Kääb, A., Huggel, C. und Paul F. (2000): Früherkennung hochalpiner Naturgefahren mittels Fernerkundung. INTERPRAEVENT 2000, Tagungspublikation, Band 1, 49-60.

FRÜHERKENNUNG HOCHALPINER NATURGEFAHREN MITTELS FERNERKUNDUNG

Andreas Kääb[1], Christian Huggel[1] und Frank Paul[1]

ZUSAMMENFASSUNG

Gerade wegen ihrer Berührungslosigkeit und Flächenhaftigkeit kommt flugzeug- und satelliten-gestützten Fernerkundungsmethoden in der Analyse von Naturgefahren im Hochgebirge eine grosse und zugleich wachsende Bedeutung zu. Gletscherseen und ihr Ausbruchspotential lassen sich in Luft- und Satellitenbildern, zum Teil automatisch, erkennen und Veränderungen beobachten. Ähnliches gilt auch für Gletscherzungen, deren Vorstoss bzw. Rückzug Infrastruktur bedrohen oder zu Eislawinen führen können. Zur Früherkennung von Eislawinen selbst ist Fernerkundung mit deutlichen Einschränkungen behaftet, zur Beurteilung der Gefahrendisposition aber durchaus wertvoll. Präzisionsphotogrammetrie erlaubt die Detektion von langsamen Kriech- und Rutschprozessen. So können Hanginstabilitäten im Periglazial und potentielle Murganganrisse im kriechenden Permafrost beobachtet werden.

ABSTRACT

Especially due to their ability to provide information touch-less and with complete spatial coverage air- and satellite-borne remote sensing technologies have a large and still growing importance for analyzing high mountain hazards. Periglacial lakes and their outburst risk can be detected using aerial and satellite imagery as well as related changes be monitored. In a similar way, it is possible to observe glacier fluctuations endangering infrastructure and potentially causing ice avalanches. Early recognition of ice break-offs themselves is difficult by remote sensing, though it contributes to the assessment of hazard disposition. High precision photogrammetry allows for measuring slow creep and slide processes. Such, slope instabilities in the periglacial environment and potential starting zones of debris flows can be monitored.

[1)] Geographisches Insitut, Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich, Schweiz. (Tel.: ++41 1 635 51 46; Fax.: +41 1 635 68 48; E-mail: kaeaeb@geo.unizh.ch; www: http://www.geo.unizh.ch/phys)

Kääb, A., Huggel, C. und Paul F. (2000): Früherkennung hochalpiner Naturgefahren mittels Fernerkundung. INTERPRAEVENT 2000, Tagungspublikation, Band 1, 49-60.

Einführung

Bei der Beobachtung und Analyse potentieller Naturgefahren im Hochgebirge haben Methoden der satelliten- und flugzeuggestützten Fernerkundung wiederholt eine wesentliche Rolle gespielt. Zieht man in Betracht, dass die technischen Möglichkeiten der Fernerkundung sowie ihre Verfügbarkeit zur Zeit stark verbessert werden, so darf man eine wachsende Bedeutung bei der Beurteilung von hochalpinen Naturgefahren erwarten. In den Gebirgsregionen der Erde, die ja in der Regel schwer zugänglich sind, kommt dabei das Schlüsselmerkmal der Fernerkundung ganz besonders zum Tragen: Fernerkundung liefert eine Fülle von Objektinformationen *berührungslos*.

In diesem Beitrag sollen an Hand von aktuellen Fallbeispielen die Möglichkeiten und Grenzen von Fernerkundungstechniken zur Gefahrenfrüherkennung im Hochgebirge aufgezeigt werden. Nach einigen grundsätzlichen Bemerkungen zur Gefahrenbeobachtung und zu Sensoren werden fünf unterschiedliche Gefahrentypen im Einzelnen behandelt: *Gletscherhochwasser, Gletscherlängenänderungen, Eisstürze, Murgänge im Permafrost sowie Felssackungen und Rutschungen.*

GRUNDLAGEN

Gefahrenerkennung - Gefahrenbeobachtung, Disposition - Auslösung

Wesentlich unterscheiden sich die verwendeten Beobachtungskonzepte und -netze zur generellen *Gefahrenerkennung* einerseits (flächendeckend, grob) und zur *Beobachtung* bereits als potentiell gefährlich erkannter Situationen andererseits (gezielt, detailliert). Während Fernerkundungsmethoden wesentliche Beiträge zur Analyse einer *Gefahrendisposition* liefern können, eignen sie sich zur Überwachung gefährlicher Situationen, also zur Erkennung der konkreten *Ereignisauslösung* vor allem wegen ihrer geringen zeitlichen Auflösung meist weniger. Je nach geforderter Genauigkeit werden verschiedene Sensoren bereits häufig zur *Dokumentation und Analyse der Schäden* nach einer Gletscherkatastrophe eingesetzt (Lawinenkegel, Murgangablagerungen etc.). Diese Standardaufgaben werden hier nicht behandelt.

