©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Ber. ANL | 26 (2002) | 95-105

Wasserspende aus hochalpinen Gebieten

Ludwig N. BRAUN*) und Markus WEBER

Inhalt

1. Einleitung
2. Niederschlag und Verdunstung in den Alpen
3. Abflussprozesse im Gebirge
4. Abfluss als Wasserhaushaltskomponente
5. Die ausgleichende Wirkung der Gletscher auf Wasserhaushalt und Gletscherschwund
6. Extremabflüsse aus vergletscherten Regionen
7. Szenarien des Abflusses aus hochalpinen Gebieten
Literatur

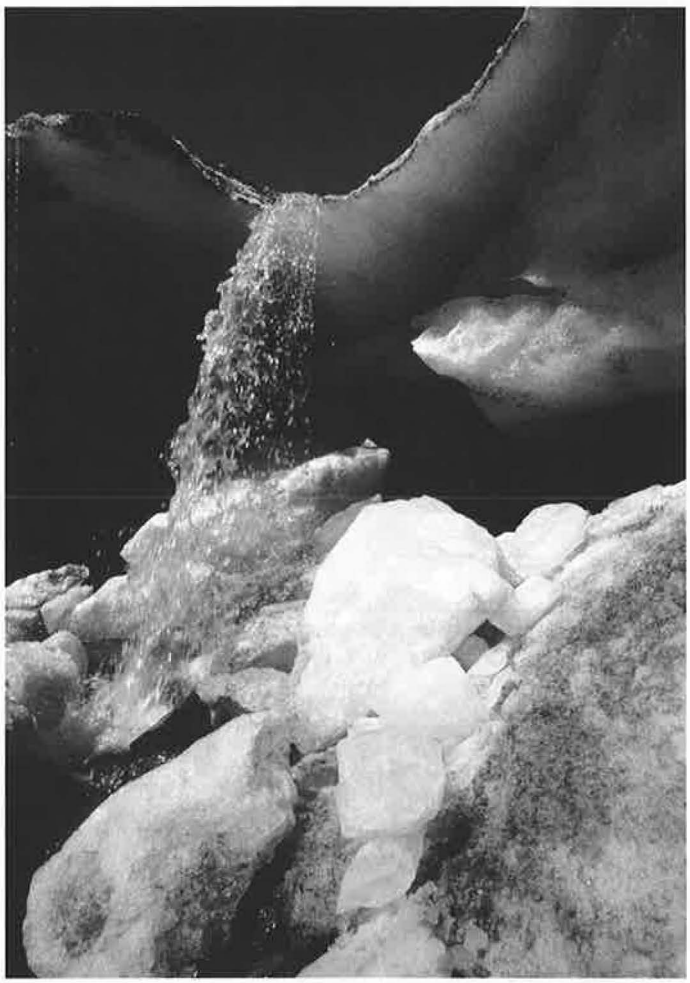

Foto: *T. Naeser* © Archiv KfG 2000

1. Einleitung

Die alpinen Regionen sind in ihrem Wasserhaushalt begünstigt, was eine Folge von hydrologischen Besonderheiten dieses Landschaftstyps ist. Das Zusammenwirken von orographisch verstärkter Niederschlagsbildung, reduzierter Verdunstung, temporärer Speicherung in Form von Schnee und Eis und ein effizientes Abflusssystem sichert eine reichliche Wasserspende, welche auch den umliegenden Tiefländern zugute kommt. Unter Umständen kann diese auch überreichlich anfallen, was im Extremfall zu Überflutungen auch in außeralpinen Regionen führen kann. Die Veränderungen durch den Klimawandel greifen massiv in diesen komplexen Mechanismus der Abflussgenese ein, so dass je nach Szenarium einschneidende Auswirkungen auf die Wasserspende in naher und ferner Zukunft zu erwarten sind.

2. Niederschlag und Verdunstung in den Alpen

Die hohen Gebirgszüge der Alpen bilden Hindernisse für die großräumige, im Mittel durch eine Westdrift geprägte Zirkulation der Atmosphäre. Neben den durch die Gebirgsüberströmung dynamisch erzwungenen Hebungsprozessen werden zusätzlich wegen der stark gegliederten, sehr heterogenen Oberfläche lokal thermische Windsysteme angeregt, welche die Konvektion anregen. Beides, großräumige Hebungsvorgänge und Verstärkung der Konvektion greifen äußerst effizient in die Prozesse der Niederschlagsbildung ein, so dass die Gebirgsregion in ihrer Gesamtheit eine größere Niederschlagsmenge als das umliegende Flachland erhält. Diese Wirkung ist aber aufgrund der komplexen Wechselwirkung zwischen den Vorgängen in der Atmosphäre und den orographischen Begebenheiten zwar charakteristisch, aber teilweise doch sehr heterogen verteilt. Diese Verteilung wird in erster Linie durch die generelle West-Ost-Orientierung der Gebirgsketten relativ zu den synoptisch wirksamsten Anströmrichtungen SW und NW, durch ihr allgemein vom Rand zur Mitte ansteigendes Höhenprofil mit der maximalen absoluten Höhenerstreckung im westlichen Teil und ihre nahe Lage zum Mittelmeer als Quellregion für feuchte Luftmassen bestimmt.

Eine Karte der Niederschlagsverteilung (Abb. 1 nach SCHWARB et al., 2001) im Alpenraum zeigt eindrücklich die hohe Niederschlagsgunst in den Luvlagen der Voralpen und der randlichen Gebirgsketten

*) Vortrag auf der ANL-Fachtagung „Die Alpen – ein kostbares Wasserschloss" am 26.-28. November 2001 in Bad Reichenhall.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

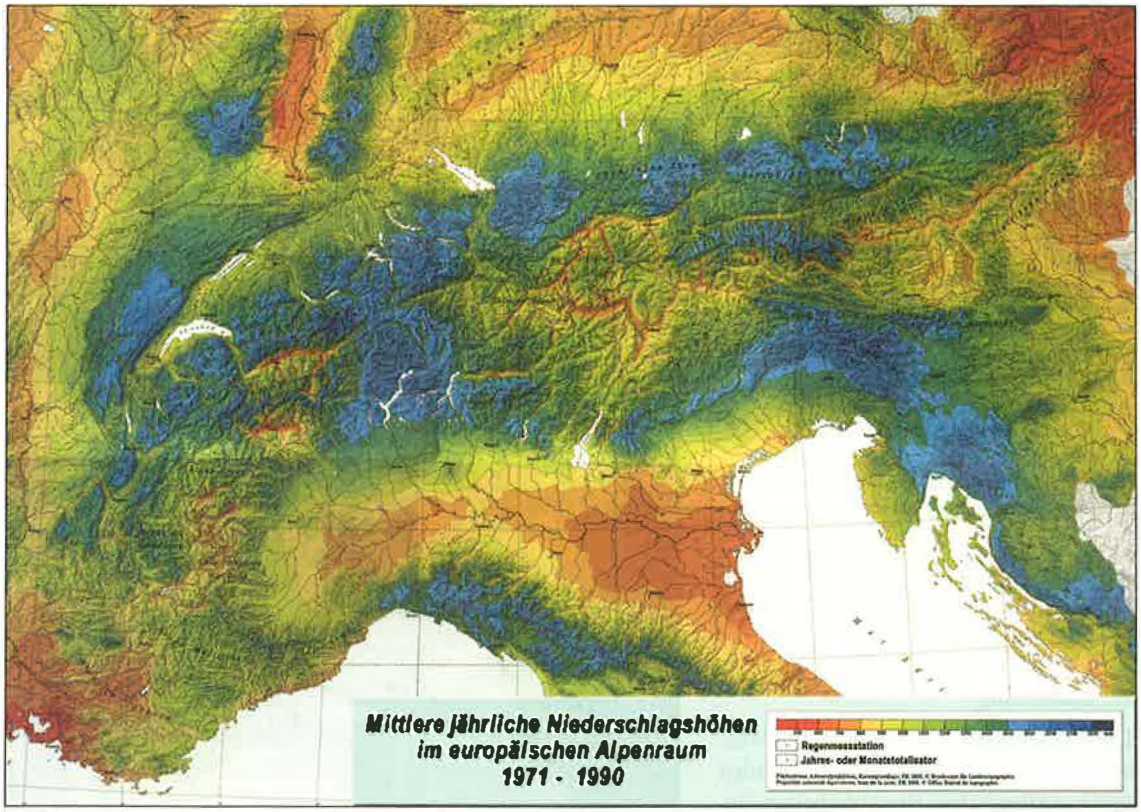

Abbildung 1

Niederschlagsverteilung im Alpenraum nach SCHWARB et al. (2001). Die Analyse stützt sich auf über 6000 Stationsdaten über den Zeitraum von 1971-1990.

