



Entwicklung einer langarmigen faseroptischen Strain-Rosette zum Monitoring eines Rutschhanges

Helmut Woschitz, Graz

Kurzfassung

Sensoren faseroptischer Messsysteme können direkt in Objekte eingebettet werden und liefern Informationen über das Verhalten aus dem Inneren des Objektes. Für eine Anwendung zum Monitoring eines Rutschhanges wurde eine langarmige Strain-Rosette entwickelt. Herausforderungen dabei waren die zur Untersuchung des Rutschverhaltens notwendige hohe Präzision der verwendeten interferometrischen SOFO-Systeme ($2\ \mu\text{m}$ für statische Messungen und $10\ \text{nm}$ für dynamische Messungen bei $1\ \text{kHz}$) und die dadurch bedingte mangelnde Möglichkeit, durchgreifende Kontrollmessungen im Feld durchzuführen. Herkömmliche geodätische Messsysteme sind dafür zu ungenau (etwa Faktor 10). Bei der Einbettung der Sensoren in den Rutschhang war aber auch die repräsentative Verankerung der Sensoren mit dem Erdmaterial kritisch. Ziel der Untersuchung ist es, mit statischen und dynamischen Messungen Informationen über das lokale Verformungsverhalten zu erhalten, die bei der Erforschung der Ursache der tiefreichenden Massenbewegung von großer Bedeutung sind. In dieser Arbeit wird insbesondere auf die Entwicklung und den Test der Strain-Rosette eingegangen und die hohe Leistungsfähigkeit der Rosette anhand von Experimenten gezeigt.

Schlüsselwörter: Verformungsmessung eines Rutschhanges, langarmige eingebettete Strain-Rosette, SOFO Sensoren

Abstract

Fiber optic sensors may easily be embedded into a structure and thus give information about internal deformations of the object. For the investigation of a deep-seated mass movement a large embedded strain rosette was developed. The sensors used are long gauge (5 m) fibre optical interferometers of SOFO type and allow the precise measurement of relative length changes. The high precision of the SOFO Systems ($2\ \mu\text{m}$ for long-term static measurements and $10\ \text{nm}$ for dynamic measurements with $1\ \text{kHz}$) was a real challenge in the development, as independent field-checks cannot be performed. Geodetic standard equipment gives precisions that are smaller by a factor of about 10. Thus laboratory testing becomes crucial. When embedding the sensors, their representative attachment to the ground material becomes very critical. It is the goal to use the strain rosette for investigating the local deformation behaviour of the sliding area, and consequently to derive deeper knowledge about the mechanism of the deep-seated mass movement. Static measurements for the long-term monitoring as well as dynamic measurements for the investigation of possible strain waves will be performed. This paper describes the development of the large strain rosette, its realisation by embedding it in the landslide area and shows the high capability (e.g. detecting strain waves with $1\ \text{nm}$ amplitudes) of the system using dedicated experiments

Keywords: Monitoring a mass movement, embedded long gauge strain-rosette, SOFO sensors

1. Einleitung

In dicht besiedelten alpinen Bereichen haben Hangrutschungen oft große wirtschaftliche und soziale Auswirkungen. Ihre Vorhersage ist daher von größter Bedeutung. Zur Untersuchung der tiefreichenden Massenbewegung Gradenbach wurde am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der TU Graz ein GPS Monitoring System entwickelt [1], mit dem die Rutschung seit 1999 untersucht wird. Die GPS Messungen zeigten eine blockförmige Bewegung mit einer starken Beschleunigung der Rutschmasse und einer darauf folgenden Verlangsamung (Abschnitt 2). Die Ursachen für die Beschleunigung und die plötzliche Verlangsamung sind unbekannt, könnten aber mit kleinräumigen und spontanen Prozessen im Hangmaterial in Zusammenhang stehen. Für die Messungen kleinräumiger

Verformungen wurde ein neues Messsystem entwickelt. Die Strain-Rosette besteht aus drei 5 m langen Sensoren, die in den Hang eingebettet werden. Die faseroptischen Sensoren und Messsysteme werden in den Abschnitten 3 und 4 vorgestellt. Das Konzept der Strain-Rosette und deren Entwicklung werden in Abschnitt 5 präsentiert und ihre Leistungsfähigkeit wird in Abschnitt 6 anhand eines Experiments gezeigt.

2. Rutschhang Gradenbach

Die tiefreichende Massenbewegung Gradenbach befindet sich am Ausgang des Gradenbachtals in das Mölltal in Kärnten, siehe Abb.1. Sie stellt in erster Linie eine Bedrohung für das Dorf Putschall dar. Die Höhenausdehnung der Rutschung beträgt etwa $1000\ \text{m}$ und der gesamte Hang rutscht auf einer Breite von $600\ \text{m}$

bis 1000 m. Das Volumen der stark zerklüfteten Rutschmasse beträgt etwa $120 \times 10^6 \text{ m}^3$. In den letzten Jahren traten Bewegungsraten von bis zu 0.6 m/Jahr auf. Die Rutschung wird seit langem von verschiedenen Gruppen untersucht und alle bekannten Untersuchungen wurden in [2] zusammengefasst, wo auch die Kinematik der Rutschung Gradenbach interpretiert wurde. Aktuell wird die Rutschung im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes von der TU Wien (Prof. E. Brückl) und der TU Graz (Prof. F.K. Brunner) näher untersucht. Dafür wurde ein GPS Monitoring System entwickelt, das aus sechs GPS Stationen besteht [1]. Vier Monitoringstationen (MA, MB, MC und MD) befinden sich im aktiven Rutschgebiet, zwei Referenzstationen (Ref. 1 und Ref. 2) wurden im unbewegten, stabilen Fels vermarktet, siehe Abb. 1.



Abb. 1: Tiefreichende Massenbewegung Gradenbach mit Rutschbereich (rot) und GPS Stationen Ref. 1, Ref. 2, MA, MB, MC und MD

Abb. 2 zeigt exemplarisch die Zeitreihen der rutschungsbedingten Höhenänderungen der vier Monitoringstationen seit Beginn der GPS Messungen (1999), wobei jeweils 48 h Mittelwerte aufgetragen wurden.

