

KÄÄB, Andreas (Zürich)*

Visualisierung glazialer und periglazialer Prozesse: Probleme und Ansätze

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Summary

1	Einführung.....	94
2	Dynamische Prozesse im Glazial und Periglazial	95
3	Geometrieänderungen	96
4	Fließen und Kriechen	97
5	Schlussfolgerungen und Perspektiven	98
6	Literaturverzeichnis	98
7	Verzeichnis der Abbildungen	101

Zusammenfassung

Viele Prozesse im Hochgebirge stehen, nicht zuletzt wegen der dortigen Eisvorkommen, nicht in einem statischen, sondern vielmehr in einem dynamischen Gleichgewicht. Dieses Gleichgewicht passt sich schwankenden Umweltbedingungen laufend an. Ständige Massentransporte und andere Veränderungen sind die natürliche Folge. Will glaziologisch-thematische Kartographie also diesem Raum gerecht werden, muss sie sich vor allem mit der Visualisierung von glazialen und periglazialen Variationen durch verschiedenste Prozesse der Eisbildung und -schmelze, des Eistransportes, des Kriechens von Permafrost oder anderen Hanginstabilitäten befassen. Hinter den schlussendlich deutlich sichtbaren Veränderungen der Oberflächengeometrie stehen aber komplexe kinematische Prozesse an der Oberfläche und im Untergrund. Viele Variationen sind nur aus diesen Prozessen heraus verständlich. Unter anderem abhängig von der räumlichen Dimension der abzubildenden Prozesse, sind die Darstellungstechniken und ihre Verständlichkeit wesentlich eingeschränkt. Während reine Geometrieänderungen vielfältig darstellbar sind, bestehen deutlich weniger Methoden um zwei- oder dreidimensionale Bewegungen abzubilden.

Summary

Many processes in high mountains are, not least because of ice occurrences, not in a static but rather in a dynamic equilibrium. This equilibrium constantly adapts varying environmental conditions. Thereby, constant mass feed and other modifications are the natural result. If glaciological thematic cartography wants to cope with this task, it has to concern particularly about the visualization of glacial and periglacial variations by diverse processes of ice formation and -melt, ice feed, creeping permafrost or other slope instabilities. Behind the finally visible modifications of surface geometry happen, however, complex kinematic processes at the surface and in the underground. Many variations are understandable only from these processes. Among other things dependent on the spatial dimension of the illustratable processes, the representation techniques and their comprehensibility may be substantially restricted. While pure modifications of geometry are variously representable, clearly fewer methods exist to depict two- or three-dimensional movements.

1 Einführung

Die Morphologie des Hochgebirges ist massgeblich von seinen Eisvorkommen geprägt. Alle von Firn, Eis und Permafrost beeinflussten Prozesse stehen

in einem dynamischen, sich laufend wandelnden Gleichgewicht. Teil dieses Gleichgewichtes sind Massentransporte, wie sie zum Beispiel das Fließen von Eis und das Kriechen von Permafrost darstellen. Vor allem unter klimatischen Einwirkungen

* KÄÄB Andreas, Geographisches Institut, Universität Zürich-Irchel, CH-8057 Zürich, Winterthurerstrasse 190

unterliegen die hochalpinen Prozesssysteme und damit die glaziale und periglaziale Morphodynamik ständigen Veränderungen. Die Hochgebirgskartographie befasst sich also mit einem höchst veränderlichen und nur selten statischen Raum.

Kartographie modelliert überwiegend eine Momentaufnahme. In der glaziologisch-thematischen Kartographie werden die markantesten hochalpinen Veränderungen, nämlich die Schwankungen der Oberflächengeometrie von Gletschern, häufig visualisiert. Solche Höhenänderungen stellen jedoch nur ein Glied in der glazialen und periglazialen Prozesskette dar. Sie sind zumeist das Ergebnis räumlicher, also dreidimensionaler Prozesse. Daher werden in der hochalpinen Prozessforschung gerade solche dreidimensionalen Veränderungen, die sogenannte Kinematik hochalpiner Phänomene untersucht. Fortschritte nicht zuletzt der photogrammetrischen und geodätischen Messtechnik eröffnen bei ihrer Beobachtung neue Möglichkeiten.

Die Informationen über die in diesem Beitrag behandelten lokalen hochalpinen Prozesse stammen überwiegend aus photogrammetrischen und geodätischen Messungen, beschreiben also die an der Oberfläche sicht- bzw. messbaren Phänomene. Aus der Oberflächenkinematik (Geometrie & Zeit), also dem flächenhaften Fließfeld eines Gletschers, eines Blockgletschers oder verschiedenen Hanginsstabilitäten lassen sich vielerlei Phänomene erklären. Aus dem Geschwindigkeitsfeld können physikalische Größen zum Beispiel der Eisdynamik abgeleitet werden (Geometrie & Zeit & Kräfte). Eng mit Gletschern und Permafrost verknüpft, ist die Entstehung und Entwicklung periglazialer Seen zu sehen.

Im Folgenden wird eine Auswahl von mit Gletschern und Blockgletschern verbundenen, lokal begrenzten, dynamischen Prozessen beschrieben und einige Möglichkeiten ihrer statischen, d.h. zeitlich invariablen thematischen Visualisierung vorgestellt. Daraus soll deutlich werden, welche Verständnisfortschritte eine fortentwickelte statische oder sogar dynamische, d.h. zeitlich variable Visualisierung zu bringen vermag.

