

Szenarien für die Alpen über Folgen des globalen Klimawandels

Von *Johann Karl*

Die Alpen als das dichtest besiedelte, am stärksten frequentierte Hochgebirge der Erde ist auch das am besten erforschte. Es verwundert deshalb nicht, daß hier die Auswirkungen der sich weltweit abzeichnenden Klimaänderung eifrig diskutiert werden. Die dabei entwickelten Szenarien reichen von vorsichtigen Mutmaßungen bis zu Horrorvisionen. Es liegt in der Natur dieses fachlich wie emotional so sehr beachteten „Lebensraumes Alpen“ – im weitesten Sinne dieses Begriffes – daß sich bei der Diskussion des Schicksals der Alpen als Folge eines wie auch immer verursachten Treibhauseffektes Fachleute und Laien aus sehr unterschiedlichen Lagern finden. Dies gilt insbesondere für Schreckensbilder, die zwar kurzfristig ein größeres Publikum aufzurütteln vermögen, auf Dauer jedoch dem Umweltdenken mehr schaden als nützen. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich zeitliche oder quantitative Voraussagen nicht einstellen und damit gutgemeinte Absichten diskriminieren.

Die in der vorliegenden Arbeit angesprochenen Szenarien und die ihnen zugeordneten wissenschaftlichen Erkenntnisse mögen einen Teil der Bandbreite skizzieren, in der sich die Diskussion bewegt. Ein besonders spektakuläres, weil optisch jedem Besucher hochalpiner Regionen ins Auge fallendes Faktum, ist der Rückgang der Alpengletscher mit der zeitgleichen weltweiten Erwärmung der bodennahen Luftschicht. Als Folgen dieses Prozesses werden unter anderem gravierende Auswirkungen auf die alpinen Fließge-

wässer vorausgesagt. So sollen extrem niedrige Wasserstände aufgrund mangelnder Reserven von Gletschereis in Trockenzeiten sowohl die Schifffahrt im Rhein wie die Trinkwasserversorgung der Anlieger ernstlich gefährden. Diese Prognosen wurden in einem Rückblick näher betrachtet und dabei zeigte sich, daß sie sich aus dem bisherigen Verlauf der Gletscherschwankungen nicht begründen lassen.

Dieses Ergebnis besagt keineswegs, daß die Alpen von möglicherweise großen, auch klimabedingten Gefahren verschont bleiben. Es sei vielmehr darauf hingewiesen, daß über wenig fundierte Schreckensszenarien die bereits eingetretenen oder mit einiger Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Veränderungen des Ökosystems Alpen nicht beiseitegeschoben oder vergessen werden sollten. Es sei nur daran erinnert, daß die Alpen derzeit 25% des Welttourismus zu verkraften haben, daß sich der individuelle Transitverkehr im nächsten Jahrzehnt voraussichtlich verdoppeln wird, daß die alpinen Wälder unter der Luftverschmutzung und fehlender Verjüngung leiden, obwohl sie noch grün aussehen, daß die Alpen ein weltweit einzigartiges Ökosystem natürlicher und seit Jahrtausenden kulturell geprägter Landschaftskomplex sind, dessen Belastungsgrenzen mehr und mehr erkennbar werden.

All dies sollte uns nicht nur mit Besorgnis erfüllen, sondern zu persönlichem Handeln führen, wie es den Zielen unseres Vereins entspricht.

Vorwort

Auswirkungen der seit etwa 100 Jahren gemessenen Erwärmung der globalen bodennahen Luftschicht um 0,3 bis 0,6° C scheinen sich in Mitteleuropa am deutlichsten in den Alpen abzuzeichnen. Der Rückgang der Alpengletscher seit 1881 um etwa 40% ihrer Fläche, die Abnahme des Permafrostes in hochalpinen Schuttkörpern, das Höherwandern alpiner Blütenpflanzen, die Zunahme schneearmer Winter und warmer Sommer wird mit diesem weltweiten Temperaturanstieg in Verbindung gebracht. Dieser wiederum wird auf den ebenfalls gemessenen Anstieg der atmosphärischen Spurengase Kohlendioxid, Methan, Stickoxide, Fluorchlorkohlenwasserstoffe zurückgeführt, der großteils aus zivilisatorischen Emissionen des Industriezeitalters, insbesondere thermischen Kraftwerken auf der Basis fossiler Brennstoffe, Verbrennungsmotoren, Landwirtschaft, Waldrodungen, Chemotechnik stammt.

Der damit verstärkte Treibhauseffekt der Atmosphäre wird in aufwendigen physikalisch-mathematischen Modellen in seinen derzeitigen und künftigen Auswirkungen auf Klima und Wetter in Szenarien simuliert und dargestellt. Die Alpen mit ihren Klimaspannweiten von mediterran und collin bis nival auf kleinsten Räumen, ihren zu Exzessen neigenden Witterungsergebnissen, ihrer Bedeutung als dichtbesiedelter Kultur- und Wirtschaftsraum, als zentraleuropäisches Transitland, als weltweit bedeutendes Erholungs- und Sportgebiet stehen dabei wirtschaftlich wie mental im hohen Interesse ihrer Bewohner und der sie umgebenden Industriegesellschaften. Es verwundert nicht, daß hier Umweltveränderungen und Naturereignisse mit dem als monokausal anthropogen deklarierten globalen Temperaturanstieg und den daraus abgeleiteten Klima- und Witterungsänderungen zu Szenarien entwickelt werden.

Derartige Zukunftsbilder sind allgemein mit großen Unsicherheiten und dementsprechenden Risiken behaftet. Das gilt vor allem für komplexe Vorgänge wie Klima und Witterung in hochgradig vernetzten Systemen. Die Alpen sind zweifellos der komplizierteste Großraum Mitteleuropas. Das gilt für den Gesteinsaufbau, das Relief, die Klimate, die Witterungsabläufe

ebenso wie für die Gewässer, die Gletscher, die Pflanzen- und Tierwelt und nicht zuletzt für den Menschen mit seinen historischen und aktuellen Aktivitäten.

Da die Alpen nicht nur das am dichtesten besiedelte, sondern auch das am besten durchforschte Hochgebirge der Erde sind, ist das Interesse an seiner möglichen Zukunft nur allzu verständlich. Daß dabei angesichts zahlloser umweltzerstörender menschlicher Tätigkeiten vielfach auch für das Schicksal der Alpen Ängste entstehen, nimmt ebensowenig wunder, wie die Zielsetzung, daraus Kapital für umweltbezogene Maßnahmen, aber auch für politische Interessen zu schlagen, letzteres wohl in der Erkenntnis, daß nur ein hoher Grad an Publikumswirksamkeit entsprechende Maßnahmen ermöglicht. Daß damit allerdings auch die Gefahr verbunden ist, im Eifer des Gefechtes unglaubwürdig zu werden, hat KLEEBERG 1996 in seiner Eröffnungsrede zum Internationalen Symposium „Klimaänderung und Wasserwirtschaft“ mit einiger Deutlichkeit dargestellt:

„Global Change“ und „Klimaänderung“ sind zu Begriffen mutiert, denen nach Belieben unterschiedliche Probleme und Problemlösungen untergeschoben werden. Die zunehmend politisch geführte Diskussion in der Öffentlichkeit läßt die eigentlichen Fragen nach den wissenschaftlichen Erkenntnissen und Aussagen sowie nach den praktischen Konsequenzen oft vergessen. Über die Folgen der Klimaänderung wird wild spekuliert, von Verniedlichungen bis zu Weltuntergangsszenarien. Das Ganze wird meist vermischt mit allem, was unter „Globaler Veränderung“ zusammengefaßt werden kann und was letztlich jeder von uns zu verantworten hat und was das Leben jedes Einzelnen von uns mitbestimmt. Doch es mangelt überall an fundierten Aussagen, an quantitativen Belegen, an Meßdaten, an Modellrechnungen.“

1. Szenarien

Es fehlt in den Alpen keineswegs an eindeutig menschlich verursachten, zum Teil bedrohlichen Veränderungen der Natur und damit an Beschädigungen menschlicher Umwelt. Das sei an einigen Beispielen gezeigt:

Spätestens vor 1000 Jahren wurde der Waldbestand alpenweit auf etwa ein Drittel seines ursprünglichen und auch heute noch standörtlich möglichen Umfangs verringert. Diese mittelalterliche Wald-Feld-Verteilung blieb im wesentlichen bis heute erhalten. Die dadurch drastisch verschärften Hochwasserabflüsse der Fließgewässer bei den häufigen Starkregen führen seither zu einer erheblichen Zunahme der Boden- und Lockergesteinsabträge. Die Folge sind Anbruchflächen, Rutschungen, Überschwemmungen, Muren, Überschotterungen, die sich über die Alpen hinaus noch in der jüngsten Vergangenheit bis in die Vorländer auswirkten. Die verbliebenen Bergwälder werden zunehmend von Lawinen beschädigt bis zerstört. Die Ursachen für diese Entwicklung sind in der Schaffung von Weideflächen ebenso zu sehen, wie in der Nutzung der Wälder durch Weidevieh und überhöhte Wildbestände. Letztere führen auch heute vor allem zur Vergrasung und Auflichtung der verbliebenen Wälder als Folge der fortlaufenden Verhinderung der standortgerechten Waldverjüngung. (KARL 1985; KARL et al. 1985).

Nicht zu unterschätzen ist auch die Zunahme der subjektiven Gefahren durch die dichte Besiedelung vieler Alpentäler, die hochempfindlichen Transitstrecken zwischen den zirkumalpinen Industrieländern, des Massentourismus (mit einem Anteil von 25% am Welttourismus) und die mit alledem verknüpften hochempfindlichen Infrastrukturen (BÄTZING 1991).

Es sei hier auch auf die in den Alpen regional deutlich festzustellende „Neuartige Walderkrankung“, das sogenannte „Waldsterben“ hingewiesen, das vor allem auf zivilisatorische und industrielle Luftverunreinigungen zurückzuführen ist. Es besteht insgesamt für

die Vermeidung dieser und anderer menschlich bedingter Umweltschäden deutlicher Handlungsbedarf, dem in den nationalen Eingriffsräumen in raumordnerischen Planungen, Gefahrenkartierungen, Schutzwasserbauten, Lawinenverbauungen, Integralmeliorationen nachgekommen wird. Neben emotional geprägten Tätigkeiten wie Jagd oder Sport treten vor allem im politischen Bereich Schwierigkeiten bei grenzüberschreitenden und allgemeinverbindlichen Vereinbarungen auf, die bisher im Rahmen der Alpenkonvention ebenso wie bei den Weltklimakonferenzen über Absichtserklärungen kaum hinausgehen (STEPHAN 1996, BÄTZING 1997).