Sensoren

Vor allem bezüglich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung unterscheiden sich satelliten- und flugzeuggestützte Sensoren. In der Satellitenfernerkundung können im Zusammenhang mit alpinen Naturgefahren optische und Mikrowellen-Sensoren verwendet werden. Optische Sensoren (wie z.B. Landsat TM, SPOT oder IRS-LISS) liefern derzeit räumliche Bodenauflösungen von selten höher als ca. 10m bei einer Wiederholungsdauer von bestenfalls einigen Wochen. Multispektrale optische Sensoren erlauben dabei eine Reihe von speziellen spektralen Analysen, die auch zur Gefahrenbeurteilung im Hochgebirge interessant sein können. Mikrowellensensoren (Radar, SAR- und In-SAR-Techniken) haben im Vergleich zu den optischen Sensoren den grossen Vorteil, als aktive Systeme auch nachts und bei Wolkenbedeckung Ergebnisse zu liefern. Satellitengestützte Mikrowellenfernerkundung, wird besonders eingesetzt zur Bestimmung von Höhenmodellen (DHM) und Geländeverschiebungen.

Das „Arbeitspferd“ zur Gefahrenanalyse im Hochgebirge ist zweifellos die Luftbild-Photogrammetrie. Die hohe räumliche Auflösung (einige Zentimeter am Boden) und die Möglichkeit zur 3D-Objektanalyse eröffnen eine Vielzahl von bewährten und zuverlässigen Wegen zur Interpretation und zur Messung der Objektgeometrie und –veränderungen mittels Luftbildern. Besonders zur Erstellung von DHM werden auch flugzeuggestützte Laserscanner und Radarsensoren an Bedeutung gewinnen. Bei vielen Aufgabenstellungen in der Glaziologie wird zuerst einmal versucht werden, soweit verfügbar, Luftbilder heranzuziehen. Wenn solche nicht vorhanden sind oder grossflächige Untersuchungen anstehen, wird auf optische Weltraumsensoren zurückgegriffen werden. Die übrigen Sensoren sind grossenteils noch in der Entwicklung und kommen zur Zeit (noch) nur in wenigen Fällen operationell in der glaziologischen Gefahrenbeurteilung zum Einsatz.

FALLSTUDIEN

Gletscherhochwasser

Gletscherhochwasser stellen generell das am weitest reichende Gletscherrisiko mit dem grössten Schadenpotential dar. Sie sind in fast allen vergletscherten Gebirgen der Erde von grösster Aktualität (z.B. Haeberli 1983; Clague und Evans 1994; Yamada 1998). Neben gefährlichen Längenänderungen von Gletschern bestehen bei Gletscherhochwassern die wohl besten Möglichkeiten zur weltraum- und luftgestützten Gefahrenerkennung und -beobachtung. Die Wasserreservoires solcher Hochwasser sind, von wenigen (subglazialen) Ausnahmen abgesehen, durch viele, besonders optische Sensoren detektierbar. Auch die möglichen Ausbruchsmechanismen, die sich aus der morphologischen Situation der Seen ergeben, lassen sich so oft erkennen (z.B. Schwallwellen, Instabilität von Eisdämmen oder Moränendämmen; Haeberli et al. 1989). Neben der Abschätzung des Gefahrenpotentials von Gletscherhochwassern eignen sich Fernerkundungsverfahren aber auch hervorragend zur Beobachtung von Variationen der gefährlichen Seen und ihrer Umgebung. 2D-Geometrieänderungen, und damit Veränderungen im morphologischen Gefahrenpotential und Ausbruchsvolumen der Seen, lassen sich meist schon aus Satellitenbildern ableiten. Genaue 3D-Variationen der Wasserreservoires und ihrer glazialen und periglazialen Umgebung kann Luftbildphotogrammetrie liefern und so eine genaue Analyse des Hochwasserrisikos erlauben (z.B. Kääb 1996a; Kääb und Haeberli 1996; Kääb et al. 1996). Entsprechende Risikogebiete sollten daher unbedingt einer photogrammetrischen Befliegungs- und Beobachtungsreihe unterzogen werden. Für eine flächenweite Detektion von periglazialen Seen bietet sich aus Zeit- und Kostengründen in hohem Masse der Einsatz von hochauflösenden Satellitensystemen an.

Für eine weitgehend automatisierte Erkennung der Seen ist es möglich, Gewässerflächen unter Ausnützung ihrer spektralen Eigenschaften auf Satellitenbildern von ihrer Umgebung zu isolieren (Fig. 1). Zum Beispiel auf der Basis von Landsat TM Bildern kann dazu der ‚Normalized Difference Water Index‘ (NDWI) angewendet werden (Huggel 1998). Er lehnt sich mathematisch an den ‚Normalized Difference Vegetation Index‘ (NDVI, z.B. Olsson 1995) an und verwendet den ersten und vierten Spektralkanal des Landsat TM:

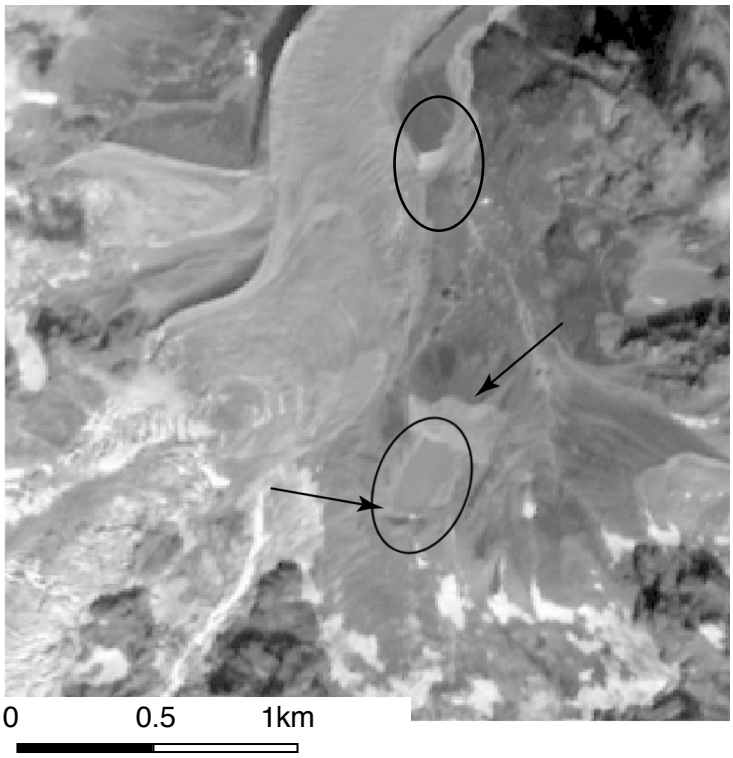
$$\mathrm{NDWI} = \frac{\mathrm{TM4} - \mathrm{TM1}}{\mathrm{TM4} + \mathrm{TM1}}$$

TM1 wird wegen des Reflexionsmaximums von Wasser in diesem Spektralbereich verwendet. Da andererseits die Reflexion von Wasser gegen das infrarote Spektrum hin sehr rasch gegen ein Minimum sinkt, muss ein IR-Kanal ausgewählt werden, um eine möglichst hohe Differenz zu erhalten. Der nah-infrarote TM4-Kanal wird dabei TM5 oder TM7 vorgezogen, weil sich darin Wasser stärker von Eis und Schnee abhebt, was im Kontext periglazialer Seen eine bedeutende Prämisse darstellt.

Figur 1: Gebirgsseen im Gebiet Simplon, Wallis. Die Wasserflächen (markiert durch Ellipsen) wurden automatisch mit Hilfe des ‚Normalized Difference Water Index' aus einem Landsat TM Bild extrahiert. Probleme bereitet in diesem Verarbeitungsstadium die Differenzierung Wasser/Schatten. © ESA/Eurimage, 1990.

Die Methode erlaubt eine erste flächenweite Erfassung (Landsat TM: 180x180km) periglazialer Seen und bildet die Grundlage für eine präzisere Einschätzung des Gefahrenpotentials. Unter Verfolgung einer ‚downscaling'-Strategie werden dazu Daten von Sensoren mit höherer räumlicher Auflösung herangezogen (in dieser Fallstudie SPOT-Pan, 10x10m). Wesentliche, für das Gefahrenpotential relevante Parameter lassen sich damit bereits erkennen. Stauende Moränendämme und Erosionsbreschen von vergangenen Seeausbrüchen zeichnen sich durch charakteristisch hohe Reflexionen aus (Fig.2).

Zur Abschätzung des gestauten Wasservolumens (Ausbruchspotential) werden z.B. einfache Flächen-Volumen Beziehungen verwendet (Huggel 1998). Auch höchstauflösende panchromatische Sensoren können allerdings keine Aussagen über die Untergrundverhältnisse machen. Vegetation ist etwa ein wichtiger Faktor bei Stabilitätsbetrachtungen von Moränendämmen und steilen Schuttreservoirs. Zur Vegetationsdetektion bieten sich wieder multispektrale Datensätze an, allerdings unter Verlust räumlicher Auflösung.



Figur 2: Der Lago delle Locce, Monte Rosa-Gruppe, auf einem SPOT Pan Bild (Ellipse und Pfeil unten). An den hohen Reflexionen sind der stauende Moränendamm (oberer Pfeil) und eine Ausbruchsbresche (obere Ellipse) zu erkennen. © SPOT-Image, 1994.

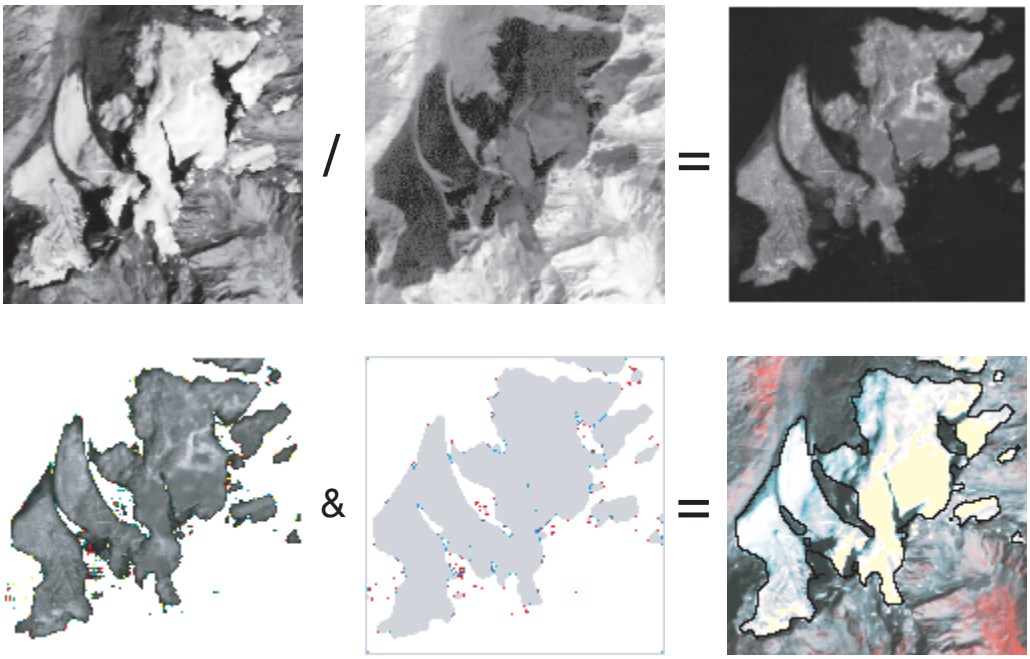
Um diese Auflösungsdifferenzen zu umgehen, werden zunehmend Techniken der multisensoralen Datenfusion angewendet (Pohl und van Genderen 1998; Hellwich 1999). Zur Verbesserung der Gefahrenanalyse wurden in der beschriebenen Fallstudie zwei unterschiedliche Fusionsverfahren getestet (IHS, z.B. Pellemans et al. 1993, und DIRS). Bessere Resultate wurden mit der etwas komplexeren DIRS-Fusion erzielt (vgl. Darvishsefat 1995). Vegetation und periglaziale Wasserreservoirs können damit effektiv erfasst werden, die Unterscheidung von Schuttflächen und schuttbedeckten Getscherpartien ist hingegen ein Problem. Bei multitemporalen Fusionsmethoden können zusätzlich Techniken der ‚change detection' angewendet werden. Durch Fusion von Fernerkundungsdaten unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte werden Veränderungen innerhalb der beobachteten Zeiträume sichtbar. Zum Beispiel lassen sich markante Veränderungen von Seen, etwa durch Ausbrüche, identifizieren.

