer der Messperiode funktionieren sollten, die von einigen Minuten bis zu einigen Stunden dauern kann und von der die Entfernung und die erforderliche Genauigkeit abhängig ist. Mit Geräten, die beide Frequenzen empfangen können (L1 und L2, komplexer und kostenaufwändiger) können **Baselines** von Hunderten von Kilometern festgelegt werden. Der mit einer längeren Verweildauer erzielte, höhere Genauigkeitsgrad erlaubt es, die Einschätzung des Baseline-Vektors mit den drei Komponenten zu verfeinern.

Die differentielle Technik sieht zwei grundsätzliche Arbeitsverfahren vor, **die statischen und die kinematischen Verfahren**, welche die richtigen Koordinaten erst nach einer differentiellen Berechnung auf dem PC mit einer Auswertungssoftware liefern.

2.2.2 Die Rapid-Static-Methode

Zu den am meisten verbreiteten und verwendeten Arbeitsmethoden gehören die statische und die **Rapid-Static-Methode** im Post Processing.

Das Grundkonzept für die statischen und die Rapid-Static-Methoden sieht die gleichzeitige Aufnahme von mindestens 2 Stationen (auf welchen die Empfänger für die ganze Messperiode ortsfest bleiben) und die Messung der verbindenden Baseline für einen Zeitraum von 5 Min. bis >60 Min. (je nach Länge der Referenzbasen und des verwendeten Empfängertyps) vor.

Die **Rapid-Static-Methode** unterscheidet sich von der statischen **Methode** durch die kürzere Verweildauer, was zu einer höheren Produktivität führt, da mehr Punkte in einem kürzeren Zeitraum gemessen werden, und durch die Länge der Referenzbasen, die bei der statischen Methode im Allgemeinen größer sein können. Einige Quellen (in der didaktischen Fachliteratur) sprechen von einer Grenze von 15-20 km für Rapid-Static-Aufnahmen, während bei den statischen Aufnahmen hingegen auch Baselines von über 100 km möglich sind.

Die Messmethode besteht in der Auswahl eines Referenzpunktes mit als bekannt vorausgesetzten Koordinaten, wo die als "Basis" bezeichnete Empfängerstation positioniert wird, während die Stationierung an den aufzunehmenden Punkten mit einem Rover-Empfänger erfolgt; es muss eine Konstellation von mindestens 4 Satelliten gewährleistet sein, die in jeder Messphase von beiden Empfängern sichtbar sein müssen.

Um eine zuverlässige Schätzung der Positionierung zu erhalten, muss in einer Messung eine gewisse Redundanz der Aufnahmen gewährleistet sein. Unter Redundanz versteht man die Differenz zwischen der Anzahl der Aufnahmen (durchgeführte Messungen) und der Anzahl der unbekannt Parameter (Positionen der Punkte).

Was die Verweildauer pro Messpunkt betrifft, so hängt diese von der Anzahl der Satelliten ab; dabei werden die Werte des Parameters PDOP <7 berücksichtigt:

Anzahl der Satelliten	Beobachtungszeitraum
4	> 20 Min.
5	10 - 20 Min.
> 6	5 - 10 Min.

2.3. Daten aus terrestrischen Aufnahmen: Terrestrischer Laser-Scanner (M. Phillips, SLF, CH)

Das terrestrische Laser Scanning ist ein Monitoringsystem, das sich im letzten Jahrzehnt weit verbreitet hat. Diese Messmethode liefert eine Punktwolke in Hochauflösung, welche die Oberfläche des gescannten Objektes darstellt und die Erstellung eines Bodenmodells mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich und Auflösung im Dezimeterbereich ermöglicht. Bei multitemporalen Aufnahmen ermöglicht es diese Technologie, ein 3D-Verformungsmodell der Oberfläche zu erstellen und einzelne Objekte auf dieser Oberfläche zu überwachen. Das Ergebnis kann in 2.5D dargestellt werden. Dabei werden die vertikalen Variationen und die waagerechten Verschiebungen der Oberfläche angezeigt.

Im SloMove Projekt wurden zwei Laser mit einem *großen Range* verwendet: einmal das von Riegl entwickelte Laser-Modell LPM321 (im Jahr 2012) und dann das Modell VZ6000 im Jahr 2013. Die Datenerfassung erfolgt mit dem Software-Paket RiProfile, das auf einem Laptop installiert ist, welcher an einen Scanner angeschlossen ist. Die Georeferenzierung und die geometrische Korrektur der Punktwolke erfolgen ebenfalls unter Verwendung dieser Software. Für weitere Analysen kann, ausgehend von der Punktwolke, ein Raster der Oberfläche berechnet werden; die dabei erzeugten DEMs können für die Definition der Verformungsoberfläche, durch die pixelweise Berechnung ihrer Differenzen, verwendet werden. Es können auch horizontale Bewegungen der Oberfläche durch die Verschiebung der Rauigkeitsmuster der Oberfläche erzeugt werden.

Um das Monitoring des ausgewählten Gebietes zu ermöglichen ist es erforderlich, einen Bezugsrahmen festzulegen, um die einzelnen Messungen in ein gemeinsames Koordinatensystem umzuwandeln; in einem dynamischen Gebiet wie dem Alpenraum bedeutet das, retroreflektierende Kontrollpunkte im Gelände zu errichten. Die **Kontrollpunkte** bestehen üblicherweise aus reflektierenden Folien auf einer runden Metallscheibe (50cmx50cm, **Abb. 12**), die unbedingt auf stabilen Stützpunkten (Festgestein oder stabile Blöcke) liegen und vor Naturereignissen (Felsstürze, Lawinen, Schneelast und

Sonneneinstrahlung) geschützt werden müssen. Im Rahmen des SloMove-Projektes sind die TLS-Messungen an GPS-Fixpunkte gekoppelt, welche auf Winkelreflektoren befestigt werden, was es noch schwieriger macht, angemessene Positionen für die Kontrollpunkte festzulegen und gleichzeitig alle GPS- und SAR-Anforderungen einzuhalten (siehe **Kap. 3**).



Abbildung 12 - Kontrollpunkte

Die Kontrollpunkte (mindestens 3) müssen sichtbar sein und ihre räumliche Verteilung muss die Stabilität des jeweiligen Standortes berücksichtigen, um einen korrekten Vergleich der späteren Aufnahmen des Gebietes sicherzustellen; weiters müssen die Kontrollpunkte in einer angemessenen Lage im Vergleich zur Ausrichtung des Messgeräts, und zwar rechtwinkelig zum Scanner, angebracht sein; die korrekte Installation des Befestigungspunktes ist maßgebend.

Die Positionierung des Scanners muss den folgenden technischen Anforderungen entsprechen:

- eine stabile Unterschicht, die eine solide Installation des Messgeräts gewährleistet;
- eine gute Rundumsicht, um die Georeferenzierung durch Verwendung der Reflektoren zu ermöglichen;
- die Positionierung des Scanners im Vergleich zum aufzunehmenden Objekt (das nicht weiter als 2500 m entfernt sein darf). Es wird empfohlen, die Entfernung zwischen Scanner und Objekt so gering wie möglich zu halten, denn die Auflösung wie auch die Fehler vermehren sich bei zunehmender Entfernung;

- niedrige Sichtwinkel zwischen Scanner und Objekt sowie Interaktionen des Laserstrahls mit der Erdoberfläche vor Erreichung des Objektes sollen vermieden werden (um die Messergebnisse nicht zu verschlechtern).
- mehrere Messungen von verschiedenen Laserscanner-Standorten durchführen, um die vom Laserstrahl nicht erreichten Gebiete zu entfernen (**Shadowing**).

Die Anwendung der TLS-Technologie wird stark durch die Witterungsbedingungen beeinflusst, die im Hochgebirge ausgeprägter sind. Regen, Schnee, starker Wind, Nebel oder Wolken in der Nähe des Scanners können die Messung unmöglich machen oder die Anzahl der Tage einschränken, an welchen die Messung durchgeführt werden kann. In diesem Fall werden die Sichtverhältnisse des Scanners witterungsbedingt eingeschränkt, während bei schneebedecktem Boden das Objekt verdeckt wird.

Von grundlegender Bedeutung für das TLS-Monitoring ist das Ausmaß der zu ermittelnden Verformung: je nach Messkonstellation und unter Anwendung eines multitemporalen Ansatzes, muss sich die zwischen zwei Messungen eines Elements erfolgte Verschiebung in etwa auf einige wenige Zentimeter belaufen; bei langsamen Phänomenen, wie Blockgletschern, soll der Zeitabstand zwischen zwei Messungen ca. ein Jahr betragen, um aussagekräftige Daten erhalten zu können.

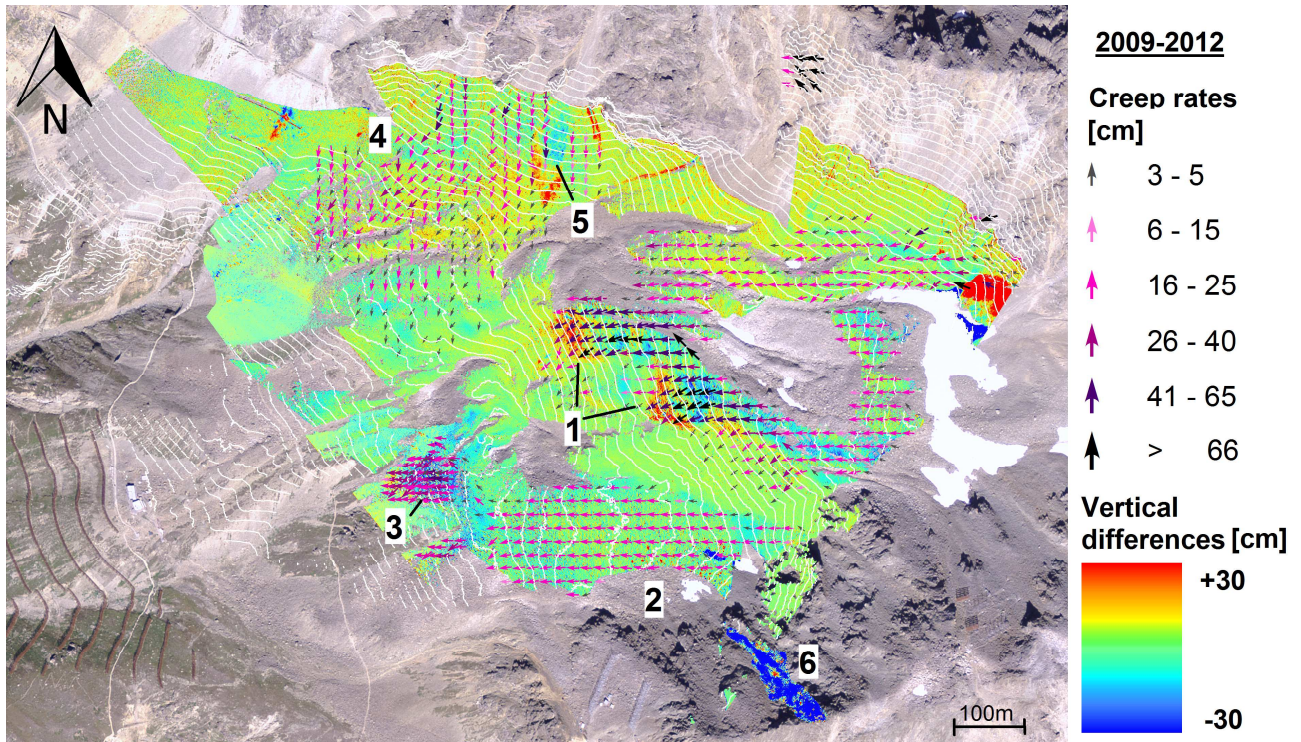


Abbildung 13: Ergebnis der Auswertung der 2009 auf dem Blockgletscher Foura da l'amd Ursina (orthophoto © swisstopo (DV03349.2)) durchgeführten Messungen.

