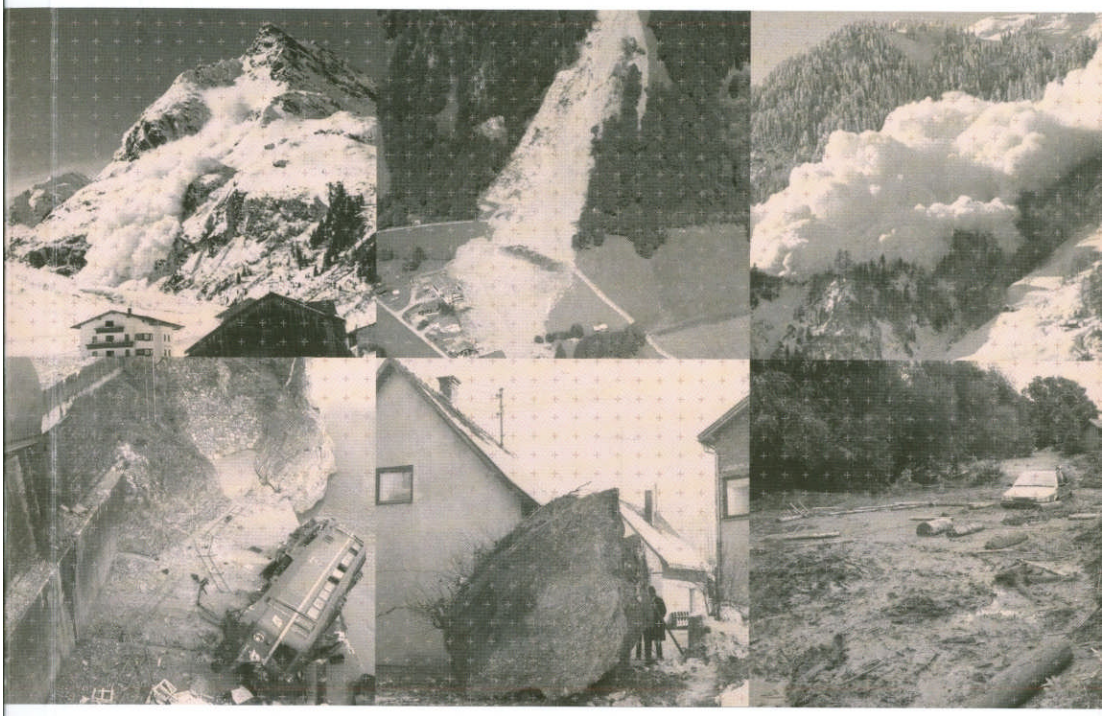
Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren, Massenbewegungen und Lawinen.

Protection of populated territories from floods, debris flow, mass movements, and avalanches.

Protection du territoire contre les crues, le laves torrentilles, le mouvements de masse et les avalanches.

Protezione del territorio da alluvioni, colate detritiche, frane e valanghe.



Conference Proceedings

26-30 May 2008
Dornbirn Vorarlberg Austria

www.interpraevent.at

INTERPRAEVENT
International
Research Society

die.wildbach
und lawinenverbauung

Vol. 2

Seiten 147 - 158

KELLERHALS
+HAEFELI AG
GEOLOGEN - 3011 BERN

Ueli Gruner:

Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse

KLIMATISCHE UND METEROLOGISCHE EINFLÜSSE AUF STURZPROZESSE

CLIMATIC AND METEOROLOGICAL INFLUENCES ON ROCKFALL AND ROCKSLIDES ("BERGSTURZ")

Ueli Gruner [1]

ZUSAMMENFASSUNG

Die klimatischen und meteorologischen Einflüsse auf Sturzprozesse werden einerseits aus historischer, anderseits aus felsmechanischer Sicht beleuchtet. Auswertungen von zahlreichen Sturzereignissen (kleinere Ereignisse bis zu Bergstürzen) ergaben, dass warme Klimaperioden weder zu einer Häufung von Bergstürzen noch zu einer Zunahme von kleineren Ereignissen führten. Bezüglich meteorologischen Einflüssen zeigt sich eine Häufung von kleineren bis mittleren Stürzen im Frühjahr im Zusammenhang mit Frost-Tau-Wechsel, Schneeschmelze und ersten Frühjahrsniederschlägen. Dieses Verhalten von Stürzen kann heute dank präziser automatischen Deformationsmessungen felsmechanisch plausibel erklärt werden: Danach führen kalte Temperaturen im Winter zu einer Entfestigung des Gebirges (Kluftöffnung infolge Gesteinskontraktion), welche bei einem intensiven Frost-Tau-Wechsel im Winter/Frühling noch verstärkt wird. Die Auslösung von Stürzen erfolgt jedoch vielfach erst bei Schneeschmelze bzw. bei den ersten Starkniederschlägen nach der Kälteperiode. Warme Zeiten, auch wenn sie mit Starkregen bzw. lang anhaltenden Niederschlägen verbunden sind, bewirken jedoch bei kleineren bis mittleren Felspartien keinen Bewegungsschub bzw. lösen wenig Sturzereignisse aus.

Key words: Felssturz, Klimaerwärmung, Meteorologische Einflüsse, Frost-Tau-Wechsel

ABSTRACT

Climatic and meteorological influences on rockfall and rockslide events are treated from a historical and a rockmechanical view. The analysis of numerous events indicates, that warm periods do not induce an accumulation of events, neither of rockslides nor of rockfall. On the other hand, an accumulation of rockfall events during spring times seems to be influenced by meteorological conditions such as frequent freezing and thawing cycles, snowmelt and the first intensive precipitations. The historically documented triggering of rockfall and rockslide events is discussed from a rock-mechanical point of view. Due to accurate and automated measurement of displacements in different rock areas, a destabilization and decomposition of rock masses during cold periods can be identified. Warm periods, even if they are associated with intensive or rather extreme precipitation, do not induce displacements of smaller or median rock masses. Large rockfall and rockslide events (over 100'000m^3) however are predominantly influenced by mountain water conditions and thus by precipitation.