2 Dynamische Prozesse im Glazial und Periglazial

2.1 Fließen von Gletschereis

Die bekanntesten glazialen Prozesssysteme sind zweifellos Gletscher. Die Veränderung der Oberflächengeometrie eines Gletschers – bis hin zu seinem Vorstoss bzw. Rückzug – ist eine Funktion der lokalen Massenbilanz und des lokalen Eisfließens, wie die kinematische Randbedingung an der Oberfläche verdeutlicht:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = b - v_z^s - v_x^s \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

mit der lokalen Massenbilanz an der Oberfläche b , der Oberflächenhöhe h , der zeitlichen Höhenänderung $\partial h / \partial t$, der horizontalen Geschwindigkeitskomponente an der Oberfläche (s) v_x^s in Fließrichtung x (dreidimensionaler Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)^T$), der Oberflächenneigung in Fließrichtung $\partial h / \partial x$ und der vertikalen Eisgeschwindigkeit an der Oberfläche v_z^s (vgl. HUTTER 1983; PATERSON 1994; KÄÄB 1996a, 1996b).

Die vertikale Eisgeschwindigkeit an der Oberfläche wiederum hängt von der horizontalen Eisgeschwindigkeit am Gletscherbett (b) v_x^b , der dortigen Neigung $\partial z^b / \partial x$ und der vertikalen Eisdeformation $\partial v_z^b / \partial z$ über die gesamte Eisdicke ab:

$$v_z^s = \int_{z^b}^h \frac{\partial v_z^b}{\partial z} dz + v_x^b \frac{\partial z^b}{\partial x} \quad (2)$$

Die kinematische Randbedingung ist prinzipiell auf jeder Oberfläche gültig und eignet sich unter anderem besonders dazu, Veränderungen der Oberflächengeometrie im Hochgebirge zu verstehen, enthält sie doch alle Terme, die an solchen dynamischen Veränderungen beteiligt sind.

Höhenänderungen und lokale Massenbilanz typischer alpiner Gletscher betragen durchschnittlich einige Meter pro Jahr (10^1 ma^{-1}), ihre Fließgeschwindigkeiten bewegen sich in der Größenordnung 10^1 - 10^2 ma^{-1} .

Die Zusammenhänge (1) und (2) zeigen, dass die in der Hochgebirgskartographie häufig dargestellten Höhenänderungen von Gletschern das Ergebnis dynamischer und klimatischer Vorgänge sind. Das Verständnis und die Interpretation der Geometrieänderungen kann durch die Darstellung der massgeblichen Terme der Gleichungen (1) und (2) wesentlich verbessert werden.

2.2 Kriechen von Permafrost

Ganzjährig gefrorenes Lockermaterial kann bei ausreichender Neigung kohärent kriechen und mit Blockgletschern auffällige hochalpine Landschaftselemente bilden. Diese, in trocken-kalten Alpenregionen verbreiteten 'Blockströme' sind wesentlich durch ihre räumliche Kinematik definiert (z.B. HAEBERLI 1985; BARSCH 1996). Deren Kenntnis und Darstellung gibt wichtige Hinweise auf die Entstehung, Entwicklung und Morphologie dieser Landschaftselemente. Geometrieänderungen sind auch bei Blockgletschern eine Funktion der räumlichen Kinematik und klimatischer Einflüsse (Gleichungen (1) und (2); HAEBERLI & VONDER MÜHLL 1996, KÄÄB

et al. 1998). Während manche Prozesse des Permafrostkriechens also mit dem Eisfließen vergleichbar sind, weisen Blockgletscher als ganze jedoch ein völlig anderes System des Massensatzes auf (HÄBERLI & VONDER MÜHLL 1996, HÄBERLI et al. 1998). Ihre Massenzufuhr besteht aus gefrierendem Oberflächen- und Grundwasser sowie Erosionsschutt. Letzterer wird stetig oder in Extremereignissen akkumuliert und kontinuierlich transportiert, verlässt das kriechende Permafrostsystem in der Regel aber kaum wieder. Blockgletscher haben nur sehr geringe Massenbilanzraten (cm a^{-1}). Auf Grund ihrer Materialeigenschaften kriechen sie mit Geschwindigkeiten von wenigen cm a^{-1} bis einigen dm a^{-1} . In ähnlicher Grössenordnung bewegen sich die typischen Höhenänderungen (z.B. HÄBERLI 1985, BARSCH 1996, KÄÄB 1998). Diese geringen Veränderungsraten stellen ein bei der Visualisierung des Phänomens besonders zu beachtendes Merkmal dar.

2.3 Felssackungen, Erosion/Akkumulation von Schutt

Felssackungen und -rutschungen im Gletscherumfeld können bei Zusammentreffen mehrerer geologischer und glaziologischer Faktoren, wie Gesteinsschichtung und Gletscherfliessrichtung entstehen, wenn ein Gletscherrückzug die Talflanken entlastet. Auch ein ständiger Wechsel von Gletschervorstoss und -rückzug mit den damit verbundenen Veränderungen der wirkenden Kräfte und hydrologischen Verhältnisse könnte die Stabilität von Talflanken beeinflussen. Die Veränderungsrate solcher Hanginstabilitäten liegen zwischen wenigen mm a^{-1} bis vielen m a^{-1} . Auch hier sind Veränderungen der Oberflächengeometrie das Resultat räumlicher Prozesse (vgl. Gleichungen (1) und (2)). Nur aus der Darstellung der Höhenänderungen heraus sind die ablaufenden Prozesse in der Regel kaum zu verstehen.

