

# 1 Hangstabilitäten und menschliche Einwirkungen

Prof. Dr. Edmund Krauter, geo-international, Mainz, und FSR

Unter Hang- oder Böschungsstabilität wird eine Gleichgewichtssituation zwischen antreibenden (A) und rückhaltenden (R) Kräfte ohne zahlenmäßige Angaben verstanden. Die Abschätzung der Hangstabilität basiert auf Erfahrung und Berechnungen (DIN 4084).

Ein stabiler Hang hat stets einem Standsicherheitsbeiwert  $\eta > 1$ , d.h. die rückhaltenden Kräfte sind größer als die antreibenden Kräfte.

Menschliche (anthropogene) Einwirkungen können die Stabilität eines Hanges erhöhen oder verringern (Tab. 1.1).

Tab 1.1: Negative menschliche Einwirkungen auf die Hangstabilität

Einwirkungen	Auswirkungen	Folgen	Fallbeispiele
Anschnitte Einschnitte Abbaue	Verringerung der rückhaltenden Kräfte	Rutschungen Steinschläge Felsstürze	Temfels
Aufschüttungen Dämme Kippen Halden	Erhöhung der abtreibenden Kräfte	Rutschungen Schlamm- und Schuttströme	Quirnbach
Auflassen von Weinbergflächen	Fehlende Wartung von Weinbergsmauern Durch Einsturz von Mauern Verlust der Stützwirkung	Einsturz von Mauern Rutschungen Schuttströme	Cochem
Furchen-(Ackerbau) und Zeilenverlauf (Weinbau)	Gezielte Wasserzuführung	Steinschläge Felsausbrüche Schuttströme	Hatzenport Saarburg
Veränderung der Wasserführung	Erhöhung des Strömungs- bzw. Kluftwasserdrucks Verringerung der Scherfestigkeiten	Rutschungen	Pünderich Lauterecken
Entwaldung	Reduzierung der Evapotranspirationsrate Dadurch Erhöhung des Wassergehaltes des Bodens	Rutschungen Schlamm- und Schuttströme	Kirn

In der Tab. 1.2 ist prozentual der Anteil des menschlichen Einflusses auf Hangdeformationen im Vergleich zu natürlichen Ursachen abgeschätzt (Basis > 1000 Schadensereignisse). Bei Rutschungsereignissen des Typs Gleiten mit einem Volumen > 100.000 m<sup>3</sup>, die durch menschliche Einwirkungen ausgelöst werden, handelt es sich in den meisten Fälle um reaktivierte prähistorische Rutschkörper, die vorher inaktiv (latent) war (Multilingual Landslide Glossary 1993).

Tab. 1.2: Menschliche und natürliche Ursachen von Rutschungen

Rutschungstyp	Menschliche Ursachen (%)	Natürliche Ursachen (%)
Kippen Fallen	30	70
Gleiten	80	20
Driften	10	90
Fließen		
schnell	90	10
langsam	30	70

Eine Auflistung natürlicher Rutschungsursachen findet sich in Tab 1.3.

Tab 1.3: Auflistung von natürlichen Rutschungsursachen  
(nach HUTCHINSON 1992, KRAUTER 1990, POPESCU 1994)

Geologische Ursachen	Klimatische und hydrogeologische Ursachen	Geomorphologische Ursachen
Petrographie und Stratigraphie	intensive Regenfälle	Hangmorphologie und -neigung
Strukturgeologie (Falten, Biegscherung, Störungen und Klüfte, Schieferung, Schichtung)	rasche Schneeschmelze	Exposition
Gefüge und Lagerung	Niederschläge	alte Rutschungen
in-situ-Spannungen	Wasserdruck in Klüften, Bodenröhren und Grabgängen	Reliefenergie und Entwicklungsstadium der Landschaft
tektonische und vulkanische Hebung	Grundwasserdruck	Erosion am Fuß und Top des Hanges
Erdbeben	artesisches und schwebendes Grundwasser	Ablagerungen am Top des Hanges
Grad der Verwitterung	Frost- und Tauvorgänge	Oberflächen- und Rinnenerosion
Boden- und felsmechanische Eigenschaften	Evapotranspiration	Erosion durch Versickerung
	Wärmeausdehnung	Vegetationsschäden durch Erosion, Waldbrände und Trockenheit
	Auftauen von Permafrostzonen	
	Abschmelzen der Gletscher	
	rasches Absinken des Grundwasserspiegels nach Überflutungen	

