



OAW
Österreichische Akademie
der Wissenschaften



INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION

ISDR - 21

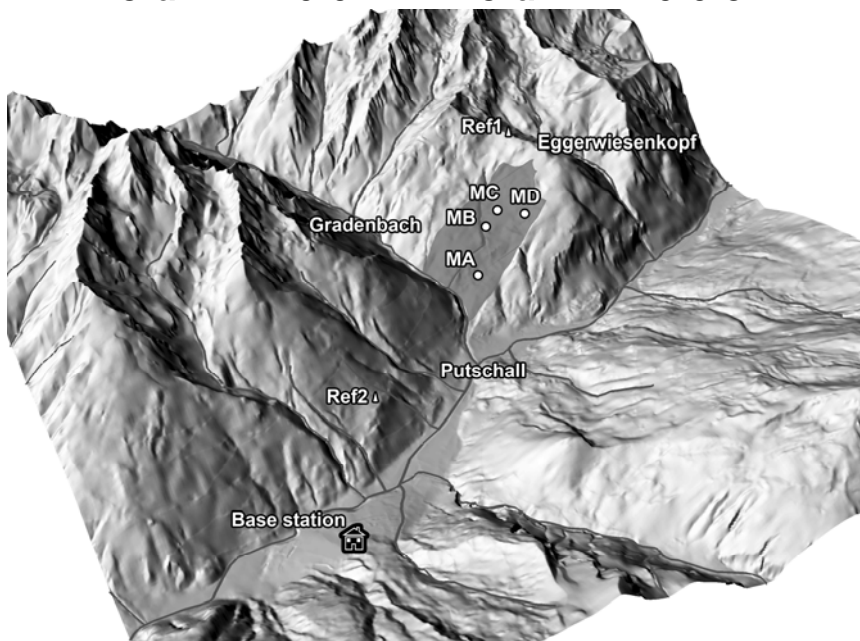
Gefahrenbewertung: Verformungen

Projekttitle: Gefahrenbewertung von tieferreichenden Massenbewegungen:
Projektteil TUG – Monitoring der Verformungen

Projektleiter: Univ. Prof. Dr. Fritz K. Brunner
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme
Technische Universität Graz

ENDBERICHT

Juli 2004 – Juli 2008



Österreichische Akademie der Wissenschaften

INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION

Code: ISDR-21 (Juli 2004 bis Juli 2008)

Projekttitel: **Gefahrenbewertung von tiefreichenden Massenbewegungen:
Projektteil TUG – Monitoring der Verformungen**

Projektleiter: Univ. Prof. Dr. Fritz K. Brunner

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Rainer Klostius (bis August 2006)

Dipl.-Ing. Daniel Gander (ab Oktober 2006)

alle: Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Technische Universität Graz

Kurzfassung

Die Aufgabenstellung für das gesamte Forschungsprojekt liegt in der Integration des geodätischen und seismischen Monitorings in ein einheitliches Überwachungssystem für tiefreichende Hangbewegungen. Die Kombination der beiden Methoden soll zur Erfassung des gesamten Spektrums der Bewegung führen, das von einer quasi-kontinuierlichen Verschiebung über Stick-Slips bis hin zu kritischen Bruchvorgängen reicht. Den Kern für das Langzeitmonitoring tiefreichender Hangbewegungen bildet das Integrierte Monitoringsystem, IMoS. Dafür wurde ein neuartiges Strainmeter entwickelt, mit dem das lokale Deformationsfeld um eine IMoS Station gemessen werden kann. Die Entwicklung der IMoS Methodik geschieht in Kooperation mit Prof. E. Brückl, TU Wien.

In der Berichtszeit wurde das GPS Monitoring der Rutschung Gradenbach fortgeführt. Zurzeit befindet sich der Hang noch immer in einer langsamen Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit (5 cm/Jahr). Neue GPS Auswertemodule wurden zur Verbesserung der Genauigkeit entwickelt. Die Entwicklung eines neuen digitalen Geologenkompasses für die geotechnische Feldaufnahme wurde abgeschlossen. Die Untersuchungen zur Korrelation der GPS Signale wurden abgeschlossen. Die Auswertung aller GPS Daten vom GPS Testnetz „Seewinkel“ mit dem neuen Modell ist noch in Bearbeitung.

Es wurde ein Prototyp einer hochgenauen, faseroptischen (SOFO) Strain-Rosette gebaut und für erste Tests in einem Testgebiet an der TU Graz eingebaut. Es werden kontinuierlich Messungen durchgeführt. Die Analyse bestätigt die bereits in frühen Experimenten festgestellte extrem hohe Auflösung von 2 µm im Feldeinsatz. Erste Messungen mit SOFO-FAST haben nm Präzision bei kHz Auflösung gezeigt. Eine leicht verbesserte Strain-Rosette (drei 5m lange Sensoren) wurde in der Nähe des Punktes MB in den Rutschhang eingebettet. Mehrere statische Messungen bestätigen die hohe Präzision. Simultane Messungen mit dem seismischen Array (TU Wien) wurden arrangiert. Die Auswertungen der aufgezeichneten Daten ist noch nicht abgeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung.....	1
1.2 GPS Auswertesoftware	2
1.3 Personalsituation und Aufgabenverteilung.....	2
2 Relevante Untersuchungen im Rahmen des Projektes ISDR-18	3
2.1 GRAZIA.....	3
2.2 Photogrammetrisches Modell.....	3
2.3 Erweiterungen am CODMS im Mai 2004	4
2.4 Low-Cost-GPS	5
2.5 Sensoren für die geotechnische Aufnahme	5
2.6 Fernerkundung	5
2.7 Geotechnische Aufnahme	6
3 Kontinuierliches GPS Monitoring	8
3.1 Messperiode Sommer 2004	8
3.2 Messperiode Sommer 2005	10
3.3 Messperiode Sommer 2006	10
3.4 Messperiode Sommer 2007	11
3.4.1 Empfängerdefekt an der Station R2 und Folgen für die Auswertestrategie.....	11
3.4.2 Datenverfügbarkeit Funk/Datalogger für das Jahr 2007	12
3.5 Messperiode Sommer 2008	13
3.6 Ergebnisse aller ausgewerteten GPS-Kampagnen.....	13
3.7 Untersuchungen der kontinuierlichen Daten	16
4 Strain-Messungen	19
4.1 Einführung und Pläne.....	19
4.2 Strainrosette am Untersuchungsgelände BTZ	21
4.2.1 Präambel	21
4.2.2 Einbau der mit Soilfrac stabilisierten Rohre.....	22
4.2.3 Verankerungen	23
4.2.4 Einbau der SOFO Sensoren.....	24
4.2.5 Einbau der Sensoren für Bodentemperatur und Bodenfeuchte.....	25
4.2.6 SOFO Static Messungen	25
4.3 Strain-Rosette Gradenbach.....	27
4.3.1 Planungsphase	27
4.3.2 Konzept für den Einbau der Strain-Rosette	28
4.3.3 Realisierung.....	29

4.3.4	SOFO-Dynamic Nullmessung und Ergebnisse.....	32
4.3.5	SOFO-Static Messungen und erste Ergebnisse.....	34
4.3.6	2-wöchige SOFO Messkampagne.....	35
5	Terrestrische Messungen am Rutschhang.....	36
5.1	Motivation.....	36
5.2	Punktfeld MD und Polygonzug.....	36
5.3	Sperrenmessung am Hangfuß.....	37
5.3.1	Vermarkung und Messeperioden 2002-2004.....	37
5.3.2	Messeperioden 2007 und 2008.....	39
5.4	Lokales Deformationsnetz.....	41
5.4.1	Nullmessung.....	41
5.4.2	Erste Folgemessung im Juni 2008.....	43
5.4.3	Deformationsanalyse.....	44
6	Weitere abgeschlossene Untersuchungen aus ISDR-21.....	46
6.1	Untersuchung zu azimutabhängigen Elevationsschranken.....	46
6.1.1	Datenverarbeitung.....	46
6.1.2	Ergebnisse.....	46
6.1.3	Zusammenfassung.....	48
6.2	Korrelationen zwischen GPS Phasenbeobachtungen.....	49
6.3	Digitaler Geologenkompass.....	50
6.4	Geologisches Modell.....	51
6.5	Mehrwegeeffekte.....	52
6.6	Low-Cost-GPS.....	52
6.7	Analyse der Niederschlagsdaten.....	53
6.8	Vergleich der Extensometerdaten am Hangfuß mit den Verschiebevektoren der GPS-Monitoringstationen.....	54
6.8.1	Beschreibung des Messsystems.....	54
6.8.2	Anzahl und Lage der installierten Drahtextensometer.....	54
6.8.3	Ergebnisse der Analyse.....	55
6.8.4	Die beschleunigte Phase.....	58
6.9	Untersuchungen zu lokalen und globalen Ionosphärenmodellen.....	59
7	Referenzen.....	67
	Relevante Veröffentlichungen.....	69
	Publikationen.....	69
	Poster.....	70
	Sonstige.....	70
	Interne technische Berichte.....	70
	Anhang.....	74

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Im Rahmen des Projektes IDNDR-10 „Kontinuierliche und automatische Überwachung von Massenbewegungen“, das im Mai 2001 abgeschlossen wurde, sind die Hardware und Software für ein kontinuierlich arbeitendes GPS Überwachungssystem (CODMS) entwickelt worden.

Als Teil des Projektes ISDR-18 „Massenbewegungen im alpinen Raum: Kontinuierliches Monitoring von Hangbewegungen mit GPS“ (Abschluss Ende 2004) wurde die projekteigene Auswertesoftware GRAZIA um Auswertemodule für die korrekte Gewichtung der GPS Phasenmessungen erweitert. Ein neues troposphärisches Korrekturmodell wurde entwickelt, mit dem die Genauigkeit der berechneten Höhenänderungen signifikant gesteigert werden konnte.

Die relativ großen Bewegungsraten und die bereits durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen machen die Rutschung Gradenbach zum wahrscheinlich besten Testgebiet für das kontinuierliche Monitoring von alpinen Massenbewegungen. Abb. 3-1 zeigt die Rutschung Gradenbach mit den GPS Stationen.

Die GPS Messungen werden seit August 1999 durchgeführt und analysiert. Während der Wintermonate 2000 fand eine Beschleunigung der Bewegung statt, die sich während der Sommermonate 2001 noch verstärkte. Eine kontinuierliche GPS Messung konnte aber zeigen, dass die Rutschung bereits wieder in eine ruhigere Phase gekommen war. Diese beruhigte Phase scheint noch immer anzudauern. Es ist bekannt, dass schon früher (Jahr 1974) nach einer raschen Bewegung von ca. 3.6 m eine einjährige Ruhephase eintrat. Wie kann man aber das Risiko des Einsetzens einer derartigen Ruhephase abschätzen?

Die Zielsetzung des Gesamtprojektes, also inklusive des TU Wien Anteils, liegt in der Integration des geodätischen und seismischen Monitorings in ein einheitliches Überwachungssystem für tiefreichende Hangbewegungen. Die Kombination der beiden Methoden soll zur Erfassung des gesamten Spektrums der Bewegung führen, das von einer quasi-kontinuierlichen Verschiebung über Stick-Slip bis hin zu kritischen Bruchvorgängen reicht. Zusätzlich soll ein neuartiges Strainmeter das lokale Deformationsfeld um eine Station erfassen, sodass einerseits Aussagen über die Repräsentativität der Messstelle gemacht und andererseits auch Aussagen über Spannungsumlagerungen getroffen werden können. Es ist geplant, dass ein Integriertes Monitoring System (IMoS) aus fünf Stationen besteht, allerdings soll aus Kostengründen zunächst nur ein Strainmeter entwickelt werden.

Es wurden für das Projekt folgende Entscheidungen und Zielsetzungen vereinbart:

- Letzte 48h Kampagne am Ende des Projektes im Juni 2008
- Die statischen Messungen mit der Strain-Rosette im Testgebiet (TU Graz) werden nur noch 3mal im Projektjahr ausgeführt.
- Neue IMoS Messeinsätze mit kontinuierlichen GPS Messungen, hochfrequenten Messungen mit der Strainrosette und den mikroseismischen Messungen (TU Wien) am Gradenbach. Diese Messungen müssen simultan ausgeführt werden und es sind jeweils ungefähr zwei Wochen für diese Messeinsätze vorgesehen.

- Gemeinsame Auswertung aller Daten vom Gradenbach, insbesondere der GPS Daten seit August 1999. Dabei sollen alle vom Institut entwickelten Auswertemodule (Troposphäre, Varianzansatz, Mehrwegeeffekte, Integrated Deformation Analysis) zur Anwendung kommen.
- Die Risikobetrachtungen für eine tiefe Hangbewegung auf der Basis der IMoS Daten wird gemeinsam mit dem Projektteam TU Wien (Prof.Dr. E. Brückl) ausgeführt werden.
- Alle bisherigen Forschungsarbeiten sollen publiziert werden und an einem Forschungstag (gemeinsam organisiert mit dem Projektteam Prof. Dr. E. Brückl, TU Wien) mit dem Thema „Risikobestimmung von tiefen Massenbewegungen“ vorgestellt werden.

1.2 GPS Auswertesoftware

Für die Auswertung der sporadischen 48h GPS Messungen wird weiterhin die Software Bernese 5.0 verwendet. Zur Auswertung der kontinuierlichen GPS Messungen wird die Institutssoftware KF_Run verwendet werden. Diese wurde von Dr. A. Wieser entwickelt und es stehen alle Modelle, die im Rahmen der ISDR Projekte entwickelt wurden, zur Auswertung der GPS Daten zur Verfügung.

1.3 Personalsituation und Aufgabenverteilung

Auf eigenen Wunsch schied DI R. Klostius mit 31. August 2006 aus dem Projekt aus. Mit 2. Oktober 2006 wurde DI D. Gander als neuer wissenschaftlicher Mitarbeiter eingestellt, der in erster Linie die Analyse aller bisherigen kontinuierlichen GPS Messungen mit der Entwicklung der notwendigen Auswertemodelle unter Leitung von Dr. A. Wieser (keine Kosten für das Projekt) durchführen soll.

Dr. S. Schön hat als F. Lynen-Stipendiat (mit teilweiser Anstellung aus diesem Projekt) die Untersuchung der Korrelation der GPS Signale vorläufig abgeschlossen. Es sind drei Publikationen über diese Arbeiten vorgesehen. Details sind in Kapitel 6.2 zusammengefasst. Er wurde mit 1. September 2006 als Professor an der Universität Hannover berufen.

Die geotechnischen Modelle der Rutschung Gradenbach werden in der Dissertation von Mag. F. Zobl (keine Kosten für das Projekt) entwickelt. Der Abschluss dieser Untersuchungen hat sich nochmals verzögert.

Unter der Leitung von Dr. H. Woschitz (keine Personalkosten für das Projekt) wurden alle Arbeiten im Zusammenhang mit der Strain-Rosette durchgeführt. Dr. Woschitz wird auch weiterhin diese Arbeiten betreuen.

2 Relevante Untersuchungen im Rahmen des Projektes ISDR-18

2.1 GRAZIA

Betrachtet man lokale GPS Überwachungsnetze, so zeigt sich, dass atmosphärisch bedingte Restsystematiken die Stationskoordinaten in erster Näherung affin verformen. Sind die Koordinaten von drei unbewegten GPS Stationen (sog. Kalibrierstationen) im Messgebiet bekannt, so können diese Verformungen effektiv durch eine affine Transformation modelliert werden. Eine erste Version des entsprechenden Moduls wurde in der Software GRAZIA implementiert und mit einem Datensatz von 2001 erfolgreich getestet (ISDR 2003-18, ISDR 2003-19).

Eine grundlegende Zusammenstellung und Analyse der mathematischen und physikalischen Eigenschaften der affinen Verzerrungen von GPS Netzen bei Rutschhängen (ISDR 2005-3) hat gezeigt, dass nicht mehr als drei Punkte (zwei Kalibrierstationen und eine Referenzstation, 9 Affinparameter) sinnvoll sind, da sonst zu starke funktionale Abhängigkeiten zwischen den Parametern (Rotationen und Scherungen) des Affinmodells auftreten. Für linienhaft angelegte GPS Netze wie am Gradenbach wird durch die Troposphäre in Kombination mit der Hangneigung eine dominante höhenproportionale Verzerrung der Höhenkomponenten erzeugt. Für solche GPS Netze reichen also eine Kalibrierstation und eine Referenzstation aus, um diese Verzerrungseffekte zu erfassen. Die theoretischen Betrachtungen konnten mit der im Oktober 2004 gemessenen speziellen Netzkonfiguration mit einer Referenzstation und drei Kalibrierstationen und drei Monitoringstationen bestätigt werden. Details wurden in Schön (2006) und Schön (2007) publiziert.

Begleitend zu den Programmierarbeiten wurde ein umfangreiches Handbuch der Software GRAZIA erstellt. Allerdings wurde wegen des häufigen Personalwechsels auf der wissenschaftlichen Mitarbeiterstelle wurde die Erhaltung und Weiterentwicklung der GPS Software GRAZIA problematisch. Als Konsequenz wird die Software GRAZIA nicht mehr zur Auswertung benützt, sondern die institutseigene Software KF-Run (Dr. A. Wieser) verwendet.

2.2 Photogrammetrisches Modell

Photogrammetrische Auswertungen von Luftbildern eignen sich sehr gut, um die Deformationen über einen längeren Zeitraum zu analysieren. Es wurden daher die Bilder der Befliegungen aus 1962 und 1996 ausgewählt und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (Prof. Dr. K. Kraus), TU Wien, ausgewertet. In Abb. 2-1 sind die durchschnittlichen Bewegungsvektoren aus der photogrammetrischen Auswertungen (1962 und 1996) sowie die mittleren Bewegungsvektoren als Resultat der GPS Messungen vom August 1999 bis Oktober 2003 dargestellt.

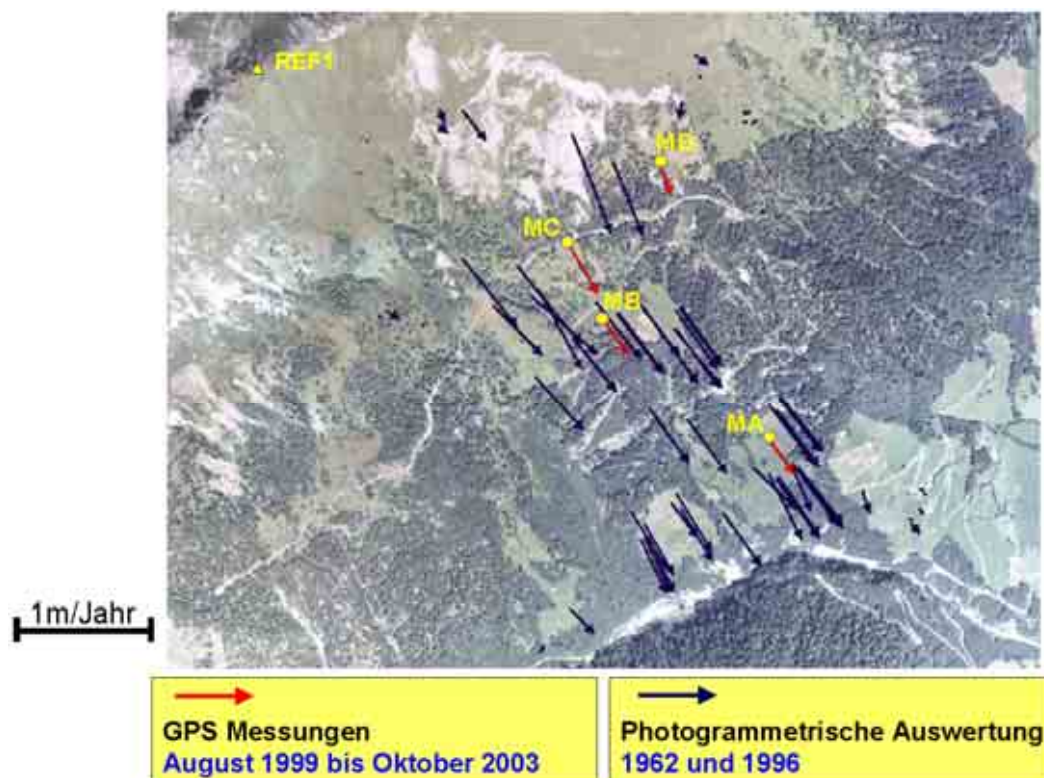


Abb. 2-1: Durchschnittliche Bewegungsvektoren, Photogrammetrie und GPS (Quelle Luftbild: NP Hohe Tauern)

Im Auftrag der Kärnter Landesregierung wurde im Jahr 2003 eine Aufnahme durchgeführt, die auch das Gebiet Gradenbach beinhaltet. So könnten die Bewegungsvektoren für die Zeitspanne 1996 bis 2003 photogrammetrisch bestimmt werden. Die GPS Messungen liegen im Zeitraum der photogrammetrischen Auswertungen von 1996 – 2003 vor, wodurch ein direkter Vergleich der beiden Messmethoden möglich wird. Die Besorgung der Originalfotos war äußerst schwierig und hat schlussendlich zur Aufgabe dieses Projektteils geführt.

2.3 Erweiterungen am CODMS im Mai 2004

Für die Messkampagne 2004 wurden umfangreiche Erweiterungen und Verbesserungen des Messequipments vorgenommen. Die bestehenden zwei Bitzschutzmodule wurden um zwei weitere ergänzt, mit denen nun ein gesicherter kontinuierlicher Betrieb von zwei Referenzstationen und zwei Roverstationen möglich ist. Um die Positionsstabilität der schweren Choke-Ring Antenne mit Radom unter Windlast und bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen zu garantieren, wurde die Stativverspannung weiter verbessert.

Wesentliche Veränderungen wurden in der Hardware und Peripherie des Feldrechners unternommen. Der alte, fehleranfällige Feldrechner wurde durch einen neuen leistungsstärkeren ersetzt. Darüber hinaus ist das Gesamtsystem (Rechner, externe Festplatte und Peripheriegeräte) durch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) abgeschirmt. Die USV erlaubt es, kurze Spannungsschwankungen und Ausfälle, die beispielsweise durch Gewitter bedingt sind, bis zu zwei Stunden zu überbrücken. Bei länger anhaltenden Ausfällen wird der Rechner kontrolliert heruntergefahren und nach Wiederherstellung der Spannung neu gestartet. So sind Beschädigungen des

Betriebssystems ausgeschlossen, und ein kontinuierlicher Betrieb ohne direkte Ansprechperson vor Ort ist möglich.

Das zur Übertragung der Status-SMS eingesetzte Handy wurde durch ein GSM Modem (Siemens MC35T) ersetzt. Die Status-SMS informiert den Benutzer über einen Ausfall einer Station und täglich über die Anzahl der aufgezeichneten Epochen.

Als weitere Neuerung wurde die Fernwartung des Feldrechners mit der Software PCAnywhere via 56k Modem (Festnetz) umgesetzt.

2.4 Low-Cost-GPS

Für die im Rahmen des Projektes ISDR-18 ausgewählten low-cost GPS Empfänger und Antennen wurden Testszenarien entwickelt, um deren Einsatzmöglichkeiten am Rutschhang zu beurteilen. Dabei wurden sowohl Experimente mit Nullbasislinien als auch mit kurzen Basislinien geplant. Bei der Durchführung wurde darauf geachtet, dass eine direkte Vergleichbarkeit in Bezug auf die Satellitenkonstellation – und damit auch in Bezug auf alle berechneten Größen – möglich ist. Dies kann durch die Verschiebung des Zeitfensters (um 3 min 56 s) zwischen Beobachtungen an darauf folgenden Tagen erreicht werden.

Bereits bei den ersten Datenanalysen wurde klar, dass die Empfängeruhr der ublox TIM-LP Sensoren Variationen im Millisekundenbereich aufweist. Dadurch war eine direkte Verwendung der Phasenbeobachtungen für die Doppeldifferenzbildung nicht möglich. Dieses Problem wurde durch die Entwicklung einer eigenen MATLAB-Auswertesoftware behoben. Es wurden mehrere Auswerteprogramme entwickelt, die die Grundlage für die im Projekt ISDR-21 angestellten Untersuchungen bildeten.

2.5 Sensoren für die geotechnische Aufnahme

Für die effiziente geotechnische Feldaufnahme wurden neue Verfahren entwickelt. Die Kernelemente des neuen Systems sind „low-cost“ GPS Empfänger für die Positionierung und ein neuer (digitaler) Sensor als geologischer Kompass. Ein Versuchsmuster wurde gebaut. Es wurden detaillierte Untersuchungen und Tests durchgeführt, um die Machbarkeit des Systems zu zeigen. Der Abschluss dieser Arbeiten wird in Kapitel 6.3 zusammengefasst.

2.6 Fernerkundung

Im Bereich des periadriatischen Lineamentes (Sprenger, 1996), für den Bereich des unteren Mölltales (Kurz, 1993; Kurz, 1997) und im Bereich des Koralmtunnels (Peresson und Decker, 1998) liegen detaillierte strukturgeologische und tektonische Arbeiten (für größere Gebiete) vor. Für den Bereich des oberen Mölltales, im speziellen für das Gebiet der Hangrutschung Gradenbach fehlten zu Beginn der Arbeiten 2001 fundierte tektonische Auswertungen. Ziel dieses Projektteiles war es, das tektonische System im Bereich der Massenbewegung mit unterschiedlichen Methoden zu erfassen und zu analysieren, um einen möglichen Einfluss (junger) Störungszonen auf die Aktivierung der Hangrutschung beurteilen zu können.

Die Grenzen des Kartierungsgebietes werden aufgrund geologischer und tektonischer Überlegungen wesentlich größer als die Begrenzung der Hangrutschung gewählt. Diese Arbeiten werden durch strukturgeologische Geländekartierungen ergänzt. Das wesentliche Ziel dieser strukturgeologischen Untersuchungen ist die Verifizierung der tektonischen Relevanz von Lineamenten. Zusätzlich werden Daten über die Lage, Orientierung und Häufigkeit von tektonischen Strukturen, die geotechnisch und hydrogeologisch relevante

Trennflächen darstellen, gewonnen. Die Auswertungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research, Prof. Schardt, durchgeführt.

Auf der Grundlage der in der Literatur dokumentierten Deformationsrichtungen wurde ein Modell der relativen Bewegungsrichtungen für den Ostalpenraum entwickelt. Es werden zwei Modellkategorien unterschieden: Seitenverschiebungen und Auf- bzw. Abschiebungen. Die Umsetzung mit einer Extraktion der Lineamente und der Anwendung des Seitenverschiebungs-Deformationsmodells im Bereich des Rutschhanges ist in Abb. 2-2 dargestellt. Detaillierte Ergebnisse sind in ISDR 2005/4 dokumentiert.

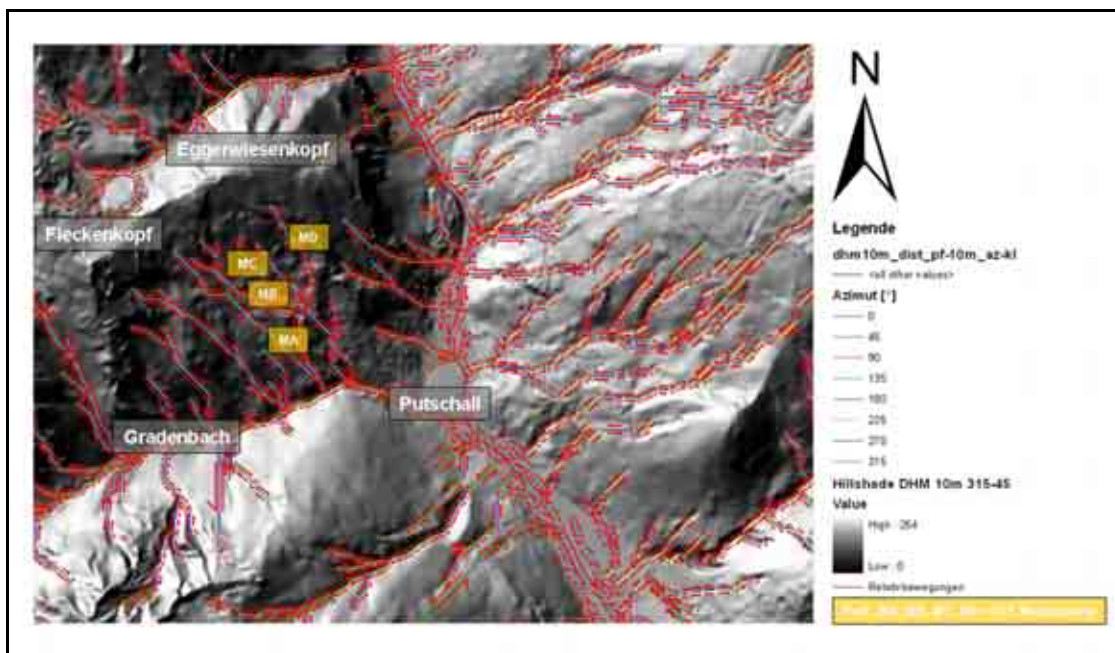


Abb. 2-2: Detailausschnitt der Umsetzung des Seitenverschiebungs - Deformationsmodells im Bereich des Rutschhanges

2.7 Geotechnische Aufnahme

Die geologische Detailkartierung dokumentiert die lithologische und strukturelle Situation im Bereich der Hangrutschung Gradenbach. Die Erhebung der Lithologie gibt Aufschluss über den geologischen Aufbau sowie über den Wechsel von Gesteinsserien. Westlich der Rutschung stehen Paragneise und Granatglimmerschiefer an (Altkristallin), östlich des aktiven Rutschgebietes Kalkglimmerschiefer, Marmore und Gneise (Zentralgneis). Im Bereich der Massenbewegung selbst dominieren Schwarzphyllite und Phyllite (Matreier Zone, Abb. 2-3). Die wesentlichen Ziele der strukturellen Untersuchungen sind die Erhebung von Störungsflächen mit Orientierung und Versatzrichtung, Scherbändern, Harnischen, offenen Spalten, Klüften und Falten. Das Untersuchungsgebiet beschränkt sich dabei nicht nur auf den eigentlichen Bereich der aktiven Rutschungsfläche, sondern beinhaltet auch den stabilen Rahmen rund um die Hangrutschung. Aufbauend auf die geologische Kartierung wird in weiterer Folge zusammen mit den restlichen Messdaten die geotechnische Modellierung des Bewegungsmechanismus durchgeführt.

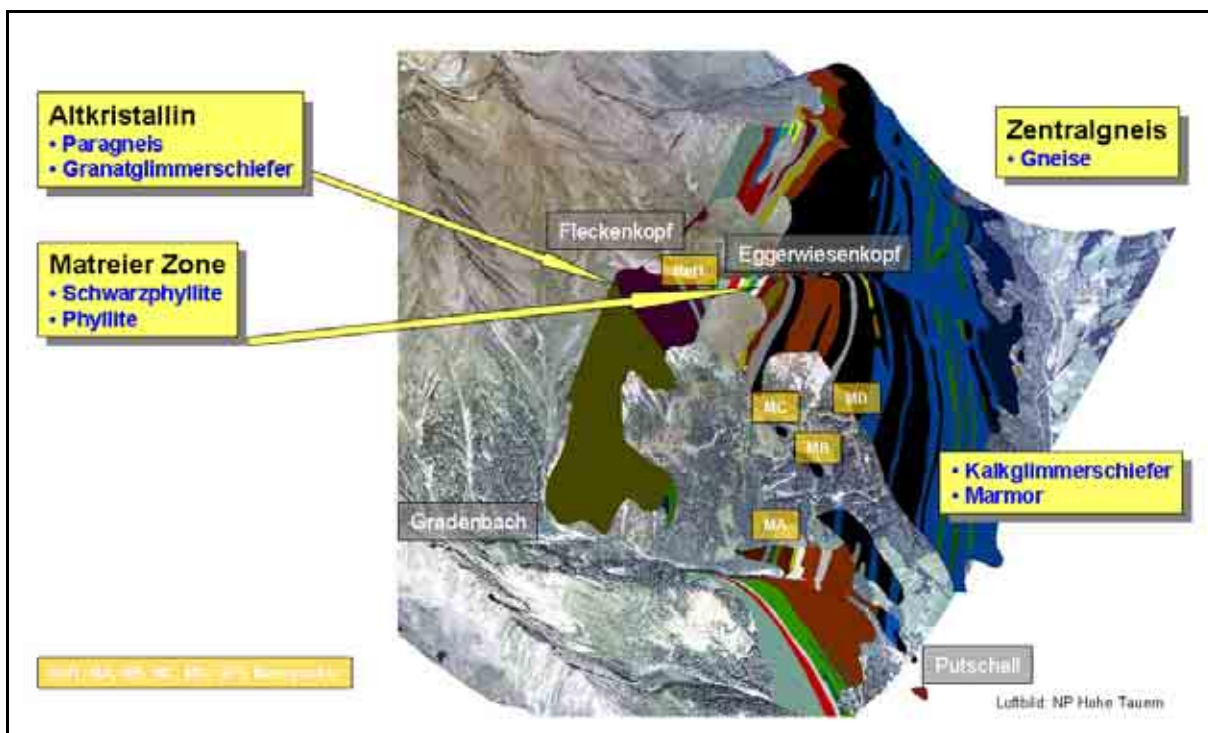


Abb. 2-3: Lithologischer Aufbau (ohne Quartär) im Bereich der Rutschung Gradenbach, Matreier Zone im Bereich der Massenbewegung mit GPS Messpunkten

3 Kontinuierliches GPS Monitoring

3.1 Messperiode Sommer 2004

Im Rahmen des Vorgängerprojektes ISDR-18 wurden am Rutschhang Gradenbach 6 GPS-Punkte vermarktet. Davon befinden sich 4 in der aktiven Zone des Rutschhanges (MA, MB, MC und MD) und 2 fungieren als Referenzstationen (R1, R2) (Punktübersicht, siehe Abb. 3-1).