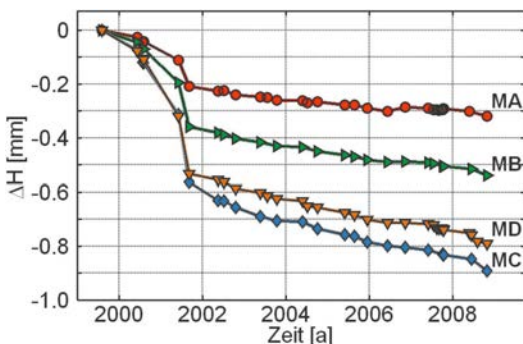


Abb. 2: Zeitreihe der mit GPS bestimmten Höhenänderungen ΔH

In den ersten Jahren der GPS Messungen konnte eine Beschleunigung der Rutschung beobachtet werden. Obwohl die gemessene Beschleunigung jener von bekannten katastrophalen Hangrutschungen ähnelt, verlangsamte sich glücklicherweise die Bewegung wieder. Die Gründe für dieses Phänomen sind unbekannt, wären aber für die Vorhersage des Verhaltens des Hanges und für das Risikomanagement von enormer Bedeutung.

Aus den mikroseismischen Untersuchungen der letzten Jahre (TU Wien) ist bekannt, dass am Hang Mikroerdbeben auftreten, die in Zusammenhang mit der tiefreichenden Massenbewegung des Gradenbach-Rutschhanges stehen. Deren Häufigkeit variiert im Jahresverlauf, wobei ein Mikrobeben (Dauer im Sekundenbereich) nur alle ein bis zwei Wochen auftritt.

Der Zusammenhang zwischen den Mikrobeben und der Massenbewegung ist noch unzureichend erforscht. Daher wurde das Konzept einer eingebetteten Strain-Rosette mit dem Ziel entwickelt, durch die sehr präzisen Messungen der lokalen Verformungssituation Hinweise auf die Geomechanik dieses Phänomens zu erhalten [3]. Neben statischen Messungen über längere Zeiträume (Monate bis Jahre) zur Erfassung des lokalen Verformungsfeldes sind daher auch hochfrequente Messungen (Tage bis Wochen) zur Untersuchung von möglichen Strainwellen notwendig. Zur Abschätzung der Genauigkeitsanforderungen an das Messsystem wurden die mit GPS erfassten Bewegungen benutzt. Diese sind in Tab. 1 für die beiden etwa 700 m voneinander entfernten Monitoringpunkte MA und MB angegeben, da zwischen diesen beiden Punkten der Einbau der Strain-Rosette möglich ist.

	Bewegung MB [mm]	Relativbewegung MB – MA [mm]
Langsame Perioden	72	-8
Beschleunigte Perioden	472	-92

Tab. 1: Jährliche Bewegung zweier GPS Monitoringpunkte

In [2] wurde gezeigt, dass die Bewegungsraten an unterschiedlichen Punkten am Rutschhang sehr ähnlich sind. Da keine weiteren Informationen vorliegen, wurde für die Abschätzung lineares Verformungsverhalten zwischen MA und MB angenommen, womit die Relativbewegung in den langsamen Perioden lediglich

-11 µm/m pro Jahr beträgt. Weiters wird dafür angenommen, dass die jährliche Gesamtbewegung durch etwa 20 Mikrobeben hervorgerufen wird, und jedes Beben den gleichen Beitrag zur Verschiebung liefert. Somit ergibt sich ein Verschiebungsbetrag von lediglich $\epsilon = 0.5 \mu\text{m/m}$ pro Beben.

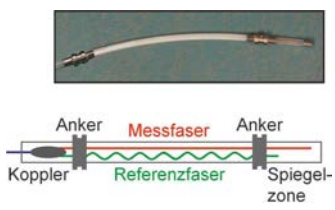


Aus diesen Überlegungen wird klar, dass geodätische Standardmessverfahren für diese Aufgabe nicht geeignet sind und ein hochgenaues Messsystem notwendig ist, um die lokalen Verformungen erfassen zu können. Weiters sollte dieses System zumindest über einen Tag stabil bleiben und keine Driften aufweisen, um die Lücke zwischen GPS (Beeinflussung durch Multipath) und Seismometer (Ableitung der Bewegung durch Integration nur über wenige Minuten möglich) schließen zu können. Damit könnte es möglich werden, schon im Entstehungsstadium einer gefährdenden Rutschung durch die Erfassung kleinster Veränderungen des Bewegungsprofils zuverlässige Warnungen zu geben.

3. Faseroptische Messsysteme vom Typ SOFO

Die Entwicklung von Glasfaser Sensoren (FOS) ist eng mit der rasanten Entwicklung der Telekommunikationsindustrie der letzten Jahrzehnte verbunden (Glasfasernetzwerke). Mittlerweile

gibt es zahlreiche sehr weit entwickelte Messsysteme, die kommerziell erhältlich sind und in manchen Anwendungsbereichen wegen ihrer Vorteile gegenüber klassischen Sensoren (z.B. elektromagnetische Immunität, geringe Größe, ...) nicht mehr wegzudenken sind. Diese Entwicklung wurde von Prof. F.K. Brunner seit langem verfolgt und ab 2001 als neues Forschungsthema für die Ingenieurgeodäsie aufgegriffen. Besonders interessant ist neben den hohen Messpräzisionen, dass sich FOS leicht in Objekte einbetten lassen und damit Messwerte aus dem Inneren eines z.B. Bauwerks liefern können. Damit lässt sich das ingenieurgeodätische Betätigungsfeld erweitern, da die für genaue Messungen oft bestehende Begrenzung durch eine Oberfläche (z.B. Erdoberfläche, Tunnelwand) überwunden werden kann [4], und sich damit neue Aufgabengebiete erschließen lassen.

