



“Die Möglichkeiten
haben keine Grenzen”



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

**Deliverable
D.4.03**

**Leitlinien für die Verwendung
der Satelliten- und terrestri-
schen Techniken bei der
Überwachung von
Hangbewegungen - mit SWOT
Analyse**

Datum: 02.2015

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 durach 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

Giulia Chinellato

Tel +39 0471 055 396

Fax +39 0471 055389

E-Mail: giulia.chinellato@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

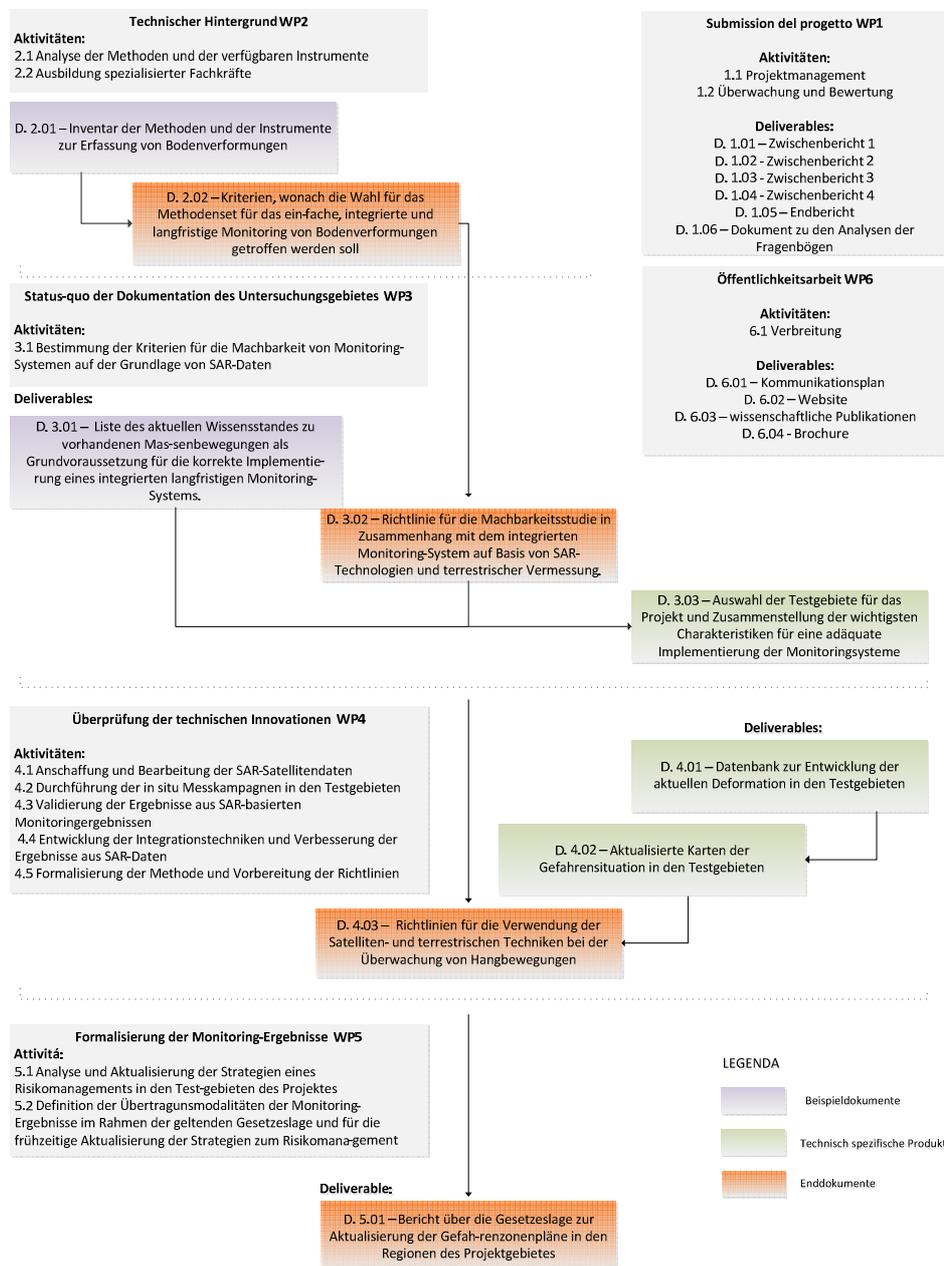
- satellitengestützte SAR Multi-Interferometrie;
- Terrestrial Laser Scanner;
- Differenzieller GPS;
- Auswertung der Daten zwischen Technikern und Administratoren

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

Giulia Chinellato

Schweiz

Partner 2

WSL -Institut für Schnee- und Lawinenforschung
SLF

Marcia Phillips
Robert Kenner

Partner 3

Abenis A.G. Ingenieure und Planer

Andreas Zischg

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbemerkungen.....	9
1.1 Datensammlung und Datenauswertung.....	10
2. Monitoring mit Differential-GNSS	12
2.1 Schätzung des Fehler- bzw. Präzisionsgrads der Messungen	13
2.2 Ergebnisse	15
3. Messungen mit Terrestrischem Laserscanner	19
3.1 Datenaufnahme.....	19
3.2. Datenauswertung.....	19
3.3 Genauigkeitsanalyse.....	20
3.4 Ergebnisse	21
4. Messungen mit Multi-Interferometrie.....	25
4.1 Bildverarbeitung.....	26
4.2 Ergebnisse aus der Auswertung der SAR-Daten.....	28
5. Vergleich und Integration.....	30
5.1 Projektion eines allgemeinen Verschiebungsvektors auf die Sichtlinie (LoS) des Satelliten	31
5.1.1 Projektion einer allgemeinen Verschiebung auf die Sichtlinie (LoS).....	31
5.1.2 Berechnung des Einheitsvektors Sichtlinie.....	32
5.1.3 Berechnung der skalaren Projektion s	33
6. Vergleich zwischen TLS und GNSS.....	35
6.1 Neubestimmung der TLS-Daten auf der Grundlage der GNSS-Messungen	35
6.1.1 Ergebnisse der Neubestimmung der TLS-Daten.....	39
6.2 Vergleich zwischen GNSS- und TLS-Daten.....	40
6.2.1 Zeitraum 2012-2013	41
6.3.1 Zeitraum 2013-2014.....	42
7 Vergleich zwischen SAR- und GNSS-Daten.....	44
8. Assimilierung und Integration der GNSS- und der TLS-Daten.....	47
9. SWOT Analyse	51
9.1 Monitoring mit GNSS-Technik.....	51
9.2 Monitoring mit TLS.....	52
9.3 Auswertung SAR-Daten mit SBAS-Algorithmus.....	53
9.4 Integrierte Technologien	54

10. Ausblick und Folgerungen	55
Literaturhinweise.....	58

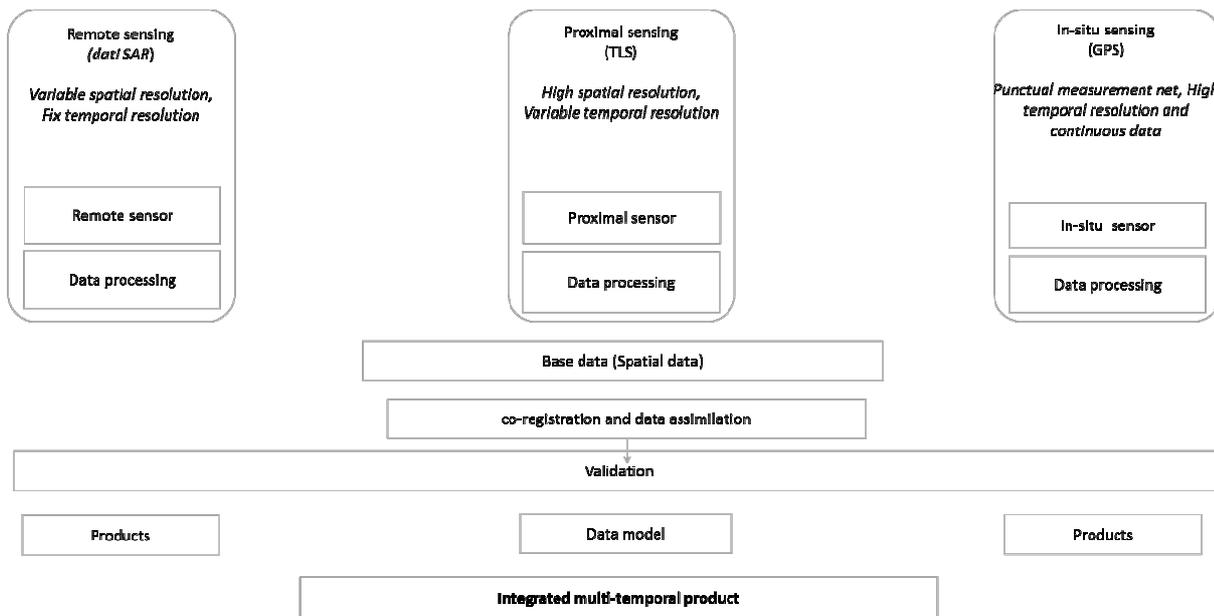
1. Vorbemerkungen

Im vorliegenden Dokument werden die Ergebnisse der Auswertung der Daten aus den terrestrischen Monitoringkampagnen 2012 und 2013-14 sowie der Auswertung der von Cosmo SkyMed im Sommer 2012 und 2013 aufgenommenen Bilder vorgestellt. In diesem Dokument werden Inhalte des **Deliverable 3.02** fortgeführt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der durchgeführten Messkampagnen in den zwei Testgebieten im Zeitraum 2012-2014 und die von Cosmo im Rahmen des Projekts aufgenommenen Bilder.

	TLS		GNSS		DInSAR	
	Ursina	Punta delle Frane	Ursina	Punta delle Frane	Punta delle Frane	Ursina
2012	18.09.	02.10.	18.09.	02-03.10.	11.06.2012 14.08.2012 30.08.2012 15.09.2012 17.10.2012	21.07.2012 06.08.2012 22.08.2012 07.09.2012 23.09.2012
2013	29.08.	13.08.	24-25.07. 29.08. 23.09.	02/04.07. 12-14.08. 19-20.09.	14.06.2013 30.06.2013 16.07.2013 01.08.2013 30.08.2013 02.09.2013 01.10.2013	24.07.2013 09.08.2013 22.08.2013 25.08.2013 07.09.2013 10.09.2013 14.09.2013 09.10.2013
2014	15.09.	02.09.	09.07.14; 18- 19.08.14; 30.09.14	01/03.07.2014; 04/06.08.14; 02.09.14		15.07.2014 23.07.2014 16.08.2014 25.08.2014 28.08.2014 13.09.2014 29.09.2014 03.10.2014 12.10.2014

Die Produkte der einzelnen Technologien wurden separat ausgearbeitet und die Ergebnisse wurden untereinander verglichen bzw. sofern notwendig korrigiert und ergänzt. In den folgenden Kapiteln werden die Methoden vorgestellt, anhand welcher die Präzision bewertet, die Daten der Messkampagnen korrigiert und der Vergleich sowie die zuverlässige Zusammenführung der Ergebnisse ermöglicht wurden.



1.1 Datensammlung und Datenauswertung

Die Messkampagnen waren die Grundlage für die Abwicklung des Projekts. Wie bereits in den vorhergehenden Deliverables vorweggenommen, weist jede der Messmethoden Schwachstellen auf, die mit den Eigenschaften des untersuchten Naturphänomens sowie von umwelttechnischen und technischen bzw. technologischen Faktoren zusammenhängen. Dieses Thema wurde insbesondere schon im Deliverable 3.02 behandelt, wo die Vor- und Nachteile der verschiedenen Messtechniken, auch unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Anwendbarkeit in bestimmten Gebieten, ausgeleuchtet wurden. In alpinen Gebieten, wo die urbanistische Entwicklung bis in die Höhenlagen vordringt, kommt als erschwerender Faktor die Zugänglichkeit der Untersuchungsorte unter angemessenen Sicherheitsbedingungen hinzu.

Die mit vor-Ort-Instrumenten durchgeführten Messungen, z.B. mit Differential-GNSS oder proximalen Systemen (proximal sensing) wie dem terrestrischen Laserscanner (TLS) haben gezeigt, dass unter bestimmten Umgebungsbedingungen die Möglichkeit des Remote-Zugangs

zu den Daten von wesentlicher Bedeutung ist. Die Zugänglichkeit des Untersuchungsorts und die Wetter- bzw. klimatischen Bedingungen waren im Rahmen des Projekts SloMove durchaus relevante Faktoren.

Die durch Remote-Zugriff abgerufenen Daten, wie jene aus der Multi-Interferometrie, bringen trotz mancher Einschränkungen (s. Kapitel 4.1 D. 3.02) Vorteile mit sich, die mit keiner anderen Technologie vergleichbar sind. Es können nämlich sehr viele Informationen über weitflächige Gebiete abgerufen werden, ohne den Messort physisch betreten zu müssen. Obwohl diese Technik mittlerweile weit verbreitet ist bzw. in manchen Bereichen (Städtebau, Zivilschutz nach Katastrophenereignissen usw.) oft eingesetzt wird, wurde sie in Hinblick auf das effiziente und wirksame Monitoring von Massenbewegungen in Berggebieten noch nicht ausreichend entwickelt.

Ein Ziel des Projekts SloMove war es, die Grenzen der Multi-Interferometrischen Daten zu verstehen und dabei zu versuchen, das Potenzial dieser Daten bestmöglich zu nutzen.

2. Monitoring mit Differential-GNSS

Die als Differential-GNSS (Global Navigation Satellite System) bezeichnete Messmethode ermöglicht es, wie umfassend im **Deliverable 3.02** beschrieben wird, die Position eines unbekanntes Koordinatenpunktes durch Bezugnahme auf einen bekannten Bezugspunkt zu ermitteln. Der dreidimensionale Vektor zwischen dem Bezugspunkt ("base station") und dem Empfänger am unbekanntes Punkt ("rover") wird als "baseline" definiert. Um die drei dreidimensionalen Vektorkomponenten in der Modalität "double differences relative positioning procedure" zu ermitteln ist es erforderlich, mindestens 2 Empfänger zu verwenden und das Signal von mindestens 4 Satelliten zu empfangen. Die Überprüfung der Wiederholbarkeit der Positionsschätzungen desselben Punktes, die durch Auswertung von zwei oder mehreren Basispunkten für denselben unbekanntes Punkt ermittelt wurden, ermöglicht es - anhand eines Netzes mit einer guten Redundanz - das Vorliegen von grundlegenden Fehlern zu erkennen (Biagi, 2009).

Die Exaktheit der Schätzung für die Baseline hängt von der Messlänge und -dauer ab; je länger die Messdauer ist, desto exakter ist die Schätzung des Baseline-Vektors entlang den 3 Komponenten aufgrund der Erhöhung der Redundanz der Messungen im Laufe der Zeit:

(Gleichung 2.1)

$$N = 2T(L-1) \quad (\text{Biagi, 2009}).$$

N= Anzahl der Beobachtungen im Verhältnis zu den doppelten Differenzen (Anzahl der Positionsschätzungen für den unbekanntes Punkt)

T= Messzeit

L= Anzahl der Satelliten

Die Sorgfalt hängt zudem von den unterschiedlichen Witterungsverhältnissen an der Extremität der Baseline sowie von Geräte- und Auswertungsfehlern und menschlichem Versagen ab.

Das in den zwei Testgebieten lokal errichtete geodätische Netz (**Deliverable 3.03**) setzt sich aus 18 Messpunkten und 2 Bezugspunkten (base station) im italienischen und 14 Messpunkten und 2 Bezugspunkten (base station) im schweizerischen Projektgebiet zusammen (Abb. 2.1). Die Bezugspunkte (base station) wurden fix an den Winkelreflektoren der SAR Technologie montiert (D 3.02 Kap. 3), und zwar in stabilen Bereichen außerhalb der vom untersuchten Naturphänomen betroffenen Gebiete.

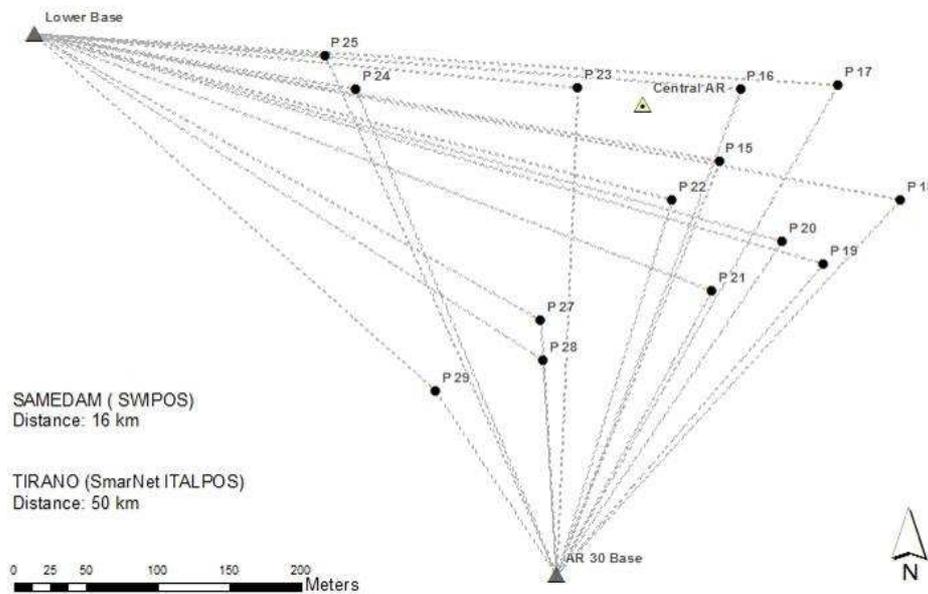


Abb. 2.1 - In der Schweiz errichtetes geodätisches Netz. "Base station", "Rover" und Fixpunkte.

Die Messkampagnen wurden im Sommer durchgeführt und umfassten insgesamt 7 Messungen pro Untersuchungsgebiet (1 im Jahr 2012, 3 im Jahr 2013 und 3 im Jahr 2014).

Für die Messungen wurden 3 Doppelfrequenzempfänger verwendet (2 Viva GS10 und Leica GS530), von welchen 2 während jeder Messkampagne fix positioniert wurden und der dritte als Rover eingesetzt wurde, um Messungen an den Punkten des geodätischen Netzes durchzuführen. Die Dauer jeder Messung betrug, zum Zweck einer höheren Messredundanz, 30 Minuten (rapid-static-Methode, D 3.02). Dadurch konnte die Baseline sorgfältiger geschätzt werden (eq.2.1). Unter Messredundanz versteht man die Differenz zwischen der Anzahl der Aufnahmen (durchgeführte Messungen) und der Anzahl der unbekannt Parameter (x, y, z von jedem Punkt). Während der Messungen wurde auf die folgenden Aspekte ein besonderes Augenmerk gelegt: i) die Einstellung der richtigen Parameter (z.B. das Antennenphasenzentrum); ii) die Kontrolle des Neigungswinkels und der Ausrichtung der Benchmarks; iii) die Kontrolle des PDOP-Parameters (D 3.02 Kap. 2.2), der die Qualität der Aufnahmen unter Berücksichtigung der Satellitengeometrie zum jeweiligen Zeitpunkt angibt (der PDOP-Wert muss geringer als 4 sein).

2.1 Schätzung des Fehler- bzw. Präzisionsgrads der Messungen

Die GNSS-Daten wurden von der Universität "La Sapienza" in Rom und von der TU Como mit dem Programm Leica Geo Office Software der Leica Geosystems ausgewertet. Es wurden die "baseline" zwischen den "rover"-Punkten und den "base stations" errechnet, woraus sich eine Schätzung der Koordinaten der Punkte ergab. Um das lokale Netz im globalen Bezugsnetz zu referenzieren, wurden

die "base stations" mit den Fixpunkten des geodätischen Netzes der Provinz Bozen (STPOS), der Schweiz (SWIPOS) und der Leica (SmartNet ITALPOS) verbunden.

