



Verteilung stabiler Isotope im Grundwasser Nordwestdeutschlands – Untersuchung zum Einfluss von Kontinental-, Höhen- und Landnutzungseffekt

Katharina Lehner¹ · Henning Fröllje¹ · Andreas Kubier¹ · Thomas Pichler¹Eingegangen: 1. Februar 2019 / Überarbeitet: 11. April 2019 / Online publiziert: 8. August 2019
© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Zusammenfassung

Diese Arbeit liefert einen Überblick über die Verteilung der stabilen Isotope von Wasserstoff ($\delta^2\text{H}$) und Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$) im Grundwasser Niedersachsens und Bremens anhand von 133 Grundwasserproben, die mit der Cavity-Ring-Down-Spectroscopy untersucht wurden. Die Ergebnisse zeigen das Auftreten eines Kontinentaleffekts in Nordwest-Südost-Richtung entlang der vorherrschenden Windrichtung mit einer Abreicherung des Isotopensignals im Wasser mit zunehmender Entfernung von der Küste ($\delta^2\text{H}$: $-48,3\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$: $-6,8\text{‰}$) ins Landesinnere ($\delta^2\text{H}$: $-56,8\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$: $-7,8\text{‰}$) sowie einen vermeintlichen Höheneffekt, der allerdings über eine große räumliche Entfernung auftritt und daher höchstwahrscheinlich nicht real ist, sondern durch den Kontinentaleffekt bestimmt wird. Des Weiteren wird die Abhängigkeit der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Grundwassers von der Evaporationsrate deutlich, die ihrerseits von der Bodenporosität und dem Pflanzenbewuchs abhängt und auf unterschiedliche Landnutzung oder das Vorkommen von verschiedenen hydrogeologischen Räumen zurückzuführen ist. Letztgenannte Effekte beeinflussen sich wechselseitig und sind ebenfalls durch den Kontinentaleffekt überprägt.

Distribution of stable isotope values in groundwater in Northwestern Germany—Evaluation of continental, altitude and land use effects

Abstract

This study provides an overview of the distribution of stable isotopes of hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) in groundwater of Lower Saxony and Bremen through the analysis of 133 groundwater samples using cavity ring-down spectroscopy. Results show a continental effect in the northwest-southeast direction along the prevailing wind direction, characterized by a depletion of the water isotope signal with increasing distance from the coastline ($\delta^2\text{H}$: -48.3‰ ; $\delta^{18}\text{O}$: -6.8‰) into the back-country ($\delta^2\text{H}$: -56.8‰ ; $\delta^{18}\text{O}$: -7.8‰). The potential appearance of an altitude effect is observed over a large distance and is thus most likely not a real feature but caused by the continental effect. Furthermore, we observed a dependence of water isotope values on the evaporation rate, which itself largely depends on soil porosity and plant growth and is caused by differences in land use and in hydrogeological conditions. The latter effects have a mutual impact on each other and are also overprinted by the continental effect.

Keywords Stable water isotopes · Groundwater · Lower Saxony · Continental effect · Altitude effect

Zusatzmaterial online Zusätzliche Informationen sind in der Online-Version dieses Artikels (<https://doi.org/10.1007/s00767-019-00423-0>) enthalten.

✉ Thomas Pichler
pichler@uni-bremen.de

¹ Geochemie und Hydrogeologie, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, Klagenfurter Str. 4, 28359 Bremen, Deutschland

Einleitung

Stabile Wasserstoff- und Sauerstoffisotope können wichtige Informationen zur Untersuchung des hydrologischen Kreislaufs beitragen, z. B. über die Evaporationsrate oder die Infiltration von Niederschlagswasser in den Boden (Clark und Fritz 1997). Isotopenhydrogeologische Untersuchungen im Grundwasser bieten die Möglichkeit, Herkunft, Fließzeit-

ten, Fließwege, Verweilzeiten und Mischungsverhältnisse von Wasser nachzuvollziehen, da die Isotopenverhältnisse den Einfluss von Niederschlags- und Flusswasser im Grundwasser und Boden anzeigen (Allison 1988). Diese Anwendungen beruhen auf Unterschieden in der Isotopenzusammensetzung von Grundwässern, Oberflächenwässern und Niederschlägen (Königer 2003; Houben et al. 2014), die abhängig von Zeit, Ort und Intensität des Eintritts in die Hydrosphäre und von verschiedenen Wechselwirkungsprozessen zwischen der Evaporation, dem Niederschlag oder der Bodenbeschaffenheit bestimmt wird (Bednorz und Brose 2017).

Das Prinzip der Anwendung von Isotopenuntersuchungen in der Hydrologie und Hydrogeologie beruht auf Unterschieden in den Reaktionsgeschwindigkeiten der aus verschiedenen Isotopen zusammengesetzten Wasser-Moleküle und der damit einhergehenden Isotopenfraktionierung. Isotopenverhältnisse werden in der Regel in der δ -Notation relativ zum VSMOW-Standard (Vienna Standard Mean Ocean Water) dargestellt:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{Probe}} = \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Probe}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Standard}}} - 1 \right) \cdot 1000 \text{ (‰)} \quad (2)$$

Die Entwicklung der $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Zusammensetzung von meteorischen Wässern wird von der Rayleigh-Destillation bestimmt (Dansgaard 1964). Rayleigh-Destillation führt zur Fraktionierung der Isotope in den Wolken (Wasserdampf). Kühlt sich Wasserdampf ab, kann es zur Niederschlagsbildung kommen, was beim Aufstieg von Wolken an Gebirgen passiert (Höheneffekt) oder bei der Migration vom Ort der Entstehung (Ozeane und Meere) in das Innere der Kontinente (Kontinentaleffekt). Während der Kondensation werden die schwereren ^2H - und ^{18}O -Isotope bei der Bildung von Wasser bevorzugt, und somit wird das in der Wolke verbleibende Wasser isotopisch leichter (d. h., die δ -Werte werden geringer). Daher sorgt der Kontinentaleffekt dafür, dass mit zunehmender Entfernung vom Ozean durch das Ausregnen sowie durch die Zumischung von kontinental gebildetem Wasserdampf die Wolke und daher auch der Niederschlag isotopisch leichter wird (Bednorz und Brose 2017). Aufgrund der isotopisch leichter werdenden Wolke, wird der nächste Niederschlag aus derselben Wolke isotopisch noch leichter (Rayleigh-Destillation). In veröffentlichten Studien berechnete Kontinentaleffekte zeigen Änderungen zwischen $-8,3 \text{ ‰}$ pro 1000 km im Grundwasser Sloweniens (Mezga et al. 2014) und $-2,0 \text{ ‰}$ pro 1000 km im Niederschlagswasser in Frankreich (Millot et al. 2010).

Der Höheneffekt hat eine ähnliche Auswirkung auf die isotopische Änderung des Niederschlages in Regionen, in denen Wolken an topographischen Gradienten aufsteigen und sich dadurch aufgrund der adiabatischen Abkühlung Niederschlag bildet. Die Abnahme im $\delta^{18}\text{O}$ variiert hierbei

zwischen $-0,15$ und $-0,5 \text{ ‰}$ pro 100 m Höhenanstieg, die Abnahme im $\delta^2\text{H}$ von -1 bis -4 ‰ (Clark und Fritz 1997).

Bisher liegen keine flächendeckenden Untersuchungen zu stabilen Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotopen im Grundwasser Niedersachsens und Bremens vor. Die einzigen bisher veröffentlichten Daten aus dieser Region stammen aus zwei Studien, die sich mit den ostfriesischen Inseln Langeoog und Spiekeroog befassen (Röper et al. 2012; Houben et al. 2014). Die Untersuchungen auf Spiekeroog zeigen, dass das Grundwasser mit größerer Tiefe isotopisch leichter wird, was die Autoren auf kältere Temperaturen während der Infiltration zurückführen und als Verschiebung der Neubildungsmuster oder als allgemeine Temperaturzunahme interpretieren (Röper et al. 2012; van Geldern et al. 2014). Auch die Messungen auf Langeoog zeigen einen Trend zu leichteren Werten mit zunehmender Tiefe, was ebenfalls auf ansteigende Temperaturen zurückzuführen ist (Houben et al. 2014).

Ohne flächendeckende Untersuchungen in Niedersachsen und Bremen fehlt neben grundlegenden Informationen über die Verteilung der Wasser- und Sauerstoffsotope die Kenntnis über das Vorkommen und die Ausprägung des Kontinentaleffekts und das mögliche Vorkommen eines Höheneffekts im Nordwestdeutschen Raum. Hebert (1997) konnte bereits einen großräumigen Kontinentaleffekt innerhalb Deutschlands beobachten, der sich in Nordwest-Südost-Richtung von der norddeutschen Küstenregion bis in den süddeutschen Alpenraum erstreckt und eine Änderung im Isotopensignal des Wassers von -45 ‰ auf -85 ‰ ($\delta^2\text{H}$) verursacht, wobei für den Nordwestdeutschen Raum eine Änderung von -45 ‰ auf -55 ‰ angegeben wurde. Im Gegensatz zu der hier vorliegenden Studie basierten die Untersuchungen von Hebert (1997) allerdings auf der Untersuchung von Niederschlagswasser. Ein möglicher Höheneffekt wurde bisher für Niedersachsen oder Norddeutschland noch nicht untersucht.

