

# Grundwasserstandsschwellenwerte für eine tiefgreifende Hangbewegung mittels Zeitreihenanalyse und numerischen Modellen (Aggenalm, Bayrischzell)

Determination of water table thresholds for a deep seated mass movement using time series analysis and numerical models (Aggenalm, Bayrischzell)

Judith Festl<sup>1</sup>, John Singer<sup>2</sup>, Kuroschi Thuro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Judith Festl, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Fachgebiet für Monitoring, Analyse und Frühwarnung von Hangbewegungen, Technische Universität München, festl@tum.de

<sup>2</sup> Dr. John Singer, Geologisches Institut, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz, john.singer@erdw.ethz.ch

<sup>3</sup> Prof. Dr. Kuroschi Thuro, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, thuro@tum.de

## Zusammenfassung

Im Rahmen des alpEWAS Projektes wurde an der Hangbewegung Aggenalm bei Bayrischzell ein Monitoringsystem installiert, das aus kostengünstigen, innovativen und kontinuierlich arbeitenden Messsystemen besteht. Hiermit werden seit über 3 Jahren die Deformationen an der Oberfläche und im Untergrund sowie mögliche Triggerfaktoren (Niederschlag/Schneesmelze) überwacht. Da aus früheren Ereignissen (1935 und 1997) bekannt ist, dass gerade Niederschlag und/oder Schneesmelze einen großen Einfluss auf die Bewegungen haben, wurde mit Methoden der Zeitreihenanalyse die zeitliche Differenz zwischen Niederschlagsereignis, maximalem Porenwasserdruck und dem Einsetzen von Bewegungen untersucht. Die Analysen bestätigen diese Annahme und weisen eine Reaktionszeit von 2-3 Tagen zwischen Niederschlag und dem korrespondierenden Anstieg im Porenwasserdruck aus. Das numerische Modell wurde auf Grundlage der Feldmessungen erstellt und durch Parameterstudien sowie den Erkenntnissen aus der Datenanalyse kalibriert, so dass es das aktuell beobachtete Bewegungsverhalten möglichst gut abbildet. Anschließend wird es dazu herangezogen, Extremereignisse zu simulieren und somit eine bessere Definition von Schwellenwerten für eine Frühwarnung zu ermöglichen.

**Schlüsselworte:** Hangbewegung, Rutschung, Monitoring, Zeitreihenanalyse, Frühwarnsystem

## Abstract

In the framework of the alpEWAS joint research project the Aggenalm landslide near Bayrischzell was instrumented with a monitoring system using innovative and cost-effective, continuously working measurement techniques. For over 3 years surface and subsurface deformation as well as potential triggering factors (precipitation/snowmelt) have been monitored. Since it is known from prior events (1935 and 1997) that precipitation and/or snowmelt have a major influence on the slope's movements, the temporal offset between precipitation, pore water pressure and increase in deformation have been analyzed by means of time series analysis. The analyses confirm this assumption and show a response time of 2-3 days between precipitation and the corresponding increase in pore water pressure. The numerical model was generated using the different field measurements, such as the results of the geological mapping, geoelectric survey, drilling profiles and also data from laboratory testing. By conducting parameter studies the model was calibrated to reproduce the currently observed deformation behavior best. Subsequently the numerical model will be used to simulate extreme events and allow a better definition of thresholds for early warning.

**Keywords:** Landslides, slide, monitoring system, time series analysis, early warning system

## 1 Einleitung

Im Kontext des globalen Klimawandels ist gerade in den Alpen durch vermehrte Extremwetterereignisse (IPCC 2012) mit einer steigenden Hangbewegungsaktivität zu rechnen, die in Kombination mit der fortwährenden Ausbreitung und Erschließung von Siedlungsflächen einen wachsenden Konflikt zwischen Landnutzung und Prävention vor Naturgefahren darstellt. Immer häufiger wird es dadurch notwendig Hangbewegungen zu überwachen, um diesen Konflikt zu minimieren aber auch, um die ursächli-

chen Mechanismen als Grundlage für eine bessere Vorhersage und Prävention zu verstehen.

Unter diesem Hintergrund wurde die Hangbewegung Aggenalm bei Bayrischzell im Rahmen des alpEWAS Projektes mit einem Monitoringsystem instrumentiert. Im Folgenden wird zunächst das alpEWAS Projekt und das Geosensornetzwerk mit seinen verschiedenen installierten Messsystemen vorgestellt, bevor die Ergebnisse der Datenauswertung mittels Zeitreihenanalyse und die der numerischen Modellierung präsentiert werden.



## 1.1 Beschreibung des alpEWAS Projektes

Ziel des Verbundprojektes alpEWAS – Entwicklung und Erprobung eines integrativen 3D-Frühwarnsystems für alpine instabile Hänge – ist es innovative, leistungsfähige und kostengünstige Messtechniken in ein Geosensornetzwerk zur Überwachung von Hangbewegungen zu integrieren. Das Projekt wurde im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprogramms Geotechnologien des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in Deutschland von 2007-2010 gefördert. THURO et al. (2009, 2011a) und SINGER et al. (2009) liefern eine ausführlichere Beschreibung des Projektes sowie der einzeln eingesetzten Messtechniken.

