

Monitoring einer Rutschung im digitalen Zeitalter: Sind Messuhr und Zollstock noch zeitgemäß?

Monitoring of Landslides in the Digital Age:
Are Dial Gauges and Rules still state of the art?

Thomas Gallemann¹

¹ Thomas Gallemann, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160; 86179 Augsburg, thomas.gallemann@lfu.bayern.de

Zusammenfassung

Bereits seit 1977 werden an einem ungebrochenen Hangrutschbereich des Isartals südlich von München messtechnische Beobachtungen durchgeführt. Insgesamt fünf Bohrungen wurden abgeteuft und mit Inklinometer- und Gleitmikrometerrohren, Stangen- und Drahtextensometern sowie GW-Beobachtungsschläuchen ausgebaut. Die Köpfe der Bohrungen wurden in ein geodätisches Beobachtungsnetz integriert. Die Messreihen über 35 Jahre belegen, dass vor allem Stangenextensometer geeignet sind, die Bruchentwicklung messtechnisch zu beobachten. Durch die Kombination mehrerer Bohrungen mit entsprechend gewählter Lage und Ausrichtung lässt sich die Auflösung des Kontinuums in einzelne Blöcke nachweisen und das Bruchgeschehen im Untergrund lokalisieren. Durch die geodätische Beobachtung der Bohrköpfe lassen sich zudem Verschiebungen an den tiefsten Ankerpunkten der Stangenextensometer ermitteln. Für die Beobachtung des Bruchvorgangs mit Stangenextensometern genügen punktuelle Messungen mit einfachen Messuhren. Analoge Messmethoden sind kostengünstig und schützen vor Vandalismus. Die Erkenntnisse aus dieser Langzeitbeobachtung lassen sich auf Rutschungen in anderen Flusstälern übertragen.

Schlüsselworte: Monitoring, Rutschung, Extensometer, Langzeitbeobachtung, Bruchentwicklung

Abstract

Since 1977, new failures and the behaviour of sliding masses have been observed on pre-failure slopes in the Isar Valley south of Munich. The movements are measured geodetically on the surface and in boreholes by rod and wire extensometers, inclinometers and sliding micrometers. The most useful information about the development of failure derive from rod extensometers. For this long-term monitoring, a dial gauge is used as a simple method and a cycle of three month is adequate. During 35 years, numerous data were collected. If data are carefully plotted and evaluated, it is possible to accurately track the development of movements inside the slope. The geodetic surveying of the measuring heads of rod extensometers permits the detection of movement of the deepest anchor points in the horizontal boring hole. Analogue methods for the observation of rod extensometers are economically priced and are less exposed to vandalism. The results of this long-term monitoring can be transferred to similar landslides in other valleys.

Keywords: long-term monitoring, landslide, extensometer

1 Einleitung

Im Herbst 1970 ereignete sich südlich von München am östlichen Talhang der Isar bei Grünwald ein tiefgreifender Anbruch des Hochufers, der die entlang der Isar am Hangfuß bereits vorhandenen alten Rutschmassen auf einer Länge von ca. 600 m wieder in Bewegung setzte (BAUMANN & GALLEMANN 2005). Im Januar 1975 erfolgte nur 150 m südlich ein weiterer Neuanbruch. Untersucht wurde zunächst das Verhalten dieser neu entstandenen Bruchkörper in Wechselwirkung mit den bereits vorhandenen Rutschmassen sowie mit den Laständerungen infolge der Wasserspiegelschwankungen der Isar.

Maßgebende Bruchmechanismen, Bruchkörperformen, Bewegungsablauf und bodenmechanische Eigenschaften der am Bruchgeschehen beteiligten Schichten konnten ermittelt

werden. Unklar blieb jedoch die eigentliche Ursache für einen Neuanbruch sowie die Frage weiterer Neuanbrüche sowie nach Überwachungsmöglichkeiten für einen bruchgefährdeten Hang und einer möglichen Vorhersage.