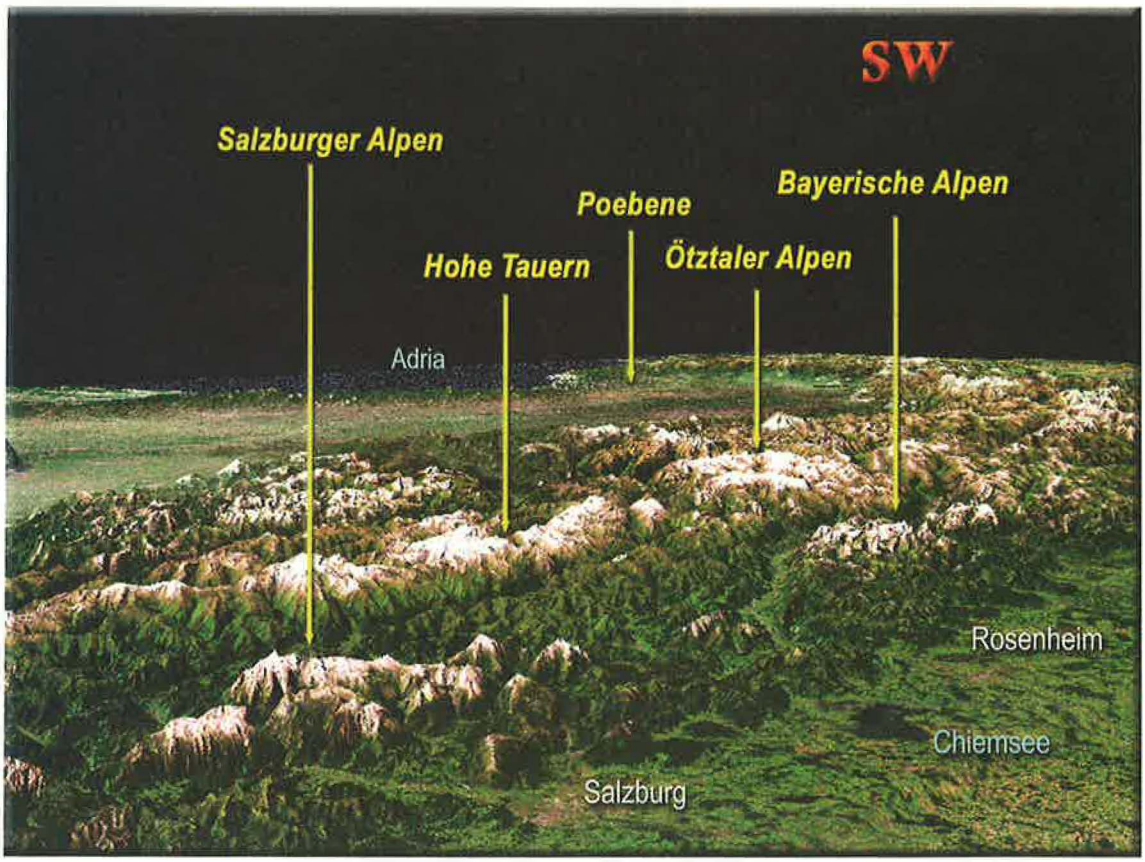

Abbildung 2

Leicht überhöhte **Visualisierung eines Höhenmodells des mittleren Abschnitts des Alpenbogens** mit Blickrichtung nach Südwesten. (Erstellt unter Verwendung der CD-Rom „Eye in the Sky", Herold Business Data AG, 1999).

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

sowohl im Norden wie auch im Süden mit Jahressummen des Niederschlags bis zu 3000 mm, wenn feuchtebeladene Mittelmeerluft ungehindert gegen die Berge geführt werden kann. Andererseits gibt es auch weite Bereiche im Lee der hohen Gebirgszüge, wie etwa die durch die Appeninnen im Süden und die Alpen im Norden abgeschirmte Poebene oder die Gipfellagen der inneralpinen Regionen wie z. B. der Rhätischen Alpen oder der Ötztaler Alpen, die teilweise weniger als die Hälfte des Niederschlages empfangen. In inneralpinen Tallagen wie z. B. dem Vinschgau oder dem Rhonetal, fällt die jährliche Niederschlagssumme gar unter 600 mm. Vereinzelt können auch inneralpine Regionen mehr Niederschlag empfangen, falls sie deutlich über die vorgelagerten Bergketten hinausragen, wie etwa der Gebirgsstock der Hohen Tauern, der durch die niederen Westteile der vorgelagerten Salzburger Alpen im Gegensatz zu den Ötztaler Alpen durch die hohen Bayerischen Alpen nur wenig abgeschirmt wird (Abb. 2). Eine ähnliche Sonderstellung hat das Tessin, das von einer Art Lücke im Gebirgsriegel zwischen den Ligurischen Alpen und den Appeninnen profitieren kann und deshalb häufiger feuchten Luftmassen aus dem Golf von Genua ausgesetzt ist.

Ein Teil des Wasserangebotes durch den Niederschlag wird verdunstet und ist dadurch der direkten Nutzung entzogen. Die Verdunstung ist an das mittlere Temperaturniveau und den mittleren Wasserdampfgehalt der Luft gebunden und nimmt daher mit der Höhe allgemein ab. Im Voralpenland beträgt sie zum Beispiel etwa 600mm im Jahr (BAUMGARTNER et al., 1983), dagegen geht sie in einem hochgelegenen zentralalpinen Einzugsgebiet wie z. B. das des Inns im Engadin auf ca. 300 mm zurück. Da neben der thermodynamisch bedingten Temperaturabnahme mit der Höhe auch die Vegetationsbedeckung die Verdunstung beeinflusst, verstärkt die spärlicher werdende Vegetation mit der Höhe die Abnahme der Verdunstung. Über Schnee und Eis geht die jährliche Verdunstung gar auf Werte von unter 100mm zurück, weil hier auch unter Schmelzbedingungen die Oberflächentemperatur 0°C nicht überschreiten kann und demnach der Sättigungsdampfdruck an der Oberfläche nicht über 6.1 hPa steigt, was des öfteren zu Kondensationsbedingungen führt (LANG, 1981).

