© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br., **101**, S. 69 - 82, Freiburg 2011

Rekonstruktion hydrologischer Extreme in der Namibwüste

Christoph Külls

Zusammenfassung

Die Häufigkeit extremer Hochwässer in der zentralen Namib während des späten Holozäns wurde durch eine Methode der Korrelation von Grundwasseraltern mit Isotopenwerten des Grundwassers ermittelt. Die Rekonstruktion beruht auf den Auswirkungen von Niederschlagsmengen auf die Isotopenzusammensetzung des Niederschlagswassers. Die Auswertung von Isotopendaten im Grundwasser alluvialer Aquifere der Namib deutet auf eine Häufung extremer Hochwässer während zumindest zweier Phasen des Holozäns von vor 1500 bis 2000 und 4500 bis 5000 Jahren hin. Diese Häufung kann als ursächlich für eine erhöhte indirekte Grundwasserneubildung durch Sturzfluten in der Namib angesehen werden. Die Methode stellt einen paläohydrologischen Proxy dar, der in ariden und hyperariden Gebieten die langfristige Planung von Wasserressourcen und paläoklimatologische Untersuchungen ergänzen kann.

Stichwörter

Namib, Grundwasser, Kuiseb, Isotope, Altersdatierung, Paläohydrologie

Anschrift des Verfassers:
Dr. Christoph Külls
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Hydrologie, Fahnenbergplatz, 79098 Freiburg
E-Mail: christoph.kuells@hydrology.uni-freiburg.de

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Reconstruction of Hydrological Extremes in the Namib Desert

Abstract

An increased frequency of extreme floods in the central Namib during the second half of the holocene could be derived from a new paleohydrological method. The method was developed based on historical rainfall, flood and isotope data. These data indicate that intense rainfall translates into a depleted water isotope signature. It could be shown that extreme floods are traced by a depleted isotope composition. Based on this approach and combining the water isotope data with ^{14}C dates, two phases of intense flooding from 1500 to 2000 and from 4500 to 5000 before present could be identified. These observations explain why samples with groundwater ages of these two periods occur more frequently. The method can be used to sustain water resources planning in this and in other arid regions and provides a hydrological proxy for paleoclimatological studies.

Key words

Namib, ground water, Kuiseb, water isotopes, age dating, paleohydrology

1. Einleitung

Die Auswirkungen höherer Kohlendioxid-Gehalte der Atmosphäre auf den Wasserkreislauf im südlichen Afrika können mit physikalisch-mathematischen Modellen nur mit sehr aufwändigen Berechnungen und hoher Unsicherheit ermittelt werden. Um die konkreten Auswirkungen auf die Produktivität von Ökosystemen und die Verteilung natürlicher Ressourcen für die Versorgung der Bevölkerung abzuschätzen, werden weitere Modellkopplungen notwendig, welche die Unsicherheiten jedoch weiter erhöhen. Eine Alternative und Ergänzung liefert der palökologische Ansatz. An Hand dokumentierter Proxydaten zu Extremen des Klimas und des Wasserkreislaufes wird die mögliche Bandbreite dieser Veränderungen in der Vergangenheit erforscht.