2 Talform und Geologie

Das Isartal südlich von München ist in seinem heutigen Verlauf das Ergebnis einer etwa 15000-jährigen Flussgeschichte (JERZ 1987). Während dieser Zeit hat sich die Isar durch die Ablagerungen der vorausgegangenen Eiszeiten bis in die darunterliegenden Tertiärsedimente eingetieft. Bedingt durch die zeitweise Überlagerungshöhe von vermutlich bis zu 200 m sind diese tertiären Sedimente ein typisches veränderlich festes Gestein: im bergfrischen Zustand einem Festgestein ähnlich, bei hoher Scherbeanspruchung oder unter Einfluss der Witterung jedoch bis hin zum Lo-



ckergestein entfestigt. Die eiszeitlichen Schotter sind meist infolge von Kalkbindung lagen- oder bankweise zu Nagelfluh verfestigt. Unmittelbar neben schwach gebundenem Lockergestein ist somit mürbes bis hartes Festgestein anzutreffen, das in den Talhängen senkrechte Wände oder gar Überhänge bilden kann (BAUMANN 1995).

Das tief eingeschnittene Tal wurde zum Teil mit Rutschmassen aufgefüllt. Jüngere Rutschungen sind auf den jeweils älteren Rutschmassen zum Stehen gekommen, so dass die Rutschschollen heute die Isarhänge vielerorts terrassenartig abstufen. Die Hänge haben dabei ihren natürlichen Böschungswinkel meist noch nicht erreicht. An den übersteilten Talflanken kann es daher auch in Zukunft zu Bewegungen und Neuanbrüchen kommen (BAUMANN et al., 1975).

3 Bewegungsmechanismen

Die Neuanbrüche 1970 und 1975 wurden zunächst mit einfachen geodätischen Methoden erfasst. Distanzen zwischen den Messpunkten wurden mit dem Maßband gemessen, Höhenunterschiede mit einem Nivelliergerät. Die elektrooptische Distanzmessung (Tachymeter) befand sich noch in den Kinderschuhen, im Isartal kam sie erstmals 1980 zum Einsatz. Aber auch mit einfachsten Methoden wurden anschauliche Ergebnisse erzielt, wie Abb. 1 und 2 zeigen.

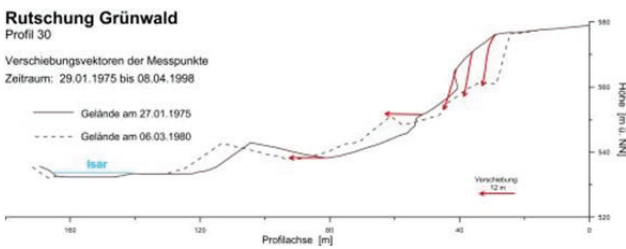


Abb. 1: Neuanbruch von 1975: Verschiebungsvektoren im geodätischen Beobachtungszeitraum und Veränderung des Gelände profils im Abstand von fünf Jahren (GALLEMANN, 2012).

Fig. 1: Failure of the slide in 1975: displacement vectors and changing morphology account for five years (GALLEMANN, 2012).

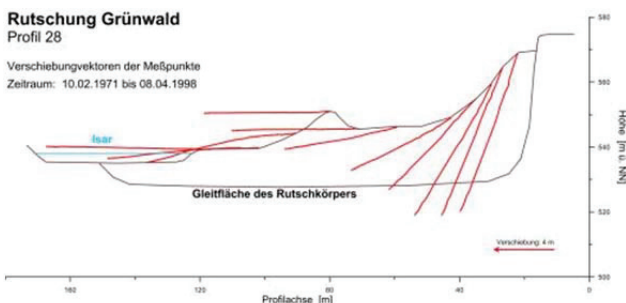


Abb. 2: Verschiebungsvektoren in einem Rutschbereich, in dem der Anbruch bereits längere Zeit zurück liegt (GALLEMANN, 2012).

Fig. 2: Displacement vectors in an area, where the failure is already long time ago (GALLEMANN, 2012).

Mit diesen Beobachtungen, zahlreichen Rammsondierungen, detaillierten geomorphologischen Aufnahmen und im Labor ermittelten bodenmechanischen Kennwerten

konnten die Rutschkörperformen und Bruchmechanismen auf einer Länge von 600 m entlang der Isar ermittelt werden. Verschiedene Rutschkörper in unterschiedlichen Entwicklungsstadien liegen im Isartal in unmittelbarer Nachbarschaft und beeinflussen sich gegenseitig.