3. INTEGRATION DER MESSMETHODEN

Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebene Integration der Messmethoden wird im Gelände durch die Installation von *gemeinsamen Referenzpunkten* für die ausgewählten Methoden erreicht. Somit werden eine genaue räumliche Georeferenzierung der Daten und, in der Auswertungsphase, ein einfacher Vergleich zwischen den unterschiedlichen Messmethoden bei vollständiger Komplementarität der Informationen ermöglicht. Die Testgebiete des SloMove-Projektes (**Deliverable 3.01**) eignen sich, wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, für die Anwendung der differentiellen Multi-Interferometrie mit natürlichen Radarzielen. Das Vorliegen großer Blöcke auf der gesamten untersuchten Fläche, die fehlende Bewaldung und die günstigen Hangausrichtungen begünstigen den Erfolg der Messungen mit SAR-Technologie. Die Validierung der SAR-Daten durch Präzisionsmessung mit differentiellem GPS erfordert die Festlegung von fixen Kontrollpunkten, die den beiden Systemen gemeinsam sind. Auf einigen als "stabil" erachteten Punkten wurden Winkelreflektoren (3 in Pontresina und 4 im Schnalstal) mit den zugehörigen GPS-Messpunkten mithilfe eines spezifisch für das Projekt erstellten Systems installiert (**Abb. 14**). Diese Struktur ermöglicht eine Überlappung der durch die zwei Methoden gewonnenen Informationen sowie eine genaue Referenzierung der GPS-Daten mit den SAR-Bildern; gleichzeitig können die SAR-Bilder mit den Daten des GPS (Global Positioning System) verknüpft und in einem "absoluten" (globalen) System referenziert werden. Bei der Errichtung des verbleibenden GPS-Messnetzes versuchte man, die Messpunkte so einheitlich wie möglich auf das vom Naturphänomen betroffenen Untersuchungsgebiet zu verteilen und dabei besonders auf die Bereiche mit höheren Verformungsgeschwindigkeiten zu achten.



Abbildung 14: Winkelreflektor und Zapfenanschluss für GPS Antenne

Im Sinne der bisherigen Ausführungen wurden auch für die TLS-Messungen die Kontrollpunkte in der Nähe der Winkelreflektoren und der GPS-Messpunkte (**Abb. 15**) angeordnet.



Abbildung 15: Kontrollpunkt für den TLS und Winkelreflektor mit Arm für GPS-Messungen

Die Punkte des GPS-Netzes sind blockweise verteilt: die Dynamik der untersuchten gravitativen Phänomene erzeugt nicht nur eine Translationsbewegung, sondern auch eine Kreisbewegung der Blöcke, die das Ergebnis der Messung verfälschen können. Aus diesem Grund wurde ein Instrument (**Fig. 16**) zur Bewertung des rotationalen Anteiles der Bewegung des Blocks geschaffen, welche einen Teil des mit GPS aufgenommenen Verschiebungsmoduls

darstellt. Das Instrument setzt sich aus einer Edelstahlstruktur, einer digitalen Wasserwaage und einem Kompass zusammen. Die Berechnung des des rotationalen Anteiles der Bewegung wird im Post-Processing berücksichtigt.



Abbildung 16: Gerät zur Bewertung des rotationalen Anteiles der Verformung

4. ANWENDBARKEIT DER GEWÄHLTEN TECHNOLOGIEN: TECHNISCHE EINSCHRÄNKUNGEN

4.1 Grenzen der multitemporalen Interferometrie

In den nachfolgenden Absätzen werden die technischen Einschränkungen in Bezug auf die Nutzung der multitemporalen Interferometrie zur Untersuchung von langsamen Bodenverformungen im Hochgebirge beschrieben, die bei der Auswahl der Monitoringmethoden als die relevantesten erachtet werden.

4.1.1 Sichtbarkeit des Satelliten

Die Sichtbarkeit des Satelliten im Untersuchungsgebiet bzw. die Fähigkeit des Satelliten, das zu untersuchende Phänomen zu "erfassen", hängt von der Aufnahmegeometrie und von den morphologischen Eigenschaften des Untersuchungsortes ab. Da die Ausrichtungparameter und die durchschnittliche Neigung des Hanges/ Phänomens bekannt sind, wird die Möglichkeit der multitemporalen Interferometrie und, im Fall eines positiven Ergebnisses, die Möglichkeit der Auswahl der geeignetsten unter den auf dem Markt verfügbaren Aufnahmegeometrien in Betracht gezogen.

Eine Bewertung der perspektivischen Verformungen (**Kap. 2.1**) scheint daher unerlässlich zu sein, um zu schätzen, in welchen Untersuchungsgebieten mit welcher räumlicher Ausdehnung die Radaraufnahmen von Verzerrungen betroffen sind und in welchen die Daten eher zuverlässig sind (**Enhanced Range**).

Was wurde im Rahmen des Projektes SloMove gemacht

Im Rahmen des Projekts SloMove wurde die Bedingung der "Sichtbarkeit" des Satelliten in den untersuchten Bereichen bewertet: zu diesem Zweck wurden einige Raster erstellt, wo Pixel für Pixel Angaben zu den vorliegenden Verzerrungen erfasst wurden. Es handelt sich um "Masken", die ausgehend von einem dtm LIDAR in Hochauflösung (2,5mx2,5m) und einer ad hoc entwickelten Software in GIS-Umgebung erstellt wurden.

Während der Bewertungsphase der geeignetsten Aufnahmegeometrie in den italienischen und in den Schweizer Untersuchungsgebieten wurden 4 Masken für die auf- und absteigenden Orbits der zwei theoretischen Satelliten ausgearbeitet, die einen nahezu gleichen Azimut (Winkel zum Orbit) hatten (N-S-Ausrichtung), aber einen unterschiedlichen Sichtwinkel, nämlich circa 30° und 45,77°.

Es folgt eine Zusammenfassung der für die Bewertung der Verzerrungen berücksichtigten Geometrien:

Tabelle 1

	Azimut	Nominaler Einfallswinkel I°
Satellit Nr. 1	$\pm 7,50^\circ$	30°
Satellit Nr. 2	$\pm 6,75^\circ$	45,77°

Ergebnis

Im Rahmen des Projekts SloMove wurde ein Tool für die Erstellung von Masken der geometrischen Verzerrungen in GIS-Umgebung entwickelt. Das Tool basiert auf geometrischen Überlegungen: ausgehend von einem digitalen Geländemodell in Hochauflösung wurde jedem Pixel folgender Wert zugeordnet: Funktion aus Azimuteigenschaften (Winkel des Orbits) und nominale Einfallswinkel der Radarwellen, interpoliert mit den topographischen Daten des Gebiets.

Der nominale Einfallswinkel I° entspricht dem Sichtwinkel (ϑ), berücksichtigt jedoch die Erdkrümmung. In einigen Fällen wird I° und in anderen ϑ geliefert.

Für nähere Details siehe **Arbeitsblatt Nr. 1** und **Anlage Nr. 1**.

Ausgehend von den Berichten (**Tabelle 1**, **Anlage Nr. 1**) konnten Verzerrungsmasken realisiert werden, welche die Überprüfung der Deckung der interferometrischen Daten ermöglichen und im Fall der Verwendung von künstlichen Reflektoren (Winkelreflektoren) Angaben zu deren bestmöglicher Positionierung liefern.

4.1.2 Sichtbarkeit: Konfiguration des Satelliten

Die polare Umlaufbahn bestimmt das Vorbeiziehen des Satelliten über einen gleichen Bereich, während der absteigenden Phase, wenn er den Äquator von Nord nach Süd überquert, und während der aufsteigenden Phase umgekehrt.

Ausgehend von einer orthogonal zum Azimuth (ca. N-S) ausgerichteten und rechts orientierten Sichtlinie (slant range), wird der absteigende Orbit geringere Verzerrungen in Bezug auf die nach Westen ausgerichteten Hänge und der aufsteigende Orbit geringere Verzerrungen in Bezug auf die nach Osten ausgerichteten Hänge aufzeigen.

Die Satellitengeometrie beschränkt die Aufnahmen bestimmter Bereiche maßgeblich, da der Radar lediglich Verschiebungen registriert, die eine Komponente in der selben Richtung der Sichtlinie (O-W-Ausrichtung) aufweisen. Demzufolge sind die orthogonal zur Slant Range (etwa N-S) verlaufenden Verschiebungen (**Abb. 1**) nicht feststellbar.

Was wurde im Rahmen des Projektes SloMove gemacht

Auf der Grundlage der vorhergehenden Beschreibungen wurde in den beiden Untersuchungsgebieten der Modalwert der Hangausrichtung zwecks Feststellung der Sichtbarkeit des untersuchungsgegenständlichen Naturphänomens bewertet. Zum Beispiel ist der Hang des italienischen Untersuchungsgebiets nach Osten ausgerichtet, mit Naturphänomenen, die in Richtung Nord-Ost (50° N) und Süd-Ost (130° N) konvergieren.

Ergebnis

Ausgehend vom digitalen Geländemodell wurden in GIS-Umgebung die Aspect- und die Slope-Karte erstellt. Mit einem eigenen Statistiktool wurden die Modalwerte der Ausrichtung und der Neigung im Untersuchungsgebiet bewertet.

4.1.3 Eigenschaften der Oberfläche

Wie bereits in der Einführung zu den SAR-Fernerkundungstechniken erwähnt wurde, können mehrere Aspekte die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigen. Einer dieser Aspekte ist die Wechselhaftigkeit der elektromagnetischen Eigenschaften (Reflektivität) der Zielmarken an den verschiedenen Aufnahmetagen.

Dies kann auf die Vegetation, auf Oberflächenerosionen oder auf landwirtschaftliche Eingriffe zurückzuführen sein. Die zeitliche Dekorrelation hängt von der Wellenlänge λ des Radars ab; je länger λ ist, desto geringer ist nicht nur die Anfälligkeit aufgrund von elektromagnetischen Änderungen der Zielmarke, sondern auch die Genauigkeit. Vegetationsbedeckte Gebiete, die vom Wind leicht beeinflusst werden und deren Erscheinungsbild sich saisonbedingt ändert, verursachen aus diesem Grund oft Dekorrelationseffekte. Wenn beispielsweise bewaldete Flächen vorliegen, können die Daten derart beeinträchtigt sein, dass sie nicht nutzbar sind. Auch bei Vorliegen geeigneter natürlicher Reflektoren, wie Städte oder herausragende Felsen, die langfristig stabiler sind, können Dekorrelationseffekte infolge von atmosphärischen Änderungen, wie Regen- oder Schneefall, auftreten.