Für eine abschliessende Gefahrenabschätzung von periglazialen Seen kann oft auf traditionelle Feldmethoden (z.B. Geophysik; Vonder Mühll et al. 1996) nicht verzichtet

werden kann. Verschiedene Fernerkundungsdaten und im speziellen ihre Fusion unter Einbezug von weiteren Geländeinformationen (z.B. digitale Geländemodelle) ermöglichen aber eine bereits weitgehende Abschätzung des Gefahrenpotentials unter dem Vorteil von automatisierten Methoden.

Gefährliche Längenänderungen von Gletschern

Längenänderungen von Gletschern können Infrastruktur gefährden, indirekt aber auch zu Hochwassern oder Eisstürzen führen. Eine Abschätzung mutmasslicher Entwicklungstrends der Gletschergeometrie ist deshalb Grundlage jeder längerfristigen Risikoanalyse (Haeberli et al. 1989, 1999). Bei kurzfristigen instabilen Längenänderungen (Surges, Kalbungen) wird die meist zu geringe zeitliche Auflösung der Fernerkundungssensoren der Gefahrenbeurteilung Grenzen setzen, wenn nicht vorangehende Entwicklungen des betroffenen Gletschers (z.B. markante Geometrieänderung) auf das drohende Ereignis hinweisen. Die benötigten geometrischen Informationen sind am genauesten aus photogrammetrischen Analysen zu erhalten (Kääb 1996a; Kääb 1996b; Kääb und Haeberli 1996). Solche Verfahren werden in der Gefahrenanalyse operationell eingesetzt. Für grossflächige Analysen, in Gebieten ohne verfügbare Luftbilder und/oder bei geringeren Genauigkeitsanforderungen können auch optische Weltraumsensoren wertvolle Informationen liefern (z.B. Buchroithner et al. 1982; Espizua und Bengochea 1990; Mantovani et al. 1996).

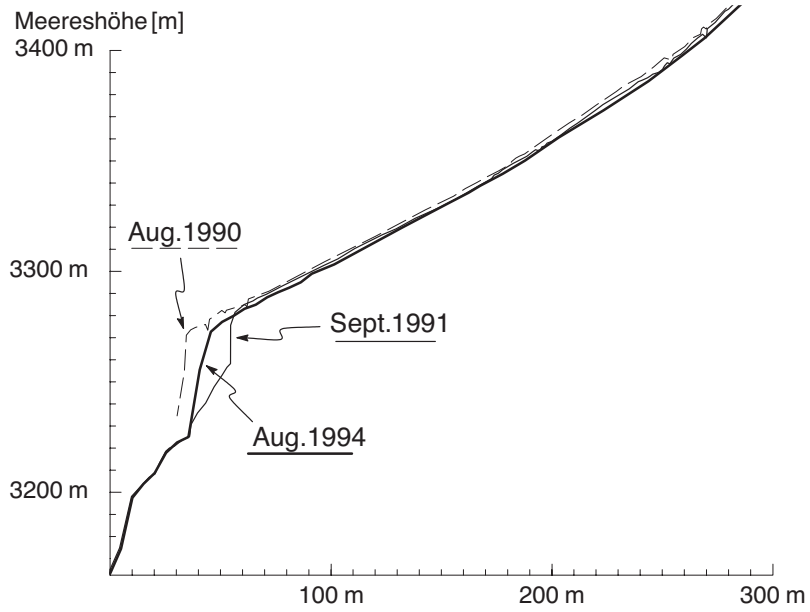


Figur 3: Automatische Extraktion von Gletscherrändern aus Landsat TM Bildern. Hochjochferner, Ötztal. Durch Division des Kanals 4 (oben links) durch Kanal 5 (oben Mitte) entsteht ein Verhältnisbild (oben rechts), das durch Anhalten eines Schwellenwertes die rohe Gletscherfläche zeigt (unten links). Durch Median-Filterung werden kleine Fehlklassierungen eliminiert (unten Mitte). Kantenextraktion liefert schliesslich den Gletscherrand, hier dem ursprünglichen Bild überlagert. © ESA/Eurimage, 1990