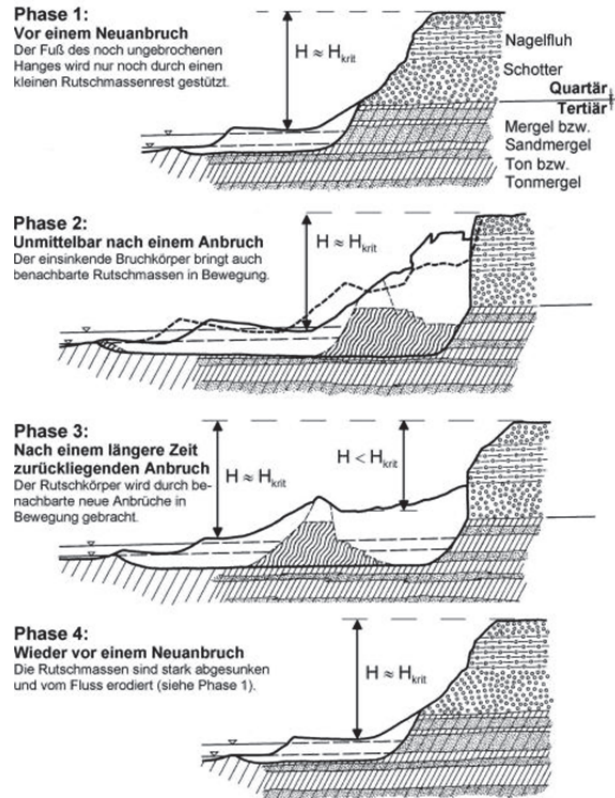


Abb. 3: Aufeinanderfolgende Phasen des Bruch- und Rutschgeschehens (BAUMANN 1995).

Fig. 3: Development of movement inside the slopes in sequenced phases (BAUMANN 1995).

Bei einem Neuanbruch sinkt zunächst eine abgetrennte Scholle des Hochufers (Quartärschotter mit Nagelfluh) in den Untergrund (Wechselfolge von Tertiärmergeln) ein. Der zuvor noch ungebrochene Böschungsfuß und die davor lagernden alten Rutschmassen werden auf einer nahezu horizontalen Gleitbahn zur Isar hin verschoben. Der Wechsel von den steil geneigten zu den weitgehend horizontalen Verschiebungsvektoren erfolgt nahezu übergangslos (siehe Abb. 1 und 3). Dieses Verschiebungsbild kennzeichnet einen Grundbruch als Bruchmechanismus (BAUMANN 1995).

4 Instrumentierung eines ungebrochenen Hangs

Bereits seit 1977 konzentrieren sich die Beobachtungen auf einen noch ungebrochenen Hangabschnitt. Dabei stellte sich in erster Linie die Frage nach der Überwachung bruchgefährdeter Hänge und einer Vorhersage eines bevorstehenden Neuanbruchs. Zunächst wurden in einem gedachten Profilschnitt die Aufschlussbohrungen B1 bis B5 abgeteuft und mit Stangen- und Drahttextensometern, Inklinometer- und Gleitmikrometerrohren sowie Grundwasser-Beobachtungsschläuchen ausgebaut (siehe Abb. 4).

An der Geländeoberfläche wurde zusätzlich ein geodätisches Messnetz eingerichtet. Die beobachteten Verformungen und das Abscheren des Inklinometerrohrs in der Bohrung B5 in der vorgelagerten, alten Rutschmasse ließen darauf schließen, dass im ausgewählten Abschnitt tatsächlich mit einem Neuanbruch gerechnet werden muss. Da in der Bohrung B5 neben dem Inklinometerrohr auch Drahtextensometer installiert wurden, kann dort bis heute „nur“ mit einem Stück Draht und einem Zollstock zuverlässig und schnell die Horizontalverschiebung gemessen werden.