Im Rahmen dieser Studie wird die Änderung der Isotopenzusammensetzung im Grundwasser Niedersachsens und Bremens zwischen Küstenregion und Landesinnerem untersucht, um eine grundlegende Datenbasis für die Verteilung der Isotopenwerte in Nordwestdeutschland zu erhalten. Das fundamentale Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung des Kontinentaleffekts, und im speziellen ob dieser innerhalb relativ kurzer lateraler Distanzen von weniger als 200 km in Norddeutschland zu beobachten ist. Die Verteilung der Proben auf unterschiedliche Landnutzungsformen und hydrogeologische Räume und Teilräume bietet zudem die Möglichkeit der Analyse dieser potenziell für die Verteilung der Isotopenzusammensetzung bedeutenden Rahmenbedingungen. Ein weiteres Ziel der Studie besteht in der Untersuchung des möglicherweise auftretenden Höheneffekts im topographisch gering differenzierten Untersuchungsgebiet, sowie dessen Beeinflussung durch den Kontinentaleffekt.

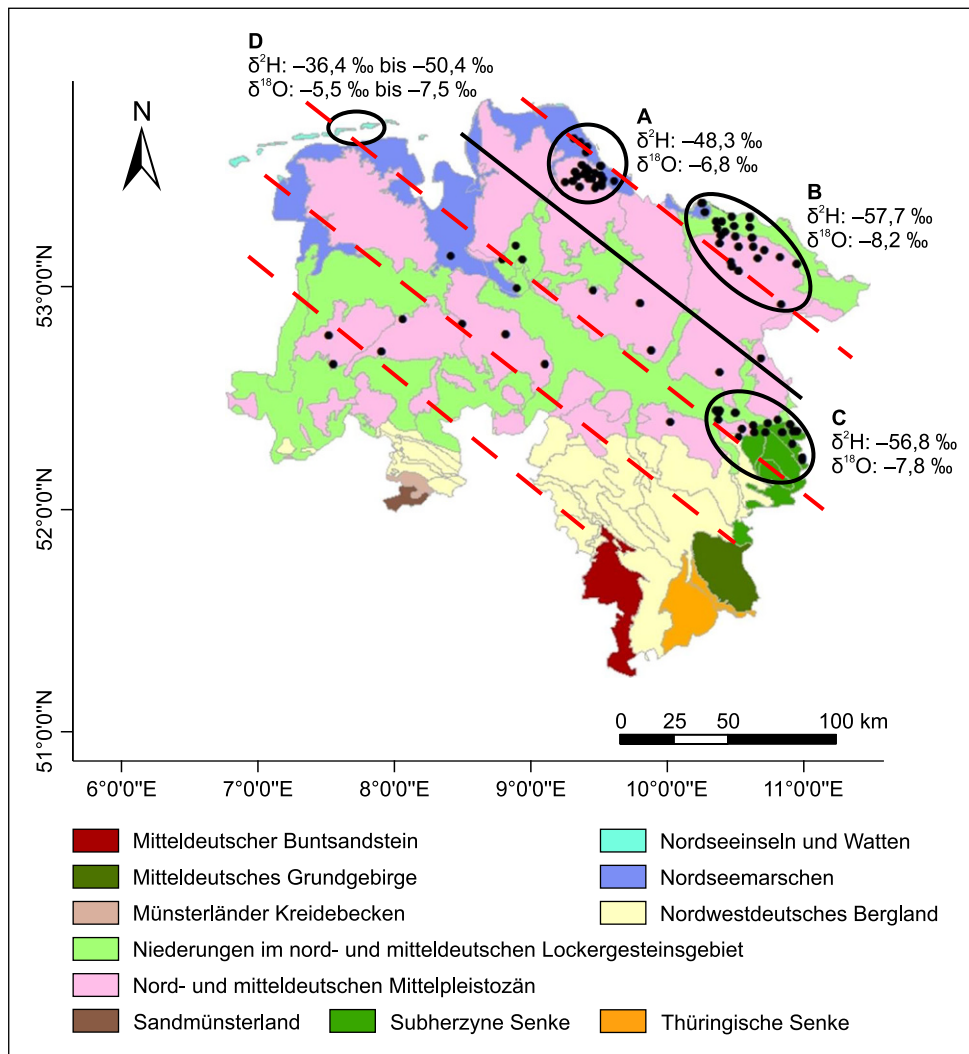


Abb. 1 Lokationen der Grundwassermessstellen (*schwarze Punkte*) innerhalb der hydrogeologischen Räume in Niedersachsen und Bremen. Außerdem gezeigt sind die Regionen A, B, C und D, sowie die Lage des Profilschnitts für die Berechnung des Höheneffekts (*schwarze Linie*) und Achsen, die die Bezugspunkte für die Entfernung der Messstellen zur Küste markieren (*rote gestrichelte Linien*). Isotopenwerte stellen den Median für eine Region (Regionen A, B, C: diese Studie) bzw. den Schwankungsbereich (Region D: Röper et al. 2012; Houben et al. 2014) dar. Farbgebung und Grenzen der Räume nach Elbracht et al. (2016). Karte erstellt mit ArcGIS

Fig. 1 Locations of the groundwater observation wells (*black dots*) within the hydrogeological areas in Lower Saxony and Bremen. Additionally shown are the regions A, B, C, and D as well as the position of the profile section for the calculation of the altitude effect (*black line*) and the axis that mark the reference points for the calculation of the distance of the wells to the coast (*red striped lines*). Isotope values represent median values for each region (regions A, B, C: this study) or the range (Region D: Röper et al. 2012; Houben et al. 2014). Color scheme and boundaries of the areas according to Elbracht et al. (2016). Map created with ArcGIS

Zur Untersuchung des Kontinentaleffekts wurden im Untersuchungsgebiet Gebiete mit einer großen Dichte an Messwerten zu drei Regionen zusammengefasst (A, B und C, Abb. 1). Es konnte so untersucht werden, ob der Kontinentaleffekt über eine vergleichsweise geringe Distanz von ca. 220 km im Grundwasser beobachtet werden kann. Die Ergebnisse ermöglichten zudem einen Vergleich mit dem von Hebert (1997) bestimmten Kontinentaleffekt im Niederschlag und erweitern somit das Verständnis über Herkunft und Einfluss von Niederschlägen auf das Grundwasser.

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 1) umfasst das nördliche und zentrale Niedersachsen sowie Bremen (Nordwestdeutschland). Es befindet sich in der außertropischen Westwindzone, bei der das Klima durch Tiefdruckgebiete geprägt ist, die meist von Westen nach Osten durchziehen. Die Hauptwindrichtung im Untersuchungsgebiet ist daher von Westen nach Osten. Das durch Hochdruckwetterlagen entstehende sekundäre Windrichtungsmaximum verläuft

jedoch überwiegend aus nordwestlicher Richtung (Bürger 2003; Häckel 2016).

Die Proben stammen aus den hydrogeologischen Räumen nord- und mitteldeutsches Mittelpleistozän (im Folgenden bezeichnet als Geesten), Niederungen im nord- und mitteldeutschen Lockergesteinsgebiet (im Folgenden bezeichnet als Niederungen), Nordseemarschen (im Folgenden bezeichnet als Marschen) (alle als Teile des hydrogeologischen Großraums nord- und mitteldeutsches Lockergesteinsgebiet) und Subherzynen Senke (als Teil des hydrogeologischen Großraums mitteldeutsches Bruchschollenland) (Elbracht et al. 2016), die einen Großteil der Fläche Niedersachsens und Bremens ausmachen und lediglich im Süden und Südosten durch das nordwestdeutsche Bergland und weitere kleinere hydrogeologische Räume abgelöst werden (Abb. 1).

Charakteristisch für die Geest sind an der Oberfläche anstehende Geschiebemergel und glaziofluviale Sande der Saale- und Elster-Kaltzeiten sowie weichseleiszeitliche Sanderflächen. Bei den Niederungen handelt es sich um ehemalige weichseleiszeitliche Entwässerungsrinnen, die hauptsächlich aus Sanden und Kiesen bestehen (Beer et al. 2016). Die Marschen kennzeichnen sich durch wiederholte holozäne Faziesänderungen mit Wechselfolgen aus Torf und klastischen Sedimenten im Untergrund. Neben dem Torf sind in der Marsch auch holozäne Tone typisch (Elbracht et al. 2016). Das Deckgebirge der Subherzynen Senke besteht überwiegend aus mesozoischen Sedimentgesteinen, die durch die Bruchschollentektonik stark beansprucht wurden. Quartäre Ablagerungen, wie Flusssedimente, existieren meist in den Talauen und Senken, deren Morphologie durch gestaffelte Terrassenablagerungen aus Sand und Kies geprägt ist.

