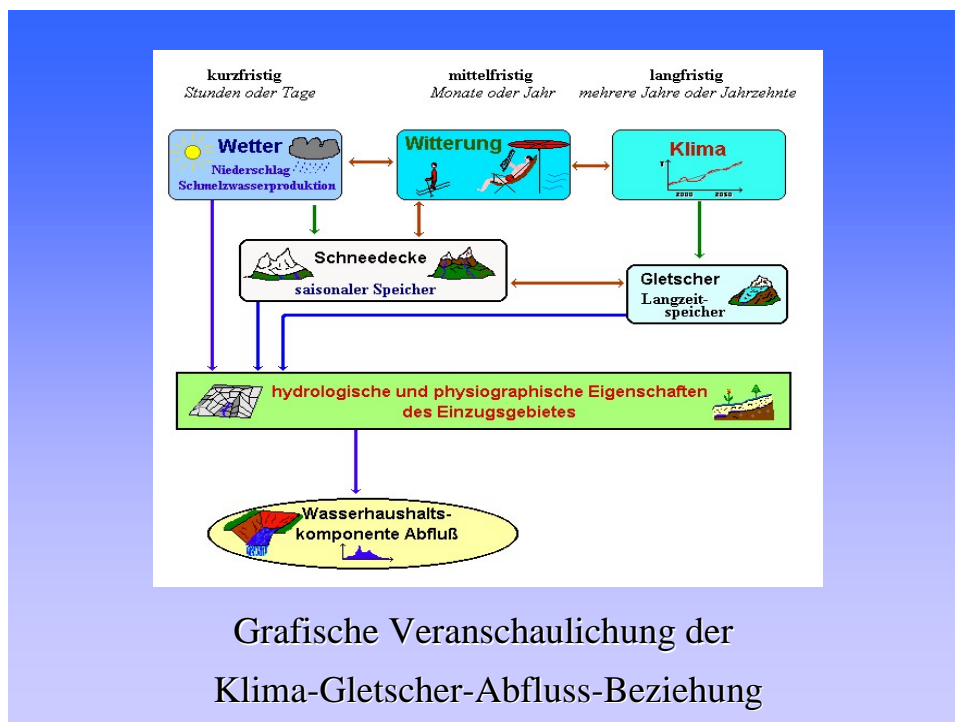


## Gebirgsgletscher im Klimawandel – Auswirkungen auf die Wasserversorgung

### 1) Einleitung

Wir leben in einer Eiszeit! Noch vor fünfzig Jahren hätte dieser Satz keine große Verwunderung ausgelöst, da – zumindest in Europa – die Menschen jedes Jahr im Winter deutliche Kälteperioden mit ergiebigen Schneefällen erlebten und im Sommer, soweit sie Alpenanrainer waren, über mehr oder weniger ausgedehnte Firn- und Eisfelder bis hin zu Gletschern ihre Bergtouren planten. Tatsächlich waren die deutschen Zeitungen in den neunzehnhundertsiebziger Jahren voll mit Meldungen über eine neue Eiszeit, und das Wort ‚Schneekanone‘ hätte man eher in Verbindung mit einem hervorragenden Schifahrer gebracht als mit künstlicher Erzeugung von festem Niederschlag.

Haben sich seither die Gletscher und das Klima grundlegend verändert? Die aktuellen Schlagzeilen konfrontieren uns ja überwiegend mit Hitzewellen und dem Sterben der Gletscher! Hierzu muss man zunächst überlegen, welche Zeitskalen wir im Zusammenhang zwischen Klima und Gletscher betrachten müssen und wie die tatsächlichen physikalischen Zusammenhänge zwischen Klima, Witterung, Wetter einerseits und Gletscherveränderung und Schmelzwasserentwicklung andererseits sind. Wir müssen also analysieren, was wir bisher gemessen haben und was man daraus als Prognose für die Zukunft wagen kann.



