

Verwendung von Deuterium und Sauerstoff-18 als natürliche Umweltisotope und als künstliche Markierungsmittel



WASSER

GEOHERMIE

MARKIERVERSUCHE

SCHADSTOFFE

FILTERTECHNIK

LEBENSMITTEL

NACHWACHSENDE ROHSTOFFE

ISOTOPE

GASE

FESTSTOFFE

ANALYTIK

HYDROISOTOP GMBH
Woelkestraße 9
85301 Schweitenkirchen

Tel. +49 (0)8444 / 92890
Fax +49 (0)8444-928929
eMail info@hydroisotop.de
Web: www.hydroisotop.de

akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005

Isotopie & Chemie in Umwelthydrologie & Lebensmittel



ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Alle chemischen Elemente besitzen Isotope. Wasserstoff z. B. besitzt zwei stabile Isotope. Protium (^1H), mit der Massenzahl 1, ist mit 99,985 % das Majoritätsisotop, während das Deuterium (^2H) mit der Massenzahl 2 nur zu ca. 0,015 % vorliegt. Daneben existiert noch ein radioaktives Wasserstoff-isotop, das Tritium (^3H), dem eine große Bedeutung bei der Grundwasseraltersdatierung zukommt.

Beim Sauerstoff existieren neben dem Majoritätsisotop ^{16}O noch die stabilen Isotope ^{17}O und ^{18}O , wobei in der hydrologischen Anwendung lediglich das Isotop ^{18}O eine Rolle spielt.

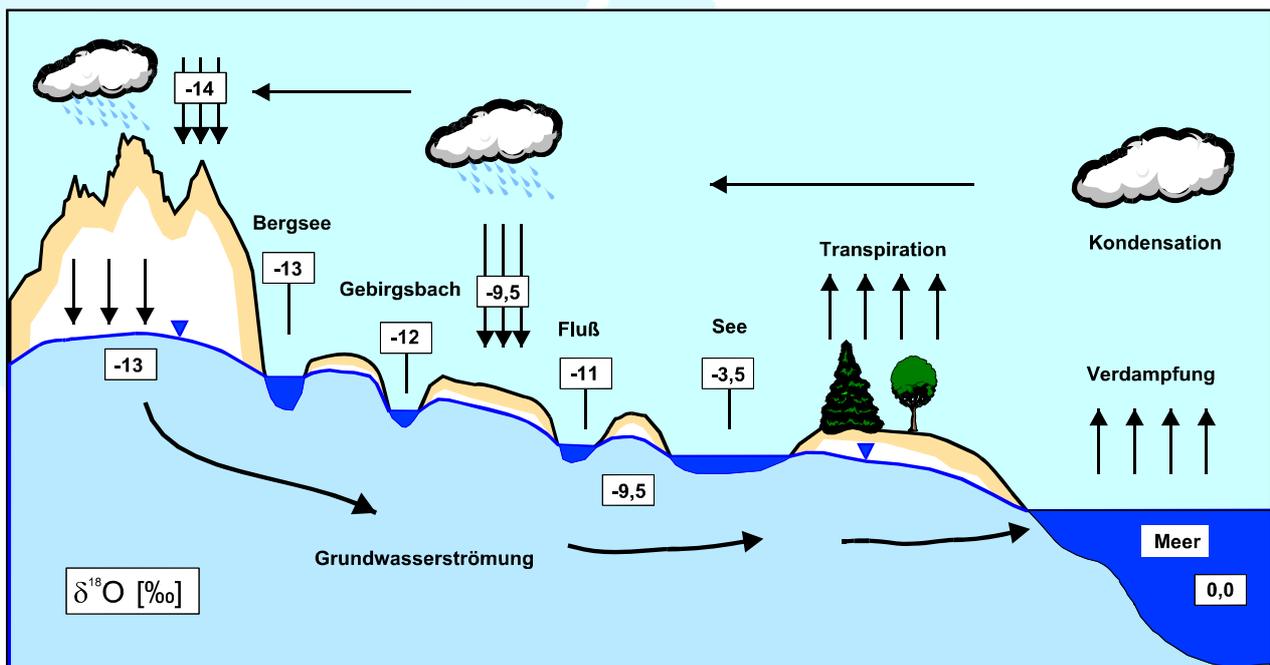
In natürlichen Wässern befinden sich unter 10^6 Wassermolekülen mit der "normalen" Isotopenzusammensetzung $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ etwa 2000 Moleküle $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ mit dem schweren Sauerstoffisotop ^{18}O und etwa 160 Moleküle $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$, bei denen eines der beiden Wasserstoffatome ^1H durch das schwere Wasserstoffisotop ^2H (Deuterium) ersetzt ist.

Das Isotopenverhältnis der Wassermoleküle in der Natur ist jedoch nicht konstant.

Durch physikalische, chemische und biologische Prozesse können Isotopenverhältnisse geändert werden (Isotopeneffekte). Systematische Untersuchungen im gesamten globalen Wasserkreislauf ergaben, dass die Anteile von $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ bzw. $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ unter 10^6 Wassermolekülen zwischen 1880 und 2010 Molekülen bzw. 90 und 170 Molekülen schwanken.

Die hydrologische Anwendung von Messungen des Gehaltes an den stabilen Isotopen ^2H und ^{18}O am Wassermolekül beruht im Wesentlichen auf diesen in natürlichen Wässern auftretenden unterschiedlichen Konzentrationen.

Die verschiedenen Isotopeneffekte führen zu einer örtlich und zeitlich charakteristischen Markierung der Niederschläge und damit auch zu einer örtlich und zeitlich charakteristischen Markierung der verschiedenen Wasserkörper des Wasserkreislaufes (siehe Schemabild).





ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Messtechnik und Messwertgrößen

Bei der Deuterium- und Sauerstoff-18-Isotopenanalytik wird in der Regel nicht der absolute Gehalt bestimmt im Gegensatz zur Bestimmung der chemischen Inhaltsstoffe.

Bei stabilen Isotopen wird ein Isotopenhäufigkeitsverhältnis ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ bzw. $^2\text{H}/^1\text{H}$) gemessen und mit einem internationalen Standard verglichen.

Die Abweichung des Isotopenhäufigkeitsverhältnisses der Probe gegenüber dem des Standards wird als δ -Wert in Promille (‰) angegeben. $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte beziehen sich auf den internationalen Standard V-SMOW (Vienna- Standard- Mean-Ocean- Water).

Da die Mehrzahl der natürlichen Wässer weniger „schwere“ Isotope enthalten als der Bezugsstandard, sind die δ -Werte häufig negativ.

