

Wasserisotope in der Schweiz

Neue Ergebnisse und Erfahrungen aus dem nationalen Messnetz ISOT

Isotopes de l'eau en Suisse

Résultats récents du réseau national de mesure ISOT

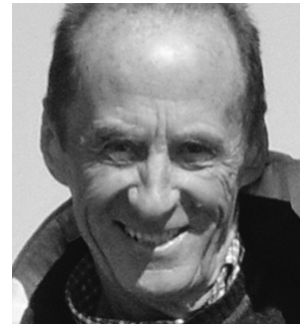
Les isotopes reportent les signes des changements climatiques présents dans les précipitations sur l'ensemble des eaux de surface et souterraines. Le réseau suisse de mesure des isotopes (ISOT) récolte ces informations sur une série de sites représentatifs et les met à disposition des praticiens et des chercheurs. Les isotopes stables documentent principalement l'origine des précipitations et les changements qu'ont connus leurs sources, l'augmentation de la température, les processus d'évaporation et l'effet retardateur de la fonte des neiges sur la genèse de l'écoulement. Ils constituent une série indépendante de données de référence, qui peut être employée pour modéliser les conditions hydroclimatiques dans les bassins versants des grandes rivières et l'influence de celles-ci sur les eaux souterraines.

Water Isotopes in Switzerland

Latest Findings of the National ISOT Network

The water isotopes transfer signals of climate changes in precipitation to surface and ground waters. In Switzerland, the isotope network (ISOT) collects this information at representative monitoring stations for practical and scientific purposes. Stable isotopes mainly document the origin of precipitation and the changes that have occurred at its source, temperature rise, evaporation processes and the retardation of discharge due to snow melt. They provide an independent data set which can be used to model hydro-climatic conditions in the catchments of large rivers and their effect on groundwater systems.

Ulrich Schotterer



Wasserisotope übertragen Signale von klimatischen Veränderungen im Niederschlag flächendeckend auf Oberflächen- und Grundwasser. Das Isotopenmessnetz in der Schweiz (ISOT) sammelt diese Informationen für Praxis und Wissenschaft an repräsentativen Messstellen. Die stabilen Isotope dokumentieren vor allem die Herkunft der Niederschläge und die Änderung an ihren Quellen, den Temperaturanstieg, Verdunstungsprozesse und die verzögerte Abflussbildung durch Schneeschmelze. Als Referenzdatenset sind sie geeignet, die hydro-klimatischen Verhältnisse in den Einzugsgebieten der grossen Flüsse und deren Auswirkung auf Grundwassersysteme abzubilden.

1 Einleitung

Wasserisotope gelten als *ideale Tracer*, um Veränderungen im Wasserkreislauf zu verfolgen [1]. Sie werden auch in der Schweiz verbreitet eingesetzt [2]. Im Vordergrund standen in der Vergangenheit vor allem die Datierung von jungem Grundwasser, die Abschätzung der mittleren Höhe von Einzugsgebieten und die Unterscheidung von Wasserkomponenten in jungem Grundwasser und im Abfluss von Oberflächenwasser. Wegen der weitgehenden Entleerung des stratosphärischen Reservoirs an *Tritium* aus der Zeit der Kernwaffentests hat die systematische Erfassung der Tritiumverteilung in der Schweiz an Bedeutung verloren. Verstärkt hat sich hingegen

die Bedeutung der stabilen Isotope Deuterium und Sauerstoff-18, weil durch sie klimatisch bedingte Veränderungen im Wasserkreislauf erfasst werden. Bei einer Überprüfung von langen Datenreihen aus der globalen Datenbank für Isotope im Niederschlag GNIP¹ der Internationalen Atomenergie-Organisation IAEA Anfang der 1990er-Jahre konnte der *Trend der globalen Erwärmung* in den stabilen Isotopen im Niederschlag nachgewiesen werden [3]. Ein ähnlicher Trend findet sich auch in den Daten der Isotopenmessungen in der Schweiz [4, 5, 6, 7, 8].

Wasserisotope werden seit 1992 im Rahmen des Messnetzmoduls ISOT der *Nationalen Grundwasserbeobachtung* NAQUA landesweit im Niederschlag (13 Stationen) in monatlichen Sammelproben, im Oberflächenwasser (7 Stationen) kontinuierlich oder in Stichproben sowie versuchsweise an Grundwasserstationen (3 Stationen) gemessen (Abb. 1). Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Überprüfung der zurzeit verfügbaren Ergebnisse vor allem auch im Hinblick auf eine Anwendung der Wasserisotope als Tracer der klimatisch bedingten Veränderungen im Wasserkreislauf. Zusammen mit den zusätzlich von der *Klima- und Umweltp Physik* (KUP) der Universität Bern betriebenen Stationen wird der gesamte Höhenbereich der Schweiz erfasst. Er reicht von Basel (315 m) bis zum Jungfraujoch (3580 m). Das Rückgrat bildet das Transekt über den Alpenhauptkamm von Bern nach Locarno, dessen Datenreihen mittlerweile vier Jahrzehnte abdecken.

2 Grundlagen

Die Variationen der stabilen Isotope *Deuterium* (²H) und *Sauerstoff-18* (¹⁸O) im Niederschlag hängen von *meteorologischen* und *klimatischen Faktoren* ab. Sie widerspiegeln die saisonale Verteilung von Temperatur und Niederschlag, die geografische Breite und Höhe der Standorte, an denen die Isotope gemessen werden, sowie die Entfernung von der Küste bzw. vom ozeanischen Quellgebiet der Niederschläge. Die bestimmenden Parameter und Prozesse sind die relative Feuchtigkeit und die Temperatur während der Verdunstung aus den Meeren, die Temperatur und der Grad der Kondensation beim Ausregnen bzw. der Anteil von fester und flüssiger Phase in der Wolke, die Anteile von rezyklierter kontinentaler Feuchtigkeit und nicht zuletzt Verdunstungseffekte an den fallenden Regentropfen. All dies ist im Detail bekannt und wurde in vielen grundlegenden Arbeiten ausführlich diskutiert [9, 10, 11, 12]. Aus messtechnischen Gründen werden die Isotopenverhältnisse auf einen internationalen Standard V-SMOW² bezogen und als Delta-werte (^δ2H bzw. ^δ18O) in Promille angegeben.