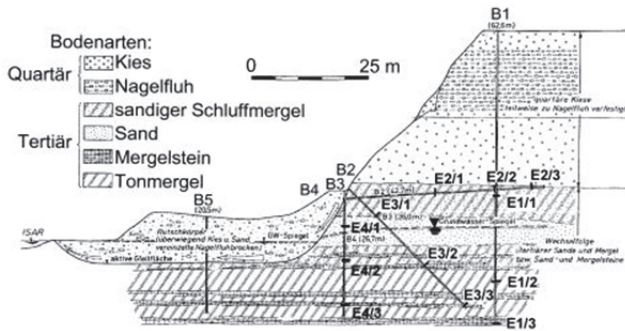


Abb. 4: Beobachtungsprofil mit Bohrungen B1 bis B5 und den Ankerpunkten von installierten Mehrfach-Stangenextensometern (GALLEMANN, 2012)

Fig. 4: Monitoring profile with boreholes and anchor points of rod extensometers (GALLEMANN, 2012)

Wie in Abb. 5 skizziert, legt sich der Drahtextensometer in die Gleitbahn, bei Verschiebung der Rutschmasse wird der Draht in seinem Hüllschlauch nach unten gezogen. Die Horizontalverschiebung wird somit an der Oberfläche messbar. Diese Verschiebung des Hangfußes wird im Abstand von zwei Jahren geodätisch kontrolliert.

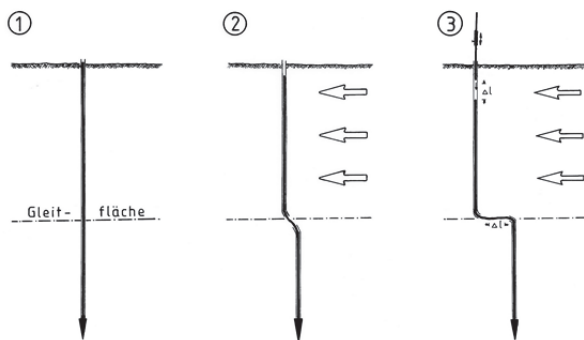


Abb. 5: Funktionsprinzip eines Drahtextensometers in einem Rutschkörper (GALLEMANN, 2012)

Fig. 5: Functional principle of wire extensometers inside of slopes (GALLEMANN, 2012)

5 Langzeitbeobachtung über 35 Jahre

Die Messungen an den Extensometern wurden zunächst etwa monatlich durchgeführt. Aufgrund der sehr einfachen Messmethodik kann dies durch entsprechend eingewiesene Personen erfolgen. Ein Geowissenschaftler ist vor Ort für die Messung nicht erforderlich. Mit zunehmender Länge der Messreihen konnte das Messintervall allmählich ausgedünnt werden. Derzeit werden Stangen- und Drahtextensometer

nur noch alle drei Monate abgelesen. Bei ggf. einsetzendem Hochwasser in der Isar wird der Messtakt kurzfristig verdichtet. Die geodätischen Beobachtungen wurden mittlerweile bis auf Kontrollmessungen zwischen dem stabilen Isardamm und dem hangseitigen Isarufer komplett eingestellt. Bei Bedarf können diese aber jederzeit wieder aufgenommen werden.

Die nützlichsten Informationen für die Beobachtung des sich entwickelnden Neuanbruchs lieferten und liefern aber die Mehrfach-Stangenextensometer in den Bohrungen B1 bis B3 (siehe Abb. 4). Mit einer analogen Messuhr wie in Abb. 6 werden die Abstände zwischen den Stangenenden und dem das Gelände repräsentierenden Bohrkopf gemessen. Aus einfachen Differenzen der Messwerte lassen sich die Längenänderungen zwischen den Messköpfen an der Geländeoberfläche und den Ankerpunkten in unterschiedlichen Tiefen ermitteln.



Abb. 6: Bohrkopf mit Mehrfach-Stangenextensometern und analoge Messuhr

Fig. 6: Boring head with rod extensometers and dial gauge

Der Untergrund entlang der Bohrachsen kann somit in Dehnungs- und Stauchungszonen gegliedert werden. Die Beobachtung über 35 Jahre zeigt jedoch, dass eine solche Einteilung nicht für den kompletten Zeitraum gelten muss. Bei manchen Ankerzonen konnte auch ein zeitlicher Wechsel zwischen Dehnung und Stauchung beobachtet werden. Die Sammlung der Messdaten und vielfältige Berechnungen in geeigneten Tabellen machen es nun möglich, unterschiedlichste Messungen und Auswertungen in einem Diagramm darzustellen und zu vergleichen. In Abb. 7 sind Setzungen an der Hangkante, horizontale Dehnungen zwischen den Ankern E2/1 und E2/3 (in 38 m Tiefe unter der Hangkante) sowie die Horizontalverschiebung des Hangfußes über die Zeit aufgetragen.

