

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 72 (1980)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Wasserhaushalt und Wärmehaushalt  
**Autor:** Lang, Herbert / Schädler, Bruno  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-941410>

#### **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:** 21.02.2026

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

terne Wellen auf, die ihre grösste Amplitude im Innern des Sees aufweisen. Interne Wellen sind allerdings nur in geschichteten Wassermassen, also für den Zürichsee etwa von April bis Dezember möglich. Ähnlich wie die Gezeiten im Meer spielen die Seiches eine wichtige Rolle für den Test eines Modells, denn sie sind als wohldefinierte Schwingung ein gutes Eichsignal. Ein Teil des Datenmaterials aus Zürichsee und Lugarnersee wird jetzt dazu verwendet, schon vorhandene bzw. neu entwickelte Seichesmodelle für diese Seen zu erarbeiten.

Die Eigenschwingungen eines Sees zu erfassen ist verhältnismässig einfach, wenn man z. B. die Simulierung der dreidimensionalen Variabilität von Strömung und Temperatur aufgrund langanhaltender oder kurzfristig einsetzender Stürme betrachtet. Diese Ereignisse prägen die Prozesse im See und haben damit eine übergeordnete Bedeutung in der Beantwortung der in der Einführung gestellten Fragen. Bei der Modellierung stösst man sehr schnell auf das Problem, wie weit man den Grad der Vollständigkeit sinnvoll erhöht, um beobachtete Verhältnisse zu reproduzieren. Gleichzeitig muss auch berücksichtigt werden, dass die in einem Modell erwünschte Vorhersage ebenso treffsicher wird wie die mit Hilfe der Messungen erfolgte «Nachhersage». Diese Problematik ist aus der numerischen Wettervorhersage hinreichend bekannt.

Trotz der angeführten Schwierigkeiten erbringen nur eine Weiter- und Neuentwicklung der mathematisch-numerischen Modelle auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen die Voraussetzungen sowohl für eine weitere systematische Forschungsarbeit in den Seen als auch für wasserbauliche und gewässerschützende Massnahmen.

#### Literaturhinweise

- F.-A. Forel: Le Léman, Monographie Limnologique. Lausanne, 1892.  
 G. Chrystal: On the hydrodynamical theory of seiches. «Trans. Roy. Soc.» Edinburgh, 41, 1906.  
 P. Nydegger: Vergleichende Untersuchungen an sieben Schweizer Seen. «Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie» Nr. 9, 1957.  
 D. Vischer: Zirkulationsströmungen in Seen und ihre messtehnische Erfassung. «Schweiz. Techn. Zeitschrift», Nr. 5/6, 10. Februar 1977.  
 W.H. Graf und C.H. Mortimer (Herausgeber): Hydrodynamic of Lakes, Proceedings of a Symposium 12-13 Oct. 1978 in Lausanne. In: Developements in Water Science, 11, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam- Oxford- New York, 1979.

#### Adresse des Verfassers:

Wilfried Horn, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, 8092 Zürich.

Bild 1. Jahresgänge (Monatsmittel) der Abflüsse aus den Einzugsgebieten der Massa (195 km<sup>2</sup>, 1496 bis 195 m ü.M. 66,6% vergletschert), des Dischmabaches (43 km<sup>2</sup>, 1668 bis 3146 m ü.M., 2,6% vergletschert), des Rietholzbaches (3,2 km<sup>2</sup>, 680 bis 950 m ü.M.) und des Rheins (34 550 km<sup>2</sup>, 262 bis 3402 m ü.M., 1,6% vergletschert) für das Trockenjahr 1976.

## Wasserhaushalt und Wärmehaushalt

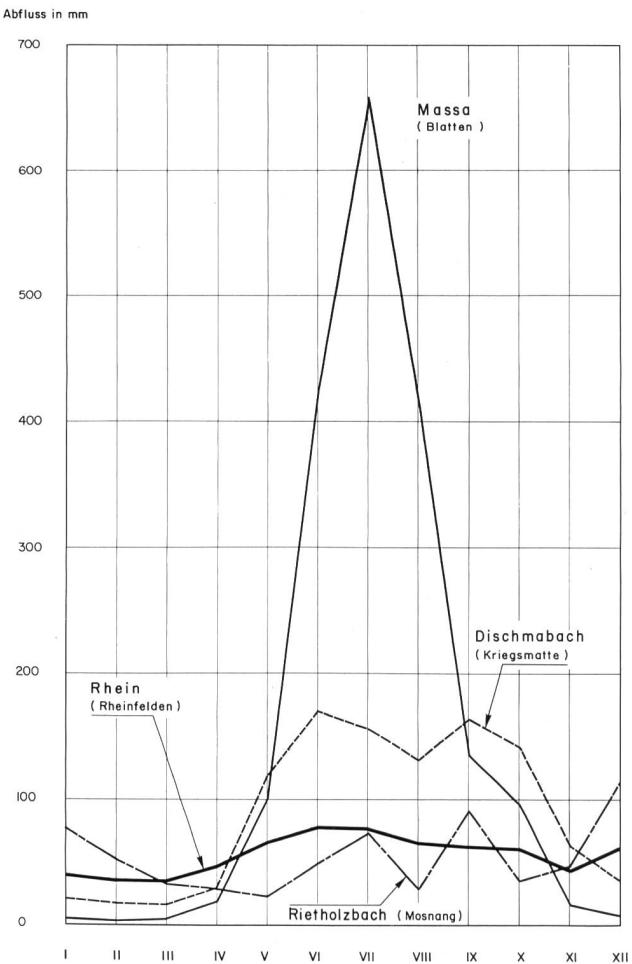
Herbert Lang und Bruno Schädler

### Zusammenfassung

Wasserhaushalt und Abfluss werden massgebend durch den Wärmehaushalt an der Erdoberfläche gesteuert. Die genauere Kenntnis der einzelnen Komponenten des Wärmeumsatzes ist eine Voraussetzung zum Verständnis der Verdunstungs- und Abschmelzungsvorgänge und damit ein wichtiger Schlüssel zur richtigen Erfassung des Wasserhaushaltes, der Abflussprozesse und ihrer Beziehungen zum Klima. Bei hydrologischen Grundlagenuntersuchungen in voralpinen und hochalpinen Gebieten werden deshalb neben den Messungen von Niederschlag, Schmelzen und Abfluss gleichzeitig Wärmebilanzstudien durchgeführt. Die gewonnenen Resultate dienen auch der Praxis, wie zum Beispiel der besseren Abschätzung und Vorhersage von Wasservorkommen und Abflüssen.

