

Geodätische Überwachung von gravitativen Massenbewegungen am Beispiel des Gradenbach-Observatoriums

Werner Lienhart und Fritz K. Brunner

Zusammenfassung

Deformationsmessungen zur Überwachung von großen Ingenieurbauten und natürlichen Phänomenen gehören zu den Kerngebieten der Ingenieurgeodäsie. Die komplexen Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und auftretenden Deformationen können jedoch nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit von Experten unterschiedlicher Fachrichtungen gewinnbringend untersucht werden. Dies trifft insbesondere auf die Überwachung von gravitativen Massenbewegungen wie Hangrutschungen zu. Eine erfolgreiche Zusammenarbeit ist das Gradenbach-Observatorium zur Überwachung der Hangrutschung Gradenbach. Anhand dieses Beispiels werden die Komplexität moderner Überwachungssysteme, die erreichbaren Genauigkeiten und ausführlich der Beitrag der Ingenieurgeodäsie aufgezeigt.

Summary

Deformation measurements of large civil engineering structures and of natural phenomena are core competences of engineering geodesy. The analysis of the complex cause-response relationship between acting forces and resulting deformations is only possible in an interdisciplinary way where experts of different scientific fields collaborate. An example of such a successful collaboration is the Gradenbach Observatory for the monitoring of the landslide Gradenbach. In the context of this case study the complexity of modern monitoring systems, the achievable accuracies and extensively the role of engineering geodesy is discussed.

Schlüsselwörter: Geodätisches Monitoring, Deformationsmessung, Rutschhang, Gradenbach-Observatorium, Österreich

1 Einleitung

Gravitative Massenbewegungen wie Hangrutschungen und Muren sind natürliche Prozesse in alpinen Regionen. Prozesse, die in der Nähe von Siedlungen oder Infrastrukturanlagen stattfinden, verursachen große wirtschaftliche Schäden und gefährden Menschenleben. Daher ist die möglichst präzise Voraussage solcher Phänomene mit Ort, Zeit und Geschwindigkeit von größter Bedeutung.

Derzeit sind die Mechanismen, die zu einer Beschleunigung und späteren Verlangsamung einer Hangrutschung führen, nur unzureichend bekannt. Um ein besseres Verständnis zu erreichen, wurden in den vergangenen zehn Jahren mehrere Forschungsprojekte initiiert. Eine Auswahl von laufenden und vor kurzem abgeschlossenen Forschungsprojekten im Alpenraum zur Überwachung von Hangrutschungen zeigt Tab. 1.

Tab. 1: Forschungsprojekte zur Überwachung von Hangrutschungen

Projekt	Geodätische Verantwortung	Laufzeit
Gradenbach Observatorium	TU Graz	1999–2012
ILEWS	Uni Bonn	2007–2010
alpEWAS	TU München Uni BW München	2007–2010
KASIP	TU Wien TU Darmstadt	2008–2012

Im Rahmen dieser Forschungsprojekte wurden moderne Überwachungssysteme entwickelt mit deren Hilfe eine Früherkennung von Hangrutschungen möglich sein sollte. Für die geodätischen Überwachungsmessungen werden dafür häufig die satellitenbasierte Positionierung mittels GPS (oder allgemein GNSS) und tachymetrische Messungen mit Totalstationen (TPS) eingesetzt. Im Fall der bereits erwähnten Forschungsprojekte wurden auch neue Messverfahren erstmalig eingesetzt, welche noch nicht zu den Standardmethoden in der Überwachung von Hangbewegungen gehören. Im Fall des Gradenbach-

Tab. 2: Eingesetzte Technologien zur Bestimmung von Deformationen bei modernen Überwachungssystemen von Hangrutschungen

Projekt	GNSS	TPS	NIV	GB-SAR	VTPS	FOS
Gradenbach Observatorium						
ILEWS						
alpEWAS						
KASIP						

Observatoriums sind dies faseroptische Sensoren (FOS), im Projekt alpEWAS (Thuro et al. 2010) Videotachymetrie mit Totalstationen mit integrierten Kameras (VTPS) und im Projekt KASIP (Eichhorn 2012) bodenbasierte Radarinterferometer (GB-SAR). Die Frühwarnung gewinnt mit der entsprechenden Sensorikausstattung immer mehr an Bedeutung. Dieser Aspekt wurde im Projekt ILEWS (Bell et al. 2010) eingehend betrachtet. Einen Überblick über die zur Deformationsmessung verwendeten Sensoren der einzelnen Projekte gibt Tab. 2.

Die komplexen Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und auftretenden Deformationen können jedoch nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit von Experten unterschiedlicher Fachrichtungen gewinnbringend untersucht werden. Die geodätischen Messungen müssen dabei um geotechnische Messungen und Messungen von Einflussgrößen wie Niederschlag ergänzt werden. Die in diesem Beitrag beschriebene Zusammenarbeit von Geodäten, Geophysikern und weiteren Experten konzentriert sich auf die Hangrutschung Gradenbach, was einem Labor allerdings in freier Natur entspricht und daher Gradenbach-Observatorium genannt wird (Brückl et al. 2013). Hier wird kurz das Labor vorgestellt mit besonderer Betrachtung des geodätischen Teils.

2 Überwachungsobjekt Massenbewegung Gradenbach

Die tiefreichende Massenbewegung Gradenbach liegt am Ausgang des Gradientals in das Mölltal (Südostflanke des Eggerwiesenkopfs) in Kärnten, Österreich. In erster Linie ist die nahegelegene Ortschaft Putschall durch diese Rutschung gefährdet. Die Rutschfläche variiert in



Abb. 1: Massenbewegung Gradenbach

der Breite zwischen 600 m und 1.000 m und besitzt eine Höhenausdehnung von ca. 1.000 m. Die Abrisskante ist in Abb. 1 dargestellt. Das Volumen der stark zerklüfteten Rutschmasse ist ungefähr $6 \cdot 10^7 \text{ m}^3$. Ausgelöst durch Hangrutschungen gab es in den Jahren 1965 und 1966 katastrophale Ereignisse, bei denen die Ortschaft Putschall verwüstet wurde. Teile der Siedlung waren meterhoch unter Schutt begraben und mehrere Häuser mussten aufgegeben werden (Kronfellner-Kraus 1967).

Auch 2012 ist der Hang trotz einer Vielzahl von technischen und flächenwirtschaftlichen Maßnahmen noch immer in Bewegung, und die von ihm ausgehende Gefahr ist noch nicht gebannt.

3 Systembetrachtung

Nach den katastrophalen Ereignissen in den Jahren 1965/66 wurde mit einer intensiven messtechnischen Überwachung des Rutschhangs begonnen. Bereits zu Beginn wurden neben Deformationen auch mögliche Einflussgrößen erfasst, sodass heute eine Vielzahl von Messdaten zur detaillierten Analyse des Übertragungsverhaltens von Einflussgrößen in Deformationen zur Verfügung steht. Für eine moderne Auswertung unter Betrachtung des Überwachungsobjektes als dynamisches System sind diese langen Datenreihen sehr wertvoll, da damit die kausale Kette von Einflussgrößen und Deformationen modelliert werden kann und Abweichungen vom »normalen« Bewegungsverhalten des Rutschhangs festgestellt werden können. Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen, aber erste Modelle wurden von Brückl et al. (2006) vorgestellt.

4 Das Gradenbach-Observatorium

Neben den katastrophalen Bewegungen 1965/66 gab es weitere beschleunigte Phasen in den Jahren 1975, 2001 und 2009. Auch außerhalb der stark aktiven Phasen ist der Hang permanent in Bewegung und weist eine Kriechbewegung von ca. 12 cm/Jahr auf. Die vor mehr als 40 Jahren begonnenen Überwachungsmessungen wurden sukzessive erweitert. Seit 1999 wurde der Ausbau des Monitoringsystems durch konzentrierte Aktivitäten im Rahmen von IDNDR und ISDR Programmen der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) beschleunigt. Heute bilden die am Hang installierten Sensoren gemeinsam mit der Datenübertragung und der automatisierten Datenauswertung einen wesentlichen Teil des sogenannten Gradenbach-Observatoriums, Brückl et al. (2013). Dessen Entwicklung und der derzeitige Ausbau werden im Folgenden näher beschrieben. Ein Überblick über die derzeit am Hang durchgeführten Beobachtungen kann Abb. 2 entnommen werden. Neben Einzelstationen sind auch Sensorknoten vorhanden, an denen unterschiedliche Messgrößen am selben Ort erfasst werden.

