

# Hangdeformationen – Beobachtungsmethoden und Risikoanalyse

E. Krauter, M. Lauterbach & J. Feuerbach

*geo-international, Mainz, und*

*Forschungsstelle Rutschungen e.V. an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz*

## KURZFASSUNG

Anwendungsbeispiele von Frühwarnsystemen als Schutzmaßnahme für durch Massenbewegungen gefährdete Verkehrswege in Mittelgebirgsräumen (SW-Deutschland) und die damit gemachten Erfahrungen werden aufgezeigt. Die Methode der Festlegung der Grenzwerte für die Alarmauslösung und Möglichkeiten der Risikoanalyse sowie der Risikoeinstufung werden beschrieben.

*Keywords:* Massenschwerebewegungen, Frühwarnsysteme, Risiko

## 1 EINLEITUNG

Felssturz- und Hangrutschungsereignisse haben in den letzten Jahren nicht nur in Hochgebirgs- sondern auch in Mittelgebirgsräumen deutlich zugenommen. Ursachen sind

Klimaveränderungen und anthropogene Eingriffe in das Gleichgewicht fragiler Ökosysteme. Die Zunahme dieser gravitativen Naturereignisse erfordert ein Überdenken bisheriger geotechnischer Sicherheitsphilosophien in Richtung Risikobewertung und -akzeptanz.

Zur Minimierung solcher Naturgefahren steht das Erkennen des Risikos an erster Stelle. Ausgehend von der Einstufung des Risikos werden messtechnische Beobachtungen als Schutzmaßnahme (Abb. 1) angewendet.

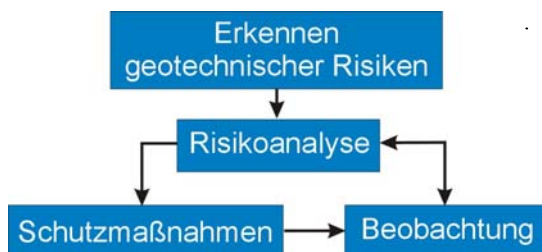


Abb.1. Zusammenhang von Risiko, Schutzmaßnahmen und Beobachtung.

## 2 BEOBACHTUNGSMETHODEN

Beobachtungsmethoden werden in Fällen angewendet, in denen eine Prognose des Verhaltens von Massenschwerebewegungen an Hängen und Böschungen allein aufgrund vorab durchgeführten Untersuchungen und rechnerischen Nachweisen nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit möglich ist. Mit

den Messungen sollen kritische Situationen rechtzeitig erkannt und durch die Anwendung vorbereiteter technischer Maßnahmen beherrscht (Kuntsche 1996) oder durch sicherheitsrelevante Maßnahmen dem Gefahren- und Risikopotenzial entgegengewirkt werden (Krauter et al. 2001). Auch aus wirtschaftlichen Erwägungen kommen Beobachtungsmethoden zur Anwendung.

Für Permanentmessungen nach der Beobachtungsmethode mit Online-Überwachung der Messdaten und Alarmauslösung bei Grenzwertüberschreitung sind in Mittelgebirgsräumen in SW-Deutschland folgende Messgeber eingesetzt:

- Fissurometer
- Oberflächenextensometer
- Bohrlochextensometer
- GPS-Empfänger (GOCA-System, Jäger & Kälber 2001)

Für epochale Kontrollen von Hang- und Böschungsverformungen, als sofortige Schutzmaßnahme, kommen verschiedene manuell oder in schwer zugänglichem Gelände auf Distanz optisch ablesbare Messgeräte (Distanz-Felsspione System geo-international) zur Anwendung. Von der Vorbereitung bis zur Herstellung der Funktionstüchtigkeit eines Frühwarnsystems einschließlich Testphase wird ein Zeitraum von etwa drei Monaten benötigt.