### Résumé: Le bilan hydrique et le bilan énergétique

Le bilan hydrique et l'écoulement sont régis principalement par le bilan énergétique à la surface de la terre. Une meilleure connaissance des différents termes du bilan énergétique est essentielle pour la compréhension des processus d'évaporation et de fusion, et par conséquent d'une importance considérable pour la compréhension du bilan hydrique, des processus d'écoulement et de leur relation avec le climat. Dans le cadre de recherches fondamentales portant sur l'hydrologie des Préalpes et des Alpes, on procède, en plus des mesures de précipitations,



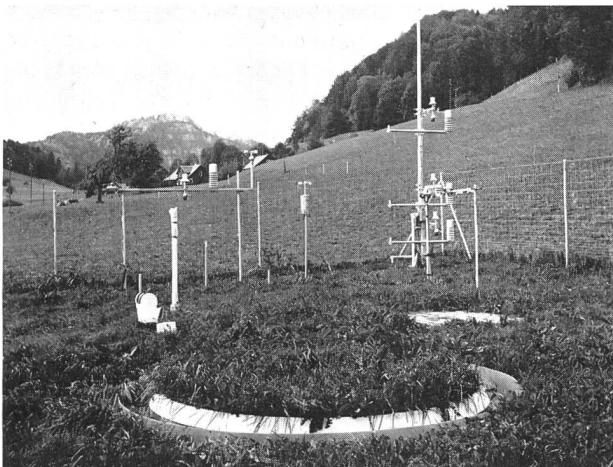


Bild 2. Klimastation Büel im Forschungsgebiet Rietholzbach. Im Vordergrund das Lysimeter mit Gewichtsregistrierung, im Hintergrund meteorologische Messgeräte und (rechts) die Geräte zur Erfassung der Wärmebilanz.

*de fonte des neiges et d'écoulement, à des études du bilan énergétique. Dans la pratique, les résultats obtenus permettent de faire de meilleures estimations et prévisions des ressources en eau et des écoulements.*

#### Abstract: Water balance and energy balance

*Water balance and run-off processes are essentially governed by the heat balance at the earth surface. Detailed knowledge of the individual components of the heat exchange is needed for the understanding of the processes of evaporation and melting and, therefore, serves as a key for a correct comprehension of the water balance, the run-off processes and their relation to climate. Besides measurements of precipitation, melting and run-off, heat balance studies are carried out in the frame of hydrological field observations in pre- and high-alpine research basins. The resulting knowledge may improve estimates and predictions of water resources and run-off events.*

#### Einführung

Für das Leben auf der Erde ist der Wasserkreislauf eine der wichtigsten Voraussetzungen; durch physikalische Prozesse wird er unaufhörlich in Gang gehalten. Die Energie dafür liefert primär die Sonnenstrahlung; Erdrotation, Gravitation und Molekularkräfte sind die zusätzlichen Kräfte, welche die Bewegungen des Wassers in der Atmosphäre, an der Erdoberfläche und im Untergrund bestimmen. Da der Mensch das Wasser vielfach braucht und nutzt, ist die Hydrologie verständlicherweise auch eine stark anwendungsorientierte Wissenschaft. Gefragt sind Aussagen über aktuelle oder vergangene Zustände, wie zum Beispiel die nutzbaren Grundwasservorkommen eines Gebietes (Wasserversorgung) oder über das grösste gemessene Hochwasser an einer bestimmten Messstelle eines Flusslaufes (Hochwasserschutz). Häufig sind auch Aussagen über zukünftige Zustände und Ereignisse zu machen, allgemein als hydrologische Vorhersagen und Bemessungen bezeichnet. Dafür können rein empirische Verfahren entwickelt werden. Wenn zum Beispiel aus einer verfügbaren, begrenzten Zahl von Beobachtungen der mittlere Jahresniederschlag  $N_1$  und der mittlere Abfluss  $A_1$  in einem bestimmten Einzugsgebiet  $E_1$  bekannt sind, kann die mittlere Gebietsverdunstung nach der Wasserhaushaltsgleichung

$$V_1 = N_1 - A_1 - R_1 \quad (1)$$

bestimmt werden. Die Reservenänderung  $R_1$  (bzw. die Vorratsänderung) wird mangels genauerer Kenntnis mei-