Darüber helfen auch gut gemeinte Horrorszenarien nicht hinweg, wie sie für die Alpen entworfen wurden und werden. Einige werden im Folgenden Aussagen von Naturwissenschaftlern gegenübergestellt. Grundsätzlich ist zu bemerken, daß die Schreckensbilder vielfach an Modellrechnungen der achtziger und frühen neunziger Jahre anknüpfen, in denen die Erwärmung der Erdatmosphäre ausschließlich auf die menschlich verursachte Zunahme der atmosphärischen Spurengase und den dadurch verstärkten Treibhauseffekt zurückgeführt wurde, während die natürlichen Ursachen der nacheiszeitlichen Klimaschwankungen nicht berücksichtigt sind (GRASSL u. KLINGHOLZ 1990).

Eine seinerzeit ungewöhnlich kritische, vor allem die Kenntnislücken über den natürlichen Kohlenstoffdioxid-Kreislauf aufzeigende Darstellung findet sich 1991 bei OZENDA und BOREL. Die daraus abgeleitete große Unsicherheit von Klimamodellen und -prognosen eignet sich allerdings wenig zur Untermauerung spektakulärer, publikumswirksamer Szenarien und fand kaum Beachtung.

Voraussagen und gutgemeinte Warnungen

Die Erwärmung wird in den Alpen zu einer rapiden Zunahme von katastrophalen Unwettern führen.

Als Folge extremer Regen werden auf dem Marienplatz in München die Leute in venetianischen Gondeln spazierenfahren.

Heiße, trockene Sommer und schneearme Winter werden die Bergwälder so schädigen, daß sie absterben. Dies vor allem deshalb, weil die Gehölze den sich rasch nach Norden verlagernden Klimazonen nicht rasch genug folgen können.

„The warming is not the problem, only the speed.“

Der Verlust der Bergwälder wird in Zusammenhang mit zahlreichen katastrophalen Niederschlägen zu flächenhaften Bodenverlusten, zu extremen Hochwassern und Muren führen. Die Geröllmassen werden die Alpentäler überschottern und Teile der Alpengseen verfüllen.

Fundierte Aussagen von Naturwissenschaftlern

Da vielfach „Wetter“ und „Klima“ nicht genügend auseinandergehalten werden, sind Aussagen über künftige Niederschläge und Temperaturen reine Spekulationen (SEILER 1996).

Die Simulation des Niederschlags bleibt ein Hauptproblem der Klimamodellierung. Obgleich nähere Kenntnisse der Verteilungsmuster der Niederschläge regionale Strukturen besser darstellen können, sind absolute Werte noch immer unsicher. Dies gilt vor allem für die Simulation extremer Niederschlagsereignisse in stark gegliederten Landschaften (SCHALLER et al. 1996).

„Leider können Klimamodelle derzeit keine Aussagen zur Veränderung der verdunstungsrelevanten Faktoren Bewölkung, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte liefern. Über die mögliche Reaktion der Bewölkung ist beispielsweise noch so wenig bekannt, daß derzeit noch über das Vorzeichen (plus oder minus) einer solchen Änderung diskutiert wird. Die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den regionalen Wasserhaushalt können auf der Grundlage des derzeitigen Kenntnisstandes über die Veränderung atmosphärischer Einflußfaktoren nicht einmal näherungsweise abgeschätzt werden (SCHUMANN 1996).“

Bergwälder haben auf schwierigen Standorten bei ungünstigen Klimaten postglaziale Warmzeiten überstanden. Heute sind sie in ihrer Existenz durch Luftverschmutzung und überhöhte Wildbestände akut gefährdet (BAYER. LA f. WAWI 1990; BAYER. STAATSMIN. d. INNEREN u. f. ELF 1969; KARL 1985; MAYER 1982; MEISTER 1984; SCHWARZENBACH 1984; BAYER. LA f. Wawi 1990).

Die Zahl der registrierten Hochwasser hat in der jüngeren Vergangenheit zugenommen. Dies ist vor allem auf die Fortschritte der hydrologischen Meßtechnik und auf die hohe Empfindlichkeit der alpinen Kulturlandschaften und Infrastrukturen, ihrer Bewohner und Gäste zurückzuführen. (KARL 1991, RÖTHLISBERGER 1991).

Die Täler der Alpen wurden in der letzten Eiszeit durch die Gletscher vorgeformt; die heute eisfreien Formen werden durch Erosion rückgängig gemacht. Immer wenn es stark regnet oder wenn Schnee dazukommt, rutscht das Material weiter herunter. Da schwimmen dann tonnenschwere Steine wie Korken auf dem Wasser auf glitschigen Tonschichten zu Tal. Die Menschen sitzen auf Zeitbomben, ohne es zu ahnen.

Die durch den Verlust der Bergwälder und des hangstabilisierenden Dauerfrostes als Folge der Erwärmung werden Fels- und Bergstürze stark zunehmen. Zum Teil sind auch künstliche Skipisten dafür verantwortlich zu machen.

Die Klimaänderung und die zu erwartenden katastrophalen Witterungsänderungen sind ausschließlich auf die menschlichen Emissionen von Treibhausgasen zurückzuführen. Sie werden in absehbarer Zeit zumindest Teile der Alpen unbewohnbar und unpassierbar machen.

Die als Abtragungs- und Vermurungspotential angenommenen Massen reichen keineswegs aus, um die Alpentäler und -seen zu verfüllen. Eine näherungsweise Abschätzung ist anhand hydrographisch-morphologischer Karten und geographischer Informationssysteme möglich (BUNZA u. KARL 1975; BAYER. LA F. WASSERWIRTSCHAFT 1996):

Eine starke Zunahme von Abtragsvorgängen ist in jüngerer Vergangenheit gebietsweise festzustellen. Sie ist vor allem auf zerstörerische Eingriffe in Schutzwälder zurückzuführen, durch die ihre Schutzwirkung bei üblichen Starkniederschlägen verlorenging (SCHIECHTL 1954/55; KARL u. DANZ 1969; KARL 1991; TIEDEMANN 1988).

Die Fels- und Bergstürze haben seit der frühen Nacheiszeit in den Alpen sehr stark abgenommen. Der Grund dafür ist in der seither größeren Stabilität der Felshänge zu suchen. Außerdem ist davon auszugehen, daß der eiszeitliche Dauerfrost als Folge der seither stattgefundenen Warmzeiten in weiten Alpengebieten verlorenging (ABELE 1974).

„Trotz einer gewichtigen Skepsis deuten verfeinerte Szenarien unter Einschluß von Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, von Verfügbarkeit von Energie und Kombination von Energieträgern darauf hin, daß der Anstieg der mittleren globalen Temperatur zwischen 1990 und 2100 n. Chr. in Modellen rund 2°C betragen kann. Allerdings ist dazu festzustellen, daß sich vor rund 11.000 Jahren eine weltweite Erwärmung um 5 bis 7°C ereignet hat, die mit einer Instabilität klimabestimmender Faktoren zusammenhängt. Auch ein künftiger Klimawandel könnte rasch und heftig erfolgen“ (NFP 31 1996).

Die Betrachtung der Lebensumstände in den Alpen während der Warmzeiten der letzten fünf Jahrtausende läßt den Schluß zu, daß weder die Erzeugung landwirtschaftlicher Güter noch die Siedlungstätigkeit und der Unterhalt der Verkehrsverbindungen klima- und witterungsbedingt stärker beeinträchtigt war, als in den dazwischenliegenden kühleren Zeiten (BÄTZING 1997; BARFIELD et al. 1992; KARL 1994; PAULI 1981).

Weit über die Alpen hinausreichende Folgen wird das in den nächsten Jahrzehnten zu erwartende völlige Verschwinden der Alpengletscher nach sich ziehen. Sie werden nicht nur als einer der wichtigsten Trinkwasserspeicher Europas verlorengehen, sondern auch beispielsweise bei sommerlichen Niedrigwasserständen des Rheins die Schifffahrt in Frage stellen.

„Es ist nicht auszuschließen, daß es in Europa zu einer sich rasch einstellenden Abkühlung kommt. Wegen der Änderung im Salzgehalt des Nordatlantiks und der sich daraus verändernden weltumspannenden Strömungen sanken vor etwa 12.000 Jahren die Temperaturen in Europa um mehrere Grad Celsius (BADER 1996).“

Präzise Voraussagen nach dem Motto „bereits im Jahre 2000 werden die norddeutschen Trinkwasserbrunnen wegen des ansteigenden Meeresspiegels versalzen“ sind wissenschaftlich nicht haltbar (GRASSL u. KLINGHOLZ 1990).

Abschließend seien noch zwei allgemeine Zitate gebracht, die die derzeitige Situation etwas beleuchten:

„Eine gesicherte Vorhersage von Häufigkeit und Gebiet des Auftretens künftiger Klimaänderungen ist für das 21. Jahrhundert mit dem heutigen Kenntnisstand weder global noch regional möglich (GUTERMANN 1996).“

„Effekte in der atmosphärischen Zirkulation sind nicht zuletzt auf immanente, zum Teil unverstandene und daher stochastisch aufgefaßte Änderungen der Zirkulation zurückzuführen (SCHÖNWIESE 1996).“

Es findet demnach in der Klimaforschung ein ähnlicher Prozeß statt wie in anderen Bereichen der Naturwissenschaften: Je weiter man in einen Problemkreis vordringt, umso mehr treten weitere, meist schwieriger zu lösende Fragen auf. Am wenigsten verwundert dies bei prognostischen Unternehmungen in den hochkomplexen, zum Teil chaotischen Systemen Klima und Witterung. Diese Tatsache mag manchen dazu verleiten, zu resignieren und politisches, wirtschaftliches, persönliches Nichtstun auf dem weiten Feld „Umwelt“ damit zu bemänteln, daß man ja doch nichts wisse und deshalb mit großer Wahrscheinlichkeit etwas Falsches mache. Genauso falsch wäre jedoch eine emotionsgeladene Panikmache, die letztlich eher schadet als nützt. JOBST hat darauf bereits 1978 in aller Deutlichkeit hingewiesen; „Der Weg nüchterner Sachlichkeit bei der Abwägung der Argumente für oder gegen bestimmte Eingriffe in die Natur ist weit

weniger spektakulär als gefühlsbetonte Angriffe; kurzfristige Scheinerfolge bleiben hier versagt. Trotzdem sind Allgemeinheit und Politiker nur über diesen dornigen Weg der Sachlichkeit auf lange Sicht zu überzeugen.“

Ein solcher Weg sollte auf jeden Fall so aussehen, daß man sich verantwortlich fühlt für die Zukunft dieses „Raumschiffes“ Erde und all das unterläßt, was zu seiner Beschädigung bis Zerstörung beitragen kann. Die Möglichkeiten dazu sind zahllos und dementsprechend auf jeden Einzelnen zuschneidbar. Voraussetzung dazu sind fachlich seriöse Informationen und Angebote.