Key words: Rockfall, Meteorological Influences, Global Warming, Rockslide

[1] Geschäftsführer KELLERHALS + HAEFELI AG, Kapellenstrasse 22, CH-3011 Bern
(Tel. +41 31 381 90 07, Fax +41 31 381 92 75, E-Mail: ueli.gruner@k-h.ch)

EINLEITUNG

Meteorologische Faktoren und Klimaveränderungen beeinflussen verschiedene Bereiche unserer Umwelt wie z. B. Massenbewegungen. Im Folgenden wird deshalb aus zwei Blickwinkeln untersucht, wie sich diese Faktoren auf Stein- und Blockschläge sowie Fels- und Bergstürze auswirken: Einerseits aus historischer Sicht, indem die meteorologischen und klimatischen Randbedingungen von datierten Stürzen in der jüngeren Vergangenheit analysiert werden. Anderseits werden die felsmechanischen Aspekte der verschiedenen Sturzauslösungen beleuchtet, welche sich u. a. auch auf zahlreiche Messresultate der Praxis wie z. B. automatische Felsüberwachung im Rahmen einer Frühwarnanlage stützen.

BERGSTÜRZE SEIT DER LETZTEN EISZEIT

Klimatische Faktoren

Der Einfluss des Klimas auf die rund 230 bis heute bekannten Bergstürze (> 1 Mio. m^3) in den Alpen wurden in Gruner (2006) eingehend beschrieben. Dabei wurde festgestellt, dass ungefähr die Hälfte dieser Stürze in der ersten Warmphase am Ende der letzten Eiszeit niedergegangen ist, als eine bedeutende Hangentlastung durch den Gletscherrückgang stattfand. Bei den 12 bisher datierten Bergstürzen des Postglazials zwischen 10'000 und 2'000 cal. yBP zeigt sich, dass diese bei unterschiedlichen Klimaverhältnissen stattfanden: Einige der Ereignisse, wie z. B. die Bergstürze von Flims und Kandersteg, ereigneten sich in einem frühen, postglazialen Klimaoptimum, andere dafür während der Kaltphase im Subboreal. Im bekannten Klimaoptimum des Mittelholozäns (Warmzeit) sind bisher jedoch keine Bergstürze datiert worden.

Bei der Analyse der rund 70 historisch bekannten Bergstürze seit 2'000 Jahren, v. a. aber seit dem 15. Jahrhundert, wurde festgestellt, dass während den drei Kaltzeiten der Kleinen Eiszeit zwischen ca. 1300 und 1850 die Sturzereignisse tendenziell etwas weniger häufig waren als in den übrigen Zeiten. Eine der bekanntesten Ausnahmen bildet der Bergsturz von Goldau (1806), der sich mitten in einer kalten Zeitperiode (letzter Gletschervorstoss in der Kleinen Eiszeit) ereignete. Die seit 1850 fortschreitende Erwärmung führte indes über den ganzen Zeitraum gesehen nicht zu einer Zunahme von Ereignissen. Eine unmittelbar nach Ende der Kleinen Eiszeit (ab ca. 1850) festgestellte zwischenzeitliche Zunahme von grossen Sturzereignissen dürfte u. a. auch auf die in diesem Zeitraum ausserordentlich intensiven Niederschläge zurückzuführen sein (Hegg, Vogt 2005).

Meteorologische Faktoren bei historischen Bergstürzen

Der Grund für die Auslösung der rund 70 historischen Bergstürze ist in vielen Fällen gut bekannt, da die Ereignisse von Zeitgenossen häufig detailliert beschrieben wurden. Rund die Hälfte der Bergstürze fand demzufolge nach intensiven bzw. lang anhaltenden Niederschlägen statt (Gruner 2006).

Jahreszeitliche Unterteilung historischer Bergstürze

Die Auswertung der Bergsturzdaten bezüglich der monatlichen Verteilung ergibt, dass in den Sommer- und Herbstmonaten, v. a. zwischen den Monaten Juli und Oktober, eine Häufung von grossen Stürzen stattfand (vgl. Abb.1). Dabei war der September der "bevorzugte" Monat. Das heisst, die Stürze fanden in einem Zeitraum statt, in welchem der Niederschlag in den

Alpen normalerweise als Regen fällt. Der damit verbundene erhöhte Bergwasserdruck wirkt sich destabilisierend auf den Felsverband aus.

STURZEREIGNISSE IN DER VERGANGENHEIT

Klimatische und meteorologische Faktoren

Eine Auswertung von rund 800 Sturzereignissen - die meisten tangierten Siedlungen oder Infrastrukturanlagen - von der Alpennordseite aus den letzten 500 Jahren (Gruner 2004), insbesondere aber aus dem 20. Jahrhundert, ergab, dass in kälteren Klimaperioden wie zum Beispiel zwischen 1950 und 1980 vermehrt Stürze im Winter und Frühjahr aufgetreten sind, während in der warmen Periode zwischen 1900 und 1950 und vor allem in der noch wärmeren Folgeperiode seit 1980 in erster Linie die Winterstürze anteilsmässig geringer waren. Auf der andern Seite zeigten die Untersuchungen auch, dass der Anteil an Sturzereignissen in den Sommermonaten dieser rund 25 sehr warmen Jahren nicht grösser war als in der ebenfalls warmen Periode von 1900 bis 1950 und dass die Sturzaktivität in den wärmsten letzten 10 Jahren sogar zurückging. Bei den analysierten Ereignissen im Zeitraum zwischen 1500 und 1900 wurde zudem keine Korrelation zwischen bekannten Feucht- bzw. Warmperioden (gemäss Pfister 1999) und einer Häufung von Sturzereignissen festgestellt.

Jahreszeitliche Verteilung der Sturzprozesse

Beispiel Kanton Bern (Schweiz)
Es wurden alle zur Verfügung stehenden Sturzereignisse aus dem Kanton Bern zwischen 1980 und 2007 gesammelt und ausgewertet. Die insgesamt über 500 aktenkundigen Ereignisse stammen im Wesentlichen von Katastereinträgen der Abteilung Naturgefahren des Kantons Bern (StorMe-Daten) und der BLS AG (Eisenbahnlinie Lötschberg-Nordrampe) sowie aus Archiven privater Gutachterbüros. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in der Abb. 2 aufgeführt. Daraus geht folgendes hervor:

Auffallend ist eine Häufung der Ereignisse im Spätwinter (Februar) und in den ersten Frühjahrsmonaten (März, April). In diesem Zeitraum finden einerseits ausgeprägte Frost-Tau-Wechsel statt, anderseits bewirkt die Schneeschmelze einen grossen kontinuierlichen Wassereintrag vor allem im Gebirge. In vielen Sturzdokumenten wird auf diesen Faktor als Auslöser hingewiesen. Im Sommer wurde vor allem im August eine etwas erhöhte Sturzaktivität festgestellt. Ursachenanalysen wie auch felsmechanische Hinweise zeigen, dass nur in Ausnahmefällen ein Starkregen dafür verantwortlich war, sondern dass die Auslöser entweder starke Windböen waren, welche bei schweren Bäumen zu einer Entfestigung von Felspartien im Wurzelbereich führten, oder aber Kaltwettereinbrüche im Gebirge mit entsprechendem Frost-Tau-Wechsel. Im Herbst (September bis November) waren die Sturzereignisse vergleichsweise selten, selbst wenn der Herbst sehr nass war.