Am Institut haben wir gute Erfahrungen mit dem SOFO System der Fa. Smartec (Roctest) gemacht [5]. Die SOFO Sensoren sind ein Beispiel für langarmige interferometrische FOS und erlauben die Bestimmung der Längenänderungen zwischen zwei Ankerpunkten mit sehr hoher Präzision. Zwei unterschiedliche Messeinheiten können mit denselben Sensoren verwendet werden: (a) das absolut messende SOFO-Static (2 µm Präzision) für Langzeitbeobachtungen und (b) das SOFO-Dynamic (<10 nm Auflösung

SOFO Sensor	SOFO-Static	SOFO-Dynamic
		
Sensorklänge: 0.25 – 10 m	Statische Anwendungen	Dynamische Anwendungen
Durchmesser: 8 mm	Absolute Messungen	Relative Messungen
Anschlusslänge: 1 –100 m	Messdauer: 6 s	Messfrequenz: 1 kHz
Messbereich: Dehnung: +1.5 % Schrumpfung: -0.5 %	Messbereich: 50 mm	Messbereich: ±5 mm
Linearität: 0.2 %	Präzision: 2 µm	Auflösung: <0.01 µm
	Drift: keine	Drift: <0.5 µm/d
	Sensorenanzahl: 1 (mit einem Multiplexer: 20)	Sensorenanzahl: max. 8

Tab. 2: SOFO Systeme und deren wichtigste Spezifikationen (Herstellerangaben)

bei 1 kHz) für dynamische Untersuchungen. Die Funktionsweise der beiden Systeme wurde bereits kurz in [6] zusammengefasst und kann für das SOFO-Static im Detail in [7] nachgelesen werden, und für das SOFO-Dynamic in [8]. In [9] wurden wesentliche Grundlagen für die Entwicklung dieser auf Weißlichtinterferometrie basierenden Systeme geschaffen. Die wichtigsten Spezifikationen der beiden SOFO Systeme sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Der große Vorteil des SOFO Systems ist, dass die Präzision de facto unabhängig von der Sensorlänge ist. Insbesondere für Messungen im zerklüfteten Untergrund bzw. Lockermaterial einer Rutschung ist dies ein gewaltiger Vorteil, da dort größere Sensorlängen notwendig sind, um repräsentative Verformungswerte zu erhalten. Wird beispielsweise ein 5 m langer Sensor benutzt, so lässt sich die Verformung mit dem SOFO-Static mit einer Präzision von $s_e = 0.4 \mu\text{m/m}$ (Einzelmessung) erfassen. Durch Mehrfachmessungen, sollte es daher möglich sein, die möglichen Mikrobeben-induzierten Bewegungen ($\epsilon \approx 0.5 \mu\text{m/m}$) signifikant erfassen zu können.

4. Test der FO Sensorik

4.1 Präambel

Aufgrund der hohen Präzision der faseroptischen (FO) Systeme ist es im Feld kaum möglich, unabhängige in-situ Messungen zur durchgreifenden Kontrolle der Resultate einer eingebetteten Strain-Rosette durchzuführen. Geodätische Standardmethoden sind in der Regel an die Oberfläche gebunden und haben entweder eine zu geringe Präzision, oder sind von der Messfrequenz her beschränkt. Beispielsweise ist in einem kleinräumigen terrestrischen Präzisionsnetz (z.B. $200 \times 200 \text{ m}^2$) mit kalibrierter Totalstation und geeigneter Erfassung der atmosphärischen Bedingungen kaum eine höhere Präzision als $5 - 10 \mu\text{m/m}$ für relative Punktverschiebungen erreichbar, und die mit GPS erreichbare Präzision kann trotz größerer Basis über kurze Zeiträume infolge Multipatheffekten um einiges schlechter sein. Daher sind sowohl unabhängige Untersuchungen der verwendeten FO Messsysteme sowie die Überprüfung ihrer Funktionalität im Feld von zentraler Bedeutung. Beispiele dafür werden in den folgenden Abschnitten gebracht.

4.2 Überprüfung des SOFO-Static im Feld

In [10] wurde gezeigt, dass das SOFO-Static infolge der thermischen Ausdehnung der im Gerät integrierten Messspindel eine Temperaturabhängigkeit von $\Delta L \cdot 10 \text{ ppm/K}$ aufweist, wobei ΔL

der Längenunterschied zwischen Mess- und Referenzfaser ist. Diese führt über den gesamten Arbeitsbereich des Systems ($-20^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$, Verformungen kleiner 50 mm) zu Abweichungen bis zu $40 \mu\text{m}$. Aber auch die SOFO Sensoren weisen eine Rest-Temperaturabhängigkeit von etwa $L \cdot 0.5 \text{ ppm/K}$ auf [11], wobei L die durch die beiden Ankerpunkte definierte Länge des Sensors ist. Bei längeren Sensoren und größeren auf diese wirkenden Temperaturunterschiede können die Abweichungen durchaus größer sein als beim zuvor genannten Effekt. Für höchste Genauigkeitsansprüche sind daher die Messwerte bezüglich der Temperatur zu korrigieren.

Die Präzision und Stabilität des SOFO-Static können im Feld durch Messung eines Referenzsensors bestimmt werden. Dabei handelt es sich um einen etwa 20 cm langen, transportablen Sensor, bei dem sowohl Mess- als auch Referenzfaser lose in einem Schutzschlauch liegen. Der Sensor besitzt keine Anker und ist damit resistent gegen eine von außen aufgetragene Dehnung. Damit bleibt der Längenunterschied ΔL zwischen den beiden Fasern über die Zeit konstant und dieser kann als Referenzwert benutzt werden.

In Abb. 3 sind solche Kontrollmessungen von etwa 150 Epochen dargestellt, die in den letzten 6 Jahren bei unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen (Messlabor, im Feld beim Prototyp der Strain-Rosette und am Rutschhang) durchgeführt wurden. Der verwendete Referenzsensor hat einen Faserlängenunterschied von $\Delta L = 12.736 \text{ mm}$, um den die Messwerte streuen. Gezeigt sind jeweils die 16 Einzelmesswerte sowie der Mittelwert pro Epoche (temperaturkorrigiert). Für jede Epoche wurde die Präzision der Einzelmessung bestimmt und diese liegt zwischen $0.4 \mu\text{m}$ und $1.5 \mu\text{m}$ und ist damit im Bereich der Herstellerangabe ($2 \mu\text{m}$). Die gute Langzeitstabilität des Systems ist anhand der geringen Variation der Mittelwerte ($\pm 2 \mu\text{m}$) zu erkennen.