Der Vergleich zwischen den Baselines der zwei "base stations" ermöglicht es, makroskopische Schätzungsfehler zu erkennen, während zufällige Fehler in Bezug auf einzelne Punkte durch Kompensierung des GNSS-Netzes minimiert werden können: durch die Methode zur Berechnung des "Winkels mit gleichem Schwerpunkt" können durch den Mittelwert der Positionen der "base stations" die Fehler zwischen den Messkampagnen errechnet und der Präzisionsgrad der Ergebnisse bewertet werden. Diese Hypothese gilt deswegen, weil die "base stations" unbeweglich bzw. an fixen Standorten angesiedelt sind. Nach dieser Methode wird der geometrische Schwerpunkt der 1. Kampagne berechnet und mit denen der folgenden Kampagnen verglichen, d.h. es wird die Differenz zwischen dem Schwerpunkt der ersten Messung mit den folgenden Schwerpunkten berechnet. Die Differenz müsste sich auf Null belaufen, jedoch erhält man aufgrund von Rechenfehlern, Messfehlern etc. eine Differenz, die durch Subtraktion für alle geschätzten Koordinaten von allen Punkten des Netzes verwendet wird, wobei immer das Prinzip der getrennten dE, dN und dUp Komponenten zu berücksichtigen ist.

Unter Berücksichtigung der Messkampagnen der Jahre 2012 und 2013 ist man zum Schluss gekommen, dass die Messungen aus Juli 2013 als Bezugsbasis dienen konnten, auf deren Basis etwaige Fehler der früheren oder späteren Messkampagnen bemessen werden sollten.

	REFERENCES	Est (m)	Nord (m)	Up (m)		REFERENCES	Est (m)	Nord (m)	Up (m)	
Luglio 2013	AR 30 Base	571133,988	5149541,593	2857,518	Luglio 2013	AR 30 Base	571133,988	5149541,593	2857,518	
	Lower Base	570765,272	5149916,012	2699,261		Lower Base	570765,272	5149916,012	2699,261	
	baricentro	570949,630	5149728,803	2778,389		baricentro	570949,630	5149728,803	2778,389	
Agosto 2013		Est (m)	Nord (m)	Up (m)	Settembre 2013		Est (m)	Nord (m)	Up (m)	
	AR 30 Base	571133,984	5149541,592	2857,531		AR 30 Base	571133,984	5149541,596	2857,573	
	Lower Base	570765,268	5149916,007	2699,275		Lower Base	570765,279	5149916,012	2699,310	
	baricentro	570949,626	5149728,799	2778,403		baricentro	570949,632	5149728,804	2778,442	
diff(Lug-Ago) _{baricentro}		metri	-0,004	-0,003	0,014	diff(Lug-Sett) _{baricentro}		0,002	0,002	0,053

Berechnung des Schwerpunktes

Der Schwerpunkt wird durch Mittelung aller Koordinaten der "base stations" jeder Messkampagne errechnet. Durch die "Schwerpunktberechnung" wurden Differenzen von wenigen mm festgestellt. Die berechneten Werte wurden von den Koordinaten der Punkte der Messkampagnen aus den Monaten August (Diff(Jul-Aug)_{Schwerpunkt}) und September 2013 (Diff(Jul-Sept)_{Schwerpunkt}) abgezogen. Dieselbe Berechnung wurde zur Verbesserung des Messwerts "0" aus Juni 2013 und des Messwerts aus September 2012 durchgeführt. Dadurch wurden die korrekten Koordinaten für die Messungen der Jahre 2012 und 2013 ermittelt.

Der **Genaukeitsindex** stellt die Dispersion (Standard-Abweichung) dar, die auf der Grundlage der Koordinaten der korrekten "base stations" berechnet wird (einschließlich Juli 2013), ohne die "rover"-Punkte zu berücksichtigen. Die Ergebnisse weisen einen Präzisionsgrad von dE 3-4 cm (Ost), dN 0.9 cm (Nord) und von dUp 2 cm (Höhenlage) auf.

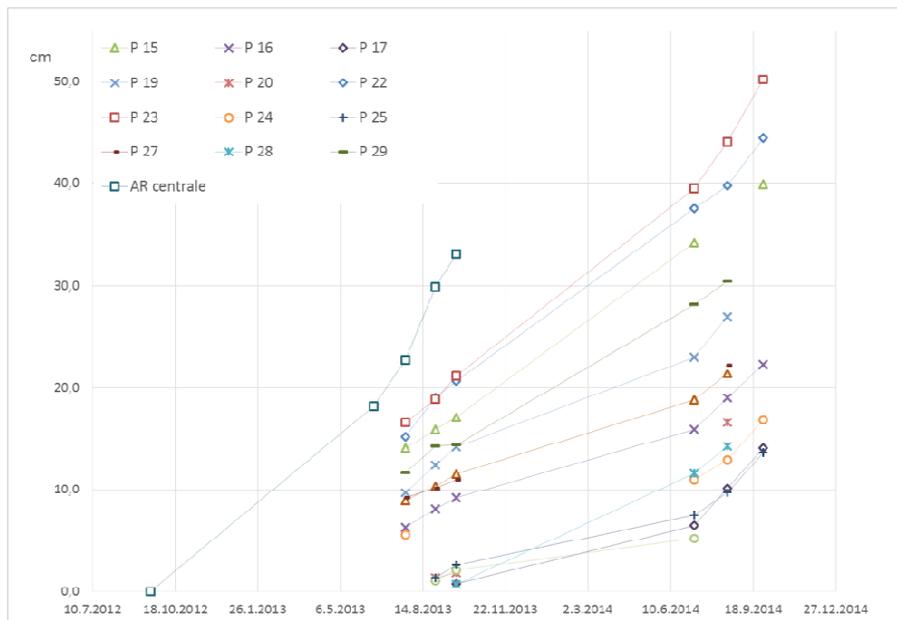
Die nachfolgenden Analysen berücksichtigen auch die Messungen aus dem Jahr 2014 und es wird versucht, die Schätzung der Fehlerquote bzw. des Präzisionsgrades zu verbessern, indem der Schwerpunkt zwischen den "base stations" und den "rover"-Punkten zu verschiedenen Zeitpunkten derselben Messkampagne berücksichtigt werden.

2.2 Ergebnisse

Die korrekten GNSS-Daten wurden in grafischer Form geplottet. Einige Punkte wurden erst 2013 in das Monitoring aufgenommen, während in Bezug auf einige andere Punkte Messfehler erkannt wurden, die die Verwendung dieser Punkte unmöglich gemacht haben. Da man sich in diesem Projekt die Analyse der Methoden zur Messung, Ausarbeitung und Auswertung der Daten, auch unter Berücksichtigung der anderen Technologien, zum Ziel gesetzt hat, werden in diesem Abschnitt nur einige Beispiele von endgültigen Datenoutputs aus den GNSS-Kampagnen angeführt.

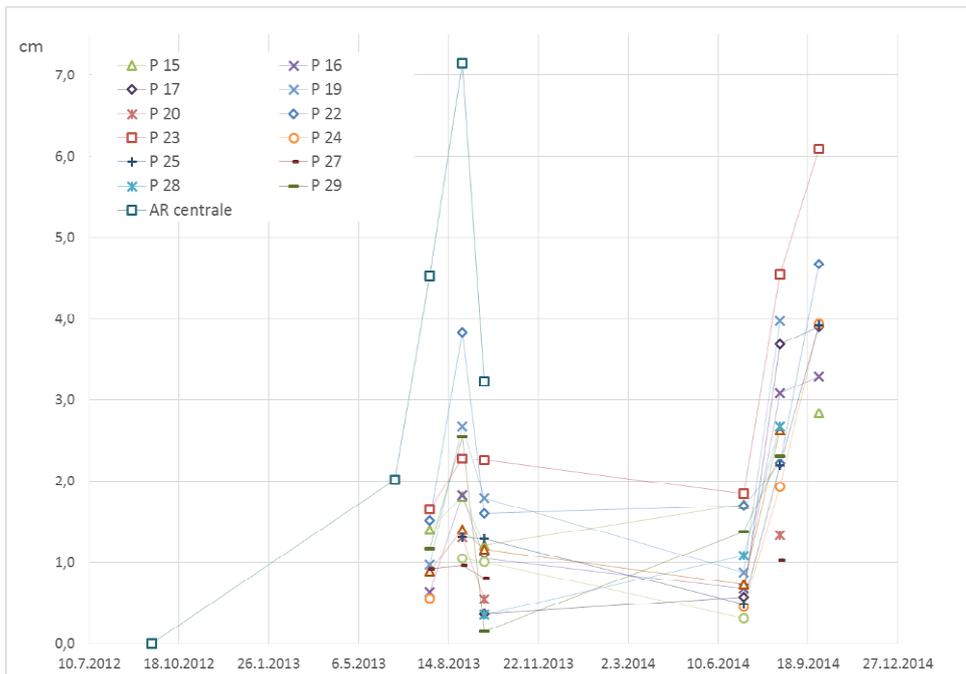
In der ersten Grafik (Grafik Nr. 2.2.1) wird die Entwicklung des Verschiebungsvektors, der sich zwischen 2012 und 2014 für alle Punkte des in Schafberg, also im schweizerischen Projektgebiet, lokal errichteten geodätischen Netzes aufsummiert hat, dargestellt. Die Aufnahmedaten betreffend den geodätischen Fixpunkt, der in unmittelbarer Nähe des zentralen Winkelreflektors angesiedelt ist, sind nicht verfügbar; die für diesen Punkt verfügbaren Daten stammen aus dem Zeitraum 2012-2013. Die größten aufgenommenen Verschiebungen betreffen den Blockgletscher Ursina I: insbesondere vom Punkt Nr. 23 auf der Stirnseite des mittleren Ausläufers, wo zwischen 2012 und 2014 eine Bewegung von mehr als 50 cm gemessen wurde. Die Punkte Nr. 15 und Nr. 22 betreffen ebenfalls Ursina I und zeigen bemerkenswerte Gesamtverschiebungen (zwischen 20-25 cm/Jahr).

In der Regel weisen die Benchmarks an den Rändern oder an der Stirnseite des Blockgletschers, auch beim Punkt Nr. 29 (15 cm/Jahr) von Ursina III und beim Punkt Nr. 19 (ca. 14 cm/Jahr), höhere Verschiebungen auf, die auch mit einem relevanten Höhenunterschied zusammenhängen. Dennoch wird angenommen, dass das Gebiet, das dem zentralen Ausläufer von Ursina I entspricht, von noch relevanteren Verformungen betroffen ist, wie aus dem Trend der Verschiebungen am Fixpunkt (zentraler AR Punkt), der sich ausschließlich auf den Zeitraum zwischen 2012 und 2013 bezieht, ersichtlich wird.



Grafik 2.2.1- Kumulierte Gesamtbewegungen 2012-2014 (cm)

Aus der Analyse der Grafik 2.2.2 gehen, trotz der beschränkten Anzahl an Messungen in den Sommermonaten, einige Unterschiede in der Verteilung der Geschwindigkeitsfelder hervor. Im Sommer 2013 erkennt man, im Nahbereich der im August durchgeführten zentralen Messung, eine Beschleunigung fast aller Punkte (ausschließlich des Punktes Nr. 27) im Vergleich zur vorhergehenden, im Juli 2013 durchgeführten Messung; insbesondere erkennt man die vom zentralen AR Punkt erreichte Spitzengeschwindigkeit (ca. 7 cm/Monat). Im Sommer 2014 ist der Geschwindigkeitstrend, wiederum bezogen auf die Messperiode, verhältnismäßig linear und weist weder in den repräsentativen Sommermonaten (Juli und August) noch im September besondere Beschleunigungen auf (die letzte Messung wurde am 30. September 2014 durchgeführt). Trotzdem sind die Geschwindigkeits-Bereiche des Jahres 2014 für alle Punkte im Durchschnitt höher als im Jahr 2013.



Grafik 2.2 – Entwicklung der Geschwindigkeit im Vergleich zur vorhergehenden Messung (cm/Jahr).

Insbesondere kann man das "Aktivwerden" einiger Punkte erkennen, die vorher keine relevanten Deformationen aufwiesen: die Punkte Nr. 24 und Nr. 25, die sich in der Nähe des Blockgletschers Ursina II befinden, wiesen im Jahr 2014 ein Deformationsmodul auf, das mit den Bereichen vergleichbar war, die bis zu diesem Zeitpunkt als die aktivsten galten, und zwar die Punkte Nr. 22 und Nr. 23. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Ursina II die Hauptursache für Murgänge im Wohngebiet von Pontresina ist, können die aufgenommenen Daten bei der Planung von Schutzmaßnahmen bzw. -eingriffen nützlich sein.

Die zwischen den 2 Jahren festgestellten Unterschiede sind auf die besonderen Wetter- bzw. Klimabedingungen im Jahr 2014 zurückzuführen: es gab bis ins späte Frühjahr starke Schneefälle, wobei der Schnee bis tief in den Sommer liegen blieb; hohe Wintertemperaturen und niedrige Sommertemperaturen, die für die jeweiligen Jahreszeiten vollkommen ungewöhnlich waren, haben gewiss zum ungewöhnlichen Verhalten der Blockgletscher beigetragen.

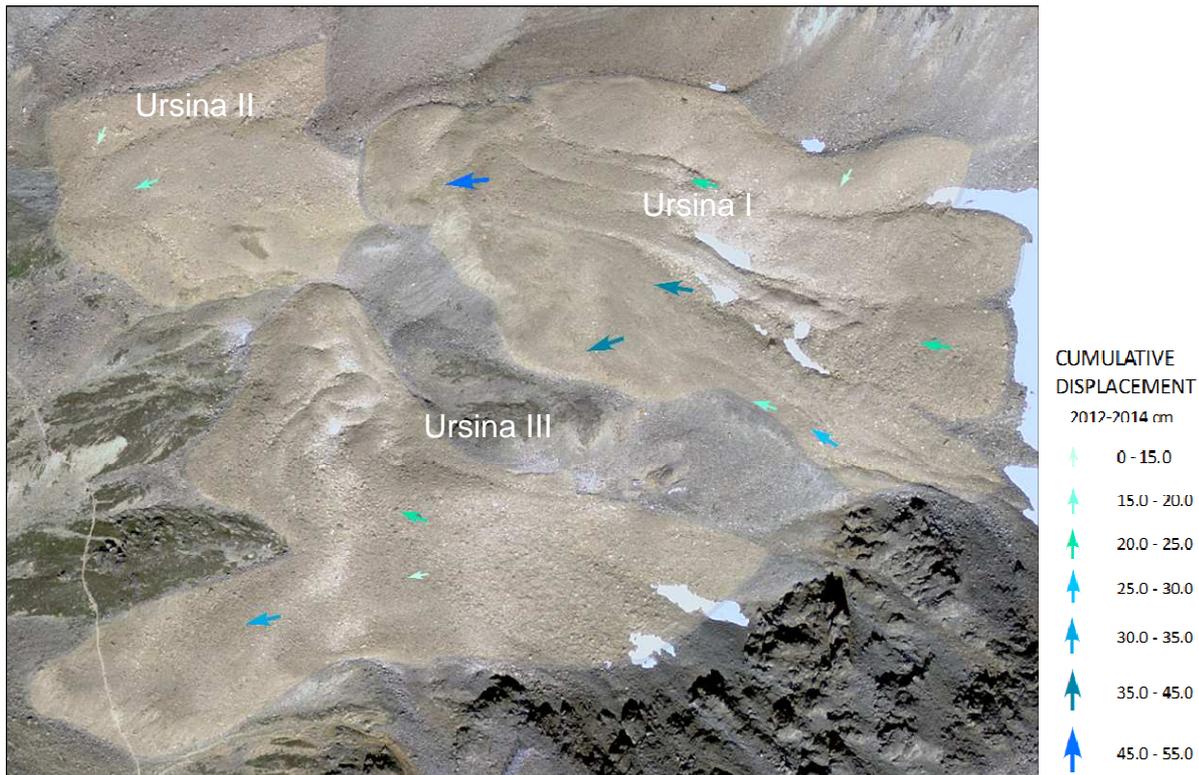


Abb. 2.2.1 - Karte der kumulierten Massenbewegungen im Zeitraum 2012-2014

Die Karte in Abb. 2.2.1 zeigt die Verteilung der kumulierten Massenbewegungen im Zeitraum zwischen 2012 und 2014: insgesamt weist hier der südöstliche Teil des Blockgletschers Ursina I einen höheren Aktivitätsgrad auf, und zwar nicht nur an den Rändern, wo das Neigungsverhältnis höher ist, sondern auch in den zentralen Teilen.

Die durchgeführte Analyse ermöglicht es, die Bereiche, in denen die Bewegungen am stärksten sind, zu identifizieren und Punkte mit höheren horizontalen als vertikalen Deformationswerten und umgekehrt zu differenzieren. Dies erfolgte durch die Korrelation der Felddaten mit den typischen morphologischen Merkmalen der Blockgletscher und durch Unterscheidung der Nähr-, Zehr- und Ablagerungsgebiete. Die Gegenüberstellung und die Validierung der mit den anderen Technologien erhaltenen Informationen erfolgte zum Teil in einem Geographischen Informationssystem.

3. Messungen mit Terrestrischem Laserscanner

3.1 Datenaufnahme

Seit 2012 wurden jährliche terrestrische Laserscanner (TLS) Messungen in beiden Testgebieten durchgeführt. Die Messungen 2012 wurden mit dem Riegl Laserscanner „LPM321“, die übrigen Messungen mit dem Riegl Laserscanner „VZ6000“ aufgenommen; Details und Unterschiede zwischen den Scannersystemen sind unter www.riegl.com abrufbar. Alle Messungen wurden von einer einzigen Scanposition pro Standort aufgenommen: Am Standort Foura da l'amd Ursina wurde eine fest verankerte Scan Plattform verwendet, am Standort Steinschlagspitze wurde von einem Stativ auf stabilem Felsuntergrund gemessen. Alle Scans haben eine resultierende Auflösung von unter 10cm. Die Laserscanner Punktwolken wurden mit Hilfe von reflektierenden Passpunkten referenziert, welche in den gemeinsamen Referenzrahmen aller in der Studie angewendeten Messmethoden integriert waren. In einzelnen Fällen mit offensichtlichen Referenzierungsfehlern wurden Scans oder Teile von ihnen einer iterativen Referenzierung über den „iterative closest point“ (ICP) Algorithmus zugeführt. Dies ist ein Verfahren, welches über eine Helmert-Transformation die Punktabstände zweier Punktwolken in Summe minimiert und diese so bestmöglich aneinander anpasst. In diesen Fällen wurde im Abgleich aller drei, über die Passpunkte referenzierten Messungen die vertrauenswürdigste als Referenz ausgewählt und die anderen nach Bedarf auf diese Referenzmessung angepasst.

3.2. Datenauswertung

Die resultierenden multitemporalen Punktwolken wurden in gerasterte Geländemodelle umgewandelt. Die Differenzen dieser Geländeaster zeigen Höhenänderungen an einem Punkt im Koordinatensystem, diese Höhenänderungen sind zu unterscheiden von der Höhenänderung eines Oberflächenpunktes. Letzterer kann sich durch eine Lage Translation im Koordinatensystem bewegen und erfährt daher eine andere Höhenänderung als die an einem festgelegten Koordinatenpunkt gemessene. Etwaige Lageverschiebungen der Oberfläche wurden mithilfe der rauen Oberflächenstruktur analysiert. Diese wurde zunächst mithilfe eines Hochpassfilters im Rasterdatensatz sichtbar gemacht, anschließend wurden die Muster dieser Oberflächenstruktur für kleine Teilbereiche zweier Raster korreliert. Auf diese Weise wurden Verschiebungsvektoren für jeden Teilbereich berechnet, welche in Summe ein zwei dimensionales Vektorfeld für horizontale

Geländebewegungen ergaben. Während diese horizontalen Verschiebungsvektoren die Lageänderung von Oberflächenpunkten beschreiben, zeigen die Rasterdifferenzen, wie eingangs erwähnt, nur die Höhenänderungen an einem Koordinatenpunkt. Um jedem horizontalen Verschiebungsvektor zwischen den Messungen t_1 und t_2 eine Höhenkomponente zuordnen zu können, wurde daher die Höheninformation eines Punktes vor der Lageverschiebung aus dem Geländemodell zu t_1 entnommen und von der Höhe des Punktes nach der Lageverschiebung aus dem Geländemodell zu t_2 subtrahiert. Die so gewonnene Höhendifferenz bildete die Höhenkomponente des jeweiligen Translationsvektors (Abb. 3.2.1).