Erosionen und Akkumulationen von Lockermaterial, seien sie stetig oder in Extremereignissen, sind ebenfalls ein typisches periglaziales Phänomen. Ihre Kinematik ist schwierig zu fassen (Steinschlag, Murgänge etc.), so dass oft nur die resultierenden Veränderungen der Oberflächengeometrie dargestellt werden können.

2.4 Periglaziale Seen

Glaziale und periglaziale Seen liegen auf Gletschern (supraglazial), werden von ihnen gestaut (randglazial), bilden sich bei Gletscherrückzug in Zungenbecken oder auf Moränenbastionen (proglazial) oder befinden sich in sonstigen von Gletschern und Permafrost beeinflussten Zonen (periglazial) (HÄBERLI 1992). Auffällige periglaziale Seen sind zum Beispiel Thermokarstseen im Toteis und dauernd gefrorenem Lockermaterial (z.B.

KÄÄB et al. 1996). All diese Seen unterliegen zum einen dauernden exogenen Schwankungen, weil sich die einwirkenden Gletscher und Permafrostvorkommen ständig verändern. Zum anderen bedingt der Kontakt der Seen zu Eis meist thermisch getriebene, endogene Variationen.

3 Geometrieänderungen

Zur verständlichen Darstellung von Grundrissveränderungen (Gletscherrand, Seerand etc.) kann die Überlagerung mehrerer Grundrisse und ihre Füllung mit unterschiedlichen Farben oder Mustern genügen (vgl. Abb. 1). Während diese Darstellungsform in Orthoprojektion naturgemäss vor allem Seen gut repräsentiert, kann die Schrägansicht von über Geländemodelle gezogenen unterschiedlichen Gletscherausdehnungen das Verständnis von Gletschervorstössen und -rückzügen beispielsweise wesentlich verbessern (HÄBERLING 1998). In komplexeren Fällen von Gletscherschwankungen wird jedoch die reine Grundrissdarstellung zum Verständnis nicht mehr genügen. Dann müssen auch andere Prozesse wie zum Beispiel die entsprechenden Höhenänderungen dargestellt werden.

So ist aus Abbildung 1 rechts kaum verständlich, wieso der abgebildete Gletscher sich zwischen 1967 und 1973 von seiner Zunge beim Moränensee her zurückzieht, aber ein erneuter Vorstoss (bis 1995) quer dazu stattfindet. Die entsprechenden Höhenänderungen (vgl. Abb. 2) verdeutlichen diesen Vorstoss, der aber wiederum erst aus der Darstellung der Hauptfliessrichtung auf der Gletscherzunge (vgl. Abb. 4) heraus klar wird. Die Fliessrichtung hat sich offensichtlich im Lauf der Jahrzehnte geändert.

Zur Darstellung von eindimensionalen Informationen an der Geländeoberfläche stehen eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verfügung. Hier sei beispielhaft die Visualisierung von vertikalen Geometrieänderungen (Höhenänderungen, $\partial h/\partial t$) herangezogen. Die Darstellung kann sich nach der Art der zugrundeliegenden Höheninformation richten. Ist die Geländegeometrie durch multitemporale Höhenlinien bestimmt, so ist die Überlagerung dieser Isolinien und die Gestaltung der Flächen zwischen Linien gleicher Höhe eine adäquate Darstellung (z.B. VAW 1983; SPINNER 1986). Hierbei haben sich rote Farben bei Höhenverlust (Rot \approx warm, Eisschmelze) und blaue Farben bei Höhenzunahme (Blau \approx kalt, Eiszunahme) eingebürgert (IMHOF 1972).

Digitale Terrainmodelle (DTM) im regelmässigen Raster stellen eine geeignete Möglichkeit dar, flächenhafte Höhenänderungen zu bestimmen. Das DTM bedeutet dann eine Stichprobe der Geländehöhen, die, anders als Bruchkanten oder Einzelpunkte, nicht vom Auswerter beeinflusst ist (KÄÄB

† 996a). Die originalen und gefilterten Daten solcher multitemporaler Rasterinformation werden mit Vorteil durch punktuelle Informationen an den Rasterpunkten dargestellt (vgl. Abb. 2). Die Interpretation einer solchen Darstellung kann die originale Datendichte und spezielle lokale Effekte berücksichtigen. Weiter ist eine (genaue) Werteentnahme aus der Darstellung möglich. Auch andere eindimensionale Attribute (z.B. Deformationen, Geschwindigkeitsbeträge, Massenbilanz) können so dargestellt werden (IMHOF 1972). Ein geeignetes Symbol für die punktuellen Werte sind Kreise bzw. Kreisscheiben (vgl. Abb. 2). Der Radius r der Kreise wird aus den Datenwerten z unter Berücksichtigung eines Massstabes m zum Beispiel nach

$$r = m * z^n \quad (3)$$

berechnet. Je grösser n , umso deutlicher werden die räumlichen Unterschiede der Daten. Auch nicht rasterförmige punktweise Informationen lassen sich so darstellen.