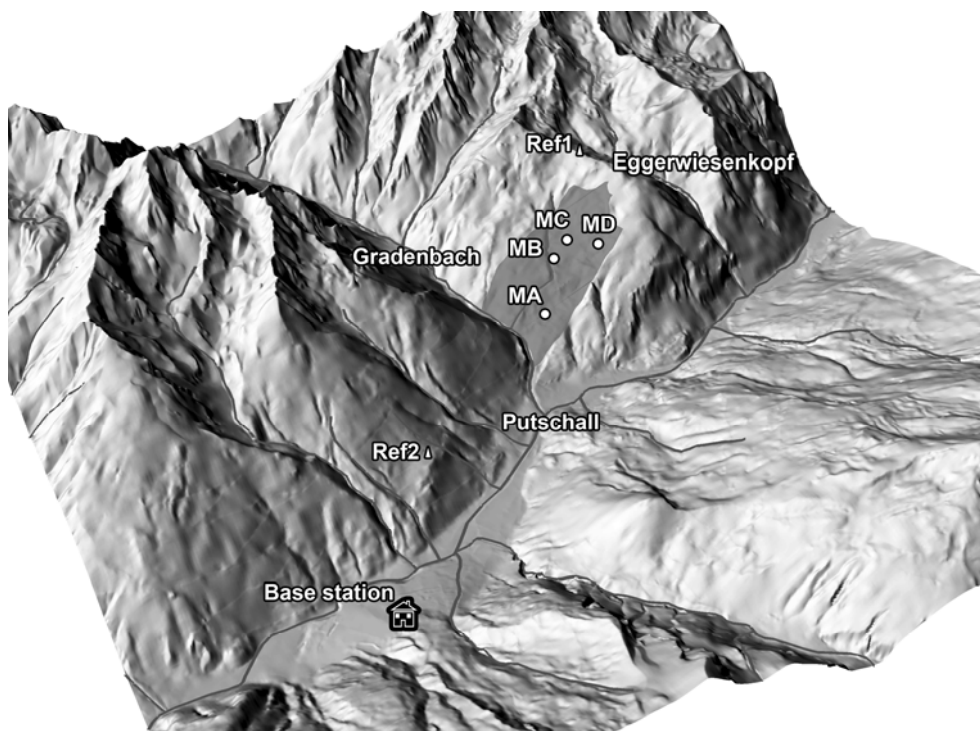


Abb. 3-1: Stationsübersicht

Im Mai 2004 wurde die erste 48h lange Messkampagne des Projektes ISDR-21 durchgeführt. In der Anordnung der GPS-Empfänger und Antennen hat sich die Kampagne an den vorangegangenen Messungen orientiert.

Die Kampagne wurde mit der Berner Software Vers. 4.2 unter Verwendung eines Cut-off-Winkels von 10° ausgewertet. Dabei wurde je eine Sessionlösung bestimmt, die dann zu einer gemeinsamen Lösung kombiniert wurde. Im Folgenden werden die wichtigsten Einstellungen der Parameterschätzung zusammengestellt, für Detailinformationen wird auf die entsprechende Aktennotiz verwiesen.

Da nicht im gesamten Netz Zweifrequenzdaten vorliegen, kann die ionosphärenfreie Linearkombination L3 nicht zur Gesamtauswertung verwendet werden. Um ionosphärische Effekte zu eliminieren oder zumindest zu reduzieren, wird ein lokales Korrekturmodell erster Ordnung angebracht. Dieses wurde pro Session in einem Vorverarbeitungsschritt aus den Zweifrequenzdaten (Station R1, R2, MC, MD) geschätzt, vgl. Hugentobler et al. (2001 S. 214). Die zeitliche Auflösung beträgt 3h.

Die Parameterschätzung wird in zwei Stufen durchgeführt. In der ersten Stufe werden die Integer-Werte der Ambiguitäten bestimmt, die dann in der zweiten Stufe als bekannt eingeführt werden. Zur Lösung der Ambiguitäten wird die SIGMA-Strategie verwendet, und die

Ambiguities für L1 und L2 werden in einem Lauf getrennt gelöst. Die Beobachtungen werden elevationsabhängig gewichtet.

Die Einflüsse der troposphärisch bedingten Laufzeitverzögerung werden durch das Saastamoinen Modell (mit der $\cos z$ Mappingfunktion) a priori berücksichtigt. Um Resteffekte aufzufangen, werden zusätzlich Troposphärenparameter für jeweils zwei Stunden geschätzt. Als Mapping Funktion wird die Niell Wet verwendet. Aufgrund der geringen Netzausdehnung (Durchmesser ca. 5 km) können nicht für jede Station Troposphärenparameter eingeführt werden, da diese nicht alle gleichzeitig schätzbar sind. Für den Referenzpunkt R1 werden deshalb keine Troposphärenparameter angesetzt.

Abb. 3-2 zeigt eine Übersicht über die Höhenbewegungen in [m] seit Beginn der Messungen 1999. In den Jahren 2000 und 2001 befand sich der Hang in einer beschleunigten Phase, welche im Oktober 2001 in einen langsameren Trend übergegangen ist. Die ausgewerteten kontinuierlichen Messungen wurden als blaue Vektoren dargestellt.

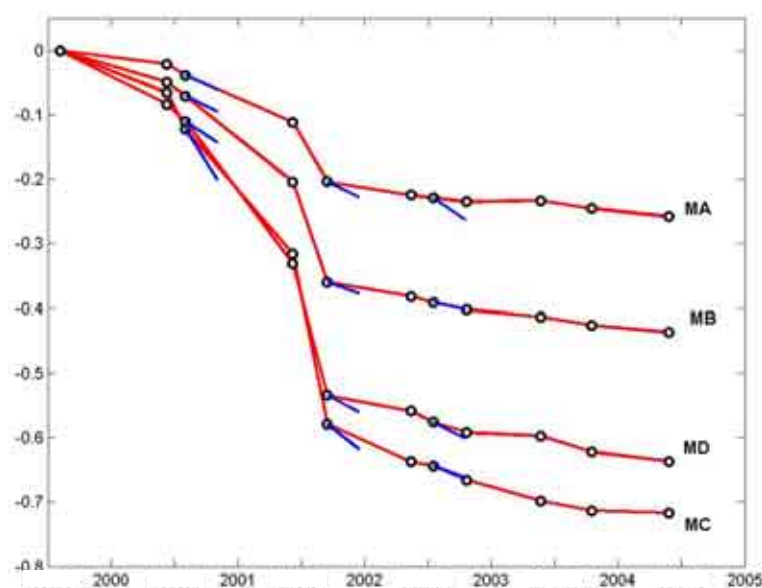


Abb. 3-2: Übersicht über die Höhenbewegungen in [m] seit Beginn der Messungen im Jahr 1999. Auswertung der kontinuierlichen Messungen sind als blaue Vektoren dargestellt.

Beim Messeinsatz im August 2004 wurden terrestrische Nachmessungen durchgeführt. Der Polygonzug wurde erneut vermessen (siehe Kapitel 5.2). Daher wurde der schon einmal bestimmte Anfangspunkt des Zuges MF erneut für 12 Stunden mit einem GPS Empfänger besetzt, sowie ein neuer Punkt MG geschaffen, der den Abschluss des Polygonzuges bilden soll (ISDR 2004-7). An beiden Stationen, sowie an den Referenzstationen wurden Ashtech Z12 Empfänger eingesetzt, an den Stationen MA und MD G12 Einfrequenzempfänger. Weiters ist das Punktfeld um den Punkt MD neu vermessen worden (siehe Kapitel 5.2).

Alternativ zu den terrestrischen Messungen wurde auch versucht, eine Volumenbestimmung des Rutschhanges mittels RTK Messungen durchzuführen. Zu diesem Zweck wurden zwei horizontale Profile (am Grat und in der Höhe des Polygonzuges) sowie zwei vertikale Profile durch RTK Messungen bestimmt. Die Auswertung der Daten wurde im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut durchgeführt (Trefalt, 2006)

Im Oktober 2004 wurde eine Multireferenzstationsmessung für spezielle Untersuchungen durchgeführt, in der alle vier Referenzpunkte (R1, R2, R3, R4) gleichzeitig besetzt wurden. Zusätzlich sind die Monitorpunkte MA, MC, MD beobachtet worden. In einer zweiten Session

wurden die Punkte MA, MB, MC, MD sowie die Referenzpunkte R1, R2 und R4 besetzt (siehe ISDR 2005-3). Die Ergebnisse dieser Messreihe wurden in Schön (2007) publiziert.

3.2 Messperiode Sommer 2005

Der Aufbau des CODMS wurde wegen der schlechten Wetterverhältnisse erst Anfang Juni durchgeführt. In diesem Jahr wurden wieder die zwei Referenzstationen R1, R2 und die Monitorstationen MA und MD für den kontinuierlichen Betrieb aufgebaut, die Stationen MB und MC wurden für 48h besetzt.

Die an den Stationen verbliebenen Geräte haben den Winter ohne Schaden überstanden. Die Temperaturmessungen in der Blitzschutzbox haben als tiefste Temperatur -10°C ergeben. Laut Spezifikation gewährleisten die GPS-Geräte einen Betrieb kontinuierlichen bis -25°C . Demnach sollten die Empfänger die Winterperiode ohne Probleme überstehen. Die Ladezyklen des Solarpanels ergaben, dass die Solaranlage des ganzen Winter hindurch funktioniert hat und die Batterie bei genügend Sonnenstrahlung geladen wurde. Um jedoch die Stromversorgung der Geräte zu garantieren, müssten aufgrund der geringeren Sonnenstrahlung im Winter statt der derzeit eingesetzten zwei, noch zusätzliche Solarpaneele aufgestellt werden. Durch diesen Test konnte gezeigt werden, dass das verwendete Equipment, mit kleinen Modifikationen, durchaus auch über die Wintermonate betrieben werden könnte (ISDR 2005-5).

Für die Auswertungen der GPS-Daten wurde im Oktober 2004 die neueste Version der GPS-Auswertesoftware Bernese (5.0) gekauft und im Zuge der Umstellung des Programms wurde auch die Auswertestrategie geändert und der Ablauf der Auswertungen modifiziert. Herr DI R. Klostius hat am Ausbildungskurs für die Berner Software teilgenommen.

Um konsistente Ergebnisse zu erhalten, wurden alle 48 h Sessions von August 1999 bis Mai 2004 neu ausgewertet, und die folgenden Kampagnen bis Juni 2005 auf dieselbe Weise ausgewertet. In allen Kampagnen werden die Stationen R1, R2, MA, MB, MC, MD prozessiert, wobei die Station R2 als Referenzstation diente (ISDR 2004/5, ISDR 2004/6, ISDR 2005/7).

Die letzte Messkampagne des Jahres und danach der Abbau der Stationen wurde vom 13.- bis 14. Dezember 2005 durchgeführt. Aufgrund der Schneemenge, und den dadurch sehr erschwerten Aufstieg, wurde darauf verzichtet die Station R1 vollständig abzubauen. Details sind dem Bericht (ISDR 2005/16) zu entnehmen.

Die Ergebnisplots aller Kampagnen wurden in Kapitel 3.6 zusammengefasst.

3.3 Messperiode Sommer 2006

Die 2005 an der Station R1 verbliebenen Batterien, und das restliche Equipment haben den Winter sehr gut überstanden. Auch die Funkantenne, die Solarpaneele, die Blitzschutzbox und der Solarregler waren unbeschadet. Details sind dem Bericht ISDR 2006/1 zu entnehmen.

Bei der Inbetriebnahme der Station MA ist ein Problem aufgetreten, welches nach längerer Suche auf einen Defekt bei einem der Funkmodems zurückzuführen war. Die Funkmodems wurden durch die Reservefunkmodems getauscht.

Für weitere Untersuchungen der GPS-Messungen am Rutschhang Gradenbach wurde die Abschattungsmaße an der Station R2 mit einem Theodoliten eingemessen. Wie schon bei der Messung der Abschattungsmaße an der Station MB im Winter 2005 wurde zwischen den Abschattungen durch Wald und Berg unterschieden. Mit Hilfe dieser Messungen werden

Beugungseffekte der GPS-Signale untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Kapitel 6.1 zusammengefasst.

Auf Grund der anhaltenden Schlechtwetterperiode im August 2006 kam es zu Schwierigkeiten mit der Stromversorgung an allen Stationen. Die Solarpanels waren nicht mehr in der Lage, die Akkus mit genügend Ladestrom zu versorgen, um einen kontinuierlichen Betrieb zu ermöglichen. Die Folge waren große Datenlücken in den kontinuierlichen Messungen.

Weitere Probleme wurden durch die Übertragung der Messdaten via Funk in die Basisstation verursacht. Vor allem in den Schlechtwetterperioden konnte eine Zunahme von fehlerhaft oder nicht vollständig übertragenen Epochen beobachtet werden. Deshalb wurde während der Messkampagne im Zuge des Abbaus (November 2006) mit Ausnahme der Station R1 auf die Funkverbindung verzichtet und die Daten intern aufgezeichnet.

Die Ergebnisplots aller Kampagnen wurden in Kapitel 3.6 zusammengefasst.

3.4 Messperiode Sommer 2007

Zusätzlich zur Funkverbindung wurden für alle Permanentstation (MA, MD, R1 und R2) CompactFlash-Datalogger angekauft und die Daten parallel zur Funkübertragung auch auf CF-Speichermedien aufgezeichnet.

Vom 16. Juli bis 19. Juli 2007 wurde zeitgleich mit der ersten SOFO-Dynamic Messung (siehe Kapitel 4.3.6) und einer Netzmessung in unmittelbarer Umgebung der Strain-Rosette (siehe Kapitel 5.4) die zweite Kampagne 2007 durchgeführt. Auf die Besetzung der Station MC wurde zu Gunsten des Punktes ZR verzichtet. Die Vermarktung des Punktes ZR erfolgte im Zuge des SOFO Einbaus im Mai 2007 oberflächennah im Zentrum der Rosette. Ziel ist es mit diesem Monitoringpunkt die Bewegung der gesamten Strain-Rosette durch die Rutschung zu überwachen.

Vom 1. Oktober bis 17. Oktober wurde ein 2-wöchiger SOFO Messeinsatz (siehe Kapitel 4.3.6) und gleichzeitig eine GPS Kampagne am Rutschhang Gradenbach durchgeführt. Es wurden für den gesamten Zeitraum zusätzlich zu den kontinuierlich überwachten Monitoringstationen MA, MD, R1 und R2 die Stationen MB und MC, sowie der im Juli 2007 neu vermarktete Punkt ZR besetzt. Im Anschluss an den 2-wöchigen Messeinsatz wurde das CODMS über die Wintermonate abgebaut (ISDR 2007/17). Die Ergebnisplots aller Kampagnen wurden in Kapitel 3.6 zusammengefasst.

3.4.1 Empfängerdefekt an der Station R2 und Folgen für die Auswertestrategie

Am 03.10.2007, im Zuge der 2-wöchigen SOFO- und GPS-Messkampagne am Rutschhang Gradenbach, trat die Vermutung auf, dass die Referenzstation R2 weniger Satelliten aufzeichnet, als tatsächlich verfügbar sind. Eine Untersuchung der aufgezeichneten Daten bestätigte diese Vermutung. Die CN/0 der aufgezeichneten Daten war um etwa 20 dB Hz geringer als bei vergleichbaren Empfängern. Deshalb konnte der Empfänger die Satelliten erst ein paar Stunden nach dem Aufgehen verfolgen und hat sie bereits vor dem Untergehen wieder verloren (vgl. Abb. 3-3 a) und b)).

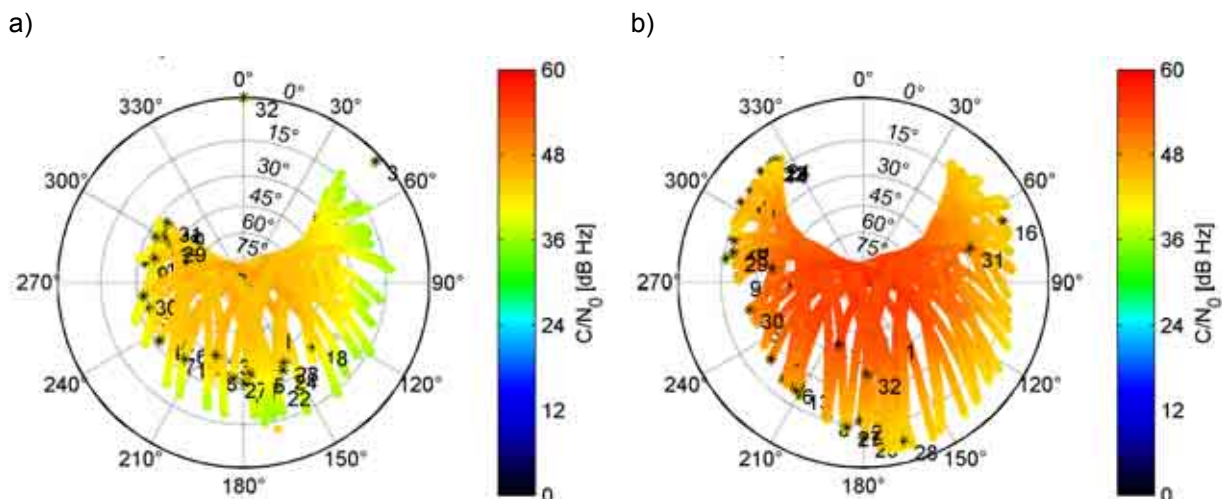


Abb. 3-3: Skyplot und CN/0 der Station R2 am a) 03.10.2007 (zwei Tage vor dem Empfängertausch) und b) 06.10.2007 (ein Tag nach dem Empfängertausch)

Eine Untersuchung aller vorhandenen Daten dieses Empfängers der Jahre 2006 und 2007, hat ergeben, dass die CN/0 Werte des Empfängers bereits seit August 2006 schwächer und schwächer geworden sind (ISDR 2007/16). Vermutlich handelt es sich dabei um ein defektes Bauteil in der Empfängerelektronik. Da der defekte Empfänger an der Station R2 eingesetzt wurde und diese als Referenzstation für die Basislinienbildung bei der Auswertung der GPS Kampagnen eingesetzt wurde, wurden sämtliche Kampagnen seit November 2006 neu ausgewertet und dabei die Station R1 als Referenzstation verwendet.

3.4.2 Datenverfügbarkeit Funk/Datalogger für das Jahr 2007

Das CODMS wurde in den Sommermonaten 2007 permanent auf 2 Referenzstationen (R1 und R2), sowie auf 2 Monitorstationen (MA und MD) betrieben. Die Datenaufzeichnung erfolgt durch Funkübertragung in die Basisstation und durch Aufzeichnung mittels Datalogger. Die Gründe dafür waren:

- Auffällig viele (kurze) Datenlücken in der Funkübertragung, teilweise auch korreliert mit den vorherrschenden Witterungsbedingungen (mehr Ausfälle bei Schlechtwetter/Nebel)
- Ausfälle der Basisstation waren nicht auszuschließen und auf Grund der langen Anreise zum Projektgebiet ist eine redundante Speicherung sehr von Vorteil: 2007 kam es durch einen Kurzschluss in einem Verteiler zu einem Ausfall der Basisstation über mehrere Wochen, durch die Datalogger gab es in diesem Zeitraum keine Datenverluste (Redundanz).
- Da die Datalogger über serielle Schnittstellen verfügen die unabhängig vom Gerät sind, sind sie mit einer Vielzahl von Geräten einsetzbar und eine Verwendung mit Low-Cost Empfängern in einer späteren Phase des Projektes ist möglich.

Dies lässt erstmals eine genaue Beurteilung der tatsächlich verloren gegangenen Daten durch die Funkverbindung im Vergleich zu den Dataloggern zu. Eine Analyse dazu wurde in ISDR 2008/7 durchgeführt und wird hier zusammengefasst.

Behandelt wurden die Daten der Permanentstationen MA, MD und R1, jene der Station R2 wurden nicht behandelt, da es gesonderte Berichte über den Empfängerdefekt 2007 an der Station R2 gibt (ISDR 2007/13, ISDR 2007/14 und ISDR 2007/16).

Mit dem Matlab Script „AnalyzeSatAvailability“ wurden die RINEX-Dateien aller Stationen für das Jahr 2007 nach Lücken untersucht. Dafür wurden die jeweils gültigen CODE-Orbits und die im Oktober 2007 gemessenen Abschattungsmasken (siehe ISDR 2007/17) verwendet um die theoretisch mögliche Anzahl an Beobachtungen zu ermitteln.

Zusammenfassend können aus der Untersuchung folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die redundante Speicherung der Daten auf den Dataloggern ist eine sinnvolle Investition, da längere Ausfälle der Basisstation oder Probleme mit der Funkverbindung überbrückt werden können.
- Es kommt sehr häufig an den Stationen MA und MD zu (kurzen) Datenlücken. Verglichen mit der Gesamtanzahl an Beobachtungen pro Tag (28800 Epochen), betragen die Lücken selten mehr als 15% der theoretisch möglichen Anzahl an Beobachtungen.
- Die Funkverbindung Basis – R1 arbeitet am Besten, jene zur Station MD am schlechtesten, obwohl direkte Sichtverbindung besteht. Die Funkverbindung zur Station MA arbeitet etwas besser als jene zur Station MD, die Anzahl an Lücken ist trotzdem sehr hoch.

3.5 Messperiode Sommer 2008

Vom 19. Mai bis 24. Mai 2008 wurden im Rahmen einer Gradenbach Kampagne die 4 Permanentstationen am Rutschhang (R1, R2, MA und MD) erneut aufgebaut. Die Stationen MB, MC und ZR wurden in diesem Zeitraum nicht besetzt, da eine weitere Kampagne Anfang Juni 2008 geplant war im Zuge derer auch das terrestrische Präzisionsnetz im Bereich der Strain-Rosette neu vermessen werden soll. Für die Messungen der vier aufgebauten Stationen wurde eine Bernese-Lösung gerechnet.

Aufgrund des defekten Z-FX Empfängers (#UX0161, bisher auf R2, siehe ISDR 2007/13, ISDR 2007/14 und ISDR 1007/16) war eine Umverteilung der Empfänger notwendig (ISDR 2008/3).

Im Rahmen der Präzisionsnetzmessung im Bereich der Strain-Rosette Gradenbach wurde vom 10. Juni bis 12. Juni 2008 eine 48h GPS Messkampagne durchgeführt. Dafür wurden zusätzlich zu den bereits seit Mai 2008 messenden Permanentstationen R1, R2, MA und MD (siehe ISDR 2008/3) die Stationen MB, MC und ZR aufgebaut und für den Zeitraum der Kampagne besetzt (ISDR 2008/4).

3.6 Ergebnisse aller ausgewerteten GPS-Kampagnen

Die Abbildungen in diesem Kapitel befassen sich mit den Ergebnissen aller bisher durchgeführten GPS-Kampagnen. Abb. 3-4 zeigt die horizontale Komponente der Verschiebevektoren aller Stationen überlagert mit einem Orthophoto. Die aktive des Zone des Rutschhangs ist hervorgehoben. Die Punkte bewegen sich alle in Richtung der lokalen Falllinie des Hanges. Den längsten Bewegungsvektor zeigt die Station MC. Es handelt sich dabei jedoch um einen Punkt direkt am Wegrand, die Wahrscheinlichkeit ist sehr hoch, dass die eigentliche Hangbewegung dort auch von lokalen Setzungen und Verformungen des Weges überlagert wird. Die eigentliche Hangbewegung ist sehr wahrscheinlich geringer als dargestellt.

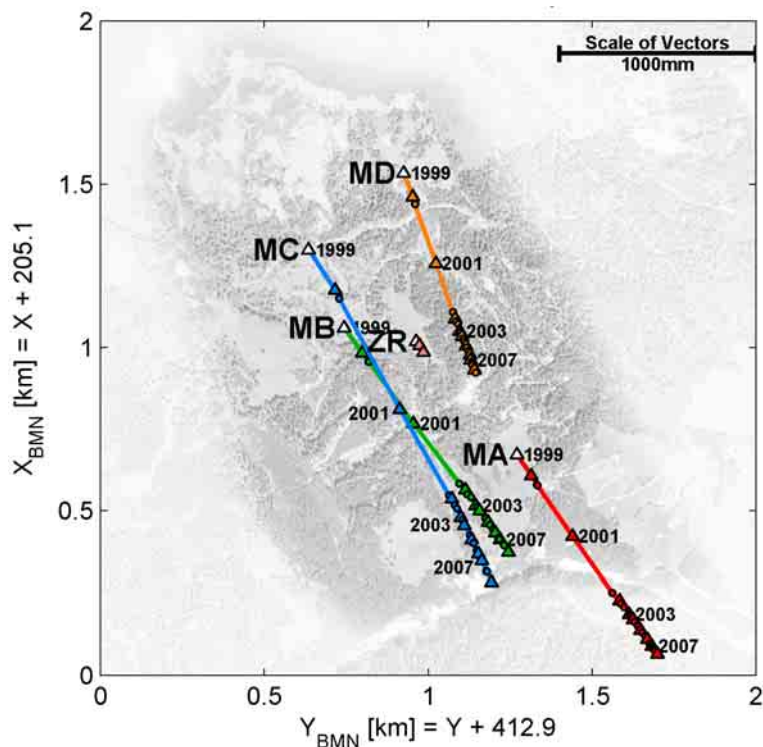


Abb. 3-4: Horizontale Komponente der Verschiebevektoren überlagert mit Orthophoto

Die Abb. 3-5 zeigt die Höhenbewegungen und Abb. 3-6 die Lagebewegungen der einzelnen Punkte von 1999 bis 2008. Der Hang behält seine seit Ende 2001 anhaltende langsamere Bewegung bei.

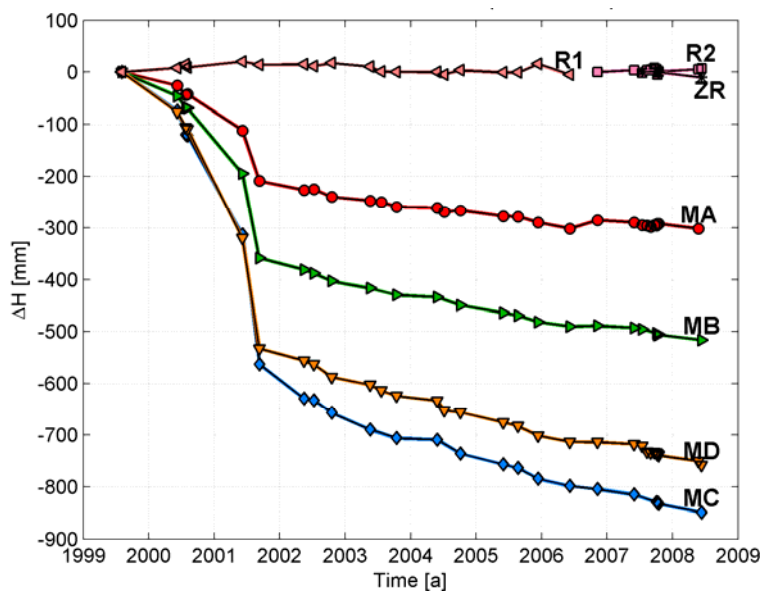


Abb. 3-5: Vertikale Komponente der Verschiebevektoren gegen die Zeit geplottet

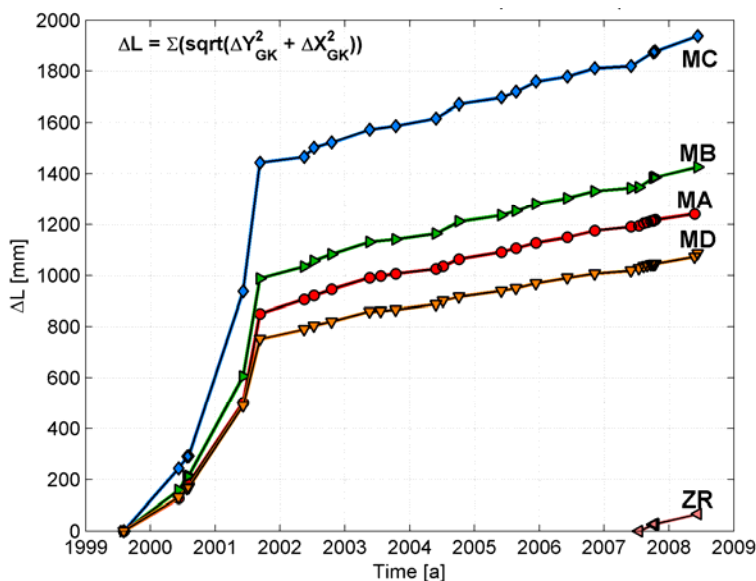


Abb. 3-6: Horizontale Komponente der Verschiebevektoren gegen die Zeit geplottet

In Abb. 3-7 wurde die wahre Länge des Verschiebevektors in der Lage (Abwicklung des Vektors, nicht Radiusvektor!) gegenüber der wahren Höhenänderung geplottet. Erkennbar ist das Verhältnis zwischen Lageänderung und Höhenänderung, welches langfristig, der Geländeneigung an den einzelnen Stationen entspricht, da die rutschenden Massen zwangsweise die Geländeneigung definieren (vgl. auch Abb. 6-12 und Abb. 6-13 in Kapitel 6.8.3).

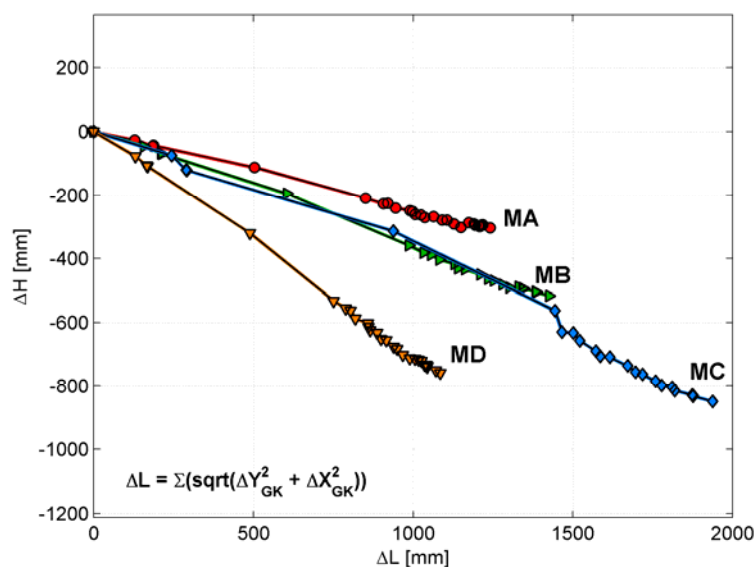


Abb. 3-7: Vertikale und horizontale Komponente der Verschiebevektoren gegeneinander geplottet

Die Tabellen Tab. 3 bis Tab. 6 (siehe Anhang) enthalten die Bewegungsraten der Stationen MA, MB, MC und MD in Lage und Höhe in cm/Jahr. Die Vorgehensweise der Berechnung ist eine lineare Extrapolation der Einzelkampagnen zum jeweiligen Anfang und Ende des Jahres.