Unter Ausnützung der unterschiedlichen spektralen Eigenschaften von Eis in den Landsat TM Kanälen 4 und 5 können so z.B. automatisch Gletscherränder abgeleitet werden (Fig. 3; Paul 1995). Auf diese Weise können einerseits die Vergletscherung grösserer Gebiete erhoben werden, aber andererseits auch Veränderungen an kritischen Stellen beobachtet werden. Dabei setzt jedoch vor allem die räumliche Auflösung des Sensors (z.B. Landsat TM: ca. 30m) Grenzen bei der Detektierung kleiner Veränderungen. Probleme bereitet die Schuttbedeckung von Eis, die zu deutlichen Fehlklassierungen führen kann. Hier werden in Zukunft wissensbasierte Algorithmen, z.B. unter Einbezug von Geländemodellen, Verbesserungen bringen.

Eisstürze

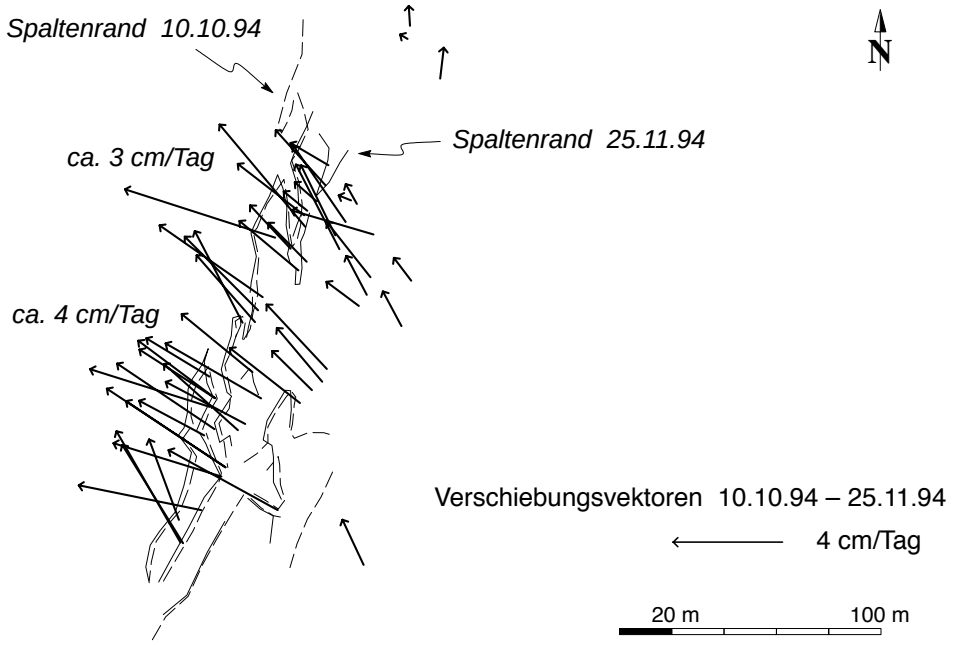
Eisstürze von Abbruchlamellen oder grösseren Eispartien von steilen Gletschern führen zu Eislawinen oder, im Falle eines Sturzes in einen See, zu gefährlichen Schwallwellen, die ihrerseits z.B. zu Seeausbrüchen führen können. Verglichen mit den Gletscherlängenänderungen sind die Möglichkeiten der Fernerkundung zur Gefahrenfrüherkennung bei Eisstürzen eingeschränkt. Gründe dafür sind z.B. die häufige Verschneiung und Verschattung (und damit Kontrastarmut), schwierige Topographie und die geringe Ausdehnung der betreffenden Gletscher.



Figur 4: Längsprofile auf dem Hängegletscher in der Westflanke des Eigers, Berner Oberland. Deutlich ist zu erkennen, wie sich die Eisfront, die durch einen Eisabbruch Ende August 1990 (nach Aufname des Profils Aug. 1990) stark zurückgesetzt wurde, wieder einer steilen und damit statisch kritischen Form annähert.

Da Eisstürze generell eine Tendenz zur Wiederholung besitzen, kann allerdings der Vergleich wiederkehrender und als kritisch erkannter Gletschergeometrien und Spaltenbilder sinnvoll sein (Fig. 4; Kääb 1996a). Auch die Abschätzung möglicher Abbruchvolumen kann so gelingen. Wegen der geringen zeitlichen Auflösung von Fernerkundungsmethoden wird die Beobachtung der typischen hyperbelartigen Beschleunigung von po-

tentiellen Abbruchmassen nur selten möglich sein (Fig. 5; Kääb 1996a). Deutlich bessere Einsatzmöglichkeiten bieten Fernerkundungsmöglichkeiten bei der Analyse der Gefahrendisposition von Eisstürzen: Satelliten- und Luftbilder erlauben die Detektion potentiell gefährlicher Situationen und die Analyse von möglichen Sturz- und Ablagerungsgebieten von Eislawinen (Bieri 1996). Detailliertere Abschätzungen bzw. Modellierungen werden durch Geländemodelle der betroffenen Gebiete wesentlich unterstützt.