Die Kondensation von atmosphärischem Wasserdampf zu Wolken und Niederschlag unter Gleichgewichtsbedingungen verursacht parallele und proportionale Änderungen von ^δ2H und ^δ18O im Niederschlag und im zurückbleibenden Wasserdampf. Als Folge davon sind sie in beiden Phasen linear korreliert, was sich in der *globalen Niederschlagsgeraden* GMWL³ mit einer Steigung von 8 ausdrücken lässt. Der Achsenabschnitt geht nicht durch 0, sondern liegt bei 10, weil die relative Feuchtigkeit bei der Verdunstung aus dem Ozean zusätzliche ki-

netische Prozesse verursacht, die das leichtere Molekül (¹H²H¹⁶O) bevorzugen. Das Ergebnis ist ein Überschuss von Deuterium im Wasserdampf, der Deuterium-Exzess (d), der sich immer auf die Steigung 8 bezieht ($d = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$).

3 ISOT-Niederschlagsstationen

Die Niederschlagsverteilung im Alpenraum wurde in den letzten Jahrzehnten intensiv erforscht [13, 14]. Sie wird im Wesentlichen durch die Form des Alpenkörpers und des angrenzenden Mittelgebirges beeinflusst. Das Relief deformiert das Windfeld, beschleunigt die Luft an den Rändern und verursacht auf der Südseite und in den Mulden des nördlichen Alpenvorlands das Blockieren von Kaltluft. Blockierte Kaltluft verändert und erweitert die Gebirgstopografie in den umliegenden Fusszonen. Besonders im Winter hat dies zur Folge, dass die Hebung von Luftmassen vor dem eigentlichen Alpenkörper einsetzt und Niederschlagsmaxima oft vor den grössten orografischen Erhebungen beobachtet werden. Eine einfache *Niederschlag-Höhen-Beziehung* besteht also nicht generell, was bei der Interpretation des Höheneffekts der stabilen Isotope berücksichtigt werden muss (Kap. 5.1). Eine weitere Besonderheit in der Niederschlagsverteilung ist die Abschirmung der inneralpinen Täler. Während beispielsweise die Jungfrauregion bis zu 4 m Niederschlag pro Jahr erhält, sind es zwischen Brig und Sion nur etwa 15% dieser Menge.

Im jährlichen Mittel fallen die meisten Niederschläge im südwestlichen Hochjura, entlang der nördlichen Voralpen und Hochalpen sowie im Tessin. Das Mittelland liegt im Regenschatten des Juras. Die *Niederschlagssummen* sind hier im Sommer am höchsten, und das Schwergewicht der Niederschläge erstreckt sich von den Freiburger Voralpen über die Zentralschweiz nach Nordosten bis zum Säntis. Sommer- und Herbstniederschläge spielen auch im Tessin eine wichtige Rolle; im Spätherbst und Winter sind hier die Niederschläge aber etwas niedriger. Vergleichsweise trocken sind das Rhonetal, aber auch Gebiete in Mittelbünden und im Engadin, insbesondere in der Zeit von Herbst bis Frühling.

Obwohl der jahreszeitliche Verlauf und die Menge der Niederschläge in den einzelnen Regionen sehr unterschiedlich sind, korrelieren die Monatsmittel der Isotopenwerte an den Niederschlagsstationen untereinander.

¹ Global Network for Isotopes in Precipitation, <http://nds121.iaea.org/wiser/index.php>

² Vienna Standard Mean Ocean Water

³ GMWL = Global Meteoric Water Line



Abb. 1 Lage der ISOT- und KUP-Stationen. Niederschlagsstationen mit Höhenangabe in Rot, Oberflächenwasserstationen mit Höhenangabe in Blau und Grundwasserstationen in Grün.

Zwischen so unterschiedlichen Klimaregionen wie dem Hochrhein (Basel) und dem Tessin (Locarno) ist die *Korrelation* erwartungsgemäss niedrig ($r^2: 0,45$) und zwischen benachbarten Stationen derselben Region (Bern und Burgdorf) hoch ($r^2: 0,91$). Nahe gelegene Regionen wie das Wallis (Sion) und das Gebiet La Brévine-Nyon können sich dagegen durchaus in Bezug auf das Isotopensignal unterscheiden. Die hohe Korrelation zwischen Grimsel und Jungfrauoch ($r^2: 0,91$) zeigt, dass die Niederschlagsmenge eine untergeordnete Rolle spielt, weil im Langzeitmittel eine hohe Korrelation zwischen den δ -Werten im vorherrschenden Wasserdampf und dem daraus kondensierten Niederschlag besteht [15]. Selbst zwischen Visp (650 m ü. M.) und dem Jungfrauoch (3580 m ü. M.) ist die Korrelation noch sehr hoch ($r^2: 0,76$).

Die saisonalen Niederschlagsmengen spielen allerdings dann eine wichtige Rolle, wenn die Isotope als Tracer im Oberflächen- und Grundwasser eingesetzt werden. Die Unterschiede zwischen Winter und Sommer können bei den stabilen Isotopen im Extremfall wie im Oberwallis (Visp, St. Niklaus) 10% übersteigen. Auch für die relativ tiefen Tritiumkonzentrationen können die saisonalen Unterschiede noch immer einen Faktor 2–3 betragen. Obwohl das ISOT-Messnetz (Abb. 1) die Kleinräumigkeit der Schweiz nicht lückenlos zu erfassen vermag, liess sich feststellen, dass die

Niederschlagsstationen ein *repräsentatives Bild* der Verteilung der Isotope in der Schweiz vermitteln [16].

4 Tritium

Das *stratosphärische Reservoir* aus der Zeit der Kernwaffentests ist weitgehend entleert, und als Folge sind die Abnahmen von Jahr zu Jahr sehr niedrig. Eine Datierung mit Tritium allein ist nur als sehr grobe Abschätzung möglich. Wegen der niedrigen Konzentrationen und der Dämpfung der jahreszeitlichen Variationen wurden die Oberflächenwassermessungen bereits ab 2006 auf einen 2-Monats-Rhythmus reduziert. Ab 2011 werden an den ISOT-Stationen keine Tritiummessungen mehr durchgeführt.

