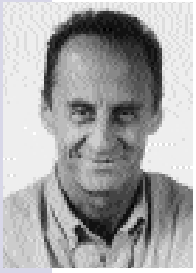
Das Schweizer Isotopen-Messnetz

Trends 1992–1999

ULRICH SCHOTTERER, THOMAS STOCKER, HANSUELI BÜRKI, JOHANNES HUNZIKER, RONALD KOZEL, DOMENICO ALESSANDRO GRASSO, JEAN-PIERRE TRIPET



U. SCHOTTERER

In diesem Bericht werden die wichtigsten physikalisch bedingten Verteilungsmuster der Wasserisotope (Deuterium, Tritium und Sauerstoff-18) im Niederschlag diskutiert und die Datenreihen des schweizerischen Isotopen-Messnetzes beurteilt. Die Ergebnisse von Temperatur- oder Höheneffekt bestätigen im Wesentlichen die aus der Literatur bekannten Werte. Sie zeigen deutlich, dass bei einer praktischen Anwendung saisonale und regionale Unterschiede berücksichtigt werden müssen, die zudem noch über klimatisch bedingte Veränderungen modifiziert werden können. Das Isotopen-Messnetz gewährt nicht nur einen guten Überblick über die Situation in der Schweiz, sondern bietet mit zunehmender Dauer der Messreihen auch international einen wertvollen Beitrag für Wissenschaft und Praxis.

Réseau fédéral d'observation des isotopes – Tendances 1992–1999

Les séries temporelles de données du réseau fédéral d'observation des isotopes sont analysées dans cet article en tenant compte des facteurs physiques qui régissent la répartition des isotopes de la molécule d'eau dans les précipitations. Les effets de température et d'altitude qui ressortent de ces observations confirment en général les résultats exposés dans la littérature et montrent distinctement que, dans le cas d'une application pratique, les variations saisonnières et régionales doivent être prises en considération ; ces variations peuvent d'ailleurs elles-mêmes être influencées par des changements des conditions climatiques. Ce réseau offre non seulement une bonne vue d'ensemble sur la situation en Suisse, mais encore, avec la durée croissante des séries de mesures, une précieuse contribution pour la recherche et la pratique sur le plan international.

Swiss National Network for Isotopes – Trends 1992–1999

The most important physically controlled distribution patterns of meteoric-water isotopes are discussed and used to assess the data series of the Swiss national network for isotopes in the hydrological cycle. The results of the temperature and altitude effects essentially confirm the values known from the literature; they show clearly that for practical applications one must consider seasonal and regional variations, which may be further modified by climatic changes. The Swiss National Network for Isotopes provides not only a good overview of the situation in Switzerland, but also – with increasing length of the data series – a valuable contribution for international scientific and practical applications.

Einleitung

Die Isotope des Wassermoleküls H_2O (^2H, ^3H, ^{18}O) werden als Spurenstoffe in den Klima- und Umweltwissenschaften sowie für praktische Untersuchungen in der Oberflächen- und Grundwasserhydrologie eingesetzt. Über die physikalisch bedingten Verteilungsmuster der *stabilen Isotope* Deuterium (^2H) und Sauerstoff-18 (^{18}O) im Niederschlag, bekannt als Temperatur-, Saison-, Höhen-, Breiten-, Kontinental- oder Mengeneffekt, erhält man sowohl Informationen über die vielfältigen Wechselwirkungen innerhalb des Wasserkreislaufs wie auch über dessen klimabedingte Veränderungen. Das radioaktive Tritium (^3H) gelangt über natürliche (durch kosmische Strahlung induzierte Spallation in der höheren Stratosphäre) und künstliche Produktion (Kernwaffentests, industrielle Verarbeitung) in den Wasserkreislauf und wird vor allem zur Altersbestimmung junger Grundwässer und zum Nachweis junger Komponenten in altem (tritiumfreiem) Wasser verwendet.

Die Erfassung von *Basisdaten* über das zeitliche und räumliche Verhalten der Isotope im Niederschlag ist zwingende Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung in Wissenschaft und Praxis.

Das *Niederschlagsmessnetz* der IAEA (Internationale Atomenergie-Behörde Wien), ursprünglich zur Überwachung der Kernwaffentests aufgebaut, wurde sehr bald auch zum Studium der weltweiten Verteilung der stabilen Isotope eingesetzt. Es entstand das *Global Network for Isotopes in Precipitation**.

Wegen des starken Rückgangs der Tritiumkonzentrationen in der Atmosphäre

* GNIP: http://www.iaea.or.at:80/programs/ri/gnip/gnipmain.htm

wurden seit dem Ende der 80er Jahre wohl viele Stationen geschlossen, es entstanden aber in der Folge vermehrt nationale Messnetze, da das Interesse an der wissenschaftlichen und praktischen Anwendung von Wasserisotopen in der Zwischenzeit stark gestiegen war.
In der Schweiz wurde ein *Isotopen-Messnetz* von der Landeshydrologie und -geologie (LHG) in Auftrag gegeben. Vertragspartner sind die Abteilung Klima- und Umweltphysik (KUP) des Physikalischen Institutes der Universität Bern (Tritium und Sauerstoff-18) sowie das «Institut de minéralogie et pétrographie» der Universität Lausanne (Deuterium). Das Messnetz, das neben dem Niederschlag auch Oberflächenwasser und oberflächennahes Grundwasser monatlich erfasst, begann 1992 mit einer Pilotphase. 1995 erschien ein erster Überblick [1] mit der Absicht, die erhobenen Daten im Abstand von etwa fünf Jahren auf ihre wissenschaftliche Aussagekraft und deren Konsequenzen für die Praxis zu untersuchen. Die Fortsetzung dieser Arbeiten ist der Anlass für den vorliegenden Artikel. Im Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz des Jahres 1997 sind die Daten des Isotopen-Messnetzes in graphischer Form erstmals publiziert worden [2]. Seither werden hier jährlich die entsprechenden Daten veröffentlicht. Die vielseitige Anwendbarkeit dieser Daten war Gegenstand eines kürzlich erschienenen Artikels [3] und wird zudem auch im Hydrologischen Atlas der Schweiz graphisch dargestellt werden.

Deuterium und Sauerstoff-18 im Niederschlag

Die kinetische Energie eines Moleküls wird durch die Temperatur und die Masse bestimmt: Moleküle mit grösserer Masse wie beispielsweise $^1H^1H^{18}O$ haben bei einer bestimmten Temperatur eine geringere Geschwindigkeit (oder Mobilität) als $^1H^1H^{16}O$. Wasserdampf ist deswegen gegenüber der Flüssigkeit, aus der er stammt, immer an ^{18}O und ^2H abgereichert, Kondensat aus dem Dampf gegenüber diesem wiederum angereichert, wobei die Dampfphase weiter an ^{18}O oder ^2H abgereichert wird. Das Wieviel hängt von der Temperatur ab, bei der dieser Prozess stattfindet, und davon, wie gross die Fraktion ist, die als Kondensat entfernt wird. Da man sich als Standard auf das Isotopenverhältnis des Meerwassers bezieht, haben die meisten Komponenten des Wasserkreislaufs negative Isotopenverhältnisse, die in der δ-Notation angegeben werden.
Das Verhalten der *Wasserisotope* im Niederschlag lässt sich quantitativ erfassen. Man geht dabei von der *Modellvorstellung* aus, dass der globale Wasserdampf in den ozeanischen Gebieten mit den höchsten Oberflächentemperaturen gebildet wird. Während der Abkühlung beim Transport in höhere Breiten kondensiert aus dem Wasserdampf schrittweise und ohne zusätzliche Beimischungen der Niederschlag im isotopischen Gleichgewicht, was zu einer stetigen Abreicherung der Luftmassen an den schwereren Isotopen Sauerstoff-18 oder Deuterium führt (Rayleigh-Prozess). Modellvorstellungen über das Verhalten der Wasserisotope bei der Verdunstung von der Ozeanoberfläche wurden erstmals 1965 von *Craig und Gordon* [4] entwickelt. *Dansgaard* [5] beschrieb den Transport in höhere Breiten; auf ihn gehen Ausdrücke wie Breiteneffekt, Kontinentaleffekt (distance from the coast effect) oder Mengeneffekt zurück. Im Jahresmittel gehorchen Sauerstoff-18 und Deuterium in den Niederschlägen einer linearen Beziehung