Die Geesthochflächen besitzen in den sandig-kiesigen Gebieten eine relativ hohe Grundwasserneubildung mit 200 bis 400 mm/a. Unter Geschiebemergel und Lössbedeckung ist die Grundwasserneubildung jedoch nur 100 bis 200 mm/a (Elbracht et al. 2016). In den Niederungen existieren oberflächennahe ergiebige Grundwasservorkommen in quartären Sanden und Kiesen. Regional gibt es auch ein tieferes Grundwasserstockwerk in pliozänen oder miozänen Sanden bzw. pleistozänen Rinnenfüllungen. Das tiefe Stockwerk ist durch überlagernde bindige Schichten gut geschützt, wohingegen das obere aufgrund fehlender schützender Deckschichten leicht verunreinigt werden kann. Aufgrund des meist hohen Grundwasserstandes ist die Grundwasserneubildung meist mit 100 mm/a sehr gering, kann aber bis zu 100–200 mm/a erreichen (Elbracht et al. 2016). Durch die geringe Durchlässigkeit der Marschsedimente, den geringen Grundwasserflurabstand und die künstliche Entwässerung ist die Grundwasserneubildung in der Marsch unter 100 mm/a (Beer et al. 2016).

Material und Methoden

Die untersuchten Grundwasserproben ($n = 133$) entstammen zu einem Großteil den Geesten ($n = 82$) und zu kleineren Teilen den hydrogeologischen Räumen Niederungen ($n = 26$), Marschen ($n = 10$) und Subherzyne Senke ($n = 14$). Eine Probe stammt zusätzlich aus dem hydrogeologischen Raum nordwestdeutsches Bergland (Teilraum Wolfenbütteler Hügelland). Die Messstellen repräsentieren Geländehöhen zwischen $-0,6$ mNN und $150,7$ mNN. Der Flurabstand beträgt $-0,9$ bis $40,5$ m und die Entnahmetiefe -211 mNN bis $137,7$ mNN (Supplement Tab. 1). Die beprobten Grundwassermessstellen liegen im Einzugsgebiet der Flüsse Weser ($n = 41$), Elbe ($n = 88$) und Ems ($n = 4$) im nördlichen und zentralen Niedersachsen bzw. Bremen (Abb. 1). Bezogen auf die Landnutzungsform befinden sich die Messstellen auf Grünlandflächen ($n = 47$), auf Äckern ($n = 39$), in Wäldern ($n = 30$) sowie in Stadtgebieten ($n = 17$) (nach CORINE LBM-DE 2012). Die Zuordnung zur Landnutzung ist nur repräsentativ für die jeweilige Messstelle und vernachlässigt das gesamte Einzugsgebiet. Die Proben wurden überwiegend aus Porengrundwasserleitern und Grundwasserleiter geringleitern entnommen.

Für diese Studie wurden 19 Brunnen eigenständig nach DVWK (1992) beprobt. Hierfür wurden die Brunnen klar gepumpt bis sich konstante Werte für Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert und Sauerstoffgehalt einstellten. Danach wurden diese aufgenommen (Supplement Tab. 2) und der Brunnen beprobt. Je nach Messstelle dauerte dies zwischen 20 und 45 min. Für die Probennahme wurden 50 ml Probe in Polypropylen-Gefäße filtriert ($0,45 \mu\text{m}$) und bis zur Analyse kühl gelagert. Die restlichen 114 Proben wurden im Rahmen einer Probennahmekampagne des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) nach DVWK (1992) genommen und von diesem zusammen mit den gemessenen Werten der Vor-Ort-Parameter zur Verfügung gestellt. Alle Proben wurden im Labor an der Universität Bremen untersucht. Die $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte wurden mit dem Cavity-Ring-Down-Spectrometer (CRDS) DLT-100 (Los Gatos Research, USA) analysiert. Für die Analyse wurden Kalibrierstandards der Firma Iso-Analytical (Zero Natural Water Standard (IOW): $\delta^2\text{H} = +11,26 \text{‰}$ und $\delta^{18}\text{O} = -0,41 \text{‰}$; Low Natural Water Standard (IAW): $\delta^2\text{H} = -269,0 \text{‰}$ und $\delta^{18}\text{O} = -33,57 \text{‰}$; Medium Natural Water Standard (ISW): $\delta^2\text{H} = -98,32 \text{‰}$ und $\delta^{18}\text{O} = -12,34 \text{‰}$) verwendet.

Zur Überprüfung der Richtigkeit der Ergebnisse wurden der Referenzstandard VSMOW2 (IAEA), sowie ein hausinterner Leitungswasserstandard (Isotopensignatur: $\delta^2\text{H} = -51,61 \text{‰}$ und $\delta^{18}\text{O} = -7,62 \text{‰}$) verwendet. Die Auswertung erfolgte mithilfe einer angepassten Variante des „Post-processing spreadsheet for the LGR DT-100 Liquid-Water Stable Isotope Analyzer“ (Newman et al. 2009).

Die für den VSMOW2 ($n=4$) gemessenen $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte weichen maximal bis 2,06 ‰ bzw. 0,62 ‰ vom Sollwert ab. Für den Leitungswasserstandard ($n=4$) ergeben sich maximale Abweichungen von 2,17 ‰ ($\delta^2\text{H}$) und 0,17 ‰ ($\delta^{18}\text{O}$). Die Standardabweichungen der Messwiederholungen ($n=9$) innerhalb einer Probenmessung liegen mit wenigen Ausnahmen im von der IAEA angegebenen Toleranzbereich ($\delta^{18}\text{O}=0,3$ ‰ und $\delta^2\text{H}=2,0$ ‰, Newman et al. 2009). Aufgrund der vorhandenen Ausnahmen wird der Median der Standardabweichungen des gesamten Datensatzes ($\delta^{18}\text{O}=0,09$ ‰ und $\delta^2\text{H}=0,48$ ‰) anstatt des Mittelwertes als repräsentative Standardabweichung angesehen. Dementsprechend wurden auch Medianwerte für die Darstellung der Isotopenwerte benutzt, obwohl laut Shapiro-Wilk-Test die Daten normalverteilt waren. Praktisch macht dies jedoch keinen Unterschied, da Median- und Mittelwerte der Isotopendaten identisch waren, was auch bei einer Normalverteilung erwartet würde.

Ergebnisse

Alle in dieser Studie gewonnenen Isotopendaten, Messungen im Gelände und Messstelleninformationen sind im Supplement Tab. 1 und 2 dargestellt. Bei den im Folgenden diskutierten Isotopen handelt es sich ausschließlich um Isotope des flüssigen Wassers.

Insgesamt weisen die Daten eine große Streuung, sowohl innerhalb des gesamten Datensatzes, als auch innerhalb der einzelnen Regionen (A, B, C) auf (Supplement Tab. 2). Die Medianwerte für die nach Lokation aufgeteilten Probengruppen im Untersuchungsgebiet (A, B, C) zeigen eine Änderung in Nordwest-Südost-Richtung, d.h. in Abhängigkeit von der Entfernung zur Küste. So hat die Probengruppe, die näher an der Küste liegt (Region A), weniger negative Isotopensignale ($-48,3$ ‰ für $\delta^2\text{H}$ und $-6,8$ ‰ für $\delta^{18}\text{O}$) als diejenigen, die sich weiter im Landesinneren befinden (Region B und C; $-57,7$ bzw. $-56,8$ ‰ für $\delta^2\text{H}$ und $-8,2$ bzw. $-7,8$ ‰ für $\delta^{18}\text{O}$) (Abb. 1 und 2). Im Gegensatz dazu gibt es keinen nachweisbaren West-Ost-Gradienten entlang der vorherrschenden Hauptwindrichtung (nicht

Abb. 2 $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte nach Regionen als Einzelwerte (farbige Punkte) und Median des jeweiligen Raumes (farbige Kästen). GMWL „Global Meteoric Water Line“

Fig. 2 $\delta^2\text{H}$ - and $\delta^{18}\text{O}$ values by regions as single values (colored dots) and median of area (colored squares). GMWL Global Meteoric Water Line

