

Monitoring eines Rutschhanges mit GPS-Messungen

Autor(en): **Gassner, G. / Brunner, F.K.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio**

Band (Jahr): **101 (2003)**

Heft 4

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-236000>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Monitoring eines Rutschhanges mit GPS-Messungen

Für die Erforschung und Überwachung tiefgreifender Hangrutschungen wurde ein autonomes, kontinuierlich arbeitendes GPS-Überwachungssystem entwickelt. Das Messsystem, bestehend aus der Hardware und der eigens entwickelten Auswertesoftware GRAZIA, wird kurz vorgestellt. Es werden Auswertemodelle für die Berechnung der Normalpunkte der Doppeldifferenzen der GPS-Phasen, die Berechnung der Beobachtungsgewichte sowie das troposphärische Modell vorgestellt. Die Einsetzbarkeit dieses Systems wird anhand der Resultate an einem seit drei Jahren überwachten Rutschhang gezeigt.

Dans la recherche et la surveillance de glissements de terrain profonds, on a développé un système de surveillance GPS autonome travaillant de façon continue. Le système de mesurage composé du hardware et du logiciel de traitement GRAZIA, développé à cet effet est présenté ci-après, ainsi que les modèles d'exploitation pour le calcul des points normaux des différences doubles des phases GPS, le calcul des poids d'observation ainsi que le modèle troposphérique. L'application pratique de ce système est démontrée à l'aide de résultats acquis pendant trois ans dans une pente glissante.

Per ricercare e tenere sotto controllo i profondi smottamenti dei pendii si è sviluppato un sistema di sorveglianza GPS, operante in modo autonomo e continuato. Nell'articolo seguente si presenta brevemente il sistema di misurazione, composto da un hardware e dal software di valutazione GRAZIA. Successivamente si analizzano i modelli di valutazione per il calcolo dei punti normali delle doppie differenze delle fasi GPS, il calcolo dei pesi osservati e il modello troposferico. L'applicabilità del sistema è comprovata partendo dai risultati ottenuti su un pendio franato e tenuto sotto osservazione da tre anni.

G. Gassner, F. K. Brunner

1. Einleitung

Aus wirtschaftlichen und sozialen Gründen sind die Bestrebungen gross, die Ursachen und besonders die Bewegungsmechanismen von Hangrutschungen zu erforschen. Um die damit verbundenen Bewegungsprozesse, die abhängig vom Mechanismus und der Jahreszeit periodisch oder ruckartig verlaufen, besser verstehen zu können, ist eine kontinuierliche Überwachung erforderlich.

Ein kontinuierliches GPS-Deformationsüberwachungssystem (Continuously Operating Deformation Monitoring System, kurz CODMS) wurde speziell für die Beobachtung von Hangbewegungen im Rahmen eines IDNDR Forschungsprojektes (International Decade of Natural Di-

saster Reduction) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften entwickelt, [Brunner et al., 2000]. Die Vorteile von GPS gegenüber terrestrischen Messungen liegen in dem hohen Genauigkeitspotenzial bei grossräumigen Messungen, der Wetterunabhängigkeit des Systems und der Tatsache, dass keine Sichtverbindung zwischen den Stationen bestehen muss. Die Messung von Deformationen kann kontinuierlich und vollautomatisch erfolgen. Um GPS im alpinen Bereich einsetzen zu können, müssen die Stationen hinsichtlich Satellitensichtbarkeit günstig gewählt werden, da Bewaldung und enge Täler die Satellitensignale stark abschwächen, und häufig auch Signalverzerrungen auftreten können.

Das grundlegende Prinzip für hochgenaue GPS-Messungen liegt in der Differenzbildung von GPS-Signalen zwischen

zwei Stationen und zwei Satelliten. Sind die Koordinaten einer Station (Referenz) bekannt, so können die Koordinaten der zweiten Station (Monitor) mit hoher Genauigkeit relativ zur Referenzstation berechnet werden. Angewandt auf eine Deformationsüberwachung können absolute Bewegungen der Monitorstationen bestimmt werden, wenn sich die Referenzstationen in unbewegtem Gebiet befinden. Für die Auswahl der Referenzstationen ist deshalb unbedingt ein Ingenieurgeologe beizuziehen.

Für die Auswertung der GPS-Messungen wurde die Auswertesoftware GRAZIA entwickelt, die speziell auf die sehr genaue Bestimmung von langsamen Deformationen ausgerichtet ist. In diese Software wurde eine Reihe von Modellen implementiert, die zur qualitätsgesicherten GPS-Auswertung an unserem Institut entwickelt wurden, [Gassner et al., 2002].