Kurzbeschreibung der Fallbeispiele in der Tab. 1.1:

- *Temfels - Obermosel*: Abbau von dolomitischem Kalkstein (Oberer Muschelkalk) zur Eisenverhüttung. Der Abbau wurde Anfang der 1950er Jahre gestoppt. Eine Rekultivierung, wie sie heutzutage gesetzlich vorgeschrieben

ist, gab es damals nicht. Aktive Drift- und Sturzbewegungen von Felswandbereichen gefährden die am Hangfuß entlang führende Bahnstrecke. Eine Sicherung (Überwachung der Felsdeformationen) soll durch episodische Konvergenzmessungen erfolgen.



Abb. 1.1: Drift- und Fallbewegungen im Bereich einer aufgelassenen Steinbruchwand bei Temmels.

- *Quirnbach – Pfalz*: Durch Dammaufschüttungen im Zuge des Autobahnbaus (A 62) wurde ein vermutetes altes Rutschareal reaktiviert. Gleitbewegungen, die etwa 2 cm im Jahr erreichen, führen zu Verformungen der Fahrbahnen der A 62. Im Friedhof im unteren Hangbereich kommt es zu Schiefstellungen von Grabsteinen und Verdrückungen an den Friedhofsmauern sowie zu Schäden an der am Hangfuß verlaufenden Landesstraße L 352. Aufgrund der Tiefenlage der Gleitfläche wurde von einer Böschungsstabilisierung abgesehen. Zur Sicherheit wurde ein Überwachungssystem durch ein satellitengestütztes Monitoring installiert.

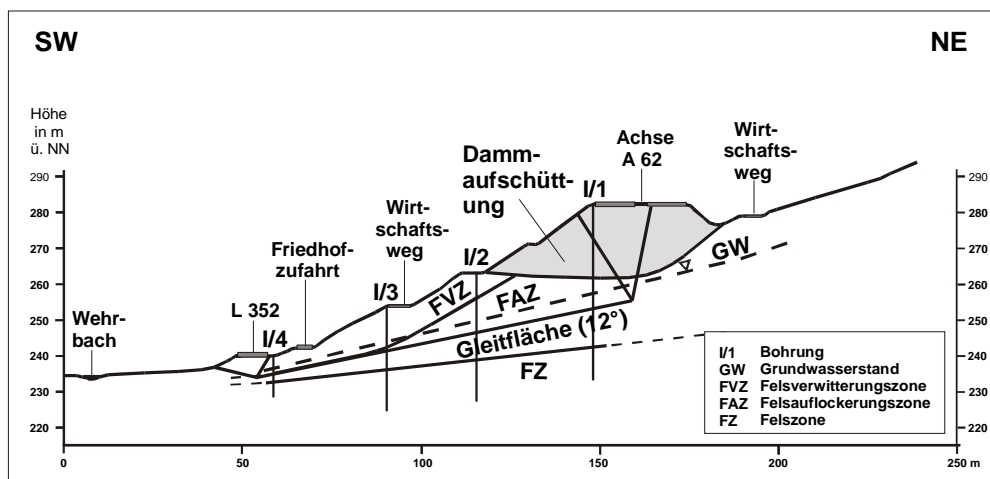


Abb. 1.2: Kinematisches Modell der Großrutschung in Quirnbach (LAUTERBACH 1999)

- *Cochem – Mittelmosel*: Das Auflassen von Weinbergflächen, an der Mittelmosel bis zu 40% der gesamten Anbaufläche, werden die Weinbergsmauern in steilem Gelände nicht mehr unterhalten. Die Folge sind Mauereinstürze und das Nachrutschen oder murenartiges Abgehen von Bodenmassen. Am Hangfuß entlang führende Verkehrswege sind dadurch unmittelbar gefährdet. Sicherungen sollen durch Fangvorrichtungen erfolgen.



