

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	94 (2002)
Heft:	7-8
Artikel:	Ein detaillierter hydrologischer Blick auf die Wasserressourcen der Schweiz : Niederschlagskartierung im Gebirge als Herausforderung
Autor:	Schädler, Bruno / Weingartner, Rolf
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-939642

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: 10.02.2026

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

Ein detaillierter hydrologischer Blick auf die Wasserressourcen der Schweiz

Niederschlagskartierung im Gebirge als Herausforderung

■ Bruno Schädler und Rolf Weingartner

Zusammenfassung

Im vorliegenden Aufsatz wird ein hydrologischer Ansatz vorgestellt, der es erlaubt, den Wasserhaushalt der Schweiz räumlich detailliert, also für jedes der 287 Bilanzierungsgebiete der Schweiz (Fläche 100–200 km²) darzustellen. «Hydrologisch» bedeutet, dass sowohl die Wasserhaushaltsskomponenten in einem Bilanzierungsgebiet als auch die Wasserbilanzen mehrerer Bilanzierungsgebiete aufeinander abgestimmt sind. Das wesentliche Merkmal des verwendeten Ansatzes besteht darin, dass der Gebietsniederschlag aus dem Gebietsabfluss, der Gebietsverdunstung und der Speicheränderung der Gletscher berechnet und nicht aus Messdaten abgeleitet wurde. Dieser Gebietsniederschlag, dessen Volumen aus hydrologischer Sicht plausibel ist, wurde beigezogen, um aktuell genutzte Niederschlagskarten der Schweiz zu beurteilen. Der Vergleich belegt die Komplexität und die Problematik der Erstellung von Niederschlagskarten insbesondere im Alpenraum. Die räumlich differenzierten Wasserbilanzen ermöglichen aufschlussreiche Einblicke in den Wasserhaushalt der Schweiz, wie anhand verschiedener Beispiele gezeigt wird.

Sommaire

Cet article propose une approche hydrologique permettant de représenter le bilan hydrique de la Suisse de façon détaillée dans l'espace, donc pour chacun des 287 bassins suisses pour le calcul du bilan (surface de 100 à 200 km²). L'adjectif «hydrologique» signifie que les éléments du bilan hydrique d'un bassin pour le calcul du bilan sont harmonisés, mais aussi les bilans hydriques de plusieurs de ces bassins. L'approche utilisée ici se caractérise essentiellement par le fait que les précipitations régionales ne sont pas dérivées des données pluviométriques mesurées, mais calculées à partir de l'écoulement régional, de l'évaporation régionale et de la variation des réserves des glaciers. Ces précipitations régionales, au volume plausible d'un point de vue hydrologique, ont été reprises pour évaluer les cartes pluviométriques de la Suisse utilisées actuellement. La comparaison prouve bien comme il est difficile de dresser des cartes de précipitations, notamment dans la région alpine. Comme le montrent divers exemples, les bilans hydriques différenciés dans l'espace contribuent à une meilleure connaissance du bilan hydrique de la Suisse.

1. Einleitung

In der im Sommer 2002 erschienenen sechsten Lieferung des «Hydrologischen Atlas der Schweiz» (HADES) liegt eine neue Karte des natürlichen Wasserhaushaltes vor. Darin werden erstmals flächendeckend für die ganze Schweiz alle Wasserhaushaltsskomponenten in den 287 so genannten Bilanzierungsgebieten des HADES dargestellt, nämlich Gebietsniederschlag (P), Gebietsabfluss (R), Gebietsverdunstung (E) und Speicheränderung der Gletscher (dS). Bei besonderen hydrogeologischen Verhältnissen – insbesondere in Karstgebieten – sind auch die natürlichen unterirdischen Zu- und Abflüsse (I) berücksichtigt.

Die Gleichung für die Wasserbilanz lautet:

$$P = R + E + dS - I$$

(Gleichung 1)

Der Wasserhaushalt beschreibt den natürlichen Wasserkreislauf in einem bestimmten Gebiet und für einen bestimmten Zeitraum. Er gibt einen Überblick über die langfristig verfügbaren Wasserressourcen. Im vorliegenden Fall wird der mittlere Wasserhaushalt der 30-jährigen Periode 1961–1990 betrachtet. Diese Angaben sind eine wichtige Grundlage für mannigfache wasserwirtschaftliche Planungen und Tätigkeiten. Durch die detaillierte räumliche Erfassung des Wasserhaushaltes lassen sich z.B. folgende Fragen beantworten: Wie gross ist der Beitrag eines hydrologischen Einzugsgebietes oder einer politischen Einheit am Abfluss des Rheins? Welche Kantone tragen überproportional zum Wasserschloss Schweiz bei? Wie gross ist der Anteil des Auslandes am turbinierten Wasser in einem Grenzkraftwerk? In welchem Kanton regnet es am meisten?

Das Konzept des «Hydrologischen Atlas» sieht vor, dass zahlreiche hydrologische Grundlagen in einem abgestimmten System von unterschiedlicher räumlicher Auflösung dargestellt werden:

- Auf der generellsten Ebene werden Resultate für die Flussgebiete (Reuss, Rhone, Ticino etc.) dargestellt. So zeigt die HADES-Tafel 6.2 den Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete, basierend auf den von Schädler (1985a) erarbeiteten Zahlen.
- Die zweite Ebene bilden die so genannten Bilanzierungsgebiete, welche die Flussgebiete in hydrologisch sinnvoller Weise unterteilen. Ihre Fläche liegt zwischen 100 und 200 km². Wie der Name zum Ausdruck bringt, bestand bereits in der Konzeptphase des «Hydrologischen Atlas» die Idee, auf dieser Ebene die Wasserbilanz darzustellen. Einige Vorarbeiten dazu sind in den vergangenen Jahren durchgeführt worden: Die HADES-Tafel 5.4 stellt die natürlichen Abflüsse der Periode 1961–1980 für die meisten der Bilanzierungsgebiete dar. Ebenso wurden gesamtschweizerische Karten der Niederschläge (Tafeln 2.2, 2.3, 2.6, 2.7) und der Verdunstung (Tafel 4.1) erarbeitet. Bis vor kurzer Zeit ist es allerdings nicht gelungen, flächendeckend für die ganze Schweiz räumlich detaillierte Wasserbilanzen zu entwickeln, welche alle Komponenten des Wasserhaushaltes ohne innere Widersprüche enthalten.
- Die unterste Ebene umfasst die Basisgebiete (10–50 km²). Zu Letzteren liegen bisher Angaben zu den Gebietskennwerten (HADES-Tafel 1.2) und zur Niedrigwasserkenngroesse Q₃₄₇ (Tafel 5.8) vor.

Zahlreiche Autoren haben bereits für einzelne Einzugsgebiete oder ganze Regionen der Schweiz Wasserbilanzen bestimmt. Übersichten dazu sind in Binggeli (1974), Leibundgut (1978), Baumgartner et al. (1983) und Schädler (1985a, 1985b) zu finden. Schon 1914 hat Roder eine Bilanz des bündnerischen Rheingebietes bis Felsberg publiziert (Roder, 1914). Die Verdunstung – als Differenz zwischen Niederschlag und Abfluss berechnet – wurde mit 716 mm ausgewiesen, was aus heutiger Sicht (343 mm) zweifellos viel zu hoch ist. Lütschg (1926) führte fundierte und überaus subtile Untersuchungen in

kleineren und grösseren Einzugsgebieten in den Alpen (Mattmark, zahlreiche Gebiete im Wallis, Lucendro, Ritom, Lauerzersee) durch. Allerdings konnte er in keinem der untersuchten Gebiete Aussagen zur Verdunstung machen. Für Gebiete ausserhalb des speziell dicht mit Messstationen bestückten Mattmarkgebietes bemerkte er zur Frage der Wasserhaushaltsbestimmung: «Bei der geringen Zahl von Niederschlagsstationen im Hochalpenteil [...] war es von vornherein ganz ausgeschlossen, der Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss in zahlenmässiger Weise [...] näher zu treten.»

Walser hat in der Zeit zwischen 1954 und 1982 in beinahe allen grösseren Flussgebieten der Schweiz den Wasserhaushalt untersucht, zum Beispiel auch im Reussgebiet (Walser, 1958). In neuerer Zeit haben Baumgartner et al. (1983) eine umfassende Arbeit über den gesamten Alpenraum mit einem abgeglichenen Wasserhaushalt der Periode 1931–1960 publiziert und die Ergebnisse in Isolinienkarten der Wasserhaushaltelemente (im Massstab 1:500 000) dargestellt. Schädler (1985a) hat für die Periode 1901–1980 den Wasserhaushalt für alle grösseren Einzugsgebiete der Schweiz in monatlicher Auflösung berechnet.