Das Hauptziel der eingesetzten messtechnischen Beobachtungsmethoden (Abb. 2) ist die Frühwarnung bei einer unmittelbaren Gefährdung von Verkehrswegen durch Massenbewegungen an Hängen und Böschungen. Diese permanent registrierenden

Messgeber übertragen online die Daten an die Messzentrale. Bei Grenzwertüberschreitung erfolgt automatisch eine Alarmauslösung über Telefonrundrufe mit Bandansage an die entsprechenden Empfänger. Die Grenzwertfestlegung basiert auf Expertenwissen, unterstützt durch das Monitoring, und wird auf die Anfälligkeit des zu sichernden Objektes abgestimmt. Entsprechend den Messwerten werden die Grenzwerte an die tatsächlich gemessenen Werte angeglichen. Mit dieser Adaption der Grenzwerte kann ständig auf die Entwicklung der Hangdeformationen reagiert werden.

Bei einer Funktionsstörung wird ebenfalls Alarm über Telefonrundruf mit entsprechender Sprachangabe ausgelöst.

Bei Felssturzgefahren wurden für die Risikoanalyse Steinschlagsimulationen und, soweit möglich, Fallversuche, die ein realistischeres Bild des Bewegungsablaufs als das der Simulation abgeben, durchgeführt. Bei Schutzmaßnahmen, die auf der Basis von Steinschlagsimulationen geplant werden, sind stets Sicherheitszuschläge erforderlich.

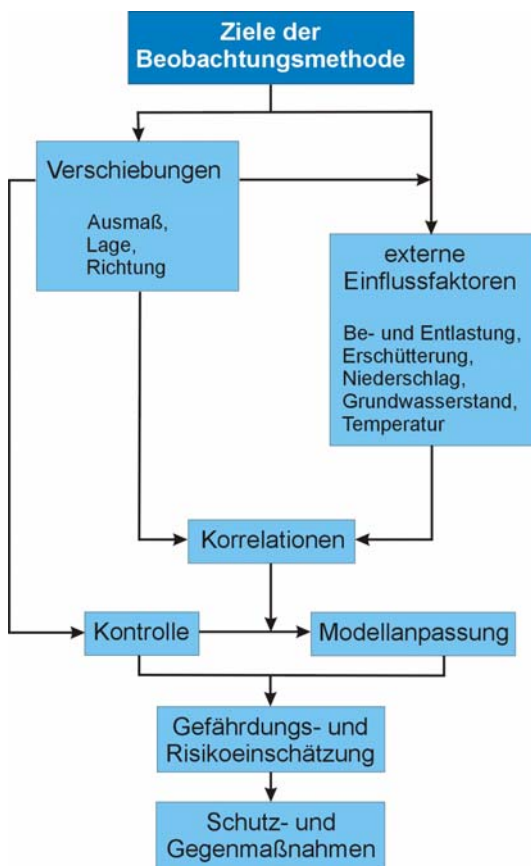


Abb. 2. Ziele der Beobachtungsmethode.

## 2.1 OBERFLÄCHENEXTENSOMETER

Die Bundesstraße B 53 an der Mosel (Rheinisches Schiefergebirge) war auf einer 250,0 m langen Strecke durch Massenbewegungsprozesse akut gefährdet. Murgänge, Kriechen und Gleiten zum Teil extrem tief aufgelockerter Felspartien, Steinschlag- und Felssturzereignisse in den letzten Monaten und Jahren wiesen auf diese Gefährdung hin.

Ausgeführte konstruktive Sicherungen wie Drahtnetzverhängungen instabiler und ausbruchgefährdeter Felspartien und Fangzäune am Hangfuß sowie in potentiellen Murengängen erhöhten die Verkehrssicherheit der Bundesstraße. Die Dimensionierung der Fangzäune (Ringnetze System Geobrug) erfolgte anhand von Steinschlagsimulationen in zweidimensionalen Profilen (Spang & Krauter 2001) und in-situ-Fallversuchen.