Im Hochgebirge, wo nur begrenzt Strukturen oder Infrastrukturen vorliegen und Witterungsverhältnisse, wie die andauernde Schneebedeckung des Bodens auch die Kohärenz der stabileren Elemente beeinträchtigen, muss die Anwendbarkeit dieser Monitoringmethode sorgfältig abgewogen werden. Die Schneebedeckung bedingt eine Reihe von Nachteilen in Bezug auf die Datenaufnahme aufgrund der Unterbrechung der Aufnahmen während der Wintermonate, die wie folgt zusammengefasst werden können:

- die Auswirkungen auf die atmosphärisch-zeitliche Filterung für lange Zeiträume zwischen einer Aufnahme und der anderen.
- der Zeitabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Aufnahmen beeinflusst auch die Fähigkeit, Verformungen zu erfassen: bei Verschiebungen, die zwischen zwei aufeinander folgenden Aufnahmen festgestellt werden und die größer sind als die Hälfte der Radarwellenlänge, ist die "Rate" unterbewertet.
- Die Beschränkung der Aufnahme auf die reinen Sommermonate ermöglicht es, wenn überhaupt, dann nur teilweise, die sogenannten "zwischenjahreszeitlichen" Verformungen zu erfassen;
- Anzahl der Bilder deutlich geringer; dem kann durch Satelliten mit geringeren Aufnahmeintervallen entgegengewirkt werden.

Nach der Überprüfung der oben beschriebenen Faktoren muss das Vorhandensein und die Dichte der natürlichen Reflektoren im Untersuchungsgebiet und deren Verteilung dahingehend überprüft werden, ob sie zur Beschreibung des beobachteten Naturphänomens ausreicht.

Was wurde im Projekt SloMove gemacht

Basierend auf der Karte der Bodennutzung wurde gesondert der **Prozentwert (%) der Baumdichte und der Intensivkulturen** bewertet, da diese eventuell die Ursache für inkohärente Daten sein können. Die Bewertung erfolgte in einer GIS-Umgebung.

Die Höhenlage der Untersuchungsgebiete und die anhaltende Schneebedeckung hatten zur Folge, dass die Monitoringtätigkeiten auf die Sommersaison beschränkt werden mussten, um die Monate zu vermeiden, an denen der Boden schneebedeckt war; dies beschränkt den Datenverlust aufgrund der Dekorrelation durch die Bedeckung der Reflektoren am Boden. Die Verkürzung des Monitoringzeitraums kann beim Post-Processing der Daten durch Aufnahme der Bilder in kürzeren Intervallen wett gemacht werden, wodurch eine kurze Baseline erzielt werden kann.

Es wurde zu einem späteren Zeitpunkt eine Analyse der an den Untersuchungsorten vorhandenen **Zieltypen** durchgeführt: dank aktueller Orthophotos, geologischer Karten und detaillierter geologisch-geomorphologischer Aufnahmen konnte das Vorliegen von idealem Deckmaterial für eine multitemporale interferometrische Messung festgestellt werden. Die zwei Untersuchungsgebiete liegen auf einer Meereshöhe von über 2500 m, ohne Sträucher und sind mit grobem Geröll von bis zu 5m³ Größe bedeckt.

Je nach Anteil der Bewaldung im Verhältnis zur Gesamtfläche und zur Verteilung der Reflektoren (Lokalisierung in Bezug auf das Naturphänomen), wurde die Angemessenheit der Methode für diese Parameter bewertet.

4.1.4 Kinematik des Phänomens

Wie in den einleitenden Kapiteln beschrieben, fußt die Technologie der Differential-Interferometrie auf der im selben Pixel berechneten Phasendifferenz zwischen zwei zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen SAR-Bildern, die den entsprechenden Mitmessungsverfahren unterzogen wurden.

Der Deformationsgradient des untersuchten Naturphänomens ist einer der wesentlichen Parameter bei der Auswahl des Satelliten und der Aufnahmegeometrie.

Im Fall von besonders schnellen und ausgedehnten Verformungsphänomenen können Probleme in Bezug auf die Zuverlässigkeit der Messung auftreten, die auf eine Reduzierung der Kohärenz der SAR-Bilder zurückzuführen sind. Theoretisch ermöglicht die Technologie der SAR-Interferometrie nur die korrekte Bewertung, bei zwei aufeinander folgenden Aufnahmen, von geringeren Bewegungen als die Hälfte der Wellenlänge, die streng an die „Band“ der Aufnahme des Satelliten gebunden ist (Tab. 2).

Band	Frequency (GHz)	Wavelength (cm)
X	12,0-8,0	2,5 – 3,75
C	8,0-4,0	3,8 – 7,5
L	2,0-1,0	15,0 – 30,0

Tabelle 2: „Band“ der Satelliten mit SAR-Sensoren

Die vorhergehenden Aussagen treffen strikt auf punktuelle Verschiebungen zu. Die vorhergehenden Einschränkungen können nämlich teilweise überwunden werden, wenn die Bewegung "ortsbezogen" ist und das Untersuchungsgebiet von einer guten Dichte an nahe beieinander liegenden und gut zusammenhängenden Punkten gekennzeichnet ist. In diesem Fall steht ein Netz an Messpunkten zur Verfügung (die im Fall der in diesem Projekt verwendeten SBAS-Technik verteilt sein können), womit die von dichten und nahe beieinander liegenden Punkten stammenden Informationen bestimmt die Zuverlässigkeit der Messung verbessern können, dies gilt bei Kohärenzwerten, die vergleichbar sind mit dem Fall, in dem isolierte Punkte zur Verfügung stehen und wirksame Phase-Unwrapping-Techniken zum Einsatz kommen. Die Auswahl des Satelliten selbst und somit einer angemessenen Wellenlänge, oder die Möglichkeit, über kürzere Baselines zu verfügen, was eine Dekorrelation aufgrund der kürzeren Zeitintervalle zwischen den Aufnahmen bewirkt, können dieses Phänomen begrenzen.

Es muss zudem hervorgehoben werden, dass das Prinzip der "Geschwindigkeit" eines Phänomens und seiner Messbarkeit durch die Interferometrie eng mit der Verformungstendenz in Zusammenhang steht, also mit dem linearen oder nicht-linearen Verlauf des Umfangs der Verschiebungen.

Was wurde im Rahmen des Projekts SloMove gemacht

Im Rahmen des Projekts SloMove wurden Untersuchungsgebiete ausgewählt, die von als "langsam" definierten Phänomenen gekennzeichnet sind. Es handelt sich um Deformationen von maximal einigen Metern pro Jahr, wie Blockgletscher und gravitative Hangbewegungen, welche häufig in Zusammenhang mit sekundären Phänomenen größeren Ausmaßes, wie Murgängen und Felsstürzen, auftreten.

Ein aktiver Blockgletscher ist von einem nichtlinearen, impulsartigen Kriechen gekennzeichnet, wobei die maximalen Verformungen in den wärmsten Monaten und am Ende der Sommersaison konzentriert auftreten. Man geht davon aus, dass die Hangverformungen, in diesem Fall der Felsrutsch im Finailtal, über das ganze Jahr hinweg ein lineares Kriechen aufweisen, obgleich sie vermutlich im Frühjahr/Sommer aufgrund der Schneeschmelze und heftigen Regenfällen teilweise von Beschleunigungen gekennzeichnet sind.

Für das Monitoring der oben beschriebenen Phänomene werden Bilder mit einer zeitlichen Baseline, wo potentiell 8-4 Tage möglich sind, aufgenommen; dadurch kann, zusammen mit der hohen Dichte der natürlichen Reflektoren, die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass es, um die bestmöglichen Ergebnisse mit der Technik der Interferometrie zu erhalten, ausschlaggebend ist, das zu untersuchende Phänomen, wenn auch nur ansatzweise, anhand früherer Daten, die Informationen über den Umfang der Verformungen liefern, zu kennen.

4.1.5 Zugänglichkeit, Einschränkungen und Sicherheit

Bei Anwendung der multitemporalen Interferometrie mit Zuhilfenahme von künstlichen Reflektoren wie Winkelreflektoren, muss auch die Zugänglichkeit des Untersuchungsorts berücksichtigt werden: die Möglichkeit eines sicheren Zugangs zum Untersuchungsort, und im Gelände Arbeiten durchführen zu können, wann auch immer es notwendig ist, muss während der vorbereitenden Planungsphasen des Monitorings berücksichtigt werden. Die Zugänglichkeit beeinflusst die Tätigkeiten nicht nur wirtschaftlich, sondern kann auch zu einer beträchtlichen Erhöhung der Kosten im Vergleich zur Veranschlagung (**Kap. 6**) führen und vor

allem dem Erfolg des Monitorings entgegenstehen. Standorte, die aufgrund von ungünstigen topographischen und mit der Umgebung zusammenhängenden Bedingungen oder wegen territorialer Einschränkungen unzugänglich sind und somit keine Installation der technischen Ausrüstung ermöglichen, stellen ein relevantes Hindernis für die Anwendung dieser Methode dar.

Im Rahmen des Projekts SloMove wurden insgesamt 7 künstliche Reflektoren installiert.

4.2 *Beschränkungen der Messungen mit Differential-GPS*

Wie bei der multitemporalen Interferometrie, werden auch für die terrestrischen Messungen in den nachfolgenden Abschnitten zunächst die technischen und operationellen Einschränkungen in Zusammenhang mit der Durchführung eines langfristigen Monitorings beschrieben. Die wichtigsten Einschränkungen im Zusammenhang mit den GPS-Differentialmessungen betreffen hauptsächlich die Sichtbarkeit des Satellitensignals und die Zugänglichkeit des Untersuchungsortes für die Durchführung der Messungen. Die erste Gruppe umfasst Bedingungen, die in hochalpinen, von Gebirgserhöhungen geprägten Landschaften vor allem die Sichtbarkeit der Satellitenkonstellation beeinflussen, während die Zugänglichkeit des Untersuchungsortes sämtliche Messtätigkeiten einschränken kann.

4.2.1 *Sichtbarkeit des Satellitensignals*

Für den Betrieb ist die gleichzeitige **Verfügbarkeit von mindestens 4** der von der Messtation aus sichtbaren **Satelliten** erforderlich. Als "nützlich" dürfen nur jene Satelliten eingestuft werden, die mindestens in einem bestimmten Höhenwinkel über dem Horizont stehen (in der Regel 15-20 Grad): jene, die in einer niedrigeren Position stehen, verursachen sowohl aufgrund der übermäßigen Breite der durchquerten Atmosphäre als auch aufgrund des Vorhandenseins von Bäumen und Gebäuden sowie anderen Hindernissen, die den guten Empfang der Signale an sich hindern, ein gestörtes Signal; je nach Anzahl der Satelliten, die zum Zeitpunkt der Aufnahme zur Verfügung stehen, wird die Verweildauer des Rover-Empfängers auf dem Messpunkt mehr oder weniger lang sein (**Kap. 2.2.2**).

Das Vorhandensein von natürlichen oder künstlichen Hindernissen, die das Satellitensignal negativ beeinflussen können, muss bei der Einrichtung eines Monitoringnetzes sorgfältig bewertet werden.

Die Messung des gegenständlichen Naturphänomens muss das Hauptziel sein; dabei muss berücksichtigt werden, dass das Satellitensignal unter "nicht idealen" Bedingungen an Genauigkeit verliert und die Messung durch Fehler beeinflusst, die unter optimalen Bedingungen auf ein Minimum reduziert werden können. Bei ausgedehnten und dichten Waldflächen, einer hohen Dichte an Gebäuden und Strukturen oder einem besonderen

morphologischen Aufbau des Untersuchungsortes können unpassende Bedingungen für ein Monitoring mit dieser Technologie auftreten.