Deutlich erkennbar ist der Einfluss des so genannten Pfingst-Hochwassers 1999. Nicht nur in den alten Rutschmassen nahe der Isar war eine deutliche Beschleunigung der Verschiebung festzustellen. Auch unterhalb der Hangkante und beachtliche 10 m über dem Niveau des Isarwasserspiegels konnte eine signifikante Zunahme der Dehnung beobachtet werden. Seit 2008 ist eine nahezu konstante, erhöhte Verformungsgeschwindigkeit im Untergrund zu beobachten, die in dieser Dimension ohne direkten Einfluss von



Wasser über einen längeren Zeitraum seit Beginn der Messungen noch nicht aufgetreten ist.

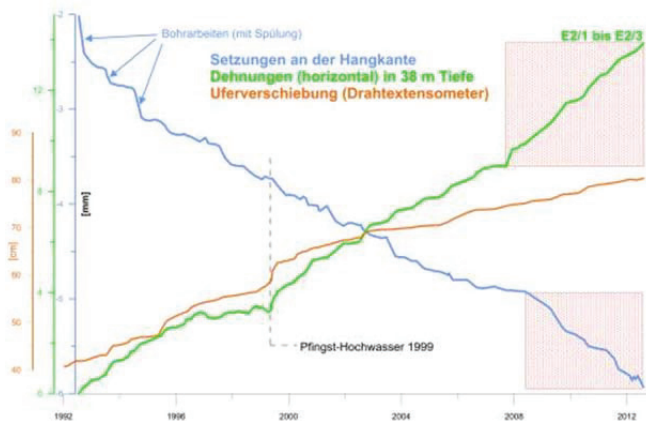


Abb. 7: Verschiebungsbeträge in verschiedenen Teilen des Rutschkörpers über die Zeit

Fig. 7: Displacement rates from several locations in the slope

6 Ergebnisse

Alle Bohrungen wurden von Beginn an in das geodätische Messnetz integriert. Hierzu wurden Punktmarken auf den Bohrköpfen gesetzt, um eine entsprechende Genauigkeit zu gewährleisten (siehe Abb. 6). Die absolute Verschiebung des Bohrkopfs der Horizontalbohrung B2 ist somit bekannt. Nach Abzug der Längenänderung in der Bohrung ergibt sich für den tiefsten Ankerpunkt (E2/3 in Abb. 4) eine resultierende Horizontalverschiebung.

Mit Hilfe der Geodäsie als Kontrolle war es nun möglich, einen Algorithmus zu entwickeln, mit welchem die horizontale Komponente der Verschiebung des Bohrkopfes aus den Extensometermessungen dieser Schrägbohrung B3 berechnet werden kann. Weiterhin wurde geodätisch nachgewiesen, dass beide Bohrköpfe (B2 und B3) analoge horizontale Verschiebungen aufweisen. Somit genügt fortan die Beobachtung der Stangenextensometer in den beiden Bohrungen, um die Verschiebungen am tiefsten Ankerpunkt der Horizontalbohrung bestimmen zu können. Seit 1992 haben sich die Verschiebungen in diesem Punkt E2/3 auf 8 mm summiert (siehe Abb. 8), seit Beginn der geodätischen Messungen 1980 auf beachtliche 19 mm. Betrachtet man die Ganglinie dieses Ankerpunkts (E2/3 bis ∞) über die Zeit, so fällt auf, dass selbst 15 m hinter der Hangkante und knapp 10 m über Isarniveau der Untergrund auf jedes größere Hochwasserereignis in der Isar reagiert. Die Veränderungen auf Grund von Hochwassereinflüssen sind jedoch nicht generell vorhersehbar. Die Ganglinie E2/1 bis E2/2 in Abb. 8 zeigt, dass infolge des Hochwasserereignisses 1999 starke Dehnungen zwischen diesen Ankerpunkten plötzlich in Stauchungen umschlugen. Bei den beiden anderen Hochwasserereignissen 1995 und 2005 ist jedoch in diesem Bereich keinerlei Reaktion zu verzeichnen.