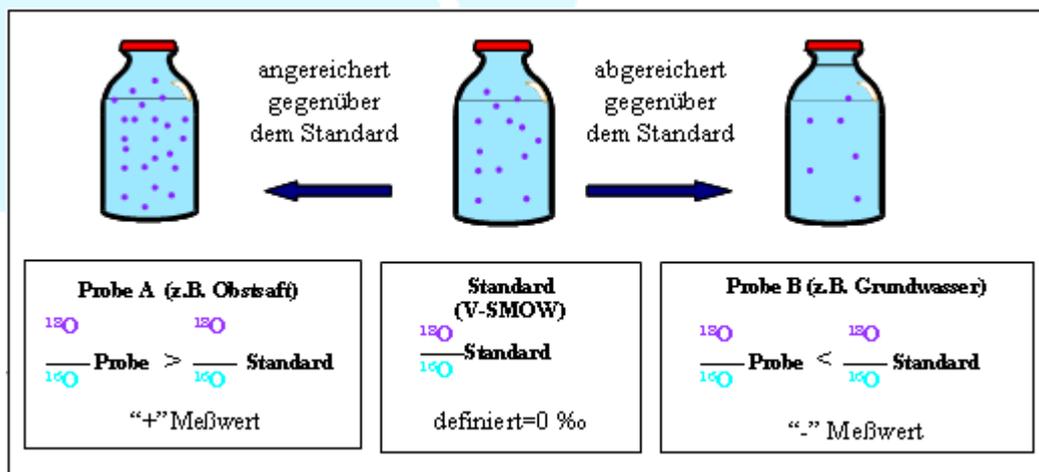
Für die Bestimmung der stabilen Isotope Deuterium und Sauerstoff-18 sind nur geringe Probenmengen (wenige ml) erforderlich. Die Messung erfolgt nach einer Probenpräparation (Überführung der Wasserprobe in ein geeignetes Messgas (Abb. 1)) im Massenspektrometer (Abb.2).

Probenpräparation

Überführung der Probe in ein Messgas (CO_2)



Messung im Massenspektrometer





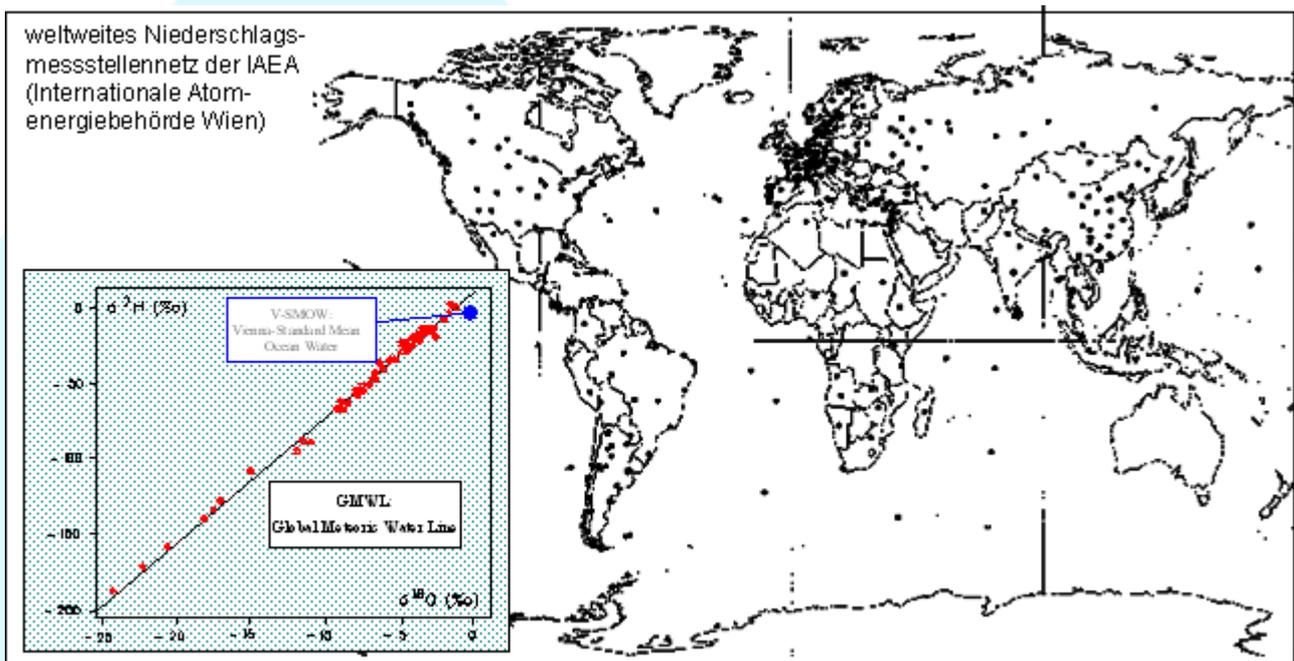
ERMITTLUNG DER HERKUNFT VON WÄSSERN

Die durch die Isotopeneffekte hervorgerufenen Schwankungen der Gehalte an den stabilen Isotopen ^2H und ^{18}O im Wasserkreislauf sind hauptsächlich durch Isotopenfraktionierungen bei allen Phasen-umwandlungen (Verdampfung, Kondensation u.ä.) bedingt. Wesentlich ist dabei, dass die Isotopenfraktionierung temperaturabhängig ist.

Aus der Bestimmung der stabilen Isotope des Wassermoleküls Sauerstoff-18 und Deuterium in einer Grundwasserprobe lassen sich somit in erster Linie Rückschlüsse auf die klimatischen Bildungsbedingungen bei der Grundwasserneubildung ziehen.

Die Niederschlagsgerade (Global Meteoric Water Line)

Das Verhältnis des ^2H - zum ^{18}O -Gehalt im Niederschlag wird durch thermodynamische Vorgänge bei der Phasenänderung beeinflusst. Prinzipiell ist bei Niederschlägen eine lineare Korrelation zwischen dem ^2H und dem ^{18}O -Gehalt zu verzeichnen. In folgender Abbildung sind die gewichteten Mittelwerte der ^2H und ^{18}O -Gehalte von 74 Niederschlagsstationen (IAEA-Messstationen) im $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm aufgetragen, die diesen linearen Zusammenhang verdeutlichen.



Für die Niederschläge in Mitteleuropa kann dieser lineare Zusammenhang durch die Gleichung

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$$

ausgedrückt werden (sog. mittlere Niederschlagsgerade).