$$\delta^2 H = s\,\delta^{18}O + d$$

Steigung *s* und Achsenabschnitt *d* werden von den meteorologischen Parametern (Temperatur, relative Feuchte, Grad des Ausregnens) während Verdunstung und Kondensation bestimmt [6, 7, 8]. Da für die meisten Niederschläge sowohl die berechneten wie die gemessenen Werte der Steigung im Jahresmittel um 8 liegen, wurde

$$\delta^2 H = 8\delta^{18}O + d$$

als *Niederschlagsgerade* oder *Meteoric Water Line (MWL)* definiert. Für d ergibt sich daraus

$$d = \delta^2 H - 8\delta^{18}O$$

Die Werte von d, als Deuterium-Exzess bezeichnet, liegen im Mittel um 10‰. Systematische Abweichungen von der Steigung 8 und/oder Änderungen im Exzess lassen sich im so definierten $\delta^2H-\delta^{18}O$-Diagramm extremen meteorologischen Bedingungen oder Sekundärprozessen zuordnen. Ein grösserer Deuterium-Exzess kann beispielsweise durch eine niedrigere relative Luftfeuchtigkeit im Verdunstungsgebiet oder eine kleinere Steigung durch Verdunstung an fallenden Regentropfen hervorgerufen werden. Da Änderungen in der Temperaturdifferenz zwischen dem Verdunstungsgebiet und dem Ort des Niederschlags und/oder der vorherrschenden relativen Luftfeuchtigkeit das Isotopenverhältnis der Niederschläge verändern, werden Deuterium und Sauerstoff-18 auch als *Klimaparameter* vor allem in den Paläo-Wissenschaften eingesetzt. Die Korrelation von δ^2H und $\delta^{18}O$ mit der mittleren Lufttemperatur am Ort des Niederschlags rührt daher, dass sich zwischen den fallenden Re-

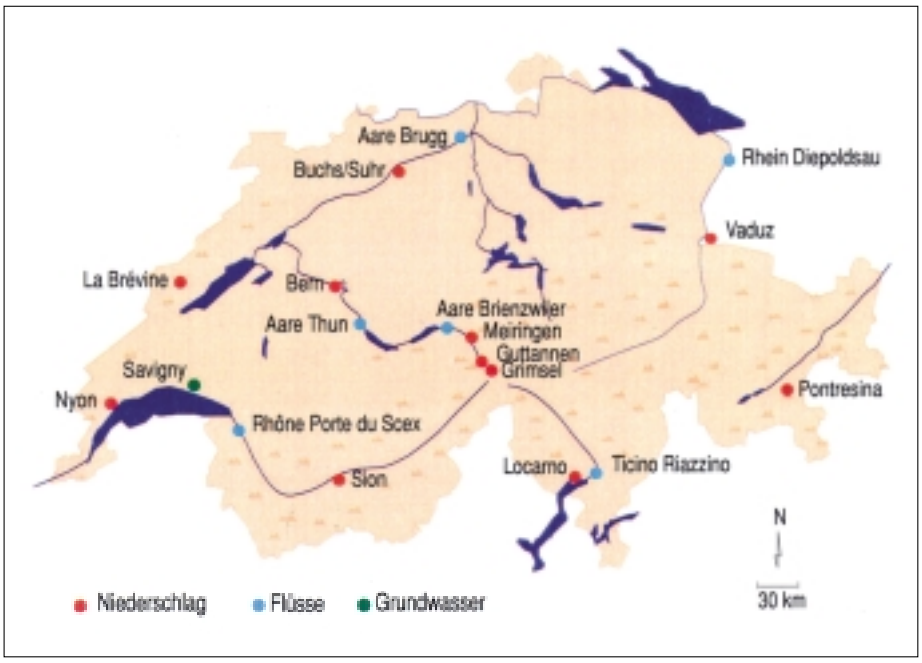


Abb. 1 Das Isotopenmessnetz der Schweiz

gentropfen und der umgebenden Luftfeuchtigkeit ein isotopisches Gleichgewicht einstellt, das von der lokalen Meteorologie mitbestimmt wird. Da im Langzeitmittel eine gute Korrelation zwischen dem Isotopengehalt des Luftwasserdampfs und dem des Niederschlags besteht [9], geht die Isotopeninformation aus dem Quellgebiet während dieses Austauschprozesses nicht verloren. Wichtige Einschränkungen betreffen stark konvektive Niederschlagssysteme (Austausch unvollkommen, vor allem bei Hagelbildung), schwache Niederschläge, die in eine trockene Atmosphäre fallen (Anreicherung der schwereren Isotope durch Verdunstung), sowie schnelle Wechsel unterschiedlicher Luftmassen, die die isotopischen Austauschbedingungen verändern. Bei Schneefall beeinflussen komplexe Prozesse während der Niederschlagsbildung in den Wolken die Isotopenverhältnisse massgeblich [10], da der Austausch zwischen dem festen Niederschlag und der umgebenden Luftfeuchtigkeit eingeschränkt ist. Trotzdem zeigen auch Isotopendaten von Stationen mit jahreszeitlich stark variierenden Anteilen von festem und flüssigem Niederschlag (wie beispielsweise in der Schweiz) eine gute Korrelation sowohl mit dem überregionalen Klimatrend als auch mit dem lokalen Temperaturverlauf [11]. Die Langzeitbeziehung von Deuterium und Sauerstoff-18 im Luftwasserdampf und im Niederschlag dominiert offensichtlich die lokalen Prozesse in den Wolken.

Im Folgenden werden die Daten des schweizerischen Messnetzes *(Abb. 1)* mit den wichtigsten der erwähnten Isotopeneffekte verglichen. Bei den stabilen Isotopen bezieht sich der Text vor allem auf die $\delta^{18}O$-Messungen; die Ausführungen gelten aber sinngemäss auch für das Deuterium.