In diesem Vortrag will ich zunächst auf die globale Verteilung der Gebirgsgletscher eingehen, die bereits erste Hinweise auf ihre Bedeutung im Wasserhaushalt der

jeweiligen Regionen erlaubt. Ich werde die Methoden skizzieren, mit denen die Veränderungen gemessen werden und, vor allem am Beispiel des Vernagtferners als dem ‚Hauptarbeitsgletscher‘ der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften die seit dem Ende des 19. Jahrhunderts erzielten Resultate diskutieren. Diese Ergebnisse liefern die Grundlage für die Abschätzung der weiteren Entwicklung und insbesondere für die Beantwortung der Frage, inwieweit der Mensch an diesen Prozessen ursächlich beteiligt ist.

## 2) Globale Verbreitung von Gebirgsgletschern

Von dem in Form von Schnee und Eis gebundenen Süßwasservorrat liegen mehr als 99% (Volumen) in den Polargebieten, nur 0.1% des Volumens entfällt auf die außerpolearen Gebirgsgletscher in Nord- und Südamerika, Zentralasien, Island, Skandinavien, in den Alpen und Neuseeland. In der unten angeführten Tabelle sind Länge und Fläche einiger ausgewählter Gebirgsgletscher zusammengestellt. Die ausgedehntesten Eismassen befinden sich in Alaska und Zentralasien, mit Flächen von mehr als 1000 km<sup>2</sup> übertreffen sie den größten Alpengletscher (Grosser Aletschgletscher, Schweiz, Fläche 2000: 82 km<sup>2</sup>) um mehr als eine Größenordnung. In den Alpen befinden sich derzeit ca. 5000 Gletscher, von denen die Hälfte kleiner als 1 km<sup>2</sup> ist. Trotzdem spielen auch diese kleinen Gletscher eine wichtige Rolle in der Wasserversorgung der Alpenanrainerstaaten, wenn auch bei weitem nicht so bedeutend wie die Gletscher in Zentralasien. Dort ist das Wasser der Gletscher zum Teil die wichtigste Quelle für Landwirtschaft, Industrie, Stromerzeugung und vor allem Trinkwasser. So stellen die Abflüsse der Gletscher im chinesischen Teil des Tianshan-Gebirges die praktisch einzige Trinkwasserquelle für eine Millionenstadt wie Urumchi in der autonomen Republik Xinjiang dar, die großen Flüsse des Himalaya wie z.B. Brahmaputra oder Ganges würden im Sommer deutlich weniger Wasser führen, und die Baumwollproduktion in den früheren GUS-Staaten wäre nicht möglich ohne die Schmelzwasserspende der Gletscher.

### Länge und Fläche ausgewählter Gebirgsgletscher, Stand : 1996

Gletscher	Länge km	Fläche km <sup>2</sup>
Hubbard-G. (Alaska, US)	122	3400
Fedtschenko-G. (Pamir, Tadschikistan)	77	992
Columbia-G. (Alaska, US)	61	1100
Baltoro-G. (Karakorum, Pakistan)	57	754
Skeidararjökul (Island)	50	1300
Moreno-G. (Patagonien, Argentinien)	30	257
Grosser Aletsch-G. (Wallis, Schweiz)	25	87
Khumbu-G. (Himalaya, Nepal)	18	34
Mer de Glace (Montblancgruppe, Frankreich)	12	33
Franz Josef-G. (Neuseeland)	10	33
Nigardsbreen (Norwegen)	10	48
Abramov-G. (Kirgisistan)	9	26
Pasterze (Hohe Tauern, Österreich)	9	20
Vernagtferner (Ötztaler Alpen, Österreich)	3	9



Perito – Moreno Gletscher (Argentinien)

(Photo P. Escher-Vetter, Februar 2004)

### 3) Veränderungen der Gletscher: Methodik und Ergebnisse

Für die großen außeralpinen Gletscher ist es auf Grund ihrer Lage und Ausdehnung äußerst schwierig, zeitlich gut aufgelöste und trotzdem langfristige Daten über ihre Massen- und Volumenänderungen zu erfassen. Deshalb werden die Ergebnisse der Gletscherveränderungen während der letzten Jahrzehnte vor allem, aber nicht ausschließlich am Beispiel von Alpengletschern geschildert.