Das Auffangen großer Einzelluftkörper ist jedoch trotz hohen Energieaufnahmevermögens der Fangzäune (2.000 kJ) nur eingeschränkt möglich. Eine Stabilisierung der tief aufgelockerten Felspartien im oberen Hangbereich ist aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht durchführbar. Zur Überwachung und Kontrolle der Felsdeformationen wurden daher, als zusätzliche Schutzmaßnahme, um bei einer akuten Rutsch- und Absturzgefahr von Felsmassen rechtzeitig Gegenmaßnahmen zu treffen, im steilen Hanggelände permanent arbeitende Oberflächenextensometer (Abb. 7; Stangenextensometer) und in der Felswand, wo mit Ausbrüchen von Felskörpern > 10,0 m<sup>3</sup> zu rechnen ist, ebenfalls permanent messende Fissurometer (beides System Glötzl) installiert.

Die Messdaten werden stündlich gespeichert und sind jederzeit in den berechtigten Fremdrechnern über Fernwartung abrufbar. Die Toleranzen der Messsensoren liegt nach Angaben des Herstellers zwischen 0,02 und 0,3 mm. In der Praxis wird erfahrungsgemäß aufgrund externer Einflussfaktoren bei der Übertragung mit einer Zehnerpotenz niedriger gearbeitet.

Das maximale Verformungsausmaß betrug seit Beginn der Messungen vor zwei Jahren 23 cm.

Einige exemplarische Alarmmeldungen infolge Grenzwertüberschreitung und deren Ursachen, woraus auch die Anfälligkeit des Messsystems gegen Überspannungen hervorgeht, sind aus Tab. 1 ersichtlich.

Tab. 1. Übersicht von exemplarischen Alarmmeldungen bei Grenzwertüberschreitungen und deren Ursache (Krauter & Lauterbach 2005).

Datum und Uhrzeit	Ursache	Bemerkungen
21.10.2003, 22:21 Uhr	Grenzwertüberschreitung an Extensometer 1.1	Unverzügliche Geländebegutachtung: Abgleiten einer Felsplatte
18.08.2004, 21:16 Uhr	Grenzwertüberschreitung an allen Messgebern; Induktion einer Überspannung durch Blitzschlag	Unverzügliche Geländebegutachtung: Bauteile der Messanlage defekt; Austausch
14.05.2005, 11:51 Uhr	Grenzwertüberschreitung an Extensometer 3.1	Unverzügliche Geländebegutachtung: neue Abrisse
30.05.2005, 10:21 Uhr	Grenzwertüberschreitung an Extensometer 3.1, 3.2 und 3.3	Telefonat mit Baufirma: Alarm durch laufende Hangsicherungsmaßnahmen ausgelöst

Die Beschleunigung der Verformungen hängt nach den bisherigen Messergebnissen mit Niederschlägen und Temperaturen zusammen (Abb. 3). Bei den Fissurometern besteht ein direkter Zusammenhang mit der Längenänderung und dem Tagesgang der Temperatur.

Die bis 105,0 m langen, aus Glasfaser-gestängen bestehenden Oberflächenextensometer, die sich der Geländemorphologie anpassen, wurden in Deutschland 2003 erstmalig eingesetzt. Inzwischen kommt ein ähnliches Frühwarnsystem auch in einem Steinbruchgelände im Wesergebirge (Niedersachsen) zur Anwendung. Die Vorteile dieser Beobachtungsmethode liegen in der Reichweite, in der relativ einfachen Installation und im permanenten Messbetrieb.

Die durch die Extensometer registrierte Zunahme der Felsverschiebungen (Abb. 3), die sich vor Ort durch Spaltenaufweitung zeigte, ließ ein Abgleiten und Abstürzen von ca. 3.000,0 m<sup>3</sup> Felsmassen befürchten. Diese sich zunehmend bewegende Felspartie wurde mit einem oben und unten an Ankern befestigten Ringnetzgeflecht sackförmig verhängt, um eine Verringerung der Gleit- bzw. Sturzenergie bei einem Abgehen