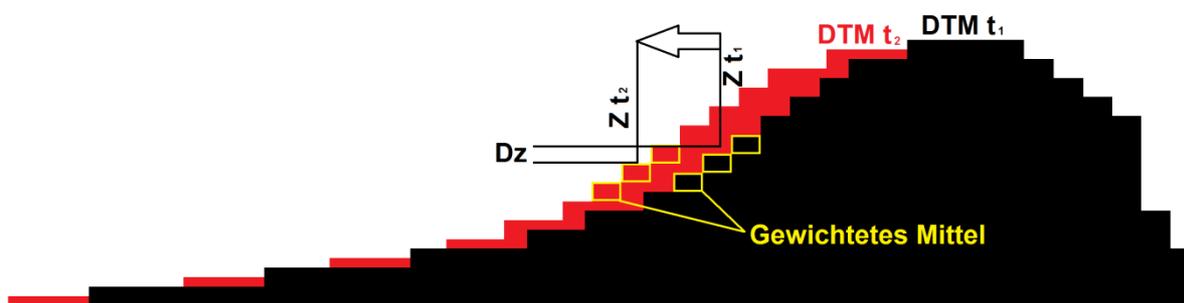


Abb. 3.2.1: Schematische Darstellung der Berechnung der Höhenkomponente einer Translationsbewegung.

3.3 Genauigkeitsanalyse

Die Genauigkeit der gewonnenen 3D Vektoren ergibt sich zunächst aus der Konsistenz des Vektorfeldes selber. Sind die Verschiebungen kleiner als die Signifikanzschwelle der Messung, zeigt sich ein chaotisches ungerichtetes Vektorfeld. Treten großskalige Fehlereinflüsse auf, zeigen sich diese an stabilen Geländebereichen als homogen gerichtetes und damit wenig plausibles Vektorfeld. Anhand dieser Abschätzung kann die Signifikanzschwelle der Messungen auf 2-3cm angegeben werden. Diese Schätzung passt mit den Differenzen zwischen den TLS Messungen und der GNSS Messungen überein. Diese lagen für alle drei Richtungskomponenten unter 3cm. Diese Analyse bezieht sich allerdings nur auf den Datensatz 2013-14, welcher mit demselben Scanner aufgenommen wurde. Die Messungen aus 2012, welche mit einem anderen Instrument ausgeführt wurden, zeigen zum Teil größere Abweichungen, vor allem an Geländekanten. Wir führten das auf die unterschiedliche Divergenz der Laserimpulse zurück. Bei Messungen in Richtung eines Horizontes erfasste das „LPM321“ Gerät mit seinem größeren „Laserabdruck“ Objekte im Randbereich des Laserimpulses, welche vom deutlich schmaleren Laserimpuls des „VZ6000“ nicht mehr erfasst

wurden. Entsprechend kam es an solchen Messhorizonten – meist Geländekanten – zu größeren Fehlereinflüssen.

3.4 Ergebnisse

An beiden Messorten konnten signifikante Massenbewegungen festgestellt werden.

Der kriechende Permafrost am Foura da l'Amd Ursina konnte in drei eigenständige Blockgletscher unterschieden werden. Abb. 3.4.1 zeigt die grobe Unterteilung in drei separate Strukturen, welche unterschiedliche Dynamik aufweisen. Zur Unterscheidung wurden die einzelnen Blockgletscher Ursina I-III benannt. Die Veränderungen werden in der Folge für jeden Blockgletscher beschrieben. Abb. 3.4.2 zeigt die Kriechraten der Blockgletscher zwischen 2013 und 2014 und die Differenzen der Geländemodelle 2013 und 2014

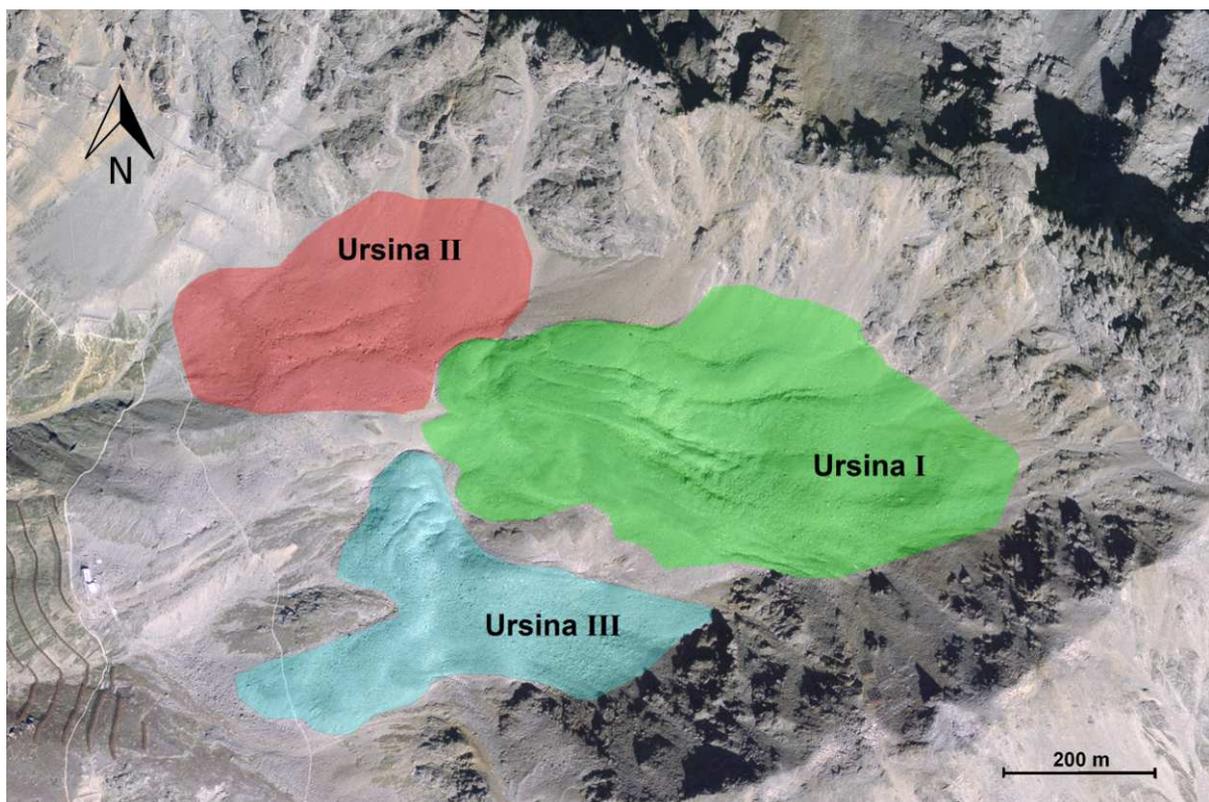


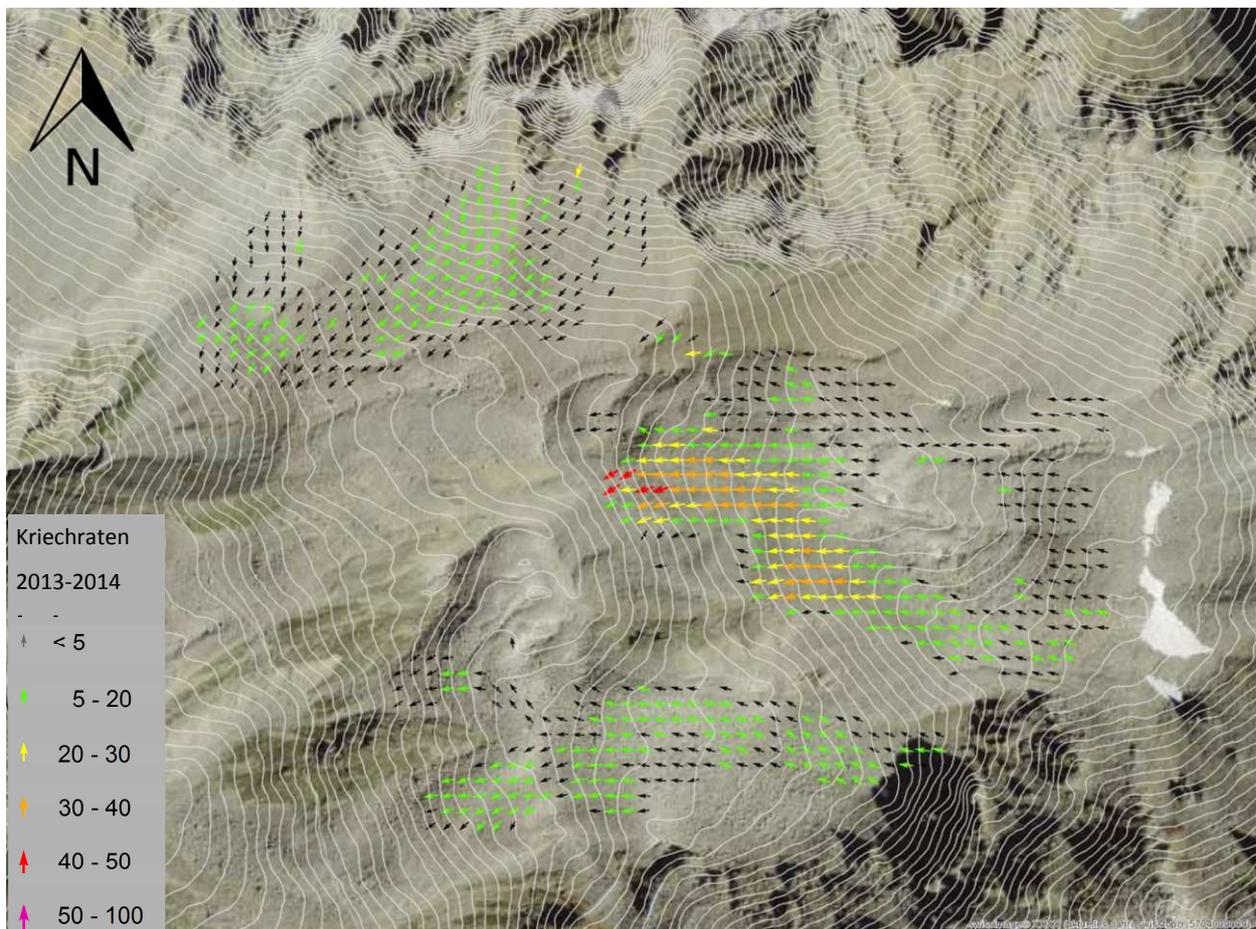
Abb. 3.4.1: Grobe Einteilung der kriechenden Permafrost Komplexe am Foura da l'amd Ursina. (Luftbild: Swisstopo DV 033594).

Die orographisch linke Seitenfront von Ursina I bildet eine Steilstufe an der die höchsten Kriechraten im Gebiet auftreten: dies waren großräumig 30cm in der Messepoche 2012/13 und 40cm in 2013/14.

Im Zuge der Kriechprozesse kam es zur Deformation des Sackungsmaterials (Aufwölbung im unteren Teil, Setzung im oberen Teil) und zu Stürzen mit einem Volumen von etwa 20m². Deutlich zu erkennende Zugrisse am oberen Ende des Hanges bestätigen die Bewegung.

Der Ursina II Blockgletscher zeigte während der Monitoring Periode recht homogene Kriechraten von 3 – 7cm. Die Höheren Beträge wurden auch hier im Zeitraum 2013/14 gemessen.

Der obere Teil des Ursina III Blockgletschers (5) kroch in der Periode 2012/13 ca. 3cm. 2013/14 konnte ebenso wie an den anderen Blockgletschern eine leichte Beschleunigung auf 5 cm beobachtet werden. Im unteren Teil teilt sich der Blockgletscher in zwei Arme. Der orographisch rechte Arm hat, wie im Luftbild Abb. 3.4.3 zu sehen, in nördlicher Richtung eine Geländemulde aufgefüllt. Damit hat er sich selbst eine Barriere aufgeschüttet und zeigt nur geringe Aktivität. Der orographisch linke Arm des Ursina III Blockgletschers bewegte sich 2013/14 mit 10 cm vorwärts.



Gröbe Einteilung der kriechenden Permafrost Komplexe am Foura da l'amd Ursina. (Luftbild: Swisstopo DV 033594).

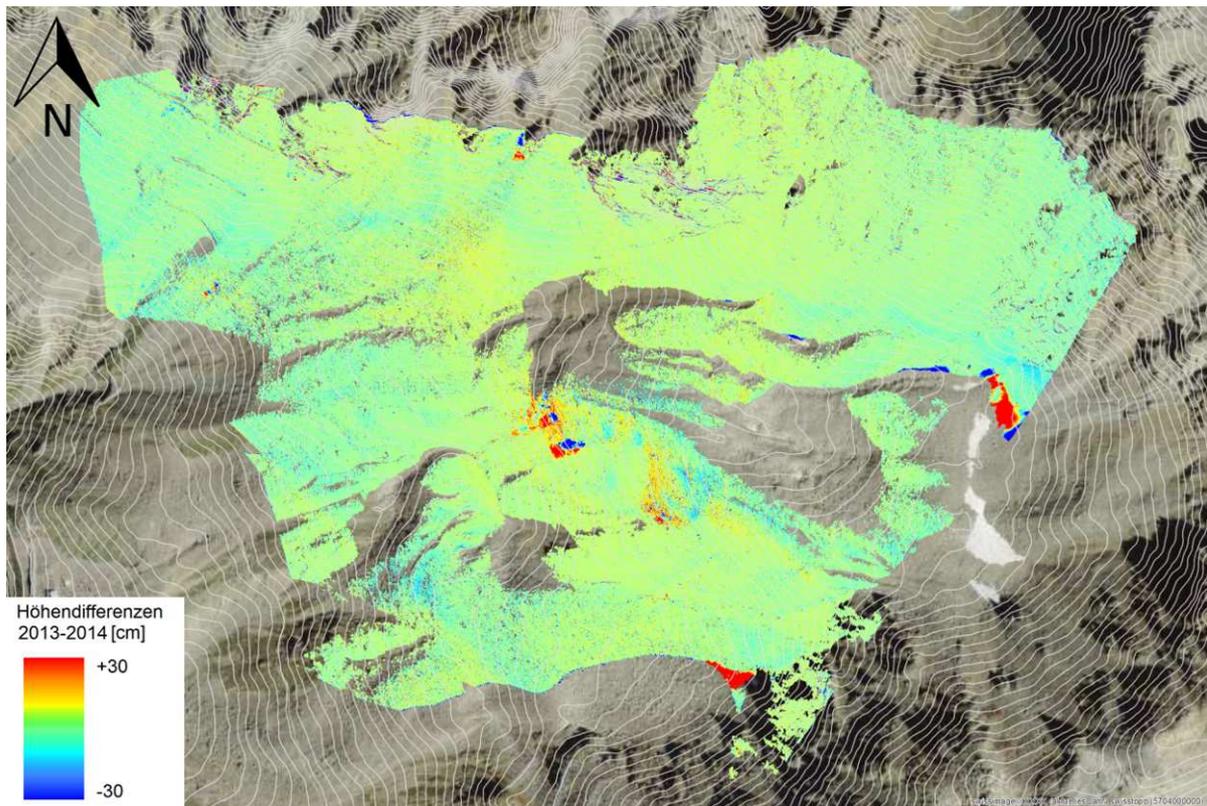


Abb. 3.4.3: Kriechraten (oben) und Höhenänderungen (unten) der aktuellen Messperiode 2013-2014

Am Messort Steinschlagspitze konnten aufgrund der beschriebenen Fehlereinflüsse nur zwischen den Messungen des VZ6000 signifikante Bewegungen erfasst werden. Diese beschränken sich auf einen kleinen Bereich nördlich der Steinschlagspitze (Abb. 3.4.4). Hier kriecht ein Blockgletscher mit wenigen cm pro Jahr. An einer größeren Blockgletscherzunge ist eine punktuelle Setzung zu erkennen, welche schon im fehlerbehafteten Vergleich 2012/13 auffällig war.

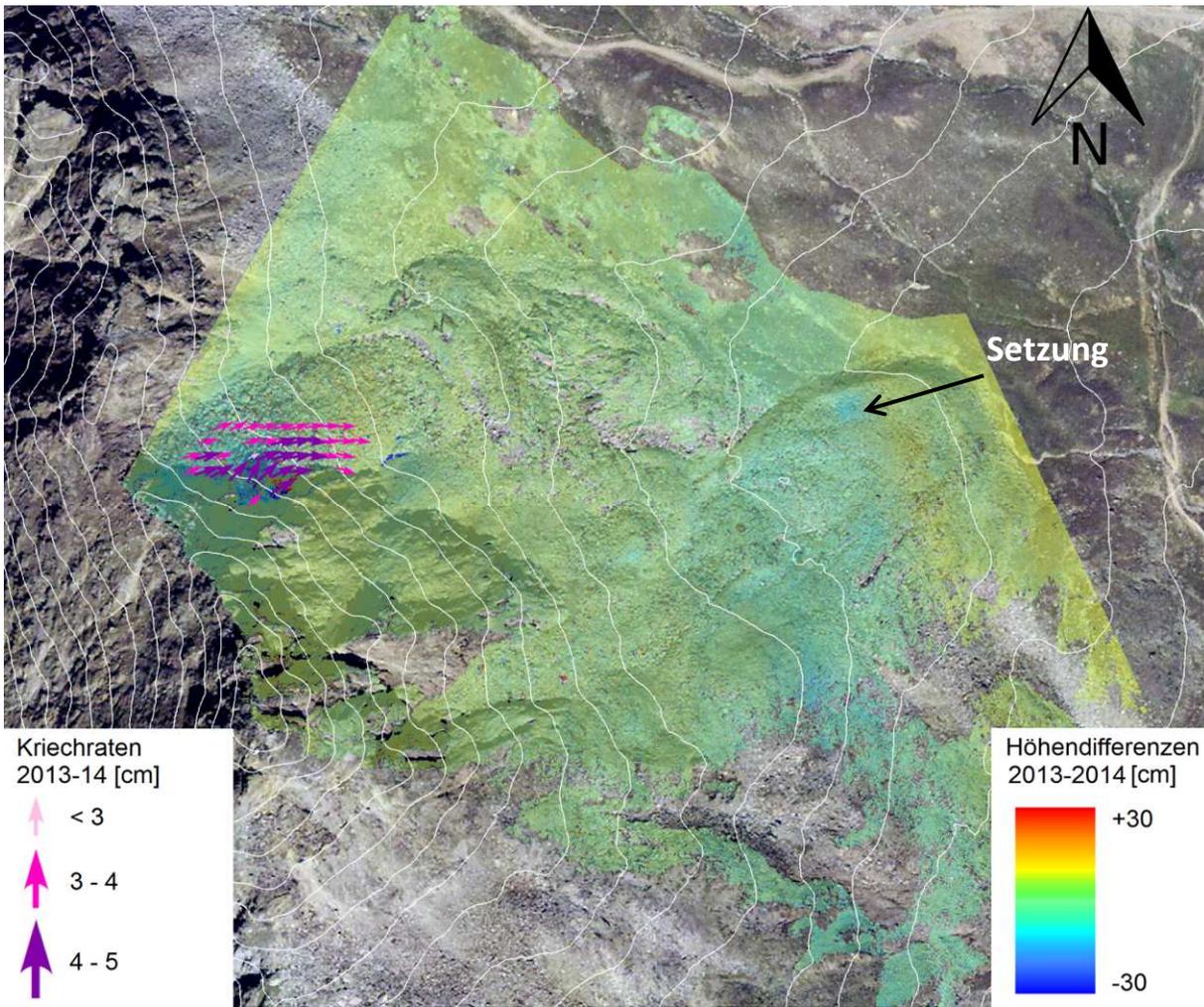


Abbildung 3.4.4: Veränderungen am Messort Steinschlagspitze zwischen 2013 und 2014.