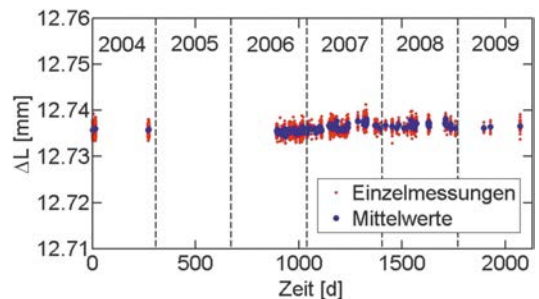


Abb. 3: Stabilität des SOFO-Static über die Zeit

4.3 Untersuchung des SOFO-Dynamic

Über Untersuchungen der SOFO-Dynamic Gerätes liegen kaum Veröffentlichungen vor. Daher wurden im Messlabor mehrere Testeinrichtungen aufgebaut, um selbst Erfahrungswerte zu sammeln und verschiedene Untersuchungen durchführen zu können. Als interessantes Beispiel wird hier eine Untersuchung zur Linearität gezeigt. In Abb. 4 ist der verwendete Aufbau dargestellt, mit dem ein SOFO Sensor kontrolliert gedehnt werden kann. Diese Bewegung wurde sowohl mit dem SOFO-Dynamic als auch einem Laserinterferometer erfasst. Ein 5 m langer SOFO Sensor wurde auf den Schienen des 30 m langen Horizontalkomparators befestigt. Ein Anker ist fix, der zweite auf einem manuellen Verschiebeapparat montiert. Beim Aufbau wurde das Abbe'sche Komparatorprinzip streng eingehalten und, um größere Cosinus-Fehler zu vermeiden, wurde der Sensor gegenüber dem Laserstrahl des Interferometers entsprechend ausgerichtet (Restfehler < 0.1 μm). Zur Überprüfung der Stabilität des fix montierten Ankers während der Dehnung des Sensors wurden zwei unabhängig gelagerte Heidenhain Messtaster (0.1 μm Auflösung) verwendet.

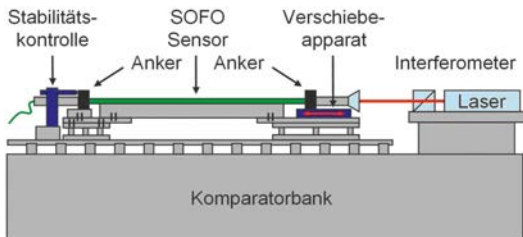


Abb. 4: Schematische Darstellung der Testeinrichtung zur Überprüfung der Linearität

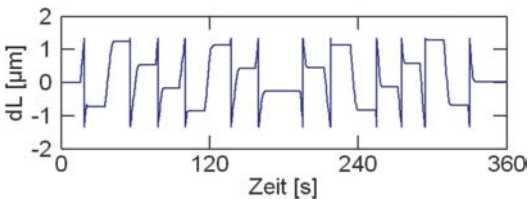


Abb. 5: Zeitreihe der SOFO-Dynamic Rohdaten bei der Linearitätsüberprüfung

In der Folge werden die Daten eines Versuchs gezeigt, bei dem der SOFO Sensor in 0.5 mm Schritten um 10 mm gedehnt (Hinmessung) und wieder entlastet (Rückmessung) wurde. Der maximal mögliche Messbereich (ca. 36 mm – 46 mm) wurde vorab empirisch festgelegt und ist einerseits durch die Vorspannung des SOFO Sensors, andererseits durch das bei größte-

ren Dehnungen schlechter werdende Signal/Rauschverhältnis des SOFO-Dynamic begrenzt. Abb. 5 zeigt die mit dem SOFO-Dynamic erfassenden Bewegungen. Sofort fallen die Unstetigkeitsstellen auf, die durch sprunghafte Änderung der Messwerte von etwa +1.3 mm auf –1.3 mm entstehen.

Die Ursache für diesen bis dato unbekanntem Effekt liegt im eingeschränkten Wertebereich der SOFO-Dynamic Rohdaten (n). Zur Verspeicherung von n wird der Datentyp Long Integer (32 bit) verwendet und die gemessenen Phasen müssen gemäß Glg. (1)

$$dL = \frac{n \cdot 2\pi}{2^{20} \cdot 9.6} \tag{1}$$

in relative Längenänderungen dL umgewandelt werden. Damit ergeben sich für die Grenzen des Wertebereichs von n die festgestellten dL von ca. ±1.3 mm. Eine Korrektur der Sprünge ist nach der Detektion der Sprungstellen aber leicht möglich.

Aufgrund thermischer Inhomogenitäten im SOFO-Dynamic sind die erfassten Daten zu meist driftbehaftet. Beispielsweise traten während der in Abb. 5 gezeigten Messung im Labor (Dauer ca. 4 Minuten) Driften von knapp 0.1 μm auf, die deutlich über der Präzision der Messung liegen ($s_{dL} \approx 6$ nm bei $f_s = 1$ kHz). Über längere Zeiträume und insbesondere bei sich ändernden Umgebungsbedingungen können aber durchaus größere Drieffekte auftreten. So wurden bei einer Messung im Feld über 14 Tage (mit Änderung der Außentemperatur um bis zu 20°C) Gesamtdriften von bis zu 0.2 mm festgestellt. Da aber auf allen Kanälen sehr ähnliche Drieffekte auftreten, können sie durch Subtraktion der Daten eines Referenzsensors ($dL = \text{const.}$) stark reduziert werden. Bei der 14-tägigen Messung konnten dadurch die Driften auf etwa 10 μm gesenkt werden. Für den Einsatz der Strain-Rosette sind die Driften aber insofern problematisch, dass sie üblicherweise einen langsamen Verlauf haben und daher nur schwer von kleinsten Bewegungen unterschieden werden können. Das SOFO-Dynamic kann daher das langzeitstabile SOFO-Static nicht ersetzen.

Nach der Driftkorrektur der Labordaten ist nun der Vergleich der mit dem SOFO-Dynamic (dL) und dem Interferometer (ΔL_{SOILL}) bestimmten Verschiebungen möglich. Dabei wurde für die SOFO-Dynamic Messwerte ein Maßstabsfaktor von 0.72 % festgestellt, der zwar groß, im messtechnischen Bereich aber nicht ungewöhnlich ist, und bei vielen Anwendungen mit sehr kleinen

Bewegungen kaum praktische Bedeutung hat. Die verbliebenen Restabweichungen gegenüber dem Interferometer sind in Abb. 6 dargestellt, wobei zwei aufeinander folgende Messungen (blau und grün) gezeigt werden.

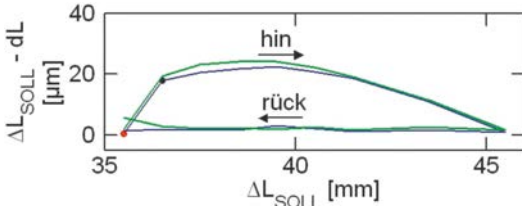


Abb. 6: Restabweichungen von SOFO-Dynamic Daten (maßstabskorrigiert) gegenüber dem Interferometer bei aufgebracht 10 mm Dehnung

Deutlich ist eine Hysterese mit Abweichungen von knapp $25 \mu\text{m}$ zu erkennen, die gut reproduzierbar ist. Solche Effekte wurden auch schon für das SOFO-Static gezeigt [10], und könnten auf das Verhalten des SOFO Sensors (z.B. visko-elastisches Verhalten des Schutzschlauchs, Verbindungsstelle Glasfaser – Anker, Kriechen der Beschichtung der Glasfaser) zurückzuführen sein. Der Hersteller gibt für den SOFO Sensor eine Linearität von 0.2 % des gemessenen Verformungsbetrags an [11], die nur geringfügig kleiner ist als die in Abb. 6 gezeigten Abweichungen.