Aus den bisherigen Messungen an den Niederschlagsstationen ergibt sich eine Regionalisierung mit höheren Werten im Norden und im Mittelland und tieferen Werten im Westen und vor allem im Tessin. *Lokale Emissionen* von Industrietritium und aus der Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen in Frankreich und England führen zu

Erhöhungen, die mit der Zugbahn der Luftmassen und der Niederschlagsverteilung zusammenhängen. Seit 2003 sind der Westen und der Süden davon kaum mehr betroffen. In Locarno liegt die Tritiumkonzentration bereits im Bereich der natürlichen Produktionsrate. Das arithmetische Jahresmittel ist regelmässig um ein Drittel niedriger als in Nyon bzw. in Sion. Der Unterschied lässt sich mit den vorherrschenden Quellen der Luftfeuchtigkeit und ihren Zugbahnen in Zusammenhang bringen. Die Distanz zwischen Mittelmeer und Tessin ist wesentlich kürzer als zwischen Atlantik und Wallis. Dadurch ist der Beitrag des Ozeans zur Verdünnung des atmosphärischen Tritiums in Locarno effizienter als in Nyon [17].

Ein weiterer interessanter Aspekt ergibt sich aus dem Vergleich der *Zeitreihen von Tritium* in Niederschlägen und in Oberflächenwässern. In *Abbildung 2* ist der Verlauf der Tritiumkonzentrationen in Locarno und der mittleren Konzentration der beiden Stationen Nyon und Sion im Vergleich mit denen im Ticino in Riazzino und der Rhone in

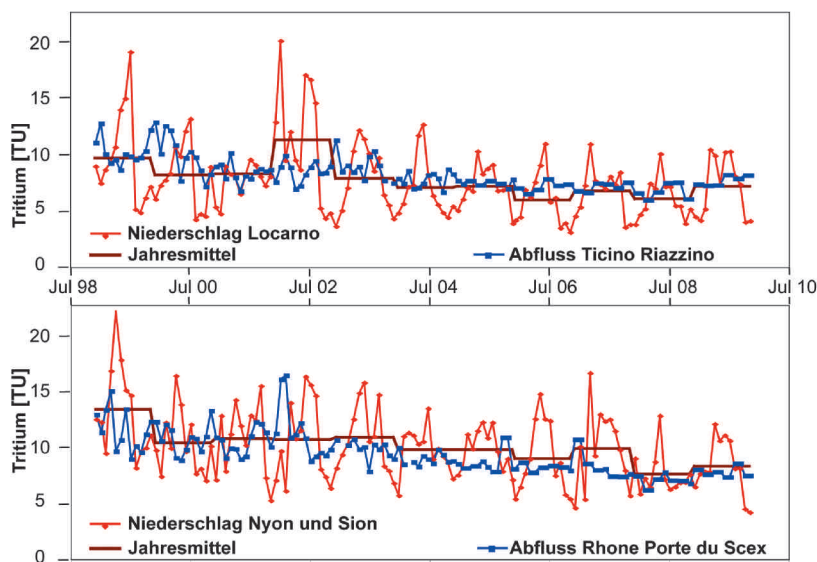


Abb. 2 Tritiumkonzentrationen im Niederschlag in Locarno und gemittelte Konzentrationen der beiden Stationen Nyon und Sion im Vergleich zu jenen im Ticino in Riazzino und in der Rhone in Porte du Scex. Die Tritiumkonzentrationen im Ticino liegen über dem Mittel der Niederschläge, jene in der Rhone dagegen darunter.

Porte du Scex dargestellt. Ab etwa 2003 liegen die Konzentrationen im Ticino immer über dem Jahresmittel des Niederschlags, während die Konzentrationen in der Rhone immer darunter liegen. Eine mögliche Ursache ist in der unterschiedlichen saisonalen Niederschlagsverteilung zu finden. Im Tessin tragen tritiumarme Spätherbst- und Hochwinterniederschläge weniger zum Abfluss bei als im Wallis. Zusätzlich dürfte der Beitrag von altem Gletscherschmelzwasser, das kein Tritium enthält, die Konzentrationen in der Rhone im Sommer reduzieren. Es ist zudem zu berücksichtigen, dass die Wasserkomponenten, die zum Abfluss beitragen, in den Einzugsgebieten unterschiedliche Verweilzeiten aufweisen. Zusammen mit den stabilen Isotopen (Kap. 5.2) bieten die Tritiumergebnisse ein *unabhängiges Datenset*, um die hydro-klimatischen Verhältnisse in den Einzugsgebieten der grossen Flüsse zu untersuchen.

5 Stabile Isotope

5.1 Im Niederschlag

Für die Anwendung der stabilen Isotope in der Praxis sind vor allem *Höhen- und Temperatureffekte* bedeutend. Wegen der klimatischen Veränderungen gewinnt auch das Verhältnis von Deuterium zu Sauerstoff-18 und die daraus abgeleitete Grösse Deuterium-Exzess an Bedeutung für die Isotopenhydrologie. Die heute vorliegende erweiterte Datengrundlage erlaubt die nachfolgend beschriebenen Beobachtungen.

Höheneffekt

Der Höheneffekt beruht darauf, dass Luftmassen durch Erhebungen wie die Alpen zum Aufsteigen gezwungen werden, sich abkühlen und ausregnen. Die δ -Werte der stabilen Isotope im Niederschlag nehmen entsprechend der *adiabatischen Abkühlung* ab. Wie in Kapitel 3 erläutert, spielen in der Schweiz bei der Niederschlagsbildung nicht alleine

die Höhenlage, sondern auch die Exposition mit *Luv-* und *Lee*-Effekten, blockierte Kaltluft und durch Instabilitäten ausgelöste konvektive Niederschläge eine wichtige Rolle. Die Koexistenz von Wasserdampf, Wassertröpfchen und Eiskristallen in den Wolken verursacht überdies zusätzliche Isotopeneffekte, die die Höhenbeziehung beeinflussen [18].

Blockierte Kaltluft im Raum Bern kann bei den vorherrschenden Westwetterlagen oft zu erzwungener Hebung und damit zu verstärkter Abkühlung der Luftmassen führen, die in Richtung Oberland ziehen. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (dies gilt im Folgenden immer entsprechend auch für $\delta^2\text{H}$) im Niederschlag von Meiringen sind deshalb bei nur 54 m Höhendifferenz im Langzeitmittel beinahe um 1‰ tiefer als in Bern. Von Meiringen über Guttannen bis zur Station Grimsel folgen die Isotopenwerte im Niederschlag dann dem Verlauf der Kondensation durch adiabatische Abkühlung auf der entsprechenden Höhenstufe [19]. Die durchschnittliche Abnahme um etwa 0,2‰ im $\delta^{18}\text{O}$ pro 100 m Höhenzunahme ist über mehrere Jahre gemittelt sehr stabil. In Bern selbst, das sich etwas abgeschwächt noch immer im Lee des Hochjuras befindet, hat der Niederschlag dieselben $\delta^{18}\text{O}$ -Werte wie in La Brévine, das 500 m höher liegt. Der Höheneffekt ist hier wegen der bereits erfolgten Hebung der Luftmassen nicht wirksam. Zwischen Nyon und La Brévine hingegen ist der Höheneffekt mit einer Abnahme von 0,2‰ pro 100 m vorhanden, obwohl auch Nyon vorwiegend im Lee und damit im Regenschatten des Hochjuras liegt. Warum die $\delta^{18}\text{O}$ -Mittel dort im Sommer wie auch im Winter deutlich höher sind als in La Brévine, ist im Moment noch ungeklärt.