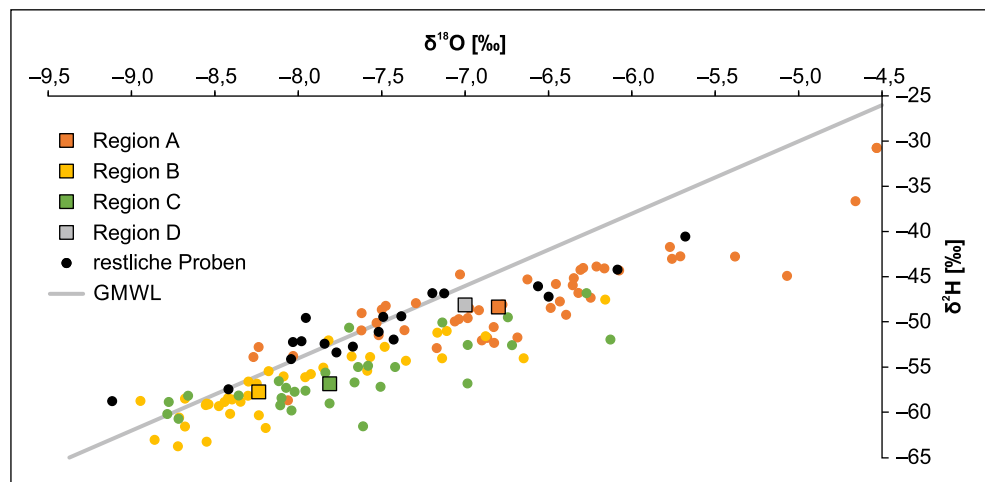
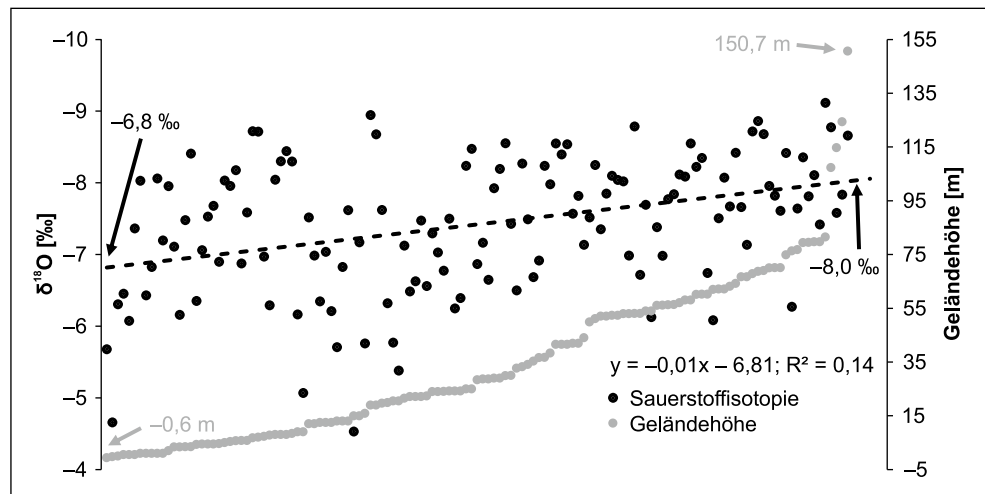


Abb. 3 $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sortiert nach aufsteigender Geländehöhe. Die angegebenen Werte kennzeichnen jeweils die geringste und größte Geländehöhe, sowie das $\delta^{18}\text{O}$ -Minimum und -Maximum der Regressionsgeraden

Fig. 3 $\delta^{18}\text{O}$ values sorted by increasing altitude. The shown values indicate lowest and highest elevation and the $\delta^{18}\text{O}$ minimum and maximum of the regression line



gezeigt). Ein Zusammenhang der Geländehöhe wird bei Betrachtung des gesamten Datensatzes nicht deutlich, auch wenn es einen leichten Trend in Richtung negativerer Werte mit steigender Geländehöhe gibt (Abb. 3). Anhand ausgewählter Grundwassermessstellen entlang einer Profillinie in Nordwest-Südost-Richtung (vgl. Abb. 1) kann jedoch ein Höheneffekt von $-1,46\text{‰}$ (Sauerstoff) pro 100 m Höhenänderung auf einer Distanz von 221 km berechnet werden.

Diskussion

Kontinentaleffekt

Die Änderung der Isotopenwerte von Wasserstoff ($\delta^2\text{H}$) und Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$) in Abhängigkeit der verschiedenen Regionen innerhalb Niedersachsens ist auf Niederschlagsereignisse zurückzuführen, die aus Nordwestwinden resultieren, da sich die Werte entlang dieser Windrichtung ändern (Abb. 1 und 2). So zeigen die Proben aus Region A relativ schwere Isotopensignale mit einem Median von $-48,3\text{‰}$ für $\delta^2\text{H}$ und $-6,8\text{‰}$ für $\delta^{18}\text{O}$ und die Regionen B und C deutlich leichtere Werte von $-57,7\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$) bzw. $-8,2\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) sowie $-56,8\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$) bzw. $-7,8\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$). Diese Verteilung macht die Abhängigkeit von der Windrichtung und der Entfernung zur Küste deutlich. Dies wird bestätigt durch Ergebnisse von Spiekeroog (Region D in Abb. 1), wo Grundwasser mit Werten zwischen $-6,5\text{‰}$ und $-7,5\text{‰}$ für $\delta^{18}\text{O}$ und zwischen $-45,8\text{‰}$ und $-50,3\text{‰}$ für $\delta^2\text{H}$ gemessen wurde (Röper et al. 2012). Ähnliche Werte ($\delta^2\text{H}$: $-36,4\text{‰}$ bis $-50,4\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$: $-5,52\text{‰}$ bis $-7,26\text{‰}$) wurden auch auf Langeoog (Region D in Abb. 1) beobachtet (Houben et al. 2014). Diese Isotopenwerte sind ähnlich zu den Untersuchungsergebnissen aus Region A, was ebenfalls darauf hindeutet, dass die küstennahen Proben in Niedersachsen isotopisch schwerer sind als Grundwasser an Lokationen im Landesinneren.

Ältere Untersuchungen des Niederschlagswassers zeigen, dass es eine Änderung der Isotopenwerte im Zusammenhang mit der Entfernung von der Küste gibt und damit auch einen Kontinentaleffekt innerhalb Deutschlands (Hebert 1997). Das Isotopensignal ist im Nordwesten Deutschlands am schwersten ($\delta^2\text{H}$: -45‰ bis -50‰), wohingegen im Südosten die leichtesten Werte ($\delta^2\text{H}$: -80‰ bis -85‰) beobachtet werden (Hebert 1997). Die von Hebert (1997) angegebenen Werte für die Küstenregion Niedersachsens ($\delta^2\text{H}$: -45‰ bis -50‰) stimmen mit den hier gemessenen Werten ($\delta^2\text{H}$: $-48,3\text{‰}$ bis $-49,5\text{‰}$) überein. Durch die Untersuchungen wird deutlich, dass sich die Werte tendenziell eher von Nordwesten nach Südosten, anstatt in West-Ost-Richtung ändern (Hebert 1997), was auf die entlang dieser Achse vorherrschende Windrichtung zurückzuführen ist (Bürger 2003; Häckel 2016). Unsere Arbeit bestätigt die

se Beobachtungen und zeigt, dass der Kontinentaleffekt in Deutschland bereits nach relativ kurzen Distanzen messbar ist.

Wird der Kontinentaleffekt abgeschätzt, so ergibt sich zwischen Probengruppe A und C eine Distanz von etwa 150 km und auf Basis der Medianwerte von $\delta^{18}\text{O}$ eine Differenz von -1‰ , was einem Kontinentaleffekt von $-6,6\text{‰}$ pro 1000 km entspricht. Damit liegt der hier ermittelte Kontinentaleffekt im Bereich bereits veröffentlichter Berechnungen für andere europäische Regionen. So konnte im Grundwasser Sloweniens für Sauerstoff ein Effekt von $-8,3\text{‰}$ pro 1000 km berechnet werden (Mezga et al. 2014), für den Niederschlag in Europa ein Wert von $-2,0\text{‰}$ pro 1000 km (Rozanski et al. 1993) und in Frankreich ein Kontinentaleffekt im Niederschlag von $-3,2\text{‰}$ für $\delta^{18}\text{O}$ (Millot et al. 2010). Beachtet werden muss an dieser Stelle jedoch, dass hier mit dem Median der Probengruppen gerechnet wurde und je eine exemplarische/repräsentative Lokation für die Entfernungsberechnung gewählt wurde. Der mit Wasserstoffisotopen berechnete Kontinentaleffekt ergibt ähnliche Werte ($-1,28\text{‰}$) wie der über den Sauerstoff berechneten.

Höheneffekt

Traditionell wird der Höheneffekt über die Isotopenwerte im Niederschlag berechnet (Clark und Fritz 1997). Allerdings zeigen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Grundwasser in Slowenien Höheneffekte zwischen $-0,25\text{‰}$ und $-0,33\text{‰}$, und damit ist der im Grundwasser beobachtete Höheneffekt identisch zu dem im Niederschlag (Mezga et al. 2014). Darauf basierend ist anzunehmen, dass die Bestimmung des Höheneffekts auf Grundlage von Grundwasserproben anstelle von Niederschlagswasser möglich ist.

Der hier für Niedersachsen berechnete Höheneffekt beträgt $-1,46\text{‰}$ pro 100 m ($\delta^{18}\text{O}$). Die sehr geringen Höhenunterschiede des Geländes im Untersuchungsgebiet von maximal 151,3 m machen jedoch eine kritische Betrachtung dieses Wertes notwendig. Ein Vergleich mit Literaturwerten zeigt beispielsweise im topographisch weitaus differenzierteren Berner Oberland für Sauerstoff eine Abnahme von $-0,2\text{‰}$ pro 100 m Höhe (Siegenthaler und Matter 1982). Dies entspricht den häufig in der Literatur zitierten Werten, die einen Höheneffekt von $-0,15\text{‰}$ bis $-0,3\text{‰}$ pro 100 m für Sauerstoff und $-1,2\text{‰}$ bis $-2,4\text{‰}$ für Wasserstoff anzeigen (Poage and Chamberlain 2001; Schotterer et al. 2000). Auch andere Untersuchungen liefern Werte für den Höheneffekt in diesem Bereich, wie beispielsweise eine modellierte Abnahme von $-0,23\text{‰}$ pro 100 m im Schwarzwald (Holtkamp 2008) oder einen Höheneffekt von $-0,31\text{‰}$ pro 100 m in Westitalien (Bortolami et al. 1979). Die Ergebnisse sind insofern auffällig, da der Höheneffekt in flacheren Gebieten eigentlich geringer ausfällt als in Regionen mit

größeren topographischen Gradienten (Gat et al. 2001). So wurde auch bei Untersuchungen in der Schweiz festgestellt, dass der Höheneffekt umso ausgeprägter ist, je differenzierter die Topographie in einem Gebiet ist (Pearson et al. 1991).

