

INTERDISZIPLINARITÄT

Eiszeit, Klimaänderung und Menschheit

GLETSCHERFORSCHUNG ALS BEISPIEL LANGFRISTIGER INTERDISZIPLINÄRER ARBEITEN AN DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN.



M. WEEBER (OBEN), L. BRAUN (UNTEN)

Vergleichsansicht der Pegelstation Vernagtbach, aufgenommen von etwa demselben Standpunkt 1989 (oben) und 2003 (unten). Die Veränderungen im Erscheinungsbild des Vernagtferners im Hintergrund sind dramatisch. Im oberen Bild ist noch deutlich die Schwarzwandzunge links in der Bildmitte zu erkennen. Gegenwärtig ist deren Oberfläche 40 m tiefer und von der Pegelstation nicht mehr einzusehen. Auch die mittlere Zunge hat innerhalb von 14 Jahren beträchtlich an Dicke verloren und den das Vernagtal abschließenden Felsriegel nahezu vollständig freigegeben. Auftauender Permafrost führte 1999 zum Einsturz eines 100 m hohen Felspfeilers (rechts oben).

VON HORST HAGEDORN

Wir leben mitten in einer Eiszeit!

Diese Aussage einiger Quartärforscher wirkt angesichts der aktuellen Diskussionen über eine globale Erwärmung wohl eher provokativ als fundiert. Bei den in der Öffentlichkeit geführten Erörterungen über eine Klimaänderung wird aber leicht vergessen, dass wir uns zur Zeit nur in einer wärmeren Phase einer Eiszeit innerhalb der geologischen Zeitabfolge des Quartärs befinden. Die polaren Eiskappen und die große Zahl von Gebirgsgletschern auf unserer Erde sind ein Hinweis auf die Fortdauer dieses Eiszeitzustands. Das Quartär ist aber auch das geologische Zeitalter der Menschwerdung und der Entwicklung von Kultur und Technik der Menschheit. Im Gegensatz zu den klimatisch erzwungenen Wanderbewegungen der Bevölkerungsgruppen während der Kaltzeiten kann die hochtechnisierte und dicht bevölkerte Zivilisation des 21. Jahrhunderts radikalen Klimaschwankungen weit schlechter begegnen. Die Aufklärung der Klimaentwicklung der seit dem Ende der letzten Kaltzeit vergangenen 10.000 Jahre und ihr Einfluss auf die Menschheit sind daher in den letzten Jahrzehnten Gegenstand intensiver und weltweit geförderter Forschungsaktivitäten in vielen wissenschaftlichen Disziplinen. Auch in der Öffentlichkeit besteht

inzwischen großes Interesse am derzeit beobachteten Klimawandel, dessen Ursachen und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Die sich langsam durchsetzende Erkenntnis, dass Gletscher in vielen Gebieten die Lebensbedingungen beeinflussen und selbst großräumige Ökosysteme vom Zusammenspiel von Eis, Niederschlag, Schmelze und Abfluss bestimmt werden, schlägt sich auch in der zunehmenden Vielfältigkeit der Fachrichtungen innerhalb der Glaziologie nieder. Waren es früher hauptsächlich Meteorologen und Vermessungsingenieure, die sich mit Gletschern befasst haben, so finden sich heute auch Hydrologen, Geophysiker, Geographen, Fernerkundungsspezialisten und andere Wissenschaftler zusammen, die in einer interdisziplinären Kooperation die vielfältigen Probleme zu lösen versuchen. Moderne Forschung auf dem Gebiet der Glaziologie wäre ohne diese Vielfalt an fachlicher Kompetenz gar nicht mehr denkbar. Dieser Forschungsaspekt ist in der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften schon seit längerem realisiert und durch übergreifende Arbeiten von diversen Fachrichtungen dokumentiert.