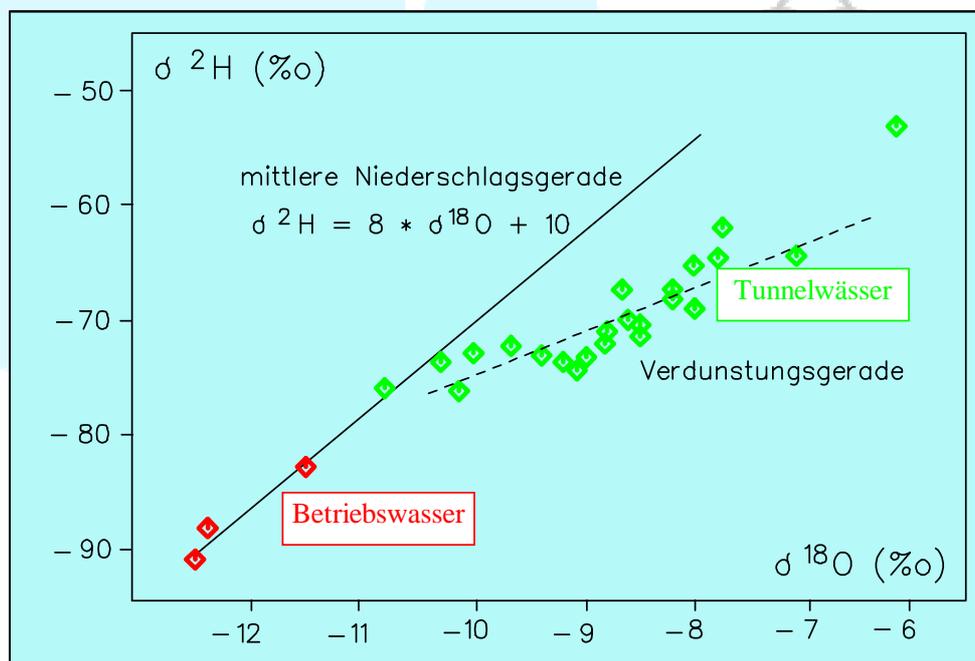
ERMITTLUNG DER HERKUNFT VON WÄSSERN

Liegen die $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ -Messwertpaare von Grundwasserproben im Bereich dieser Niederschlagsgeraden, so kann daraus geschlossen werden, dass die Grundwässer aus lokalen Niederschlägen gebildet wurden und somit meteorischer Herkunft sind.

Spielen Verdunstungsprozesse bei der Grundwasserneubildung eine Rolle (z.B. Infiltration von Seewasser) oder ist ein Sauerstoffisotopenaustausch mit dem Gestein zu verzeichnen (z.B. bei hochtemperierten Thermalwässern), so drückt sich dies in einer charakteristischen, abweichenden Lage des Messwertpaares von der mittleren Niederschlagsgeraden aus.

Bei dem folgenden Beispiel aus dem Tunnelbauwesen sollte die Herkunft von Wässern im Sohlbereich ermittelt werden. Es galt zu klären, ob die Wässer aus dem verwendeten Betriebswasser herzuleiten sind (Leckagen im Zuleitungssystem) oder ob hier ein Zutritt von autochthonen Bergwässern vorliegt.

Durch die Untersuchungsergebnisse konnte eine Herkunft der Tunnelwässer aus dem verwendeten Betriebswasser ausgeschlossen werden. Diese Schlussfolgerung konnte zudem durch andere Parameter (z.B. Tritium) bestätigt werden.





ERMITTLUNG DER HERKUNFT VON WÄSSERN

Der Höheneffekt

Mit zunehmender orographischer Höhe tritt eine Abnahme des Gehaltes an schweren Isotopen auf. Grund hierfür ist vor allem die mit der Höhe abnehmende Temperatur.

In morphologisch stärker geprägten Gebieten kann mit Hilfe von ^2H - und ^{18}O -Messungen die mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes eines unterirdischen Grundwasservorkommens abgeschätzt werden.

Das dargestellte Beispiel zeigt eine Anwendung der Methode im Bereich der Nördlichen Kalkalpen (Ober-österreich).

Für eine neu errichtete 60 m tiefe Aufschlussbohrung (TB 1) sollte aufgrund einer geplanten Trinkwasser-nutzung das Einzugsgebiet für die notwendige Schutzgebietsausweisung ermittelt werden.

Die Bohrung erschließt das tiefe Grundwasser eines großflächigen Hangschuttkegels.

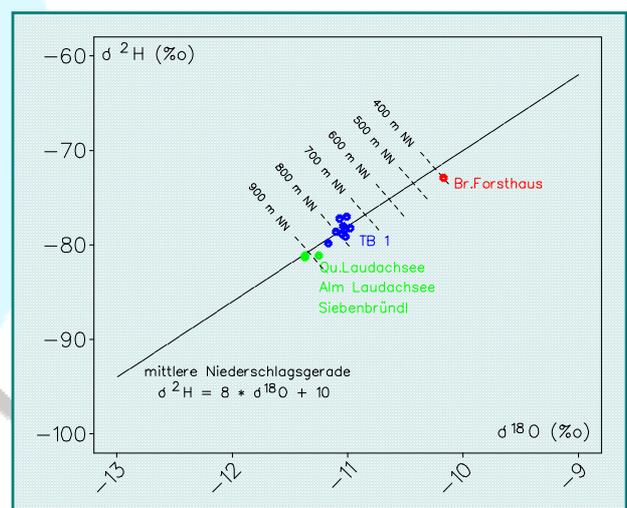
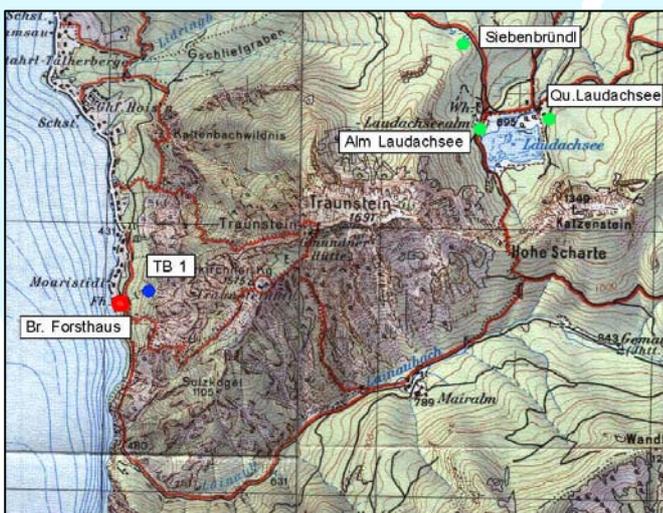
Es galt zu klären, ob das Grundwasser im Bereich des Hangschuttkegels neugebildet wird, oder ob das Grundwasser aus einem höher gelegenen Einzugs-gebiet im Bereich des östlich angrenzenden Gebirgs-zuges (Traunstein-Katzenstein) stammt.

- Die Entnahmestelle Br. Forsthaus repräsentiert das oberflächennahe Grundwasser des Hangschuttkegels. Dieses Grundwasser wird im unmittelbaren Nahbereich neugebildet, was einer Einzugsgebiets-höhe von ca. 420 m NN entspricht.

- Die Entnahmestellen Quelle Laudachsee, Alm Laudachsee, Siebenbründl repräsentieren das Grundwasser, das im Bereich des Höhenzuges Traunstein-Katzstein neugebildet wird. Für diese Entnahmestellen kann eine Einzugsgebiets-höhe von ca. 900-1200 m NN veranschlagt werden.

- Aus diesen Daten lässt sich im Untersuchungs-gebiet eine Abnahme des ^{18}O -Gehaltes von ca. 0.2 ‰ pro 100 m ermitteln, was im typischen Bereich für den Höheneffekt liegt.