Nachdem die Monitoringpunkte eingerichtet wurden, ist es zum Zeitpunkt der Messung erforderlich, nicht nur auf die Anzahl, sondern auch auf die Anordnung der "gesichteten" Satelliten zu achten. Auch die Ausrichtung der Satelliten entlang einer Vorzugsrichtung kann die Messungen beeinträchtigen, da dies zu einer "schlechten" Aufnahmegeometrie führt, die es in den schlimmsten Fällen unmöglich macht, die Position eines Punktes zu bestimmen, oder sogar zu Positionierungsfehlern von Hunderten von Metern führen kann.

Was wurde im Rahmen des Projekts SloMove gemacht?

Im Rahmen des Projekts SloMove hat sich das Messverfahren mit dieser Technik angesichts dessen, dass das Untersuchungsgebiet völlig unbewaldet und frei von Strukturen und Gebäuden war, als angemessen herausgestellt. Bei der Erstellung des Messnetzes wurde dennoch versucht, die Messpunkte auf großen Blöcken zu positionieren, die im Vergleich zum restlichen Gelände erhöht lagen und für die Kinematik des vorherrschenden Phänomens so repräsentativ wie möglich waren. Zu diesem Zweck wurden die Messpunkte durch Einbau von exakt vertikalen Gewindestiften auf den Blöcken errichtet, auf die ein Zapfenanschluss zur Positionierung der Empfängerantennen (Rover) aufgeschraubt wurde. Die für die Installation des "Basis"-Empfängers ausgewählten Stationen wurden so ausgeführt, dass sie mit den Basen, auf denen die Winkelreflektoren eingebaut werden, übereinstimmen (**Abb. 15**).

4.2.2 Zugänglichkeit, Einschränkungen und Sicherheit

Die Messmethode erfordert Arbeiten im Gelände, deren Häufigkeit vom Ziel des Monitorings und von der Dauer des Messprogramms abhängt.

Die Voraussetzung für die Durchführung des GPS-Monitorings ist die Möglichkeit eines sicheren Zugangs und die Möglichkeit, über die gesamte Dauer der Messung (in Bezug auf die "Rapid Static" Schnellmesstechnik) stationiert zu bleiben.



4.3 Grenzen des Terrestrischen Laserscanners (TLS)

Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass die Technik des TLS sich für die Messung von Hochgebirgsphänomenen wie Blockgletscher und langsame Erdrutsche eignet. Trotz der guten Erfolge, die erzielt wurden, bestehen Schwierigkeiten und Einschränkungen in Bezug auf die Anwendbarkeit dieser Technologie, die in erster Linie mit der Umgebung und der Morphologie des Untersuchungsgebiets in Zusammenhang stehen. Im gegenständlichen Fall kommt auch die Notwendigkeit hinzu, verschiedene Messmethoden zu integrieren, die jeweils eigene Einschränkungen aufweisen.

4.3.1 Sichtbarkeit

Wie bereits in der allgemeinen Einleitung zur Lasertechnik angedeutet, ist für die **Positionierung des Scanners** eine sorgfältige, vorausseilende Bewertung zur Auswahl eines Untersuchungsortes, von dem aus das gesamte Untersuchungsgebiet sichtbar ist, erforderlich. Wenn dies nicht möglich ist, müssen mehrere Positionen ausfindig gemacht werden, von denen aus die Messung durchgeführt werden kann. Bei der Positionierung der Instrumente muss zudem der Abstand zwischen Scanner und Zielmarken berücksichtigt werden, da die Auflösung der Aufnahme bei Zunahme der vom Signal selbst zurückgelegten Entfernung abnimmt. Im Falle des im Projekt SloMove verwendeten Scanners belief sich die maximale Entfernung auf 1000 m.

Ebenso müssen, nachdem der/die Installationsort/e des/r Scanner/s festgelegt wurde/n, auch die **Kontrollpunkte** (Reference Target) gut sichtbar und entsprechend ausgerichtet sein.

Ein weiterer Faktor, der die Sichtbarkeit des Laserscanners und daher die Zuverlässigkeit der Messungen beeinflusst, sind die **klimatischen Bedingungen**: Nebel, Dunst, Regen und Wolken können die Messung, im schlimmsten Fall zur Gänze beeinträchtigen oder relevante Fehler bei der Messung erzeugen.

Was wurde im Rahmen des Projekts SloMove gemacht

Im Rahmen des Projekts SloMove wurden, nach vorheriger Festlegung des Untersuchungsgebiets und der zu überwachenden Phänomene, die angemessensten Positionen, auch in Hinblick auf die Zugänglichkeit des gewählten Gebietes, zur Installation

des Laserscanners ermittelt. Im italienischen Testgebiet ermöglichte der erste Standort, der einfach zu erreichen und unweit vom Untersuchungsort entfernt war, keine vollständige Aufnahme des gesamten Untersuchungsgebiets. Um das gesamte Untersuchungsgebiet abzudecken, musste ein zweiter Standort ermittelt werden: dieser 2. Standort wurde an einem mit der Seilbahn einfach zu erreichenden Ort festgelegt, der sich innerhalb der für das entsprechende Lasermodell vorgesehenen maximalen Entfernung zwischen Sensor und Zielmarke befand. Die Messungen wurden von beiden Beobachtungspunkten aus durchgeführt (Messungen mit unterschiedlichem Genauigkeitsgrad aufgrund der unterschiedlichen Entfernung zwischen Scanner und Zielmarke), wodurch das gesamte Untersuchungsgebiet abgedeckt werden konnte.

Im Zuge der Messungen stellten der Transport der Messausrüstung und die widrigen Witterungsbedingungen das größte Problem dar.

4.3.2 Eigenschaften der Oberfläche

Oberflächen, die von einer erhöhten Rauigkeit gekennzeichnet sind, wie Geröllhalden mit großen Blöcken und Blockgletscher, eignen sich gut für Laserscanaufnahmen: eine ausgeprägte Rauigkeit und eine regelmäßige Topografie ermöglichen die Beobachtung von horizontalem Kriechen, ohne dass Shadowing-Phänomene eintreten.

4.3.3 Zugänglichkeit, Einschränkungen und Sicherheit

Aufgrund des Gewichts der verwendeten technischen Ausrüstung können die Messungen nur durch Verwendung eines Transportmittels, u.A. einem Hubschrauber, durchgeführt werden. Die Laser-Technologie erfordert in der Tat einen Standort, von dem aus das gesamte Untersuchungsgebiet sichtbar ist, weswegen hoch gelegene Standorte, die häufig schwer zu erreichen sind, besonders günstig sind.

Was wurde im Rahmen des Projekts SloMove gemacht

Im Rahmen des Projekts SloMove wurde die technische Ausrüstung für die Messungen mit TLS im italienischen Untersuchungsgebiet, in Hinblick auf den Transport der Geräte, durch die Nutzung der Seilbahn und eines Geländewagens unterstützt. Im Schweizer Untersuchungsgebiet wurde die technische Ausrüstung mit dem Hubschrauber transportiert.

5. VALIDIERUNG DER DATEN

Wie in den einleitenden Kapiteln vorweggenommen, legt die Validierung der durch die Multi-Interferometrie gemessenen Daten die Grundlagen für ihre weitere und systematische Nutzung auf regionaler Ebene zur Untersuchung von Naturphänomenen, die durch ein langsames Fortschreiten gekennzeichnet sind.

Die Validierung der Daten besteht in der Überprüfung der Zuverlässigkeit der durchgeführten Messung, insbesondere in Hinblick auf ihre Exaktheit (jeder einzelnen Erhebung und des gesamten Bild-Pakets), und somit in der Feststellung, ob die Gesamtheit der Informationen nutzbar ist. Die Validierung der interferometrischen Daten muss anhand einer genaueren Methode erfolgen, wie im Fall der GPS-Differentialmessungen mit "Rapid Static"-Konfiguration im Post-Processing. Die GPS-Technologie ist eine der am häufigsten verwendeten Methoden zur Vor-Ort-Messung von Hangbewegungen. Die Validierung der mit verschiedenen Technologien gemessenen Ergebnisse erfolgt durch den Vergleich der Daten, sobald diese auf einen gemeinsamen Nenner (Geschwindigkeit oder Positions-Verschiebung) und auf eine gemeinsame Dimension gebracht wurden. Das Ziel der Validierung der SAR-Daten ist es, die Bedeutung der mit dieser Technologie gesammelten Informationen besser zu verstehen und beispielsweise durch einen Korrelationsalgorithmus, Schätzungen der tatsächlichen Verformungsgeschwindigkeit des untersuchungsgegenständlichen Naturphänomens anzustellen.

Auch die korrekte Installation der technischen Ausrüstung in den Untersuchungsgebieten (GPS-Punkte, Winkelreflektoren, Kontrollpunkte) bildet eine Grundlage für die Validierung der Interferometerdaten, die ad hoc in den italienischen und schweizerischen Untersuchungsgebieten gemessen wurden.

6. FÄHIGKEIT ZUR DURCHFÜHRUNG EINES LANGFRISTIGEN INTEGRIERTEN MONITORINGS: Kostenvariabilität

Bei der Planung eines Monitoringsystems werden, nachdem die Rahmenbedingungen zur Durchführung der Messungen geschaffen wurden, die in Hinblick auf die erwarteten Ergebnisse angemessenste Technologie und die entsprechenden Methoden ausgewählt.

Bei der Auswahl der Methoden müssen die Einschränkungen in Hinblick auf die Anwendbarkeit der Methode, wie in den vorhergehenden Kapiteln zum Projekt SloMove beschrieben, berücksichtigt werden; gleichzeitig müssen die finanziellen Aspekte in Zusammenhang mit den für die Umsetzung und die wirtschaftliche Tragbarkeit des Monitorings im Laufe der Zeit, insbesondere langfristig zu tragenden Kosten bedacht werden.

Die verschiedenen Messtechnologien werden unterschiedlichen Kostenklassen zugeordnet, die dem beauftragten Techniker einen ersten Anhaltspunkt für die Schätzung der Gesamtkosten für die Tätigkeit bieten (**Deliverable 2.01**).

Die Aufmerksamkeit muss auch auf all jene Faktoren gerichtet werden, welche die Kosten mehr oder weniger beeinflussen und Auswirkungen auf die so genannten "Basiskosten" haben können. Die variablen Kosten (wie im **Deliverable 2.02** aufgelistet) hängen von Faktoren ab, die zur Gänze in die Reihe der im Zuge des Monitorings durchgeführten Tätigkeiten fallen, von der Einrichtung des Messortes über die Messung der Daten bis hin zu den Endphasen der Auswertung der Messdaten. Nachstehend werden die in Hinblick auf die angemessene Planung eines Monitoring-Systems relevanten Faktoren, unterteilt in allgemeine und spezifische Faktoren, aufgelistet.

6.1 Allgemeine Faktoren

Es handelt sich hierbei um Faktoren, die für jene Messmethoden, die Messtätigkeiten und die Installation von spezifischen Geräten im Gelände implizieren, als allgemeine Faktoren betrachtet werden können; es sind Faktoren, die eng mit der Zugänglichkeit des Untersuchungsortes und der Lebensdauer der eingesetzten Geräte in Verbindung stehen.

