Bull. angew. Geol. Vol. 9/2 Dezember 2004 S. 23-37

Klima und Sturzereignisse in Vergangenheit und Zukunft

Ueli Gruner[1]

Stichworte: Felssturz, Bergsturz, Klimawandel, Temperaturwechsel, Frost-Tau-Zyklus, Kluftwasserdruck, Felssturzprognosen

Zusammenfassung

Eine Auswertung von rund 800 Sturzereignissen von der Alpennordseite aus den letzten 500 Jahren, insbesondere aus dem 20. Jahrhundert, ergibt, dass im Zeitraum zwischen 1500 und 1900 keine eindeutige Korrelation zwischen bekannten Feucht- bzw. Warmperioden und einer Häufung von Sturzereignissen besteht. Im 20. Jahrhundert zeigt es sich, dass der Anteil von Winterstürzen (wie auch der Stürze im Frühling) in der kalten Klimaperiode zwischen 1950 und 1980 zugenommen hat, während dieser in den wärmeren Perioden zwischen 1900 und 1950 und v.a. seit 1980 trotz vermehrter Intensivniederschläge geringer war. Dies ist auf die bei kälteren Temperaturen grösseren Deformationen (Kluftausweitung infolge Gesteinskontraktion) zurückzuführen. Der seit 1980 gegenüber früheren Perioden erhöhte Anteil an Sommerstürzen hat seinen Grund v.a. in der Zunahme von extremen Niederschlagsereignissen. Eine generelle Zunahme von Stürzen infolge der bisher erfolgten Klimaerwärmung ist nicht erkennbar und wird für die nächsten 50 Jahre nicht erwartet. Allerdings werden in diesem Zeitraum weitere jahreszeitliche Verschiebungen der Sturzhäufigkeit eintreten: So ist infolge der Erwärmung tendenziell mit einer weiteren Abnahme von Winterstürzen (trotz vermehrter Niederschläge) und einer leichten Zunahme von Sommer- und Herbstereignissen infolge vermehrter extremer Starkniederschlägen zu rechnen, während der Anteil an Frühlingsstürzen in einem ähnlichen Rahmen wie bisher bleiben dürfte.

Abstract

About 800 rock fall events on the north side of the Alps of Switzerland have been evaluated in the last 500 years. There is no evident correlation between humid respectively warm periods and an accumulation of rock fall events between 1500 and 1900. In the 20th century it became apparent that there was en increase of rock fall events in winter during the cold period between 1950 and 1980 due to rock mass contraction respectively joint expansion. The amount was higher than in the warm periods between 1900 and 1950 and especially in the years since 1980 in spite of increasing intensive precipitation. A general increase in rock fall events due to the warmer climate has not been discernible and is not expected within the next 50 years. In future, however, the warmer climate will cause a further decrease in rock fall events in winter and a light increase in summer due to more extreme precipitation.

[1] c/o Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstr. 22, 3011 Bern, ueli.gruner@k-h.ch

1. Einleitung

Müssen wir in Anbetracht der weiter andauernden Klimaerwärmung in Zukunft vermehrt mit Sturzereignissen (Stein- und Blockschlag, Fels- oder sogar Bergsturz) rechnen? Diese Frage interessiert nicht nur die Geologen, sondern auch – nach fast jedem neuen grösseren Sturzereignis – die Öffentlichkeit. Um darauf, wenigstens ansatzmässig bzw. provisorisch, eine Antwort geben zu können, werden vorerst folgende zwei Aspekte detaillierter beleuchtet:

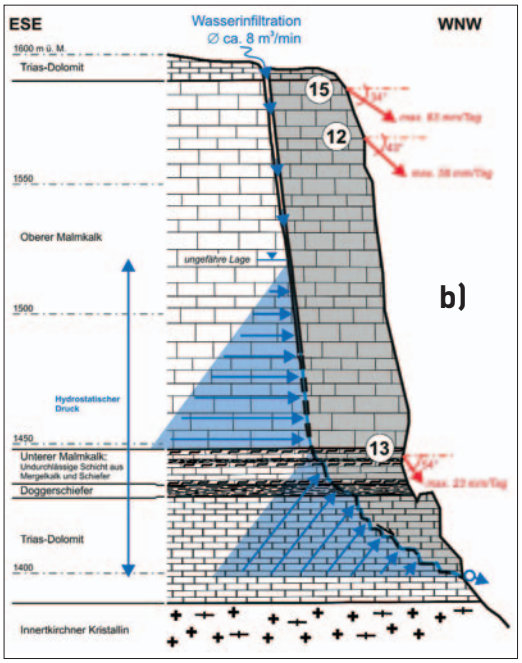
- Die meteorologischen bzw. klimatologischen Randbedingungen, welche verantwortlich sind für die einzelnen Sturzmechanismen.
- Die Auswirkungen der Klimavariationen der letzten 500 Jahre, insbesondere jedoch der letzten 100 Jahre, auf die anteilsmässige Häufigkeit der Stürze innerhalb der vier Jahreszeiten.

2. Meteorologische Verhältnisse und Sturzmechanismen

Die Disposition des Gesteins zu Sturzprozessen hängt von verschiedenen Faktoren ab: Trennflächen, Lithologie, Verwitterung, Wasserwegsamkeit, Topographie (Freiheitsgrad) etc.. Bevorzugte Trennflächen, entlang denen eine Ablösung einer Felspartie stattfinden kann, sind Klüfte, Spalten, Scherzonen und Schichtflächen.
Es gibt verschiedene Prozesse, welche zur Entfestigung des Gebirges und letztlich zu Abstürzen von Felspartien führen.

a) Eine wichtige Rolle für einen Deformationsschub entlang einer Trennfläche stellt der Faktor Wasser dar. Vor allem bei länger andauernden Niederschlägen, bei Starkniederschlägen oder auch nach einer Schneeschmelze kann der hydrostatische Wasserdruck im Gebirge rasch bzw. auf ausserordentliche Werte ansteigen. Dadurch entsteht ein Druck auf die Kluft- bzw. auf die potenzielle Ablösefläche, wodurch die als eine Art «Kohäsion« wirkenden rückhaltenden Kräfte wie Gesteinsbrücken und Verzahnungen abgebaut oder sogar zerstört werden können. Es gibt viele Felsbewegungen, die mit dem Niederschlagsverhalten eindeutig korrelierbar sind. Ein eindrückliches Beispiel ist der Wässerungsversuch am Chapf bei Innertkirchen am Grimselpass (Kanton Bern) im Jahr 2001, wo während 18 Tagen durch Infiltration von rund 0,2 Millionen m^3 Bachwasser versucht wurde, einen Absturz eines rund 100 m hohen und 250'000 m^3 umfassenden Felspaketes künstlich auszulösen (Gruner 2001, Brasser & Gruner 2002). Obschon der Versuch nicht gelang, konnte doch mittels Aufbau eines vermutlich hohen hydrostatischen Druckes die Felsmasse innerhalb der Versuchszeit bis zu 1 m talwärts verschoben werden, wobei die Geschwindigkeiten teilweise bis gegen 8 cm/Tag stiegen (vgl. Fig. 1).
b) Temperaturwechsel führen generell ebenfalls zu Felsbewegungen. Es ist bekannt, dass sich bei spröden Gebirgstypen ohne behindernden Wasserabfluss bei kalten Temperaturen die Klüfte und Risse infolge der Gesteinskontraktion öffnen, während die Deformationen in der warmen Jahreszeit wieder zurückgehen oder stagnieren. Als Beispiel für diese kältebedingten Bewegungen wird das Gstryfet Birg oberhalb der BLS-Linie bei Mitholz (Kanton Bern) aufgeführt, wo die Deformationen der Hauptablösungskluft eines instabilen Felspaketes von rund 100'000 m^3 an verschiedenen Stellen automatisch überwacht werden (Fig. 2). Weitere Beispiele dieser kältebedingten Deformationen sind in Krähenbühl (2004) zu finden. Der hauptsächliche Bewegungsschub findet vielerorts somit in erster Linie in der kalten Jahreszeit statt, wobei der Deformationsbetrag bei sinkenden Temperaturen entsprechend grösser wird. Dadurch werden rückhaltende Kräfte wie Gesteinsbrücken etc. abgebaut und zerstört. In verschiedenen Fällen zeigte es sich auch, dass Niederschläge im Winter einen zusätzlichen Deformationsschub aus-