Im südlichen Afrika haben hydrologische Ereignisse während des Holozäns eine Vielzahl von morphologischen und biogeochemischen Spuren hinterlassen (HEINE 2004). Die Betrachtung und Zusammenschau dieser Spuren ergeben das Bild eines von Variabilität, Extremen und Änderungen gekennzeichneten Wasserkreislaufes (VOGEL 1987, STONE et al. 2010). Die Art und die entsprechenden Auswerteverfahren der verschiedenen Proxydaten (Lage von Hochflutlehmen, Altersstruktur und Zusammensetzung von Karbonaten, Pollenspektren) liefern Hinweise auf Temperaturänderungen (VOGEL 1989), Änderungen der Niederschlagsmengen (CONWAY et al. 2009), Änderungen in der Vegetationsstruktur und auf direkte Veränderungen in der Oberflächenhydrologie, insbesondere von Flüssen und permanenten, episodischen oder ephemeren Seen (HEINE & HEINE 2002). Für ein anwendbares Verständnis dieser Phänomene ist allerdings eine Synthese und ursächliche Verknüpfung dieser Proxydaten erforderlich. Dabei müssen regionale Unterschiede in der klimatischen Entwicklung und die Art und Herkunft der Proxydaten genau berücksichtigt werden.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Einer der wichtigsten und für die Wasserversorgung im südlichen Afrika grundlegenden Prozesse, die Grundwasserneubildung, ist bisher jedoch schwer darzustellen und zu rekonstruieren. Die Grundwasserneubildung ist definiert als eine Fließrate des Wassers, das die Grundwasseroberfläche eines Aquifers während eines bestimmten Zeitraumes erreicht. Hydrologisch werden dabei zwei unterschiedliche Formen der Grundwasserneubildung unterschieden: Die **direkte** Grundwasserneubildung resultiert aus der Infiltration und Perkolation von Wasser durch die ungesättigte Zone, ohne dass dieses vorher durch abflussbildende Prozesse räumlich und zeitlich konzentriert worden wäre. Die **indirekte** Grundwasserneubildung setzt voraus, dass zunächst Oberflächenabfluss gebildet wird, der nach einem Zusammenfließen in Flussbetten oder in kreisförmigen Vertiefungen, sogenannten Pfannen, infiltriert. Über die Paläohydrologie und Paläohydrogeologie der Abflussbildung und der Grundwasserneubildung ist im südlichen Afrika wenig bekannt. Insbesondere für die indirekte Erneuerung des Grundwassers, die in semiariden und ariden Gebieten als der dominante Prozess angesehen wird, sind bisher kaum Daten aus dem Holozän bekannt und publiziert. Es besteht jedoch ein großes Interesse, diese Prozesse näher zu erforschen. Im Kuiseb Delta werden Grundwasserreserven von ca. 200 bis 300 Millionen Kubikmeter vermutet (BENITO et al. 2010), die durch Versickerung von Flusswasser im Holozän gebildet wurden. Sturzfluten sind sehr selten und treten nur in wenigen Jahren auf, können daher kaum hydrometrisch erfasst werden (Abb. 1).

Abb. 1: Der ephemere Fluss Kuiseb unterhalb der Forschungsstation Gobabeb während einer kleineren Sturzflut im Januar 2006 bei einer Wassertiefe ca. 0.5 m und einem Abfluss von gechätzten 35 bis 50 m³/s. Während eines großen Hochwassers im Februar 2006 erreichte die Wassertiefe an dieser Stelle ca. 2.5 m bei einem Spitzenabfluss von geschätzten 270 m³/s (Photo: G. BENITO).

Fig. 1: *The ephemeral river Kuiseb during a minor flash flood downstream of the research station Gobabeb in January 2006, water level reached 0.5 m and discharge about 35 to 50 m³/s. During a major flood in February 2006, water level rose to 2.5 m and peak discharge reached an estimated 270 m³/s (Photo: G. BENITO).*

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Mehrere Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Variabilität von hydrologischen Prozessen vom Niederschlag über die Abflussbildung und die Infiltration bis hin zur Neubildung von Grundwasserressourcen steigt (DAHAN et al. 2008). Dies liegt an der Tatsache, dass die Abflussbildung und die Infiltration durch stark nichtlineare Zusammenhänge zwischen der Bodenfeuchte und der Infiltrationsrate gesteuert werden. Kleinere Unterschiede in der Klimahistorie führen zu entsprechenden Unterschieden in der Bodenfeuchte, welche auf Grund des stark nichtlinearen Zusammenhanges zwischen Bodenfeuchte und Infiltrationsvermögen größere Unterschiede in der Menge von gebildetem Abfluss verursachen. Ebenso kommt es zu einer Verstärkung der Variabilität in der Menge infiltrierten Wassers. Da Wasser eine limitierende Ressource für das Pflanzenwachstum ist und das Pflanzenwachstum wiederum in mehrfacher und komplexer Weise auf die hydrologischen Prozesse zurückwirkt, sind hydrologische Prozesse in Trockengebieten generell schwer vorhersagbar. Die Vorhersagbarkeit sinkt mit zunehmender Aridität. Somit kann die indirekte Grundwasserneubildung in ephemeren Flüssen und aus Ansammlungen von Oberflächenwasser in ariden Gebieten als ein komplexer und kaum vorhersagbarer Prozess bezeichnet werden. Umso wichtiger sind paläohydrologische Daten, denn große Teile der Bevölkerung in ruralen Gebieten der Namib nutzen das Grundwasser aus alluvialen Aquiferen von ephemeren Trockenflüssen als einzig verfügbare Ressource (BENITO et al. 2010).