Grundlage des Gradenbach-Observatoriums sind die Messungen von Einflussgrößen und Deformationen, welche in interdisziplinärer Zusammenarbeit vom Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz,

der Forschungsgruppe Geophysik der TU Wien und der Abteilung Wildbach und Erosion des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien (BFW) durchgeführt werden. Für eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Messungen und deren Zusammenwirken siehe Brückl et al. (2013). Ziel der Überwachung ist die Erhöhung der Sicherheit der benachbarten Kommunen und deren Einwohner, ein besseres Verständnis des kausalen Zusammenhangs zwischen Einflussgrößen und Deformationen und die Beurteilung der Effektivität von bereits implementierten Sicherungsmaßnahmen. Das Gradenbach-Observatorium bietet eine Basis für die Entscheidungsfindung von zukünftigen Aktivitäten zur Stabilisierung der Hangrutschung Gradenbach und liefert Erkenntnisse, welche die Übertragung auf andere Rutschhänge ermöglichen sollten.

Im Detail werden folgende Gruppen von Messungen durchgeführt:

- Einflussgrößen
 - Meteorologische Messungen (BFW)
 - Hydrologische Messungen (BFW)
- Deformationen
 - Geotechnische Messungen (BFW)
 - Geodätische Messungen (IGMS)
 - Faseroptische Messungen (IGMS)
 - Seismische Messungen (TU Wien)

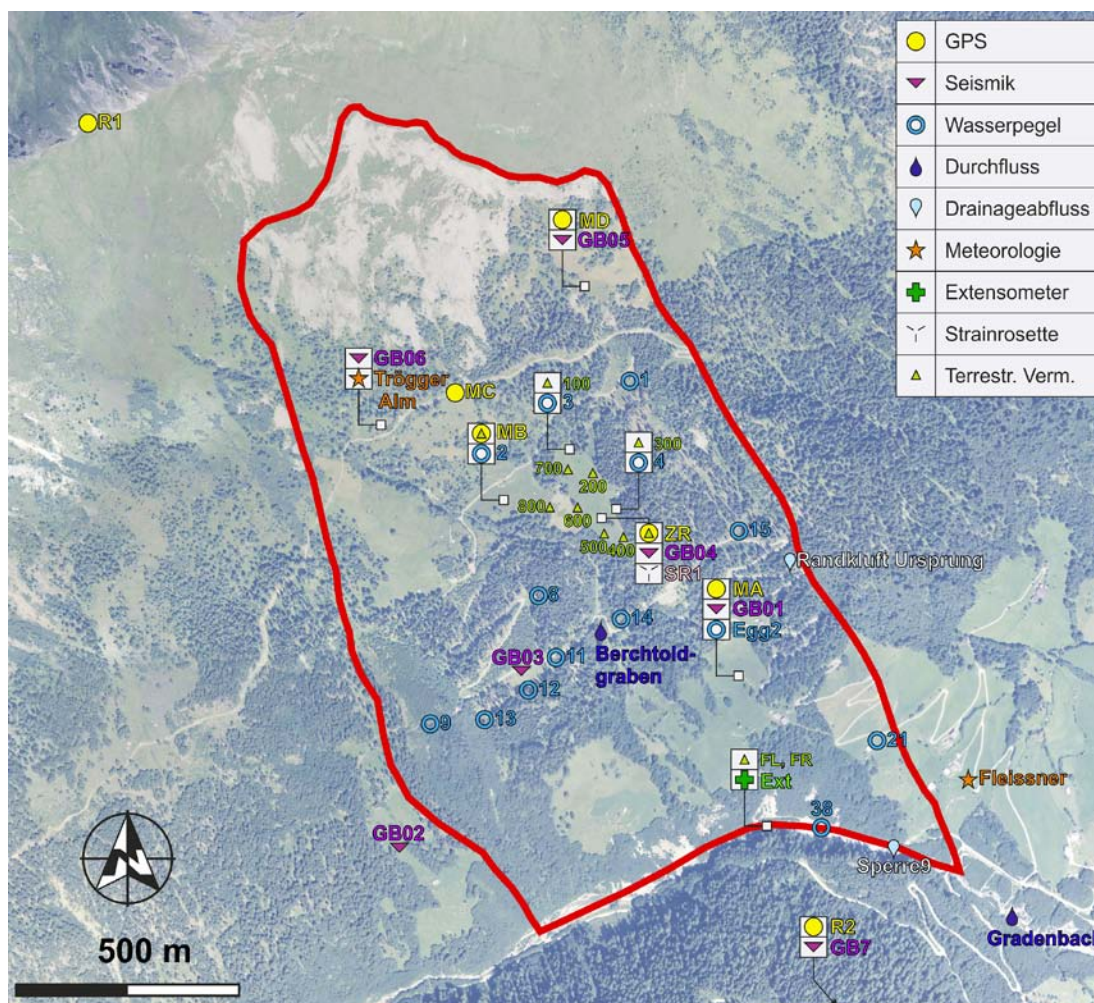


Abb. 2:
Gradenbach-
Observatorium,
Stand der Be-
obachtungen im
Jahr 2012

5 Messung der Einflussgrößen

Für ein besseres Verständnis einer Hangrutschung und zur Entwicklung von Frühwarnsystemen ist es essentiell, die aktuelle Wassersituation im Hang beurteilen und deren Entwicklung vorhersagen zu können. Zu diesem Zweck werden am Gradenbach-Observatorium meteorologische und hydrologische Messungen von Parametern, welche die Hangdurchfeuchtung beeinflussen, durchge-

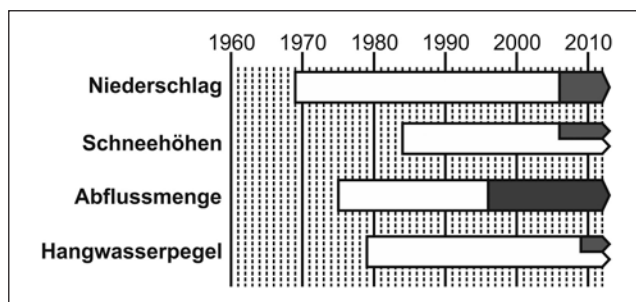


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung von meteorologischen und hydrologischen Messungen am Gradenbach-Observatorium mit Übergang von manuellen Messungen (weiße Balken) zu automatisierten Messungen (dunkle Balken)

führt. Für den Wassereintritt in den Hang sind Niederschläge und Schneeschmelze verantwortlich. Um diese Parameter erfassen zu können, werden an zwei meteorologischen Stationen Temperatur und Niederschlag kontinuierlich aufgezeichnet. Die Lage dieser Stationen kann Abb. 2 entnommen werden. An der Station Trögger Alm werden ergänzend zu Temperatur und Niederschlag auch Schneehöhen automatisiert gemessen. Zusätzlich erfolgen wöchentliche manuelle Messungen des Wasseräquivalents der Schneedecke in 14 Höhenlagen.

Um die aktuelle Hangdurchfeuchtung bestimmen zu können, werden am Rutschhang die lokalen Wasserpegel in Bohrlöchern gemessen. Bei zwei Bohrlöchern erfolgt die Aufzeichnung automatisiert, an weiteren elf Bohrlöchern wöchentlich manuell. Die Wasserdurchflussmengen werden automatisiert an vier Stationen aufgezeichnet. Die Stationen Gradenbach und Berchtoldgraben messen die oberirdische Durchflussmenge. Zwei weitere Stationen messen die Wasseraustrittsmenge aus dem Hang im Bereich der Hangdrainagen.

Mit dem vorliegenden Messprogramm kann demnach festgestellt werden, wie viel Wasser in den Hang eindringen kann, wie viel Wasser sich derzeit im Hang befindet und wie viel aus dem Hang austritt. Abb. 3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Erfassung der Einflussgrößen nach den Katastrophen in den Jahren 1965/66. Erkennbar ist, dass in den letzten zehn Jahren ein Großteil der Messsysteme sukzessive auf einen automatisierten und kontinuierlichen Betrieb umgestellt wurde. Dieses Thema wird im Abschnitt 6.2 nochmals aufgegriffen.