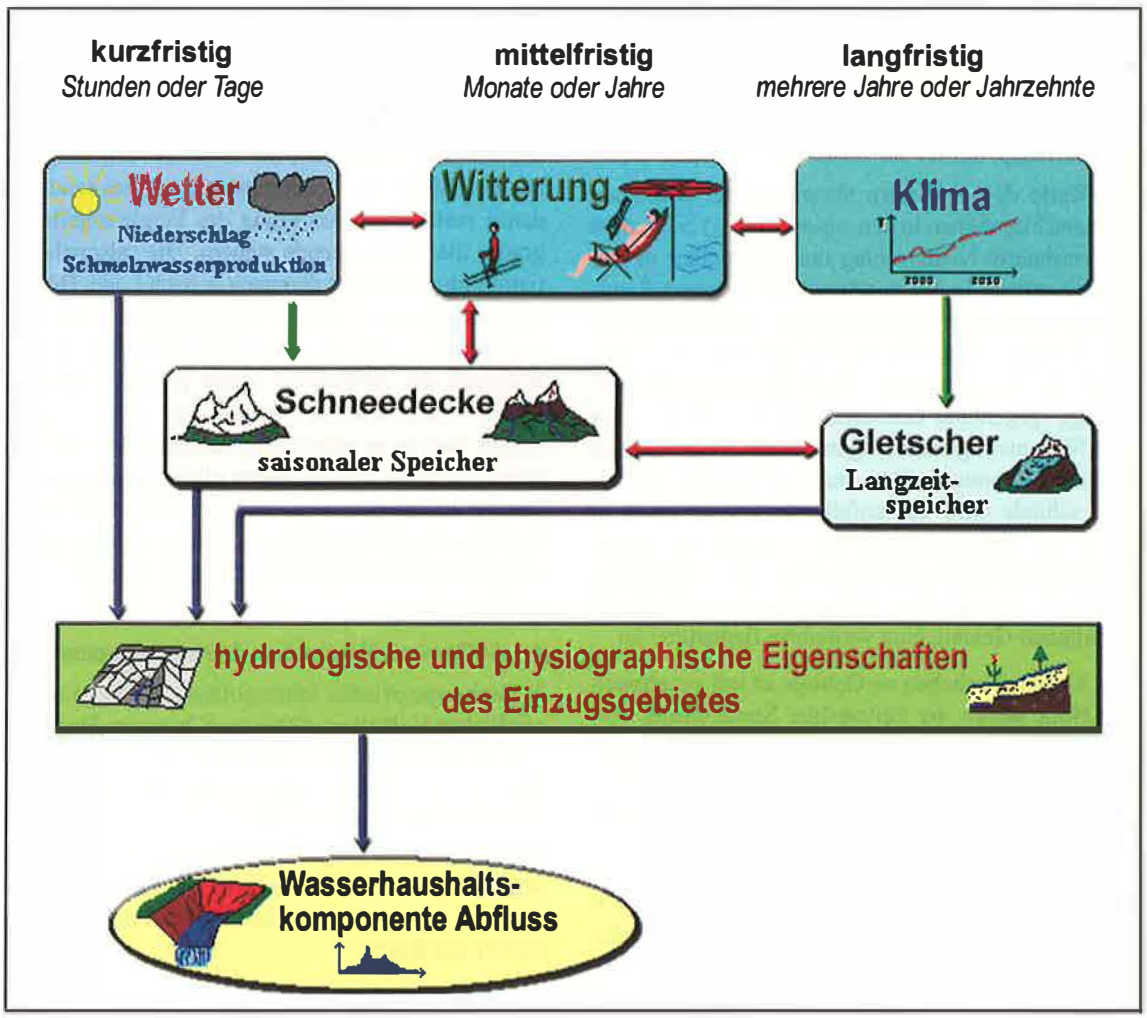

Abbildung 3

Schematische Darstellung der wichtigsten an der Abflussbildung in einem vergletscherten Einzugsgebiet beteiligten Einflüsse und Prozesse (aus KFG, 1999).

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

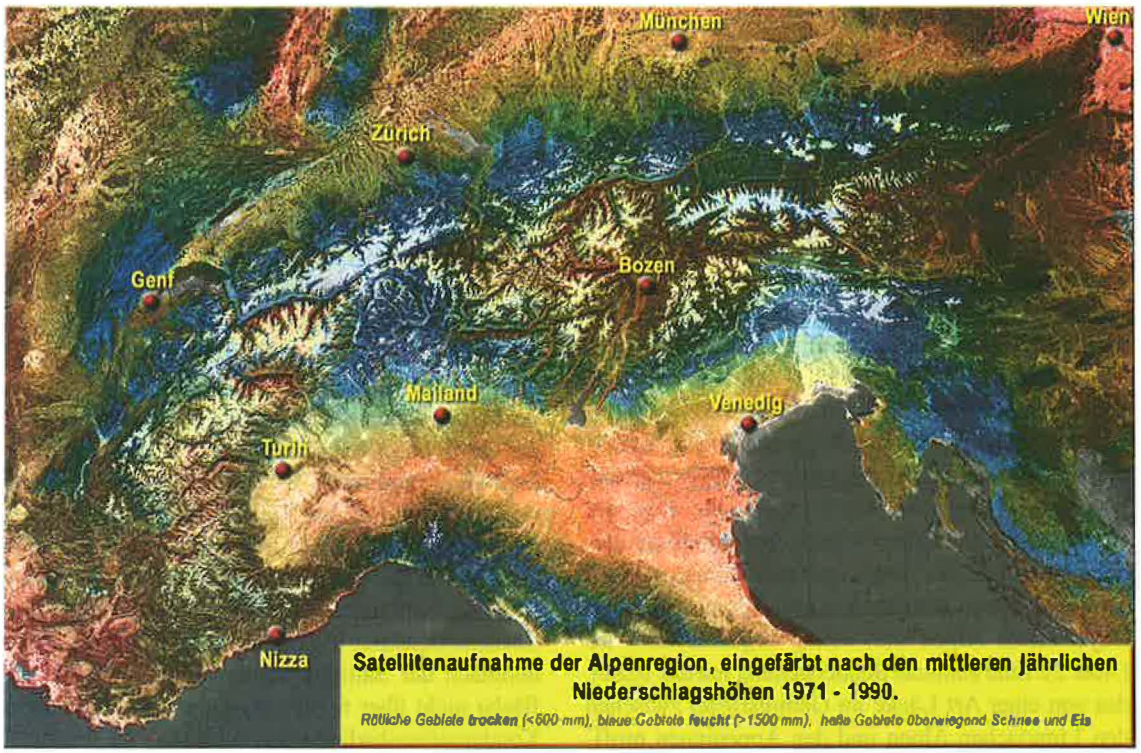

Abbildung 4

Satellitenaufnahme der Alpenregion, eingefärbt nach den mittleren jährlichen Niederschlagshöhen 1971-1990 nach SCHWARB et al. (2001), wobei Trockengebiete (N < 600 mm) rötlich, Feuchtgebiete (N > 1500 mm) blau und Gletscher- und Schneegebiete sich hell abzeichnen.

3. Abflussprozesse im Gebirge

Die Karte der regionalen Verteilung der jährlichen Niederschlagshöhen in den Alpen (Abb. 1) zeigt, dass der vermehrte Niederschlag nur unmittelbar in den Bergen auftritt. In den nordwestlich gelegenen Randgebieten und auch lokal in einigen inneralpinen Tälern kommt es wegen der Abschirmung im Lee (Föhn) sogar zu einer markanten Reduzierung der Niederschläge gegenüber dem alpenfernen Tiefland. Aber dies führt nicht gleichzeitig zu einem Wassermangel in diesen Regionen, denn durch die großen Höhenunterschiede wird das anfallende Wasser rasch in Form von Abfluss in tiefere Lagen und das Alpenvorland abgeführt und steht dort zur Verfügung. Demnach kommt dem Abfluss im Wasserhaushalt der alpinen Gebiete eine vermehrte Bedeutung zu.

Das Abflussgeschehen im Gebirge ist mit zunehmender Höhe durch die zeitweilige Speicherung von Wasser in der Form von Schnee und Eis geprägt, was ebenfalls eine Folge der generellen Temperaturabnahme mit der Höhe ist (Abb. 3, KFG, 1999). Kurzfristig (über einen Zeitraum von Stunden bis Tage und Wochen) ist vor allem entscheidend, ob und wo Niederschlag als Schnee oder Regen fällt, ob sich eine Schneedecke bildet oder abgebaut wird, oder auch, ob vorhandene Gletscher schneebedeckt oder aper sind. Mittelfristig (über Wochen und Monate) bestimmt dann die vorherrschende Witterung sowie die Mächtigkeit und Ausdehnung der schneebedeckten Fläche, wie viel Wasser durch Schmelze anfällt. Langfristig (über Jahre und Jahrzehnte) werden dann Klimatrends bedeutsam, die über die Änderung des Niederschlags- und des Temperaturregimes sowie die damit verbundene Änderung des Vergletscherungsgrades die Wasserspende steuern. Die saisonale Variation im Abfluss ist demnach je nach Lage, Höhenerstreckung und Grad der Vergletscherung des Einzugsgebietes pluvial, nival oder glazial gesteuert. Während der Abfluss in einem pluvial geprägten Gebiet sich primär nach dem Niederschlagsangebot richtet und dementsprechend ähnlich über das Jahr verteilt auftritt, wird in einem glazial geprägten Gebiet der Jahresabfluss konzentriert in den 4 Sommermonaten Juni bis September anfallen, während in der restlichen Zeit nur minimale Mengen abfließen.

