Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 82 (1990)
Heft: 10

Artikel: Abfluss im Alpengebiet in einer wärmeren Atmosphäre
Autor: Schädler, Bruno
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939842

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Abfluss im Alpengebiet in einer wärmeren Atmosphäre

Bruno Schädler

1. Abflussbildung: Charakteristik und Sensitivität

Der mittlere Abfluss lässt sich für ein geschlossenes Einzugsgebiet mit Hilfe der Wasserbilanzgleichung wie folgt berechnen:

$$A = N - V - \delta S$$

A Abfluss
N Niederschlag
V Verdunstung
δS Vorratsänderungen

Damit wird klar, dass der Abfluss über die anderen Glieder der Wasserhaushaltsgleichung gesteuert wird:
Die massgebliche Grösse ist der *Niederschlag N.* Sowohl im langjährigen Bereich (Jahre) als auch im kurzfristigen Bereich bei Hochwasserereignissen ist der Niederschlag die dominante Grösse.
Die *Verdunstung V* ist das einzige echte Verlustglied. Sie ist abhängig von der Niederschlagsmenge, der Luftfeuchtigkeit, dem Strahlungshaushalt, und damit von der Temperatur, und von der Windgeschwindigkeit. Für kurzzeitige Ereignisse ist der Einfluss der Verdunstung gering, aber bereits im Bereich von einigen Tagen nimmt ihre Bedeutung zu. Im alpinen Bereich kann die Verdunstung wegen ihres grossen Energiebedarfs die Bedingungen für das Abschmelzen von Schnee und Eis entscheidend verändern (*Lang* 1981), so dass sie dort bereits im Kurzfristbereich wichtig wird. Zusätzlich zu den meteorologischen Bedingungen sind die Bodenverhältnisse (Speicherfähigkeit, Durchlässigkeit, Flurabstand des Grundwasserspiegels usw.) und Art und Zustand der Vegetation für die Verdunstung von grosser Bedeutung.
Die *Wasservorratsänderung* δS wirkt in ihren verschiedenen Erscheinungsformen je nach Zeitmassstab in sehr unterschiedlicher Weise auf den Abfluss (Bild 1). Die quantitative Bedeutung der verschiedenen Speicher ist von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet unterschiedlich. Die direkt mit dem Inputglied Niederschlag und dem Verlustglied Verdunstung verbundenen Speicher (Boden) haben kurze Reaktionszeiten. Sie sind daher entscheidend für kurzfristige Ereignisse wie die Hochwasserbildung. Entsprechend beeinflussen die tiefer liegenden Grundwasserspeicher (Grundwasser im weitesten Sinne) sowie die physikalisch langsam reagierenden Speicher (Schnee, Gletscher, Seen) hauptsächlich den Basisabfluss und somit auch die Niederwasserabflüsse. Die künstlichen, vom Menschen bewirtschafteten Speicher können je nach Lage für beide Zeitbereiche eingesetzt werden (Hochwasserrückhalt bei genügender Speicherkapazität; Abflussaufhöhung in Niederwasserzeiten bei genügend gespeichertem Vorrat, abhängig von der energiepolitischen und wirtschaftlichen Interessenlage).
Der Abfluss spielt also im allgemeinen innerhalb des hydrologischen Kreislaufes eine eher passive Rolle. Nur in speziellen Fällen, beispielsweise als Zufluss zu natürlichen Seen oder künstlichen Speicherseen und auch bei der Infiltration in das Grundwasser, hat der Abfluss eine aktive Bedeutung für den hydrologischen Kreislauf.
Alles andere als passiv ist die Stellung des Abflusses jedoch im Rahmen unserer Umwelt und der Wasserwirtschaft. Tabelle 1 fasst die verschiedenen Bereiche zusammen.

Die Bedeutung der einzelnen Bereiche ist nicht überall und jederzeit dieselbe. Die Gewichte können sich je nach wirtschaftlicher Entwicklung, in stärkerem Masse aber in Abhängigkeit vom Wasserdargebot verändern. So ist etwa der Bereich «Bewässerung» heute im Alpenbereich gesamtwirtschaftlich nicht von grosser Bedeutung. In anderen Gebieten der Erde jedoch ist die Versorgung mit Grundnahrungsmitteln direkt davon abhängig und durch eine nur geringe Wasserverknappung sehr stark gefährdet (*Nemec* 1989).
Die Sensitivität des Abflusses auf eine Klimaveränderung ist also sehr stark gekoppelt mit der Sensitivität einzelner Bereiche in Tabelle 1, wodurch sich gewisse Einflüsse und Abhängigkeiten überproportional verstärken können.