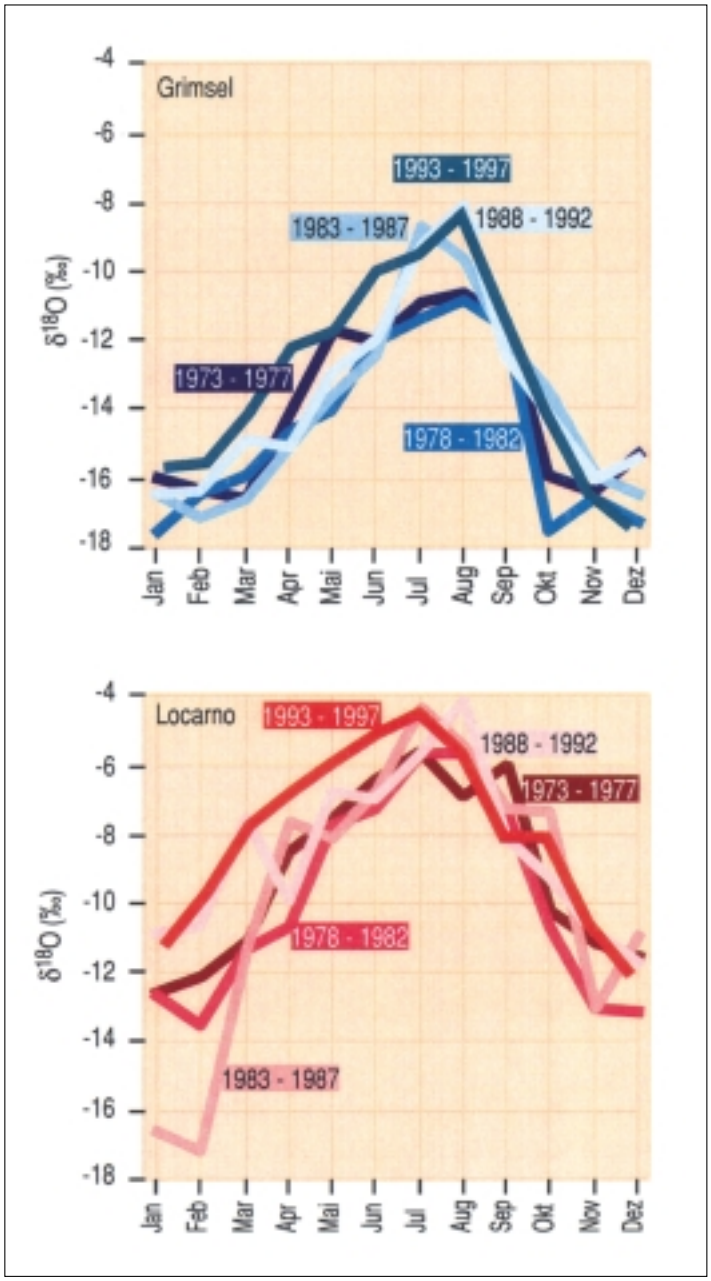


Abb. 2
Pentadenwerte für $\delta^{18}O$ im Niederschlag am Beispiel der Stationen Locarno und Grimsel. Im ersten Halbjahr der letzten Pentade (1993–1997, Beginn Isotopenmessnetz LHG) wurden die höchsten $\delta^{18}O$-Werte im Niederschlag seit Beginn der Isotopenmessungen in der Schweiz registriert.

Jahreszeitliche Schwankungen

Im Winter ist die Kondensationstemperatur niedriger als im Sommer. Dies trifft wohl auch für das Quellgebiet der Niederschläge zu; die jahreszeitlichen Schwankungen sind aber in den Tropen oder Subtropen wesentlich geringer als in unseren Breiten. Wegen der grösseren Temperaturdifferenz zwischen dem Quellgebiet der Luftfeuchtigkeit und dem Ort des Niederschlags im Winter kann daher mehr Wasserdampf aus den Luftmassen entfernt werden. Die Niederschläge sind deshalb im Winterhalbjahr isotopisch leichter.

Der Unterschied zwischen Winter- und Sommerhalbjahr beträgt an den Stationen des *Schweizer Messnetzes* 4–6‰ im $\delta^{18}O$ (bzw. 30–50‰ im $\delta^{2}H$) und schwankt von Jahr zu Jahr beträchtlich. Dies liegt an den grösseren Schwankungen der stabilen Isotope, aber auch der Niederschlagsmenge in den Monatsmitteln individueller Jahre im Vergleich zu denjenigen der Lufttemperatur. Auch die niederschlagsgewichteten Jahresmittel können deshalb bis zu 3‰ (entsprechend bis zu 24‰ im $\delta^{2}H$) voneinander abweichen. Die klimatisch bedingte Variabilität wird besonders gut in den Pentadenwerten sichtbar (in *Abb. 2* für die Stationen Grimsel und Locarno aufgetragen), wobei die letzte Pentade (1993–1997) seit Beginn der Messperiode durch die höchsten $\delta^{18}O$-Werte in der ersten Jahreshälfte auffällt. Wie eingangs erwähnt, ist diese Variabilität auch bei der praktischen Anwendung der Isotopendaten zu berücksichtigen.

Temperatureffekt

Niederschlagsmenge und -verteilung innerhalb eines Monats (oder Jahres) bestimmen das zeitliche Intervall, innerhalb dessen die stabilen Isotope mit der lokalen Lufttemperatur verglichen werden können. Wenn beispielsweise der gesamte Niederschlag eines Monats innert weniger Tage fällt, ist ein Vergleich mit dem Monatsmittel kaum ziel-