Das Rhonetal und seine Seitentäler, allseitig durch hohe Berge abgeschirmt, sind schweizweit die *trockensten Gebiete*. Frontaler Niederschlag kommt vor allem aus Südwest bis West; bei kräftigen Höhenwinden wird Niederschlag über die Waadtländer und Berner Alpen ins Rhonetal verfrachtet. Die Kondensationstemperaturen sind deshalb im Mittel deutlich niedriger und die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte entsprechend negativer als in Nyon. Bei nur 30 m Höhendifferenz zwischen Nyon und Sion beträgt deshalb die Abnahme von $\delta^{18}\text{O}$ 1,7‰.

Die *Zunahme der Niederschläge mit der Höhe* erfolgt im Wallis nur sehr langsam. Erst ab etwa 1600 m nehmen die Niederschläge zu. Zwischen Sion, Visp und St. Niklaus ist der Gradient des $\delta^{18}\text{O}$ mit einer Abnahme um 0,5‰ für 100 m noch immer sehr flach, weil der Anteil

Station	Höhe [m ü. M.]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]
Basel	316	-8,58
Locarno	379	-8,27
Buchs	387	-9,15
Nyon	455	-8,27
Vaduz	457	-9,90
Sion	482	-9,95
Burgdorf	530	-9,74
Bern	541	-9,61
Meiringen	595	-10,53
Visp	639	-11,03
St. Gallen	776	-9,90
Grindelwald	1040	-12,06
La Brévine	1042	-9,40
Guttannen	1055	-11,93
St. Niklaus	1150	-13,22
Pontresina	1774	-13,76
Grimsel	1980	-13,25
Scheidegg	2061	-13,52
Säntis	2502	-11,24
Jungfrauoch	3580	-15,19

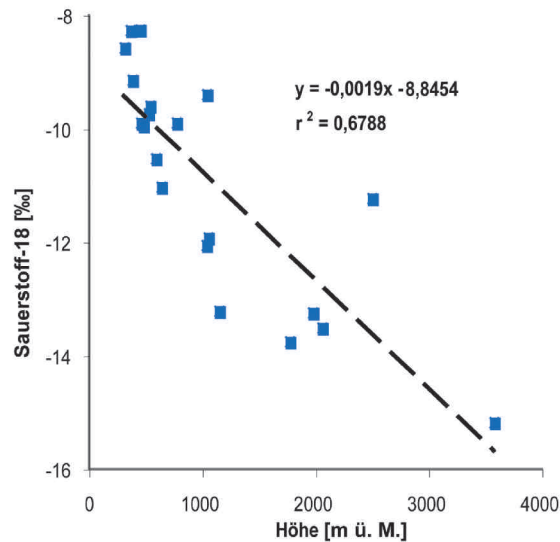


Abb. 3 Der Höheneffekt an den Isotopen-Niederschlagsstationen in der Schweiz im Mittel der Jahre zwischen 2000 und 2009.

der Niederschläge, die in grosser Höhe kondensieren, überwiegt. Das Mittel aller Stationen mit langen Datenreihen (Abb. 3) entspricht mit 0,2‰ für 100 m wohl dem in der einschlägigen Literatur am häufigsten zitierten Wert, die Abweichungen davon sind allerdings beträchtlich. Für die Praxis empfiehlt sich deshalb, wenn immer möglich, eine Eichung an Proben mit vergleichbaren Verhältnissen.

Temperatureffekt

Der überwiegende Teil der Isotopeneffekte ist temperaturabhängig und lässt sich unter einfachen Modellannahmen befriedigend erklären. Bei einer ersten Überprüfung der GNIP-Daten im Jahre 1964 fand Dansgaard [9] für die Beziehung von $\delta^{18}\text{O}$ zur Temperatur am Ort des Niederschlags: $\delta^{18}\text{O} = 0,69 \cdot T - 13,6\text{‰}$. Er bezog sich dabei auf eine Kondensations-temperatur an der ozeanischen Quelle des Niederschlags von 20 °C mit schrittweisem Ausregnen bei isobarischer Abkühlung der Luftmassen auf dem Weg nach Norden. Zumischungen anderer Feuchtigkeitsquellen wurden dabei ausgeschlossen. Dieser Temperaturfaktor gilt für das Jahresmittel von küstennahen Stationen im Nordatlantik unter der Voraussetzung eines parallelen Verlaufs der Kondensationstemperatur an der Wolkenunterkante und der Temperatur am Boden. Im Bereich zwischen 0 und 20 °C schwankt der

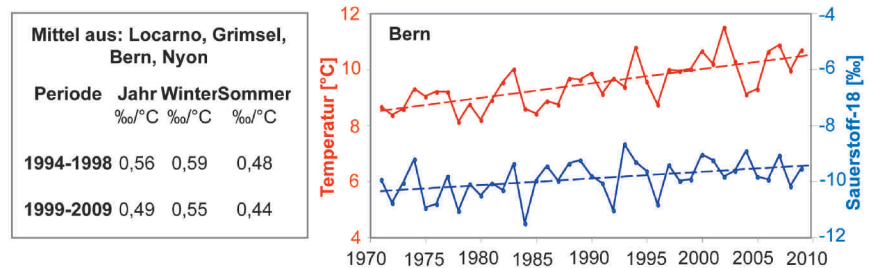


Abb. 4 Mittlerer Temperaturfaktor von $\delta^{18}\text{O}$ an ausgewählten ISOT-Niederschlagsstationen (links) und Trend von Temperatur und Sauerstoff-18 in den Jahresmitteln der letzten 40 Jahre in Bern (rechts).

Faktor zwischen 0,9 und 0,5‰/1 °C [1].