Deformationsdiagramme über die Zeit veranschaulichen wertvolle Informationen, die sich aus einer rein tabellari-schen Darstellung nicht erschließen lassen. Allerdings ist es auch mit diesen Darstellungen schwer, den räumlichen

Zusammenhang der gesammelten Informationen und Berechnungen zu erfassen. Mit Abb. 9 wurde versucht, die Deformationen zumindest zweidimensional zu visualisieren, die zeitliche Entwicklung wurde dabei aber direkt in die Profildarstellung integriert. Horizontal- und Vertikalverschiebungen im Untergrund werden lagerichtig und orientiert dargestellt, die Messreihen bekommen eine plastische Aussagekraft. Die Darstellung zeigt noch eindrücklicher, welche Bedeutung die Verbindung verschiedener Messmethoden hat. Nur durch die Kombination mit der Geodäsie war es möglich, die Bewegungen im Untergrund 17 m hinter der Hangkante und in 38 m Tiefe mess- und „sichtbar“ zu machen.

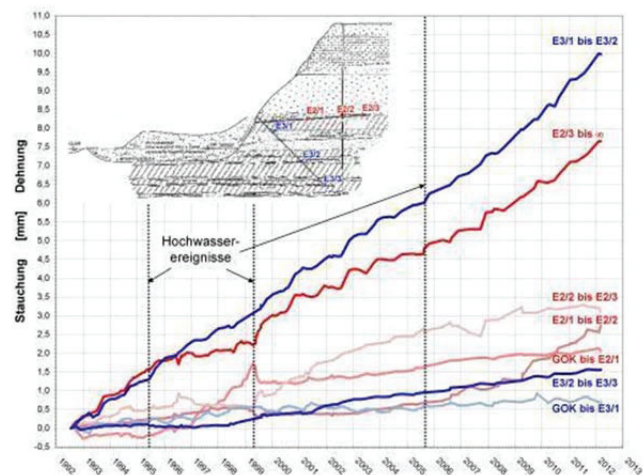


Abb. 8: Zeitliche Entwicklung der Dehnungen und Stauchungen zwischen den Ankerpunkten der Stangenextensometer in Horizontal- und Schrägbohrung

Fig. 8: Development of elongation and compression between the anchors of the rod extensometers

7 Geotechnische Interpretation

In der Vertikalbohrung B1 erleidet ausschließlich die Zone zwischen 35 und 53 m Tiefe eine Stauchung mit nahezu konstanter Geschwindigkeit (siehe Abb. 9). Seit 2008 ist eine leichte Zunahme der Geschwindigkeit zu verzeichnen (siehe Abb. 7). Andere Veränderungen sind nicht messbar. Auch Reaktionen auf Isarhochwasser sind nicht zu erkennen. Die Schrägbohrung B3 zeigt, dass ein Großteil der auftretenden Dehnungen zwischen E3/1 und E3/2 stattfinden. Diese erfolgen in nahezu konstanter Geschwindigkeit, die sich ebenfalls seit 2008 nochmals etwas gesteigert hat. In dieser Zone liegt auch die sich ausbildende Gleitfläche, deren Tiefe bereits mit dem Inklinometer in der Bohrung B5 nachgewiesen wurde.

Ausschließlich in der Horizontalbohrung B2 lassen sich Längenänderungen beobachten, die verschiedene Entwicklungsphasen erkennen lassen. Seit 1995 führt die Isar deutlich mehr Wasser als in den Vorjahren. Die alten Rutschmassen am Hangfuß beschleunigen sich seither wieder. Aber auch die Dehnungen zwischen der Geländeoberkante und dem ersten Extensometeranker nehmen signifikant zu, während in allen anderen Zonen die Dehnungen abnehmen oder gar gegen Null gehen (siehe Abb. 8).