Aus flächenhaften Höhenänderungen bzw. anderen eindimensionalen Informationen können Isolinien, Isoflächen und Farbverläufe interpoliert werden (z.B. KOMMISSION FÜR GLAZIOLOGIE 1990; IMHOF 1972). Alle Interpolationen bergen die Gefahr von Artefakten und erlauben keine Beurteilung der Originaldaten mehr. Sie stellen also vor allem eine für ein breiteres Publikum aufbereitete Präsentationsform dar, die teilweise besser als die Originaldaten verständlicher sind. Den natürlichen Prozessen am nächsten kommt dabei eine kontinuierliche Interpolation und Visualisierung zum Beispiel mit Farbverläufen (vgl. Abb. 3; Glaziologische Karte des Oberengadins, 1998). Zur Orientierung und zum besseren Verständnis der natürlichen Prozesse wird die Darstellung der eindimensionalen Information mit Geländeinformation hinterlegt. Meist werden hierzu Höhenlinien (vgl. Abb. 2), Schummerungen (vgl. Abb. 9; RENTSCH et al. 1990) und/oder Orthophotos oder andere Photoperspektiven verwendet (vgl. Abb. 3; ASCHENBRENNER 1992; KERSTEN & MEISTER 1993). Wie auch bei den Grundrissänderungen dürften Schrägansichten dem Verständniss durch Laien manchmal förderlich sein (SLUPETZKY 1996).

4 Fliesen und Kriechen

Während Höhenänderungen auf Gletschern, kriechem Permafrost und Hanginstabilitäten auf vielfältigste Weise darstellbar sind, ist die Visualisierung von Oberflächenbewegungen deutlich eingeschränkter. Räumliche Bewegungen stellen im Vergleich zu den eindimensionalen Höhenänderungen eine zwei- oder sogar dreidimensionale Information dar ($\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)^T$). Zugleich ist aber die räumliche Kinematik eine wesentliche Ursache

für die Veränderungen der Oberflächengeometrie (vgl. Gleichungen (1) und (2)). So können Geometrieänderungen teilweise nur aus der Betrachtung dieser Kinematik heraus verstanden werden. Zur Darstellung von horizontalen Bewegungen (Feldern von zweidimensionalen Geschwindigkeiten $\mathbf{v}_{hz} = (v_x, v_y)^T$) sind vor allem Vektoren geeignet, die beispielsweise anderen, topographischen Informationen überlagert werden (vgl. Abb. 3; RENTSCH et al. 1990; KAUFMANN 1996; IMHOF 1972).

Werden die kartesischen Koordinaten der Vektoren in Polarkoordinaten umgewandelt, können die Komponenten 'Vektorlänge' (Betrag der Geschwindigkeit) oder 'Richtung' als eindimensionales Attribut ähnlich den Höhenänderungen dargestellt werden (Isolinien, Isoflächen, Farbverläufe, Symbole etc.). Temporale Geschwindigkeitsänderungen lassen sich durch Überlagerung der Geschwindigkeitsvektoren der verschiedenen Epochen (vgl. Abb. 4) oder durch vektorielle Abbildung der Beschleunigung darstellen (Ableitung der Geschwindigkeitsvektoren, $\partial \mathbf{v} / \partial t$) (vgl. Abb. 5). Die Komplexität und damit die Unanschaulichkeit solcher Prozesse setzt ihrer statischen Darstellung enge Grenzen.

Eine andere Form der Visualisierung von Geschwindigkeitsfeldern besteht in der Interpolation von Stromlinien, also der Berechnung von theoretischen Partikelwegen (zur Darstellung von Bewegungen vgl. auch IMHOF 1972). Ist das zugrundeliegende Geschwindigkeitsfeld konstant oder seine temporalen Variationen bekannt, können Trajektorien, also tatsächliche Partikelwege interpoliert und dargestellt werden (vgl. Abb. 6).

Wie zu Beginn gezeigt, sind das Fliesen von Eis und Permafrost sowie andere Massentransporte Prozesse, die die Veränderungen der Oberflächengeometrie massgeblich beeinflussen. So kann die kombinierte Darstellung von Höhenänderungen und horizontalen Geschwindigkeiten wichtige Vorgänge erkennen und verstehen lassen (vgl. Abb. 3, 7).

Neben den räumlichen Geschwindigkeiten haben auch die räumlichen Gradienten eines Geschwindigkeitsfeldes – die Deformationen – einen Einfluss auf die Oberflächengeometrie (vertikale Deformation $\partial v_z / \partial z$, vgl. Gleichung (2)). Obendrein verdeutlichen sie als Ableitungen der Geschwindigkeit Eigenschaften des räumlichen Geschwindigkeitsfeldes. Zum Beispiel die Bildung von Gletscherspalten ist eng mit der Eisdeformation verknüpft. Die beiden horizontalen Komponenten des Deformations-Tensors ($\partial v_x / \partial x$ und $\partial v_y / \partial y$) können, auf die Hauptachsen transformiert, als Rosetten dargestellt werden. Solche Rosetten zeigen Richtung und Betrag der ebenen Deformationen an (vgl. Abb. 8). Die vertikale Komponente ($\partial v_z / \partial z$) der Deformationen kann als eindimensionale Information ana-

log der Höhenänderungen dargestellt werden (vgl. Abb. 9). Bei inkompressiblen Medien wie Eis gilt

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

5 Schlussfolgerungen und Perspektiven

Thematische Hochgebirgskartographie befasst sich mit zwei- und dreidimensionalen Objekten wie Seen, Gletschern, Blockgletschern etc. Wird, wie meist der Fall, nur die Oberfläche dreidimensionaler Objekte betrachtet, sei hier von 2,5-dimensionalen Objekten die Rede (vgl. Abb. 10). Die Veränderungen der Objekte durch räumlich wirksame Prozesse oder auch andere Informationen können ein- bis dreidimensional sein. Die Veränderung eines Sees beispielsweise stellt einen zweidimensionalen Prozess einer ebenen Fläche (2D) dar; Höhenänderungen sind eine eindimensionale (vertikale) geometrische Veränderung einer Oberfläche (2,5D); horizontale Oberflächengeschwindigkeiten sind zweidimensionale Veränderungen. Je höher die Objekt- und Prozessdimensionen, um so geringer die Möglichkeiten und Verständlichkeit ihrer Projektion.

