Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie

Band: 3 (1998)

Heft: 1

Artikel: Geologische Naturgefahren in der Schweiz = Dangers géologiques en Suisse = Pericoli geologici naturali in Svizzera

Autor: Keusen, Hans Rudolf / Bollinger, Daniel / Lateltin, Olivier

Kapitel: Allgemeiner Teil : Massenbewegungen und ihre geologische Beurteilung

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-220733

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bull. angew. Geol.	Vol. 3	Nr. 1	11 - 28	Juli 1998

Allgemeiner Teil:

Massenbewegungen und ihre geologische Beurteilung

HANS RUDOLF KEUSEN[1], DANIEL BOLLINGER[2], OLIVIER LATELTIN[3] und CHRISTOPH BEER[3]

1. Bedeutung der geologischen Naturgefahren in der Schweiz

Unter geologischen Naturgefahren werden Ereignisse verstanden, welche durch geologische Ursachen und Vorgänge charakterisiert sind. Es sind dies:

a) Erdbeben
b) Vulkanausbrüche
c) Bodenbewegungen (Rutschungen, Absenkungen)
d) Bergstürze, Felsstürze, Block- und Steinschlag
e) (Murgänge)

Die gravitativen Vorgänge c - e werden auch als Massenbewegungen bezeichnet, wobei Murgänge kausal eine ausgeprägt meteorologisch-hydrologische Komponente haben.

Gemäss dem Bericht «Katastrophen- und Notlagen in der Schweiz» (Bundesamt für Zivilschutz 1995, «KATANOS») haben Massenbewegungen (ohne Murgänge) nur einen Anteil von etwa 1 % des gesamten gewichteten Risikos aller Naturgefahren. Erdbeben und Hochwasser, auf welche hier nicht weiter eingegangen wird, machen dagegen 50 % resp. 15 % aus. Obschon Erdbeben seltene Ereignisse sind und im Bewusstsein der schweizerischen Bevölkerung kaum als Gefahr empfunden werden, ist das hier bestehende Risiko wegen des grossen Wirkungsraumes und damit immensen Schadenpotentials (100 Mia CHF monetarisierter Gesamtschaden bei einem Erdbeben mit der Stärke des Basler Bebens von 1356) erheblich.

Das von Massenbewegungen ausgehende Risiko ist dagegen relativ gering, weil die Schäden meist vergleichsweise klein sind. Im Empfinden des Menschen werden solche Ereignisse trotzdem stark wahrgenommen. Sie sind häufig und die Medien greifen die Vorkommnisse gerne auf. Gerade Massenbewegungen können aber durch ein wirksames Gefahrenmanagement relativ gut beherrscht werden.

[1] Geotest AG, Birkenstrasse 15, 3052 Zollikofen
[2] Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern
[3] Landeshydrologie und -geologie, 3003 Bern

Fig. 1: Bergstürze Sandalp (Kanton Glarus): Schuttkegel der Bergstürze vom 24. Januar und 3. März 1996

Ausbruchvolumen: 0.5 und 1.8 Mio m^3
Sturzhöhe 900 m, Pauschalgefälle 35°
Ablagerungsvolumen: 3 Mio m^3
Die stark strukturierte Ablagerung ist auf der Seite des Ausgleichsbeckens durch einen scharfen Stauchwulst begrenzt. Bereits wenig intensive Niederschläge führen zu markanten Erosionsrinnen.
Foto H.R. Keusen

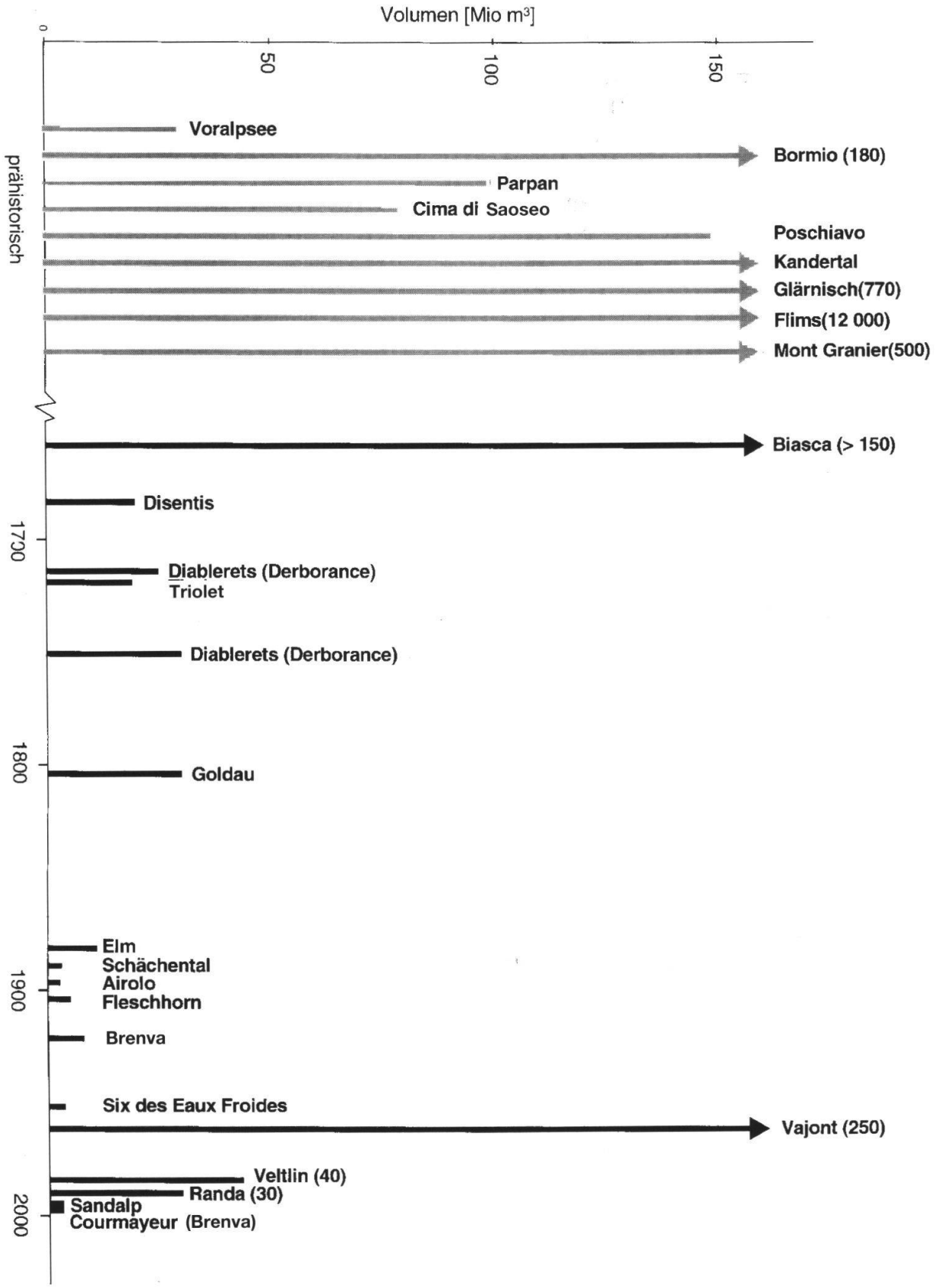

Fig. 2: Bergstürze in den Alpen

Die historische Rückschau auf die grossen Bergsturzereignisse in den Alpen zeigt Überraschendes: Immerhin sind hier in den letzten 300 Jahren 16 solche Ereignisse bekannt (siehe Fig. 1 und 2). Ihre Zahl ist wahrscheinlich grösser, weil Bergstürze in abgelegenen Tälern nicht überliefert wurden. Dazu kommen eine ganze Reihe sehr grosser prähistorischer Bergstürze, welche heute aufgrund geologischer Evidenzen nachkonstruiert werden können. Durchschnittlich ereignet sich in den Alpen ca. alle 20 Jahre ein Bergsturz.