2. Untersuchungsgebiet

Die Namib-Wüste erstreckt sich über fast 2000 km entlang der Westküste des südlichen Afrikas. Sie wird im Süden bei 32° südlicher Breite durch das Namaqualand südlich des Oranje-Flusses und im Norden bei 14° südlicher Breite durch die Moçamedes-Wüste nördlich des Cunene in Angola begrenzt. Nach Osten schließt nach ca. 50 bis 125 km bei steigenden Niederschlägen die von kargen Böden und Bergrücken geprägte Region des Großen Escarpement an. Die klimatischen Bedingungen sind durch eine hohe Aridität gekennzeichnet. Nach der Definition, dass hyperaride Wüsten in einzelnen Jahren gar keinen Niederschlag erhalten (<0.1 mm/Jahr), können zumindest einige zentrale Teile der Namib als hyperarid gelten. Insgesamt reichen die mittleren jährlichen Niederschläge von ca. 10 mm/Jahr direkt an der Küste bis zu 50-60 mm/Jahr am östlichen Rand des Großen Escarpment. Die jahreszeitliche Verteilung variiert: Während der nördliche Teil noch von den subtropischen Zenitalregen und Sommerniederschlägen geprägt ist, nimmt im südlichen Teil der Anteil der durch zyklonale Zellen des Südatlantiks verursachten Winterniederschläge zu (LANCASTER 2002).

Die Aridität des Gebietes hängt ursächlich mit dem Benguela-Strom zusammen (DIESTER-HAASS et al. 1988). Der Benguela-Strom ist eine entlang der Küste des südwestlichen Afrikas nordwärts verlaufende Strömung von aufsteigendem, kaltem antarktischem Tiefenwasser, die bis etwa 30° südlicher Breite reicht und dann in nordwestlicher Richtung abgelenkt wird. Der Strömungsverlauf wird durch die Topographie des Meeresuntergrundes, die mit dem Walvis-Rücken eine Erhebung aufweist, und durch die vorherrschenden südwestlichen Winde begünstigt. Der Benguela-Strom erzeugt eine stabile atmosphärische Inversion mit kühler, häufig nebliger Luft, welche von warmer, trockener Luft überlagert wird. Diese Inversion ist ursächlich für die ariden Bedingungen der Namib-Wüste. Klimavariabilität kann in Verbindung mit Änderungen im Druck- und Windfeld durch eine Abschwä-