4. Messungen mit Multi-Interferometrie

Die Verwendung der mit Satellitentechnik SAR (Synthetic Aperture Radar) aufgenommenen Daten bringt aufgrund der Möglichkeit, einerseits über synoptische Deformationskarten verfügen zu können und andererseits in schwer erreichbaren Gebieten arbeiten zu können, große Vorteile mit sich. Die auf der Differential-Interferometrie SAR (DInSAR) basierenden multi-interferometrischen Technologien, mit denen Daten erfasst werden, um historische Deformations-Messreihen zu Punkten der Erdoberfläche sowie Schätzungen der Durchschnittsgeschwindigkeit der Bewegungen in Blickrichtung des jeweiligen Satelliten aufzuzeichnen, wurden bereits in verschiedensten Bereichen sehr vorteilhaft angewendet, sind aber im Rahmen von Projekten wie SloMove immer noch ein Untersuchungs- bzw. Forschungsgegenstand. Dies ist einerseits auf das Vorliegen steiler Hangneigungen und andererseits auf die Tatsache, dass die betroffenen Flächen über lange Zeiträume des Jahres schneebedeckt sind, zurückzuführen. Erstere Schwierigkeit ist insofern von Relevanz, als dass die SAR-Sensoren einen lateralen Blickwinkel (keine Nadir Blickrichtung) erfordern, um eine eindeutige Erkennung der verschiedenen Zielmarken gewährleisten zu können. Die letztere Tatsache hat Auswirkungen auf die zeitliche Dekorrelation des Standortes, was die Gewinnung einer historischen Messreihe der Deformationen unmöglich machen kann. Der vorliegende Absatz bezieht sich auf die im Deliverable **D.3.02, Kapitel 2.1** bereits vertieft und detailliert besprochene Technik der Interferometrie.

Aufgrund all dieser Überlegungen wurde für die zwei Gebiete eine Voruntersuchung der möglichen Sichtwinkel der Satellitenaufnahmen durchgeführt, um Aufnahmemethoden bzw. -techniken zu wählen, die mit den untersuchungsgegenständlichen Gebieten im Schnalstal und in Schafberg kompatibel sind; zudem hat man sich dazu entschieden, die Satellitenaufnahmen auf die schneelosen Zeitfenster des Jahres zu konzentrieren. Diese letztere Entscheidung erfordert die Auswahl eines Satelliten, der es ermöglicht, eine hohe Anzahl von Daten in einer sehr kurzen Zeitspanne zu erfassen, denn für eine wirksame Anwendung der Multi-Interferometrie-Techniken sind mindestens 20 SAR- Aufnahmen sinnvoll bzw. erforderlich (Colesanti et al., 2003). Aus diesem Grund hat man sich für die Datenaufnahmen der Satellitenkonstellation COSMO-SkyMed der Italienischen Raumfahrtorganisation (Agenzia Spaziale Italiana) bzw. vom Italienischen Verteidigungsministerium entschieden, die sich aus 4 Satelliten zusammensetzt, von welchen jeder eine Wiederholungszeit von

16 Tagen hat. Insbesondere hat man Daten in Stripmap HIMAGE-Modus mit einer Nennauf­lö­sung von 3 Metern gewählt (s. Tabelle 1).

	Aufnahmemodus	Beam	Center Scene Off-Nadir Angle [degrees]
Schnals	H4-04	Ascending	29,09
Schafberg	H4-05	Descending	30,62

Tabelle 1. Eigenschaften der für das Projekt SloMove herangezogenen Daten von COSMO-SkyMed

4.1 Bildverarbeitung

von Giovanni Cuozzo

Unter den verfügbaren Multi-Interferometrie-Algorithmen hat man sich für die SBAS-Technologie (Small Baseline Subset) entschieden, die von der CNR-IREA aus Neapel entwickelt wurde (Lanari et al., 2004). Es handelt sich hierbei um eine Technik, die eine räumlich verstreute Analyse des Untersuchungsgebiets ermöglicht, was sich für die Testgebiete des Projekts SloMove sehr gut eignet, da die Vegetation hier nur sehr spärlich bzw. gar nicht vorhanden ist (und somit eine gute räumliche Korrelation der Oberfläche ermöglicht) und Felsblöcke vorliegen, die als natürliche Reflektoren dienen können. Darüber hinaus hat diese Wahl den Weg für eine Zusammenarbeit mit der CNR-IREA angebahnt, welche mit der Ausarbeitung und Durchführung einer Grundausbildung für die Projektmitarbeiter beauftragt wurde.

Die Planung der Aufnahmen begann für die Sommersaison 2013 mit dem Ziel, Aufnahmen in 8-Tagesszyklen zu erfassen. Leider hat die verhältnismäßig niedrige Priorität der Forschungsprojekte im Vergleich zu anderen Anwendungszwecken dazu geführt, dass nur ein sehr geringer Anteil der geplanten Datenaufnahmen tatsächlich durchgeführt wurde und somit im Projekt verwendet werden konnte. Um dieses Problem zu überwinden, wurde der Versuch angestellt, diese für die Jahre 2013 und 2014 geplanten Aufnahmen mit Archivdaten aus dem Jahr 2012 zu erweitern. In der Tabelle 2 sind alle zu den 2 SloMove-Projektgebieten erfassten Daten zusammengefasst. Es wird darauf hingewiesen, dass im Jahr 2014 keine Aufnahmen für das Projektgebiet Schnals durchgeführt wurden, da in den ersten 2 Monaten der Sommersaison 2014 aus Prioritätsgründen alle geplanten Aufnahmen gestrichen wurden und das verbleibende Zeitfenster, von dem man annahm, dass keine Schneebedeckung vorliegen würde, zu kurz gewesen wäre, um eine für die multi-interferometrischen Algorithmen angemessene Anzahl an Daten zu erfassen. Infolgedessen wurden nach Verstreichen dieser 2 Monate alle weiteren geplanten Aufnahmen gestrichen, um unnötige zusätzliche Kosten zu vermeiden.

	2012	2013	2014
Schafberg	5	8	9
Schnals	5	7	-

Tabelle 2. Anzahl der über COSMO-SkyMed für das Projekt SloMove aufgezeichneten Daten

Die größte Schwierigkeit im Zusammenhang mit den untersuchungsgegenständlichen Datensätzen hängt mit der geringen Anzahl an verfügbaren SAR-Aufnahmen zusammen. Eine fortgeschrittene DInSAR-Analyse mit einer Genauigkeit wie in der Literatur beschrieben (Casu et al., 2006) erfordert mindestens 25 Bilder, die mit einer gewissen zeitlichen Regelmäßigkeit aufgenommen wurden. In diesem Fall wurden die Bilder alle in den Sommermonaten über mehrere Jahre gesammelt. Diese Verteilung der Aufnahmen hat dazu geführt, dass die zeitliche Baseline der Interferogramme sich auf viele Monate (also die Interferogramme zwischen einem Jahr und dem Folgejahr) belief, was insbesondere aufgrund der zeitlichen Dekorrelation als besonders erschwerend zu betrachten ist. Zudem haben die saisonalen Untersuchungen bezogen auf die einzelnen Jahre die Schwierigkeit mit sich gebracht, dass die jeweilige Ausarbeitungen auf der Grundlage von weniger als 10 Szenen durchgeführt werden mussten.

Zu diesen schwerwiegenden Problemen mit den Datensätzen kam die Schwierigkeit der Filterung der atmosphärischen Störungen hinzu. Die Entfernung dieser Störungen erfolgt durch räumliche und zeitliche Filterung mithilfe unterschiedlicher Fenster, unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die atmosphärisch gestörten Signale in der Regel sehr variabel zwischen verschiedenen Aufnahmen verstreut sind und dass infolgedessen eine höhere Anzahl an Daten aus regelmäßig durchgeführten Aufnahmen es ermöglicht, diese Störelemente auf eine wirksamere Weise zu isolieren. In diesem Fall erlaubt die geringe Anzahl an Aufnahmen und die besondere Verteilung der SAR-Szenen keine sorgfältige Entfernung der atmosphärischen Störungen.

Das untersuchungsgegenständliche Phänomen der Bodenverformung (zeitlich schnelle Verformungen, mit hohen Beschleunigungsarten und im Raum sehr genau lokalisiert) stößt an die Grenzen der technischen Möglichkeiten der DInSAR und ist im spezifischen Fall aufgrund der Verteilung der SAR-Aufnahmen noch schwieriger. Theoretisch erfordert diese Art von Phänomen, um angemessen gemessen zu werden, eine hohe Frequenz an SAR-Aufnahmen (1 Szene alle 8 Tage, wie in der Planungsphase der Aufnahmen festgelegt), um auch die nicht-linearen Komponenten des zeitlichen Signals zu identifizieren.

Trotz der oben festgehaltenen Schwierigkeiten wurde der verfügbare Datensatz bearbeitet bzw. ausgewertet. Es wurde die Small Baseline Subset Technologie (SBAS) mit geringer räumlicher Auflösung verwendet (auf welche sich die oben beschriebenen Probleme des Datensatzes weniger stark auswirken), durch welche Karten mit den Geschwindigkeiten und den historischen Datenreihen über die Verformungen mit einer, im konkreten Fall, räumlichen Auflösung von etwa 30 m, erstellt werden. Wie bereits erwähnt, war es auf keinste Weise möglich, zuverlässige Daten zu den Verformungen in den Wintermonaten (von November bis Juni) zu gewinnen.

4.2 Ergebnisse aus der Auswertung der SAR-Daten

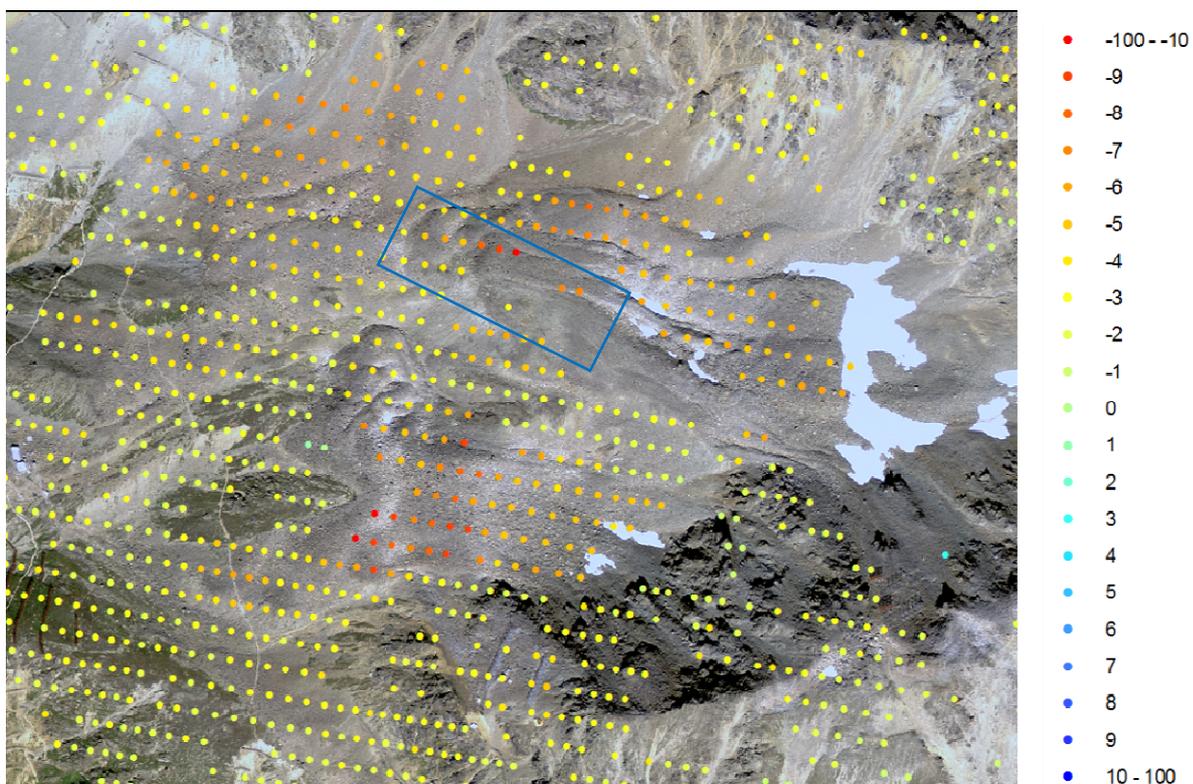


Abb. 4.2.1: Ergebnis Bildauswertung SAR 2013, Geschwindigkeit in mm/Jahr. Für den mit einem blauen Rechteck gekennzeichneten Bereich stehen vermutlich aufgrund der hohen Verformungsgeschwindigkeit keine SAR-Daten zur Verfügung.

In den Abbildungen 4.2.1-2 sind die Ergebnisse der Bildauswertungen der Aufnahmen von Cosmo im Sommer 2013 dargestellt. In der Abbildung 4.2.1 erkennt man schon bei Betrachtung mit freiem Auge die von den größten Verformungen betroffenen Bereiche (mit roten Punkten gekennzeichnet). Zudem kann man, durch Verwendung perspektivischer Verzerrungsmasken in der Analyse (Deliverable 3.02), die Daten qualitativ bewerten und die Bereiche ermitteln, in denen das Ausbleiben von Informationen auf inkohärente Daten oder andere Faktoren zurückzuführen ist. Das

Fehlen von Informationen in einigen Bereichen aufgrund inkohärenter Daten ist im spezifischen Fall auf sehr hohe Deformationsgeschwindigkeiten und eine begrenzte Anzahl an Aufnahmen zurückzuführen (siehe Kap. 4).

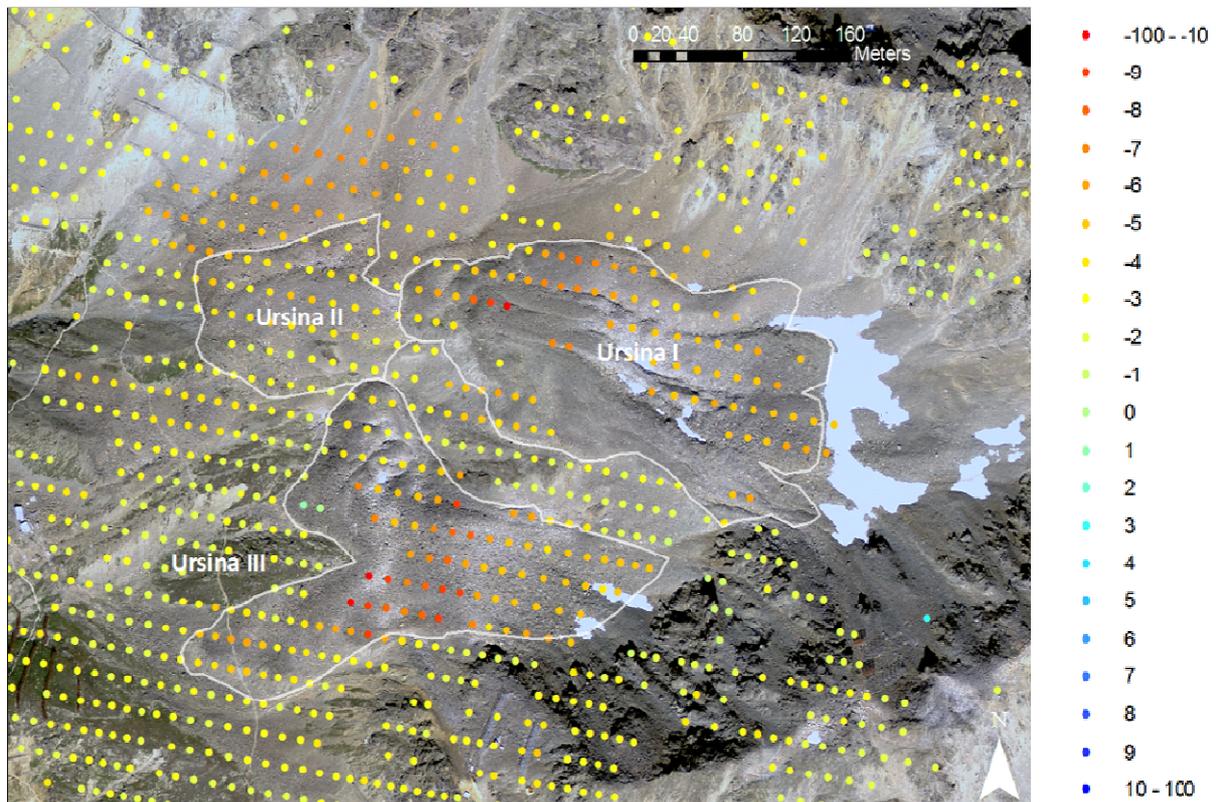


Abb. 4.2.2 - Ergebnis SAR-Daten-Auswertung Sommer 2013 und Umfang der Ursina-Blockgletscher

In der Abbildung 4.2.2 wurden in die Karte die Begrenzungen der Ursina-Blockgletscher eingetragen: auf der Grundlage der zuvor beschriebenen GNSS- und TLS-Daten kann behauptet werden, dass die räumliche Aufteilung der Deformationsfelder der SAR-Daten jedoch mit den von den anderen beiden Technologien erhobenen Daten absolut kohärent und kompatibel ist.

5. Vergleich und Integration

Die Möglichkeit, für ein und dasselbe Phänomen über Daten zu verfügen, die durch Monitoringtechniken erfasst wurden, die sich hinsichtlich Auflösung, Präzision, Genauigkeit und Art der Information (beispielsweise die Bezugsdimension des Verschiebungsvektors) voneinander unterscheiden, ermöglicht Folgendes:

- a) ein viel detaillierteres und genaueres Modell des untersuchten Prozesses zu erhalten;
- b) die verfügbaren Informationen validieren zu können und die Aussagekraft der aus den unterschiedlichen Techniken erhaltenen Daten besser zu verstehen;
- c) die Messtechniken **integrieren** zu können:
 1. um, in Bezug auf einen bestimmten Zeitraum, ein integriertes "Multiprodukt" zu erhalten, welches das Phänomen besser repräsentiert;
 2. um bei der Untersuchung einer Bodenverformung die geeignetste Monitoringtechnik für die jeweilige Entwicklungsphase des Phänomens einzusetzen; um alle verfügbaren, auch die nicht auf den gleichen Zeitpunkt bezogenen Daten, integrieren zu können, um ununterbrochene historische Datenreihen zu den Verformungen zu erhalten.
 3. bezugnehmend auf den Punkt Nr. 2, um langfristig steuerbare und wirtschaftlich tragbare Monitoringsysteme anzubieten.

Der **Vergleich** von Informationen, die durch unterschiedliche Monitoringtechniken in ein und demselben Gebiet aufgenommen bzw. erfasst wurden, impliziert die Analyse der einzeln erhaltenen Ergebnisse, um Unterschiede und Ähnlichkeiten zu ermitteln. Bei der Untersuchung eines Phänomens werden oft Daten, die durch unterschiedliche Messtechniken erfasst wurden und deshalb unterschiedliche Informationen liefern, miteinander verglichen, so wie wenn Ferndatenerfassungen und punktuelle Ortsaufnahmen miteinander verglichen würden. Das Konzept der **Integration** impliziert nicht nur einen Vergleich zwischen Daten, und eine gegenseitige Validierung, sondern auch eine Assimilation der diversen Informationen, um ein einziges Endprodukt zu erhalten.