In den letzten Jahren wurde über die Entwicklungen zur Überwachung von Rutschhängen und Vulkanen mit GPS-Messungen veröffentlicht, z. B. Manetti und Knecht (2000). In diesem Zusammenhang könnten die speziellen Eigenschaften des von uns entwickelten Messsystems von Interesse sein. Daher werden hier die Hardware-Komponenten und die Software GRAZIA mit einigen der darin implementierten Modelle vorgestellt. Das System wird seit mehr als drei Jahren auf einigen Rutschhängen in Österreich erprobt. Als Beispiel wird ein Anwendungsfall einer tiefgreifenden Hangbewegung vorgestellt. Die Resultate einiger periodischer und auch kontinuierlicher Messungen zeigen, dass das System für die Bestimmung von Hangbewegungen sehr vorteilhaft eingesetzt werden kann.

2. Messsystem und Auswertung

2.1 Hardware

Das CODMS besteht in seiner derzeitigen Konfiguration aus sechs GPS-Stationen, von denen mindestens zwei als Referenz für die restlichen Monitorstationen verwendet werden. Zur Zeit kommen vier L1/L2 Empfänger und zwei L1 Empfänger

zum Einsatz. Die Erweiterung des Systems auf mehr als sechs Stationen ist problemlos möglich.

Das System ist auf einen autonomen Betrieb ausgelegt. Die GPS-Daten werden per Funk an einen Zentralrechner übertragen, und dort aufbereitet, abgespeichert und sofort ausgewertet. Die Stromversorgung erfolgt mit Bleiakkus. Die Stationen können auch über eine Solaranlage betrieben werden, mit Bleiakkus als Puffer. So kann ein autonomer Betrieb über einen längeren Zeitraum erfolgen. Daher wurde auch ein spezieller Blitzschutz für die GPS Empfänger entwickelt.

2.2 Software

Die Software GRAZIA berechnet die Koordinatenergebnisse aus L1 und L2 GPS-Phasenwerten. Es wird eine Netzlösung für die Monitorstationen berechnet, wobei die Möglichkeit besteht, mehrere Referenzstationen zu verwenden. Kern der Software ist ein Kalmanfilter, der es ermöglicht, die Koordinaten online zu ermitteln. Die Bewegung wird im Kalmanfilter als Random Walk mit einem Systemrauschen von $1e-10 \text{ m}^2/\text{s}$ modelliert. CODMS verwendet eine GPS-Datenaufzeichnungsrate von 3 s, die durch die Datenübertragungsgeschwindigkeit der Funkverbindung limitiert ist. Nach einer Überprüfung bzw. Korrektur hinsichtlich Cycle Slips und Bildung von Doppeldifferenzen, werden diese Daten in der Software mit einer Normalpunktmethode [Gassner et al., 2002] mit Qualitätskontrolle auf 30 s Werte reduziert. Die Reduktion auf 30 s stellt einen Kompromiss zwischen Linearität des Modells und Überbestimmung der Normalpunktbeziehung dar. Die Normalpunktmethode verwendet einen robusten Schätzer zur Elimination von Ausreißern und gewichtet die ursprünglichen Beobachtungen in Funktion ihres Signal/Rauschverhältnisses in Funktion ihres Signal/Rauschverhältnisses (C/N0) mit dem SIGMA- ϵ -Modell [Hartinger und Brunner, 1999]. C/N0 Werte stellen viele Empfänger als zusätzliche Beobachtung zur Verfügung. Es ist ein sehr nützliches Qualitätskriterium der empfangenen Signale. Durch die Normal-