Die Alpen sind als sehr junges und immer noch in Hebung begriffenes Gebirge übersteil und entsprechend instabil. Der die Talflanken entlastende Rückzug der Gletscher ist ein zusätzlicher, Instabilitäten begünstigender Faktor. Massenbewegungen sind im Alpenraum deshalb allgegenwärtig. Sie gefährden Menschen und Sachwerte, deren Wert durch die fortschreitende Erschliessung des Alpenraums zunimmt.

Der Gesetzgeber trägt dieser Erkenntnis Rechnung. Er fordert die Kantone mit Gesetzen auf, Massnahmen zum Schutz vor Naturereignissen zu ergreifen (Waldgesetz 1991, Wasserbaugesetz 1991, Raumplanungsgesetz 1979). In der Folge hat der Bund Empfehlungen zur Berücksichtigung von Naturgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten veröffentlicht (BWW, BUWAL, BRP 1997).

2. Begriffe, Definitionen

2.1 Massenbewegungen

Bei Massenbewegungen handelt es sich um bruchhafte oder bruchlose, unter der Wirkung der Schwerkraft hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fest- (Fels) und/oder Lockergesteinen. Sie sind in ihrer Entstehung sehr komplex und beruhen selten auf nur einer Ursache.

Der Ablauf und die Dynamik von Massenbewegungen können durch die Grundmechanismen Fallen, Gleiten und Fliessen beschrieben werden, wobei oft Übergänge oder Kombinationen davon auftreten.
Die geologischen Gegebenheiten und insbesondere die nacheiszeitliche Entwicklung des Reliefs beeinflussen die Grunddisposition für Hanginstabilitäten massgeblich. Während die eiszeitlichen Gletschervorstösse die Alpentäler trogförmig ausschliffen, blieben nach dem Zurückschmelzen des stützenden Eises oft übersteilte und instabile Talflanken zurück.

Massenbewegungen beruhen auf ungünstigen Veränderungen des Kräftegleichgewichtes (Verhältnis der rückhaltenden und treibenden Kräfte) infolge physikalischer Prozesse, welche durch verschiedene Faktoren gesteuert werden. So beeinflussen langfristig wirksame Verwitterungsvorgänge wie auch die Schwankungen des Grundwasserspiegels die Stabilität eines Hanges kontinuierlich. Ein Hang kann indessen auch kurzfristig destabilisiert werden, sei es infolge der Erosion des Hangfusses durch ein Fliessgewässer, starke Niederschläge oder durch ein Erdbeben. Nicht selten werden Hanginstabilitäten durch anthropogene Einflüsse begünstigt (Hanganschnitte, Erhöhung des Hangwasserspiegels, Entwaldung etc.).

Stabilitätsberechnungen dokumentieren, dass Wasser ein äusserst wichtiger kausaler Faktor von Massenbewegungen ist, da dieses sehr grosse Kräfte aufbauen kann. Porenwasser- oder Kluftwasserdruck sind oft auslösende Momente für Massenbewegungen.

2.2 Verschiedene Erscheinungsformen von Massenbewegungen

Sturzprozesse

Sturzprozesse sind schnelle Massenbewegungen, bei welchen das längs Trennflächen (Schicht-, Schieferungs-, Kluft- oder Bruchflächen) aus dem Gebirgsverband ausgebrochene Material den grössten Teil des Weges in der Luft zurücklegt. Es werden drei Kategorien unterschieden: Block- und Steinschlag, Felssturz und Bergsturz. Sturzprozesse umfassen drei räumlich aufeinander folgende Prozessbereiche: das Ausbruchsgebiet, die Transitstrecke und das Ablagerungsgebiet (Fig. 3).

Steinschlag, Blockschlag:	*Isolierte Sturzbewegungen (Fallen, Springen Rollen) von Einzelkomponenten bis mehrere Kubikmeter Grösse. Geschwindigkeiten bis 30 m/s.*
Felssturz:	*Beim Felssturz löst sich ein grösseres Gesteinspaket von 100 bis mehreren 100'000 m³ und stürzt ab. Geschwindigkeiten bis 40 m/s.*
Bergsturz:	*Ein Bergsturz entsteht beim gleichzeitigen Loslösen grosser Gebirgsteile (1 Mio bis viele Mio m³). Bewegungsmechanismus und Verlagerungsprozess werden durch die Topographie sowie die Interaktion zwischen den Gesteinsfragmenten bestimmt. Es werden Geschwindigkeiten von über 40 m/s erreicht. Die Transportdistanzen sind volumenabhängig und können infolge der geringen Pauschalgefälle beträchtlich sein und mehrere Kilometer betragen. In Gebirgstälern können die grossen Sturzmassen Bäche und Flüsse zurückstauen, was die Gefährdung durch katastrophale Überflutungen v.a. in talabwärts liegenden Gebieten zur Folge hat.*

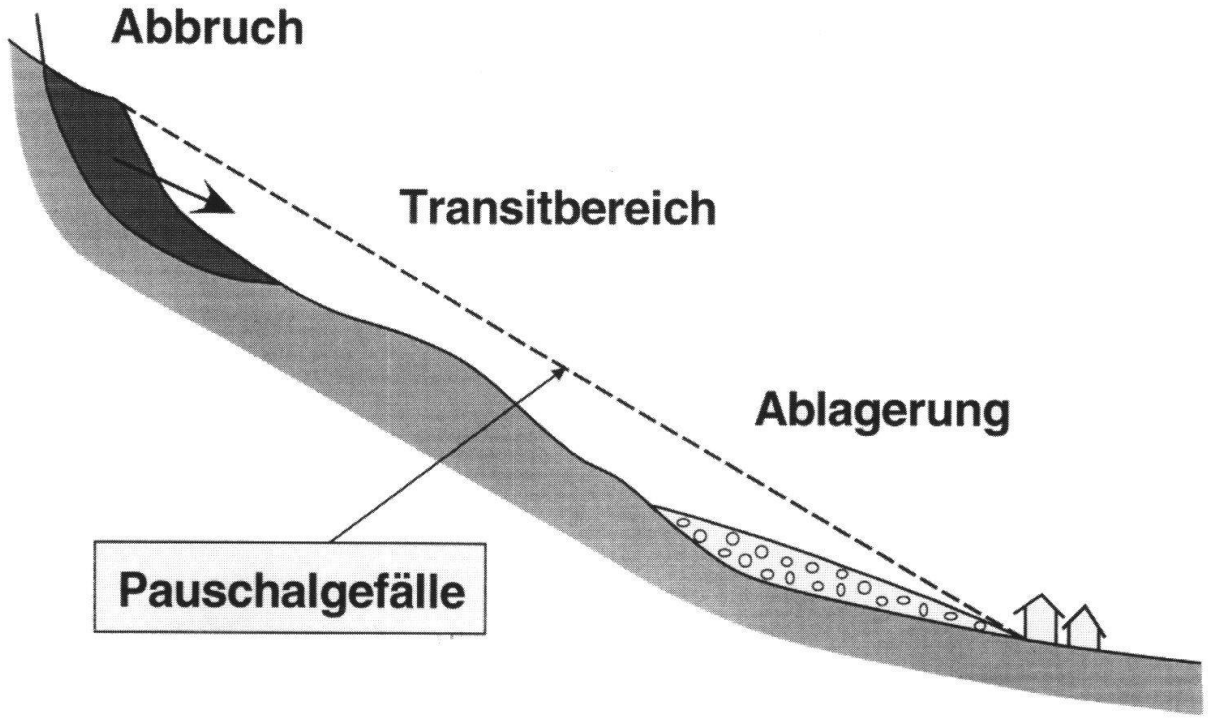

Fig. 3: Wirkungsbereiche von Massenbewegungen (Pauschalgefälle = Fahrböschung nach Heim 1932).