Die meisten Autoren haben als Ausgangslage ihrer Berechnungen die Niederschlagskarte von Uttinger (1949) verwendet. Allen Autoren gemeinsam ist, dass sie die Verdunstung grundsätzlich als Restglied der Wasserbilanz, also als Differenz zwischen Niederschlag und Abfluss berechnet haben. Einzig Kasser (1959, 1984) hat bei der Bestimmung des Wasserhaushaltes im stark vergletscherten Einzugsgebiet der Massa (Aletschgletscher) sowie für das Einzugsgebiet der Rhone bis zum Genfersee den Gebietsniederschlag als Restglied bestimmt. Kasser hat diese Vorgehensweise gewählt, weil die Berechnung des Gebietsniederschlag mit Hilfe von Niederschlagsdaten im Rhonegebiet aufgrund der mangelhaften Datenlage kaum möglich sei.

Im Gebirge ist die Interpolation des Niederschlages zwischen den Messstationen und noch ausgeprägter die Extrapolation in Höhen ohne Niederschlagsmessung eine Quelle grosser Unsicherheiten und Fehler und deshalb Anlass dazu, dass der Wasserhaushalt eines hochgelegenen Einzugsgebietes nicht exakt bestimmt werden kann. Bild 1 zeigt die Problematik am Beispiel der Bilanzierungsgebiete im Einzugsgebiet des Rheins bis Chur.

Die Verdunstung der 19 Bilanzierungsgebiete wurde als Restglied der Wasserbilanz basierend auf der Karte der korrigierten Niederschläge in Tafel 2.2 (Kirchhofer

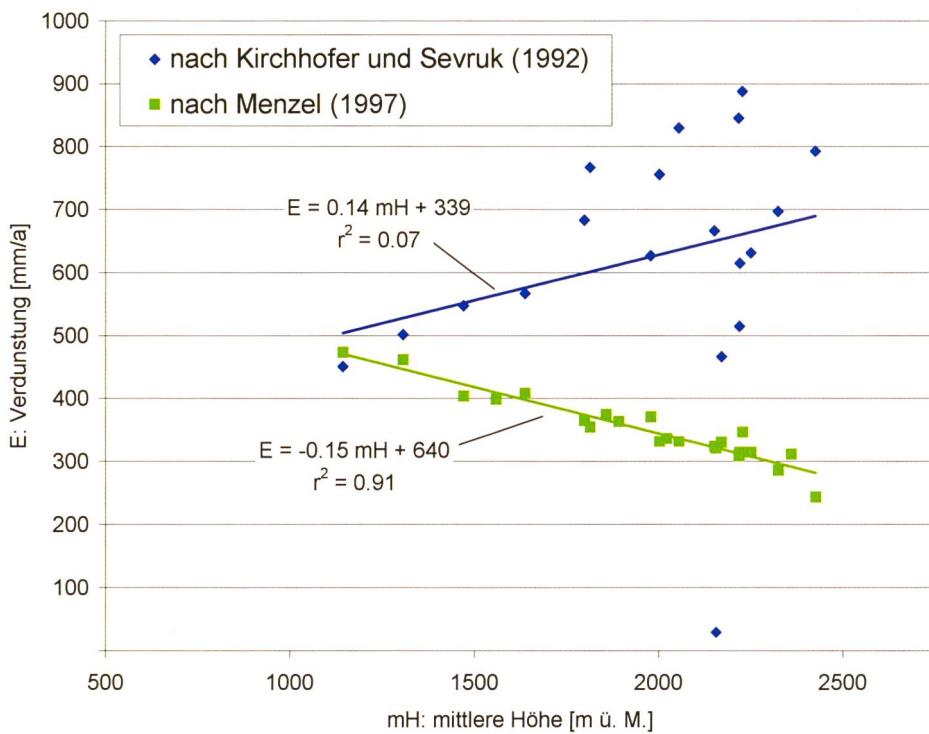


Bild 1. Berechnete Verdunstung der Bilanzierungsgebiete im Einzugsgebiet des Rheins bis Felsberg, basierend auf gemessenen und regionalisierten Niederschlägen aus Kirchhofer und Sevruk (1992). Gleichzeitig dargestellt sind die mit einem physikalischen Modell nach Menzel (1997) berechneten Werte.

und Sevruk, 1992) des «Hydrologischen Atlas» berechnet. Die Analyse zeigt entgegen der physikalisch begründeten Erwartung

- eine mit ansteigender Gebietshöhe zunehmende Verdunstung,
- Werte, welche kaum einen Zusammenhang mit der Einzugsgebietshöhe haben, sowie
- einzelne Gebiete mit viel zu hohen oder viel zu tiefen, nicht plausiblen Werten.

Da es sich bei den hier ausgewählten Einzugsgebieten um Gebiete mit verlässlichen und plausiblen natürlichen Abflussdaten handelt, muss davon ausgegangen werden, dass die Fehler in der Verdunstungsrechnung hauptsächlich auf die fehlerhafte Niederschlagsbestimmung zurückzuführen sind.

Dies bedeutet, dass insbesondere im Gebirgsraum für die Bestimmung eines kohärenten Wasserhaushaltes neue Ansätze zur Herleitung des Gebietsniederschlages gewählt werden müssen. Bereits Lang (1985) hat in seinen Schlussfolgerungen zur Diskussion der Niederschlagverteilung im Gebirge festgehalten: «Der indirekte Weg zur Bestimmung der Gebietsniederschläge führt über die Wasserhaushaltsgleichung. Da die Verdunstung im Hochgebirge im Vergleich zu Niederschlag und Abfluss um etwa eine ganze Grössenordnung (d.h. um etwa einen Faktor zehn [die Autoren]) kleiner ist, sind in den Gebieten mit guten Abflussmessstellen möglicherweise die indirekt aus der Wasserhaushaltsgleichung abgeleiteten Gebietsniederschläge das genaueste, was wir aus den Hochregionen über den Niederschlag kennen.»

derschläge das genaueste, was wir aus den Hochregionen über den Niederschlag kennen.»

2. Methodik

Aufgrund der im letzten Kapitel geschilderten Problematik wurde für die Herleitung einer räumlich differenzierten Wasserbilanz der Schweiz der Vorschlag von Lang (1985) aufgegriffen und der Gebietsniederschlag eines Bilanzierungsgebietes aus dem Abfluss, der Verdunstung und der Speicheränderung der Gletscher berechnet (s. Gleichung 1). Entscheidend für die erfolgreiche Anwendung der vorgeschlagenen Vorgehensweise ist, dass vor allem verlässliche Abfluss- und Verdunstungsdaten zur Verfügung stehen. Die Abflussdaten für die Bilanzierungsgebiete wurden bereits von Schädler und Weingartner (1992) eingehend analysiert und diejenigen Gebiete identifiziert, für die plausible Daten verfügbar sind. Bei der Verdunstung sind in den letzten Jahren – dank physikalisch basierter Modelle – entscheidende Fortschritte erzielt worden. Die Verdunstungskarte von Menzel et al. (1999) (HADES-Tafel 4.1) zeigt erstmals die detaillierte Verteilung der aktuellen Verdunstung in der Schweiz. Die dort dargestellten Werte konnten mit Methoden, welche weitgehend auf unabhängigen Daten beruhen, verifiziert werden: mit Punktmessungen, mit speziellen Wasserhaushaltsuntersuchungen (Schädler, 1985a, Schädler und Bigler, 1995) sowie auf der Grundlage der

verfügbarer Strahlungsenergie (Zgraggen und Ohmura, 2002). Ausgehend von einzelnen repräsentativen Gletschern, für welche Jahreswerte der Massenänderung vorliegen (Müller-Lemans et al., 1994), liessen sich Aussagen zur Speicheränderung vergletscherter Gebiete ableiten. Damit waren die notwendigen Voraussetzungen gegeben, den Wasserhaushalt der Bilanzierungsgebiete zu bestimmen.

Im Hinblick auf Genauigkeitsüberlegungen ist den Fehlern der Abflussdaten grösste Beachtung zu schenken, da in der Schweiz im Jahresmittel 30 bis 88% (im Durchschnitt 68%) des Niederschlags zum Abfluss gelangen. Die Verdunstungswerte sind besonders im Gebirge wesentlich kleiner als Niederschlag und Abfluss. Damit wirken sich Fehler im Abflussbeitrag entscheidend, Fehler im Verdunstungsbetrag hingegen nur geringfügig auf den Fehler bei der Niederschlagsberechnung aus. Obwohl die relativen Fehler bei der Abschätzung der Massenbilanzänderung der Gletscher verhältnismässig gross sind, haben sie absolut gesehen einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit des Gebietsniederschlags.