6 Deformationsmessungen

Das Gradenbach-Observatorium zeigt auch die technischen Entwicklungen im Monitoring in den letzten Jahrzehnten. Klar erkennbar ist die Tendenz zur vollständigen Automatisierung und kontinuierlichen Aufzeichnung

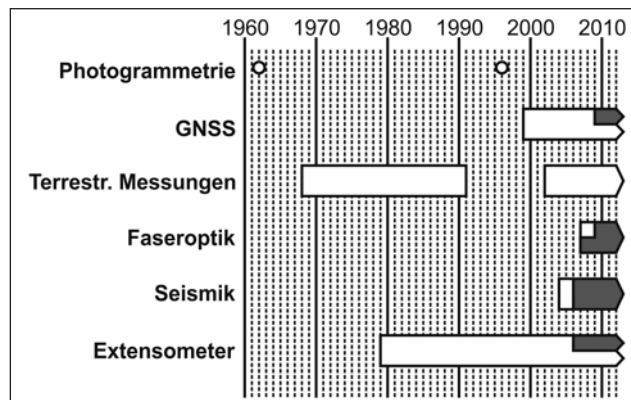


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung von Deformationsmessungen am Gradenbach-Observatorium mit Übergang von manuellen Messungen (weiße Balken) zu automatisierten Messungen (dunkle Balken)

der Messdaten. Die ersten Deformationsmessungen am Rutschhang waren konventionelle Polygonzugsmessungen. Wie Abb. 4 zeigt, kamen mit der Zeit neue Messsysteme hinzu, die heute etabliert sind und zum Stand der Technik gehören (GPS), und Systeme, die sich erst am Beginn eines routinemäßigen Einsatzes befinden, wie z. B. faseroptische Messsysteme.

6.1 Photogrammetrische Auswertung

Das enorme Ausmaß der Bewegung des Rutschhanges Gradenbach kann man an der photogrammetrischen Auswertung der Orthophotos aus den Jahren 1962 und 1996 erkennen (Brückl et al. 2006). Diese Zeitspanne beinhaltet sowohl die katastrophalen Ereignisse 1965/66 als auch das nachfolgende Kriechen des Rutschhanges mit kurzen beschleunigten Perioden. Die aus der Auswertung abgeleitete mittlere Bewegung von Punkten am Hang beträgt ca. 19 m. Im Mittel sind dies ca. 0,6 m/Jahr (s. Abb. 5).

6.2 GNSS Messungen

6.2.1 Entwicklung des Monitoring Systems CODMS

Um das Rutschverhalten zeitlich besser auflösen zu können, wurde am IGMS ein kontinuierliches GPS-Monitoringsystem entwickelt (CODMS, Continuously Operating GPS Deformation Monitoring System), siehe Hartinger und Brunner (2000). Dieses wurde 1999 erstmalig am Gradenbach eingesetzt und seither schrittweise ausgebaut. Zu Beginn wurden die Messungen epochenweise zwei

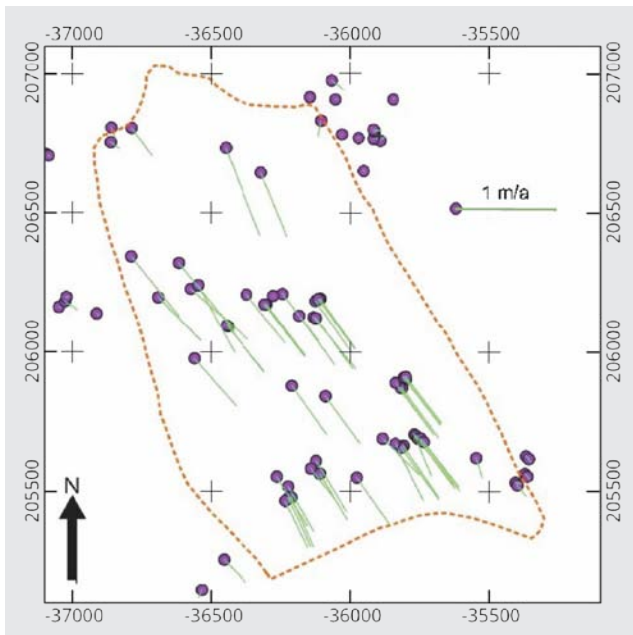


Abb. 5: Mittlere jährliche Verschiebung berechnet aus Orthophotos von 1962 und 1996 (Brückl et al. 2013)

Mal im Jahr durchgeführt. Ab dem Jahr 2009 wurde die Datenübertragung auf GPRS-Modems umgestellt und das Monitoringsystem für einen Ganzjahresbetrieb aufgerüstet. In der derzeitigen Ausbaustufe werden zwei GNSS-Monitoringstationen (MA und MC) am Hang und zwei GNSS-Referenzstationen (R1 und R2) permanent über das ganze Jahr betrieben. Die Stromversorgung erfolgt dabei über wiederaufladbare Batterien, die über Solarpanele gespeist werden. Abb. 6 zeigt den Aufbau einer solchen GNSS Station. Verwendet werden Choke Ring Antennen auf Stativen. Zur Erhöhung der Stabilität sind die Stativ mit Stahlseilen abgespannt. Neben dem Stativ befindet sich eine geerdete Schutzbox, welche die elektronischen Geräte vor Blitzschlag und generell vor Umwelteinflüssen schützt. In der Schutzbox befinden sich die aufladbaren Batterien, der GPS-Empfänger, ein Datenlogger und das GPRS-Modem. Zur Datenübertragung ist neben der Schutzbox eine GPRS-Antenne installiert.

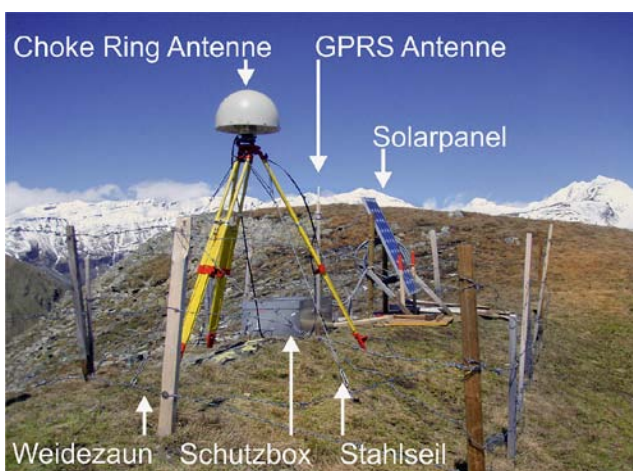


Abb. 6: Permanent betriebene GNSS-Station R1 am Gradenbach-Observatorium

Zusätzlich zu den vier Permanentstationen werden am Gradenbach-Observatorium noch zwei weitere Punkte (MB, MD) epochenweise zweimal im Jahr mit GNSS-Antennen und -Empfängern besetzt.

6.2.2 Automatisierte Positionsrechnung

Die über GPRS-Modems versendeten Daten werden in der Auswertezentrale am IGMS empfangen und gespeichert. Alle vier Stunden startet vollautomatisch eine Koordinatenberechnung nach dem in Abb. 7 dargestellten Ablaufschema.

Für die Berechnung werden die komprimierten binären Rohdaten in RINEX konvertiert und in der wissenschaftlichen Auswertesoftware Bernese (Dach et al. 2007) weiterverarbeitet. Die für die Berechnung erforderlichen Orbit- und Ionosphären Daten werden von den FTP-Seiten des International GNSS Service und des Centre for Orbit Determination Europe heruntergeladen. Falls für eine bereits berechnete 4h-Epoche neuere und genauere Orbit- oder Ionosphären Daten zur Verfügung stehen, wird diese Epoche mit den neuen Daten erneut berechnet. Atmosphärische Biases werden durch ein Doppelreferenzstationsmodell berücksichtigt, siehe dazu Schön et al. (2005) und Schön (2007). In diesem Modell wird die Koordinatendifferenz der beiden Referenzpunkte R1 und R2 festgehalten, was die Berechnung der Korrekturwerte ermöglicht. Sämtliche Ergebniskordinaten werden skaliert, sodass diese eingeführte Bedingung erfüllt wird. Mit diesem Modell können die Koordinaten der Monitoringpunkte des Gradenbach-Observatoriums mit der Präzision (1σ) von 1 mm in der Lage und 2 mm in der Höhe bestimmt werden.