#### 3.1) Methodik

Während man historische Gletscherveränderungen durch die Kartierung von Moränenständen dokumentiert, kann das Vorstoß- oder Rückzugsverhalten bei derzeit existierenden Gletschern im wesentlichen mit drei Methoden analysiert werden. Diese sind

- die geodätische Methode, die auf der mittleren Höhenänderung der Gletscheroberfläche basiert, abgeleitet aus dem Vergleich von Kartierungen des Gletschers in mehrjährigem Abstand,
- die direkte glaziologische Methode, bei der die Jahresbeträge von Akkumulation, d.h. Massengewinn vor allem durch Niederschlag, und Ablation, also Massenverlust in erster Linie durch Schmelzung erfasst werden, und
- die hydrologisch-meteorologische Methode, welche die Eisvorratsänderung aus der hydrologischen Bilanz von Niederschlag und Abfluss ermittelt und vor allem eine detaillierte, zeitlich hoch aufgelöste Analyse der Schmelzwasserproduktions- und Abflussprozesse beinhaltet.

Es gibt nur wenige Gletscher, bei denen alle drei Methoden angewendet werden können. Einer davon ist der Vernagtferner, das Hauptarbeitsgebiet der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Er liegt im südlichsten Teil des Ötztales in Österreich und bildet einen Teil der Vergletscherung

des sog. Weißkammes, einer der am stärksten vergletscherten Regionen der Ostalpen. Die Massenänderungen dieses Gletschers werden seit 1889 geodätisch, seit 1964 glaziologisch und seit 1974 hydrologisch-meteorologisch untersucht. Die geodätische Methode resultiert in einer Flächenabnahme von rund 40% (13,8 km<sup>2</sup> im Jahr 1845 bis 8,5 km<sup>2</sup> 2003), und einem Volumenverlust von mehr als 50% im gleichen Zeitraum. Eine wesentliche Grundlage der hydrologisch-meteorologischen Methode bildet die kontinuierliche Registrierung des Gesamtabflusses dieses Gletschers an der Pegelstation Vernagtbach, der mit 2640 m NN höchstgelegenen ganzjährig betriebenen Wasserstandsmessstelle der Ostalpen. Ich betone das, weil dieser Parameter nur bei wenigen Gletschern lückenlos und vollständig erfasst werden kann, da das Schmelzwasser eines Gletschers in der Regel nicht an einer Stelle zusammenfließt, sondern sich auf viele Einzelbäche verteilt. Die hier gewonnenen Werte geben das Bild eines typisch glazialen Abflussregimes wieder, bei dem etwa 75% des Jahresabflusses in den Sommermonaten Juni bis September anfallen, mit von Jahr zu Jahr steigenden Tagesamplituden im Verlauf des Sommers.



Gletscher in der Wildspitzregion

(Photo M. Weber, KfG, 9.9.1999 )