Rutschungen

Rutschungen sind hangabwärts gerichtete, gleitende Bewegungen von Hangbereichen aus Fest- und/oder Lockergestein. Sie sind das Ergebnis eines Scherbruches und treten im allgemeinen an mässig geneigten bis steilen Hängen und Böschungen auf. Natürliche Instabilitäten dieser Art sind in der Schweiz ausserordentlich häufig (8 % natürliche Geländeoberfläche) und weisen eine grosse Vielfalt von Erscheinungsformen auf. Sehr viele unter ihnen sind alt und heute weitgehend passiv, können aber bei ungünstigen Bedingungen plötzlich neu belebt werden. Bei Rutschungen spielt das Wasser meist eine wichtige Rolle, sei es durch die Wirkung von Porenwasserdrücken, von Sickerströmungen oder von Quelldrücken infolge des Quellens von Tonmineralien.

Die durchschnittlichen Bewegungsraten liegen bei substabilen bis schwach aktiven Rutschungen meist in der Grössenordnung von einigen mm, bei aktiven Rutschungen bei mehreren cm bis dm pro Jahr. Seltener treten auch bedeutend raschere Verschiebungen auf, welche unter Beibehaltung einer in sich kohärenten Rutschmasse mehrere Dezimeter pro Tag erreichen können. In Extremfällen können auch sehr rasche Verschiebungen erfolgen (z.B. Rutschung Falli-Hölli, August 1994: rund 6 m pro Tag).

Vereinfachend sind zwei Typen von Rutschungen zu unterscheiden, die **Rotations-** und **Translationsrutschung**. Die meisten der grossen Hangrutschungen sind eine Kombination dieser beiden Typen.

Translationsrutschungen:	*In Translationsrutschungen gleiten Schichten oder Schichtpakete auf einer bestehenden Schwächezone (oft Felsoberfläche, Schicht-, Schieferungs-, Kluft- oder Bruchflächen). Die flächenmässige Ausdehnung solcher Rutschungen ist sehr variabel und kann Flächen von einigen m^2 bis zu mehreren km^2 umfassen. Die Mächtigkeit der Rutschmassen erreicht häufig mehrere Zehner von Metern. Gebiete mit Flysch, kalkigen Mergelschiefern oder metamorphen Schiefern sind prädestiniert für die Bildung solcher Rutschungen.*
Rotationsrutschungen:	*Für Rotationsrutschungen charakteristisch sind mehr oder weniger sphärische Gleitflächen. Sie bilden sich hauptsächlich in homogenen Lockergesteinen aus. Rotationsrutschungen beinhalten im allgemeinen beschränkte Volumina und Mächtigkeiten und sind entsprechend von begrenzter räumlicher Ausdehnung.*

Rutschungen können nach der mutmasslichen Tiefenlage der Gleitfläche und der durchschnittlichen, langfristigen Geschwindigkeit (als Mass der Aktivität) der Bewegungen klassifiziert werden.

Bei der Beurteilung des Gefahrenpotentials von Rutschungen sind nicht allein Volumina, Bewegungsraten und auftretende Differentialbewegungen massgebend, sondern auch die Disposition zu Reaktivierungen. Rutschungen können ferner in Fliessrutschungen (Hangmuren) übergehen und dadurch grössere Reichweiten erlangen. Im weiteren zu beachten sind die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen Rutschungen und Fliessgewässern, sei es durch Mobilisierung grosser Geschiebemengen, Ablenkung oder - im Extremfall - durch Rückstau eines Fliessgewässers.

Obschon selten, können in manchen Schweizer Seen «Rutschungen» in geotechnisch äusserst sensiblen, feinkörnigen Seeablagerungen, insbesondere Seekreide, auftreten. Spannungsänderungen können dort zu einem Kollaps des Korngefüges und zu schnellen Massenbewegungen in Form eines viskosen Breis führen. Eine eigentliche Gleitfläche bildet sich dabei nicht aus. Solche Bewegungen sind selbst bei geringem Gefälle von nur wenigen Grad möglich (z.B. Seeuferrutschung Zug 1887, Schindler und Gyger, 1987).

Hangkriechen

Über lange Zeiträume anhaltende, langsame Verformungen im Lockergestein oder Fels können zu kriechenden Hangbewegungen führen. Dabei finden bruchlose, kontinuierliche Verformungen und/oder ein diskontinuierliches Kriechen mit Gleitvorgängen auf zahlreichen kleinen Trennflächen statt. Im Gegensatz zu den Rutschungen sind keine durchgehenden Gleitflächen ausgebildet. Phänomene wie Talzuschub und Bergzerreissung können Formen tiefgründiger Kriechbewegungen sein. Bei kriechenden Hangbewegungen kann das Vorhandensein einer durchgehenden Gleitfläche in manchen Fällen jedoch nicht eindeutig ausgeschlossen werden.

Ein Spezialfall von Hangkriechen zeigt sich bei **Blockgletschern** im Permafrost. Blockgletscher bestehen aus einem Gemisch von Lockergestein und Eis. Die physikalischen Eigenschaften des Eises, insbesondere dessen ausgeprägte Anfälligkeit zum Kriechen, haben zur Folge, dass in derartig gefrorenen Böden bereits bei kleinen Hangneigungen ab etwa 6° auffallend gleichmässige Kriechbewegungen in der Grössenordnung von Dezimetern pro Jahr auftreten.

Murgänge

Murgänge - im Volksmund auch «Rüfen» genannt - sind ein schnellfliessendes Gemisch aus Lockergesteinskomponenten (bis grosse Blöcke) und Wasser. Der Feststoffanteil variiert im allgemeinen zwischen 30 und 70 %, die Fliessgeschwindigkeiten betragen rund 2 - 20 m/s. Murgänge sind gekennzeichnet durch ein erhebliches erosives Potential (insbesondere Tiefenerosion) längs der Fliessstrecke.

In einem Gerinne können Murgänge nur schwierig von Hochwassern mit starkem Geschiebetransport abgegrenzt werden, da beide Prozessarten in wechselnder Reihenfolge auftreten können. Während eines 'normalen' Hochwasserabflusses können sich eine oder mehrere Murgangwellen (Murgangschübe) ausbilden, deren Zeitdauer in der Grössenordnung von einigen Sekunden bis wenigen Minuten liegt. Charakteristisch ist ein sehr rascher Anstieg der Hochwasserwelle, eventuell verbunden mit der Ausbildung einer stark feststoffbefrachteten Front. Ein weiteres Kennzeichen ist die Ausbildung wallartiger Ablagerungen an der Seite (levées) und/oder an der Front (Murköpfe).