Inwieweit die diskutierten Effekte für die eingebetteten Sensoren am Rutschhang mit den vergleichsweise kleinen Bewegungen relevant sind und ob daher entsprechende Korrekturen anzubringen sind, werden weitere Untersuchungen zeigen, die mit einer automatisierten und erweiterten Prüfanlage geplant sind. Diese steht nach intensiven Planungsarbeiten kurz vor der Fertigstellung.

5. Eingebettete langarmige Strain-Rosette

5.1 Präambel

Für die Messungen von Dehnungen im kompakten Fels sind mehrere Techniken bekannt [12]. Aber insbesondere bei geringer Größe der Sensoren versagen diese, wenn das Material zerklüftet ist, was in Rutschungszonen zumeist der Fall ist. Die Punkte zwischen denen die Verformung gemessen wird müssen daher weiter voneinander separiert werden, weshalb große Sensorlängen notwendig sind.

An einem für die Rutschung repräsentativen Einbauort sollte die Hauptdehnungsrichtung φ mit der Bewegungsrichtung des Hanges über-

einstimmen. Bei lokalen Störungen, hervorgerufen z.B. durch eine sekundäre Rutschung, kann φ aber auch stark davon abweichen. Daher ist es sinnvoll, φ mit dem Messsystem mitzubestimmen und die erfassten Dehnungen auf die Hauptdehnungsrichtung zu reduzieren. Dies ist mit einer Strain-Rosette möglich, die durch drei in einer Ebene in verschiedene Richtungen angeordneten Sensoren realisiert werden kann. Obwohl Strain-Rosetten seit langem bekannt sind, können Standard Strain-Rosetten aber nicht zur Erfassung der Verformungen am Rutschhang verwendet werden, hauptsächlich wegen ihrer geringen Größe (wenige Zentimeter).

In Abschnitt 3 wurde abgeschätzt, dass lokale Verformungen mit dem SOFO-Static ($2 \mu\text{m}$ Präzision) mit einer Präzision von $s_\varepsilon = 0.4 \mu\text{m}/\text{m}$ bestimmt können, wenn 5 m lange SOFO Sensoren für die Strain-Rosette verwendet werden. Die Hauptdehnungsrichtung φ kann mit den in der experimentellen Spannungsanalyse gebräuchlichen Beziehungen berechnet werden. Die Präzision mit der φ bestimmbar ist, hängt auch von den auftretenden Verformungen ab. Mit den in Abschnitt 2 abgeschätzten Werten (sehr geringe Dehnung in Hauptdehnungsrichtung $\varepsilon_1 = 10 \mu\text{m}/\text{m}$) lässt sich die Hauptdehnungsrichtung mit einer Präzision von $s_\varphi = 1.8^\circ$ bestimmen [3].

5.2 Bau eines Prototyps

Für die Einbettung von SOFO Sensoren in Lockermaterial (Erdreich, zerklüfteter Fels) lagen keinerlei Berichte oder sonstige Erfahrungswerte vor. Daher sollte mit einem Prototyp überprüft werden, ob eine langarmige faseroptische Strain-Rosette überhaupt realisierbar ist. Insbesondere war zu klären, ob die Glasfasersensoren unbeschädigt ins Erdreich integriert und repräsentativ mit diesem verbunden werden können (Verankerung) und ob die beiden SOFO Systeme unter den Einsatzbedingungen im Feld die erwartete Leistung liefern.

Der Bau eines Prototyps der Strain-Rosette erfolgte in unbewegtem Gebiet am Gelände der TU Graz, um bei der Erprobung des Systems frei von rutschungsinduzierten Effekten zu sein. Der Prototyp bestand aus drei SOFO Sensoren, die zueinander einen Orientierungsunterschied von 120° aufwiesen und einen gemeinsamen Zentralpunkt hatten. Die Länge der Sensoren wurde mit 5 m gewählt, da damit die notwendige Präzision (siehe Abschnitte 2 und 3) erreicht werden kann und sich der Aufwand der Grabungen noch in Grenzen hält. Die Verbindung der Ankerpunk-

te der SOFO Sensoren mit dem Bodenmaterial wurde mit einer Variante von Soilfrac ausgeführt, das hierfür besonders geeignet erscheint, aber sich als doch recht aufwändig in der Realisierung erwies.

Intensive Untersuchungen mit dem Prototyp bestätigen die hohe Leistungsfähigkeit der faseroptischen Sensorik und wurden in [3] präsentiert. Anhand der gesammelten Erfahrungen wurde das Konzept für die Strain-Rosette am Rutschhang adaptiert, insbesondere auch im Hinblick auf die schlechteren Rahmenbedingungen am Rutschhang (1600 m Seehöhe, fehlende Infrastruktur, keine oder eingeschränkte Zufahrtsmöglichkeiten, Störung durch Weidevieh).

5.3 Konzept für die Strain-Rosette Gradenbach

Die Lage der Strain-Rosette wurde nach mehreren Begehungen und Tests im Nahbereich der GPS Station MB festgesetzt, da hier der Untergrund geeignete Eigenschaften für den Einbau aufwies und die rutschungsbedingten Verschiebungen für die vorangegangenen Jahre vorlagen. Der Einbau erfolgte im Mai 2007, wobei die meisten Arbeiten manuell durchgeführt wurden, um eine Störung des Felsmaterials soweit als möglich zu vermeiden. Lediglich die Künetten wurden maschinell ausgehoben. Abb. 7 zeigt eine Prinzipskizze der Rosette mit den drei gegeneinander um 120° verdrehten, jeweils 5 m langen Sensoren. Die Sensoren wurden in drei getrennten Künetten hangparallel (ca. 10° Hangneigung) eingebaut und liegen mit geringen Abweichungen (<1 cm) in derselben Ebene. Gemäß den mit dem Prototyp der Strain-Rosette gewonnenen Erfahrungen wurde kein Zentralpunkt, sondern drei unabhängige Extensometer realisiert [6].