6.1.1 Zugänglichkeit

Im Hochgebirge nehmen die Probleme in Bezug auf die Zugänglichkeit eines Untersuchungsgebiets bei der Schätzung der Endkosten eine wesentliche Rolle ein. Die Möglichkeit eines einfachen Zugangs zum Untersuchungsgebiet hat Auswirkungen auf die Anzahl der einzusetzenden Techniker, auf die erforderliche Arbeitszeit im Gelände und auf die notwendigen Transportmittel. In jenen Fällen, in denen langfristige, intensive Arbeiten im Gelände erforderlich sind, ist der Aspekt der Zugänglichkeit einer der wesentlichen Faktoren, die in den vorhergehenden Phasen der Planung des Monitorings zu bewerten sind.

Als Beispiel seien die Kosten pro Stunde für den Einsatz eines Geländefahrzeugs im Vergleich zu einem Hubschrauber angeführt:

Hubschrauber ca. 50 Euro/Minute

Flugzeit 15 Minuten = 700 Euro

Anzahl der Flüge/Jahr 6 = 700 Euro/Flug*6 = 4200 Euro/Jahr

Fahrzeugkosten 0,35 Cent/km

160 km h/r um den Untersuchungsort zu erreichen = 180 km*0,35 Cent/km = 63 Euro

Benzin (Fahrzeug mit Verbrauch von 15 km/l bei einem Benzinpreis von 1,75 Euro/l) = 17,5 Euro

Insgesamt 63 Euro + 17,5 Euro = 80,5 Euro

Anzahl der Messungen 6 = 6 *80,5 Euro = 483 Euro/Jahr

Was wurde im Rahmen des Projekts SloMove gemacht

Im Rahmen des Projekts SloMove, in dem das Untersuchungsgebiet nach zahlreichen, für die Umsetzung des Projekts selbst als relevant erachteten Faktoren ausgesucht wurde, wurden die mit dem Zugang zum Untersuchungsort in Zusammenhang stehenden Kosten anhand einer exakten Bewertung bemessen (**Deliverable 3.03**).

Im Wesentlichen handelte es sich um eine gute Planung der im Gelände durchzuführenden Tätigkeiten, der Häufigkeit sowie des Zeitraums des Monitorings, wie Jahreszeiten und

Witterungsverhältnisse. Auf der Grundlage dieser voraussetzenden Bewertungen wurde das Untersuchungsgebiet, unter Berücksichtigung sowohl der technischen Anforderungen in Hinblick auf die durchzuführenden Untersuchungen als auch der Einschränkungen aufgrund eines festgelegten Budgets, ausgewählt.

Im Allgemeinen muss man, wenn man eine Massenbewegung überwachen will und die finanziellen Mittel von vornherein bekannt sind, eine reale Bemessung der Kosten in Hinblick auf den Zeitaufwand, die Anzahl der für die technische Ausrüstung des Messortes und für die Durchführung des Monitorings erforderlichen Techniker und Mittel, auch in Hinblick auf die Zugänglichkeit des Standortes, durchführen.

6.1.2 Datenausgabe/Ausgabe der Messdaten

Dieser Faktor steht auch in Zusammenhang mit der Zugänglichkeit des Messortes, betrifft aber vorwiegend die für die wirksame Nutzung der ausgewählten Messtechnologie und zur Ermittlung der Messdaten erforderlichen Tätigkeiten.

Darunter werden Tätigkeiten wie die Bestellung von Zubehör, die Installation der technischen Ausrüstung im Gelände, die Planung der Messungen oder die Planung der Ausrüstung des Messortes mit alternativen Technologien verstanden. In diese Kategorie fallen auch alle Kosten in Zusammenhang mit dem Ankauf von Zubehör und spezifischen Geräten, die Transport- und Anmietungskosten.

Was wurde im Rahmen des Projekts SloMove gemacht

Es war sehr schwierig, die in diese Kategorie fallenden Kosten zu bewerten: einerseits konnte man auf bewährte Standardaktivitäten bauen, die in Bezug auf Kosten und Zeit genau bemessen werden konnten; andererseits erwies sich die A-priori-Bewertung der Kosten für experimentelle Tätigkeiten und Geräte als schwierig.

Die Planung der Monitoringaktivitäten, die Häufigkeit der Messungen und der für die Durchführung der Messungen erforderliche Zeitaufwand konnte im Voraus mit hinreichender Genauigkeit bewertet werden. Die größten Schwierigkeiten entstanden beim Abschluss der Kaufverträge und bei der Planung, was lange Bearbeitungszeiten für die Herstellung der für die Erfordernisse des Projekts passenden technischen Ausrüstung zur Folge hatte.

Im Rahmen des Projekts SloMove wurden Winkelreflektoren entwickelt, die für die Hochgebirgsbedingungen geeignet waren und auf dem Markt nicht verfügbar sind; zudem wurde das Untersuchungsgebiet hinsichtlich der GPS-Messungen und angesichts der Eigenschaften der vorherrschenden Naturphänomene mit fixen Messpunkten ausgestattet, die sich für die Installation der Sensoren eigneten.

6.1.3 Lebensdauer und Wartung der Ausrüstung

Die Lebensdauer der im Gelände fix installierten Geräte kann ausschließlich auf der Grundlage von bereits vorhandenen Kenntnissen über die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Naturphänomene bewertet werden. Gute Kenntnisse des untersuchungsgegenständlichen Prozesses und der geologischen und geomorphologischen Rahmenbedingungen ermöglichen es, die Geräte an einem sicheren Standort zu positionieren. Im Fall von Präzisionsmessungen wie jenen, die mit den im Rahmen des gegenständlichen Projekts verwendeten Technologien durchgeführt werden, wirkt sich die Lebensdauer nicht nur auf die Zuverlässigkeit der Messungen und des gesamten Monitorings aus, sondern schlägt sich auch auf die Kosten für das Material und für die Durchführungszeiten/den Erwerb von neuen Geräten nieder.

Was wurde im Rahmen des Projekts SloMove gemacht

Der Standort der Winkelreflektoren und der technischen Ausrüstung für die GPS- und TLS-Messungen wurde auf der Grundlage der Vorkenntnisse und der jüngeren Informationen über die im Untersuchungsgebiet auftretenden Naturphänomene geplant. Die Prozesse, die Gegenstand des Monitorings sind, sind von sehr langsam fortschreitenden Verformungen gekennzeichnet: im Untersuchungsgebiet werden, mehr oder weniger davon abhängige, intensivere Phänomene gemessen (Geschwindigkeit, Umfang, Wiederkehrintervall) wie Steinschlag und Murgänge sowie, in den Wintermonaten, Lawinen festgestellt.

Insbesondere liegen die gefährdeten Bereiche oberhalb des Untersuchungsgebiets und gefährden die installierten technischen Ausrüstungen. Aus diesem Grund wurde, abgesehen davon, dass die potentiellen Sturzbahnen der Felsblöcke und die unmittelbar unter den Felswänden gelegenen Bereiche vermieden wurden, bei gleichermaßen aussagekräftigen

Standorten, vorzugsweise der jeweils höher gelegene Standort ausgewählt. Die selben Überlegungen wurden in Bezug auf Murgänge und Lawinen angestellt.

6.2 Spezifische Faktoren

Im Rahmen des Projekts wurde der Möglichkeit, über die gesamte Dauer der Messverfahren autonom zu arbeiten und, soweit möglich, die notwendigen Kompetenzen zu erlangen, um ein integriertes Monitoring effizient und umfassend durchzuführen, besondere Aufmerksamkeit zugewandt. Dadurch wurden die Grundlagen geschaffen, um die Monitoringkampagne vollumfänglich, von den anfänglichen Phasen der Planung, über die Ausstattung des Untersuchungsgebiets mit den notwendigen Ausrüstungen und der Durchführung der Messungen bis hin zur Nutzung der ermittelten Ergebnisse für weitere Anwendungszwecke, zu begreifen. In diesen Zusammenhang gliedern sich auch weitere Faktoren ein, die es zu berücksichtigen gilt, welche die anfängliche Kostenschätzung beeinflussen und in die Abschlussphasen der Monitoringkampagne fallen, wie die **Datensammlung, die Datenbearbeitung und die letztendliche Interpretation der Daten.**

Für diese Abschlussphasen ist die Verfügbarkeit von hochqualifiziertem Personal und Spezialsoftware erforderlich: in Bezug auf den ersten Punkt wurde internes Personal durch Trainingsmaßnahmen geschult, wofür hilfsweise Branchenexperten entsprechende Schulungen abgehalten haben. Für den zweiten Punkt wurden, soweit möglich, frei nutzbare Programme verwendet oder Spezialsoftwareprogramme erworben.

6.2.1 Datensammlung

Multitemporale Interferometrie

Im Rahmen des Projekts SloMove wurden die SAR-Bilder von der Satellitenkonstellation Cosmo-SkyMed aufgenommen, die in der Bandachse mit Wiederkehrzeiten von 16 Tagen liegen. Die Beantragung der Daten beim Lieferanten erfordert eine sorgfältige Planung und Auswahl der bestmöglichen Aufnahmegeometrie. Die häufigsten Gründe für die Unmöglichkeit, Daten innerhalb der vorab festgelegten Fristen zu erfassen, hängen im Wesentlichen von technischen Aspekten im Zusammenhang mit der Funktionstüchtigkeit des Satelliten ab: die Cosmo-SkyMed-Konstellation wurde für duale, also militärische und zivile Zwecke geschaffen, wobei die Priorität der zu erfassenden Bereiche und die zeitlichen

Aspekte variieren können. Das Ausbleiben eines oder mehrerer Bilder im Vergleich zum veranschlagten Wert kann den Erfolg der interferometrischen Messung beeinflussen.

Differential-GPS

Die Datensammlung im Gelände mit der Differential-GPS-Technik, die im "Rapid-Static"-Modus mit mehreren Empfängern durchgeführt wird, muss in einem bestimmten Zeitfenster erfolgen, um die gleichzeitige Sichtbarkeit der selben Satellitenkonstellation ausgehend von allen Standorten des Netzes zu ermöglichen.

Die Zugänglichkeit des Untersuchungsortes und die Witterungsbedingungen stellten die größten Probleme bei den Messungen dar. Während der Messkampagne für das Projekt SloMove wurden die Messungen mehrfach aufgrund schlechter Witterungsverhältnisse eingestellt: die Geräte mussten mehrfach vom Standort entfernt werden, um Beschädigungen zu vermeiden, und die Messungen mussten anschließend wiederholt werden. Die Neuprogrammierung einer neuen Messkampagne steht im Zusammenhang mit dem Stundensatz des eingesetzten Personals.

Terrestrischer Laserscanner

Die Messungen mit Laserscanner erfordern Tätigkeiten im Gelände, wobei man das Risiko läuft, dass es zu Problemen in Bezug auf die Zugänglichkeit des Untersuchungsortes und auf die Wetterverhältnisse kommt: da der Einsatz dieser Technik bei niedrigen Wolken und Niederschlägen, also Regen oder Schnee, nicht möglich ist, mussten ganze Messtage mehrfach neu geplant werden. Die TLS-Messungen werden mit der Unterstützung durch externe Berater und mithilfe von Transportmitteln wie dem Hubschrauber durchgeführt; es ist offensichtlich, dass die Unterbrechung einer Messkampagne und die Notwendigkeit, erneut zum Untersuchungsort zu gelangen, um die Messung durchzuführen, sich auf die Kosten niederschlägt.