Aus diesen Genauigkeitsüberlegungen lassen sich Anforderungen an die Daten in den Bilanzierungsgebieten ableiten. Dazu werden insbesondere die Plausibilitätsstufen der Abflussdaten von Schädler und Weingartner (1992) verwendet:

- In Gebieten mit verlässlichen Abflussdaten wird die Wasserbilanz direkt berechnet und für die weiteren Analysen unverändert übernommen.
- Bei den übrigen Gebieten kann die Wasserbilanz wegen der Unsicherheit der Abflussdaten nur näherungsweise bestimmt werden. Deshalb wird – wo möglich – ein regionaler Abgleich durchgeführt (Kap. 2.1). Dazu sind übergeordnete Einzugsgebiete notwendig, welche mehrere Bilanzierungs-

gebiete umfassen und über verlässliche Abflussdaten verfügen.

- In einigen Regionen entlang der Landesgrenze lassen sich übergeordnete Einzugsgebiete nicht finden, sodass dort ein regionaler Abgleich nicht möglich ist (Kap. 2.2).

Somit ergeben sich zur Erhebung der Wasserbilanz der Bilanzierungsgebiete grundsätzlich die zwei in Kap. 2.1 und 2.2 dargestellten Vorgehensweisen.

2.1 Wasserbilanzberechnungen mit regionalem Abgleich

In Bilanzierungsgebieten mit plausiblen Abflussdaten werden alle Wasserhaushaltsskomponenten, also auch der aus dem Abfluss berechnete Gebietsniederschlag, unverändert übernommen (Plausibilität der Wasserbilanz = 1). Für die übrigen Gebiete wird der Gebietsniederschlag mit weniger plausiblen Abflussdaten berechnet (Plausibilität = 2) oder mit regionalhydrologischen Modellen abgeschätzt (Plausibilität = 3).

Die Summe der Gebietsniederschläge aller Bilanzierungsgebiete muss dem Gebietsniederschlag des übergeordneten Einzugsgebietes entsprechen. Der Ausgleich einer allfälligen Differenz geschieht ausschliesslich beim Gebietsniederschlag der Gebiete mit Plausibilität 2 und 3. Anschliessend muss in diesen Bilanzierungsgebieten der Abfluss über die Wasserbilanz berechnet werden (Bild 2).

2.2 Wasserbilanzberechnungen ohne regionalen Abgleich

Es wird analog zu Kapitel 2.1 vorgegangen; allerdings ist hier ein regionaler Abgleich nicht möglich. Das heisst, dass die geschätzten Wasserbilanzen unverändert übernommen werden müssen, weil eine regionale Überprüfung nicht durchgeführt werden kann. Deshalb ist auch die Plausibilität der Wasserbilanz nicht abschätzbar (Plausibilität = 4).

2.3 Die hydrologische Wasserbilanz

Insgesamt erhalten wir ein in sich geschlossenes System zur Herleitung von Wasserbilanzen, das von plausiblen Werten ausgeht und regional abgestimmte Wasserbilanzen erzeugt. Dies bedeutet, dass die einzelnen Komponenten und alle Gebiete *logisch* ineinander überführt werden können. Es handelt sich also um einen hydrologischen Lösungsansatz, bei dem die Plausibilität der Ergebnisse klar ersichtlich ist: 57% aller Bilanzierungsgebiete fallen in die Plausibilitätsstufe 1, 16% in Stufe 2 und 9% in Stufe 3. Bei 18% der Bilanzierungsgebiete ist die Plausibilität unbekannt (Stufe 4).

3. Resultate

Die in Kapitel 2 dargestellte Methodik bildete die Grundlage zur Ausarbeitung der neuen HADES-Tafel «Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990» (Schädler und Weingartner 2002). Die Zeitperiode 1961–1990 wurde vor allem aus zwei Gründen gewählt:

- aktuellste Standardperiode der Weltorganisation für Meteorologie (WMO),
- gute Verfügbarkeit von Daten und Informationen.

In Bild 3 werden am Beispiel des Rheineinzugsgebietes die Mittelwerte der Wasserhaushaltsskomponenten dieser 30-jährigen Periode mit den Mittelwerten der übergreifenden Periodenmittel 1901–1930, 1902–1931, ..., 1971–2000 verglichen (Daten aus Schädler, 1985a). Dabei lassen sich interessante Tendenzen ablesen:

- Die Periodenmittel der Verdunstung nahmen – wohl hauptsächlich infolge des Temperaturanstiegs – im Laufe des 20. Jahrhunderts kontinuierlich zu; Perioden vor der Standardperiode 1961–1990 weisen deshalb durchwegs kleinere, Perioden nach 1961–1990 durchwegs grössere Werte als die Standardperiode auf.



Bild 2. Berechnung der Wasserbilanz der Bilanzierungsgebiete mit regionalem Abgleich.

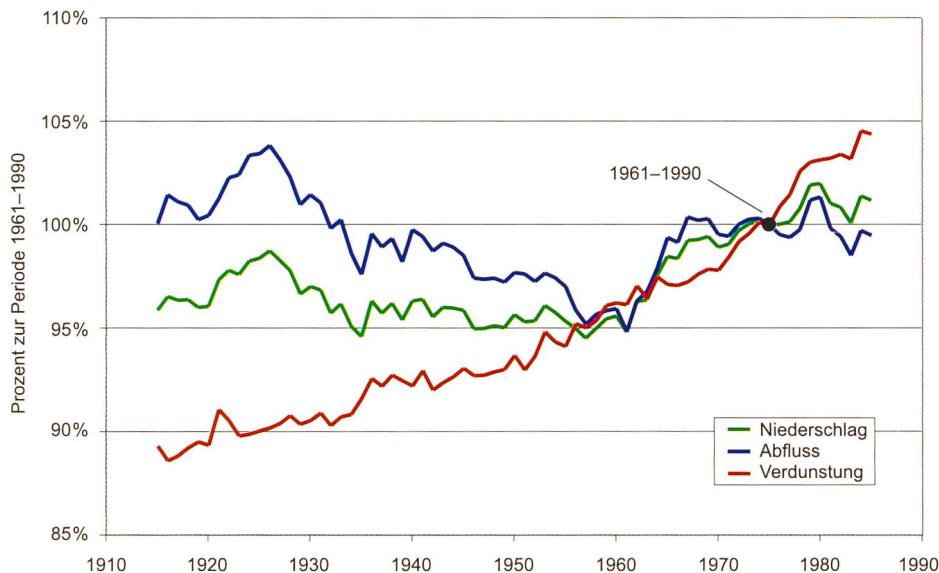


Bild 3. Vergleich der übergreifenden 30-jährigen Periodenmittel (1901–1930, 1902–1931, ..., 1971–2000) der Wasserhaushaltsskomponenten des Rheingebietes (Schädlar, 1985a) mit den Werten der Periode 1961–1990. Beispiel 1920: Die Verdunstung der Periode 1906–1935 erreicht 89% des Verdunstungswerts der Periode 1961–1990.

- Der mittlere Gebietsniederschlag blieb zu Beginn des letzten Jahrhunderts relativ konstant mit Werten um 96% des Periodenmittels 1961–1990. Bemerkenswert ist die markante Zunahme der Gebietsniederschläge ab der Periode 1946–1975. Seit der Periode 1961–1990 scheint sich der Niederschlag wieder auf einem nun höheren Niveau einzupendeln.
- Im Gebietsabfluss kommen vor allem die Effekte der zeitlichen Schwankungen von Niederschlag und Verdunstung zum Tragen. Es resultiert in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Abnahme, gefolgt von einer Zunahme und dann einer «Einpendlung» analog dem Niederschlagsverlauf.

In den anderen Flussgebieten der Schweiz sind – mit Ausnahme des Inngebietes – ähnliche zeitliche Muster erkennbar. Erwähnenswert ist die markante Zunahme der mittleren Gebietsverdunstung beim Ticino mit Werten um 360 mm/a zu Beginn des Jahrhunderts und einem Wert von 485 mm/a für die Periode 1961–1990. Ziemlich anders verhält sich das Inngebiet: Die mittlere Gebietsverdunstung war zu Beginn und wiederum am Ende des 20. Jahrhunderts systematisch höher als in der Standardperiode 1961–1990; sie zeigt also einen U-förmigen zeitlichen Verlauf. Die mittleren Gebietsniederschläge unterliegen geringeren zeitlichen Schwankungen als in den anderen Flussgebieten; der in Bild 3 für das Rheingebiet dokumentierte Anstieg des Niederschlags in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ist hier nicht zu beobachten.