In beiden Fällen, ob es sich nun um einen Vergleich oder um eine Integration handelt, ist es wichtig, über Daten zu verfügen, für welche eine sorgfältige Georeferenzierung durchgeführt wurde und die auf dieselbe räumliche Dimension zurückzuführen sind.

5.1 Projektion eines allgemeinen Verschiebungsvektors auf die Sichtlinie (LoS) des Satelliten

Damit die Messergebnisse miteinander verglichen, validiert und integriert werden können, müssen die Daten auf dieselbe Dimension bezogen werden.

Da es unmöglich ist, monodimensionale Daten wie die SAR-Aufnahmen, bei denen die Verschiebungswerte auf die Sichtlinie des Satelliten (Line of Sight) bezogen sind, auf die 3 Dimensionen zurückzuführen, wurden die GNSS- und die TLS-Daten auf die Sichtlinie projiziert. Nachfolgend wird die Methode beschrieben, die eingesetzt wurde, um die GNSS- und die TLS-Daten auf die Sichtlinie zu projizieren.

5.1.1 Projektion einer allgemeinen Verschiebung auf die Sichtlinie (LoS)

von Mattia Callegari

Bei zwei gegebenen Vektoren \mathbf{a} \mathbf{b} und dem Winkel α zwischen \mathbf{a} \mathbf{b} (Abb. 5.1.1.1), ergibt sich die skalare Projektion s von \mathbf{a} auf \mathbf{b} durch:

$$|\mathbf{a}| \cos \theta = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{b}|} = \mathbf{a} \cdot \hat{\mathbf{b}} \quad (1)$$

wobei der Operator \cdot das Skalarprodukt angibt, $|\mathbf{a}|$ und $|\mathbf{b}|$ jeweils die Länge von \mathbf{a} und \mathbf{b} sind, und $\hat{\mathbf{b}}$ der Einheitsvektor in der Richtung von \mathbf{b} ist.

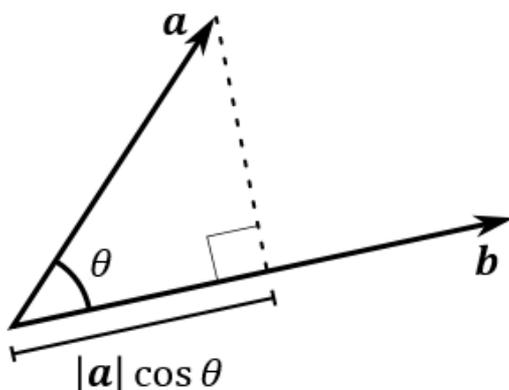


Abb. 5.1.1.1 - Graphische Darstellung der Vektor-Projektion \mathbf{a} auf \mathbf{b}

Bei der Projektion einer allgemeinen Verschiebung auf die Sichtlinie des Satelliten, in Übereinstimmung mit (1), ist der Vektor \mathbf{a} jener Vektor, der die allgemeine Verschiebung beschreibt und $\hat{\mathbf{b}}$ der Einheitsvektor, jener der der Richtung der Sichtlinie mit positiver Richtung ausgehend von der Position des Satelliten Richtung Erde entspricht.

5.1.2 Berechnung des Einheitsvektors Sichtlinie

Nachdem der Einfallswinkel κ der Einfallsrichtung \mathbf{z} und der von der karthesianischen \mathbf{x} Achse gemessene Azimutwinkel φ (sodass die Achse \mathbf{y} $\varphi = +90^\circ$ entspricht) ermittelt wurden, konnte der Einheitsvektor $\hat{\mathbf{b}} = (b_x, b_y, b_z)$ durch Verwendung der sphärischen Koordinaten gezeichnet werden (r, κ, φ) , siehe Abb. 5.1.2.1 :

$$\begin{cases} b_x = r \sin \kappa \cos \varphi \\ b_y = r \sin \kappa \sin \varphi \\ b_z = r \cos \kappa \end{cases} \quad (2)$$

r entspricht 1, da $\hat{\mathbf{b}}$ ein Einheitsvektor ist. Der Einfallswinkel κ beträgt $\pi - \theta_1$ wobei θ_1 der Sichtwinkel des Satelliten ist. Der Winkel φ entspricht $-\gamma$ für die aufsteigende "right-looking" (oder die absteigende "left-looking")-Konfiguration, und entspricht $\pi - \gamma$ für eine absteigende "right-looking" (oder eine aufsteigende "left-looking")-Konfiguration. γ ist der Winkel der Umlaufbahn, von Norden (Achse \mathbf{y}) in Richtung Osten gemessen (sodass der Osten, Achse \mathbf{x} , $\gamma = +90^\circ$ beträgt). Somit erhalten wir durch Ersatz in (2), für eine "right-looking" (oder eine absteigende "left-looking")-Konfiguration:

$$\begin{cases} b_x = \sin \theta_1 \cos \gamma \\ b_y = -\sin \theta_1 \sin \gamma \\ b_z = -\cos \theta_1 \end{cases} \quad (3)$$

Für eine absteigende "right-looking"-Konfiguration:

$$\begin{cases} b_x = -\sin \theta_1 \cos \gamma \\ b_y = \sin \theta_1 \sin \gamma \\ b_z = -\cos \theta_1 \end{cases} \quad (4)$$

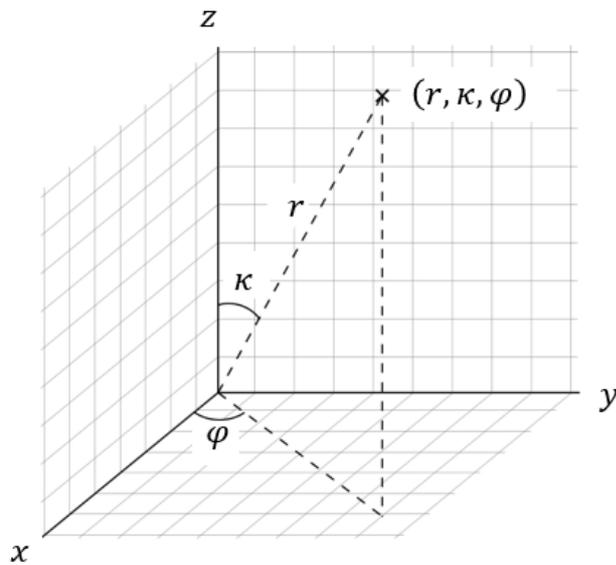


Abb. 5.1.2.2 - Darstellung der sphärischen Koordinaten (r, κ, φ) im kartesischen System x, y, z mit dem Ursprung am Satelliten

5.1.3 Berechnung der skalaren Projektion s

Die Projektion s eines allgemeinen Verschiebungsvektors $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$ kann somit durch Verwendung von (1) berechnet werden. Konkret für die beiden Umlaufbahn-Konfigurationen:

- 1) Für die aufsteigende "right-looking"- (oder die absteigende "left-looking")-Konfiguration:

$$s = d_x \sin \vartheta_1 \cos \gamma - d_y \sin \vartheta_1 \sin \gamma - d_z \cos \vartheta_1$$

- 2) Für eine absteigende "right-looking"- (oder eine aufsteigende "left-looking")-Konfiguration:

$$s = -d_x \sin \vartheta_1 \cos \gamma + d_y \sin \vartheta_1 \sin \gamma - d_z \cos \vartheta_1$$

In Bezug auf Abb. 5.1.2.2 ist für beide Gleichungen zu berücksichtigen, dass die positiven Werte aus der Projektion auf eine dem Azimut der Sichtlinie entsprechende Verschiebung hindeuten, während die negativen Werte Verschiebungen in die Gegenrichtung aufzeigen. **Für den Vergleich mit den Standardprodukten der Multi-Interferometrie müssen alle oben beschriebenen Zeichen der Gleichung umgedreht werden.**

Für eine bessere Projektion der GNSS- und der TLS-Daten auf die Sichtlinie hat man für jeden Bodenpunkt den Sichtwinkel ϑ_1' herangezogen. Für diesen Vorgang sind Informationen (wie H des Satelliten) erforderlich, die im Internet und auf den Übergabeberichten der Satellitendaten (wie der

Sichtwinkel beim Near Range und die entsprechenden Koordinaten) verfügbar sind. Die Berechnungen für die Projektion wurden in Excel durchgeführt.

Die Berechnung des Winkels ϑ_i' setzt voraus, dass folgende Werte bekannt sind:

- Sichtwinkel beim Near Range θ_n ;
- Koordinaten x_{near} und y_{near} ;
- H, Höhe der Satellitenumlaufbahn;
- Koordinaten des Bodenpunktes (x_p, y_p) , in dem man den ϑ_i' berechnen will.

Wobei:

$$\vartheta_i' = \text{Arctan}((a+b)/H)$$

$$a = (\text{Tan}(\theta_n) * H)$$

$$b = (y_p - (m * x_p) - q) / \sqrt{1 + m^2}$$

$$m = \text{Tan}(\theta_n)$$

$$q = y_{near} - (m * x_{near})$$

6. Vergleich zwischen TLS und GNSS

In diesem Abschnitt wird der zwischen den TLS- und den GNSS-Daten durchgeführte Vergleich behandelt. Bei der Durchführung der Analyse ging man von der differentiellen GNSS-Technik als "Bezugsmessung" aus, da sie eine höhere Genauigkeit in den drei Dimensionen gewährleistet. So liefern die GNSS- und die TLS-Daten Informationen über den Verschiebungsvektor entlang der 3 Komponenten x, y, z und können aus diesem Grund direkt miteinander verglichen werden; die GNSS-Daten beziehen sich jedoch auf einen "Punkt", während die TLS-Daten den Mittelwert für ein Gebiet darstellen.

6.1 Neubestimmung der TLS-Daten auf der Grundlage der GNSS-Messungen

von Marcello Pettita

In diesem Kapitel werden einige Methoden für den Vergleich der im schweizerischen Testgebiet gesammelten Daten analysiert:

1. Differentielle GNSS-Messungen im Post-Processing: es wurden 4 Aufnahmen auf 16 GNSS-Punkten an den folgenden Tagen durchgeführt: 18.09.2012, 24.07.2013, 29.08.2013, 23.09.2013
2. TLS: es wurden 2 Messkampagnen mit Terrestrial Laser Scanner (TLS) durchgeführt, davon eine im August 2012 und die andere im August 2013.

Die Neubestimmung der TLS-Daten impliziert eine neue Schätzung der Daten auf der Grundlage der aus den GNSS-Messungen erhaltenen Informationen. Das Ziel besteht darin, zu versuchen, Informationen zu erhalten, die so zuverlässig wie möglich miteinander verglichen werden können.

Man geht davon aus, dass die nachbereiteten, mit differentieller GNSS-Technik erfassten Daten genauer sind, und dass die Messungen des Verschiebungsfeldes (\vec{r}_{GNSS}) und der Geschwindigkeit (\vec{v}_{GNSS}) der einzelnen überwachten Punkte im Vergleich zu den jährlichen TLS-Einzelmessungen häufiger durchgeführt wurden. Ziel ist es, die punktuellen GNSS-Messungen einzusetzen, um die Punktwolke der Verschiebungs- (\vec{r}_{TLS}) und der Geschwindigkeitsdaten (\vec{v}_{TLS}) des TLS zu korrigieren und zu verbessern. Die Verschiebungsvektoren (\vec{r}_{ij}) werden als euklidische Entfernung zwischen zwei Ortsvektoren zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten berechnet. Analog dazu wurden die Geschwindigkeitsvektoren (\vec{v}_{ij}) als das Verhältnis zwischen dem Verschiebungsvektor und dem zeitlichen Abstand zwischen zwei Messintervallen berechnet. Das Ergebnis dieser Berechnung ist die

mittlere Geschwindigkeit für den gesamten Untersuchungszeitraum (der in beiden Fällen 1 Jahr beträgt).

Für die Analyse werden zunächst die GNSS-Punkte gewählt, die sich innerhalb des TLS-Bereichs befinden, während alle außerhalb dieses Bereichs liegenden Punkte ausgeschlossen werden, da sie zu weit von den TLS-Punkten entfernt sind. Ferner muss berücksichtigt werden, dass jeder TLS-Punkt einen vierkantigen Bereich mit einer Seitenlänge von ca. 10 m darstellt. Bei der Auswahl der mit den GNSS-Daten zu vergleichenden TLS-Punkten (oder umgekehrt) wurden 2 parallele Methoden angewendet:

- Methode 1: es wurde der gemäß der euklidischen Normalform dem GNSS-Punkt am nächsten liegende TLS-Punkt gewählt.
- Methode 2: es wurden alle in den P_{GPS} -Bereich des GNSS-Monitoringpunktes und der einfache Durchschnitt der vorhandenen Punkte ermittelt.

Die Ergebnisse der beiden Methoden für die Verschiebungsvektoren (\vec{t}_{GPS}) und (\vec{t}_{TLS}) sind in der **Abbildung 5.1.1 1a** für die **Methode 1** und in der **Abbildung 5.1.1 1b** für die **Methode 2** dargestellt. In **Abbildung 5.1.1 1c** (Methode 1) und **Abbildung 5.1.1 1d** (Methode 2) sind die Streudiagramme (zur Überprüfung der Übereinstimmung zwischen zwei vergleichbaren d-Sets) für die mittleren Geschwindigkeiten (\vec{v}_{GPS}) und (\vec{v}_{TLS}) dargestellt. In den Abbildungen wird weiters die Gerade des linearen Verhältnisses (Fit-Gerade, in dunkelblau) zwischen den Beobachtungen und das Konfidenzintervall von 95% dargestellt (Intervall an plausiblen Werten für diesen Parameter), der in violett schattierte Bereich, des Fits.

Um eine objektive Messung der Qualität der Linearitätshypothese, des Fit und der mit der Messung in Zusammenhang stehenden Ungewissheit zu erhalten, sind in Tabelle 6.1.1 die Werte des linearen Korrelationskoeffizienten angeführt (zwei Variablen stehen in linearer Korrelation, wenn die gegenseitige Abhängigkeit sich in guter Näherung über ein lineares Gesetz, bzw. über die Gleichung einer Geraden, nämlich $y = bx + a$), den mittleren quadratischen Fehler, R^2 , die Ergebnisse der F-Tests und die Werte der Koeffizienten des Fit ausdrücken kann.

Es kann beobachtet werden, dass der Effekt der Verwendung mehrerer Punkte in einem Umkreis des GNSS die Ungewissheit bedeutend reduziert, die Aussagekraft der Linearität erhöht und dass somit nur zwei Punkte außerhalb des Vertrauensintervalls bleiben. Aus methodologischer Sicht hat die Verwendung des Mittelwertes den Zweck, den mit der TLS-Messung in Zusammenhang stehenden Fehler zu beseitigen und abzuschwächen. Es muss darauf hingewiesen werden, dass der Fehler beim Mittelwert von der Umkehrfunktion der Wurzel der Punkte abhängt und dass der Kumulierungseffekt bei der Fehlerfortpflanzung folglich darin besteht, die Ungewissheit beim Mittelwert selbst um den

Faktor $\frac{1}{\sqrt{N}}$ zu reduzieren. Aus physischer Sicht kann dadurch vermieden werden, dass sich einzelne Messfehler negativ auf die Schätzung der Linearkorrelation auswirken. Schließlich muss angemerkt werden, dass - durch den Ausschluss der Werte des y-Achsenabschnittes-Interzepts und der RMSE-Werte - die anderen Werte, da sie nicht von der Skala des Systems und von dessen absolutem Wert abhängen, mit den Verschiebungsvektoren und den Geschwindigkeitsvektoren übereinstimmen, da Letztere eine lineare Kombination (arithmetisches Mittel) der Ersteren sind.

	KORRELATIONSKOEFFIZIENT	RMSE	INTERZEPT	STEIGUNG	R ²	F TEST (p<5%)
VERSCHIEBUNG (FALL 1)	0.49	0.51	3.77	0.51	0.24	NO p<0.18
VERSCHIEBUNG (FALL 2)	0.81	0.29	2.89	0.72	0.65	JA p<0.01
GESCHWINDIGKEIT (FALL 1)	0.49	6.15	0.31	0.51	0.24	NEIN p<0.18
GESCHWINDIGKEIT (FALL 2)	0.81	3.52	0.24	0.72	0.65	JA p<0.01

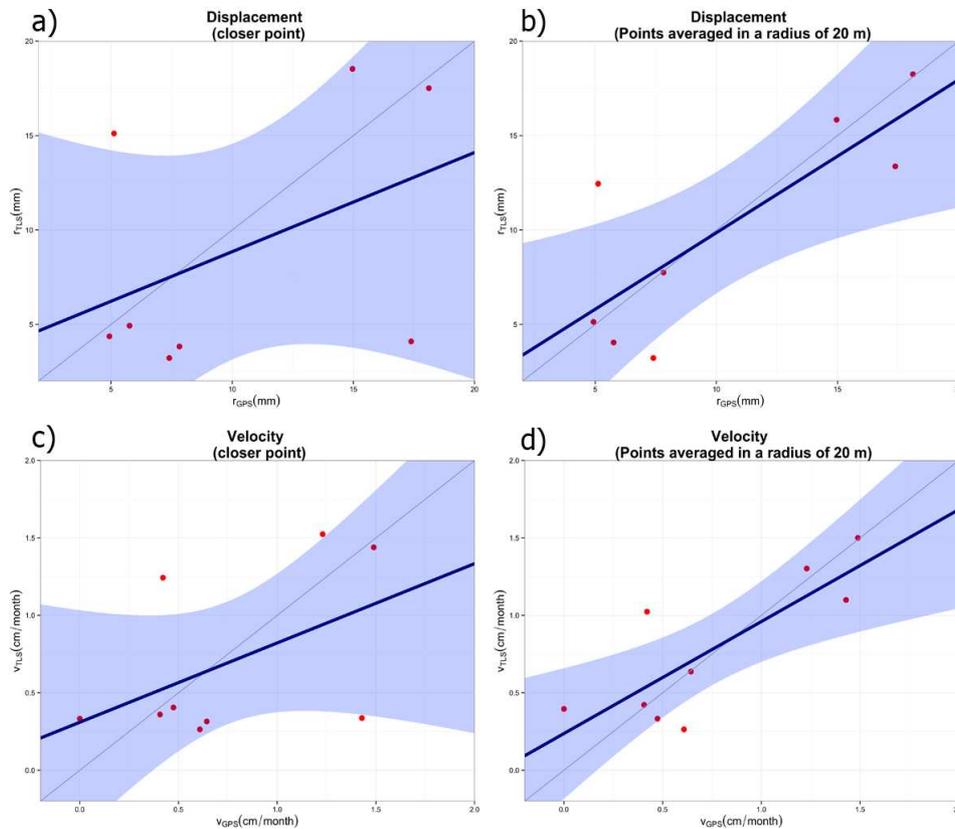
Tabelle 6.1.1- Ergebnisse der linearen Regression zwischen Verschiebungen und GNSS- und TLS-Geschwindigkeiten für die beiden Methoden (nahester Punkt – Mittel der Punkte in einer Umgebung). Man sieht, dass die Verwendung des Mittelwertes der Punkte in einer gewissen Umgebung (Zeilen 2 und 4) statistisch relevantere Ergebnisse liefert, so wie es durch die Erhöhung des Korrelationskoeffizienten, des R² und der Aussagekraft des Tests f aufgezeigt wird.