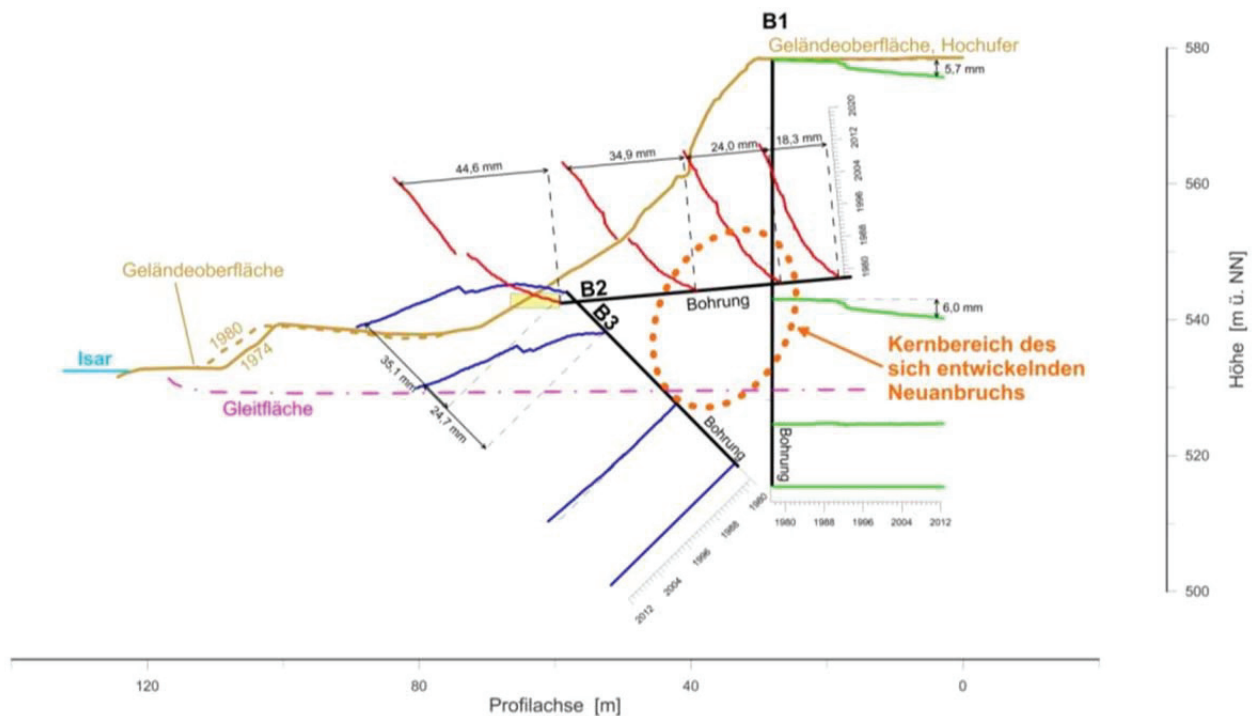


Abb. 9: Beobachtungsprofil mit Bohrungen, zeitlicher Entwicklung der Verschiebungen entlang der Bohrachsen und räumlicher Eingrenzung des sich entwickelnden Neuanbruchs im Untergrund.

Fig. 9: Monitoring profile with boreholes, movement of the anchor points of rod extensometers and localization of the area for the expected failure.

Das Pfingst-Hochwasser 1999 veränderte die Verteilung der Längenänderungen abermals. Von 1999 bis 2009 fanden die Dehnungen entlang der Bohrachse vor allem in den tiefsten Bereichen statt. Seitdem zeigt sich eine signifikante Beschleunigung der Dehnung zwischen den Anker E2/1 und E2/2, während der Abschnitt bis zum folgenden Anker nun kaum noch Dehnungen aufweist.

Die verschiedenen Bewegungsphasen entlang der Horizontalbohrung lassen den Schluss zu, dass sich das Kontinuum in einzelne Blöcke aufgelöst hat. Seit 2009 finden die größten Dehnungen im Bereich des erwarteten Kernbereichs für den Neuanbruch statt. Möglicherweise wird hier gerade das endgültige Versagen des Hanges beobachtet.

8 Folgerungen

Für die Beobachtung eines Neuanbruchs sind Messeinrichtungen im Untergrund zwingend erforderlich. Eine Inklinometer- oder gar Gleitmikrometerbohrung an der Hangkante ist hierfür generell denkbar. Dazu ist aber eine ausreichende Tiefe erforderlich. Erfahrungen des Bayerischen Landesamts für Umwelt aus anderen Projekten zeigen jedoch, dass bei großen Tiefen bei der Installation der Inklinometerrohre beträchtliche Verdrehungen auftreten können, welche die Messergebnisse entscheidend beeinflussen können. Eine Optimierung ist bei dieser Methode anzustreben.