Eine mögliche Erklärung für den großen berechneten Höheneffekt im topographisch gering differenzierten Niedersachsen liefert eine Untersuchung aus Argentinien (Vogel et al. 1975). Diese Autoren haben festgestellt, dass die relative Änderung der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit zunehmender Höhe abnimmt. Dabei ist diese Änderung mit $-0,6\%$ pro 100m in den flacheren Gebieten stärker ausgeprägt als in dem hoch gelegenen Bereich der Anden, wo der Höheneffekt nur $-0,2\%$ pro 100m beträgt. Diese ausgeprägte Änderung des Isotopensignals im Flachland Argentiniens ist auf die großen Entfernungen und damit auf eine Kombination von Höhen- und Kontinentaleffekt zurückzuführen (Vogel et al. 1975). Wir können daher spekulieren, dass dies auch für das nordwestdeutsche Flachland zutrifft und der berechnete Höheneffekt kein reales Signal ist, sondern vom Kontinentaleffekt überlagert wird. Bei der Bestimmung des Höheneffekts wurden Proben berücksichtigt, die geographisch bis zu 210km voneinander entfernt liegen, wohingegen die Literaturwerte der Höheneffekte (z. B. Schotterer et al. 2000) in einem weitaus kleinräumigeren Gebiet bestimmt wurden. Es kann daher bei den beobachteten Isotopenänderungen nicht direkt von einem Höheneffekt gesprochen werden, sondern vielmehr von einem Effekt, der dem Höheneffekt ähnliche Merkmale aufweist. Deutlich wird dies, wenn man die für den Kontinentaleffekt berechneten Werte ($\delta^{18}\text{O}$: $6,6\%$ auf 1000km) auf die zur Berechnung des Höheneffekts genutzten Standorte anwendet. Die räumliche Differenz von 210km ergibt entlang dieser Strecke einen Kontinentaleffekt von $\sim 1,5\%$ ($\delta^{18}\text{O}$), was dem hier bestimmten Höheneffekt entspricht. Die Möglichkeit, den Höheneffekt auf kleinräumiger Basis zu berechnen, z. B. den Höheneffekt zwischen Elbmarsch (maximale Geländehöhe: 3,5m) und Zevener Geest (maximale Geländehöhe: 36,7m) in Region A oder zwischen der Weser-Aller-Leine-Niederung (maximale Geländehöhe: 60m) und der Subherzynen Senke (maximale Geländehöhe: 150,7m) in Region C, wurde hier verworfen, da dies nicht von den Einflüssen durch die hydrogeologischen Rahmenbedingungen getrennt werden kann (siehe Diskussion weiter unten).

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass neben dem grundlegenden Rayleigh-Effekt auch andere Faktoren für die isotopischen Fraktionierungsprozesse bedeutend sind. Dazu zählt die Anreicherung der schweren Isotope ^{18}O und ^2H in den Regentropfen während des Abregnens, die in niedrigen Höhen größer ist, da dort die Wolkenbasis typischerweise hoch über dem Boden liegt (Moser und Stichler 1974). Dieser sogenannte Pseudo-Höheneffekt wird zwar häufig auf der Leeseite von Gebirgen beobachtet, trifft aber mög-

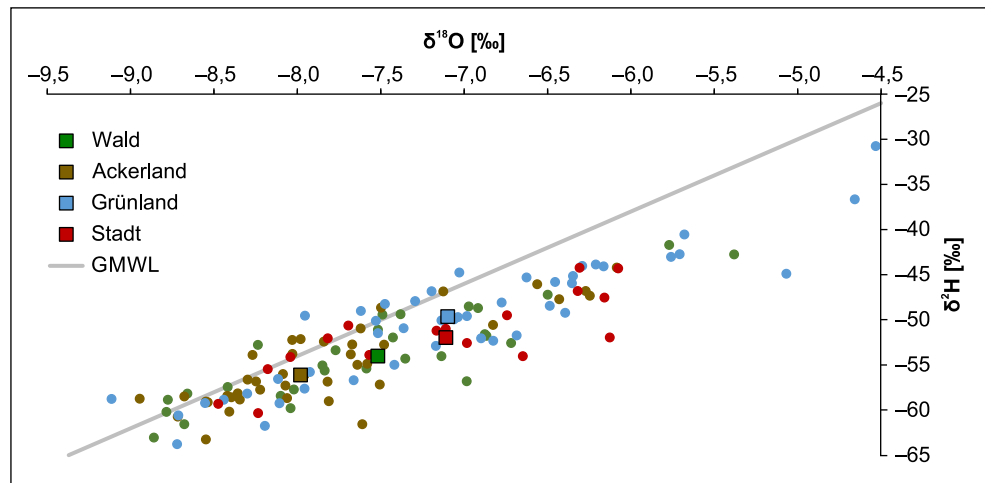
licherweise auch auf das Flachland allgemein zu. Es ist daher zu vermuten, dass im Flachland ausgeprägte Höheneffekte zu beobachten sind, die neben dem begünstigten Ausregnen schwerer Isotope aufgrund der hohen Differenz zwischen den Wolken und dem Boden auch durch das zusätzliche Wirken des Kontinentaleffekts verursacht werden.

Weitere Einflussfaktoren auf die Isotopenverteilung

Zusätzlich zum Kontinental- und Höheneffekt besteht eine Variabilität in den $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, die von Landnutzung und hydrogeologischen Rahmenbedingungen abhängt. In Bezug auf die Isotopenfraktionierung spielt vor allem die Evaporation eine entscheidende Rolle, da diese eine systematische Anreicherung der schweren Isotope im Wasser bewirkt (z. B. Dansgaard 1964; Adomako et al. 2010). Im Allgemeinen hängt die Verdunstung von der Temperatur, der Strahlungsbilanz und der Wassersättigung im Boden ab. Es spielen also auch die Jahreszeiten, die Zusammensetzung und Beschaffenheit des Bodens, für den Fall einer Pflanzenbedeckung die Art, die Größe und das Alter der Pflanzen (Häckel 2016) sowie verschiedene Landnutzungsparameter wie die Albedo oder die Hangneigung (Reichert 2001) eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Verdunstung. Dennoch gibt es in Bezug auf die verschiedenen Landnutzungsformen Unterschiede in der Verdunstung und deren Komponenten (Müller und Münch 2000; Baumgartner und Liebscher 1990). Wir beobachten im Untersuchungsgebiet eine Abhängigkeit der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von der Landnutzungsform, hier unterschieden in Wald, Stadt, Ackerland und Grünland (Abb. 4). Diese Abhängigkeit lässt sich durch die verschieden starke Evaporation und Versickerung des Wassers erklären. Wälder verdunsten bis zu 70% des Niederschlags (Baumgartner 1977) und damit einen höheren Anteil des zur Verfügung stehenden Niederschlags als landwirtschaftliche Nutzflächen (Goldberg und Bernhofer 2011). Der Anteil des im Wald verdunsteten Wassers fällt dabei zur Hälfte auf die Interzeptionsverdunstung und zur anderen Hälfte auf die Transpiration und Evaporation (Goldberg und Bernhofer 2011). Da aber nur bei letzterem eine Isotopenfraktionierung auftritt, sind die Isotopenwerte ($-7,6\%$ für $\delta^{18}\text{O}$, $-54,0\%$ für $\delta^2\text{H}$) der Waldgebiete nur mäßig abgereichert (Abb. 4). Auf Grünlandflächen kann das Niederschlagswasser aufgrund des Pflanzenwachstums wesentlich länger im Boden gehalten werden, als auf dem Ackerland (Müller et al. 1988). Der Verdunstungsanteil, der auf die Transpiration fällt, ist auf dem Grünland einigermaßen ausgeglichen mit dem Anteil der Evaporation (Reichert 2001) und da zusätzlich weniger Interzeption als im Wald stattfindet (Goldberg und Bernhofer 2011), sind die höchsten Evaporationsraten und damit am wenigstens negativen Isotopenwerte ($-7,1\%$ für $\delta^{18}\text{O}$, $-49,9\%$ für $\delta^2\text{H}$) auf Grünlandflächen zu finden. Die Verdunstung auf Ackerböden

Abb. 4 $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte nach Landnutzungsform als Einzelwerte (*farbige Punkte*) und Median der jeweiligen Nutzungsform (*farbige Kästen*). GMWL „Global Meteoric Water Line“