In den Alpen besteht trotz zahlloser Veröffentlichungen und Aktionen noch einiger Bedarf, um Kenntnislücken zu schließen und weniger gesicherte Voraussagen auf ihre Plausibilität hin zu betrachten. Ein solcher Fall sind die Meinungen über die Rolle der Alpengletscher im Wasserhaushalt. Im nächsten Kapitel wird dieser Frage nachgegangen.

2. Der Einfluß der Alpengletscher auf Fließgewässer

2.1 Einführung

Der Anteil der Gletscher in den 200.000 km² großen Alpen beträgt derzeit 3000 km². Sie waren als Folge der mehrfachen postwürmglazialen Klimaschwankungen Vorstößen und Rückzügen unterworfen, die zwar zeitlich gut bekannt, in ihren Ursachen jedoch unerforscht sind. (KARL 1994; OESCHGER

1988; SCHÖNWIESE 1979). Der nach dem post-würmglazialen Gletscherhöchststand von 1850 beginnende Rückzug der Alpengletscher unterscheidet sich von den vorausgegangenen dadurch, daß das damit einsetzende Moderne Klimaoptimum seit 1861 temperaturmäßig und seit 1881 mit seinen Gletscherbewegungen quantitativ, letzteres auch topographisch dokumentiert ist (FOREL 1881/94) und daß er mit dem gemessenen globalen Temperaturanstieg der bodennahen Luftschicht von 0,3 bis 0,6°C in Zusammenhang gebracht und in umstrittenem Ausmaß auf anthropogene Einflüsse auf die Erdatmosphäre zurückgeführt wird (BADER 1996; GRASSL u. KLINGHOLZ 1990; MRASEK 1995; SCHÖNWIESE 1996). Darüber hinaus wird das gänzliche Abschmelzen der seit 1881 um 40% kleiner gewordenen Alpengletscher für die erste Hälfte des 21. Jahrhunderts vorausgesagt und als Folge davon u.a. ein katastrophales Absinken sommerlicher Niedrigwasserabflüsse des Rheins bis zum Erliegen der Schifffahrt und Mängel in der Trinkwasserversorgung der Rheinanlieger prognostiziert (DER SPIEGEL 1994).

Die Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs in der globalen bodennahen Luftschicht und der Bewegungen der Alpengletscher (Abbildung 1) legt wegen der hohen Übereinstimmung einen engen Zusammenhang nahe. Dazu ist folgendes zu bemerken: Die

Temperaturangaben basieren auf einem weltweiten Meßnetz, dessen Meßpunkte jeweils 250.000 km² Erdoberfläche repräsentieren. Die Angaben über die Gletscherbewegungen beziehen sich auf den prozentualen Anteil der zurückweichenden Gletscher an der Gesamtzahl der Alpengletscher. Die Flächen- und Massenveränderungen sind dabei nicht berücksichtigt.

2.2 Methodik

Bei der Untersuchung des Einflusses der Alpengletscher auf alpine und alpin beeinflusste Fließgewässer war es naheliegend, zunächst anhand von Pegelaufzeichnungen festzustellen, ob und wie weit sich der bereits stattgefundenene Gletscherverlust von 40% in den Abflüssen abzeichnet. Zu einer Langzeituntersuchung bot sich in erster Linie der Rheinpegel Basel an, der seit 1808 in Betrieb ist und damit zeitlich sowohl den Gletscherhochstand von 1850 wie die Rückzüge bis in die Gegenwart abdeckt (GHEZZI 1926; EIDGEN. DEPART. D. INNERN 1925-1992). Des weiteren wurden in Deutschland herangezogen Pegel am Inn (BAYER. LANDESST. usf. 1940-1989), in Frankreich Pegel an Rhône und Isère (MINISTRE D'AGRICULTURE 1995), in Italien an Po (CATI 1981) und Etsch (PROVINCIA AUTON. DI BOLZANO 1957-1989), in der Schweiz an Inn, Rhône, Massa (EIDGEN. DEPART. D. INNERN 1925-1992).

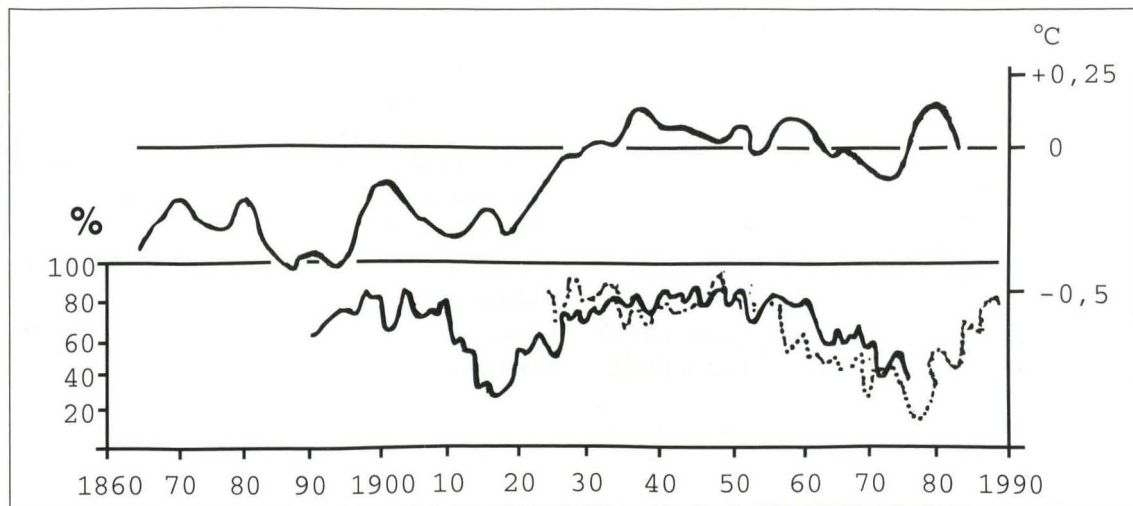


Abbildung 1: Obere Kurve (—) Temperaturverlauf der nordhemisphärischen bodennahen Luftschicht in °C. Untere Kurven: Prozentualer Anteil der zurückweichenden schweizer (—) und italienischen (.....) Gletscher. (Quellen: JONES et al. 1984; KASSER u. AELLEN 1978; SMIRAGLIA 1994).

Ein Vergleich vergletscherter und unvergletschter Einzugsgebiete wurde ab 1940 zwischen Rhein, Rhône, Massa, Inn, Lech, Isar und Iller angestellt. Diese Periode wurde gewählt, um die nach 1950 in Betrieb genommenen Jahresspeicher für die Gewinnung hydroelektrischer Energie mit zu erfassen (LINK 1970). Die Gletscherabflüsse wurden von der Abflußperiode 1974 – 1993 des Vernagtferners auf das gesamte Alpengebiet übertragen (ESCHER-VETTER u. REINWARTH 1994). Dieser Pegel wurde gewählt, weil er mit einer Vergletscherung von 81% des Einzugsgebietes den höchsten Gletscheranteil alpiner Meßstationen aufweist und deshalb den geringsten nicht quantifizierten Störfaktor in den Abfluß einbringt.

2.2.1 Fließgewässer

Die zentral- und nordalpinen Fließgewässer weisen mit und ohne Gletscheranteil hohe Sommer- und niedrige Winterabflüsse auf; die süd- und südwestalpinen Fließgewässer zeigen zum Teil mediterrane und in-subrische Einflüsse, die andere Abflußregime mit niedrigeren Sommer- und höheren Winterabflüssen, bzw. sehr hohe Sommer- und hohe Winterabflüsse aufweisen (SCHWANDEN u. WEINGARTNER 1985).

Wie die Tabelle 1 zeigt, setzen sich die Abflüsse alpiner und alpin beeinflusster Fließgewässer aus zahlreichen Faktoren zusammen, die mit ihren zahllosen Vernetzungen ein außerordentlich komplexes System bilden (KARL 1993). Die Gletscher sind davon nur ein Teilbereich, dessen Anteil am Abflußgeschehen wie bei einer Reihe weiterer Faktoren nur sehr ungenau bekannt ist. Experimentell gesichert ist der Einfluß der Vegetation auf den Oberflächenabfluß bei Starkregen (KARL et al. 1985), wobei Durchlässigkeit und Relief der Standorte zusammen mit dem Gewässernetz als nicht oder nur sehr aufwendig zu quantifizierende zusätzliche Faktoren zu berücksichtigen sind (BAYER. LANDESAMT F. WASSERWIRTSCHAFT 1996).

Die Problematik der in Tabelle 1 dargestellten Faktoren sei an einem Beispiel gezeigt (Abbildung 2): Die Einzugsgebiete der Iller am Pegel Sonthofen und der Isar am Pegel Mittenwald sind mit 401 bzw. 400 km² gleich groß. Sie sind am Nordostrand der Alpen in den Allgäuer und Mittleren Bayerischen Alpen etwa 70 km voneinander entfernt. Die Niederschlagsverhältnisse sind, wenn man die Ungenauigkeiten der Niederschlagsmessung in Hochgebirgen zwischen 700 bis 2500 m Seehöhe in Betracht zieht, in etwa als vergleichbar anzunehmen. Unterschiedlich sind die Gesteinsverhältnisse (Iller: Flysch, Sandsteine, Kalke, Hauptdolomit; Isar: Wettersteinkalk, große Lockergesteinshalden) und die Vegetation (Iller: Hoher Anteil Alpweiden, geringer Waldanteil; Isar: Kaum Almweiden, mäßiger Waldanteil). Im 10-Jahres-Durchschnitt beträgt das MQ der Isar nur 2/3 des MQ der Iller. Die größten Unterschiede treten in den Monaten März bis Juli, die geringsten in den Monaten August bis Februar auf. Die Abflußtendenzen sind bei beiden Flüssen gleich. Gletscher und Firnfelder sind bei beiden nicht vorhanden.