### 1.1.1 Die Hangbewegung Aggenalm

Um die verschiedenen Messsysteme unter alpinen Bedingungen im Feldversuch zu testen, wurde die Hangbewegung Aggenalm als Projektstandort ausgewählt. Die Hangbewegung Aggenalm liegt in der Nähe von Bayrischzell etwa 80 km südöstlich von München.

Das erste dokumentierte Ereignis an der Hangbewegung Aggenalm ereignete sich 1935 und wurde durch starke Niederschläge in Kombination mit Schneeschmelze ausgelöst. Eine Fläche von etwa 900 m (Länge) auf 400 m (Breite) war von der Hangbewegung betroffen und es wurden drei Brücken sowie die Zufahrtsstraße zum Skigebiet am

Sudelfeld zerstört. Wiederrum nach heftigen Niederschlägen, wurde 1997 am nördlichen Rand der Hangbewegung die Zufahrtsstraße durch eine Mure überschüttet (blau umrandet – Agggraben Mure in Abb. 1). Nach diesem Ereignis wurde die Hangbewegung Aggenalm periodisch vom Bayerischen Landesamt für Umwelt überwacht und vermessen. Die dabei festgestellten Bewegungsraten von 1,5-2,0 cm/a sind seit Beginn des alpEWAS Projektes im Jahr 2007 auf jetzt 0,5 bis 1,0 cm/a leicht zurückgegangen.

Geologisch betrachtet liegt die Hangbewegung Aggenalm in den Nördlichen Kalkalpen und wird vor allem von triassischen und jurassischen Kalken, Dolomiten und Mergeln aufgebaut. Als ursächlich für die Instabilität des Hanges werden die Mergel der Kössener Schichten angesehen, die große Teile des Hanges unterlagern. Im oberen Hangbereich, sinken die an der Oberfläche austreichenden Oberrhätkalke und -dolomite in die unterlagernden plastischen, verwitterten Mergel der Kössener Schichten ein. Nach CRUDEN & VARNES (1996) kann der Mechanismus im oberen Drittel der Hangbewegung als Driften klassifiziert werden. Im unteren Hangbereich löst sich das Gefüge auf Grund stärkerer Deformation auf und der Mechanismus geht in eine sehr langsame Rutschung über. Detaillierte Beschreibungen der Geologie und der Hangbewegungsmechanismen werden in SINGER et al. (2009) und THURO et al. (2011b) gegeben.