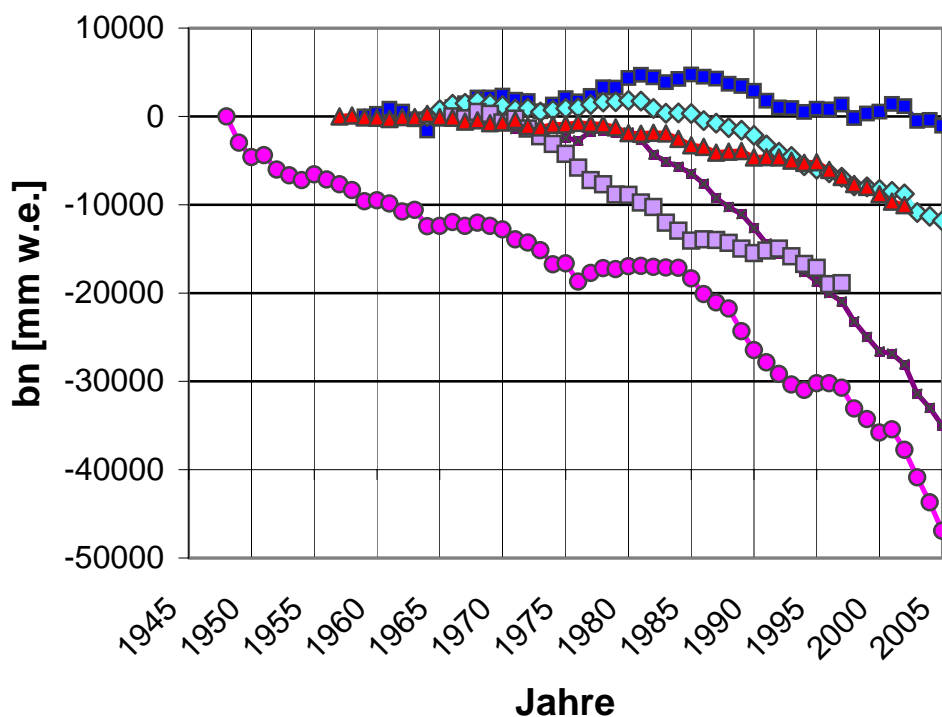
### 3.2) Ergebnisse

#### Glaziologische Methode

Zunächst will ich an Hand der Resultate der glaziologischen Methode die Veränderung von vier Gletschern im Alpenraum und zwei weiteren in Zentralasien während der letzten etwa 50 Jahre diskutieren (Abb.1). Die längste hier betrachtete Messreihe liegt vom Glacier des Sarennes in Frankreich vor, bei dem bereits im Jahr 1947 mit der Bestimmung des Winterniederschlags und der Schmelze getrennt für jedes Jahr begonnen wurde. Die kumulativen Werte, d.h. die von Jahr zu Jahr aufaddierten Einzelwerte zeigen ein deutliches Bild: Trotz einiger weniger Jahre wie z.B. 1955 oder Mitte der 1960er und der 1970er Jahre, in denen der Gletscher an Masse gewonnen hat, verlor er insgesamt rund 47000 mm Wasseräquivalent (w.e.),

d.h. eine Wassersäule von 47 m Höhe. Aus den etwa zehn Jahre später begonnenen Messungen der drei weiteren Alpengletscher (Silvretta in der Schweiz, Careser in Italien und Vernagtferner in Österreich) ergibt sich ein ähnliches Bild, und sogar die im Pamir-Alai (Abramov) und im Tianshan (Glacier NO.1) gelegenen zentralasiatischen Gletscher weichen nicht prinzipiell von diesem zeitlichen Verlauf ab.

Der Massenverlust am Glacier de Sarnnes entspricht einer Eisdicke von fast 52 m bzw. einem Wasservolumen von 0,24 km<sup>3</sup>. Vergleicht man die Abschmelzung von 47 m w.e. mit den ebenfalls auf die Fläche bezogenen Verlusten von 19 m Wasseräquivalent am Abramovgletscher in Kirgisistan, so könnte man den letzteren Wert für nicht ganz so dramatisch halten, entspräche er nicht – wegen der 50mal so großen Fläche - einem Wasservolumen von 4,6 km<sup>3</sup> in einem deutlich kürzeren Zeitraum, nämlich von 1966 bis 1997! Zum Vergleich: ein Bürger der Stadt Augsburg verbraucht pro Tag ca. 140 l Wasser. Mit der genannten Schmelzwasserspende des Abramovgletschers könnten alle Einwohner rund 340 Jahre mit Wasser versorgt werden, und sogar am Glacier de Sarnnes würde die in den letzten 55 Jahren angefallene Schmelzwassermenge den Trinkwasserverbrauch von Augsburg für etwa 13 Jahre gewährleisten.



—■— Careser	[3,9 km <sup>2</sup> ]	—●— Sarnnes	[0,5 km <sup>2</sup> ]
—■— Silvretta	[3,3 km <sup>2</sup> ]	—◇— Vernagt	[9,2 km <sup>2</sup> ]
—■— Abramov	[26,2 km <sup>2</sup> ]	—▲— Glacier No. 1	[1,9 km <sup>2</sup> ]

Abb.1: Kumulative Massenänderungen von vier Alpengletschern und zwei zentralasiatischen Gletschern für den Zeitraum 1947 bis 2005

Eine Bemerkung am Rande: Die Messreihe des Abramovgletschers endet im Jahre 1998. Am 21. August 1999 wurde die Gletscherstation von einer Gruppe bewaffneter Männer in Brand gesetzt und vollständig zerstört, wodurch die extrem wertvolle Langzeitmessung an diesem Gletscher beendet wurde.