Beispiel Norwegen
Sandersen et al. (1995) haben die monatliche Verteilung von 235 Felsstürzen in Norwegen ausgewertet (Abb. 1 unten). Daraus geht hervor, dass in den Frühjahrsmonaten März, April und Mai eine erste, eindeutige Häufung auftritt, was auf die Schneeschmelze und auf Frost-Tau-Wechsel zurückgeführt wird. Die Häufung im Herbst (Oktober und November) hat ihre Ursache in den ersten Frost-Tau-Wechseln, welche mit der niederschlagsreicheren Jahreszeit verknüpft sind.

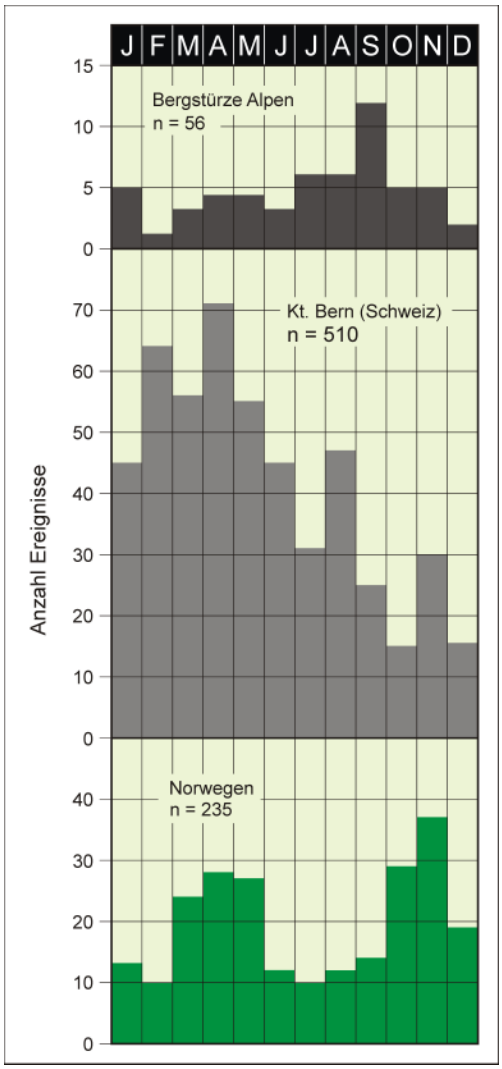


Abb. 1: Verteilung von Sturzereignissen pro Monat:
Oben: Historische Bergstürze seit 2000 Jahren in den Alpen
Mitte: Sturzereignisse im Kt. Bern (Schweiz) 1980 bis 2007
Unten: Sturzereignisse in Norwegen (nach Sandersen et al. 1995)

Fig. 1: Monthly distribution of rockfall and rockslide events:
Above: Rockslides over the last two milleniums in the Alps
Middle: Rockfall events in the Canton of Berne (Switzerland) between 1980 and 2007
Below: Rockfall events in Norway (after Sandersen et al. 1995)

Beispiele Täschgufer (Kt. Wallis, Schweiz) und Schwarzenberg (Kt. Bern, Schweiz)

Mittels dendrochronologischer Studien an Stammscheiben aus bewaldeten alpinen Hängen unterhalb von Felswänden wurde in den letzten Jahren versucht, auf Grund von Baumverletzungen durch Sturzkörper u. a. auch Angaben über den saisonalen Verlauf von Sturzaktivitäten zu erhalten. Das von Stoffel et al. (2005) untersuchte Ausbruchgebiet im Täschgufer (Kt. Wallis, Schweiz) liegt auf einer Höhe von über 2300 m ü. M. Es zeigte sich, dass 88 % der 115 in einem Zeitraum von 25 Jahren (1977 bis 2001) festgestellten Steinschläge in der winterlichen Wachstumsphase zwischen Oktober und Mai stattfanden, wobei der Schwerpunkt in den Monaten April und Mai lag. Die Untersuchung von Perret et al. (2006) am Schwarzenberg (Kt. Bern, Schweiz) ergab ähnliche Resultate: Die Hauptaktivität wurde ebenfalls während der winterlichen Wachstumsphase festgestellt (74%; ca. 300 Ereignisse in den letzten rund 280 Jahren). Der etwas niedrigere Prozentsatz gegenüber dem Täschgufer dürfte auf das mit 1250 bis 1650 m ü. M. deutlich tiefer gelegene und damit im Winter weniger kalte Ausbruchgebiet der Sturzaktivitäten zurückzuführen sein. Auch am Schwarzenberg lag der Schwerpunkt der Aktivität im Frühling. Erstaunlicherweise wurde die Steinschlagaktivität beider Gebiete weder durch starke Sommergewitter noch durch lang anhaltende Niederschläge im Herbst beeinflusst.

FAZIT DER HISTORISCHEN ANALYSE

Aus der historischen Analyse der Bergstürze und der übrigen, kleineren Sturzprozesse kann in Bezug auf die klimatischen und meteorologischen Einflüsse zusammenfassend folgendes Fazit gezogen werden:

Klima:

- Es besteht keine Korrelation zwischen warmen Klimaperioden und grossen Sturzereignissen wie Bergstürzen. Auch die seit 1850 fortschreitende Er wärmung lässt bis heute keine tendenzielle Zunahme von solchen Ereignissen erkennen.
- Kalte Klimaperioden bewirken vermehrt kleine bis mittlere Sturzereignissen im Winter und im Frühling. Warme Perioden hingegen zu keiner Häufung solcher Ereignisse.