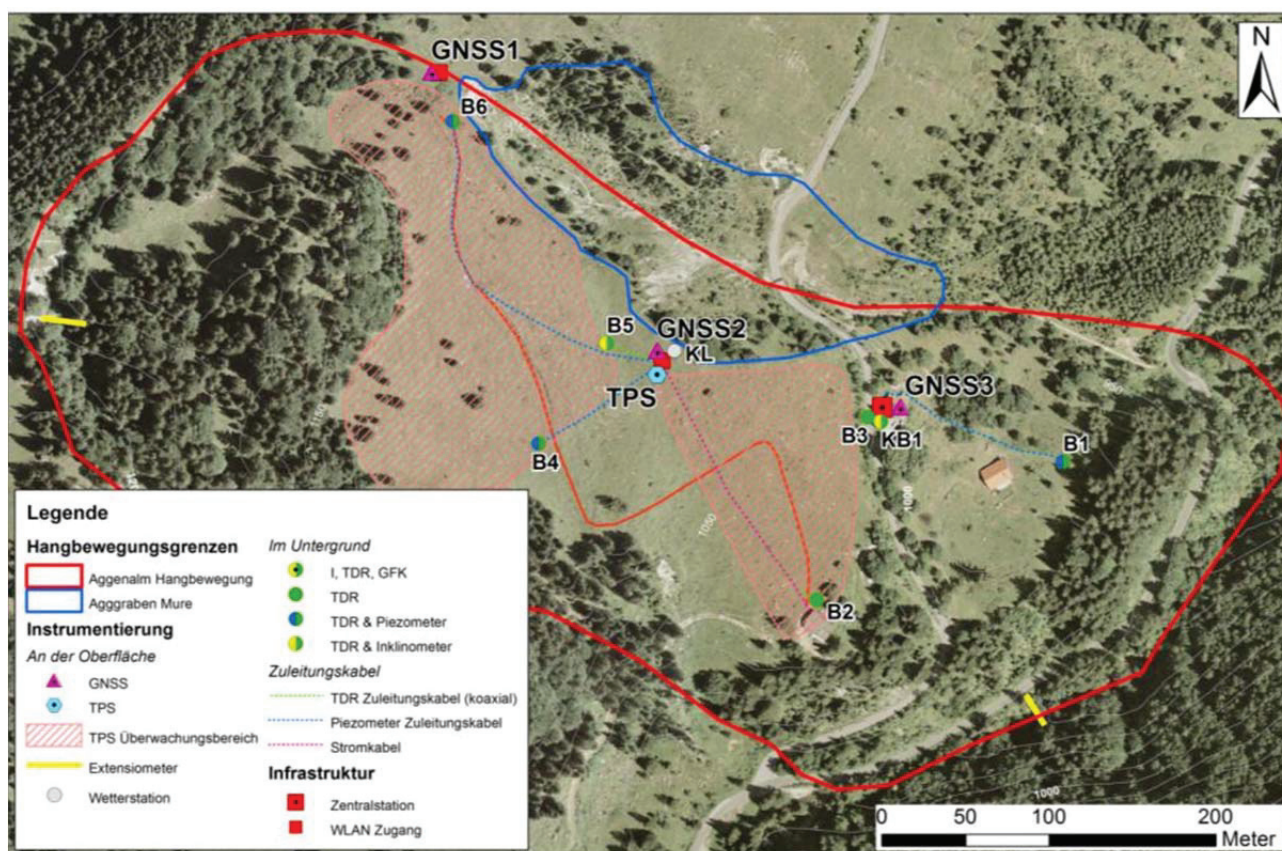


Abb. 1: Orthofoto der Hangbewegung Aggenalm (rote Umrandung) mit Installationsplan der Sensorik (nach SINGER et al. 2009).

Fig. 1: Installation setup of the different sensors installed at the Aggenalm landslide (red boundary) depicted in an orthophoto (after SINGER et al. 2009).

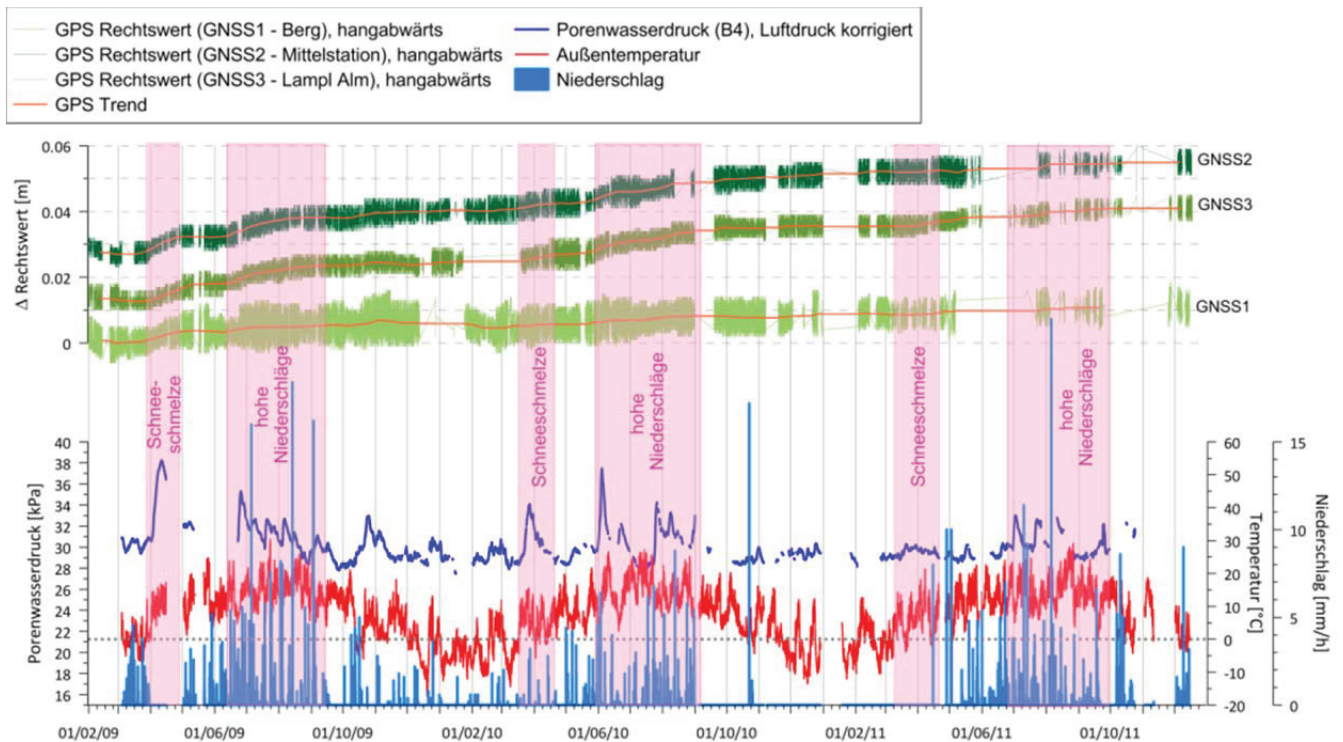


Abb. 2: Niederschlag und Temperatur an der Zentralstation (bei GNSS2), Porenwasserdruck am Sensorknoten B4 und GNSS (GPS) Deformationsmessungen an allen 3 Sensorknoten (GNSS1-3) über einen Zeitraum von Februar 2009 bis Dezember 2011. Die grau gepunktete Linie markiert die 0°C Grenze, um das Einsetzen der Schneeschmelze im Frühjahr besser identifizieren zu können (nach FESTL et al. 2011, 2012).