Insgesamt weist die WMO-Standardperiode 1961–1990, auf der die nun folgenden Analysen beruhen, höhere Nieder-

schlags- und Verdunstungswerte auf als der grösste Teil der übergreifenden Periodenmittel im 20. Jahrhundert. Einzig das hoch gelegene Inngebiet (mittlere Höhe um 1800 m) macht davon eine Ausnahme.

Wie im Kapitel 2 besprochen, wurde der Wasserhaushalt 1961–1990 aller 287 Bilanzierungsgebiete der Schweiz bestimmt. Maximale Gebietsniederschläge mit Werten > 2300 mm/a treten vor allem in den Gebieten zwischen Grimsel/Gotthard und Säntis auf. Die Abflusshöhen erreichen hier Werte um 2000 mm/a, was einer mittleren jährlichen Abflussspende von rund 70 l/s km² entspricht. Die minimalen Gebietsniederschläge mit Werten zwischen 800 und 900 mm/a sind im Seeland, im Bodenseegebiet und in der Region Basel zu finden. Werte dieser Grössenordnung sind auch im Wallis und Engadin zu

beobachten, und zwar in den tiefer gelegenen, von Tallagen dominierten Bilanzierungsgebieten. In diesen niederschlagsarmen Gebieten erreichen die Abflüsse Werte um 300 mm/a, was Abflussspenden um 10 l/s km² entspricht. Allein schon diese Gegenüberstellung der Maxima und Minima zeigt das grosse Spektrum des Wasserhaushalts innerhalb des Wasserschlosses Schweiz. Dieses Spektrum gelangt auch in Bild 4 zum Ausdruck, welches die Schwankungen der Wasserhaushaltselemente entlang eines Nord-Süd-Profilis darstellt. Die Verdunstungsanteile am Niederschlag erreichen im Mittelland und Jura Werte um 50%, können aber im Einzelfall bis 70% des Gebietsniederschlags ausmachen. Die absoluten Werte der Gebietsverdunstung liegen in diesen Gebieten zwischen 500 und 650 mm/a mit Maximalwerten bis rund 720 mm/a. Im Alpenraum sind die Verdunstungsanteile am Gebietsniederschlag sehr klein – dementsprechend hoch sind die Abflusskoeffizienten. In hochalpinen Bilanzierungsgebieten gelangen im Mittel bis zu 90% der Niederschläge zum Abfluss.

Aufgrund des hydrologischen Vorgehens bei der Bestimmung der Wasserbilanzen ist es nun auch möglich, die Wasserbilanzen von grösseren, mehrere Bilanzierungsgebiete umfassenden Einheiten auszuweisen. Auf der im «Hydrologischen Atlas» publizierten Tafel zum Wasserhaushalt wird auch der Wasserhaushalt grösserer Teileinzugsgebiete sowie aller Kantone dargestellt. Wir möchten aus dieser Betrachtungsweise nur einige wenige Aspekte herausgreifen. Interessant ist beispielsweise, dass beim Gesamtabfluss des Rheins an der Landesgrenze in Basel, der im Mittel 1089 m³/s oder 34 355 Mio. m³/a beträgt, rund 23% aus dem benachbarten Ausland stammen. Im Inland, auf schweizerischem Boden, werden somit

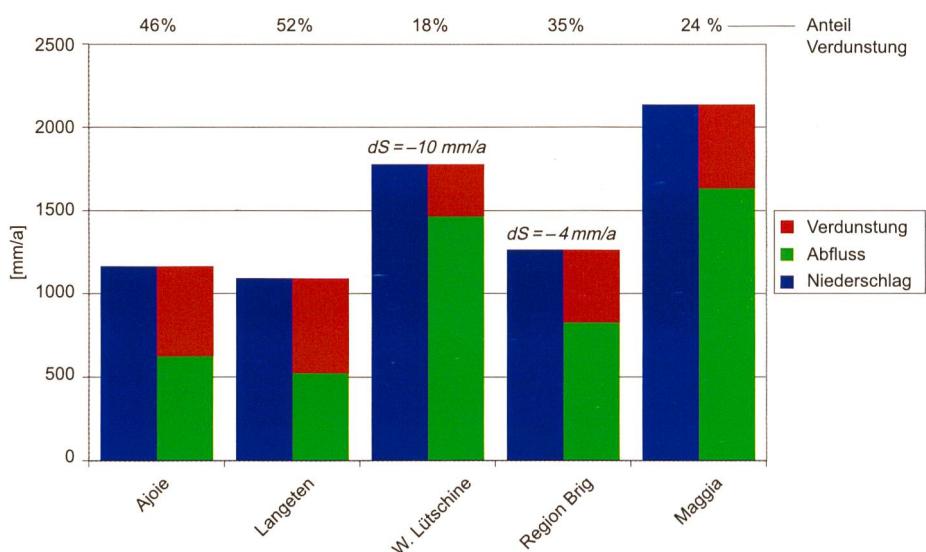


Bild 4. Charakteristische mittlere Wasserbilanzen 1961–1990 von Bilanzierungsgebieten entlang eines Profils Jura–Wallis–Tessin (dS: Speicheränderung der Gletscher).

840 m³/s oder 26 496 Mio. m³/a erzeugt. Dies entspricht rund 65% des gesamten Abflusses, der aus der Schweiz abfließt (Tabelle 2). Die Rhone trägt beispielsweise mit 17% und der Inn mit 4% zu diesem Gesamtabfluss aus der Schweiz bei.

Ähnliche Aussagen lassen sich nun auch in Bezug auf die Kantone machen. Das Spektrum der Beiträge zum Gesamtabfluss der Schweiz reicht von 19% (Kanton Graubünden) bis 0,03% (Kanton Basel-Stadt). In diesen Zahlen widerspiegeln sich natürlich auch die unterschiedlichen Kantonsflächen. Um diesen Einfluss auszuschalten, wurde für jeden Kanton ein «Effizienzfaktor» berechnet, der sich aus dem Verhältnis zwischen dem Abflussbeitrag eines Kantons und dessen Flächenanteil ergibt. In dieser Betrachtungsweise erreicht der Kanton Uri einen Faktor von 1,7, gefolgt von Glarus mit einem Faktor von 1,6 sowie Schwyz und Tessin mit 1,5. Im Kanton Uri wird also dank der hohen Niederschläge 1,7-mal mehr Abfluss erzeugt als aufgrund des Flächenanteils zu erwarten wäre. In den Kantonen Thurgau, Schaffhausen und Genf ist die Abflusseffizienz – wegen der kleinen Niederschlagswerte und der hohen Verdunstungswerte – mit einem Wert von 0,4 vergleichsweise gering. So sind dann auch die Wasserbilanzen des Kantons Uri und des Kantons Genf sehr verschieden (Tabelle 1).

Bild 5 zeigt einen Ausschnitt aus einer für den «Hydrologischen Atlas der Schweiz» erstellten Karte, welche die wichtigsten wasserhaushaltlichen Merkmale der grösseren Teileinzugsgebiete und der Kantone darstellt. Betrachten wir als erstes die Situation beim Zusammenfluss von Aare, Reuss und Limmat. Die Aare (bis Brugg) trägt im Mittel 10 108 Mio. m^3/a zum Gesamtabfluss des Rheins an der Landesgrenze von 34 355 Mio. m^3/a bei, die Reuss 4417 Mio. m^3/a und die Limmat 3201 Mio. m^3/a . Im Weiteren veranschaulicht die Karte, dass im Kanton Aargau nur 394 Mio. m^3/a des Gesamtabflusses der Aare (bei der Rheinmündung) von 17 798 Mio. m^3/a gebildet werden. Der Kanton Aargau trägt aber auch mit 120 Mio. m^3/a zum Gesamtabfluss der Reuss und mit 54 Mio. m^3/a zum Abfluss der Limmat bei.

Aus dem Zusammenzug der Bilanzierungsgebiete lässt sich nun die hydrologische Bilanz der Schweiz ableiten, die in Tabelle 2 ausgewiesen ist. Diese Bilanz stimmt in den Grössenordnungen mit den Werten überein, die Schädler (1985a) bzw. Schädler und Bigler (1992) in einer gesamtschweizerischen Wasserhaushaltsstudie erhalten haben. Darin zeigt sich einmal mehr, dass es bei grösseren Gebieten wegen des Fehlerausgleiches weniger problematisch ist, den Wasserhaushalt und insbesondere die Ge-

Kanton	$P [mm/a]$	$R [mm/a]$	$E [mm/a]$	$dS [mm/a]$	$R/P [-]$	«Effizienz»
Uri	2088	1711	382	-5	0,81	1,7
Genf	981	363	618	-	0,37	0,4

Tabelle 1. Wasserbilanz 1961–1990 eines niederschlagsreichen und eines niederschlagsarmen Kantons («Effizienz» siehe Text).