3.7 Untersuchungen der kontinuierlichen Daten

Mit der von Dr. A. Wieser entwickelten Software KF_Run wurde eine Untersuchung zur Klärung folgender Fragestellungen durchgeführt:

- Bewegen sich die Monitorpunkte gleichförmig oder ruckartig?
- Bewegen sich die Monitorpunkte synchron oder in einer bestimmten zeitlichen Abfolge?

Aufgrund der besonders hohen Bewegungsraten wurde für die ersten Analyseversuche der der 6. und 7. Juni 2001 ausgewählt (siehe Abb. 3-8 a) und b)), obwohl bei dieser Kampagne nur ca. 45 Stunden Daten aufgezeichnet worden waren. Zur kinematischen Auswertung wurden nur die L1 Trägerphasendaten verwendet; die Koordinaten der Monitorpunkte wurden als Random-Walk-Prozesse ($7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) angesetzt, und die Troposphäre wurde durch Schätzen einer höhenabhängigen Korrektur modelliert.

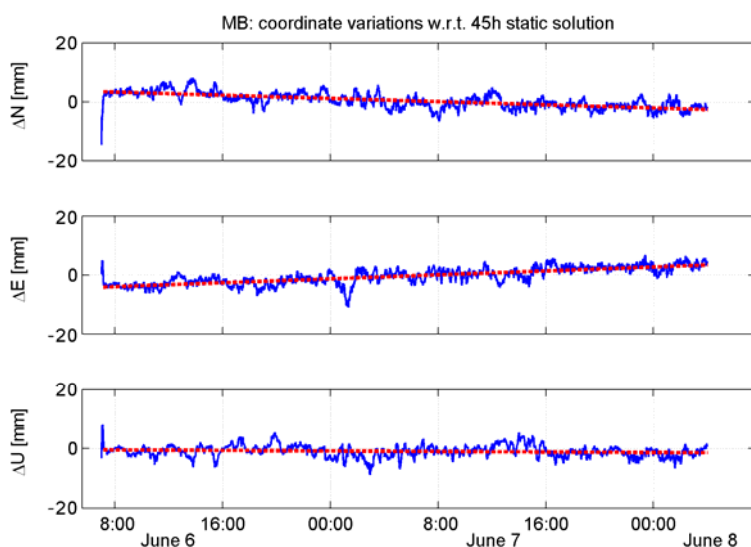


Abb. 3-8: Variation der geschätzten Koordinaten von MB (L1-Netzlösung mit 15 Sekunden Auflösung) und Regressionsgeraden durch gesamte Zeitreihen.

Abb. 3-8 zeigt die Variation der geschätzten Koordinaten eines Monitorpunktes (MB) gegenüber dem bereits früher berechneten Ergebnis der statischen Auswertung dieser Kampagne mittels Bernese GPS Software, (siehe ISDR 2004/6). Das Filter benötigt anfänglich etwa 10 Minuten Daten um einzuschwingen (hauptsächlich wegen der Troposphärenschätzung). Anschließend zeigen insbesondere die Nord- und Ostzeitreihen einen klaren Trend. Eine lineare Regression (strichlierte, rote Linien in Abb. 12) ergibt Raten von -3.2 mm/d , $+4.0 \text{ mm/d}$ und -0.5 mm/d für Nord, Ost und Höhe; alle drei Werte sind statistisch signifikant. Ähnliche Raten haben sich auch für die anderen Monitorpunkte ergeben.

Mit Hilfe der Regressionsgeraden können Azimut der Bewegung, horizontale und vertikale Verschiebung während der 45h dauernden Session mit hoher Präzision berechnet werden. Entsprechende Werte konnten für denselben Zeitraum auch aus den jeweiligen Resultaten der statischen Auswertung der Kampagnen "Juni 2001" und "September 2001" gewonnen werden, siehe Abb. 3-9. Die Übereinstimmung ist frappant, wenn man die Tatsache berücksichtigt, dass die Bewegungsrichtung einmal aus Verschiebungen von ca. 3–15 mm über 2 Tage bestimmt sind (blaue Linien) und einmal aus Verschiebungen von einigen dm über 3 Monate (rote Linien).

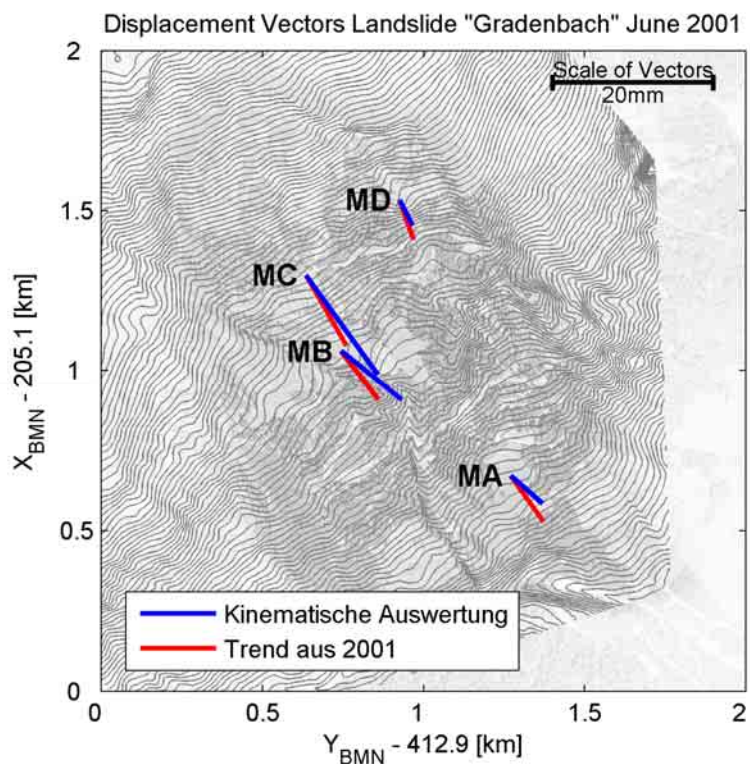


Abb. 3-9: Verschiebungsvektoren der Monitorpunkte während der 45-Stunden Kampagne "Juni 2001"; Resultat aus linearer Regression der kinematisch bestimmten Koordinaten (blau), aufgrund der durchschnittlichen Bewegung von Juni bis September 2001 erwartete Verschiebung (rot).

Offensichtlich entsprachen Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit vom 6.–8.6.2001 weitgehend der durchschnittlichen Bewegung während des gesamten Sommers. Darüber hinaus zeigt diese Analyse aber auch, dass schon Bewegungsraten von wenigen Millimetern pro Tag mit GPS nachweisbar sind.

Die Abweichungen der kinematisch bestimmten Koordinaten von den Regressionsgeraden (siehe Abb. 3-8) betragen im Mittel (RMS) 2 mm, bei einer zeitlichen Auflösung von 15 Sekunden (Daten Aufzeichnungsintervall). Eine Analyse und Berücksichtigung der Korrelation der Koordinaten ist noch nicht erfolgt. Die Zeitreihe zeigt aber klar, dass die Abweichungen korreliert sind (sie sind nicht zufällig verteilt). Ein Teil der erkennbaren Systematik wird auf kaum behebbare Restfehler im GPS-Auswertemodell zurückzuführen sein (hauptsächlich Mehrwegeeffekte und atmosphärische Ausbreitungseffekte). Für den Fall, dass die Bewegung nicht gleichförmig erfolgt, ist in dieser Systematik aber auch das Signal enthalten, mit dessen Hilfe die zeitliche und räumliche Abfolge der Bewegung studiert werden kann.

Tatsächlich zeigt ein näherer Blick auf die Zeitreihen in Abb. 3-8 dass die Bewegung vermutlich nicht gleichförmig erfolgt. Besonders die Zeitreihe der Ostkoordinaten zeigt zwei deutliche "Sprünge" im zeitlichen Verhalten (s. Abb. 3-10, "A" und "B"). Es fällt auch auf, dass dem Sprung "A" eine markante Störung der Ostkomponente vorausgeht. Ob diese Störung auf Restfehler der GPS-Auswertung oder auf tatsächliche Bewegung des Punktes zurückzuführen ist, konnte bisher noch nicht geklärt werden. Allerdings finden sich ähnliche Störungen auch in den Zeitreihen der Monitorpunkte MA und MC, und sprunghafte Änderungen des Bewegungsverhaltens sind visuell in den Zeitreihen aller Monitorpunkte nahezu zeitgleich zu erkennen.

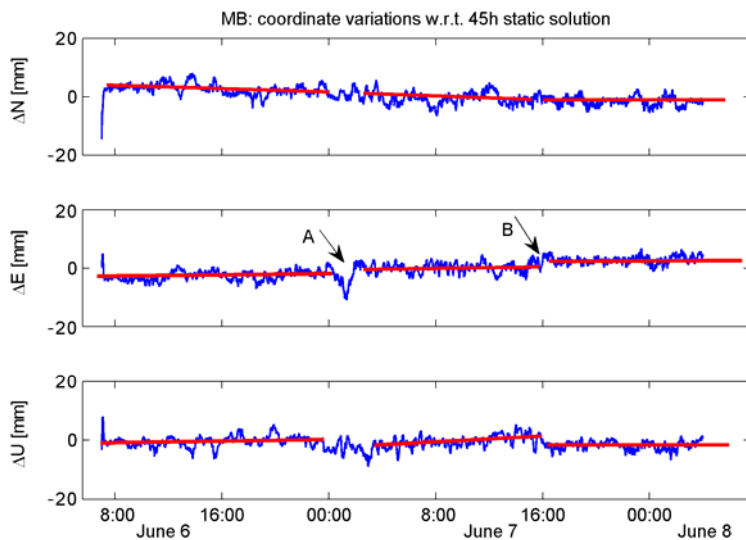


Abb. 3-10: Variation der geschätzten Koordinaten von MB (L1-Netzlösung mit 15 Sekunden Auflösung) und visuell erkennbare Trends mit sprunghafter Änderung.

Diese vorläufigen Resultate deuten darauf hin, dass sich die Punkte nicht gleichförmig bewegen, sondern dass es zu Sprüngen mit einer Größenordnung von einigen Millimetern kommt. Es ist noch unklar, ob die zeitliche Lokalisierung dieser Sprünge ausreichend genau erfolgen kann, um auch die Frage nach der Gleichzeitigkeit der Bewegung zu beantworten.

Die nächsten Untersuchungen sollen nun klären, ob die visuell erkennbaren unterschiedlichen Trends durch Restfehler der GPS-Modelle verursacht werden können, oder dem tatsächlichen Bewegungsverhalten entsprechen. Dabei wird unter Berücksichtigung der Korrelation insbesondere abzuschätzen sein, welche Bewegungsraten bzw. welche sprunghaften Bewegungen statistisch signifikant nachweisbar sind. Anschließend wird untersucht werden, welche Art der Filterung der kinematischen Auswertergebnisse helfen kann, GPS-induzierte Artefakte und tatsächliche Bewegung noch besser zu trennen, und welche Algorithmen sich eignen, um Sprünge zeitlich genau zu lokalisieren.

4 Strain-Messungen

4.1 Einführung und Pläne

Für das Monitoring der Hangbewegungen wurde am Rutschhang Gradenbach auch eine Strain-Rosette eingebaut. Diese Rosette besteht aus drei 5 m langen faseroptischen Strainsensoren (SOFO Sensoren) bestehen, wobei benachbarte Sensoren einen Winkel von 120° einschließen. Die SOFO Sensoren der Firma Smartec wurden am Institut (IGMS) schon erfolgreich eingesetzt, um eine Brückenüberwachung durchzuführen (Lienhart und Brunner, 2007). Nun sollen mit diesen Sensoren die vermuteten Bodenwellen im Rutschhang Gradenbach gemessen werden. Untersuchungen im Labor haben ergeben, dass diese SOFO Messungen eine Präzision von 2 µm aufweisen.

Die Sensoren wurden im Erdreich einbettet, und an den Enden verankert. Die repräsentative Vermarkung der Ankerpunkte der Strainrosette ist ein besonders wichtiger Punkt. Aufbauend auf die derzeitige Lösung wird nach Verbesserungen der Vermarkung gesucht. Für die Vermarkung von Referenzpunkten, die sich nicht bewegen sollten, gibt es ausreichend stabile Methoden, wie z.B. Messpfeiler. Will man jedoch Punkte in bewegtem Untergrund vermarken, ist es bei herkömmlichen Stabilisierungsmethoden nicht sicher, dass man in den Messungen nur die Bewegung des Untergrunds und nicht auch die Eigenbewegung des vermarkten Punktes sieht.

Ein neuer Ansatz zur Lösung dieses Problems ist der Einsatz des im Bauwesen gebräuchlichen Verfahrens Soilfrac.

Ursprünglich wurde das sog. Soilfracturing-Verfahren in der Erdölindustrie eingesetzt, um dem Öl im Untergrund geeignete Fließwege zur Förderpumpe zu eröffnen. In den 60er Jahren wurde dieses Verfahren von der Tiefbaufirma Keller aufgegriffen und für Problemstellungen im Grundbau adaptiert. Das von der Firma Keller entwickelte Soilfrac-Verfahren wird allgemein als Niederdruck-injektionsverfahren bezeichnet. Bei diesem Verfahren wird zuerst ein sog. Ventil- oder Manschettenrohr in den Boden eingebracht. An diesem Rohr befinden sich ca. alle 25 cm Öffnungen, die sog. Ventilstufen, die bei Einbringung des Rohres mit Gummimanschetten verschlossen sind. Über einen Injektionsschlauch wird danach Suspension an allen Ventilstufen verpresst. Durch den Druck werden die Gummimanschetten an den einzelnen Ventilstufen aufgedrückt und die Suspension wird in den Boden gepresst. Je nach Anwendung kann das Injektionsmaterial mit einem wählbaren Druck eingespritzt werden (typischer Druck für dieses Niederdruckinjektionsverfahren ist 30 bar). Je nach Höhe des Druckes wird die Suspension in Porenräume gepresst oder der Boden lokal aufgesprengt. Dadurch entstehen die für dieses Verfahren charakteristischen Verästelungen, sog. „Frac“ (siehe Abb. 4-1).

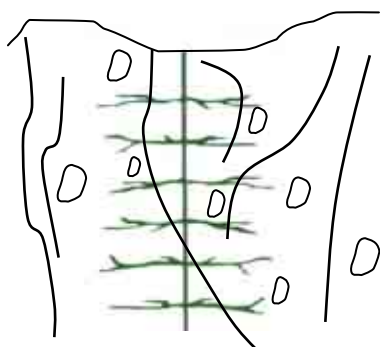


Abb. 4-1: Soilfrac-Verfahren

Bei der Verwendung dieses Verfahrens zur Vermarkung von Messpunkten soll der Untergrund nicht aufgesprengt werden. Das Injektionsmaterial soll nur in freie Porenräume fließen und den Boden nicht aufbrechen. Dies kann durch geeignete Wahl der Suspension und des Injektionsdruckes erreicht werden. Durch die Einspritzung der Suspension in den Boden erreicht man eine zusätzliche Stabilisierung des Ventilrohres, auf dem der Messpunkt angebracht werden soll. Durch die Fracs wird eine bessere Verbindung des Rohres mit dem Untergrund erreicht. Es wird erwartet, dass mit diesem Verfahren vermarkte Punkte die Bewegung des Untergrunds (z.B. Rutschhang Gradenbach) mitmachen, und weniger Eigenbewegung als z.B. ein klassisches Eisenrohr aufweisen werden, da ein größeres Volumen mit der verästelten Vermarkung verbunden wird.

Um die Güte dieser neuen Punktstabilisierungsmethode zu bestimmen, sollen Messungen durchgeführt werden. Eine Überprüfung der Stabilität dieser Vermarkungsmethode stellt sich als äußerst schwierig dar, da man keine ausreichend stabilen Bezugspunkte zur Verfügung hat. Daher soll das System im Vorfeld in einem flachen und stabilen Gelände in Graz getestet werden. Zusätzlich sollen in diesem Testfeld erste Erfahrungen mit dieser neuen Messtechnik gesammelt werden. In diesem Testgebiet soll wie später am Rutschhang eine Strainrosette eingebettet werden, wobei die Endpunkte der Rosette mit dem Soilfrac-Verfahren vermarkt werden. Die Vermarkung der Punkte wird von der Firma Keller durchgeführt werden.

Abb. 4-2 zeigt die geplante Messanordnung zwischen zwei mit dem Soilfrac-Verfahren vermarkten Punkten.

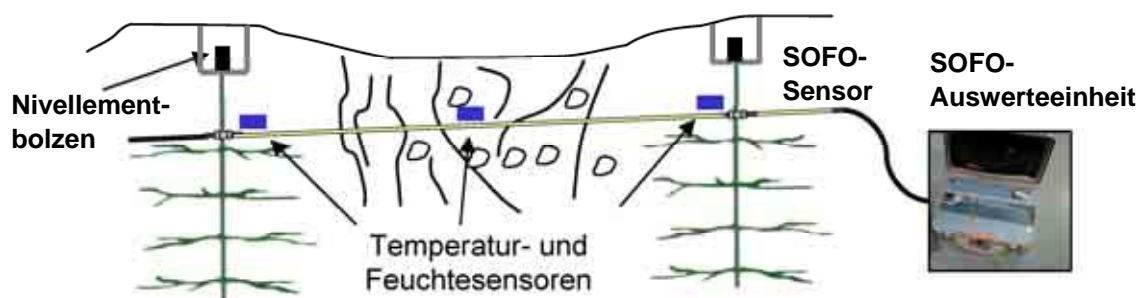


Abb. 4-2: Messkonzept

Der SOFO-Sensor wird im Erdreich eingebettet und zwischen den beiden Ventilrohren verankert. Um die Stabilität der Vermarkungen zu testen, sind folgende Messungen geplant:

- Messung der Distanzänderung zwischen den vermarkten Punkten mit der institutseigenen statischen Auswerteeinheit (Smartec) zur Bestimmung der Langzeitstabilität
- Kontrolle der Punkthöhen über ein Nivellement
- Messung der Temperatur und der Feuchte
- Inklinometermessungen in den Ventilrohren
- Eventuelle Entnahme von Bodenproben, Durchführung von Kernbohrungen oder einer Hammerschlagseismik

Kritische Punkte sind die Verankerung der Sensoren an den Ventilrohren, sowie die Einbettung der Sensoren im Erdreich. Diese beiden Punkte müssen so gelöst werden, dass die Sensoren nach Beendigung der Messungen wieder gewonnen und danach am Rutschhang eingebaut werden können.

Bei diesen Messungen soll erstens die Stabilität der vermarkten Punkte überprüft werden. Zweitens sollen Erfahrungen mit dem Einsatz der mechanischen Verbindung und der Einbettung von SOFO- Sensoren im Erdreich gesammelt werden. Das bei den Testmessungen konzipierte Messsystem soll auch am Rutschhang Gradenbach zum Einsatz kommen.

Da die statische Auswerteeinheit nur für Langzeitbeobachtungen geeignet ist, ist geplant für die Messungen der Strainwaves am Rutschhang Gradenbach eine dynamische Auswerteeinheit (SOFO Dynamic) zu kaufen. Das SOFO Dynamic ist das Kernstück der large-scale Strainrosette, die am Rutschhang eingebaut werden soll. Es wird damit möglich sein, mit bis zu 1 kHz Strainwerte aufzuzeichnen.

Für die Messungen wurden von der Firma Smartec schon 4 Standard SOFO Sensoren mit einer aktiven Länge von 5 m und einer passiven Länge von 10 m gekauft. Drei der vier Sensoren sollen im Testgebiet eingebettet werden und ein Sensor wurde für Versuche im Labor reserviert (ISDR 2005-8).

4.2 Strainrosette am Untersuchungs Gelände BTZ

4.2.1 Präambel

Die SOFO Sensoren der Firma Smartec wurden am Institut schon erfolgreich eingesetzt, um eine Brückenüberwachung durchzuführen (Lienhart und Brunner, 2007). Für diese statischen Längenmessungen konnte eine Standardabweichung von 2 μm bestimmt werden. Mit diesem System sollen Strainwellen, die vermutlich Hangbewegungen vorangehen, gemessen werden. Zur Messung dieser Strainwellen wurde eine dynamische Auswerteeinheit (SOFO Dynamic) gekauft, mit der Strainwerte bis mit bis zu 1 kHz aufgezeichnet werden können.

Bevor dieses System jedoch am Rutschhang eingebaut wird, soll das Verhalten der Strain-Rosette zunächst in einem unbewegten Gebiet (flaches und stabiles Gelände) untersucht werden. Als Testgebiet wurde eine Wiese auf den Inffeldgründen im Areal der Technischen Universität Graz, westlich des Bautechnikzentrums (BTZ), gewählt (siehe Abb. 4-3).

Um diese Stabilisierungsmethode zu testen, sollen lokale Deformationen mit dem statischen SOFO des Instituts gemessen werden. Zusätzlich werden Inklinometermessungen, geodätische Messungen, Temperatur- und Bodenfeuchtemessungen durchgeführt.

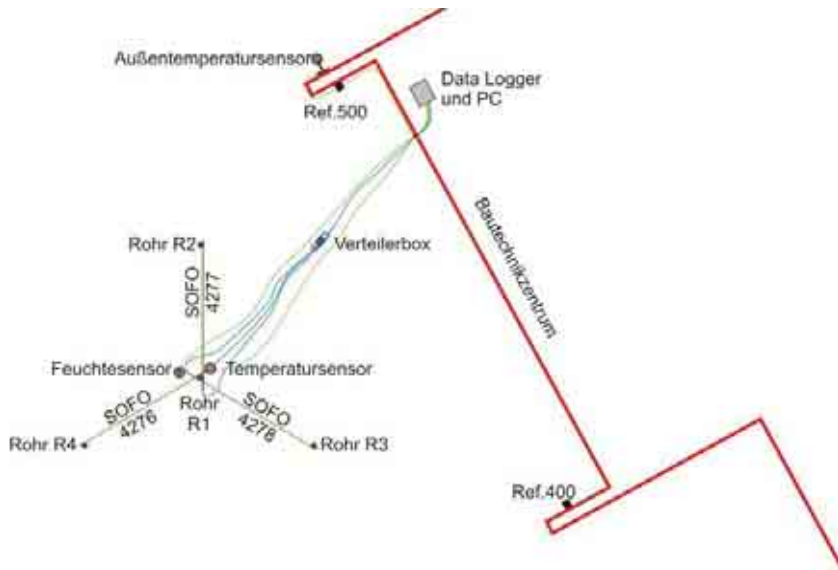


Abb. 4-3: Übersicht über die Strainrosette beim BTZ (4277 = A, 4278 = B, 4276 = C)

4.2.2 Einbau der mit Soilfrac stabilisierten Rohre

Der Einbau der mit Soilfrac stabilisierten Rohre wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

Das Bohren der Löcher wurde mit einem Doppelkopfbohrer durchgeführt. Nach dem Bohren des 5 m tiefen Lochs, blieb ein Außenrohr im Bohrloch, in das das Ventilrohr eingesetzt wurde (siehe Abb. 4-4). Danach wurde der Raum zwischen dem Außenrohr und dem Ventilrohr ohne Druck mit Beton gefüllt.



Abb. 4-4: Einsetzen des Ventilrohres

Nach dem Befüllen des Raumes zwischen dem Ventil- und dem Außenrohr wurde das Außenrohr aus dem Boden gezogen.

Die Verpressung der Suspension soll dazu führen, dass sich das Rohr mit dem Boden verbindet und somit Bewegungen des Bodens mitmacht. Durch die eingepresste Suspension baut sich zwischen dem Ventilrohr und dem Bohrloch Druck auf, der das Rohr stabilisiert.

Der Boden soll bei dieser Methode durch die eingepresste Suspension nicht aufgebrochen, sondern nur die Hohlräume im Boden gefüllt werden.

Um Bewegungen der Rohre messen zu können, wurde entschieden, auch Inklinometermessungen in den Rohren durchzuführen. Dazu wurden Standard Inklinometerrohre aus Kunststoff in die Ventilrohre eingesetzt. Details über den Einbau sind im technischen Bericht (ISDR 2006/3) zusammengestellt.

Da die SOFO Sensoren in einer Tiefe von etwa 1m Tiefe (Frosttiefe) eingebettet werden sollen, wurden zwischen den Endpunkten der Strainrosette mit einem Bagger Künetten gezogen.

4.2.3 Verankerungen

Um die SOFO Sensoren an den Ventilrohren zu befestigen, wurden spezielle Verankerungen entworfen und gefertigt. An diese Verankerungen wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Fixierung der Verankerungen an den SOFO Sensoren nur an den Ankerpunkten
- Verbindung im μm Bereich stabil
- Schutz der Spiegelzone und des Kopplers
- Ausgleich von Positionsabweichungen und Neigungen der Ventilrohre
- Wiederverwendbarkeit der Sensoren nach Abschluss der Tests

Die beiden notwendige Verankerungen bei der Spiegelzone AS und dem Koppler AK des SOFO Sensors wurden sensorbedingt unterschiedlich gefertigt. Beide Verankerungen sollten Richtungs- und Neigungsabweichungen ausgleichen können. Jedoch muss nur eine Verankerung eine Abweichung in der Länge ausgleichen können. Die Abb. 4-5 a) und b) zeigen die Verankerungen für den Ankerpunkt AS, und AK.

a)



b)

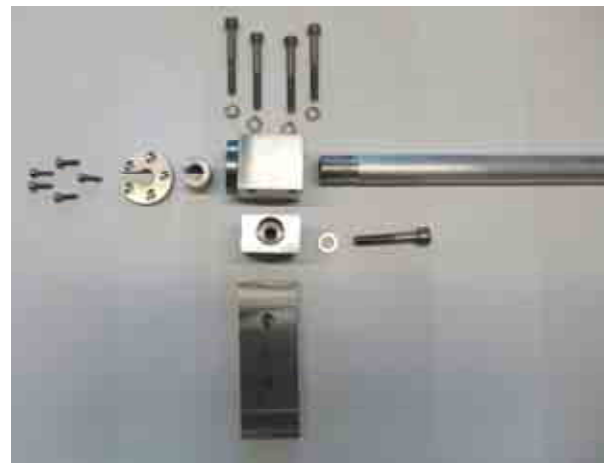


Abb. 4-5: Verankerung für den Ankerpunkt AS bei der Spiegelzone (links) und den Ankerpunkt AK beim Koppler (rechts) in Einzelteilen

Die Verankerungen wurden modular gefertigt und sollten nach der Montage an den Soilfrac-Rohren und deren endgültigen Ausrichtung mit diesen verschweißt werden.

4.2.4 Einbau der SOFO Sensoren

Dieses Kapitel beschreibt die Vorgehensweise beim Einbau der SOFO Sensoren im Testgebiet beim BTZ. Da es sich um Glasfasersensoren handelt, war besondere Vorsicht beim Einbau im Boden geboten.

Die Verankerungen wurden zuerst provisorisch an den Ventilrohren befestigt (siehe Abb. 4-6). Danach erfolgte die Höhen- und Längsausrichtung durch Fluchtung und durch ein Nivellement. Erst dann wurden die Verankerungen an die Ventilrohre angeschweißt.



Abb. 4-6: Am mittleren Rohr R1 vormontierte Adapter

Die Einbettungstiefe der Sensoren betrug zwischen 65 und 90 cm. Um die Sensoren zu schützen, befindet ober- und unterhalb der Sensoren eine ca. 10 cm dicke Sandschicht. Um ein späteres Setzen der SOFO Sensoren zu vermeiden, wurde das eingebrachte Material verdichtet.

Nach der endgültigen Montage der Verankerungen wurden die SOFO Sensoren eingebaut. Vor dem Einbau wurden die Sensoren getestet. Die Resultate der Tests sind im technischen Bericht ISDR 2006/9 zusammengefasst. Die Sensoren wurden 10 mm vorgespannt (siehe Abb. 4-7), um auch Bewegungen der Rohre zueinander messen zu können. Danach wurden die letzten Adapterteile angeschweißt, um eine dauerhafte Fixierung zu garantieren.



Abb. 4-7: Vorgespannter Sensor

Nachdem alle Sensoren eingebaut waren, wurden die Künetten zuerst mit Sand, dann mit einer Schicht Dachpappe, dann wieder einer Schicht Sand, und dann mit Waschbetonplatten ausgebaut. Die Dachpappe soll den Sensor vor Regenwasser schützen, und die

Waschbetonplatten sollen zusätzlichen mechanischen Schutz bieten. Der restliche Teil der Künetten wurde mit Erde zugeschüttet.

Aufgrund der geplanten Dauermessung wurde der PC und die Reading Unit im BTZ untergebracht und alle Kabel ins Innere des Gebäudes geführt. Die Kabel der SOFO Sensoren wurden mit Patchcords verlängert. Zum Schutz der Verbindung im Erdreich wurde eine wasserdichte Switch-Box (Abb. 4-8) angefertigt, die in ca. 20 cm Tiefe eingegraben wurde.



Abb. 4-8: SOFO Kabel und Patchcords in der geöffneten Switch-Box

4.2.5 Einbau der Sensoren für Bodentemperatur und Bodenfeuchte

Vor dem Einbau wurden beide Sensoren im Labor kalibriert (siehe ISDR 2006/10). Der Temperatursensor wurde beim Zentralrohr R1 montiert. Er ist zur späteren Kompensation der temperaturbedingten Längenänderungen notwendig. Der Sensor zur Messung der Bodenfeuchte wurde ebenfalls beim Zentralrohr R1 eingebaut. Damit können die Messungen der SOFO Sensoren mit den Schwankungen der Bodenfeuchte verglichen werden. Weiters wurde ein Lufttemperatursensor an der Nordseite des BTZ in einer Höhe von ca. 5.5 m befestigt (siehe ISDR 2006/11) zu entnehmen.

4.2.6 SOFO Static Messungen

Seit der Fertigstellung des Einbaus werden laufend SOFO-Static Messungen durchgeführt, wobei ein Sensor in halbstündigen Intervallen automatisch gemessen wird. Die beiden anderen Sensoren müssen aufgrund des fehlenden optischen Multiplexers einmal täglich durch einen Mitarbeiter des Instituts manuell angesteckt und gemessen werden.

Da die Sensoren mittels Adaptern aus Stahl mit bekannten Längen an den Soilfrac-Rohren befestigt wurden, müssen die gemessenen Längenänderungen um die Auswirkung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten dieser Adapter korrigiert werden. Die dazu notwendige Bodentemperaturmessung erfolgt mit einem ebenfalls eingebetteten PT100 Temperatursensor im Zentrum der Strain-Rosette (siehe Abb. 4-3). Derart reduzierte Längenänderungen seit Beginn der Messungen sind in Abb. 4-9 dargestellt, wobei der Offset von ca. 10 mm durch die Vorspannung der Sensoren hervorgerufen wird.

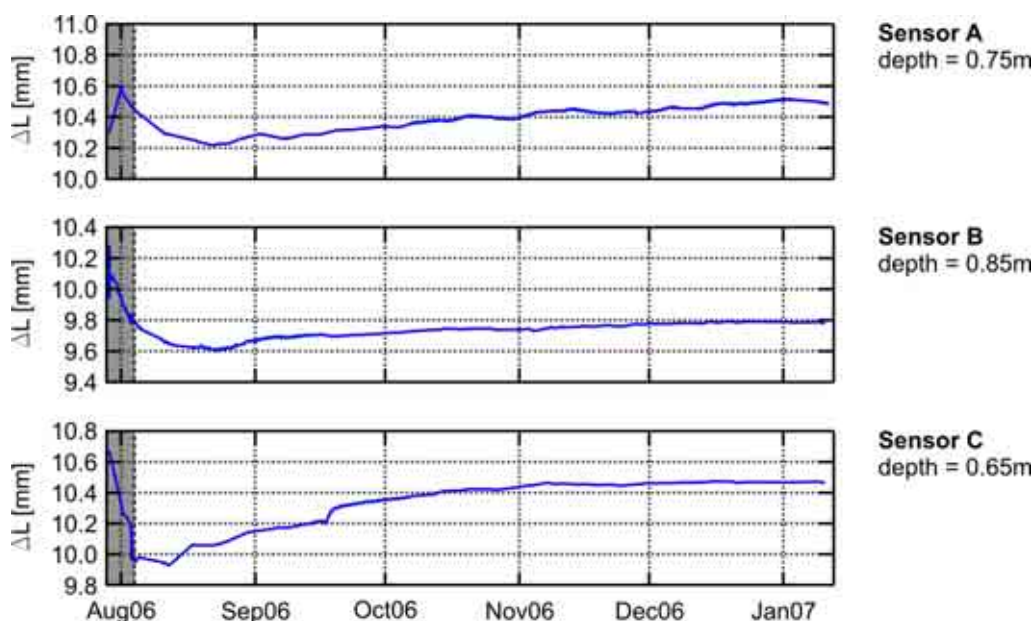


Abb. 4-9: Temperaturkorrigierte Messdaten, Verteilung der Sensoren ist in Abb. 4-3 gezeigt

Trotz dieser Temperaturkompensation verbleibt – je nach Temperaturunterschieden zwischen Tag und Nacht – ein Tagesgang von etwa 0.02 mm in den Messdaten, der weitere temperaturabhängige Effekte vermuten lässt. Nach einigen Untersuchungen erhärtete sich der Verdacht, dass die bis an die Oberfläche geführten Soilfrac Rohre die Ursache dafür sind.