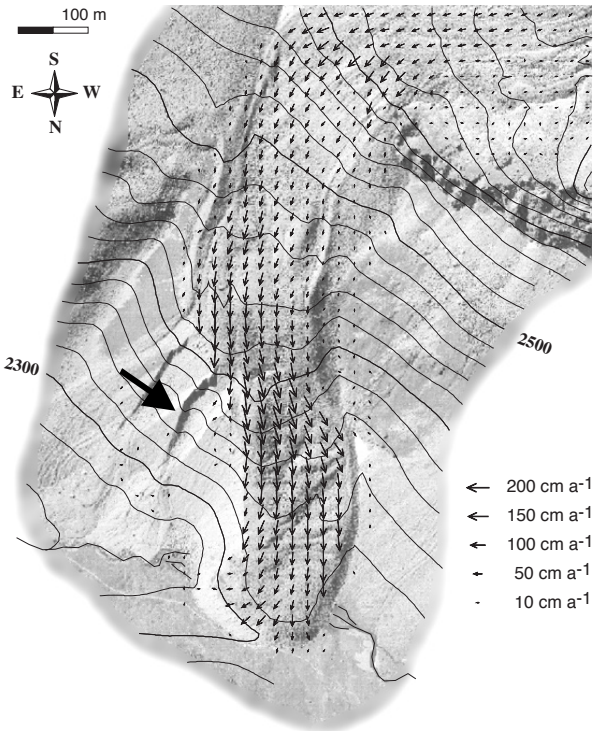


Figur 5: Oberflächengeschwindigkeiten auf dem Hängegletscher in der Westflanke des Eigers, Berner Oberland. Die beobachteten Geschwindigkeiten entsprechen den üblichen Verschiebungen und lassen keine kritische Beschleunigung erkennen.

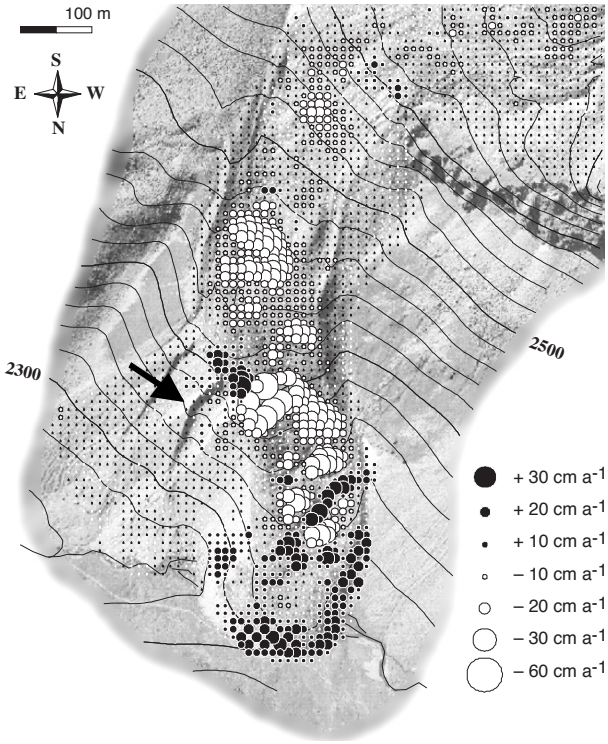
Murganganrisse und Hanginstabilitäten im Permafrost

Gefrorener Schutt kann in Form von Blockgletschern mit Geschwindigkeiten von 10^{-2} bis 10^{0} m/Jahr talwärts kriechen. Solche Blockgletscher vermögen Schutt (und Eis) in der Grössenordnung von 10^{3} bis 10^{5} m^3/Jahrhundert in potentielle Murganganrisszonen oder Murgangrinnen zu transportieren (Kääb 1996a; Hoelzle et al. 1998; Kääb 1998). Durch spezielle Verfahren multitemporaler Luftbild-Photogrammetrie können die Bewegungsbeträge an der Oberfläche des kriechenden Permafrostes gemessen und damit die Transportraten abgeschätzt werden (Fig. 6; Luftbildmaterial: Eidgenössische Vermessungsdirektion). Auch Setzungen durch Eisschmelze im eisübersättigten Untergrund kann die wiederholte photogrammetrische Messung von DHM aufzeigen (Fig. 7). Wegen ihrer geringen räumlichen Auflösung einerseits und der kleinen Veränderungsraten des gefrorenen Lockermaterials andererseits sind satellitengestützte Fernerkundungsverfahren zur Beobachtung von Hanginstabilitäten nur seltener geeignet (vgl. aber Rott und Siegel 1999). Zur grossräumigen Abschätzung und Modellierung von entsprechenden Gefahrenpotentialen, besonders in Gebieten mit schlechter Datenlage, kommen aber solche Verfahren, z.B. verbunden mit geomorphometrischen Analysen durchaus in Frage.

Kääb, A., Huggel, C. und Paul F. (2000): Früherkennung hochalpiner Naturgefahren mittels Fernerkundung. INTERPRAEVENT 2000, Tagungspublikation, Band 1, 49-60.



Figur 6: Oberflächengeschwindigkeiten zwischen 1992 und 1997 auf einem Blockgletscher im Val Suvretta, Oberengadin. Im Bereich zweier Murganganrisse (Pfeil) wird Schutt mit Geschwindigkeiten bis zu 2m/Jahr in das Murgangreservoir transportiert.