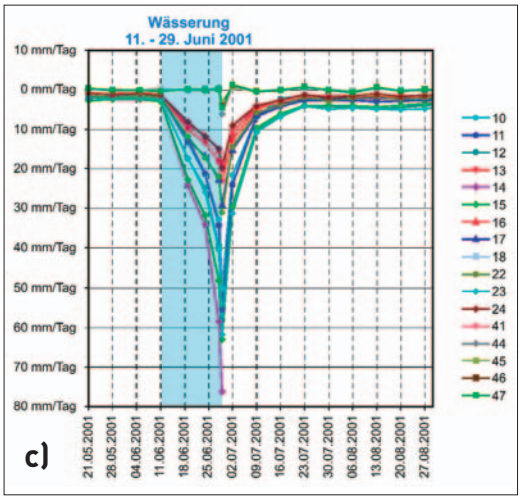


Fig. 1:
a) Luftaufnahme der instabilen Felspartie Chapf (Kubatur rund 250'000 m³) oberhalb der Grimselstrasse (Kt. Bern) von Norden (oben).

b) Geologisches Profil durch die instabile Felspartie mit maximaler Geschwindigkeit (Bewegungsvektor) der Lasermesspunkte während der Wässerung (rechts oben).

c) Geschwindigkeit der Lasermesspunkte während der Wässerung vom 11.–29. Juni 2001 (rechts).

lösten (evtl. verbunden mit Eisdruck; vgl. c), weil der Kluftwasserdruck infolge der Öffnung bzw. der Zunahme der Klufttiefen ansteigen konnte (Krähenbühl 2004), während der Regen im Sommer infolge der Schliessung der Klüfte keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Bewegungen hatte (vgl. z.B. auch Fig. 2, Gstryfet Birg). Anderseits gibt es zahlreiche Beispiele, bei welchen im Winterhalbjahr ein Rückgang der Deformationen festzustellen ist – Heim (1932) bezeichnete dies als «Winterschlaf der Berge» – und erst die Schneeschmelze bzw. die Frühlingsniederschläge zu einem Deformationsschub führen (vgl. z.B. Gruner & Ottiger 2001).

c) Eine Kombination der ersten beiden Faktoren sind die bekannten Frost-Tau-Zyklen (Gefrieren von Kluftwasser, evtl. verbunden mit anschliessendem Regen), welche sich

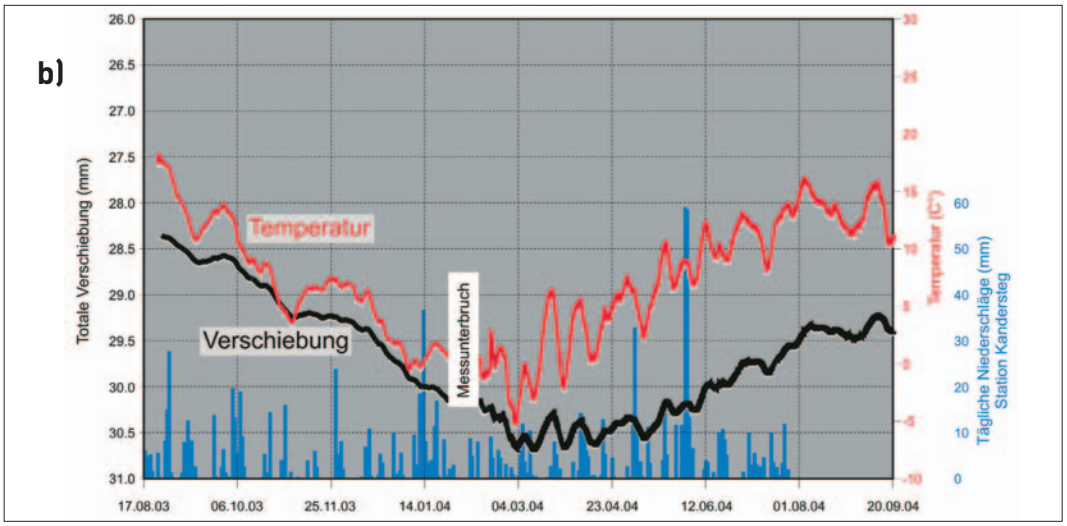


Fig. 2:
a) Luftaufnahme der Felspartie Gstryfet Birg oberhalb der BLS-Linie bei Mitholz (Kt. Bern) von Norden. Eine z.T. weit offene Hauptkluft trennt ein rund 100'000 m^3 umfassendes, instabiles Felspaket von der stabilen Felsmasse (oben).
b) Deformation und Temperatur des automatischen Weggebers «N» an der Hauptkluft des Gstryfet Birg (unten). Die Deformationskurve verläuft praktisch gleich wie die Temperaturkurve (Kluftausweitung bei kälteren Temperaturen). Die Niederschläge haben keine Auswirkungen auf die Bewegungen.

ebenfalls ungünstig auf die Stabilität auswirken. Erfahrungsgemäss treten viele Blockschläge oder Felsstürze nicht während der Volumenzunahme des Wassers beim Gefrierprozess in der Kluft auf, sondern erst beim Auftauen. Währenddem sich die Klüfte infolge Kälte und Eisdruck öffnen, entsteht offenbar eine Art Eishaftung, welche in den Klufträumen die Gesteinsteile zusammenhält. Beim (schnellen) Auftauen, evtl. verbunden mit Regen, geht diese Eishaftung dann rasch verloren. (Ein ähnliches Phänomen stellen auch die in auftauenden Permafrostgebieten beobachteten Felsstürze dar, wie sie z.B. im Sommer 2003 gehäuft auftraten.) Zahlreich sind Felsstürze auch, wenn am Ende einer längeren Frostperiode grössere Regenmengen in den gefrorenen Untergrund gelangen und das Wasser in den Klüften durch das Eis kurzfristig gestaut wird. Dies führt jeweils zu einem raschen Anstieg des hydrostatischen Druckes oberhalb des Eispfropfens, d.h. zu einem Deformationsschub oberhalb des üblichen Kluftwasserdruckes und zur Auslösung von Felsstürzen.

d) Starke Winde können dazu führen, dass infolge Kippens der Bäume kleiner Felspartien im Wurzelbereich aufgelockert werden und schliesslich zum Absturz gelangen.

e) Ebenfalls bekannt sind Deformationen (bzw. Felsstürze) infolge von Erschütterun-



gen durch Erdbeben. Ein eindrückliches Beispiel ist der Bergsturz von Six des Eaux Froides vom 30. Mai 1946, als rund 4 Mio m^3 durch ein Erdbeben (Beben von Sierre) zu Tale stürzten.