Im Alpenraum mit seinen unterschiedlichen Feuchtigkeitsquellen, grossen Variationen in der Niederschlagsverteilung und komplexen Mechanismen, die Niederschlag auslösen können, gibt es keinen exakten, überall gültigen Temperaturfaktor. Der Trend der Erwärmung in den letzten Jahrzehnten ist jedoch in den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten aller Niederschlagsstationen deutlich zu beobachten. Am Beispiel der Datenreihe von Bern (Abb. 4) sieht man auch, dass die Schwankungen von Temperatur und $\delta^{18}\text{O}$ wegen der erwähnten Einschränkungen nicht immer parallel verlaufen, obwohl

Jahresmittel diese Effekte etwas glätten. Die meteorologischen Bedingungen variieren von Jahr zu Jahr in der Regel weniger als von Monat zu Monat.

Bei der letzten Beurteilung der Temperaturbeziehung vor zehn Jahren [5] wurden die Sommer-, Winter- und Jahresmittel der δ -Werte von vier ISOT-Stationen (Locarno, Grimsel, Bern und Nyon) der Periode 1994–1998 verwendet. Der Vergleich mit der Periode 1999–2009 in Abbildung 4 zeigt geringfügige Verschiebungen zu niedrigeren Werten. Alle Werte liegen jedoch um 20–30% unter den Werten aus den vereinfachten Modellannahmen, weil darin die komplexen meteorologi-

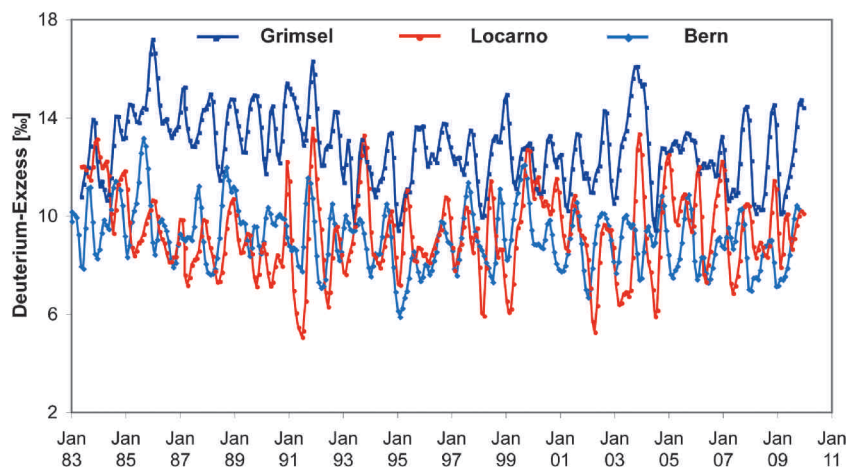


Abb. 5 Zeitreihen von Deuterium-Exzess an den Messstellen Grimsel, Bern und Locarno (l.) sowie d-Mittelwerte an allen Niederschlagsstationen zwischen 2002 und 2009 (r.).

Station 2002-2009	Höhe [m ü. M.]	Exzess [‰]
Basel	316	7,1
Locarno	379	9,2
Buchs	387	8,4
Nyon	455	7,8
Vaduz	457	6,3
Sion	482	6,0
Burgdorf	530	8,7
Bern	541	8,7
Meiringen	595	7,9
Visp	639	5,2
St. Gallen	776	9,7
Grindelwald	1040	9,1
La Brévine	1042	10,9
Guttannen	1055	10,2
St. Niklaus	1150	6,5
Pontresina	1774	8,5
Grimsel	1980	12,5
Scheidegg	2061	9,9
Säntis	2502	10,4
Jungfrauoch	3580	11,4

schen Bedingungen im Alpenraum nicht berücksichtigt sind.

Deuterium-Exzess

Die raschere Abkühlung und Erwärmung der Luft gegenüber der Ozeanoberfläche im Verlauf der Jahreszeiten bewirkt eine Änderung der relativen Feuchtigkeit und als Folge auch eine saisonale Änderung des Deuterium-Exzesses (d) im Niederschlag. Ein d von 10‰ in der GMWL entspricht einer relativen Luftfeuchtigkeit bezogen auf den Sättigungsdampfdruck an der Ozeanoberfläche bei 25 °C von 81% [11]. Mit abnehmender Luftfeuchte wird die kinetische Trennung grösser, der Deuterium-Exzess steigt. Die höchsten d -Werte treten im Spätherbst und Frühwinter auf, wenn die kalte Luft bezogen auf die wärmere Wasseroberfläche relativ trocken ist. Das Gegenteil erfolgt im späten Frühjahr und Sommer. Im östlichen Mittelmeer treten bei kontinentalen Kaltluftausbrüchen im Frühjahr häufig hohe d -Werte im Niederschlag auf [20, 21]. Tiefe d -Werte finden sich hingegen in Niederschlägen aus Gebie-

ten mit kühlen Meerestemperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit. Der Deuterium-Exzess ist somit indirekt ein Indikator für die *Herkunft der Niederschläge*. Kinetische Prozesse in den Wolken und Verdunstungseffekte an fallenden Regentropfen vor allem bei geringen Niederschlagsmengen können diese Information verfälschen. Dies lässt sich daran erkennen, dass die Steigung in der $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Beziehung kleiner wird und von der GMWL abweicht. An den Niederschlagsstationen der Schweiz betrug sie zwischen den Jahren 2002 und 2009 im Jahresmittel $8,06 \pm 0,13$.

Der Deuterium-Exzess hat sehr unregelmässige Monatsmittel und Jahresamplituden. Zur Hervorhebung der *Saisonalität* wurden die Monatswerte in *Abbildung 5* mit einem Tiefpassfilter (G7) gedämpft. Die höchsten d -Werte werden meistens gegen Jahresende erreicht, die tiefsten zur Jahresmitte. Der Deuterium-Exzess an der Grimsel ist deutlich höher als in Locarno und Bern. Die Zunahme mit der Höhe ist nicht systematisch. Im Allgemeinen sind die d -Werte in tieferen

Lagen etwas niedriger, weil dort Verdunstungseffekte während der warmen Jahreszeit mit höherer Wahrscheinlichkeit auftreten können. An den Steigungen der Niederschlagsgeraden ist dies allerdings nicht eindeutig nachweisbar. Demnach liegen die Differenzen im Deuterium-Exzess hauptsächlich in der unterschiedlichen Zusammensetzung und Herkunft der Luftmassen begründet.