Die Orientierung der Rosette erfolgte derart, dass Sensor S1 parallel zur Bewegungsrichtung der GPS Station MB liegt, wodurch die bestmögliche Erfassung der bewegungsinduzierten Deformationen erreicht werden sollte. Die Tiefe der Sensoren unter der Oberfläche wurde so gewählt, dass sie möglichst unter der Frostgrenze liegen, um einerseits frostbedingte Effekte, andererseits den Verlust eines Sensors durch mögliche Eisbildung im Sensor und einen dadurch bedingten Faserbruch zu vermeiden. Verbindung zur Oberfläche wurde keine vorgesehen, um Störungen durch die Bewirtschaftung der Alm zu vermeiden. In Abb. 8 ist die Lage der Strain-Rosette während deren Bau zu sehen.

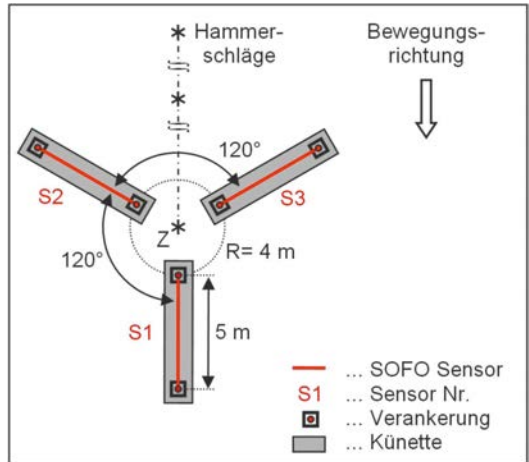


Abb. 7: Schematische Darstellung der Strain-Rosette



Abb. 8: Ansicht der Einbaustelle der Strain-Rosette in der Nähe des GPS Punktes MB

Abb. 9 zeigt schematisch die gewählte Verankerung für die SOFO Sensoren. An den beiden Enden jeder Künette wurden ca. 0.5 m tiefe Löcher mit einem Durchmesser von etwa 30 cm ausgehoben, armiert und später mit Beton verfüllt. Zur Stabilisierung einer kleinen Betonsäule wurden zusätzlich mehrere Armierungseisen in das lockere Felsmaterial getrieben. Am oberen Ende der Säule wurde eine Ankerplatte einbetoniert, und an diese spielfreie Adapter zur Montage der SOFO Sensoren befestigt.

Abb. 10 zeigt eine Künette mit faseroptischem Sensor während des Einbaus. Die Sensoren wurden beim Einbau um etwa 3 mm vorgespannt,

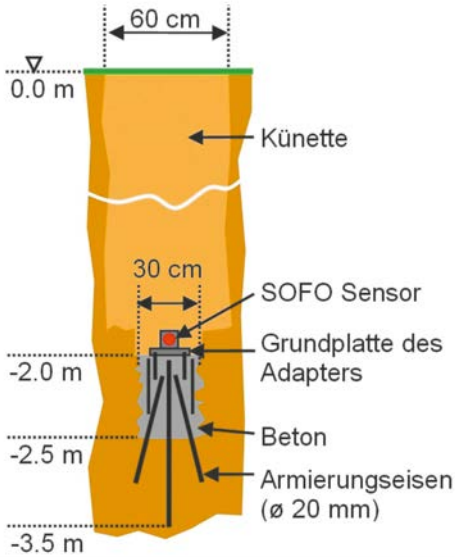


Abb. 9: Verankerungskonzept für die Sensoren der Strain-Rosette

um auch negative Deformationen unverfälscht messen zu können. Vor dem Zuschütten der Künetten wurden diese in Sand eingekoffert und zusätzlich gegen Wasser und Steinschlag geschützt.

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 entsprechend korrigieren zu können, und um diverse Abhängigkeiten untersuchen zu können. Zum Schutz des Instrumentariums wurde im Nahbereich der Strain-Rosette eine kleine Hütte errichtet.

Im Bereich um die Strain-Rosette wurde ein terrestrisches Präzisionsnetz bestehend aus 10 oberflächlich stabilisierten Punkten (verteilt auf ca. $250 \times 200 \text{ m}^2$) Information über das Deformationsverhalten zu erhalten. Die so abgeleiteten Daten können aber nur zur Verifikation dienen, da die erreichbare Präzision ($\sigma_\epsilon \approx 4 \mu\text{m/m}$) im Vergleich zur Strain-Rosette um etwa den Faktor 10 geringer ist.

Zusätzlich zu den faseroptischen Messungen wird zur Einbindung der Strain-Rosette in das GPS Netz auf deren Zentralpunkt Z eine weitere GPS Monitoring Station aufgebaut. Im Nahbereich der Rosette wurde auch ein Seismometer (TU-Wien) installiert, um die verschiedenen Systeme miteinander verbinden zu können.



Abb. 10: Faseroptischer Sensor beim Einbau

6. Test der Strain-Rosette Gradenbach

Die Verankerung der SOFO Sensoren mit dem Untergrund ist ein kritisches Element der Strain-Rosette. Daher sollte die Leistungsfähigkeit der Strain-Rosette zur Detektion von Strainwellen und die Reproduzierbarkeit der Signale anhand eines Experimentes mit künstlicher Anregung getestet werden.

Die Anregung erfolgte mittels Hammerschlägen auf den Boden (Schlagplatte), wie auch bei der Hammerschlagseismik. Die dadurch generierten Strainvariationen wurden mit dem SOFO-Dynamic (1 kHz Abtastfrequenz) erfasst. Aus Vorversuchen war bekannt, dass die Signale sehr klein sind ($< 1 \mu\text{m}$) und sich bei größeren Distanzen kaum mehr vom Rauschen abheben. Daher wurden mit einem 5 kg Hammer an jedem Anregungspunkt 16 aufeinander folgende Hammerschläge durchgeführt, um durch Überlagerung der Signale der Einzelschläge das Summensignal trotz geringem Signal-Rauschabstand sichtbar machen zu können. Während der an einem Anregungspunkt ca. 50 s dauernden Messung traten Driften von etwa 20 nm auf. Da der Referenzsensor bei diesem Experiment zur Synchronisation verwendet wurde, wurden die Driften vor der Weiterverarbeitung der Daten mittels Hochpass-Filterung (Grenzfrequenz 1 Hz) eliminiert. Beim Experiment erfolgte die Anregung an insgesamt 53 Positionen entlang dreier Linien (in Verlängerung zu den drei SOFO Sensoren).