Fig. 2: Precipitation and temperature at the central station node, pore water pressure at node B4 and GNSS (GPS) deformation measurements of all three GNSS nodes (1-3) for the interval February 2009 to December 2011. The gray dotted line marks 0°C to better show the beginning of the snowmelting period each year (after FESTL et al. 2011, 2012).

### 1.1.2 Instrumentierung der Hangbewegung

Hier wird das an der Hangbewegung Aggenalm installierte Monitoringsystem nur überblicksweise vorgestellt. THURO et al. (2010b, 2011b), SINGER et al. (2009) und SINGER (2010) beschreiben den Aufbau des Geosensornetzwerkes, die drei Hauptmesstechniken – GNSS, TPS, TDR und Inclinometer – sowie die jeweiligen Ergebnisse der Messsysteme im Detail. Drei innovative und kosteneffiziente Techniken für die Überwachung der Bewegungen an der Oberfläche und im Untergrund wurden im Rahmen des alpE-WAS Projektes ausgewählt.

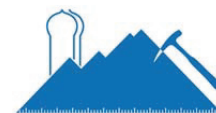
Vier kostengünstige GNSS (GPS) Sensoren wurden für die punktuelle Überwachung von Oberflächenbewegungen installiert, wobei ein Sensorknoten als Referenzstation auf stabilen Grund angebracht wurde (GNSS4). Ein reflektorloser Videotachymeter beobachtet die Bewegungen ausgewählter natürlicher Zielpunkte auf einem Großteil der Hangbewegung (schraffierter Bereich in Abb. 1). Als dritte Technik wird zur Überwachung der Bewegungen im Untergrund Time Domain Reflectometry (TDR) in Bohrungen eingesetzt (KB1, B1-B6). Zusätzlich wurde das Monitoringssystem mit Piezometern (B1, B4 und B6) und Inclinometermessstellen (KB1 und B5) sowie einer Wetterstation ausgestattet, die Temperatur, Luftdruck und Niederschlag aufzeichnet. Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Sensorik auf der Hangbewegung Aggenalm.

## 2 Datenanalyse

Anfang Februar 2009 wurde das Geosensornetzwerk an der Hangbewegung Aggenalm vollständig in Betrieb genommen, so dass ab diesem Zeitpunkt kontinuierliche Datensätze vorliegen und erste Zeitreihenanalysen möglich wurden. Die dokumentierten Ereignisse von 1935 und 1997 sowie das numerische Modell der Hangbewegung unterstützen die Annahme, dass ein Haupteinflussfaktor auf die Bewegungsraten der Hangbewegung Niederschlag, teils in Kombination mit Schneeschmelze ist. Ziel der Datenanalyse ist es daher, die Bewegungscharakteristika der Hangbewegung mit Hilfe von Korrelationen der gemessenen Daten wie Niederschlag, Porenwasserdruck (Piezometer) und Deformation zu validieren.

### 2.1 Zeitreihen

Die potentiellen Trigger Niederschlag und Porenwasserdruck inklusive der Temperatur sowie die Bewegungsmessungen durch GNSS an den 3 Sensorknoten sind in Abbildung 2 über einen Zeitraum von etwa 3 Jahren, beginnend im Februar 2009, dargestellt. Limitierend auf die Analyse wirken sich die relativ geringen Bewegungsraten von maximal 1 cm/a aus (GNSS1 etwa 1 cm und GNSS2 und GNSS3 je etwa 3 cm im gesamten Zeitraum von 3 Jahren, vgl. Abb. 2). Die Messungen mit dem TPS System zeigen vergleichbare Bewegungsraten, wohingegen mit dem TDR System bislang noch keine Deformationen im Untergrund



gemessen werden konnten, da noch kein kraftschlüssiger Kontakt zwischen Kabel und Gebirge erreicht wurde (Details hierzu in SINGER (2010) und THURO et al. (2011b)).

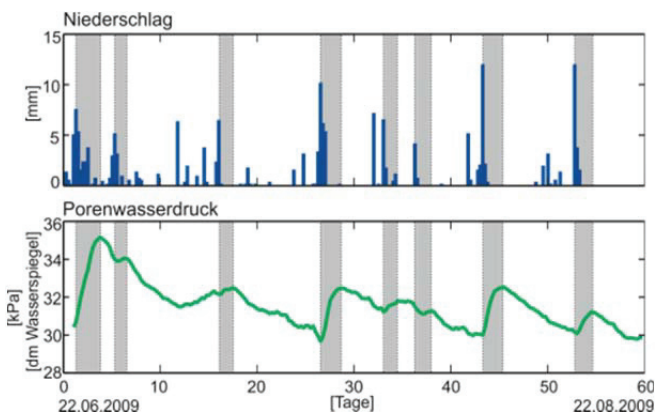


Abb. 3: Niederschlag und Porenwasserdruck dargestellt über einen Zeitraum von 60 Tagen (22. Juni bis 22. August 2009). Grau hinterlegt ist die Responszeit zwischen Niederschlag und Anstieg im Porenwasserdruck.