Die grundlegende Annahme für das angewendete Doppelreferenzstationsmodell ist, dass sich die beiden Referenzpunkte R1 und R2 nicht bewegen. Auswertungen haben gezeigt, dass der Punkt R1 nicht stabil ist, sondern sich langsam bewegt. Diese Bewegung von ca. 1 mm/Jahr wird durch eine Regressionsgerade modelliert und im Doppelreferenzstationsmodell berücksichtigt.

Nach Berechnung der Koordinaten mit Bernese werden sie in amtliche Gauß-Krüger-Koordinaten und in lokale Projektkoordinaten transformiert. Abb. 8 zeigt die Bewegungen im lokalen Projektkoordinatensystem, wobei die y-Achse in die Hauptbewegungsrichtung des Rutschhanges orientiert wurde.

Die GNSS-Messungen der Hangdeformationen seit 1999 zeigen, dass eine konstante Bewegungsrate überlagert wird von sporadischen Beschleunigungen, gefolgt von abklingenden Phasen der Bewegung des Rutschhanges. Nach Abb. 8 kommt es mindestens einmal pro Jahr zu einer Beschleunigung der Bewegung. Rund um diesen Zeitpunkt ist die Bestimmung der Strainvariationen der Rutschung wichtig für die Prädiktion, da die Beschleunigungen auch zu einer katastrophalen Rutschung führen könnten. Eine Prädiktion des Zeitpunktes und der Stärke einer Beschleunigung steht im Zentrum der

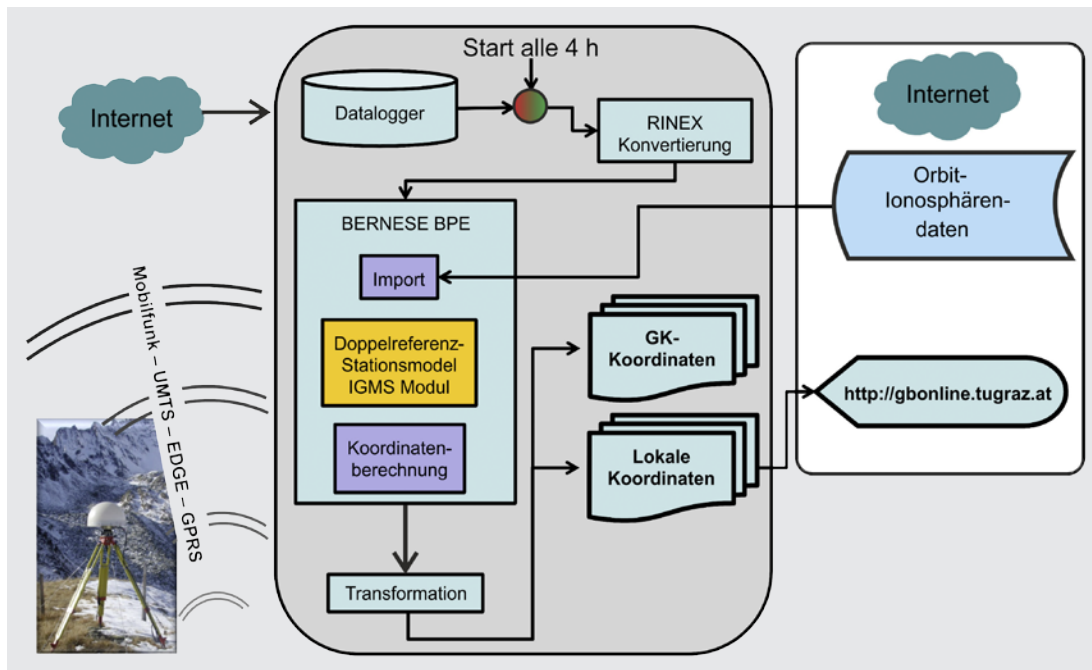


Abb. 7: Ablaufdiagramm der automatisierten GNSS-Positionsberechnung für das Gradenbach-Observatorium

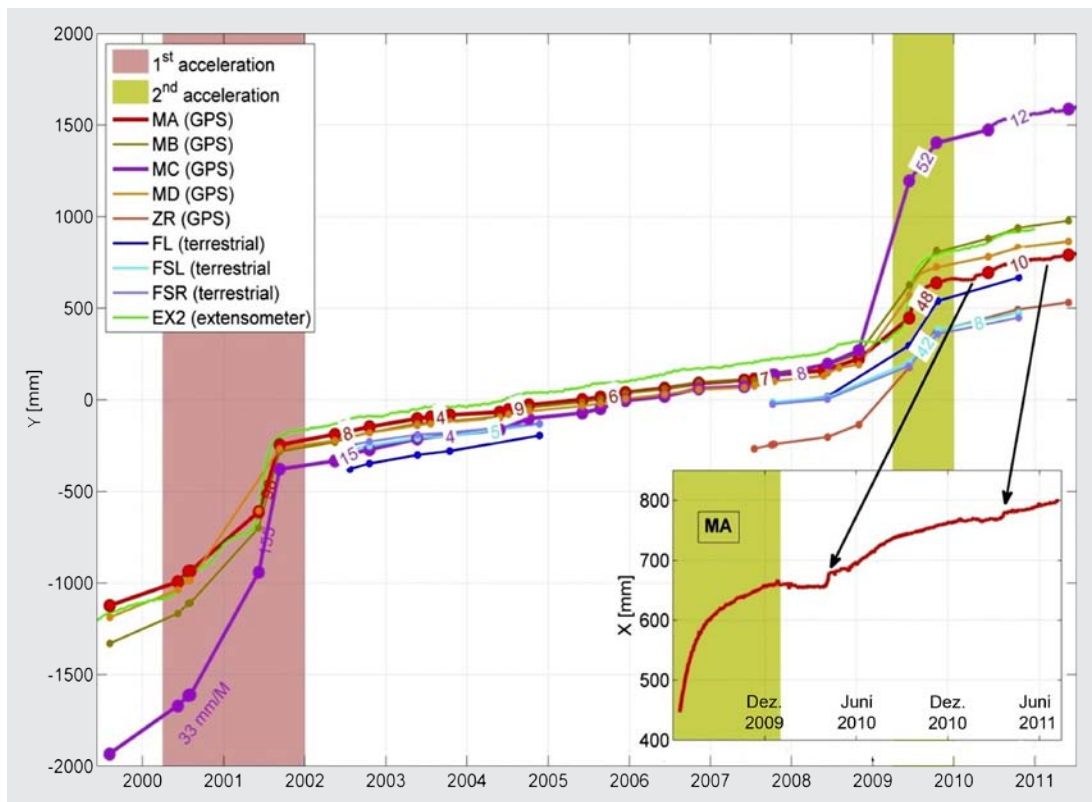


Abb. 8: Bewegungen in der Hauptbewegungsrichtung des Rutschhanges Gradenbach. Die Zahlenwerte geben mittlere Bewegungsraten in mm/Monat an.

Untersuchungen. Dazu gehört auch die Prädiktion des Zeitpunktes der Abklingphase der überlagerten Bewegung, um eine Entwarnung einleiten zu können. Daher wird die Bestimmung der Koordinaten der Messpunkte kontinuierlich mit GNSS durchgeführt. Alle vier Stunden wird eine Lösung berechnet.

Klar erkennbar sind in Abb. 8 die beiden beschleunigten Perioden 2001 und 2009. In diesen Perioden gab es Bewegungsraten von bis zu 155 mm/Monat. Im Jahr 2002 hat sich die Bewegung des Rutschhanges abrupt verlangsamt. Es ist aber zu erkennen, dass der Rutschhang nie

vollständig zur Ruhe kommt. In weniger aktiven Zeiten beträgt die Bewegungsrate ca. 10 mm/Monat.