Klimawandel und Gletscherverhalten

Ein wesentliches Hilfsmittel für die Aufklärung des Klimagangs ist die Erforschung des Verhaltens der Gletscher, deren drastische Veränderungen im Erscheinungsbild innerhalb eines Zeitraums von wenigen Jahren auch dem interessierten Laien nicht verborgen bleiben (Abbildung Seite 8). Die polaren Gletscher haben sich dabei durch Untersuchungen während der letz-

ten Jahrzehnte als hervorragende Klimaarchive über die letzten Eiszeiten hinweg erwiesen. Dagegen spiegeln die alpinen Gletscher vor allem die rezenten Klimaentwicklungen in ihren Reaktionen wider, wobei allerdings die Rückkopplung zwischen klimatischen Einflüssen und dem Gletscherverhalten sehr komplex ist und weite Bereiche von Zeitskalen abdeckt. Aus diesem Grund kann die glaziale Antwort auf nachhaltige klimatische Veränderungen oft erst auf der Grundlage von langjährigen Datenreihen systematisch untersucht und bewertet werden. Dabei ist es für die ökologische und ökonomische Wirkung von drastischen Schwankungen der Witterung oft von Vorteil, dass Gletscher deren Folgen bis zu einem gewissen Grad, z.B. im Abflussverhalten des Schmelzwassers, abmildern können. In vielen Gebieten der Erde ist dies von fundamentaler Bedeutung für die Bewohnbarkeit ganzer Landstriche. So kann während heißer und trockener Perioden die erhöhte Gletscherschmelze den Wassermangel der Gebirgsanrainer teilweise kompensieren, während in niederschlagsreichen Zeiten die Gefahr von Hochwässern durch die Speicherung des Niederschlags in Form von Schnee und Eis verringert wird.

Langzeitbeobachtung des Vernagtferners durch die Bayerische Akademie der Wissenschaften

Speziell in den letzten Jahren wurde auf wissenschaftlichen Tagungen deutlich gemacht, dass die inzwischen vorhandenen langen Messreihen einer kleinen Anzahl von gut untersuchten Gletschern (z.B. Hintereisferner, Vernagtferner, Glacier de Sarenne, Storglaciären) eine wichtige wissenschaftliche Basis für die Analyse der Interaktion von Gletscher und Klima darstellen. Dies

trägt der Tatsache Rechnung, dass in Kurzzeitprojekten zwar Effekte (etwa die Abschmelzverhältnisse für einen spezifischen Ort und begrenzte Witterungsvariationen) untersucht werden können, die Einbettung in den großen Zusammenhang jedoch nicht erkenntlich wird. (Dies hat im Übrigen dazu geführt, dass auch für die großen Eisschilde längerfristige, systematische Beobachtungsprogramme umgesetzt werden, wie etwa bei PARCA (Programme for Arctic Regional Climate Assessment) und ICEMON (Glaciological monitoring of the Greenland ice margin) in Grönland).

Die im Jahr 1962 gegründete Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften ist in der glücklichen Lage, für den Vernagtferner in den Ötztaler Alpen eine der besten Zeitreihen für langfristige Gletscherbeobachtung in den Alpen zu betreuen. Die Grundlagen dieser Forschung wurden bereits durch frühe Gletscherbeobachtung im 18. Jahrhundert gelegt und wissenschaftlich durch Professor Sebastian Finsterwalder fortgeführt, der im Jahr 1889 die erste großmaßstäbliche Karte eines Alpengletschers für den Vernagtferner erstellt hat. Das seitdem erarbeitete umfangreiche Archiv von Gletscherstands- und Massenbilanzdaten dient heute als Basis für die Identifikation wichtiger Prozesse im komplexen Zusammenspiel zwischen Klima, Gletschern und Umwelt.