- Das mit dem Tiefbrunnen erschlossene Grundwasser weist δ -Werte auf, die zwischen diesen beiden Regionen liegen. Aus der Lage der Wertepaare im $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm lässt sich für den Brunnen TB 1 ein Einzugsgebiet mit einer mittleren Höhenlage von ca. 700-800 m ermitteln.



Folgerung für die Schutzgebietsausweisung:

Ein bedeutender Anteil des Grundwassers, das durch die Aufschlussbohrung TB 1 erschlossen wird, wird in den höheren Regionen des Untersuchungsgebietes neugebildet.

Dieser Bereich ist somit bei der Bearbeitung der Schutzgebietsfragestellung mit einzubeziehen.



DATIERUNG JUNGER GRUNDWÄSSER

Grundwasseralter und Mittlere Verweilzeit

Beim Grundwasser versteht man unter dem Alter die Zeitspanne, die es im Untergrund verweilte seit es als Niederschlag im Untergrund versickert ist. Da in einem Grundwasservorkommen im Regelfall eine Vermischung mehrerer Niederschlagsjahrgänge vorliegt, lässt sich kein exaktes Grundwasseralter angeben, man spricht daher vielmehr von einer Mittleren Verweilzeit (MVZ) des Grundwassers.

Die Mittlere Verweilzeit eines Grundwassers kann als Indikator für die natürliche Geschütztheit eines Grundwasservorkommens herangezogen werden.

Bei flachgründigen Grundwassersystemen, bei denen von geringen Grundwasserverweilzeiten im Bereich von wenigen Jahren auszugehen ist, stellt die Sauerstoff-18-Methode neben der Tritium- und Krypton-85-Gehaltsbestimmung eine ideale Methode zur Ermittlung des Grundwasseralters dar. Um detaillierte Aussagen zur Grundwasseraltersstruktur treffen zu können sind hierzu jedoch Zeitreihenaufzeichnungen des Sauerstoff-18-Gehaltes im Niederschlag und im Grundwasser von mindestens einem hydrologischen Jahr notwendig.

Die Sauerstoff-18-Methode zur Altersbestimmung junger Grundwässer

Bedingt durch die Temperaturabhängigkeit der Isotopenfraktionierung tritt im Isotopengehalt der Niederschläge ein Maximum im Sommer und ein Minimum im Winter auf, wobei dieser allgemeine Trend überlagert wird durch kurzzeitige Variationen der Isotopengehalte (siehe Abbildung). Dies führt zu einem charakteristischen saisonalen Verlauf des ^{18}O -Gehaltes im Niederschlag.

Die Grundwasserdatierung mit ^{18}O beruht auf der quasiperiodischen, jahreszeitlichen Schwankung dieser Isotopengehalte im Niederschlag und damit im neugebildeten Grundwasser.

Soweit diese Schwankungen im Grundwasser noch messbar sind, lassen sich damit modellabhängige Grundwasserverweilzeiten im Bereich von Monaten bis zu einigen Jahren angeben.

Das nachfolgend dargestellte Beispiel aus einem flachgründigen Porengrundwasserleiter (Süd- deutschland) zeigt exemplarisch die Ermittlung der Mittleren Verweilzeit eines Grundwassers durch Modellrechnung (Best-Fit-Methode).



Entnahme von Niederschlagsproben:
wöchentliche oder monatliche Sammelprobe
mit Aufzeichnung der Niederschlagsmenge



Entnahme von Grundwasserproben:
wöchentliche oder 14-tägige Beprobung



DATIERUNG JUNGER GRUNDWASSER

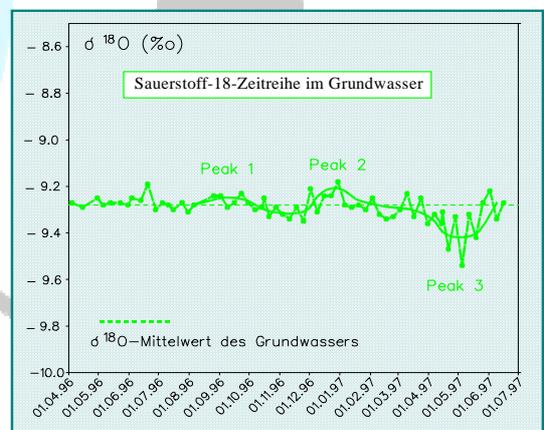
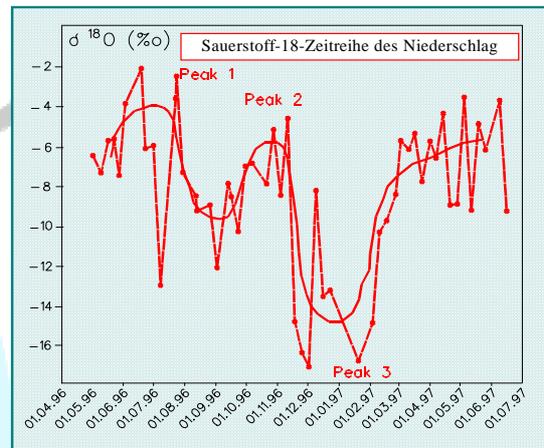
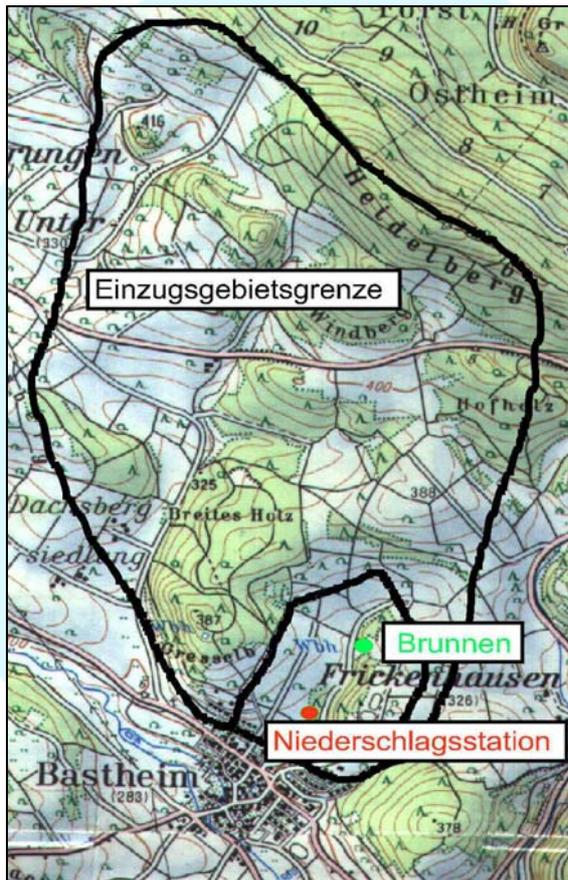
Präzisierung der Neubildungsbedingungen

Bei einer hohen zeitlichen Auflösung der ^{18}O -Ganglinie des Niederschlages und des Grundwassers (mind. wöchentliche Beprobung) können durch einen direkten Vergleich der beiden Ganglinien Anteile und Verweilzeiten von sehr rasch abfließenden Niederschlagskomponenten erfasst werden.