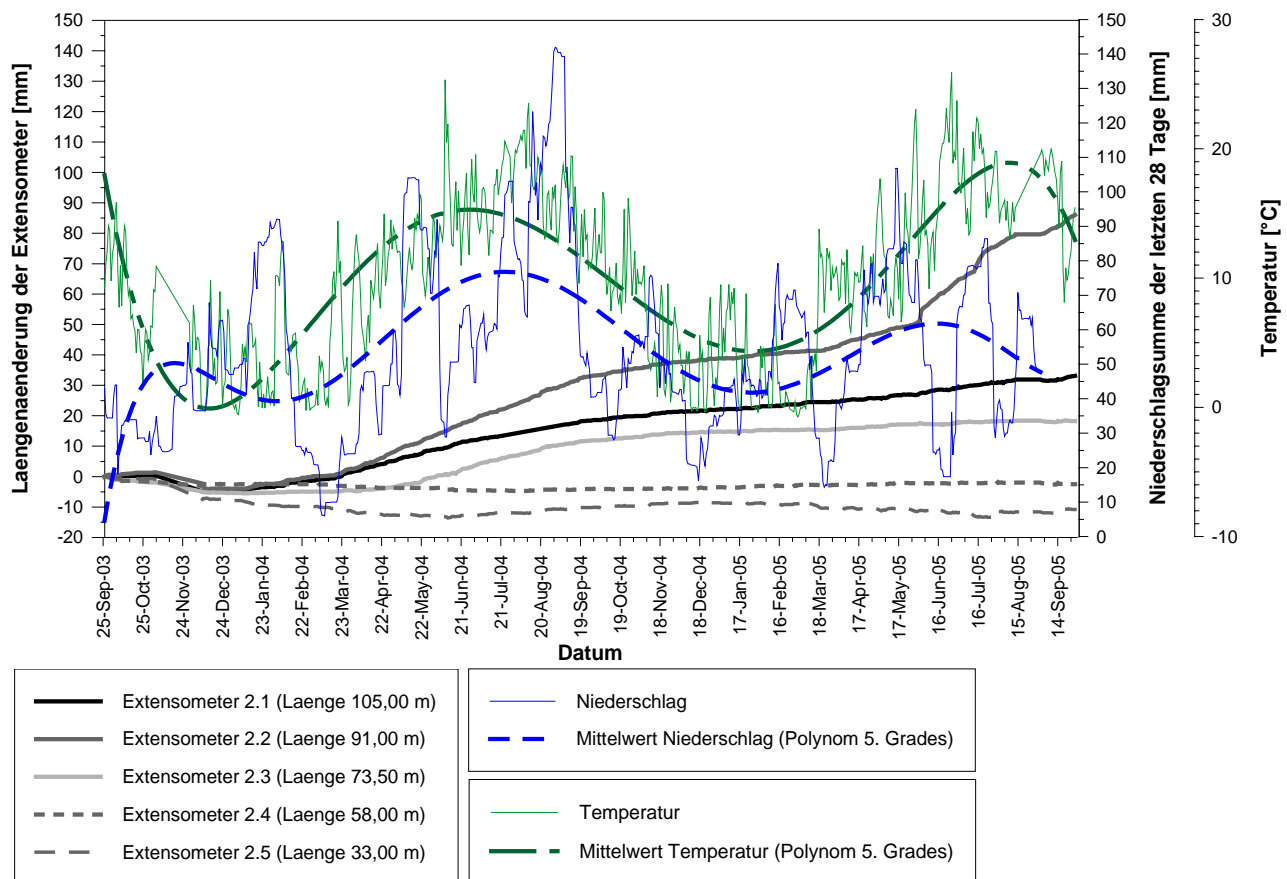


Abb. 3. Korrelation der Längenänderung eines Extensometers mit Temperatur und Niederschlag.

infolge der Bremswirkung durch die Netzverformung zu erreichen, so dass die sich bewegenden Massen im unteren flacherem