stens als vernachlässigbar angenommen. Die einfachste, häufig benutzte Methode einer Vorhersage beziehungsweise Extrapolation besteht dann zum Beispiel darin, für «ähnliche» Gebiete  $E_2$  wie zum Beispiel solche in etwa derselben Meereshöhe, für welche nur Niederschlagsmessungen, aber keine Abflussdaten vorliegen, den mittleren Jahresabfluss «vorherzusagen» nach  $A_2 = N_2 - V_2$  unter der Annahme, dass  $V_2 = V_1$  sei. Je nach den Anforderungen an die Genauigkeit wird man diese Annahme mehr oder weniger in Frage stellen und durch Grundlagenuntersuchungen überprüfen müssen. Dies gilt besonders dann, wenn auch über kürzere Zeiträume von Monaten, Wochen oder Tagen Aussagen zu machen sind. Es wird also darum gehen festzustellen, welche Einflussgrößen – das sind hauptsächlich die meteorologischen Faktoren und die Gebietscharakteristiken – die Verdunstung und ihre räumliche Variation bestimmen. Den Zugang zum grundlegenden Verständnis der Zusammenhänge bieten Messungen des *Wärmehaushaltes an der Bodenoberfläche*. Diese zeigen, dass der für die Verdunstung von Wasser erforderliche Energieaufwand, als latenter Wärmestrom  $L$  bezeichnet, den grössten Teil der aus der Sonnenstrahlung im Mittel an der Erdoberfläche aufgenommenen Energie  $S$  ausmacht:

$$L = (S - E) - F - B - M \quad (2)$$

$E$  ist die Wärme, welche durch langwellige Ausstrahlung (Emission) abgeführt wird,  $F$  bewirkt als fühlbare Wärme eine Erhöhung der Lufttemperatur,  $B$  ist der dem Boden zuströmende Wärmeanteil, angezeigt durch Änderungen in der Bodentemperatur.  $M$  ist die bei Schneedeckung an einer Schneoberfläche für Schmelzen verbrauchte Wärme.

Die Verdunstung ist ein energieintensiver Prozess. Die gleiche Energie, die zum Beispiel an einem Sommertag zur Verdunstung von 5 mm Wasser verbraucht wird, reicht zum Abschmelzen von etwa 38 mm Schnee – Wasseräquivalent oder zur Erwärmung der unteren 1000 m der Atmosphäre um rund 10,7°. Im Jahresmittel über die ganze Erd-

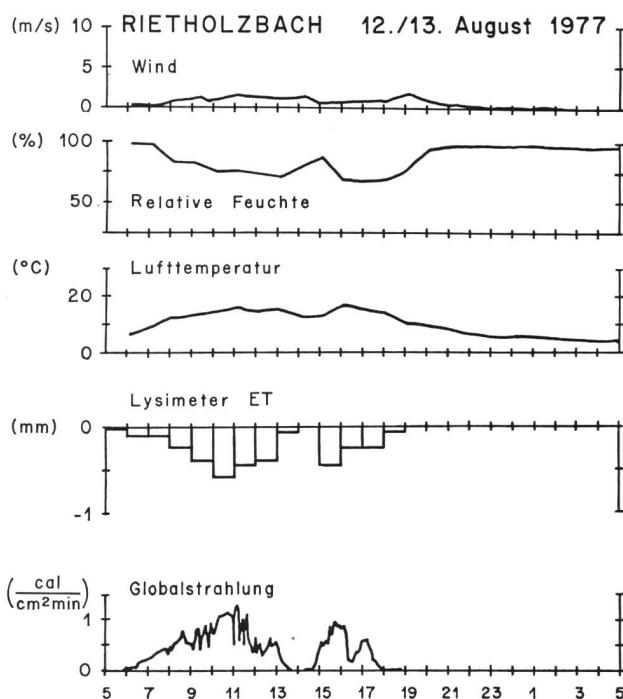


Bild 3. Tagesgang verschiedener hydrometeorologischer Elemente an einem Sommertag an der Station Büel (Rietholzbach). Die Globalstrahlung hängt eng mit der mit dem Lysimeter direkt gemessenen Verdunstung zusammen.

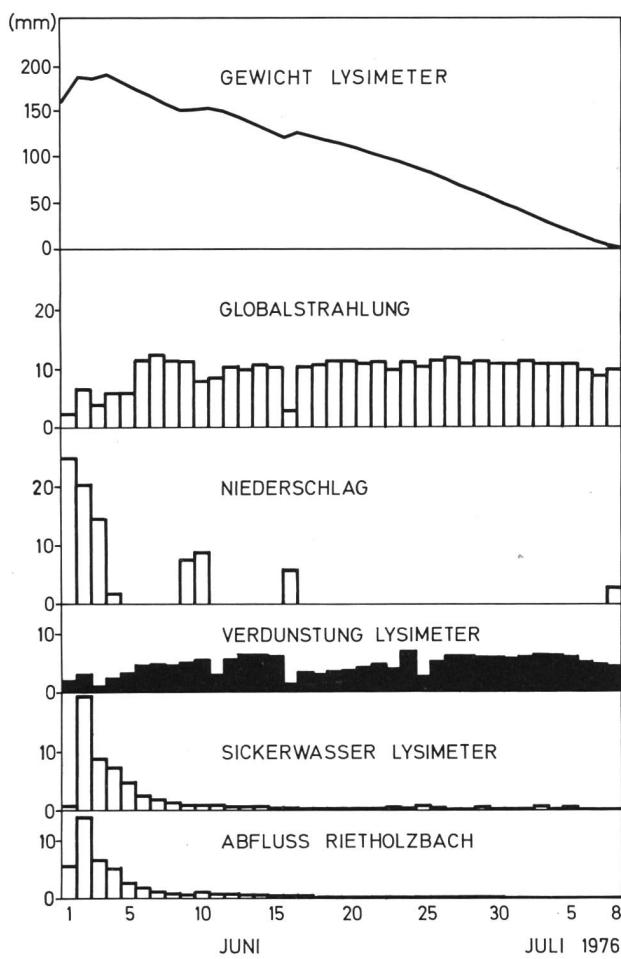


Bild 4. Tagessummen des Abflusses und des Gebietsniederschlages vom Einzugsgebiet Rietholzbach; Sickerung und Verdunstung aus dem Lysimeter; Gewichtskurve des Lysimeters (ausgedrückt in einer relativen Wassergehalts-skala in mm). Zum Vergleich die Globalstrahlung (in mm Verdunstungsäquivalent). Periode vom 1. Juni bis 8. Juli 1976.

oberfläche werden über 80 % der aus der Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche aufgenommenen Energie für Verdunstung verbraucht; daraus ist leicht einzusehen, dass die Verdunstung nicht nur im Wasserhaushalt, sondern auch für das Klima an der Erdoberfläche eine ausschlaggebende Rolle spielt.