2. Datengrundlage

Die Beobachtung von Wasserständen und Abflüssen hat in den Alpenländern eine lange Tradition. Die staatlichen hydrometrischen Dienste haben seit Ende des letzten Jahrhunderts für zuverlässige, langjährige Messreihen gesorgt. Abflussmengen konnten allerdings erst seit Beginn des 20. Jahrhunderts regelmässig und verbreitet gemessen werden.
Für den Rhein bei Basel liegt heute eine über 100jährige Messreihe vor. An 25 Stationen im schweizerischen Alpengebiet wurden seit mehr als 80 Jahren, an 60 Stationen mehr als 60 Jahre und an über 110 Stationen mehr als 30 Jahre die Abflüsse beobachtet. Es handelt sich dabei um Stationen mit Einzugsgebietsflächen bis hinunter auf 10 km².
Im Zusammenhang mit der postulierten Klimaänderung müssen mit Hilfe von Trendanalysen schon geringfügige Änderungen wahrgenommen werden. Hier ist es wichtig, die Homogenität der Messreihen abzuklären. Hilfsmittel dazu sind, neben statistischen Tests innerhalb der Messreihen und mit Hilfe von anderen Messreihen, sorgfältige Abklärungen über anthropogene Eingriffe im Einzugsgebiet,

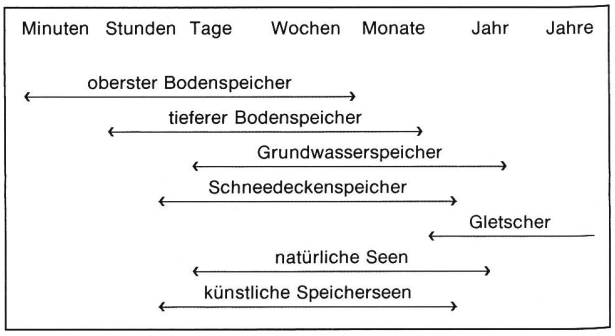

Bild 1. Zeitliche Wirkung der verschiedenen Speicherarten.

Tabelle 1. Bedeutung des Abflusses in verschiedenen Bereichen.

Naturgefahren	Überschwemmungen, Murgänge
Transport	Feste und gelöste Stoffe, Schiffahrt
Entsorgung	Abwasser (Verdünnung und Abbau)
Wasserversorgung	Trink- und Nutzwasser (Speisung der Seen und Grundwasservorkommen), Zubringen von Bewässerungswasser
Energiewirtschaft	Betrieb der Laufkraftwerke Speisung der Speicherseen Kühlung von Kernkraftwerken Prozesswasser für Kühlung und Heizung (Wärmepumpen)
Ökologie	Medium für mannigfache Lebewesen und Pflanzen
Landschaft	Wichtiges Element der Landschaft Freizeit und Erholung

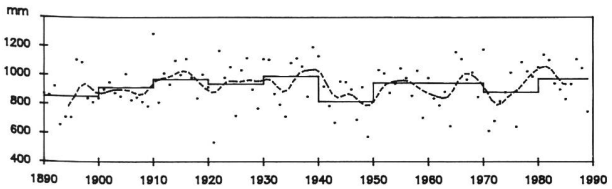

Bild 2. 100jährige Messreihe der Abflusshöhe im Rheineinzugsgebiet bis Basel. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (Punkte), Dekadenmittel (ausgezogene Linie) und die über jeweils 9 Jahre geglättete Zeitreihe (gestrichelt).

oder auch Analysen mit Hilfe von Wasserbilanzbetrachtungen.

Es existieren einige Untersuchungen von langjährigen Messreihen:

Mittelwasserbereich (Jahresmittelwerte):

- In der Analyse des Wasserhaushaltes grosser Einzugsgebiete der Schweiz (*Schädler* 1986) wurden die Abflussmessreihen der Periode 1901–1980 diskutiert.
- Die über 65jährigen Abflussmessreihen mehrerer kleiner und mittlerer natürlicher Einzugsgebiete wurden in (*Schädler* 1989) analysiert.
- Die 100jährige Abflussmessreihe des Rheins bei Basel (1890–1989) zeigt Bild 2.

Alle langjährigen Abflussmessreihen zeigen grosse Variationen im Verlaufe der Zeit (Bild 3), welche direkt von den entsprechenden Schwankungen im Niederschlagsgeschehen abhängen. Werden durch eine Tiefpassfilterung der Messreihen die kurzzeitigen Schwankungen eliminiert, so zeigt sich eine überraschend regelmässige Periodizität der Schwankungen mit einer Wellenlänge von 6 bis 11, im Durchschnitt 9 Jahren. Diese Schwankungen lassen sich in allen Gebieten der Schweiz, im Süden besonders ausgeprägt, beobachten. Neben diesen periodischen Schwankungen fällt die Trockenzeit der 40er Jahre auf. In der ganzen Schweiz waren die Abflüsse, bedingt durch wenig Niederschlag und hohe Temperaturen, sehr tief. In höher gelegenen, stark vergletscherten Gebieten wurde das Niederschlagsdefizit durch grosse Schmelzwasserbeiträge der Gletscher kompensiert, so dass dort (z.B. Massa) sogar überdurchschnittliche Abflüsse registriert wurden.