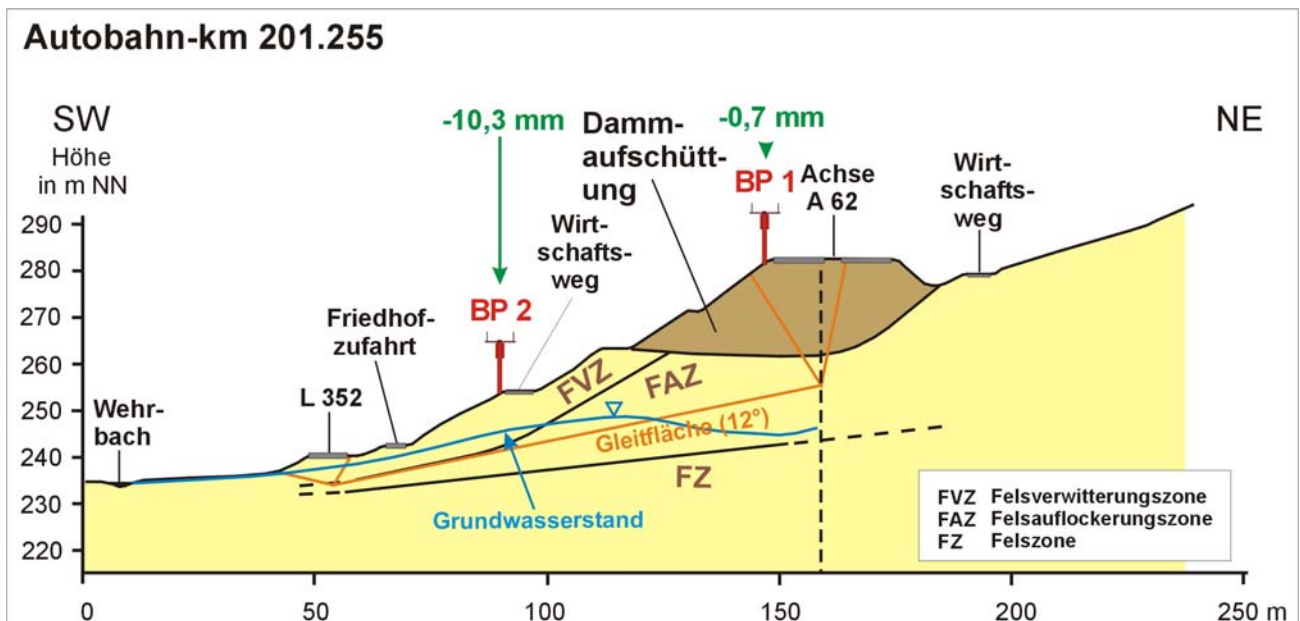
Gelände mit verträglicher Energie vom Fangzaun aufgenommen werden können.

## 2.2 GOCA-SYSTEM

Im Bereich des Autobahndammes der A 62 Landstuhl – Trier (SW-Deutschland) kommt es seit Ende der 1960er Jahre zu Verformungen der Fahrbahnen und des umliegenden Geländes. Bisher ging man davon aus, dass es sich um Verformungen des Aufschüttungsmaterial des Dammes handelt. Ingenieurgeologische Untersuchungen ab 1998 ergaben, dass die Gleitfläche bzw. Gleitzone in hangparallel einfallenden Schluff- und Sandsteinschichten etwa 35,00 m unter der Fahrbahnsohle der Autobahn liegt (Abb. 4). Die Rutschmasse hat ein Volumen von ca. 700.000 m<sup>3</sup>. Die Bewegungsrate beträgt in den letzten Jahren 1 bis 2 cm/a.

Da ein Versagen des Hanges bzw. der Böschung nicht mehr auszuschließen war, wurde zum Schutz des Verkehrsweges ein Frühwarnsystem mit Permanentmessungen eingerichtet. Es dient als Kontroll- und Überwachungssystem, und es ermöglicht