Zur Darstellung eindimensionaler Prozesse stehen vielfältige Techniken zur Verfügung, zur Darstellung zweidimensionaler Prozesse deutlich weniger. Dreidimensionale Prozesse lassen sich unter Umständen durch Überlagerung von vorgenannten Techniken visualisieren (1D+2D; vgl. GUDMUNDSSON 1994). Statisch können die Objekte und Prozesse in zweidimensionaler, orthogonaler Weise oder perspektiv (2,5D) abgebildet werden (vgl. Abb. 10). Fortschritte zum Verständniss gerade hochalpiner Objekte können zweifellos 3D-Visualisierungstechniken bringen (vgl. BUCHROITHNER & KIRSCHENBAUER 1998).

Im Gegensatz zu vielen anderen Themenbereichen befasst sich Hochgebirgskartographie mit einem höchst variablen Raum, muss sich also nicht nur mit der Modellierung dreidimensionaler (Raum), sondern gerade auch mit vierdimensionaler Information (Raum & Zeit) beschäftigen. Hier geraten statische Visualisierungsmethoden an deutliche Grenzen. Sie vermögen nur wenige Zeitpunkte, bzw. Veränderungen zwischen diesen Zeitpunkten gemeinsam darzustellen. In Zukunft könnte die Erweiterung der Visualisierungstechniken um die Dimension der Zeit neue Ansätze bieten (dynamische Visualisierung).

6 Literaturverzeichnis

ASCHENBRENNER J. (1992), Orthophoto und Monoplotting in der Gletscherkartographie. Die

Herstellung von Kartengrundlagen für die Hochgebirgsforschung am Beispiel des Stubbacher Sonnenblickkees, Hohe Tauern (= Salzburger Geogr. Schriften, 21). 89 S.

BARSCH D. (Hrsg.) (1996), Rock glaciers. Heidelberg, Springer Verlag. 352 S.

BUCHROITHNER M., KIRSCHENBAUER S. (1998), Derivation of relief information from various cartographic representation. In: KRIZ K. (Hrsg.), Hochgebirgskartographie – Silvretta '98, High Mountain Cartography (= Wiener Schriften z. Geogr. u. Kartogr., 11), S. 65-75.

Glaziologische Karte: Julier Bernina (Oberengadin) (1998), Glaziologische Karte NFP31. Zürich, vdf-Verlag.

GUDMUNDSSON H. (1994), Converging glacial flow – a case study: The Unteraarglacier. In: VISCHER D. (Hrsg.), Beiträge aus der Gebirgs-Geomorphologie (= Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie d. ETH Zürich, 131). 120 S.

HAEBERLI W. (1985), Creep of mountain permafrost. In: VISCHER D. (Hrsg.), Beiträge aus der Gebirgs-Geomorphologie (= Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie d. ETH Zürich, 77). 142 S.

HAEBERLI W. (1992), Zur Stabilität von Moränenseen in hochalpinen Gletschergebieten. In: Wasser, Energie, Luft, 84, 11/12, S. 361-364.

HAEBERLI W., VON DER MÜHLL D. (1996), On the characteristics and possible origins of ice in rock glacier permafrost. In: Zeitschrift f. Geomorphologie N.F., Suppl.-Bd. 104, S. 43-57.

HAEBERLI W., HOELZLE M., KÄÄB A., KELLER F., VON DER MÜHLL D., WAGNER S. (1998, im Druck), Ten years after drilling through the permafrost of the active rock glacier Murtèl, Eastern Swiss Alps: answered questions and new perspectives. In: Proc. of the 7th Int. Conf. on Permafrost.

HÄBERLING C. (1998), Benutzerbedürfnisse und Anforderungen zu neuartigen Gletscherdarstellungen. In: KRIZ K. (Hrsg.), Hochgebirgskartographie – Silvretta '98, High Mountain Cartography (= Wiener Schriften z. Geogr. u. Kartogr., 11), S. 81-93.

HUTTER K. (Hrsg.) (1983), Theoretical Glaciology. Boston, Reidel Publishing Company. 510 S.

IMHOF E. (Hrsg.) (1972), Thematische Kartographie. Berlin, New York, Walter de Gruyter. 360 S.