Abb. 1.3: Durch den Einsturz von Weinbergsmauern und nachrutschenden Bodenmassen gefährdete Bahnstrecke im Bahnhofsbereich Cochem. Die Schuttströme (Rutschungen) breiten sich nach unten und oben aus (Rechteck links: Ausschnitt Bild rechts)

- *Hatzenport – Unteres Moseltal und Saarburg*: Der Furchenverlauf im Ackergelände (Hatzenport) und die Weinbergszeilen (Saarburg) sind zum Talhang gerichtet. Es kommt zu verstärktem (gezieltem) Eindringen von Oberflächenwasser in den Hangbereich, was zu Felsausbrüchen und murenartigem Abgehen von Gehängeschuttmassen führt.



Abb. 1.4: Zum steilen Talhang gerichtete Ackerfurchen. Oberflächenwasser, vor allem nach Starkregen, kann gezielt in den Steilhang eindringen



Abb. 1.5: Felsausbruch und Schuttstrom ausgelöst von aus dem oberen Hangbereich eindringendes Oberflächenwasser infolge der talwärts verlaufenden Weinbergszeilen im Bereich einer Neuanpflanzung bei Saarburg.

- *Pünderich – Mosel*: Die Bahnstrecke ist durch ein Rutschareal gefährdet. Beim Bahnbau in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts war schon das Rutschareal bekannt. Durch umfangreiche Entwässerungsmaßnahmen hat man die Verformungen stark reduziert, so dass jahrzehntelang ein reibungsloser Bahnverkehr möglich war. Etwa in den 1970er Jahren stellte man erhebliche Gleisverformungen fest. Seit dieser Zeit hat sich der Bahnkörper ca. 50,0 cm talwärts bewegt. Durch Gleisregulierungen wurden die Verformungen ausgeglichen. Die Verformungsrate liegt zur Zeit bei ca. 2,0 cm. Die Verformungen werden mittels Extensometer permanent überwacht. Die Ursache der Zunahme der Verformungen liegt im Versagen der alten Entwässerungsmaßnahmen, die durch Abquetschungen jetzt gezielt Wasser in die einzelnen Gleitschollen einleitet und dadurch die Verformungen beschleunigt.

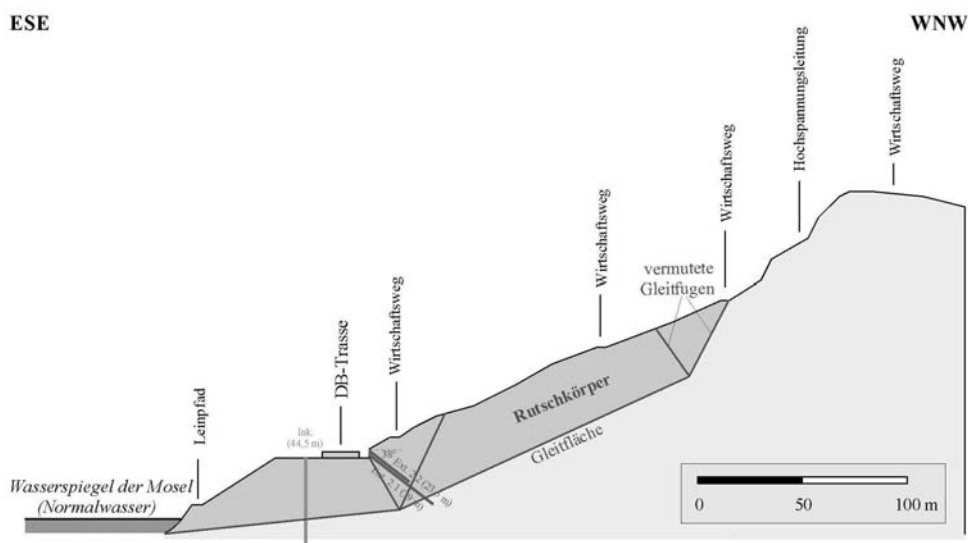


Abb. 1.6: Kinematisches Modell der Rutschung Pünderich

- **Lauterecken – Pfalz:** Durch Änderungen der Wasserführung im hangseitigen Straßengraben oberhalb des Ortsteils Wälderbusch in Lauterecken kam es zu Hangrutschungen, die zu erheblichen Schäden an den in den 1970er gebauten Wohnhäusern führten. Nach dem Rückbau der Maßnahme, wodurch wieder der frühere Zustand hergestellt wurde, kam es zu einem Stillstand der Hangdeformationen. Nach einem 5-jährigen Gerichtsprozess wurden die Hausbesitzer entschädigt.