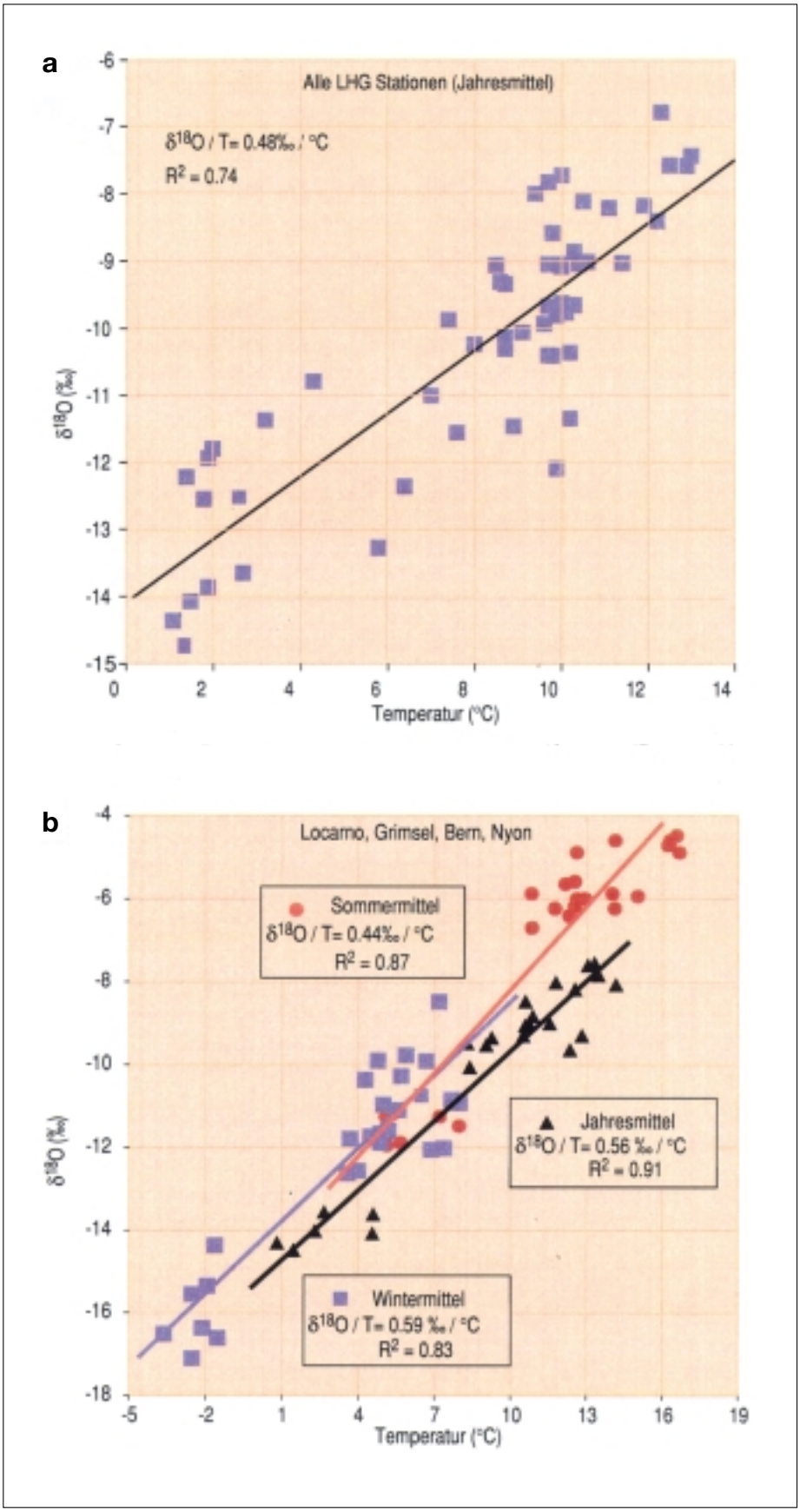


Abb. 3 $\delta^{18}O$-Temperatur-Beziehung der Jahresmittel aller LHG-Niederschlagsstationen (3a). Ungeachtet der unterschiedlichen Niederschlags- und Feuchtigkeitsverteilung in der Schweiz ist die Korrelation hoch. Sie steigt allerdings deutlich, wenn man zwischen Winter- und Sommerniederschlägen differenziert. Die Sommermittel sind deshalb schlechter korreliert, weil Verdunstungseffekte eine zusätzliche Rolle spielen können. Der Niederschlag in der wärmeren Jahreszeit kann unter anderem Anteile von wieder verdunsteter Bodenfeuchtigkeit enthalten, die zu einer anderen Zeit als der Vergleichsperiode als Niederschlag in den Boden gelangt ist (3b).

führend. In der Praxis werden für die $\delta^{18}O$/T-Vergleiche meist Monats- oder *Jahresmittel* verwendet; sinnvolle Resultate sind aber nur dort zu erwarten, wo Niederschläge und Lufttemperatur über den Vergleichszeitraum entsprechend gleichmässig verteilt sind. Im Jahresmittel beträgt die theoretische Temperaturbeziehung für Sauerstoff-18 etwa 0,7‰/°C (in Abhängigkeit von der Kondensationstemperatur schwankt sie zwischen 0,9 und 0,5‰/°C bei 0 °C bzw. 20 °C). Vergleichbare Werte ergeben sich aus den meisten GNIP-Daten mittlerer und hoher Breiten (die $\delta^{18}O$/T-Beziehung ist in den Tropen nur schwach ausgebildet, da meist konvektive Prozesse zur Niederschlagsbildung führen) und lassen sich auch für die Schweizer Niederschlagsstationen ableiten. In *Abbildung 3a* sind die $\delta^{18}O$-Jahresmittel aller LHG-Stationen im Zeitraum von 1993bis 1998 aufgetragen. Die 0,48‰ pro °C erscheinen eher tief; wenn man aber zwischen Winter- und Sommerhalbjahr für einige ausgewählte Stationen differenziert *(Abb. 3b),* wird ersichtlich, dass die Niederschlags- und Temperaturverteilungen eine wichtige Rolle spielen. Solche regionalen Unterschiede in den klimatischen Kenngrössen wirken sich selbstverständlich auch auf den Höheneffekt aus.

Höheneffekt

Wenn Luftmassen von Erhebungen wie den Alpen zum Aufsteigen gezwungen werden, kühlen sie sich ab und die in ihnen enthaltene Luftfeuchtigkeit kann kondensieren. Da aber ebenfalls der Luftdruck mit der Höhe abnimmt, ist im Gegensatz zur isobarischen Kondensation eine stärkere Temperaturabnahme für das Ausregnen erforderlich. Neben den meteorologischen Parametern wirkt sich auch die jeweilige Orographie auf diesen Effekt aus; die $\delta^{18}O$-Höhen-Beziehung kann deshalb in der Schweiz bedingt durch die kleinräumige Höhenabstufung beträchtlich schwanken. Dies zeigt sich in *Abbildung 4a,* in der die $\delta^{18}O$- bzw. $\delta^{2}H$-Jahresmittel aller LHG-Stationen gegen die entsprechende Höhe aufgetragen sind. Die $\delta^{18}O$-Abnahme mit der Höhe ist wohl sehr ausgeprägt, ebenso aber auch die Variationsbreite von Jahr zu Jahr und von Ort zu Ort vor allem in unteren und mittleren Höhenlagen. *Siegenthaler und Matter* [12] haben für das Berner Oberland mit den dafür gültigen meteorologi-

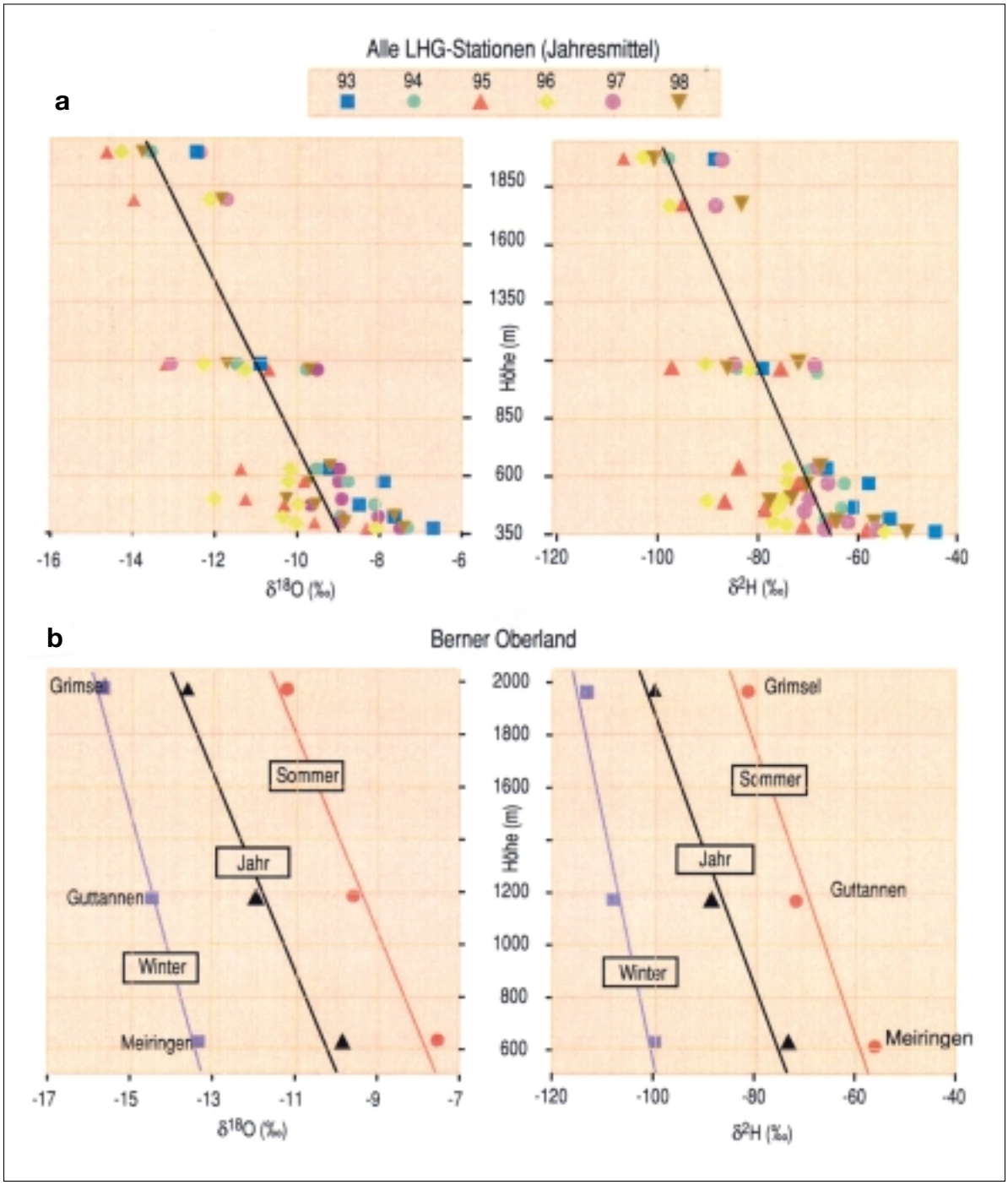


Abb. 4
Höhenbeziehung von $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ der Jahresmittel aller LHG-Niederschlagsstationen (4a). Die einzelnen Jahre individueller Stationen sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Eine generelle Abnahme ist deutlich, die Variationsbreite aber beträchtlich, da in der Höhenabhängigkeit neben den meteorologischen Parametern auch die lokale Topographie mitbestimmend ist. Eine Differenzierung nach Ort und Zeit ist deshalb für die Anwendung in der Isotopenhydrologie besonders wichtig (4b).