Abb. 11 zeigt die Signale der überlagerten Einzelschläge und das daraus abgeleitete mittlere Signal für eine zum Zentrum der Rosette sehr nahe Distanz (5 m) und die größte beim Experiment realisierte (155 m). Beide Anregungspunkte lagen hangaufwärts in Verlängerung des Sensors S1, siehe Abb. 7. Für die Überlagerung der Signale der Einzelschläge wurden die aufgezzeichneten Zeitpunkte der Anregung verwendet. Gezeigt werden wie zuvor die Relativbewegungen dL der beiden Anker, gemessen mit Sensor S1. Die Signale der beiden anderen Sensoren weisen ähnlich große Amplituden auf, geometriebedingt treten jedoch auch unterschiedliche Frequenzen auf.

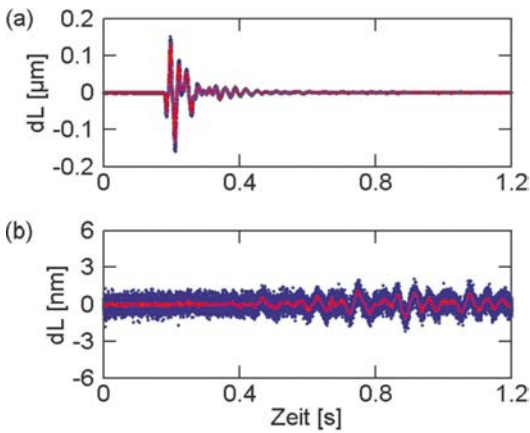


Abb. 11: Bei Sensor S1 auftretende Signale von 16 Hammerschlägen (blau) und deren Mittel (rot), (a) bei einer Distanz von 5 m und (b) bei 155 m

Bei der kurzen Distanz (5 m) sind die Signale deutlich sichtbar (ca. $0.14 \mu\text{m}$ Amplituden), wogegen sie (ca. 1 nm Amplituden) sich bei der großen Distanz (155 m) aufgrund der Energieabsorption im Untergrund kaum mehr vom Rauschen ($s_{dL} = 0.4 \text{ nm}$) abheben. Wie zu erwarten, reduziert sich durch die Mittelung der Signale der zufällige Rauschanteil (Verringerung der robusten Standardabweichung von 0.4 nm auf 0.1 nm), wodurch insbesondere bei der größeren Entfernung die anregungsinduzierten Signale erst deutlich sichtbar werden.

Anhand eines weiteren Beispiels soll die Reproduzierbarkeit der Signale gezeigt werden. In Abb. 12a, sind die Summensignale von drei an derselben Position (Entfernung 50 m) durchgeführten Versuchen dargestellt. Bei jedem Versuch erfolgte die Anregung wiederum mit je 16 Hammerschlägen, wobei alle drei Versuche in einem Zeitraum von 10 Minuten ausgeführt wurden. Zur deutlicheren Darstellung wurden die

drei Summensignale gegeneinander verschoben. Visuell sind kaum Unterschiede festzustellen, weswegen in Abb. 12b die Abweichungen gegenüber dem Gesamtmittel dargestellt wurden (wiederum gegeneinander verschoben dargestellt). Die maximale Abweichung beträgt 0.7 nm und liegt damit weit unter der vom Hersteller doch eher restriktiv angegebenen Auflösung.

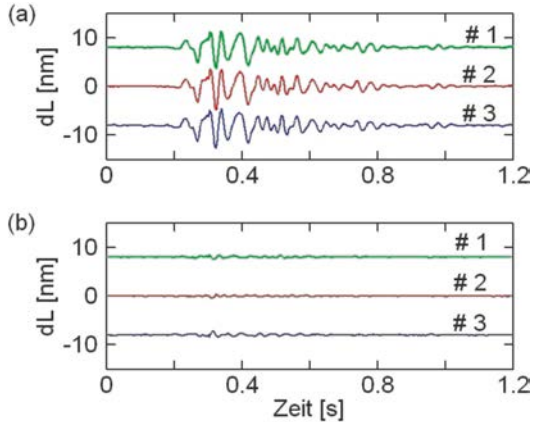


Abb. 12: (a) Bei Sensor S1 auftretende Summensignale dreier aufeinander folgender Hammerschlagversuche in 50 m Entfernung mit je 16 Einzelschlägen und (b) Abweichungen der drei Summensignale von ihrem Mittel

Die hohe Reproduzierbarkeit des Signals bei verschiedenen Anregungen zeigt auch, dass die Verbindung der Anker mit dem Untergrund sehr gut ist und die in sie gesetzten Erwartungen voll erfüllen kann. Die durch die Hammerschläge verursachten Signale haben extrem kleine Amplituden, und die zwischen 700 nm (Anregungspunkt direkt bei der Strain-Rosette) und etwa 1 nm (bei 155 m Entfernung) liegen. Die hohe Sensitivität des SOFO-Dynamic und der Strain-Rosette macht die Erfassung dieser kleinen Signale erst möglich.

7. Resümee

Auf Basis von faseroptischen SOFO Sensoren wurde eine langarmige Strain-Rosette entwickelt und es konnte gezeigt werden, dass diese die für die Untersuchung der Rutschung Gradenbach notwendige hohe Präzision aufweist. Die eingesetzten faseroptischen Systeme lassen sich im Feld aber gerade wegen ihrer hohen Präzision kaum unabhängig überprüfen, weshalb Systemuntersuchungen im Messlabor von zentraler Bedeutung sind. Dafür wurden im Labor bereits einige Prüfeinrichtungen für faseroptische Dehnungssensoren entwickelt und verschiedenste

Untersuchungen durchgeführt. Basierend auf diesen Resultaten wurde eine Kalibrieranlage für die Bestimmung statischer Kennwerte konzipiert, die kurz vor ihrer Fertigstellung ist. Mit dieser und einer weiteren Anlage zur Bestimmung dynamischer Kenngrößen, die sich zurzeit in Entwicklung befindet, werden künftig weitere für die Rutschung relevante sensortechnische Aspekte untersucht werden.