Trotz der grossen saisonalen Schwankungen sind Trends über mehrere Jahre erkennbar. Sie deuten eine systematische Verschiebung der Quellen von Luftmassen an, die am Niederschlag beteiligt sind. In letzter Zeit wurden Methoden einer quantitativen Klimatologie zur Herkunft des alpinen Niederschlags mithilfe von Rückwärtstrajektorien entwickelt [22]. Sie lokalisierten die *Feuchtequellen* im jahreszeitlichen Mittel und über mehrere Jahre für Gebiete nördlich und südlich der Alpen. Die Isotopeninformation kann somit auch zur Validierung der entsprechenden meteorologischen Vorhersagemodelle eingesetzt werden.

5.2 In Flüssen

Die Isotope im Niederschlag übertragen als Tracer ihre Information auf die Oberflächen-gewässer der Schweiz [5]. Vergleichbar dem Tritium (*Kap. 4*) lässt sich mit ihrer Hilfe überprüfen, ob und wie die lokale Information ei-

ner Niederschlagsstation durch die unterschiedlichen Vorgänge bei der Abflussbildung eines Oberflächengewässers modifiziert wird. Dies hat Einfluss auf die saisonalen Schwankungen, den klimatischen Trend und die Beziehung zum Höheneffekt im Flusswasser. Die Wechselwirkung zwischen Oberflächen- und Grundwasser spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. In Abhängigkeit von den Grundwasserstandsverhältnissen kommt es zu jahreszeitlich und räumlich wechselnden In- bzw. Exfiltrationsverhältnissen entlang der Flüsse mit charakteristischen Isotopensignaturen im Flusswasser [23]. Viele Flüsse in der Schweiz haben ein höheres Einzugsgebiet als das lokale Grundwasser, und wenn die Unterschiede in den δ -Werten gross genug sind, lassen sich so zum Beispiel die beteiligten Komponenten über die stabilen Isotope separieren. Zusätzlich verändert sich durch Verdunstung das Verhältnis von $\delta^2\text{H}$ zu $\delta^{18}\text{O}$. Die Steigung und der Achsenabschnitt weichen von der GMWL ab. Die Isotopenwerte in den Flüssen vor dem Brienersee und nach dem Thunersee, vor und nach dem Genfersee bzw. vor und nach dem Bodensee dokumentieren den Anreicherungseffekt im Oberflächenwasser beim Durchfließen der Seen anhand einer flacheren Steigung und negativer Achsenabschnitte.

Abbildung 6 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf und den klimatischen Trend von $\delta^{18}\text{O}$ im Abfluss dreier unterschiedlich grosser Flusseinzugsgebiete. Ein Tiefpassfilter (G7) hebt die Unterschiede zwischen Winter und Sommer hervor. Die negativeren Winterwerte in der Schneedecke sind im Abfluss im Zusammenhang mit der Schneeschmelze gegenüber dem Niederschlag um mehrere Monate verzögert. Ihr Minimum erscheint im Abfluss meist im Juni und Juli. Das Maximum aus den Sommerniederschlägen wird erst gegen Ende des Jahres erreicht.

Der Zeitpunkt und die Amplitude der δ -Werte im Abfluss hängen von der Schnee- und Regenverteilung und von der Intensität der hydroelektrischen Nutzung im Einzugsgebiet ab. Extremereignisse wie Trockenphasen oder Starkniederschläge sind in den Isotopendaten deutlich zu erkennen. Nach den vor allem in den Walliser Alpen schneearmen Wintern 1989 und 1990 fehlten beispielsweise die negativen Winterwerte im Abfluss der Rhone vollständig. Der schneereiche Winter im Jahr 1991 widerspiegelt sich in der Rhone in stark abgereicherten $\delta^{18}\text{O}$ -Werten. Die Auswirkungen

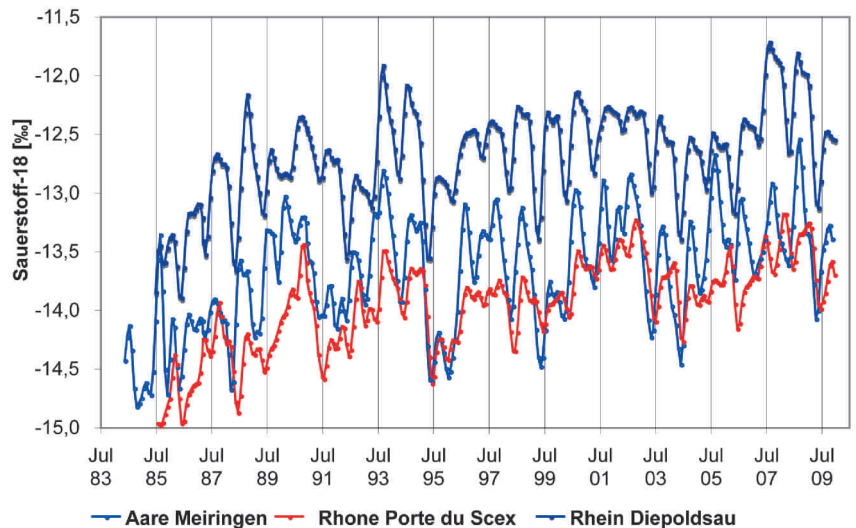


Abb. 6 Zeitreihen von Sauerstoff-18 in Aare, Rhone und Rhein mit Tiefpassfilter (G7).

der Hitzewelle 2003 führten in allen Abflüssen zu negativeren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten und änderten die Verhältnisse von Winter- zu Sommer-niederschlag im Abfluss.

Der klimatische Trend äussert sich vor allem in der geänderten Menge und Verteilung der Winterniederschläge und dem oft fehlenden Schnee in tiefen Lagen [24]. Das Einzugsgebiet der Rhone ist schweizweit am stärksten vergletschert und somit davon am deutlichsten betroffen. Auffallend ist, dass hier im Gegensatz zur Aare und zum Rhein die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte nach einem Anstieg zwischen 1984 und 1994 in der Folge in allen Jahreszeiten weiter steigen. Es kann durchaus sein, dass hier die Mischungsverhältnisse durch den verstärkten Pumpspeicherbetrieb zusätzlich verändert werden.

Die Änderung des Deuterium-Exzesses im Niederschlag als Anzeichen für klimatisch bedingte Veränderungen wird auch auf die Flüsse übertragen. Zwischen 2004 und 2006 stieg d im Ticino um ungefähr 3‰ an, in allen anderen Flüssen blieb der Wert konstant oder nahm

sogar etwas ab. Im Niederschlag von Locarno stieg d in derselben Periode ebenfalls an (Abb. 5). Ein erhöhter Beitrag von Niederschlägen aus dem Mittelmeerraum, die unter ähnlichen Bedingungen wie in [21] beschrieben gebildet wurden, könnte dafür verantwortlich sein [25]. Ausschlaggebend sind die Verteilung und die Mischung der Niederschläge aus allen Höhenstufen im Einzugsgebiet und die daraus resultierenden Isotopenkonzentrationen im Abfluss.