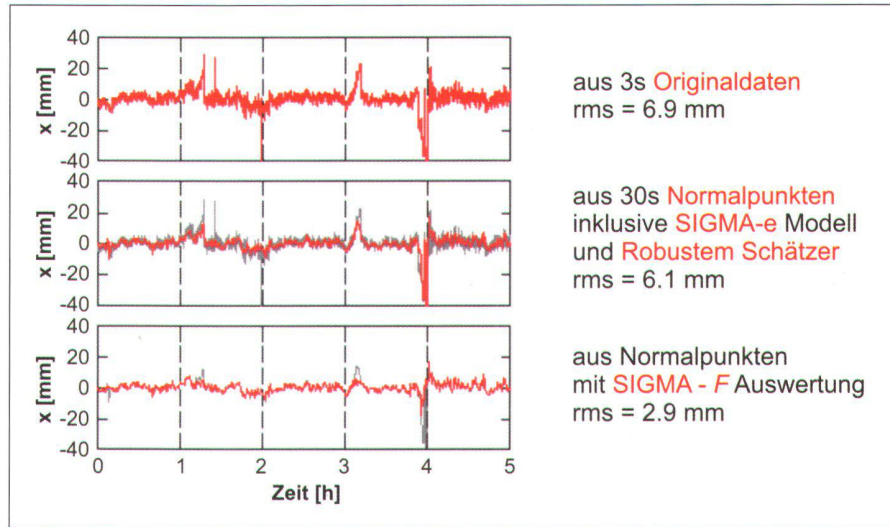


Abb. 1: Sequenz der Datenanalyse dargestellt für die Koordinate x über den Zeitraum von fünf Stunden. Grau hinterlegt sind die Ergebnisse des vorhergehenden Berechnungsschrittes.

punktmethode mit der Verwendung eines robusten Schätzers kann die Integrität der Daten gesteigert werden. In Abbildung 1 ist exemplarisch anhand einer fünfständigen Zeitreihe der x-Koordinaten eines Punktes dargestellt, wie sich die einzelnen Algorithmen auf die Koordinatenergebnisse auswirken. Mit der Normalpunktmethode wird in diesem Beispiel, in dem nur wenige grobe Fehler vorhanden sind, die Standardabweichung von 6.9 auf 6.1 mm reduziert. Die geringe Reduktion durch die Mittelbildung der 3 s Originalwerte auf 30 s Normalpunkte (man würde eine Verbesserung um den Faktor $\sqrt{10} \approx 3$ erwarten) kann durch die Berechnung mit einem Kalmanfilter erklärt werden. Die für die Berechnung der Standardabweichung herangezogenen Koordinaten entsprechen wegen der Filterung bereits gewichteten Mittelwerten über einen längeren Zeitraum. Die weitere Auswertung im Kalmanfilter umfasst die Gewichtung der Daten mit Hilfe des SIGMA-F-Modells [Wieser und Brunner, 2002]. SIGMA-F ist ein Fuzzy-Varianz-Modell, das einen konventionellen Ausreißer Detektor mit zusätzlicher Information über die Datenqualität kombiniert. Es wird wiederum das Signal/Rauschverhältnis, bzw. die Abweichung des C/N0 Wertes einer Beobachtung von

einem theoretisch möglichen, optimalen Wert (template) als ein Indikator für die Qualität der Beobachtungen verwendet. Zusätzlich werden im SIGMA-F Modell aber auch die normierten Residuen der Phasendoppeldifferenzen für die Berechnung ihrer Gewichte berücksichtigt. In Abbildung 1 unten, sieht man sehr gut den Effekt durch die Abgewichtung der vermuteten Ausreißer. Es ergibt sich jetzt eine Standardabweichung von 2.9 mm für die x-Koordinate. In diesen Berechnungsschritten wird ein Standardatmo-

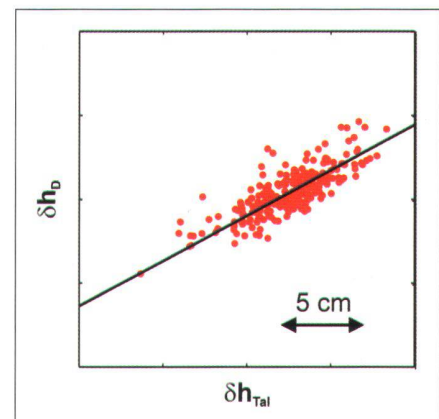


Abb. 2: Gegenüberstellung der Höhenvariationen der Talstation (δh_{Tal}), und der Monitorstation D (δh_{D}). Die schwarze Linie stellt die Regressionsgerade dar.

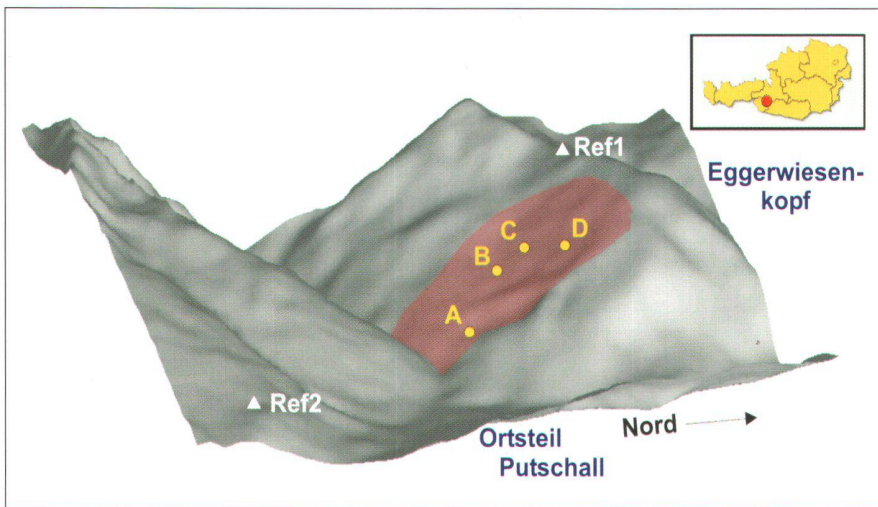


Abb. 3: Übersicht GPS Netz am Rutschhang Gradenbach.