4. Abfluss als Wasserhaushaltskomponente

Typische spezifische Jahresabflüsse betragen in den nördlichen Kalkalpen 1300mm (Chiemgau/Berchtesgadener Alpen), in den inneren Ostalpen um 1000 mm (Ötztaler und Stubaier Alpen) und in den Südalpen in der Größenordnung von 1500 mm (Tessiner Voralpen). Für das gesamte Gebiet der Schweiz mit einer Gesamtfläche von 41.285 km² sind die Terme der Wasserbilanz 1961-1980 nach SCHÄDLER und BIGLER (1992) wie folgt:

- Niederschlag **N**= 1481 mm pro Jahr
- Verdunstung **V**= 513 mm
- Gesamtabfluss **A**= 961 mm (dazu zusätzlich vom Ausland: 318 mm)
- Reserveänderung **R**= -7.5 mm pro Jahr.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Die Reserveänderung geht vor allem auf das Konto der negativen Massenbilanzen der Gletscher über diesen Zeitraum. Nach den aktuelleren Daten von SCHWARB et al. (2001) liegt der Jahresniederschlag über den Zeitraum 1971-1990 bei 1380 mm, was vor allem auf die Verwendung eines regional variablen Niederschlagsgradienten zurückgeführt wird. Berechnet man die Gebietsverdunstung mit der Formel

$$\mathbf{V = N - A + R},$$

dann kommt unter Verwendung des neu bestimmten Gebietsniederschlags ein wesentlich geringerer Wert für die Gebietsverdunstung von ca. 410 mm zustande.

Die aktuellen Wasserreserven der Schweiz belaufen sich nach SCHÄDLER (1985) und MAISCH et al. (2000) auf folgende gerundete spezifischen Wasserwerte:

• Natürliche Seen	5.7 m
• Gletscher	1.6 m (zum Vergleich: Mitte des 19. Jahrhunderts: 2.3 m)
• Grundwasser	1.2 m
• Künstliche Seen	0.1 m
Total	**8.6 m**

Im alpinen Raum nimmt die Speicherung von Wasser in Form von Eis die wichtigste Rolle ein, und daher richtet sich unser Augenmerk auf die aktuelle Vergletscherung und ihre Veränderung in Vergangenheit und Zukunft. Überlagert man wie in Abbildung 4 die Niederschlagskarte der Alpenregion (Abb. 1) mit einem im Sommer aufgenommenen Satellitenbildmosaik des Alpenbogens, so werden die Lage, Orientierung und Verteilung von Gletscher- und Firnflächen in Relation zum Niederschlagsangebot deutlich sichtbar. Es zeigt sich, dass Gletscher nicht nur bevorzugt in den nordseitigen Bereichen mit einem überdurchschnittlich hohen Angebot an Niederschlägen (blau, z. B. Tauern) zu finden sind, sondern auch in großer Zahl in den über 3000 m NN hinausreichenden Gipfelregionen der inneralpinen Trockengebiete (rötlich, z.B. Ötztaler Alpen, Ortlerregion). Letztere verdanken ihre Existenz primär den Eisreserven, die unter den klimatischen Bedingungen der Zeit vor 1850 angesammelt wurden. Die im letzten Jahrhundert weltweit beobachtete Erwärmung des globalen Klimas (IPCC, 2001) hatte auch im Alpenraum einen Anstieg der Frostgrenze um ca. 200 m zur Folge, welcher vor allem in den Trockengebieten der österreichischen und italienischen Zentralalpen zu erheblichen Massenverlusten von bis zu 75% geführt hat, aber auch für die oben erwähnten negativen Massenbilanzen der Gletscher in der Schweiz verantwortlich ist. Die bei der Gletscherschmelze entstehenden Wassermassen werden unmittelbar dem Abfluss zugeführt und kommen damit auch den durch das Niederschlagsangebot weniger begünstigten trockeneren Tälern der Alpen zugute.

5. Die ausgleichende Wirkung der Gletscher auf den Wasserhaushalt und Gletscherschwund

Das Niederschlagsangebot zeigt generell erhebliche Variationen von Jahr zu Jahr, welche sich unmittelbar auf den Wasserhaushalt der Alpen auswirken. Durch die nicht unwesentliche Größenordnung der Schmelz-

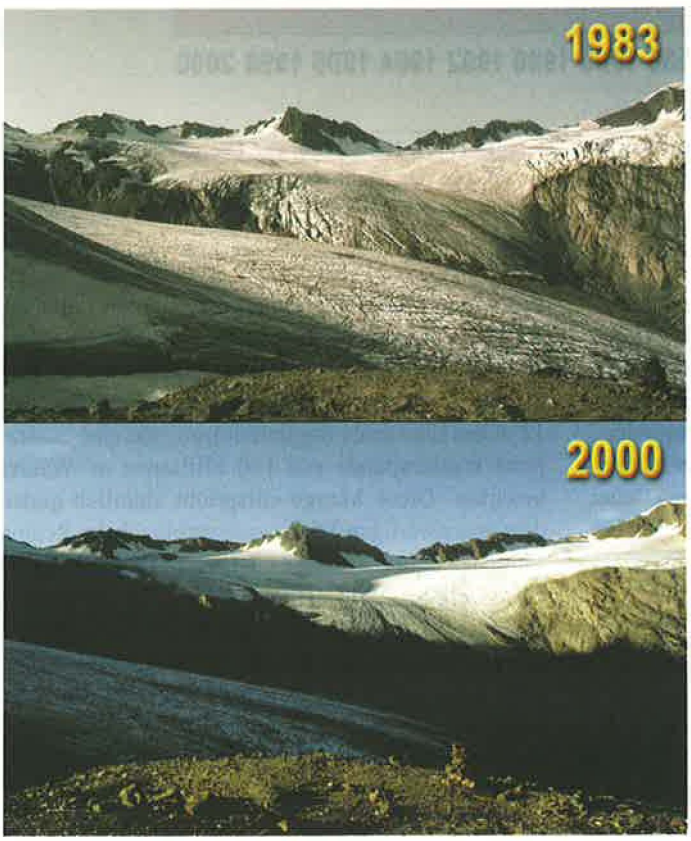

Abbildung 5

Veränderung im Zungenbereich des Vernagtferners innerhalb von 17 Jahren. Die Oberfläche der im Vordergrund sichtbaren Schwarzwandzunge wurde innerhalb dieses Zeitraums um ca. 40 m abgesenkt. Auch der ca. 25 m hohe Eiswulst auf der rechten Seite ist gegenwärtig verschwunden. Wegen des nachlassenden Eisdrucks hat sich die Fließgeschwindigkeit des Eises stark reduziert, so dass die Gletscheroberfläche von deutlich weniger Gletscherspalten durchzogen ist. (Fotos: M. WEBER)

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

wasserspende haben Gletscher jedoch eine ausgleichende Wirkung auf die Abflussspende: in Jahren mit überdurchschnittlich hohen Winterniederschlägen wird vermehrt Wasser zurückgehalten, weil die Schneedecke das Eis vor der Schmelze schützt. Dagegen wird nach trockenen Wintern der Gletscher in der Regel früh ausapern, dadurch schmilzt mehr Eis, was eine zuverlässige Wasserspende gerade auch in Trockenzeiten gewährleistet. Diese kompensierende Wirkung der Gletscher ist für wasserwirtschaftliche Belange von großer Bedeutung (BRAUN, 1995).