schen Parametern für $\delta^{18}O$ eine Abnahme um 0,2‰/100 m Zunahme in der Höhe berechnet. Dies entspricht sowohl den in der Literatur am häufigsten zitierten Werten wie auch den neueren Daten der LHG-Stationen aus dem Berner Oberland (0,15‰ bis 0,3‰/100 m für $\delta^{18}O$ und 1,2‰ bis 2,4‰ für $\delta^{2}H$; *Abb. 4b*).

Der Höheneffekt der stabilen Isotope ist für die Praxis eine wichtige Anwendung. Er wird zur Abschätzung der mittleren Höhe von Einzugsgebieten von Grundwässern eingesetzt. Bei fehlenden Niederschlagsdaten dienen umgekehrt oft auch Quellen oder Bäche mit bekannten Einzugsgebieten als Eichpunkte für solche Anwendungen. Wie aus *Abbildung 4b* ebenfalls ersichtlich, kann beides aber nur gelten, wenn die jahreszeitliche Gewichtung des infiltrierenden und abfliessenden Wassers einigermassen der jährlichen Niederschlagsverteilung entspricht.

Breiteneffekt und Kontinentaleffekt

Beide Effekte spielen in der Schweiz bezogen auf die Distanz zur Quelle der Niederschläge kaum eine Rolle. Allerdings beeinflussen die Alpen als Klimascheide den Luftmassentransport und damit ergeben sich auch charakteristische Unterschiede in den Isotopenverhältnissen der Niederschläge. Da Winterniederschläge aus dem Mittelmeerraum häufig erhöhte Deuterium-Exzess-Werte aufweisen können [13], ist so eine Differenzierung zwischen atlantischen und mediterranen Luftmassen möglich. Ein anderer Effekt, den man als *«mini distance from the coast effect»* bezeichnen könnte, bildet sich im Rhonetal aus, das nach Norden und Süden weitgehend von Niederschlag bringenden Luftmassen abgeschirmt ist. Verglichen mit

	1995		1996		1997		1998	
	Nyon	*Sion*	*Nyon*	*Sion*	*Nyon*	*Sion*	*Nyon*	*Sion*
N (mm)	1183,1	756,7	961,9	554,6	1000,2	551,0	961,9	486,3
T (°C)	10,4	10,2	9,7	9,9	10,5	10,6	9,7	10,2
Sauerstoff-18 (‰)	–9,01	–11,32	–10,37	–12,07	–8,09	–8,98	–9,02	–10,33

Tab. 1 Niederschlag-, Temperatur- und δ^{18}O-Jahresmittel von Nyon (436 m) und Sion (482 m). Auf vergleichbarer Meereshöhe sind die Werte in Sion systematisch tiefer. Entsprechend dem Kontinentaleffekt kann man dies mit einem verstärkten Ausregnen von Luftmassen erklären, die an isotopisch schwereren Wassermolekülen stärker abgereichert sind.

Nyon sind nicht nur die Niederschlagsmengen in Sion deutlich geringer, auch die Isotopenverhältnisse in den Niederschlägen sind systematisch negativer *(Tab. 1)*.
Der Unterschied in den δ^{18}O-Jahresmitteln lässt sich weder auf den Temperatur- noch auf den Höhenunterschied zwischen beiden Stationen zurückführen. Die um ein bis zwei Promille stärker abgereicherten δ^{18}O-Werte der Niederschläge in Sion sind vielmehr eine Folge der zunehmenden Abtrocknung der Luftmassen im Mittelwallis bezogen auf die Niederschlagssituation im Gebiet um den Genfersee.

Tritium im Niederschlag

Die Entleerung des stratosphärischen Tritiumreservoirs aus der Zeit der Kernwaffentests hat zur Folge, dass auch die Tritiumkonzentrationen in den Niederschlägen systematisch abnehmen. Dieser Abwärtstrend wird durch die Freisetzung von Industrietritium überlagert, das aus Quellen innerhalb und ausserhalb der Schweiz stammt und über die Niederschläge ebenfalls in den Wasserkreislauf gelangt. Beide Effekte, Abnahme wie unregelmässige Freisetzung, erschweren die präzise *Altersbestimmung von Grund- und Oberflächenwasser* zunehmend, sie ist aber bei entsprechender Präzision der Messung nach wie vor in Zeitschritten von drei bis fünf Jahren möglich. Voraussetzung dazu sind allerdings Probenserien oder Wiederholungsmessungen zu verschiedenen Jahreszeiten, da die Abnahmen der mittleren Konzentrationen von Jahr zu Jahr oft geringer sind als die jahreszeitlichen Schwankungen (1 bis 3 TU gegenüber 3 bis 12 TU). Die Verteilung der LHG-Stationen gewährleistet eine gute räumliche Differenzierung der Tritium-Input-Verhältnisse. Dies zeigen die Zeitreihen von 1993 bis 1998 für einige ausgewählte Stationen in *Abbildung 5*. Abgesehen von den deutlich überhöhten Werten um Bern, die ähnlich La Chaux-de-Fonds im Jura oder Teuffen in der Ostschweiz von lokalen Abgaben an die Atmosphäre verursacht werden [14], sind die Tritiumkonzentrationen südlich des Alpenhauptkamms wegen der Nähe zum Mittelmeer (mit sehr tiefen Tritiumkonzentrationen) meist niedriger als nördlich davon. Die überregionalen Tritiumabgaben aus England und Frankreich beeinflussen meist nur Gebiete, die ihren Niederschlag vorwiegend von Wetterlagen aus West/Nordwest erhalten. Niedrigere Tritiumkonzentrationen sind auch in Höhenlagen zu erwarten, da die lokalen Kontaminationsfahnen bevorzugt in den unteren Luftschichten ausgeregnet werden und somit nicht in grosse Höhen gelangen [15].