In dem dargestellten Beispiel (Muschelkalkbrunnen in Franken) kann das Grundwasser bezüglich der Altersstruktur folgendermaßen charakterisiert werden. Aufgrund der starken Amplitudendämpfung der ^{18}O -Eintragskurve im Grundwasser kann auf eine Mittlere Verweilzeit des Grundwassers von mehreren Jahren geschlossen werden.

Aus dem direkten Ganglinienvergleich lässt sich jedoch ein Anteil einer sehr jungen Grundwasserkomponente (Verweilzeit: wenige Monate) mit ca. 5-10 % erkennen.

An diesem Beispiel wird darüber hinaus ersichtlich, dass sich die Herbst- Winterniederschläge deutlicher in der Grundwasserganglinie durchpausen als die Sommerniederschläge. Bei einer entsprechend langen Beobachtungszeit können deshalb auch grundlegende Aussagen über die Grundwasserneubildungsperiode im Einzugsgebiet eines Grundwasservorkommens getroffen werden.



Ergebnisse des Ganglinienvergleiches

Mittlere Verweilzeit (aus Dämpfung):	ca. 4-5 Jahre
Anteil einer sehr jungen Komponente:	ca. 5-10 %
Verweilzeit der sehr jungen Komponente:	ca. 2-3 Monate



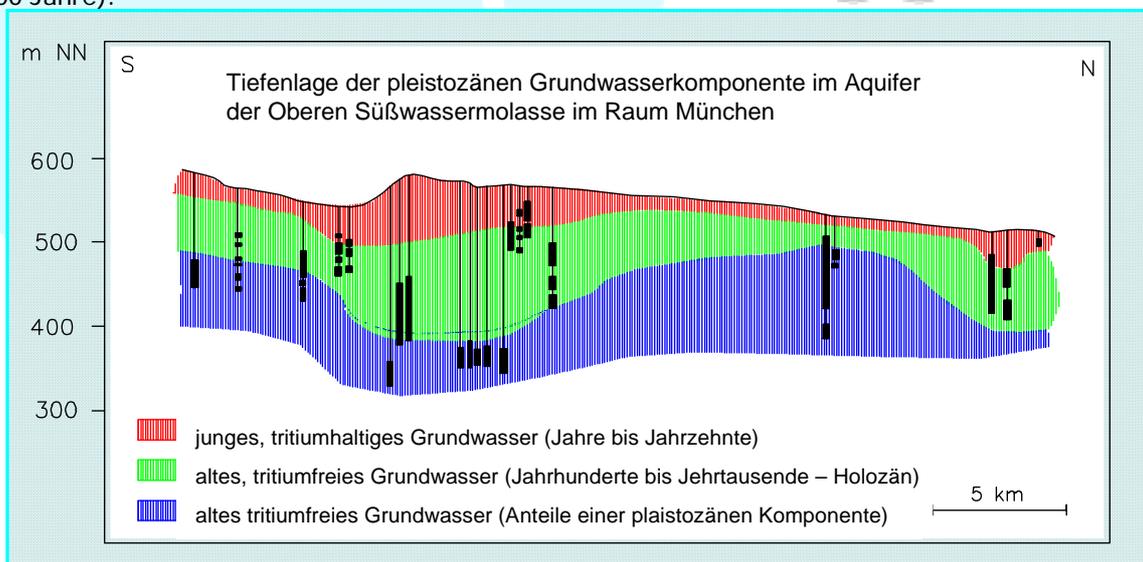
AUFSPÜREN EISZEITLICHER GEBILDETER GRUNDWÄSSER



In Kaltzeiten des Pleistozän gebildete Grundwässer weisen aufgrund des damals deutlich kühleren Klimas niedrige ^2H - und ^{18}O -Gehalte auf. Der Zusammenhang zwischen dem ^{18}O -Gehalt des Niederschlages und der globalen Klimageschichte geht ein-drucksvoll aus Untersuchungen an Bohrungen im Grönlandeis hervor.

Grundwässer, die niedrige ^2H und ^{18}O -Gehalte aufweisen und auch aufgrund der Altersstruktur (z.B. Kohlenstoff-14) als sehr alt anzusprechen sind, be-sitzen zumindest Anteile einer im Pleistozän ge-bildeten Grundwasserkomponente (>10.000 Jahre).

Für mehrere großräumige Grundwassersysteme konnte anhand der Bestimmung der stabilen Isotope ^2H und ^{18}O in Zusammenhang mit anderen isotopehydrologischen Untersuchungen die Tiefenlage der pleistozänen Grundwasserkomponente bestimmt werden und daraus u.a. Rückschlüsse auf die Grundwasserneubildungsrate gezogen werden. Darüber hinaus stellt bei diesen Grundwasservorkommen das hohe Grundwasseralter prinzipiell einen hohen Grad der natürlichen Geschüttheit dar. Ein Gedanke, der auch bereits Einzug in der Werbung von verschiedenen Mineralwasserbetreibern gefunden hat.