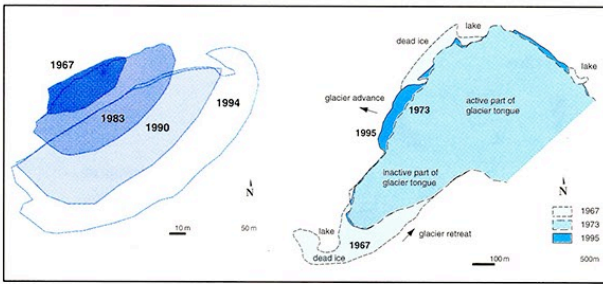


Abb. 1: Variierende Grundrissgeometrien: Wachstum eines Thermokarstsees (links) und Entwicklung eines Gletscherumrisses bzw. markante Stadien (rechts). Gruben, Wallis

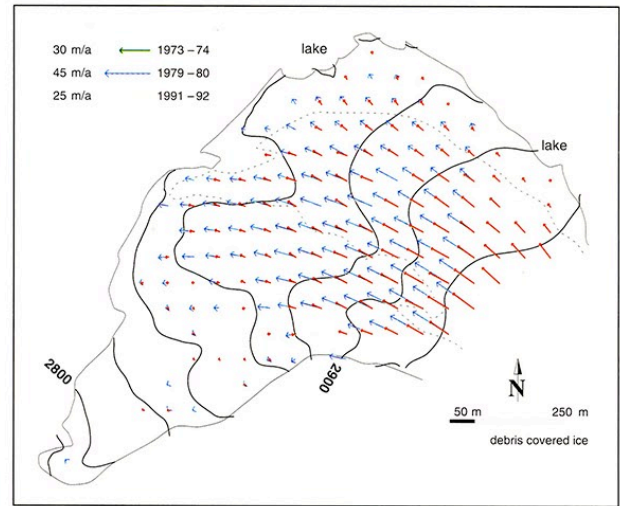


Abb. 4: Horizontale Oberflächengeschwindigkeiten eines Gletschers in verschiedenen Perioden. Grubengletscher, Wallis

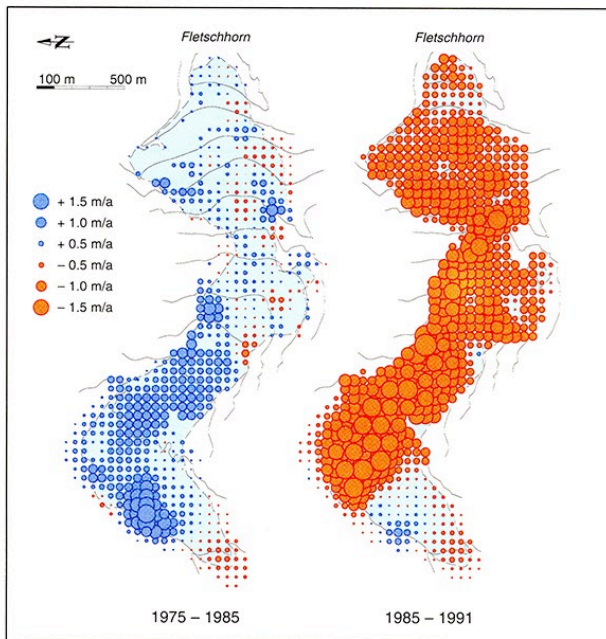


Abb. 2: Rasterförmig gemessene Höhenänderungen. Grubengletscher, Wallis

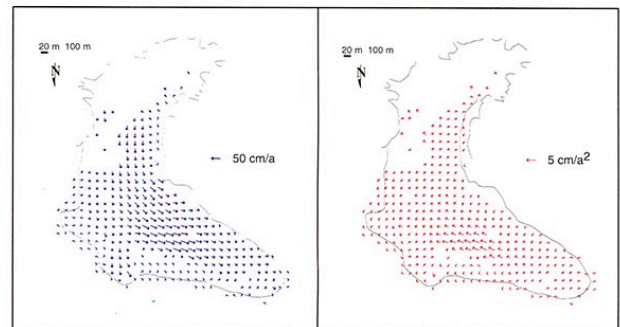


Abb. 5: Horizontale Oberflächengeschwindigkeiten zwischen 1981 und 1994 (links) und ihre temporale Veränderung zwischen den Perioden 1981/85 und 1990/94, dargestellt als ebene vektorielle Ableitungen (rechts). Muragl Blockglacier, Graubünden

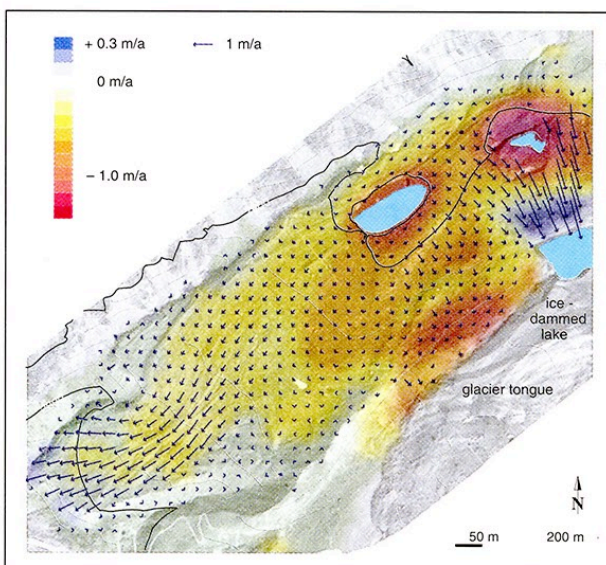


Abb. 3: Horizontale Oberflächengeschwindigkeiten und Höhenänderungen kriechenden Permafrostes. Gruben Blockglacier 1970-1991, Wallis. Orthophoto 1985, Situation 1991