Das SOFO-Static wurde bereits über einen längeren Zeitraum am Gradenbach eingesetzt. Von August 2007 bis November 2008 traten an der Strain-Rosette Verformungen von etwa 0.2 mm auf, siehe [6]. Alleine im Juni 2008 traten Bewegungen von etwa 0.13 mm auf, die ein geändertes Rutschverhalten des Hanges zeigen. Unabhängige Messungen zeigten für diesen Zeitraum eine Verdoppelung der Geschwindigkeit. Eine Änderung des Bewegungsmusters ist mit der Strain-Rosette also tatsächlich nachweisbar.

In [3] konnte anhand der Untersuchungen mit dem Prototyp der Strain-Rosette gezeigt werden, dass aus den mit den SOFO Sensoren bestimmten Dehnungen die Hauptdehnungsrichtungen ableitbar sind. Daher wurde zur Erweiterung des vorhandenen SOFO-Static (Einkanalgerät) ein faseroptischer Multiplexer angeschafft, mit dem nun seit 2009 auch am Rutschhang alle drei Sensoren kontinuierlich beobachtet werden können.

Die hohe Sensitivität der Strain-Rosette in Verbindung mit dem SOFO-Dynamic ermöglicht die Erfassung von extrem kleinen Bewegungsamplituden (1 nm). Allerdings weist das SOFO-Dynamic Driften auf, die mehrere μm pro Tag betragen können. Bisher konnte mit der Strain-Rosette noch kein einem Mikrobeben zuordenbares Signal erfasst werden und es ist noch nicht klar, ob die mit den Seismometern erfassbaren Signale der Mikroerdbeben mit der Strain-Rosette überhaupt erfassbar sind, insbesondere da die Systeme zueinander unterschiedlich ausgerichtet (vertikal bzw. näherungsweise horizontal) sind. Die hohe Sensitivität des Systems bedingt aber auch, dass viele Störsignale erfasst werden. Ein Beispiel dafür wurde in [13] gezeigt, wo eine sich abseits der Strain-Rosette bewegend Person Signalamplituden von etwa 10 nm verursacht hat. Mit den Daten der Strain-Rosette alleine ist es daher derzeit nicht möglich, Signale, die durch Mikrobeben hervorgerufen werden, von Störsignalen zu unterscheiden, insbesondere da deren Signalstrukturen (Strain-Rosette) noch vollkommen unbekannt sind. Daher erfolgt die Klassifikation der Signale und Identifikation jener Signale, die durch die Hangrutschung

hervorgerufen werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes durch das Seismometerfeld der TU Wien.

Erschwerend kommt hinzu, dass Mikrobeben am Hang selten auftreten und deshalb eine Portion Glück notwendig ist, um bei einer mehrwöchigen Messkampagne zumindest ein Mikrobeben erfassen zu können. Bei den bisherigen Untersuchungen konnte das Signal eines lokalen Erdbebens mit Epizentrum in Serbien erfasst werden, siehe [13].

Danksagung

Diese gezeigten Arbeiten wurden im Rahmen eines von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften geförderten Forschungsprojektes durchgeführt, welches einen österreichischen Beitrag zu ISDR darstellt. Dabei wird die tiefreichende Massenbewegung Gradenbach mit GPS und Strainmessungen (TU Graz, Prof. Dr. F.K. Brunner) sowie mit mikroseismischen Messungen (TU Wien, Prof. Dr. E. Brückl) untersucht. DI H. Hausmann (TU Wien) hat beim Hammerschlagexperiment mitgewirkt. Besonderer Dank gilt allen Projektmitarbeitern (DI G. Gassner, DI R. Klostius, Mag. F. Zobl, DI D. Gander), die die vielen GPS Messkampagnen durchgeführt haben, und den Kollegen am Institut, die beim Bau der Strain-Rosette (Ing. R. Lummerstorfer, Ing. R. Presl, DI K. Macheiner) geholfen haben und die Testmessungen unterstützten. Der Österreichischen Geodätischen Kommission danke ich für die Zuerkennung des Karl-Rinner Preises und die damit verbundene Anerkennung meiner Arbeiten.

Referenzen

- [1] Brunner FK, Zobl F, Gassner G (2003): On the Capability of GPS for Landslide Monitoring. *Felsbau* 21: 51-54
- [2] Brückl E, Brunner FK, Kraus K (2006): Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. *Engineering Geology* 88: 149-159
- [3] Brunner FK, 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
- [4] Brunner FK (2009): Faseroptische Sensorik: Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie? *Öst. Z. f. Vermessung und Geoinformation* 97: 335-342
- [5] Lienhart W (2007): Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data. Serie "Engineering Geodesy – TU Graz", Shaker Verlag
- [6] Brunner FK, Woschitz H (2009): Langarmige eingebettete Strain-Rosette zum Monitoring eines Rutschhanges. 24. Christian Veder Kolloquium „Stabilisierung von Rutschhängen, Böschungen und Einschnitten“, Mittl. Gruppe Geotechnik, TU Graz, 35: 263-278
- [7] Inaudi D, Elamari A, Pflug L, Gisin N, Breguet J, Vurpillot S (1994): Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil-engineering structures. *Sensors and Actuators A* 44: 125-130
- [8] Inaudi D, Glisic B, Posenato D (2004): High-speed demodulation of long-gauge fibre optic strain sensors for dynamic structural monitoring. In *Boller C, Staszews-*

- ki WJ (eds.) 'Structural Health Monitoring 2004, Proc. 2nd Europ. Workshop on Structural Health Monitoring', München, DEStech publ., 485-491
- [9] Koch A, Ulrich R (1991): Fiber-optic displacement sensor with 0.02 μm resolution by white-light interferometry. *Sensors and Actuators A*, 25-27: 201-207
- [10] Lienhart W (2005): Experimental Investigation of the Performance of the SOFO Measurement System. In *Fu-Kuo Chang* (ed.) 'Structural Health Monitoring 2005, Proc. 5th Int. Workshop on Structural Health Monitoring', Stanford, USA: 1131-1138
- [11] Inaudi D (2004): Testing performance and reliability of fiber optic sensing system for long-term monitoring. Proc. 2nd European Workshop on Optical Fibre Sensors, Santander, Spain, 9-11 June 2004
- [12] Amadei B, Stephansson O (1997): Rock stress and its measurement. Chapman & Hall, London
- [13] Woschitz H, Brunner FK (2008): Monitoring a deep-seated mass movement using a large strain rosette. 13th Int. Symp. on Deformation Measurement and Analysis, May 12-15, 2008, Lisbon, Portugal

Anschrift des Autors

Dr. Helmut Woschitz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz
E-Mail: helmut.woschitz@tugraz.at