### **Hydrologisch-meteorologische Methode**

Während bei der glaziologischen Methode die Gewinne oder Verluste der Gletscher auf Jahresbasis analysiert werden, bietet die hydrologisch-meteorologische Methode die beste Möglichkeit, den Zusammenhang zwischen Gletscher und Klima zu untersuchen. Obwohl Klima ja als Mittelwert der meteorologischen Bedingungen an einem Ort über einen Zeitraum von dreißig Jahren definiert ist, können nur die in der Zeitskala von Stunden bis Tagen ablaufenden Wetterereignisse Aufschluss geben über die Wirkungsmechanismen, die das Gletscherverhalten steuern. Deshalb will ich diese Zusammenhänge hier kurz erläutern.

Bei den allermeisten Gletschern stellt die Absorption der Sonnenstrahlung die größte Energiequelle für die Abschmelzung dar. Im Mittel werden 70% bis 80% der gesamten Schmelzwasserproduktion durch die Strahlung und nur 20% bis 30% durch den Energietransport infolge positiver Lufttemperaturen über dem Gletscher bewirkt. Die maßgebliche Rolle der Lufttemperatur für die Gletscherschmelze äußert sich aber vor allem an einer anderen Stelle, nämlich bei der Art des Niederschlags. Je kälter die Atmosphäre ist, desto häufiger fällt der Niederschlag als Schnee, bedeckt damit die typischerweise deutlich dunklere Eisfläche der Gletscher mit einer hellen Schicht und verhindert die Absorption der Sonnenstrahlung. So reflektiert Neuschnee zwischen 80% und 90% der Strahlung, dunkles Gletschereis aber nur 20% bis 30%. Je häufiger nun im Sommer Neuschneefälle auftreten, desto weniger wird vom Schnee und Eis des Gletschers geschmolzen, die Massenbilanz wird weniger negativ, ja zum Teil sogar positiv.

Positive Massenbilanzen bewirken wiederum, dass die Gletscher ihre Funktion als wichtige Süßwasserreservoir der Gebirge erfüllen, da sie den Niederschlag in Form von Schnee und Eis über Monate bis hin zu Jahren und Jahrzehnten speichern. Die Schmelze dieses Vorrats im Sommer, also während Schönwetterperioden mit hoher Einstrahlung und geringen Niederschlagsmengen, bewirkt den sog. Kompensationseffekt des Gletscherabflusses auf die Wasserführung von Flüssen in vergletscherten Einzugsgebieten. Dies wird deutlich, wenn man die mittlere Wasserführung des Rheins getrennt für den Oberlauf und den Unterlauf betrachtet (Abb.2).

Der Abfluss am Pegel Rheinfelden, d.h. nach der Einmündung der aus dem Berner Oberland kommenden Aare (9,5% Vergletscherungsanteil am Pegel Thun) und anderer Flüsse mit Gletschern im Einzugsgebiet zeigt ein deutliches Maximum in den Sommermonaten, das zumindest teilweise durch die Schmelze von Schnee und Eis zwischen Mai und August erzeugt wird. Die Addition dieser Wassermengen zu denen des Unterlaufs ergibt den mit „Mündung“ gekennzeichneten Jahresgang an der deutsch-holländischen Grenze. Ohne die Bezuschussung durch Schmelzwässer würden die Abflüsse im Sommer deutlich niedriger ausfallen!