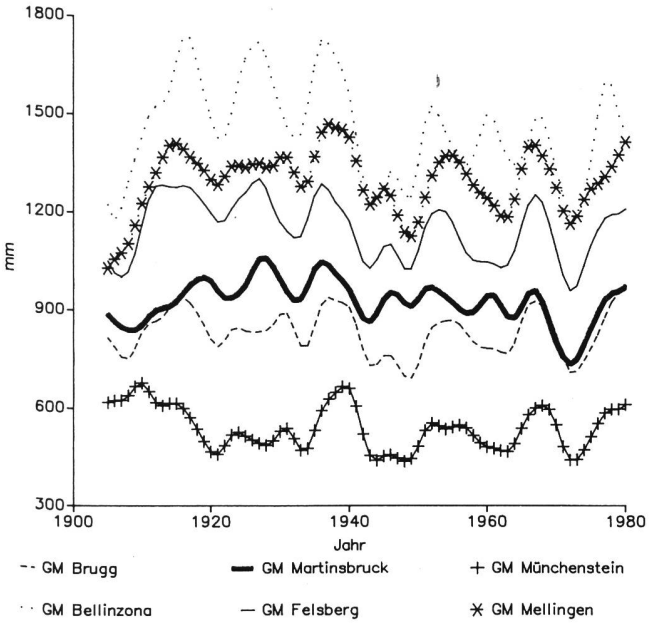

Bild 3. 84jährige Messreihen der Abflusshöhe verschiedener grosser Einzugsgebiete in der Schweiz. Dargestellt sind die mit einem Gaussschen Tiefpassfilter über jeweils 9 Jahre geglätteten Zeitreihen. Es handelt sich um die Einzugsgebiete Aare (Brugg), Ticino (Bellinzona), Inn (Martinsbruck), Rhein (Felsberg), Birs (Münchenstein), Reuss (Mellingen).

Obwohl die Abflüsse in vielen Einzugsgebieten in der zweiten Hälfte der Beobachtungsperiode um 5 bis 10% kleiner geworden sind, ist innerhalb der Variationen kein deutlicher langfristiger Trend erkennbar. Besonders markant ist die Abflussmessreihe im Einzugsgebiet des Ticino, wo sich seit der Trockenperiode der 40er Jahre die Abflüsse auf einem rund 10% tieferen Niveau eingependelt haben. Der Grund dazu ist ein ähnliches Verhalten der Niederschläge, welches möglicherweise mit einer generellen Änderung der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation auf der Alpensüdseite im Zusammenhang steht.

Die zeitliche Entwicklung der Auftretenswahrscheinlichkeit von *Hochwasserspitzen* wurde einerseits im Zusammenhang mit der Analyse der Hochwasser in der Schweiz analysiert (*Spreafico* und *Stadler* 1986, 1988); anderseits wurden entsprechende Untersuchungen in den durch die Hochwasserereignisse im Jahre 1987 betroffenen Gebieten durch *Aschwanden* und *Schädler* (1988) und *Zeller* und *Röthlisberger* (1988) durchgeführt. Keine dieser Untersuchungen konnte eine markante Veränderung der Hochwasserintensität aufzeigen.

Die Variabilität der *Niederwasser* wurde im schweizerischen Alpenraum kaum untersucht. Die anthropogenen Einflüsse z.B. durch Ableitungen, Wasserentnahmen für Bewässerung (Trockenzeit!) können die Niederwasserabflüsse stark beeinflussen. Untersuchungen auf der Basis des Q_{347}-Wertes (mittlerer Tagesabfluss, der an 347 Tagen im Jahr überschritten wird) von *Aschwanden* (1989) können keine abschliessenden Antworten geben.

3. Prozessverständnis

Da der Abfluss als Ausgangssignal des Wasserhaushaltes betrachtet werden muss, wird klar, dass für dessen Modellierung praktisch sämtliche Wasserhaushaltsprozesse im Einzugsgebiet exakt berechnet werden müssten. Viele dieser Prozesse werden zwar im einzelnen verstanden: Aufnahme des Wassers in der Wurzelzone, Transport durch den Stamm, Transpiration durch die Stomata eines einzelnen Blattes, Interzeption einzelner Blätter, Tiefensickerung durch eine Bodenmatrix usw.