Der vergrößerte Ausschnitt in Abb. 8 zeigt die Bewegungen des Punktes MA von Juni 2009 bis Juni 2011. Erkennbar ist, dass vom linearen Trend abweichend die Bewegung an der Oberfläche in den Wintermonaten beinahe zum Stillstand kommt. Bei der Schneeschmelze kommt es zu einer kurzzeitigen Beschleunigung, danach folgt die Bewegung wieder dem linearen Jahrestrend.

Dieses Verhalten wird deutlicher, wenn anstelle der Lageänderung des Punktes die Geschwindigkeit der

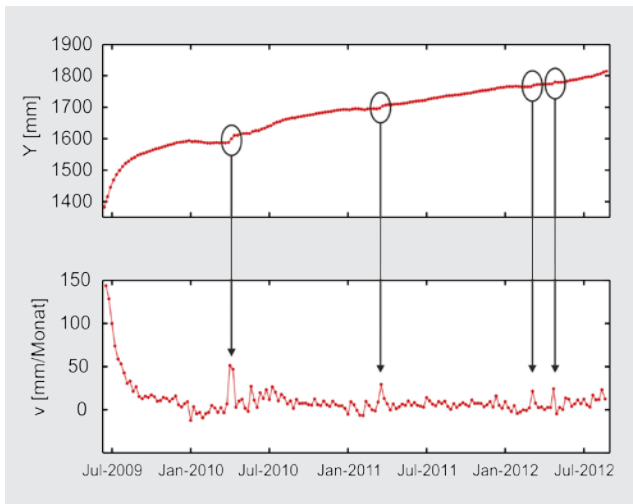


Abb. 9: Positionsänderungen (oben) und Geschwindigkeiten (unten) von Punkt MA in der Hauptbewegungsrichtung des Rutschhanges Gradenbach. Schwarze Kreise und Pfeile kennzeichnen die Schneeschmelze.

Punktbewegung betrachtet wird. Abb. 9 zeigt das Verhalten des Punktes MA von Juli 2009 bis Sommer 2012. Klar erkennbar ist das Abklingen der beschleunigten Bewegung von 2009. Die Bewegungsraten verlangsamten sich von mehr als 150 mm/Monat auf ca. 10 mm/Monat. Diese konstante Bewegungsrate wird von kurzzeitigen Beschleunigungen während der Schneeschmelze überlagert. Im Frühjahr kann die Geschwindigkeit der Bewegung von Punkt MA kurzzeitig bis zu 50 mm/Monat betragen.

6.2.3 Ergebnisdarstellung und Zuverlässigkeitsbeurteilung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, dass durch ein kontinuierliches Monitoringsystem das Bewegungsverhalten einer komplexen Struktur, wie die eines Rutschhanges, besser beurteilt werden kann. Neben einer automatisierten Berechnung sind für ein Frühwarnsystem ein zuverlässiger Betrieb und der einfache Zugang zu Informationen erforderlich. Um diesen Anforderungen nachzukommen, werden seit 2011 die Zeitreihen der GNSS-Berechnungen auf einer eigenen Website (<http://gbonline.tugraz.at>) dargestellt. Das aktuelle Bewegungsverhalten kann somit jederzeit interaktiv betrachtet werden, siehe Abb. 10. Für Entscheidungsträger wie z.B. Landesgeologen gibt es noch einen passwortgeschützten Bereich mit erweiterten Funktionen wie z.B. einem Download der Ergebniskoordinaten.

Der aktuelle Betriebszustand der einzelnen Stationen wird zusätzlich zu den Bewegungsraten dargestellt. An den Projektverantwortlichen werden täglich Zuverlässigkeitsstatistiken per Email versandt und im Falle eines Ausfalls einer Station erfolgt eine Benachrichtigung per Email und SMS. Mittels Fernwartung, z.B. Reset eines Receivers über eine SMS-Nachricht, ist es möglich, rasch auf auftretende Probleme zu reagieren und dadurch eine hohe Datenverfügbarkeit zu garantieren. Auch in den Schneemonaten ist eine hohe Verfügbarkeit der Daten

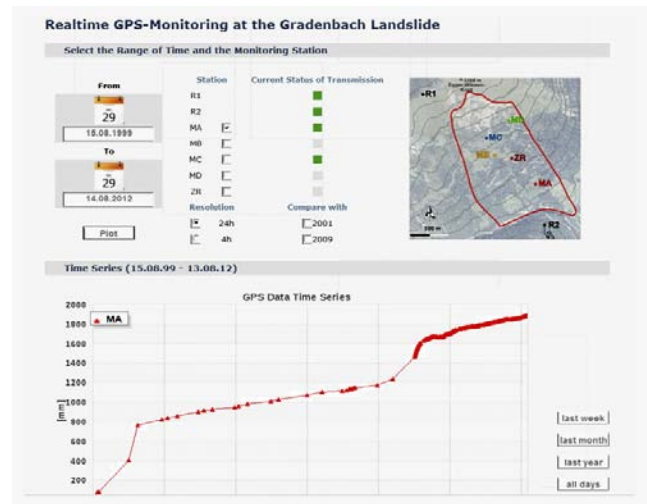


Abb. 10: Echtzeitdarstellung des Bewegungsverhaltens und aktueller Betriebszustand von CODMS

vorhanden, da die Pufferbatterien die Stromversorgung auch bei voll eingeschnittenen Solarpanelen für eine Woche aufrechterhalten können. Im Winter 2010/11 gab es daher bei Punkt MC nur drei Datenlücken von einmal vier Tagen und zweimal sechs Tagen. Zu berücksichtigen ist dabei, dass in den Wintermonaten die Bewegung der Hangoberfläche beinahe zum Stillstand kommt und eine 100-prozentige Datenverfügbarkeit daher nicht erforderlich ist.

6.3 Terrestrische geodätische Messungen

Die Überwachung des Rutschhanges mit terrestrischen geodätischen Überwachungsmessungen wurde kurz nach den Katastrophen 1965/66 im Jahr 1968 begonnen. Zu Beginn waren dies Polygonzugmessungen in einer Höhe von 1.300 m. Diese Messungen wurden später um vier weitere Polygonzüge in 1.500 m, 1.650 m, 1.800 m und 2.000 m Höhe erweitert. Im Jahr 1991 wurden die zeit-aufwendigen Messungen der Polygonzüge eingestellt. Die Beobachtung von absoluten Bewegungen von Punkten auf dem Hang erfolgte ab 1999 mit dem GNSS-basierten CODMS. Der Hangfuß ist jedoch aufgrund der großen Abschattungen für GNSS-Messungen ungeeignet. Daher werden die Bewegungen dieses Bereichs des Rutschhanges seit 2002 jährlich mit geodätischen Netzmessungen bestimmt. Die Bewegungen der Punkte FL, FSL und FSR in der Schlucht am Fuße des Rutschhanges sind in Abb. 8 ebenfalls eingetragen und zeigen ein ähnliches Bild wie die Bewegungen der GNSS-Monitoringpunkte.

Um besser die Abfolge von Kompression und Expansion des Rutschhanges beobachten zu können, wurde in mittlerer Höhe des Hanges ein geodätisches Netz, bestehend aus neun Punkten eingerichtet. Einer dieser Punkte (ZR) befindet sich direkt über der faseroptischen Strain-rosette. Zur Einbindung der terrestrischen Messungen in das Koordinatensystem des Gradenbach-Observatoriums wurden auch GNSS-Messungen am Punkt ZR durchge-

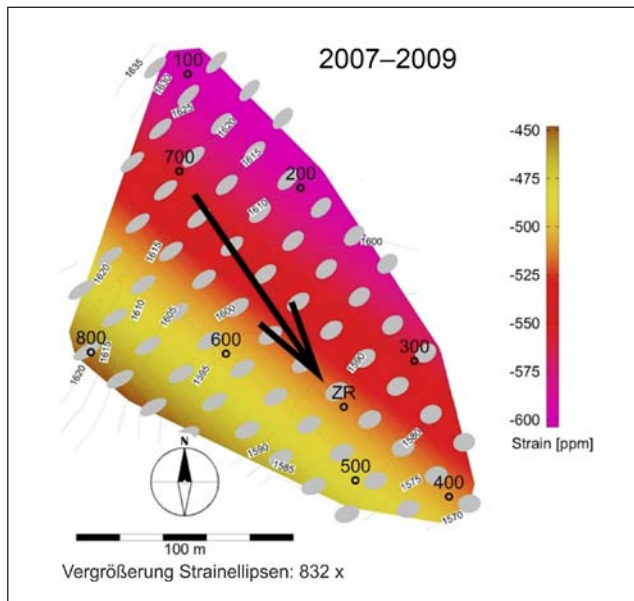


Abb. 11a: Strainellipsen abgeleitet aus terrestrischen geodätischen Netzmessungen rund um die Station ZR der Epochen 2007 und 2009