sphärenmodell verwendet, das nur von der Höhe der Stationen abhängt.

Der Höhenunterschied zwischen einer Monitorstation und der Referenzstation kann in einem alpinen GPS-Netz sehr gross sein. Bei grösseren Höhenunterschieden können die troposphärischen Ausbreitungseffekte aber Höhenvariationen von mehreren Zentimetern erzeugen. Daher wurde für diese Effekte ein Korrekturmodell entwickelt [Rührnössl et al., 1999]. Es basiert auf der hohen Korrelation der simultanen Höhenvariationen der GPS-Stationen auf einem Hang, die durch Ausbreitungseffekte induziert werden. Als Beispiel sind in Abbildung 2 die Höhenvariationen der Monitorstation D (mit 450 m Höhendifferenz zur Referenzstation am Berg) den Höhenvariationen einer fixen Station im Tal ($\Delta h = 900$ m) gegenübergestellt, siehe Abbildung 3. Man erkennt deutlich die lineare Abhängigkeit.

Für die Korrektur der induzierten Höhenvariationen kann man daher die fixe Station im Tal als «Kalibrierstation» für die troposphärischen Ausbreitungseffekte verwenden. Die berechneten Höhenvariationen der fixen Kalibrierstation, $\delta h_{\text{Kal}}(t)$, werden proportional zum Verhältnis zwischen Höhendifferenz einer Station i zur Referenzstation am Berg ($\Delta h_i = H_{\text{Ref}} - H_i$) und Höhendifferenz der Kalibrierstation zur Referenzstation am Berg ($\Delta h_{\text{Kal}} = H_{\text{Ref}} - H_{\text{Kal}}$), als Korrektur $\delta h_i(t)$ an die

Höhenwerte der Monitorstationen $h_i(t)$ angebracht:

$$\delta h_i(t) = \delta h_{\text{Kal}}(t) \cdot \frac{\Delta h_i}{\Delta h_{\text{Kal}}}$$

Mit diesem troposphärischen Korrekturmodell kann bei grossen Höhenunterschieden die Genauigkeit der Höhenkoordinaten um einen Faktor drei verbessert werden. Beispiele für Ergebnisse mit diesem Modell werden im Abschnitt 3.3 gezeigt.

3. Anwendung

3.1 Messgebiet Talzuschub Gradenbach

Als Testgebiet für den Einsatz des CODMS wurde der Talzuschub Gradenbach in Kärnten gewählt. Die tiefgreifende Hangdeformation liegt am Ausgang des Grudentals in das Mölltal (Südostflanke des Eggerwiesenkopfes), ca. 7 km südlich von Heiligenblut. Die aktive Deformation umfasst den gesamten Hang auf einer Breite zwischen 600 und 1000 m und erstreckt sich über ca. 1000 Höhenmeter von der Grabensohle (zwischen 1100 und 1270 m) bis zum Kamm (2270 m) mit einer Fläche von ca. 2 km². Die deutlich entwickelte Hauptabrissskante verläuft etwas unterhalb des Gipfels und weist im obersten Bereich eine Höhe von ca. 40 m auf. Dies ist ein besonderes Merkmal des

Talzuschubs Gradenbach, wodurch eine deutlich höhere Aktivität als bei anderen Talzuschüben sichtbar wird [Moser und Mazur, 1983].

Der Talzuschub Gradenbach bietet interessante geotechnische Aspekte, weshalb dieses Gebiet schon seit mehr als 30 Jahren im Blickpunkt umfangreicher Untersuchungen steht. Teil der zahlreichen Messungen waren auch geodätische Messungen, allerdings waren diese ausschliesslich terrestrischer Natur und nur in grösseren zeitlichen Abständen ausgeführt. Die Hangbewegung wurde in den letzten Jahren mit ca. 11 cm pro Jahr angenommen [Weidner, 2000]. Eine kontinuierliche Vermessung auf der Basis von GPS sollte erstmals die Möglichkeit bieten, Informationen über die Hangbewegung mit sehr hoher zeitlicher Auflösung zu erhalten. Diese kontinuierlichen Messungen, kombiniert mit kurzen, periodischen Messungen, sollen zu einem besseren Verständnis dieser tiefgreifenden Hangdeformation führen.