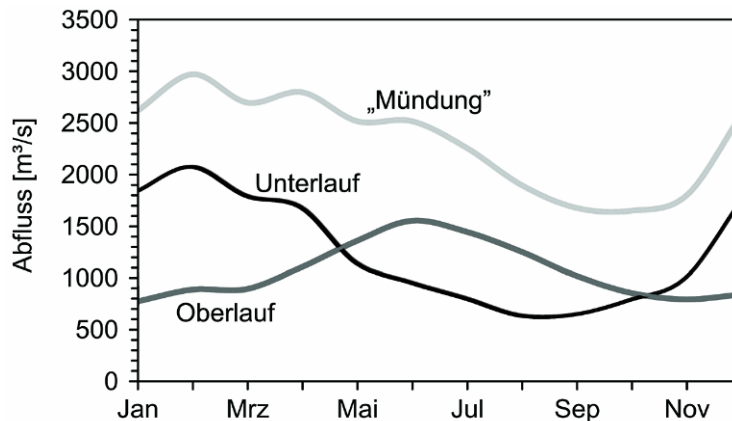


Abb. 2: Mittlere Wasserführung des Rheins (1961-1990), dargestellt für den Oberlauf (Pegel Rheinfelden), den Unterlauf und die deutsch-holländische Grenze (Pegel Lobith, „Mündung“)

Wie hat sich nun der Gletscherabfluss in den letzten Jahrzehnten entwickelt? An der Pegelstation Vernagtbach (2640 m ü. NN) wird seit 1974 der Gesamtabfluss des Vernagtferner kontinuierlich registriert, zusammen mit den Klimaparametern Strahlung (kurz- und langwellig), Lufttemperatur, -feuchte, -druck, Wind und Niederschlag. Während in den ersten Jahren, etwa bis 1980, die Abflusssummen in der Größenordnung von 1000 bis 1500 mm pro Jahr lagen (Abb.3), sind sie in der Zwischenzeit auf Werte von 2000 mm und mehr angestiegen, mit dem Spitzenjahr 2003, das eine Schmelzwasserspense von 3400 mm lieferte. Die Trendlinie zeigt, dass sich der Abfluss in diesen 33 Jahren nahezu verdoppelt hat, maßgeblich gesteuert durch die Gletscherspense ( mit negativem Vorzeichen im unteren Teil der Abbildung aufgetragen, da sie einen Verlust für den Gletscher darstellt) und nicht durch den nahezu gleich gebliebenen Niederschlag in dieser Periode. Diese Entwicklung führte auch zu dem immer weiter fortschreitenden Verlust der Firnbedeckung des Gletschers. Während noch in den siebziger Jahren etwa zwei Drittel des Gletschers am Ende des Haushaltsjahres, also Ende September, mit Firn und Altschnee bedeckt waren, sind diese Flächenanteile im 21. Jahrhundert auf ca. 10 % bis 20% geschrumpft und geben damit immer größere dunkle Eisflächen frei, die wiederum die Schmelzwasserproduktion erhöhen. Insgesamt ist es aber vor allem die Verlängerung der Zeiten mit hoher Schmelzwasserproduktion, die zu den massiven Massenverlusten der Gletscher führen.

Eine weitere Randbemerkung: Der größere Anstieg der Lufttemperatur in den Alpen seit 1900 (1,5°C gegenüber 0,8°C im globalen Mittel) ist ursächlich mit den Flächenverlusten der Gletscher verbunden, da Fels und Erdboden sich wesentlich stärker erwärmen als Schnee- und Eisoberflächen, deren maximale Oberflächentemperatur bei 0°C liegt.