Aus den reduzierten Daten lässt sich die Richtung der Hauptdehnungen und deren Beträge bestimmen, siehe Abb. 4-10. Details hierzu sind in Brunner et al. (2007) dargestellt.

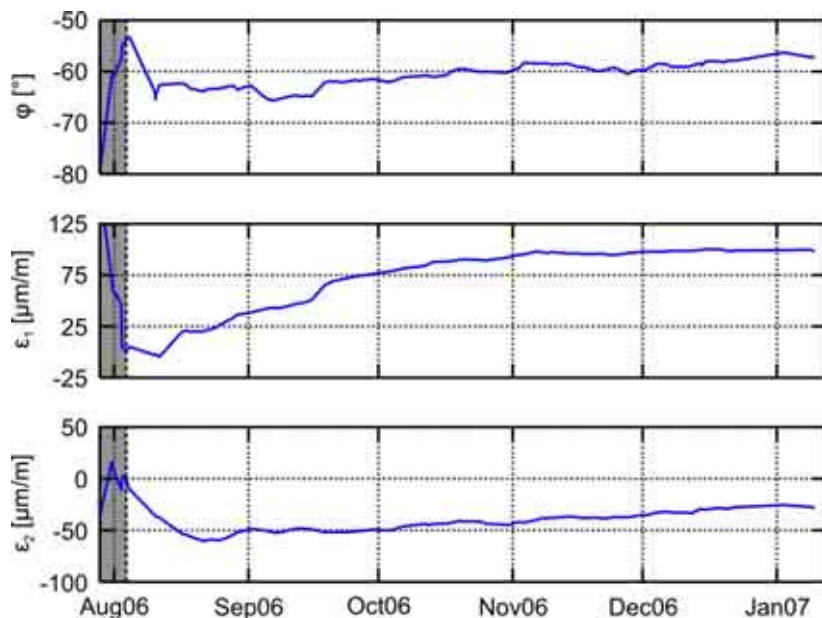


Abb. 4-10: Hauptdehnungsrichtung φ und Hauptdehnungen ε_1 und ε_2

Die bestimmten Dehnungen (ε_1) liegen bei etwa 100 $\mu\text{m}/\text{m}$, obwohl vom Versuchsaufbau erwartet wurde, dass im als stabil angenommenen Gelände keine Dehnungen auftreten sollten. Die Richtung der Hauptdehnung φ zeigt orthogonal auf das nahe gelegene BTZ Gebäude. Parallel zu den SOFO Messungen durchgeführte Präzisionsmessungen mit geodätischen Instrumenten zeigten, dass sich das BTZ Gebäude im Messzeitraum um etwa

1.3 mm deformiert hat, was die mit dem SOFO bestimmten Dehnungen hervorgerufen haben dürfte. Ob diese Deformationen durch eine nahe Baustelle oder durch thermische Ausgleichsbewegungen hervorgerufen wurden, werden die noch immer durchgeführten Messungen zeigen.

Erste Messungen mit den eingebetteten SOFO Sensoren, allerdings mit der Auswerteeinheit SOFO-Dynamic, wurden auch durchgeführt und haben überzeugende Resultate geliefert (Brunner et al. 2007)

4.3 Strain-Rosette Gradenbach

4.3.1 Planungsphase

Die Strain-Rosette ist jene Komponente des IMOS, die es ermöglichen soll, Informationen über das Verhalten des Rutschhanges in dem bisher von den GPS Messungen (TUG) und den Seismometermessungen (TUW) nicht erfassten Frequenzbereichen zu erlangen. Bei einem Treffen mit der Gruppe von Prof. Brückl (TUW) wurden die Anforderungen an die Strain-Rosette und die wichtigsten Kriterien für den Einbau diskutiert und im Detail festgelegt (NOT 2006/2).

Im Zuge der GPS Messkampagne vom 7. bis 11. November 2006 fand dann am Rutschhang Gradenbach eine umfangreiche Begehung statt, um einen geeigneten Ort für die Strain-Rosette zu finden. Bei der Begehung waren auch die Besitzverhältnisse und die Kooperativität der Grundstücksbesitzer abzuklären, eine wichtige Nebenbedingung für den Einbau. Bereits vor der Begehung wurden anhand von Orthophotos mögliche Grundstücke für den Einbau der Rosette visuell ausgewählt (siehe Abb. 4-11).

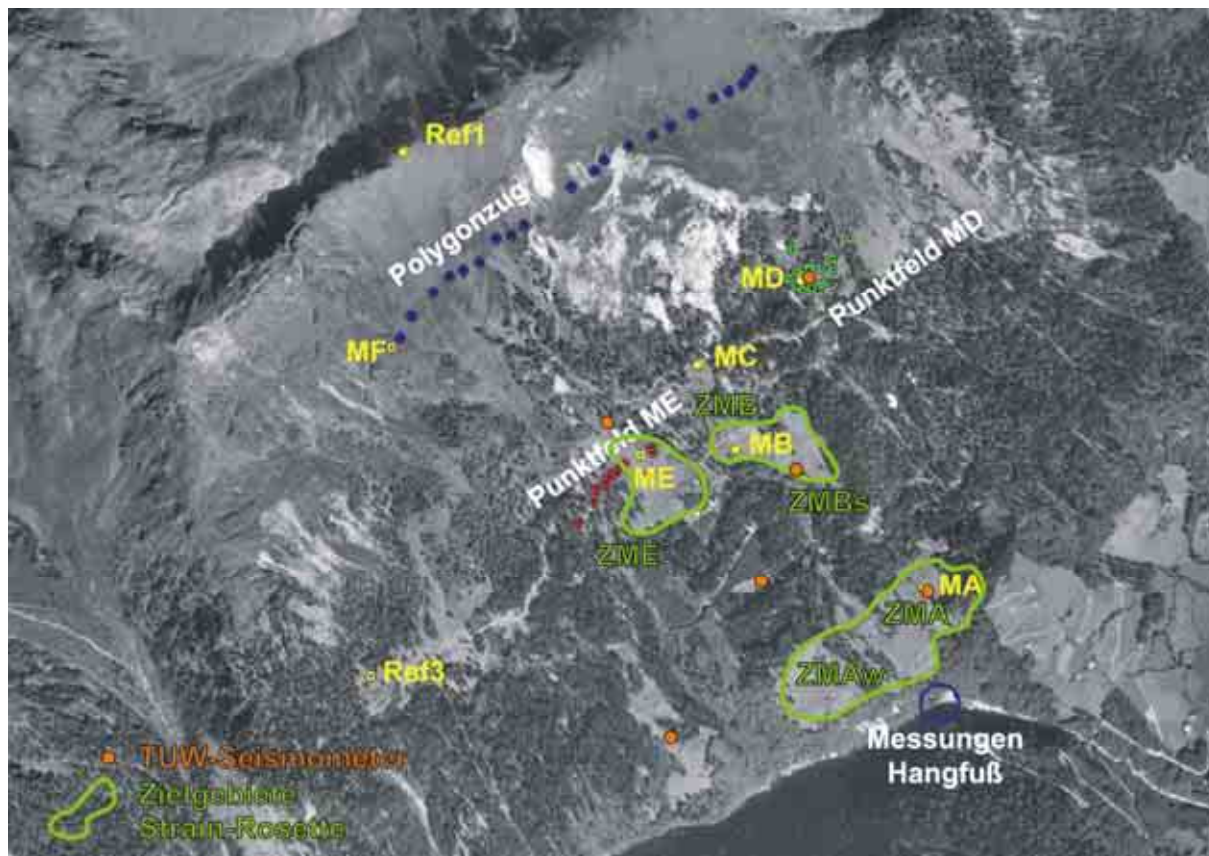


Abb. 4-11: Punktübersicht am Rutschhang Gradenbach und Zielgebiete für die Strain-Rosette

Die Vor- und Nachteile aller im Lokalaugenschein untersuchten Zielgebiete können dem Technischen Bericht ISDR 2006/20 entnommen werden.



Abb. 4-12: Zielgebiet ZMBs mit tatsächlicher Einbauposition der Strain-Rosette (rot)¹

4.3.2 Konzept für den Einbau der Strain-Rosette

Das Einbaukonzept der Strain-Rosette am BTZ sollte bezüglich der Erfahrungen, die mit diesem Prototyp gesammelt wurden, adaptiert werden. Die Messungen am BTZ zeigten einen Tagesgang, der in der Verankerung begründet sein dürfte. Die Rohre wurden dort wegen der geplanten Inklinometermessungen bis an die Oberfläche geführt, siehe Bericht ISDR–2006/3, und wurden offenbar durch die oberflächennahen Bodenschichten beeinflusst.

Da das Zielgebiet ZMBs am Gradenbach bewirtschaftet wird, wäre mit gleichartigen Rohren eine zusätzliche Beeinflussung durch das Weidevieh zu erwarten. Zudem fehlt die für den Einbau notwendige Infrastruktur (Starkstrom, Wasser) und könnte im mit Maschinen nur schwer zugänglichen Gebiet (1600 m Seehöhe) nur mit großem Aufwand bereitgestellt werden. Daher sollte die Verankerung der SOFO Sensoren wie in Abb. 4-13 dargestellt und in der Folge beschrieben erfolgen.

An den Enden einer ca. 1 m tiefen Künette werden händisch zwei ca. 0.5 m tiefe Löcher gegraben, die dann mit Beton gefüllt werden. Zur Stabilisierung der Betonsäule wird ein 1.5 m langes Armierungseisen vertikal in das Erdreich eingetrieben, vier weitere Armierungseisen (je 1 m lang) werden schräg eingetrieben. Am oberen Ende einer Betonsäule werden entsprechende Adapter einbetoniert, so dass eine Verbindung mit dem SOFO Sensor hergestellt werden kann

¹ Quelle Orthophoto und Höhenschichtenlinien: KAGIS

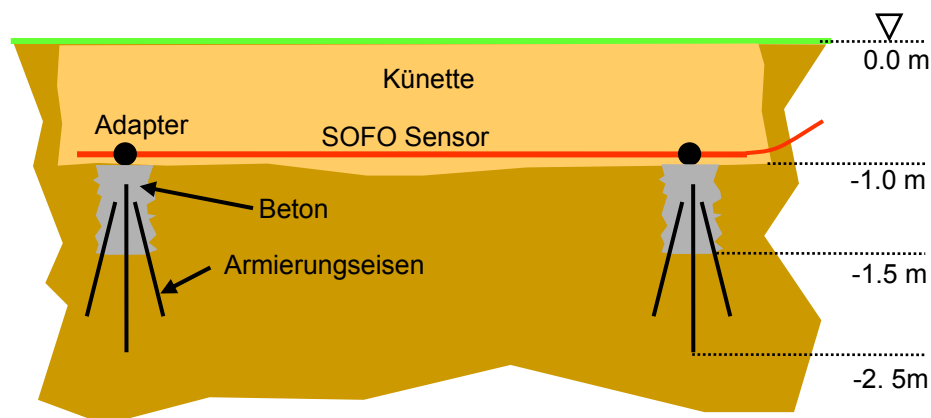


Abb. 4-13: Verankerungskonzept für die Sensoren der Strain-Rosette

Der Einbau der Sensoren sollte hangparallel erfolgen, wobei die Neigung im Bereich der Rosette etwa 10° beträgt. Die Ausrichtung der Strain-Rosette sollte so erfolgen, dass ein Sensor in Richtung der maximalen Bewegung, die mit der Bewegung des nahe gelegenen GPS Punktes MB gegeben ist.

Die Länge der Sensoren wurde (wie bei der Rosette beim BTZ) mit 5m festgesetzt, was einen akzeptablen Kompromiss zwischen gewünschter Großflächigkeit und den entstehenden Einbauaufwand darstellt. Bei einer Relativbewegung von etwa 10 mm pro Jahr zwischen den GPS Punkten MA und MB (zwischen diesen beiden liegt die Rosette), und der Annahme einer linearen Verformung, ergeben sich zu messende Bewegungen an der Rosette von etwa $70 \mu\text{m}$ pro Jahr.

Um das Erdreich während des Einbaus so wenig wie möglich zu stören, und einen zentralen Verankerungspunkt aller drei Sensoren zu vermeiden, sollten die drei Sensoren in getrennten Künetten eingebaut werden.

4.3.3 Realisierung

Der Einbau der Strain-Rosette erfolgte im Mai 2007. Die meisten Arbeiten mussten manuell durchgeführt werden (4 Mann, 5 Tage). Lediglich die Grabungsarbeiten an den Künetten konnten maschinell mit einem kleinen Bagger durchgeführt werden. Abb. 4-14 zeigt einen Überblick über die Strain-Rosette während dem Einbau der Sensoren und Abb. 4-15 zeigt exemplarisch einige Arbeitsschritte.



Abb. 4-14: Ansicht der Einbaustelle der Strain-Rosette



Abb. 4-15: Einbau der Strain-Rosette: (links) Eintreiben der Armierungseisen, (mitte) montierter und ausgerichteter SOFO Sensor, (rechts) Schutz des Sensors beim Zuschütten

Die Anordnung der drei SOFO Sensoren erfolgte in der um 10° gegenüber der horizontalen geneigten hangparallelen Ebene jeweils 120° zueinander, siehe Abb. 4-16. Die Abweichungen vom Sollwinkel betragen zwischen 0.03° und 0.06° .

Die Ausrichtung der Rosette in Bewegungsrichtung des MB (1999-2006) erfolgte auf 0.04° genau.

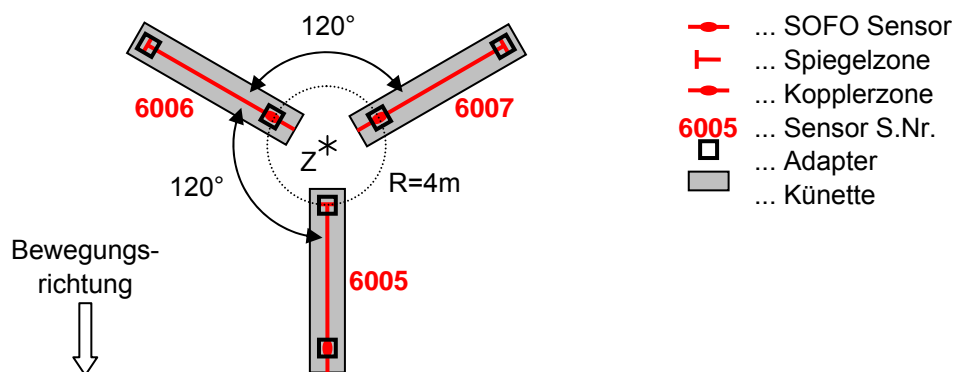


Abb. 4-16: Anordnung der Sensoren der Strain-Rosette

Als Folge der lokalen Topographie (leichte Kuppe) war aber ein etwas tieferer Einbau der Sensoren notwendig, als ursprünglich geplant, siehe Tab. 1. Sensor 6006 liegt 1 m unter der Erdoberfläche und gibt damit die Tiefen der anderen Sensoren vor, da alle drei Sensoren hangparallel (10° Neigung) und in etwa in der gleichen Ebene eingebaut werden sollten.

Tab. 1: Kenngrößen des Einbaus

Sensor	Bez.	Tiefe unter der Oberfläche [m]	Abstand zur hangparallelen Ebene durch 6005 [cm]	Abstand SOFO Anker zum Zentralpunkt Z [m]
6005	A	-1,7 bis -2,0	0	4,11
6006	B	-1,0 bis -1,7	-26	3,95
6007	C	-1,6 bis -2,0	+3	4,04

Das Aushubmaterial im Bereich der Strain-Rosette war größtenteils Lockermaterial (mit Steinen versetzte Erde). Lediglich an einem Ende einer Künette trat Fels auf, was den Einbau erschwerte. Damit liegen die drei Sensoren in leicht unterschiedlichen Höhen, wobei der maximale Abstand 26 cm beträgt, siehe Tab. 1. Ebenso eine Folge der lokalen Gegebenheiten ist, dass der Abstand der Sensoren vom Zentralpunkt leicht unterschiedlich ist, was jedoch aufgrund der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wellen im Untergrund und der trotz 1 kHz noch immer beschränkten Aufzeichnungsrate nicht auflösbar sein wird.

Neben den SOFO Sensoren wurden ein Bodenfeuchtesensor und je ein Temperatursensor zur Messung der Boden- sowie der Lufttemperatur eingebaut, um die Messdaten der SOFO Sensoren korrigieren und diverse Abhängigkeiten überprüfen zu können. Bodenfeuchtesensor und Bodentemperatursensor wurden nahe der Kopplerzone von Sensor 6007, knapp 2m unter der Oberfläche eingebaut.

Die Vorbereitung des Einbaus, die Fertigung der Adapter, die Kalibrierung und Überprüfung der Sensoren und der Einbau der Rosette sind im Detail in den Berichten ISDR 2007/04, 05, 06, 07 und 08 beschrieben.

4.3.4 SOFO-Dynamic Nullmessung und Ergebnisse

Vom 16. bis 19. Juli 2007 wurde der Einbau der Strain-Rosette am Rutschhang fertiggestellt. Während das Vergraben der Sensoren bereits im Mai 2007 abgeschlossen werden konnte, war die Einrichtung einer Messbox zur Unterbringen der Messinstrumente noch ausständig. Abb. 4-17 a) zeigt die umzäunte SOFO-Messbox in unmittelbarer Umgebung der vergrabenen Strain-Rosette während die Abb. 4-17 b) die geöffnete Messbox mit den Messinstrumenten zeigt.

a)



b)



Abb. 4-17: a) SOFO-Messbox hinter Umzäunung Nähe eingebaute Strain-Rosette und b) geöffnete SOFO-Messbox mit Messinstrumenten

Beim Fertigstellen der Messbox am 17.07.2007 wurde eine 3-tägige kontinuierliche SOFO-Dynamic-Kampagne durchgeführt. Die Auswertung dieser Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit der TUW, da besonders jene Abschnitte in den SOFO-Daten interessant erscheinen, welche von den Seismometern der TUW als seismisches Event klassifiziert werden.

Abb. 4-18 zeigt eine 14 Stunden lange Zeitreihe von SOFO-Dynamic Rohdaten der Nacht von 18.07.2007 auf 19.07.2007. Deutlich erkennbar ist die in diesem Zeitraum aufgetretene Drift von ca. $28 \mu\text{m}$, die in allen Kanälen auftritt. Die Drift kann mit dem Signal des Referenzsensors kompensiert werden.

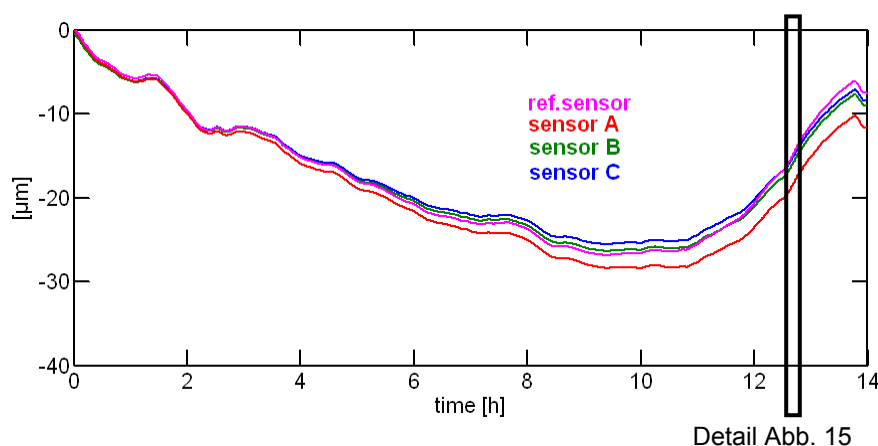


Abb. 4-18: SOFO-Dynamic Rohdaten, 14h kontinuierlich, Startzeit: 18.07.2007 19:19 Uhr

Nach der Kompensation verbleibt eine Restdrift von etwa $0.2 \mu\text{m} / 15 \text{ min}$ und eine Datenreihe mit einer (robusten) Standardabweichung von 0.4 nm . Diese Größenordnung

verdeutlicht die Genauigkeit des SOFO-Dynamic Messgerätes und zeigt auch die Notwendigkeit der Anschaffung für dieses Projekt. Eine Ausreißererkennung ermöglicht das Visualisieren von den in den Datenreihen enthaltenen Events (vgl. Abb. 4-19).

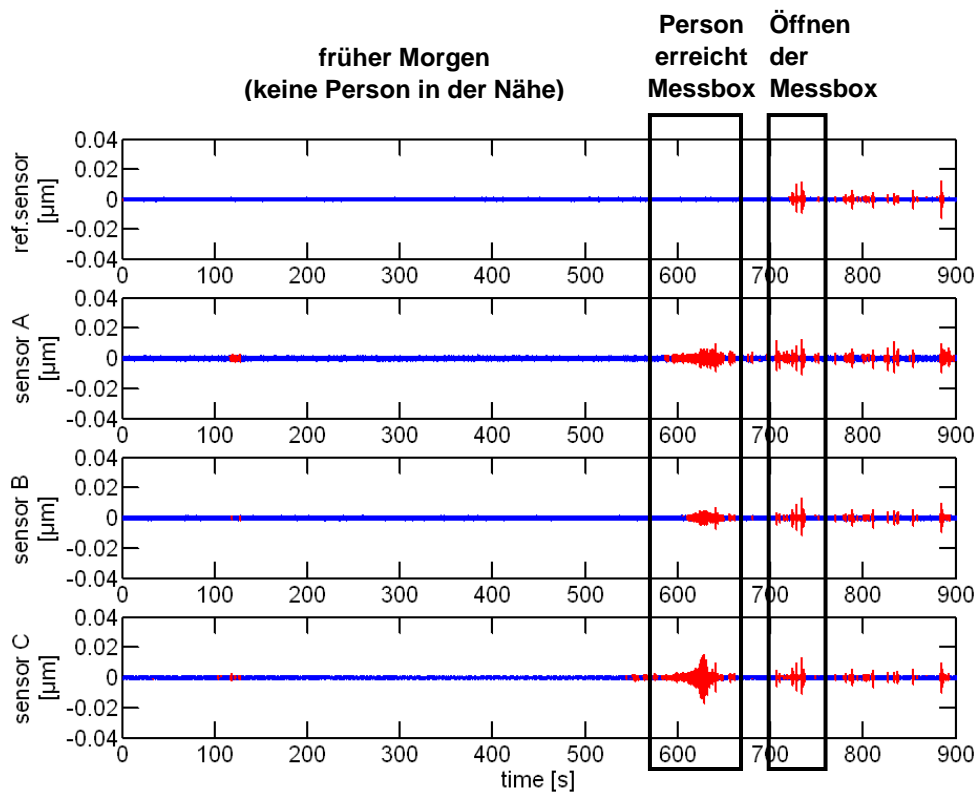
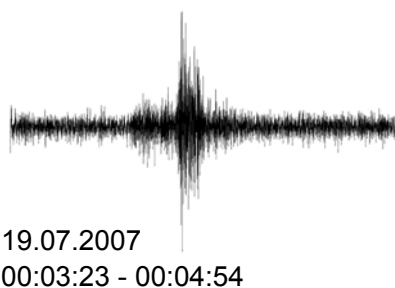


Abb. 4-19: Drift kompensierte und gefilterte Daten der 15 Minuten langen Zeitreihen

Am 19. Juli 2007 ist um 00:03 Uhr nach Angaben der TUW ein regionales Erdbeben (Event #15438) durch das Seismometerfeld registriert worden. Dieses konnte auch in den SOFO-Dynamic Daten lokalisiert werden (siehe Abb. 4-20 a) und b)).

a)



b)

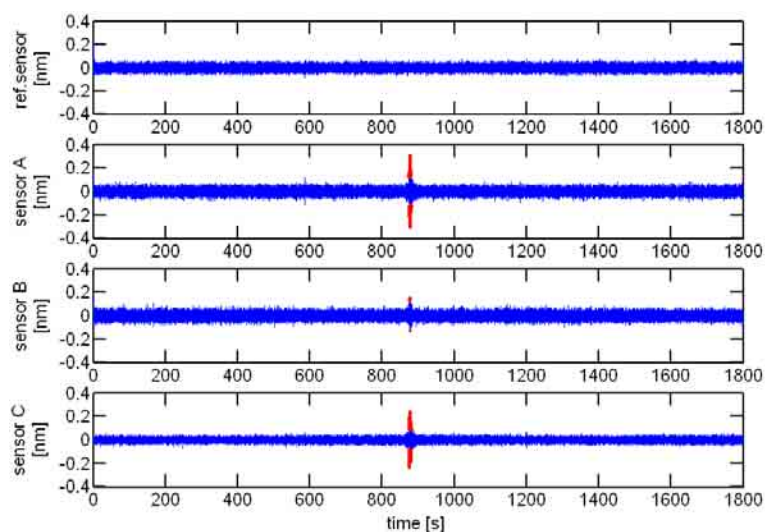


Abb. 4-20: a) Regionales Erdbeben registriert vom Seismometerfeld und b) in den ausgewerteten SOFO-Dynamic Daten

4.3.5 SOFO-Static Messungen und erste Ergebnisse

Vom Fertigstellen der Messbox im Juli bis zur 2-wöchigen SOFO-Messkampagne im Oktober wurde der Sensor (A) in Geländefallrichtung kontinuierlich mit SOFO-Static gemessen.

Abb. 4-21 zeigt eine Zeitreihe der SOFO-Static Messungen seit Einbau der Strain-Rosette. Von Mai bis Mitte August ist eine deutliche Drift bei allen 3 Sensoren erkennbar, als Ursache wird eine Entspannungs-bewegung der eingebauten Sensoren vermutet, wie sie auch bei der Strain-Rosette im TU-Testgebiet BTZ beobachtet wurde.

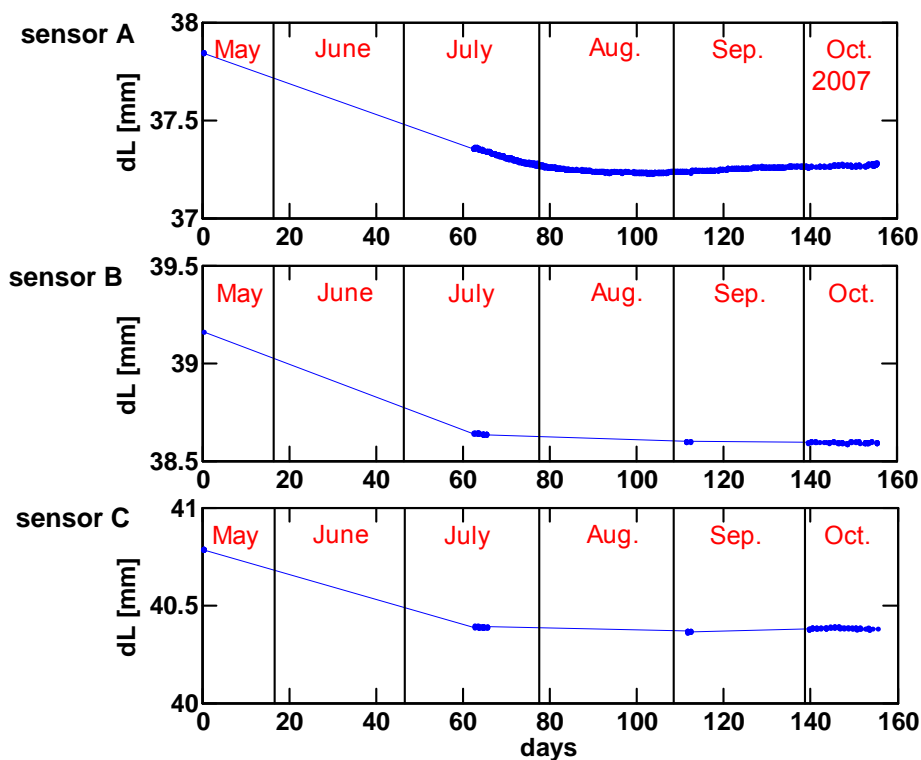


Abb. 4-21: SOFO-Static Zeitreihe seit Einbau der Sensoren

4.3.6 2-wöchige SOFO Messkampagne

Die erste 2-wöchige SOFO Messkampagne wurde im Oktober 2007 durchgeführt. Es wurden täglich SOFO-Static sowie kontinuierliche SOFO-Dynamic Daten aufgezeichnet. Daten der Strain-Rosette werden erst nach Abschluss der Untersuchung der Seismometer-Daten nach seismischen Events durch die TUW ausgewertet.

5 Terrestrische Messungen am Rutschhang

5.1 Motivation

Zweck der terrestrischen Punkteinmessungen am Gradenbach ist es, erweiterte Informationen über die Oberflächenbewegungen am Rutschhang Gradenbach zu erhalten. Mit den Erstmessungen vom September bzw. Oktober 2001, und den Nachmessungen, die im Juli 2002 im Rahmen des ersten Vorgängerprojektes IDNDR-10 durchgeführt worden sind, konnten erste Bewegungsvektoren bestimmt werden.

5.2 Punktfeld MD und Polygonzug

Die im Jahr 2004 gemessenen terrestrischen Daten beziehen sich auf bereits bestehende Punktfelder und gliedern sich in drei Bereiche, die in Abb. 5-1 zu sehen sind:

- Punktfeld MD
- Polygonzug
- Messungen am Hangfuß.



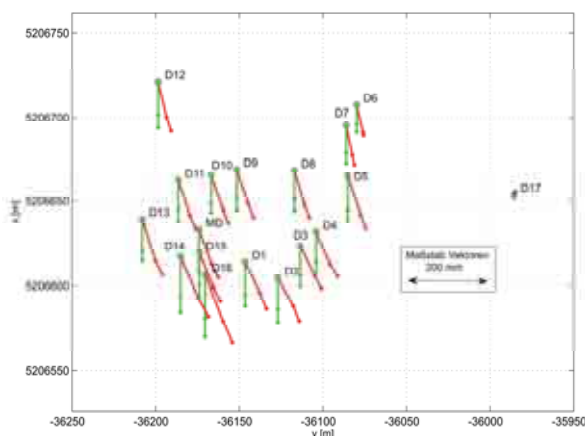
Abb. 5-1: Übersicht der Punktfelder

Abb. 5-2 a) zeigt die Punkte des Punktfeldes MD zu den Zeitpunkten September 2001, Oktober 2003 und August 2004 (Einzelepochen durch Punkte in den Verschiebungsvektoren gekennzeichnet). Die Verschiebungsrichtungen weisen alle talwärts in dieselbe Richtung und nehmen von West nach Ost gesehen leicht ab. Am östlichen Rand des Punktfeldes (Punkt D17, östlich der Hauptabrissskante) ist nahezu keine Bewegung mehr feststellbar.