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

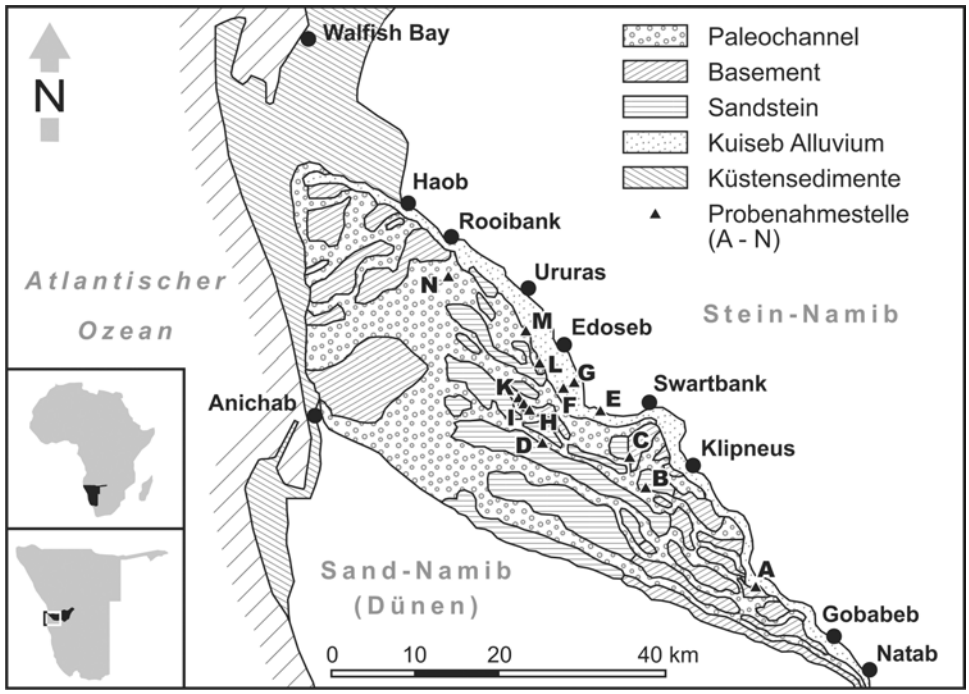

Abb. 2: Das Untersuchungsgebiet der Kuiseb-Mündung in der zentralen Namib mit der Lage der Probenahmestellen A bis N für die Altersbestimmung und Isotopenanalyse des Grundwassers.
Fig. 2: *Study area and location of sampling points A to N for groundwater age dating and stable isotope analysis of water samples.*

chung des Benguela-Stroms und durch ein Vordringen wärmeren Wassers des Angola-Stroms aus dem äquatorialen Bereich verursacht werden. Solche Benguela-Ninõ-Ereignisse gehen mit einem Anstieg des Meeresspiegels vor der Küste Namibias um mehrere Zentimeter einher und können daher ozeanographisch und hydrographisch gut erkannt werden. Benguela-Ninõs sind für die Jahre 1963, 1984, 1995 und 2010/2011 dokumentiert (Abb. 2).

Hydrologisch ist das Untersuchungsgebiet durch westwärts entwässernde Einzugsgebiete geprägt, die an der kontinentalen Wasserscheide des Großen Escarpment beginnen und Richtung Küste entwässern. Im oberen Bereich der Einzugsgebiete, die schon außerhalb der Namib-Wüste liegen, fallen 300-400 mm Niederschlag pro Jahr. Entlang der Entwässerungsrichtung fallen die mittleren jährlichen Niederschläge dann bis auf 10-50 mm/Jahr an der Küste (KOK & NEL 1996).

Der Untergrund ist von einer komplexen Geologie geprägt, da auf der Höhe der Stadt Swakopmund der Damara-Gürtel beginnt, die in nordwestliche Richtung verlaufende Sutur zwischen Kalahari- und Kongo-Kraton. Es überwiegen Magmatite und Metamorphite. Insgesamt dominieren schwache und sehr geringmächtige Böden, die eine Bildung von Oberflächenabfluss bei intensiven Niederschlägen fördern (LANGE 2005).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

3. Methoden

Die Rekonstruktion der Klimageschichte und der hydrologischen Bedingungen während der letzten 10.000 Jahre beruht auf Isotopenmethoden und insbesondere auf der Kombination von Datierungsmethoden und hydrologischen Proxies. Eine Datierung des Grundwassers im Bereich von mehreren hunderten bis zu wenigen 10.000 Jahren wurde mit der ^{14}C Methode erreicht. Diese Methode beruht auf dem grundlegenden Ansatz der Radiochronometrie (GEYH & SCHLEICHER 1990), der durch PEARSON & WHITE (1967) auf Grundwassersysteme übertragen wurde. Als Quelle des datierbaren Kohlenstoffes wird der anorganische gelöste Kohlenstoff verwendet, der im neutralen Bereich als Hydrogenkarbonat vorliegt. Dieses wird nach Fällung auf seine Radioaktivität durch β-Zerfall mittels Flüssigszintillationsspektrometrie gemessen. Einige Proben wurden direkt mit Beschleunigermassenspektrometrie bestimmt. Die Radioaktivität des β-Zerfalls wird in der Einheit ‚percent modern Carbon' angegeben, die die Messwerte auf den natürlichen radioaktiven Hintergrund der modernen Atmosphäre normiert und in Prozent angegeben wird. Nach dem Eintritt des Kohlendioxids in den Wasserkreislauf bei der Lösung in Wasser, zerfallen die im Hydrogenkarbonat enthaltenen ^{14}C Atome mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren. Aus dem Verhältnis der gemessenen Radioaktivität zur ursprünglichen Radioaktivität bei der Grundwasserneubildung kann das ^{14}C-Alter berechnet werden. Da diese Altersbestimmung auf einigen Annahmen zur Ausgangsaktivität von ^{14}C und zur Lösung von Kohlendioxid im Wasser beruht, wird in der Regel von einem Modellalter gesprochen.