Fläche [km ²]	mittlere Höhe [m]	P [mm/a]	R [mm/a]	E [mm/a]	dS [mm/a]	R [m ³ /s]	Periode, Autoren
41285	1312	1458	991	469	-2	1296	1961–1990; hydrologische Wasserbilanz; Schädler und Weingartner (2002)
41285	1312	1481	961	513	7,5	1257	1961–1980; Schädler und Bigler (1992)

Tabelle 2. Wasserbilanzen der Schweiz nach unterschiedlichen Autoren.

bietsniederschläge zu bestimmen. Die positive Speicheränderung von 7,5 mm/a bei Schädler und Bigler (1992) ist nicht sehr typisch für die Entwicklung im 20. Jahrhundert. Sie ist aber bedingt durch eine kurzfristige Wachstumsphase der Gletscher am Ende der 1960er- und zu Beginn der 1970er-Jahre.

4. Vergleich von Niederschlagskarten

Die hier vorgestellten Analysen führen – wie wir im letzten Kapitel gesehen haben – zu wasserhaushaltlich abgestützten Gebietsniederschlägen auf Stufe Bilanzierungsgebiete, übergeordnete Einzugsgebiete (mehrere Bilanzierungsgebiete), Flussgebiete, Kantone und gesamte Schweiz. Diese Ge-

bietsniederschläge wurden weitgehend unabhängig von Niederschlagsmesswerten ermittelt. Ihr Volumen ist aus hydrologischer Sicht abgesichert, da sie meistens über die Wasserbilanz berechnet wurden (Gleichung 1). Die Gebietsniederschläge bilden ein Integral über eine grössere Fläche und haben deshalb eine weit grössere Aussagekraft als Stationsniederschläge, die durch lokale Faktoren massgeblich beeinflusst werden und die – vor allem im Alpenraum – die höheren Lagen nur ungenügend repräsentieren.

Die wasserhaushaltlich ermittelten Gebietsniederschläge weisen einen relativ kleinen Fehler auf. Für den Gebietsniederschlag der Schweiz kann der Fehler wie folgt abgeschätzt werden: Beim Abfluss muss mit

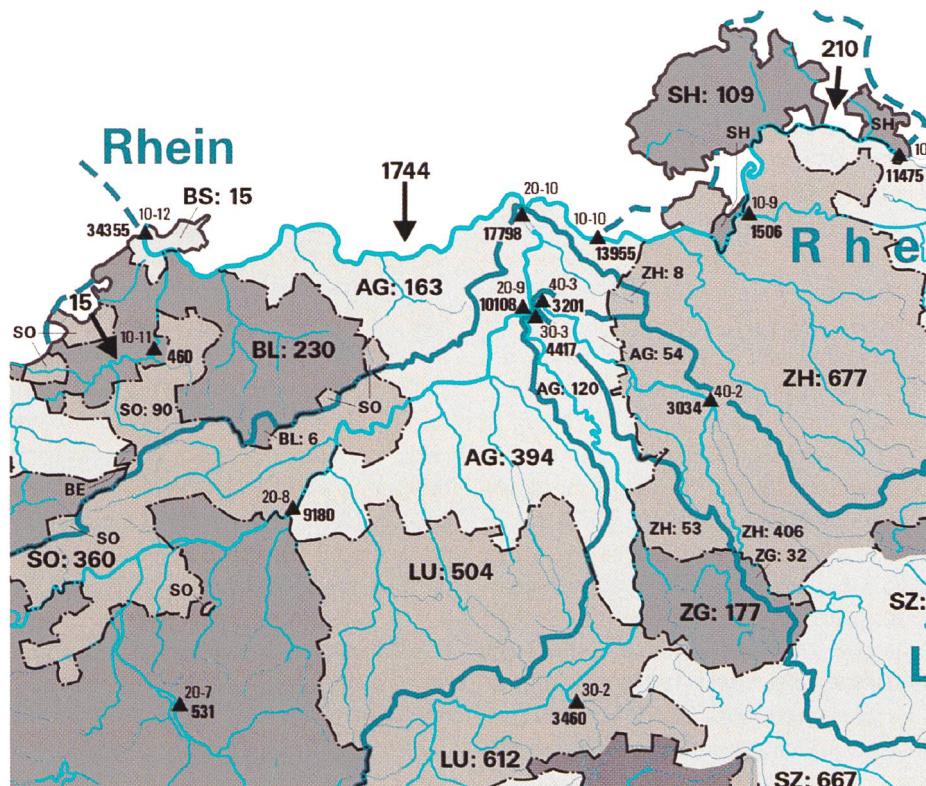


Bild 5. Ausschnitt aus der Karte «Mittleres jährliches Abflussvolumen der Kantone und ausgewählter Einzugsgebiete 1961–1990» der HADES-Tafel 6.3 (Schädler und Weingartner, 2002)

▲ 10108 Bestimmungspunkt mit mittlerem Abflussvolumen [Mio. m³/a]

AG: 394 mittlerer Beitrag eines Kantons [Mio. m³/a].

Autor	Jahr	Periode	Kurzbeschrieb der Methode
Schwarb et al.	2001	1971–1990	Der Untersuchungsraum wird in ein Gitternetz mit einer Auflösung von 1,25" (2 km) unterteilt. Zur Berechnung des Niederschlags an einem Gitterpunkt wird aus den umliegenden Stationen ein gewichteter Gradient bestimmt. Stationen in ähnlicher topografischer Lage wie der zu interpolierende Gitterpunkt erhalten dabei ein grösseres Gewicht.
Rohmann und Menzel	1999	1973–1992	Auf der Basis von 425 Stationen mit Tagessammeln und 69 Jahrestotalisatoren werden für 48 nach lokalklimatischen Gesichtspunkten ausgesuchten Regionen vertikale Niederschlagsgradienten berechnet. Die Gradienten werden 256 gleichmässig verteilten Stützstellen zugewiesen und mit Kriging-Verfahren auf ein 2-km-Gitternetz interpoliert. Anschliessend erfolgte eine Umrechnung der Jahresniederschläge der 425 N-Stationen auf ein Niveau von 1000 m ü.M. Erneutes Kriging der Ergebnisse auf ein 2-km-Gitternetz und anschliessend Umrechnung mit Hilfe der interpolierten Gradienten auf die wahre Topografie. Es wird angenommen, dass der Niederschlag oberhalb 3500 m ü.M. nicht weiter zunimmt.
Kirchhofer und Sevruk (korr.)	1992	1951–1980	Korrektur des systematischen Niederschlagsmessfehlers (vgl. Sevruk 1985); das Ausmass der Korrektur ist in Sevruk und Kirchhofer (1992) dargestellt. Anschliessend erfolgt eine Reduktion der Stationswerte mit einem Einheitsgradienten von 80 mm/100 m auf ein Niveau von 1000 m ü.M. Die reduzierten Stationswerte werden mittels Kriging räumlich interpoliert (Auflösung: 1-km-Raster). Die Umrechnung der interpolierten, reduzierten Raster-Niederschläge auf das wahre Relief geschieht wiederum unter Verwendung des Einheitsgradienten.
Kirchhofer und Sevruk (unkorr.)	1992	1951–1980	Wie Kirchhofer und Sevruk (korr.), aber ohne Korrektur des systematischen Niederschlagsmessfehlers
Baumgartner et al.	1983	1931–1960	Die ausgewiesenen Gebietsniederschläge gehen von der Karte von Uttinger (1949) aus, deren Werte an jene der Nachbarländer angepasst wurden. Die so ermittelten Gebietsniederschläge wurden in einem weiteren Schritt anhand der Wasserbilanz abgeglichen.
Uttinger	1949	1901–1940	Die Herleitung der Karten basiert auf regionalen Gradienten in Kombination mit einer «gutachterlichen Vorgehensweise».

Tabelle 3. Übersicht über Informationen (Karten, digitale Datensätze) zum Jahresniederschlag.

einem Fehler von 2 bis 4 % gerechnet werden (Schädler, 1985a), was einem absoluten Fehler von höchstens ± 40 mm entspricht. Ein angenommener maximaler Fehler von 10% bei der Verdunstung entspricht weiteren ± 50 mm. Damit beträgt der Gesamtfehler für den Gebietsniederschlag maximal ± 100 mm bzw. maximal $\pm 7\%$. In einzelnen Bilanzierungsgebieten können je nach Datenlage auch grössere Fehler auftreten. Mit den in Kapitel 2.3 diskutierten Angaben zur Plausibilität der Wasserbilanz konnten die Fehler der Bilanzierungsgebiete qualitativ eingegrenzt werden.