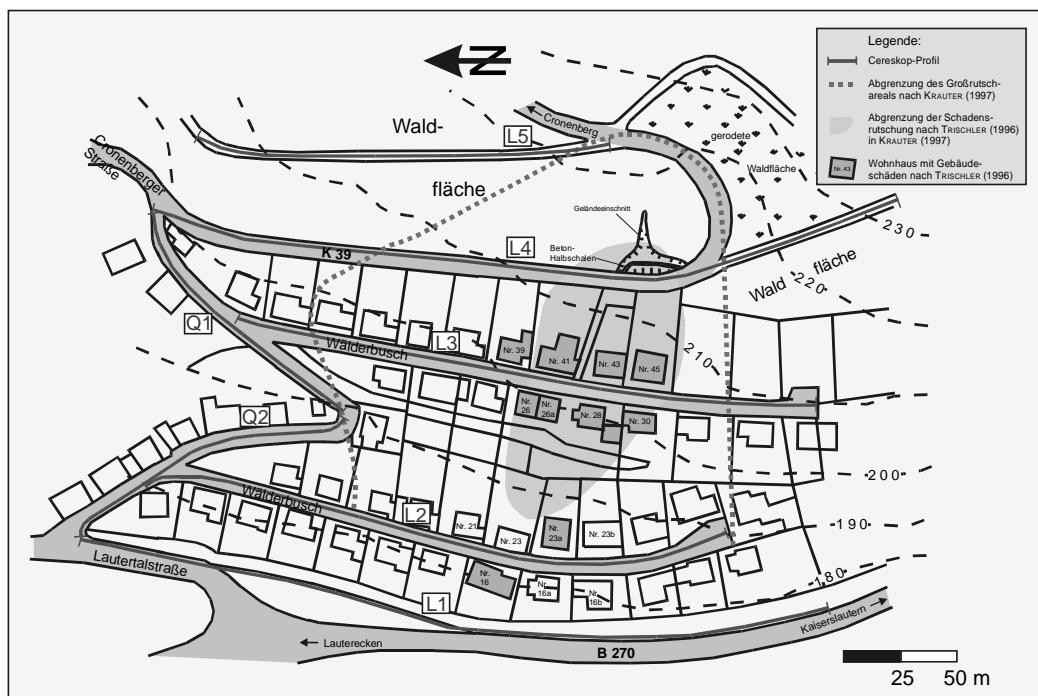


Abb. 1.7: Ortsteil Wälderbusch in Lauterecken dessen Wohnhäuser durch Hangdeformationen beschädigt wurden mit dem Rutschareal

- **Kirn – Saar-Nahe-Land:** Die aktive Rutschung Kirn hat ein Volumen von ca. 170.000 m<sup>3</sup>. Ein wesentlicher Faktor war die Entwaldung von Teilflächen. Als Gleithorizont wirken Schiefertone des Rotliegenden.



Abb. 1.8: Rutschareal Kirn mit der gefährdeten Bahnstrecke

Die anthropogenen stabilitätsmindernden Einwirkungen auf Hänge und Böschungen mit den Folgen zeigen die Notwendigkeit den Planern und Entscheidungsträgern die dadurch entstehenden Gefahren bewusst zu machen. Bei jedem Eingriff in das Hanggleichgewicht oder bei der Herstellung von Böschungen sollten die möglichen Auswirkungen in Betracht gezogen werden, was ingenieurgeologisch-geotechnische Untersuchungen in der Vorplanungsphase voraussetzt.