Die Punkte des Polygonzugs (MF, MG, PP2 – PP5) sowie die von diesen Standpunkten aufgenommenen Detailpunkte F1 – F18 zu den Zeitpunkten September 2001, Juli 2002 und August 2004 sind in Abb. 5-2 b) ersichtlich. Auffällig sind die großen Verschiebungsbeträge (bis zu 80 cm horizontal und 50 cm vertikal) in den Punkten F7 – F11 zwischen 2002 und 2004, die auf oberflächennahe Hangbewegungen schließen lassen. Die Bewegungsrichtung stimmt hier mit der Richtung eines abfallenden Grabens mit teilweise offener Grasnarbe bzw. mit der östlichen Hauptabrissskante überein. Die zur dominierenden

Bewegungsrichtung leicht verdrehte Richtung des Punktes F10 lässt sich aus den lokalen Geländegegebenheiten erklären.

a)



b)

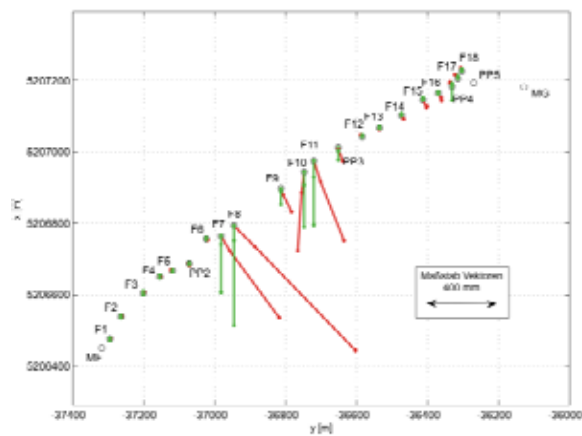


Abb. 5-2: Verschiebungsvektoren Punktfeld MD (links) und Polygonzug (rechts). rot: Lageänderung, grün: Höhenänderung, Epochen: Sept. 2001, Okt. 2003 und Aug. 2004.

5.3 Sperrenmessung am Hangfuß

Diese Messungen dienen der Klärung jener Bewegungsmuster, welche die Sperrenbauwerke im Gradenbach in diesem Bereich zerstören.

5.3.1 Vermarkung und Messepochen 2002-2004

Für die Bestimmung der Bewegungen des Hangfußes im Bereich von zwei Sperren, wurden drei Punkte an der stabilen orographisch rechten Seite und ein Punkt an der bewegten linken Seite, neben der in Beton verankerten Extensometern, vermarkt. Zusätzlich wurden an der oberen der beiden Sperren zwei Bolzen gesetzt, um die Bewegung der Sperre zu bestimmen (siehe Punktübersicht Abb. 5-3) Für die Vermarkung der Punkte (FR1, FR3 und FL) wurden Wild-Bolzen (auf eine 15cm langen Stahlstange geschraubt und geklebt) in den Fels bzw. in Beton geklebt. Der Punkt FR2 wurde an der Spitze eines vorgespannten Felsankers, durch Einfeilen eines Kreuzes signalisiert.

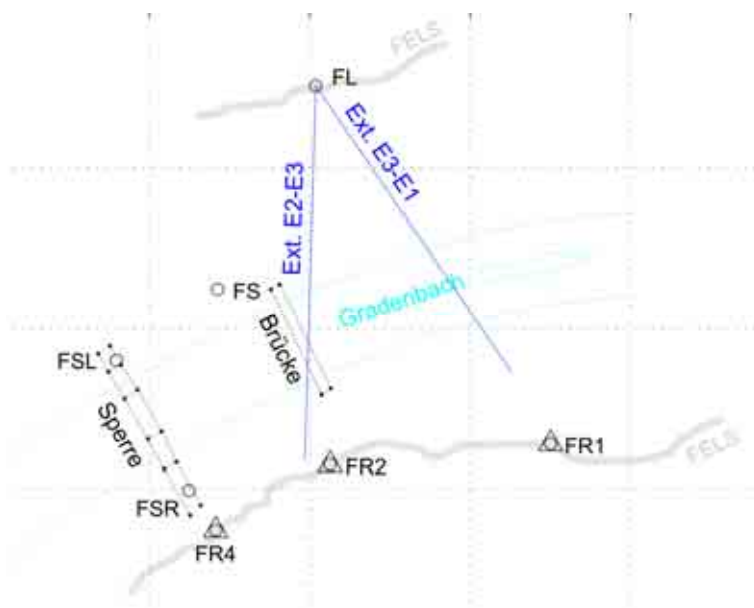


Abb. 5-3: Punktübersicht Hangfuß (stabil angenommene Punkte durch Dreiecke mit Kreis, bewegte Punkte durch Kreis symbolisiert)

Die Punkte am Hangfuß wurden im Juli 2002, im Oktober 2002, im Mai 2003, im Oktober 2003 und im November 2004 relativ zu FR1, FR2 und FR3 (Stabilisierung verloren) bzw. FR4 vermessen. Die beobachteten Punkte setzen ihre Bewegungsrichtung fort, auch der Betrag der Lage- und Höhenänderung ist zwischen Herbst 2003 und Herbst 2004 vergleichbar mit den entsprechenden Epochen 2002 und 2003 (siehe Abb. 5-4). Auffällig ist die größere Hebung und Verschiebung des in Fließrichtung gesehenen linken Teils des Sperrenbauwerks. Das Bachbett wurde vom Forsttechnischen Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Villach, mit einer Steinschichtung versehen, sodass das steigende Gefahrenpotential einer fortschreitenden Deformation des Bauwerkes reduziert werden konnte.

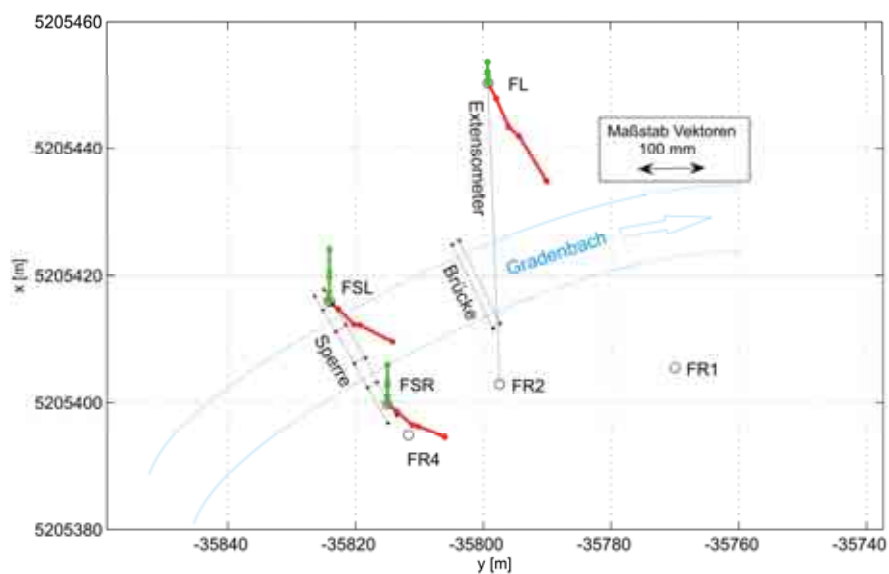


Abb. 5-4: Verschiebungsvektoren Hangfuß 2002-2004

Detaillierte Ergebnisse der terrestrischen Messungen im Jahr 2004 sind ISDR 2004-8 zu entnehmen.

5.3.2 Messepochen 2007 und 2008

Im Zuge der 2-wöchigen SOFO Messkampagne am Rutschhang Gradenbach wurden am 09.10.2007 die seit November 2004 nicht mehr durchgeführten terrestrischen Messungen am Hangfuß wiederholt. Eine weitere Wiederholungsmessung wurde wiederum im Zuge einer GPS Messkampagne am 11. Juni 2008 durchgeführt (ISDR 2007/15 und ISDR 2008/5).

Abb. 5-5 zeigt die Koordinatendifferenzen sämtlicher Epochen in Form von Verschiebevektoren der Punkte FSR, FSL, und FL.

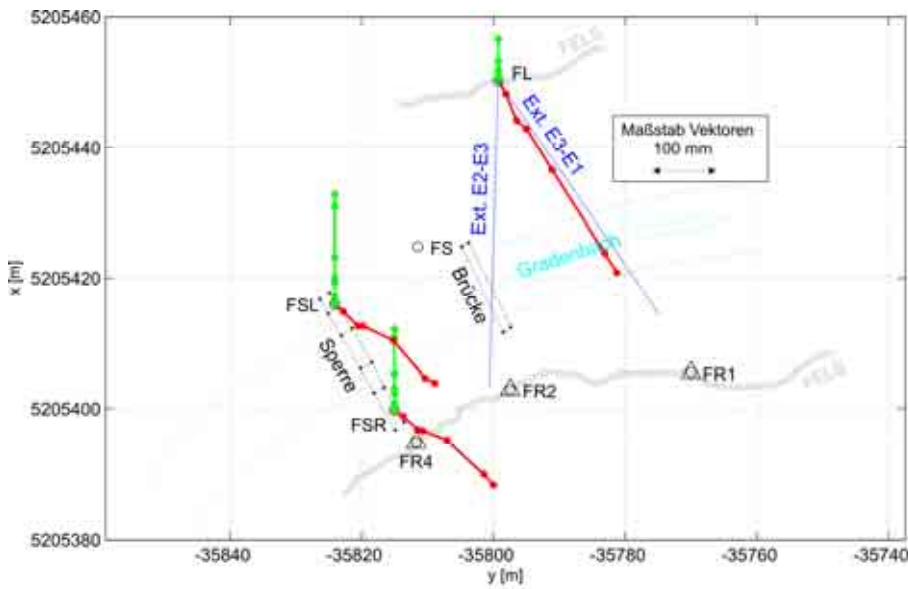


Abb. 5-5: Verschiebevektoren der Punkte FSL, FSR und FL von 2002 bis 2008. Grüne Vektoren entsprechen der Höhe (positiv nach oben), rote Vektoren entsprechen der Lage. Epochen: Juli 2002, Okt. 2002, Mai 2003, Okt. 2003, Nov. 2004, Okt. 2007 und Juni 2008.

Die Abb. 5-6 a) und b) zeigen die Horizontal- bzw. Vertikalkomponenten der Verschiebevektoren gegen die Zeit geplottet. Am nahezu linearen Verlauf beider Komponenten erkennt man die Kontinuität der Bewegung auch unter Beibehaltung der Bewegungsrichtung. Auffällig ist die größere Hebung des in Fließrichtung gesehenen linken Teils des Sperrbauwerks bei nahezu gleicher horizontaler Verschiebung.

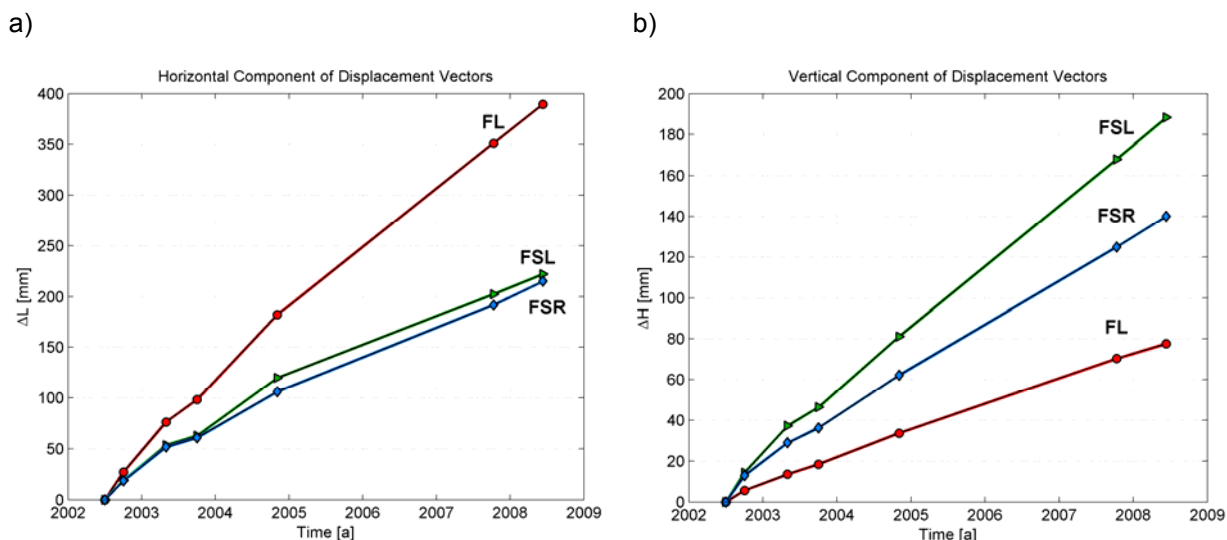


Abb. 5-6: Horizontalkomponenten und Vertikalkomponenten der Verschiebevektoren gegen die Zeit geplottet.

Um die Größenordnung der Bewegungen am Hangfuß mit jenen der GPS Monitoringstationen vergleichen zu können, wurde in Abb. 5-7 die Horizontalkomponente des Verschiebevektors der Station MA im Zeitraum der Messungen am Hangfuß mit den Horizontalkomponenten der Verschiebevektoren der Punkte am Hangfuß überlagert. Man erkennt deutlich, dass die Größenordnung der Bewegung dieselbe ist. Die Vertikalkomponenten sind im Gegensatz dazu, nicht vergleichbar, da es sich bei den Bewegungen am Hangfuß um eine Hebung und bei der Bewegung der GPS Station um eine Senkung handelt. Dieses Resultat lässt sich durch die Topographie des Hanges erklären.

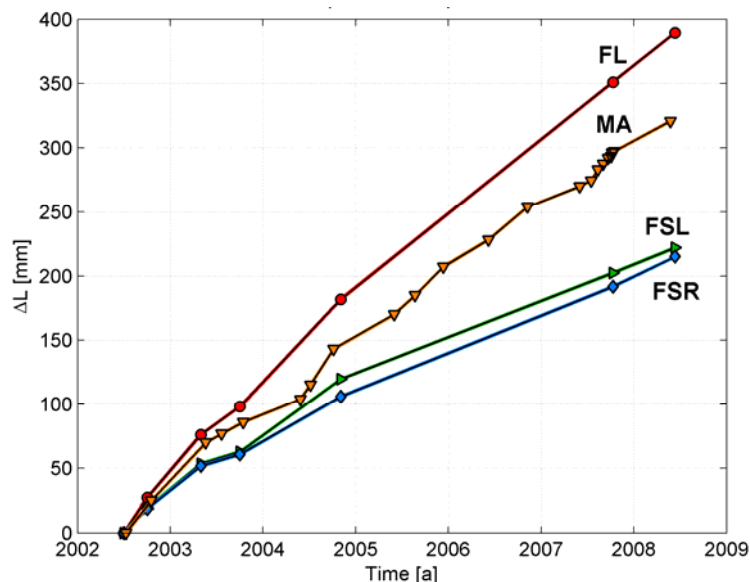


Abb. 5-7: Zeitliche Entwicklung der Horizontalkomponente des Verschiebevektors der Punkte am Hangfuß überlagert mit jener der GPS-Station MA

Die ähnlichen Bewegungsvektoren der GPS Station MA und des Hangfußpunktes FL sind weiters ein Hinweis dafür, dass die gewählten Anschlusspunkte für die terrestrische Hangfußüberwachung am Gegenhang wirklich stabil sind. Da der Verschiebevektor der

Station MA nicht größer ist, als jener von FL, kann angenommen werden, dass sich der Gegenhang nicht mit der Rutschung mitbewegt.

Eine aktuelle Analyse der Bewegungen am Hangfuß wurde in Form einer Untersuchung der Extensometerdaten in Kapitel 6.4 durchgeführt.

5.4 Lokales Deformationsnetz

5.4.1 Nullmessung

Im Zuge der Messungen mit der Strain-Rosette am Rutschhang Gradenbach im Juli 2007 (siehe Kapitel 4.3.4) wurde ein terrestrisches Überwachungsnetz im Bereich der Rosette angelegt, um eventuelle lokale Verformungen in der unmittelbaren Umgebung der Rosette feststellen zu können. Diese Verformungen sollten sich in den Daten der SOFO Sensoren der Rosette widerspiegeln, sodass – genügend große Bewegungen vorausgesetzt – die terrestrischen Messungen zumindest als grobe Überprüfung der SOFO Messungen dienen können.

Die Auswahl der Netzpunkte erfolgte am 16. Juli 2007 vor Ort unter Berücksichtigung der folgenden Rahmenbedingungen:

- Erfassung des Gebietes um die Strain Rosette
- Sicherheit der Punktlage
- Visuren zwischen den Netzpunkten
- Anschlussvisuren zu den mit GPS-Empfängern besetzten Punkten MB und ZR

Die unter diesen Rahmenbedingungen gewählten Punkte sind in Abb. 5-8 eingetragen.

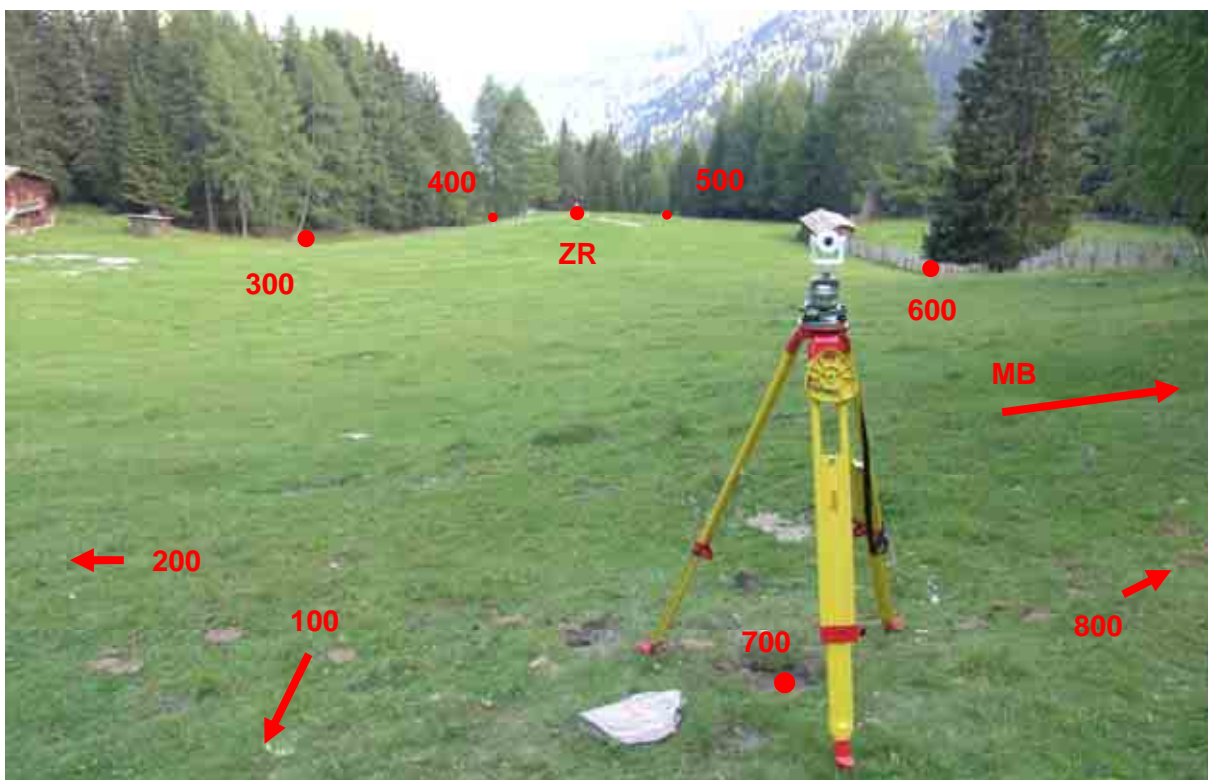


Abb. 5-8: Ansicht des Hangs im Bereich der Strain Rosette mit Netzpunkten

In der Umgebung des Zentrumspunktes der Strain Rosette (ZR) liegen die Punkte 300, 400, 500 und 600, wobei die Punkte 400 bzw. 500 unterhalb und 300 bzw. 600 oberhalb der Rosette stabilisiert wurden. Die Punkte 100, 200 und 700 liegen deutlich oberhalb des Gebietes der Strain Rosette. Punkt 800 befindet sich nicht im unmittelbaren Bereich der Rosette. Er dient der Herstellung des Messungsanschlusses zum GPS-Punkt MB.

Für die Netzmessung wurde die institutseigene Totalstation Zeiss Elta S10 (S.-Nr. 113384) verwendet. Die Messung des Netzes erfolgte am 17. Juli 2007 durch jeweils vier vollständige Sätze (Richtungen, Zenitwinkel, Schrägstrecken) auf den Punkten 400, 500, 700 und 800. Die Punkte MB und ZR konnten nicht als Standpunkte verwendet werden, da zeitgleich GPS Antennen aufgebaut waren. Die Verwendung der Netzpunkte 100, 200, 300 und 600 als Standpunkte konnte aus Zeitgründen nicht erfolgen. Jene Punkte, die nicht als Standpunkte dienten, wurden von mindestens zwei, meist jedoch von drei oder vier Standpunkten aus eingemessen. Zusätzlich zu den Netzpunkten wurden, die sofern beobachtbaren Fernziele mitgemessen, um später die Berechnung von Näherungskoordinaten zu erleichtern. Die Auswertung der Nullmessung wurde mit dem geodätischen Softwarepaket Geosi 6.0 durchgeführt. Abb. 5-9 zeigt die Lage der Netzpunkte (Screenshot aus dem Auswerteprogramm GeoNET).

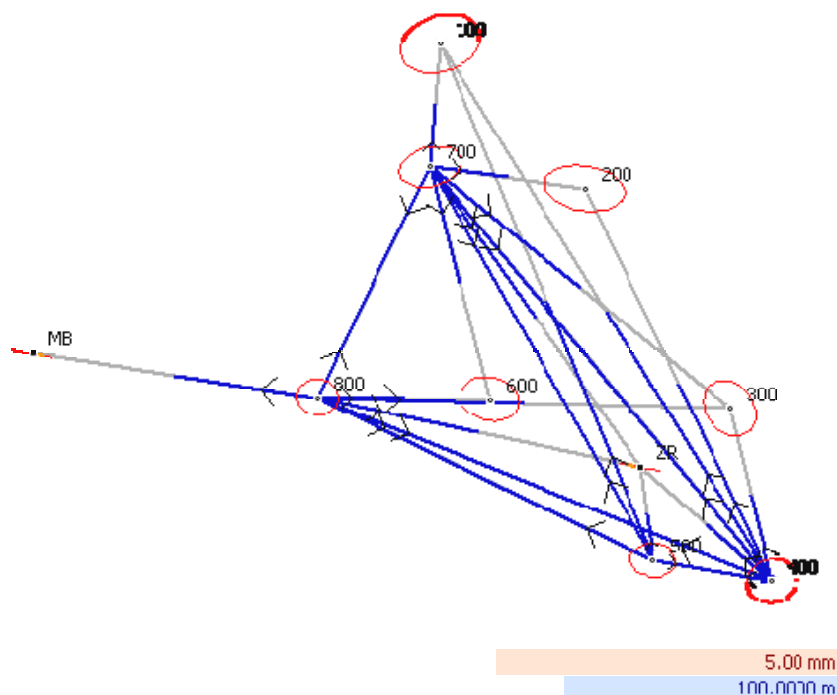


Abb. 5-9: Netzübersicht Lage (Geosi Screenshot)

Die Präzision des Lagenetzes erreicht Werte kleiner als 0.6 mm (1σ), jene des Höhennetzes weist Standardabweichungen kleiner als 1.1 mm (1σ) auf. Details zur Auswertung der Präzisionsnetzmessung können dem internen Technischen Bericht ISDR 2007/11 entnommen werden.

Im Fall einer Wiederholungsmessung können mit den erreichten Präzisionen Deformationen in der Lage von größer als 1 mm (1σ) detektiert werden. Treten unterschiedliche Deformationsbeträge in den einzelnen Netzpunkten auf, ist es wahrscheinlich, dass sich diese Deformationen auch in den SOFO Daten widerspiegeln werden.

5.4.2 Erste Folgemessung im Juni 2008

Die Messung des Netzes erfolgte am 10. Juni 2008 durch jeweils mindestens fünf vollständige Sätze (Richtungen, Zenitwinkel, Schrägstrecken) in den Punkten 400, 500, 700, 800 und ZR. Die Verwendung der Netzpunkte 100, 200, 300 und 600 als Standpunkte konnte aus Zeitgründen nicht erfolgen (die gesamte Messdauer war auf einen Tag limitiert). Jene Punkte, die nicht als Standpunkte dienten, wurden von mindestens zwei, meist jedoch von drei oder mehr Standpunkten aus eingemessen.

Die Auswertung der Messungen wurde mit dem geodätischen Softwarepaket Geosi 6.0 (Version 2.0.5) und dem darin enthaltenen Netzausgleichspaket GeoNET durchgeführt. Als Koordinatensystem wurde analog zur Nullmessung das System der österreichischen Landesvermessung (MGI, Gauß-Krüger-Abbildung, Bezugsmeridian M31) gewählt, die Höhen wurden als Gebrauchshöhen (orthometrische Höhen) festgelegt.

Die Höhennetzberechnung aus trigonometrischen Höhenunterschieden (berechnet aus Zenitwinkeln und meteorologisch reduzierten Schrägstrecken) wurde vor der Lagenetz auswertung vorgenommen, um für sämtliche Netzpunkte Höhen für die Lagenetzberechnung notwendigen geometrischen Reduktionen zu erhalten. Da in den Punkthöhen die mit einem Rollmeter gemessenen Instrumentenhöhen enthalten sind, weisen die Höhen der Punkte eine schlechtere Präzision auf als die Lagekoordinaten. Die Präzision der Höhen der Netzpunkte bei dieser freien Ausgleichung bewegt sich zwischen 0.5 und 0.9 mm.

Das Lagenetz wurde wie das Höhennetz auf den nach MGI transformierten GPS-Koordinaten der Punkte MB und ZR frei gelagert. Sämtliche Richtungsbeobachtungen zu den Fernzielen 180-180T1 und R2 wurden aus der Ausgleichung entfernt, da sie die weitaus größten normierten Verbesserungen aufwiesen. Nach Elimination dieser Beobachtungen und jener Messungen, die bei der automatischen Zielerfassung Probleme bereiteten, konnte eine Präzision in den Lagekoordinaten von 0.1 bis 0.4 mm erzielt werden.

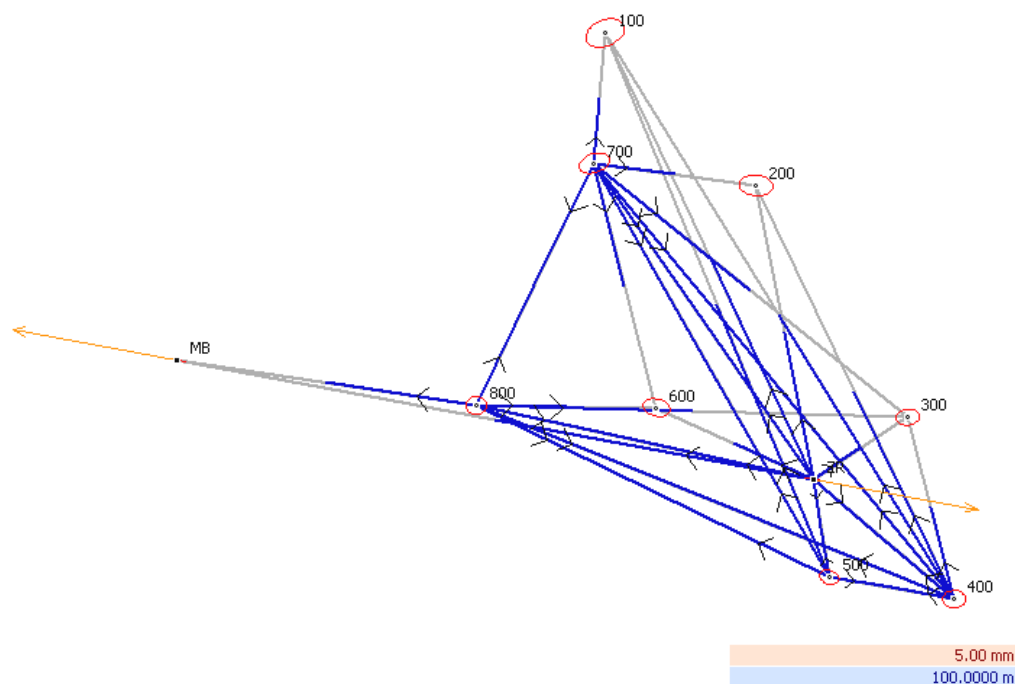


Abb. 5-10: Netzübersicht Lage (Geosi Screenshot)

Details zur Auswertung der Präzisionsnetzmessung können dem internen Technischen Bericht ISDR 2008/8 entnommen werden.

5.4.3 Deformationsanalyse

Voraussetzung für eine Deformationsanalyse ist, dass die Netze in den verschiedenen Epochen jeweils (1) zwangsfrei ausgeglichen wurden und (2) in einem gemeinsamen Datum vorliegen (Niemeier 2002, Kapitel 12). Die Zwangsfreiheit wurde bei der Berechnung dadurch erreicht, dass die Punkte MB und ZR als Datumspunkte („Passpunkte“) eingeführt wurden. Das gemeinsame Datum wird in beiden Epochen (07/2007 und 06/2008) jeweils durch die Punkte MB und ZR definiert, die – da sie ja wie die übrigen Netzpunkte im Rutschgebiet liegen – mittels GPS vom stabilen Referenzpunkt REF1 aus bestimmt wurden.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Voraussetzungen wurde eine MATLAB Routine zur Deformationsanalyse erstellt. Die Routine berechnet zum einen die Absolutverschiebungen zwischen beiden Epochen, zum anderen auch die für den Vergleich mit den Daten der Strain Rosette wichtigeren Relativverschiebungen in Bezug auf einen definierten Punkt (z.B. ZR, Zentrum der Strain Rosette) und beurteilt die Signifikanz der Deformationsgrößen. Die entsprechend visualisierten Verschiebungen für die Lagekoordinaten sind in Abb. 5-11 a) und b) dargestellt.

Die Absolutverschiebungen zwischen Juli 2007 und Juni 2008 betragen durchschnittlich +40 mm in y-Richtung und -60 mm in x-Richtung und spiegeln die mittels GPS ermittelten Verschiebungsvektoren wider. Die numerischen Werte der Verschiebungen in Lage und Höhe für jeden Netzpunkt inklusive Signifikanztests (95%) können dem Anhang entnommen werden. In den folgenden Abbildungen zeigt der schwarze Punkt die Position bei der Nullmessung (07/2007), das freie Ende des Verschiebungsvektors gibt die aktuelle Punktlage (06/2008) wieder.

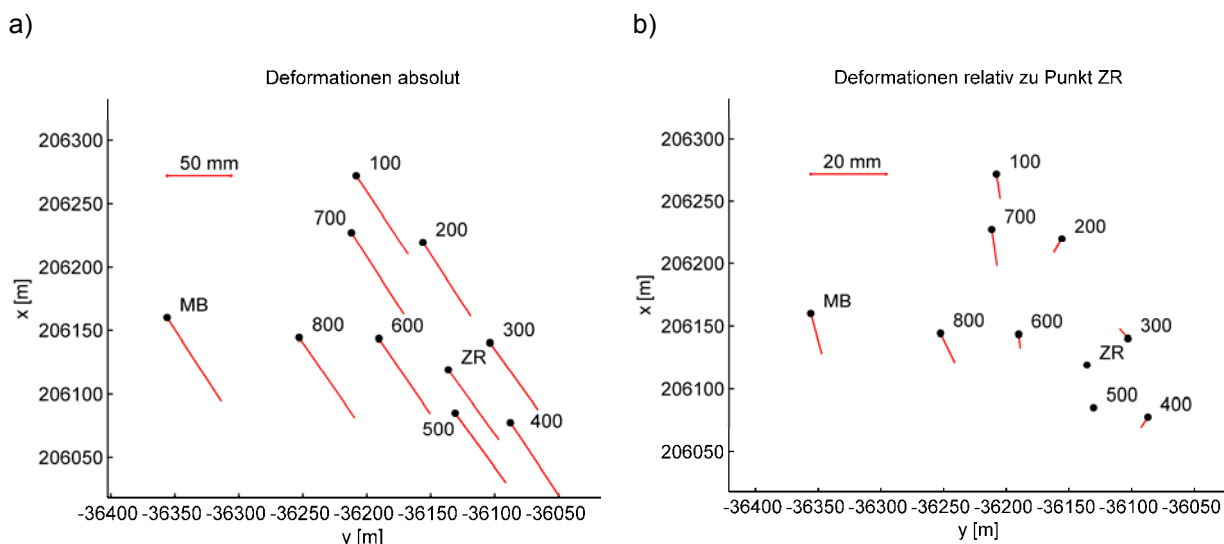


Abb. 5-11: a) Absolutverschiebungen der Netzpunkte zwischen 07/2007 und 06/2008 und b) Relativverschiebungen der Netzpunkte in Bezug auf den Punkt ZR

Subtrahiert man von allen Punkten den Verschiebungsvektor des Punktes ZR, erhält man Verschiebungen relativ zum Mittelpunkt der Strain Rosette. Diese Vektoren können für einen groben Plausibilitätstest der SOFO Daten herangezogen werden, da mit Hilfe der Strain Rosette ebenfalls Relativverschiebungen in Bezug auf ZR gemessen werden. Die in unmittelbarer Umgebung der Rosette gelegenen Punkte 300, 400, 500 und 600 weisen

Deformationen zwischen 0.4 und -2.2 mm in y-Richtung und 2.6 und -3.7 mm in x-Richtung auf.