Die wasserhaushaltlich abgestützten Gebietsniederschläge (BS/Wg; Tabelle 4) werden nun beigezogen, um die in der Schweiz vorhandenen, aktuell genutzten Karten bzw. Datensätze zum Jahresniederschlag (Tabelle 3) aus hydrologischer Sicht zu beurteilen. Dazu wurde aus jeder Quelle der Gebietsniederschlag der Schweiz und ausgewählter Einzugsgebiete bestimmt. Um einen Vergleich mit den wasserhaushaltlich abgestützten Gebietsniederschlägen der Standardperiode 1961–1990 (BS/Wg, Referenz) wirklich zu ermöglichen, wurden die aus den einzelnen Quellen bestimmten Werte, die meist einen anderen Zeitraum umfassen, auf die Standardperiode reduziert (vgl. Bild 3). In

der Tabelle 4 sind die Ergebnisse dieses Vergleichs zusammengestellt. Sie können wie folgt beurteilt werden:

Gebietsniederschlag Schweiz: Mit Ausnahme des Gebietsniederschlags von Kirchhofer und Sevruk (korr.) bewegen sich alle Werte in einem Bereich von 1460 mm ± 75 mm ($\pm 5\%$). Der Gebietsniederschlag Schweiz von 1460 mm/a scheint damit für die Periode 1961–1990 durch zahlreiche mehr oder weniger unabhängige Quellen gesichert zu sein. Die Fehler, die in Teileinzugsgebieten auftreten, gleichen sich offenbar über grössere Räume aus, sodass alle Ansätze einen ähnlichen Gebietsniederschlag für die Schweiz ergeben. Einzig der von Kirchhofer und Sevruk ausgewiesene, nach dem systematischen Messfehler korrigierte Gebietsniederschlag ist deutlich höher.

Alpenraum: Der Ansatz von Schwarb et al. unterschätzt den Jahresniederschlag im Alpenraum systematisch. Hierin ist wohl auch der Grund zu suchen, dass der Gebietsniederschlag Schweiz nach Schwarb et al. insgesamt um 5% kleiner ist als die Referenz. Im Weiteren sticht die massive Überschätzung von Kirchhofer und Sevruk (korr.) ins Auge. Auch die Werte, die aufgrund unkorrigierter Ausgangsdaten ermittelt wurden (Kirchhofer und Sevruk [unkorr.]), sind zum Teil markant

grösser als der Referenzwert. Die Verfahren von Uttinger, Rohmann und Menzel und Baumgartner et al. ergeben Gebietsniederschläge, die relativ geringfügig von der Referenz abweichen.

Mittelland, Jura: Im Zuflussgebiet des Neuenburgersees (ohne Broye) sind sich die nach den unterschiedlichen Verfahren ermittelten Gebietsniederschläge relativ ähnlich. Mit den Verfahren von Schwarb et al. und Uttinger erhalten wir sogar Werte, die nur minimal vom Referenzwert abweichen. Es fällt auf, dass im Einzugsgebiet der Birs alle Gebietsniederschläge grösser sind als die Referenz.

Alpensüdseite: Mit Ausnahme des Verfahrens von Schwarb et al. im Einzugsgebiet des Ticino wird der Referenzwert leicht bis sehr stark überschätzt.

Diese Ergebnisse bestätigen sich auch auf der Stufe der Bilanzierungsgebiete. Für jedes der 287 Bilanzierungsgebiete wurde die relative Abweichung zwischen dem Gebietsniederschlag der verschiedenen Autoren und der Referenz bestimmt. Die Streuung der relativen Abweichungen wurde zusammenfassend in so genannten Box-Plots dargestellt. Bild 6 zeigt diese Streuung für die Alpennordseite, gegliedert nach den Höhenstufen.

	<i>Fn</i> [km ²]	<i>mH</i> [m]	<i>BS/Wg</i> [mm/a]	Schwarb et al. [mm/a]	Rohmann und Menzel [mm/a]	Kirchhofer und Sevrak (korr.) [mm/a]	Kirchhofer und Sevrak (unkorr.) [mm/a]	Uttinger [mm/a]	Baumgartner et al. [mm/a]
Schweiz ¹	40925	1391	1458	1385 (-5%)	1528 (5%)	1681 (15%)	1507 (3%)	1461 (0%)	-
Alpenraum									
Rhone-Brig	910	2351	1829	1737 (-5%)	1798 (-2%)	2276 (24%)	1912 (5%)	1723 (-6%)	1925 (5%)
Inn-Martina	2058	2338	1229	992 (-19%)	1249 (2%)	1630 (33%)	1419 (15%)	1293 (5%)	1253 (2%) ²
Rhein-Chur	3270	1995	1465	1274 (-13%)	1468 (0%)	1806 (23%)	1590 (9%)	1525 (4%)	1607 (10%)
Reuss-Seedorf	843	1984	2000	1705 (-15%)	1930 (-3%)	2355 (18%)	2034 (2%)	2043 (2%)	2161 (8%)
Nördliche Voralpen									
Emme	672	969	1384	1493 (8%)	1586 (15%)	1556 (12%)	1437 (4%)	1445 (4%)	-
Thur	1729	767	1464	1383 (-6%)	1456 (-1%)	1519 (4%)	1385 (-5%)	1364 (-7%)	-
Mittelland, Jura									
Zuflussgebiet Lac Neuchâtel ³	1391	913	1332	1332 (0%)	1429 (7%)	1423 (7%)	1274 (-4%)	1334 (0%)	-
Birs	822	743	1056	1247 (18%)	1362 (29%)	1325 (26%)	1200 (14%)	1204 (14%)	-
Alpensüdseite									
Ticino- Bellinzona	1484	1690	1826	1735 (-5%)	1991 (9%)	2357 (29%)	2125 (16%)	2003 (10%)	1993 (9%)
Südl. Tessin	542	703	1824	1879 (3%)	1920 (5%)	2117 (16%)	2015 (10%)	1980 (9%)	-

¹ Summe der Bilanzierungsgebiete (ohne Puschlav und Bergell)

² Fläche des Inn-Gebietes bei Baumgartner et al. um 113 km² kleiner

³ ohne Broye

Tabelle 4. Vergleich der Gebietsniederschläge unterschiedlicher Autoren mit dem Gebietsniederschlag nach Schäder und Weingartner (2002; BS/Wg), der hier als Referenzwert verwendet wird.

Im Folgenden werden mögliche Gründe für die festgestellten Abweichungen der Gebietsniederschläge von der Referenz diskutiert:

Der Ansatz von **Kirchhofer und Sevrak (korr.)** führt mit ganz wenigen Ausnahmen zu grösseren Gebietsniederschlägen als die Referenz. Diese positiven Abweichungen nehmen mit zunehmender Gebietshöhe stark zu (Bild 6). Diese Überschätzung wird sowohl durch die Schwierigkeiten bei der Korrektur des systematischen Messfehlers als auch durch den zu hohen Einheitsgradienten verursacht. Kirchhofer und Sevrak versuchten erstmals konsequent, die notwendige Niederschlagskorrektur in ein Regionalisierungsverfahren einzubauen. Die Ergebnisse zeigen heute, dass diese Korrekturen insbesondere im alpinen Bereich nicht gelingen. Interessanterweise liefert der von beiden Autoren verwendete räumliche Interpolationsalgorithmus bereits bei der Verwendung von Ausgangsdaten, welche nicht nach dem systematischen Messfehler korrigiert sind (Kirchhofer und Sevrak [unkorr.]), vielfach höhere Werte als die Referenz, was die Problematik des verwendeten hohen Einheitsgradienten unterstreicht.

Das Verfahren von **Schwarb et al.** führt in tieferen Lagen im Allgemeinen zu

plausiblen Gebietsniederschlägen. Im Alpenraum scheint dieser Ansatz oft zu tiefe Werte zu produzieren. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass bei der Regionalisierung von gemessenen Werten ausgegangen wurde, also der systematische Messfehler unberücksichtigt blieb. Die Nicht-Berücksichtigung des Messfehlers hängt vor allem auch damit zusammen, dass allgemeingültige Verfahren zur Niederschlagskorrektur nach wie vor nicht vorhanden sind. Der Inter- bzw. Extrapolations-Algorithmus mit lokal berechneten Gradienten stösst im Hochgebirge an Grenzen, weil

- das Messnetz nur wenige Stationen umfasst,
- grosse Höhenlagen kaum mit Stationen besetzt sind und
- Gradienten vor allem in inner- und südalpinen Lagen wenig ausgeprägt sind.