Fig. 3: Depicted are precipitation and pore water pressure over a time span of 60 days (June 22<sup>nd</sup> to August 22<sup>nd</sup> 2009). The response time between rainfall and increase of pore water pressure is shaded in gray.

Eine minimale Erhöhung der Bewegungsrate nach starken Niederschlägen und/oder Schneeschmelze konnte bereits mehrfach durch die GNSS Messungen nachgewiesen werden (Abb. 2). Im Frühjahr 2009 und 2010, nach Einsetzen der Schneeschmelze steigt der Porenwasserdruck jeweils auf über 33 kPa an (rosa hinterlegter Bereich in Abb. 2), wohingegen 2011 dieser Einfluss auf Grund der geringen Schneemächtigkeit kaum zu sehen ist. 2009 verursachte die Schneeschmelze einen Anstieg des Porenwasserdrucks von 30 kPa auf 38 kPa, was einem Wasserspiegelanstieg von 0,8 m entspricht. Aber auch nach starken Niederschlägen, z.B. im Juli und August 2009 sowie im Juni 2010 wurde ein deutlicher Porenwasserdruckanstieg beobachtet. Ein 60 Tage Abschnitt von Juni bis August 2009 zeigt dies beispielhaft (Abb. 3).

Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden die Daten zunächst wie folgt aufbereitet: aus den Niederschlagsdaten wurden 6 h Summen berechnet und der Einfluss des Luftdrucks auf die Piezometerdaten wurde kompensiert. Auf Grund der unterschiedlichen Abtastfrequenzen bei der Datenakquise – Porenwasserdruck und Niederschlag werden alle 5 Minuten erhoben, GNSS Daten alle 15 Minuten – wurden alle Datensätze schließlich auf ein einheitliches Datenintervall von 6 h reduziert.

Abbildung 3 zeigt den oben erwähnten 60 Tage Abschnitt für die gefilterten und einheitlich abgetasteten Niederschlags- und Piezometerdaten. Rein optisch betrachtet fällt bereits auf, dass einige Tage nach einem Niederschlag (>20 mm in 2 Tagen) der Porenwasserspiegel um ca. 0,5 m ansteigt (30 kPa → 35 kPa). In diesem 60 Tage Abschnitt ist dieser verzögerte Anstieg nach einem stärkeren Regenerereignis mehrfach zu beobachten (grau hinterlegte Bereiche in Abb. 3). Die wenigen Starkregenereignisse, die einen messbaren Anstieg der Deformation des Hangs ausgelöst haben,

genügen für eine statistische Betrachtung des Systems Anstieg Porenwasserdruck → Beschleunigung der Bewegung noch nicht aus. So wird bislang nur die Systemantwort des Porenwasserdrucks auf Niederschlag genauer mittels Zeitreihenanalysen betrachtet.

## 2.2 Kreuzkorrelationen

Mit Hilfe von Kreuzkorrelationen wurde die zeitliche Differenz zwischen Regenereignissen und Anstieg des Porenwasserdrucks genauer quantifiziert. Die Analyse des kompletten 60 Tage Abschnittes zeigt eine deutliche Korrelation zwischen Regen und Anstieg des Porenwasserdruckes mit einer Reaktionszeit von 2-3 Tagen. Dahingegen weisen Kreuzkorrelationen zwischen Niederschlag bzw. Porenwasserdruck und Bewegung (GNSS Daten) keine signifikante zeitliche Abhängigkeit auf, obwohl rein optisch betrachtet ein ähnliches Verhalten identifiziert werden kann. Dies ist u.a. durch die geringe Anzahl an Beschleunigungsphasen aber auch durch die sehr geringen Bewegungsraten zu erklären, die sich am Rande der Messauflösung befinden.