2.2.2 Gletscher

Der nach 1850 einsetzende Rückzug der Alpengletscher wird seit dem Ende des vorigen Jahrhunderts dokumentiert (CONCIGLIO NATIONALE 1959/62; FOREL 1881/94; GROSS 1987; KASSER 1978; KASSER u. AELLEN 1978; MÜLLER ET AL. 1978; SMIRAGLIA 1994; VIVIAN 1975). Im Allgemeinen werden die Längenveränderungen, zum Teil auch die Flächenveränderungen gemessen; Massenbilanzen wurden bisher nur an wenigen Gletschern in Österreich und in der Schweiz durchgeführt (KASSER 1978; PATZELT 1994). Wegen der starken Abhängigkeit der Gletscherbewegungen und -abflüsse von der sommerlichen und winterlichen Witterung (Tabelle 2) betrachtet KASSER (1978) nur Jahresmittel der Abflüsse für einigermaßen repräsentativ.

Komplexe	Wesentliche Gewässerbestimmende Faktoren (Formen, Abflüsse)	Wirkung auf Abflüsse	Quantifizierbarkeit
Klimatyp	Geogr. Lage (Zentral-, Randalpen N-, S-, W-, O-Alpen); Höhenlage (alpin, subalpin, montan, collin)	+ - ±	ausreichend
Witterung	Niederschlag (fest, flüssig, Intensität, zeitliche, räumliche Verteilung; Temperatur (zeitliche, räumliche Verteilung), Staulage; Föhn	+ ±	ausreichend bis mäßig
Gesteine	Festgesteine, veränderlichste Gesteine, Lockergesteine	+ - ±	ausreichend bis mäßig
Relief	Reliefenergie, Form des Niederschlagsgebietes	+ -	ausreichend bis unmöglich
Gewässergestalt	Grundriß (gestreckt, gekrümmt, verzweigt, Fluß-, Talmäander; Sohlzustand (potentielle-, aktuelle Eintiefung, Auflandung, Beharrung)	+ - ±	ausreichend bis mässig
Gletscher	Typ (Tal-, Gebirggletscher); Anteil am Niederschlagsgebiet	+	mässig bis unmöglich
Natürliche Seen	Größe, Tiefe, natürliche „Atmung“, Aus-, Einleitungen	+ - ±	ausreichend
Vegetation	Formation (Wälder, Zwergstrauch-, Grasheiden); Bewirtschaftung (Grünland, Acker, Sonderkulturen, intensiv, extensiv); Naturnähe	+ - ±	ausreichend bis unmöglich
Schutzwasserbau	Fluß-, Wildbachausbau	+ - ±	ausreichend
Wasserkraft	Kraftwerke (Fluß-, Ausleitungs-, Pumpspeicherkraftwerke); Jahresspeicher	- ±	ausreichend
Straßen, Siedlungen, Infrastrukturen	Flächenversiegelung	+	ausreichend bis mässig

Tabelle 1:

Die am Abfluß alpiner und alpin beeinflusster Fließgewässer beteiligten Komplexe, ihre Wirkungen auf den Abfluß, ihre Quantifizierbarkeit. + abflußfördernd, - abflußverringend, ± Abfluß moderierend. (Quelle: KARL 1993).

Die vielfältigen Auswirkungen der alpinen Landschaftskomplexe auf die Abflüsse der alpinen und alpin beeinflussten Fließgewässer sind im einzelnen nur zum Teil quantitativ bekannt; die gegenseitigen Einflüsse der Landschaftskomplexe sind noch weniger quantifiziert. Das naturgegebene und menschlich bedingte Netz all dieser die Abflüsse bestimmender Faktoren ist nicht nur wegen ihrer Kompliziertheit, sondern auch wegen häufiger Zufälligkeiten kausalen Analysen nur bedingt zugänglich.

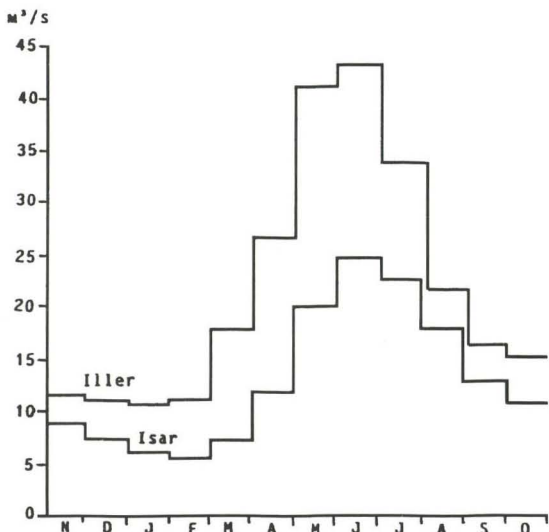


Abbildung 2: Die Abflüsse von Iller am Pegel Sonthofen (AEo 401 km²) * und Isar am Pegel Mittenwald (AEo 400 km²) * im 10-jährigen Durchschnitt der monatlichen Mittleren Abflüsse. (Quelle: BAYER. LANDESST. us. 1960/79). * AEo ist die oberflächliche Abflußfläche des Einzugsgebietes eines Gewässers. Unberücksichtigt bleiben dabei unterirdische Zu- und Abflüsse, z.B. in Karstgebieten, sowie künstliche Zu- und Ausleitungen z.B. bei Wasserkraftanlagen.

Witterung			Andere Faktoren	
Niederschlag-Temperatur			Topographie-Relief-Exposition	
Winter	Sommer	Bilanz	Gletschertyp	Reaktion auf Klima, Witterung
viel Schnee	feucht, kühl	+	Talgletscher	langsam
viel Schnee	trocken, warm	-	Gebirgsgletscher	rasch
viel Schnee	feucht, warm	- ±	Höhenlage-Exposition	
wenig Schnee	feucht, kühl	- ±	witterungs- und typbedingt sind alle Kombinationen möglich	
wenig Schnee	trocken, warm	-	Schuttbedeckung-Albedo	
wenig Schnee	feucht, warm	-	je nach Schuttanfall, sommerlicher Schneebedeckung und Ausaperung sind alle Kombinationen möglich	
Die hier angeführten Faktorengruppen können in zahlreichen nicht vorhersehbaren Kombinationen auftreten (ALLEN 1978; GROSS 1987).				

Tabelle 2: Bestimmende Faktoren der Massenbilanzen alpiner Gletscher.

+ Massenzunahme; - Massenverlust; ± keine Änderung

Alle Massenveränderungen gelten gegenüber dem Vorjahr am jeweils gleichen Gletscher.

Talgletscher sind Gletscher, die sich als lange Eisströme in Tälern oft bis unter die Waldgrenze bewegen (z.B. Aletschgletscher im Wallis). Sie reagieren auf Witterung und Klima mit z.T. starker zeitlicher Verzögerung. Gebirgsgletscher weisen keine langen Eisströme in Tälern auf. Zu ihnen zählen u.a. auch Hängegletscher. Sie sind in den Alpen häufiger vertreten als Talgletscher. Albedo ist die Reflexion von nicht selbstleuchtenden, diffus reflektierenden Oberflächen, z.B. von Schnee, Eis, Wolken. Albedo mindert die Erwärmung schneebedeckter Gletscher, während dunkle schuttbedeckte Gletscheroberflächen durch die Strahlung stark erwärmt werden und dementsprechend stärker abschmelzen. Dieser Vorgang wird Ablation genannt.

2.2.3 Natürliche Seen

Die natürlichen Seen der Inneralpen, des südlichen Alpenrandes und des nördlichen Alpenvorlandes weisen im jährlichen und mehrjährigen Verlauf z.T. erhebliche Wasserspiegelschwankungen auf. Hochstände treten meist im Sommer als Folge der hohen Sommerabflüsse ihrer Zuflüsse auf. Sie wirken im Winter ausgleichend auf die jahreszeitlich bedingten geringeren Abflüsse ihrer unterliegenden Fließgewässer. Die Wirkung der natürlichen Seen auf die Abflüsse ist damit dem moderierenden Einfluß der künstlichen Jahresspeicher vergleichbar, ihre Quantifizierung ist allerdings wesentlich schwieriger als die der Fassungsräume und der Entleerung der Speicher. Die Tabelle 3 zeigt die Seeoberflächen in km² und gibt damit zumindest Hinweise auf ihre moderierende Wirkung. Ihre An-

teile an den Einzugsgebieten der untersuchten Flüsse (AEo) werden mit denen der Gletscher verglichen. Dabei zeigt sich, daß die Anteile der natürlichen Seen (mit Ausnahme des Inn) die Flächenanteile der Gletscher weit übertreffen. Am deutlichsten ist dies beim Rhein.

2.2.4 Jahresspeicher zur Erzeugung hydroelektrischer Energie

Die in Tabelle 4 dargestellten Anteile der Jahresspeicher am Abfluß der untersuchten Flüsse liegen zum Teil sehr nahe an den Anteilen ihrer Gletscherabflüsse. Es kann bei diesen Flüssen davon ausgegangen werden, daß die Gletscher weitgehend in den AEo der Speicher liegen. Diese Ähnlichkeit erlaubt die Vermutung, daß die am Vernagtferner orientierten Gletscherabflüsse zumindest in diesen Gebieten einigermaßen zutreffen.