Rohmann und Menzel arbeiten mit regional differenzierten Gradienten. In einzelnen Gebieten scheinen diese Gradienten zu einem guten Ergebnis zu führen, in anderen Gebieten treten offenbar Probleme auf, wie wir sie bereits bei Schwarb et al. kurz geschildert haben.

Leider liegen zum Ansatz von **Baumgartner et al.** nur Vergleichswerte für alpine Einzugsgebiete vor. Die Überschätzungen

der Referenz beträgt bei den untersuchten Beispielen weniger als 10%. Baumgartner et al. haben bei ihren Ausgleichsrechnungen den gesamten Wasserhaushalt mitberücksichtigt, sodass ihre Gebietsniederschläge – ähnlich wie die Referenzwerte – wasserhaushaltlich abgestützt sind.

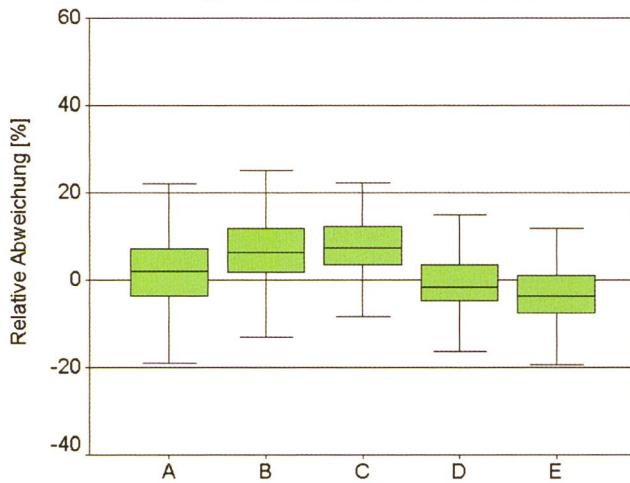
Die Vorgehensweise von **Uttinger**, der regionale Gradienten mit einem profunden Expertenwissen verband, führt im Allgemeinen zu Gebietsniederschlägen, welche den Referenzwerten nahe kommen. Können wir daraus schliessen, dass ausgeklügelte Interpolationsalgorithmen Gebietskenntnisse und Erfahrungen nicht vollumfänglich ersetzen können, dass eine optimale Methode in der Kombination von objektiven Interpolationsalgorithmen und subjektivem Expertenwissen liegen könnte?

5. Zur Problematik der Gebietsniederschlagsbestimmung im Alpenraum

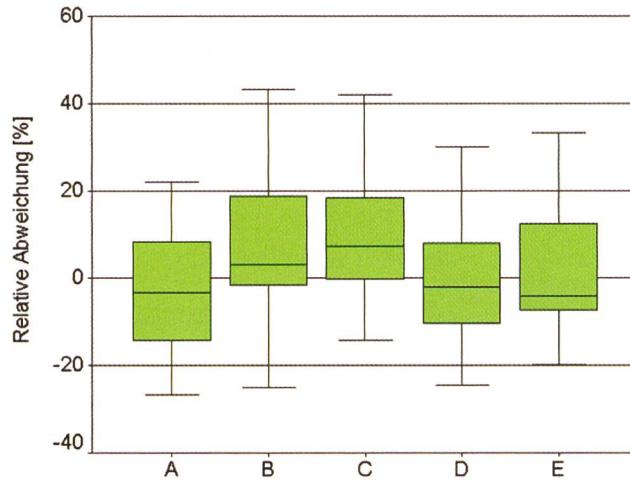
Die Resultate des Vergleiches der verschiedenen Niederschlagskarten widerspiegeln eindrücklich die Komplexität und die Problematik bei der Erstellung von Niederschlagskarten:

Niederschlagsmessfehler: Es ist wissenschaftlich anerkannt, dass die Nieder-

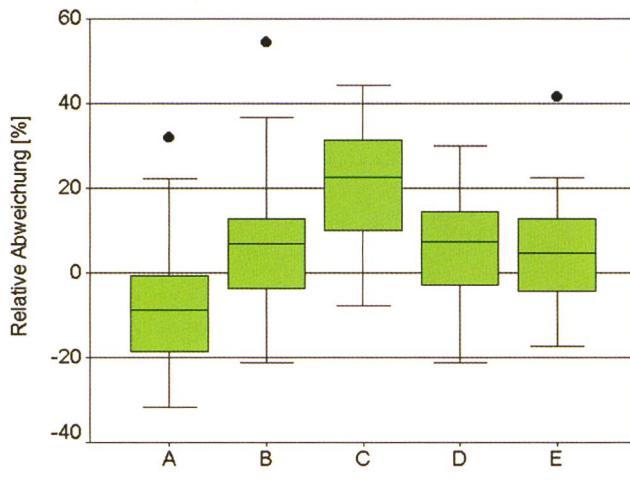
Alpennordseite, Höhen <1000m



Alpennordseite, Höhen 1001-1500m



Alpennordseite, Höhen 1501-2500

A *Schwarb et al. (2001)*B *Rohmann und Menzel (1999)*C *Kirchhofer und Sevruk (1992; korrig.)*D *Kirchhofer und Sevruk (1992; unkorrig.)*E *Uttiger (1949)*

Jede Box zeigt den Median, die Quartile, die Extremwerte sowie die Ausreißer an.

Bild 6. Streuung der relativen Abweichungen zwischen dem Gebietsniederschlag verschiedener Autoren und dem Referenzwert von BS/Wg in verschiedenen Höhenstufen der Alpennordseite, berechnet auf der Grundlage der in der jeweiligen Höhenstufe vorhandenen Bilanzierungsgebiete (<1000 m: 96 Gebiete; 1000–1500 m: 32; > 1500 m: 25).

schlagsmessung aus unterschiedlichen Gründen mit Fehlern behaftet ist (Sevruk, 1982). Die Korrektur dieser Fehler ist allerdings nicht einfach, sind doch die Faktoren, welche die Messung beeinflussen, komplex und die zur Korrektur notwendigen Daten am Standort der Regenmesser meist nicht verfügbar. Dies bedeutet, dass die Korrektur bereits am Standort des Regenmessers nur eine Abschätzung sein kann (vgl. Sevruk und Kirchhofer, 1992; Tafel 2.3).

Messnetzdichte: Zwar ist das in der HADES-Tafel 2.2 und 2.3 verwendete Niederschlags-Messnetz (340 Stationen) in der Schweiz mit einer Station pro 120 km^2 insgesamt recht dicht, jedoch ist die Messnetzdichte ausgerechnet im Gebirge mit seiner komplexen Topografie und der damit verbundenen hohen räumlichen Variabilität der Niederschläge relativ gering. So liegen nur 18% dieser Messstationen oberhalb der mittleren Höhe der Schweiz (1312 m ü.M.), sodass dort auf 350 km^2 eine Station fällt. Noch problematischer ist die Situation oberhalb von 2000 m ü.M., wo sich nur noch 19 Stationen befinden; in diesem Höhenbereich weist

das Messnetz noch eine Dichte von etwa 550 km^2 pro Station auf. Im Vergleich mit den Richtlinien der Weltorganisation für Wetter (WMO, 1994), welche eine Messnetzdichte von höchstens 250 km^2 pro Station im Gebirge und höchstens 575 km^2 pro Station in hügeligem Gelände empfiehlt, ist die mittlere Stationsdichte der gesamten Schweiz dank der hohen Dichte im Mittelland scheinbar hervorragend. Der Blick auf die höheren Regionen zeigt aber, dass der Niederschlag hier nicht genügend detailliert erfasst werden kann, zumal die Tagessammler, welche die Basisinformationen in relativ hoher zeitlicher Auflösung erheben, hauptsächlich in Tallagen positioniert sind. Dadurch kann sowohl die horizontale und vertikale als auch die zeitliche Variabilität nur schlecht beschrieben werden.