3.2 Messkampagnen mit CODMS

Das GPS-Netz am Talzuschub Gradenbach umfasst zwei Referenzstationen, die in unbewegtem Gebiet liegen. Eine befindet sich am Kamm des Eggerwiesenkopfes in einer Höhe von 2270 m und eine zweite auf einer Anhöhe am Gegenhang, in einer Höhe von 1400 m, siehe Abbildung 3. Die Monitorpunkte auf dem Rutschhang sind ungefähr entlang der Linie zwischen den beiden Referenzstationen angeordnet, sie liegen zwischen 1400 und 1800 m Höhe.

Die erste Messkampagne (Nullmessung) mit CODMS erfolgte im August 1999. Darauf beziehen sich die Resultate aller nachfolgenden Kampagnen. Für die Nullmessung wurden GPS Daten für 48 Stunden aufgezeichnet. Es folgten pro Jahr jeweils eine kontinuierliche Messung mit einer Dauer von zwei bis drei Wochen und ein bis zwei, jeweils 48 Stunden lange, Messkampagnen. Die kontinuierlichen Messungen sollten zum einen die dauerhafte Einsetzbarkeit des Systems belegen, zum anderen auch die erreichbare Genauigkeit des Systems klären und zeigen,

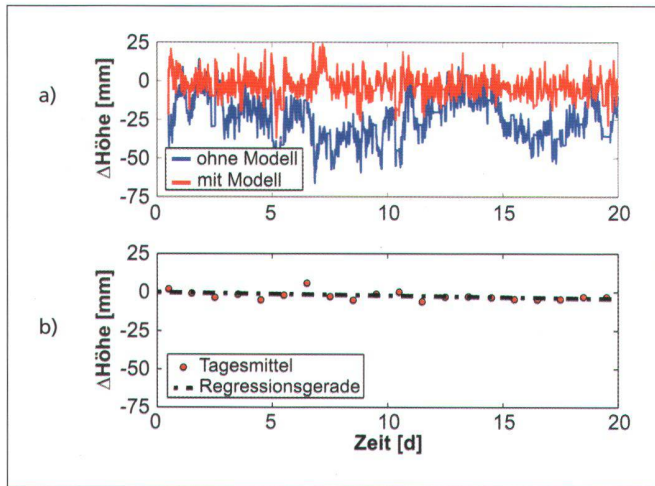


Abb. 4: Variationen der Höhenwerte des Monitorpunktes B während drei Wochen, (a) mit und ohne troposphärischem Modell für die Normalpunkte (30 s), (b) Tagesmittelwerte mit troposphärischem Modell.

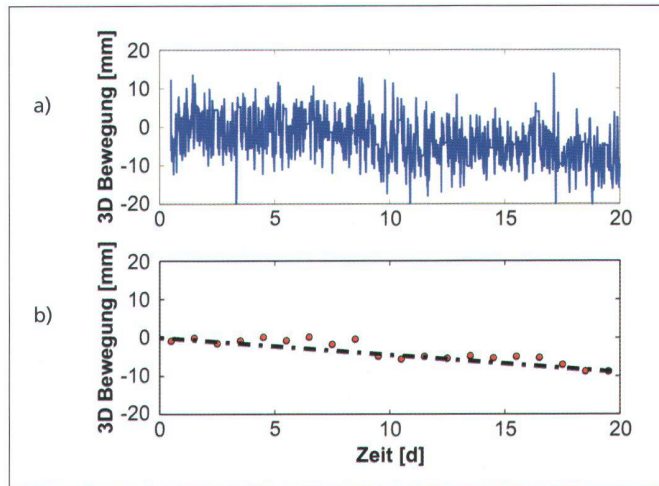


Abb. 5: 3D-Gesamtbewegung von Monitorpunkt B während drei Wochen, (a) mit 30 s Normalpunkten und (b) mit Tagesmittelwerten und Regressionsgerade.

ob Bewegungen in einem so kurzen Zeitraum verlässlich messbar sind.

3.3 Resultate

Für die Einschätzung der erreichbaren Genauigkeit ist die Analyse der GPS-Daten einer der kontinuierlichen Messkampagnen besonders nützlich. Anschliessend werden die Gesamtergebnisse aller Messepochen vorgestellt. Eine Interpretation der Resultate in Bezug auf die Hangbewegung wird im Anschluss versucht.