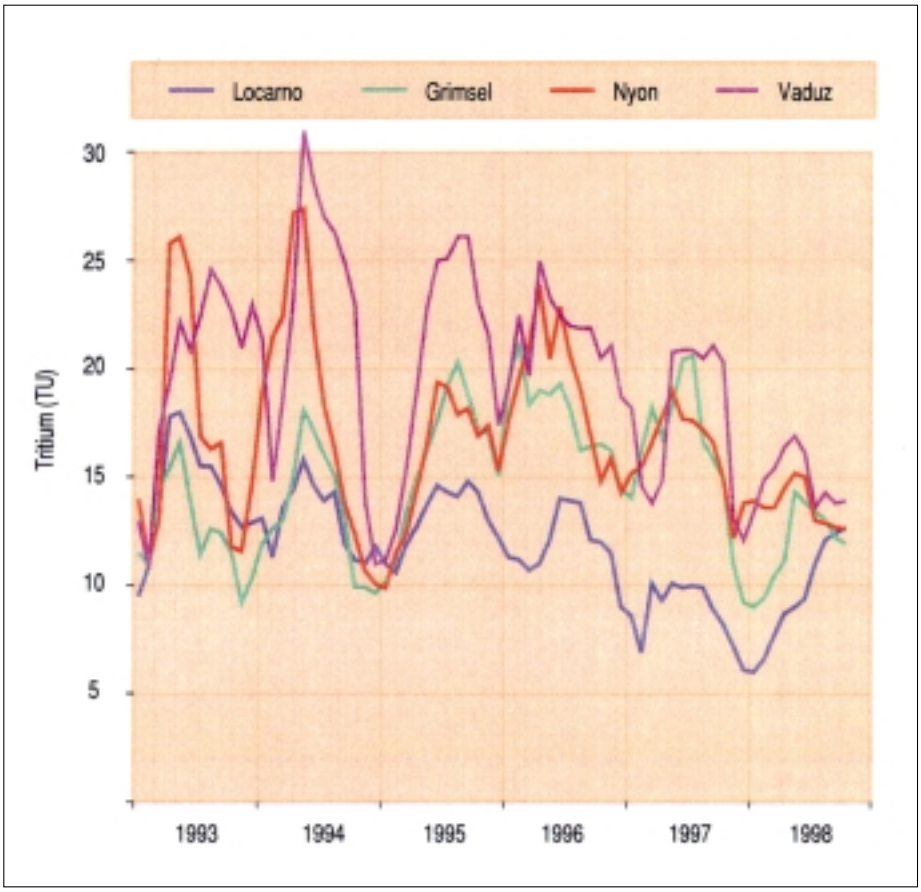


Abb. 5 Zeitreihen von Tritium in Niederschlägen einiger LHG-Stationen. Ein sechs Monate gleitendes Mittel wurde angewandt, um die Saisonalität hervorzuheben. Tritium aus der Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen erhöht die Konzentrationen vor allem nördlich der Alpen.

Deuterium und Sauerstoff-18 im Fluss- und Grundwasser

Klimatische Faktoren, die sich auf die Isotopenverhältnisse im Niederschlag auswirken, werden auch auf das Oberflächenwasser und in stark abgeschwächter Form auf das Grundwasser übertragen. Die *Saisonalität* ist im Flusswasser gegenüber dem Niederschlag um einige Monate verschoben. Da der Niederschlag meist über den Zwischenabfluss ins Flusswasser gelangt (nur ein kleiner Teil fliesst direkt ab), erscheinen die hohen δ^{18}O-Werte der Sommerniederschläge im Abfluss erst gegen Ende des Jahres [16]. Die tiefen δ^{18}O-Werte der Winterniederschläge, durch Aufbau und Abschmel-

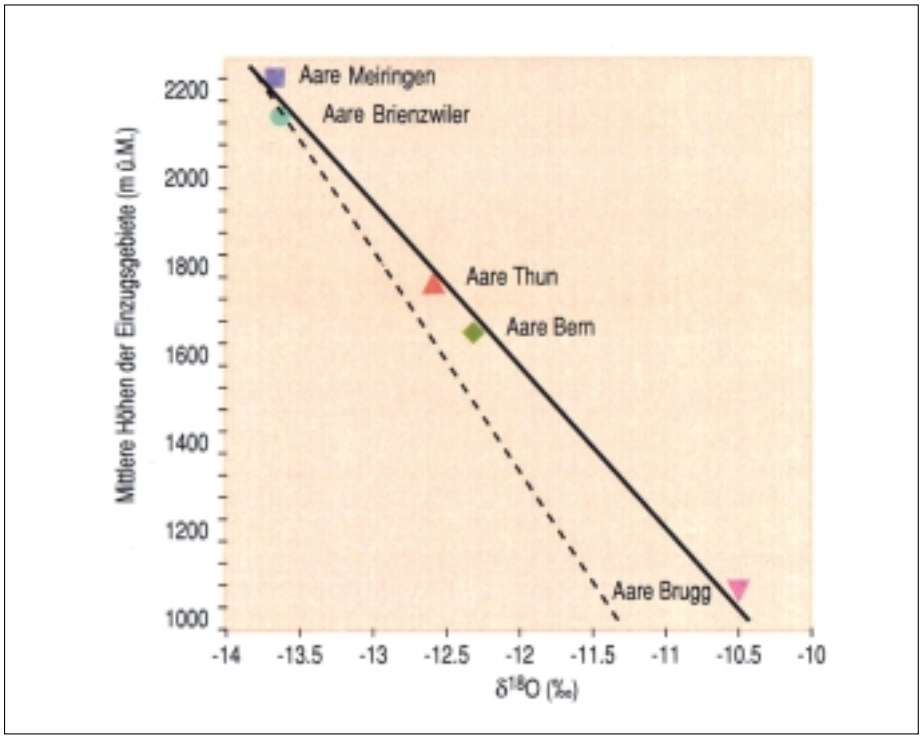


Abb. 6 Die Abnahme der stabilen Isotope mit der mittleren Höhe eines Einzugsgebietes lässt sich auch im Oberflächenwasser am Beispiel der Aare verfolgen. Das Δδ/ΔHöhe liegt mit 0,27‰/100 m im Rahmen der Werte, die in Niederschlägen verschiedener Höhenlagen gemessen werden. Das Beispiel zeigt, das sich die Höhen von Einzugsgebieten auch im regionalen Massstab mit guter Genauigkeit abschätzen lassen; der Einfluss der Verdunstung im Oberflächenwasser ist allerdings für Anwendungen in der Praxis nicht zu vernachlässigen.

zen der Schneedecke zusätzlich verzögert, werden in der Regel zwischen Mai und Juli im Flusswasser gemessen.

Die Aare wird im Messnetz der LHG an mehreren Stellen beobachtet *(Abb. 1)*. Am Oberlauf in Brienzwiler ist der Jahresgang in den stabilen Isotopen wegen der Staustufen im Grimselgebiet nur zum Teil erhalten. Ein Vergleich mit den Niederschlagswerten am Grimsel sowie der Aare bei Meiringen (Datenbank KUP) zeigt aber, dass die Jahresmittelwerte deswegen nicht verfälscht werden. Beim Durchfluss durch Brienzer- und Thunersee werden die jahreszeitlichen Unterschiede wegen der Durchmischungsprozesse bis auf wenige Zehntel Promille gedämpft und steigen gegen Brugg wieder an. Der Unterschied zwischen Winter- und Sommerhalbjahr beträgt dort etwa 1‰.

Die *Höhenabhängigkeit* von $\delta^{18}O$ bleibt auch für das Flusswasser über sein ganzes Einzugsgebiet weitgehend erhalten. Wenn man die $\delta^{18}O$-Mittelwerte der Periode 1993–1998 (für Aare Thun sind es nur die Jahre 1997 und 1998) gegen die mittlere Höhe der Einzugsgebiete an den jeweiligen Messstationen aufträgt, ergibt sich daraus eine Abnahme um 0,27‰ für eine Zunahme um 100 Höhenmeter *(Abb. 6)*. Der Einfluss der Verdunstung vor allem an der Oberfläche der durchflossenen Seen auf den Gradienten der Höhenabhängigkeit im Flusswasser war zumindest während der Beobachtungsperiode gering und macht sich erst bei Brugg bemerkbar. Wenn man dem Flusswasser einen $\delta^{18}O$-Gradienten von 0,20‰ für 100 m zugrunde legt und die Werte für Aare Meiringen bzw. Brienzwiler als Fixpunkte wählt, da sie mit den entsprechenden $\delta^{18}O$-Werten der Niederschläge gut übereinstimmen (gestrichelte Linie in *Abb. 6)*, liegt der Wert für ein Einzugsgebiet von ungefähr 1000 m bei Brugg um ein Promille zu hoch. Dies hätte sicherlich Konsequenzen für eine Anwendung des Höheneffektes in der Praxis: Eine *Fehleinschätzung* der mittleren Höhe eines Einzugsgebietes um etwa 500 m ist (vor allem bei geringeren Höhendifferenzen) selten zu vernachlässigen.