Pegelstation Vernagtbach der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Die intensive Beschäftigung der beteiligten Wissenschaftler mit einem speziellen Untersuchungsgebiet ermöglicht ein noch tieferes Verständnis der Mechanismen und Zusammenhänge, das ohne dieses Testgebiet so nie erreichbar sein

wird. Das dort gewonnene Wissen bildet die Basis für die Entwicklung neuer Konzepte und Methoden, angepasst an den Stand moderner Technik und neuer Erkenntnisse. So ist es trotz des fortschreitenden Einsatzes der Fernerkundung auch in der Glaziologie unumgänglich, weiterhin geeignete Bodendaten zu erheben, die zur Kalibrierung und Evaluation benötigt werden.

Solche Teststudien werden bevorzugt in bereits intensiv untersuchten Gebieten durchgeführt, da vorhandenes Datenmaterial und Erfahrung die Optimierung der Messkampagnen wesentlich erleichtert. Gezielt

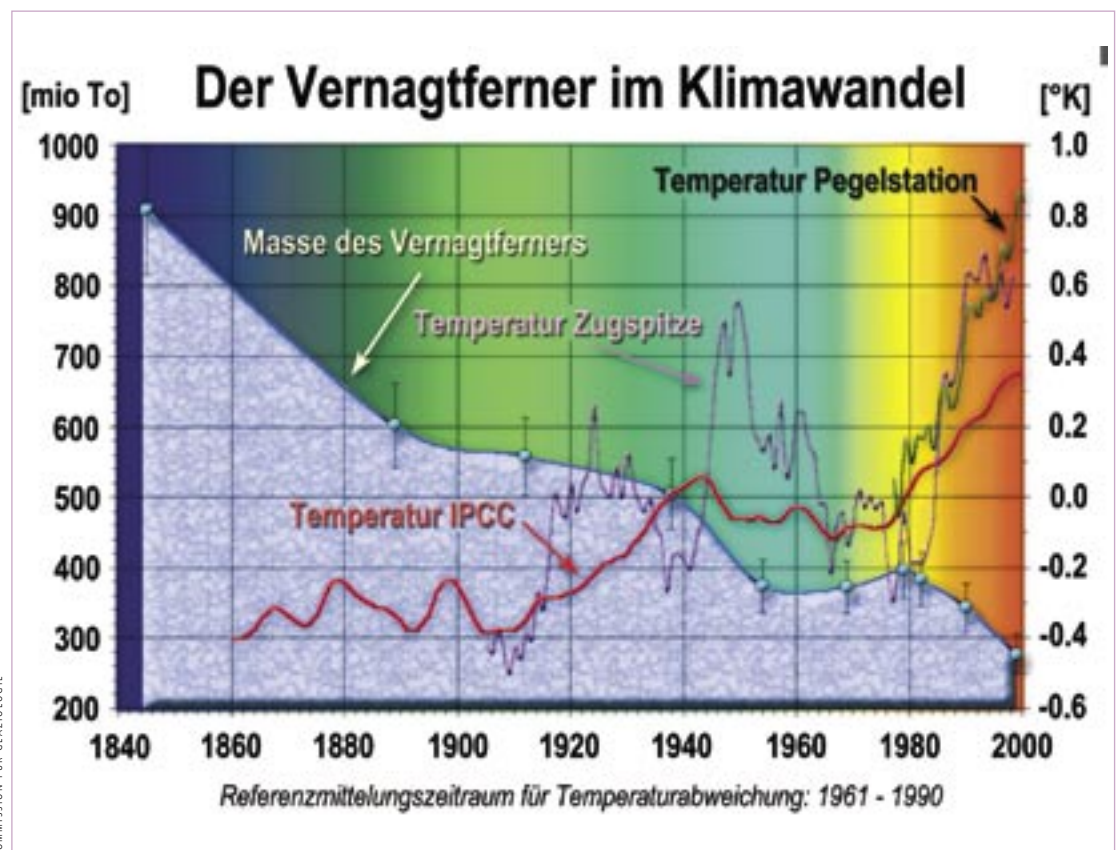
können hier Messungen an optimalen Lokationen zur optimalen Zeit durchgeführt werden. In vielen Fällen setzt dies jedoch voraus, dass das Testgebiet kurzfristig und auch häufig von den Wissenschaftlern besucht werden kann. Nur mit regelmäßigen Kontrollbesuchen während der gesamten Beobachtungsperiode können alle denkbaren Zustände und Fehlfunktionen der Geräte getestet werden.