6.2.2 Datenverarbeitung

Multitemporale Interferometrie

Der SBAS-Algorithmus wird bei einer Vielzahl von klassischen Interferogrammen genutzt, die sorgfältig ausgewählt werden und von kurzen zeitlichen und räumlichen Baselines gekennzeichnet sind. Der SBAS-Algorithmus zielt zur Ermittlung der Dekorellationseffekte auf die Redundanz in der Analyse, was stark von der Anzahl der verfügbaren Bilder abhängt. Die wirksame Verwendung des Algorithmus hängt daher von der Anzahl der Bilder und von der Verfügbarkeit von Endgeräten und Softwares ab, die zur Verwaltung dieser Datenmenge notwendig sind; zudem erfordert die Verwendung des Algorithmus besondere Fachkenntnisse, die durch spezifische Ausbildungen erworben werden können.

Differential-GPS;

Das Post-Processing der Daten umfasst eine Reihe von Tätigkeiten, die mit dem Auslesen der Rohdaten und deren Einspeisung in eine Software zur Schätzung der Koordinaten der Baselines zwischen den verschiedenen Punkten beginnt. Die Softwares können in zwei Gruppen eingeteilt werden: die "handelsüblichen" Anwendungen, die vom Hersteller eines bestimmten Gerätes mitgeliefert werden und im Single-Base-Mode arbeiten, und die "wissenschaftlichen" Anwendungen, die weitaus komplexer und kostspieliger sind.

Im Projekt SloMove wurde die Software LGO des Herstellers Leica verwendet, welche die Einspeisung und Verarbeitung von Daten im RINEX-Format und eine Ausgleichberechnung des Netzes ermöglicht. Nach Schätzung der approximativen Koordinaten der gemessenen Punkte werden die Fehler anhand einer Schätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate behoben. Diese Tätigkeit erfordert entsprechende Kompetenzen und geschultes Personal.

Terrestrischer Laserscanner

Die Verwaltung und Verarbeitung der mit TLS gemessenen Daten macht eine Software in GIS-Umgebung erforderlich, welche dazu in der Lage ist, das Volumen der gesammelten Daten zu verwalten (100.000 Punkte pro m²). In diesem Fall ist für den Ankauf von geeigneten Softwareanwendungen und Terminals ein bedeutender Kostenaufwand notwendig. Dennoch



werden TLS-Messungen von Fachunternehmen durchgeführt und die Kosten des Voranschlags inkludieren auch die Verarbeitungskosten.

6.3 Interpretation der Daten

Für alle bisher analysierten Messtechnologien erfordert die Interpretation der erhaltenen Daten spezifische Kompetenzen, die durch Fortbildungskurse erlangt werden können. Für die Integration unterschiedlicher Messmethoden ist auch die Unterstützung durch spezialisierte Techniker unerlässlich, vor allem während der ersten Phasen der Machbarkeitsanalyse und der Planung eines Monitoringsystems.

6. Referenzunterlagen

- Lauknes T.R. (2004), "Long-Term Surface Deformation Mapping using Small-Baseline Differential SAR Interferograms", Ms. Thesis, Tromsø Un., Norway
- Lauknes T. R., (2010), "Rockslide mapping in Norway by means of interferometric SAR time series analysis". PhD Thesis Tromsø Un., Norway
- Mulas M. (2011), "Using X-Band Persistent Scatterer Interferometry for slope instability monitoring" Master II livello, Bari Un., Italy
- Colesanti C., Wasowsky J., (2006), "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry" Eng. Geo. 88, 173–199
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2003. Monitoring landslides and tectonic motion with the permanent Scatterers technique. Engineering Geology 68/1-14.
- Gili J. A., Corominas J., Rius J., (1998), "Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring", Eng. Geo.55, 167–192
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R. e Sansosti E. (2002), "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms" IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens., 40, 11, 2375-2383
- Squarzoni. C, Delacourt C., Allemand P., (2003), "Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps)" Eng. Geo, 79,3-4, 215-229
- Casu F., Manzo M., Lanari R., (2006), "A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data". Rem. Sens.Env. 102, 3–4, 195–210
- Pesci A., Conforti D., Fabris M., Loddo F. , (2006), GPS; fotogrammetria digitale e Laser Scanner: un sistema integrato di rilevamento. Quaderni di geofisica.
- Bauer A., Paar G., Kaufmann V. (2003). Terrestrial Laser scanning for rock glacier monitoring.
- Kenner, R., Phillips, M., Danioth, C., Denier, C., Zraggen, A., 2001, "Investigation of rock and ice loss in a recently deglaciated mountain rock wall using terrestrial laser scanning: Gemsstock, Swiss Alps. 2011". Cold Reg.Sci. Tech., 67 (3) 159-164

Operative Anweisungen: DATENBLATT 1. DATEN SATELLITENGESTÜTZTES RADAR

1. SCHÄTZUNG DER VON PERSPEKTIVISCHEN VERZERRUNGEN BETROFFENEN GEBIETE

Die Methoden für die Satellitenaufnahme mit einem nicht senkrecht zum Boden stehenden Sichtwinkel θ und der Bodentopographie führen zu **perspektivischen Verformungen** (Forshortening, Shadowing, Layover), die einen Mangel an Daten oder Verformungen der RADAR-Bilder in einigen Gebieten implizieren.

Satellitenorbit = im Fall des Cosmo-Satelliten ca. N-S ausgerichtet (± 6.75)

Sichtwinkel (LoS)= θ

Nominaler Einfallswinkel = I° ist gleich θ , jedoch unter Berücksichtigung der Erdkrümmung, ohne Berücksichtigung der Topographie.

Die Schätzung der von geometrischen Verformungen betroffenen Gebieten, je nach I° und Satellitenorbit ermöglicht es, **(1) die beste Aufnahmegeometrie des Satelliten** und, sofern notwendig, **(2) die Position der künstlichen Reflektoren** auszuwählen. Für die Erzeugung der Verzerrungsmasken wurde ein eigens in einem GPS-Umfeld erzeugtes Tool und ein dtm 2.5mx2.5m im Gebiet des Schnalstaes und 20mx20m in der Schweiz verwendet. Für die Beschreibung des Tools siehe **Anlage Nr. 1**.

WICHTIG IST AUCH DIE SCHÄTZUNG DER VEGETATIONSBEDECKTEN GEBIETE (Dekorrelationseffekte) UND DAS VORHANDENSEIN GUT VERTEILTER ZIELMARKEN

Die Auswahl des Cosmo-SkyMed Satelliten erfolgte auf der Grundlage der Satellitengeometrie, der Frequenz der Bildererfassung (garantierte Aufnahmen alle 16 Tage), und der Auflösung des Sensors (3mx3m). Die Daten wurden im Rahmen von Mapitaly ([Progetto Mapitaly - AO - 8mar2011.doc](#); [mapitaly - 8mar2011.kmz](#)) erhoben, ein Programm für programmierte und garantierte Erhebungen von Cosmo, das eine SAR-Katalogisierung des gesamten italienischen Gebietes, mit einer Mindest-Wiederholrfrequenz von 16 Tagen mit der gleichen Erhebungsgeometrie sicherstellt. Cosmo-SkyMed (<http://www.cosmo-sky.med.it/en/index.htm>) ist jedoch eine Konstellation aus 4 Satelliten, für den dualen Einsatz auf ziviler und militärischer Ebene: dadurch entstehen Konflikte in Hinblick auf die

Priorität der Aufnahmen (mögliche Sprünge im Vergleich zur durchgeführten Programmierung, wodurch sich die Anzahl der Bilder im Vergleich zur Planung reduziert).

Bild-Provider Cosmo-SkyMed: <http://www.e-geos.it/>

Link, um die Bilder des Katalogs einzusehen: zur Registrierung (<http://87.241.31.78/index.php>). Bei den Archivbildern handelt es sich um bereits erfasste Bilder, die zu einem im Vergleich zu einem ad hoc-programmierten Bild geringeren Preis erworben werden können.

2. WINKELREFLEKTOREN

2.1 MATERIAL UND EINBAU

Corner: verzinkter Stahl und eloxiertes Aluminium. Ausführungszeiten 2-3 Monate.



Basis: gelochte Stahlplatten (3 Löcher mit 20 mm) mit einem Durchmesser von 20 cm, Dicke (10 mm). 19 cm lange Nägel (Durchm. 16 mm) oder 40 cm lange Gewindestäbe (Durchm. 14 mm). Die Basis muss waagrecht sein und die subvertikalen Stangen müssen eine einfache Montage der Basis des Winkelreflektors ermöglichen. Für jeden Winkelreflektor müssen 1-2 Platten für die Basis vorgesehen

werden. **Verwendete Geräte:** Elektrobohrer, Schrauben und Schraubenmutter, Universalschraubenschlüssel, Inbusschlüssel, digitale Wasserwaage, Kompass, Säge.

Basis für den Winkelreflektor

Die mit den GPS-"Basen" gekoppelten Winkelreflektoren sind in stabilen Bereichen, im Fels, außerhalb der Verformungsbereiche, gelegen. Die Winkelreflektoren und die Unterseite des

Tetraeders sind nach den geometrischen Eigenschaften des aufzeichnenden Satelliten ausgerichtet bzw. geneigt, wobei im gegenständlichen Fall der Azimut (Orbitwinkel) und I° in den beiden Testgebieten von SloMove unterschiedlich sind.



Bei jeder GPS-Messung wurde der Corner auf Ausrichtung und Neigung (mit Verlängerung aus Holz, Kompass und digitaler Wasserwaage) kontrolliert.

Überprüfung der Ausrichtung des Winkelreflektors

Im Rahmen des Projekts wurden die künstlichen Reflektoren, die Winkelreflektoren, installiert, um einen gemeinsamen Punkt für die Kontrolle, die

Validierung und die Integration der drei verwendeten Technologien zu schaffen. Bei der für die Testgebiete von SloMove gewählten Untersuchungsmethode werden die naturgemäß im Gebiet vorkommenden Scatterer verwendet, wodurch die Aufnahmen im Hochgebirge rein auf die Sommersaison beschränkt sind.

!!!!!! Im Hochgebirge (über 2500 m ü.d.M.) dauert die Sommersaison, also die Zeit, während der der Boden nicht schneebedeckt ist, ca. 3-4 Monate pro Jahr, wodurch die Anzahl der Bilder beschränkt ist. Außerdem muss auch das Fehlen von Informationen zwischen zwei oder mehreren Erfassungszeiträumen berücksichtigt werden, die - je nach Dynamik des Phänomens - die Genauigkeit des Auswertungsergebnisses beeinflussen können.

WENN KÜNSTLICHE REFLEKTOREN (WINKELREFLEKTOREN) INSTALLIERT WERDEN, MUSS DIE ZUGÄNGLICHKEIT ZUM UNTERSUCHUNGSORT BEWERTET WERDEN!!

2.2 POST-PROCESSING DER DATEN

Mit dem Post-Processing der SAR-Bilder wurde die CNR-IREA Neapel beauftragt, die den von der Firma selbst entwickelten Algorithmus Small BAseLine Subset - SBAS verwendet hat. Grundlegend ist die Anzahl der verwendeten Bilder, welche die Genauigkeit des Endproduktes bestimmt.