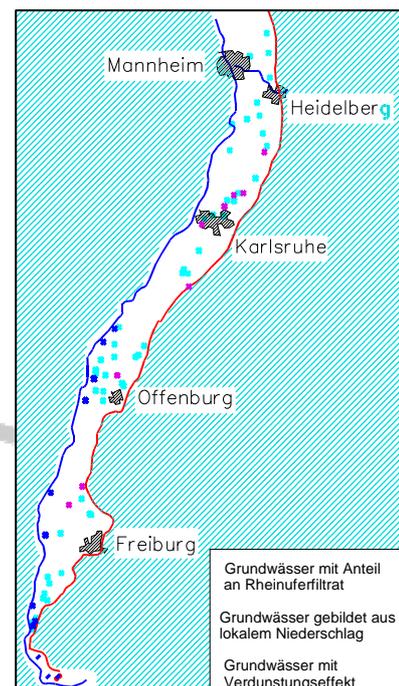
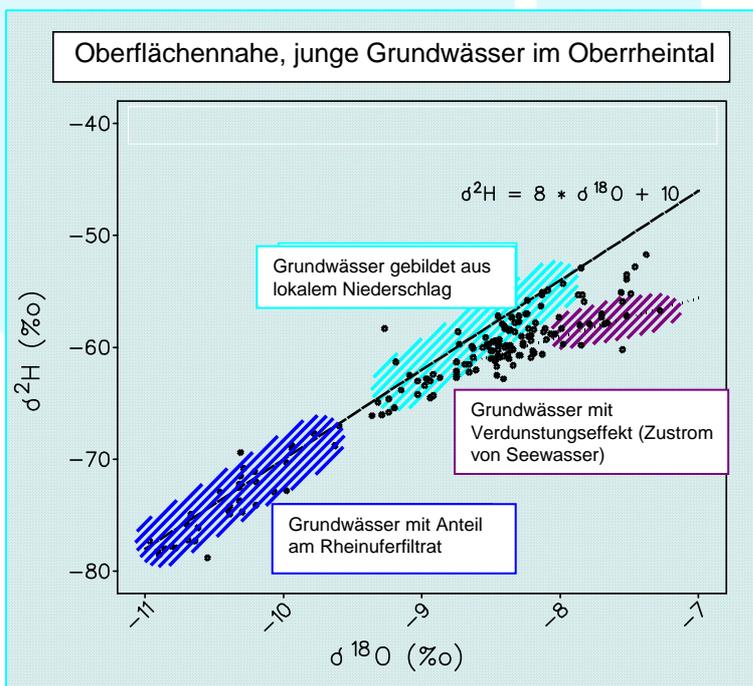
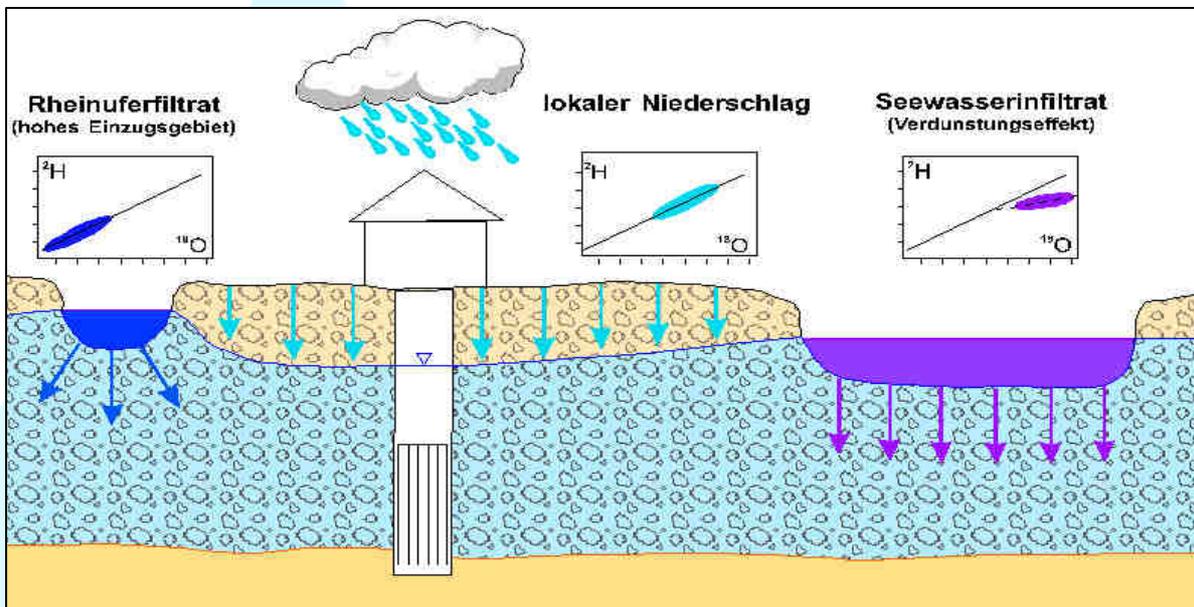


FLUSSWASSERINFILTRATION

Flusswasser weist bedingt durch sein in der Regel hoch gelegenes Einzugsgebiet niedrigere ^2H - und ^{18}O -Gehalte auf, als das begleitende lokal gebildete Grundwasser in den Flussniederungen. Infiltrierendes Flusswasser lässt sich im flusnnahen Grundwasser somit anhand der Messung des ^{18}O - bzw. des ^2H -Gehaltes eindeutig nachweisen.

Lokalisation von Infiltrationsbereichen

Am Beispiel des Oberrheintales ist exemplarisch dargestellt, wie über die Bestimmung der ^{18}O - und der ^2H - Signatur des oberflächennahen Grundwassers die Regionen mit Flusswasserinfiltration lokalisiert werden können.





FLUSSWASSERINFILTRATION

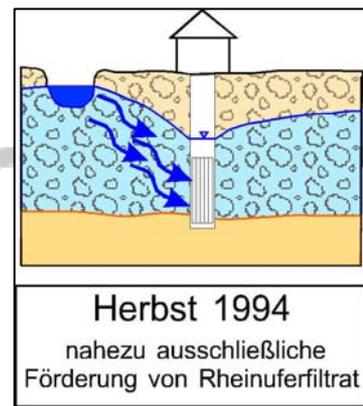
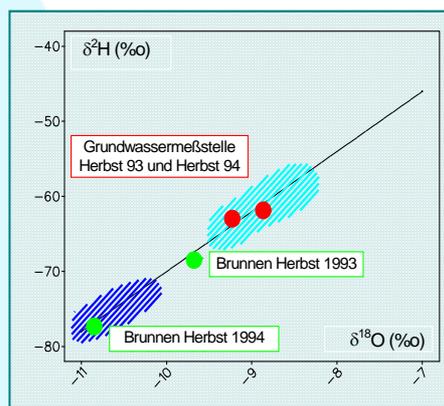
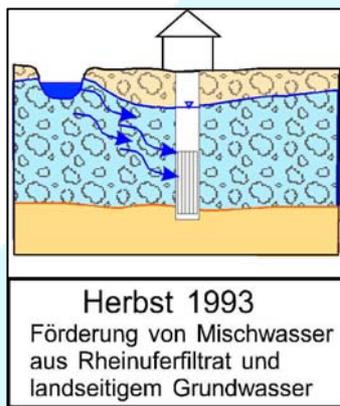
Quantifizierung des Uferfiltratanteiles

Ist die Isotopensignatur (^2H , ^{18}O) des Flusswassers und des landseitigen Grundwassers bekannt, so lässt sich über eine einfache Mischwasserberechnung der Flusswasseranteil im flusssnahen Grundwasser quantifizieren.

Für manche Bereiche des Untersuchungsgebietes (Oberrheintal) konnte bereits durch wenige Einzelmessungen der Zusammenhang des Uferfiltratanteiles im Grundwasser und der Entnahmelistung der rheinnahen Brunnen geklärt werden.

Dies wird in folgender Abbildung für einen Trinkwasserbrunnen im Raum Freiburg exemplarisch dargestellt.

Im Gegensatz zum Brunnen ist bei diesem Fallbeispiel in einer wenige 100 m flussaufwärts gelegenen rheinnahen Grundwassermessstelle kein Zustrom von Rheinwasser zu verzeichnen. Dies deutet darauf hin, dass die Uferfiltration durch eine hohe Grundwasserabsenkung im unmittelbaren Nahbereich des Brunnen verursacht wird und lokal sehr eng begrenzt ist.