Um die Qualität der angestellten linearen Hypothese zu überprüfen und zu messen, wurde ein Kreuzvalidierungsverfahren durch Anwendung dieses Modells durchgeführt. Diese Validierung wurde folgendermaßen durchgeführt:

1. Es wurden die Ursprungsdaten herangezogen, die man mit den Mittelwerten innerhalb einer Umgebung des GNSS erhalten hat (Methode 2);
2. Es wurden 8 lineare Tests wiederholt, wobei jedes Mal einer der 8 verwendeten GNSS-Punkte ausgeschlossen wurde;
3. Der Wert des ausgeschlossenen GNSS-Punktes wurde mit der entsprechenden, aus dem Fit erhaltenen Vorhersage verglichen.

Typische Validierung in der Statistik (Grafiken 6.1.2): die Ergebnisse des Kreuzvalidierungsverfahrens sowohl für die Verschiebungs- als auch für die Geschwindigkeitsvektoren zeigen, dass die Punkte, die

sich bereits anfangs außerhalb des Konfidenzintervalls befanden, jene sind, die den linearen Fit negativ beeinflussen und somit ein nicht lineares Verhalten aufweisen.



Grafiken. 6.1.2: Scatter Plot für die diversen Methoden: a) Scatter Plot zwischen den Verschiebungsvektoren des GNSS (assex) und dem TLS (assey), wobei nur der am nächsten beim GNSS-Receiver angesiedelte TLS-Punkt berücksichtigt wird. b) Scatter Plot zwischen den Verschiebungsvektoren des GNSS (assex) und dem TLS (assey), wobei sämtliche TLS-Punkte in einem Umkreis von 20m des GNSS-Receivers berücksichtigt werden c) Scatter Plot zwischen den Verschiebungsvektoren des GNSS (assex) und des TLS (assey), wobei alle TLS-Punkte in einem Umkreis von 20m des GNSS-Receivers berücksichtigt werden. d) Scatter Plot zwischen den Verschiebungsvektoren des GNSS (assex) und des TLS (assey), wobei alle TLS-Punkte in einem Umkreis von 20m des GNSS-Receivers berücksichtigt werden. Für sämtliche Grafiken ist die blaue Gerade der lineare Fit, jene in grau die Winkelhalbierende der Achsen und der hellblaue Bereich das Konfidenzintervall des Fit (0.95).

Um auf der Grundlage der punktuellen GNSS-Messungen korrekte TLS-Daten zu erhalten ist es abschließend notwendig, von der für die lineare Regression verwendeten Formel auszugehen:

$$\begin{cases} \vec{r}_{\text{TLS}} = \alpha \vec{r}_{\text{GPS}} + \beta \\ \vec{v}_{\text{TLS}} = \phi \vec{v}_{\text{GPS}} + \chi \end{cases}$$

wobei α e β jeweils die Steigung und das Interzept für \vec{r}_0 und ϕ e χ das Interzept für \vec{v} sind.

Kehrt man die Termen um, ergibt sich Folgendes:

$$\begin{cases} \vec{r}_{\text{TLS}} = \frac{1}{\alpha} (\vec{r}_{\text{TLS}} - \beta) \\ \vec{v}_{\text{TLS}} = \frac{1}{\phi} (\vec{v}_{\text{TLS}} - \chi) \end{cases}$$

wobei unter Scheitelpunkt die Verschiebungs- und die Geschwindigkeitsvektoren verstanden werden, die nach dem linearen Modell korrigiert wurden.

6.1.1 Ergebnisse der Neubestimmung der TLS-Daten

In Abbildung 6.1.1.1 sind die Ergebnisse der Neubestimmung der TLS-Daten für das schweizerische Testgebiet aufgeführt.

Die Korrektur der Daten erfolgte unter Berücksichtigung der im Feld VERSCHIEBUNG (Fall 2) der Tabelle 4.1 angegebenen Interzept- und Steigungsparameter, wobei hier ein höherer Korrelationskoeffizient vorliegt (0.81). Die Bestimmung der neuen TLS-Vektoren erfolgte in Excel und die Daten wurden auf ein GIS projiziert.

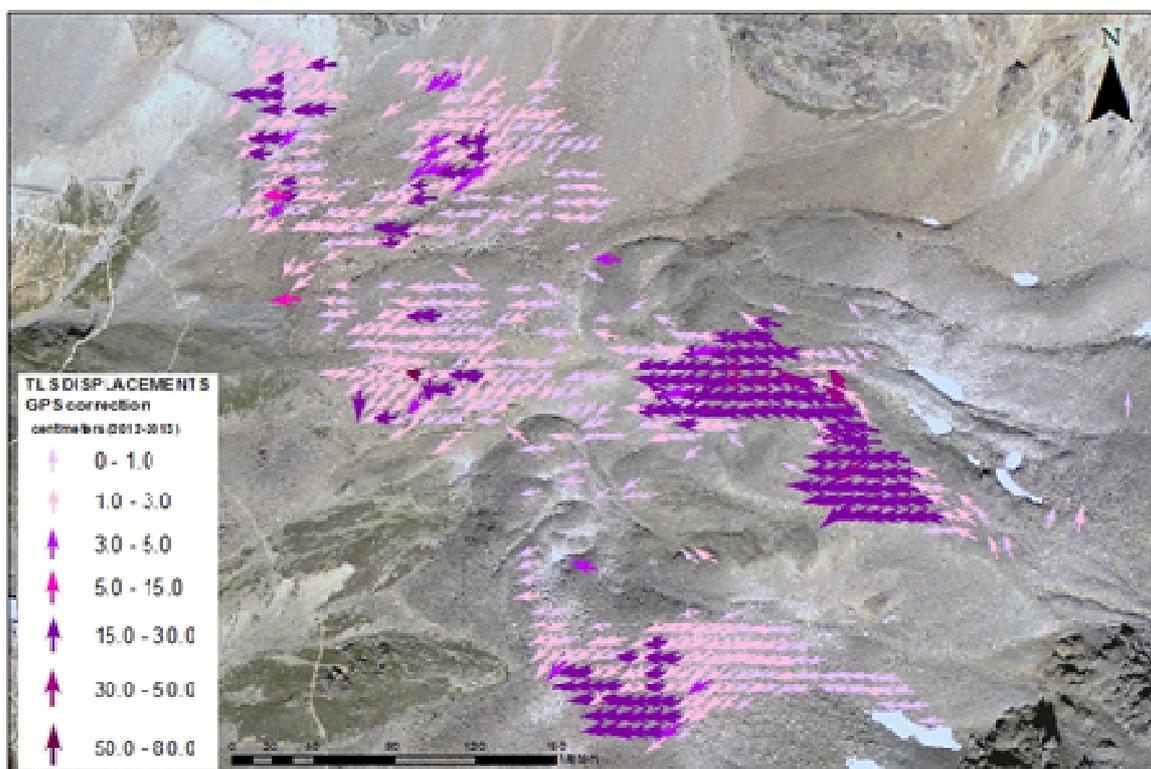
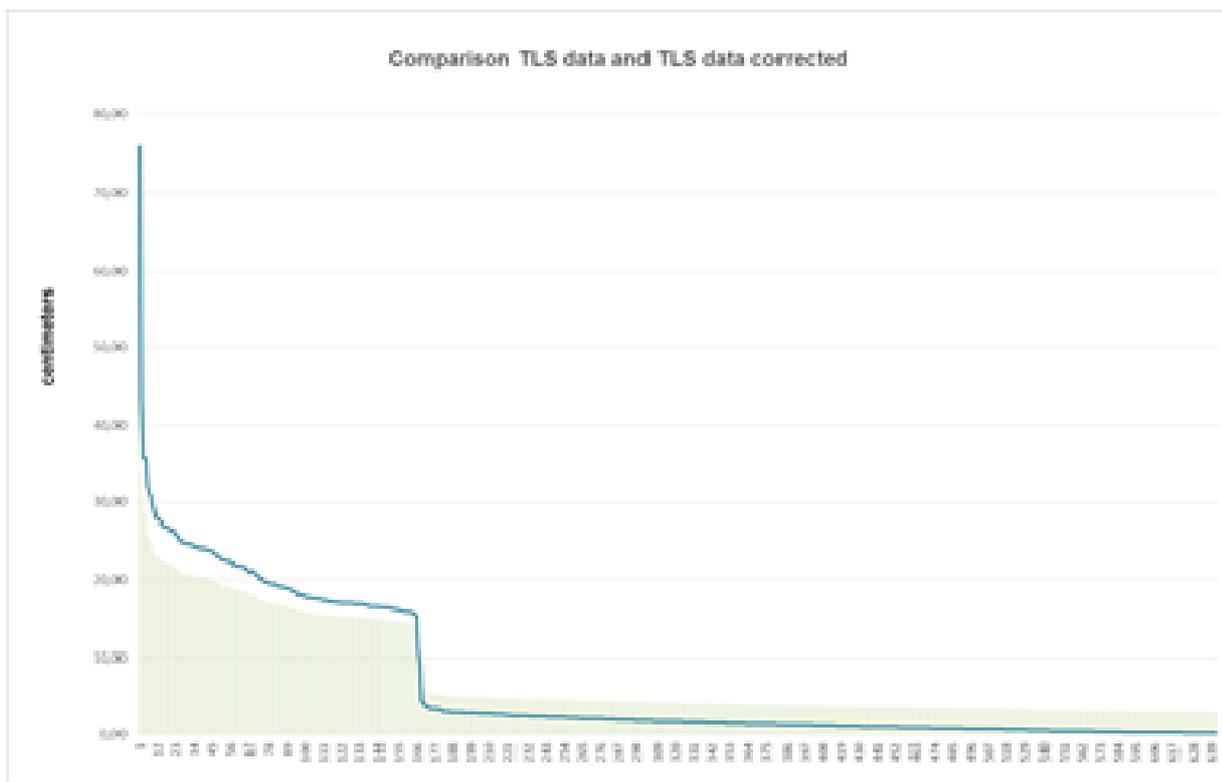


Abb. 6.1.1.1 - Ergebnis der Neubestimmung der TLS-Daten



Grafik 6.1.1.2 - Das Verhältnis zwischen den originalen (grau) und den korrigierten (Linie und blau) Verschiebungsvektoren ist in der Grafik 5.1.2 dargestellt.

Die Neubestimmung der TLS-Daten hat zu keiner Änderung bei der Verteilung der Verformungsfelder geführt, so wie diese durch die Ursprungsdaten definiert und ermittelt werden. Die statistische Auswertung hat über einen linearen Zusammenhang, zu einer "Anpassung" der TLS-Daten an die durch GNSS-Technik ermittelten Werte geführt. Diese Technik ist vorteilhaft, wenn die TLS-Daten bei der Schätzung der Verschiebungen erhebliche Fehler aufweisen. Im Rahmen des Projekts hat man es - auch dank einer guten Auswertung der TLS- und GNSS-Daten - als sinnvoller erachtet, die Daten in ihrer Gesamtheit einzusetzen. Im nachfolgenden Abschnitt wird der Vergleich zwischen den unveränderten TLS- und GNSS-Daten näher beschrieben.

6.2 Vergleich zwischen GNSS- und TLS-Daten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der in den Zeiträumen 2012-2013 und 2013-2014 mit GNSS- und TLS-Technik erfassten Daten verglichen.

6.2.1 Zeitraum 2012-2013

In Abb. 6.2.1.1 werden die Ergebnisse aus 2012-2013 für beide Techniken überlappt dargestellt. Allgemein betrachtet scheinen die aufgenommenen Geschwindigkeitsspannen, so wie auch die Verteilung der Geschwindigkeitsfelder, kohärent zu sein. Die Unterschiede (Abb. 6.2.1.2) in der horizontalen Komponente der Verschiebung im Dezimeterbereich und in der Höhenlage (entlang der Komponente z), mit Unterschieden in der Größenordnung von einigen Zentimetern, sind nicht auf Fehler in der Ausarbeitung oder in der Erhebung der Daten, sondern auf die unterschiedlichen Datenerfassungsarten der diversen Messtechniken bzw. -technologien zurückzuführen.

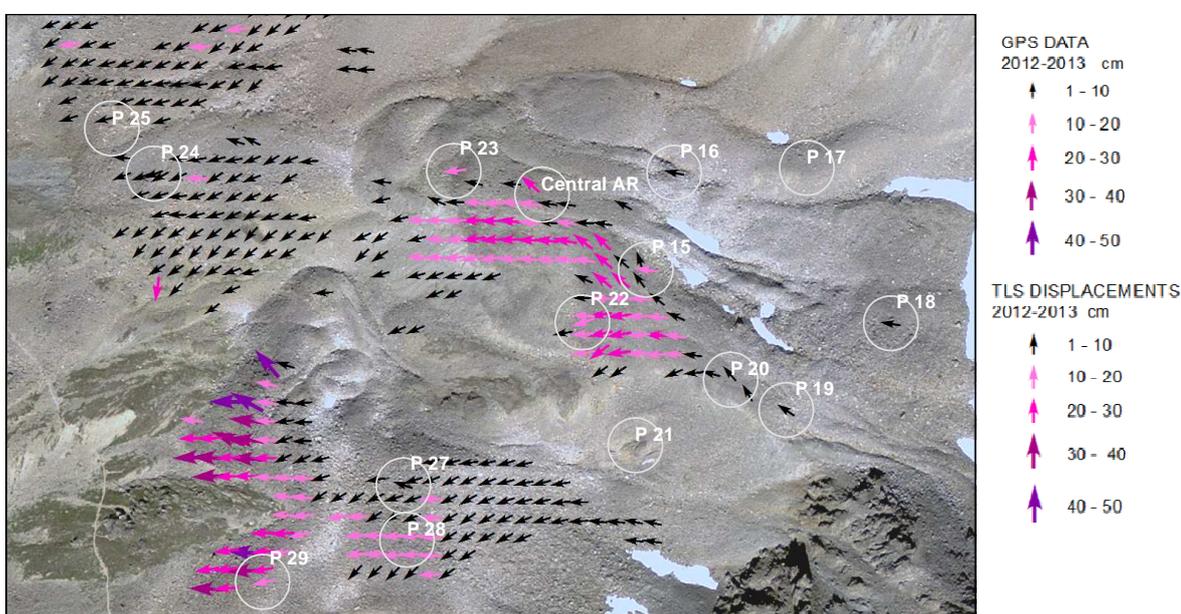


Abb. 6.2.1.1 – Vergleich 2D-Verschiebung GNSS und TLS – 2012/2013

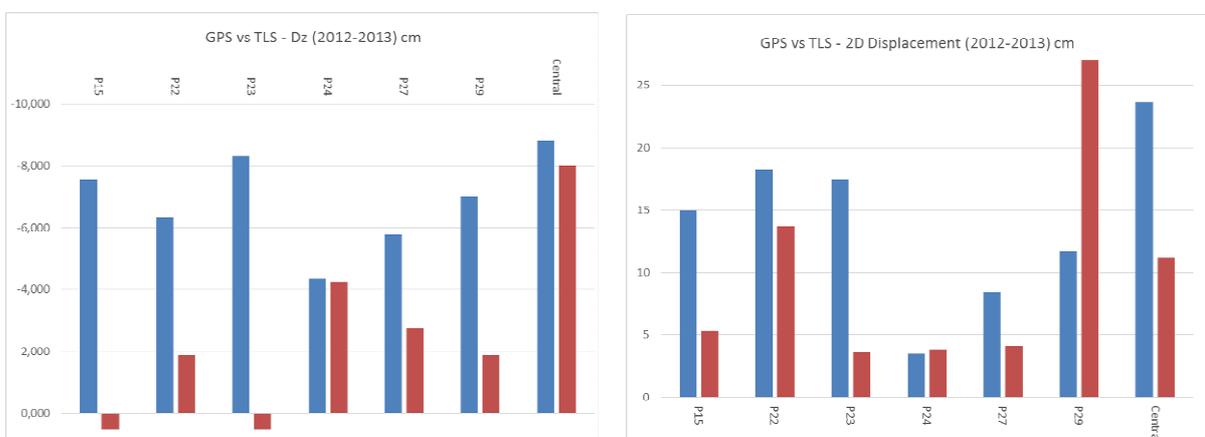


Abb. 6.2.1.2 – Vergleich (li) zwischen der Komponente Δz und (re) zwischen dem 2D-Verschiebungsvektor, die mittels GPS und TLS im Zeitraum 2012 aufgenommen wurden. In Rot die GNSS-Daten und in Blau die TLS-Daten

Die punktuellen GNSS-Daten, die sehr genau sind, doch in einigen Fällen das komplexe System, das hier untersucht wird, nicht sehr gut repräsentieren, werden mit einer gemittelten und repräsentativen Information eines Gebiets verglichen. Wie im **Kapitel 3.2** beschrieben, wurde die Auswertung der TLS-Daten so durchgeführt, um eine möglichst zuverlässige Information zu erhalten, die mit den GNSS-Daten vergleichbar ist. Die flächendeckenden TLS-Daten sind weniger genau, aber für das untersuchte Phänomen repräsentativer, denn es werden auch zu Bereichen, die vom GNSS nicht abgedeckt werden, Informationen geliefert.

6.3.1 Zeitraum 2013-2014

Im Zeitraum 2013-2014 sticht das Fehlen von TLS-Informationen über im Zeitraum 2012-2013 aufgenommene Gebiete hervor; dies ist möglicherweise auf Probleme mit der Sichtbarkeit oder mit einem Verlust an Kohärenz zwischen den beiden Scans zurückzuführen. Insbesondere betrifft dies den östlichen Teil des Blockgletschers Ursina III und des Blockgletschers Ursina II, für welche die TLS-Daten aus dem Zeitraum 2012-2013 verfügbar sind.

Für die restlichen Gebiete scheinen die Ergebnisse der GNSS- und der TLS-Messungen im nachfolgenden Vergleich (Abbildungen 6.3.1.1 - 2) im Bereich der 2D-Verschiebung und der Höhenvariationen dennoch kompatibel zu sein.