Das Zusammenspiel zwischen Wärmehaushalt und Wasserhaushalt ist kompliziert. In vielen Gebieten ist die Verdunstung  $V$  durch das geringe Wasserangebot an der Erdoberfläche begrenzt. Dies kann verschiedene Gründe haben, zum Beispiel:

- Zu wenig Niederschlag in ausgesprochenen Trockengebieten
- Niederschlag fällt im Jahresgang in zeitlich begrenzten Regenzeiten. Je nach Vegetation und Speicherkapazität des Bodens ist die Verdunstung beziehungsweise die Evapotranspiration bei hohem Energieangebot in der regenfreien Zeit mehr oder weniger stark reduziert, weil das für Evaporation und Transpiration verfügbare Wasserangebot aus dem Bodenspeicher nach einer bestimmten Zeit erschöpft ist.
- In der durch menschliche Eingriffe versiegelten Landschaft fliesst das meiste Niederschlagswasser oberflächlich rasch ab, ohne den Bodenspeicher zu füllen und anschliessend für die Verdunstung verfügbar zu sein.

Bei gleichem Energieangebot  $S$  bedeutet geringer Verbrauch an Verdunstungswärme  $L$  in der Wärmehaushalts-

gleichung (2) entsprechend mehr Energie für die restlichen Glieder. Die sich rasch auf höhere Temperaturen erwärmende Erdoberfläche wirkt dann als Heizfläche für die Atmosphäre, der dabei abgegebene fühlbare Wärmestrom  $F$  bewirkt entsprechend höhere Lufttemperaturen.

Bei einer *Schneedecke* ist die Verdunstung ebenfalls weitgehend eingeschränkt. Dies hängt mit ihren physikalischen Eigenschaften zusammen:

- Die hohe Albedo (= Reflexionsvermögen) von Schnee reduziert die verfügbare Energie. So wird bei einer Schneearbedo von 0,6 bei gleicher Sonneneinstrahlung nur halb soviel Energie  $S$  an der Oberfläche zur Verfügung stehen wie bei einer Grasfläche mit einer Albedo von 0,2.
- Die Temperatur der Schneedecke kann  $0^{\circ}\text{C}$  nicht überschreiten; damit ist auch ihr Sättigungsdampfdruck physikalisch begrenzt. Deshalb ist nur bei sehr trockener Atmosphäre das für die Verdunstung notwendige Dampfdruckgefälle von der Oberfläche zur bodennahen Atmosphäre hin vorhanden. Die Energie, die einer bereits temperierten Schneedecke bleibt, wenn wenig oder keine Verdunstungswärme verbraucht wird, dient vor allem als Schmelzwärme  $M$  zum Abbau der Schneedecke.

Die nach der Wärmehaushaltsgleichung an der Erdoberfläche für Aggregatzustandsänderungen zur Verfügung stehende Energie führt also im einen Fall das im Boden oder an der Oberfläche gespeicherte Wasser wieder zurück in die Dampfform und in die Atmosphäre, wirkt also abflussvermindernd. Im anderen Fall wird der in Form von Schnee (oder Eis) vorhandene Wasserspeicher abgebaut und als zusätzliche Abflussspende registriert. In Gebieten, die sich über einen gewissen Höhenbereich erstrecken wie im Alpenraum, ergibt dieses Zusammenspiel zwischen Wärme- und Wasserhaushalt den wasserwirtschaftlich sehr nützlichen Ausgleich des Abflussregimes grösserer Flussgebiete (Bild 1).

#### Grundlagenuntersuchungen zum besseren Verständnis von Abflussprozessen und Wasserhaushalt

Um die Zusammenhänge besser zu verstehen, führt man in ausgewählten hydrologischen Forschungsgebieten intensive Untersuchungen durch. So wurden im Gebiet Rietholzbach (Dreien SG, 3,2 km<sup>2</sup> Fläche, Höhenbereich 680 bis 950 m ü. M.) in den Jahren 1974 bis 1977 entsprechende Messnetze aufgebaut. Neben der Abflussmessstelle (eingerichtet und betreut vom Bundesamt für Wasserwirtschaft beziehungsweise von der Landeshydrologie) wurden unter anderem an acht Stationen registrierende Regenmesser (Pluviographen), Bodenfeuchtemessstellen und zwei reich ausgestattete Klimastationen eingerichtet. Zusätzliche temporäre Messprogramme dienten seither unter anderem der Erfassung der einzelnen Komponenten der Wärmehaushaltsgleichung, des Bodenwasserhaushaltes und der Schneedecke. Als zentrales Instrument wurde erstmalig im Zusammenhang mit Einzugsgebietstudien ein Lysimeter mit Gewichtsregistrierung eingesetzt (siehe Bild 2). Die Einrichtung dieses «Kleinsteinzungsbietes» an einem möglichst repräsentativen Punkt des Gebietes erlaubt es, alle Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung inklusive der Vorratsänderung mit einer Genauigkeit von 0,1 mm Wasserhöhe (0,1 kg/m<sup>2</sup>) zu erfassen. Die hohe zeitliche Auflösung in Stundenwerten macht es zum Beispiel möglich, den Tagesgang der Evapotranspiration zu registrieren. Bild 3 zeigt den engen Zusammenhang zwischen Evapotranspiration und Globalstrahlung.