Meteorologie:

- Kleinere bis mittlere Sturzereignisse finden zum grösseren Teil im Frühjahr statt. In einem Zeitraum also, in dem nach der kalten Zeit vermehrt Frost-Tau-Wechsel, Schneeschmelze und erste grössere Frühjahrsniederschläge auftreten. Im Herbst (v. a. im Oktober) sind solche Ereignisse hingegen eher selten.
- Im Gegensatz zu den kleineren bis mittleren Ereignissen treten grosse Sturzprozesse wie Bergstürze in den Herbstmonaten deutlich häufiger auf als im Frühling und sind verbunden mit starken bzw. lang anhaltenden Niederschlägen.

METEOROLOGIE UND AUSLÖSUNGSMECHANISMEN BEI STURZPROZESSEN

Der Einfluss der meteorologischen Verhältnisse auf die Auslösungsmechanismen bei Sturzprozessen wird anhand der folgenden Faktoren beschrieben:

- Temperatur
- Niederschlag
- Frost-Tau-Zyklen
- Weitere Faktoren (Winddruck, Permafrost)

Nicht näher eingegangen wird an dieser Stelle auf die verschiedenen denkbaren Ursachen von Stürzen (geologische oder geomorphologische Disposition etc.).

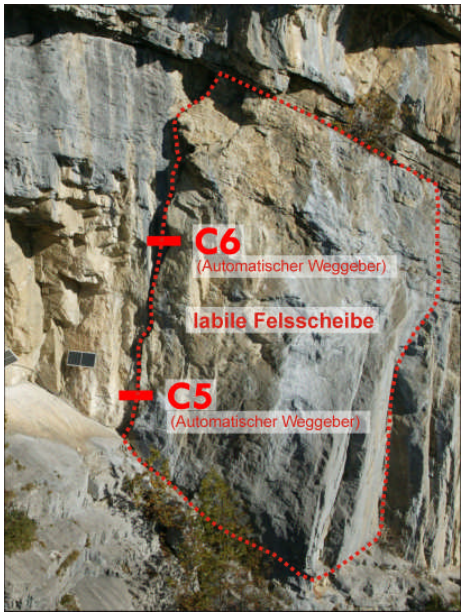


Abb. 2: Labile Felsscheibe (rund 1'000 m^3) am Brünigpass über der Nationalstrasse N 8 (Kt. Bern, Schweiz) mit Lage der automatischen Weggeber C5 und C6

Fig. 2: Unstable rock plate (about 1'000 m^3) near the Brünig Pass above Swiss national road N 8 (canton of Berne, Switzerland) with situation of automatic deformations records of the points C5 and C6

Faktor Temperatur

Kleinere bis mittlere labile Felspartien

Der Mechanismus der Gebirgsentfestigung kann heute dank präziser automatischer Deformationsmessungen gut erfasst werden. Der Vergleich mit den entsprechenden Temperaturaufzeichnungen ergibt für kleinere bis mittlere labile Felspartien und gleichzeitig spröde Gebirgstypen, dass sich die Klüfte und Risse bei kalten Temperaturen infolge Gesteinskontraktion öffnen, während sie bei wärmeren Temperaturen stagnieren oder sich sogar wieder schliessen (vgl. auch Krähenbühl 2004). Je nach Form und Grösse der Felspartie können Tagesschwankungen von bis zu 1 mm auftreten: Als Beispiel dient die mit automatischen Weggebern ausgerüstete, rund 1'000 m^3 grosse Felsscheibe am Brünigpass oberhalb der Nationalstrasse N8 (Kt. Bern, Schweiz; Abb. 2). Die täglichen temperaturbedingten Deformationsschwankungen betragen je nach Jahreszeit bis gegen 1 mm (Abb. 3); die jährlichen Differenzen liegen bei 3 mm (Abb. 4). Auch beim mit gegen 100'000 m^3 bedeutend grösseren Felspaket am Gstryfet Birg über der Eisenbahnlinie Lötschberg-Nordrampe (Kt. Bern, Schweiz) wurden Jahresschwankungen von über 2 mm gemessen (Abb. 5 und 6).

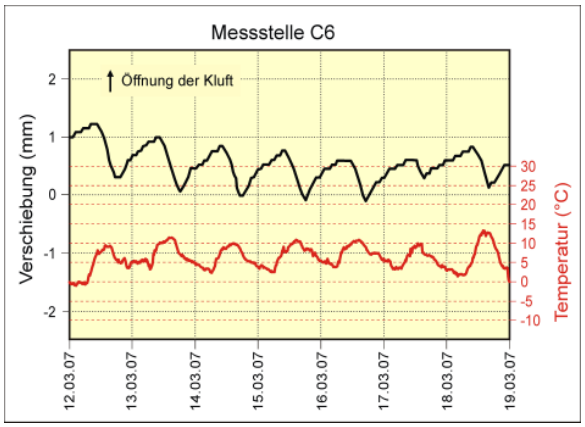


Abb. 3: Aufzeichnung des automatischen Weggebers C6 an einer offenen Kluft an der Felsscheibe am Brünigpass Mitte März 2007. Die temperaturbedingte Tagesdeformation beträgt fast 1mm.

Fig. 3: Automatic deformation record of point C6 at the joint of the rock plate near the Brünig Pass. Deformation due to daily temperature change is almost 1 mm.

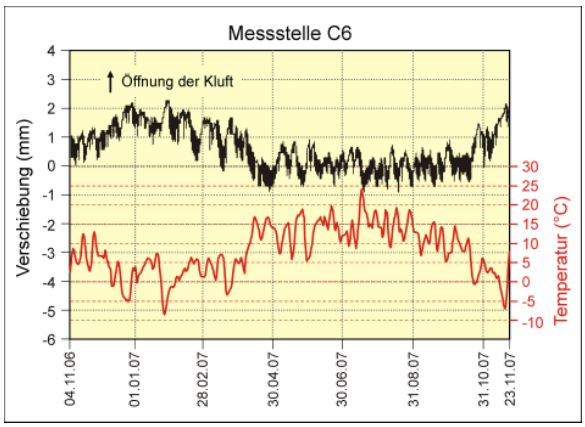


Abb. 4: Aufzeichnungen des automatischen Weggebers C6 an der Felsscheibe am Brünigpass von 2006 bis 2007. Die jahreszeitlich bedingte Deformation beträgt fast 3 mm.