Betroffen davon sind Maßnahmen in Hanglagen, wie:

- Flurbereinigungen
- Ausweisen von Bebauungsgebieten
- Ausbau und Neubau von Verkehrswegen
- Bau von Ver- und Entsorgungsleitungen
- Aufschüttungen

Sicherungsmaßnahmen, die Sanierungs- und Stabilisierungsmaßnahmen einschließen, in Schadensfällen sollen auf einer exakten Ursachenerforschung und einer Wichtung der Ursachenfaktoren basieren.

### 3 Gefahrenabschätzung von Hangstabilitäten

Prof. Dr. Edmund Krauter, geo-international, Mainz, und FSR

Die Gefahrenabschätzung von Hängen oder Böschungen basiert auf einer Stabilitätsbewertung. Es soll damit ein unerwünschtes Ereignis hinsichtlich des Gefahrenpotentials, welches das Ausmaß und die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens beinhaltet, und die Auftreffwahrscheinlichkeit auf ein bestimmtes Objekt charakterisiert werden.

Verwendete Begriffe sind:

- Gefahr Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem ein Schaden für Mensch, Umwelt und / oder Sachgüter entstehen kann
- Gefährdung Gefahr, die sich ganz konkret auf eine bestimmte Situation oder ein bestimmtes Objekt bezieht
- Risiko Größe und Wahrscheinlichkeit eines möglichen Schadens
- Restrisiko Nach Realisierung aller vorhergesehenen Sicherungsmaßnahmen noch verbleibende Gefährdung

Eine Einstufung des Risikos bzw. Gefährdungspotentials zeigt die Abb. 3.1.

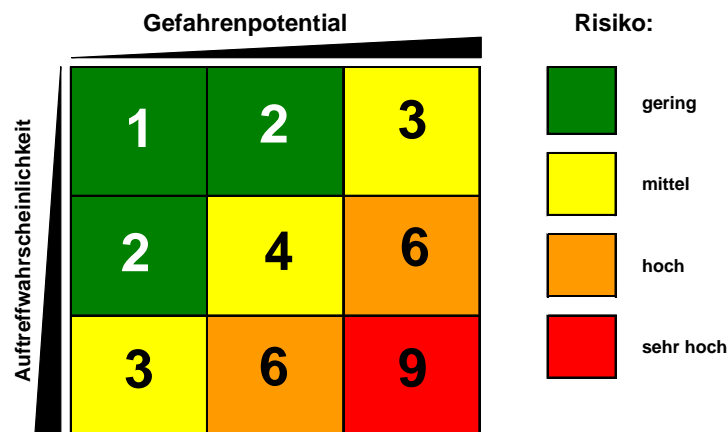


Abb. 3.1: Risikoeinstufung aus Produkt Gefahrenpotential und Auftreffwahrscheinlichkeit

Die Einstufungen des Risikos von „niedrig“ bis „sehr hoch“ an Bahnstrecken bedeuten:

- niedrig: Keine Schutzkonzepte erforderlich, jährliche Inspektionen.
- mittel: Entwicklung und Ausführung von Schutzkonzepten innerhalb von 5 Jahren,



- hoch: halbjährliche Inspektionen.  
Entwicklung und Ausführung von Schutzkonzepten innerhalb von 3 Jahren, vierteljährliche Inspektionen.
- sehr hoch: Sofortmaßnahmen.

Die Einstufung des Risikos in „sehr hoch“ bedeutet eine hohe Wahrscheinlichkeit des Auftreffens und des Auslösens des Ereignisses durch nicht vorhersehbare externe Faktoren, wie Schneeschmelze, Frostaufgang, Starkregen oder extreme Trockenzeiten (Sommer 2003). Diese Einstufung wird auch als „Gefahr in Verzug“ bezeichnet.

Sofortmaßnahmen können beinhalten:

- Sperrung von Verkehrswegen
- Geschwindigkeitsbeschränkung, Ampeleinrichtungen,
- Sicherheitsposten
- Sofortige Ausführung konstruktiver Sicherungsmaßnahmen
- Installation von Kontroll- und Überwachungsanlagen

In Wohngebieten kann diese Einstufung Evakuierung bedeuten. Die Entscheidung für solch eine Maßnahme ist besonders schwierig und erfordert eine exakte Planung mit allen zuständigen Stellen.