Die im Moment einzige Grundwasserstation in Savigny VD (Source de Lutry) wird seit Anfang 1997 monatlich beprobt. Die mittlere Tritiumkonzentration dieser Quelle entspricht etwa derjenigen der Niederschläge in Nyon der letzten Jahre. Daraus lässt sich eine obere Grenze für das *mittlere Wasseralter* von etwa drei Jahren ableiten. Schwankungen und ein leichter Abwärtstrend im $\delta^{18}O$ (beides nicht dem direkten jahreszeitlichen Verlauf der Niederschläge folgend) lassen auf sekundäre Effekte in einem nicht gut durchmischten Aquifer schliessen [17].

Langzeitverhalten der stabilen Isotope

Die Schweiz besitzt neben Deutschland und Österreich die weltweit längsten Messreihen der Isotopenverhältnisse im Niederschlag, im Flusswasser und im Grundwasser, mit denen sich klimatisch bedingte Veränderungen im Wasserkreislauf nachweisen lassen. Die *Entwicklung des Klimas* seit 1972 wird an Hand der $\delta^{18}O$-Variationen im Niederschlag abgebildet *(Abb. 7)*. Alle Niederschlagsstationen zeigen, mit einer geringfügigen Ausnahme (Locarno 1979–1981), denselben Trend. Seit Mitte der 80er Jahre wird neben einem Anstieg der stabilen Isotope (als Folge des beobachteten Temperaturanstiegs) auch eine erhöhte Variabilität von klimatischen Kenngrössen (wie Niederschlagsmenge und -verteilung) registriert, die sich letztlich auf alle hydrologischen Teilsysteme auswirkt [18]. Um das Klimasignal gegenüber der Saisonalität hervorzuheben, wurden die Monatsmittel der Niederschläge durch ein 36 Monate übergreifendes Mittel geglättet. Da die Isotopenwerte im Flusswasser gegenüber dem Niederschlag bereits gedämpft sind, wurde dort nur ein sechs Monate übergreifendes Mittel angewandt. Die jahreszeitlichen Variationen sind hier dem klimatischen Isotopensignal überlagert. Der Abfluss der Rhone (vor dem Genfersee) ist wie derjenige der Aare vor dem Brienzersee durch Rückhaltebecken für die Elektrizitätsproduktion modifiziert. Jahreszeitliche Schwankungen sind deshalb nicht immer voll erhalten, der Langzeittrend in den Isotopen wird davon aber nicht betroffen. Vergleicht man die mittleren $\delta^{18}O$-Werte mit den entsprechenden Höhen der Einzugsgebiete beider Flüsse (Rhein/Diepoldsau: –12,64‰, 1800 m ü. M., 6100 km^2; Rhone/Porte du Scex: –13,94‰, 2130 m ü. M., 5200 km^2) für die Zeitperiode der übrigen LHG-Stationen (1993–1998), so stimmt der Rhein mit der Höhenbeziehung der Aare überein, der Wert der Rhone ist aber um etwa 0,4‰ zu tief. Das Einzugsgebiet der Rhone ist mit 20‰ stark vergletschert, was sich auf die Isotopenwerte

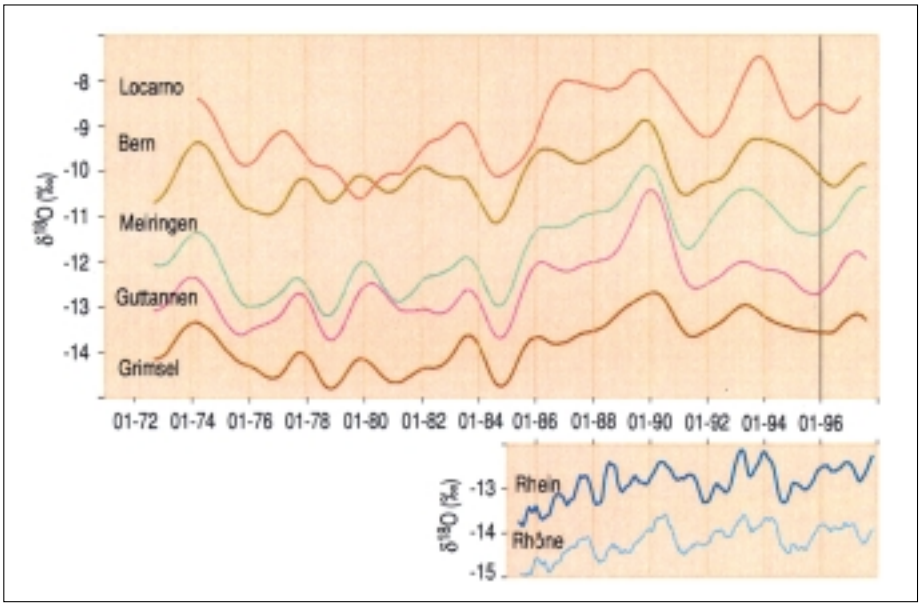


Abb. 7 Vergleich der $\delta^{18}O$-Werte im Niederschlag mit denjenigen von Flüssen mit Einzugsgebieten von regionaler Grösse. Ein 36 Monate übergreifendes Mittel wurde bei den Niederschlägen angewandt, um jahreszeitliche Schwankungen zu unterdrücken. Da das Flusswasser gegenüber dem Niederschlag schon stark gedämpft ist, wurde mit dem sechs Monate gleitenden Mittel nur die Saisonalität unterstützt. Der klimatische Trend im Niederschlag kommt in beiden Flusssystemen voll zur Geltung.

im Abfluss auswirken kann [19], zudem können aber auch lokale Isotopeneffekte eine Rolle spielen (Beispiel Sion mit «zu negativen» Isotopenwerten).

Schlussfolgerungen

Das Isotopenmessnetz der Schweiz, seit sieben Jahren operationell, bietet mit seiner Datenbank *(Abb. 8)* eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten für Wissenschaft und Praxis. Die erarbeiteten Messreihen machen aber auch deutlich, dass das Verhalten der Wasserisotope im hydrologischen Kreislauf nicht Naturkonstanten gleichzusetzen ist, die, einmal mit hinreichender Genauigkeit gemessen, überall und zu jeder Zeit als feste Grössen angewandt werden können. Kurzzeitiges Wettergeschehen ebenso wie längerfristige Variabilität des Klimas verändern die Isotopenverhältnisse im Niederschlag und damit in Oberflächen- und Grundwasser. Nur das Wissen um solche Veränderungen zusammen mit den entsprechenden Messreihen machen eine sinnvolle Anwendung in der Isotopenhydrologie möglich. Die vertiefte Kenntnis von Wechselwirkungen im Wasserkreislauf ist für eine dauerhafte *wasserwirtschaftliche Planung* angesichts der Prognosen für die klimatische Entwicklung im nächsten Jahrhundert das beste *Vorsorgeprinzip*. Das Messnetz der Schweizerischen Landeshydrologie und -geologie zur Beobachtung der Isotope im Wasserkreislauf bietet dafür eine wertvolle Basis. Die Ergebnisse werden auch in Zukunft jährlich im Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz veröffentlicht.