Auffällig bei den Deformationen in der Höhe ist der Punkt 800: er macht scheinbar eine Hebung durch, was jedoch auf einem sich talwärts bewegenden Rutschhang unmöglich ist. Die Ursache für die scheinbare Hebung dieses Punktes, der eigentlich nur den Anschluss der Messungen an die Punkte MB und ZR gewährleisten soll, liegt in der vor Ort beobachteten Hebung der Stabilisierung (Eisenrohr).

Nicht das gesamte Gebiet im Bereich der Strain Rosette weist derart geringe relative Verschiebungen auf wie der Bereich um ZR. Zwischen den Punkten 100, 200 und 700 beispielsweise würden sich größere relative Bewegungsunterschiede ergeben. In diesem Bereich war auch ursprünglich der Standort der Rosette geplant (Woschitz H, persönliche Mitteilung vom 10.06.2008), doch der Verantwortliche der Eigentümergemeinschaft stimmte diesem Standort nicht zu.

6 Weitere abgeschlossene Untersuchungen aus ISDR-21

6.1 Untersuchung zu azimutabhängigen Elevationsschranken

Bei Überwachungsmessungen mit GPS ist die Ablenkung der Signale durch Objekte in der Umgebung der GPS-Station ein kritischer Punkt. Neben lokalen Störobjekten wie Bäume oder Büsche, können auch weit entfernte Objekte wie z.B. Berge zu Beugungseffekten führen, die die Signalqualität mindern. Es wurden mehrere Lösungsansätze untersucht, um diesen Effekt zu minimieren (Klostius et al., 2006).

6.1.1 Datenverarbeitung

Um diese Effekte zu untersuchen, wurden Daten der GPS-Kampagne „Gradenbach“ vom Dezember 2005 verwendet. Untersucht wurde ein 24 Stunden Datensatz der Basislinie R2 und MB. Details über die Messungen sind dem technischen Bericht ISDR 2005-16 zu entnehmen.

Für die Untersuchungen wurden doppeldifferenzierte „observed-minus-computed“ (OC) Werte mit der institutseigenen Software KF_Run berechnet. Für die Auswertung wurden drei verschiedene Varianzmodelle verwendet. Das einfachste Modell (1) setzt gleiche Varianzen für alle Beobachtungen an (ID), das Modell (2) setzt die Varianzen elevationsabhängig an, und das Modell (3) ist das am Institut entwickelte SIGMA- ϵ Varianzmodell (EPS). Die berechneten Varianzen des SIGMA- ϵ Modells der undifferenzierten Beobachtungen sind eine Funktion des gemessenen C/N0 Wertes (Signal-Rausch-Verhältnis) und einer Konstanten C, die vom verwendeten GPS Equipment abhängt.

6.1.2 Ergebnisse

Abb. 6-1 zeigt einen typischen Beugungseffekt, wenn ein Satellit hinter einem Berg untergeht. Die obere Grafik zeigt die Elevation des Satelliten PRN18 in rot und des Referenzsatelliten PRN29 in blau in einem Zeitfenster von 30 min. In der mittleren Grafik sind die C/N0 Werte für beide Satelliten an der Roverstation MB abgebildet, und die untere Grafik zeigt die berechneten OC Werte. Die C/N0 Werte für den Satelliten PRN18 zeigen einen Abfall im C/N0 von 12 dBHz innerhalb von 3 Minuten, die OC Werte zeigen entsprechend im gleichen Zeitfenster einen Anstieg auf etwa 5 cm, bis der Satellit schließlich hinter dem Berg untergeht.

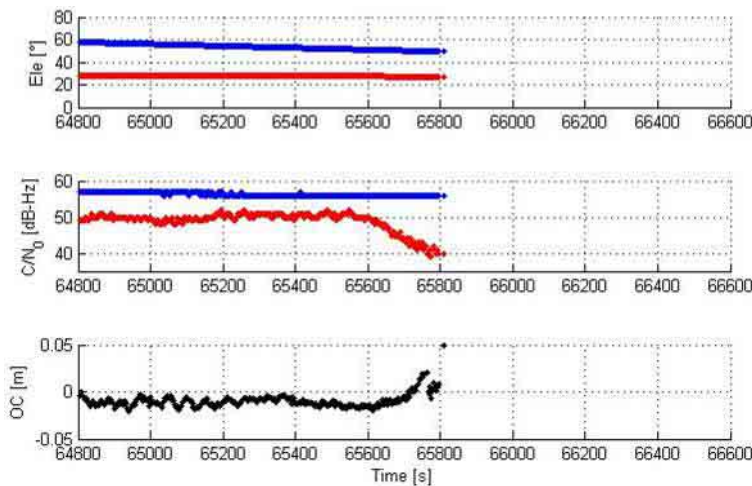


Abb. 6-1: Elevation, C/N₀ (Station MB) und OC Werte für Satellit PRN18 (Rot)

Die dazugehörige Koordinatenlösung für dieses Zeitfenster weist, bei einer Elevationsschranke von 15°, Fehler bis zu 2 cm in der Horizontalen und 7 cm in der Höhe auf. Erhöht man nun die Elevationsschranke auf 30°, beeinflussen die gestörten Beobachtungen das Ergebnis nicht mehr, da alle Hindernisse in der Umgebung niedriger sind als die gewählte Elevationsschranke. Dabei gehen jedoch 30% der aufgezeichneten Beobachtungen verloren, wodurch sich die Geometrie dramatisch verschlechtert. Abb. 6-2 zeigt die Koordinatenlösung der gesamten 24 h Session für verschiedene Elevationsschranken und für die drei vorgestellten Varianzmodelle. Bei einem cut-off Winkel von 30° ergeben sich Koordinatenfehler bis zu 1 m. Auch eine Elevationsschranke von 15° führt zu einer Verschlechterung der Ergebnisse, verglichen mit der Lösung mit einem Winkel von 5°. Abb. 6-2 d) zeigt die Koordinatenlösung bei Verwendung einer azimutabhängigen Elevationsschranke. Dieser „elektronische Horizont“ wird durch die Analyse der Satellitenbahnen und ihren Auf- und Untergängen für jede Station bestimmt, wobei das Trackingverhalten des Empfängers bei auf- und untergehenden Satelliten unterschiedlich ist. Es kann gezeigt werden, dass die Signale, die durch den Berggrat gestört werden, nicht mehr Teil der Lösung sind. Da diese Effekte in einer 24 Stunden Session nicht sehr oft auftreten, können in der 24 Stunden Lösung nur geringe Unterschiede zwischen der Lösung c) und d) festgestellt werden.

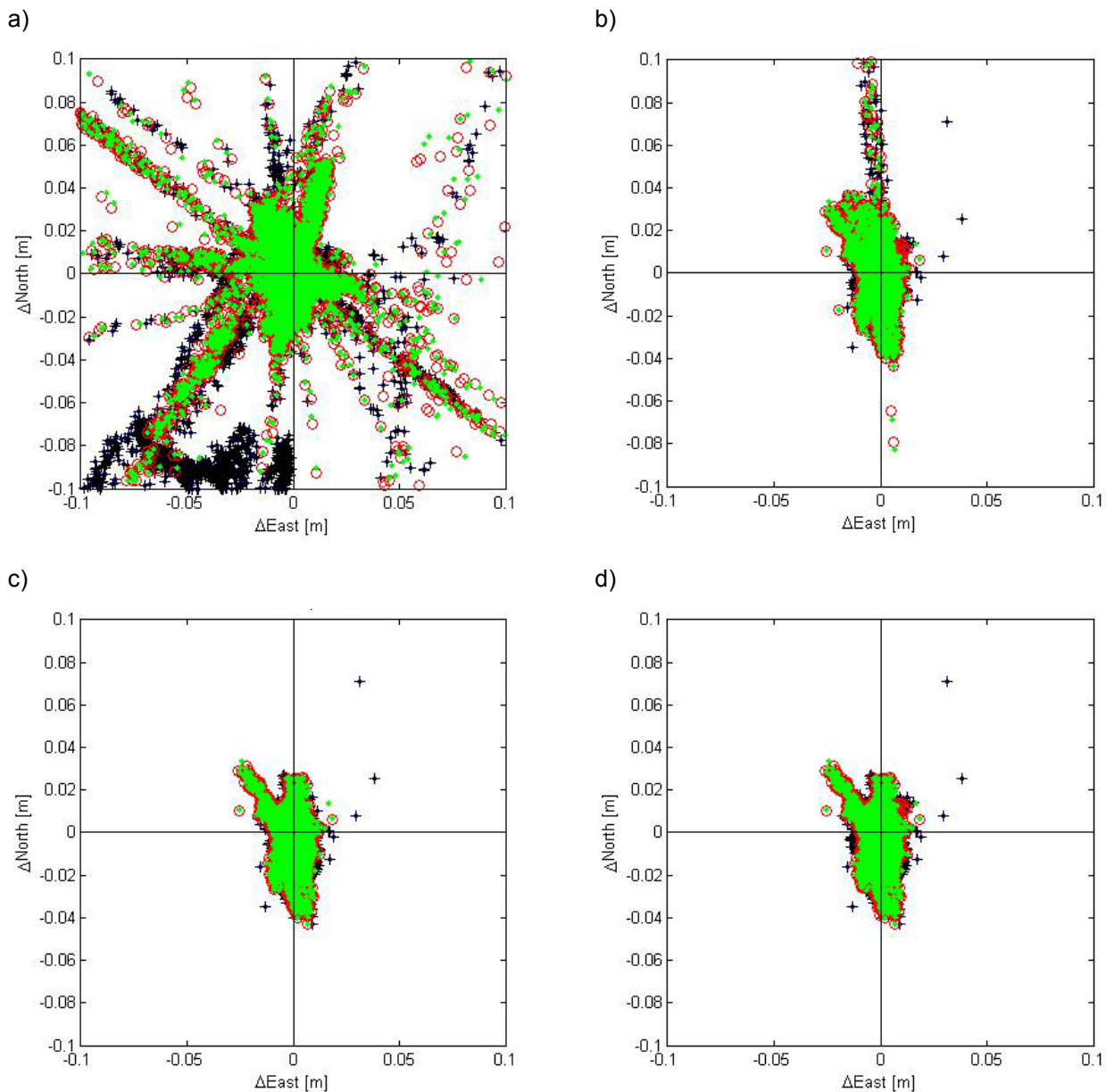


Abb. 6-2: Nord- und Ostabweichungen der geschätzten Koordinaten von der Referenzlösung für die drei verschiedenen Varianzmodelle. Elevationsmaske: (a) 30°, (b) 15°, (c) 5°, (d) azimutabhängig. Varianzmodell: ID: +, ELE: ●, EPS: ●

Eine Alternative zum Einsatz einer azimutabhängigen Elevationsmaske ist die Verwendung eines Varianzmodells, welches die gestörten Signale erkennen und ihren Einfluss auf die geschätzten Koordinaten verringern kann.

Die 24 Stunden Lösung in Abb. 6-2 zeigt, dass das SIGMA- ϵ Varianzmodell (3) generell bessere Ergebnisse als das elevationsabhängige Modell (2), und signifikant bessere als das ID Varianzmodell (1) liefert. Die Lösungen mit dem SIGMA- ϵ Varianzmodell verglichen mit einer azimutabhängigen Elevationsmaske liefern in etwa die gleichen Ergebnisse.

6.1.3 Zusammenfassung

Geodätische GPS-Empfänger können Satellitensignale auch noch empfangen, wenn sich der Satellit schon unter dem physikalischen Horizont befindet. Dadurch entsteht ein Abfall in

der Signalstärke und ein Bias in den Beobachtungen. Es konnte gezeigt werden, dass diese Bias - Werte bis zu 7 cm erreichen können, und der Abfall in der Signalstärke 10-12 dB betragen kann.

Die Ergebnisse der kinematisch bestimmten Koordinaten zeigten Fehler im Zentimeterbereich, wenn der Beugungseffekt nicht berücksichtigt wird. Bei einer hohen Elevationsmaske wird die Geometrie so stark verschlechtert, dass die Lösung für Monitoringaufgaben unbrauchbar wird.

Es konnte gezeigt werden, dass die Beugungseffekte durch den Einsatz einer azimutabhängigen Elevationsmaske oder durch das SIGMA- ϵ Modell reduziert werden können. Über Details zu der Untersuchung berichten Klostius et al. (2006).

6.2 Korrelationen zwischen GPS Phasenbeobachtungen

Physikalische Korrelationen zwischen GPS Phasenbeobachtungen werden bei der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen von den GPS Satelliten durch die Atmosphäre zum Empfänger erzeugt. In den gängigen GPS Auswertemodellen und Software-Paketen werden physikalische Korrelationen nicht berücksichtigt. Somit werden die geschätzten Parameter (beispielsweise Punktkoordinaten) verfälscht und zu optimistische Genauigkeitsmaße für die Koordinaten erhalten. Dadurch ist der Einsatz statistischer Methoden, dem Standardverfahren der Deformationsanalyse zur Aufdeckung realer Deformationen, nur beschränkt möglich.

Zwei wesentliche Zielrichtungen bestimmen unsere Untersuchungen. Zum einen wurde mit Hilfe von Strukturfunktionen untersucht, inwieweit sich turbulente Fluktuationen des Brechungsindex in der Troposphäre in den GPS Daten widerspiegeln. Zum anderen wurden mit Ansätzen der Turbulenztheorie vollbesetzte Varianz-Kovarianz-Matrizen (VKM) für doppelt differenzierte GPS Phasenmessungen (DD) entwickelt.

Für den experimentellen Test des neuen VKM Modells wurde schon im Jahr 2003 ein spezielles GPS Testnetz vermessen (mit finanzieller Unterstützung durch das ISDR Projekt). Es wurden 6 GPS Stationen in verschiedenen Abständen auf einer Geraden positioniert. Um den Einfluss der Topographie gering zu halten, wurde für das Testnetz der flachste Teil des Gebietes „Seewinkel“ ausgewählt. Das eher überraschende Resultat ist, dass die geostrophische Windgeschwindigkeit ein wesentlicher Parameter für die korrekte Modellierung der Korrelationen der GPS Phasenmessungen ist.

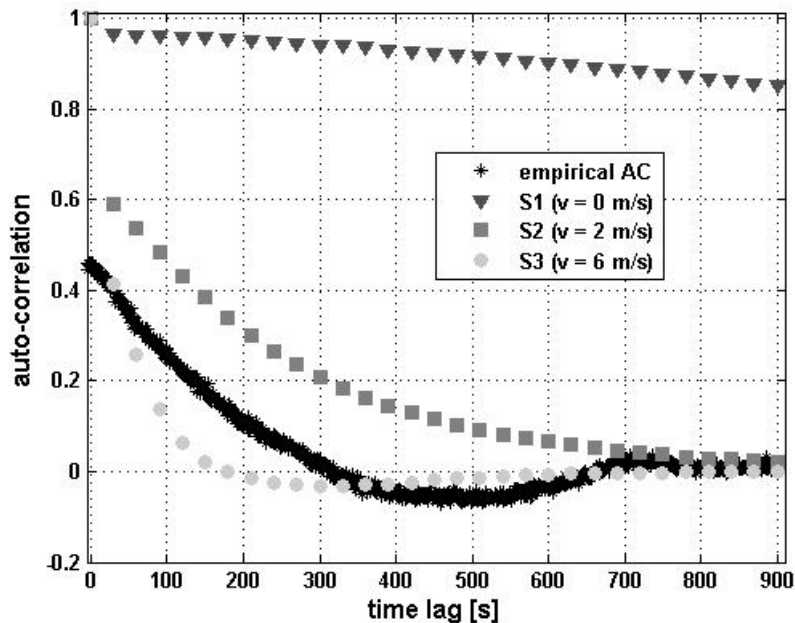


Abb. 6-3: Standardisierte Autokorrelationsfunktion für die GPS DD Zeitreihe einer 2 km Basislinie, Turbulenzansatz mit drei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

Abb. 6-3 zeigt die aus den tatsächlichen DD Messdaten berechnete Autokorrelationsfunktion im Vergleich zu drei theoretisch berechneten Autokorrelationsfunktionen, die sich durch drei verschiedene (0, 2 und 6 m/s) Windgeschwindigkeiten unterscheiden. In allen bisher bekannten Untersuchungen wurde die Windgeschwindigkeit nicht beachtet. Dagegen zeigt Abb. 6-3 – und alle anderen Resultate ergeben ähnliche Bilder – ganz klar, dass erst die Verwendung einer Windgeschwindigkeit von ungefähr 6 m/s die experimentell bestimmte Autokorrelationsfunktion korrekt modellieren kann.

Die Untersuchungen sind abgeschlossen und es wird darüber in drei Veröffentlichungen berichtet werden: Schön und Brunner (2007) und Schön und Brunner (2008). Für die dritte Arbeit sollen alle Daten der sechs GPS Stationen des Experiments „Seewinkel“ neu ausgewertet werden, wobei auch ein meteorologisches Prädiktionsmodell für die geostrophische Windgeschwindigkeit verwendet werden soll.

6.3 Digitaler Geologenkompass

Für die effiziente geotechnische Feldaufnahme wurden neue Verfahren untersucht. Das Kernelement ist ein neuer (digitaler) Sensor für die Messung der Einfallrichtung und des Fallwinkels von Strukturen und Schichten. Ein erstes Versuchsmuster wurde gebaut, und die ersten Testmessungen wurden durchgeführt.

Die räumliche Orientierung einer geologischen Struktur ist im allgemeinen durch ihre Neigung ϑ ($0 \leq \vartheta \leq 90^\circ$) und ihr magnetisches Azimut α ($0 \leq \alpha \leq 360^\circ$) bestimmt. Diese wird heute meistens mit einem Geologenkompass bestimmt. Der Kompass verfügt über eine kleine Testfläche, die an die geologische Struktur gehalten wird. Der Kompass wird dann über eine Dosenlibelle horizontalisiert und das Azimut mit einem Magnetkompass gemessen. Die Genauigkeit der Messungen hängt von der Güte der Horizontalisierung ab, die wenn sie exakt durchgeführt werden soll beide Hände des Geologen benötigt. Neben der manuellen Horizontalisierung ist auch die visuelle Ablesung der Messdaten eine Fehlerquelle. Die Präzision

der Messungen mit einem herkömmlichen Geologenkompass kann mit etwa 2° angegeben werden.

Im Vergleich dazu konnten bei dem neu entwickelten digitalen Geologenkompass (DiGC) viele Probleme eliminiert werden. Der neue DiGC verwendet noch immer die oben erwähnte Testfläche, jedoch muss er nicht mehr horizontiert werden (siehe Abb. 6-4). Das Azimut wird mit einem digitalen magnetischen Kompass und die Neigung über die Beschleunigungskomponenten bestimmt.

Das verwendete Equipment für erste Tests war ein Xsens Motion Tracker (MT9-A) der Firma Xsens Technologies, der aus drei Beschleunigungsmessern, drei Magnetometern, drei Winkelgeschwindigkeitssensoren und einem Temperatursensor besteht. Mehrere Test wurden im Labor und im Feld durchgeführt, um die Tauglichkeit des DiGC zu überprüfen (siehe Abb. 6-5), wobei sich zeigte, dass die Kalibrierung des DiGC besonders kritisch ist, Zobl et al.(2007).



Abb. 6-4: Vergleichbare Messung eines herkömmlichen Geologenkompass mit dem neuen Sensor

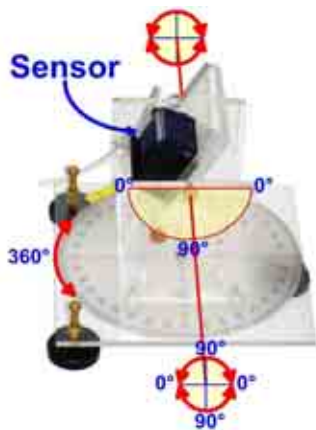


Abb. 6-5: Montagegestell für die Kalibrierung

6.4 Geologisches Modell

Um den Mechanismus der Massenbewegung zu erforschen, werden alle erhobenen und vorhandenen Daten, basierend auf dem Fernerkundungsmodell, dem geologischen Untergrundmodell, und dem Deformations- bzw. Bewegungsmodell analysiert und modelliert. Das Bewegungsmodell kann mit den sehr genauen geodätischen Messungen „kalibriert“

werden, wobei wichtige Informationen aus der Analyse der kontinuierlichen GPS Messungen vorliegen. Die endgültigen Resultate sollten bis Ende 2008 vorliegen.

6.5 Mehrwegeeffekte

Zur Lösung des schwierigen Multipatheffektes bei GPS Messungen sollten im Rahmen einer Disseratation (North-South Dialog Scholarship) mehrere Modelle untersucht werden. Die Kandidatin hat allerdings ihre Studien im Mai 2007 abgebrochen. Es wurde wegen Personalmangels und der Konzentration auf die Entwicklung der Strain-Rosette und die Auswertung der bereits ausgeführten kontinuierlichen GPS Messungen entschieden, die Untersuchung des Multipatheffektes nicht weiter fortzuführen.

6.6 Low-Cost-GPS

Während der letzten Jahre wurden für Anwendungen im Navigations- und Freizeitbereich besonders günstige (einige 100 USD), kleine und stromsparende (einige 100 mW) GPS-Empfänger entwickelt. Solche "low-cost" Empfänger könnten längerfristig ermöglichen, die Hardware-Kosten pro CODMS-Station deutlich zu senken.

In einer Masterarbeit (Lanzendörfer, 2007) wurden versuchsweise zwei low-cost GPS-Empfänger (u-blox AEK-4T) in das CODMS am Gradenbach integriert. Diese Einfrequenz-Empfänger geben Trägerphasenmessungen aus und sind daher potentiell für die vorliegende Anwendung geeignet. Die Auswertung der Messdaten von zwei Perioden (10.–17.8.2006, 7.–10.11.2006) zeigte, dass die AEK-4T Empfänger tatsächlich qualitative ähnliche Resultate liefern, wie die bisher verwendeten geodätischen Empfänger.

Als Beispiel sind hier die praktisch ungefilterten Zeitreihen der geschätzten Koordinaten von MD dargestellt (Abb. 16; die Datenlücken entsprechen Perioden während denen für eine epochenweise Analyse zu wenige Satelliten zur Verfügung standen). Visuell können kaum Unterschiede zwischen der Lösung mit einem geodätischen Empfänger (links) und mit einem low-cost Empfänger (rechts) auf MD festgestellt werden. Eine statistische Analyse zeigt, dass der low-cost Empfänger sogar geringfügig bessere Präzision und Genauigkeit liefert.

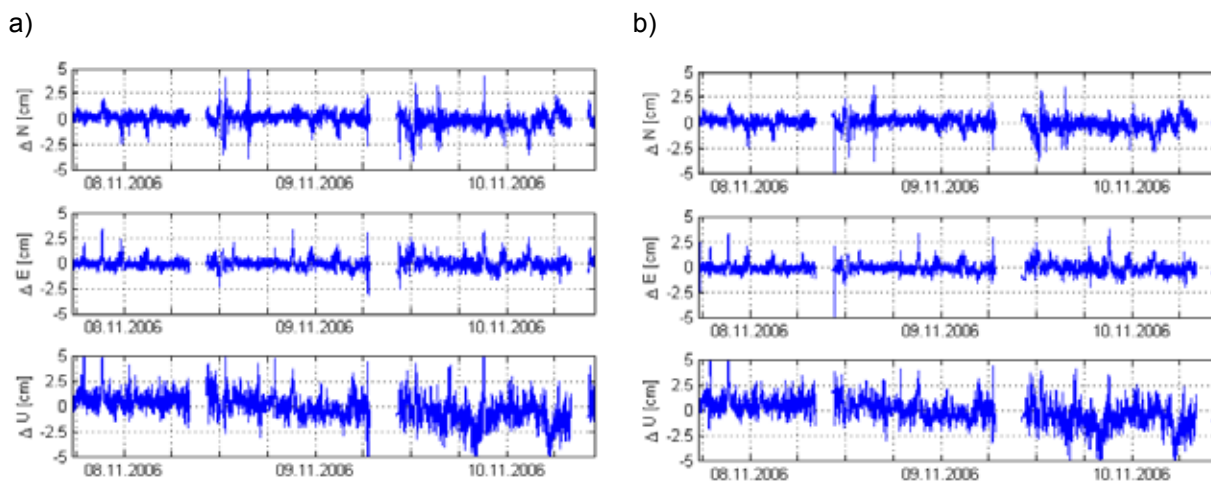


Abb. 6-6: Zeitreihen der geschätzten Koordinaten von MD (L1-Netzlösung mit REF2, MB und MD; Nord-, Ost- und Höhenabweichungen gegenüber Ergebnis der statischen Auswertung, siehe Kapitel 2.2.1; nur Ashtech-Empfänger (links), u-blox Empfänger statt Ashtech auf MD (rechts).

Im Zuge dieser Untersuchung wurde allerdings auch festgestellt, dass der hier verwendete low-cost Empfänger ein Firmware-Problem aufweist, welches die Trägerphasenmessungen etwa einmal pro Stunde für eine Minute unbrauchbar macht. Die betreffenden Zeiten sind leicht aus den Messdaten selbst erkennbar und wurden in der obigen Analyse bereits eliminiert. Die Herstellerfirma hat das Problem inzwischen gelöst.

Die Ergebnisse der Masterarbeit sind so überzeugend, dass geplant ist, zu untersuchen, ob sich die (teuren) Choke-Ring Antennen ohne merkliche Genauigkeitseinbußen durch einfache und kostengünstige Antennen ersetzen lassen.

6.7 Analyse der Niederschlagsdaten

Von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) in Klagenfurt wurden im Dezember 2007 die Niederschlagsdaten der Messstation Döllach der Jahre 1997-2007 angekauft. Es handelt sich um eine automatisierte Messstation welche vom ZAMG in Sagritz betrieben wird. Bei den angekauften Niederschlagsdaten handelt es sich um Monatssummen in mm (Liter/m²) von Januar 1997 bis November 2007.

Der Berchtoldhang (Rutschhang Gradenbach) ist als stark durchnässt einzustufen, die Hangbewegungen sind hochgradig vom Durchnässungsgrad und von den Niederschlägen sowie der hohen Infiltrationsrate abhängig. Nach der Ausführung von kombinierten Schutzmaßnahmen (Verbauungen, Entwässerungen und Aufforstungen) konnte eine Beruhigung der Talzuschubsbewegung erreicht werden (vgl. Kronfellner-Kraus, 1990).

Durch Beregnungsversuche im Sommer 1980 wurde aufgezeigt, dass Regen- und Schneeschmelzwässer rasch und fast zur Gänze im Kluftsystem des Hanges aufgenommen werden, ohne oberflächlich abflusswirksam zu sein (vgl. Kronfellner-Kraus u. Schaffhauser, 1984).

Der mittlere Jahresniederschlag im analysierten Zeitraum beträgt 838 mm. Die Jahresniederschlagssummen der vom FBVA (Forstliche Bundesversuchsanstalt Wien) publizierten Messdaten von 1970 bis 1996 liegen zwischen 1182 mm und 670 mm für eine ganzjährig betriebene Beobachtungsstation am Rutschhang, der mittlere Jahresniederschlag dieser Daten beträgt 929 mm (vgl. Lang und Hagen, 1999, S. 53).

Abb. 6-7 zeigt eine graphische Darstellung der Monatssummen (blau) und Jahressummen (rot) von 1997 bis 2007. Von 1998 bis 2000 ist ein Anstieg des Jahresniederschlags festzustellen, welcher schließlich mit 1129 mm im Jahr 2000 den Höhepunkt des gesamten Datensatzes erreicht. Das niederschlagsreichste Jahr zwischen 1970 und 1996 war das Jahr 1977 mit 1182 mm (vgl. Lang und Hagen, 1999, S. 13), also nur 53 mm mehr als der Jahresniederschlag im Jahr 2000. Auf das sehr niederschlagsreiche Jahr 2000 folgte mit lediglich 721 mm ein sehr niederschlagsarmes Jahr 2001. Dieses fällt zeitlich mit dem Übergang in eine langsame Kriechbewegung des Hanges zusammen. Ein Zusammenhang zwischen dem geringen Niederschlag im Jahr 2001 und einem Rückgang der Bewegung ist deshalb nicht auszuschließen.

Nicht immer führte die Häufung schwerer Niederschläge zu Hochwasserschadereignissen, beispielsweise Ende November und Anfang Dezember 1990 (vgl. Lang und Hagen, 1999, S. 18), ein Hinweis, dass nicht nur der Niederschlag allein sondern auch der vorhandene Durchfeuchtungsgrad beispielsweise auf Grund einer raschen Schneeschmelze und möglicherweise weitere unbekannte Faktoren den Hangwasserhaushalt beeinflussen und zu Hochwassersituationen führen (vgl. Lang und Hagen, 1999, S. 51). Die hohen Niederschläge im November 2002 haben zu keiner beschleunigten Hangbewegung geführt.

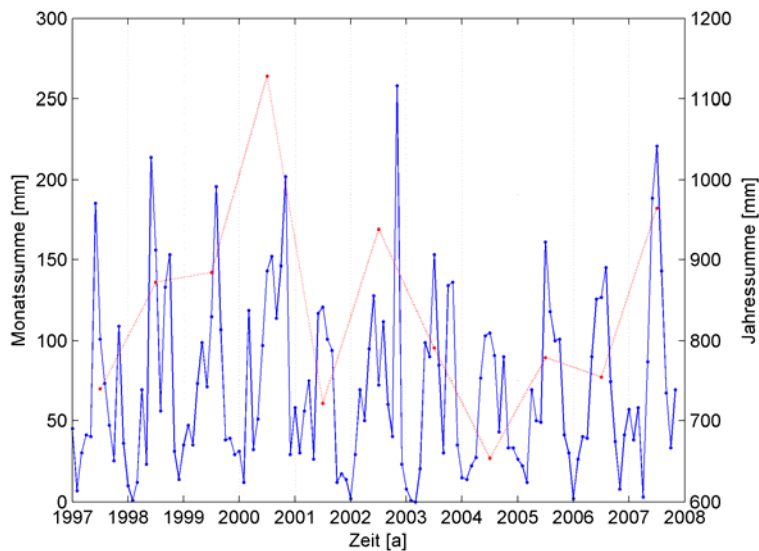


Abb. 6-7: Graphische Darstellung der Monatssummen (blau) und Jahressummen (rot) von 1997-2007

Die gemessenen Monatssummen wurden in ISDR 2007/18 zusammengestellt und diskutiert.

6.8 Vergleich der Extensometerdaten am Hangfuß mit den Verschiebevektoren der GPS-Monitoringstationen

6.8.1 Beschreibung des Messsystems

Bei den Drahtextensometermessungen werden keine orientierten Verschiebungsbeträge, sondern relative Distanzänderungen zwischen zwei Punkten aufgezeichnet (eindimensional). Als Verbindungsglied zwischen den beiden Punkten dient ein gespannter Invardraht. Die registrierten Längenänderungen sind somit geringer als die tatsächlichen, da die Richtung des Drahtes nicht exakt der Richtung des räumlichen Verschiebungsvektors folgen kann.

6.8.2 Anzahl und Lage der installierten Drahtextensometer

Die Drahtextensometer der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) sind in der Schluchtstrecke am Talausgang des Gradientales installiert. Auf der Talzuschubsseite ist der Draht fest verankert. Auf der gegenüberliegenden Seite werden die Längenänderungen registriert. Die Messungen haben 1972 begonnen und wurden bis jetzt - mit Unterbrechungen - aufrechterhalten. Von der Forstlichen Bundesversuchsanstalt (FBVA) wurden in den Jahren 1979 und 1980 zwei Drahtextensometer-Messstellen mit insgesamt vier Drähten für die Aufzeichnung des Zeit-Verschiebungs-Verhaltens des Gebirges an der Talzuschubsstirn zwischen der orographisch linken, instabilen Talflanke und der orographisch rechten, stabilen Talflanke installiert (siehe Abb. 6-8).