Anhand der Ergebnisse der im Rahmen der Sofortmaßnahmen einsetzenden geotechnischen Untersuchungen wird festgelegt, ob die Einschränkungen aufrecht zu erhalten sind, bzw. welche anderen Sicherungsmaßnahmen zur Anwendung kommen sollen.

Rechnergestützte Modellrechnungen zur Stabilitäts- bzw. Standsicherheitsbetrachtung werden zur Wichtung der Ursachenfaktoren durch Variation der Eingangsparameter mit herangezogen und unterstützen die visuelle Risikoeinschätzung. Eine alleinige Einstufung des Risikos anhand der Ergebnisse von Stabilitäts- oder Standsicherheitsberechnungen ist nicht ausreichend. Die grundlegende Voraussetzung für eine Risikoabschätzung ist immer das Expertenwissen.

Bei einem gleichen Ereignis besteht für Bahnstrecken wegen der festen Fahrspur, dem Bremsweg und der Zuglänge gegenüber dem Straßenverkehr ein höheres Risiko.

Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Steinschlägen oder Felsstürze kann anhand schon eingetretener Ereignisse nach der empirischen Formel,

$$p = 1 - (1 - 1/T)^n$$

wobei **n** die betrachtete Nutzungsperiode, **T** die Wiederkehrperiode des Ereignisses und **p** die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses, das gleich oder größer als

jenes der Wiederkehrperiode  $T$  innerhalb der Nutzungsperiode ist (Bundesämter der Schweiz 1997), oder durch Analogieschlüsse eingeschätzt werden.

Das Problem der Gefahreneinschätzung bei Rutschungen (Bewegungstypen: Gleiten, Kippen, Driften und Fallen) ist das Erfassen der momentanen Aktivitätsphase (Abb. 3.2), die geologische Zeiträume umfassen kann.

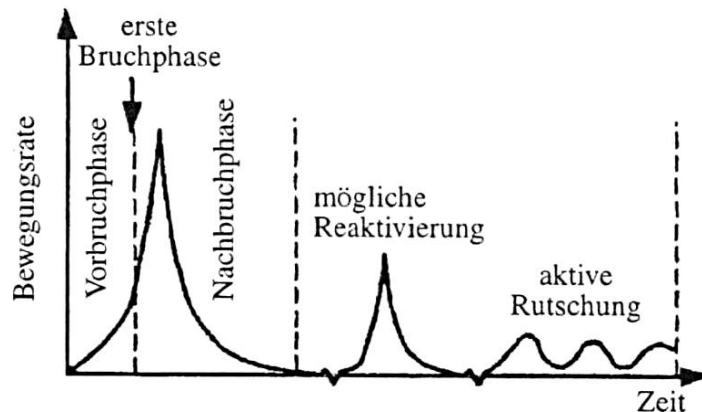


Abb. 3.2: Bruch- und Bewegungsphasen von Rutschungen (nach LEROUEIL et al. 1998)

Für die Gefahrenabschätzung von Hang- und Böschungstabilitäten ist die Beschleunigung von ausschlagender Bedeutung. Erfahrungsgemäß tritt das Ereignis einer schadensverursachenden schnellen Bewegung nicht mit der ersten Beschleunigungsphase ein. Folgt nach einer stetigen Bewegung oder einer Verlangsamung eine weitere Beschleunigung, so besteht dann unmittelbare Gefahr, wenn sie größer oder langanhaltender als die vorangegangene ist, wie der Messpunkt E auf Abb. 3.3 zeigt, wo es am 04.06.1930 zum Absturz von Felsmassen kam.

Die Messungen der Horizontalbewegungen (Abb. 3.3) erfolgten episodisch in verhältnismäßig großen Zeitabständen, die eine Wichtung der Ursachenfaktoren nur sehr bedingt zulassen.