3. Ein Blick in die Vergangenheit

3.1 Allgemeines

Die häufig gestellte Frage, ob sich in den letzten Jahren oder Jahrzehnten infolge des Klimawandels eine Häufung von Sturzereignissen ergeben hat, kann statistisch nicht beantwortet werden. Zwar gibt es für einzelne Gebiete gut dokumentierte Katastereinträge und von den letzten Jahren auch einigermassen zuverlässige Zusammenstellungen von bedeutenderen Ereignissen (vgl. z.B. Jahresbericht der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft Birmensdorf, WSL; Fraefel & Hegg 2004). Statistisch lassen solche Einträge jedoch keine zuverlässige Aussage für einen längeren, repräsentativen Zeitraum zu. Dies u.a. aus folgenden Gründen:
Im Verlauf des 20. Jahrhundert, vor allem jedoch in den letzten Jahrzehnten, wurden nämlich immer mehr Stürze dokumentiert. Dies weil einerseits das Schadenpotenzial in gefährdeten Gebieten infolge der intensiveren Nutzungen auch im Gebirge bedeutend angewachsen ist und so Stürze, welche früher unerkannt blieben, nun vermehrt registriert wurden. Anderseits führt die Sensibilisierung der Bevölkerung für Naturereignisse und das mediale Interesse insbesondere auch an Felsstürzen dazu, dass eine weit vollständigere Dokumentation von Ereignissen vorhanden ist als früher. So entsteht mancherorts der – nicht selten auch durch suggestive Fragen ausgelöste – Eindruck, dass in den «letzten Jahren» eine Häufung von Ereignissen stattgefunden hat, die von verschiedener Seite auf die Klimaerwärmung zurückgeführt wird. Bei einer allfälligen Statistik der Häufigkeit müsste zudem berücksichtigt werden, dass die in den letzten Jahren und Jahrzehnten neu erstellten Steinschlagschutzbauten kleinere Sturzereignisse auffangen, welche früher registriert wurden.
Die obige Frage der Häufung kann somit nicht schlüssig beantwortet werden. Sie soll deshalb von einem andern Ansatz her angegangen werden: Es ist bekannt, dass die bisherigen Klimavariationen bzw. -perioden mit dem entsprechenden jeweiligen Niederschlagsverhalten immer auch zu einer markanten Veränderung des Klimas in den einzelnen Jahreszeiten geführt hat. Und so stellt sich die Frage, ob sich in diesen vier Jahreszeiten eine anteilsmässige Veränderung von Felssturzereignissen feststellen lässt bzw. ob eine Korrelation mit diesen Klimaperioden besteht. Ziel der Beantwortung dieser Frage ist es somit aufzuzeigen, ob sich in einzelnen klimatisch unterscheidbaren Langzeitperioden Tendenzen zu einer Veränderung der Ereignisse innerhalb der vier Jahreszeiten nachweisen lassen.

3.2 Klimaperioden

Aus den bekannten Klimaaufzeichnungen der vergangenen Jahrhunderte bzw. des 20. Jahrhunderts im Alpenraum (Pfister 1999, Wanner et al. 2000) wurden für die vorliegende Studie folgende Klimaperioden ausgewählt (vgl. auch Fig. 3):
– 1500–1900: Generell kühl, mit zwei Gletschervorstössen innerhalb der so genannten Kleinen Eiszeit; grosse Schwankungen beim Niederschlagsverhalten.
– 1901–1950: Allmählich wärmer; tendenziell vermehrte Herbst- und Winterniederschläge; «warm».
– 1951–1980: Rückgang der Temperaturen mit generell kalten Wintern; Zunahme der Winterniederschläge; «kalt».
– 1981–2004: Kontinuierlicher, z.T. markanter Temperaturanstieg; Zunahme der Herbst- u. Winterniederschläge; «warm»; 1995–2004: «sehr warm».

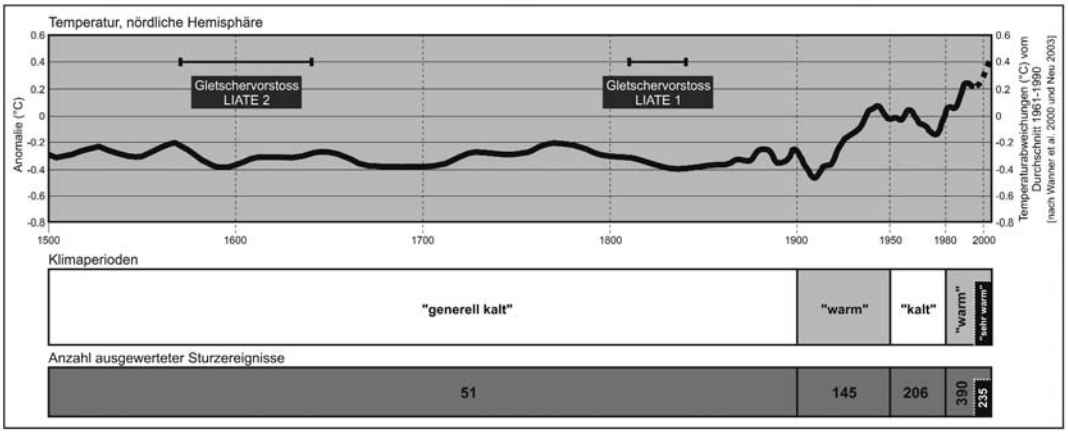


Fig. 3: Ausgewählte Klimaperioden 1500–2004 mit Anzahl der jeweils ausgewerteten Sturzereignisse.

Detailliertere Angaben über das Klima in den ausgewählten Perioden sind in den nachfolgenden Kapiteln zu finden.

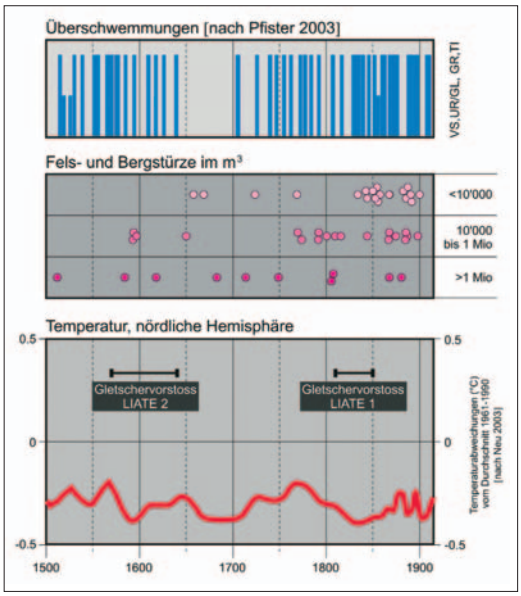


Fig. 4: Vergleich Sturzereignisse und Überschwemmungen (schwere bzw. extreme Ereignisse) in den Kantonen Wallis, Uri, Glarus, Graubünden und Tessin (nach Pfister 1999 und 2003). Der Temperaturverlauf der nördlichen Hemisphäre ist gemäss IPCC (nach Neu 2003) und die Gletschervorstösse nach Wanner et al. (2000) aufgetragen.

3.3 Sturzereignisse

Um die Frage der Korrelation zwischen Jahreszeit und Anzahl Sturzereignisse in den einzelnen Klimaperioden beantworten zu können, wurden rund 800 Einzelereignisse gesammelt und diese nach Jahreszeit und Kubatur sortiert. Auf eine weitere Zuteilung nach Ursachen der einzelnen Stürze, z.B. in Bezug auf meteorologische Verhältnisse, wurde verzichtet, weil in sehr vielen Fällen keine oder nur unzureichende Angaben zur Verfügung standen. Die Unterlagen stammen zu rund der Hälfte aus den Katastereinträgen der Abteilung Naturgefahren des Kantons Bern (StorMe-Daten), aus Archiven privater Gutachterbüros (Kellerhals + Haefeli AG, Dr. T. Schneider, Dr. H. Furrer, Dr. R.U. Winterhalter), aus den Ereigniskataster der BLS Lötschbergbahn AG und einzelner Gebiete der Innerschweiz (Axenstrasse, Kanton Uri) sowie aus der Literatur (z.B. Heim 1932) bzw. von diversen Publikationen. Fast alle Sturzereignisse stammen von der Alpennordseite (inkl. Wallis). Die meisten Ereignisse wurden registriert bzw. dokumentiert, weil sie Menschen, Siedlungen und Infrastrukturanlagen (Strassen, Bahnen etc.) betrafen.

Eine Auswertung der Sturzereignisse zeigt, dass rund die Hälfte der Stürze Kubaturen von <10 m³ Fels betrafen (Fig. 5). Die jahres-

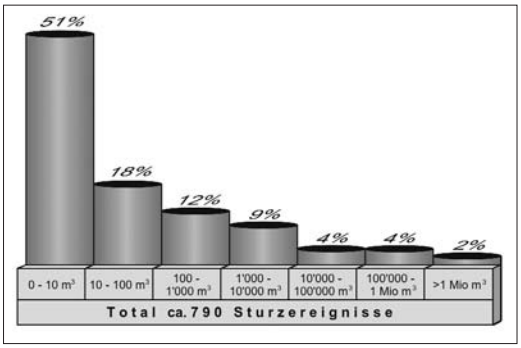


Fig. 5: Statistik der ausgewerteten Sturzereignisse 1500–2004 in Bezug auf Kubaturen.

zeitliche Sortierung ergab, dass die kleineren Ereignisse tendenziell eher im Winter und Frühling auftraten und die grösseren Stürze vorwiegend im Sommer und Herbst zu verzeichnen waren (Fig. 6).