Bei der Genese von Murgängen sind zwei Haupttypen zu unterscheiden: Hangmuren und Murgänge aus Gerinnen. Im Kasten sind einige wichtige Begriffe des Prozesses Hochwasser - Murgang aufgeführt.

Hochwasser:	*Zustand in einem Gewässer, bei dem der Wasserstand oder der Abfluss einen bestimmten Schwellenwert überschritten hat.*
Überschwemmung:	*Bedeckung einer Landfläche mit Wasser und Feststoffen, die aus dem Gewässerbett ausgetreten sind.*
Ufererosion:	*Abgleiten von Uferböschungen infolge Tiefen- und Seitenerosion.*
Übermurung:	*Ablagerung von Murgangmaterial ausserhalb des Gerinnes (häufig im Kegelbereich eines Wildbaches).*
Übersarung:	*Ablagerung von Feststoffen ausserhalb des Gerinnes anlässlich von Überschwemmungen.*
Murgang:	*Schnell fliessendes Gemisch von Wasser und Feststoffen mit einem hohen Feststoffanteil von ca. 30 bis 70 %, Geschwindigkeit 2 - 20 m/s.*
Hangmure:	*Entstehung in steilen Hängen mit gering durchlässigem Untergrund. Kennzeichnend ist ein oberflächliches Gemisch aus Lockergestein und Wasser. Beschränktes Volumen i.a. ≤ 20'000 m³. Geschwindigkeiten 1 - 10 m/s.*
Murkopf:	*Steile Front eines Murganges bzw. der abgelagerten Masse eines (plötzlich) zum Stillstand gekommenen Murganges.*
Murzunge:	*Relativ flache, oft weitreichende Ablagerung eines Murganges bzw. von verschwemmtem Murmaterial.*

Absenkungs-und Einsturzphänomene

Absenkungs- und Einsturzphänomene treten auf im Zusammenhang mit der Auslaugung eines löslichen Untergrundes (Gips, Rauhwacke), unterirdischen Hohlräumen (z.B. Karsthöhlen) oder infolge von Grundwasserabsenkungen. Typische Erscheinungsformen sind Dolinen. Insbesondere in triadischen Schichtfolgen mit Gips und Rauhwacke können solche Phänomene in Erscheinung treten. Sie kommen auch in verkarsteten Kalken der Alpen und des Juras vor, wo sie räumlich konzentriert Flächen bis zu einigen km² einnehmen können.

Absenkungs- und Einsturzphänomene können auch im Zusammenhang mit menschlichen Aktivitäten stehen (grossflächige Setzungen infolge Grundwasserabsenkungen, Salzgewinnung, Einsturz über Untertagebauten).

Hakenwurf

Schichtköpfe des anstehenden Felses können unter dem Einfluss der Schwerkraft talwärts bis zu subvertikalem Einfallen umgebogen werden, insbesonders dann, wenn die Talachse parallel zum Schichtstreichen verläuft. Dieses als Hakenwurf bezeichnete Phänomen erfasst vor allem geschichtete, gebankte, plattige und schiefrige Serien. Selbst grobbankige Schichten können ihm unterworfen sein. Hakenwurf tritt in der Regel im Bereich der obersten Meter bis Zehner von Metern auf. Mit zunehmendem Zerfall der Felsböschung kann er zu Sackungen und zu Felsstürzen führen.

Sackungen

Sackungen sind gravitative Bewegungen in Festgesteinen mit einer ausgeprägten vertikalen Bewegungskomponente längs Trennflächen. Sie führen im allgemeinen zu einer Auflockerung des Gesteinsverbandes. Einerseits bestehen graduelle Übergänge zu Rutschungen, andererseits lösen sich aus versackten Felspartien oft auch Stein-/Blockschlag oder kleinere Felsstürze. Grosse Felsstürze oder Bergstürze können in der Anfangsphase aus einer Sackung hervorgehen.

3. Gefahrenbeurteilung

3.1 Allgemeines

Die Beurteilung einer Naturgefahr ist eine äusserst anspruchsvolle, schwierige und oftmals heikle Aufgabe. Es wird eine sichere Aussage erwartet, denn von dieser hängen entscheidende und häufig kostspielige Massnahmen zur Verminderung oder Ausschaltung des Risikos ab. Die Prognose hat nicht nur darüber Antwort zu geben, wie das Naturereignis ablaufen wird, welchen Wirkungsraum es einnimmt und wie gross seine Intensität ist. Vielmehr wird auch eine Antwort auf die Frage, ob und wann dieses eintrifft, erwartet. Da grosse Sachwerte und häufig Menschenleben auf dem Spiel stehen, ist die haftungsrechtliche Bedeutung von Gefahrenbeurteilungen besonders brisant.

Massenbewegungen haben ihren Ursprung im mehr oder weniger bedeckten, nicht direkt einsehbaren Untergrund, d.h. im Innern des Gebirges. Das Verständnis von Massenbewegungen setzt damit eine sowohl räumliche wie zeitliche Auseinandersetzung mit einem komplex aufgebauten geologischen Medium voraus.

Eine exakte und vollkommen objektive Beurteilung der Gefahr ist aber meist nicht möglich. Der Geologe muss diesem Umstand Rechnung tragen, indem er seine Aussagen nachvollziehbar darstellt und deren Unsicherheiten offenlegt.

Die Überprüfung der Qualität einer Prognose der Gefahr von Massenbewegungen ist schwierig und letztlich erst anhand des Eintretens oder Nichteintretens des Ereignisses möglich (Zopfi 1996).
Im Hinblick auf die Erfassung, Darstellung und Beurteilung geologischer Naturgefahren ist das folgende grundsätzliche Vorgehen zweckmässig (Kienholz 1995, BUWAL 1998):

a) Gefahrenerkennung und -dokumentation
- Zusammenstellung und Analyse früherer Ereignisse anhand der Ereignisdokumentation und Naturbeobachtungen («stumme» Zeugen)
- Beschreibung des Prozessgebietes (Geologie, Hydrogeologie, Morphologie, Vegetation etc.)

b) Ursachenanalyse (kausale Zusammenhänge der Entstehung der Massenbewegung)

c) Beurteilung des Gefahrenpotentials (was kann wo und wann geschehen?)
- Ermittlung oder Abschätzung von Ursache, Grösse, Wirkungsraum, Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit von Ereignissen

d) Beurteilung des Schadenpotentials (welche Schäden können entstehen?)

e) Gefahren- und Risikomanagement im Hinblick auf wirksame und zweckmässige Schutzmassnahmen

Die Vielfalt des Problems der Entstehung und Auswirkungen von Massenbewegungen macht häufig eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit anderen Fachleuten (Geomorphologen, Ingenieuren, Forstingenieuren, Pflanzensoziologen etc.) zweckmässig.