Die Altersdatierung erfordert in einigen Fällen eine Korrektur der Anfangskonzentration, wenn durch Lösung von altem nicht biogenem Kohlenstoff eine Verdünnung vorliegt. In dieser Studie ist dieser Effekt in der Regel gering, da in der Namib durch die hohe Aridität die Karbonatfällung bereits erfolgt ist und in den Böden die Sulfatfällung dominiert (ECKHARD & SPIRO 1999). Dennoch kann es in einigen Flussbetten zu Kalkablagerungen kommen. In diesen Fällen wurde eine ^{13}C-Korrektur vorgenommen. An Hand des ebenfalls gemessenen ^{13}C-Wertes wurde der Einfluss von sekundärem Austausch des gelösten Hydrogenkarbonates mit Karbonaten im Boden und im Aquifer korrigiert (GEYH & SCHLEICHER 1990).

Die Bestimmung der paläohydrologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet erfolgte mit stabilen Isotopen des Wassers. Das Wasser enthält unter anderem stabile Isotope des Sauerstoffs ^{18}O und ^{16}O und des Wasserstoffs ^{2}H und ^{1}H. Die Verhältnisse zwischen den schweren und leichten Isotopen $^{18}O/^{16}O$ und $^{2}H/^{1}H$ im Wassermolekül schwanken in natürlichen Wässern. Die Werte werden nach einer Normierung auf die mittlere Isotopie des Ozeanwassers nach der Internationalen Atomenergiebehörde geeicht und in der Notation $\delta\ ^{18}O$-VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) in Promille Abweichung vom Ozeanstandard angegeben. Die Schwankungen werden durch die Temperatur bei Phasenübergängen (Verdunstung, Kondensation, Gefrieren, Verdampfen) verursacht. Somit können die Isotopenverhältnisse im Wasser als Thermometer für die Temperatur bei dem letzten Phasenübergang, der Niederschlagsbildung, verwendet werden (LEIBUNDGUT et al. 2010). In Namibia liegen auf Grund von Messreihen der stabilen Isotope im Niederschlag aus den 1960er bis 1980er Jahren gute Ausgangsdaten für die Anwendung von Isotopendaten vor. Die Messreihen zeigen einen saisonalen Gang der Isotopenwerte im Niederschlag, die invers mit der Niederschlagsmenge korrelieren. Dieser Mengeneffekt wird durch eine sequentielle Abreicherung von schweren Isotopen beim Ausregnen verursacht (KÜLLS 2001) (Abb. 3).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

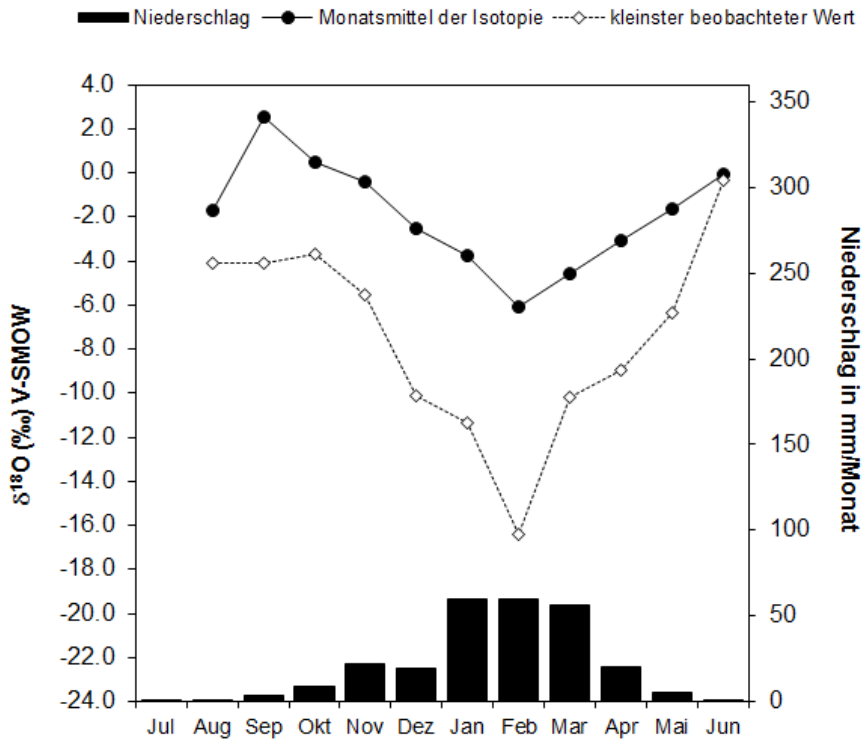

Abb. 3: Jahresgang der Isotopenwerte des Sauerstoffs im Niederschlagswasser in Namibia: Schwarz gefüllte Kreise entsprechen dem Mittelwert, die weiß gefüllten Rauten entsprechen den niedrigsten gemessenen Isotopenwerten.