3.4 Auswertung 1500 bis 1900

Das Klima der Periode zwischen 1500 und 1900 kann generell als eher kühl beschrieben werden (Kleine Eiszeit zwischen 1300 und 1850), wobei zwei grössere Eisvorstösse charakteristisch waren, welche in Wanner et al. (2000) als LIATE 1 und 2 («Little Ice Age Type Events») bezeichnet werden (vgl. Fig. 4). Das Niederschlagsverhalten zeigte generell eher starke Schwankungen, wobei bis 1750 überdurchschnittliche Sommer- und eher geringe Frühlingsniederschläge zu verzeichnen waren (Pfister 1999).
Der aus der Fig. 4 ersichtliche Vergleich zwischen Sturzereignissen und schweren bzw. extremen Überschwemmungen der letzten Jahrhunderte (Pfister 1999 und 2003) ergibt, dass eine Korrelation nicht zwingend ist. Während in der ersten Kaltphase (Gletschervorstoss LIATE 2; 1570–1640) und vor allem in der anschliessenden Erwärmung Überschwemmungen und Stürze selten sind, ist während der zweiten Kaltzeit (LIATE 1; 1810–1840) und in der anschliessenden Warmphase eine Zunahme bzw. eine Häufung sowohl von Überschwemmungen wie

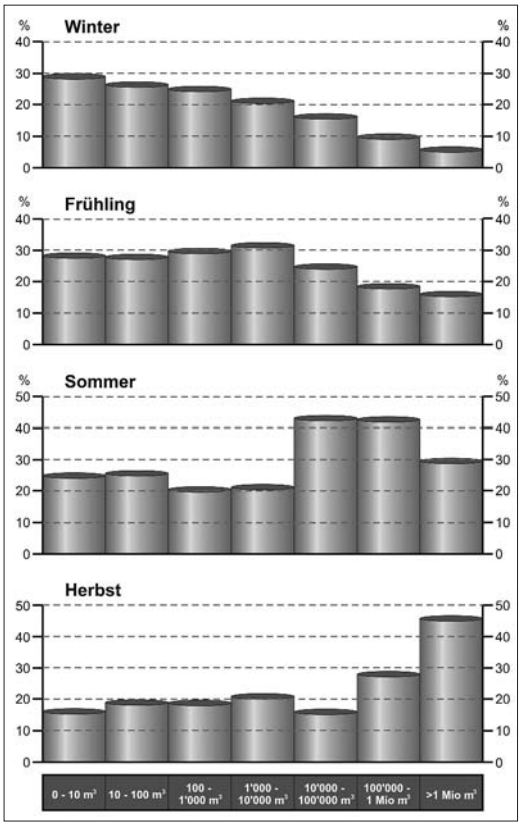


Fig. 6: Statistik der ausgewerteten Sturzereignissen 1500–2004 in Bezug auf Jahreszeiten.

auch von Stürzen erkennbar.
Der Vergleich der 51 vorgefundenen Sturzereignisse – meist sind es grössere, historisch gut dokumentierte Stürze – mit den für diesen Zeitraum von Pfister (1999) aufgezeichneten Niederschlagsvariationen in den einzelnen Jahreszeiten zeigt, dass diese Stürze kaum mit länger dauernden, sehr niederschlagsreichen Perioden verknüpft werden können (Fig. 7). Das heisst, historisch bekannte, lang anhaltende Feuchtperioden – sei es im Winter, Frühling, Sommer oder im Herbst – führten im erwähnten Zeitabschnitt nicht zwangsläufig zu einem bedeutenden Sturzereignis bzw. zu einer Häufung von solchen. Einschneidende Ereignisse, wie z.B. der Bergsturz von Goldau im September des Jahres 1806, können somit nicht mit generell nassen Klimaperioden verknüpft werden,

sondern sind vielmehr als Einzelereignisse auf Grund von ausserordentlichen Niederschlägen zu betrachten. Auffallend ist im Übrigen, dass die meisten Bergstürze (Kubatur >1 Mio m³) im Herbst zu verzeichnen waren (vgl. auch Fig. 6), wobei, wie die Unterlagen zeigen, der Monat September «bevorzugt» wurde.

3.5 Auswertung 1901 bis 2004

Allgemeines zum Klima im 20. Jahrhundert

Das Klima im 20. Jahrhundert kann zusammenfassend wie folgt charakterisiert werden: Die Durchschnittstemperaturen stiegen auf der Alpennordseite um ca. 1,1°C an (global um ca. 0.6°C; vgl. auch Wanner et al. 2000). Aus den Niederschlagsdaten geht hervor, dass die Niederschläge im Winter in den letzten 100 Jahren statistisch um rund 20 bis 30%, örtlich sogar um über 60% zunahmen, wobei diese Zunahme in erster Linie auf intensive Niederschläge zurückzuführen ist (Frei & Schär 2001, Frei 2003, Schmidli & Frei in Vorb. und Fig. 9). Als intensive Niederschläge werden solche Ereignisse bezeichnet, die im Mittel alle 30 Tage auftreten; die entsprechende Niederschlagsmenge beträgt dabei auf der Alpennordseite – je nach Station – zwischen 15 und 23 mm/Tag (Frei & Schär 2001). Eine ähnliche, wenn auch leicht geringere Zunahme gab es bei den Herbstniederschlägen, wobei auch hier die intensiven Niederschläge massgeblich dafür verantwortlich waren (Fig. 10). Das Niederschlagsverhalten im Frühling und Sommer hat sich zwischen 1900 und 2000, auch bezüglich der intensiven Niederschläge, kaum verändert (Fig. 9 und 10). Eine Tendenz über eine Zunahme von starken Niederschlägen (alle 100 Tage auftretend; ca. 24 bis 37 mm/Tag) oder extremen Niederschlägen (jährlich auftretend; ca. 34 bis 53 mm/Tag) ist statistisch im letzten Jahrhundert auch bezüglich Jahreszeiten nicht eindeutig erkennbar (Frei & Schär 2001, Frei 2003). Allerdings nahm gemäss Courvoisier

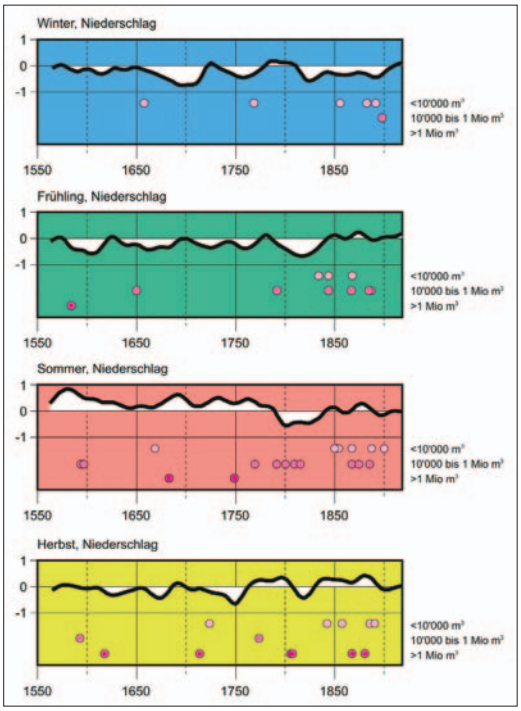


Fig. 7: Vergleich Sturzereignisse und Niederschlagsverhalten in den vier Jahreszeiten zwischen 1550 und 1900. Die Niederschlagsverhältnisse gelten für die Niederungen der Alpennordseite. Werte von +1 stehen für nasse, Werte von -1 für trockene Bedingungen gegenüber der Referenzperiode 1901–1960 (geglättete Kurve; nach Pfister 1999, verändert gemäss Wanner et al. 2000).