Operative Anweisungen: DATENBLATT 2. GPS-MESSUNG UND POST-PROCESSING

1 VERMARKUNG DES GEODÄTISCHEN NETZES

2 “Referenzbasen” für jedes Testgebiet

Schnals: Anzahl Messpunkte: 18 + 2 Referenzbasen. Dichte der Messpunkte: ca. 79 Stellen/km²

Schafberg: Anzahl Messpunkte: 14 + 2 Referenzbasen. Dichte der Messpunkte: ca. 92 Stellen/km²

JE NACH ANZAHL DER VORGESEHENEN MESSUNGEN MUSS DIE ZUGÄNGLICHKEIT DES GEBIETS BERÜCKSICHTIGT WERDEN!

1.1 VERWENDETES MATERIAL

Referenzstation: Winkelreflektoren mit Zapfenanschluss. Die GPS-Antenne muss im Vergleich zum oberen Festpunkt des Corner stets erhöht sein (um das Einführen neuer Fehler in der Messung zu vermeiden).

Festpunkte: Gewindestäbe mit 14 mm aus verzinktem Stahl, ca. 40 cm lang; diese werden ca. 10 cm weit in die Blöcke eingefügt und mit einem chemischen Verankerungsmittel befestigt.

Bohrer, Schrauben, Schraubenschlüssel, Inbusschlüssel, digitale Wasserwaage, Kompass, Säge.



Referenzstation



Festpunkt

1.2 POSITIONIERUNG DER MESSPUNKTE

Positionierung der "Referenzbasen": Stabile Punkte auf außerhalb des Verformungsbereichs aufgeschlossenem Fels. GPS-Basen, gekoppelt mit Winkelreflektor und Kontrollpunkt für das TLS. Abstand der Referenzbasen der Festpunkte von weniger als 200 m.

Positionierung der Festpunkte: angeordnet nach einem Netz, das möglichst regelmäßig waagrecht und senkrecht entlang der Richtungen der größten Verformung verläuft. Anordnung der Festpunkte in den repräsentativsten Punkten des untersuchten Phänomens (ausgesetzte und große Blöcke). Die Stangen müssen vertikal angeordnet sein. Eine etwaige Rotation der Blöcke muss erfasst (digitale Wasserwaage und Kompass) und in der Phase des Post-Processing der GPS-Daten berücksichtigt werden.

ES MUSS AUF NATÜRLICHE ODER KÜNSTLICHE HINDERNISSE IM NAHBEREICH DER GEBIETE, IN DENEN SICH DIE REFERENZBASEN UND DIE FESTPUNKTE BEFINDEN, GEACHTET WERDEN - SICHTBARKEIT!

1.3 MESSUNGEN

Zwei Doppelfrequenz-GPS-Sensoren wurden in den beiden Referenzbasen positioniert. Mit einem dritten Sensor wurde jeder Festpunkt jeweils 30 Minuten lang gemessen. Erfassung alle 5 Sekunden; Cut-off-Winkel 15° ; Erfassung mit GPS- und GLONASS-Satelliten.

Eine Messreihe mit n Empfängern ermöglicht die Schätzung von $n(n-1)/2$ Referenzbasen (Basislinie, die zwei Messpunkte miteinander verbindet).

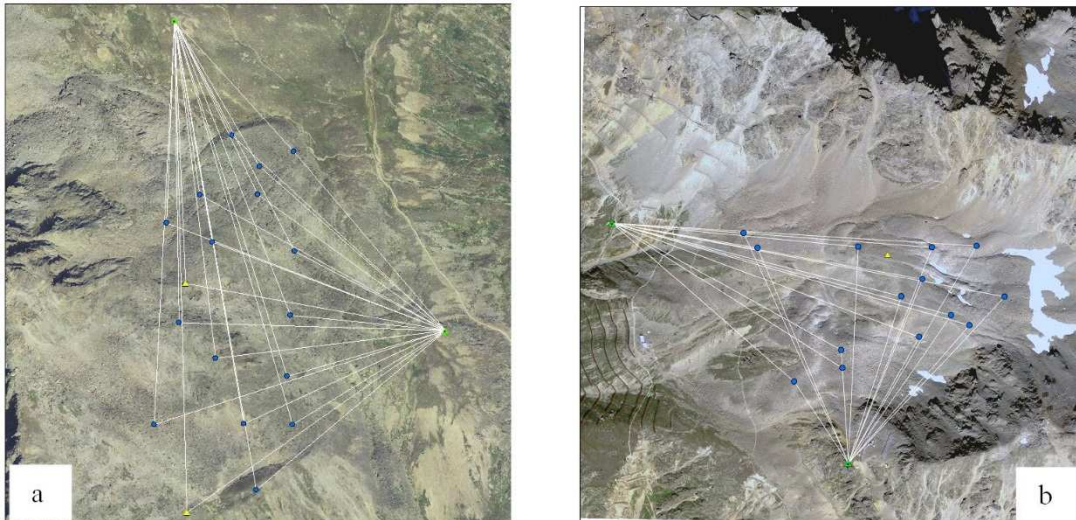


Abb. a und b - Messnetz und Baseline (weiß). Sternsystem

Für die gesamte Messung eines Netzes mit N Punkten müssen alle Punkte miteinander verbunden bzw. $N-1$ Basen erfasst werden. Die Redundanz der Messung ist die Differenz zwischen der Anzahl der Beobachtungen (erfasste Referenzbasen \times 3 Komponenten) und der Anzahl an Unbekannten (N Punkte \times 3 Komponenten). Die Redundanz bestimmt die Zuverlässigkeit des Netzes: deshalb ist es zweckmäßig, für jeden Festpunkt mindestens 2 Besetzungen vorzusehen, da somit eine Redundanz von > 0 , die Kontrolle grober Fehler und eine rigorose Zusammensetzung des Netzes ermöglicht wird.

1.4 POST-PROCESSING DER DATEN

Die Endprodukte der Verarbeitung der GPS-Daten in relativer Positionierung entsprechen der Schätzung der 3 Koordinaten der Referenzstation (siehe oben, Kap. 1.3 - MESSUNGEN).

1.5 BASISDATEN

Für das Post-Processing der Daten wurde die Software **LGO** von **Leica Geosystem** verwendet.

Es wurden folgende **Dauerstationen** eingesetzt:

- Schafberg: Tirano (50 km); Samedam (6 km);
- Schnals: Mals (19 km vom Testgebiet entfernt); Meran (41 km vom Testgebiet entfernt).

Die Daten der **Messstationen Mals und Meran** können, nach vorheriger Registrierung, von der Internetseite der Autonomen Provinz Bozen heruntergeladen werden <http://www.stpos.it/SpiderWeb/frmlIndex.aspx>. Von dieser Seite können nach vorheriger Registrierung auch die absoluten Antennenwerte heruntergeladen werden (dies ist nützlich, falls diverse Sensoren mit unterschiedlichen Antennen-Offsets verwendet werden).

Die Daten der **Messstation Tiran** wurden von der Firma Leica **SmartNet Italpos** erworben, die Daten der **Messstation Samedam** wurden bei der Firma Swisstopo, www.swipos.ch angefordert. Die Daten der Dauerstationen werden alle 5 Sekunden, d. h. mit dem selben Intervall wie die Messwerte, erfasst.

Für eine höhere Genauigkeit der Verarbeitung der GPS-Daten wurden die **genauen Ephemeriden** heruntergeladen (Daten über die Positionierung und den Zustand der GPS-Konstellation zum Zeitpunkt der Messung), die insbesondere bei weit entfernten Dauerstationen nützlich sind. Anleitung zum Download:

1. Suchen Sie auf der Webseite <http://adn.agi.com/GNSSWeb> den GPS-Wert jenes Tages, an dem die Messungen durchgeführt wurden, z. B.: 19/09/2013 = Tag GPS 1758:4 = 17584
2. Gehen Sie auf www.igs.org und folgen Sie dem Verlauf FTP - pub - gps, öffnen Sie den Ordner 1758 und laden Sie die Datei igs17584.sp3.Z herunter (ACHTEN SIE AUF DIE DATEIERWEITERUNG: .sp3!!)

1.6 DATENIMPORT

1. Weisen Sie dem Projekt eine Projektion und ein Referenzsystem zu (UTM - ETRF2000).
2. Laden Sie die Daten der Messkampagne herunter: eine Kampagne nach der anderen!
3. Laden Sie die Daten der Dauerstationen jener Tage herunter, an denen die Messungen durchgeführt wurden. Kontrollieren Sie die Qualität der Stationen, indem Sie überprüfen, dass die Schätzung der Koordinaten auf dem neuesten Stand ist und regelmäßigen Kontrollen unterzogen wird.
4. Importieren Sie die genauen Ephemeriden.
5. Wenn diese nicht während der Messung eingestellt wurden, kontrollieren Sie die Antennen-Offsets.
6. Benennen Sie, wenn notwendig, die Messpunkte um. Um einen Punkt endgültig umzubenennen, muss direkt der Original-Messwert (Rinex oder sonstiger) bearbeitet werden.

RINEX-WERT: <http://it.wikipedia.org/wiki/RINEX>

Das Programm LGO ermöglicht den Export der von den GPS-Sensoren erhaltenen Dateien mit den Rohdaten in Rinex.

1.7 BEGINN DER BEARBEITUNG

Richtlinien zur Verwendung des LGO-Programms im Post-Processing

http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDkQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.ingeosystems.it%2Fdownload.php%3F926743a5d0ce99583135805efd4d123f&ei=_l2wUrS-

[OqrD4gTZsYHYAw&usg=AFQjCNEG0WLJIZE5fDqFVQb6_eEw9PIInnQ&sig2=oAT43Trcoz0AvehXVyH_olw&bvm=bv.57967247,d.bGE](http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CEEQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ingeosystems.it%2Fdownload.php%3F17c48d25f195b7eb4bc545ec6035222b&ei=_l2wUrS-OqrD4gTZsYHYAw&usg=AFQjCNEG0WLJIZE5fDqFVQb6_eEw9PIInnQ&sig2=oAT43Trcoz0AvehXVyH_olw&bvm=bv.57967247,d.bGE)

http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CEEQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ingeosystems.it%2Fdownload.php%3F17c48d25f195b7eb4bc545ec6035222b&ei=_l2wUrS-OqrD4gTZsYHYAw&usg=AFQjCNET7ZcAcZo_3_oN96K6E0YWUbj2zw&sig2=w-DqHpu_caw5yTIHMu17Fw&bvm=bv.57967247,d.bGE

a) Schätzung der Koordinaten der Referenzbasen

Bei der Schätzung der Koordinaten der Referenzbasen der in den Testgebieten des Projektes errichteten geodätischen Netze bezog man sich auf die oben angeführten Referenzstationen (Tirano und Samedam für die beiden Schweizer Referenzbasen, Mals und Meran für die italienischen).

Es wurde das troposphärische Modell nach **Saastamoinen** verwendet.