Alle genannten Bedingungen werden für die Untersuchungen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften am Vernagtferner in idealer Weise durch die im Jahr 1973

errichtete Pegelstation Vernagtbach (Abbildungen Seite 8) erfüllt, die neben ihren hydraulischen und meteorologischen Messeinrichtungen Unterkunfts- und Arbeitsmöglichkeiten für wissenschaftliches und technisches Personal bereitstellt.

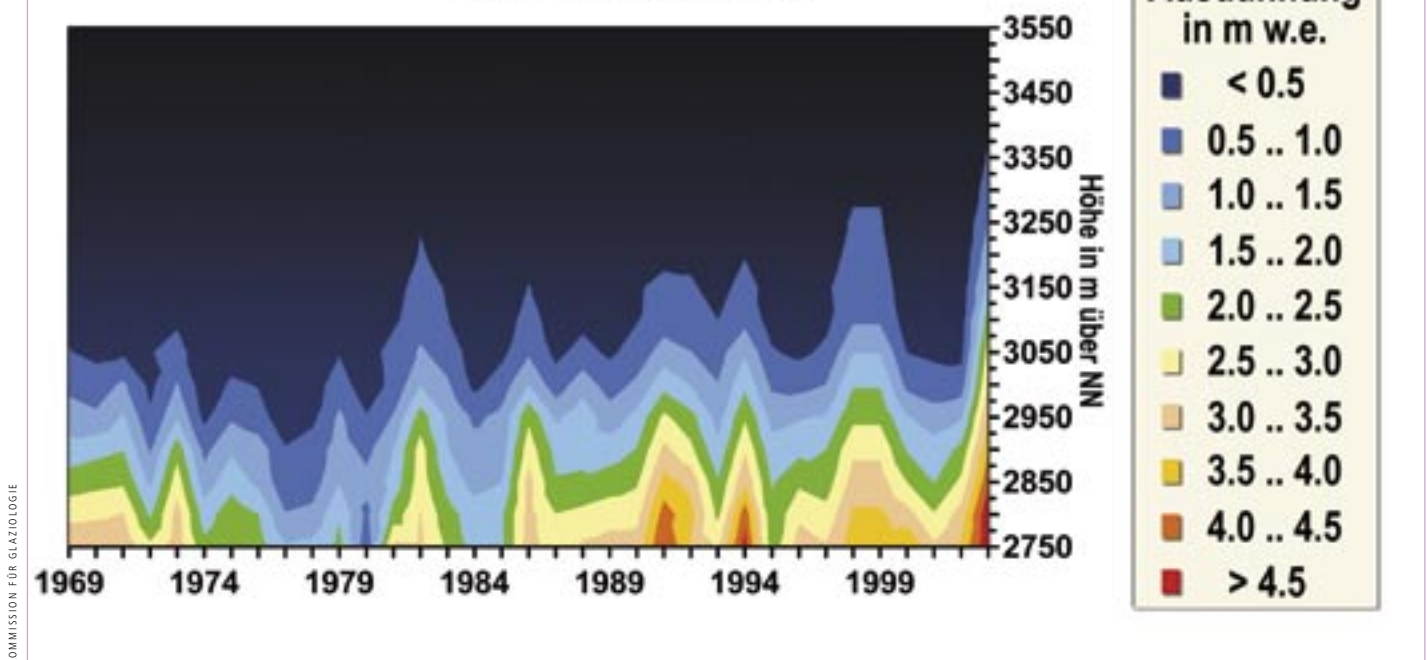
Ergebnisse der Vernagt-forschung: Die Massenbilanz des Gletschers