(1998 und persönliche Mitteilung 2004) die Anzahl von seltenen extremen Niederschlagsereignissen mit ≥70 mm/Tag seit 1976 massiv zu, und zwar von ca.10 bis 20 Ereignissen pro Jahrzehnt im Zeitraum zwischen 1900 und 1976 auf 35 bis 38 Ereignisse pro Jahrzehnt zwischen 1976 und 2000. Gemäss persönlicher Mitteilung von H. W. Courvoisier (2004) ist die massive Zunahme dieser Starkniederschläge in erster Linie auf Sommer- und Herbstereignisse (untergeordnet auch auf Frühlingsereignisse) zurückzuführen, während die Anzahl im Winter im 20. Jahrhundert praktisch gleich geblieben ist.

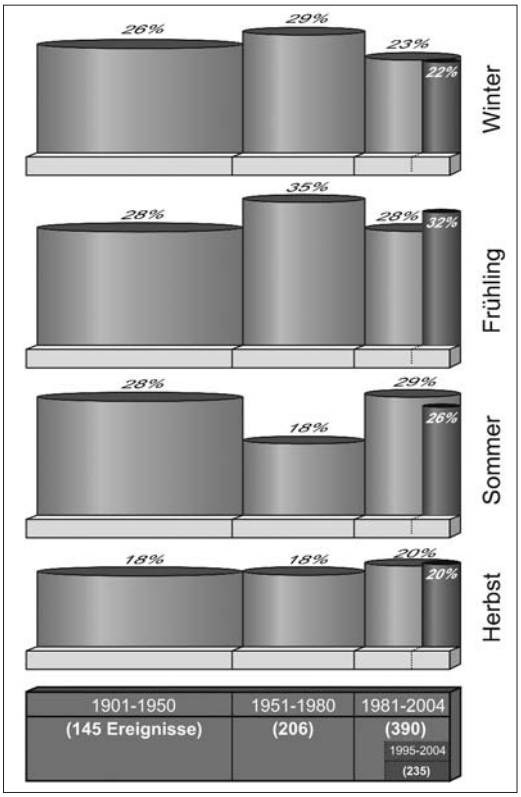


Fig. 8: Jahreszeitliche Verteilung der Sturzereignisse in den Klimaperioden 1901–1950 («warm»), 1951-1980 («kalt») und 1981-2004 («warm»).

Periode 1901 bis 1950 («warm»)

Die Periode 1901 bis 1950 wird witterungsmässig charakterisiert durch einen kontinuierlichen Temperaturanstieg mit einer Zunahme der Niederschläge im Herbst und Winter. Die Auswertung der insgesamt 145 Sturzereignisse zeigt, dass im Winter, Frühling und Sommer jeweils ähnlich viele Sturzereignisse zu verzeichnen waren (26% im Winter, je 28% im Frühling und Sommer), während der Anteil der Stürze im Herbst unter 20% lag (Fig. 8).

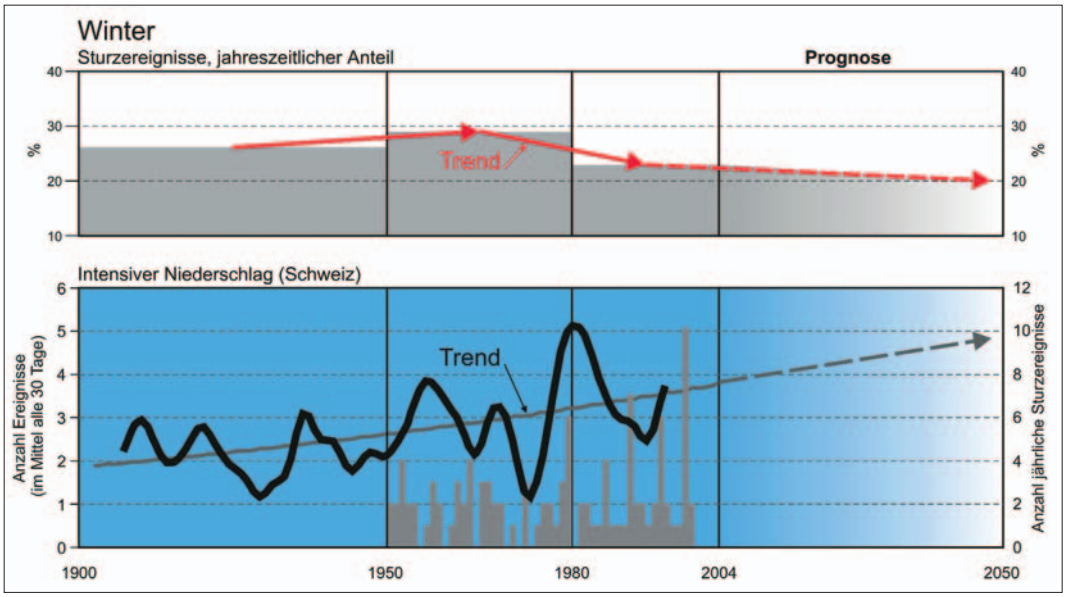
Periode 1951 bis 1980 («kalt»)

Die Periode 1951 bis 1980 zeigt einen generellen Rückgang der Temperaturen mit kalten Wintern. Tendenziell stiegen die Niederschläge im Winter an (Schnee bis in tiefe Lagen), während die Frühlingsniederschläge eher zurückgingen. Die Auswertung von 206 Ereignissen ergibt, dass der Anteil von Winterstürzen anstieg (Fig. 8). Dies kann mit den kältebedingten Felsbewegungen (Öffnung der Klüfte etc.) sowie evtl. auch mit vermehrten Frost-Tau-Wechseln erklärt werden. Der Anteil der Ereignisse im Frühling nahm gegenüber der vorhergehenden Klimaperiode trotz der tendenziell geringeren Niederschläge deutlich auf 35% zu. Dies dürfte auf den Abbau der kältebedingten Eishaftung in den Klüften, auf die hohen Kluftwasserdrücke während der Schneeschmelze und die in dieser kälteren Klimaperiode generell auch im Frühjahr vermehrt auftretenden Frost-Tau-Wechsel zurückzuführen sein. Während die Herbstereignisse anteilsmässig praktisch gleich blieben, ging der Anteil an Sommerstürzen deutlich von 28% auf 18% zurück (Fig. 8).

Ein Vergleich der Anzahl von intensiven Niederschlagsereignissen (alle 30 Tage auftretend; registriert an insgesamt 38 Stationen) in den Herbst- und Wintermonaten einzelner Jahre – d.h. in denjenigen Jahreszeiten, in welchen tendenziell vermehrt solche Niederschläge festgestellt werden – mit der Anzahl Felssturzereignissen in den gleichen Jahreszeiten ergab keine zwingende Übereinstimmung (Fig. 9 und 10). Dies zeigt, dass die Intensität solcher Ereignisse (15–23 mm/Tag) häufig nicht für eine Sturzauslösung genügt (was durch Beobachtung und Dokumentation bestätigt wird), sondern dass es dafür starke, extreme oder langandauernde Niederschläge braucht. Für solche Ereignisse ist jedoch keine verlässliche Aussage über Trends im 20. Jahrhundert möglich (Frei 2003).