Fluß (Pegel)	See	Seefläche	Anteil See an AEo Fluß	Anteil Gletscher an AEo Fluß
		km ²	%	%
Rhône (Beaucaire)	Lac Léman	581	0.6	1.2
Po (Pontelagoscuro)	Lago di Garda	370	0.9	0.7
	Lago Maggiore	216		
	Lago di Como	146		
	Lago d'Iseo	65		
		797		
Rhein (Basel)	Bodensee	539	3.4	1.3
	Neuenburger See	218		
	Vierwaldstättersee	114		
	Zürichsee	89		
	Thunersee	50		
	Bieler See	39		
	Zuger See	32		
	Brienzer See	29		
	Walensee	24		
	Murtensee	23		
Kleinere Seen Sa.	50			
		1207		
Inn (Passau-Igling)	Chiemsee	80	0.4	1.8
	Kleinere Seen Sa.	18		
	Engadiner See	8		
		106		

Tabelle 3: Die natürlichen Seen in den Einzugsgebieten von Rhône, Po, Rhein und Inn sowie der Vergleich deren prozentualen Anteil und der prozentualen Anteile der Gletscherflächen in den jeweiligen Einzugsgebieten (Quelle: WORLD GLACIER MONITORING 1989).

Die Abweichungen der Anteile der Speicher von denen der Gletscher in anderen Flüssen sind auf unterschiedliche Anteile der Gletscherabflüsse an der Füllung der Speicher zurückzuführen. Die Abbildung 3 stellt den Einfluß der Jahresspeicher auf den Abfluß dar.

3. Die Abflüsse in historischer Sicht

Die Rückzugsphasen der Alpengletscher mit ihren erhöhten Abschmelzraten müßten sich in langjährigen Pegelaufzeichnungen ebenso bemerkbar machen, wie die Vorstoßphasen mit ihrer geringeren Ablation. Wie die Abbildung 4 zeigt, prägt sich diese Erwartung zwar in den Abflüssen der Ablationsmonate Juli-August-September in einigen Fällen aus, nicht jedoch in den Jahresabflüssen, die nach KASSER (1978) ein gesicherteres Bild des Abflußgeschehens liefern. Insbesondere beim Rheinpegel Basel fallen die hohen Abflußwerte der Sommer vor 1850 und zwischen 1930 und 1940 auf, die mit Gletscherhochständen oder -rückzügen zusammenfallen, während die hohen Werte nach 1900 und 1940 gut mit den Vorstellungen über höhere Abflüsse bei Gletscherrückzügen übereinstimmen. Zu bedenken ist hier allerdings, daß von den 35.925 km² Einzugsgebiet des Rheins bei Basel nur 1.3% vergletschert sind und 1207 km² Seeflächen zen-

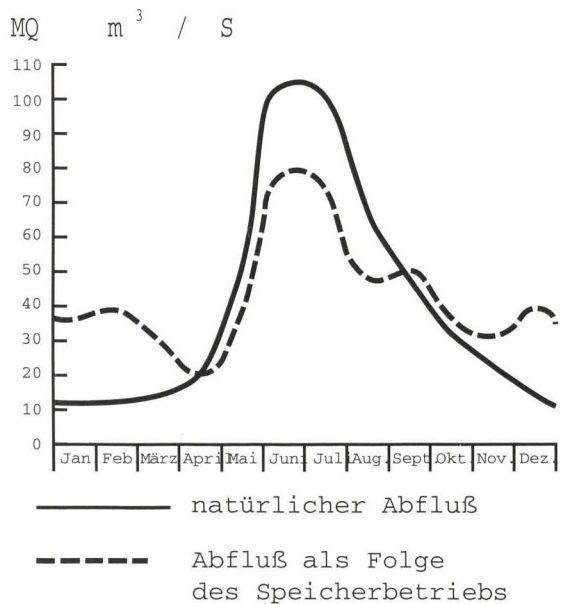


Abbildung 3: Die Abbildung zeigt die ausgleichende Wirkung der großen Jahresspeicher im Einzugsgebiet des Ziller (Tirol) am Pegel Hart auf die sommerlichen und winterlichen Abflüsse (verändert nach WIDMANN 1983).

tralalpines Hochgebirge, ebenso umfaßt wie Randalpen des Kalkalpins und des Helvetikums, außeralpi-

Fluß (Pegel)	Jahresspeicher	Gletscher		
	Inhalte	Abfluß Ø mQ/a	Anteil a. Ø MQ/a Fluß	Anteil a. Ø MQ/a Fluß
	Mio m ³	m ³ /s	%	%
Rhône (Beaucaire)	3.852	122	7.6	4.5
Po (Pontelagoscuro)	2.137	68	4.9	4.2
Rhein (Basel)	1.846	59	5.4	2.3
Inn (Passau-Igling)	345	11	1.5	3.2
Etsch (Branzoll)	347	11	7.3	6.2
Isère (Grenoble)	399	13	6.8	6.7
Rhône (Port de Secx)	275	13	4.7	14.2

Tabelle 4: Für große Flußgebiete sind die Speicherinhalte und deren fiktiv gleichmäßigen Abflüsse über das ganze Jahr dargestellt. Ihr prozentualer Anteil wird dem ebenfalls fiktiven ganzjährigen prozentualen Anteil der Gletscherabflüsse gegenübergestellt. (Quelle: LINK 1970).

nen Jura und das Tertiär und Quartär des schweizer Unterlandes.

Das mit 14.3% stark vergletscherte Einzugsgebiet der Rhône in Port des Secx oberhalb des Lac Léman folgt zwar in der Periode 1930-1950 in etwa den Erwartungen, die Vorrückungsphase von 1970 bis 1980 zeigt allerdings ähnlich wie der Rhein ein von den Erwartungen abweichendes Verhalten. Sowohl bei der Rhône wie beim Rhein sind für diesen Zeitabschnitt bereits die Jahresspeicher voll wirksam (vergl. Abbil-

dung 3 und Tabelle 4). Der obere Inn mit einem Gletscheranteil von 4.3% weist übergreifend über Rückzugs- und Vorrückungsphasen hohe Abflüsse in der Ablationszeit auf.

Die Massa folgt zwar dem Trend von 1930 bis 1960, die Abflüsse nehmen jedoch bereits in der darauffolgenden Vorrückungsphase wieder zu. Hier ist allerdings zu beachten, daß der hohe Gletscheranteil von 66.3% weitgehend vom Aletschgletscher, dem größten Talgletscher der Alpen eingenommen wird, dessen

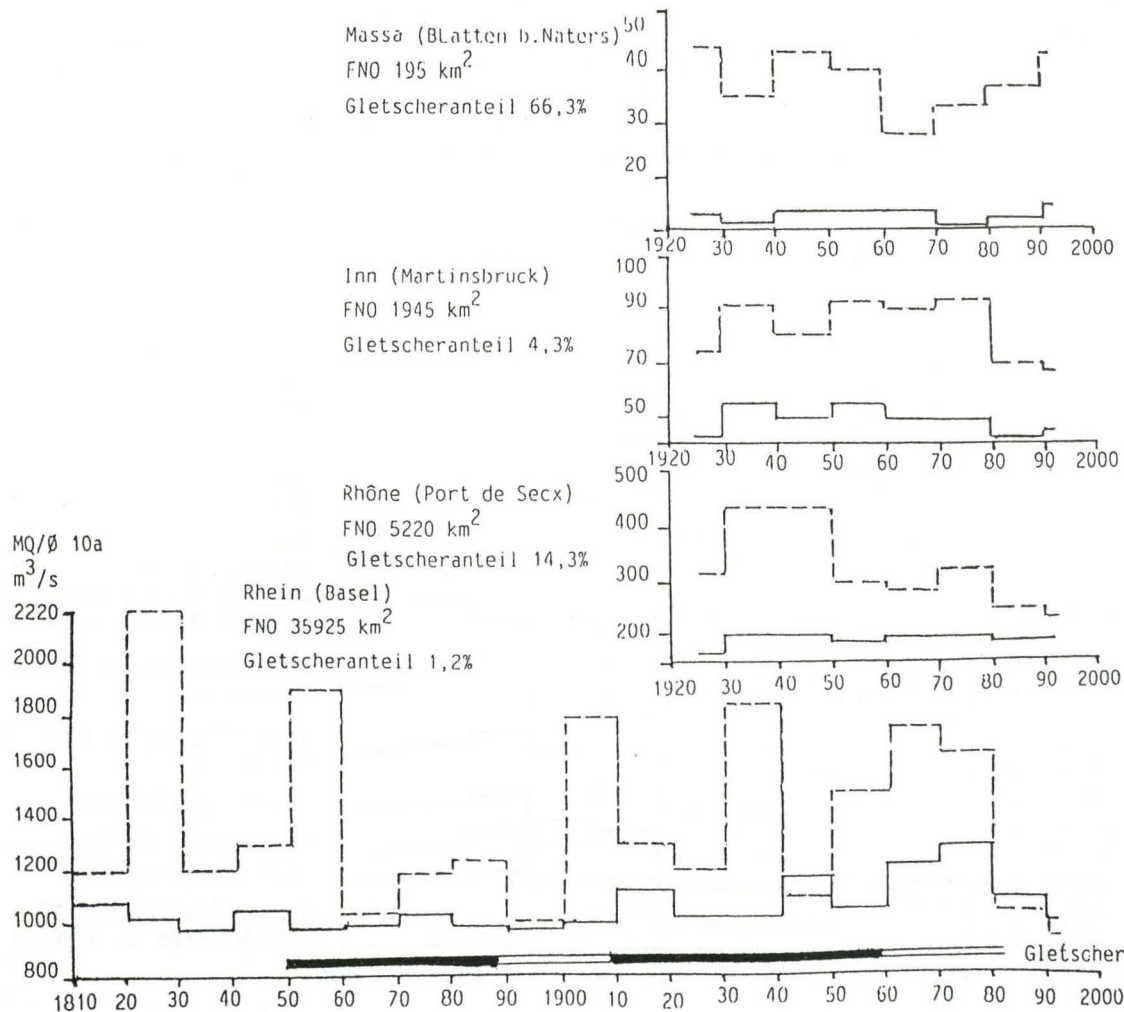


Abbildung 4: Vergleich der 10-jährig gemittelten Mittleren Jahresabflüsse (—) mit den im gleichen Zeitraum dargestellten Mittleren Abflüssen der Monate Juli-August-September, d.i. die Ablationszeit der Alpengletscher (-----). Der im Diagramm Rhein eingesetzte Balken zeigt die Bewegungen der Alpengletscher. ■ Rückzug, □ Vorstoß. (Quellen: EIDGEN. DEP. D. Innern 1925/92; GHEZZI 1925; GROSS 1987; KASSER u. ALLEN 1978; SMIRAGLIA (1994).