FLUSSWASSERINFILTRATION

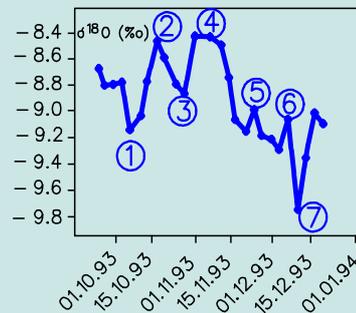
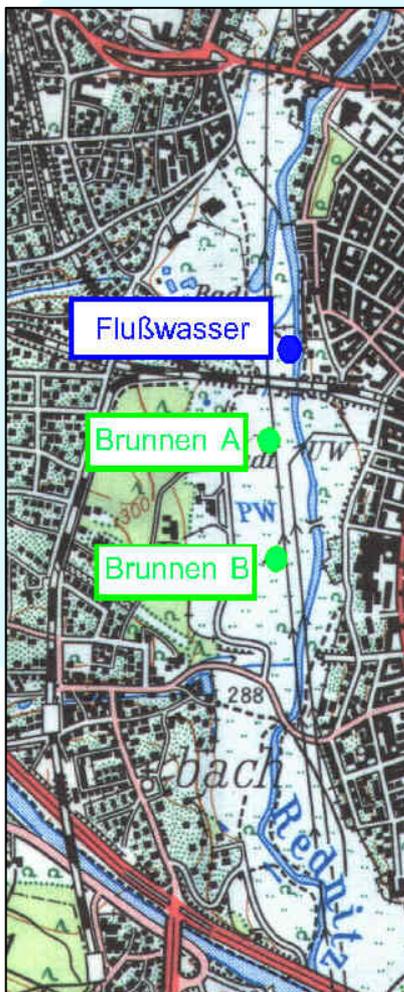
Bestimmung der Fließzeit von infiltrierendem Flusswasser

Niederschlagsereignisse zeichnen sich in der Regel relativ rasch in Fließgewässern ab, sowohl in der Schüttung als auch in der hydrochemischen und isotopischen Zusammensetzung. Die jahreszeitliche ^{18}O - bzw. ^2H -Ganglinie des Niederschlages ist somit in gedämpfter Form auch im Flusswasser erkennbar.

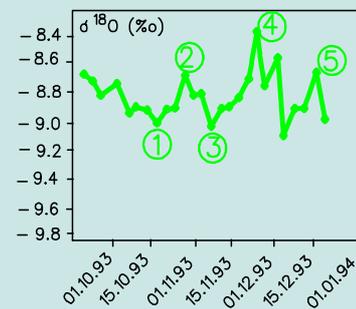
Durch einen Vergleich der ^{18}O - bzw. der ^2H -Ganglinie des Flusswassers mit den Ganglinien von flussnahen Grundwassermessstellen können wertvolle Erkenntnisse über die Beeinflussung des Grundwassers durch infiltrierendes Flusswasser gewonnen werden und die Fließzeiten des Uferfiltrates bestimmt werden.

Vorteil der Sauerstoff-18-Methode bei der Erfassung der Uferfiltratproblematik ist, dass bei der Infiltration und der Untergrundpassage des infiltrierenden Flusswassers im Gegensatz zu den meisten hydro-chemischen Parametern (z.B. Nitrat) keine Änderungen des Sauerstoff-18-Gehaltes durch physikalische chemische und biologische Prozesse auftreten.

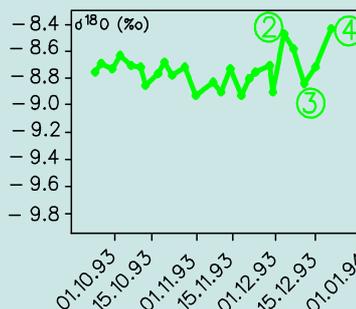
Im dargestellten Beispiel wurden über einen ca. 3-monatigen Beobachtungszeitraum die ^{18}O -Ganglinie des Flusswassers und des Förderwassers der ca. 100 m vom Ufer entfernten Brunnen ermittelt (Stadtwasserversorgung im Großraum Nürnberg). Durch einen Ganglinienvergleich war es möglich, die Fließzeiten des Flussuferfiltrates zu den einzelnen Brunnen zu bestimmen.



Sauerstoff-18-Ganglinie
Flusswasser
ausgeprägte Peakfolge



Sauerstoff-18-Ganglinie
Brunnen A
aus Ganglinienvergleich:
Fließzeit Fluss-Brunnen
ca. 15 bis 25 Tage



Sauerstoff-18-Ganglinie
Brunnen B
aus Ganglinienvergleich:
Fließzeit Fluss-Brunnen
ca. 35 bis 50 Tage

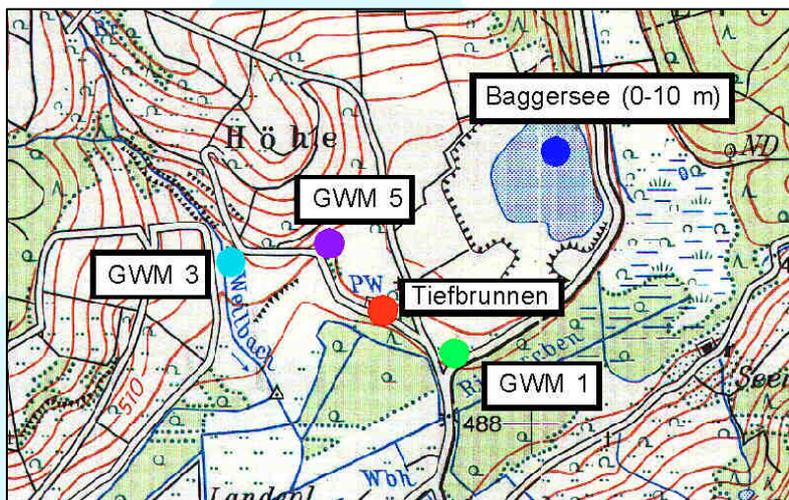


SEEWASSERINFILTRATION

Bei Verdunstungsvorgängen (z.B. von Seeoberflächen) tritt stets eine Anreicherung von schweren Isotopen in der flüssigen Phase auf. Bei einer solchen Phasenumwandlung tritt dabei eine Verschiebung des Verhältnisses zwischen $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Wert, das meist durch die Relation $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ bestimmt wird (sog. mittlere Niederschlagsgerade), in der Weise auf, dass ^{18}O stärker als ^2H angereichert wird. Dies hat eine Änderung des Steigungsfaktors zu kleineren Werten hin zur Folge (sog. Verdunstungsgerade).

Die Bestimmung der ^2H - und ^{18}O -Gehalte sind optimal geeignet, um Anteile von infiltrierendem Seewasser im Grundwasserleiter sowohl qualitativ als auch quantitativ nachzuweisen.