Periode 1981 bis 2004 («warm»)

Die Periode 1981 bis 2004 ist im Einzelnen charakterisiert durch einen kontinuierlichen, markanten Temperaturanstieg und eine weitere Zunahme der Herbst- und Winterniederschläge, insbesondere auch der



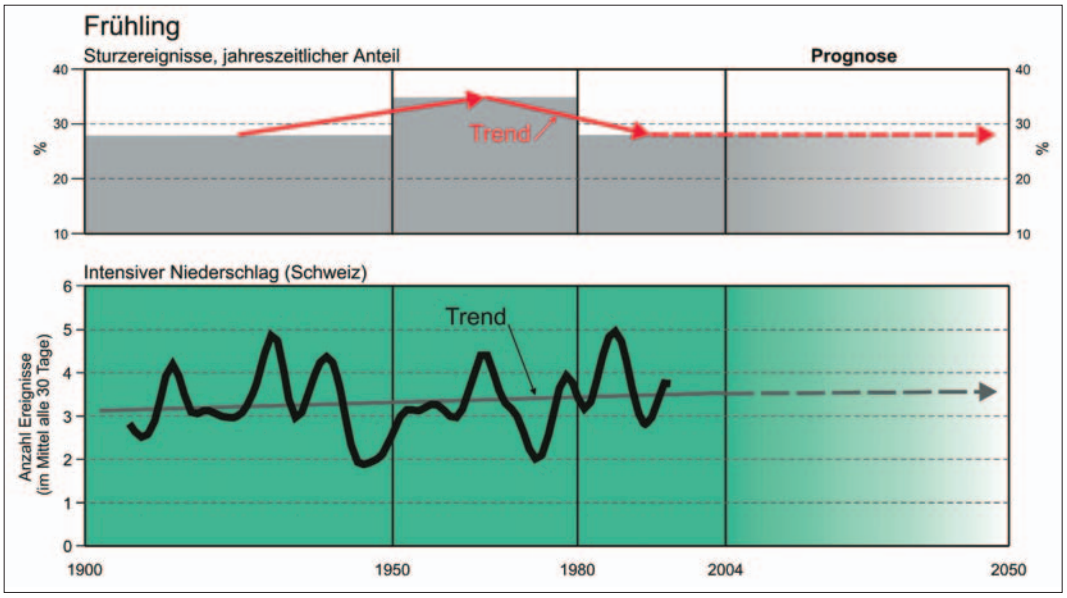
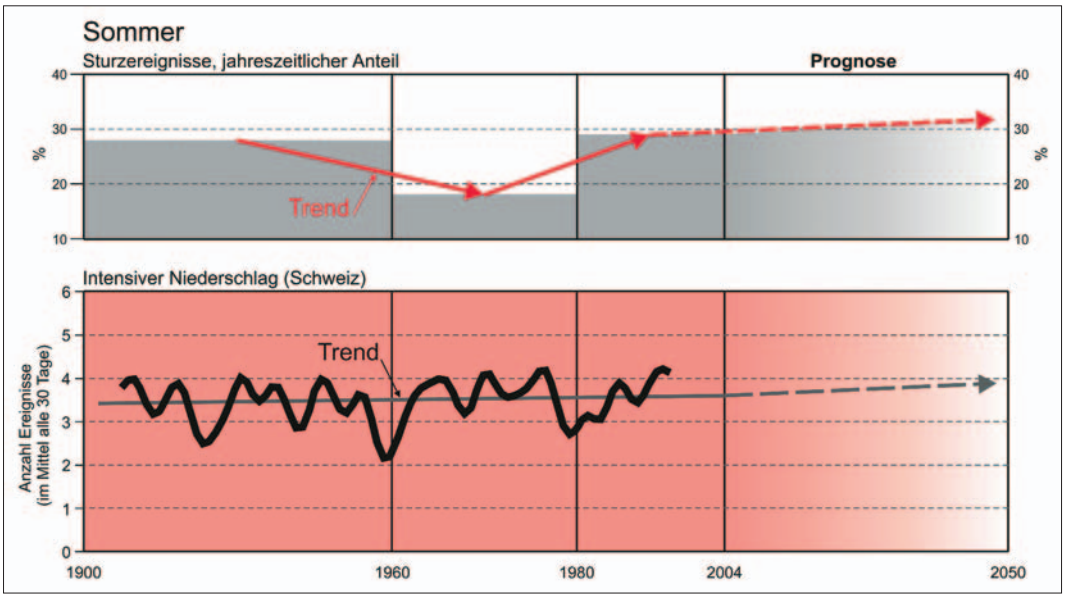


Fig. 9: Jahreszeitliche Verteilung (Winter und Frühling) der Sturzereignisse in den Klimaperioden 1901–1950 («warm»), 1951–1980 («kalt») und 1981–2004 («warm») im Vergleich zur Entwicklung von intensiven Niederschlägen (gemäss Schmidli & Frei in Vorb.) inkl. Prognose für die nächsten 50 Jahre. Für den Winter wurde zusätzlich die Anzahl der jährlichen Sturzereignisse zwischen 1950 und 2000 aufgetragen.



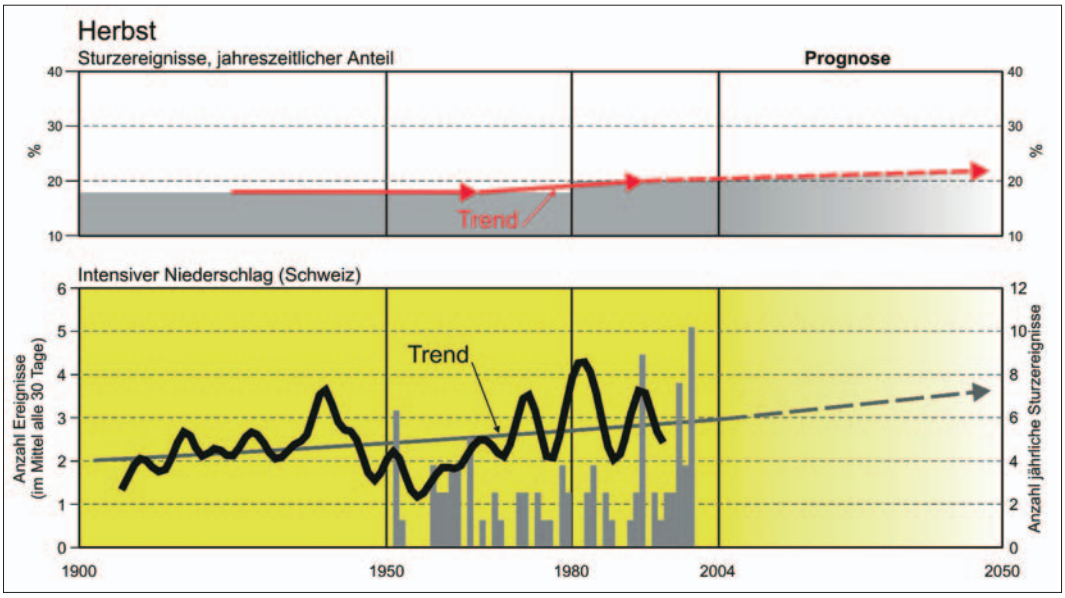


Fig. 10: Jahreszeitliche Verteilung (Sommer und Herbst) der Sturzereignisse in den Klimaperioden 1901–1950 («warm»), 1951–1980 («kalt») und 1981–2004 («warm») im Vergleich zur Entwicklung von intensiven Niederschlägen (gemäss Schmidli & Frei in Vorb.) inkl. Prognose für die nächsten 50 Jahre. Für den Herbst wurde zusätzlich die Anzahl der jährlichen Sturzereignisse zwischen 1950 und 2000 aufgetragen.

intensiven Niederschläge. Die Auswertung von 390 Sturzereignissen zeigte nun, dass der Anteil von Winterereignissen gegenüber der Vorperiode trotz weiter ansteigenden Niederschlagsmengen erstaunlicherweise von 29% auf rund 23% zurückgegangen ist (Fig. 8). Dies ist erklärbar mit einer Abnahme von kältebedingten Felsbewegungen sowie auch von sturzauslösenden Frost-Tau-Wechseln. Nimmt man aus der Periode 1981 bis 2004 das Zeitfenster 1995 bis 2004 («sehr warm») mit rund 235 dokumentierten Ereignissen, so stellt man fest, dass in diesem Zeitraum der Anteil der Winterstürze praktisch gleich tief geblieben ist (22%). Die Sommerereignisse stiegen in der Periode 1981 bis 2004 anteilsmässig auf rund 30% an, gingen jedoch im letzten, sehr warmen Jahrzehnt tendenziell wieder etwas zurück. Aufgrund der Ereignisdokumentation ist der höhere Anteil von Sommerstürzen nur sehr untergeordnet auf eine vermehrte Aktivität infolge des Aufschmelzens des Permafrostes zurückzuführen (vgl. auch Kapitel 4.4), sondern in erster Linie auf die, in dieser wärmeren Periode seit 1976 häufiger auftretenden, extremen Starkniederschlagsereignissen (≥70 mm/ Tag; vgl. oben).