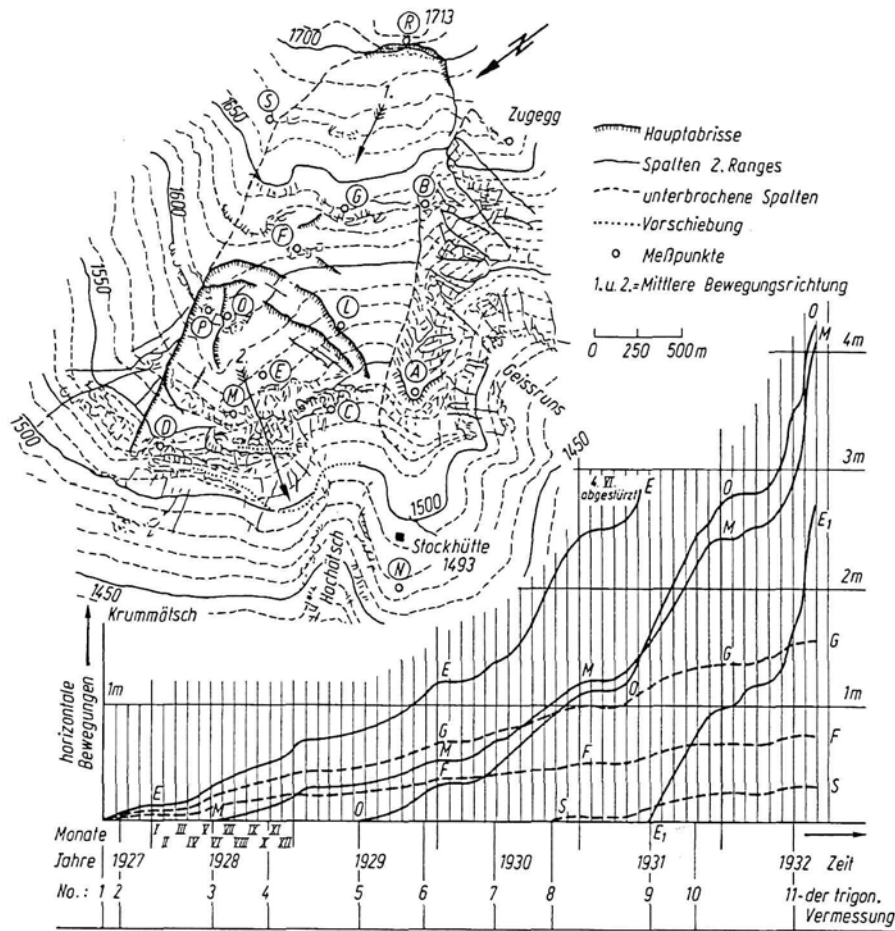


Abb. 3.3: Horizontalbewegungen am Kilchenstock bei Linthal, Schweiz (nach HEIM 1932)

Eine realistische Gefahrenabschätzung und die Quantifizierung der Einflussfaktoren kann erst durch permanente Messungen der Verformungen geschehen (Abb. 3.4).