Verhalten nur bedingt auf andere Gletscher zu übertragen ist. Insgesamt ist zu Abbildung 4 festzustellen, daß sich die Gletscherschwankungen in Teilbereichen der Ablationszeiten abzeichnen, die Jahresabflüsse jedoch beim Rhein wegen des geringen Gletscheranteils nur sehr unsicher mit dem Gletscherrückzug kausal verknüpfen lassen. Die erhöhten Jahresabflüsse des Inn, der Rhône und der Massa verhalten sich wenig differenziert.

Die Abbildung 5 zeigt bei neun Pegeln mit vergletscherten und unvergletscherten Einzugsgebieten sehr unterschiedlicher Größe in der Periode 1940 - 1990 die Mittleren Jahresabflüsse. Diese Periode wurde gewählt, weil sie sowohl eine zurückweichende wie eine vorrückende Phase der Gletscher erfaßt.

Auffallend ist hier die hohe Übereinstimmung der Abflusstendenzen in den Perioden 1960 - 1990 bei so unterschiedlichen Flüssen wie Isar (0% Gletscheranteil), Iller (0% Gletscheranteil) und Inn am Pegel Reissach (Gletscheranteil 4.6%). Die Massa 66.3%

Gletscheranteil) folgt dem zwar in der Periode 1965 - 1975, weicht aber dann ab. Der Inn am Pegel Martinsbruck (4.3% Gletscheranteil) und die Etsch (2.1% bzw. 2.7% Gletscheranteil) stimmen in den Perioden 1955 - 1960 gut überein, die Etsch hier übrigens auch mit dem Lech (0% Gletscheranteil), die anderen Abflußjahre zeigen jedoch ein gegensätzliches Verhalten.

Der Rhein folgt lediglich dem verminderten Abfluß ab 1980 bei Isar, Iller, Lech und Inn. Etsch und Massa zeigen jedoch in diesem Zeitraum ansteigende Abflüsse.

Insgesamt ist festzustellen, daß in den einzelnen Perioden bei unvergletscherten und vergletscherten Niederschlagsgebieten gleichgerichtete und gegenläufige Abflusstendenzen in bunter Mischung vorhanden sind. Sie können mit dem Zurückweichen oder Vorrücken der Alpengletscher in keinem kausalen Zusammenhang stehen.

Angesichts der in Tabelle 1 dargestellten höchst komplizierten und vielfach quantitativ nicht bekannt-

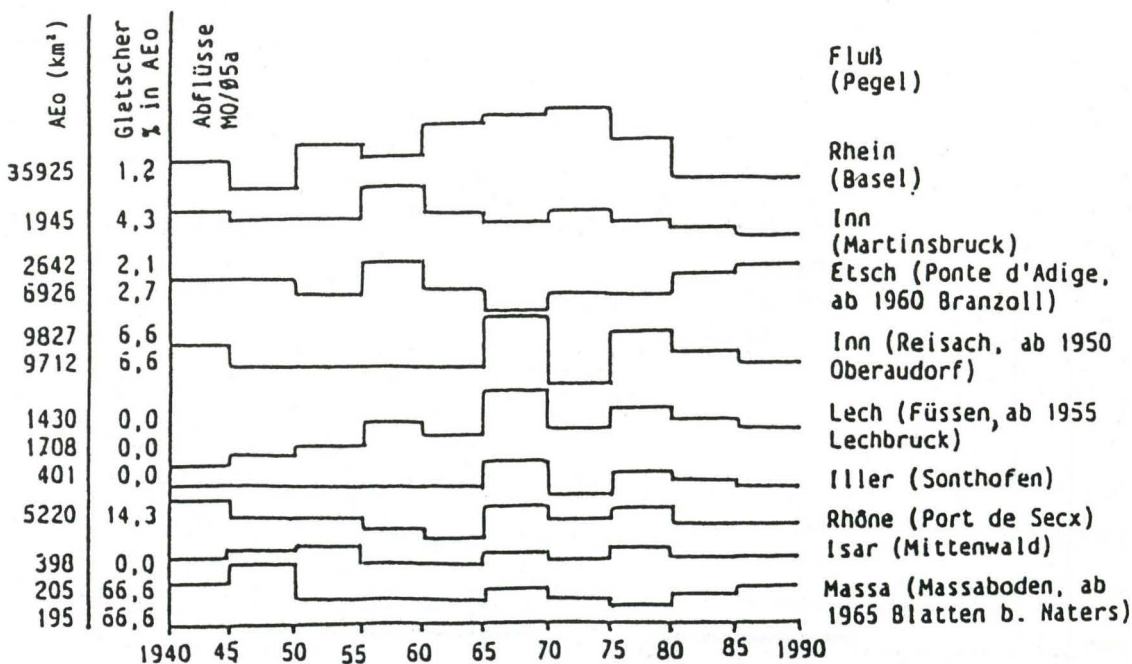


Abbildung 5: Vergleich der 5-jährlich gemittelten Jahresabflüsse von Flüssen mit Gletscheranteil (Rhein, Basel; Inn, Martinsbruck; Etsch, Ponte d'Adige, ab 1960 Branzoll; Inn, Reissach, ab 1950 Oberaudorf; Rhône, Port de Secx; Massa, Massaboden, ab 1965 Blatten b. Naters) und Flüssen ohne Gletscheranteil (Lech, Füssen, ab 1955 Lechbruck; Iller, Sonthofen; Isar, Mittenwald) in den jeweiligen Einzugsgebieten. (Quellen: BAYER. LANDESSST. F. GEW. KDE. 1940/89; EIDGEN. DEP. D. INNERN 1925/1992; PROV. AUT. DI BOLZANO 1957/1989).

ten Faktoren des Abflusses könnten über den Einfluß der Gletscher auf die Abflüsse höchstens spekulative Äußerungen gewagt werden. (Vergl. KLEEBERG 1996).

In der Tabelle 5 werden die vom Vernagtferner auf andere Alpengletscher übertragenen Abflußwerte mit den Mittleren Jahresabflüssen der Periode 1970 - 1989 verglichen. Die Einzugsgebiete von Rhône (Mündung in die Donau), Etsch (oberhalb von Bozen), Isère (oberhalb von Grenoble), Rhône (oberhalb des Lac Léman), Massa (zur Rhône oberhalb von Brig), Vernagtbach (zum Inn oberhalb von Innsbruck) sind in der Tabelle 5 nach der Größe geordnet. Die 20-jährigen Durchschnitte der Mittleren Jahresabflüsse ($\bar{Q}_{MA/a}$) je km^2 Einzugsgebiet (AEo) zeigen, daß diese Werte z.T. weit auseinanderliegen. Dies deutet auf unterschiedliche Niederschlagsverhältnisse ebenso hin wie auf geologische und insbesondere vegetationsmäßige Unterschiede in den Einzugsgebieten, die die Abflüsse entscheidend beeinflussen. Die Anteile dieser vielfach vernetzten Faktoren an den Abflüssen lassen sich nur grob schätzen, eine näherungsweise Quantifizierung ist allenfalls für kleine eingehend untersuchte Räume möglich, die sich jedoch nicht auf andere Gebiete übertragen läßt. Die Flächenanteile der Gletscher sind in den einzelnen Einzugsgebieten sehr unterschiedlich groß, sie sind jedoch die einzige Maßeinheit, aus der sich mit Hilfe der Abflüsse des Vernagtferners Schlüsse auf den Anteil der Gletscherabflüsse auf die Gesamtabflüsse ziehen lassen. Dabei ist zu beachten, daß sich die Gletscherabflüsse aus der Ablation plus der unmittelbar abfließenden Niederschläge zusammensetzen.

Mangels anderer 20-jähriger Reihen der Abflußdaten von Einzugsgebieten mit sehr hohem Gletscheranteil wurden die Abflüsse aller Gletscher der in der Tabelle 5 betrachteten Niederschlagsgebiete auf die Abflüsse des Vernagtbaches bezogen. Dieses Vorgehen ist zwar mit großen Unsicherheiten behaftet, es ist jedoch immer noch verlässlicher als die nicht im Einzelnen quantifizierten Abflußanteile der anderen Abflußfaktoren. Ein vergleichbarer Maßstab wären die Niederschläge, deren Quantifizierung jedoch im Hochgebirge ebenfalls mit großen Unsicherheiten belastet ist. Insgesamt ist festzustellen, daß hohe Anteile am Ab-

fluß nur bei großen Gletscheranteilen der Niederschlagsgebiete signifikant sind, während deren Anteil in großen Einzugsgebieten nahe an oder unter der Meßgenauigkeit der Pegelanlagen liegt.

Die Tabelle 6 zeigt, daß zwischen dem prozentualen Anteil der Gletscher im Einzugsgebiet der Flüsse und den Mittleren Abflüssen der Gletscher keine Übereinstimmungen vorhanden sind. Das heißt, daß bei der Übertragung der Abflußwerte des Vernagtferners auf andere Gebiete einige Vorsicht geboten ist. Eine gewisse Übereinstimmung wird allerdings bei der Gegenüberstellung mit den Jahresspeichern erkennbar (Tabelle 4). Insgesamt bestätigt sich auch hier, daß die Abflüsse aus größeren Einzugsgebieten von anderen Faktoren stärker beherrscht werden als von den Gletschern.

3. Ergebnis

Das Verschwinden der Alpengletscher in den nächsten Jahrzehnten als Folge der globalen Temperaturerhöhung der bodennahen Luftschicht ist eine von vielen Hypothesen über mögliche Witterungs- und Klimaänderungen, von denen die anthropogenen Ursachen zum Teil, die natürlichen Ursachen überhaupt nicht bekannt sind. Aus einem vermuteten Gletscherverlust abgeleitete erhebliche bis fatale Veränderungen sommerlicher Abflüsse im Rhein und auch in anderen Flüssen lassen sich aus vielerlei Gründen nicht vorher sagen und sind aufgrund der vorstehenden Untersuchungen auch nicht zu erwarten.