Fazit

Die generelle Erwärmung im 20. Jahrhundert mit einer deutlichen Zunahme von Winterniederschlägen hat tendenziell nicht zu einem entsprechend höheren Anteil von Felsstürzen in den Wintermonaten geführt. Im Gegenteil: In dieser Jahreszeit wurde in den letzten 24 bzw. 10 Jahren sogar anteilsmässig ein Rückgang der Ereignisse festgestellt. Auf der andern Seite war in der Periode mit tendenziell eher kalten Wintern (1951 bis 1980) ein erhöhter Anteil von Sturzereignissen in den Wintermonaten sowie im Frühling zu verzeichnen. Der grössere Anteil von Sommerereignissen seit 1981 dürfte tendenziell auf eine Zunahme von seltenen extremen Niederschlagsereignissen infolge der temperaturbedingten Erhöhung des Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre zurückzuführen sein.

Generell zeigt die Auswertung der rund 800 Ereignisse, dass eine Klimaänderung einen Einfluss auf die Häufigkeit von Sturzereignissen innerhalb der einzelnen Jahreszeiten hat. Ob die in den letzten rund 25 Jahren immer deutlicher werdende Klimaerwärmung mit einer allgemeinen Häufigkeitszunahme von Felsstürzen verbunden ist, wie dies vielfach behauptet wird, kann mit diesen Untersuchungen nicht beantwortet werden. Aufgrund der jahreszeitlichen Veränderungen der Stürze und der von den meteorologischen Verhältnissen abhängigen Sturzmechanismen muss dies jedoch bezweifelt werden.

4. Eine provisorische Prognose

4.1 Allgemeines

Gemäss den Klimaszenarien des Geographischen Institutes der Universität Bern (AG NAGEF 2002, Wanner et al. 2000) ist in den nächsten 50 Jahren mit einem Temperaturanstieg auf der Alpennordseite von durchschnittlich ca. 1 bis max. 3°C zu rechnen. Aufgrund der weiteren Erwärmung der Atmosphäre und der entsprechenden Zunahme des Wasserdampfgehaltes wird generell auch eine weitere Zunahme der mittleren Niederschlagsintensität prognostiziert, welche jedoch je nach Jahreszeit sehr unterschiedlich ist. Die für die nächsten 50 Jahre geltenden Prognosen – in den nachstehenden Kapiteln noch etwas detaillierter aufgeführt – stellen die Abweichung vom Mittel der Jahre 1901–2000 dar. In den nächsten 50 Jahren ist auch eine Veränderung des Niederschlagsverhaltens zu erwarten. Dabei sind die diesbezüglichen Klimaszenarien für die Niederschläge je nach Jahreszeit unterschiedlich: Für die Herbst- und Wintermonate wird eine Zunahme der Niederschläge um rund 5 bis 20% prognostiziert, während für die übrigen Jahreszeiten keine wesentlichen

Veränderungen bei den Niederschlägen zu erwarten sind (AG NAGEF 2002, Wanner et al. 2000).

4.2 Winter

Für die Wintermonate wird neben dem merkbaren Temperaturanstieg in den nächsten 50 Jahren eine weitere Zunahme der Niederschläge von bis zu 20% vorausgesagt (AG NAGEF 2002; vgl. Fig. 9). Diese Zunahme ist in erster Linie auf vermehrte intensive Niederschläge im Rahmen von Wärmeeinbrüchen zurückzuführen. Weil in diesen Monaten zudem die Verdunstung generell gering ist, kann vermehrt Wasser in die Klüfte und Spalten eindringen, was grundsätzlich für Sturzereignisse förderlich ist. Auf dieser Grundlage wurde deshalb für die nächsten Jahrzehnte von verschiedenen Seiten eine (weitere) Zunahme von Felsstürzen in den Wintermonaten als Folge der klimatischen Veränderungen prognostiziert. Diese Aussage steht jedoch im Widerspruch zur Erkenntnis aus der historischen Auswertung der Sturzereignisse im durch den Klimawandel ebenfalls bereits stark tangierten 20. Jahrhundert sowie auch der eingangs in Kapitel 2 beschriebenen felsmechanischen Prozesse im Winter (je kälter desto grösser die Gesteinskontraktionen bzw. die Deformationen bei den Kluftausweitungen).
Die prognostizierten wärmeren Temperaturen im Winter führen somit tendenziell zu einer Abnahme von kältebedingten Felsbewegungen und somit, wie die Sturzauswertungen im letzten Jahrhundert gezeigt haben, tendenziell zu einer weiteren Abnahme von Stürzen, welche Menschen, Siedlungen und Infrastrukturanlagen gefährden. Die im Winter vermehrt auftretenden Intensivniederschläge sind grundsätzlich einer Felsinstabilität förderlich, doch genügen erfahrungsgemäss diese im Mittel alle 30 Tage auftretenden Niederschlagsmengen vielfach nicht für die Auslösung von Felsstürzen. Extreme Starkniederschläge waren in den letzten 25 Jahren im Winter trotz der Erwärmung nicht häufiger als früher (Courvoisier; persönliche Mitteilung 2004). Anzeichen, dass sich dies in naher Zukunft ändern wird, bestehen keine. Die im Winter auftretenden Wärmeeinbrüche werden somit kaum zu einer statistisch relevanten Häufigkeitszunahme von Stürzen beitragen und somit Einzelereignisse bleiben.
Fazit: In den Wintermonaten ist bei der prognostizierten Klimaentwicklung tendenziell eher mit einer weiteren Abnahme von Stürzen zu rechnen (Fig. 9).

4.3 Frühling

Für den Frühling werden etwa ähnliche Niederschlagsmengen wie in den letzten 100 Jahren prognostiziert (Fig. 9). Infolge der wärmeren Temperaturen wird auch der Frost-Tau-Wechsel z.B. im Monat März generell von geringerer Bedeutung.
Fazit: Die Häufigkeit von Stürzen im Frühling dürfte tendenziell in einem ähnlichen Rahmen bleiben wie bisher (Fig. 9).

4.4 Sommer

Für den Sommer werden für die nächsten 50 Jahre durchschnittlich ähnliche bis leicht höhere Niederschlagsmengen wie in den letzten 100 Jahren prognostiziert (Fig. 10). Aufgrund der weiteren Erwärmung der Atmosphäre und der entsprechenden Zunahme des Wasserdampfgehaltes kann allerdings eine weitere (der bereits seit 1976 beobachteten) Zunahme von Ereignissen mit seltenen, extremen Niederschlägen (≥70 mm/Tag) erwartet werden, was Felsstürzen förderlich ist.
Kaum einen Einfluss auf die Häufigkeit im Gebiet von Siedlungen und Infrastrukturanlagen werden Permafrost bedingte Stürze haben. Die generell höheren Jahrestemperaturen führten zwar in den letzten 25 Jahren dazu, dass das Thema Permafrost vermehrt in den Blickpunkt des Interesses – auch der Medien – gelangte und einzelne Prognostiker eine grosse Gefährdung durch Felsstürze

voraussagten. Das Auftauen des Permafrostes ist allerdings ein langsamer, schleichender Prozess, der nicht nur abhängig ist von einem heissen Sommer, sondern auch von anderen Faktoren wie z.B. der Mächtigkeit der Schneedecke im Winter. Zudem spielt der Permafrost nur in Höhen über ca. 2'500 m ü. M. eine Rolle, also in Gebieten, wo Stürze kaum Siedlungen gefährden und höchstens für exponierte Verkehrswege von Bedeutung sind. Auch wenn im trockenen und heissen Sommer 2003, z.B. in einzelnen Nordwänden der Schweizer Alpen, vermehrt Felsstürze festgestellt wurden, so gilt es doch festzuhalten, dass in «normalen» Sommern mit z.B. starken Gewitterregen oder gelegentlichen nasskalten Wetterlagen Stein- und Blockschlag wie auch Felsstürze generell eine grössere Gefährdung darstellen als Stürze infolge Auftauen des Permafrostes. Letzteres führt allerdings zu einer erhöhten Gefährdung von Siedlungen durch Murgänge. Zu erwähnen ist zudem, dass das Auftauen des Permafrostes bei jeder längeren Erwärmungsphase aufgetreten ist, z.B. bei den verschiedenen früheren Warmphasen seit der letzten Eiszeit oder, was für die vorliegende Auswertung von Sturzereignissen nicht unbedeutend ist, auch während der Erwärmung im 20. Jahrhundert zwischen 1901 und 1950, als sich die Permafrostgrenze (und auch die Gletscher) noch in einer tieferen Lage und somit näher den Siedlungen befand.
Fazit: Die Häufigkeit von Sturzereignissen im Sommer wird auch in den nächsten 50 Jahren, unter Berücksichtigung der üblichen Witterungsschwankungen, im bisherigen Rahmen liegen, mit einer tendenziellen Zunahme infolge von vermehrten, meist jedoch nur lokal auftretenden extremen Starkniederschlägen (Fig. 10).