Fig. 4: Automated deformation record of point C6 at the joint of the rock plate near the Brünig Pass. Deformation due to of annual temperature change is almost 3 mm.



Abb. 5: Labiles Felspaket am Gstryfet Birg (ca. 100'000 m^3) oberhalb der Eisenbahnlinie der BLS (Lötschberg-Nordrampe; Kt. Bern, Schweiz)

Fig. 5: Unstable rock mass at Gstryfet Birg (about 100'000 m^3) above the railway line Lötschberg (nothern part; Canton of Berne, Switzerland)

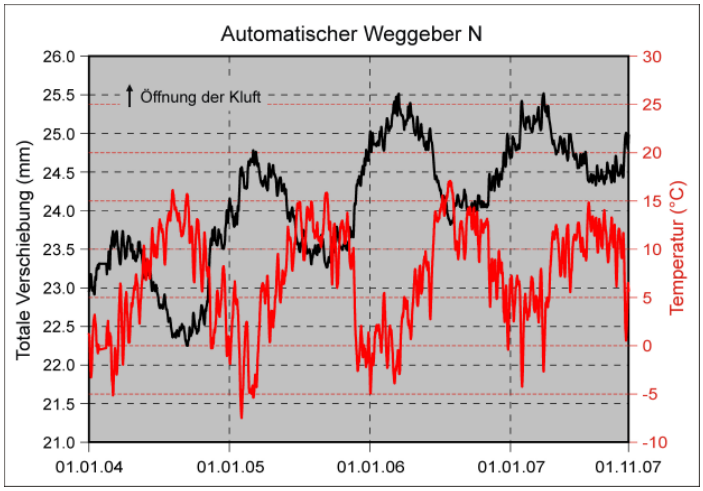


Abb. 6: Aufzeichnung des automatischen Weggebers N am labilen Felspaket vom Gstryfet Birg von 2003 bis 2007. Die jahreszeitlich bedingte Deformation beträgt ca. 2 mm.

Fig. 6: Automated deformation record at point N (unstable rock mass at Gstryfet Birg) between 2003 and 2007. Deformation due to annual temperature change is around 2 mm.

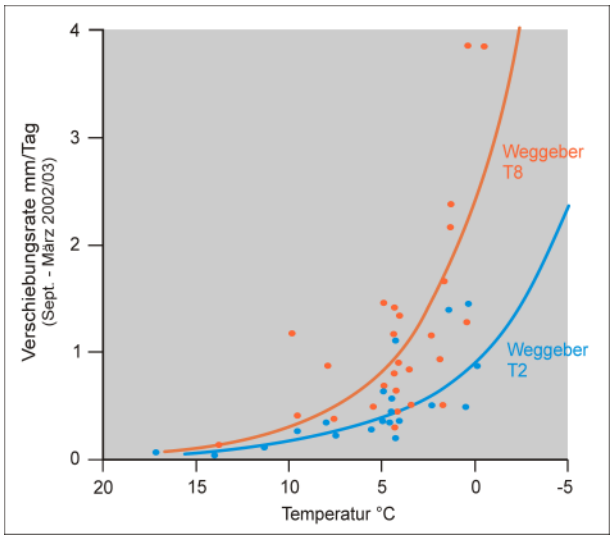


Abb. 7: Der Einfluss der Temperatur auf die Verschiebungsrate verläuft exponentiell (nach Krähenbühl 2004 aus einem Beispiel im Val Infern, Kt. Graubünden, Schweiz).

Fig. 7: The influence of absolute temperature on deformation rate appears to be exponential (after Krähenbühl 2004; example of the Val Infern, Canton of Graubünden, Switzerland)

Die Temperaturschwankungen sind somit für einen zyklischen Prozess verantwortlich, welcher mit z. T. täglich oder jährlich wiederkehrenden Deformationen (Last-Entlastungs-Zyklen) zu einer Zerstörung von Gesteinsbrücken, zu einer Zunahme der Klufttiefe und somit zu einer allmählichen Entfestigung des Gebirges führt. Gemäss Krähenbühl (2004) wird die Deformationsrate bei sinkenden Temperaturen sogar exponentiell grösser (vgl. Abb. 7). Das bedeutet generell, dass bei einer labilen Felspartie der hauptsächliche Bewegungsschub in erster Linie in der kalten Jahreszeit stattfindet. Damit wird der "Reifegrad" einer Felspartie für einen Absturz erhöht. Das Sturzereignis selbst findet jedoch vielfach erst im Frühjahr bei den ersten Wassereinträgen in das Gebirge statt (vgl. unten).

Grössere labile Felspartien

Bei grösseren labilen Felspartien (bis zu potenziellen Bergstürzen von > 1 Mio. m^3) gehen die Deformationen im Winterhalbjahr zurück. Dies zeigte sich z. B. ausgeprägt bei der gegen 250'000 m^3 grossen Felsmasse am Chapf bei Innertkirchen (Kt. Bern, Schweiz; Gruner, Ottiger 2001) oder in etwas weniger ausgeprägtem Ausmass bei der knapp 400'000 m^3 umfassenden Felspartie am Grätli bei Interlaken (Kt. Bern, Schweiz; Keusen 2000). Heim (1932) bezeichnete dieses Verhalten als "Winterschlaf der Berge".

Faktor Wasser (Regen oder Schneeschmelze)

Kleinere bis mittlere labile Felspartien

Der Faktor Wasser spielt grundsätzlich eine wichtige Rolle beim Deformationsschub entlang einer Trennfläche. Allerdings ist hier eine differenzierte Betrachtung notwendig:

Schneeschmelze und die ersten intensiven Niederschläge führen in den Frühlingsmonaten zum Aufbau eines erhöhten Kluftwasserdruckes. Dadurch steigt der Druck auf die Kluft- bzw. auf die potenzielle Ablösefläche. Dies kann zu einem Abbau oder einer Zerstörung von rückhaltenden Kräften wie Gesteinsbrücken oder Verzahnungen führen. Felspartien, welche im Winterhalbjahr infolge kältebedingter Kluftöffnungen einen erhöhten "Reifegrad" bezüglich Absturzgefahr erreicht haben (vgl. oben), sind auf diese Prozesse speziell anfällig. Dies erklärt auch die in diesem Zeitraum stark erhöhte Stein- und Blockschlag- sowie Felssturzaktivität.