Die Modellierung dieser einzelnen Prozesse bietet jedoch selbst beim Vorliegen der notwendigen hydrometeorologischen Daten bereits Schwierigkeiten. Viele an sich physikalisch begründete Grössen müssen parametrisiert werden: So werden z.B. «Widerstände» an Wurzeln und Blättern eingeführt. Damit lassen sich immerhin plausibel begründbare Modellresultate erzielen. Bereits die Umsetzung der Erkenntnisse von einzelnen Blättern auf die ganze Pflanze bietet jedoch gewisse Schwierigkeiten. Für die Umsetzung auf ganze Vegetations-, Boden- oder Standorttypen, auf grössere, kombinierte Flächen, beginnen die Probleme bereits grösser zu werden. Es müssen zahlreichere Parametrisierungen vorgenommen werden, welche oft, um die Zahl der Parameter nicht zu gross werden zu lassen, zusammengefasst werden müssen. Der Schritt zu einem Einzugsgebiet, und sei es noch so klein, lässt den angestrebten Detaillierungsgrad nochmals kleiner werden.

Es müssen also bei allen Modellen mehr oder weniger zahlreiche Parameter, welchen zwar meistens eine physikalische Bedeutung zugemessen wird, an die Randbedingungen eines zu behandelnden Gebietes angepasst werden. In Modellen wie z.B. BROOK, SHE oder IHDM beschränken sich diese Anpassungen auf einige wenige Parameter, in

anderen wie z.B. IRMB (*Bultot* 1988) ist eine vollständige Optimierung mit Hilfe des gemessenen Abflusses notwendig.

Die Frage stellt sich nun, ob Modelle für die Berechnung der Abflüsse unter veränderten Klimabedingungen geeignet sind. Am geeignetsten wären zweifellos detaillierte, deterministische Modelle. Sind dazu aber die notwendigen Inputdaten bekannt? Erforderlich sind ja nicht nur Temperatur und Niederschlag, deren Änderungen vielleicht bekannt sind, sondern auch der Strahlungshaushalt und andere meteorologische Variablen ebenso wie die Art und Zusammensetzung der Vegetation und die Parameter, welche den Boden und den Untergrund beschreiben. Die zukünftigen Änderungen dieser Grössen sind aber weitgehend unbekannt.

Anders sind die Anforderungen für die eher statistischen Modelle: Zwar werden dort nicht derart detaillierte Inputdaten verlangt. Die verschiedenen internen Abhängigkeiten der Parameter unter sich, die durch Eichung quantifiziert und optimiert worden sind, verschieben sich jedoch durch die oben erwähnten Umstellungen im Gebiet in eine unbekannte Richtung. Damit ist ungewiss, wie zuverlässig die Resultate bei geänderten Inputdaten und geänderten (unbekannten) Randbedingungen sind.

Aus diesen Überlegungen wird klar, dass mit den heute verfügbaren Modellansätzen nur Sensitivitätsanalysen unter heutigen Randbedingungen sauber durchgeführt werden können.

Kenntnislücken in Modellen und Daten

Damit liesse sich aber nur ein Zustand beschreiben, der sich bei einer erneuten Stabilisierung des Klimas eingestellt haben wird. Von Interesse jedoch wäre, die Konsequenzen einer raschen Klimaänderung zu kennen, und zwar während dieser Transitionsphase, welche vielleicht einige zehn bis einige hundert Jahre dauern dürfte. In dieser Zeit verändern sich ja die Rahmenbedingungen wie Vegetation, Boden, Gletscher, Grundwasserreserven usw. nicht gleich schnell wie das Klima. Gerade im Alpengebiet, wo teilweise nur wenig Boden vorhanden ist, dauert die Anpassungszeit recht lange. Hier sind noch grosse Kenntnislücken vorhanden.

Wasserhaushaltsmodelle simulieren in der Regel nur die in einem Einzugsgebiet unter den gegebenen Umständen natürlich ablaufenden Prozesse. Künstliche Eingriffe wie Ableitung von Wasser zwecks Trinkwasserversorgung, Wasserkraftnutzung oder Bewässerung/Entwässerung müssen separat berücksichtigt werden. Die Bewässerung hat in der Schweiz nur in einzelnen Gebieten eine gewisse Bedeutung. In einem wärmeren Klima könnte sie durchaus an Bedeutung gewinnen. Da global gesehen grosse landwirtschaftliche Gebiete bewässert werden, ist das Know-how auf diesem Gebiet vorhanden. Im Alpenraum dürfte aber in dieser Beziehung gegebenenfalls ein grosser Wissensrückstand aufzuholen sein.