Zwischen den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten der Flüsse (im Jahresmittel der Jahre 2000–2009) und der mittleren Höhe ihrer Einzugsgebiete besteht eine klare lineare Beziehung; die Abnahme pro 100 m Höhenzuwachs beträgt 0,29‰ (Abb. 7). Die Einzugsgebiete des Inn und des Ticino heben sich bei gleicher Steigung wegen der unterschiedlichen Herkunft der Niederschläge deutlich von den übrigen Einzugsgebieten ab.

5.3 Im Grundwasser

Wenn Grundwasser nicht direkt mit einem Oberflächengewässer in Ver-

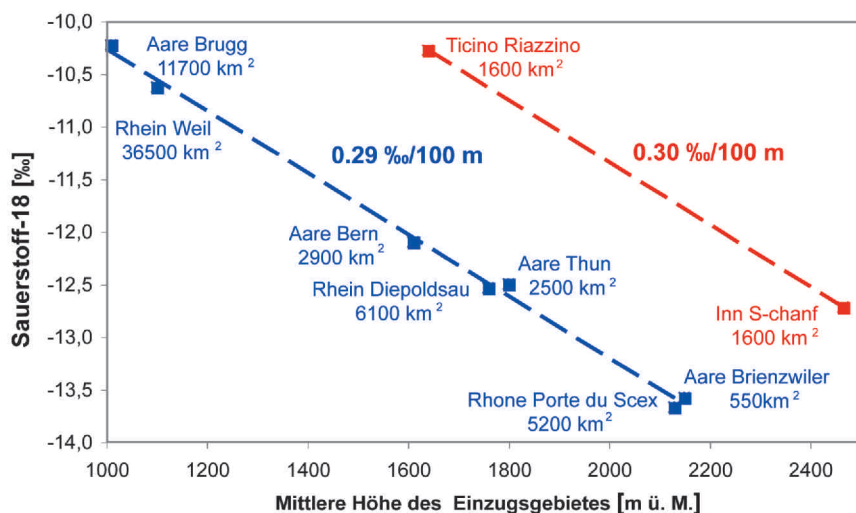


Abb. 7 Höhengradient von Sauerstoff-18 in den Flüssen. Die Einzugsgebiete (jeweils in km² angegeben) integrieren die unterschiedlichen Mechanismen, die zur Niederschlagsbildung führen, sie differenzieren aber nach Herkunft und Zusammensetzung.

bindung steht, sollten sowohl das $\delta^2\text{H}$ und das $\delta^{18}\text{O}$ wie auch das $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnis im Grundwasser dem des Niederschlags im Einzugsgebiet entsprechen. Sonderfälle sind der Austausch von ^{18}O in hydrothermalen Gängen und von ^2H mit H_2S [1]. Verdunstung aus Böden verursacht eine Anreicherung der schwereren stabilen Isotope in der zurückbleibenden Bodenfeuchte. Normalerweise ist dieser Effekt aber nicht gross genug, um als Tracer des Infiltrats zu dienen. An der Oberfläche schlechtdurchlässiger Böden und Deckschichten kann Verdunstung

dagegen zur Anreicherung der stabilen Isotope führen. Der Bewuchs spielt dabei kaum eine Rolle, denn Pflanzen entziehen den Böden die Feuchtigkeit praktisch trennungsfrei und bewirken keine zusätzliche Anreicherung der schwereren Isotope. Eine Identifikation der einzelnen Prozesse, die die Verhältnisse der stabilen Isotope im Grundwasser modifizieren können, ist schwierig, da sie in der Literatur selten dokumentiert sind und zudem systematische Daten fehlen [1].

Der Schwerpunkt der Anwendung der stabilen Isotope als Tracer in Grundwasserstudien lag bisher bei Fragen nach der Höhe von Einzugsgebieten oder nach Mischungsverhältnissen in Mehrkomponentensystemen. Wegen der ausgeprägten Topografie und der Kleinräumigkeit in der Schweiz sind die Unterschiede in den δ -Werten häufig gross genug, um die Wechselwirkungen zwischen Niederschlag, Oberflächenwasser und Grundwasser zu verfolgen. Im Zusammenhang mit dem klimatisch bedingten

Anstieg der δ -Werte im Niederschlag werden sich auch die δ -Werte im Grundwasser ändern [4]. Neben drei Grundwasserstationen, die versuchsweise bereits seit längerer Zeit auf stabile Isotope analysiert werden, finden solche Erhebungen seit 2006 auch an den Messstellen des Moduls TREND der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA statt, um diese Entwicklung und allfällige klimabedingte Änderungen in der Dynamik der Grundwasserneubildung in Zukunft detaillierter verfolgen zu können.

6 Schlussfolgerungen

Klimatische Veränderungen übertragen sich auf die Isotopenverhältnisse im Niederschlag. Die Niederschlagsstationen des Isotopenmessnetzes vermitteln ein repräsentatives Bild der Verteilung der Isotope in der Schweiz; der beobachtete Temperaturanstieg wird an allen Stationen qualitativ gut erfasst. Über den Deuterium-Exzess erhält man zudem einen Hinweis auf Veränderungen im Quellgebiet der Niederschläge und der Zusammensetzung von Luftmassen, die zum Niederschlag führen. Der Höhengradient der stabilen Isotope hängt von der Topografie und den regional vorherrschenden Niederschlagsverhältnissen ab. Er kann im Extremfall bis zu einer Grössenordnung schwanken. Gemittelt über die Einzugsgebiete der Flüsse besteht aber eine klare lineare Beziehung mit 0,3‰ pro 100 m Höhenzunahme. Der klimatische Trend und die jahreszeitlichen Schwankungen im Niederschlag werden in abgeschwächter Form auf die Isotopenverhältnisse in den Flüssen und im Grundwasser übertragen. Durch deren systematische Erhebung entsteht ein zusätzliches Datenset, um längerfristige Änderungen der jahreszeitlich und räumlich wechselnden Neubildungsbedingungen besser beurteilen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Mook, W.G. (ed.) (2001): Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle, Principles and Applications. IHP-V, Technical Documents in Hydrology, No. 39, Vol. II, UNESCO, Paris. 113 S.
- [2] Etcheverry, D.; Vennemann, T. (2009): Isotope im Grundwasser. Methoden zur Anwendung in der hydrogeologischen Praxis. Umwelt-Wissen Nr. 0930. Bundesamt für Umwelt, Bern. 121 S.
- [3] Rozanski, K.; Araguas-Araguas, L.; Gonfiantini, R. (1992): Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition and climate. Science 258, 981–985.