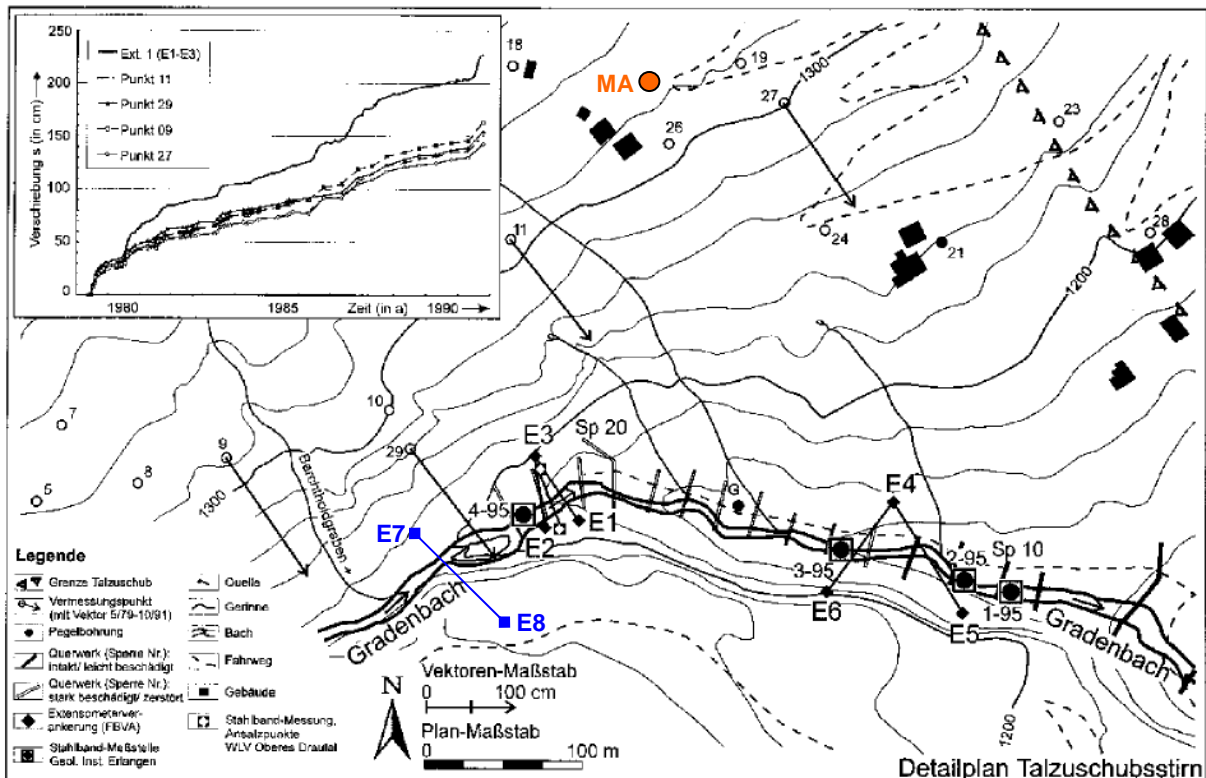


Abb. 6-8: Übersicht der installierten Drahtextensometer am Hangfuß des Rutschhangs Gradenbach (Weidner, 2000). Anm.: Das Extensometer E7-E8 wurde in dieser Abbildung ergänzt, die Verankerungspunkte sind nicht genau bekannt, da sie durch eine Rutschung 2007 zerstört wurden.

Bei zwei in Richtung der Hangbewegung angebrachten Messstrecken (E1-E3 und E4-E5) wurden die Bewegungen kontinuierlich mit SEBA-Bandschreibern aufgezeichnet. Die Messstellen E1-E2 und E4-E6 sind mit Linealen ausgestattet, um Kontrollmessungen zu ermöglichen und Messausfälle zu überbrücken (Weidner, 2000).

Aus den Extensometerdaten der Seile E1-E3 und E2-E3 (vgl. Abb. 6-9) wurde ein horizontaler Bewegungsvektor gerechnet. Genauere Details zur Auswertung sind in ISDR 2008/6 dokumentiert.

6.8.3 Ergebnisse der Analyse

In Abb. 6-9 wurden die Koordinaten des berechneten Bewegungsvektors überlagert mit einem lokalen Lageplan geplottet. Das Azimut des Bewegungsvektors entspricht jenem vom Extensometer E3-E1. Abb. 6-10 zeigt die Längenänderung des gerechneten Bewegungsvektors aus den Extensometerdaten überlagert mit der horizontalen Komponente der Verschiebevektoren der GPS-Monitoringstationen MA, MB, MC und MD. Die Zeitreihe des Punktes FL am Hangfuß verläuft im dargestellten Zeitraum deckungsgleich mit jener der Station MB, das heißt deren Bewegungsvektoren sind im gesamten beobachteten Zeitraum gleich lang. Ein sehr interessanter Punkt, wo doch bisher vermutet wurde, dass die Bewegungen am Hangfußpunkt geringer sind als in höheren Hanglagen und dazwischen „Stauchungen“ der rutschenden Massen auftreten. Auf dieser Vermutung basiert auch das Konzept der Strain-Rosette, welche diese Stauchungen auf einer kurzen Basis messbar machen soll. Nun zeigt jedoch ein gerechneter Bewegungsvektor am Hangfuß die gleiche Länge wie der Vektor der Station MB, kommt es nun doch zu keinen Stauchungen?

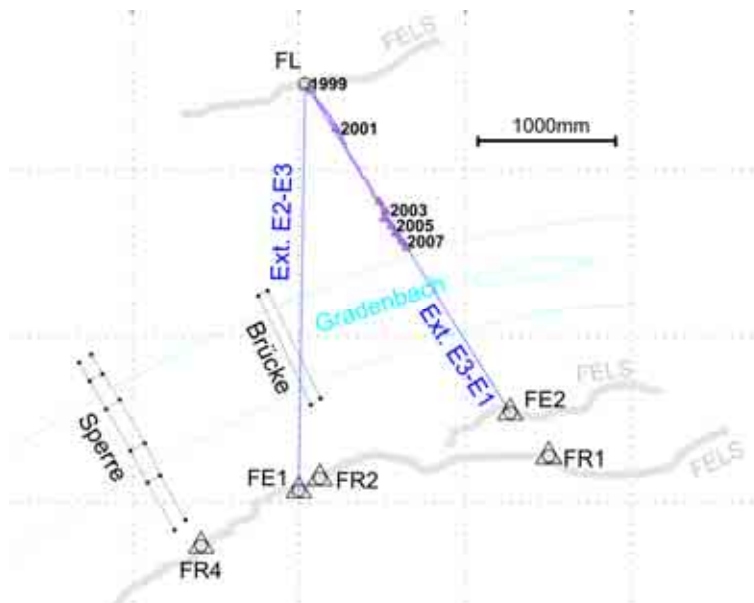


Abb. 6-9: Lageplan Extensometer E1-E3 und E2-E3, überlagert mit gerechnetem Bewegungsvektor aus den Seillängen beider Seile. Die Punkte FR1, FR2 und FR4 entstammen den terrestrischen Messungen am Hangfuß (siehe Kapitel 5.3)

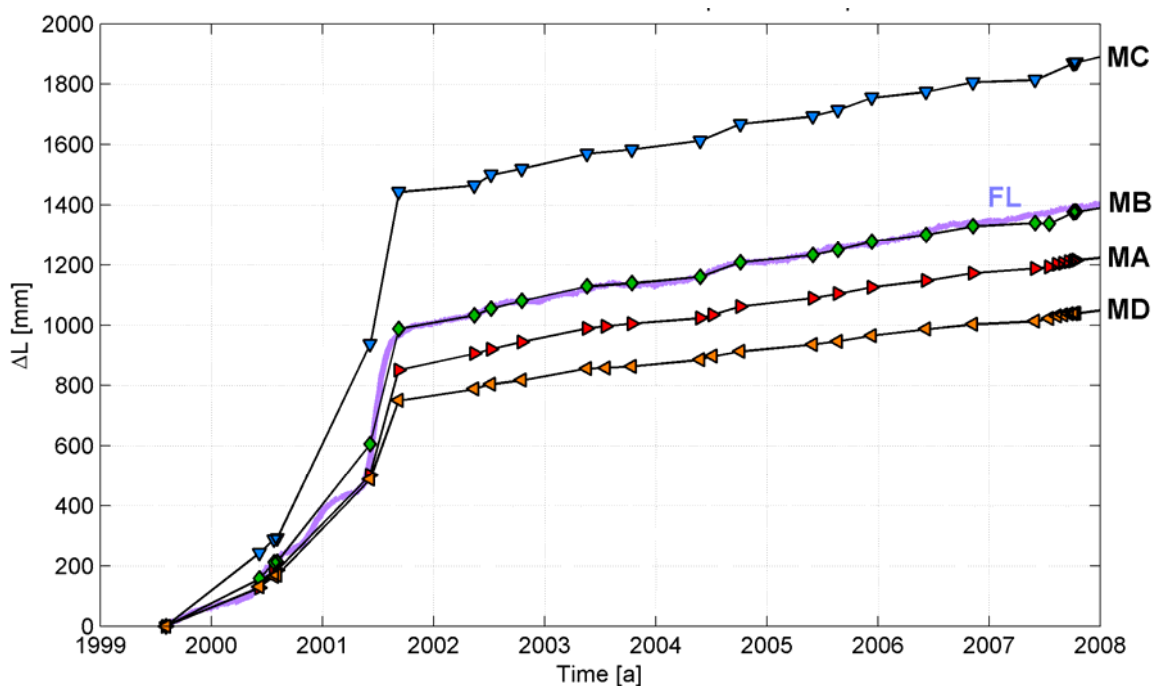


Abb. 6-10: Längenänderung des Bewegungsvektors der Extensometerdaten überlagert mit horizontaler Komponente der Verschiebevektoren der GPS-Monitoringstationen MA, MB, MC und MD von 1999 bis 2008.

Betrachten wir den Hang und die Verteilung der Punkte bzw. deren Bewegungsvektoren etwas genauer. Schneidet man den Hang beispielsweise entlang der Falllinie durch MB, dann kommen FL und MC auch darauf zu liegen (vgl. Abb. 6-11). Weiters liegt die Station MA in etwa in Verlängerung der Falllinie durch MD. MB, FL und MC weisen längere Bewegungsvektoren auf, MA und MD kürzere und die jeweiligen Falllinien bilden den gemeinsamen Nenner.

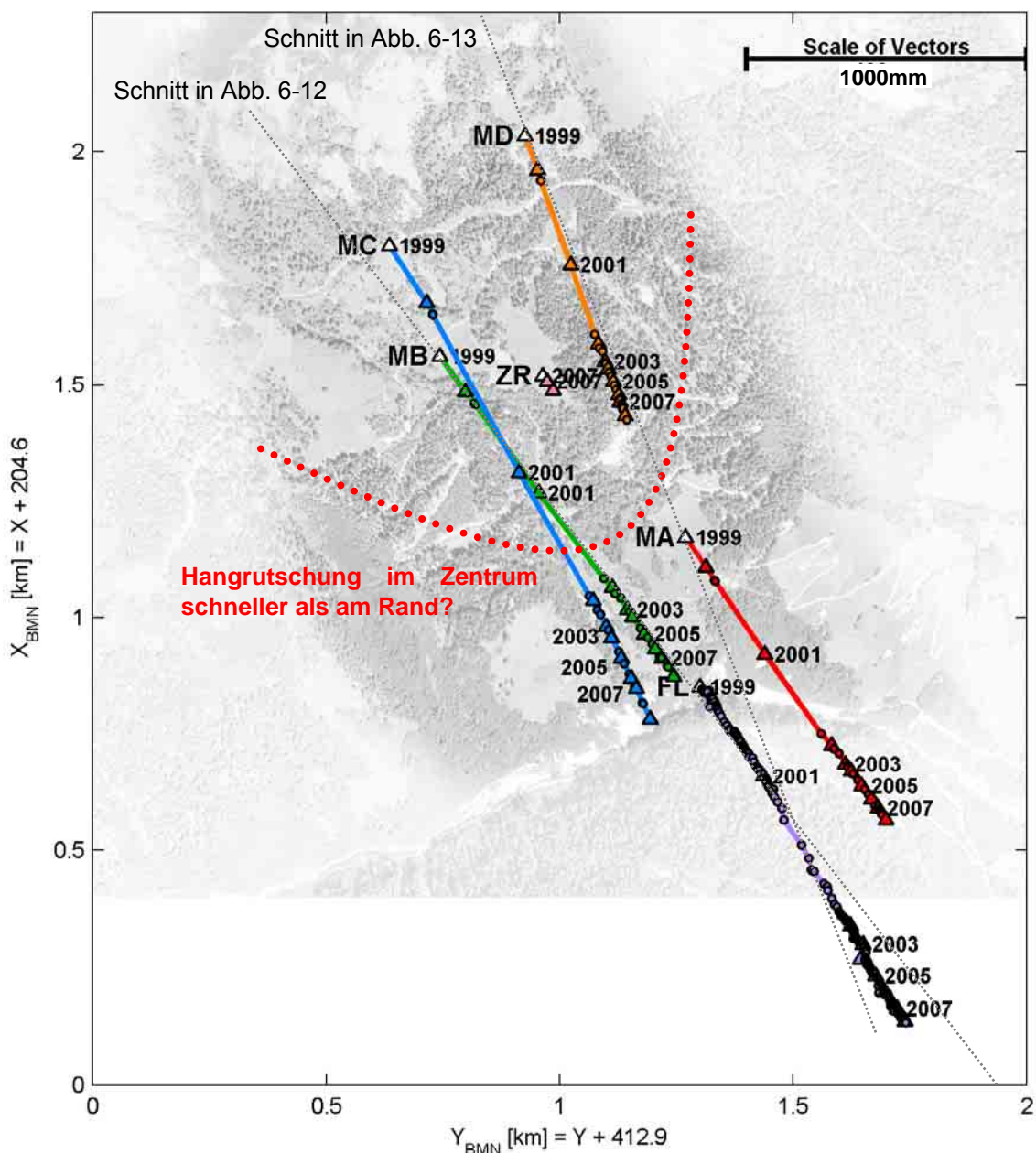


Abb. 6-11: Bewegungsvektor des Extensometerpunktes FL und Bewegungsvektoren der der GPS-Monitoringstationen von 1999 bis 2008.

Zurück zur Falllinie: Die Punkte MC, MB und FL liegen auf einer Falllinie welche im Zentrum der Rutschung verläuft und sie alle zeigen große Bewegungen (Schnitt entlang der Falllinie, siehe Abb. 6-12). Die Punkte MA und MD liegen etwas weiter östlich, eher am Rand der Rutschung und zeigen geringere Bewegungen (Schnitt entlang der Falllinie, siehe Abb. 6-13). Kann dieser Beobachtung die in Abb. 6-11 rot punktiert eingezeichnete Bewegungsform zu Grunde liegen, welche darstellen soll, dass die Hangrutschungen entlang der Falllinie im Zentrum größer sind als am Rand des Hanges? Eine Vermutung die in Anbetracht der hier vorliegenden Daten zwar durchaus ihre Berechtigung hat, jedoch sehr schwer besser gestützt werden kann, da die Punktdichte am Rutschhang dafür zu gering ist und zur Zeit auch keine beschleunigten Bewegungen auftreten.

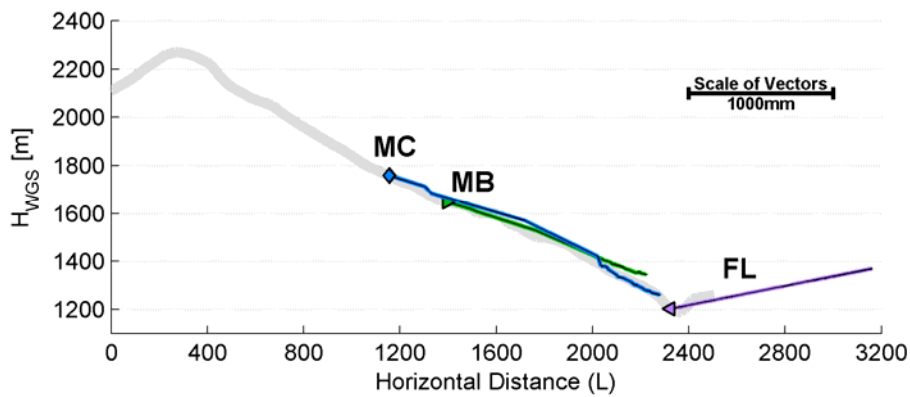


Abb. 6-12: Geländeschnitt durch die Falllinie MC, MB, FL und Bewegungsvektoren der entsprechenden Punkte. Keine Geländeüberhöhung. Vertikale Komponente von FL durch Extrapolation der terrestrischen Messungen bestimmt.

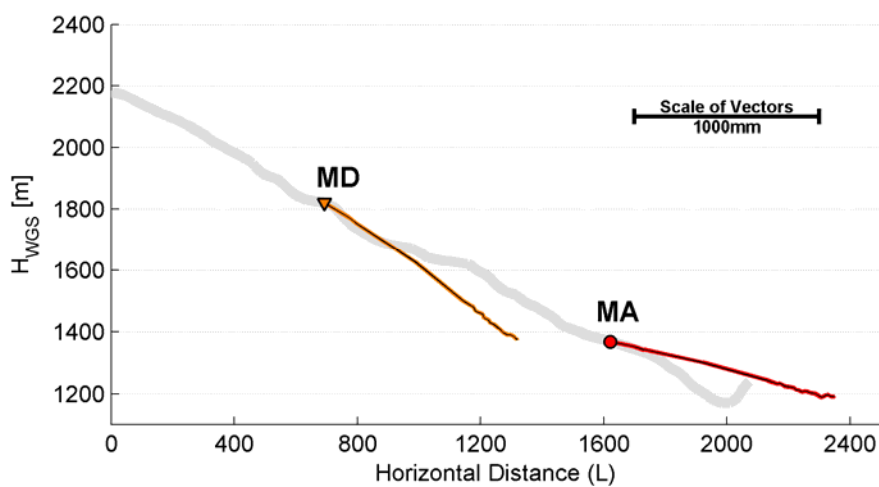


Abb. 6-13: Geländeschnitt durch die Falllinie MD, MA und Bewegungsvektoren der entsprechenden Punkte. Keine Geländeüberhöhung.

6.8.4 Die beschleunigte Phase

Da die Extensometerdaten eine wesentlich höhere zeitliche Auflösung als die der GPS-Messungen aufweisen, erlauben sie vor allem in den Phasen mit hohen Bewegungsraten eine genauere Beurteilung der Beschleunigung der Rutschung. Abb. 6-14 zeigt einen Ausschnitt von Abb. 6-10 und konzentriert sich auf die beschleunigte Phase.

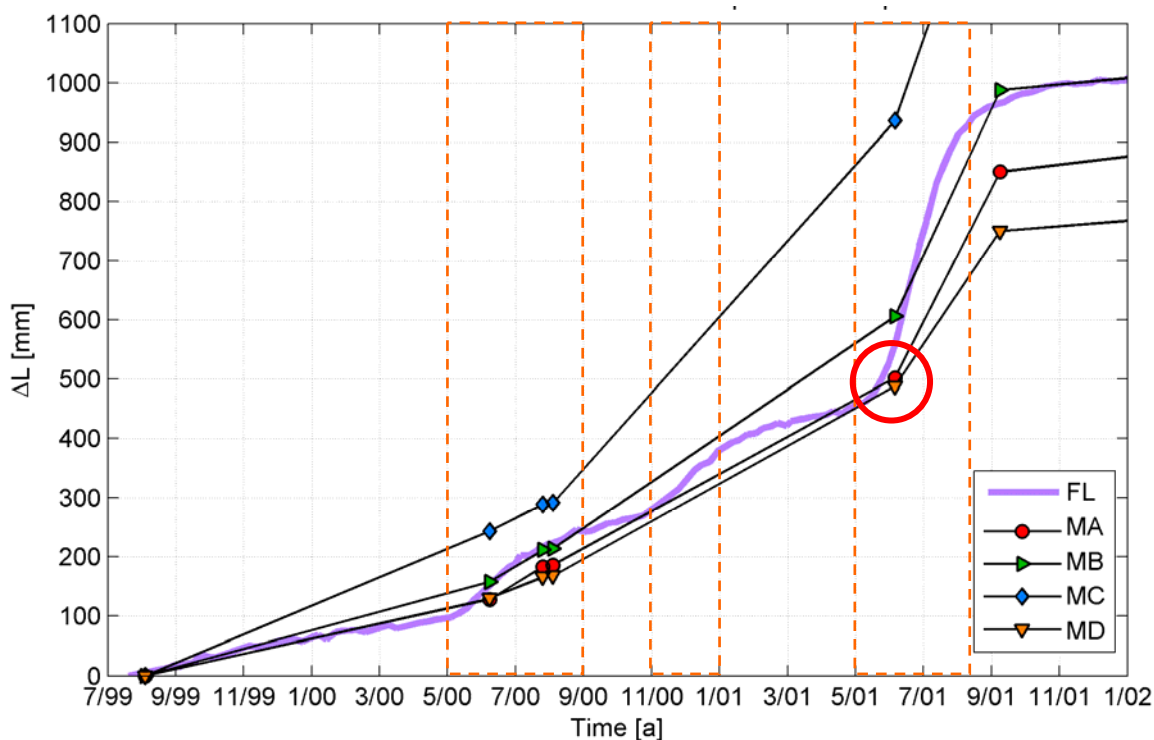


Abb. 6-14: Horizontale Längenänderung des Bewegungsvektors der Extensometerdaten überlagert mit horizontaler Komponente der Verschiebevektoren der GPS-Monitoringstationen MA, MB, MC und MD von 1999 bis 2002 (beschleunigte Phase des Hanges). Unterschiedlich hohe Bewegungsraten wurden farblich hervorgehoben (orange gestrichelte Rahmen).

Es wird verdeutlicht, dass es auch in der beschleunigten Phase unterschiedlich hohe Bewegungsraten gibt. Höhere Bewegungsraten traten von Mai bis August 2000, von November 2000 bis Jänner 2001 und Mai bis September 2001 auf. Die Übergänge sind fließend. Besonders interessant ist der rot markierte Bereich Anfang Juni 2001 in welchem aber leider nur 45 Stunden an kontinuierlichen GPS-Daten vorliegen. Diese wurden mit KF_Run untersucht, und in Kapitel 3.7 zusammengefasst. Ein Vergleich mit den analysierten Niederschlagsmessungen der vom ZAMG zugekauften Niederschlagsdaten für die Messstation Döllach der Jahre 1997 bis 2007 (Kapitel 6.7) zeigt keine erhöhten Niederschläge im Mai/Juni 2001. Das Jahr 2001 war generell ein sehr niederschlagsarmes Jahr. Aus der Literatur ist allerdings auch bekannt, dass sich außergewöhnlich große Niederschläge oftmals erst verzögert auf die Rutschungen auswirken.

Die Zeitreihe in Abb. 6-14 gibt auch einen genaueren Einblick in den Übergang von beschleunigter Phase in beruhigte Phase der Rutschung. Dieser erfolgt nicht, wie man aus der spärlichen Dichte der GPS-Kampagnen zu diesem Zeitraum vielleicht annehmen könnte, abrupt, sondern in einem sanften etwa 2 Monate dauernden Übergang im August und September 2001.

6.9 Untersuchungen zu lokalen und globalen Ionosphärenmodellen

Es wurde eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt um folgende Fragestellungen zu klären:

- Wie viele Stationen müssen mit Zweifrequenzempfängern ausgestattet sein, um ein lokales Modell zu schätzen?

- Wie variieren die geschätzten Koeffizienten des lokalen Ionosphärenmodells über die Zeit?
- Wie ändern sich die Koeffizienten bei unterschiedlicher Verteilung von Zweifrequenzempfängern bzw. wie viele Zweifrequenzempfänger sind sinnvoll?
- Wie groß sind die Differenzen der berechneten TEC-Werte aus einem globalen Modell und einem lokalen Modell?
- Welche Einflüsse entstehen dadurch auf die Koordinaten der GPS Punkte?

Elektromagnetische Wellen, welche die Ionosphäre durchdringen, erfahren eine Laufzeitverzögerung, die direkt proportional zum Integral des Elektronengehalts n_e entlang des Strahlenweges ist. Der Wert des Integrals des Strahlenweges E wird in der Literatur mit TEC (Total Electron Content) bezeichnet.

$$E = \int n_e(s) ds \quad (6-1)$$

Es gibt die Gesamtanzahl an freien Elektronen in einem Rotationszylinder entlang des Signalweges vom Satelliten zum Empfänger mit einem Querschnitt von 1m^2 an. In geodätischen Applikationen wird der TEC in sogenannten TEC Units (TECU) gemessen.

$$1\text{TECU} = 10^{16} / \text{m}^2 \quad (6-2)$$

Nicht nur die Weglänge beeinflusst den TEC, sondern auch verschiedene andere Parameter, wie die Änderung der Sonnenaktivität, die Intensität des Erdmagnetfeldes, der Ort des Empfängers oder der Elevationswinkel des Satelliten (vgl. Walser, 1988).

Beispiel: Bei L1 Lösungen mit einem Elevation cut-off Winkel von 15° und einem TEC Wert von 10 TECU, kann man eine Basislinien-Verkürzung von 1 ppm erwarten, wenn die Ionosphäre nicht berücksichtigt wird (vgl. Dach et al., 2007).

Ionosphärenmodelle ermöglichen die Modellierung des TEC und die Berücksichtigung des Einflusses auf die Satellitensignale. GNSS-basierte Modelle beschreiben die deterministische Komponente der Ionosphäre, üblicherweise basierend auf dem sogenannten „Single-Layer Model“ (SLM). Im SLM wird die Annahme getroffen, dass sämtliche freien Elektronen in einer infinitesimal dicken Schicht konzentriert sind (vgl. Abb. 6-15). Da die Verteilung der freien Elektronen in der Ionosphäre nicht über die gesamte Dicke der Schicht konstant ist, wird mit H die Höhe gewählt, welche die höchste Konzentration an freien Elektronen beinhaltet.

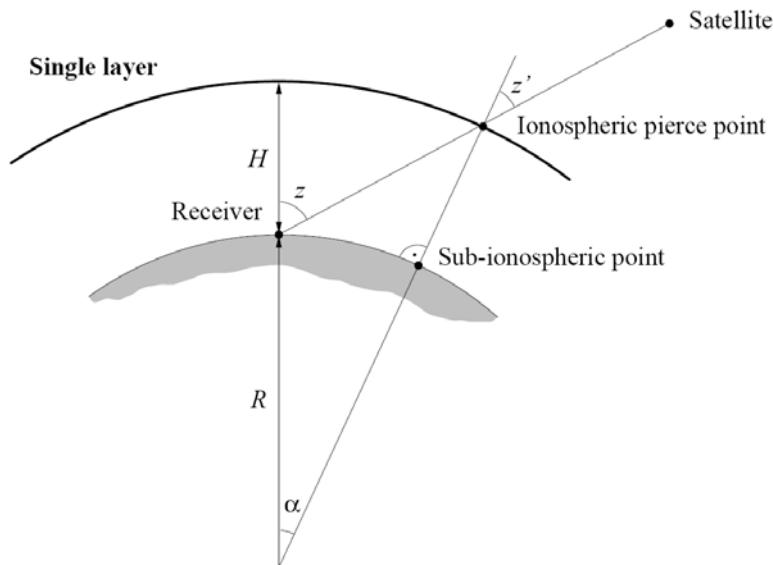


Abb. 6-15: Single-Layer Model (Dach et al., 2007)

In diesem Abschnitt wird zwischen lokalen und globalen Ionosphärenmodellen unterschieden. Erstere basieren auf zweidimensionale Taylorreihen:

$$E_v(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} E_{nm} (\beta - \beta_0)^n (s - s_0)^m \quad (6-3)$$

Der VTEC E_v (Vertical Total Electron Content, in Zenitrichtung gemessener TEC) an den solar-geographischen Koordinaten β und s ist abhängig von den Koeffizienten der Taylorreihe E_{nm} sowie von den solar-geographischen Koordinaten des Ausgangspunktes des geschätzten Modells.

Globale Ionosphärenmodelle basieren auf sphärischen Kugelfunktionen:

$$E_v(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms) \quad (6-4)$$

Globale Tagesmodelle sind vom CODE (Center for Orbit Determination in Europe) im IONEX-Format erhältlich sind. Dieses beinhaltet die geschätzten VTEC-Werte mit einer zeitlichen Auflösung von 2 Stunden und in einem definierten Grid (z.B. 5° in Longitude und 2.5° in Latitude) über den gesamten Globus.

Es wurden zwei Datensätze à 24 Stunden untersucht. Der Datensatz 291/02 vom 18.10.2002 stammt aus einer Periode hoher Ionosphärenaktivität, während der Datensatz 287/07 vom 14.10.2007 aus einer Periode niedriger Ionosphärenaktivität stammt (vgl. Abb. 6-16).

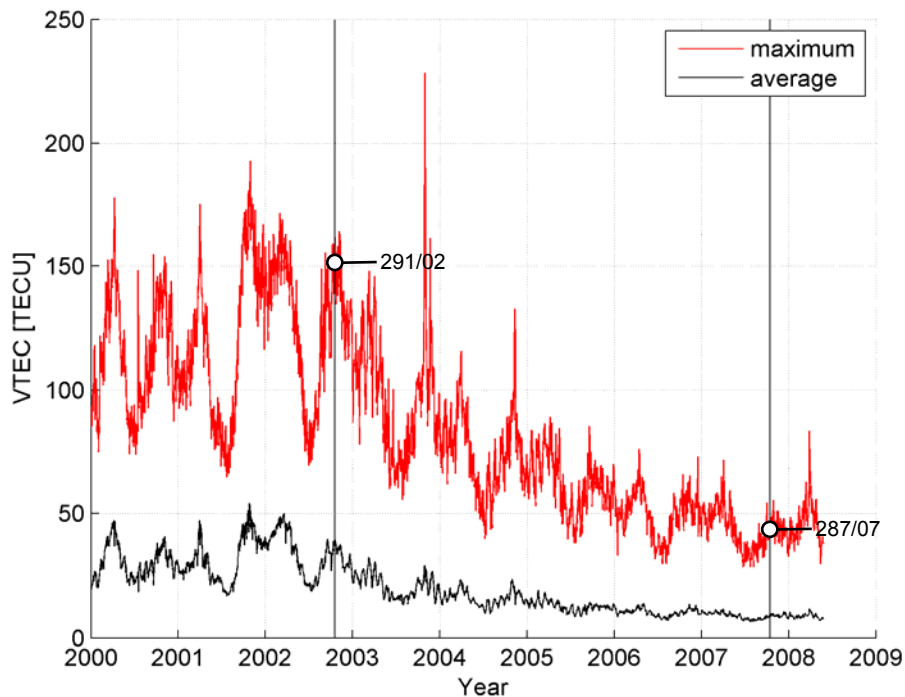


Abb. 6-16: Zeitreihe des täglichen Maximums (rot) und durchschnittlicher VTEC (schwarz), berechnet aus allen verfügbaren globalen CODE Ionosphärenmodellen vom 01.01.2000 bis 25.05.2008 verwendet (keine Lücken)

Es wurde darauf geachtet, dass die Datensätze in derselben Kalenderwoche und Jahreszeit liegen. Die Schätzung von lokalen Ionosphärenmodellen aus den beiden Datensätzen ist in ISDR 2008/2 detailliert dokumentiert, es folgend die Ergebnisse der 4 ausgewählten Szenarien untersucht:

- a) Nur Station R1 mit L1/L2
- b) Nur Station R2 mit L1/L2
- c) Beide Stationen R1 und R2 mit L1/L2
- d) Alle verfügbaren Stationen mit L1/L2

Um die Auswirkung der Koeffizienten-Variationen der einzelnen Szenarien auf die Bestimmung des VTEC beurteilen zu können, wurde nach (6-3) der VTEC aus den gewählten Szenarien bestimmt und eine Zeitreihe erstellt (vgl. Abb. 6-17 a) und b)).