Ist dieser erste, ausserordentliche Eintrag von Wasser in das Gebirge ohne Sturzereignis überstanden, so können selbst Starkregen im gleichen Jahr vielfach keine Stürze mehr auslösen. Die Klüfte schliessen sich in der wärmeren Jahreszeit wieder; ein stark erhöhter Wasserdruck an der Kluftspitze ist nicht mehr möglich. Die auf den Abbildungen 8 und 9 gezeigten Beispiele vom Brünigpass bzw. vom Gstryfet Birg zeigen, dass selbst extreme Niederschlags-

werte, wie sie anlässlich von Unwettern gemessen wurden (z. B. im August 2005 oder im August 2007), keinen Bewegungsschub auslösten. Die Auswertung der Unwetterstatistik vom August 2005 im Kanton Bern ergab zudem, dass trotz Rekordniederschlägen nur zwei Sturzereignisse (neben tausenden von Hangmuren und Rutschungen) bekannt sind. Im Jahresbericht der Unwetterschäden in der Schweiz im Jahr 2005 fand sich für den August kein einziges Sturzereignis (Hilker et al. 2007).

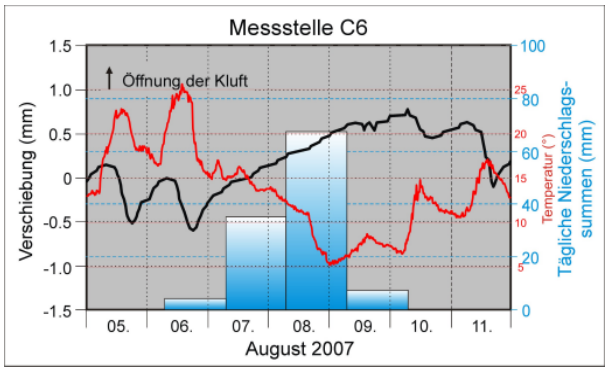


Abb. 8: Aufzeichnung des automatischen Weggebers C6 an der Felsscheibe am Brünigpass im August 2007. Trotz der Niederschlagsrate von 67 mm/Tag (9. August) wurde keine Deformation festgestellt.

Fig. 8: Automated deformation record of point C6 (rock plate near the Brünig Pass), August 2007. In spite of e precipitation rate of 67 mm per day (9 August), any deformation was measured.

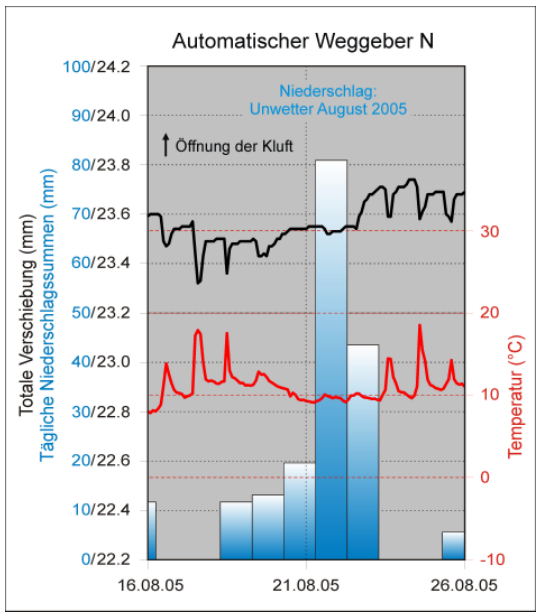


Abb. 9: Aufzeichnung des automatischen Weggebers N am labilen Felspaket am Gstryfet Birg im August 2005. Die extremen Niederschläge im Rahmen des Unwetters vom August 2005 wirkten sich nicht auf die Deformation aus.

Fig. 9: Automated deformation record of point N (unstable rock mass at Gstryfet Birg), August 2005. Even the extreme precipitation in this month did not cause any increased movements.

Grössere labile Felspartien

Die Analyse der historischen Bergstürze zeigt, dass rund die Hälfte der erfassten Ereignisse auf Niederschläge bzw. Nassperioden zurückzuführen waren (Gruner 2006). Dies weist bei vielen Felspartien auf einen behinderten Wasserabfluss im Berginnern hin. So dass sich ein hydrostatischer Druckaufbau aufbauen konnte. Neuere Beispiele dieses Verhaltens von grossen Felspartien werden in Keusen (2000) und Gruner (2004) beschrieben. Beim Teilabsturz von rund 450'000 m^3 auf der Ostseite des Eigers (Kt. Bern, Schweiz) im Juli 2006 werden die extremen Niederschläge vom August 2005 als auslösender Faktor der Felsbewegung von insgesamt rund 2 Mio. m^3 vermutet (Keusen et al. 2007). Die zu diesem Zeitpunkt festgestellten Geräusche und Mikrobeben in der nahen Umgebung deuten auf das Aufbrechen von Gesteinsbrücken als Folge hoher Wasserdrücke in Klüften hin. Ein weiteres Beispiel für die destabilisierende Wirkung bei einem erhöhten Wassereintrag bei grossen Felspartien liefert ein Wässerungsversuch an einem labilen, 250'000 m^3 grossen Felspaket an der Grimselpassstrasse im Kt. Bern. Hier sollte mittels Einleitung von Fremdwasser in die Klüfte ein künstlicher Absturz ausgelöst werden. Auch wenn der Versuch (erfolglos) abgebrochen werden musste, zeigt doch die Erhöhung der Bewegungen innerhalb von wenigen Tagen von anfänglich ca. 1 mm/Tag auf gegen 8 cm/Tag eindrücklich die Wirkung des Bergwasserdruckes auf die Felsmasse (Gruner 2004).

Faktor Frost – Tau- Wechsel

Eine Kombination der beiden Faktoren Temperatur und Wasser ist der Frost-Tau-Wechsel, welcher ebenfalls zu einer fortlaufenden Entfestigung im Kluftbereich von labilen Felspartien beitragen kann. Auch dieser häufig zyklische Prozess bewirkt infolge seiner deformationellen Wirkung eine Ermüdung von Gesteinsbrücken und ähnlichen rückhaltenden Kräften. Der Faktor Frost-Tau-Wechsel löst vor allem kleinvolumige Stürze aus (Steinschlag). Frostsprengung wirkt nur untergeordnet als Trigger, da die damit verbundenen Kräfte statisch und nicht dynamisch wirken. Die mittels dendrochronologischen Studien festgestellten Steinschlagaktivitäten im Winterhalbjahr und vor allem im Frühling sind massgeblich auf diesen Faktor zurückzuführen.