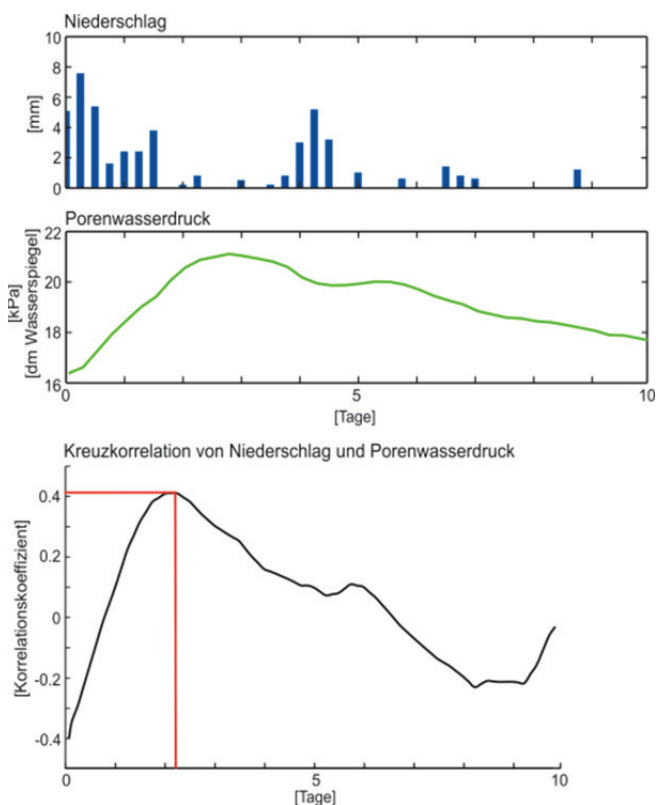


Abb. 4: Niederschlag und Porenwasserdruck eines 10 Tage Abschnitts (23. Juni – 3. Juli 2009) inclusive einer Kreuzkorrelation.

Fig. 4: Precipitation and pore water pressure over 10 days (June 23<sup>rd</sup> to July 3<sup>rd</sup> 2009) including a cross correlation.

In Abbildung 4 sind für einen kürzeren Abschnitt von nur 10 Tagen die Ergebnisse der Kreuzkorrelation exemplarisch dargestellt. Innerhalb der ersten zwei Tage fallen insgesamt 25 mm Niederschlag. Die Reaktionszeit des maximalen Porenwasserdruckes auf dieses Ereignis beträgt 2,5 Tage. Berechnungen ähnlicher Events lieferten vergleichbare Ergebnisse von 2-3 Tagen zeitlicher Differenz. Die Reaktionszeit nach dem Einsetzen der Schneeschmelze scheint

dahingegen etwas höher zu sein. Hier ergab die Analyse eine Differenz von 3-5 Tagen für die Jahre 2009 und 2010. Die Schneeschmelze 2011 dahingegen war zu wenig markant (deutlich weniger Schneefall als die Jahre zuvor), um eine Analyse zu ermöglichen.

Die Berechnungen der Korrelationen stellen eine erste mögliche Analyseverfahren dar. Eine längere Zeitreihe mit noch weniger Datenausfällen und vor allem einer größeren Anzahl markanter, extremer Regenereignissen sollte die Wirkungskette von Niederschlag-Porenwasserdruck-Oberflächendeformation und die zeitliche Abhängigkeit der Triggerfaktoren noch besser interpretierbar machen.

### 3 Numerische Modellierung

Nachdem aus der Daten- und Korrelationsanalyse nur sehr konservative Schwellenwerte (Grundwasserstand) für das Einsetzen erster sehr geringer Beschleunigungsraten abgeleitet werden konnten, wurde eine numerische Modellierung herangezogen um Extremereignisse zu simulieren. Das numerische Modell wurde auf Grundlage einer Detailkartierung (JUNG 2007) und unter Einbeziehung sämtlicher Feldmessungen sowie den Ergebnissen der Datenanalyse mit dem Itasca Code FLAC® (Fast Lagrangian Analysis of Continua) erstellt und kalibriert. Das in 2D modellierte Profil verläuft im südöstlichen Bereich der Hangbewegung und beinhaltet die Bohrungen B2 und B4 (siehe Abb. 1).

Die Materialparameter, für die im Modell verwendeten Gesteine, wurden größtenteils der Arbeit von JUNG (2007) entnommen, aber auch mit Hilfe des Programms RocData von RocScience bzw. durch Laborversuche bestimmt. REIBMÜLLER (1997) und SCHORMAIR (2003) haben erste Untersuchungen hinsichtlich des Reibungswinkels und der Kohäsion an den Kössener Mergeln in unterschiedlichen Verwitterungsstufen durchgeführt. Dabei ergab sich ein Schwankungsbereich von 5-42 kPa für die Kohäsion und 16-30° für den Reibungswinkel. Als Grundlage der Modellierung wurden an verwitterten Kössener Mergeln, die am Rutschungsfuß aufgeschlossen sind, erneut Rahmenscherversuche durchgeführt und eine Kohäsion von etwa 20 kPa und ein Reibungswinkel von 20-23° ermittelt.