Schätzen Sie die Baseline zwischen den beiden Punkten (Dauerstation-Referenzstation):

- Base Corner 1 (Schnals) bezogen auf Meran, Base Corner 13 bezogen auf Mals
- Niedrige Base Corner (Schafberg) bezogen auf Samedam, hohe Base Corner bezogen auf Tirano

ES SIND AUCH DIE HÖHENUNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEN DAUERSTATIONEN UND DEN REFERENZBASEN, IN HINBLICK AUF DAS PROBLEM MIT DER TROPOSPHÄRISCHEN STÖRUNG, ZU BERÜCKSICHTIGEN

b) Schätzung der Punkte-Festpunkte

1. Das Rechenmodell wurde während der vorhergehenden Vorgänge eingestellt.
2. Die Festpunkte müssen zuerst ausgehend von einer Referenzstation (z. B. Base Corner 1) und dann von einer anderen (Base Corner 13) geschätzt werden.
3. Somit erhält man zwei Koordinatenschätzungen für jeden Punkt. Die Differenz zwischen diesen zwei Werten muss überprüft werden.
4. Die Schätzung der vom Base Corner 1 und vom Base Corner 13 geschätzten Koordinaten des Punktes 1 muss verglichen werden. Die Differenzen müssten sich auf mehrere mm oder wenige Zentimeter belaufen (in der Regel ist der Fehler in der Höhe geringfügig größer als die xy-Werte).

c) Zusammensetzung des Netzes

Dies dient einer realistischeren Bewertung der Genauigkeit der Endschätzungen im Vergleich zu den davor erarbeiteten Schätzungen, mit Feststellung etwaiger Anomalien auf einzelnen Reihen (Fehler in den Ephemeriden, Atmosphäre etc.).

Operative Anweisungen: DATENBLATT 3.

MESSUNG MIT TERRESTRISCHEM LASERSCAN

Die Technologie mit terrestrischem Laserscanner erfordert hochqualifiziertes Personal für die Durchführung der Messungen und die Phasen der Datenverarbeitung. Diese Leistung wird daher gewöhnlich von spezialisierten Firmen bzw. Instituten erbracht. Dennoch ist es nützlich zu wissen, wie und nach welchen Kriterien die Messung von den ersten Phasen der "technischen Einrichtung" des Messnetzes an durchgeführt wird.

1. EINRICHTUNG DES MESSNETZES

1.1 LASERSCANNER

Die Position des Laserscanners richtet sich nach dem Prinzip der "guten Sichtbarkeit" des zu überwachenden Gebiets und der Entfernung zwischen Sensor und Zielmarke, die von der Art des verwendeten Lasers abhängt, wie im **Kapitel 2.3** beschrieben.



Im gegenständlichen Fall wurde der Laserscanner auf einem Dreifußgestell installiert, das auch dank 3 eigens hergestellter Furchen auf dem Fels positioniert wurde, die es bei der Wiederholung der Messungen ermöglicht haben, das Dreifußgestell stets auf dem selben Punkt zu positionieren. Weiters wurden aus

Sicherheitsgründen 3 (im Fels befestigte) Ringe und Seile eingebaut, um das Dreifußgestell bei starkem Wind am Boden zu verankern. Der Laserscanner wurde nämlich auf stark ausgesetzten topographischen Höhen positioniert.

Für das Funktionieren des Laserscanners ist ein Generator erforderlich.

1.2 KONTROLLPUNKTE

Die Kontrollpunkte (Kap. 2.3) bestehen aus 50cmx50cm großen, verzinkten Stahlplatten, auf welchen reflektierende Folien aufgebracht werden. Die Punkte, deren Anzahl nicht weniger als 3 betragen darf, müssen orthogonal zum Laserstrahl ausgerichtet sein. Es muss auf die Verankerung der Platten (Verwendung von Einpressgewindebolzen mit kleinem Durchmesser, Länge ca. 40 cm, Abb. 12) sowie auf deren Stabilität und Lebensdauer Acht gegeben werden.

1.3 VERWENDETES MATERIAL

Kontrollpunkte: verzinkte Stahlplatten, reflektierende Folien, Einpressgewindebolzen, Bohrer, Zangen, Hammer, Ringe.

ANLAGE NR. 1:

TOOL FÜR DIE ERSTELLUNG VON PERSPEKTIVISCHEN VERFORMUNGSMASKEN

Verwendete Software: ArcMap 10.1

WARUM?

Zur Auswahl der für das zu untersuchende Phänomen am besten geeigneten Satellitenausrichtung.

WIE?

Durch Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse zwischen dem Winkel der Umlaufbahn des Satelliten, dem nominalen Einfallswinkel (I°) des Satelliten, der Hangneigung und der Hangausrichtung.

INPUTDATEN

Digitales Geländemodell (dtm) - Raster Dataset, Wert I° und Winkel der Umlaufbahn. Diese hängen vom Messgebiet und von der Messmethode (STRIPMAP etc.) ab.

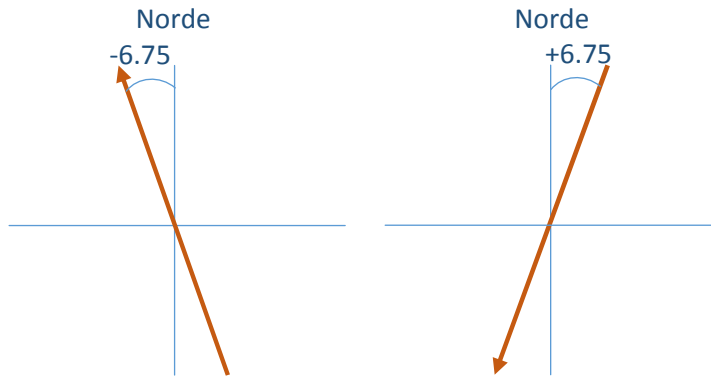
Zur Überprüfung der geometrischen Daten von Cosmo und zur Einsicht in die verschiedenen Möglichkeiten: http://www.e-geos.it/products/pdf/Cosmo_FAQ.pdf.

BEFEHLSEQUENZ

- Resampling des dtm, je nach Auflösung des SAR-Bildes
- Erstellung der Raster *aspect* und *slope* (unter Spatial Analyst, **Aspect und Slope**)
- Berichtigung des Rasters *aspect* unter Bezugnahme auf die Umlaufbahn des Satelliten (Map algebra expression: "raster aspect + (Winkel der Umlaufbahn)", um einen *aspect recalculated* zu erhalten.

Bei der Cosmo-SkyMed Konstellation hat der aufsteigende Orbit einen negativen Wert von ca. -6.75° ($353,25^\circ$ N) und der absteigende einen Wert von $+6.75^\circ$:

“raster *aspect* + (-6.75°)” für den aufsteigenden Orbit und “raster *aspect* + (+6.75°)” für den absteigenden Orbit.



- Getrennte Umwandlung des *Slope-Rasters* und des „*Aspect recalculated-Rasters*“ von Grad in Radianten (Map algebra expression: 1. “raster *slope* x(3,14/180)”; 2. “raster *aspect neu berechnet* x(3,14/180)”: somit erhält man die Raster *slope rad* und *aspect rad*).
- (in ArcMap, Map algebra expression: “raster *slope rad* x Seno(raster *aspect rad*)”) somit erhält man ein *Raster unique*.
- Umwandlung des *raster unique* von Radianten in Grade (Map algebra expression: 1. “raster *unique* x(180/3,14)”) somit erhält man ein *raster unique deg*.
- Das *raster unique deg* muss nach den folgenden Verhältnissen klassifiziert werden:

Absteigender Orbit		Aufsteigender Orbit	
$0 < \alpha < 1^\circ$	forshortening	$0 < \alpha < 90^\circ - 1^\circ$	forshortening
$\alpha > 1^\circ$	layover	$\alpha < 90^\circ - 1^\circ$	shadowing
$0 > \alpha > 1^\circ - 90^\circ$	Enhanced range	$0 > \alpha > -1^\circ$	Enhanced range
$\alpha < 1^\circ - 90$	shadowing	$\alpha > 90^\circ - 1^\circ$	layover

Tabelle 2

Wobei 1° den Einfallswinkel und α die Neigung des Bodens angibt.

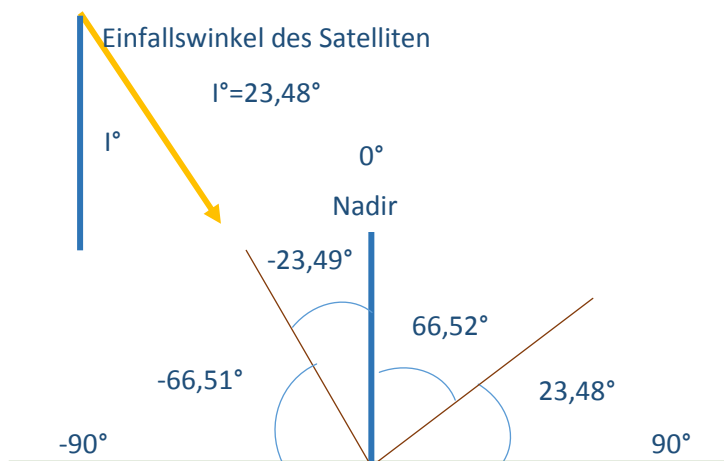
Ausgehend von einem nominalen Einfallswinkel $I^\circ = 23,48$, und von einem "right looking" aufsteigenden Orbit, verwenden Sie die Funktion **Reclassify** und geben Sie die folgende neue Klassifizierung ein:

Bei Bodenneigungen zwischen -90° und $-23,49^\circ$ treten Shadowing-Phänomene auf;

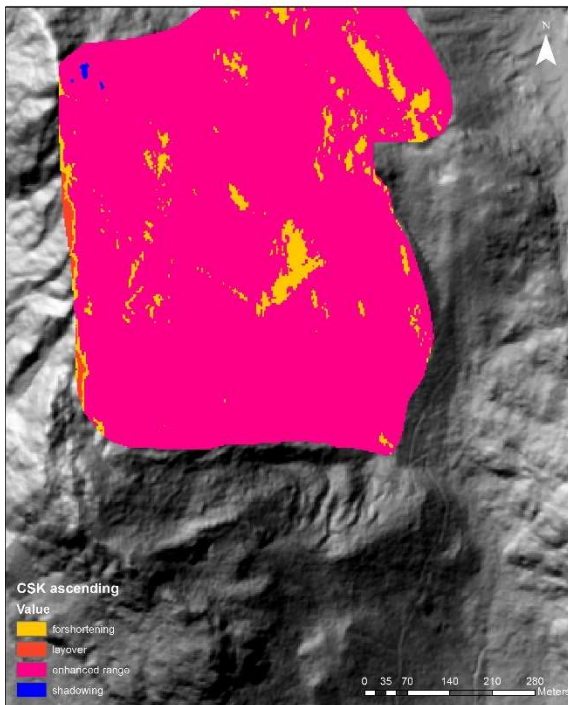
Bei Werten der Bodenneigung zwischen $-23,48^\circ$ und 0° treten Enhanced-range-Gebiete auf;

Bei Werten der Bodenneigung zwischen 0° und $66,51^\circ$ treten Forshortening-Phänomene auf;

Bei Werten der Bodenneigung zwischen $66,52^\circ$ und 90° treten Layover-Phänomenen auf.



Man erhält ein Raster mit Angabe der von den diversen perspektivischen Verformungen betroffenen Gebiete.



Maske mit Angabe der geometrischen Verzerrung für die aufsteigende Geometrie des Cosmo-SkyMed-Satelliten (Testgebiet Schnalser Tal). Das Enhanced-range-Gebiet ist in Rosa gekennzeichnet.

Durch Änderung des Einfallswinkels oder der Umlaufbahn des Satelliten wird die am besten geeignete Satellitenausrichtung ausgewählt.