3.2 Grösse, Wirkungsraum und Intensität des Ereignisses

Mit Feldkartierungen, Erfassung der räumlichen Lage von Trenn- und Gleitflächen, photogeologischen Analysen sowie Sondierungen kann der potentielle Ausbruchkörper lithologisch und volumenmässig erfasst werden. Die Aufgabe ist schwierig, weil geologische Körper im nicht direkt einsehbaren Untergrund liegen und praktisch immer anisotrop und inhomogen sind. Trenn- und Gleitflächen, Inhomogenitäten und Anisotropien der boden- oder felsmechanischen Eigenschaften sowie der Wasserhaushalt spielen eine entscheidende Rolle für die vorhandene Stabilität. Anhand der Naturbeobachtungen, Messungen, Berechnungen und seiner Erfahrung kann der Geologe die Gefahr modellhaft erfassen und darstellen. Geologische Modelle sind die wichtigste Grundlage für die Ursachenanalyse und die richtige Einschätzung der Gefahr von Massenbewegungen. Das geologische Modell ist das Resultat eines vielschichtigen und kreativen Arbeitsprozesses, in welchem die vorhandenen Naturphänomene und Messungen als harte Fakten, wissenschaftliche Kenntnisse, Berechnungen und Erfahrung einfliessen. Der Geologe überprüft das so entstehende Modell laufend durch Rückkoppelungen, bis es möglichst «wahr» ist. Programme für Stabilitätsberechnungen sind dabei nützliche Hilfsinstrumente, da damit verschiedene Varianten analysiert und die Sensitivität des Systems ergründet werden kann.

Messungen von Deformationen von Massen mit fraglicher Stabilität können sehr aufschlussreich sein. Sie zeigen, ob und welche Gebirgsteile sich in einem labilen Zustand befinden. Analysen von Deformationen geben Aufschluss über die Bewegungsmechanismen und deren Dynamik (Keusen 1998).

Ist die Grösse des möglichen Ausbruchs bekannt, kann der Wirkungsraum und die Intensität des Prozesses mit Modellrechnungen einigermassen zuverlässig ermittelt werden. Unter Intensität wird die physikalische Wirkung des Prozesses auf die Umgebung verstanden (z.B. Druckwirkung).
Eine charakteristische Grösse für die Reichweite von fliessenden und stürzenden Massen ist das Pauschalgefälle (Scheller 1970 sowie Fig. 3, 4, 5 und Tabelle 1).

Tab. 1: Pauschalgefälle von Massenbewegungen

Prozess	*Pauschalgefälle*
Murgänge	10 - 20°
Stein- und Blockschläge	30 - 35°
Felsstürze	30 - 35°
kleine Bergstürze (2 - 10 Mio m^3)	25 - 35°
grosse Bergstürze (10 - 50 Mio m^3)	12 - 25°
sehr grosse Bergstürze (50 - 1'000 Mio m^3) *	6 - 12°

*Beispiel: Flimser Bergsturz (interglazial) 12 Mia m^3, 8°.

Fig. 4: Felsstürze Randa (VS). Ausbruchnische und Schuttkegel. Das Gesamtvolumen der Felsstürze beträgt 30 Mio m^3. Da die Abbrüche in kleineren Teilstürzen von <500'000 m^3 erfolgten, ist das Pauschalgefälle entsprechend klein (35°). Die Ereignisse von Randa werden daher richtigerweise nicht als Bergsturz bezeichnet. Foto H.R. Keusen

Fig. 5: Fels-Eis-Schneelawine Brenva (Courmayeur) vom 18.1.1997. Ausbruchvolumen: 2 Mio m^3 Fels.Ablagerung >8 Mio m^3 Fels-Eis-Schnee. Pauschalgefälle 23°. Der Felssturz löste eine Eis-Schneelawine aus, welche ein Hotel zerstörte und 2 Menschenleben forderte (siehe: Courmayeur, Brenva. Eboulement du 18 janvier 1997. Rapport géologique GEOTEST 1997).
Foto H.R. Keusen

3.3 Eintretenswahrscheinlichkeit

Die Eintretenswahrscheinlichkeit gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Prozess mit einer bestimmten Intensität und innerhalb einer bestimmten Zeitperiode an einem bestimmten Ort auftritt. Im Gegensatz zu periodischen, meteorologisch korrelierten Naturereignissen wie Hochwasser und Lawinen sind Massenbewegungen Prozesse, die oft episodisch auftreten. Wasser beeinflusst aber den Ablauf von Massenbewegungen erheblich, so dass auch hier häufig ein gewisser Zusammenhang mit sich wiederholenden Witterungsbedingungen besteht.

Bei der Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit von Massenbewegungen kann der Geologe nur auf indirekte Anhaltspunkte basieren. Es sind dies Zeugen früherer Ereignisse (Ereignisdokumentation, «stumme» Zeugen im Gelände) und Deformationsmessungen. Vor einem Absturz beschleunigen sich Deformationen von geologischen Massen häufig exponentiell. Dieser Umstand kann für eine Prognose des Absturzzeitpunktes verwendet werden (Funk et al. 1998). Es ist aber auch bekannt, dass Fels- und Erdmassen über Jahrzehnte oder Jahrhunderte hinweg kriechen können, ohne abzustürzen (Terrasse von Braunwald, Grindelwald, u.v.a.). Der Gotschna-Rutsch ob Klosters und die Saaser-Rutschmasse bei Saas im Prättigau kriechen seit ca. 7'000 Jahren (^{14}C-Datierung an Holz aus z.T. von Rutsch überfahrenen Schottern).

Trotz der Schwierigkeit, die Eintretenswahrscheinlichkeit numerisch abschätzen zu können, wird vom Geologen auch hier eine konkrete Äusserung erwartet, weil eine solche für eine vollständige Gefahrenbeurteilung erforderlich ist (Zopfi 1996). Es ist dabei wichtig, dass klar unterschieden wird zwischen der Eintretenswahrscheinlichkeit eines Prozesses und jener eines Schadens. In den Alpen treten viele Massenbewegungen auf, ohne dass ein Schaden entsteht. Auch diese Ereignisse sind aber ein wichtiges geologisches Anschauungsmaterial für das empirische Verständnis von Prozessabläufen.

3.4 Schadenpotential und Risiko

Nur dann, wenn die Naturgefahr auf einen Wert, ein Schadenpotential (Sachwert, Menschen) einwirken kann, spricht man von Risiko. Das Risiko beschreibt demnach die Grösse und Eintretenswahrscheinlichkeit eines Schadens.

Viele Ortschaften in den Alpentälern liegen im theoretischen Einflussbereich von Bergstürzen. Grosse Kubaturen führen zu kleinen Pauschalgefällen bis hinunter zu 6° (Tabelle 1) und haben entsprechend grosse Reichweiten zur Folge. Dieses Restrisiko sehr grosser aber seltener Ereignisse kann geologisch kaum erfasst werden, was wegen der möglichen immensen Zerstörungen nur schwer erträglich ist. Hier hilft aber die Tatsache, dass sich grosse Ereignisse kaum spontan, ohne längere Vorankündigung ereignen. Vorzeichen sind Deformationen und zunehmender Stein- und Blockschlag, welcher durch die fortschreitenden Entfestigung des Gebirges verursacht wird; Beispiele: Bergstürze Elm und Goldau (Heim 1932), Felsstürze Randa, Felssturz Jungfraujoch (Keusen 1998).