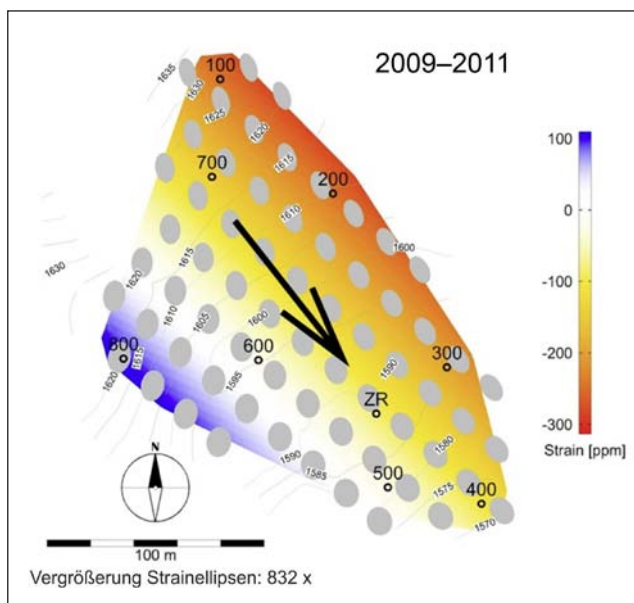


Abb. 11b: Strainellipsen abgeleitet aus terrestrischen geodätischen Netzmessungen rund um die Station ZR der Epochen 2009 und 2011

führt und der GNSS-Punkt MB in das terrestrische Netz integriert. Das terrestrische Netz wird seit dem Jahr 2007 einmal jährlich mit einer motorisierten Totalstation gemessen. Die Auswertung erfolgt als freie Netzausgleichung mit einer Lagerung auf den Datumpunkten ZR und MB, deren Koordinaten aus den GNSS-Messungen stammen.

Für die Berechnung von Strain werden die Punktbewegungen zwischen zwei Epochen in Starrkörperbewegungen und Verformungen aufgetrennt. Aus den Verformungen werden in weiterer Folge Strainellipsen für Punkte innerhalb des geodätischen Netzes berechnet. Die Präzision (1σ) der aus den geodätischen Messungen abgelei-

teten Strainellipsen beträgt dabei 32 ppm für die Achsen der Ellipsen und 7 gon für deren Orientierung (Wöllner et al. 2011). Abb. 11a zeigt eine Kompression des Rutschhangs zwischen den Messepochen 2007 und 2009. Diese Kompression entsteht, wenn sich höher gelegene Bereiche des Rutschhangs schneller bewegen als tiefer gelegene und somit auf diese auflaufen. Die topographische Form der Rutschzone des Hangs wird dabei einen signifikanten Einfluss haben. Von 2009 bis 2011 kam es zu einer Expansion in Längsrichtung, siehe Abb. 11b, da sich tiefer gelegene Bereiche des Rutschhangs schneller bewegt und diesen quasi auseinandergezogen haben.

6.4 Drahtextensometermessungen

Die ursprünglichen Stahlbandmessungen in der Schlucht am Fuße des Rutschhangs wurden ab 1979 durch Drahtextensometermessungen ersetzt. Die beiden Drahtextensometer EX1 und EX2 sind an beiden Seiten der Schlucht verankert und haben eine Länge bis zu 50 m. Mit Drahtextensometern kann die Längenänderung zwischen zwei Verankerungspunkten bestimmt werden. Durch diese Konvergenzmessungen zwischen den Felsen auf beiden Seiten der Schlucht kann eine Verbreiterung und eine Verengung der Schlucht beobachtet werden. Seit 2006 wird das Drahtextensometer EX2 automatisiert gemessen. Diese manuellen und automatisierten Messungen von EX2 sind in Abb. 8 eingetragen und zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die GNSS-Messungen. Ein Nachteil der Drahtextensometermessungen ist, dass damit nicht die Richtung der Bewegung bestimmt werden kann. Daher werden die kontinuierlichen Extensometermessungen durch jährliche geodätische Netzmessungen in der Schlucht ergänzt.

7 Entwicklung und Messungen mit der faseroptischen Strainrosette

Die konventionellen geodätischen Messungen (GNSS, terrestrische Messungen) liefern eine sehr hohe Genauigkeit, sind aber für die Prädiktion einer Beschleunigungs- und Abklingphase nur bedingt sensitiv genug. Im Gradenbach-Observatorium geht es insbesondere um die Bestimmung von zuverlässigen Vorläufern dieser überlagerten Bewegungen. Wir haben daher eine in den Hang eingebettete große Strainrosette auf faseroptischer Basis entwickelt, die eine ungefähr 50-mal höhere Empfindlichkeit als das geodätische Monitoring hat. Erste Erfahrungen wurden mit einer Testinstallation in ebenem Gelände gesammelt. Im Jahr 2007 wurde eine solche faseroptische Strainrosette am Rutschhang bei Punkt ZR installiert (Woschitz und Brunner 2008). Diese faseroptische Strainrosette ist eines der ersten permanent installierten faseroptischen Messsysteme in einem Rutschhang. Dai et al. (2008) haben zu

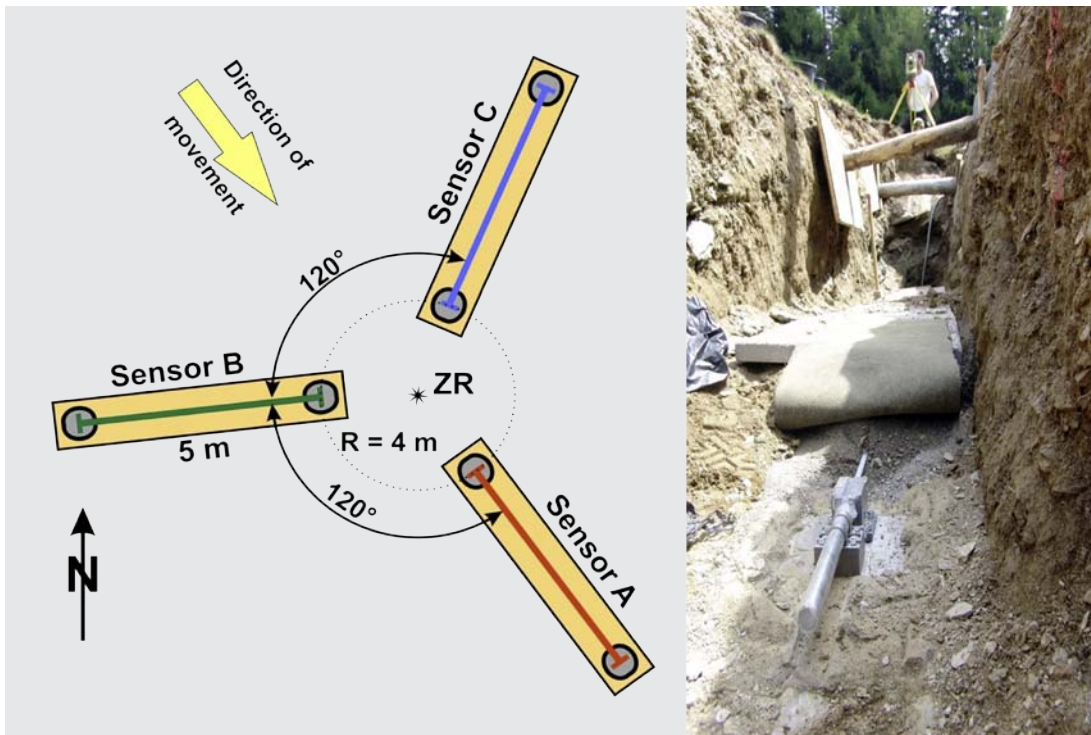


Abb. 12:
Aufbau der faser-
optischen Strain-
rosette (links),
Einbettung 2 m
unter der Ober-
fläche (rechts)

einem ähnlichen Zeitpunkt auch faseroptische Sensoren in einem Rutschhang eingebaut, jedoch in einer anderen Anordnung und Messmethode.