Vertikale Verteilung der Niederschläge: Weil im Gebirgsraum die vertikale Erstreckung des Messnetzes völlig ungenügend ist, kann die vertikale Niederschlagsverteilung nur im unteren Bereich belegt werden. In den allermeisten Fällen behilft man sich für eine Extrapolation in grössere Höhen mit

einem linearen vertikalen Niederschlagsgradienten, wobei das Bestimmtheitsmass der Regression zwischen Niederschlag und Höhe oft nicht zufriedenstellend ist. Die Gebietsanteile, in die vertikal extrapoliert wird, sind recht gross, wie die Diskussion der Messnetzdichte gezeigt hat. Wie genau sich die Gradienten in mittleren und grösseren Höhen wirklich verhalten, ist zumeist unbekannt. Trotzdem wird meistens angenommen, die Beziehung setzt sich stetig fort. Eine Analyse der vertikalen Verteilung der hier berechneten Gebietsniederschläge zeigt (Bild 7), dass sich in vielen Regionen die allgemein beobachtete Zunahme der Niederschlagsmengen mit zunehmender Meereshöhe ab ca. 1500 m ü.M. verändert (in der Regel verkleinert). Dies bedeutet, dass eine Extrapolation eines linearen Gradienten in grössere Höhen nicht allgemein zulässig ist.

Horizontale Interpolation der Niederschläge: In mittleren und grösseren Höhen sind die Niederschlagsstationen nicht sehr zahlreich und nicht regelmässig verteilt. Damit lassen sich die kleinräumigen Variabilitäten (z.B. Luv- und Leeeffekte) nicht erfassen.

sen, und deswegen ist auch die Qualität einer horizontalen Interpolation ungenügend.

Fazit: Bei jeder Bestimmung des Gebietsniederschlages oder genereller beim Entwurf einer Niederschlagskarte sieht man sich mit dem Problem konfrontiert, dass die Güte der verwendeten Methode bzw. des Produktes kaum quantitativ beifert werden kann, da die «Wahrheit» nicht bekannt ist. Mit dem hier diskutierten Ansatz steht eine von der Niederschlagsmessung unabhängige, in sich geschlossene, räumlich differenzierte und wasserhaushaltlich abgestimmte Vergleichsbasis zur Verfügung. Künftige Niederschlagskarten sollten unbedingt in Kombination mit einer solchen hydrologischen Vergleichsbasis entwickelt werden.

Dank

Wir danken Max Lämmli und Daniel Vivioli für die Unterstützung bei einzelnen Auswertungsschritten.

Literatur

Baumgartner A., Reichel E., Weber G. (1983): Der Wasserhaushalt der Alpen. R. Oldenbourg, München.
 Binggeli V. (1974): Hydrologische Studien im zentralen schweizerischen Alpenvorland, insbesondere im Gebiet der Langtäler. Beitr. z. Geologie der Schweiz – Hydrologie, Nr. 22, Bern.
 Kasser P. (1959): Der Einfluss von Gletscherrückgang und Gletschervorstoß auf den Wasserhaushalt. Wasser- und Energiewirtschaft, No. 6: 155–168, Zürich.
 Kasser P. (1984): Die Variation der Wasservorräte im Einzugsgebiet der Rhone von Porte du Scex. In: Die Gletscher der Schweizer Alpen 1975/76 und 1976/77. ETH Zürich.
 Kirchhofer W., Sevruk B. (1992): Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951–1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.2. Bern.
 Leibundgut Ch. (1978): Die Berechnung der Verdunstung aus der Wasserbilanz von Einzugsgebieten. In: Die Verdunstung in der Schweiz. Beitr. z. Geologie der Schweiz – Hydrologie, Nr. 25, Bern.
 Lang H. (1985): Höhenabhängigkeit der Niederschläge. In: Der Niederschlag in der Schweiz; Beiträge zur Geologie und Hydrologie der Schweiz, Nr. 31: 149–157, Bern.
 Lütschg O. (1926): Über Niederschlag und Abfluss im Hochgebirge. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Verbandsschrift Nr. 14, Schweiz. Meteorolog. Zentralanstalt, Zürich.
 Menzel L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Zürcher Geographische Schriften, Nr. 67. Zürich.
 Menzel L., Lang H., Rohmann M. (1999): Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973–1992. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 4.1, Bern.

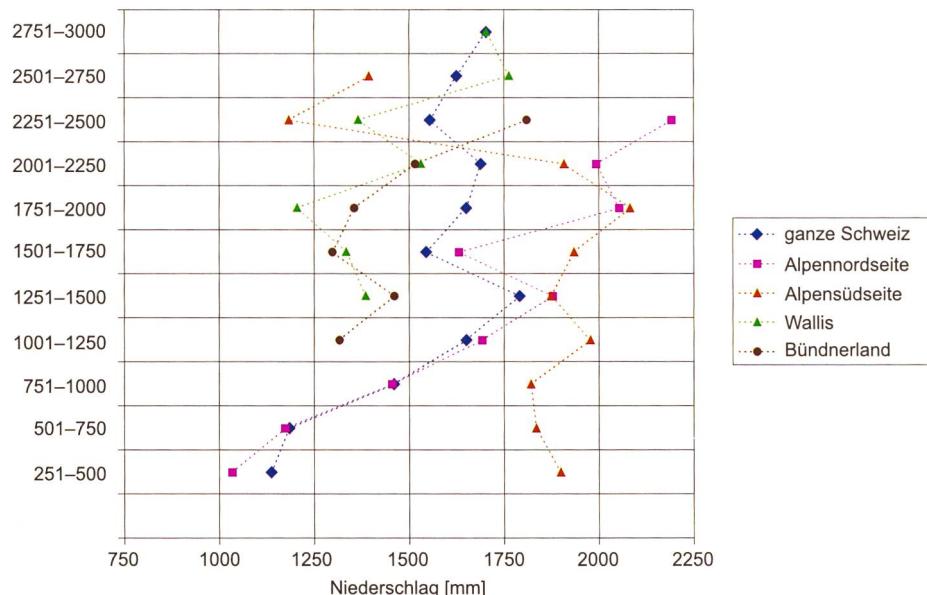


Bild 7. Mittelwert der Gebietsniederschläge aller Bilanzierungsgebiete einer bestimmten Region und Höhenzone.

- Müller-Lemans et al. (1994): Langjährige Massenbilanzreihen von Gletschern in der Schweiz. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 30: 141–160, Innsbruck.
 Rohmann M., Menzel L. (1999): Räumliche Interpolation von Niederschlag, Lufttemperatur und Verdunstung. Grundlagen und Methoden. Beiträge und Skripten Nr. 67; Geographisches Institut der ETH Zürich, Zürich.
 Roder E. (1914): Niederschlag und Abfluss im bündnerischen Rheingebiet während der Jahre 1894–1909. Mitt. Nr. 5 der Landeshydrographie, Bern.
 Schädler B. (1985a): Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitteilung der Landeshydrologie Nr. 6, Bern.
 Schädler B. (1985b): Gebietsniederschläge. In: Der Niederschlag in der Schweiz. Beitr. z. Geologie der Schweiz – Hydrologie, Nr. 31: 171–186, Bern.
 Schädler B., Bigler R. (1992): Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.1, Bern.
 Schädler B., Bigler R. (1995): Wasserhaushalt der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. Hydrologische Mitteilungen der LHG, Nr. 21, Bern.
 Schädler B., Weingartner R. (1992): Natürliche Abflüsse 1961–1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.4, Bern.
 Schädler B., Weingartner R. (2002): Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.3, Bern.
 Schwab M., Frei Ch., Schär Ch., Daly Ch. (2001): Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.6, Bern.
 Sevruk B. (1982): Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use. Operational Hydrology, Report No. 21, WMO-No. 589, Geneva.
 Sevruk B. (1985): Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. In: Der Niederschlag in der Schweiz. Beitr. z. Geologie der Schweiz – Hydrologie, Nr. 31: 65–86, Bern.
 Sevruk B., Kirchhofer W. (1992): Mittlere jährliche Korrekturen der gemessenen Niederschlagshöhen 1951–1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.3, Bern.
 Uttinger H. (1949): Die Niederschlagsmengen in der Schweiz. Führer durch die Schweizerische Wasser- und Elektrizitätswirtschaft, Bd. 2, Verlag des Schweiz. Wasserwirtschaftsverbandes, Zürich.
 Walser E. (1958): Niederschlag und Abfluss im Reussgebiet. Wasser- und Energiewirtschaft, Nr. 8/9, Zürich.
 WMO (1994): WMO Guide to Hydrological Practices, 5th edition, WMO-No. 168, Geneva.
 Zgraggen L., Ohmura A. (2002): Räumlich-zeitliche Variationen der Nettostrahlung 1984–1993. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 4.2.

Anschrift der Verfasser

Dr. Bruno Schädler, Bundesamt für Wasser und Geologie, CH-3003 Bern-Ittigen, bruno.schaeider@bwg.admin.ch
 PD Dr. Rolf Weingartner, Geographisches Institut der Universität Bern, CH-3012 Bern, wein@giub.unibe.ch