Weitere Faktoren

Winddruck
Erstaunlich häufig sind auch Sturzereignisse, welche im Zusammenhang mit Sturmböen (evtl. verbunden mit Starkniederschlägen) stehen. Dabei bewirkt der Winddruck im Wurzelbereich von schweren Bäumen eine Felsauflockerung. Auch hier dürfte es sich um eine dynamische Auflockerung durch die Wippbewegung der Bäume im Wind handeln.

Permafrost
Stürze, welche auf das Auftauen des Permafrosts zurückzuführen sind, haben vor allem in ausserordentlich heissen Sommermonaten (2003) eine Bedeutung und dann auch nur in den Nordwänden der Hochalpen. Zudem spielt der Permafrost in der Regel nur in Höhen von über 2500 m ü. M. eine Rolle, also in Gebieten, wo Siedlungen kaum gefährdet und höchstens exponierte Verkehrswege von Bedeutung sind.

Fazit

- Kalte Temperaturen bewirken eine dynamische Entfestigung bzw. eine Destabilisierung des Gebirges infolge von Gesteinskontraktionen, während sich bei wärmeren Temperaturen die Klüfte eher schliessen, was eine Stabilisierung zur Folge hat. Ein häufiger Wechsel von Gefrieren und Auftauen kann diesen destabilisierenden Prozess noch beschleunigen. Grosse Felsmassen mit tief liegenden Klüften bzw. Ablösungsflächen werden jedoch in ihrer Gesamtstabilität tendenziell nicht von Temperaturschwankungen beeinflusst.
- Wasser wirkt generell als treibender und auslösender Faktor: Bei grossen labilen Felsmassen von in der Regel deutlich über 100'000 m^3 stehen die Bewegungen vielfach in direktem Zusammenhang mit dem Niederschlagsgeschehen. Bei kleineren und mittleren labilen Felspartien ist in erster Linie der erste bedeutende Wassereintrag im Frühjahr nach der kalten Zeit (evtl. zusammen mit der Schneeschmelze) der wichtigste Trigger. Die Sommer- und Herbstniederschläge spielen in diesem Fall für die Sturzaktivitäten nur eine vergleichsweise untergeordnete Rolle.
- Während Winddruck erstaunlich häufig Sturzereignisse auslöst, ist die Bedeutung der durch Permafrost bedingten Stürzen in abgelegenen Höhenlagen begrenzt.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Beschreibung der historischen Erkenntnisse und des felsmechanischen Verhaltens des Gebirges erlaubt zusammenfassend die nachstehenden Schlussfolgerungen. Diese sind beispielsweise bei der Beurteilung einer potenziellen Felssturzgefahr oder bei einem Gefahrenmanagement von Bedeutung.

Ursachen und Auslösung von kleineren bis mittleren Sturzereignissen

- Kalte Temperaturen bzw. das Ausmass von Kaltzeiten (kalte Klimaperioden und kalte Winter) bilden - nebst der geologischen Disposition - die wichtigste Ursache von kleinen bis mittleren Sturzereignissen. Ergänzend dazu wirken häufige Frost-Tau-Wechsel z. B. bei Kälteeinbrüchen im Frühling oder auch im Sommer im Gebirge destabilisierend. Diese klimatischen und meteorologischen Einflüsse führen zu einer Entfestigung des Gebirges, indem die Klufttiefe vergrössert und Gesteinsbrücken zerstört werden. Dadurch erhöht sich der "Reifegrad" eine Felspartie für einen Absturz (vgl. Abb. 10).

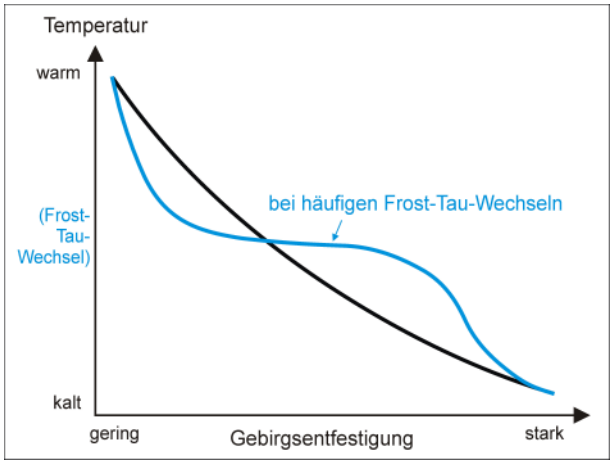


Abb. 10: Ausmass der Gebirgsentfestigung in Abhängigkeit der Temperatur

Fig. 10: Extent of dynamic fatigue of rock masses depending on temperature

- Ausgelöst werden kleinere bis mittlere Sturzereignisse häufig im Anschluss an eine Kaltzeit bzw. im Anschluss an Frost-Tau-Wechsel, sobald im Frühjahr das erste Mal bedeutende Niederschläge auftreten oder sobald es zur Schneeschmelze kommt.

- Warme Zeiten und vor allem auch warme Sommermonate bewirken hingegen eine Beruhigung der Fels- oder Gebirgsbewegungen, d. h. es sind generell weniger Sturzereignisse zu erwarten (Abb. 11). Eine Ausnahme bilden auf Winddruck zurückzuführende Felsstürze und durch Permafrost bedingte Ereignisse in heissen Sommermonaten in den Nordwänden der Hochalpen. Letztere tangieren den Siedlungsraum und die Infrastrukturanlagen jedoch kaum.