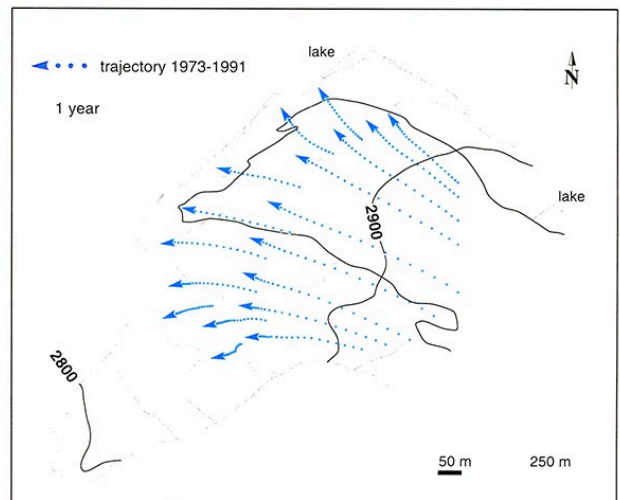


Abb. 6: Aus multitemporalen Geschwindigkeitsfeldern interpolierte Trajektorien auf einem Gletscher. Die Kreise markieren in Jahresritten den tatsächlichen Weg eines Oberflächenpartikels. Grubengletscher, Wallis

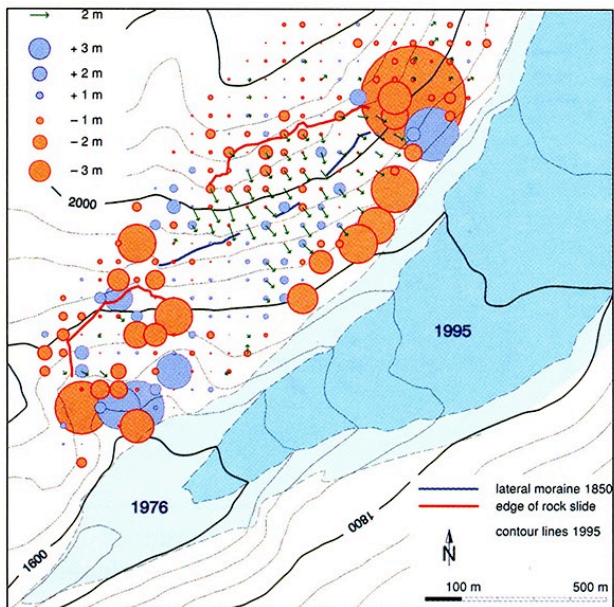


Abb. 7: Horizontale Oberflächengeschwindigkeiten und Höhenänderungen auf einer Fels-sackung 1976-1995. Aletschgletscher, Wallis

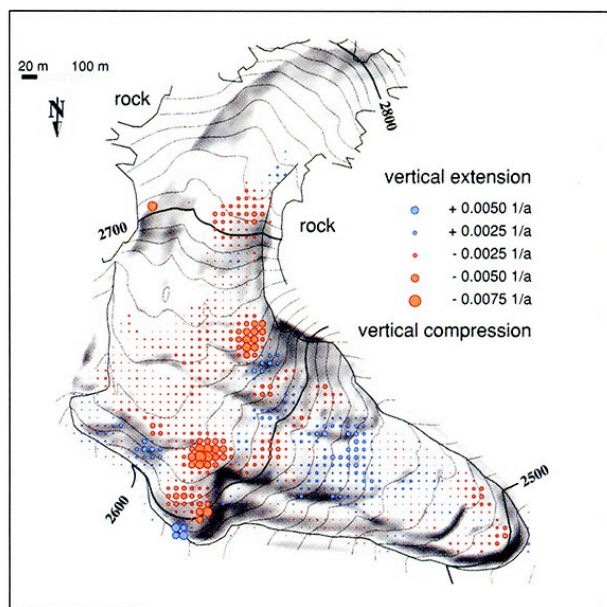


Abb. 9: Vertikale Deformationsraten auf einem Blockgletscher im Val Muragl 1981-1994, Graubünden

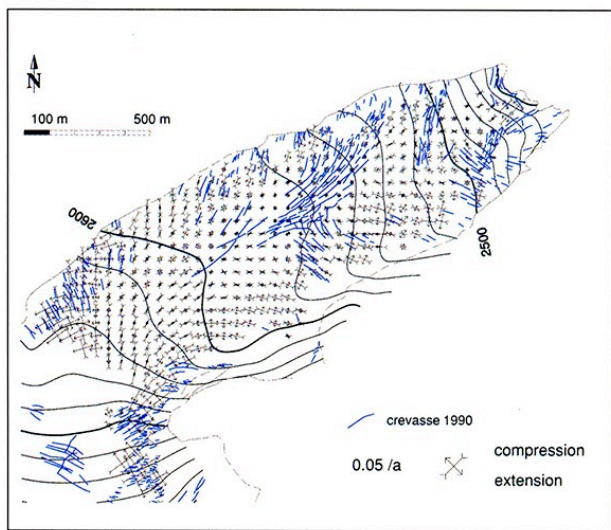


Abb. 8: Horizontale Deformationsraten und Spalten auf einem Gletscher. Griesgletscher 1990-1991, Wallis