Nach einer Erhebung in den 1970iger Jahren war der gesamte Alpenbogen mit ca. 5100 Gletschern bestückt, welche eine Gesamtfläche von 2900 km² und ein Gesamtvolumen von 140 km³ an Eis aufwiesen (CHEN & OHMURA, 1990). Verteilt auf die Haupteinzugsgebiete lag die größte Anzahl von ca. 950 Gletschern mit einer Gesamtfläche von knapp 500 km² im Einzugsgebiet des Inns, der größte Flächenanteil vergletscherter Areale von ca. 750 km² lag im Rhonetal oberhalb des Genfersees, bestehend aus 650 Einzelgletschern. Dem generellen Gletscherschwund seit 1850 folgend haben die Gletscher vor allem in den 1930er bis 1950er Jahren und in den 1980er und 1990er Jahren stark an Masse eingebüßt. Nach Angaben von MAISCH et al. (2000) ist die Gletscherfläche der Schweiz von ca. 1800 km² in der Mitte des 19. Jahrhunderts auf aktuell 1300 km² zurückgegangen, was einem Eisverlust von knapp 30 Mrd. m³ oder spezifisch auf die Fläche der Schweiz gesehen von 72 cm Wassersäule entspricht.

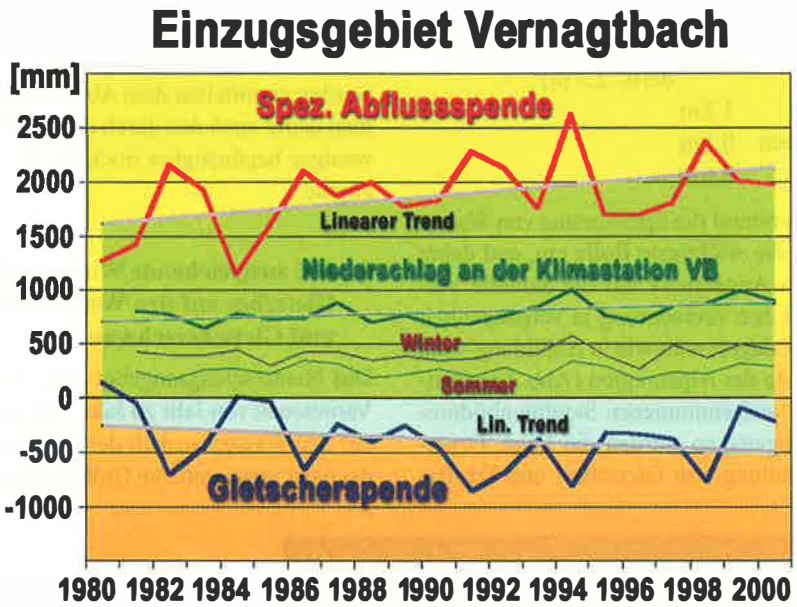

Abbildung 6

Abfluss und Speicheränderung im Einzugsgebiet des Vernagtferners 1980-2000. Die Gletscherspende resultiert aus den negativen Massenhaushalten des Gletschers und wird aus der Sicht des Einzugsgebietes als Verlust ausgewiesen (aus BRAUN & WEBER, 2002).

Zuverlässige Angaben über den Eisverlust in den Ostalpen können vom Vernagtferner im hinteren Ötztal gegeben werden. So hat sich seine Fläche von 13.8 km² zum Zeitpunkt seines letzten Maximalstandes im Jahre 1845 auf 8.7 km² im Jahre 1999 vermindert, entsprechend einer Reduktion um ca. 1/3 der ehemaligen Ausdehnung. Bis auf wenige Reste ging dabei die gewaltige in das Tal reichende Gletscherzunge bis Mitte des letzten Jahrhunderts verloren. Die ursprünglich fast eine Milliarde Tonnen betragende Eismasse wurde innerhalb von nur 150 Jahren sogar um mehr als 2/3 auf gegenwärtig ca. 250 bis 280 Millionen Tonnen reduziert (WEBER, 2002). Der Vernagtferner befindet sich seit 20 Jahren in einem Stadium, in dem die Flächenabnahme im Gegensatz zu den Massenverlusten relativ langsam fortschreitet. Daher ist bei anhaltend hohen Schmelzwassermengen, deren Produktionsrate primär flächenproportional ist, vor allem eine markante Ausdünnung des Gletschers zu beobachten (Abb. 5). Allein seit 1982 sind am Vernagtferner durchschnittlich über den ganzen Gletscher 12 m des Eisvorrats abgeschmolzen, was eine zusätzliche Wasserspende von 110 Millionen m³ Wasser bewirkte. Diese Menge entspricht ziemlich genau dem gegenwärtigen Trinkwasserverbrauch der Region München innerhalb eines Jahres (STADTWERKE MÜNCHEN, 2001). Diese von der Aufzehrung des Eisvorrates stammende Wasserspende erhöht den niederschlagsbedingten spezifischen Jahresabfluss des Einzugsgebietes des Vernagtbaches von etwa 1200 mm auf über 2000 mm (Abb. 6). Die zusätzliche Abflussmenge fällt konzentriert Mitte Juli bis Mitte September an und erhöht die täglichen Abflussspitzen beträchtlich.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

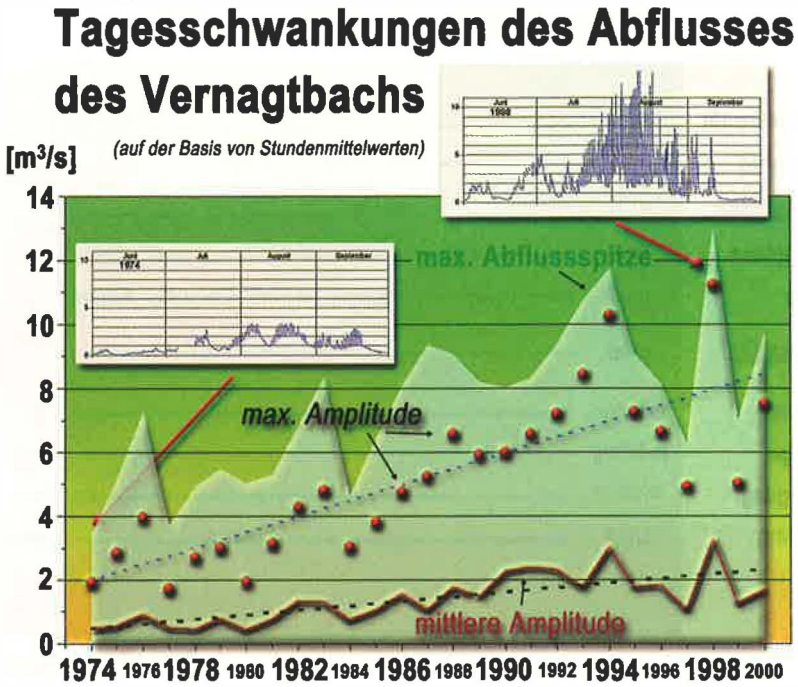

Abbildung 7

Zunahme der Spitzenabflüsse und der Tagesschwankungen im Gletscherabfluss des Vernagtferners aufgrund der Zunahme der Eisgebietsgröße (Verlust des Firnkörpers) und der Abnahme der Eisbewegung.