Stangenextensometer sind demzufolge die zuverlässigere Methode, um die Entwicklung eines Bruchs verfolgen und erkennen zu können. Setzungen an der Hangkante finden während einer Bruchentwicklung zwar statt, die Bewegun-

gen sind aber wesentlich kleiner als am Hangfuß und als Warnung vor einem Versagen des Hanges nicht aussagekräftig. Die Stangenextensometer in der Horizontalbohrung am Hangfuß können ohne zusätzliche Messeinrichtungen zwar die Gesamtbewegungen nicht erfassen, erlauben aber die besten Rückschlüsse auf eine Bruchentwicklung (BAUMANN & GALLEMANN 2005). In der Schrägbohrung am Hangfuß erfassen die Stangenextensometer sehr zuverlässig die Gesamtbewegung des Rutschkörpers. Ob damit aber auch ausreichend frühzeitig Hinweise auf das endgültige Versagen des Hanges erhalten werden, muss die weitere Beobachtung zeigen.

Nach den bisherigen Erkenntnissen erscheint eine Kombination aus Horizontal- und Schrägbohrung am Hangfuß mit eingebauten Mehrfach-Stangenextensometern am geeignetsten, um einen Hang auf seine Bruchentwicklung hin zu überwachen. Zusätzlich ist die Einbindung der Bohrköpfe in ein geodätisches Netz zu empfehlen. Dieses hat in erster Linie eine Kontrollfunktion und kann entsprechend mit ausgedehnten Messintervallen beobachtet werden. Die Verschiebung von alten Rutschmassen am Hangfuß kann kostengünstig mit Drahtextensometern beobachtet werden. Das Einbringen in die Rutschmasse erfolgt mit Hilfe einer schweren Rammsonde (DPH), die Gleitfläche muss dabei durchstoßen werden.

Stangenextensometer lassen sich selbstverständlich mit digitalen Wegsensoren und Datenloggern ausstatten, bei Bedarf auch mit Datenfernübertragung. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn Neuanbrüche in kürzeren Zeiträumen



zu erwarten sind. Mitunter kann die Entwicklung eines Neuanbruchs jedoch sehr lange dauern, wie das hier vorgestellte Projekt zeigt. Der Einsatz elektronischer Geräte unter Geländebedingungen und über lange Zeiträume sollte deshalb in Hinsicht auf Kosten und Funktionstüchtigkeit sorgfältig abgewogen werden. Insbesondere bei Rutschungen in Flusstälern genügen Messungen vor Ort in relativ großen zeitlichen Abständen mit einfachen und analogen Messinstrumenten oder Hilfsmitteln. Der Messtakt kann jederzeit, z. B. bei Hochwasser oder Langzeitniederschlägen, verdichtet werden. Informationen zu Flusspegeln und Niederschlagsmengen sind quasi in Echtzeit verfügbar – dank des digitalen Zeitalters.

Literatur

- BAUMANN, H. J., KRANZBERGER, A. & KRÖGER, J. (1975): Beschreibung einer Rutschung im Isartal südlich von München – *Geologica Bavarica* **74**, Bayerisches Geologisches Landesamt, München, 193-208
- BAUMANN, H. J. (1995): Bruch- und Rutschvorgänge in den Tälern des Alpenvorlandes und des Schichtstufenlandes. - Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München, Heft 21, 260–271, München
- BAUMANN, H. J. & GALLEMANN, TH. (2002): 30 Jahre Beobachtung einer Rutschung im Isartal bei München. - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Tagungsband der 12. Donau-Europäischen Konferenz, Passau, 215–217.
- BAUMANN, H. J. & GALLEMANN, TH. (2004): Die Bruch- und Rutschvorgänge im Isartal und ihre Bedeutung für die Gemeinde Grünwald. - Hans Waldhauser u. Christine Waldhauser-Künlen, Grünwald Chronik Band III, Herausgeber: Gemeinde Grünwald, 197–210.
- GALLEMANN, TH. (2012): Geodätische und geotechnische Langzeitbeobachtungen an einer Rutschung im Isartal südlich von München. - *VDVmagazin*, **6/2012**: 474-479
- JERZ, H. (1987): Geologische Karte von Bayern 1:25000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 7934 Starnberg Nord, Bayerisches Geologisches Landesamt, München.