*Typische Beispiele für einen trockenen und einen eher feuchten Hochsommer:  
Die Jahre 1976 und 1978*

In den Bildern 4 und 5 werden der extrem trockene Sommer 1976 und der normale feuchte Sommer 1978 in Tageswerten einander gegenübergestellt. Das Strahlungs- beziehungsweise Energieangebot erweist sich unter den gegebenen Klimabedingungen neben dem Niederschlag als die ausschlaggebende Größe für den Wasserhaushalt. Im trockenen Sommer 1976 erreichte bei anhaltendem Strahlungswetter die Evapotranspiration 180,2 mm über 37 Tage beziehungsweise einen Wert von 4,9 mm/Tag im Mittel. Das Kleinsteinzugsgebiet Lysimeter mit  $3,14 \text{ m}^2$  Oberfläche zeigte folgende Bilanz für die Periode vom 1. Juni bis 7. Juli 1976:

Niederschlag	$N$	84,7 mm
Evapotranspiration	$V(ET)$	180,2 mm
Abfluss	$A$	65,2 mm
Vorratsänderung	$R$	-160,7 mm

Vor allem durch die hohen Verdunstungsraten wurde der Bodenwasservorrat in dieser Zeit um 160,7 mm vermindert.

Das Beispiel des feuchten Sommers 1978 zeigt für eine gleich lange Periode vom 24. Juni bis 31. Juli 1978 ein ganz anderes Bild:

Niederschlag	$N$	201,0 mm
Evapotranspiration	$V(ET)$	135,8 mm
Abfluss	$A$	100,9 mm
Vorratsänderung	$R$	-35,7 mm

Bei zahlreichen Niederschlagstagen mit entsprechender Bewölkung ist das Energieangebot aus der Einstrahlung beschränkt; die Evapotranspiration ist mit 135,8 mm beziehungsweise einem Mittelwert von 3,6 mm pro Tag um zirka 25% geringer als im Sommer 1976.

Der Bodenwasserspeicher wurde in dieser Sommerperiode mit einer Reservenänderung  $R$  von nur -36 mm wenig beansprucht.

Aus Bodenfeuchte-Untersuchungen im gesamten Gebiet und im Vergleich mit den Messungen am Lysimeter darf angenommen werden, dass die am Lysimeter gefundenen Wasserhaushaltzzahlen die Gebietswerte gut repräsentieren. Die aus den Grafiken ersichtlichen ähnlichen Ganglinien von Lysimeterabfluss und Gebietsabfluss deuten ebenfalls auf den repräsentativen Charakter der Lysimeteranlage hin.

*Der Wasserhaushalt während der Vegetationsperiode vom 1. April bis 31. Oktober 1979*

In Bild 6 sind auf der Basis von Tageswerten die Summenkurven des Gebietsniederschlages, des Abflusses und der Verdunstung für das Einzugsgebiet des Rietholzbaches, Pegel Mosnang SG, aufgezeichnet. Als Verdunstung ist die am Lysimeter gemessene Evapotranspiration als repräsentativ für das ganze Gebiet angenommen worden. Daraus ergibt sich für die Vegetationsperiode vom 1. April bis 31. Oktober 1979 folgende Gebietsbilanz:

Niederschlag	$N$	822 mm
Verdunstung	$V$	583 mm
Abfluss	$A$	396 mm
Vorratsänderung	$R$	-157 mm

Der Verlauf der Summenkurven in Bild 6 ist recht aufschlussreich und dürfte für viele voralpine Gebiete ziem-

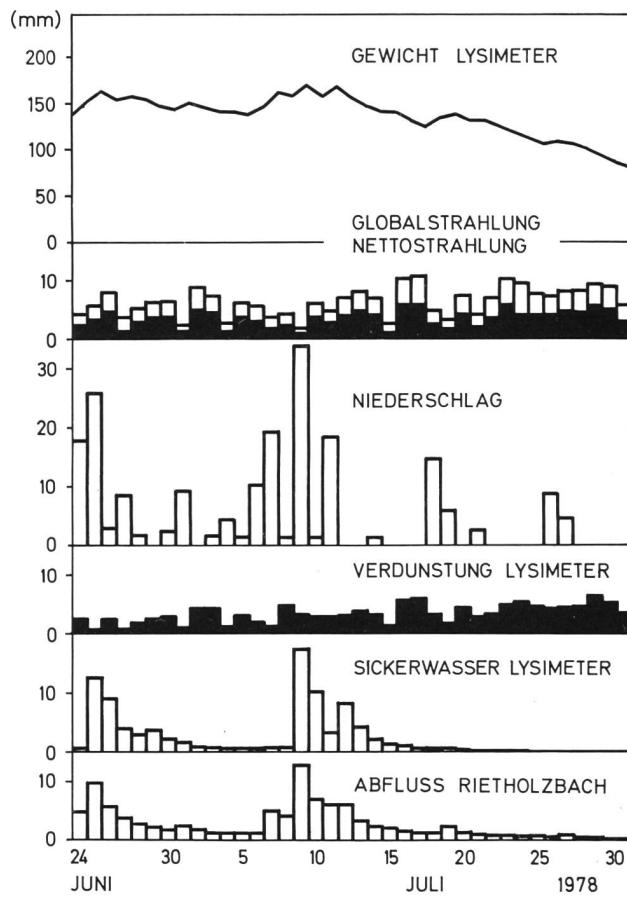


Bild 5. Tagessummen des Abflusses und des Gebietsniederschlages vom Einzugsgebiet Rietholzbach; Sickerung und Verdunstung aus dem Lysimeter; Gewichtskurve des Lysimeters (ausgedrückt in einer relativen Wassergehalts skala in mm). Zum Vergleich die Globalstrahlung und die für die Verdunstung verfügbare Energie aus der Nettostrahlung (in mm Verdunstungäquivalent). Periode vom 24. Juni bis 31. Juli 1978.