4. Beeinflussen Klimaänderungen Naturgefahren?

Für die Schweiz existieren verschiedene Klima-Projektionen, basierend auf dem zunehmenden CO_2-Gehalt der Atmosphäre. Eine Verdoppelung des CO_2-Gehalts gegenüber dem vorindustriellen Ausgangswert (Jahr 1800) von 280 ppmv (parts per million volume) dürfte ca. Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht werden. Die dannzumal möglichen Temperaturen variieren - je nach Methode- zwischen +1 bis +2°C für den Sommer und +0.5 bis +1.5°C für den Winter. Die Niederschlagsprojektionen ergeben für den Winter ein sehr uneinheitliches Bild (-5 bis +20%). Mehrheitlich zeigen die Abschätzungen jedoch eine Zunahme der Niederschläge. Für den Sommer wird tendenziell eine Abnahme (0 bis -10 %) erwartet. Bei diesen Projektionen unberücksichtigt ist die abkühlende Wirkung von Sulfat-Aerosolen, welche vor allem in stark industrialisierten Regionen wirksam sind. Längerfristig muss jedoch mit einem deutlichen Überwiegen des erwärmenden CO_2-Einflusses gerechnet werden.

Was für Folgen haben diese Entwicklungen hinsichtlich der erwähnten Naturgefahren? Unter der Annahme, dass in der Schweiz Niederschlag und Verdunstung gleichmässig zunehmen, dürfte der Oberflächenabfluss im Durchschnitt gleich bleiben. Der Anstieg der Nullgradgrenze wird jedoch zur Folge haben, dass der Niederschlag auch in höheren Zonen länger in Form von Regen fällt. Im jährlichen Durchschnitt verlängert sich dadurch die Hochwassersaison und die Wahrscheinlichkeit, dass sich in diesem Zeitraum ungünstige Rahmenbedingungen einstellen können, nimmt zu. Da im Alpenraum Hochwasserereignisse oft mit einer erheblichen Umlagerung von Lockergesteinen verbunden sind, wächst die Eintretenswahrscheinlichkeit von hochwasserinduzierten Massenbewegungen wie Murgängen, Böschungserosion, Reaktivierung von Rutschungen etc. Inwieweit die veränderten Klimaverhältnisse zu bodenstabilisierenden Entwicklungen in Form von verstärkter Vegetation, Bodenbildung und Anstieg der Waldgrenze nach sich ziehen, ist ungewiss. Auch eine gegenteilige Entwicklung ist denkbar, indem sich der Zustand des Waldes zusehends verschlechtert.

Die erhöhten Temperaturen könnten zur Folge haben, dass der Boden selbst in höheren Lagen während längerer Zeit nicht gefroren ist. Während der prognostizierten, niederschlagsreicheren Winterhalbjahre dürfte somit vermehrt Niederschlag im Boden versickern und dadurch das Gleichgewicht von instabilen Hängen beeinträchtigen. Ungünstig wirkt sich in diesem Zusammenhang auch aus, dass das beachtliche Wasserbindungsvermögen der Vegetationsdecke in dieser Zeit keine Wirkung entfalten kann. Aus dieser Konstellation ist zu folgern, dass insbesondere in voralpinen Gebieten zwischen 1'000 und 1'700 m ü.M. - wo sich bereits heute die meisten sensiblen Rutschgebiete befinden - vermehrt Hanginstabilitäten auftreten könnten (Lateltin et al. 1997).

In diese Richtung weisen auch Untersuchungen im Rahmen des NFP 31 (Bloetzer et al. 1998) hin, welche das Langzeitverhalten verschiedener tiefgründiger, grossflächiger Rutschmassen im Schweizer Alpenraum anhand von Vergleichen zwischen früheren Landesvermessungen und registrierten Niederschlagsdaten über-

prüften. So ist bei den untersuchten Rutschungen in der Westschweiz eine tendenzielle Zunahme der durchschnittlichen Bewegungen festzustellen, was mindestens teilweise mit den seit 1977 registrierten, erhöhten Niederschlagsmengen korreliert. Im östlichen Alpenraum verhielten sich die Rutschungen bislang indifferent (Noverraz et al. 1998).

Die durchschnittlich höheren Temperaturen (Ansteigen der Nullgradgrenze) werden auch Auswirkungen auf die Permafrost-Regionen haben und die alpinen Eismassen weiter zum Abschmelzen bringen. Dadurch werden grosse Lockergesteinsmassen dekonsolidiert und ein Geschiebepotential bereitgestellt, welches durch Murgänge bis in tiefe Tallagen verfrachtet werden kann. Mit dem Ansteigen der Permafrostgrenze wächst auch die Gefahr, dass vorderhand noch durch Eis konsolidierte, zerklüftete Felsmassen zunehmend an Festigkeit verlieren. Dies kann vermehrt zu Sturzprozessen und zu Felssackungen sowie verstärkter Schuttproduktion Anlass geben.

Bei allen Klima-Projektionen darf allerdings nicht übersehen werden, dass die Natur an sich ein dynamisches System darstellt. Dieses System verändert sich kontinuierlich, zeitweise auch rasch und manchmal abrupt. Die Erdgeschichte gibt davon reichlich Zeugnis. So ist die Erwärmung im Alpenraum seit dem letzten Jahrhundert nicht einzig auf anthropogene Ursachen zurückzuführen. Ein wesentlicher Teil ist als natürliche Wiedererwärmung nach der ausgeprägten Kaltphase des letzten Jahrhunderts zu interpretieren.

5. Erdbeben als Auslöser von Massenbewegungen

Die Schweiz gehört im mitteleuropäischen Vergleich zu den Ländern mit erhöhter Erdbebenaktivität. Historisch sind Erdbeben praktisch aus der ganzen Schweiz belegt. Als besonders gefährdete Regionen gelten das Wallis, Basel, das St. Galler Rheintal, das Engadin, Teile der Innerschweiz und des Berner Oberlandes.

Die Intensität eines Erdbebens beschreibt - im Gegensatz zur Magnitude (≈ freigesetzte Energie) - die sinnesmässig feststellbaren Auswirkungen eines Bebens an der Erdoberfläche (Standorteinwirtung, Schadenausmass). Sie ändert sich von Ort zu Ort je nach Entfernung zum Epizentrum und der Untergrundbeschaffenheit. Bei der heute in Europa allgemein gültigen MSK-Skala treten Massenbewegungen in der Regel ab einer Intensität von VII auf. Seit 1850 ereigneten sich in der Schweiz rund 30 Beben mit einer Intensität grösser als MSK VII. Durchschnittlich tritt in der Schweiz somit etwa alle 5 Jahre ein Beben auf, das als Sekundäreffekt Massenbewegungen (v.a. Stein- und Blockschlag, Felssturz, Rutschungen) auslösen kann.

Der lokale geologische Untergrund beeinflusst die Ausbreitung der seismischen Wellen und entsprechend die Stärke von Erschütterungen. Je nach Untergrund kann die Intensität von Erdbeben lokal bis zu ca. 1.5 Intensitätsstufen von der in Abhängigkeit der Distanz zum Epizentrum zu erwartenden Intensität abweichen (Beer 1997, Sägesser & Mayer-Rosa 1978). Auch ein schwächeres, von der Eintre-

tenswahrscheinlichkeit her häufigeres Beben kann somit lokal zu Massenbewegungen führen, insbesondere beim Vorliegen ungünstiger Randbedingungen, wie zum Beispiel witterungsbedingt starker Bodensättigung oder hoher Wasserdrücke auf Klüften. In den erdbebengefährdeten alpinen Regionen der Schweiz ist die Eintretenswahrscheinlichkeit von Massenbewegungen als Folge eines Bebens innerhalb der Zeitperiode einer Generation durchaus als gross zu bezeichnen. Die Methoden der computergestützten Mikrozonierung (Beer 1997) eröffnen neue Möglichkeiten bei der Identifikation besonders sensibler Zonen.