Die geodätische und glaziologische Langzeitbeobachtung des Vernagtferners belegt die auch andersorts in den Alpen gemachte Erfahrung, dass die Massenänderungen der Gletscher über die letzten



Veränderung der Gesamtmasse des Vernagtferners seit dem letzten Maximalstand 1844, rekonstruiert anhand von Moränenständen, Kartierungen ab 1889 und seit 1964 mittels direkter Massenbilanzbestimmung. Weiterhin eingetragen die Abweichung des Mittelwertes der bodennahen Lufttemperatur der nördlichen Hemisphäre, am Gipfel der Zugspitze und an der Pegelstation Vernagtbach vom klimatologischen Mittelwert 1961–1990. Trotz lokaler Unterschiede zeigen alle drei Kurven einen einheitlichen Trend und einen signifikanten Bezug zur Änderung der Masse des Vernagtferners.

Mittlere jährliche Abschmelzraten am Vernagtferner von 1969 bis 2003



Mittlere jährliche Abschmelzbeträge am Vernagtferner in Abhängigkeit von der Höhenlage von 1969 bis 2003.

hundertfünfzig Jahre keineswegs einheitlich verliefen, weder was den einzelnen Gletscher noch was die Gesamtheit der Alpengletscher betrifft. Für den Vernagtferner stehen sie jedoch in bemerkenswertem Einklang mit den Beobachtungen zum weltweiten und lokalen Anstieg der bodennahen Lufttemperatur (Abbildung Seite 10).

Wie wichtig eine kontinuierliche Langzeitbeobachtung unter möglichst hochaufgelöster zeitlicher Diskriminierung ist, zeigte sich im Jahr 2003. Noch nie seit Beginn der Aufzeichnungen konnte ein solch hoher Verlust an Eismasse innerhalb nur eines Sommers festgestellt werden. Am Vernagtferner beispielsweise übertraf die über die Gesamtfläche gemittelte Ausdünnung der Eisdecke mit 2,3 m alle bislang in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts gemessenen

Extrema um nahezu das Doppelte. Obwohl noch vor einem Jahr derartige Abschmelzbeträge auch von den Experten für nahezu unmöglich gehalten wurden, lässt sich dieses Ereignis dank des vorliegenden umfangreichen Datenmaterials durchaus einordnen und erklären. Es resultiert nämlich aus dem Zusammentreffen vieler die Gletscherschmelze begünstigenden Faktoren.

Abbildung Seite 11, welche die zeitliche Entwicklung der Eisdickenverluste am Vernagtferner in Abhängigkeit von der Höhenlage veranschaulicht, zeigt die Gletscherschmelze im Sommer 2003 als vorläufigen Höhepunkt in der Abfolge singulärer Jahre mit deutlichen Eisverlusten in den tiefer gelegenen Bereichen des Gletschers. Dazwischen liegen die Verluste immer wieder im „regulären“ Bereich. Auffallend ist jedoch

ein Trend, dass zunehmend höher gelegene Bereiche der Gletscherfläche von deutlichen Massenverlusten erfasst werden. Im August 2003 war erstmals wegen der ungewöhnlichen Länge der Schmelzperiode die gesamte Fläche des Vernagtferners aper, also auch in der Gipfelregion keine Winterschneereserve mehr vorhanden, die den Gletscher durch ihr relativ hohes Reflexionsvermögen üblicherweise vor allzu großen Verlusten schützt.

Die in den Messreihen am Vernagtferner beobachtete zunehmende Häufung von warmen und trockenen Sommern ist ein typisches Merkmal der zukünftigen Klimaentwicklung, wie sie auch von den Klimaforschern prognostiziert wird. Insofern ist dann Abbildung Seite 11 ein Beleg dafür, dass der Klimawandel in der Realität bereits begonnen hat.