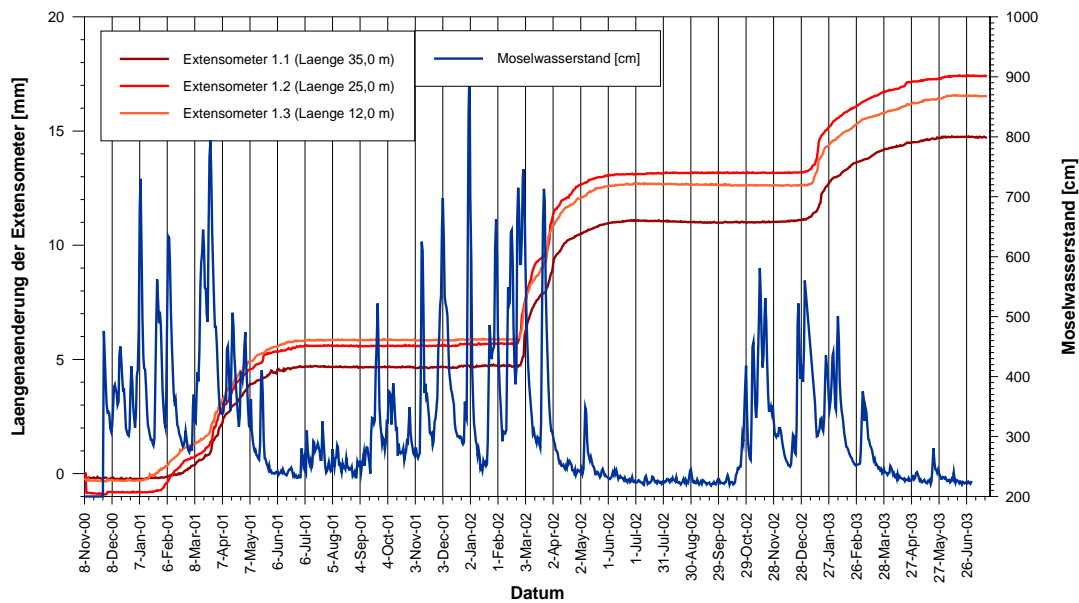


Abb. 3.4: Rutschung Pünderich: Korrelation Längenänderung Extensometer mit Moselwasserstand

Bei Frühwarnsystemen, wie zum Beispiel an der Bahnstrecke in Pünderich, werden von Erfahrungswerten an vergleichbaren Hang- und Böschungsdeformationen ausgehend, Grenzwerte für Verformungen festgelegt, bei deren Überschreiten Alarm ausgelöst wird, der Sofortmaßnahmen zur Folge hat. Um eine unnötige Alarmauslösung zu vermeiden, wird bei Annäherung des Bewegungsausmaßes an den Grenzwert mittels den Ergebnissen der bisherigen permanenten Messungen in Kombination mit einer Inaugenscheinnahme vor Ort der Grenzwert angeglichen.

Die Erfassung von Gefahren durch Massenschwerebewegungen an Hängen und Böschungen beinhaltet im wesentlichen drei Schritte:

- Gefahrenerkennung      Was kann wo und wann passieren?
- Gefahrenabschätzung      Welches Risiko besteht?
- Schutzkonzept      Welche Sicherungsmaßnahmen sind erforderlich?

Für die Gefahrenabschätzung bzw. Risikoanalyse ist von Wichtigkeit:

- Größe der sich bewegenden Masse
- Bewegungsgeschwindigkeit
- Welche Faktoren steuern die Geschwindigkeit?
- Wie weit kann sich die Masse bewegen?
- Können Vorfluter aufgestaut werden?
- Können Schwall- oder Flutwellen ausgelöst werden?
- Welche Sachgüter befinden sich auf der sich bewegenden Masse oder unterhalb?
- Sind Menschenleben gefährdet?

Der entscheidende Faktor bei der Abschätzung der Gefahren durch Massenschwerebewegungen an Hängen und Böschungen, also die Einschätzung ihrer Stabilität, ist der Wissensstand und die Erfahrung des Beurteilers. Wenn sich Gefahren anzeigen, müssen Sofortentscheidungen getroffen werden, z.B. sind Verkehrswege zu sperren oder Menschen zu evakuieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Eingangsdaten für eine Gefahrenabschätzung oder Risikoanalyse zu diesem Zeitpunkt noch sehr lückenhaft sind

Bei der Gefahrenabschätzung sollte die Fragestellung nicht lauten „wie stabil ist der Hang oder welche Standsicherheit weist er auf“ sondern „wie schnell bewegt er sich“, da sich jeder Hang verformt (Aussage von LEOPOLD MÜLLER-Salzburg), seien es auch nur Bruchteile von Millimetern.

Grundsätzlich ist auch zu sagen, dass flache Hänge nicht unbedingt stabiler sind als steile Hänge (Abb. 3.5).



Abb. 3.5: Hangrutschung in sehr flachem Gelände in Ton-Schluffschichten (Tertiär) in Rheinhessen.

Die Frage sollte daher bei einem flachen Hang lauten „Warum ist der Hang (natürliche Böschung) nicht steil?“.

Die Gefahren- und Risikoabschätzung bezüglich der Stabilität von Hängen ist eine der schwierigsten Aufgaben in der Geotechnik.