lich charakteristisch sein. Im Verlauf der Monate Mai und Juni sind vom Energieangebot und vom atmosphärischen Sättigungsdefizit her die höchsten Verdunstungswerte zu verzeichnen. Ausgesprochene Niederschlagsperioden sind mit weniger Energieangebot und entsprechend geringeren Verdunstungsraten gekoppelt, deutlich ausgeprägt im Juni. Insgesamt zeigt die Verdunstung im Vergleich zu

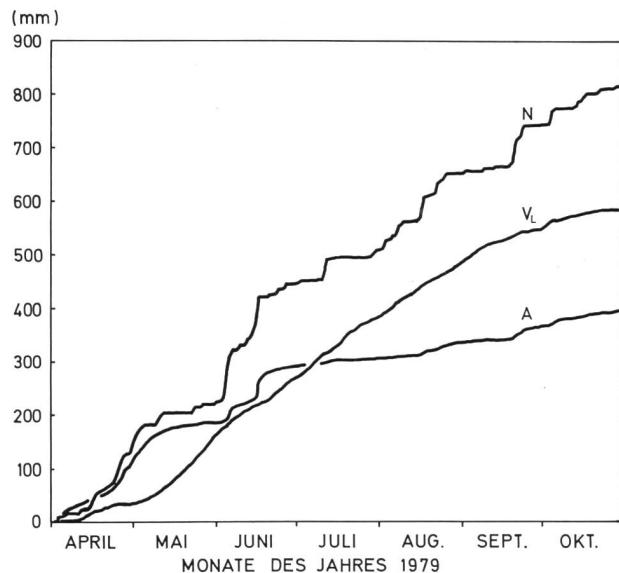


Bild 6. Summenkurven von Gebietsniederschlag und Abfluss vom Einzugsgebiet Rietholzbach und der Verdunstung des zentral gelegenen Lysimeters. Zeitperiode April bis Oktober 1979.



Bild 7. Die Einrichtung und der Betrieb einer Station zur Abflussmessung am grossen Aletschgletscher waren technisch schwierig, weil sich die Eisoberfläche durch Ablation und Eisbewegung dauernd veränderte. Nach etwa 2 Wochen Schmelzperiode war die Station rechts im Bild unbrauchbar; an einer inzwischen vorbereiteten zweiten Station konnte die Limnigraphenregistrierung ohne Unterbrechung fortgesetzt werden. Das weisse Syntosilpapier, von dem ein 30 cm breites Band um das ganze Versuchsgebiet ausgelegt worden war, dient zum Schutz vor der Sonnenstrahlung, um die Ablation möglichst gering zu halten. Gleichzeitig dient es zur Abgrenzung des zirka 4500 m<sup>2</sup> grossen Einzugsgebietes, in dem im Sommer 1965 gleichzeitig zur hydrologischen Bilanz die Wärmebilanz und die Eisablation erfasst wurden.

Niederschlag und Abfluss einen sehr gleichmässigen Verlauf der Summenkurven.

Das *Niederschlag-Abflussverhalten* des Gebietes zeigt ebenfalls den jahreszeitlich bedingten Einfluss des Wärmehaushaltes und damit der Verdunstung, was hier nur grob und qualitativ skizziert werden soll: In der Niederschlagsperiode von Mitte April bis in den Mai (Bild 6) reagiert der Abfluss auf den Niederschlag unmittelbar (hoher Abflusskoeffizient, Bodenspeicher und Vegetation zeigen in dieser Zeit noch wenig Rückhaltevermögen). Auf eine vergleichbare Niederschlagsperiode im August spricht der Abfluss dagegen nur schwach an; von den zirka 150 mm Regen werden zirka 100 mm laufend für die Verdunstung dem Bodenspeicher entzogen, und nur bei kurzfristig höheren Niederschlagsintensitäten wie zum Beispiel am 15. August gelangt ein kleiner Teil des Regenwassers auf «direktem» Weg zum Abfluss und erzeugt eine kleine Abflusswelle im Gerinne. In Niederschlag-Abflussmodellen wird der rasche Abfluss, der bei einem Regen ziemlich direkt eine Welle im Gerinne auslöst, etwas irreführend als Oberflächenabfluss bezeichnet, obwohl unter unseren Klima- und Bodenbedingungen nur ein sehr kleiner Teil oberflächlich abfließt. Der grösste Teil des direkten Abflusses erfolgt offenbar in einer Art Makroporensystem. Die Art und Weise, wie der Abfluss in einem solchen Gebiet unter den verschiedenen Bedingungen von Bodenfeuchte, Regenintensität und Regendauer zustande kommt, ist ein wichtiger Teil des Forschungsprojektes Rietholzbach, der letzten Endes zum besseren Verständnis der Entstehung der Hochwasser und der Speicherung als Boden- und Grundwasser dient.

#### *Schmelzen der Schneedecke und der Gletscher*

Viel unmittelbarer als in den vorangegangenen Beispielen wirkt der Wärmehaushalt auf den Abfluss von schneebedeckten Gebieten oder Gletschern. Dabei bringt man das

Schmelzen von Schnee und Eis einfacheitshalber meist nur in Zusammenhang mit der Lufttemperatur, die sich als brauchbarer Index für die Gletscheränderungen und für die Schneeschmelze erwiesen hat – dies gilt allerdings nur im Mittel über längere Zeitperioden, und solange die allgemeinen klimatischen Bedingungen nicht ändern. Sobald man zu Tageswerten übergeht, scheint die Lufttemperatur als einzige Grösse zur Bestimmung der Schmelzrate nicht mehr zuverlässig. So schwankte zum Beispiel der Temperaturfaktor (mm Schmelzwasser pro positiven Temperaturgrad) der bekannten Grad-Tag-Methode für Tageswerte des Schmelzwasserabflusses an der aperen Oberfläche des Grossen Aletschgletschers (2200 m ü.M., 2. bis 27. August 1965) zwischen 3,0 und 22,5 mm/°C, im Akkumulationsgebiet des Gletschers (3366 m ü.M., 3. bis 19. August 1973) wurde sogar ein Bereich von 1,0 bis 47,0 mm/°C festgestellt. Durch die gleichzeitig durchgeföhrten Wärmehaushaltmessungen war es möglich, den Anteil der einzelnen, den Schmelzwasserabfluss steuernden Komponenten festzustellen.