Der Trend einer Zunahme der Spitzenabflüsse und der Amplitude der Tagesschwankungen im Abflusshydrographen des Vernagtbachs in den Sommermonaten konnte seit Beginn der Messungen an der Pegelstation 1973 durch die Kommission für Glaziologie beobachtet werden (ESCHER-VETTER & REINWARTH, 1995) und setzt sich bis heute fort (Abb. 7). Die bislang höchsten Abflussspitzen wurden mit über 15 m³/s im August 1998 registriert. Detaillierte Untersuchungen zeigen, dass die Änderung des Abflussverhaltens aus dem Zusammenwirken einer Reihe von Einflüssen resultieren, die mit dem Zurückschmelzen des Vernagtferners in Verbindung stehen. So wächst die Schmelzwasserwelle proportional zur Größe des aperen Eisgebietes, deren Dämpfung nimmt dagegen wegen der weitgehenden Verluste des Firnspeichers gegenläufig ab. In den 1990er Jahren kam es zu einer deutlichen Verlangsamung der Eisbewegung, wodurch zusätzlich das intraglaziale Entwässerungssystem an Effizienz gewann. Die Folge ist, dass in den Sommermonaten das an der Oberfläche gebildete Schmelzwasser und der flüssige Niederschlag nahezu unverzögert abfließen können. Ein wesentlich weiteres Anwachsen der Spitzenabflüsse des Vernagtbach ist allerdings nicht mehr zu erwarten. Nach Messungen zur Schmelzwasserproduktion im Sommer 1998 und 2000 sowie einer mehrjährigen Untersuchung der hydrologischen Prozesse der Abflussbildung kann abgeschätzt werden, dass gegenwärtig die theoretisch maximal mögliche durch Eisschmelze bedingte Abflussspitze des Vernagtbaches bei 19 m³/s liegt (WEBER et al., 2002).

6. Extremabflüsse aus vergletscherten Regionen

Hochalpine Regionen sind potentielle Quellgebiete von lokalen Hochwässern, zumal hier im Gegensatz zum Flachland schon kleine Wassermengen genügen, um große Wirkung zu erzielen. Das Ötztal beispielsweise wurde seit 1288 nahezu 450 mal durch Hochwasser heimgesucht. Allgemein wird ein Hochwasser im Gebirge zwar immer von einer Extremwetterlage mit ergiebigen Niederschlägen begleitet, häufig waren zusätzlich auch Verhältnisse auf den Gletschern ursächlich beteiligt. Obwohl im Gebirge örtlich die Niederschlagsmengen stark erhöht werden, bietet üblicherweise die große Höhenerstreckung der Berge eine Art von Selbstschutzmechanismus gegen Hochwasser dank der temporären Speicherung eines Teils des Niederschlags in Form von Schnee (BRAUN & WEBER, 2002). Die Gletscher bilden in diesem Sinne besonders effiziente Speicher. Ist deren Kapazität eingeschränkt, kann die Gefahr einer Hochwassersituation wachsen. Dank der modernen Gletscherforschung kann die Disposition zu Hochwasserereignissen besser eingeschätzt werden (Abb. 8). Maßgeblich für diese sind in erster Linie die im Frühjahr gemessene Schneeakkumulation sowie die Ausdehnung des Ablationsgebietes zum aktuellen Zeitpunkt und dessen Maximalausdehnung im Vorjahr. Ein Hochwasser kann je nach Situation durch überdurchschnittliche Niederschlagsereignisse z. B. während eines Gewitters ausgelöst werden. Eine konkrete Hochwasserwarnung erfordert eine Niederschlagsvorhersage, die verlässliche Information bezüglich Zeit, Ort und Intensität liefert. Insbesondere für Gewitterniederschläge sind die gegenwärtig einge-

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

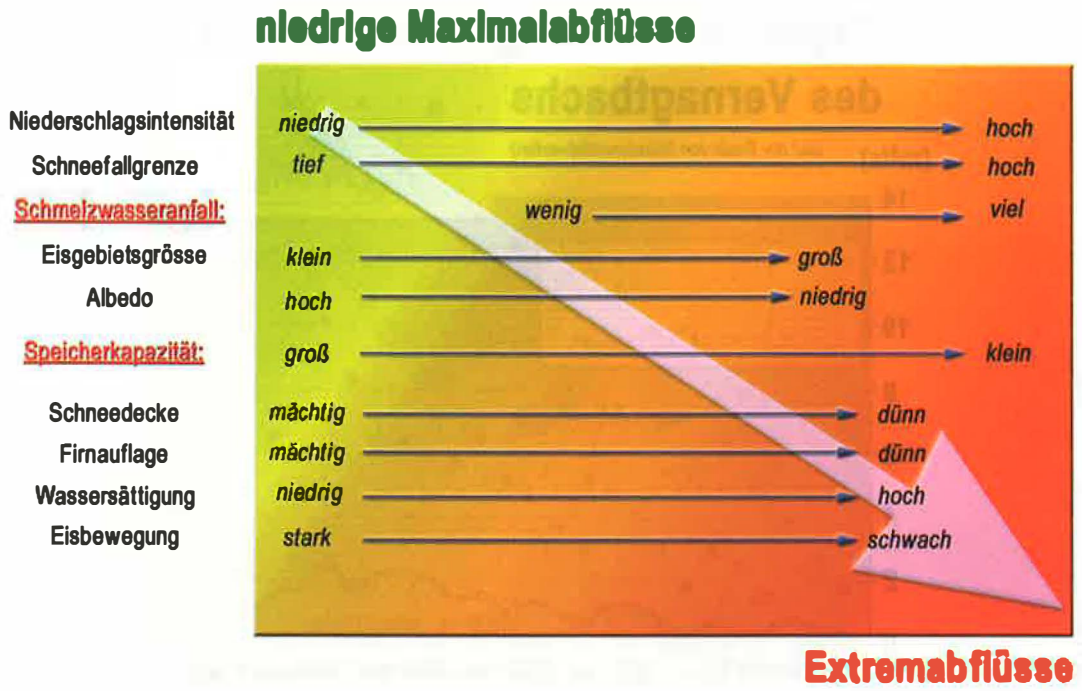

Abbildung 8

Zusammenfassung der Einflussgrößen, die zur Genese von Extremabflüssen in einem vergletscherten Einzugsgebiet führen. Je mehr Faktoren eine Rolle spielen und je gewichtiger sie sind, desto wahrscheinlicher wird das Auftreten von Extremabflüssen und damit die Hochwassergefahr (aus BRAUN & WEBER, 2002).

setzten operationellen Prognosemodelle noch nicht zuverlässig genug, hingegen zeichnen sich großräumige Niederschlagsfelder schon mehrere Tage im voraus ab. In diesem Fall kann zumindest eine Hochwasserwarnung bei entsprechender Disposition rechtzeitig erfolgen.

7. Szenarien des Abflusses aus hochalpinen Gebieten

Von größtem Interesse sind die Folgen eines zu erwartenden Klimawandels auf die Wasserspende hochalpiner Gebiete. Inwieweit sich die überwiegend den Wasserhaushalt bestimmenden Klimaparameter Temperatur und Niederschlag in Zukunft ändern könnten ist ungewiss. Bislang liegen lediglich die Prognosen von Klimamodellen vor, wie sie beispielsweise vom IPCC (2001) für die globale Entwicklung veröffentlicht werden. Für kleinräumigere und heterogenere Gebiete, wie sie die Alpen darstellen, liefern einzelne nationale Forschungsprojekte detaillierte Ergebnisse auf der Basis von regionalen Klimamodellen wie etwa BayFORKLIM (1999) oder das NFP 31 (BADER & KUNZ, 1998) in der Schweiz. Alle diese Prognosen beinhalten leider nur unzureichende Information zur Änderung der wesentlichsten Einflussgröße auf die Wasserspende, nämlich den Niederschlag. Je nach Quelle ergibt sich regional eine Zunahme oder Abnahme der Niederschlagssummen. Etwas eindeutiger sind dagegen die Temperaturprognosen. Nahezu alle Modelle zeigen einen zu erwartenden weiteren Anstieg der Mitteltemperatur, allerdings im Rahmen einer Spanne, die mehrere Kelvin umfasst. Betrachtet man jedoch die Veränderungen innerhalb der letzten 150 Jahre, so gewinnt man die Erkenntnis, dass die Region der Alpen auf Klimaveränderungen erheblich empfindlicher und schneller zu reagieren scheint als die umliegenden Tieflandregionen. Dies ist vor allem eine Folge des Anstiegs der Frostgrenze durch die Erwärmung und der damit verbundenen geringeren Zwischenspeicherung des Niederschlags in Form von Schnee und Eis.