Das installierte GOCA-System (GPS-based Online-Control-and-Alarm-System) besteht aus fünf zentral steuerbaren GPS-Empfängern, wobei vier Empfänger als Beobachtungspunkte und ein Empfänger als Referenzpunkt dient (Abb. 8), mit zugehöriger Telemetrie-einrichtung, die über einen Standard-PC in der GOCA-Zentrale gesteuert wird. In definierten Zeitabständen werden die Lage- und Höhenkoordinaten der GPS-Empfänger satellitengestützt vermessen, berechnet und ausgewertet, und es kann sofort automatisch Alarm ausgelöst werden, wenn festgelegte Grenzwerte der Deformationen überschritten werden. Die Genauigkeit der berechneten Messdaten kann bei optimaler Messkonfiguration bis 1 mm in der Lage und bis 2-3 mm in der Höhe betragen. Über Fernwartungs- und Hardwarekontrollsoftware können von jedem berechtigten Fremdrechner die Messdaten ausgelesen und Änderungen in der Messsystemkonfiguration vorgenommen werden. Kürzere Netzausfälle werden mit einer USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung) überbrückt.



ergänzende Kenntnisse über die Kinematik der Rutschung und der sie steuernden externen Faktoren zu liefern. Eine konstruktive Stabilisierung der Böschung wird wegen der Tiefenlage der Gleitfläche nicht in Betracht gezogen. Die Korrelation der Verformungsrate mit Niederschlägen und Grundwasserständen soll Auskunft geben, ob mittels Entwässerungsmaßnahmen eine Stabilisierung oder zumindest eine Verringerung der Verformung erreicht werden kann.

Abb.4. Querschnitt des Autobahndammes mit zwei GPS-Beobachtungspunkten.

### 3 RISIKOANALYSE

Aus vorhandenem Kartenmaterial über Gefahren durch gravitative Hangdeformationen lässt sich nur bedingt das Risiko ablesen, da deren Aussagen im allgemeinen nicht auf das gefährdete Objekt bezogen sind.

Die Risikoanalyse erfolgt generell durch Analogieschlüsse von bereits eingetretenen Vorgängen, Stabilitätsberechnungen, Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen und Simulationen (Spang & Krauter 2001) oder bei Steinschlägen auch durch in-situ-Fallversuche. Die anhand dieser Methoden erhaltene Risikoanalyse lässt sich mittels messtechnischer Beobachtungen präzisieren. Eine Korrelation der Messergebnisse mit externen Einflussfaktoren wie Temperatur, Niederschlag und Wasserständen (Grundwasser, Vorfluter), erlaubt eine Quantifizierung dieser Faktoren und damit eine Optimierung von Schutzmaßnahmen. Eine realistische Wichtung der Ursachenfaktoren kann erfahrungsgemäß nur durch permanente Messungen, die auch Voraussetzung für ein Frühwarnsystem sind, erreicht werden.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses durch Gleit- und Fallbewegungen an Hängen und Böschungen ist nur näherungsweise abzuschätzen, da die Phase des Verformungsprozesses (Abb. 5) und der das Ereignis auslösende Faktor nicht hinreichend bekannt ist (Lateltin 1997). Die Einstufung des Risikos für ein Objekt erfolgt daher anhand des Gefahrenpotentials und der Auftreffwahrscheinlichkeit (Abb. 6).

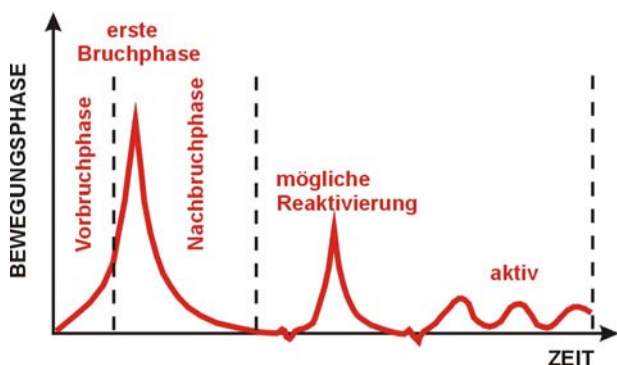
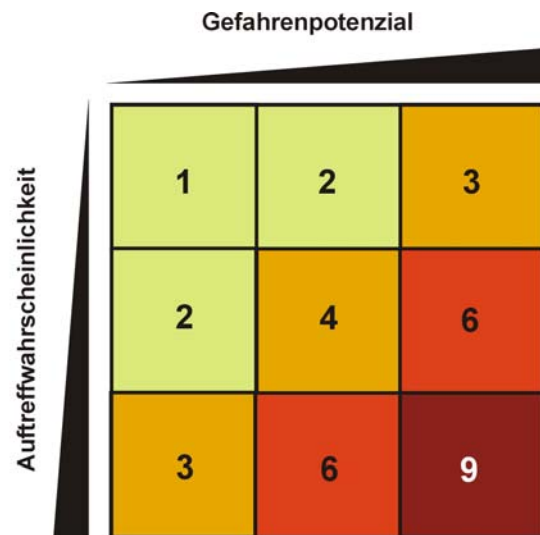