Um die tatsächlich gemessenen Bewegungsraten und das beobachtete Bewegungsprofil möglichst genau abzubilden wurden zunächst Parameterstudien mit variierenden Kohäsionen und Reibungswinkeln in den Kössener Schichten bei gleich bleibendem Wasserspiegel (entsprechend dem durchschnittlich beobachteten Wasserspiegel in B4) durchgeführt. Die Ergebnisse der Parameterstudie (Abb. 5) zeigen, dass eine im Bereich von 0-40 kPa variierende Kohäsion nur einen geringen Einfluss auf die Bewegungsraten hat, wohingegen eine Variation des Reibungswinkels zwischen 16-30° eine deutlich größere Änderung im Bewegungsverhalten hervorruft (etwa zehn Mal höher, als die Änderung durch eine Variation der Kohäsion). Die Parameterstudie konnte zeigen, dass die im Rahmenscherversuch ermittelten Werte ( $c = 20 \text{ kPa}$  und  $\phi = 20\text{-}23^\circ$ ) die tatsächlichen Verhältnisse gut widerspiegeln und die im Modell errechneten Deformationsvektoren gut mit den Langzeitverformungsmessungen übereinstimmen.

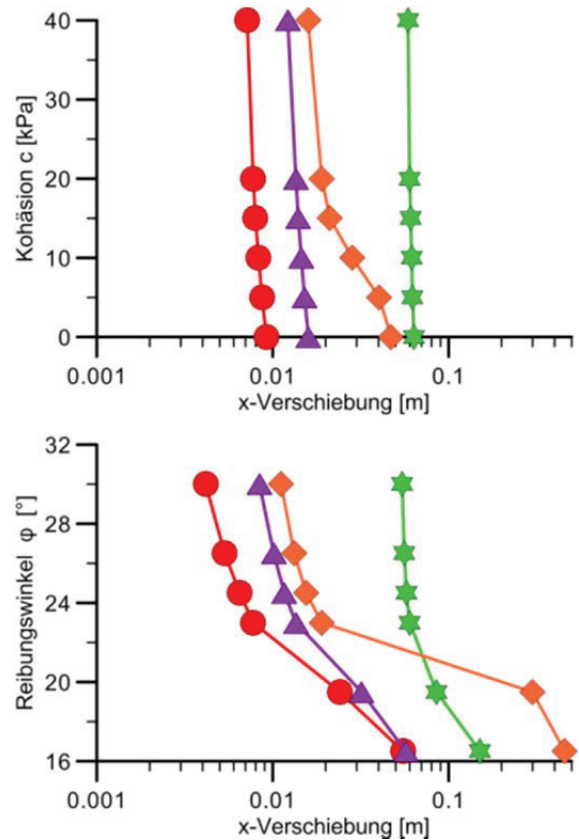


Abb. 5: Maximale x-Verschiebung an ausgewählten Punkten nach 100.000 Rechenzyklen für variierende Kohäsion (oben) bzw. Reibungswinkel (unten) bei ansonst gleichbleibenden Parametern.

Fig. 5: Maximum x-displacements for varying cohesions (top) and friction angles (bottom) for otherwise constant properties at selected observation points after 100.000 cycles.

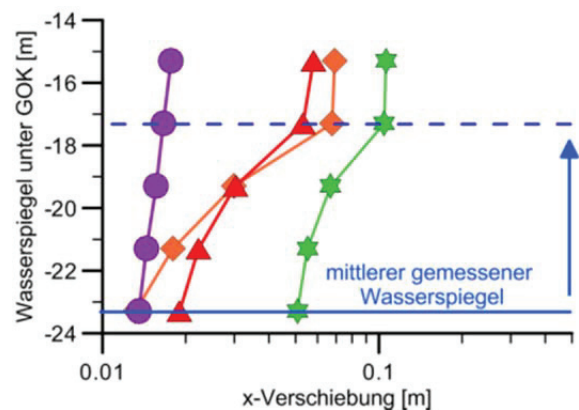


Abb. 6: Maximale x-Verschiebung an ausgewählten Punkten nach 100.000 Rechenzyklen für variierende Bergwasserspiegelstände bei gleichbleibenden Materialparametern c und φ.

Fig. 6: Maximum x-displacement for varying water tables and constant c and φ at selected observation points after 100.000 cycles.

Für die Simulation von Extremereignissen wurde der Wasserspiegel bei gleichbleibenden c und φ der Kössener Mergel schrittweise erhöht. In den Monitoringdaten konnten bislang nur relativ geringe Schwankungen im Grundwasserspiegel nachgewiesen werden. Die maximale Schwankung beträgt etwa 1,2 m wobei der maximale Anstieg nach einem



Niederschlagsereignis nur etwa 0,5 m nach Starkregen bzw. 0,8 m nach Schneeschmelze betragen hat. In der Simulation werden modellbedingt Schrittweiten vom minimal 2 m gewählt und die daraus resultierenden Deformationsbeträge an ausgewählten Beobachtungspunkten aufgezeichnet. Erste Modellberechnungen haben gezeigt, dass ein Bergwasserspiegelanstieg von mindestens 6 m notwendig ist um eine deutliche Beschleunigung der Bewegungen zu erreichen (Abb. 6).