Den Aufbau der faseroptischen Strainrosette zeigt Abb. 12. Die Strainrosette besteht aus drei faseroptischen Sensoren vom System SOFO. Mit diesem System können Längenänderungen zwischen zwei Ankerpunkten des Sensors mit einer Genauigkeit von $2\text{ }\mu\text{m}$ bestimmt werden. Diese Genauigkeitsangabe vom Hersteller konnte durch eigene Untersuchungen bestätigt werden, z.B. Lienhart (2005). Die drei Sensoren der Strainrosette besitzen eine Länge von jeweils 5 m und wurden ca. 2 m unter der Erdoberfläche verankert. Die Achse von Sensor A fällt mit der Hauptbewegungsrichtung des Rutschhanges zusammen. Die Achsen der Sensoren B und C sind um $+120^\circ$ bzw. -120° gedreht.

Ursprünglich wurden nur die Längenänderungen von Sensor A kontinuierlich erfasst. Im Jahr 2009 wurde das faseroptische Messsystem mit einem Multiplexer erweitert, sodass seit 2009 kontinuierliche Messungen von allen drei Sensoren von Juni bis Oktober durchgeführt werden können. Derzeit werden die Daten noch lokal gespeichert, eine Datenübertragung mit GPRS-Modem zum Auswertezentrum am IGMS ist in Vorbereitung. Die Messungen seit dem Einbau der Strainrosette sind in Abb. 13 dargestellt. Seit dem Einbau hat sich der Sensor B um ca. 1,4 mm verkürzt während die Längenänderungen von Sensor C im Bereich von $\pm 0,2\text{ mm}$ variieren. Die Längenmessung von Sensor A hat anfangs ähnliche Werte wie bei den anderen Sensoren ergeben. Bis Juni 2009 gab es dann aber eine starke Verkürzung und seit diesem Zeitpunkt nimmt die gemessene Dehnung wieder langsam zu und folgt derzeit einem ähnlichen Verlauf wie die Werte des Sensors B. Bis jetzt (September 2012) sind die einge-

betteten faseroptischen Sensoren (SOFO) mit konstanter Leistung in Betrieb (62 Monate).

Aus den Längenänderungen der einzelnen Sensoren können die Strainellipsen abgeleitet werden, welche eine größere Aussagekraft haben als die Einzelmessdaten. Die Veränderung des Strains zwischen den Messepochen 2007 bis 2009 und 2009 bis 2011 ist in Abb. 14 dargestellt. Klar erkennbar ist, dass es von 2007 bis 2009 zu einer Kompression in der Hauptbewegungsrichtung gekommen ist. Im Zeitraum von 2009 bis 2011 kam es zu einer Expansion.

Die terrestrischen Netzmessungen (Abb. 11) ergeben ein ähnliches Strainbild wie die faseroptischen Strainmessungen (Abb. 14). Die Strainbestimmung ist mit der faseroptischen Strainrosette jedoch mit einer viel höheren Präzision möglich. Wöllner et al. (2011) zeigen, dass mit der Strainrosette die Achsen der Strainellipse mit einer Präzision von $0,6\text{ ppm}$ (1σ) und die Orientierung

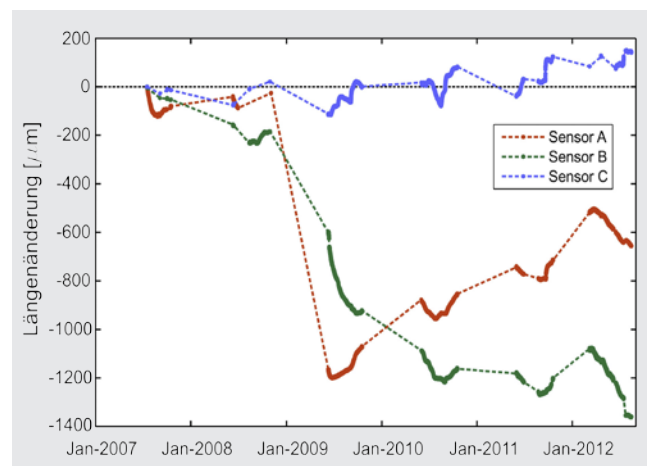


Abb. 13: Messdaten der Strainrosette

der Strainellipse mit einer Präzision von 0,1 gon (1σ) bestimmt werden können. Die hohe Präzision der Messungen mit der faseroptischen Strainrosette soll die Analyse einer Beschleunigung oder Verlangsamung der Bewegung der Rutschung möglich machen. Der Vergleich der unterschiedlichen Strainbestimmungen ist sinnvoll, da die gemessenen Bewegungen mit einer Blockbewegung der gesamten Rutschmasse übereinstimmen.

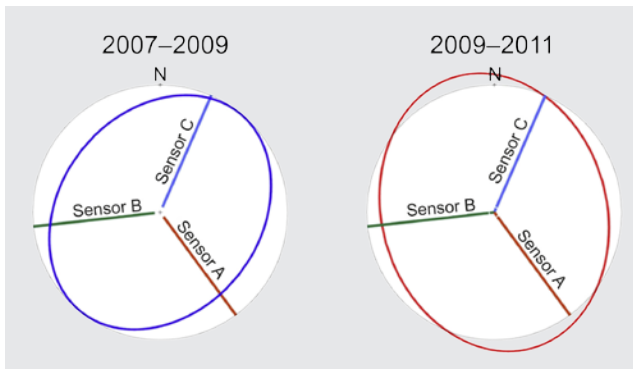


Abb. 14: Strainellipsen abgeleitet aus der faseroptischen Strainrosette

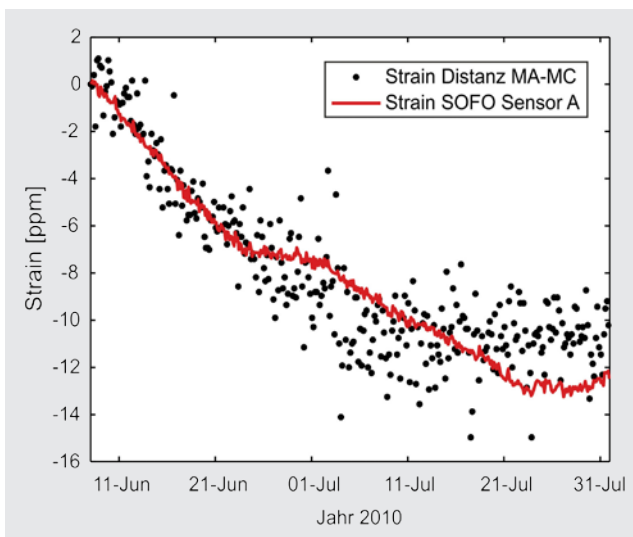


Abb. 15: Lokaler Strainverlauf (Sensor A, rote Linie) und großräumiger Strainverlauf (abgeleitet aus GPS-Messungen, schwarze Punkte)

Aus den GNSS-Messungen können ebenfalls Strainwerte abgeleitet werden. Die Distanzänderungen der Strecke MA–MC (ca. 1.300 m) sind in Abb. 15 in Strain umgerechnet und als schwarze Punkte (für 4 h) dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet ist der Strainverlauf von Sensor A, dessen Orientierung ähnlich der Strecke MA–MC ist. Aus Abb. 15 ist ersichtlich, dass im Juni und Juli 2010 das großräumige und lokale Strainverhalten ähnlich sind. Aus der Grafik ist auch die wesentlich höhere Messauflösung der faseroptischen Strainrosette erkennbar. Zusätzlich können mit der Strainrosette auch dynamische Messungen mit 1 kHz durchgeführt werden und somit auch Schwingungen erfasst werden, siehe Brunner und Woschitz (2009).