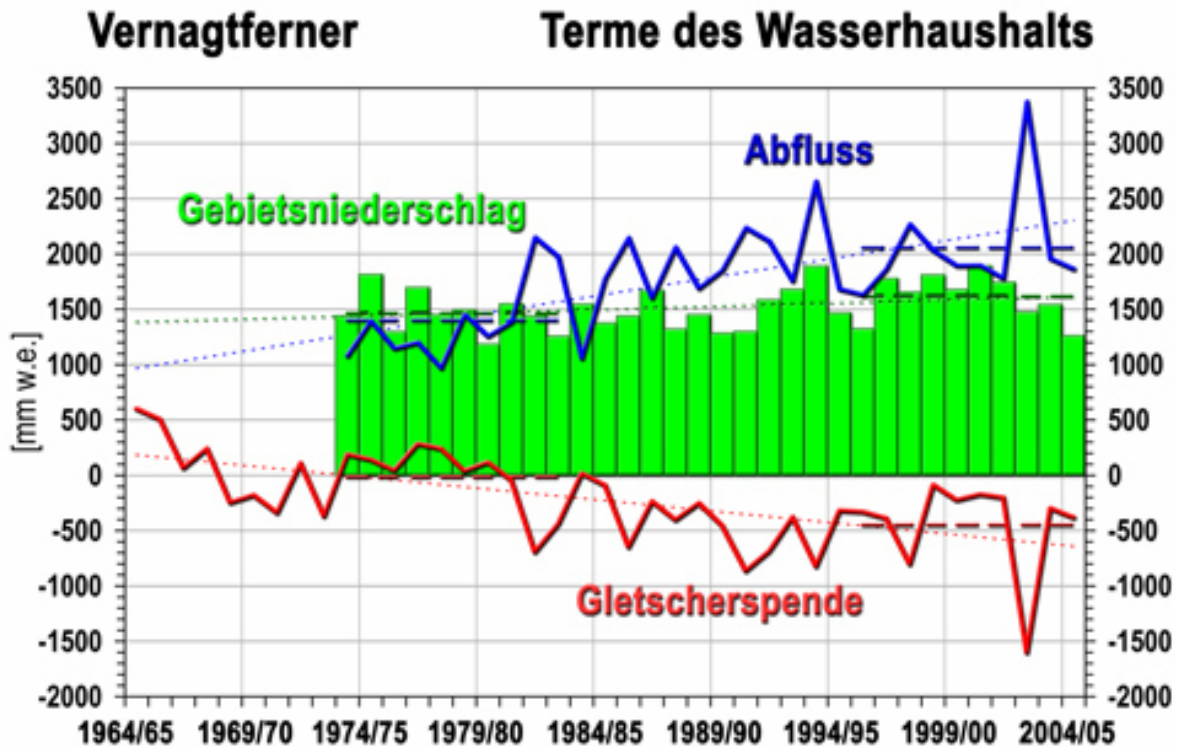


Abb. 3: Einzugsgebiet Pegelstation Vernagtbach, Öztaler Alpen, Österreich (2638 m – 3633 m NN, 11,44 km<sup>2</sup>, etwa 80% vergletschert): Jahreswerte von Gebietsniederschlag und Abfluss (1974 - 2005), Gletscherspende, d.h. Massenbilanz (1964 – 2005)

#### 4) Zukünftige Entwicklung der Gletscher und des Abflusses aus vergletscherten Einzugsgebieten

##### 4.1) in den nächsten Jahrzehnten

Über die nächsten Jahrzehnte wird die hohe Abschmelzung von Gletschern die Gefahr von Hochwässern erheblich verstärken. Schon die Jahre 1987 und 1998 zeigten sehr deutlich, dass vor allem die Überlagerung von hoher Schmelzwasserproduktion durch Starkniederschläge zu Katastrophenereignissen führen kann. So traten infolge des Durchzugs eines großräumigen Niederschlagsgebietes am 24./25. August 1987 in den zentralalpinen Teilen der Schweiz, Österreichs und Italiens Hochwässer auf, die viele inneralpine Täler betrafen. Besonders verheerend waren die Auswirkungen im Ötztal, denn es waren neben großen Sachschäden an Gebäuden, Straßen und Wasserwegen sogar Menschenleben zu beklagen. Dagegen war das Hochwasserereignis vom 4. August 1998 auf das hintere Ötztal begrenzt, führte aber auch dort zu größeren Schäden wie z.B. der Beschädigung der seit 1967 betriebenen Pegelmessstelle in Vent.

Eine Verlagerung der sommerlichen Schneefallgrenze in immer größere Höhen infolge des Klimawandels wird diesen Prozess noch verstärken, da damit der Selbstschutzmechanismus der Gletscher verringert wird. Mit steigender Meereshöhe der Schneefallgrenze steigt auch die Summe aus Schmelzwasserabfluss und

Regenabfluss, die bei einem derartigen Ereignis anfällt und damit zu immer größeren Wassermengen im Unterlauf der Gebirgsflüsse und der durch sie gespeisten Alpenflüsse führt.

Nur kurz ansprechen möchte ich hier weitere Gefahren des Gletscherrückgangs wie z.B. Felsstürze infolge des Zurückgehens von Permafrost im Hochgebirge oder Gletscherstürze, die zu Hochwasserwellen in und aus Gebirgsseen (sowohl natürlich entstandenen als auch durch den Menschen angelegte, z.B. für Speicherkraftwerke) führen.