Fig. 4 $\delta^2\text{H}$ - and $\delta^{18}\text{O}$ values by land use as single values (*colored dots*) and median of each land usage (*colored squares*). GMWL Global Meteoric Water Line



hängt von der Geländeausformung, dem Ausgangsgestein, der Porenraumverteilung und -kontinuität des Bodens sowie von der Bodenbehandlung durch den Menschen und der Vegetation ab (Wohlrab 1973). Obwohl auf Ackerflächen ein großer Teil der Verdunstung auf die Bodenverdunstung fällt (Müller und Münch 2000), bei der Fraktionierungsprozesse stattfinden (Geyh 2000), nimmt die Verdunstung bei Abtrocknung des Oberbodens schnell ab (Glugla et al. 2003). Hinzu kommt, dass durch die geringe Vegetationsbedeckung und die damit verbundene schlechte Verwurzelung sowie aufgrund des recht hohen Gesamtporenvolumens und des Grobporenanteils von Ackerböden (Müller et al. 1988) kein Wasser im Boden gehalten wird. Daher steht nur wenig freies Wasser für die Evaporation zur Verfügung, was die sehr negativen Isotopensignale ($-7,9\text{‰}$ für $\delta^{18}\text{O}$, $-56,1\text{‰}$ für $\delta^2\text{H}$) erklärt. Auf versiegelten oder teilversiegelten Flächen in Städten ist der Evaporationseffekt ebenfalls weniger stark ausgeprägt, da das Niederschlagswasser zum Großteil gleich der Kanalisation zugeführt wird, sodass weniger Evaporation stattfindet (Klostermann et al. 2012). Der Anteil der Evaporation am Niederschlag beträgt auf versiegelten Flächen durchschnittlich nur 15 bis 30 % (Sieker et al. 2009). Jedoch kann bei einer Komplettversiegelung das Wasser nicht sofort abfließen (Müller und Münch 2000), weshalb Evaporation und Fraktionierungsprozesse stattfinden können. Aus diesen parallel auftretenden Erscheinungen ergeben sich in Stadtgebieten mittlere Isotopenwerte ($-7,1\text{‰}$ für $\delta^{18}\text{O}$, $-51,9\text{‰}$ für $\delta^2\text{H}$).

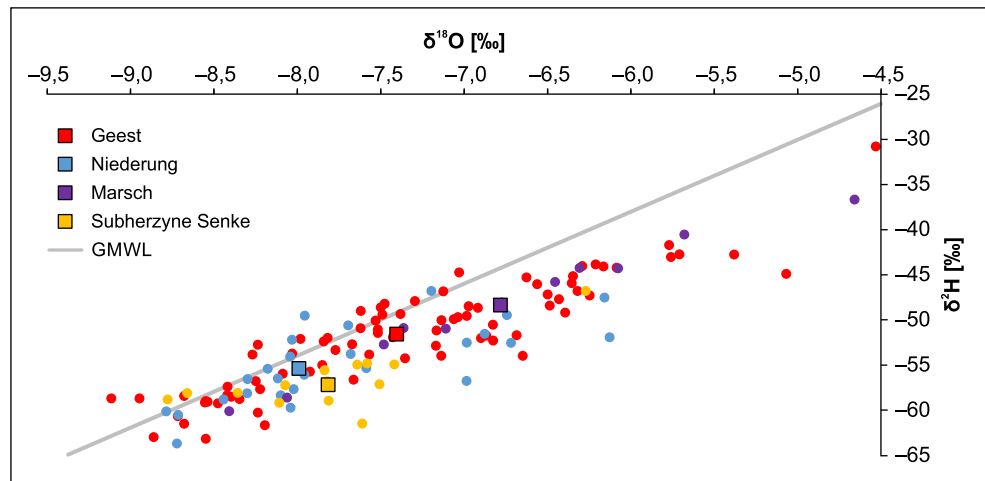
Auch in den hydrogeologischen Räumen spielt die Evaporation eine entscheidende Rolle für die Verteilung der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte. Die Evaporation wird in Böden und Gesteinen neben der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur stark von der Porosität kontrolliert (Aranyosy et al. 1998). Vor allem in Lockergesteinsgebieten sind der Bodentyp (Baumgartner und Liebscher 1990; Scheffer et al. 2010) und die Korngröße (Freeze und Cherry 1979; Dörhöfer und Josopait 1980; Lemke und Elbracht 2008) von besonde-

rer Bedeutung für die Versickerung und Evaporation. Ein grobkörniger Sand mit großen Poren verliert schneller an Feuchtigkeit als ein feinkörniger (Warren 2013). Die hohe Porosität von Sanden ermöglicht zwar eine rasche Wasseraufnahme, besitzt jedoch eine hohe Abflussrate, wenn es keinen flachen Grundwasserspiegel gibt. Sandige Oberflächen trocknen im Allgemeinen verstärkt aus, da die Kapillarwirkung in den großen Poren zu schwach ist, um Wasser seitlich oder von unten zuzuführen (Breuning und Thielmann 1992; Ravi und D'Odorico 2005; Warren 2013). Auch bei der Differenzierung der Messstellen anhand von hydrogeologischen Räumen (Geest, Niederungen, Marsch, Subherzyne Senke) lassen sich Unterschiede in den $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten im Grundwasser innerhalb des Untersuchungsgebiets feststellen (Abb. 5).

In den Niederungen existieren zahlreiche Flusssedimente, die sich zum Großteil aus gröberen, gut durchlässigen Sanden und Kiesen aufbauen (Elbracht et al. 2016; Beer et al. 2016). Die damit einhergehende schnelle Versickerung ist Grund für die stark abgereicherten Isotopenwerte ($-8,0\text{‰}$ für $\delta^{18}\text{O}$, $-55,4\text{‰}$ für $\delta^2\text{H}$), da hier wenig Verdunstung stattfinden kann. Die Isotopenwerte im Grundwasser der Subherzynen Senke ($-7,8\text{‰}$ für $\delta^{18}\text{O}$, $-57,2\text{‰}$ für $\delta^2\text{H}$) sind sehr ähnlich zu denen der Niederung (Abb. 5), da auch hier weitflächig verbreitete Sande und Kiese (Beer et al. 2016) zu einer schnelleren Versickerung und damit geringeren Verdunstung des Wassers führen. In den Marschen bilden die oberflächennahen bindigen Sedimente und der saaleiszeitliche Geschiebelehm eine schützende Deckschicht für das Grundwasser. Neben den Geschiebelehmen sind auch holozäne, ebenfalls undurchlässige Tone und Schluffe typisch für die Marsch (Elbracht et al. 2016). Daher versickert Wasser nur langsam in den Untergrund und viel Wasser kann an der Oberfläche verdunsten, was ein Grund für die stark angereicherten Isotopenwerte der Marsch ist ($-6,8\text{‰}$ für $\delta^{18}\text{O}$, $-48,3\text{‰}$ für $\delta^2\text{H}$). Die Geest besteht aus einer Mischung von tonigem, schluffigem, kiesigem sowie

Abb. 5 $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte nach hydrogeologischen Räumen als Einzelwerte (*farbige Punkte*) und Median des jeweiligen Raumes (*farbige Kästen*). GMWL „Global Meteoric Water Line“

Fig. 5 $\delta^2\text{H}$ - and $\delta^{18}\text{O}$ values by hydrogeological area as single values (*colored dots*) and median of area (*colored squares*). GMWL Global Meteoric Water Line



vor allem aus sandigem Material (Elbracht et al. 2016). In Norddeutschland fehlt der Geschiebelehm zum Teil im Unterboden, sodass weite Gebiete der Geest von sandigem und kiesigem Material aufgebaut werden (Dierschke 1969). Da die Grundwasserneubildung in den sandig-kiesigen Gebieten sehr hoch ist, kann daraus geschlossen werden, dass in diesen Bereichen viel Wasser versickert und wenig für die Verdunstung zur Verfügung steht. Unter Geschiebemergel und Lössbedeckung hingegen ist die Grundwasserneubildung wesentlich geringer (Elbracht et al. 2016), was zur Folge hat, dass dort das Wasser schlechter versickert und mehr verdunsten kann. Die Geest besitzt also Gebiete, in denen aufgrund der Bodenbeschaffenheit wenig Evaporation stattfindet, sowie Gebiete, in denen der umgekehrte Fall eintritt. Dies führt zu einer sehr großen Streuung der Werte in den Proben der Geest und zu einem Medianwert ($-7,4\text{‰}$ für $\delta^{18}\text{O}$, $-51,5\text{‰}$ für $\delta^2\text{H}$), der zwischen den Marschgebieten und den Niederungen und der Subherzyner Senke liegt (Abb. 5).