Trotz der Unsicherheiten der Klimaprognosen kann die Auswirkung einer Klimaänderung auf den Abfluss durch Sensitivitätsstudien mit einfachen Abflussmodellen studiert werden, die möglichst wenig Eingabeinformation benötigen. Solche Studien wurden beispielsweise durch KUHN & BATLOGG (1999) in insgesamt 10 vergletscherten und 12 unvergletscherten Einzugsgebieten in Österreich mit Flächen zwischen 22 und 650 km² durchgeführt. Ihre Resultate können wie folgt zusammengefasst werden:

- In stark vergletscherten Einzugsgebieten kommt mit steigenden Temperaturen im Sommer mehr Abfluss zustande, weil genügend Gletschereis zum Schmelzen zur Verfügung steht.
- Schwach vergletscherte Gebiete zeigen einen Anstieg des Winterwassers und die Vorverlegung und Verflachung der Schmelzwasserspitze mit steigenden Temperaturen ohne Komplikationen.

Unvergletscherte Gebiete verhalten sich ähnlich wie die schwach vergletscherten, zeigen aber ein sekundäres Abflussmaximum im Herbst, das sich mit steigender Temperatur verstärkt, weil der wachsende Re-

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

genanteil im Oktober und November ungespeichert abfließen kann.

Ausgehend von Klimaszenarien, wie sie im Rahmen von BayFORKLIM (1999) erstellt wurden, werden sich die Abflussbedingungen im Zentralalpenraum (Abb. 9) deutlicher ändern als in den unvergletscherten Voralpen. Die sommerlichen Abflüsse aus stark vergletscherten Einzugsgebieten werden dabei zunächst ansteigen, bedingt durch die Abnahme von Neuschneefällen in den Gletscherregionen und der erhöhten Schmelzraten aufgrund der allgemein höheren Lufttemperaturen im Hochsommer. Schwierig ist jedoch, dass die Szenarien keinerlei Information über den zeitlichen Ablauf der Klimaerwärmung enthalten, da sie nur die Zustände bei einer Verdopplung des Gehalts der Atmosphäre an maßgeblichen Treibhausgasen wie CO^2 prognostizieren. Der Temperaturanstieg kann sich eventuell über Jahrhunderte erstrecken. Da aber jeder weitere Temperaturanstieg zu einem weiteren Verlust der Eisreserven in den Alpen führt, werden diese in absehbaren Zeiträumen aufgezehrt sein.

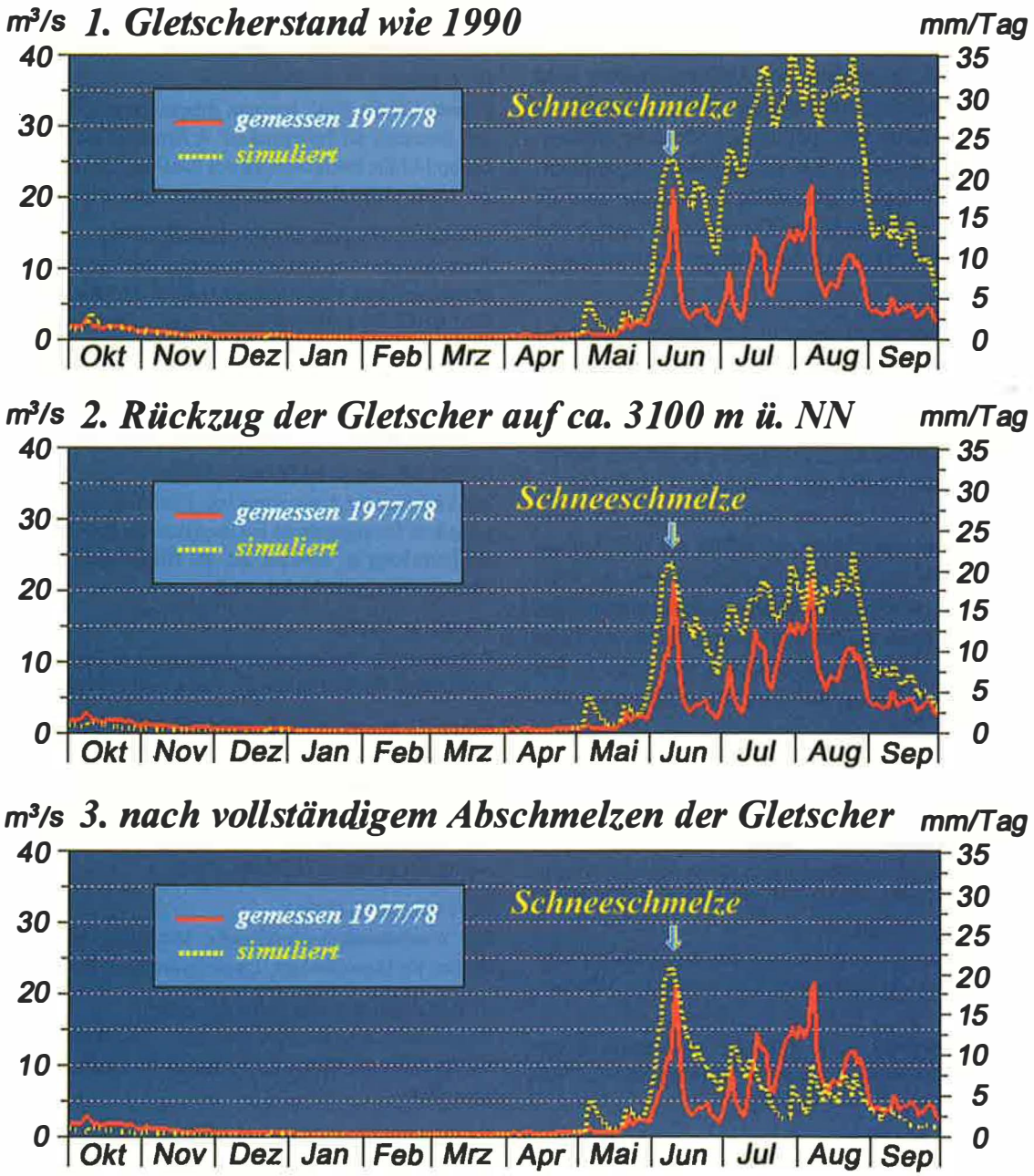

Abbildung 9

Simulation der Tagesmittel des Abflusses unter zukünftigen Klimabedingungen in einem vergletscherten Einzugsgebiet am Alpenhauptkamm am Beispiel der Rofenache und der Vergleich mit Messungen im Referenzhaushaltsjahr 1977/78.
Oben: Vergletscherung wie 1990, 41% der 98.2 km² großen Einzugsgebietsfläche.
Mitte: Simulation unter Bedingungen einer auf Gebiete oberhalb 3100 m NN reduzierten Gletscherfläche.
Unten: Verhältnisse ohne Gletscher. (Nach BRAUN et al., 2000)

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Falls die starken Gletscherschwundjahre der achtziger und frühen neunziger Jahre sich über weitere Jahrzehnte fortsetzen sollten, wird die vergletscherte Fläche weiter schrumpfen und die Abflussspenden der Gletscher werden graduell zurückgehen. Extrapoliert man beispielsweise den jährlichen Massenverlust des Vernagtferners innerhalb der letzten 20 Jahre in die Zukunft, dann wird der Gletscher in ca. 70 Jahren vollständig verschwunden sein (WEBER, 2002). Damit werden die sommerlichen Abflüsse stark reduziert, was u.U. zu empfindlichen Engpässen in der Wasserversorgung führen kann. Demgegenüber beschreiben die auf diesen Klimaszenarien beruhenden Modellrechnungen für die tiefer gelegenen Voralpen zwar eine Reduktion der Schneedecke vor allem in den Hochlagen, das Abflussverhalten wird sich dadurch aber kaum merklich ändern. Generell ist ein Wechsel von nival zu pluvial gesteuerter Abflussbildung zu erwarten, d.h. der Abfluss wird vermehrt über den flüssigen Niederschlag und weniger über die Schmelze von Schnee und Eis gesteuert werden und ist damit von Jahr zu Jahr größeren Schwankungen unterworfen.