Dank

Ein Teil der in dieser Arbeit verwendeten Daten stammt aus Projekten, die durch den Schweizerischen Nationalfonds unterstützt wurden. Die Autoren danken Markus Leuenberger (KUP) für die Anmerkungen und Ergänzungen zum Manuskript sowie Hansueli Bürki, Peter Nyfeler und Rüdiger Schanda (ebenfalls KUP) für die gewohnt zuverlässige Isotopenanalytik.

- [4] Schotterer, U.; Stocker, T.; Hunziker, J.; Buttet, P.; Tripet, J.-P. (1995): Isotope im Wasserkreislauf. Ein neues eidgenössisches Messnetz. gwa 09/95, 714–720.
- [5] Schotterer, U.; Stocker, T.; Bürki, H.; Hunziker, J.; Kozel, R.; Grasso, D. A.; Tripet, J.-P. (2000): Das Schweizer Isotopen-Messnetz. Trends 1992-1999. gwa 10/00, 733–741.
- [6] Schürch, M.; Kozel, R.; Schotterer, U.; Tripet, J.-P. (2003): Observations of isotopes in the water cycle – the Swiss national Network (NISOT). Environmental Geology 45, 1–11.
- [7] BAFU (2009): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2008. Umwelt-Wissen Nr. 0921, Bundesamt für Umwelt, Bern. 578 S.
- [8] Parriaux, A.; Etchevery, D.; Vaudan, J. (2001): Isotope im Wasserkreislauf. Tafel 6.2. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [9] Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, 436–468.
- [10] Craig, H.; Gordon, L.I. (1965): Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: Tongiorgi, E. (Ed.): Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pisa, Italy. 1–22.
- [11] Merlivat, L.; Jouzel, J. (1979): Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen-18 relationship for precipitation. J. Geophys. Res. 84, 5029–5033.
- [12] Stewart, K. M. (1975): Stable Isotope Fractionation Due to Evaporation and Isotopic Exchange of Falling Water Drops: Application to Atmospheric Processes and Evaporation of Lakes. J. Geophys. Res. 80/9, 1133–1146.
- [13] Frei, C.; Schär, C. (1998): A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. Int. J. Climatol. 18, 873–900.
- [14] Frei, C.; Schmidli, J. (2006): Das Niederschlagsklima der Alpen. Wo sich Extreme nahe kommen. Promet, 32/1-2, 61–67.
- [15] Jakob, H.; Sonntag, C. (1991): An 8-year record of the seasonal variation of 2H and 18O in water vapor and precipitation at Heidelberg, Germany. Tellus, 43B, 291–300.
- [16] Rickli, R. (2008): Meteorologische Charakterisierung der NAQUA ISOT-Niederschlagsstationen. Meteotest. Unveröffentlichter Bericht z.H. des Bundesamtes für Umwelt, Bern. 38 S.
- [17] Roether, W. (1967): Tritium im Wasserkreislauf. Dissertation, Universität Heidelberg.
- [18] Jouzel, J.; Merlivat, L. (1984): Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation. J. of Geophys. Res. 89, 11749–11757.
- [19] Siegenthaler, U.; Oeschger, H. (1980): Correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation with temperature and altitude. Nature 285, 314–316.
- [20] 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.
- [21] Gat, J.R.; Klein, B.; Kushner, Y.; Roether, W.; Wernli, H.; Yam, R.; Shemesh, H. (2003): Isotope composition of air moisture over the Mediterranean Sea: an index of the air-sea interaction pattern. Tellus 55B, 955–965.
- [22] Sodemann, H.; Zubler, E. (2010): Seasonal and inter-annual variability of the moisture sources for Alpine precipitation during 1995–2002. Int. J. Climatol. 30, 947–961.
- [23] Fette, M.; Kipfer, R.; Schubert, C.J.; Hoehn, E.; Wehrli, B. (2005): Assessing river-groundwater exchange in the regulated Rhone River (Switzerland) using stable isotopes and geochemical tracers. Applied Geochemistry 20, 701–712.
- [24] Marty, C. (2008): Regime shift of snow days in Switzerland. Geophys. Res. L., 35, L 12501, doi:10.1029/2008GL033998.
- [25] Schotterer, U.; Leuenberger, M.; Nyfeler, P.; Bürki, H.; Kozel, R.; Schürch, M.; Stichler, W. (2007): The role of rivers in the Swiss network for the observation of isotopes in the water cycle (ISOT). Proceedings of the Symposium «Advances in Isotope Hydrology and its Role in Sustainable Water Resources Management (IHS – 2007)». IAEA, Wien, 1, 399–407 (IAEA-CN-151/102).

Autoren

Ulrich Schotterer, Umweltphysiker
Physikalisches Institut
Abt. Klima- u. Umweltphysik KUP
Universität Bern, CH-3012 Bern
Tel. +41 (0)31 631 44 84
schotterer@climate.unibe.ch

Marc Schürch, Dr. sc. nat.
Abt. Hydrologie
Sektion Hydrogeologie
Bundesamt für Umwelt BAFU
CH-3003 Bern
marc.schuerch@bafu.admin.ch

Ralph Rickli, Dr. phil. nat.
Meteotest
CH-3012 Bern
rickli@meteotest.ch

Willibald Stichler, Dipl.-Phys.
Institut für Grundwasserökologie
Helmholtz Zentrum München
GmbH
D-85764 Neuherberg
w.stichler@t-online.de

Keywords

Wasserkreislauf – Tritium – stabile Isotope

VSB-Geschieberückhaltestation

Hohe Wartungskosten für Pumpen u. andere Ausrüstung?
Abrieb im Kanalbereich durch Sand, Kies und Geröll?

Wir empfehlen die neueste Generation unserer
Geschieberückhaltestation

- zuverlässige Trennung u. Weiterführung der Organik mittels Belüftung
- verstopfungsfreies Intervall-Belüftungssystem
- Belüftungsrohr sicher in Behälterwand integriert
- patentierte Geschiebehöhenmessung
- wartungsfrei – kein Verschleiß

ZAG Engineering AG

Hauptstraße 96 • 5064 Wittnau
Tel. 062871/8383 • Fax /8386

info@zag-engineering.ch • www.zag-engineering.ch