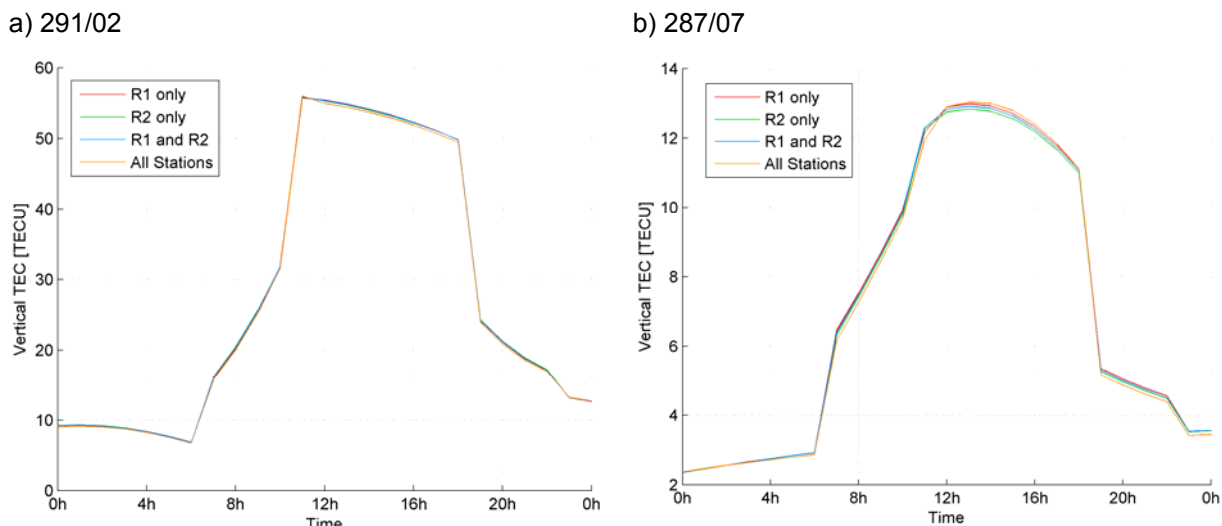


Abb. 6-17: Berechnete VTEC-Werte aus den verschiedenen Szenarien für einen Punkt an der Stelle 47°N und 13°O jeweils für den gewählten Datensatz a) mit hoher Ionosphärentätigkeit und mit b) niedriger Ionosphärentätigkeit.

Die Differenzen liegen sowohl für den Tag hoher Ionosphärentätigkeit als auch für den Tag niedriger Ionosphärentätigkeit im Bereich von ± 0.4 TECU. Nach Schaer (1999) beträgt die Signalverzögerung 0.162 m pro TECU für die L1-Trägerfrequenz und 0.267 m pro TECU für die L2-Trägerfrequenz. Die auftretenden Differenzen entsprechen somit einer Signalverzögerung von ± 6.5 cm für L1 und ± 10.7 cm für L2. Der Skalierungsfaktor für Basislinien bei einer Elevationsschranke von 15° beträgt -0.1 ppm pro TECU wiederum für L1 und somit ± 0.04 ppm für ± 0.4 TECU. Hochgerechnet auf die längste Basislinie im Gradenbach GPS-Netz (R1-R2, 4.5 km) entspricht die Differenz in den VTEC-Werten somit maximal 0.2 mm.

Die Anzahl der Stationen, welche in die Schätzung eines lokalen Modells einfließen, ist also nicht von Bedeutung, da auch nur mit einer Station ein lokales Modell geschätzt werden kann, welches sich von einem Modell an dessen Schätzung 4 oder mehr Stationen beteiligt waren, kaum unterscheidet.

Es folgt ein Vergleich der statischen Koordinatenlösungen nach Anbringung der entsprechenden Modelle. Wie es die geringen Variationen der geschätzten TEC-Werte aus einzelnen Szenarien in Abb. 6-17 bereits vermuten ließen, kommt es auch hier zu keinen Variationen, die größer sind als 0.1 mm. Dies entspricht auch der oben durchgeführten Abschätzung, wo ein Einfluss von 0.2 mm auf die längste Basislinie im GPS-Netz abgeschätzt wurde.

Es verbleibt nun zu klären, ob es Variationen zwischen dem lokalen und dem bisher verwendeten globalen Ionosphärenmodell des CODE gibt und wie groß diese ausfallen. Denn diese Fragestellung wird schlussendlich dafür verantwortlich sein, ob und wie viele Zweifrequenzempfänger in Zukunft am Rutschhang eingesetzt werden sollen.

Zum einen gibt es dazu die Möglichkeit die extrahierten VTEC-Werte aus einem lokalen Modell und einem globalen Modell miteinander zu vergleichen. Zum anderen kann ein Vergleich aber auch wieder in Form einer statischen Koordinatenlösung erfolgen. Hier kommen beide Möglichkeiten zur Anwendung.

Es wurden TEC-Werte in einem Grid um das Gebiet des Rutschhanges ($2,5^\circ$ Auflösung in Nord-Süd-Richtung und 5° Auflösung in Ost-West-Richtung) aus dem lokalen Modell und

dem globalen Modell gerechnet und die Differenzen bestimmt. Abb. 6-18 zeigt eine 24h-Zeitreihe von TEC-Werten jeweils für einen Punkt in diesem Grid. Rot entspricht dem lokalen Modell, grün dem globalen Modell und die Differenz zwischen beiden Modelle wurde blau geplottet. Beim Datensatz hoher Ionosphärentätigkeit treten maximale Differenzen von bis zu 20 TECU auf. Analog dazu treten beim Datensatz mit niedriger Ionosphärentätigkeit Differenzen bis 3 TECU auf (vgl. Abb. 6-19). Wie groß wäre nun die Auswirkung dieser Differenzen auf eine Basislinie? Die Faustformel zur Abschätzung, die bereits weiter oben durchgeführt wurde, kann auch hier wieder angewendet werden. Der Skalierungsfaktor für Basislinien bei einer Elevationsschranke von 15° beträgt -0.1 ppm pro TECU (L1). Hochgerechnet auf die längste Basislinie im Gradenbach GPS-Netz (R1-R2, 4.5 km) würde sich eine Differenz von 20 TECU also mit einer Verkürzung von 9 mm auf die Basislinie auswirken! Kann allein die Verwendung eines lokalen an Stelle eines globalen Ionosphärenmodells so große Auswirkungen auf eine Basislinie haben? Es muss natürlich auch berücksichtigt werden, dass das für die Abschätzung verwendete Maximum von 20 TECU nicht über den gesamten Datensatz auftritt. In eine statische Lösung wird schlussendlich nicht das Maximum sondern viel mehr eine mittlere Differenz der VTEC-Werte im prozessierten Zeitraum einfließen.

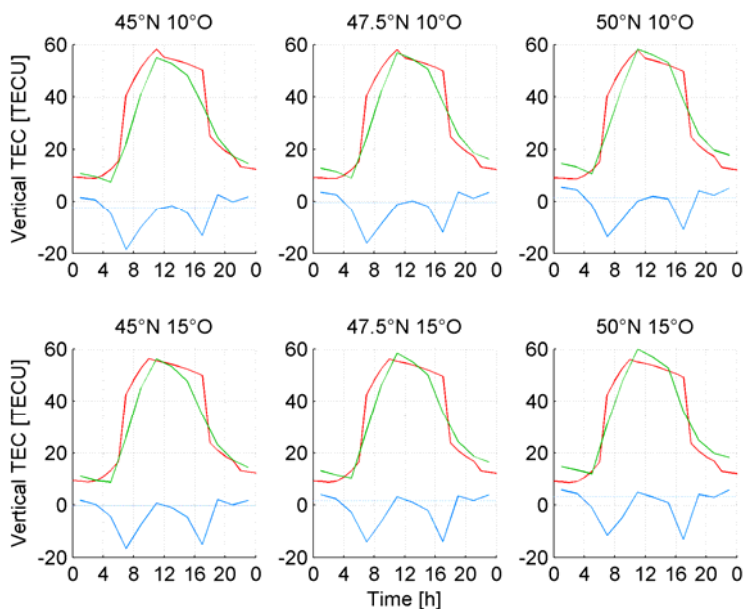


Abb. 6-18: Zeitreihe von globalen (grün) und lokalen (rot) TEC-Werten für den Datensatz 291/02 (hohe Ionosphärentätigkeit) sowie Differenzen (blau) und Median der Differenzen über 24h (blau gestrichelt) für ein $2.5^\circ\text{N} \times 5.0^\circ\text{O}$ Grid.

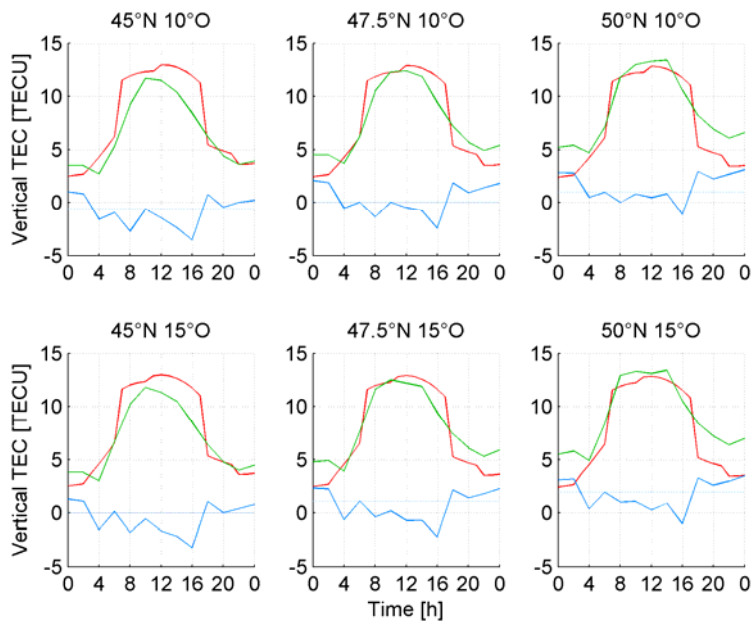


Abb. 6-19: Zeitreihe von globalen (grün) und lokalen (rot) TEC-Werten für den Datensatz 287/07 (niedrige Ionosphärentätigkeit) sowie Differenzen (blau) und Median der Differenzen über 24h (blau gestrichelt) für ein 2.5°N x 5.0°O Grid.

In Tab. 2 wurden die Differenzen „global – lokal“ der statischen Koordinatenlösungen in Lage und Höhe dargestellt. Sie betragen in der Lage maximal 0.8 mm und in der Höhe maximal 1.4 mm für den 24-stündigen Datensatz (hohe Ionosphärentätigkeit). Für den Datensatz niedriger Ionosphärentätigkeit wurde dies nicht wiederholt, da mit wesentlich geringeren Differenzen zu rechnen war, und für die Entscheidung „lokales oder globales Modell“ Maximalwerte ausschlaggebend sind.

Wie bereits weiter oben vermutet, scheint in die statische Lösung nicht das Maximum der Differenz der TEC-Werte „global“ und „lokal“ sondern viel mehr eine mittlere Differenz einzufließen und die tatsächlichen Koordinatendifferenzen sind wesentlich geringer als die abgeschätzten 9 mm.

Tab. 2: Differenz der statischen Koordinatenlösungen in Y, X und H („global – lokal“). Datensatz 291/02 von 0 bis 24 Uhr ausgewertet.

Station	Diff. Y _{GK} [mm]	Diff. X _{GK} [mm]	Diff. H [mm]
R2	-0.7	0.8	-1.4
MC	-0.2	0.3	-1.2
MD	-0.2	0.3	-0.2

Zusammenfassend konnten aus der Analyse lokaler und globaler Ionosphärenmodelle folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

Für die Schätzung von lokalen Modellen ist die Anzahl der an der Schätzung beteiligten Stationen (L1/L2) irrelevant. Es reicht die Bestückung einer Station mit einem Zweifrequenzempfänger um ein ausreichend genaues lokales Ionosphärenmodell zu rechnen. Die maximal festgestellten Koordinatendifferenzen bei Anbringung

unterschiedlicher lokaler Modelle (aus R1, aus R2, aus R1/R2 oder aus mehr Stationen geschätzt) betragen 0.1 mm.

Die maximal festgestellten Koordinatendifferenzen einer statischen Lösung beim Vergleich „global – lokal“ betragen weniger als 1 mm in der Lage und 1.4 mm in der Höhe (24h-Datensatz). Diese Koordinatendifferenzen „global – lokal“ sind zwar nicht verschwindend gering, aber auch nicht erschreckend hoch. Es gilt zu bedenken, dass nicht festgestellt werden kann, ob nun das lokale oder das globale Modell „richtigere“ Ergebnisse liefert und auch, dass das Schätzen eines lokalen Modells mit einem wesentlich höheren Zeitaufwand verbunden ist (Datensatz in der Bernese auf 4h begrenzt (bei 3s Aufzeichnungsintervall)). Berücksichtigt man zusätzlich noch die Empfehlungen in der Literatur, bei derartig kleinräumigen Netzen, auch wenn große Höhenunterschiede auftreten (vgl. Turtmann-Netz in der Schweiz), auf die Schätzung von lokalen Modellen zu verzichten, dann lautet die Empfehlung auch in Zukunft das globale Modell von CODE zu verwenden, und die teuren Zweifrequenzempfängern durch geeignete, günstigere L1-Empfänger zu ersetzen.

7 Referenzen

- Brunner F., Woschitz H., Macheiner K. (2007) Monitoring of deep-seated mass movements, 3rd Int. Conf. on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-3), Nov.13-16, 2007, Vancouver, Canada. Submitted.
- Dach R., Hugentobler U. Fridez P. Meindl M. (2007): Bernese GPS Software Version 5.0. Astronomical Institute, University of Bern.
- Howind J. (2005): Analyse des stochastischen Modells von GPS-Trägerphasenbeobachtungen. Deutsche Geodätische Kommission DGK C, München (im Druck).
- Hugentobler U., S. Schaer und P.Fridez (2001): Bernese GPS Software Version 4.2. Astronomical Institute University of Berne.
- Klostius R., Wieser A., Brunner F.K. (2006): Treatment of diffraction effects caused by mountain ridges. In Kahmen H. and Chrzanowski A. (Eds.) Proc. 3rd IAG Symp. Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering / 12th FIG Symp. Deform. Meas., Baden (2006): CD - 10 p.
- Kurz W. (1993): Strukturentwicklung längs der Mölltallinie (südöstlich des Tauernfensters), Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz.
- Kurz W. (1997): Alpine tectonic evolution of the Tauern Window: Constraints from structural and metamorphic geology, Dissertation, Universität Salzburg.
- Kronfellner-Kraus G. (1990): Einige aktuelle Probleme und Ergebnisse der Wildbachforschung in Österreich. Wien, Beiträge zur Wildbacherosions- und Lawinenforschung, FBVA-Berichte, Nr. 43 S. 7-40.
- Kronfellner-Kraus G. und Schaffhauser H. (1984): Schneehydrologische Untersuchungen in einem Talzuschubsgebiet in Kärnten/Österreich. Bonn, DVWK-Mitteilungen, Heft 7, S. 373-383.
- Lang E., Hagen K. (1999): Wildbacheinzugsgebiet Gradenbach – Analyse des Niederschlags- und Abflussgeschehens 1968 – 1996, FBVA-Berichte; Schriftenreihe der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Nr. 108, 109 S.
- Lanzendörfer H. (2007): Zum Einsatz von Low-cost GPS-Empfängern für kontinuierliches Monitoring eines Rutschhanges. Diplomarbeit, TU Graz
- Lienhart W. Brunner F. K. (2007): Integrated Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data of a Monolithic Bridge. 3rd Int. Conf. Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Vancouver, CD-Proceedings (2007): 9 pages
- Niemeier W. (2002): Ausgleichsrechnung. Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. de Gruyter, Berlin

- Peresson H., Decker K. (1998): Tektonische Auswertung von digitalen Fernerkundungs- und Höhendaten, Trassenkorridor Koralmtunnel, Geozentrum - Institut für Geologie, Universität Wien.
- Schaer S. (1999): Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System, Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- Schön S. (2006): Comparison of correction models for distance dependent systematic effects in GPS monitoring networks with large height differences. In Kahmen H. and Chrzanowski A. (Eds.) Proc. 3rd IAG Symp. Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering / 12th FIG Symp. Deform. Meas., Baden (2006): CD - 9 p.
- Schön S. (2007) Affine distortion of small GPS networks with large height differences, GPS Solutions 11 (2007): 107 - 117.
- Schön S., Brunner F. K. (2007) Atmospheric turbulence theory applied to GPS phase data, Journal of Geodesy (2007): In Print.
- Schön S., Brunner F. K. (2008): A proposal for modelling physical correlations of GPS phase observations. Journal of Geodesy (2008): Accepted.
- Sprenger L. (1996): Das Periadriatische Lineament südlich der Lienzer Dolomiten. Strukturgeologie – Fernerkundung – Geochemie, Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 52, 220 S., Wien.
- Trefalt A. (2006): Bestimmung von Massenbewegungen in hochalpinem Gelände mit GPS-RTK - Untersuchung zur Einsatzmöglichkeit und Leistungsfähigkeit am Beispiel des Rutschhangs Gradenbach. Diplomarbeit, TU Graz
- Rührnößl H., F.K. Brunner und M. Rothacher (1998): Modellierung der troposphärischen Korrektur für Deformationsmessungen mit GPS im alpinen Raum. AVN (1):14-20.
- Walser F. (1988): Ionosphäreneinfluss bei GPS-Messungen, Bericht Nr. 147, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Wanninger L. (2000): Der Einfluss der Ionosphäre auf die Positionierung in Referenzstationsnetzen. Bayerisches Landesvermessungsamt: 3. SAPOS-Symposium, 23./24. Mai 2000, München, S. 129-140.
- Wakonigg H. (1968): Der Anteil der verschiedenen Wetterlagen am herbstlichen Niederschlagsmaximum im Gailtal. Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft, S. 203-233.
- Weidner S. (2000): Kinematik und Mechanismus tiefgreifender alpiner Hangdeformationen unter besonderer Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse, Dissertation, Univ. Erlangen-Nürnberg
- Zobl F., Brunner F., Wieser A. (2007) Development of a digital geological compass, Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology.2007; 40: 301-30.

Relevante Veröffentlichungen

Publikationen

- Brunner F., Woschitz H., Macheiner K. (2007) Monitoring of deep-seated mass movements, 3rd Int. Conf. on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-3), Nov.13-16, 2007, Vancouver, Canada. Submitted.
- Brückl E., Brunner F., Kraus K. (2006) Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data, *Engineering Geology* 88: 149 – 159.
- Klostius R., Wieser A., Brunner F.K. (2006): Treatment of diffraction effects caused by mountain ridges. In Kahmen H. and Chrzanowski A. (Eds.) Proc. 3rd IAG Symp. Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering / 12th FIG Symp. Deform. Meas., Baden (2006): CD - 10 p.
- Schön S. (2006): Comparison of correction models for distance dependent systematic effects in GPS monitoring networks with large height differences. In Kahmen H. and Chrzanowski A. (Eds.) Proc. 3rd IAG Symp. Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering / 12th FIG Symp. Deform. Meas., Baden (2006): CD - 9 p.
- Schön S. (2007) Affine distortion of small GPS networks with large height differences, *GPS Solutions* 11 (2007): 107 - 117.
- Schön S., Brunner F. K. (2006): Modelling physical correlations of GPS phase observations: First results. In Kahmen H. and Chrzanowski A. (Eds.) Proc. 3rd IAG Symp. Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering / 12th FIG Symp. Deform. Meas., Baden (2006): CD - 8 p.
- Schön S., Brunner F. K. (2007) Atmospheric turbulence theory applied to GPS phase data, *Journal of Geodesy* (2007): In Print.
- Schön S., Brunner F. K. (2008): A proposal for modelling physical correlations of GPS phase observations. *Journal of Geodesy* (2008): Accepted.
- Schön S., Kutterer H. (2006) Uncertainty in GPS networks due to remaining systematic errors: the interval approach, *Journal of Geodesy* 80: 150 - 162.
- Schön S., Wieser A., Macheiner K. (2005): Accurate tropospheric correction for local GPS monitoring networks with large height differences. Proc. ION GNSS 2005, 18th Int. Techn. Meet. of the Satellite Division, Long Beach, CA (2005): 250 - 260.
- Woschitz, H., Brunner, F.K. (2008) Monitoring a deep-seated mass movement using a large strain rosette, 13th Int. Symp. on Deformation Measurements and Analysis CD- Proceedings (2008): 10 pages
- Zobl F., Brunner F., Wieser A. (2007) Development of a digital geological compass, *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*.2007; 40: 301-30.

Poster

Brückl E., Brunner F. K. , Kraus K. (2004): The kinematics of a deep-seated mass movement derived from geophysical, GPS and photogrammetric data. EGU - 1st General Assembly, Nizza, 25.-30.04.2004

Gander D. und Brunner F. K. (2007): Continous Monitoring of the Gradenbach Landslide using GPS.

Gassner G., Zobl F., Brunner F. K. (2004): GPS Monitoring der Hangrutschung Gradenbach. "Ingenieurvermessung 2004", ETH Zürich, 15.-19.03.2004

Klostius R., Schön S, Zobl F., Brunner F. K. (2005): Online monitoring of landslides using GPS. 54. Geomechanik-Kolloquium, Salzburg, 13.-14.10.2005

Zobl F., Brunner F. K. (2004): GPS Monitoring of the Landslide Gradenbach. 53. Geomechanik-Kolloquium, Salzburg, 07.-08.10.2004

Sonstige

Lanzendörfer H. (2007): Zum Einsatz von Low-cost GPS-Empfängern für kontinuierliches Monitoring eines Rutschhanges. Diplomarbeit, TU Graz

Trefalt A. (2006): Bestimmung von Massenbewegungen in hochalpinem Gelände mit GPS-RTK - Untersuchung zur Einsatzmöglichkeit und Leistungsfähigkeit am Beispiel des Rutschhanges Gradenbach. Diplomarbeit, TU Graz

Interne technische Berichte

Jahr	Berichtnummer	Titel
2004	ISDR 2004/1 IGMS 2004/6	Wandmessung WLW Gradenbach: Dokumentation der Drahtextensometermessungen 1999-2003
	ISDR 2004/2	Auswertung GPS-Messungen Gradenbach Mai 2004
	ISDR 2004/3	Übersicht über die Ashtech GPS Antennen
	ISDR 2004/4	Bestimmung der Endpunkte MF und MG des Polygonzugs mit GPS
	ISDR 2004/5 IGMS 2004/22	Bernese 5.0 GPS Auswertung Gradenbach
	ISDR 2004/6 IGMS 2004/39	Auswertung GPS-Kampagnen Gradenbach: Oktober 1999 – November 2004
	ISDR 2004/7 IGMS 2005/4	Terrestrische Messungen der Hangrutschung Gradenbach 2004
	ISDR 2004/8 IGMS 2004/40	Bestimmung der GPS-Punkte MD, MF und MG im neuen Auswertekonzept
2005	ISDR 2005/1	Antennen- und Receiver tests GPS low-cost – Experimente

Relevante Veröffentlichungen

	ISDR 2005/2	Antennen- und Receiver tests GPS low-cost – Auswertung
	ISDR 2005/3	Multi-Ref-Test am Gradenbach
	ISDR 2005/4	Fernerkundung Gradenbach: Extrahierung von Lineamenten mit Fernerkundungsdaten, Modellbildung, Umsetzung und Verifizierung der tektonischen Relevanz von Lineamenten im Bereich der Hangrutschung Gradenbach
	ISDR 2005/5	Erfahrungen Winterbetrieb Gradenbach
	ISDR 2005/6	Messkampagne Gradenbach Juni 2005
	ISDR 2005/7	Auswertung GPS Kampagne Juni 2005
	ISDR 2005/8	Test der Vermarkungsmethode SOILFRAC mit dem SOFO Messsystem in Söding
	ISDR 2005/9	Validierung ausgewählter Module in der GPS-Software GRAZIA
	ISDR 2005/10	Messaufbau des SOFO-Soilfrac Experiments am BTZ
	ISDR 2005/11 IGMS 2005/7	Affinmodell: Bestimmung der CN0 Templates für die Ashtech ZXtreme Empfänger
	ISDR 2005/12 IGMS 2005/8	Affinmodell: Erste Analyse der Daten des Multireferenzstationstests
	ISDR 2005/13 IGMS 2005/9	Affinmodell: Analyse der Doppeldifferenzzeitreihen
	ISDR 2005/14	Test der Berechnung der Satellitenpositionen (SP3 Orbits) in GRAZIA
	ISDR 2005/15 IGMS 2005/10	Affinmodell: Koordinatenzeitreihen der ersten Auswertung
	ISDR 2005/16	Auswertung GPS Kampagne Dezember 2005
2006	ISDR 2006/1	Auswertung GPS Kampagne Juni 2006
	ISDR 2006/2	Messkampagne Gradenbach Juni 2006
	ISDR 2006/3 (doppelt vergeben)	Strain Rosette BTZ – Einbau der mit Soilfrac stabilisierten Rohre
	ISDR 2006/3 IGMS 2006/8	Kurzbericht: Recherche über aktuelle low-cost GPS Ausrüstung
	ISDR 2006/4 (doppelt vergeben)	Strain Rosette BTZ – Verankerungen der SOFO-Sensoren an den Soilfrac-Rohren
	ISDR 2006/4	Kurzbericht: Recherche über aktuelle low-cost GPS Ausrüstung
	ISDR 2006/5	Strain Rosette BTZ: Offene Arbeiten
	ISDR 2006/6	Makro Read_SOFO_Database

Relevante Veröffentlichungen

	ISDR 2006/7	Strain Rosette BTZ: Konstruktion der Anker
	ISDR 2006/8	Strain Rosette BTZ: Planung der Arbeiten für den Einbau der Sensoren
	ISDR 2006/9	Strain Rosette BTZ: Funktionsüberprüfung der für den Einbau beim BTZ vorgesehenen SOFO Sensoren
	ISDR 2006/10	Strain Rosette BTZ: Kalibrierung der Temperatursensoren und des Bodenfeuchtesensors
	ISDR 2006/11	Strain Rosette BTZ: Einbau der Sensoren
	ISDR 2006/12	Strain Rosette BTZ: Lage- und Höhenaufnahme der Einbauten der Strain Rosette
	ISDR 2006/13	Strain Rosette BTZ: Bestimmung der Prismenkonstanten für das Zeiss Elta S10 sowie die Prismen Leica GPH1 und die OMNI-Miniprismen
	ISDR 2006/14	Strain Rosette BTZ: Geodätische Nullmessung
	ISDR 2006/15 IGMS 2006/8	Kurzbericht: Recherche über aktuelle low-cost GPS Ausrüstung
	ISDR 2006/16	SOFO IV (S.Nr. 0014) Probleme beim BTZ am 07.08.2006: "ERROR: index signal timeout ..." nach Start der Messung
	ISDR 2006/17	Bestimmung von Bodenbewegungen mit faseroptischen Sensoren
	ISDR 2006/18	Strain Rosette BTZ: Vorversuch mit dem SOFO Dynamic bei Anregung durch Hammerschläge
	ISDR 2006/19	Stromversorgung Sofo-Dynamic
	ISDR 2006/20	Strain Rosette Gradenbach: Lokalaugenschein am Rutschhang
	ISDR 2006/21	Auswertung GPS Kampagne November 2006
	ISDR 2006/22	Strain Rosette Gradenbach: Begehung und Nachmessung Dezember
2007	ISDR 2007/1	Strain Rosette Gradenbach: Besprechung der Einbaudetails vor Ort
	ISDR 2007/2	Neues Gerät: Avisaro CF Datalogger mit serieller Schnittstelle
	ISDR 2007/3	Auswertung GPS Kampagne Juni 2007
	ISDR 2007/4	Strain Rosette Gradenbach: Planung und Einbaukonzept der Rosette
	ISDR 2007/5	Strain Rosette Gradenbach: Planung und Fertigung der Adapter
	ISDR 2007/6	Strain Rosette Gradenbach: Kalibrierung der Temperatursensoren und des Bodenfeuchtesensors
	ISDR 2007/7	Strain Rosette Gradenbach: Test der SOFO Sensoren

Relevante Veröffentlichungen

	ISDR 2007/8	Strain Rosette Gradenbach: Dokumentation des Einbaus
	ISDR 2007/9	Auswertung GPS Kampagne Juli 2007
	ISDR 2007/10	Bernese Zwischenlösung für August 2007
	ISDR 2007/11 IGMS 2007/4	Nullmessung terrestrisches Netz Strain Rosette
	ISDR 2007/13	Satellitenverfügbarkeit auf R2
	ISDR 2007/14 IGMS 2007/23	Untersuchung Satellitenverfügbarkeit MA und R2
	ISDR 2007/15 IGMS 2007/26	Nachmessung Sperre im Oktober 2007
	ISDR 2007/16 IGMS 2007/27	CN/0 Untersuchung Ashtech Z-FX (R2) 2006-2007
	ISDR 2007/17 IGMS 2007/28	Auswertung GPS Kampagne Oktober 2007
	ISDR 2007/18 IGMS 2007/29	Analyse Niederschlagsdaten 1997-2007
2008	ISDR 2008/1 IGMS 2008/2	Vergleich eines lokalen und globalen Ionosphärenmodells mit der Bernese
	ISDR 2008/2 IGMS 2008/4	Schätzung von lokalen Ionosphärenmodellen mit der Bernese und Vergleich mit dem globalen Modell des CODE
	ISDR 2008/3 IGMS 2008/6	Aufbau der Permanentstationen im Mai 2008
	ISDR 2008/4 IGMS 2008/7	Auswertung GPS Kampagne Juni 2008
	ISDR 2008/5 IGMS 2008/8	Nachmessung Sperre im Juni 2008
	ISDR 2008/6 IGMS 2008/9	Analyse der Extensometerdaten
	ISDR 2008/7 IGMS 2008/10	Datenverfügbarkeit Funk/Datalogger für das Jahr 2007

Anhang

Tab. 3: Extrapolierte Bewegungsraten der Station MA in cm/a

Jahr	Nord [cm]	Ost [cm]	Höhe [cm]	Lage [cm]
1999	3.5	-5.1	-1.2	6.2
2000	15.6	-23.1	-6.4	27.8
2001	31.0	-43.7	-14.1	53.6
2002	5.4	-6.6	-2.6	8.4
2003	3.0	-4.2	-1.8	5.1
2004	3.5	-4.9	-1.2	6.1
2005	3.3	-4.6	-1.9	5.6
2006	3.1	-4.2	-1.5	4.8
2007	2.8	-3.7	-0.9	4.7

Tab. 4: Extrapolierte Bewegungsraten der Station MB in cm/a

Jahr	Nord [cm]	Ost [cm]	Höhe [cm]	Lage [cm]
1999	4.4	-6.2	-2.2	7.6
2000	19.2	-26.6	-10.8	32.8
2001	36.3	-48.2	-23.9	60.4
2002	5.5	-7.1	-3.9	8.9
2003	2.7	-4.0	-2.3	4.9
2004	4.1	-5.9	-2.3	7.2
2005	3.7	-5.1	-2.7	6.3
2006	2.7	-4.3	-2.5	5.1
2007	3.5	-4.8	-2.0	5.9

Tab. 5: Extrapolierte Bewegungsraten der Station MC in cm/a

Jahr	Nord [cm]	Ost [cm]	Höhe [cm]	Lage [cm]
1999	6.4	-9.8	-3.6	11.7
2000	24.0	-42.5	-17.9	48.8
2001	41.6	-73.8	-37.8	84.7
2002	4.1	-7.5	-7.5	8.5
2003	2.5	-5.1	-3.9	5.7
2004	3.6	-7.6	-3.6	8.4
2005	3.4	-7.2	-4.2	8.0
2006	2.1	-4.7	-2.1	5.2
2007	3.6	-3.7	-1.1	4.1

Tab. 6: Extrapolierte Bewegungsraten der Station MD in cm/a

Jahr	Nord [cm]	Ost [cm]	Höhe [cm]	Lage [cm]
1999	2.2	-5.9	-3.7	6.3
2000	8.5	-24.6	-17.5	26.1
2001	14.7	-42.0	-33.2	44.5
2002	2.4	-5.8	-5.0	6.3
2003	1.2	-3.8	-3.4	4.0
2004	1.9	-4.7	-3.6	5.1
2005	1.7	-4.3	-4.0	4.6
2006	0.9	-3.7	-1.2	3.8
2007	1.6	-4.1	-2.9	4.4