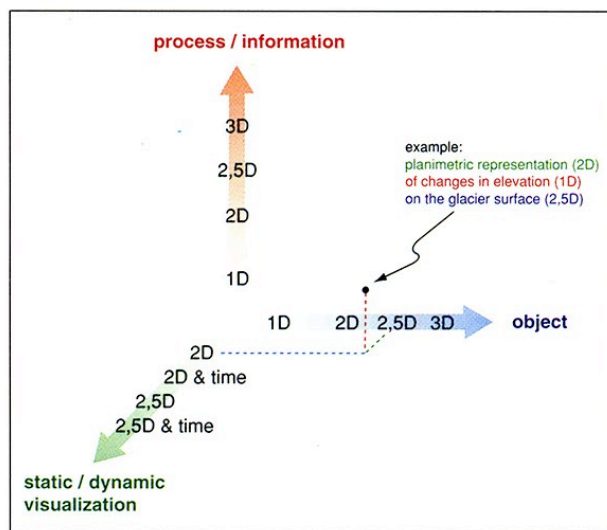


Abb. 10: Räumliche Dimensionen von Objekten, ihren Veränderungen und Visualisierungstechniken

- KÄÄB A. (1996), Photogrammetrische Analyse zur Früherkennung gletscher- und permafrostbedingter Naturgefahren im Hochgebirge. In: VISCHER D. (Hrsg.), Beiträge aus der Gebirgs-Geomorphologie (= Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie d. ETH Zürich, 145). 182 S.
- KÄÄB A., HAEBERLI W., TEYSSEIRE P. (1996), Entwicklung und Sanierung eines Thermokarstsees am Gruben-Blockgletscher (Wallis). In: Berichte u. Forschungen, 8, 145-153. Freiburg, Geogr. Inst. d. Universität.
- KÄÄB A. (1998), Oberflächenkinematik ausgewählter Blockgletscher des Oberengadins. In: VISCHER D. (Hrsg.), Beiträge aus der Gebirgs-Geomorphologie (= Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie d. ETH Zürich, 158), S. 121-140.
- KÄÄB A., GUDMUNDSSON G.H., HOELZLE M. (1998, im Druck), Surface deformation of creeping mountain permafrost. Photogrammetric investigations on rock glacier Murtèl, Swiss Alps. In: Proc. of the 7th Int. Conf. on Permafrost.
- KAUFMANN V. (1996), Der Dösener Blockgletscher – Studienkarten und Bewegungsmessungen (= Arbeiten aus d. Inst. f. Geogr. d. Karl-Franzen-Universität Graz, Beiträge z. Permafrostforschung in Österreich, 33), S. 141-162.
- KEFSTEN Th., MEISTER M. (1993), Grosser Aletschgletscher. Photogrammetrische Auswertungen als Grundlage für glaziologische Untersuchungen. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 2, S. 75-80.
- KOMMISSION FÜR GLAZIOLOGIE DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN (Hrsg.) (1990), Vornagtferner. Höhenänderungen 1979-1982. Beilage zu Fluctuations of Glaciers 1985-1990, IAHS (ICSI) – UNESCO, 1993, 6.
- PATERSON W.S.B. (Hrsg.) (1994), The physics of glaciers. 3. Aufl. Oxford, Pergamon Press. 378 S.
- RENTSCH H., WELSCH W., HEIPKE Ch., MILLER M. (1990), Digital terrain models as a tool for glacier studies. In: Journal of Glaciology, 36, 124, S. 273-278.
- SPINNER C. (1986), Änderungen der Zungenlage des Gepatschferners seit 1886. Beilage zu Fluctuations of Glaciers 1980-1985, IAHS (ICSI) – UNESCO, 1988, 5.
- SLUPETZKY H. (1996, unpubl.), Gletschervermessungsprogramm. Höhenänderungen des Ödenwinkelkees, visualisiert von G. EHGARTNER. Alpine Glaciologist Meeting, Zürich.
- VAW (Hrsg.) (1983), Griesgletscher 1:10.000. Aufnahmen 1961 und 1979. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich / Gletscherkommission d. SNG Zürich. Beilage zu Fluctuations of Glaciers 1975-1980, IAHS (ICSI) – UNESCO, 1985, 4.

7 Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Variierende Grundrissgeometrien: Wachstum eines Thermokarstsees (links) und Entwicklung eines Gletscherumrisses bzw. markante Stadien (rechts). Gruben, Wallis
- Abb. 2: Rasterförmig gemessene Höhenänderungen. Grubengletscher, Wallis
- Abb. 3: Horizontale Oberflächengeschwindigkeiten und Höhenänderungen kriechenden Permafrostes. Gruben Blockgletscher 1970-1991, Wallis. Orthophoto 1985, Situation 1991
- Abb. 4: Horizontale Oberflächengeschwindigkeiten eines Gletschers in verschiedenen Perioden. Grubengletscher, Wallis
- Abb. 5: Horizontale Oberflächengeschwindigkeiten zwischen 1981 und 1994 (links) und ihre temporale Veränderung zwischen den Perioden 1981/85 und 1990/94, dargestellt als ebene vektorielle Ableitungen (rechts). Muragl Blockgletscher, Graubünden
- Abb. 6: Aus multitemporalen Geschwindigkeitsfeldern interpolierte Trajektorien auf einem Gletscher. Die Kreise markieren in Jahresschritten den tatsächlichen Weg eines Oberflächenpartikels. Grubengletscher, Wallis
- Abb. 7: Horizontale Oberflächengeschwindigkeiten und Höhenänderungen auf einer Felsackung 1976-1995. Aletschgletscher, Wallis
- Abb. 8: Horizontale Deformationsraten und Spalten auf einem Gletscher. Griesgletscher 1990-1991, Wallis
- Abb. 9: Vertikale Deformationsraten auf einem Blockgletscher im Val Muragl 1981-1994, Graubünden
- Abb. 10: Räumliche Dimensionen von Objekten, ihren Veränderungen und Visualisierungstechniken