In diversen Untersuchungen (*Bultot* 1990; *Forster* und *Leuppi* 1990) hat sich deutlich gezeigt, dass für die Variabilität des Abflussverhaltens von Gebiet zu Gebiet die verschiedenen Speicher, allen voran der Boden, dann aber auch die Schneedecke, eine entscheidende Rolle spielen.

Geht man davon aus, dass verschiedene Modellansätze in Gebieten mit unterschiedlichen klimatischen und geologischen Bedingungen und in verschiedener Höhenlage angewendet werden sollen, um derart exemplarisch die Auswirkungen von Klimaänderungen studieren zu können, so sind zuverlässige Messdaten eine wesentliche Grundvoraussetzung. Der schweizerische Alpenraum ist mit einem dichten Messnetz von Niederschlags-, Klima- und Abflussmessstationen überzogen. In höher gelegenen Gebieten müssten die Niederschlagsmessung und damit auch die Messung der Schneedecke gezielt verbessert werden. Detaillierte klimatologische Daten, wie sie komplexe Modelle verlangen, sind in diesen Gebieten kaum erhältlich. Eine besondere Anstrengung müsste zusätzlich für die Erhebung der notwendigen Bodenkennwerte unternommen werden.

4. Zukunftsperspektiven

Im folgenden werden mögliche Auswirkungen eines *wärmeren Klimas im Alpenraum (Alpen und Voralpen)* in von zusätzlichen anthropogenen Einflüssen unberührten Einzugsgebieten skizziert. Diese Änderungen würden der derzeitigen beträchtlichen natürlichen Variabilität des Abflusses überlagert. Sie würden wohl im mittleren Verhalten und während längerer Episoden, aber nicht unbedingt im Einzelfall sichtbar.

Die folgenden Aussagen hängen direkt vom angenommenen Ausgangsszenario der Klimaänderung ab. Folgende *Annahmen* seien getroffen:

- Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um einige Grad, Wintertemperatur stärker erhöht als Sommertemperatur,
- entsprechende Zunahme der Jahresniederschlagsmenge um einige Prozent, im Winter stärker als im Sommer,
- Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlägen,
- auf grössere Höhe zurückgedrängte, aber stabile Gletscher.

Die Auswirkungen auf die verschiedenen Erscheinungsformen des Abflusses lassen sich etwa wie folgt beschreiben:

Mittlerer Jahresabfluss

Die Verdunstung wird – insbesondere im Winterhalbjahr – leicht zunehmen. Mit dem Anstieg der Vegetationsgrenzen dürfte sie in höheren Lagen verstärkt an Bedeutung gewinnen. Daher wird der mittlere Jahresabfluss trotz höherem Jahresniederschlag kaum spürbar ansteigen.

Jahreszeitliche Verteilung (Regime)

Die mittlere Schneefallgrenze verschiebt sich um einige 100 m nach oben. Dadurch werden die Schneereserven insbesondere in mittleren Höhen kleiner. Der vermehrt direkt zum Abfluss gelangende Niederschlag und die entsprechend verminderte Schneeschmelze bewirken eine saisonal ausgeglichenere Verteilung der Abflüsse. Die Abflussregimes (*Aschwanden* et al. 1986) verschieben sich in Richtung nival und pluvial (Bild 4). Die ausgleichende Wirkung pflanzt sich auf die grossen Mittellandflüsse fort (*Kwadijk* 1989), so dass auch dort die Unterschiede zwischen Sommer- und Winterabfluss geringer werden (Bild 5).

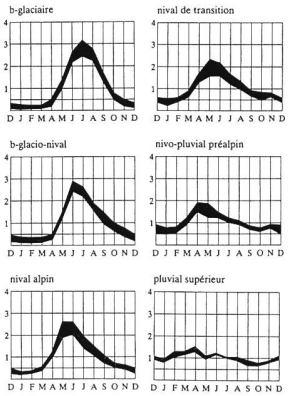

Bild 4. Ausgewählte Abflussregimetypen (aus *Aschwanden* und *Weingartner* 1986). Die dargestellten Beispiele repräsentieren Einzugsgebiete, deren mittlere Einzugsgebietshöhe sich im Mittel um jeweils etwa 300 m unterscheiden. Dargestellt ist für jeden Monat die Bandbreite der *Pardé*-Koeffizienten (Quotient MQ_{Monat}/MQ_{Jahr}) verschiedener Einzugsgebiete.