Ursachen und Auslösung von grösseren Sturzereignissen

- Die Ursache von grösseren Sturzereignissen (>> 100'000 m^3 bis Bergsturz von > 1 Mio. m^3) ist in erster Linie in der geologischen und hydrogeologischen Disposition des Gebirges zu suchen. Dazu gehören der Auflockerungsgrad, das Vorhandensein von Entlastungsklüftungen und Abscher- bzw. Gleithorizonten, die Hangentlastung nach dem Rückzug der Gletscher und der lithologische und tektonische Gebirgsaufbau. Letzterer kann die Voraussetzung bilden, damit der Aufbau eines hydrostatischen Druckes (Bergwasserdruck) infolge eines behinderten Wasserabflusses im Berginnern möglich ist.
- Ausgelöst werden solche Grossereignisse vielfach durch starke und lang anhaltende Niederschläge, welche zum Aufbau eines ausserordentlich hohen Bergwasserdruckes führen. Grosse Stürze sind in erster Linie im höher gelegenen Gebirge zu erwarten und treten daher tendenziell eher im Sommer und Herbst auf (Abb. 11).

- Die kalte Jahreszeit bewirkt tendenziell eher eine Beruhigung dieser grossen Felsmassen ("Winterschlaf").

AUSBLICK

Ursachen- und Ereignisanalysen von Sturzphänomenen und das felsmechanische Verhalten von labilen Gesteinskörpern lassen den Schluss zu, dass ein wärmeres Klima bisher nicht zu einer tendenziellen Zunahme von Sturzereignissen geführt hat - weder von kleinen noch von grossen - und dass auch in Zukunft nicht mit einer erkennbaren Häufung zu rechnen ist. Dies im Gegensatz zu den Äusserungen, wie sie in den letzten Jahren vielfach in den Medien zu finden waren, oder auch zum Bericht der OcCC/ProClim- (2007), welche in ihrer Studie zu den erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung in der Schweiz im Jahr 2050 u. a. eine Zunahme von grossen Stürzen im Hochgebirge befürchtet. Warme Sommermonate führen vielmehr zu einer Beruhigung des Gebirges (mit Ausnahme der steilen Nordflanken im Hochgebirge in sehr heissen Sommermonaten). Zukünftig wärmere Winter führen zudem zu einer geringeren Destabilisierung des Gebirges, da die Gesteinskontraktion bzw. die Kluftaufweitung weniger ausgeprägt ist als bei sehr kalten Temperaturen. Im Einzelfall können allerdings, in erster Linie in den Voralpen, häufige Frost-Tau-Wechsel und anschliessende Niederschläge den Entfestigungsprozess im Gebirge beschleunigen, d. h. den "Reifegrad" für einen Absturz erhöhen. Da die Klimaveränderung jedoch generell ein langsamer Prozess ist, wird sich die Anzahl von Sturzprozessen in Anbetracht dieses geologisch gesehen ebenfalls sehr langsam verlaufenden Entfestigungsprozesses des Gebirges auch in Zukunft nicht relevant verändern.

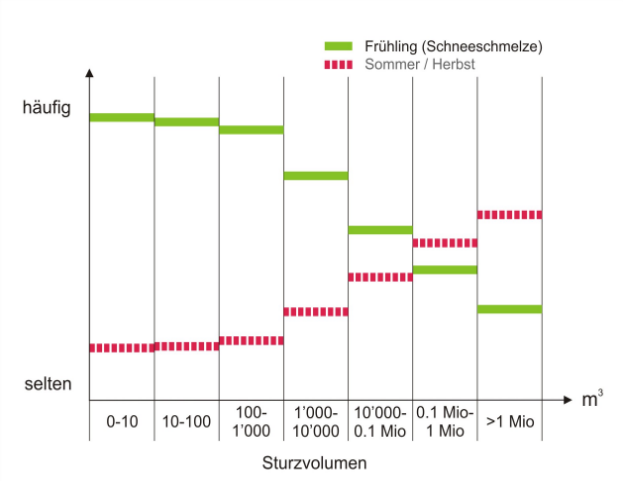


Abb. 11: Häufigkeit von Sturzereignissen bei Starkniederschlägen in Bezug auf das Sturzvolumen (für einzelne Volumenkategorien)

Fig. 11: Frequency of rockfall events as a function of the falling volume in case of intense precipitation (for single size categories)

LITERATUR

Gruner U. (2004): "Klima und Sturzereignisse in Vergangenheit und Zukunft." Bull. angew. Geol., Vol. 9/2; 23-37.

Gruner U. (2006): "Bergstürze und Klima in den Alpen - gibt es Zusammenhänge?" Bull. angew. Geol., Vol. 11/2; 25-34.

Gruner, U., Ottiger, R. (2001): "Chronik eines anzukündigenden Felssturzes." 13. Nat. Ing. Geol., Karlsruhe. Sonderband Geotechnik; 11-16. Verlauf Glückauf GmbH, Essen.

Hegg, C., Vogt, S. (2005): "Häufigkeit und Trends von Starkniederschlägen in der Schweiz im Zeitraum 1864 - 2002." Wasser, Energie, Luft, Vol. 97, 7/8; 209-212.

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

Hilker, N., Jesy, M., Badoux, A., Hegg, C. (2007): "Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2005." Wasser, Energie, Luft, Vol. 99,1; 31-41.

Keusen, H.R. (2000): "Schynige Platte, Jungfraugebiet - Langzeitbeobachtungen an einer grossen Felsbewegung." Felsbau, Vol. 18/3; 56-62.

Keusen, H.R., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M. (2007): "Bergsturz am Eiger: Überwachung der Felsbewegungen mittels 3D Laserscanning." Geoscience Actuel (Platform of the Swiss Academy of Sciences) 2/2007; 28-32.

Krähenbühl, R. (2004): "Temperatur und Kluftwasser als Ursache von Felssturz." Bull. angew. Geol., Vol. 9/1; 19-35.

OcCC / ProClim- (2007): "Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft." OcCC / ProClim (Forum for Climate and Global Change), Bern.

Perret, S., Stoffel, M., Kienholz, H. (2006): "Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps - a dendrogeomorphological case study." Geomorphology, vol. 74; 219-231.

Pfister, C. (2003): "Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496-1995." Haupt Verlag Bern.

Sandersen, F., Bakkehoi, S., Hestnes, E., Lied, K. (1995): "The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability." Senneset (ed.): Landslides 1996; 97-113 Balkema, Rotterdam.

Stoffel, M., Lièvre, I., Monbaron, M., Perret, S. (2005): "Seasonal timing of rockfall activity on a forest slope at Täschgufer (Swiss Alps) - a dendrochronological approach." Z. Geomorph., Vol. 49; 89-106.