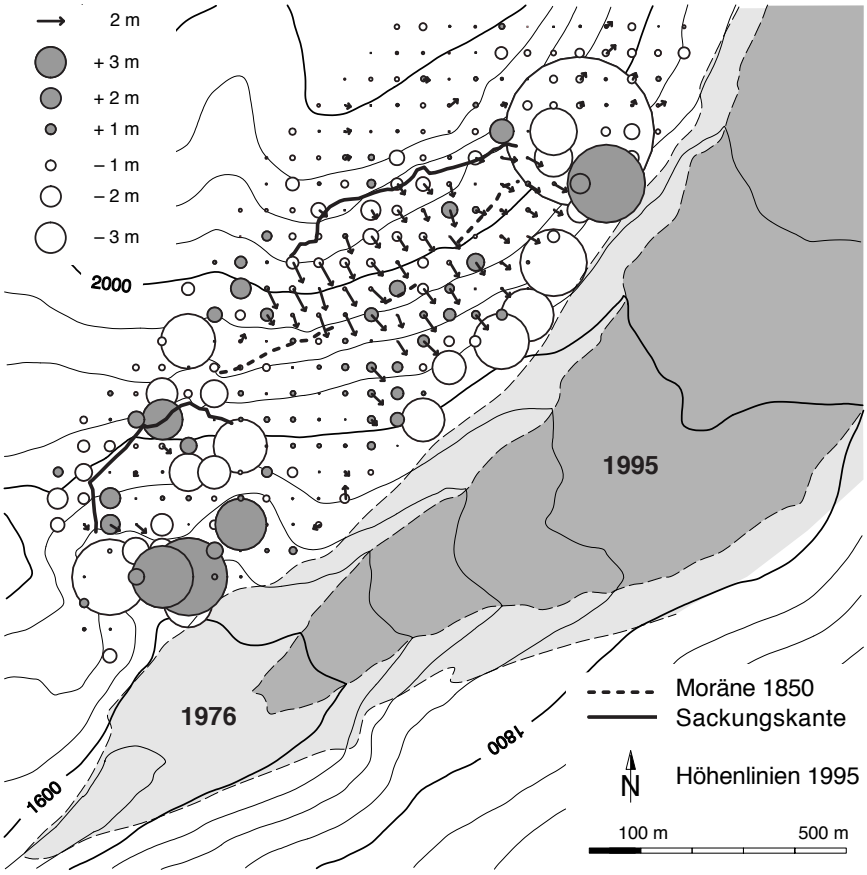


Figur 7: Höhenänderungen zwischen 1992 und 1997 auf obigem Blockgletscher. Die Geländehebungen von bis zu 30cm/Jahr im Bereich der zwei Anrisse wiederspiegeln das Füllen des potentiellen Murgangreservoires durch das Kriechen des Permafrostes.

Kääb, A., Huggel, C. und Paul F. (2000): Früherkennung hochalpiner Naturgefahren mittels Fernerkundung. INTERPRAEVENT 2000, Tagungspublikation, Band 1, 49-60.

Felssackungen und Rutschungen

Hanginstabilitäten im Periglazial können auch mit Gletscherrückzug und folgender Entlastung der Talflanken zusammenhängen. Die Bewegungsbeträge solcher Sackungen und Rutschungen sind meist so gering, dass zu deren Messung als optisches Fernerkundungsverfahren meist nur hochauflösende, multitemporale Luftbild-Photogrammetrie (Fig. 8) oder in günstigen Fällen Interferometrisches SAR in Frage kommen (Rott und Siegel 1999). Weltraumgestützte optische Sensoren können allenfalls zur groben Detektion grosser Rutschungsgebiete beitragen.



Figur 8: Höhenänderungen und Verschiebungen 1976-1995 auf einer Felssackung an der Zunge des Aletschgletschers, Wallis (oben Mitte). Die gemessenen Verschiebungen betragen bis zu 20cm/Jahr. Im oberen Teil konnten Einsinkbeträge, im unteren Teil Hebungen derselben Grössenordnung beobachtet werden. Die Sackung ist mutmasslich durch den massiven Rückzug des Gletschers bedingt.

SCHLUSSBEMERKUNGEN, AUSBLICK

Analytische Photogrammetrie bietet zweifellos die besten Möglichkeiten zur berührungslosen Gefahrenerkennung und -beobachtung im Hochgebirge. Digitale Photogrammetrie wird viele, aber vorerst nicht alle Arbeitsgänge photogrammetrischer Gefahrenanalyse ablösen. Gezielte und laufend aktualisierte Beobachtungsnetze sind daher von grösstem Wert. Eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Früherkennung und Beobachtung gletscher- und permafrostbedingter Naturgefahren mittels Photogrammetrie, deren kon-

krete Umsetzung, aber auch deren Grenzen wurden im Rahmen des Schweizerischen NFP31-Projektes „Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge“ aufgezeigt (Haeberli et al. 1999).

Optische Satellitenfernerkundung hat die spezialisierten Forschungsinstitute verlassen und ist „reif“ für einen breiteren Anwenderkreis. Deutlich wachsende Bedeutung wird der optischen Satellitenfernerkundung mit den in naher Zukunft zu erwartenden hochauflösenden Sensoren zuwachsen (z.B. IKONOS). Flugzeuggestützte Mikrowellenfernerkundung und Laserscanner werden von einigen wenigen Firmen kommerziell betrieben, satellitengestütztes SAR wird vor allem in spezialisierten Forschungsinstituten prozessiert. Noch nicht ausgenützt ist das Potential digitaler Nahbereichsphotogrammetrie zur Gefahrenbeobachtung im Hochgebirge. Solche Verfahren könnten in ähnlichen Konstellationen wie automatische geodätische Verfahren zum Einsatz kommen.