Hochwasser

Die Zeitdauer mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt wird verkürzt und hat vermehrte Niederschläge in Form von Regen zur Folge. Die Saison für potentielle Hochwasser wird dadurch verlängert. Zusammen mit tendenziell höherem Basisabfluss verursachen die eher intensiveren Niederschläge im Winter und Frühjahr häufigere und höhere Hochwasser.
Die sommerlichen Hochwasser sind sehr schwer einzuschätzen. Einerseits fällt bei Niederschlagsereignissen ein grosser Teil als flüssiger Niederschlag und die Intensitäten dürften grösser sein. Anderseits werden die Bodenspeicher durch erhöhten Verbrauch der Evapotranspiration eher mehr Wasser speichern können und der Sommerabfluss wird generell kleiner sein. Diese Effekte dürften sich etwa kompensieren. Wirklich entscheidend, insbesondere für Katastrophenhochwasser, wird deshalb eine allfällige Veränderung der zeitlich-örtlichen Struktur und Intensität der Starkregen sein.

Niederwasser

Im Alpenraum liegt die Niederwasserzeit meistens im Winter. Durch vermehrte flüssige Niederschläge werden die Niederwasser weniger ausgeprägt ausfallen.
In einigen Gebieten, wie etwa in den inneralpinen Trockentälern und an anderen exponierten Stellen, werden im Sommer schon heute Trockenzeiten beobachtet. Dort, und zusätzlich in Gebieten mit wenig Schnee- und Eisreserven, könnten durch geringer werdende Schneereserven und durch erhöhte Evapotranspiration Niederwasserabflüsse im Sommer öfter auftreten.

Die beschriebenen Änderungen im Abflussverhalten können Folgen für die Umwelt und die Wasserwirtschaft haben, die sich etwa wie folgt präsentieren könnten:

Speicherseen

Da die Schneereserven trotz erhöhten Niederschlägen geringer ausfallen werden, fliesst den Speicherseen im Sommer weniger Wasser zu. Die teilweise Verlagerung der Zuflüsse in die Speicher mit nicht sehr hoch gelegenen Einzugsgebieten vom Sommer in den Winter könnte dazu führen, dass weniger Speicherraum für den saisonalen Ausgleich benötigt wird. Die Energieproduktion würde dadurch wohl nicht beeinträchtigt, da die gesamte Jahreszuflussmenge kaum verändert würde.

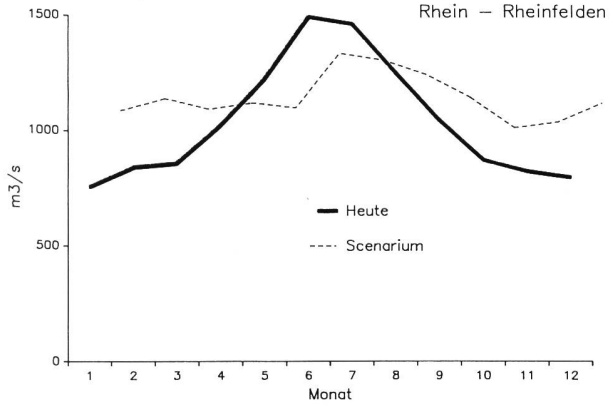

Bild 5. Abflussregimes des Rheins in Rheinfelden: langjähriger gemessener Mittelwert und von *Kwadijk* (1989) berechnete Werte für erhöhte Temperaturen (+4° C im Winter, +2° C im Frühjahr und Herbst, unverändert im Sommer).

Flusskraftwerke

Da sich wie erwähnt die ausgleichende Wirkung der Abflüsse auch auf die grossen Mittellandflüsse überträgt, wird die Energieproduktion im Winter zu Lasten des Sommers erhöht werden können. Damit wird die Auslastung der Turbinen ausgeglichen. Wegen der niedrigeren Sommerabflüsse müsste weniger Wasser entlastet werden. Die Gesamtenergieproduktion würde gleich bleiben oder geringfügig erhöht werden können.

Seeregulierung

Da sich der Zufluss zu den Alpenrandseen ausgeglichener gestalten wird, würden die Seespiegelschwankungen voraussichtlich kleiner ausfallen. Die bestehenden Regulierreglemente müssten gegebenenfalls angepasst werden.

Fliessgewässer als Vorfluter von Abwasser

Die allgemeine Erhöhung der Niederwasserabflüsse im Winter dürfte sich günstig auf die Verdünnungswirkung der Vorfluter von Abwassereinleitungen auswirken. Ausserhalb des alpinen Bereichs könnten sich in kleineren oder mittleren Fliessgewässern allerdings im Sommer durch ausgeprägtere Niederwasserzeiten Probleme ergeben.