Kontinuierliche Messung:

Im Sommer 2000 erfolgte eine kontinuierliche Messung während eines Zeitraumes von drei Wochen, wobei die Messdaten auf allen sechs Stationen aufgezeichnet wurden. Eine geringe Ausfallsrate (0.04% verursacht durch die Funkübertragung) und die hohe Qualität der Daten, die in den folgenden Abschnitten gezeigt wird, bewiesen die Einsatzfähigkeit des Systems für den kontinuierlichen Betrieb. Die Analyse der Daten mit GRAZIA ergab, dass die Genauigkeit der Koordinatenergebnisse ausreicht, um Bewegungen der Hangrutschung Gradenbach mit einer Genauigkeit von 9 mm online feststellen zu können. Die Auswertungsergebnisse werden in den Abbildungen 4 und 5 exemplarisch für den Monitorpunkt B dargestellt. Ab-

bildung 4 zeigt einen Vergleich der Resultate ohne und mit Anwendung des troposphärischen Korrekturmodells, das in Abschnitt 2 erklärt wurde. In Tabelle 1 sind die zugehörigen Standardabweichungen (Std) angeführt, welche die Wirksamkeit dieses Modells zeigen.

Aus den Tagesmittelwerten wurden mit einer linearen Regression die Bewegungsraten der Punkte ermittelt (in Abb. 4 und 5 exemplarisch dargestellt). Eine Aussage über einen möglichen nichtli-

nearen Bewegungsverlauf der Rutschung kann wegen der kurzen Zeitspanne der Daten nicht getroffen werden, weshalb die Bewegung als linear angenommen wurde. In Abbildung 5 sind die Resultate der Auswertung als 3D Gesamtbewegungen dargestellt, wobei neben der Auswertung mit 30 s Normalpunkten auch die Tagesmittelwerte und die Regressionsgerade dargestellt sind. In Tabelle 1 sind die zugehörigen Std angeführt.

Zeitreihe	Std [mm]
Höhenwerte	
30 sec Normalpunkte ohne trop. Modell	14
30 sec Normalpunkte mit trop. Modell	7
Tagesmittel	2.5
3D Gesamtbewegung	
30 sec Normalpunkte mit trop. Modell	9
Tagesmittel	3

Tab. 1: Standardabweichungen für die verschiedenen Auswertemodelle, nach Abzug der geschätzten Bewegungsrate (Regressionsgerade in Abb. 4 und 5).

Periodische Messungen:

Ein Vergleich aller Messungen seit der Nullmessung im August 1999 ermöglicht die Untersuchung der Bewegungen über den Zeitraum der letzten drei Jahre. Natürlich kann dabei keine Aussage über die exakte Form der Bewegung des Hanges zwischen den Messepochen getroffen werden.

Abbildung 6 zeigt die Bewegungssequenzen in Lage und Höhe für den Monitorpunkt B. Man sieht in Abbildung 6 (links), dass die Bewegungsrichtung über die knapp drei Jahre sehr konstant beibehalten wird und in die Falllinie des Hanges zeigt. Aus der Darstellung der Höhenveränderungen als Funktion der Zeit lässt sich ablesen, dass sich die Bewegung bis September 2001 kontinuierlich beschleunigt, aber danach wieder beruhigt hat.

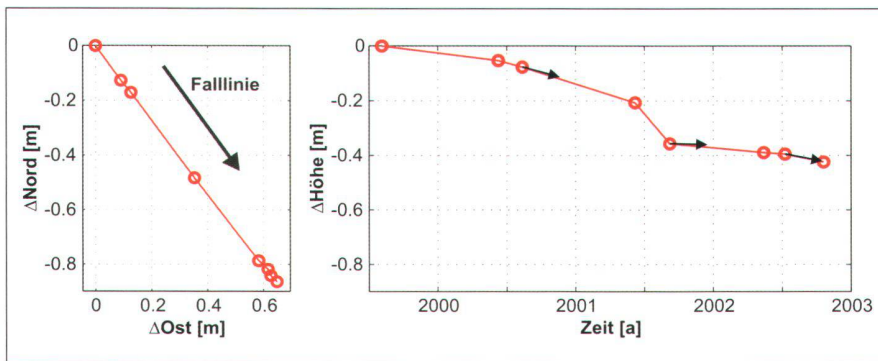


Abb. 6: Bewegung des Monitorpunktes B in Lage (links) und Höhe (rechts) zwischen August 1999 (Nullmessung) und Oktober 2002. Ringe stehen für die Mittelwerte der Kampagnen, Pfeile (rechts) zeigen die Höhenänderungsrate während der kontinuierlichen Messperioden.