Mittels Fernerkundungsverfahren können viele Schritte zur Gefahrenanalyse berührungslos und effizient durchgeführt werden. Sie können (und sollen) aber in vielen Fällen nicht alleine, ohne eine visuelle Beurteilung vor Ort zu verantwortungsvollen Entscheidungen führen.

DANK

Die präsentierten Fallstudien wurden unterstützt durch den Schweizer Nationalfonds (NFP31 Projekt ‚Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge‘ Nr. 4031-34232 und das Projekt ‚Schweizer Gletscherinventar 2000‘ Nr. 21-54073.98). Die photogrammetrischen Analysen basieren auf Luftbildern der Eidgenössischen Vermessungsdirektion. Hans Kienholz sah das Manuskript durch.

LITERATUR:

Bieri, D. (1996): Abschätzung von Gletschergefahren im Raum Grindelwald - Lauterbrunnen - Lötschental. Diplomarbeit am Geographischen Institut, Universität Zürich.

Buchroithner, M.F., Jentsch, G. and Waniverhaus, B. (1982): Monitoring of Recent Geological Events in the Khumbu Area (Himalaya, Nepal) by Digital Processing of Landsat MSS data. *Rock Mechanics* 15, 4, 181-197.

Clague, J.J. und Evans, S.G. (1994): Formation and failure of natural dams in the Canadian Cordillera. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 464. Ottawa.

Darvishsefat, A.A. (1995): Einsatz und Fusion von multisensoralen Satellitenbilddaten zur Erfassung von Waldinventaren, Remote Sensing Series Vol. 24, Geographisches Institut der Universität Zürich.

Espizua, L.E. und Bengochea, J.D. (1990): Surge of Grande del Nevado Glacier (Mendoza, Argentina) in 1984: its evolution through satellite images. *Geografiska Annaler* 72A, 3-4, 255-259.

Haeberli, W. (1983): Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology* 4, 85-90.

Haeberli, W., Alean, J.-C., Müller, P. and Funk, M. (1989): Assessing risks from glacier hazards in high mountain regions: some experencies in the Swiss Alps. Annals of Glaciology 13, 77-101.

Haeberli, W., Kääb, A., Hoelzle, M., Bösch, H., Funk, M., Vonder Mühll, D. und Keller, F. (1999): Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Schlussbericht NFP31. *vdf-Verlag. Zürich.* 190pp.

Hellwich, O. (1999): An alternative Paradigm for Data Evaluation in Remote Sensing using Multisensor Data Fusion. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'99, Hamburg, 299-301.

Hoelzle, M., Wagner, S., Kääb, A. und Vonder Mühll, D. (1998): Surface movement and internal deformation of ice-rock mixtures within rock glaciers in the Upper Engadin, Switzerland. *Proceedings of 7th International Conference on Permafrost, Yellowknife,* 465-472.

Huggel, C. (1998): Periglaziale Seen im Luft- und Satellitenbild. Diplomarbeit am Geographischen Institut, Universität Zürich.

Kääb, A. (1996a): Photogrammetrische Analyse zur Früherkennung gletscher- und permafrostbedinger Naturgefahren im Hochgebirge. *Mitteilungen der VAW/ETHZ* 145, 182pp.

Kääb, A. (1996b): Photogrammetrische Analyse von Gletschern und Permafrost. *Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik*. 12/96, 639-644.

Kääb, A. (1998): Oberflächenkinematik ausgewählter Blockgletscher des Oberengadins. Jahrestagung 1997 der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft. *Mitteilungen der VAW/ETHZ* 158, 121-140.

Kääb, A. und Haeberli, W. (1996): Früherkennung und Analyse glazialer Naturgefahren im Gebiet Gruben,Wallis, Schweizer Alpen. *Interpraevent* 4, 113-122.

Mantovani, F., Soeters, R. and Van Westen, C.J. (1996): Remote Sensing Techniques for Landslide Studies and Hazard Zonation in Europe. Geomorphology 15, 213-225.

Olsson, K. B.-E. (1995): Terrestrial net primary production of the Baltic drainage basin, based on global vegetation index, spatial stratification and local growing season estimates. In: Askne, J. (Ed.), Sensors and Environmental Applications of Remote Sensing, Proceedings of the 14th EARSeL Symposium, 79-85.

Paul, F. (1995): Fernerkundung von Gletscheränderungen in den Alpen zwischen 1973 und 1992 beobachtet mit Landsat. Diplomarbeit im Fach Meteorologie, Universität Hamburg. Nr. 230.

Pellemans, A.H.J.M., Jordans, R.W.L. and Allewijn, R. (1993): Merging Multispectral and Panchromatic SPOT Images with Respect to the Radiometric Properties of the Sensor. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 59, 1, 81-87.

Pohl, C. and Van Genderen, J.L. (1998): Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications. International Journal of Remote Sensing, 19 (5), 823-854.

Rott, H. and Siegel, A. (1999): Analysis of Mass Movement in Alpine Terrain by means of SAR Interferometry. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'99, Hamburg, 1933-1936.

Vonder Mühll, D.S., Haeberli W. und Klingelé E. (1996): Geophysikalische Untersuchungen zur Struktur und Stabilität eines Moränendammes am Grubengletscher (Wallis). Interpraevent (1996) 4, 123 - 132.

Yamada, T. (1998): Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalaya. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice. 96pp.