Diese Einflussfaktoren können anhand des vorliegenden Datensatzes nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Genauso können auch der Einfluss von Landnutzung und hydrogeologischen Rahmenbedingungen auf die $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Grundwasser Norddeutschlands nicht vom Einfluss des Kontinentaleffekts getrennt werden. So unterscheiden sich beispielsweise die Mediane der hydrogeologischen Räume Marsch und Subherzyne Senke um 1‰ in ihren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten. Aufgrund ihrer geographischen Lage (Marschgebiete in der Nähe der Küste) und einer ungefähren Entfernung von 150 km (Regionen A und C) kann dieser Unterschied vollständig durch den Kontinentaleffekt (für $\delta^{18}\text{O}$: 1‰ auf 150 km bzw. $6,6\text{‰}$ auf 1000 km, siehe oben) erklärt werden. Ob darüber hinaus die hydrogeologischen Rahmenbedingungen eine Rolle spielen, lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht eindeutig ermitteln. Eine Möglichkeit dies zu differenzieren, besteht im Vergleich der hydrogeologischen Räume innerhalb einer Region. Betrachtet

man die hydrogeologischen Räume Marsch (Elbmarsch; $\delta^{18}\text{O}$: $-6,4\text{‰}$; $\delta^2\text{H}$: $-48,5\text{‰}$) und Geest (Zevener Geest; $\delta^{18}\text{O}$: $-6,8\text{‰}$; $\delta^2\text{H}$: $-45,0\text{‰}$) innerhalb der Region A, sollte der Kontinentaleffekt vernachlässigbar sein. Unterschiede von $0,4\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) und $3,5\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$) sind deutlich geringer als für die Unterschiede zwischen den Räumen, wie in Abb. 5 dargestellt, und zusätzlich im Bereich des Bestimmungsfehlers (siehe oben). Dasselbe lässt sich für Region C beobachten, wo Unterschiede zwischen Subherzyner Senke ($\delta^{18}\text{O}$: $-7,8\text{‰}$; $\delta^2\text{H}$: $-57,2\text{‰}$) und Mittelweser-Aller-Leine-Niederung ($\delta^{18}\text{O}$: $-7,7\text{‰}$; $\delta^2\text{H}$: $-56,5\text{‰}$) nur $0,1\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) und $0,7\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$) betragen. Diese Beispiele machen deutlich, dass zur Bestimmung der Effekte von Hydrogeologie auf der einen und Kontinentaleffekt auf der anderen Seite eine Probenstrategie von Nöten ist, die hydrogeologische Räume in Unabhängigkeit vom Kontinentaleffekt abdeckt, beispielweise durch ein Probenetz parallel zur Küstenlinie zur Bestimmung des Einflusses der hydrogeologischen Rahmenbedingungen. Im Umkehrschluss sollten zur Berechnung des Kontinentaleffekts andere Einflussfaktoren, wie z. B., die Hydrogeologie, ausgeschlossen werden.

Die Betrachtungen zur Wechselwirkung zwischen Hydrogeologie und Kontinentaleffekt in Bezug auf die resultierende Verteilung der Isotopenwerte lässt sich auch auf die Landnutzungsformen übertragen. Die in Abb. 4 dargestellten Unterschiede in Bezug auf unterschiedliche Landnutzung zeigen auf den ersten Blick einen Effekt der Landnutzung auf das Grundwasser (siehe oben). Zwar sind die Landnutzungsformen geographisch in allen drei Regionen verteilt, was zu einem zu vernachlässigenden Einfluss des Kontinentaleffekts auf eine Landnutzungsform führt, jedoch muss auch hier berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Landnutzungsformen nicht gleichmäßig in den hydrogeologischen Räumen verteilt sind. So ist zum Beispiel Ackerland nur sehr vereinzelt in den Teilräumen Marschen und Niederungen vertreten. Speziell die im Ackerland feh-

lenden relativ schweren Isotopenwerte der Marsch, können daher zu negativeren Isotopenwerten im Bereich von Ackerland führen. Da es sich bei diesen Effekten um eine wechselseitige Beeinflussung handelt, sind im Umkehrschluss möglicherweise auch die Isotopenwerte des Marschlandes durch nur wenig vorhandene Ackerflächen beeinflusst. Zusätzlich zur Berücksichtigung von hydrogeologischen Räumen ist es notwendig, auch die Landnutzung in eine genauere Betrachtung einzubeziehen. Ein vielversprechender Ansatz wäre, Landnutzungsformen nur innerhalb einer hydrogeologischen Einheit bzw. hydrogeologische Einheiten nur unter Berücksichtigung einer Landnutzungsform zu betrachten. Außerdem muss der Kontinentaleffekt berücksichtigt werden.

Unsere Studie kann diese Effekte mit dem vorhandenen Datensatz nicht differenzieren, bildet aber als erste flächendeckende Studie im Raum Niedersachsen/Bremen eine exzellente Datenbasis für weitere detailliertere Untersuchungen im Hinblick auf die beeinflussenden Effekte für die Verteilung der Isotopenwerte im Grundwasser sowie auf die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einflüssen.

Schlussfolgerungen

Insgesamt konnte ein Einblick in die Verteilung der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im niedersächsischen Grundwasser und der für diese Verteilung verantwortlichen Prozesse gewonnen und somit eine grundlegende Datenbasis für die Isotopenzusammensetzung im Untersuchungsgebiet geschaffen werden, die als Grundlage für weitergehende Untersuchungen dienen kann. Ein wichtiges Ziel dieser Studie stellt die Identifizierung des Kontinentaleffekts dar. Unsere Untersuchungen zeigten, dass es eine räumliche Verteilung der Werte gibt und dass der Kontinentaleffekt innerhalb des Untersuchungsgebiets nachzuweisen ist. Der Kontinentaleffekt erstreckt sich in Niedersachsen in Nordwest-Südost-Richtung und zeigt sich in einer Abnahme im Isotopensignal in Richtung des Landesinneren. Dabei wirkt sich der Kontinentaleffekt deutlich auf die Berechnung des Höheneffekts aus, da die Isotopenunterschiede auf Entfernungen von bis zu 210 km gemessen wurden. Dies ist der Grund für die im Vergleich zu den Literaturdaten weitaus höheren Werte für den Höheneffekt. Letzterer kann hier nicht nachgewiesen werden, sondern ist vom Kontinentaleffekt überprägt ist. Durch die Analysen wurde außerdem sichtbar, dass die Isotopenwerte stark von der Evaporation abhängen und daher zwischen verschiedenen Landnutzungsformen und in unterschiedlichen hydrogeologischen Räumen Differenzen im Isotopensignal auftreten. Diese Beobachtungen sind auf die variierenden Porengrößen, den Pflanzenbewuchs sowie die Expositionsbedingungen zurückzuführen. Zur genaueren Betrachtung aller Prozesse (Kontinentaleffekt, Höhen-

effekt, Landnutzung und Hydrogeologie) und zur Differenzierung des wechselseitigen Einflusses dieser Prozesse sind weitere Untersuchungen nötig, für die die vorliegende Studie eine solide Datenbasis liefert.

Danksagung Unser Dank gilt dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), dem Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverband (OOWV), dem Wasserverband Peine sowie dem Trink- und Abwasserverband (TAV) „Bourtanger Moor“ für die Genehmigung zur Beprobung zahlreicher Messstellen. Ein besonderer Dank gilt dabei J. Thomas (NLWKN), S. Cording (NLWKN), H. Seidel (NLWKN), S. Beck (NLWKN), T. Armke (Wasserverband Peine) und A. Rawe (TAV Bourtanger Moor) für die Unterstützung bei der Geländearbeit. Wir danken J. Elbracht und D. Budziak, sowie den Mitarbeitern des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) für die Bereitstellung von Grundwasserproben. Weiterer Dank gilt S. Koopmann und J.L. Schukies für Hilfe bei der Probenahme sowie C.-C. Brombach und L. Knigge für die Unterstützung bei Laborarbeiten. Wir danken J. Barth sowie einem anonymen Gutachter für die hilfreichen Anmerkungen, die maßgeblich zur Verbesserung dieses Artikels beigetragen haben.

Literatur

- Adomako, D., Maloszewski, P., Stumpp, C., Osae, S., Akiti, T.T.: Estimating groundwater recharge from water isotope ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) depth profiles in the Densu River basin, Ghana. *Hydrol. Sci. J.* **55**(8), 1405–1416 (2010)
- Allison, G.B.: Stable isotopes in soil and water studies. In: Causse, C., Gasse, F. (Hrsg.) *Hydrology and Isotope Chemistry—Proceedings of the International Symposium in Memory of Jean-Charles Fontes*, S. 23–38. Orstrom editions, Paris (1988)
- Aranyossy, J.F., Njitchoua, R., Zuppi, G.M.: Input of environmental isotopes in the study of the recharge and the flow dynamic of aquifers. In: Causse, C., Gasse, F. (Hrsg.) *Hydrologie et géochimie isotopique*, S. 39–54. Ostrom editions, Paris (1998)
- Baumgartner, A.: Wald und Wasser – Entwicklung und Stand. DVWK-Arbeitskreis. Vorträge zur Jahrestagung Oktober 1977 in Göttingen, zusammengestellt von Günther, K.-H. Paul Parey, Hamburg, Berlin, S. 39–55 (1977)
- Baumgartner, A., Liebscher, H.-J.: *Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie*. Lehrbuch der Hydrologie, Bd. 1. Bornträger, Berlin, S. 233–534 (1990)
- Bednorz, F., Brose, D.: Altersdatierung mittels Isotopenanalytik zur Verweilzeitbestimmung und Identifizierung von Speisungsanteilen des Grundwassers in Brandenburg. *Brand. Geowiss Beitr* **24**(1/2), 83–101 (2017)
- Beer, A., Fritsche, J.-G., Hübschmann, M., Kärcher, T., Nommensen, B., Reutter, E., Schuster, H., Wagner, B., Zaepke, M.: *Regionale Hydrogeologie von Deutschland – Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung*. Geologisches Jahrbuch der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Reihe A – Allgemeine und regionale Geologie. Bundesrepublik Deutschland und Nachbargebiete, Heft 163. Schweizerbart, Hannover (2016)
- Bortolami, G.C., Ricci, B., Susella, G.F., Zuppi, G.M.: Isotope hydrology of the Val Corsaglia, Maritime Alps, Piedmont, Italy. In: IAEA (Hrsg.) *Isotope Hydrology Symposium 228*, 06.1978. Bd. I, S. 327–350. IAEA, Neuerberg (1979)
- Breuning, T., Thielmann, G.: Binnendünen und Sandrasen. In: Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg.) *Biotope in Baden-Württemberg 1*. Veröffentlichung des Umweltministeriums Baden-Württemberg. S. 1–9 (1992)
- Bürger, M.: Bodennahe Windverhältnisse und windrelevante Reliefstrukturen. In: Leibniz-Institut für Länderkunde (Hrsg.) *Klima*,