4. Zusammenfassung – Ausblick

Die Alpen verleiten wegen ihrer zentralen Lage in Mitteleuropa, ihrer dichten Besiedelung, ihres Kulturerbes und ihrer Bedeutung als Wirtschafts-, Verkehrs- und Erholungsraum dazu, Szenarien über ihre Zukunft im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung der Erdatmosphäre und anderen umweltbeeinflussenden menschlich-zivilisatorischen Aktivitäten zu entwickeln. Horrorbilder fehlen dabei ebensowenig wie seriöse wissenschaftliche Untersuchungen, die allerdings immer häufiger auf die prognostischen Schwierigkeiten und Probleme hinweisen, die aus der außerordentlichen Vernetzung und Komplexität des

Fluß (Pegel)	AEo Fluß km ²	ØMQ Fluß 1970/89 m ³ /s	ØMQ/km ² AEo Fluß m ³ /s	Anteil Aeo Glet./ Aeo Fluß %	ØMQ Gletsch. 19974/93 m ³ /s	Anteil ØMQ Gletsch. an ØMQ Fluß %	Erläut. z. Fluß (siehe unten)
Rhône (Beaucaire)	96500	1558	0.016	1.2	69.5	4.5	1)
Po (Pontelagoscuro)	70091	1409	0.020	0.7	25.5	4.2	2)
Rhein (Basel)	35925	1117	0.031	1.3	24.9	2.3	3)
Inn (Passau-Igling)	26084	773	0.029	1.8	24.4	3.2	4)
Etsch (Branzoll)	6926	150	0.021	2.7	9.3	6.2	5)
Isère (Grenoble)	5720	189	0.033	4.5	12.8	6.7	6)
Rhône (Port de Secx)	5220	275	0.052	15.3	39.8	14.2	7)
Inn (Martinsbruck)	1945	93	0.048	4.9	4.7	5.2	8)
Massa (Blatten b. Natters)	195	35	0.179	66.7	6.7	20.8	9)
Vernagtbach (Vernagtbach)	11	0,58	0.051	81.0	0.41	81.0	10)

Tabelle 5: Vergleichende Darstellung von Niederschlagsgebieten, Abflüssen von alpinen und alpin geprägten Flüssen und ihren Gletscheranteilen sowie deren Anteilen an den Abflüssen.

Erläuterungen zu den Flußgebieten. n) a Gesteine; n) b Niederschlagscharakter.

- 1) a (außeralpiner Anteil Saone, Doubs AEo 29.900 km²; Jurakalke, z.T. Karst, Mergel, Sandsteine, Quartär). In den Alpen zentrales Kristallin, Jurakalke, Mergel, Sandsteine, Quartär.
- 1) b (außeralpin subatlantisch). In den Alpen hochalpin, submediterran, mediterran, subatlantisch. Trockental Wallis.
- 2) a (außeralpiner Anteil Quartär). In den Alpen insubrisches und zentrales Kristallin, südliches Kalkalpin.
- 2) b Oberlauf submediterran, Alpensüdrand-Poebene hohe Niederschläge Sommer-Winter.
- 3) a (außeralpiner Anteil Jurakalke, z.T. Karst, Molasse, Quartär). In den Alpen zentrales Kristallin, Kalke, z.T. Karst, Mergel.
- 3) b Hochalpin bis subatlantisch.
- 4) a (außeralpiner Anteil Sande, Quartär, Kristallin). In den Alpen zentrales Kristallin, Phyllite, Kalke.
- 4) b (außeralpin subatlantisch). In den Alpen hochalpin, subatlantisch. Trockentäler Engadin, zentralalpine Tiroler Täler.
- 5) a Zentrales Kristallin, Phyllite, Plutonite, Kalke, Dolomit.
- 5) b Hochalpin. Hohe Niederschläge Sommer-Winter. Trockental Vinschgau.
- 6) a Zentrales Kristallin, Kalke.
- 6) b Hochalpin, submediterran.
- 7) a Zentrales Kristallin, Kalke, Sandsteine.
- 7) b Hochalpin. Trockental unteres Wallis.
- 8) a Zentrales Kristallin, Phyllite, Mergel.
- 8) b Hochalpin. Trockental Engadin.
- 9) a Zentrales Kristallin.
- 9) b Hochalpin.
- 10) a Zentrales Kristallin.
- 10) b Trockental Ötztal.

Alpenraumes und der Unkenntnis der natürlichen Faktoren von Klimaänderungen erwachsen. Man könnte nach der Darstellung dieser Situation zu der resignierenden Einsicht gelangen, daß man zwar immer noch nicht wisse, was falsch und richtig ist, daß

man aber zumindest auf einem höheren Niveau verwirrt sei.

Das ist nicht die Absicht dieser Untersuchung. Sie will vielmehr darlegen, daß gerade wegen der großen Lücken in der Kenntnis der Zusammenhänge jeder

Fluß (Pegel)	Verhältnis von Anteil Gletscher am AEo d. Flüsse	zu Abfluß Gletscher Ø MQ/a
Rhône (Beaucaire)	1	: 3.75
Po (Pontelagoscuro)	1	: 6.00
Rhein (Basel)	1	: 1.01
Inn (Passau-Igling)	1	: 1.78
Etsch (Branzoll)	1	: 2.29
Isère (Grenoble)	1	: 1.49
Rhône (Port de Secx)	1	: 0.93
Inn (Martinsbruck)	1	: 1.06
Massa (Blatten b. Natters)	1	: 0.31
Vernagtbach (Vernagtbach)	1	: 1.00

Tabelle 6: Das Verhältnis der Flächenanteile des oberflächlichen Abflußgebiets (AEo) zum Jahresdurchschnitt der jeweiligen Gletscherabflüsse (ØMQ/a).

Eingriff, aber auch jede Unterlassung eines solchen im Alpenraum sorgfältig in seiner Komplexität bedacht und Langzeitwirkungen so weit als möglich in Betracht gezogen werden sollen. Leider stehen diesen Forderungen nicht selten politische und wirtschaftliche Zwänge gegenüber, wie dies u.a. länderübergreifende Bemühungen zeigen.

Es sei dahingestellt, aus welchen Motiven klimabedingte Schreckensbilder für die Alpen entstehen; die Spannweite dürfte von Idealismus bis Opportunismus reichen, wenn man fachliches Wissen außer Betracht läßt. Sie mögen kurzfristig beim großen Publikum Eindruck erwecken, das Ausbleiben prophezeiter Katastrophen läßt jedoch das Interesse rasch schwinden. Dieses Schicksal erleiden allerdings auch schleichende Veränderungen, die der Allgemeinheit erst zur Kenntnis kommen, wenn es zu spät ist.

Ein in den Alpen sehr beliebtes, weil offensichtlich klimatisch stark beeinflusstes Landschaftsphänomen

sind die Gletscher, deren Rückgang auch dem Laien im Hochgebirge nicht verborgen bleibt. Solche Gletscherrückzüge und Vorstöße hat es in den letzten 10.000 Jahren einigemal gegeben, ohne daß dies zum Untergang der alpinen Landschaften und Kulturen geführt hätte. In unseren empfindlich gewordenen Kultur- und Zivilisationslandschaften zeichnet sich dieser Vorgang jedoch sehr deutlich ab. Die Gletscher werden nicht selten als wichtiger europäischer Trinkwasservorrat betrachtet, ihr Anteil am Abfluß der alpinen und alpin geprägten Fließgewässer wird so hoch eingeschätzt, daß bei einem gänzlichen Abschmelzen der Gletscher bei sommerlicher Wasserknappheit in den aus den Alpen kommenden großen Flüssen mit erheblichen Engpässen in Schifffahrt und Wasserversorgung zu rechnen wäre.

Eine nähere Betrachtung zeigt allerdings, daß der Anteil der Gletscherwasser an den Abflüssen zumindest in den großen Flüssen so gering ist, daß er vielfach unter der Meßgenauigkeit von Pegelstationen liegt. Er wird zudem überlagert von zahlreichen natürlichen Seen, die ausgleichend auf die Abflüsse wirken, sowie von zahlreichen Jahresspeichern für die Erzeugung hydroelektrischer Energie, die im Sommer erhebliche Anteile der Gletscherwasser speichern, um sie im Winter abzugeben. Die Befürchtungen über katastrophale Auswirkungen des Gletscherrückganges auf die Fließgewässer sind demnach nicht nachvollziehbar.

Die wirklichen Gefahren eines weiteren Gletscherschwundes liegen auf ganz anderen Gebieten:

Der sommerliche Massentourismus des Gletscher-skilaufs und snowboardings sowie die Touristenattraktion „Gletscher“ werden der Fremdenindustrie und ihren Zulieferern verlorengehen; die nach dem Zurückschmelzen der Gletscher vegetationsfreien Moränen können fallweise den Feststoffanteil der Wildbäche bei Hochwassern erhöhen und bei mürfähigen Bächen eine zusätzliche Gefahr für Siedlungs- und Verkehrsräume werden; nicht zuletzt werden die Alpen um eine wichtige charakteristische Landschaftsform und ein hochalpines Ökosystem ärmer sein. Vordergründig tröstlich mag die Meinung mancher Klimaforscher sein, daß eine rasche Abkühlung unseres Globus in naher Zukunft nicht auszuschließen sei.