4.5 Herbst

Für den Herbst wird eine weitere leichte Zunahme von 5 bis 10% der Niederschlagsmengen prognostiziert (AG NAGEF 2002; Fig. 10). Diese Zunahme dürfte u.a. auch mit vermehrt auftretenden intensiven bis starken Niederschlagsereignissen aufgrund der Aufheizung der Atmosphäre in den Sommermonaten verbunden sein (vgl. auch die Zunahme von extremen Starkniederschläge ≥70 mm/Tag seit 1976; Kapitel 3.5). Die bereits in den letzten 100 Jahren gemessene Zunahme der Herbstniederschläge (inkl. Intensivniederschläge) hat anteilsmässig zu etwas mehr Sturzereignissen in dieser Jahreszeit geführt, so dass sich diese Tendenz fortsetzen dürfte. Auf der andern Seite ist bei einer Temperaturerhöhung eher mit weniger Frost-Tau-Wechseln im Spätherbst zu rechnen.
Fazit: Tendenziell wird eine leichte Zunahme von Sturzereignissen in den Herbstmonaten erwartet (Fig. 10).

4.6 Schlussbemerkungen

Die Kenntnisse der meteorologischen bzw. klimatologischen Auswirkungen auf die Sturzprozesse und die Auswertung der gegen 800 Sturzereignisse lassen generell keine Häufigkeitszunahme innerhalb eines Jahreszyklus infolge der Klimaerwärmung erkennen. Es wird deshalb die Prognose gewagt, dass in den nächsten Jahrzehnten diesbezüglich auch keine wesentlichen Veränderungen eintreten werden. Allerdings wird es in diesem Prognosezeitraum auf der Grundlage der heutigen Klimaprognosen weitere jahreszeitliche Verschiebungen der Sturzhäufigkeit geben.
Die vorliegenden Prognosen werden als «provisorisch» betrachtet. Zum einen, weil auch die Klimaprognostiker ihre Prognosen immer wieder verändern oder verbessern, insbesondere was die Niederschlagsvorhersagen für das Gebiet nördlich des Alpenbogens anbetrifft. Zum andern, weil z.B. eine Prognose betreffend einer Zunahme von Sturzereignissen als langfristige, über viele Jahre übergreifende Tendenz zu verstehen ist und durch die bekannten, kleineren oder auch grösseren Witterungsschwankungen (z.B. nasser Sommer 2002, heisser und trockener

Sommer 2003) immer wieder unterbrochen oder scheinbar verfälscht werden kann. Nicht zu unterschätzen ist dabei die Rolle der Medien, welche durch die prominente Darstellung von Felssturzereignissen der Bevölkerung nicht selten eine Zunahme von Sturzereignissen suggerieren, welche statistisch nicht belegt ist bzw. nicht besteht.

Inwiefern die vorliegende provisorische Prognose auch anwendbar ist für Aussagen, welche heute über die Eintretenshäufigkeit von Sturzereignissen im Rahmen von Gefahren- bzw. Risikoanalysen gemacht werden müssen, soll hier offen bleiben. Bekanntlich sind bei diesen Arbeiten Prognosen von Blockschlag- oder Felssturzereignissen für eine Wiederkehrperiode von 30-, 100- und sogar 300-jährlichen Ereignissen gefragt (BUWAL/BWW/BRP 1997). Gerade eine Voraussage von 100- oder 300-jährlichen Ereignissen verlangt nicht nur eine grosse langjährige Erfahrung bei der Feldbeurteilung, sondern auch viel Intuition und eine gehörige Portion Mut. Man kann sich dabei zwar auf gewisse Anhaltspunkte beziehen – z.B. Ausbildung des Trennflächengefüges im potenziellen Ablösungsgebiet, stumme Zeugen, Katastereinträge etc. –, doch ein statistischer Bezug wie z.B. bei Hochwasserprognosen (Niederschlagsdaten) steht nicht zur Verfügung. Berücksichtigt man, dass das Klima in den nächsten 100 bis 300 Jahren weiterhin starken Veränderungen unterworfen sein wird – sei es durch natürliche Schwankungen (vgl. die Klimageschichte der letzten 10'000 oder auch der letzten 500 Jahre!), sei es anthropogen bedingt (CO_2-Gehalt) –, sind Prognosen der Sturzereignisse vor allem für einen Zeitraum von 300 Jahren so spekulativ, dass davon abgesehen werden sollte.

Verdankungen

Ein Dank geht an die Abteilung Naturgefahren des Kantons Bern (H. Buri, J. Häberle) und an die BLS Lötschbergbahn AG (A. Meier, F. Zurbrügg) für die zur Verfügung gestellten Daten von Sturzereignissen sowie an J. Schmidli und C. Frei (ETH Zürich) bzw. H.W. Courvoisier für die Überlieferung der Auswertungen von meteorologischen Daten.

Literatur

AG NAGEF - Arbeitsgruppe Naturgefahren des Kantons Bern 2002: Fakten und Szenarien zu Klimawandel und Naturgefahren im Kanton Bern.

Brasser, J.P. & Gruner, U. 2002: Behebung der Felssturzgefahr bei Innertkirchen durch zwei Grossprengungen. Felsbau 20/5, 195–202.

BUWAL/BWW/BRP 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten (Empfehlungen). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft / Bundesamt für Wasserwirtschaft / Bundesamt für Raumplanung, Bern.

Courvoisier, H.W. 1998: Statistik der 24-stündigen Starkniederschläge in der Schweiz. SMI Rep. 194, MeteoSwiss, Zürich.

Fraefel, M. & Hegg, C. 2004: Unwetterschäden in der Schweiz 2003. Wasser, Energie, Luft, 3/4: 103–109. (Jahresbericht; erscheint seit vielen Jahren immer im Heft Wasser, Energie, Luft; seit wenigen Jahren auch mit einer Dokumentation von wichtigen Sturzereignissen).

Frei, C. 2003: Starkniederschläge. In OcCC Bern: Extremereignisse und Klimaänderung, 61–64.

Frei, C. & Schär, C. 2001: Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. J. Clim., 14, 1568–1584.

Gruner, U. 2001: Felssturzgefahr Chapf-Üssri Urweid. Risikobeurteilung und Gefahrenmanagement. Mitt. Schweiz. Ges. f. Boden- und Felsmechanik 143, 73–80.

Gruner, U. & Ottiger R. 2001: Chronik eines anzukündigenden Felssturzes. 13. Nat. Ing. Geol., Karlsruhe. Sonderband Geotechnik, 11–16. Verlag Glückauf GmbH, Essen.

Heim, A. 1932: Bergsturz und Menschenleben. Vjschr. Natf. Ges. Zürich, 20.

Krähenbühl, R. 2004: Temperatur und Kluftwasser als Ursachen von Felssturz. Bull. angew. Geol. 9/1, 19–35.

Neu, U. 2003: Beobachtete Klimaänderung und Entwicklung des Klimas in der Zukunft. In OcCC Bern: Extremereignisse und Klimaänderung, 16–18.

Pfister, C. 1999: Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496–1995. Haupt Verlag, Bern.

Pfister, C. 2003: Ein Blick auf die letzten 500 Jahre. In OcCC Bern: Extremereignisse und Klimaänderung, 21–24.

Schmidli, J. & Frei, C. (in Vorb.): Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century.

Wanner, H., Gyalistras, D., Luterbacher, J., Rickli, R., Salvisberg, E. & Schmutz, C. 2000: Klimawandel im Schweizer Alpenraum. vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH, Zürich.