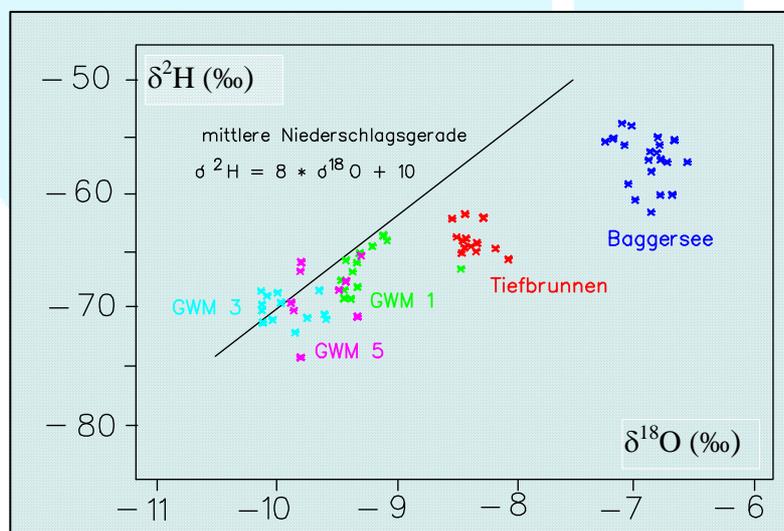
Mit Hilfe von Sauerstoff-18- und Deuteriumgehaltsbestimmungen im Nahbereich eines Kies-Nassabbaues oberstromig zu einem Trinkwasserbrunnen konnten detaillierte Aussagen über den Einfluss von Baggersee-Filtrat auf das Grundwasser getroffen werden.



Klärung der Beeinflussung des Trinkwasserbrunnen durch Baggersee-Filtrat:

Untersuchungsumfang:
Zeitreihen der ^{18}O - und ^2H -Gehalte in 14-tägigem Rhythmus an:

- Trinkwasserbrunnen
- Baggersee (drei Tiefen)
- Grundwassermessstellen



- Baggerseewasser ist gegenüber dem Grundwasser deutlich angereichert (Verdunstungseffekt)
- Messwerte der Grundwassermessstellen ohne Baggersee-Filtrat streuen um sog. Mittlere Niederschlagsgerade
- Der Tiefbrunnen und bestimmte Grundwassermessstellen enthalten Anteile von Baggersee-Filtrat. Messwerte liegen auf einer Mischungsgeraden zwischen Grundwasser und isotopisch angereichertem Baggerseewasser



DEUTERIUM ALS KÜNSTLICHER MARKIERUNGSTOFF

Die bisher besprochenen isopenhydrologischen Methoden beruhen auf der natürlichen Verteilung von Sauerstoff-18 und Deuterium im globalen Wasserkreislauf (Umweltisotop).

Bei Grundwassermarkierungsversuchen werden dagegen künstliche Stoffe (Markierungsstoffe, Tracer) absichtlich in das zu untersuchende Wasserregime eingegeben und deren Verbreitung qualitativ und quantitativ verfolgt.

Am häufigsten werden in der Hydrologie Fluoreszenzfarbstoffe als Markierungsstoffe eingesetzt (Uranin, Eosin, Pyranin, Sulforhodamine etc.). Neben dieser Markierungsstoffgruppe können prinzipiell auch isotopisch markierte Substanzen verwendet werden (stabile und radioaktive Substanzen).

In der Praxis kommt aus dieser Stoffgruppe insbesondere mit Deuterium angereichertes Wasser bei der Gewässermarkierung zum Einsatz.

Es handelt sich hierbei um Wasser, das zu ca. 96 % aus den schweren $^2\text{H}_2\text{O}$ -Molekülen (D_2O ; "schweres Wasser") besteht.

Analog ist auch die Verwendung von mit Sauerstoff-18 angereichertem Wasser möglich. Dies scheidet jedoch aufgrund der extrem hohen Kosten bei Markierungen im Grundwasserbereich aus.

Im folgenden werden kurz die Vor- und Nachteile von D_2O als Markierungsmittel in der Hydrologie angeführt.

Vorteile von Deuterium als Markierstoff

- D_2O kann als idealer Tracer angesehen werden, da das Wassermolekül selbst markiert wird und sich der Markierungsstoff somit vom isotopisch normalen Wasser ($^1\text{H}_2\text{O}$) chemisch nicht unterscheidet. Der Markierungsstoff unterliegt somit keinen Änderungen durch physikalische, chemische und biologische Prozesse (Adsorption, mikrobieller Abbau etc.).
- Beim Einsatz von D_2O besteht in der Regel keine Notwendigkeit einer behördlichen Genehmigung.
- D_2O ist humantoxikologisch völlig unbedenklich. Bei der Grundwassermarkierung mit D_2O kommt es zu einer Erhöhung des natürlichen Deuteriumgehaltes des Grundwassers um ca. 10-100 ‰.

Die bei Deuteriummarkierungen erreichten Deuteriumgehalte liegen somit im Bereich von natürlich vorkommenden Wässern (z.B. Meerwasser mit ca. 0 ‰, Fruchtsäfte ca. +10 ‰).

- D_2O führt zu keiner wahrnehmbaren Veränderung des Wassers, was bei zahlreichen Markierungsversuchen von primärer Bedeutung ist (z.B. Markierung im Nahbereich von Mineralwasserbrunnen). Beim Einsatz von Fluoreszenzfarbstoffen als Markierungsmittel kann in der Regel nicht ausgeschlossen werden, dass an den Entnahmestellen Markierungsstoffkonzentrationen über der Sichtbarkeitsgrenze erreicht werden.

Nachteile von Deuterium als Markierungsstoff

- Vergleichsweise hohe Kosten sowohl für den Markierungsstoff als auch bei der Laboranalytik der Proben. Insbesondere die hohen Kosten des Markierungsstoffes schränken den Einsatz von D_2O auf kleine Grundwasservorkommen beziehungsweise geringe Fließdistanzen ein. Als Faustformel muss für die Markierung von 500 bis 1000 m^3 Wasser eine Markierungsstoffmenge von 1 l D_2O veranschlagt werden.
- Im Gegensatz zu den Fluoreszenzfarbstoffen ist bei Deuterium aufgrund der aufwendigen Laboranalytik nur ein geringer Probendurchsatz möglich (ca. 40 Proben pro Woche). Eine online Messung im Gelände ist nicht möglich. Bei zahlreichen Markierungsversuchen ist jedoch zur Anpassung des Probenahmeintervalles eine rasche Analytik notwendig. Eine derartige Rückkoppelung zwischen Laboranalytik und Beprobungsdichte ist bei der Verwendung von D_2O als Markierungsstoff nicht möglich.
- Da der Deuteriumgehalt des Grundwassers natürliche Schwankungen aufweist, sollte bei Markierungsversuchen mit D_2O soweit möglich eine Referenzmessstelle im näheren Untersuchungsgebiet beprobt werden, um diese natürliche Schwankungen im Untersuchungszeitraum zu erfassen. Nur so lassen sich bei der Auswertung der Durchgangskurven auftretende Änderungen des Deuteriumgehaltes im beprobten Grundwasser zweifelsfrei auf das eingegebene Deuterium zurückführen.