#### **4.2) gegen Ende des 21. Jahrhunderts**

Langfristig ist jedoch durch den Verlust der Schnee- und Eismassen in den Gebirgen mit einer Verringerung der Abflüsse zu rechnen. Das Jahr 2003 lieferte bereits erste Beispiele, welche Konsequenzen sich daraus ergeben können, obwohl hier ja noch eine deutliche Bezuschussung der Wasserführung durch die Schmelzwässer erfolgte. So musste die Schifffahrt auf Rhein oder Donau zeitweise eingestellt werden, und thermische und nukleare Kraftwerke konnten auf Grund der geringen Wasserführung des Rheins nicht mehr gekühlt werden. Mit der geringeren Wassermenge ist i.d.R. auch ein Anstieg der Wassertemperaturen verbunden, der sich nicht nur auf die Energiewirtschaft, sondern auch auf die im und am Fluss lebende Fauna und Flora auswirkt.

#### **5) Ausblick**

Seit dem Ende der kleinen Eiszeit zu Mitte des 19. Jahrhunderts ist für die Gletscher der Alpen – wie für die meisten Gletscher weltweit – ein deutlicher Rückgang zu verzeichnen. Die Ursache hierfür ist primär in einer erhöhten Abschmelzung im Sommer zu sehen und führte zu einer deutlichen Erhöhung der Abflüsse aus stark vergletscherten Einzugsgebieten. Diese Wasser wurden bisher – mit Ausnahme von Katastrophenereignissen wie Hochwässern – als willkommener Beitrag zur hydrologischen Bilanz angesehen und ermöglichten vor allem in ariden Regionen eine Intensivierung der Landwirtschaft, eine Erweiterung von Siedlungsräumen und eine Erhöhung der Energieproduktion. Mit der Verkleinerung und dem Verschwinden der Gletscher werden diese Wassermengen nicht mehr die sommerliche Wasserführung der Flüsse bereichern, und die Hochgebirgslandschaften der Erde verlieren nicht nur den schönen Schmuck, sondern auch ihre wichtigsten Wasserspeicher.

#### **Danksagung**

Bei der Zusammenstellung des Vortragsmaterials durfte ich auf - teilweise nicht veröffentlichte - Texte und Abbildungen meiner Kollegen Heribert Moser, Oskar Reinwarth, Markus Weber und Ludwig Braun (um nur die wichtigsten zu nennen) zurückgreifen, wofür ich mich herzlich bedanke. Die Arbeiten der Kommission für Glaziologie werden im Rahmen des Akademienprogrammes von der Bundesrepublik Deutschland und vom Freistaat Bayern gefördert.

## **Weiterführende Literatur**

Klimastatusbericht 2001. Darin: H. Escher-Vetter: Zum Gletscherverhalten in den Alpen im zwanzigsten Jahrhundert. Herausgeber: Deutscher Wetterdienst, Offenbach, S. 51-57, 2002.

Hochwasser oder Chance? Hochwasser und Ökologie. Darin: L. Braun und M. Weber: Droht im nächsten Sommer Hochwasser vom Gletscher? Rundgespräche der Komm. f. Ökologie, Bd. 24, S. 47-66. Verlag Dr. F. Pfeil, München, 2002.

Homepage der Kommission für Glaziologie [www.glaziologie.de](http://www.glaziologie.de) Webmaster: M. Weber.

Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Genügend Wasser für alle – ein universelles Menschenrecht. Darin: H. Escher-Vetter: Gebirgsgletscher und die Wasserversorgung. Herausgeber: J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, Chr.-D. Schönwiese. Wissenschaftliche Auswertungen, S. 57-61, Hamburg, 2005.

Wetterkatastrophen und Klimawandel – Sind wir noch zu retten? Edition Wissen. Darin: H. Escher-Vetter: Gletscher als Zeugen von Klimaänderungen. Herausgeber: CUGC3 – GeoRisikoForschung. Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, S. 114-121, München, 2004.