Abb. 5. Unterschiedliche Bruch- und Bewegungsphasen von Böschungen (nach Leroueil & Locat 1998).

Die Schutzmaßnahmen an Bahnstrecken und klassifizierten Straßen für die Risikostufen "gering" bis "sehr hoch" sind festgelegt. Die Einstufung des Risikos "sehr hoch" hat

Sofortmaßnahmen zur Folge, die in Wohngebieten eine Evakuierung bedeuten kann.

Für den Fall einer Grenzwertüberschreitung ist entsprechend der zu sichernden Objekte ein Alarmplan ausgearbeitet. Im allgemeinen wird bereits bei der Annäherung an die Grenzwerte überprüft, ob der Wert höher gesetzt werden kann, um eine unnötige Alarmauslösung zu vermeiden. Unabhängig davon, werden die Messdaten täglich ausgelesen und bewertet.



$$\text{Risiko} = \text{Gefahrenpotenzial} \times \text{Auftrittswahrscheinlichkeit}$$

Risiko	
	gering: keine Schutzkonzepte erforderlich, jährl. Inspektion
	mittel: Entwicklung und Ausführung von Schutzkonzepten innerhalb von 5 Jahren, halbjährl. Inspektion
	hoch: Entwicklung und Ausführung von Schutzkonzepten innerhalb von 3 Jahren, vierteljährl. Inspektion
	sehr hoch: Sofortmaßnahmen

Abb. 6. Einstufung des Risikos für Bahnstrecken.

Die Erfahrung und die bisherigen Messergebnisse zeigen, dass bei einer nahezu stetigen Zunahme der Verformung nicht mit einem unmittelbar bevorstehenden Versagensereignis zu rechnen ist. Für die Gefahrenbeurteilung ist die Beschleunigung von ausschlaggebender Bedeutung. Der Kollaps tritt generell nicht mit der nach stetigem Anstieg ersten Beschleunigungsphase ein. Folgt nach einer stetigen Bewegung oder einer Verlangsamung eine weitere Beschleunigung, so besteht dann Gefahr in Verzug, wenn sie größer oder langanhaltiger als die vorangegangene ist (Krauter 2001). Die Grenzwerte für die Alarmauslösung sind dementsprechend anzupassen.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

Zur Minimierung der natürlichen Gefahren durch Massenschwerebewegungen an Hängen und Böschungen ist das Erkennen und Einschätzen des Risikos Voraussetzung. Mittels Permanentmessungen nach der Beobachtungsmethode mit Online-Überwachung der Messdaten kann die Einschätzung des Risikos und das kinematische Modell präzisiert, sowie die die Verformungen steuernden Faktoren quantifiziert werden. Die Beobachtungsmethoden sind auch als Frühwarnsysteme mit Alarmauslösung bei Grenzwertüberschreitung eingesetzt. Die Festlegung der Grenzwerte erfolgt zuerst anhand von Erfahrungswerten und wird dann dem Verformungsverlauf angepasst. Die Messgenauigkeit der verwendeten Messeinrichtungen liegt im Millimeterbereich. Häufigste Störungsanfälligkeit sind Induktion von Überspannungen durch Blitzschlag oder Stromnetzausfälle. Die Messdaten des satellitengestützten System werden u.a. durch Abschattungen (z.B. Bewuchs, Kfz-Verkehr) und durch die Satellitenkonstellation beeinflusst.