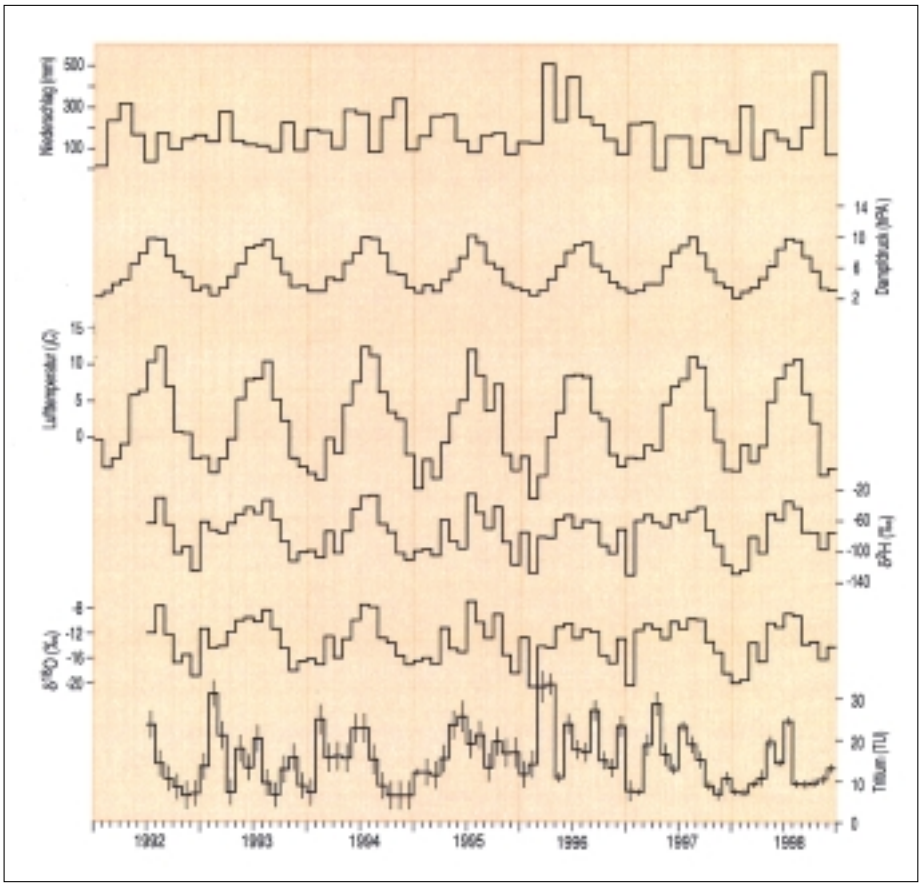


Abb. 8 Parameterset der LHG-Station Grimsel seit Beginn der Messperiode im Jahr 1992 zusammen mit den entsprechenden meteorologischen Parametern SMA

Literaturverzeichnis

[1] *Schotterer, U., Stocker, T., Hunziker, J., Buttet, P., Tripet, J. P.* (1995): Isotope im Wasserkreislauf: Ein neues eidgenössisches Messnetz. Gas – Wasser – Abwasser 9, 714–720.

[2] Landeshydrologie und -geologie (1998): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 1997. Landeshydrologie und -geologie, Bern.

[3] *Etcheverry, D., Parriaux, A.* (1998): Les méthodes isotopiques dans la pratique de l'hydrogéologie. Gas – Wasser – Abwasser 1, 10–17.

[4] *Craig, H., Gordon, L. I.* (1965): Deuterium and oxygen.18 variations in the ocean and the marine atmophere. In: Tongiorgi, E. (Ed.): Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pisa, Italy, 1–22.

[5] *Dansgaard, W.* (1964): Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, 436–468.

[6] *Ehalt, D., Knott, K.* (1965): Kinetische Isotopentrennung bei der Verdampfung von Wasser. Tellus 17, 389–397.

[7] *Merlivat, L., Jouzel, J.* (1979): Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen-18 relationship for precipitation. J. of Geophys. Res. 84, 5029–5033.

[8] *Johnsen, S. J., Dansgaard, W., White, J. W. C.* (1989): The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions. Tellus 41B, 452–468.

[9] *Jacob, H., Sonntag, Ch.* (1991): An 8-year record of the seasonal variation of ^{2}H and ^{18}O in atmospheric water vapour and precipitation at Heidelberg, Germany. Tellus, 43B, 291–300.

[10] *Jouzel, J., Merlivat, L.* (1984): Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modelling of the isotopic effects during snow formation. J. of Geophys. Res., 89, 11794–11757.

[11] *Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R.* (1993): Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P. K., Lohmann, K. C., Mckenzie, J. & Savin, S. (eds.): Climate Change in Continental Isotopic Records, Geophysical Monograph 78, American Geophysical Union, 1–3.

[12] *Siegenthaler, U., Matter, H. A.* (1982): On the dependence of $\delta^{18}O$ and δD in precipitation on climate. In: Variation of the Isotopic Composition of Precipitation and of Groundwater during the Quaternary as a Consequence of Climatic Changes. IAEA Vienna.

[13] *Gat, J. R., Carmi, I.* (1970): Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. J. Geophys. Res., 75, 3039–3048.

[14] Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz. Jahresberichte des Bundesamts für Gesundheitswesen, Bern.

[15] *Schotterer, U., Schwarz, P., Rajner, V.* (1998): From prebomb levels to industrial times: A complete tritium record from an alpine ice core and its relevance for environmental studies. Proc. Conf. on Isotope Techniques in the Study of Environmental Change, IAEA Vienna, 581–590.

[16] *Martinec, J., Oeschger, H., Schotterer, U., Siegenthaler, U.* (1982): Snowmelt and groundwater storage in an Alpine basin. In: Hydrological Aspects of Alpine and High Mountain Areas, IAHS Publ. No. 138, 169–175.

[17] *Etcheverry, D., Parriaux, A.* (1999): Etude hydrogéologique et isotopique de la source de Savigny. Bericht Geolep/EPFL zuhanden der Landeshydrologie und -geologie, 17S., Lausanne (unveröffentlicht).

[18] *Schotterer, U., Fröhlich, K., Stichler, W., Trimborn, P.* (1993): Temporal variations of oxygen-18 and deuterium excess in alpine regions of Switzerland. In: Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere. IAEA, Vienna, 53–64.

[19] *Stichler, W., Schotterer, U.* (2000): From Accumulation to Discharge-Modification of Stable Isotopes during Glacial and Postglacial Processes. Hydrol. Process. 14, 1423–1438.

Verdankungen

Ein Teil der in dieser Arbeit verwendeten Daten stammt aus Projekten, die durch den Schweizerischen Nationalfonds unterstützt wurden. Peter Nyfeler wird für die Sauerstoff-18-Messungen gedankt.

K E Y W O R D S

Wasserisotope – Messnetz – Klima – Wasserkreislauf

A D R E S S E D E S A U T O R S

Ulrich Schotterer, Umweltphysiker
Universität Bern
Abt. Klima- und Umweltphysik
Sidlerstrasse 5, 3012 Bern
Tel. 031/631 44 84, Fax 031/631 87 42
E-Mail: schotterer@climate.unibe.ch

Co-Autoren:

Thomas Stocker, Prof. Dr. sc. nat.
Hansueli Bürki
(Adresse, siehe Autor)

Johannes Hunziker, Prof. Dr. rer. nat.
Institut de minéralogie et pétrologie
Université de Lausanne

Ronald Kozel, Dr. rer. nat.
Domenico Alessandro Grasso, Dr. rer. nat.
Jean-Pierre Tripet, Dr. rer. nat.
Landeshydrologie und -geologie, Bern