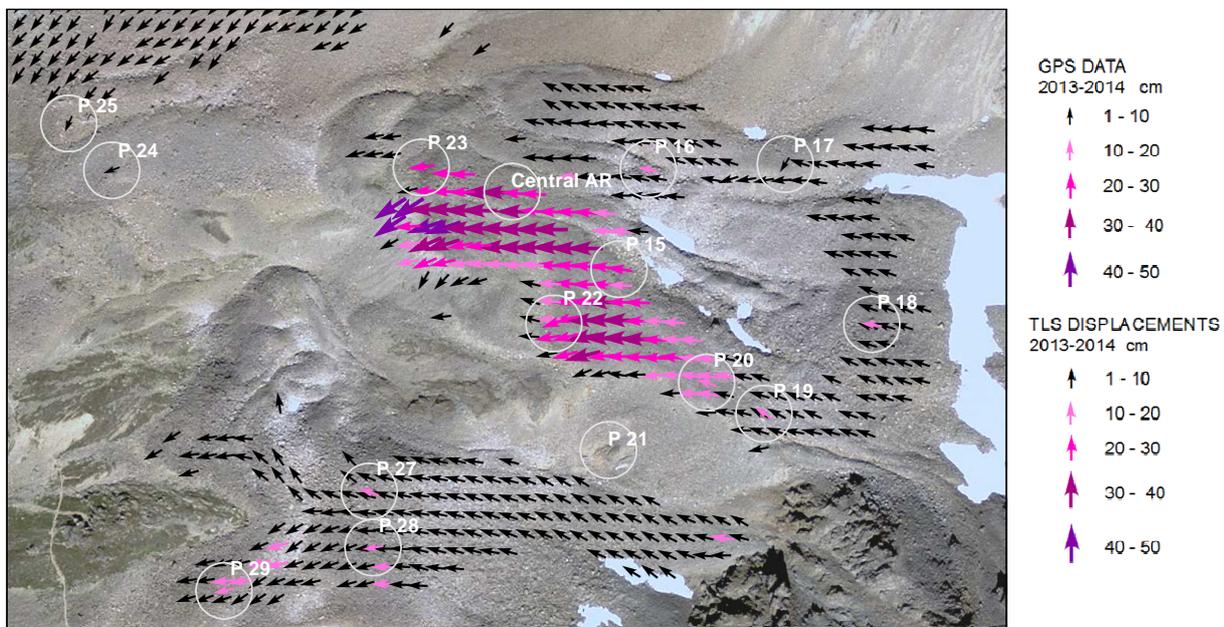


Abb. 6.3.1.1 – Vergleich 2D-Verschiebung GNSS und TLS – 2013/2014

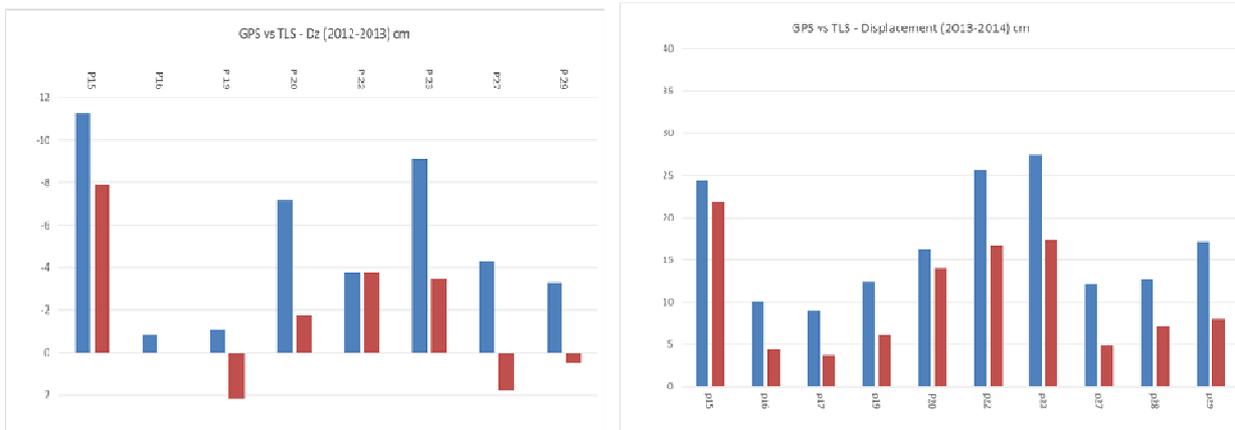


Abb. 6.2.1.2 – Vergleich (li) zwischen der Komponente ΔZ und (re) zwischen dem 2D-Verschiebungsvektor, die mittels GPS und TLS im Zeitraum 2012 aufgenommen wurden. In Rot die GNSS-Daten und in Blau die TLS-Daten

Wie bereits in den vorhergehenden Abschnitten angedeutet, sind die durch die beiden Messungen ermittelten Unterschiede auf die intrinsischen Eigenschaften der GNSS- und der TLS-Techniken zurückzuführen: insbesondere zeigt die Analyse der Komponente Δz auf, dass die ausgesprochen genaue GNSS-Technik in einigen Fällen das Verhalten der einzelnen Blöcke aufzeigt, die sich aufgrund der Verformung des untersuchten Systems drehen und heben können.

7 Vergleich zwischen SAR- und GNSS-Daten

Für eine qualitative Analyse der SAR-Daten wurde ein Vergleich mit den Ergebnissen der auf den selben Zeitraum wie die ausgewerteten Bilder bezogenen GNSS-Messungen (Sommer 2013) durchgeführt. Die GNSS-Daten wurden dazu auf die Sichtlinie des Satelliten projiziert (Kap.5.1).

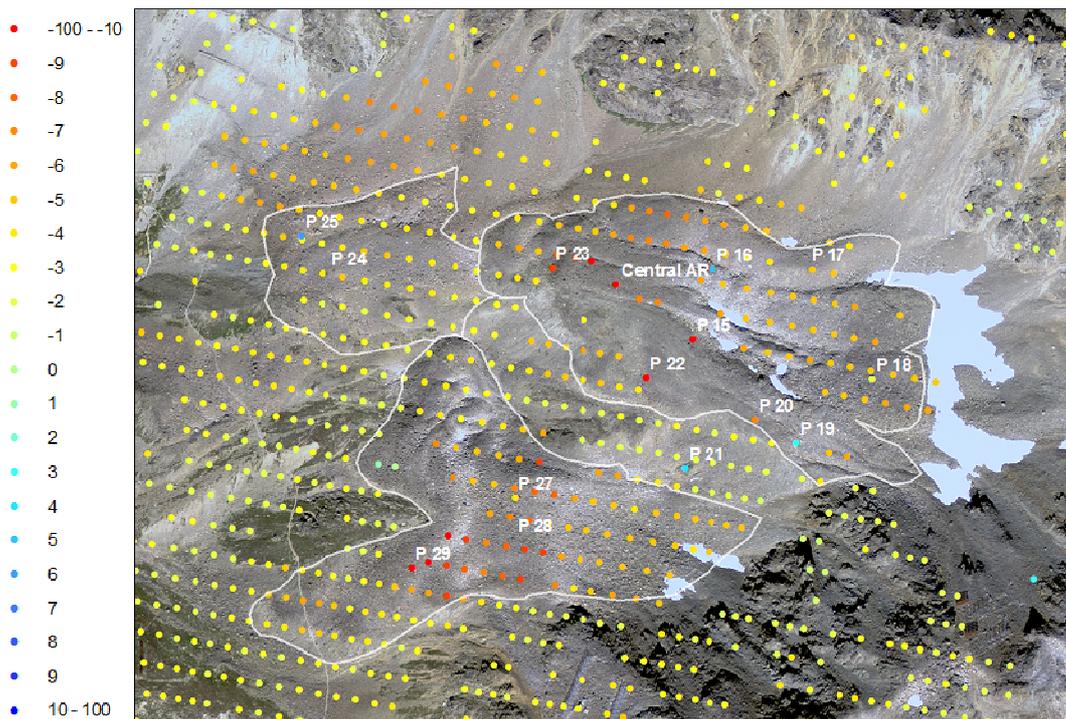


Abb. 7.1 Vergleich GNSS - SAR

In Abbildung 7.1 ist gut ersichtlich, dass die Geschwindigkeitsfelder der GNSS- und der SAR-Daten, mit Ausnahme einiger Fälle, miteinander übereinstimmen.

Konkret wurde in der Grafik in Abb. 7.2 der Vergleich zwischen den mittleren jährlichen Geschwindigkeiten (cm/Jahr) der auf die Sichtlinie des Satelliten projizierten GNSS-Messungen mit SAR-Punktegruppen innerhalb eines Buffers mit einem Radius von 15 Metern und dem GNSS-Punkt in der Mitte angestellt.

Was hervorsticht, ist dass i) von den GNSS-Daten ermittelte vertikale Verschiebungen (Punkte Nr. 16, 19, 21 und 25) nicht durch die SAR-Daten ermittelt werden, da die Information, ähnlich wie beim TLS, das Ergebnis von Mittelwerten in einem Bereich mit einer Bodenauflösung von 30 m ist; ii) dass in den Bereichen rund um die GNSS-Punkte mit größeren Verformungsgeschwindigkeiten die SAR-

Punkte die Geschwindigkeit unterschätzen und schlimmstenfalls der Verlust an Kohärenz zum Datenausfall führt.

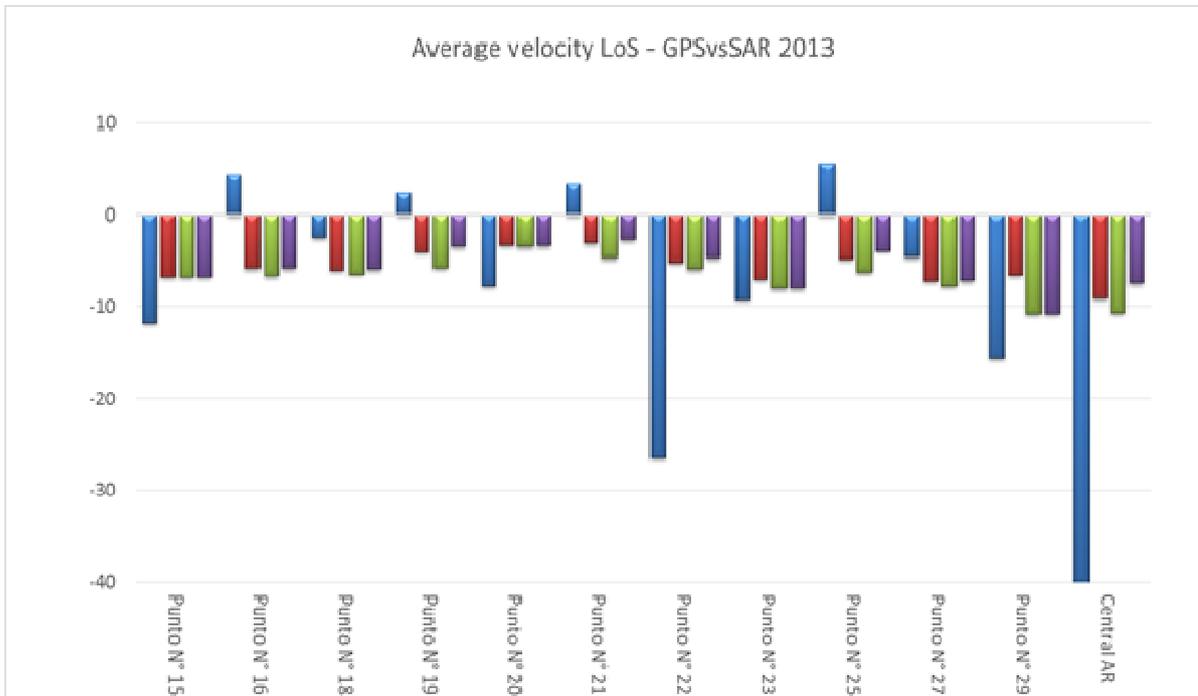


Abb. 7.2 – Vergleich zwischen den mittleren jährlichen Geschwindigkeiten (cm/Jahr) der auf die Sichtlinie des Satelliten projizierten GNSS-Messungen mit SAR-Punktgruppen innerhalb eines Buffers mit einem Radius von 15 Metern und dem GNSS-Punkt in der Mitte. In der Grafik stellen die blauen Säulen die GNSS-Daten entlang der Sichtlinie dar, der Mittelwert der Geschwindigkeiten der SAR-Punkte im Buffer ist in Rot dargestellt, in Grün der Höchstwert der Geschwindigkeiten zwischen den SAR-Punkten im Buffer und in Violett die Geschwindigkeit des dem GNSS-Punkt am nächsten gelegenen SAR-Punktes.

Die wichtigsten Informationen, die aus der Analyse der Grafiken in Abb. 7.3 hervorgehen, sind i) dass die durch die GNSS-Punkte im August 2013 ermittelte und im Kap. 2.2 erwähnte Beschleunigungsspitze in den SAR-Aufnahmen nicht ersichtlich wird; diese zeigen jedoch eine Verlangsamung während der ersten Septemberwochen auf, die von den GNSS-Daten bestätigt wird; ii) dass bis Mitte/Ende Oktober die Blockgletscher Verformungen unterliegen, die sich wahrscheinlich über einen Großteil des Herbstes erstrecken und auch nach dem ersten Schneefall weitergehen.

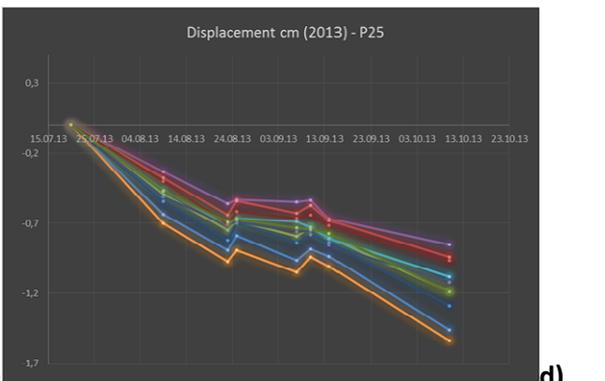
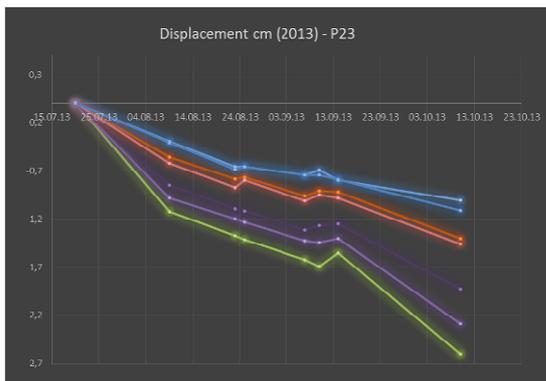
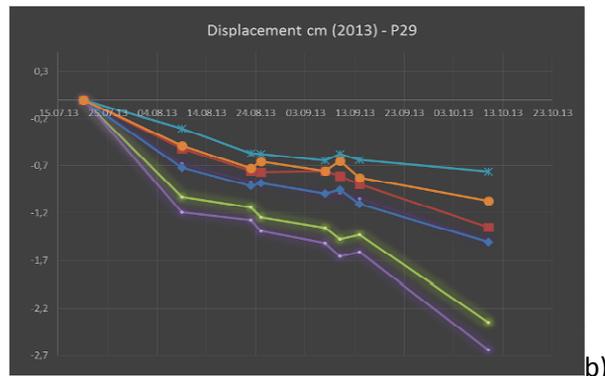
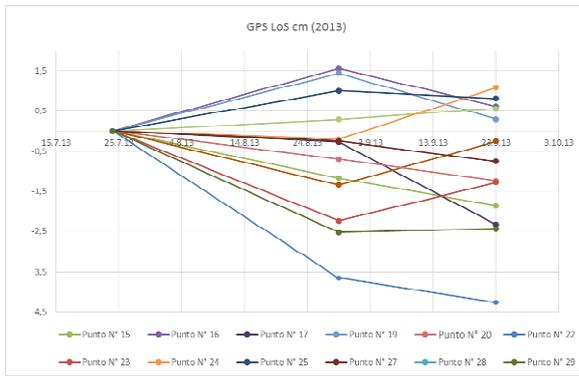


Abb. 7.3 – a) Verschiebung (cm) der GNSS-Daten entlang der Sichtlinie; b), c), und d) historische Datenreihen der in der Umgebung des GNSS-Punktes (nach P29, P23 und P25, jeweils in der Ursina III, I und II angesiedelt) angesiedelten SAR-Punkte (Buffer $r=15m$).

8. Assimilierung und Integration der GNSS- und der TLS-Daten

von *Marcello Pettita*

Im Projekt SloMove wurde eine neue Technik entwickelt, um alle verfügbaren Datenquellen zu integrieren und eine Gesamtschätzung der Geschwindigkeiten und der Verschiebungen bzw. Massenbewegungen in den betroffenen Gebieten zu erhalten.

Da die verfügbaren Daten - GPS, Telelaserscanner, InSAR - sich voneinander deutlich unterscheiden und die mit den einzelnen Messungen in Zusammenhang stehenden Ungewissheiten unterschiedlich sind, wurden für die Herstellung einer neuen Variablen, die alle Messungen miteinander integriert, Datenassimilierungstechniken verwendet, die in anderen Bereichen, wie der Meteorologie und der Atmosphärenphysik, Anwendung finden. Diese Techniken werden als "Data Assimilation" (Datenassimilierung) bezeichnet. Eine allgemeine Beschreibung des Themas ist in diversen Büchern und Artikeln zu finden. Für die Zwecke des vorliegenden Texts wurde die von Kalnay (2003) verwendete Annotation herangezogen, während eine vollständige Beschreibung in Daley (1991), Ghill und Malanotte-Rizzoli (1991) und Talagrand (1997) zu finden ist. Im Allgemeinen geht man bei der Datenassimilierung von einer Reihe an Beobachtungen derselben physischen Größe mit unterschiedlichen Fehlern aus und erstellt ein neues Feld, das die gegenständliche Variable, unter Berücksichtigung der Variabilität der verschiedenen Messungen und der damit in Zusammenhang stehenden Fehlern, beschreibt. Um dieses neue Feld herzuleiten, ist es erforderlich, dass der mit der Variablen in Zusammenhang stehende Fehler auf ein Minimum reduziert wird. Methoden wie der Kalman-Filter, die optimale Interpolation, das 3DVar und das 4DVar ermöglichen es, die beste Approximation der Variablen auf der Grundlage einer gewissen Anzahl an Beobachtungen zu berechnen bzw. zu erhalten. In diesem Projekt wurden die Variablen der Verlagerung (r) und der Geschwindigkeit (v) berücksichtigt, die mit den diversen, oben aufgeführten Methoden gemessen und ermittelt wurden. Um diese zu integrieren, wurde beschlossen, die 3DVar-Methode für nicht miteinander in Zusammenhang stehende Variablen zu verwenden.

Im Allgemeinen besteht der Zweck darin, das optimale Analysefeld der Variablen \mathbf{x}_a zu finden, und zwar auf der Grundlage eines Bezugfeldes (sog. "Background") \mathbf{x}_b , das auf einem regelmäßigen Raster verfügbar ist, und einer gewissen Anzahl n an punktuellen Beobachtungen \mathbf{y}_o , die sich innerhalb des Bereichs, in räumlich unregelmäßig angeordneten Punkten befinden. In unserem Fall wurde das Konzept verallgemeinert, indem die Methode auf mehrere, auf demselben Raster angeordnete Variablen (drei: GPS, TLS und InSAR) angewendet wurde. Allgemein betrachtet ist es SloMove

möglich, das Analysefeld als lineare Kombination der Quellfelder mit Koeffizienten auszudrücken, die vom Raum und von den Fehlern der einzelnen Felder abhängen. Diese analytisch nachvollziehbare Lösung hängt auch von den Kovarianzmatrizen der mit den GPS-, TLS- und InSAR-Feldern in Zusammenhang stehenden Fehlern ab. Die Berücksichtigung der Kovarianz der Fehler verkompliziert das Problem jedoch drastisch, und zwar sowohl aus konzeptueller Sicht (es ist notwendig, die Kovarianz der diversen Ungewissheiten festzulegen) als auch in Hinblick auf die Berechnung (es ist notwendig, Matrizen umzukehren, die eine höhere Dimension aufweisen können). Aus diesem Grund wurde beschlossen, die Kovarianz der Fehler zu vernachlässigen und ausschließlich die punktuelle Varianz und deren lineare Kombination zu berücksichtigen, wobei vom Nichtbestehen einer räumlichen Korrelation der Ungewissheiten ausgegangen wird. Diese Annahme ist in unserem Fall absolut akzeptabel, da - wenn eine räumliche Korrelation zwischen den Fehlern besteht - diese im Vergleich zum Messfehler selbst sicherlich größer ist.

Ausgehend von dieser Annahme ist es möglich, die Variable des neuen Feldes wie folgt auszudrücken:

$$r_a = \frac{\frac{1}{\sigma_{GPS}^2} r_{GPS} + \frac{1}{\sigma_{TLS}^2} r_{TLS} + \frac{1}{\sigma_{SAR}^2} r_{SAR}}{\frac{1}{\sigma_{GPS}^2} + \frac{1}{\sigma_{TLS}^2} + \frac{1}{\sigma_{SAR}^2}}$$

Analog wie oben ist es möglich, auch die mit dem assimilierten Feld in Zusammenhang stehende Ungewissheit zu berechnen, die in unserem Fall wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$\frac{1}{\sigma_a^2} = \frac{1}{\sigma_{GPS}^2} + \frac{1}{\sigma_{TLS}^2} + \frac{1}{\sigma_{SAR}^2}$$

Um das neue assimilierte Feld zu erhalten, wurden räumlich regelmäßige Felder, ausgehend von den verfügbaren punktuellen Beobachtungen, ermittelt. Durch räumliche Interpolationsmethoden, die auf der Umkehr der Entfernung basieren, hat man drei Felder (eines für jede Art von beobachtbarer Variable, GPS, TLS und InSAR) ermittelt, die räumlich regelmäßig auf einem Raster verteilt sind. Analog dazu wurden die Fehler räumlich verteilt, indem der Fehler nach der Methode der Entfernungsumkehr verbreitet und sich räumlich regelmäßig verteilte Ungewissheitsfelder ergeben haben. Die drei Felder wurden anschließend mit der vorab dargelegten Methode assimiliert. Die hier vorgeschlagene Methode ermöglicht es, eine Reihe von Problemen zu bewältigen, die im Bereich des Monitorings von Erdbeben wohl bekannt sind:

1. Es ist möglich, eine räumlich verteilte Schätzung durchzuführen, die alle unterschiedlichen Messungen und die jeweiligen Fehler berücksichtigt;

2. Es ist möglich, die mit dieser Schätzung in Zusammenhang stehende Ungewissheit zu schätzen, um zu verstehen, in welchen Gebieten die Schätzung mehr bzw. weniger zuverlässig ist;
3. Es ist möglich, zeitgleich mit Messungen zu arbeiten, die räumlich auf unterschiedliche Weise angeordnet sind und die Ungewissheiten aufweisen, die sich auch um eine oder mehrere Größenordnungen unterscheiden.
4. Diese Methode ermöglicht es, die Vorteile einer jeden Technik und die Genauigkeit einer jeden Messmethode bestmöglich zu nutzen.