Beispiele für durch Erdbeben beeinflusste Massenbewegungen sind Felsstürze im Friaul (Italien, 1976). Auch der Bergsturz von Six-des-Eaux Froides (Wallis 1946) wurde wahrscheinlich durch zwei innert Tagesfrist aufeinanderfolgende Beben im Mittelwallis (MSK-Intensität VIII und VII) begünstigt. Die alte Rutschung von Vaz-Obervaz bei Lenzerheide (GR) wurde 1992 in der Folge eines am 20.11.1991 erfolgten Erdbebens reaktiviert (Noverraz et al. 1998).

Zur Abschätzung der Stabilität von Hängen bei seismischer Erschütterung müssen bei der konventionellen Stabilitätsberechnung zwei zusätzliche Grössen berücksichtigt werden: Die Trägheitskräfte, die aus den zu erwartenden Beschleunigungskomponenten resultieren und der Porenwasserüberdruck, verursacht durch die zusätzliche dynamische Belastung.

6. Gefahren- und Risikomanagement

Ziel des Gefahren- und Risikomanagements ist a) die prophylaktische Verhütung von Schäden und b) der optimale Einsatz der zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel (Holenstein 1997). Das Diagramm Fig. 6 zeigt die Zusammenhänge. Massnahmen sind häufig sehr aufwendig oder haben für die Betroffenen einschneidende Konsequenzen. Sie müssen deshalb klar begründet werden und auf nachvollziehbaren, naturwissenschaftlich fundierten Grundlagen basieren. Das Gefahren- und Risikomanagement muss eine Definition der Schutzziele und Diskussion der Risikoakzeptanz beinhalten, weil eine vollkommene Sicherheit oft nicht möglich oder nur mit enormen Mitteln erreichbar ist. Schutzziele sollen flexibel gehandhabt werden, denn nicht jede Raumeinheit bedarf desselben Schutzes. Risiken müssen deshalb häufig bis zu einem gewissen Grad toleriert werden. Dabei ist es wichtig, diese akzeptierten Risiken zu beschreiben. Die Massnahmen können planerischer Natur sein (Reduktion der Exposition durch Auszonungen) oder mit baulichen technischen Mitteln die Naturgefahr eindämmen. Mit technischen Massnahmen können entweder Ereignisse in ihrer Entstehung verhindert oder deren Häufigkeit reduziert werden (aktive Massnahmen). Es kann aber auch deren Ablauf schadenarm gestaltet werden, indem die Verletzlichkeit des gefährdeten Wertes vermindert wird (passiv). Bei allen baulichen Massnahmen gilt, dass deren Wirksamkeit nur dann gewährleistet ist, wenn sie regelmässig auf ihre Funktionstüchtigkeit hin kontrolliert und unterhalten werden (z.B. Leeren von Steinschlagverbauungen, Säubern von Entwässerungsgraben).

Mit Frühwarndiensten, d.h. durch systematische Beobachtungen und Messungen, kann das Verhalten und die Entwicklung einer drohenden Naturgefahr erkannt

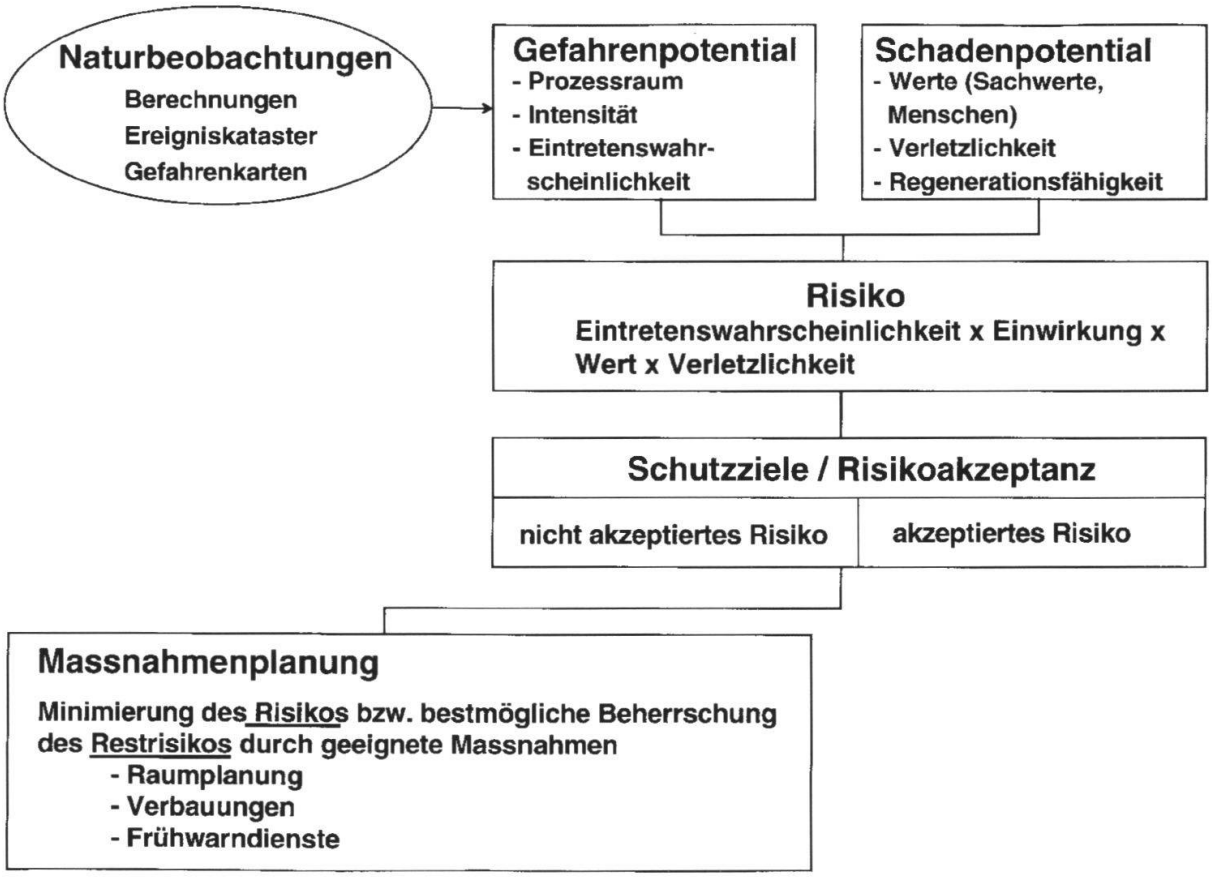

Fig. 6: Gefahren- und Risikomanagement bei Naturgefahren

werden und Schäden können so durch zeit- und sachgerechtes Handeln vermieden werden (Keusen 1998).

Glossar

Gefahrenpotential:
Zustand oder Vorgang, aus dem ein Schaden für Menschen und Sachwerte hervorgehen kann. Das Gefahrenpotential beschreibt ein mögliches Ereignis bezüglich seiner Wirkung (Raum, Intensität).