Ergebnisse der Vernagtforschung: Prozessstudien

Um den Zusammenhang zwischen dem beobachteten Gletscherrückgang und den Veränderungen in den atmosphärischen Zustandsgrößen wie Strahlung, Temperatur und Treibhausgasen quantifizieren zu können, ist die Entwicklung von komplexen physikalischen Modellen erforderlich, mit deren Hilfe Prozesse und deren Wirkung im Detail studiert werden können. Beispiele hierfür sind die Ansammlung und Verteilung von Schnee an der Gletscheroberfläche, das Schmelzen von Schnee und Eis sowie die komplexen Transportvorgänge von Eismassen und Schmelzwasser innerhalb des Gletschers.

So ist zur Bestimmung der Schmelzwasserproduktion die Kenntnis sämtlicher Energieflüsse zwischen Atmosphäre und Gletscheroberfläche erforderlich. Die unter normalen Geländebedingungen zum Einsatz kommenden mikrometeorologischen Messverfahren sind allerdings unter den besonderen Verhältnissen auf einem Gletscher nur sehr eingeschränkt anwendbar. Die kleinräumig gegliederte Orographie (Beschreibung der Reliefformen des Landes) und die sich ständig verändernde Gletscheroberfläche erfordern eine Verfeinerung, Modifikation und Anpassung der Verfahren an die speziellen Verhältnisse über einem Gletscher. Dazu kommt, dass die dort herrschenden Bedingungen bezüglich Strahlungsumsatz, Turbulenzstruktur und Temperaturschichtung der Atmosphäre in der allgemeinen Meteorologie wegen ihrer Komplexität meist ausgeklammert werden. Da die glaziologische Auswertung jedoch auf diese Kenntnisse angewiesen ist, mussten in mehreren Feldstudien besondere methodi-

sche und apparative Ansätze zur Bestimmung der Schmelze von Schnee und Eis entwickelt werden (Abbildung Seite 13).

Diese neuen Ansätze finden im Übrigen bereits Eingang in großflächig angelegte und weit vernetzte Modelle wie z.B. in dem im BMBF-Projekt „GLOWA-Danube“ entwickelten 'DANUBIA'-Entscheidungsunterstützungssystem, welches hochaufgelöst nicht nur hydrologisch, sondern auch ökonomisch relevante Prozesse des Wasserhaushaltes im 77.000 km² großen Einzugsgebiet der Donau bis Passau behandelt. Ein Drittel dieses Gebietes befindet sich in den Alpen, in denen die temporäre Speicherung des Niederschlags in Form von Schnee und Eis bei der Verfügbarkeit von Wasser eine wichtige Rolle spielt.

Kooperation der Kommission für Glaziologie innerhalb und außerhalb der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Im oben erwähnten GLOWA-Projekt kommt ebenso wie in früheren Forschungsprogrammen der Kommission für Glaziologie zum Tragen, dass durch die Zusammenarbeit vieler Disziplinen und die gegenseitige Unterstützung von Kommissionen innerhalb der Akademie eine im Verhältnis zum Personalstand hohe wissenschaftliche Breite erreicht wird. So konnte z.B. in dem von der DFG geförderten Sonderforschungsbereich 81, Teilprojekt „Abfluss in und von Gletschern“, durch die Zusammenarbeit mit Instituten der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) und der TU München auf vielen Sektoren der glaziologischen Forschung Pionierarbeit betrieben werden. In diesem Rahmen sind seinerzeit die Registrierungen hydrologischer und meteorologischer Daten an der Pegelstation Vernagtbach (vgl. Abbildung Seite 8)

aufgenommen werden. Inzwischen liegen für diese auf 2640 m NN gelegene Forschungsstation dreißigjährige, nahezu lückenlose Serien von Abfluss, Niederschlag, Lufttemperatur und Strahlung vor, um nur die wichtigsten Kenngrößen zu nennen. Auf der Basis dieses Datenmaterials wurden in enger Zusammenarbeit mit Physikern, Chemikern und Ingenieuren der beteiligten Institutionen Modelle für die zeitlich-räumliche Verteilung der Schmelzwasserproduktion und den Verlauf des Abflusses entwickelt, getestet und eingesetzt sowie Kernbohrungen im Gletschereis, Isotopenuntersuchungen an Schnee-, Eis- und Wasserproben und Fließbewegungsuntersuchungen des Eises durchgeführt. Für viele weitere Projekte in der Arktis und Antarktis wurden hier die Grundlagen erarbeitet, die dort zu einem erfolgreichen Einsatz gekommen sind.