8 Seismische Messungen

Seit 2006 werden seismische Aktivitäten am Rutschhang kontinuierlich aufgezeichnet. Zu diesem Zweck wurden am Hang sechs Geophone installiert. Deren Positionen sind Abb. 2 zu entnehmen. Ziel der seismischen Messungen ist die Aufzeichnung von seismischen Ereignissen, verursacht durch die Hangrutschung. Um diese Effekte von großräumigeren seismischen Ereignissen zu trennen, wurde auch eine Referenzstation außerhalb des Rutschungsgebietes mit einem Geophon ausgestattet. Zusätzlich installierte Mikrophone zeichnen Geräuschquellen wie Gewitter, Hubschrauber und ähnliches auf, welche auch als Signale in den Geophonmessungen erkennbar sind. Details zur Datenauswertung können Mertl (2012) entnommen werden.

Während der Beschleunigung und der Verlangsamung der aktiven Phase von 2009 konnten vermehrte seismische Aktivitäten des Rutschhanges festgestellt werden, siehe Brückl et al. (2013).

9 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die Messmethoden des Gradenbach-Observatoriums als Beispiel eines modernen Monitoringsystems zur Überwachung von gravitativen Massenbewegungen vorgestellt. Anhand dieses Beispiels ist die Weiterentwicklung des Monitorings von manuellen, epochenweisen Messungen zu vollautomatischen, kontinuierlichen Messungen klar erkennbar. Am weitesten ausgebaut ist am Gradenbach-Observatorium die kontinuierliche GNSS-Überwachung mit dem entwickelten CODMS. Hier erfolgt die gesamte Kette von Erfassung der Messungen, Datenübertragung, Auswertung und Darstellung der Ergebnisse vollautomatisiert.

Das Gradenbach-Observatorium ist ein Beispiel für die erfolgreiche Zusammenarbeit von Experten aus unterschiedlichen Fachdisziplinen. Zum Verständnis des komplexen Phänomens eines Rutschhanges muss die gesamte kausale Kette von Einflussgrößen und Deformationen betrachtet werden. Daher werden am Gradenbach-Observatorium neben den Deformationen auch permanente meteorologische und hydrologische Messungen durchgeführt. Das Zusammenwirken aller unterschiedlichen Messungen wird in Brückl et al. (2013) besprochen, während hier die geodätischen Messungen mit besonderer Beachtung der faseroptischen Strainrosette betrachtet werden. Wie bereits betont wurde, ist die langarmige Strainrosette am Rutschhang Gradenbach die erste ihrer Art und für die wissenschaftliche Untersuchung von Vorläufern der Geschwindigkeitsänderungen gebaut worden.

Zur Bestimmung des Bewegungsverhaltens liefern die ingenieurgeodätischen Messungen einen wichtigen Beitrag. Mit moderner Ausrüstung und fortgeschrittenen Auswertestrategien können hohe Genauigkeiten erreicht

werden. Aus den GNSS-Messungen und dem angewandten Doppelreferenzstationsmodell können Bewegungen des Hanges mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich bestimmt werden.

Das Gradenbach-Observatorium zeigt auch die Erweiterung des ingenieurgeodätischen Monitorings von reinen Oberflächenmessungen zu Messungen an der Oberfläche und im Inneren des Überwachungsobjektes. Am Rutschhang wurde dazu die faseroptische Strainrosette im Erdreich eingebettet. Die unterschiedlichen Messsysteme ergänzen sich und decken einen Genauigkeitsbereich von Millimeter (GNSS) bis zu 1/1000 mm (FOS) ab. Anzeichen einer Beschleunigung oder Verlangsamung der Hangrutschung sollten dadurch zuverlässig und frühzeitig detektiert werden können.

Seismische Messungen ergänzen die geometrischen Deformationsmessungen. Die Untersuchung von Art und Häufigkeit von auftretenden seismischen Ereignissen ist eine weitere Möglichkeit, das zukünftige Bewegungsverhalten eines Rutschhangs vorherzusagen.

Die Verfügbarkeit von Langzeit- und interdisziplinären Monitoringdaten bilden die Basis für ein besseres Verständnis für geologische Phänomene wie der Gradenbach Massenbewegung. Neben der Möglichkeit der Frühwarnung ist die permanente Überwachung auch ein geeignetes Mittel, um die Effektivität von durchgeführten Sicherheitsmaßnahmen beurteilen zu können.

Dank

Wir möchten der Akademie der Wissenschaft für die Förderung des Überwachungsprojektes im Rahmen des ISDR-Programms und den Mitarbeitern des IGMS für deren unermüdlichen Einsatz bei den Feldarbeiten und bei der Auswertung danken.

Literatur

- Bell R., Mayer J., Pohl J., Greiving S., Glade T. (Hrsg.) (2010): Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung. Klartext Verlag, Essen: S. 270.
- Brückl E., Brunner F.K., Kraus K. (2006): Kinematics of a seep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. *Eng Geol* 88: pp. 149–159.
- Brückl E., Brunner F.K., Lang E., Mertl S., Müller M., Sary U. (2013): The Gradenbach Observatory – monitoring non-stationary deep-seated gravitational creep by geodetic, hydrological, and seismological methods. Submitted to *Landslides*.
- Brunner F.K., Woschitz H. (2009): Langarmige eingebettete Strain-Rosette zum Monitoring eines Rutschhangs. Christian Veder Kolloquium »Stabilisierung von Rutschhängen, Böschungen und Einschnitten«, Mitt. Gruppe Geotechnik, TU Graz, 35: S. 263–278.

- Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. (2007): Bernese GPS Software, Version 5.0. User Manual, Astronomical Institute, University of Bern: S. 612.
- Dai Z.D., Liu Y., Zhang L.X., Ou Z.H., Zhou C., Liu Y.Z. (2008): Landslide Monitoring Based on High-Resolution Distributed Fiber Optic Stress Sensor. In *Proc. APOS 2008*: S. 4.
- Eichhorn A. (2012): KASIP – Monitoring System und numerisches Modell für Rutschhänge. In *Proc. GeoMonitoring 2012*: S. 6.
- Hartinger H., Brunner F.K. (2000): Development of a monitoring system of landslide motions using GPS. In *Proc. 9th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Olsztyn, Sept. 1999 (2000): pp. 29–38.
- Kronfellner-Kraus G. (1967): Catastrophes of the year 1965 and 1966 in Upper-Carinthia and the East-Tyrol torrent research in Austria. Document FAO-EFC-T-67-II, Rome, S. 11.
- Lienhart W. (2005): Experimental Investigation of the Performance of the SOFO Measurement System. In *Proc. 5th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, USA: pp. 1131–1138.
- Mertl S. (2012): Characterization of local seismic events on deep-seated gravitational creep. PhD Thesis, TU Wien, in Vorbereitung.
- Schön S. (2007): Affine distortion of small GPS networks with large height differences. *GPS Solutions* 11 (2007): pp. 107–117.
- Schön S., Wieser A., Macheiner K. (2005): Accurate tropospheric correction for local GPS monitoring networks with large height differences. In *Proc. ION GNSS 2005 18th Int. Techn. Meeting of the Satellite Division*, Long Beach, CA: pp. 250–260.
- Thuro K., Singer J., Festl J., Wunderlich T., Wasmeier P., Reith C., Heunecke O., Glabs J., Schuhbäck S. (2010): New landslide monitoring techniques – developments and experiences of the alpEWAS project. *Journal of Applied Geodesy*, 4 (2010): pp. 69–90.
- Welsch W., Heunecke O. (2001): Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations, *Proc. 10th international FIG-Symposium on Deformation Measurements*, Orange, USA: pp. 390–412.
- Wöllner J., Woschitz H., Brunner F.K. (2011): Testing a large fiber optic strain-rosette, embedded in a landslide area. In *Proc. 8th Int. Symp. Field Measurements in GeoMechanics – FMGM*, Berlin, Germany (2011): S. 18.
- Woschitz H., Brunner F.K. (2008): Monitoring a deep-seated mass movement using a large strain rosette. In *Proc. 13th Int. Symp. on Deformation Measurements and Analysis CD-Proceedings*: S. 10.

Anschrift der Autoren

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Werner Lienhart
em. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Fritz K. Brunner
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme
Technische Universität Graz
Steyrergasse 30, 8010 Graz, Österreich
www.igms.tugraz.at
werner.lienhart@tugraz.at
fritz.brunner@tugraz.at