Eine solche weltweite oder zirkum-arktische Entwicklung würde allerdings ganz andere Probleme als die hier angeschnittenen aufwerfen. Zumindest wäre jedoch dann die Zukunft der Alpengletscher gesichert.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Johann Karl
Jugendstraße 7
D-81667 München

Schrifttum und Quellen:

- Bader, St. (1996): Globale Klimaänderung. Neue Erkenntnisse, neue ungelöste Fragen. NFP 31-Nat. Forschungsprogr. Klimaänd. u. Naturkatstr. Schweiz. Nationalfonds. Info 7. S. 4-7. Bern
- Barfield, L.; Koller, E. u. Lippert, A. (1992): Der Zeuge aus dem Gletscher – das Rätsel der frühen Alpen-Europäer. 208 Seiten. Wien
- Bätzing, W. (1991): Die Alpen. Entstehung und Gefahren einer europäischen Kulturlandschaft. 286 Seiten. Verlag C. H. Beck München
- Bätzing, W. (1997): Kleines Alpenlexikon: Umwelt-Wirtschaft-Kultur. 320 Seiten. Verlag C. H. Beck München
- Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde - Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.) (1940-1989): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Donaugebiet. München
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.) (1990): Schneebewegungen und Lawinentätigkeit in zerfallenden Bergwäldern. Konetschny, H. in: Informationsberichte Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft. 3/90. 218 Seiten. 4 Anlagen. München
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1996): Abfluß und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten. Grundlagen zum Integralen Wildbachschutz. Schriftenr. LfW. H. 27. 90 Seiten. München
- Bayerisches Staatsministerium des Innern und Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1969): Schutz dem Bergland – eine landeskulturelle Pflicht. Alpenplan. 76 Seiten. München
- Bunza, G. und Karl, J. (1975): Erläuterungen zur hydrographisch-morphologischen Karte der Bayerischen Alpen 1:25000. Bayer. Landesamt f. Wasserwirtsch. Sonderheft. 68 Seiten. ebenda (Hrsg.) 1975-1994 54 Blätter Karten 1:25000. München
- Cati, L. (1981): Idrografica del Po. Ministero dei Lavori Pubblici; Servicia Idrografico. 309 Seiten, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato. Roma
- Der Spiegel (1994): Das System kann kippen. Spiegelgespräch mit H. Graßl. 48. H. 4. S. 192-196. Hamburg
- Eidgenössisches Departement des Innern (Hrsg.) (1925-1992): Hydrographisches Jahrbuch der Schweiz. Amt für Wasserwirtschaft. Bern
- Escher-Vetter, H. u. Reinwarth, O. (1994): Zwanzig Jahre Abflußmessungen an der Pegelstation Vernagtbach (Öztaler Alpen). Komm. f. Glaziologie a. d. Bayer. Akademie d. Wissenschaften. 48 Seiten. München
- Forel, F. A. (1881/94): Jahresberichte über die Veränderungen der Schweizer Gletscher. Naturf. Ges. o.O.
- Ghezzi, C. (1926): Die Abflußverhältnisse des Rheins in Basel. Eidgen. Depart. d. Innern. Mitt. d. A. F. Wasserwirtschaft. S. 46-70. Bern
- Graßl, H. u. Klingholz, R. (1990): Wir Klimamacher. 296 Seiten. S. Fischer Verlag. Frankfurt am Main
- Gross, G. (1987): Der Flächenverlust der Gletscher in Österreich. 1850-1920-1969. Zeitschr. f. Gletscherkunde und Glaziologie. 23. H. S. 131-1141. Universitätsverlag Innsbruck
- Gutermann, Th. (1996): Extreme Wetterereignisse als Folgen für die Schweiz? NFP 31 National Forschungsprogr. Klimaänderung u. Naturkatastr. Schweiz. Nationalfond. Arbeitsberichte, S. 39-49. Hochschulverlag AG a. d. ETH Zürich. Zürich
- Jobst, E. (1978): Der dornige Weg der Sachlichkeit. Jahrb. d. Ver. z. Schutz d. Bergwelt e.V. 43 S., S. 9-28. München
- Jones, P. D.; Wigley, T. M. L. u. Wright, P-B. (1984): Global Temperatur variations between 1861 and 1984. *Mature* 322 (6077).
- Karl, J. (1985): Steilhangwälder in den Alpen – Wälder ohne Zukunft. Jahrb. d. Ver. z. Schutz d. Bergwelt e.V. 56. S. 65-78. München
- Karl, J. (1991): Naturkatastrophen in den Alpen – naturgegeben oder provoziert? Alpenvereinsjahrbuch Berg '91. S. 216-226. München Innsbruck Bozen
- Karl, J. (1993): Unsere Umwelt Alpen. Jahrb. d. Ver. z. Schutz d. Bergwelt e.V. 58 S. 13-37. München
- Karl, J. (1994): Klimaveränderungen in den Alpen – einst und jetzt. Alpenvereinsjahrbuch Berg '94. S. 272-286. München Innsbruck Bozen
- Karl, J.; Porzelt, M. u. Bunza, G. (1985): Oberflächenabfluß und Bodenerosion bei künstlichen Starkniederschlägen. Deutsch. Verb. f. Wasser u. Kulturbauwesen. - DVWK-Schriften 71. S. 39-102. Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin

- Kasser, P. (1978): Rezente Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen. *Jahrb. d. Schweiz. Naturforsch. Ges. Wissenschaftl. Teil.* S. 106-138. Birkhäuser Verlag Basel
- Kasser, P. u. Aellen, M. (1978): Gletscherentwicklung in den Schweizer Alpen. Eidgen. Technische Hochschule Zürich. zit. in: BACHMANN 1978: Gletscher der Alpen. Hallwag-Verlag Bern und Stuttgart
- Kling, L. (1978): Gletscherschwankungen. in: BACHMANN 1978: Gletscher der Alpen. S. 22-29. Hallwag-Verlag Bern und Stuttgart
- Kleeberg, H.-B. (1996): Einleitung zum Symposium „Klimaänderung und Wasserwirtschaft“. Universität d. Bundeswehr. H. 56a/1996. S. 13-14. München
- Link, H. (1970): Speicherseen der Alpen. Wasser- und Energiewirtschaft. 62. Sonderh. S. 242-358. Baden CH
- Mayer, H. (1982): 10 ökologische Wald-Wild-Gebote. *Jahrb. d. Ver. z. Schutz d. Bergwelt e.V.* 47 S. 59-82. München
- Meister, G. (1984): Waldsterben im Hochgebirge – Wettlauf mit der Zeit – *Jahrb. d. Ver. z. Schutz d. Bergwelt e.V.* 49. S. 9-34. München
- Ministre D'Agriculture (1995): Abflußdaten der Rhône unterhalb des Lac Léman (briefl. Mitt.). Lyon
- Mrasek, V. (1995): Zeitreise durch 190 Jahre Klima. *Süddeutsche Zeitung.* 29.10.1995. S. 36. Süddeutscher Verlag München
- Müller, F.; Cafilisch T. u. Müller, G. (1978): Firn und Eis in den Schweizer Alpen. Gletscherinventar. Eidgen. Technische Hochschule Zürich. Geogr. Inst. Publikation Nr. 57. Zürich
- NFP 31 (1996): Klimaentwicklung und Naturkatastrophen im Alpengebiet. Signale des Treibhauseffekts? *Nat. Forschungsprogr. „Klimaänderung u. Naturkatastrophen. Schweiz. Nat. Fonds. Info 8, S. 9-11.* Bern
- Oeschger, H. (1988): Klimaschwankungen und -änderungen, vermutbare Ursachen und Folgen. *Österr. Wasserwirtsch.* 40. H. 5-6. S. 106-114. Springer Verlag Wien New York
- Ozenda, P. u. Borel, J.-L. (1991): Mögliche ökologische Auswirkungen von Klimaveränderungen in den Alpen. *Commission internationale pour la protection des Alpes - CIPRA. Kleine Schriften. 8/91.* Vaduz
- Patzelt, G. (Hrsg.) (1974/94): Gletscherberichte 1974-1994. *Mitt. d. Österr. Alpenvereins. Jahrg. 33-49.* Innsbruck
- Pauli, L. (1981): Die Alpen in Frühzeit und Mittelalter. 346 Seiten. Verlag C. H. Beck München
- Provincia Autonoma di Bolzano Alto-Adige, Autonome Provinz Bozen-Südtirol (1957-1989): *Annale Idrologico-Hydrologisches Jahrbuch.* Bolzano-Bozen
- Röthlisberger, G. (1991): *Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Ber. d. Eidgen. Forschungsanstalt Wald, Schnee u. Landschaft.* 330., 122 Seiten. Birmensdorf
- Schaller, E.; Keuler, K.; Knoche, R. u. Münzenberg-Denis, A. (1996): Does the alpine climate change during the next decades? INTERPRAEVENT 1996 - Garmisch-Partenkirchen. *Internat. Forschungsges. Bd. 1.* S. 43-53. Klagenfurt
- Schönwiese, C. D. (1979): *Klimaschwankungen. Verst. Wiss. Bd. 115.* 181 Seiten. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York
- Schönwiese, C. D. (1996): Problematik der Klimaänderungen; Ursachen und Beobachtungen *Sympos. „Klimaänderung u. Wasserwirtschaft“.* Universität d. Bundeswehr. H. 56 a. S. 17-32. München
- Schuhmann, A. H. (1996): Veränderungen des Wasserhaushaltes durch Klimaänderungen. *Sympos. „Klimaänderung und Wasserwirtschaft“.* Universität d. Bundeswehr. H. 56a/1996. S. 89-99. München
- Schwanden, H. u. Weingartner, R. (1985): *Die Abflußregime der Schweiz. Geogr. Inst. d. Universität Bern.* 273 Seiten. Bern
- Schwarzenbach, F. H. (1984): Gedanken zur schleichenden Zerstörung des Bergwaldes. *Jahrb. d. Ver. z. Schutz d. Bergwelt e.V.; 49. S. 31-34.* München
- Seibold, E. (1991): *Das Gedächtnis des Meeres.* 447 Seiten. Piper München Zürich
- Seiler, W. (1996): mdl. Mitt. b. Fachkolloquium „Das Wildbachsystem-Prozesse, Bewertung, Maßnahmen.“ Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft. München
- Smiraglia, C. (1994): L'Evolutione dei Ghiaccia Italiani. *Rivista del Club Alpino Italiano.* 119. Vol. CXIII. Maggio-Julio. S. 62-67 Milano
- Stephan, K. (1996): Von Rio bis Berlin – Eckpunkte der weltweiten Bemühungen um die Eingrenzung des zusätzlichen Treibhauseffektes. *Sympos. „Klimaänderung und Wasserwirtschaft“.* Universität d. Bundeswehr. 56b/1996. S. 355-374. München
- Tiedemann, H. (1988): *Berge – Wasser – Katastrophen. Schweizerische Rückversicherungsgesellschaft (Hrsg.)* 85 Seiten. Zürich
- Vivian, R. (1975): *Les Glaciers des Alpes Occidentales.* 513 Seiten. Imprimerie Allier Grenoble
- Widmann, P. (1983): Die Kraftwerksgruppe Zemm-Ziller. *Österr. Wasserwirtsch.* 35. H. 5-6. S. 125-137. Springer Verlag Wien New York
- World Glacier Monitoring Service (Hrsg.) (1989): *World Glacier Inventory-Status 1988. IAHS (Icsi)-UNEP-UNESCO.* New York

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt](#)

Jahr/Year: 1997

Band/Volume: [62_1997](#)

Autor(en)/Author(s): Karl Johann

Artikel/Article: [Szenarien für die Alpen über Folgen des globalen Klimawandels 241-259](#)