Als Beispiele können die Resultate der Wärmebilanzstudie (Bild 7) vom 2. bis 27. August 1965 auf der Gletscherzunge des Grossen Aletschgletschers dienen. In Gleichung (2) entfällt für die temperierte Gletscheroberfläche der Bodenwärmestrom  $B$ ; die kurzwellige und die langwellige Strahlungsbilanz ( $S-E$ ) fassen wir zusammen in der Gesamtstrahlungsbilanz  $SB$  (auch Nettostrahlung genannt); für die zur Verfügung stehende Schmelzwärme  $M$  schreiben wir dann

$$M = SB - F - L$$

$F$  und  $L$  sind wieder die fühlbaren (Luftwärme) beziehungsweise die latenten Wärmeströme (Verdunstung beziehungsweise Kondensation). Beim latenten Wärmestrom überwiegt die Kondensation (an 25 Tagen) bei weitem die Verdunstung (nur an 5 Tagen), weshalb auch der latente Wärmestrom im Mittel zur Abschmelzung beiträgt. Im Mittel über die gesamte Messperiode ergab sich folgendes Resultat:

		cal/cm <sup>2</sup> Tag	%
Strahlungsbilanz	SB	267	71
Fühlbare Wärme	F	77,9	21
Latente Wärme	L	28,6	8
Schmelzwärme	M	373,5	100

Die verfügbare Schmelzwärme  $M$  lieferte im Mittel also eine Ablation von 47 mm/Tag entsprechend 544 l/s km<sup>2</sup> Schmelzwasserspende, wobei die Strahlungsbilanz mit 71% den weitaus grössten Anteil zur Abschmelzung beiträgt. Der latente Wärmestrom, der im Mittel nur 8% der Energie liefert, zeichnet sich allerdings durch eine hohe Schwankung in den Tageswerten aus, weshalb er für Abflussvorhersagen im Kurzfristbereich berücksichtigt werden sollte.

In Bild 8 sind für einen Schönwettertag der Gang des Schmelzwasserabflusses an der Gletscheroberfläche zusammen mit den meteorologischen Faktoren dargestellt. Die Wärmebilanzstudie im Akkumulationsgebiet des Grossen Aletschgletschers (3. bis 19. August 1973) zeigt ebenfalls die Strahlungsbilanz als wichtigste Wärmekomponente beim Abschmelzen der Schneedecke an. Infolge der Dampfdruckabnahme mit der Meereshöhe überwiegt in 3366 m ü.M. aber offensichtlich die Verdunstung, weshalb der latente Wärmestrom als Wärmeverbraucher (Wärmesenke) auftritt. Immerhin bleiben im Mittel noch 101 cal/cm<sup>2</sup>Tag an Wärme, um 12,6 mm/Tag abschmelzen zu lassen [2].

Der Schmelzwasserabfluss aus temporären Winterschneedecken im Alpenvorland und Mittelland interessiert besonders in Kombination mit Regenwetter. Dabei tritt infolge der geringen Sonneneinstrahlung bei solchen Ereignissen die Strahlungsbilanz als Wärmekomponente gegenüber den Austauschwärmeströmen  $F$  und  $L$  stark zurück. Der Regen selbst ist auch hier als Wärmequelle  $N$  vernachlässigbar. Als Beispiel sei der 26. Januar 1977 für das Gebiet Rietholzbach (Dreien SG, 3,2 km<sup>2</sup>, 680 bis 950 m ü.M) genannt:

	cal/cm <sup>2</sup> Tag	%
Strahlungsbilanz	SB	20,7
Fühlbare Wärme	F	83,2
Latente Wärme	L	36,3
Wärme aus Regen	N	8,8
Schmelzwärme	M	149,0
		100

Die zur Verfügung stehende Schmelzenergie  $M$  reicht zum Schmelzen von 18,7 mm/Tag Schnee-Wasseräquivalent, dazu kamen 21,5 mm/Tag Regen an diesem Tag.

### Hydrologische Grundlagenforschung und ihre Anwendung

Wie bereits einleitend festgestellt, sind in der angewandten Hydrologie Angaben über aktuelle und zukünftige Zustände und Prozesse unserer Wasservorkommen an der Oberfläche und im Untergrund gefragt. Dabei liegt es in der Natur der Hydrologie als erdwissenschaftlichem Fach, dass die vorhandenen Mess- und Beobachtungsdaten immer nur einen kleinen Ausschnitt der Wirklichkeit wiedergeben. So gibt es für einzelne Gebiete langjährige Niederschlagsmessreihen; Abflussmessungen und Grundwasserbeobachtungen liegen aber nur von wenigen Jahren vor. Gesucht sind aber zum Beispiel Angaben, ob die für die Trinkwasserversorgung vorhandenen nutzbaren Grundwasservorkommen auch in einer Folge von extremen Trockenjahren ausreichen. Dazu wird es nötig sein, neben der statistischen Bearbeitung der Niederschlagsdaten Grundlagen beizuziehen, welche die Zusammenhänge zwischen Niederschlägen, Direktabfluss, Bodenspeicherung, Versickerung, Verdunstung und Trockenwetterabfluss beschreiben. Es wird unter Umständen von ausschlaggebender Bedeutung sein, in welcher Jahreszeit und mit welchen Intensitäten die Niederschläge fallen, um entscheiden zu können, wieviel davon in sogenannten Trockenjahren noch zur Grundwasserneubildung beiträgt. Kenntnisse aus Grundlagenuntersuchungen sind dann die wesentlichen Stützen, um zu besser gesicherten Abschätzungen zu gelangen.