Dieser in anderen wissenschaftlichen Bereichen wohl bekannte Ansatz kann neue und wichtige Informationen im Bereich der Geologie und des Monitorings von Erdbeben liefern, da er unterschiedliche Datentypen integriert und die Probleme im Zusammenhang mit den verschiedenen Ungewissheiten und den diversen, mit den Messungen in Zusammenhang stehenden Fehlerarten bewältigt. Schließlich ermöglicht es diese Methode, die Satellitendaten in Kombination mit anderen Standard-Beobachtungen auf optimale und physisch konsistente Weise zu verwenden.

Die im Rahmen des SloMove-Projektes erhaltenen Ergebnisse (Abb. 8.1 und 8.2) zeigen, dass diese Methode in einigen Fällen die Grenzen der Messinstrumente wettmachen kann und es ermöglicht, ihre jeweiligen Vorzüge durch einen integrierten Ansatz bestmöglich zu nutzen. Die wichtigste Eigenschaft dieser Karten besteht in der Möglichkeit, diese abzuändern, um ein Assimilierungsergebnis zu erhalten, welches das untersuchte Phänomen so gut wie möglich repräsentiert.

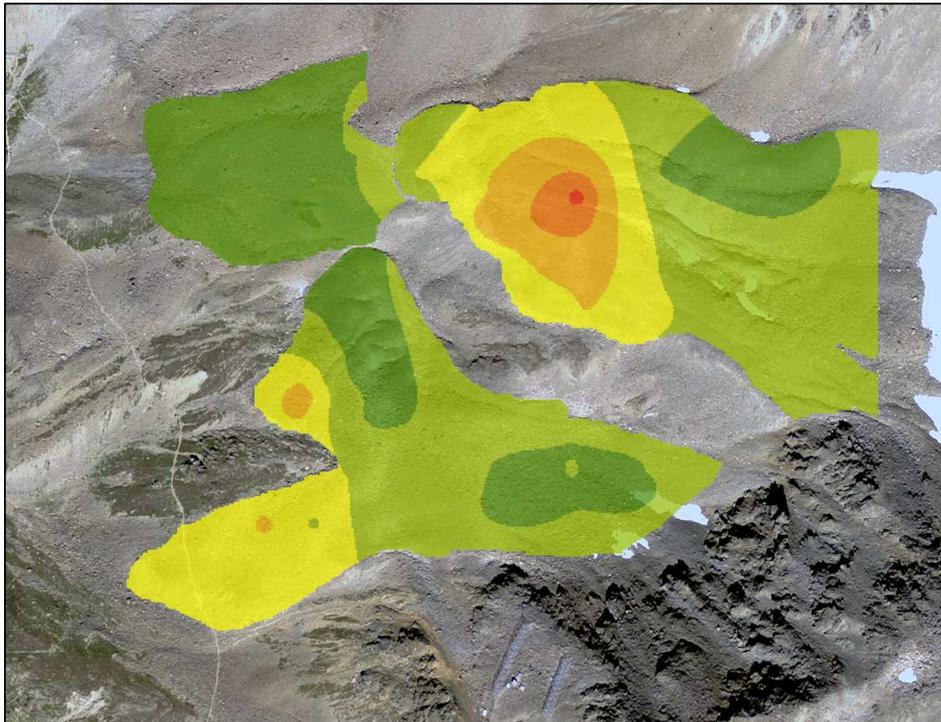


Abb. 8.1 - Assimilierungskarte der GPS- und der TLS-Daten: in diesem Fall ist das Gebiet, in dem der Wert der GPS-Daten eine höhere Bedeutung hat, größer.

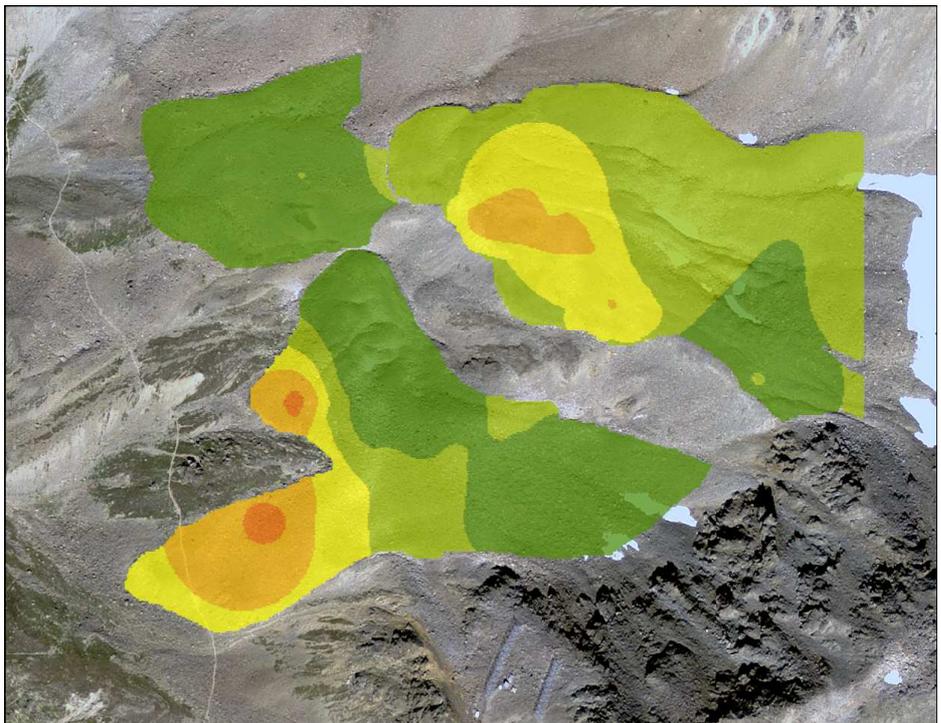


Abb. 8.2 - Assimilierungskarte der GPS- und der TLS-Daten: in diesem Fall wurde der TLS-Messung ein höheres Gewicht beigemessen und eine gute Aussagekraft der GPS-Daten beibehalten.

9. SWOT Analyse

9.1 Monitoring mit GNSS-Technik

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - liefert Informationen in einem Globalen Bezugsrahmen (WGS84) - liefert präzise Informationen in einem Absoluten Zeitbezugsrahmen (GPS-Zeit) - fähig, in Echtzeit zu arbeiten - Standard Datenformat (RINEX) 	<ul style="list-style-type: none"> - punktuelle Informationen – manchmal nicht repräsentativ für den Prozess - teurer Sensor - die Einschränkungen beziehen sich auf die Tätigkeiten vor Ort (Installation und Datensammlung) - standortabhängiges Geräusch (Multipath), das nicht immer einfach gelöscht werden kann
Möglichkeiten	Gefahren
<ul style="list-style-type: none"> - Forschung im Bereich Low-cost-GNSS-Sensor - zukünftige Multikonstellation (GPS, Glonass, Galileo) Interoperabilität - Datenintegration/-assimilation: um Schwächen zu bewältigen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Repräsentativität versus Genauigkeit: welches Gewicht soll den GNSS-Daten zugewiesen werden, um eine angemessene Datenassimilation zu erhalten

9.2 Monitoring mit TLS

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - Sehr hohe Messauflösung - Basiert außerhalb des Bewegungsbereichs - Direkte 3D Oberflächenkoordinaten - Referenzierte Bilddaten 	<ul style="list-style-type: none"> - Schatteneffekte - Schwierigkeiten unter kleinen Mess-Einfallswinkeln - Wetterabhängig - Vegetation kann Messungen stören
Möglichkeiten	Gefahren
<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung von kleinen Skaleneffekten - Monitoring von unzugänglichem Boden - Einfache und unmissverständliche Interpretation 	<ul style="list-style-type: none"> - Räumliche Datengaps - Geringere Datenqualität unter schwierigen Bedingungen - Einschränkung an Schönwettertagen - Eingeschränkte Bedeutung für vegetationsbedeckte Gebiete.

9.3 Auswertung SAR-Daten mit SBAS-Algorithmus

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - Erstellung von synoptischen Karten mit Darstellung der Verteilung der Verformungen - Verformungsmessungen in schwer zugänglichen Gebieten - Kostensenkungspotential - Erhöhte Genauigkeit bei den Verformungsmessungen mit Aufnahmen in regelmäßigen Zeitabständen und in ausreichender Anzahl - Möglichkeit zur Validierung der Daten und Integration mit anderen Messtechniken 	<ul style="list-style-type: none"> - Verformungsmessung nur entlang der Sichtlinie - Notwendigkeit einer ausreichenden Anzahl an Daten, bevor man Verformungsmessungen liefern kann - Es sind jedenfalls Vorkenntnisse über das Phänomen erforderlich, um zuverlässige Messungen zu erhalten - Die zeitliche Dekorrelation der Winterzeit kann die Messergebnisse beeinträchtigen
Möglichkeiten	Gefahren
<ul style="list-style-type: none"> - Die Einführung von Sentinel 1 bietet Gratis-SAR-Bilder mit einem Wiederholungszeitraum von 12 Tagen (daraus werden 6 Tage mit der Einführung von Sentinel 1b) - Präsenz der Entwicklergesellschaft des Algorithmus auf dem Staatsgebiet - Beginn der Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts mit der Entwicklergesellschaft des Algorithmus - Erhöhung der Anzahl der Softwareprogramme, die eine Version des Algorithmus implementieren 	<ul style="list-style-type: none"> - Die für eine genaue Verformungsmessung erforderliche Anzahl an Bildern ist nicht im Voraus garantiert. - Die Technik erfordert einen hohen Erfahrungsgrad für ihre noch nicht intern verfügbare Anwendung - Die als Referenzen für die Integration mit anderen Techniken erforderlichen natürlichen Reflektoren hängen hinsichtlich Größen und Ausrichtungen von der Modalität des SAR-Sensors ab

9.4 Integrierte Technologien

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - vollständigeres und detailliertes Prozessmodell: Validierung einzelner Ergebnisse; - kosteneffizientes Monitoringsystem: verwenden Sie geeignete Technologien für unterschiedliche Verformungsphasen desselben Prozesses - gut etablierte Methode auf einem anderen Gebiet (Atmosphäre) 	<ul style="list-style-type: none"> - zuverlässige Georeferenz der Daten - mangelnde Kenntnisse über einzelne Technologien - Beschränkungen und Eigenschaften (Bedeutung von Output)
Möglichkeiten	Gefahren
<ul style="list-style-type: none"> - Bestehen von unterschiedlichen Daten aus dem Archiv; Daten für unterschiedliche Schritte können verwendet werden (vorhergehendes Monitoringsystem, vorhergehende Remote-Daten) - neue Chancen für den Austausch von Daten und Informationen - sogar neue Informationsquelle (neue Sensoren, neue Methoden) - Diese Methode wird in diesem Bereich der Geowissenschaften nicht vollständig ausgeschöpft. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diese Methode kann sehr komplex sein, wenn die räumliche Kovarianz inbegriffen ist. - Integration von Informationen unterscheidet sich von Integration oder Assimilierung von Daten/Technologien - Vergleich zwischen den Ergebnissen auf unterschiedlichen Monitoringsystemen: einzelnes Produkt verglichen. - Datenintegration /-assimilation: aus unterschiedlichen Einzelprodukten ein einzigartiges, mehrfach integriertes Produkt zu erhalten, das den Prozess besser repräsentiert.

10. Ausblick und Folgerungen

Trotz der Schwierigkeiten aufgrund ungünstiger und außergewöhnlicher Wetter- und Klimabedingungen (der Sommer 2015 kündigt sich sehr viel günstiger für die Aufnahmen an) und aufgrund der Hürde der Prioritätensetzung für die Aufnahmen der Satellitenkonstellation CosmoSkyMed-Satelliten, die sich negativ auf die Fristen und auf die Ergebnisse der Datenauswertung ausgewirkt haben, haben die durchgeführten Analysen sicherlich zu einem besseren Verständnis der Technik der Multi-Interferometrie sowie der untersuchten Phänomene geführt.

Der Vergleich der mit den drei eingesetzten Messtechniken erfassten Daten hat es ermöglicht, die folgenden Schlussfolgerungen zu ziehen:

- 1) Informationen, die aus genauen, jedoch punktuellen Daten wie jene, die mit differentiellen GNSS-Messungen erfasst werden, erhalten werden, stellen einen guten Ausgangspunkt für einen Vergleich zwischen verschiedenen Messtechniken dar;
- 2) Die beispielsweise durch TLS- und SAR-Aufnahmen erfassten, weniger genauen, jedoch räumlich verteilten Informationen repräsentieren das Gesamtphänomen häufig besser;
- 3) Trotz der beschränkten Anzahl an Bildern war es durch den SBAS-Algorithmus möglich, insbesondere in Bezug auf die räumliche Aufteilung der Verformungen, mit den anderen Messtechniken vergleichbare Informationen zu liefern.

Die während des Projektes festgestellten Schwierigkeiten haben weitere Informationen über die mögliche derzeitige Verwendung dieser Techniken für das Monitoring langsamer Phänomene im Hochgebirge seitens einer Landesverwaltung geliefert:

- 1) Die differentielle GNSS-Technik liefert punktuelle Informationen (außer bei Verwendung eines dichten Netzes an Messpunkten) über die Verformungen eines Phänomens, ermöglicht es jedoch, genaue Ergebnisse innerhalb kurzer Zeit zu erhalten und auch sehr schnelle oder durch Beschleunigung gekennzeichnete Bewegungen zu überwachen, wie im Fall von sich entwickelnden bzw. fortlaufenden Phänomenen, die zum Beispiel aus Gründen des Zivilschutzes überwacht werden. Diese Technik erfordert einen größeren Aufwand vor Ort (für die Installation der Messgeräte und aufgrund der längeren Messzeiten) und somit auch zu längeren Ausführungszeiten und ist für die Überwachung großer Gebiete schwer einsetzbar. Diese

Technik ist daher aus wirtschaftlichen Gründen nur in spezifischen Fällen zum Zweck der Raumplanung beschränkt anwendbar.

- 2) Die TLS-Technik ermöglicht die Überwachung größerer Gebiete mit geringerem Zeitaufwand. Die Verwendung dieser Technik hängt von der Möglichkeit ab, eine geeignete Positionierung der Messgeräte zu finden (Sichtwinkel und Entfernung), von der aus es möglich ist, das gesamte Untersuchungsgebiet aufzunehmen sowie von der Zugänglichkeit des Standortes und den Witterungsbedingungen. Diese Technik und die Entwicklung der Methode mit der Verwendung neuer Sensoren und einer automatischen Datenverarbeitung deuten darauf hin, dass der terrestrische Laserscanner in Zukunft effizient im Bereich der Raumplanung und für den Zivilschutz verwendet werden kann.
- 3) Die Verwendung der SAR-Technik zieht lange Liefer- und Datenverarbeitungszeiten nach sich. Die multitemporale SAR-Technologie ist eine für die Aufnahme großer Flächen konsolidierte Methode (z. B. mit der PS-Technik und den historischen Datenreihen zwecks Raumplanung), weist jedoch noch viele Beschränkungen in Alpengebieten und für Zivilschutzzwecke auf. Die langen Zeitabstände zwischen zwei Aufnahmen, die sich jedoch mit den Satelliten der letzten Generation Cosmo SkyMed und TerraSAR-X verkürzt haben, eignen sich nicht für das Monitoring von Prozessen, die eine schnelle Datenerfassung für die Auswertung der Informationen erfordern. Unsere Erfahrungen zeigen, dass es, um die SAR-Technologie für "öffentliche" Zwecke und nicht nur für die Wissenschaft und die Raumplanung (siehe die Außerordentlichen Pläne für die Fernaufnahme des Italienischen Umweltministeriums), sondern auch für den Zivilschutz zu verwenden, notwendig ist, dass diese Technologie von einer rein strategischen und militärischen Verwaltung zu einer Nutzung ausschließlich für zivile Zwecke übergeht. Diese müsste sicherstellen, dass Aufnahmen nach einem geplanten Programm durchgeführt werden, und sollte die Daten bzw. Bilder für die Auswertung, idealerweise durch lokale Techniker, schnell ausgeben oder die bereits ausgewerteten Daten liefern, für welche jedoch die Möglichkeit der "Ausarbeitung" auf der Grundlage der lokalen Kenntnisse möglich sein sollte.

Um diese Technik aufwerten zu können und ihr gesamtes Potential auszuschöpfen und somit Abstand von einem rein wissenschaftlichen bzw. demonstrativen Ansatz zu nehmen, ist Folgendes notwendig:

- a) Einrichtung von näher beim Gebiet angesiedelten Forschungs- und Auswertungszentren;
- b) Verkürzung der Aufnahmezeiten und der Kosten für die Datenauswertung;

- c) Entwicklung neuer Algorithmen für die Auswertung einer immer geringeren Anzahl an SAR-Bildern.

Literaturhinweise

Bauer, A., Paar, G., Kaufmann, V., 2003. Terrestrial Laser scanning for rock glacier monitoring.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., 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

Casu, F., Manzo, M., Lanari, R., 2006. "Performance analysis of the SBAS algorithm for surface deformation retrieval." *Fringe 2005 Workshop*. Vol. 610. 2006.

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

Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2003. "Monitoring landslides and tectonic motion with the permanent Scatterers technique." *Engineering Geology* 68/1-14.

Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2003. "Multi-Image Satellite SAR Interferometry: State of the Art and Future Trends" In: *Proc Radar Conference, Adelaide*. 2003. S. 239-244.

Colesanti, C., Wasowsky, J., 2006. "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry" *Eng. Geo.* 88, 173–199

Daley, R., 1991. "Atmospheric Data Analysis." Cambridge University Press.

Gili, J. A., Corominas, J., Rius J., 1998. "Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring", *Eng. Geo.* 55, 167–192

Ghill, M., Malanotte-Rizzoli, P., 1991. "Data assimilation in meteorology and oceanography." *Advances in Geophysics* 33, 141e266.

Kalnay, E., 2003. "Atmospheric Modeling, Data Assimilation, and Predictability." Cambridge University Press.

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

KENNER, R., BÜHLER, Y., DELALOYE, R., GINZLER, C., PHILLIPS, M., 2014. "Monitoring of high alpine mass movements combining laser scanning with digital airborne photogrammetry." Geomorphology, 206(0), 492-504.

Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquì, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. "A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms" In Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 42(7), 1377-1386.

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

Pesci, A., Conforti, D., Fabris, M., Loddo, F., 2006. "GPS; fotogrammetria digitale e Laser Scanner: un sistema integrato di rilevamento." Quaderni di geofisica.

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

Talagrand, O., 1997. "Assimilation of observations, an introduction." Journal of the Meteorological Society of Japan 75 (1B), 191e20