Da Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit nur sehr bedingt möglich sind, wird das Risiko als Produkt aus Auftretenswahrscheinlichkeit und Gefahrenpotential definiert.

Die permanenten Beobachtungsmethoden kamen bisher an gefährdeten Bahnstrecken und klassifizierten Straßen zum Einsatz.

## LITERATUR

CatchRisk (2005): Mitigation of hydro-geological risk in Alpine catchments.- *Program INTERREG III B – Alpine Space – Final Report* (Ed.: C. Cazzaniga et al.), 189 S.

Jäger, R. & Kälber, S. (2001): GPS-based Online Control and Alarm System (GOCA) – A Geodetic Contribution for Hazard Prevention.- *International Conference on Landslides – Causes, Impacts and Countermeasures*, (Ed.: Kühne, M. et al.), 17.-21. Juni, Davos: 261-276

Lateltin, O. (1997): Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten (Empfehlungen).- 42 S.; Bern (BUWAL, BWB und BRP)

Krauter, E. (2001): Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen.- In: Smolczyk, U. (Ed.): *Grundbautaschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen*, 6. Auflage, S. 613-665; Berlin (Ernst & Sohn)

Krauter, E. & Lauterbach, M. (2005): Überwachung der Hang- und Böschungsdeformationen bergseitig der B 53 zwischen Traben-Trarbach und Wolfer Brücke.-

Ingenieurgeologisch-geotechnischer Messbericht, 36 S., geo-international (unveröffentl.)

Krauter, E., Katzenbach, R. & Lauterbach, M. (2001): Möglichkeiten und Grenzen der Beobachtungsmethode bei labilen Gebirgsverhältnissen.- 1. Siegener Symposium (Ed.: Herrmann, R.A.): *Messtechnik im Erd- und Grundbau*, 24.-25. September, Universität Siegen: 125-132

Kuntsche, K. (1996): Empfehlungen zum Einsatz von Mess- und Überwachungssystemen für Hänge, Böschungen und Schutzbauwerke.- *Geotechnik*, 19: 82-98; Essen (VGE)

Lauterbach, M., Krauter, E. & Feuerbach, J. (2002): Satellitengestütztes Monitoring einer Großrutschung im Bereich eines Autobahndammes bei Landstuhl/Pfalz.- *Geotechnik*, 25: 97-100; Essen (VGE)

Leroueil, S. & Locat, J. (1998): Slope movement – Geotechnical characterization, risk, assessment and mitigation. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International IAEG Congress*, Rotterdam (Balkema)

Spang, M. & Krauter, E. (2001): Rock Fall Simulation – A State of the Art Tool for Risk Assessment and Dimensional of Rockfall Barriers.- *International Conference on Landslides – Causes, Impacts and Countermeasures* (Ed.: Kühne, M. et al.), 17.-21. Juni, Davos: 607-615



Abb. 7. Über einen Rutschhang verlegte Oberflächenextensometer.

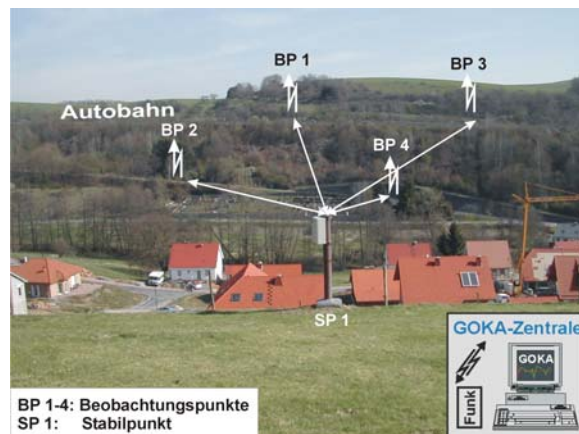


Abb. 8. GOCA-System mit GPS-Beobachtungs- und Stabilpunkten zur Überwachung eines Autobahndammes.