Oft wird nach der Häufigkeit extremer Hochwasserabflüsse gefragt. Will man die gängigen, einfachen empirischen Verfahren verbessern, um solche Extremabflüsse abzuschätzen, sind genauere Untersuchungen über die Variation der Abflusskoeffizienten unentbehrlich, um die Bedeutung ihrer Abhängigkeit von Niederschlagsintensität und -dauer, Bodenzustand und Gebietscharakteristiken beurteilen zu können. Die Hochwasser vom August 1978 in der Schweiz zeigen deutlich, wo es noch zu forschen gilt. Im Vordergrund stehen dabei auch Probleme des zeitlichen und räumlichen Skalenbereichs der höchsten Gebietsniederschläge.

Weitere Anwendungen sind laufende, aktuelle Vorhersagen (real time) der Abflussmessungen beziehungsweise der Wasserstände für bestimmte Flüsse. Handelt es sich um kurzfristige Vorhersagen des Abflusses über Stunden oder Tage, müssen die komplizierten Niederschlag/Ab-

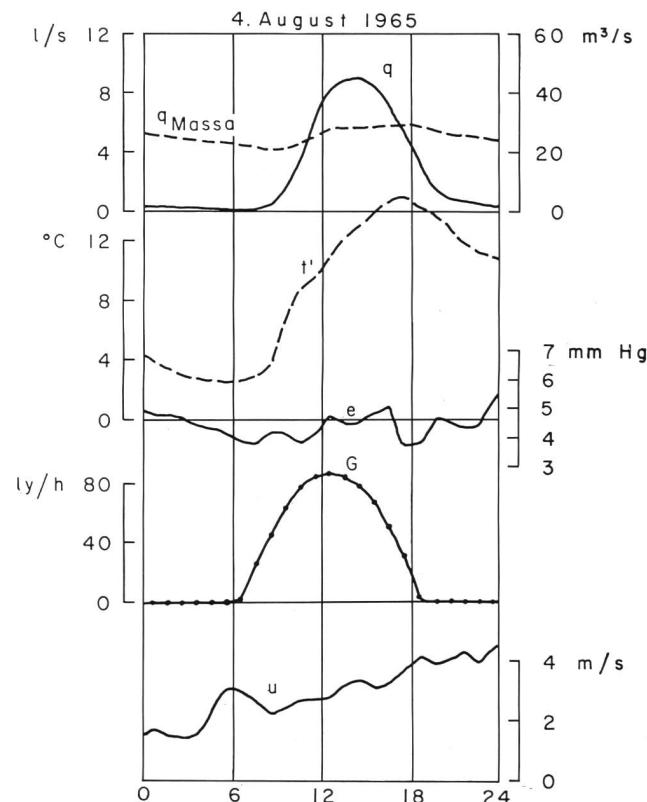


Bild 8. Beispiel eines Tagesganges des Abflusses vom Experimentierfeld auf dem Aletschgletscher ( $q$ ) und der Massa. Dazugehörige meteorologische Parameter: Lufttemperatur, registriert neben dem Gletscher ( $t'$ ), Wasserdampfdruck ( $e$ ), Globalstrahlung ( $G$ ) und Windgeschwindigkeit ( $u$ ), auf dem Gletscher gemessen.

fluss- Prozesse im Vorhersagemodell so «einfach» dargestellt werden, dass die in Raum und Zeit begrenzten Daten der vorhandenen Messnetze zur Berechnung beziehungsweise Vorhersage ausreichen. Erst die entsprechenden Kenntnisse über Niederschlag beziehungsweise Schmelzwasserabfluss ermöglichen es, auch aus begrenztem Datenmaterial die grösstmögliche Information über die hydrologischen Vorgänge herauszuziehen; auch erlauben sie, unüberbrückbare Lücken im Beobachtungsnetz zu erkennen, um entsprechende Vorschläge an die staatlichen Dienste begründet vorbringen zu können. Diese Überlegungen gelten ebenso für Vorhersagen im Langfristbereich [3,4].

Die Abteilung für Hydrologie der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie bemüht sich, einem breiten Spektrum von Fragestellungen nach hydrologischen Grundlagen und Anwendungen gerecht zu werden. Gute, solide Grundlagenforschung braucht viel Mühe und Geduld. Die Forschung über das Wasser als eine unserer Lebensgrundlagen und als zeitweise bedrohliches Element ist nicht nur eine interessante Beschäftigung für die Wissenschaftler, sondern auch eine Verpflichtung der Hochschule gegenüber der sie tragenden Gesellschaft.

#### Literatur

- [1] Germann P., Lang H., Schädler B., 1978: Flächenmässige Interpretation von Lysimeterdaten mit Hilfe von Bodenfeuchtemessungen. «Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.» 26, 61–66.
- [2] Lang H., Davidson G., Schädler B., 1977: Hydroglaciological investigations on the Ewigschneefeld – Grosser Aletschgletscher. «Z. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie» XII, 2, 109–124.
- [3] Verschiedene Autoren in: Hydrologische Prognosen für die Wasserwirtschaft. Mitt. Nr. 12, 1974, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
- [4] Vischer D. und Jensen H., 1978: Langfristprognosen für den Rheinabfluss in Rheinfelden. «Wasserwirtschaft» 68, 9, 6 p.

Adresse der Verfasser: Dr. Herbert Lang und Bruno Schädler, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, 8092 Zürich.