Die Abflussmodellierungen zur Untersuchung der Folgen des zu erwartenden Klimawandels zeigen zusammenfassend zwei generelle Auswirkungen auf die Wasserspende: das Aufzehren der Eisreserven bewirkt zunächst ein Überangebot an Wasser, wovon vor allem die Unterlieger profitieren. Langfristig gesehen nimmt jedoch mit dem Schwinden der Gletscher der kompensatorische Effekt auf den Abfluss immer mehr ab, und in der Endphase wird die Wasserspende nur noch durch das Niederschlagsangebot gesteuert. Dann werden in trockenen Jahren die Sommerabflüsse sehr gering sein, was vor allem in den außeralpinen Randgebieten zu Wasserknappheit führen wird.

Literatur

BADER, S. und P. KUNZ (1998):
Klimarisiken – Herausforderungen für die Schweiz. Wissenschaftl. Schlussbericht NFP 31, vdf-Verlag, Zürich, 307 S.

BayFORKLIM (1999):
Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. Abschlussbericht des Bayerischen Klimaverbundes, München, 90 S.

BAUMGARTNER, A.; E. REICHEL; G. WEBER (1983):
Der Wasserhaushalt der Alpen. Oldenburg Verlag, München, Wien, 343 S + Kartenbeilage.

BRAUN, L.N. (1995):
Gletscherabflüsse unter verschiedenen klimatischen Bedingungen. Internationales Symposium „Klimaänderungen und Wasserwirtschaft" vom 27./28. Nov. 1995 in München. Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Heft 56b, pp. 269-292.

BRAUN, L.N.; M. WEBER und M. SCHULZ (2000):
Consequences of climate change for runoff from Alpine regions. Annals of Glaciology, 31/2000, pp. 19-25.

BRAUN, L. & M. WEBER (2002):
Droht im nächsten Sommer Hochwasser vom Gletscher? Beitrag in Rundgespräch „Katastrophe oder Chance? Hochwasser und Ökologie" der Komm. f. Ökologie der BAdW München, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Band 24, S.47-66 (im Druck)
z.Z.:
http://www.glaziologie.de/download/hochwasser_www.pdf

CHEN, J. & A. OHMURA (1990):
Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. IAHS Publ. no. 193, pp. 127-135.

ESCHER-VETTER, H. und O. REINWARTH (1995):
Two decades of runoff measurements (1974 to 1993) at the Pegelstation Vernagtbach/Oetztal Alps. Zeits. für Gletscherk. und Glazialgeol., 30, p53-98.

IPCC (2001):
Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. A Report of the Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UNEP & WMO, Geneva. Internet: http://www.ipcc.ch/

KOMMISSION FÜR GLAZIOLOGIE (1999):
Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt alpiner, teilweise vergletscherter Gebiete. Abschlussbericht BayFORKLIM. Enthalten auf CD-Rom „Klimaerwärmung Gletscher – Wie verändern sich die Gebirgsabflüsse". München, Bayerische Akademie der Wissenschaften, Kommission für Glaziologie, CD Rom, ISBN 3 7696 3500 0 oder unter www.Glaziologie.de/bericht.

KUHN, M. und N. BATLOGG (1999):
Modellierung der Auswirkung von Klimaänderung auf verschiedene Einzugsgebiete in Österreich. In: Schriftenreihe der Forschung im Verbund, Bd. 46, Hrsg. Österreichische Elektrizitätswirschafts-AG, 94 S.

LANG, H. (1981):
Is evaporation an important component in high Alpine hydrology? Nordic Hydrology, Vol. 12, pp 217-224.

MAISCH, M.; A. WIPF; B. DENNELER; J. BATTAGLIA & C. BENZ (2000):
Die Gletscher der Schweizer Alpen. Gletscherhochstand 1850, aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien. Schlussbericht NFP 31, 2. Auflage, Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 373 S.

SCHÄDLER, B. (1985):
Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitteilung Nr. 6, Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie, Bern.

SCHÄDLER, B. und R. BIGLER (1992):
Wasserhaushalt großer Einzugsgebiete. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Blatt 6.1, Bundesamt für Landestopographie, Bern.

SCHWARB, M.; C. DALY; C. FREI & C. SCHÄR (2001):
Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum, 1971-1990. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Blatt 2.6, Karte 1 : 1 700 000, Bundesamt für Landestopographie, Bern.

STADTWERKE MÜNCHEN (2001):
Quellfrisch aus der Natur. M Direkt extra, Stadtwerke München GmbH, Blumenstr. 19, 80331 München, 16 S.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

WEBER, M. (2002):
Der „Magersucht" eines Alpengletschers auf der Spur – Forschung zum Rückzug und gegenwärtigen Abflussverhalten des Vernagtferners in den Ötztaler Alpen. Manuskript auf CD-Rom „Glaziologie in 3D" V2.0, Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, ISBN 3 7696 3501 9 bzw. DAV-Mitteilungen der Sektion Würzburg, Heft 2/2002.

WEBER, M.; L. BRAUN; M. SIEBERS (2002):
Glazialabflüsse am Vernagtferner nach erheblichen Massenverlusten. Schlussbericht DFG-Projekt, Jan 2002, Kommission f. Glaziologie der BAdW, München, 23 S.

Anschrift der Verfasser:

Dr.Ludwig N. Braun und
Dipl.-Met. Markus Weber
Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
Marstallplatz 8
80993 München
Tel.: 089/23 03 1196
ludwig.braun@lrz.badw-muenchen.de
www.glaziologie.de

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Berichte der ANL
26 (2002)

Herausgeber:
Bayerische Akademie für Naturschutz
und Landschaftspflege (ANL)
Seethalerstr. 6 / 83410 Laufen
Postfach 1261 / 83406 Laufen
Telefon: 0 86 82 / 89 63 - 0
Telefax: 0 86 82 / 89 63 - 17 (Verwaltung)
0 86 82 / 89 63 - 16 (Fachbereiche)
E-Mail: poststelle@anl.bayern.de
Internet: http://www.anl.de

Die Bayerische Akademie für Naturschutz
und Landschaftspflege ist eine dem
Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums
für Landesentwicklung und Umweltfragen
angehörende Einrichtung.

Schriftleitung und Redaktion:
Dr. Notker Mallach, ANL

Für die Einzelbeiträge zeichnen die
jeweiligen Autoren verantwortlich.

Die Herstellung von Vervielfältigungen
– auch auszugsweise –
aus den Veröffentlichungen der
Bayerischen Akademie für Naturschutz
und Landschaftspflege sowie deren
Benutzung zur Herstellung anderer
Veröffentlichungen bedürfen der
schriftlichen Genehmigung unseres Hauses.

Erscheinungsweise:
Einmal jährlich

Dieser Bericht erscheint im Dezember 2002

Bezugsbedingungen:
Siehe Publikationsliste am Ende des Heftes

Satz: Christina Brüderl (ANL) und Fa. Bleicher, Laufen
Druck und Bindung: Lippl Druckservice, Tittmoning

Druck auf Recyclingpapier (100% Altpapier)

ISSN 0344-6042
ISBN 3-931175-68-5

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der Bayerischen Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Jahr/Year: 2002

Band/Volume: 26

Autor(en)/Author(s): Braun Ludwig N., Weber Markus

Artikel/Article: Wasserspende aus hochalpinen Gebieten 95-105