Während der kontinuierlichen Messkampagnen kann die aktuelle Geschwindigkeit der Hangbewegung gemessen werden. In Abbildung 6 (rechts) zeigen die drei schwarzen Pfeile den gemessenen Trend der Höhenänderungen während der kontinuierlichen Messkampagnen von jeweils drei Wochen Messdauer an. Die Trends stimmen mit dem weiteren Verlauf der Rutschung sehr gut überein.

3.4 Diskussion

Um ein Gesamtbild der Bewegungen aller vier Monitorstationen zu erhalten, werden in Abbildung 7 die Lageänderungen dargestellt. Die Richtungen der Bewegungsvektoren aller Monitorpunkte während des dreijährigen Beobachtungszeitraums sind sehr homogen. Im oberen Bereich der Rutschung (C und D) sind grössere und steilere Verschiebungen festzustellen, als im unteren Bereich (A), was den allgemeinen Vorstellungen über den Bewegungsmechanismus einer tiefen Massenbewegung entspricht [Brückl und Scheidegger, 1972].

Geotechnische und auch terrestrische geodätische Messungen haben im letzten Jahrzehnt eine Beruhigung der Hangbewegung am Talzuschub Gradenbach angedeutet. Die durchschnittlichen Jahresbewegungsraten lagen bei 11 cm pro Jahr [Weidner, 2000]. Aus den GPS-Messungen mit CODMS ergaben sich für die Periode 1999–2000 Bewegungsraten von 15–30 cm pro Jahr, die sich dann bis Sep-

tember 2001 bis auf 50 cm in nur drei Monaten beschleunigt haben. Erst danach trat wieder eine Beruhigung der Bewegung ein. Die Fortführung der GPS-Vermessungen soll zeigen, ob die neuerliche Verlangsamung der Bewegung zu einem periodischen Bewegungsrhythmus des Hanges gehört. Beschleunigt sich der Hang weiter, dann soll mit einer kontinuierlichen Messkampagne am Ende der Beschleunigung bis zu einer möglichen neuerlichen Beruhigung gemessen werden. Damit sollen die Bewegungsvorgänge während dieser äusserst interessanten Phase der Hangrutschung geklärt werden.

Eine detaillierte Untersuchung der Geologie und der Geomechanik des Rutschgebietes ist in Bearbeitung, aber nicht Gegenstand dieses Berichtes.

4. Schlussfolgerung

Das hier vorgestellte GPS-System wurde speziell für das Monitoring von Hangbewegungen im hochalpinen Gelände konfiguriert. Es ist in kurzer Zeit installiert, liefert GPS-Daten online und wertet diese sofort als Positionswerte der Überwachungspunkte aus. Damit besteht die Möglichkeit, Gebiete von mehreren Quadratkilometern kontinuierlich in Echtzeit zu überwachen, wodurch wertvolle Informationen über den aktuellen Bewegungsverlauf gewonnen werden können. Für die Auswertung der GPS-Daten wur-

de die Software GRAZIA entwickelt. Zur Genauigkeitssteigerung der Resultate wurden mehrere Module für GRAZIA entwickelt, von denen drei hier kurz vorgestellt wurden: Berechnung von 30 s Normalpunkten, SIGMA-F Gewichtsmodell, und ein troposphärisches Korrekturmodell. Die erreichbare Genauigkeit konnte durch die Verwendung dieser Algorithmen um einen Faktor zwei verbessert werden.

Die tiefe Massenbewegung Gradenbach wurde seit drei Jahren mit diesem Monitoringsystem in mehreren Messkampagnen und während drei kontinuierlicher Messperioden überwacht. Auch bei den grossen Höhenunterschieden am Hang Gradenbach können Standardabweichungen von 7 mm für die Höhe und 4 mm für die Lage der Monitorpunkte erreicht werden. Das Monitoringsystem ist daher besonders für die sehr genaue Überwachung von grossräumigen Gebieten (z. B. Bergzerreissungen) und für die kontinuierliche Messung von kritischen Hangbewegungen geeignet. Ein weiteres Anwendungsgebiet stellt die Überwachung von Hangsanierungen dar, wobei mit der kontinuierlichen GPS Messung die Wirksamkeit der Sanierungsmassnahmen kontrolliert werden könnte.