Neben den grundlegenden Arbeiten am Vernagtferner und den mitbetreuten bayerischen Gletschern war stets die intensive Zusammenarbeit mit vielen anderen Institutionen, etwa dem Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck, dem Institut für Hydraulik und Gewässerkunde der TU München und dem Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung, fester Bestandteil der Forschungsaktivitäten der Kommission für Glaziologie. Zudem unterhält sie enge Beziehungen zur Wirtschaft, wie z. B. der Münchener Rückversicherungsgesellschaft, wo die Gletscher mit ihren Veränderungen häufig als „Kronzeugen“ des Klimawandels und der damit verbundenen Konsequenzen für die Absicherung gegen Naturrisiken zitiert werden. Aber auch für die Bereiche der hydroelektrischen Energiegewinnung und der Tourismuswirtschaft ist immer wieder die Expertise der Glaziologen gefragt.



Betrieb einer mikrometeorologischen Turbulenzmesseinrichtung zur direkten Messung des Wärmeübergangs zwischen Atmosphäre und Eisoberfläche im August 1998 während der Feldmesskampagne HyMEX98 auf dem Vernagtferner. Im Hintergrund die Schutzzelte für die Messelektronik und die zugehörige Computeranlage.

für Glaziologie zu einem sehr attraktiven Kooperationspartner. Im Bereich der eher kurzfristigen und meist projektbezogenen Forschungsausrichtung der Universitätsinstitute und der an aktuellen Themen - wie z.B. der Beschäftigung mit den Polargebieten am Alfred Wegener Institut - ausgerichteten großen Forschungszentren ist im Allgemeinen eine solche Grundlagenarbeit kaum möglich. Dies ist vermutlich auch die Ursache dafür, dass die notwendigen langfristigen Gletscherbeobachtungen von ähnlichen Organisationen wie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt werden (wie z.B. der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften oder der Kasachischen Akademie der Wissenschaften in Almaty).

Zusammenfassend ist das im Akademienprogramm geförderte, in Deutschland einmalige Projekt zur Erforschung des Gletscherverhaltens unter sich verändernden Umweltbedingungen ein gutes Beispiel für die notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit wissenschaftlicher Fachbereiche sowohl aus den Natur- als auch den Geisteswissenschaften. Viele der auftretenden Fragen und Probleme können nur gemeinsam gelöst werden. Die Akademien bieten dafür die besten Voraussetzungen, nicht nur durch die Zusammenarbeit in ihren Kommissionen, sondern auch als Ort für den fächerübergreifenden Gedankenaustausch.



Die Kooperation mit den Universitätsinstituten dient dabei nicht nur dem Erkenntnisaustausch zwischen den verschiedenen Gruppen, sondern schlägt sich auch in der wissenschaftlichen Produktivität und Kontinuität innerhalb der gemeinsamen Forschungsprojekte z.B. in Form von Diplom- und Doktorarbeiten nieder. Universitätsinstitute

sind von ihrer Konzeption und Organisation her weniger gut in der Lage, die langfristigen Beobachtungsfunktionen zu übernehmen, wie sie für die Kommissionen der Akademie selbstverständlich sind. Gerade diese Eigenschaft der zeitlichen Kontinuität und die Sammlung von langfristigen Datenreihen macht aber die Kommission

Der Autor dankt Mitgliedern und Mitarbeitern der Kommission für Glaziologie für ihre Hilfe bei der Abfassung dieses Artikels.