Gefährdung:
Die Gefährdung beschreibt das Gefahrenpotential unter Berücksichtigung der Eintretenswahrscheinlichkeit.

Schadenpotential:
Gesamtheit aller aus einem bestimmten Gefährdungsbild möglicherweise resultierenden Schäden.

Risiko:
Qualitative oder quantitative Charakterisierung eines Schadens hinsichtlich der Eintretenswahrscheinlichkeit und Tragweite der Schadenwirkungen.

Risikoakzeptanz: Persönliche oder kollektive Bereitschaft, ein erkanntes Risiko zu tolerieren.

Gefahren- und Risikomanagement:
Gesamtheit von Strategien und Massnahmen zur Erreichung von festgelegten Schutzzielen.

Eintretenswahrscheinlichkeit, Wiederkehrdauer:
Bezogen auf eine bestimmte Periode lassen sich Eintretenswahrscheinlichkeit und Wiederkehrperiode numerisch wie folgt verbinden:
$p = 1 - (1 - 1/T)^n$
wobei n der betrachtete Zeitraum, T die Wiederkehrperiode und p die Einretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses gleich oder grösser als jenes der Wiederkehrperiode T innerhalb der betrachteten Periode darstellt. Nimmt man 30 Jahre (eine Generation) als Betrachtungszeitraum, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein 30jährliches Ereignis eintritt 64 % (oder knapp ⅔), ein 100jährliches 26 % (oder ungefähr ¼) und ein 300 jährliches knapp 10 %. Dieser Ansatz verdeutlicht, dass selbst bei einer relativ seltenen Wiederkehrperiode (z.B. 300 Jahre) die verbleibende Restgefährdung nicht vernachlässigbar gering ist.

Pauschalgefälle («Fahrböschung» nach Heim 1932):
Grenzneigung zwischen Ausbruch und Ablagerungsfront Das Pauschalgefälle ist eine charakteristische Grösse, welche von den Eigenschaften (und z.T. vom Volumen) des stürzenden Materials abhängig ist.

Frühwarndienste:
Systematische Beobachtungen und Messungen, die geeignet sind, das Verhalten und die Entwicklung einer drohenden Naturgefahr zu erkennen, um im Hinblick auf die Vermeidung von Schäden zeit- und sachgerecht handeln zu können (Definition in Keusen 1998).

Gefahrenhinweiskarte (GHK):
Die GHK gibt eine grobe Übersicht der denkbaren Gefahrenpotentiale durch die Naturereignisse Lawinen, Steinschlag, Murgang und Rutschung. Im weiteren zeigt sie die Konflikte dieser Gefahren mit möglichen Schadenpotentialen (Siedlungen, Verkehrswege). Die GHK stellt auf Ebene Richtplan ein wichtiges Instrument dar. Sie zeigt mögliche Konfliktstellen auf und weist auf näher abzuklärende Risiken hin.

Gefahrenkataster, Ereigniskataster (EK):
Im EK sind frühere Ereignisse von Naturprozessen zusammengestellt (BUWAL 1998). Der EK weist auf besonders gefährliche Gebiete mit häufigen Vorkommnissen hin. Aufgrund des EK können Anhaltspunkte über die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Prozesses gewonnen werden.

Gefahrenkarte (GK):
In der Gefahrenkarte sind gefährliche Naturprozesse bezüglich Eintretenswahrscheinlichkeit und Intensität dargestellt. Die Prozesse werden naturwissenschaftlich detailliert abgeklärt und modelliert. Die Gefahrenkarte scheidet rote (Verbotszone), blaue (Gebotszone, z.B. Bauauflagen) und gelbe Gebiete (Hinweiszone) aus und ist Grundlage für den eigentümerverbindlichen Nutzungsplan.

Permafrost:
Dauernd gefrorener Untergrund. Tritt je nach Exposition und Lage oberhalb von 2'000 bis 3'000 m auf. Im Permafrost tritt Wasser in Form von Eis auf (Eisgehalte bis über 50 %). Das Verhalten von Permafrost wird massgeblich von den physikalischen Eigenschaften des Eises mitbestimmt (Tendenz zum Kriechen).

«Stumme» Zeugen:
Spuren früher erfolgter Massenbewegungen im Gelände (Blöcke, Murköpfe, Waldschäden u.a.). Es ist oft möglich, anhand des Zustandes dieser Zeugen auf das Alter der Ereignisse zu schliessen.

Literaturverzeichnis

BEER, CH. 1997: Erdbebengefährdung in Abhängigkeit vom geologischen Untergrund. Beitr. Geol. Schweiz, geotechn. Ser., 92.

BLOETZER, W., EGLI, TH., PETRASCHEK, A., SAUTER, J. & STOFFEL, M. 1998: Klimaänderungen und Naturgefahren in der Raumplanung. Synthesebericht NFP 31. Vdf Verlag ETH Zürich.

BUNDESAMT FÜR ZIVILSCHUTZ 1995: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine vergleichende Übersicht (KATANOS).

BUWAL, BWW 1995: Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene, Empfehlungen (Ausgabe 1995). - EDMZ, Bestell-Nr. 310.022 d/f, Bern.

BUWAL, BWW, BRP 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungen bei raumwirksamen Tätigkeiten.

BUWAL, 1998: Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85.

BWW, BRP, BUWAL 1997: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. EDMZ.

EVED, BWW, EDI, BUWAL, LHG 1991: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 - Schlussbericht. - Mitt. der Landeshydrologie und -geologie Nr. 15.

FUNK, M., WEGMANN, M., FLOTRON, A. & KEUSEN, H.R. 1998: Movement studies to forecast the time of breaking off ice and rock masses. Internat. IDNDR-Conference on Early Warning Systems for the Reduction of Natural Disasters. Potsdam.

HEIM, A. 1932: Bergsturz und Menschenleben. Viertelsjahrschrift der Nat. forschenden Gesellschaft Zürich.

HOLENSTEIN, K. 1997: Analyse, Bewertung und Management von Naturrisiken. vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich.

KEUSEN, H.R. 1998: Warn- und Überwachungssysteme (Frühwarndienste). Publ. PLANAT.

KIENHOLZ, H. 1995: Gefahrenbeurteilung und -bewertung auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept, Schweiz. Z. Forstwesen, 146.

LATELTIN, O., BEER, CH., RAETZO, H. & CARON, CH. 1997: Landslides in Flysch terranes and climate change. Eclogae geol. Helv. 90/3.

NOVERRAZ, F., BONNARD, CH., DUPRAZ, H. & HUGUENIN, L. 1998: Grands versants instables et climat, projet versinclim, PNR 31. Vdf Verlag, ETH Zürich.

SÄGESSER, R. & MAYER-ROSA, D. 1978: Erdbebengefährdung in der Schweiz. - Schweiz. Bauztg. 96/7.

SCHELLER, E. 1970: Geophysikalische Untersuchungen zum Problem des Taminser Bergsturzes (Diss. ETHZ).

SCHINDLER, C. & GYGER, M. 1987: Die Katastrophe von Zug. Die Zuger Vorstadt. Gedenkschrift zum 100. Jahrestag der Vorstadtkatastrophe vom 5. Juli 1887.

ZOPFI, E. 1996: Kilchenstock. Der Bergsturz in den Köpfen. Limmatverlag Zürich.