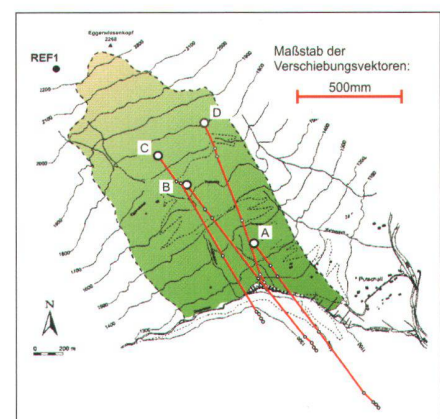


Abb. 7: Lageverschiebungen der Monitorpunkte am Gradenbach zwischen August 1999 und Oktober 2002. Die grün hinterlegte Fläche stellt den Bereich der Rutschung dar. Quelle für den Hintergrund der Darstellung: Forstliche Bundesversuchsanstalt Wien, 1977/78.

Dank

Die Österreichische Akademie der Wissenschaften hat dieses Forschungsprojekt im Rahmen von IDNDR unterstützt. Wir danken allen beteiligten Mitarbeitern und Studenten für ihre wertvolle Hilfe bei den Feld- und Entwicklungsarbeiten, insbesondere H. Hartinger, A. Lippitsch, B. Richter und A. Wieser.

Referenzen:

Brückl E., Scheidegger A. E. (1972): The rheology of spatially continuous mass creep in rock. *Rock Mechanics* 4: 237–250.

Brunner F.K., Hartinger H., Richter B. (2000): Continuous Monitoring of Landslides using GPS: A Progress Report. In: Bauer S.J., Weber F. (Eds), *Geophysical Aspects of Mass Movements*, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien, pp 75–88.

Gassner G., Wieser A., Brunner F.K. (2002): GPS Software Development for Monitoring of Landslides. *Proceedings FIG XXII Congress Washington, D.C. USA, April 2002, CD-ROM, TS6.4 Deformation Measurement and Analysis II*, 12 Seiten.

Hartinger H., Brunner F.K. (1999): Variances of GPS Phase Observations: the SIGMA-ε Model. *GPS Solutions*, Vol. 2/4: 35–43.

Manetti L., Knecht A. (2000): Permanente und autonome Erdbebenüberwachung mit GPS. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, 98: 446–448.

Moser M., Mazur W. (1983): Die Kinematik von instabilen hohen Talflanken. *Berichte von der 4. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie*, Goslar, pp 247–258.

Rührnössl H., Brunner F.K., Rothacher M. (1998): Modellierung der troposphärischen Korrektur für Deformationsmessungen mit GPS im alpinen Raum. *Allg. Vermessungsnachrichten* 105:14–20.

Weidner S. (2000): Kinematik und Mechanismus tiefgreifender alpiner Hangdeformationen unter besonderer Berücksichtigung der hydrologischen Verhältnisse. *Dissertation*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Wieser A., Brunner F.K. (2002): SIGMA-F: Variances of GPS Observations Determined by a Fuzzy System. In Ádám and Schwarz (Eds), *Vistas for Geodesy in the New Millennium*, Springer, IAG Symposia, 125: 365–370.

Dipl.-Ing. Georg Gassner
Univ. Prof. Dr. Fritz K. Brunner
Institut für Ingenieurgeodäsie
und Messsysteme
Steyrergasse 30
AT-8010 Graz
georg.gassner@TUGraz.at
fritz.brunner@TUGraz.at
www.cis.tugraz.at/ivm



**schnell
sicher
modern
Sprechfunk**

**Professionell
Jetzt schon ab
CHF 876.-
inkl. MwSt.**



Kurz und bündig Anweisungen erteilen. Ohne Zeit raubendes Wählen und Warten. Einfach Taste drücken und sprechen. Verbindung ist sofort hergestellt. Das ist MOTOROLA-Sprechfunk. Für jeden Einsatz. Immer das passende Modell. Handlich, vielseitig und robust. Keine Gesprächsgebühren. Ideal für Service, Unterhalt, Sicherheit, Bau, Vermessung usw..

Professional Radio
MOTCOM
Communication

Motcom Communication AG
Max-Högger-Strasse 2, 8048 Zürich
Tel. 01 437 97 97, Fax 01 437 97 99
contact@motcom-com.ch
www.motcom-com.ch

MOTOROLA-Funkgeräte gibts im Funkfachhandel oder bei:

GRATIS-FUNK-KONTAKT

JA, ich bin an modernem Sprechfunk interessiert.

Bitte senden Sie mir das kostenlose **Funk-Info-Paket**.

Wo finden wir den nächsten **MOTOROLA-Stützpunkt**?

Name/Vorname _____

Firma _____

Strasse _____

PLZ/Ort _____

Telefon _____ Telefax _____

E-Mail _____

Senden an: Motcom Communication AG, Max-Högger-Str. 2, 8048 Zürich

VPK 4/03 200217