#### 4 Fazit

Mit Methoden der Zeitreihenanalyse war es möglich, die Korrelation von Niederschlag und Porenwasserdruck mit einem zeitlichen Versatz von 2-3 Tagen nachzuweisen. Auch wenn optisch eine Beschleunigung der Bewegungen beim Überschreiten eines Porenwasserdruckes von etwa 33 kPa erkennbar ist, konnte diese Beziehung bislang noch nicht durch Kreuzkorrelationsanalysen belegt werden. Dies wird auch durch die Ergebnisse der numerischen Modellierung verdeutlicht, die gezeigt hat, dass für das Einsetzen deutlicherer Bewegungen ein Anstieg des Bergwasserspiegels von mindestens 6 m benötigt wird, also einem mindestens 6 mal höheren Anstieg als bislang tatsächlich beobachtet.

Auch wenn es mit den hier beschriebenen Messergebnissen nicht leicht ist die Wirkungskette mittels komplexeren Modellen zu verifizieren, so bedeutet dies doch, dass nur eine sehr geringes Gefahrenpotential von der Hangbewegung Aggenalm unter den momentan beobachteten meteorologischen Bedingungen ausgeht.

#### Literatur

- CRUDEN, D.M. & VARNES, D.J. (1996): Landslide types and processes. – In: TURNER, A.K., SCHUSTER, R.L. (Hrsg.): Landslides: Investigation and Mitigation. – Transportation Research Board: National Research Council; Special Report 247: 36-75, Washington, D.C., USA (National Academy Press).
- FESTL, J., SINGER, J. & THURO, K. (2011): The Aggenalm landslide – first findings of the acquired monitoring data. – In: EBERHARDT, E. et al. (Hrsg.): Slope stability 2011, International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Vancouver, Canada, 18.-21.09.2011: 7 S.
- FESTL, J., SINGER, J. & THURO, K. (2012): The Aggenalm landslide – first findings of the monitoring data. – In: EBERHARDT, E. et al. (Hrsg.): Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding: 907-912, London (Taylor & Francis).
- IPCC (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – FIELD, C., BARROS, T., STOCKER, D., QIN, D., DOKKEN, D., EBI, K., MASTRANDREA, M., MACH, K., PLATTNER, G., ALLEN, S., TIGNOR, M. & MIDGLEY, P. (Hrsg.). – 582 S., Cambridge, UK, New York, USA (Cambridge University Press).
- JUNG, S. (2007): Untersuchung der Hangbewegung Aggenalm östlich des Sudelfelds zwischen Bayrischzell und Oberaudorf. – 82 S., unveröff. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, München.
- REIBMÜLLER, M. (1997): Die Geologie des Oberen Rottachtales zwischen Bodenschneid, Stolzenbert und Siebligrat sowie Geotechnische Eigenschaften verwitterter Kössener Mergel. – 128 S., unveröff. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie, Technische Universität München, München.
- SCHORMAIR, N. (2003): Geologische Kartierung des Gebietes zwischen Aggenalm und Tatzelwurmwasserfall, Sudelfeld. – 58 S., unveröff. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie, Technische Universität München, München.
- SINGER, J. (2010): Development of a continuous monitoring system for instable slopes using Time Domain Reflectometry (TDR). – 189 S., unveröff. Dissertation, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, München.
- SINGER, J., SCHUHBÄCK, S., WASMEIER, P., THURO, K., HEUNECKE, O., WUNDERLICH, T., GLABSCH, J. & FESTL, J. (2009): Monitoring the Aggenalm Landslide using Economic Deformation Measurement Techniques. – Austrian Journal of Earth Sciences, **102** (2): 20-34.
- THURO, K., SINGER, J. & FESTL, J. (2011a): Low cost 3D early warning system for alpine instable slopes – the Aggenalm Landslide monitoring system. – In: EBERHARDT, E. et al. (Hrsg.): Slope stability 2011, International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Vancouver, Canada, 18.-21.09.2011: 12 S.
- THURO, K., WUNDERLICH, T., HEUNECKE, O., SINGER, J., SCHUHBÄCK, S., WASMEIER, P., GLABSCH, J. & FESTL, J. (2009): Low Cost 3D Early Warning System for Alpine Instable Slopes – the Aggenalm Landslide Monitoring System. – Geomechanics & Tunneling **2** (3): 221-237.
- THURO, K., SINGER, J., FESTL, J., WUNDERLICH, T., WASMEIER, P., REITH, C., HEUNECKE, O., GLABSCH, J. & SCHUHBÄCK, S. (2010a): New Landslide Monitoring Techniques – Developments and Experiences of the alpEWAS Project. – Journal of Applied Geodesy **4** (2): 69-90.
- THURO, K., SINGER, J., FESTL, J., WUNDERLICH, T., WASMEIER, P., REITH, C., HEUNECKE, O., SCHUHBÄCK, S. & GLABSCH, J. (2011b): Entwicklung und Erprobung eines integrativen 3D-Frühwarnsystems für alpine instabile Hänge – alpEWAS. – Schlussbericht im Forschungs- und Entwicklungsprogramm „Geotechnologien“: München.