- Pflanzen- und Tierwelt Bundesrepublik Deutschland Nationalatlas, Bd. 3, S. 52–55 (2003)
- Clark, I.D., Fritz, P.: Environmental isotopes in hydrology. Lewis Publishers, Boca Raton, S. 1–328 (1997)
- Dansgaard, W.: Stable isotopes in precipitation. *Tellus* **16**, 436–468 (1964)
- Dierschke, H.: Die naturräumliche Gliederung der Verdener Geest. Landschaftsökologische Untersuchungen im nordwestdeutschen Altmoränengebiet. In: Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung (Hrsg.) Forschungen zur Deutschen Landeskunde, Bd. 177, Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Selbstverlag, Bad Godesberg (1969)
- Dörhöfer, G., Josopait, V.: Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. *Geologisches Jahrbuch*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart (1980)
- DVWK: Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau. DVWK-Regeln, 128/1992. DVWK, Bonn (1992)
- Elbracht, J., Meyer, R., Reutter, E.: Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen. *GeoBerichte des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie*, Hannover, Bd. 3., S. 1–118 (2016)
- Freeze, R.A., Cherry, J.A.: *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1979)
- Gat, J.R., Mook, W.G., Meijer, H.A.M.: Atmospheric Water. In: IAEA (Hrsg.) *Environmental Isotopes in the hydrological cycle – Principles and Applications*, Bd. 2, S. 1–235 (2001)
- van Geldern, R., Baier, A., Subert, H.L., Kowol, S., Balk, L., Barth, J.A.C.: Pleistocene paleo-groundwater as a pristine fresh water resource in southern Germany – Evidence from stable and radiogenic isotopes. *Sci. Total Environ.* **496**, 107–115 (2014)
- Geyh, M.: Groundwater – saturated and unsaturated zone. In: IAEA (Hrsg.) *Environmental isotopes in the hydrological cycle – principles and applications*, Bd. 4, S. 343–361 (2000)
- Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G., Krahe, P.: BfG-Bericht Nr. 1342 – Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 23–98 (2003)
- Goldberg, V., Bernhofer, C.: Wasserhaushalt bewaldeter Einzugsgebiete. In: Lozán, J.L., Graßl, H., Hupfer, P., Karbe, L., Schönwiese, C.-D. (Hrsg.) *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Auswertungen*, 3. Aufl., S. 98–104 (2011)
- Häckel, H.: *Meteorologie*. UTB-Band, Bd. 1338. Eugen Ulmer, Stuttgart (2016)
- Hebert, D.: Isotopenmethoden in der Hydrogeologie – Physikalische Grundlagen und Anwendungsmethodik. In: TU Bergakademie Freiberg (Hrsg.) *Wissenschaftliche Mitteilungen*, S. 1–96. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg (1997)
- Holtkamp, J.: Modellierung der Isotopenfraktionierung im Niederschlag, S. 1–51 (2008). Diplomarbeit am Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau
- Houben, G.J., Königer, P., Sültensfuß, J.: Freshwater lenses as archive of climate, groundwater recharge, and hydrochemical evolution: Insights from depth-specific water isotope analysis and age determination on the island of Langeoog, Germany. *Water Resour. Res.* **50**, 8227–8239 (2014)
- Klostermann, P., Coldewey, W.G., Göbel, P.: Entwicklung wasser-durchlässiger und verdunstungsfähiger Pflasterstein-Beläge zum Vermeiden von Niederschlagsabflüssen und zur Erhöhung der Evaporation im urbanen Raum (1. Phase). Ergänzende Untersuchungen zur Optimierung wasser-durchlässiger Pflasterstein-Beläge als Beitrag zur Erhöhung der Evaporation im urbanen Raum (2. Phase). Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 23277 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 1–158 (2012)
- Königer, P.: Tracerhydrologische Ansätze zur Bestimmung der Grundwasserneubildung. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Bd. 16, S. 1–87 (2003)
- LBM-DE2012 Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland (CORINE Land Cover 10 ha). Referenzjahr 2012, Stand der Dokumentation: 7. Jan. 2016. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Leipzig
- Lemke, D., Elbracht, J.: Grundwasserneubildung in Niedersachsen – Ein Vergleich der Methoden Dörhöfer und Josopait und GRO-WA06V2. *GeoBerichte* 10. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, S. 1–52 (2008)
- Mezga, K., Urbanc, J., Cerar, S.: The isotope altitude effect reflected in groundwater: a case study from Slovenia. *Isotopes Environ. Health Stud.* **50**(1), 33–51 (2014)
- Millot, R., Petelet-Giraud, E., Guerrot, C., Nègre, P.: Multi-isotopic composition ($\delta^7\text{Li}$ - $\delta^{11}\text{B}$ - δD - $\delta^{18}\text{O}$) of rainwaters in France: origin and spatio-temporal characterization. *Appl. Geochem.* **25**, 1510–1524 (2010)
- Moser, H., Stichler, W.: Deuterium and oxygen-18 contents as an index of the properties of snow covers. *Snow Mechanics Symposium, Proceedings of the Grindelwald Symposium*. IAHS-AISH Publication 114., S. 122–135 (1974)
- Müller, G., Münch, A.: Landnutzungsänderungen und Wasserbilanz – Modellierung des Wasserhaushaltes mit dem Modell AKWA-M. In: Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement (Hrsg.) *Niederschlag-Abfluss Modellierung – Simulation und Prognose Wiener Mitteilungen*, Bd. 164, S. 7–18 (2000)
- Müller, R., Schneider, R., Schröder, D.: Physikalische, chemische und biologische Eigenschaften trocken rekultivierter Lössböden unter Wald-, Grünland- und Ackerntzung. In: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (Hrsg.) *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Bd. 56, Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, Göttingen (1988)
- Newman, B., Tanweer, A., Kurttas, T.: IAEA standard operating procedure for the liquid-water stable isotope analyser. *IAEA water resources programme*, S. 1–27 (2009)
- Pearson Jr., F.J., Balderer, W., Loosli, H.H., Lehmann, B.E., Matter, A., Peters, T., Schmassmann, H., Gauschi, A.: *Applied isotope Hydrogeology—A case study in northern Switzerland*. *Studies in Environmental Science* 43, Technical Report. Elsevier, Amsterdam, New York, S. 88–1 (1991)
- Poage, M., Chamberlain, C.: Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface water: considerations for studies of paleoelevation change. *Am. J. Sci.* **301**, 1–15 (2001)
- Ravi, S., D'Odorico, P.: A field-scale analysis of the dependence of wind erosion threshold velocity on air humidity. *Geophys. Res. Lett.* **32**, 1–4 (2005)
- Reichert, D.: Der Einfluss der Landnutzung auf Verdunstung und Grundwasserneubildung – Modellierungen und Folgerungen für das Einzugsgebiet des Glan. Report 73. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, S. 1–195 (2001)
- Röper, T., Kröger, K.F., Meyer, H., Sültensfuß, J., Greskowiak, J., Massmann, G.: Groundwater ages, recharge conditions and hydrochemical evolution of a barrier island freshwater lens (Spiekeroog, Northern Germany). *J. Hydrol. Reg. Stud.* **454–455**, 173–186 (2012)
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., Gonfiantini, R.: Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate change in continental isotopic records, geophysical monograph* 78, American Geophysical Union, S. 1–36 (1993)
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M.: *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Aufl. Spektrum, Heidelberg (2010)
- Schotterer, U., Stocker, T., Bürki, H., Hunziker, Kozel, R., Grasso, D.A., Tripet, J.-P.: Das Schweizer Isotopen-Messnetz – Trends 1992–1999. *GWA* **80**(10), 733–741 (2000)
- Siegenthaler, U., Matter, H.A.: On the dependence of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation on climate. In: IAEA (Hrsg.) *Variation of the iso-*

- topic composition of precipitation and of groundwater during the quaternary as a consequence of climatic changes, S. 37–51. IAEA, Wien (1982)
- Sieker, F., Sieker, H., Zweynert, U.: Konzept für bundeseinheitliche Anforderungen an die Regenwasserbewirtschaftung. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Texte 19/2009, S. 44–46 (2009)
- Vogel, J.C., Lerman, J.C., Mook, W.G.: Natural isotopes in surface and groundwater from Argentina. *Hydrol. Sci. Bull.* **20**, 203–220 (1975)
- Warren, A.: *Dunes – Dynamics, Morphology, History*. Wiley-Blackwell, Chichester (2013)
- Wohlrab, B.: Über Wirkungen eines Wandels der Bodennutzung auf den Wasserhaushalt in quantitativer Hinsicht. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.) *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 1973, Sonderheft*. S. 20–24 (1973)

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.