5. Massnahmen

Wie die vorstehenden Ausführungen zeigen, sind viele Aussagen im Zusammenhang mit den Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Abflüsse unsicher und nicht exakt belegbar. Es ist aus diesen Gründen verständlich, dass über die wasserwirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen dieser Veränderungen noch wenig konkrete Aussagen möglich sind und erst recht noch kaum handfeste Massnahmen in diesen Richtungen an die Hand genommen werden können.
Daher ist es um so wichtiger, zu versuchen die entsprechenden Unsicherheiten zu beseitigen und trotzdem schon jetzt in den davon betroffenen Perspektivstudien und Planungsvarianten die möglichen Auswirkungen ebenfalls in Betracht zu ziehen.
Für die verantwortlichen Stellen in der Forschung, in den Behörden und in der Privatwirtschaft können die folgenden Massnahmen empfohlen werden:

Beobachtungen, Analyse von Daten

Die dafür verantwortlichen Institutionen müssen darauf achten, lange Beobachtungsreihen, die möglichst homogen, gut belegbar und von keinen anthropogenen Beeinflussungen belastet sind, weiterzupflegen. Solche Reihen sollten in verschiedenen Klimagebieten und Regionen, in verschieden grossen Einzugsgebieten bestehen. Auch sollten alle hydrologischen Regimes berücksichtigt sein.
Die fortlaufende Analyse der Wasserhaushaltsdaten sowie der Hochwasser- und Niederwasserdaten soll sichergestellt werden. Insbesondere sollte auch die saisonale Verteilung und Entwicklung bei den Analysen mitberücksichtigt werden.

Modelle, Grundlagenkenntnisse

Geeignete Modelle sollten adaptiert und verbessert werden, um sie exemplarisch in einigen typischen Gebieten anwenden zu können. Der Verifikation der Modelle sollte grösste Beachtung geschenkt werden.
Die Anwendung der Modelle sollte mit Hilfe von Szenarien geschehen. Es ist dabei wichtig, viele Jahre zu simulieren, um zu überprüfen, in welchem Verhältnis die Abweichungen zur bisher beobachteten Variabilität stehen.

Wichtig ist die gewissenhafte Überprüfung der Modelle auf ihre Einsetzbarkeit während der Zeit eines schnellen Klimawechsels.
Aufgrund von Abflussszenarien könnten mögliche Auswirkungen auf die Umwelt und die Wasserwirtschaft bereits vor dem Vorliegen von Ergebnissen aus der Abflussmodellierung erforscht werden. Die sich daraus ergebenden möglichen Massnahmen könnten damit bereits zu einem frühen Zeitpunkt diskutiert werden.

Literatur

Aschwanden, H. (1989): Einsatz von Kurzzeitmessungen zur Bestimmung der Abflussmenge Q_{347}. Technischer Bericht Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Aschwanden, H., Schädler, B. (1988): Hochwasserereignisse im Jahre 1987 in der Schweiz. Mitt. Nr. 10 der Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Aschwanden, H., Weingartner, R. (1986): Abschätzungen im Mittelwasserbereich. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 33, Bern.

Aschwanden, H., Weingartner, R., Leibundgut, Ch. (1986): Zur regionalen Übertragung von Mittelwerten des Abflusses. «Dt. Gewässerkundl. Mitt.» *30* (2/3 und 4), 52–61, 93–99.

Bultot, F., Coppens, C., Dupriez, G.L., Gellens, D., Meulenberghs, F. (1988): Repercussions of a CO_2 doubling on the water cycle and on the water balance – a case study for Belgium. «J. Hydrol.», *99*, 319–347.

Bultot, F. (1990): persönliche Mitteilung, Publikation in Vorbereitung.

Forster, E., Leuppi, E. (1990): Ursachenanalyse Hochwasser 1987, Projekt A1: Waldwirkung, Schlussbericht. WSL Birmensdorf.

Kwadijk, J. (1989): Sensitivity of the river Rhine discharge to environmental changes, a first tentative assessment. In: Discussion Report on Fluvial Systems, p. 60–73. European Conference on Landscape Ecological Impact of Climate Change (LICC), Lunteren. Agricultural University of Wageningen.

Lang, H. (1981): Is evaporation an important component in high alpine hydrology? «Nordic Hydrology», *12*, 217–224.

Nemec, J. (1989): Impact of climate variability and change on water resources management in agriculture. In: Conference on Climate and Water, Suomen Akatemian Julkaisuja 9/89, Vol. 2, 357–371, Valtion Painatuskeskus, Helsinki.

Schädler, B. (1986): Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitteilung Nr. 6 der Landeshydrologie, Bern.

Schädler, B. (1989): Water balance investigations in Swiss Alpine basins – tool for the improved understanding of impacts of climatic changes on water resources. In: Conference on Climate and Water, Suomen Akatemian Julkaisuja 9/89, Vol. 1, 462–475, Valtion Painatuskeskus, Helsinki.

Spreafico, M., Stadler, K. (1986): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern, Band 1; Abflussmessreihen mit mehr als 30 Jahren in den Einzugsgebieten des Rheins und der Aare. Mitteilung Nr. 7 der Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Spreafico, M., Stadler, K. (1988): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern, Band 2; Abflussmessreihen mit mehr als 30 Jahren in den Einzugsgebieten der Reuss, der Limmat, der Rhone, des Ticinos, des Inn und der Adda. Mitteilung Nr. 8 der Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Zeller, J., Röthlisberger, G. (1988): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1987. «wasser, energie, luft», *80*, 1/2, 29–42.

Gekürzte schriftliche Fassung eines Vortrages, den der Verfasser an der Fachtagung vom 11. Mai 1990 an der ETH Zürich gehalten hat. Das Tagungsthema lautete: Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre. Alle vollständigen Referate sind zusammen mit einer Zusammenfassung der Podiumsdiskussion und gemeinsamen Schlussfolgerungen in der Mitteilung Nr. 108 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie publiziert worden.

Adresse des Verfassers: Dr. *Bruno Schädler,* Landeshydrologie und -geologie, CH-3003 Bern.

Der Architekt Sinan als Wasserbauer

Niklaus Schnitter

Zusammenfassung

Aus Anlass des vierhundertsten Todesjahres des berühmten osmanischen Architekten Sinan (1495–1588) wurden auch seine Wasserversorgungen von Edirne (Adrianopel) und Istanbul (Konstantinopel) wieder gebührend ins Licht gerückt und gewürdigt. Zwei derselben stellten die ersten grossen derartigen Anlagen seit der Antike dar.

Résumé: L'architecte Sinan en tant qu'ingénieur hydraulicien

A l'occasion du 400e anniversaire de la mort du fameux architecte osmane Sinan (1495–1588), ses approvisionnements en eau des villes d'Edirne (Adrianople) et de Stamboul (Constantinople) furent mis en évidence et appréciés. Deux d'entre eux étaient les premiers grands aménagements de cette nature construits depuis l'antiquité.

Summary: The architect Sinan as hydraulic engineer

On the occasion of the 400th anniversary of the death of the famous Ottoman architect Sinan (1495–1588) his water supply schemes for the cities of Edirne (Adrianople) and Istanbul (Constantinople) were put in evidence and appreciated. Two of them were the first large such constructions since antiquity.

1. Einleitung

Der aus der Gegend von Kayseri, 260 km südöstlich von Ankara, stammende *Sinan* (1495–1588) wurde 1538 Hofarchitekt des Sultans *Süleyman I.* «des Prächtigen» (1520–1566), welcher das osmanische Reich auf den Höhepunkt seiner Macht führte und zweimal bis vor die Mauern Wiens vordrang. In seiner fünfzigjährigen Amtszeit leitete Sinan die Erstellung von 477 Gebäuden, worunter sich 107 grosse und 52 kleine Moscheen, 74 Schulen, aber auch drei grosse Wasserversorgungssysteme befanden.
Soweit diese gemauerte Kanäle und Aquädukte aufwiesen, handelte es sich um die ersten grossen derartigen Anlagen seit der Antike, denn auch nach Wiedereinführung der unter den Römern üblichen öffentlichen Brunnen zu Beginn des 13. Jahrhunderts begnügte sich der Rest der Welt mit vergleichsweise bescheidenen Zuleitungen aus Holz-, selten Tonröhren und sollte es noch einige Jahrhunderte lang tun [1]. In Spanien gab es kleinere mittelalterliche Aquädukte, und in seiner neuen Kolonie Mexiko entstanden ab 1554 ebenfalls grosse Bauten dieser Art [2].

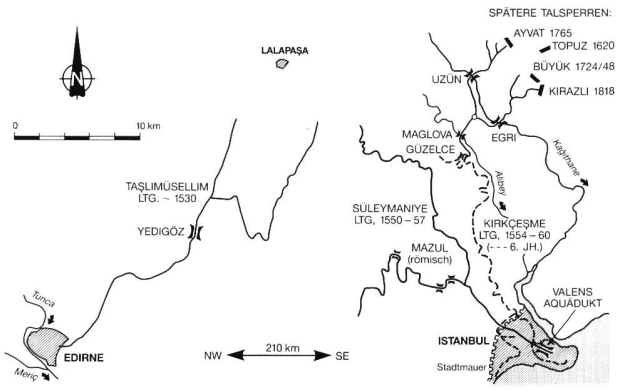

Bild 1: Gleichmassstäbliche Pläne von *Sinans* Wasserzuleitungen nach Edirne (links) und Istanbul (rechts).