Fig. 3: *Seasonal variation of oxygen isotopes of water in precipitation in Namibia: Black filled dots represent average values of isotope ratios, white rhombuses represent lowest observed values.*

Zur Übertragung der Isotopendaten auf den Abfluss wurde eine Korrelation der saisonalen Isotopendaten im Niederschlag mit bekannten Abflussereignissen im Untersuchungsgebiet verwendet. Dafür wurden die bekannten Verläufe der Isotopenwerte im Niederschlag mit bekannten Verläufen von Abflussereignissen korreliert. Der Zusammenhang zwischen starken Niederschlägen und extremen Abflussereignissen wurde für alle vorhandenen Isotopendaten und historischen Abflussdaten untersucht. Das Ereignis von Januar bis Februar 1974 zeigt, wie ein Starkregen, der einen hohen Abfluss an der Station Schlesien im Kuiseb Einzugsgebiet erzeugt, von leichten Isotopenwerten geprägt ist. Somit ist auch das zum Abfluss gelangende Wasser dieses Ereignisses isotopisch besonders leicht markiert (Abb. 4).

Diese Korrelation für alle verfügbaren Niederschlags-, Abfluss- und Isotopendaten ergab, dass nur besonders extreme Niederschlags- und dadurch ausgelöste Abflussereignisse durch sehr leichte Isotopenwerte gekennzeichnet sind. Während Abflussereignisse unter 200 m³/s Isotopenwerte von δ ^{18}O V-SMOW von 0 bis -5 ‰ geprägt sind, entspricht die Isotopenzusammensetzung des Abflusses bei großen Hochwässern Werten von δ ^{18}O V-SMOW von -5 bis -10 ‰. Diese Korrelation liefert somit einen hydrologischen Proxy für extreme Hochwässer (Abb. 5).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

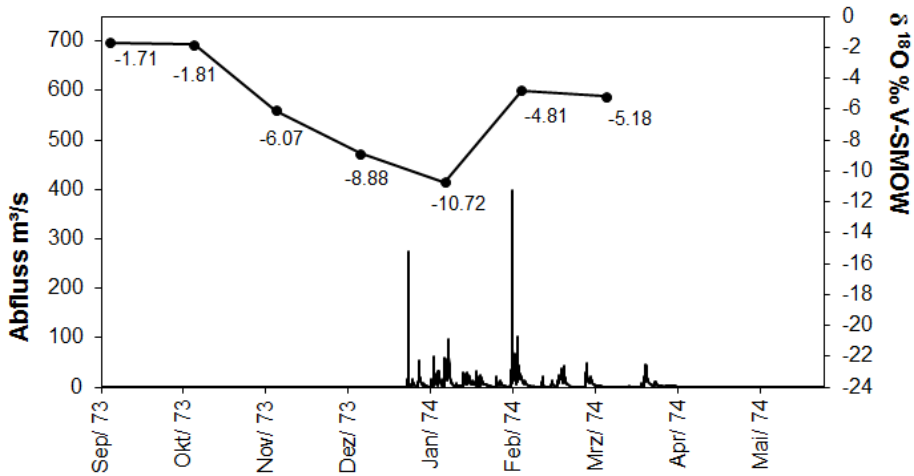

Abb. 4: Zusammenhang zwischen Isotopenwerten im Niederschlag bei extremen Ereignissen und den beobachteten Abflüssen für ein Ereignis von Januar bis März 1974 mit max. 412 m³/s Abfluss, Station Schlesien, Kuiseb Einzugsgebiet.

Fig. 4: *Correlation between isotope values in precipitation and the hydrological response (runoff) during an extreme event from January to March 1974 with a peak discharge of 412 m³/s at gauging station Schlesien, Kuiseb catchment.*

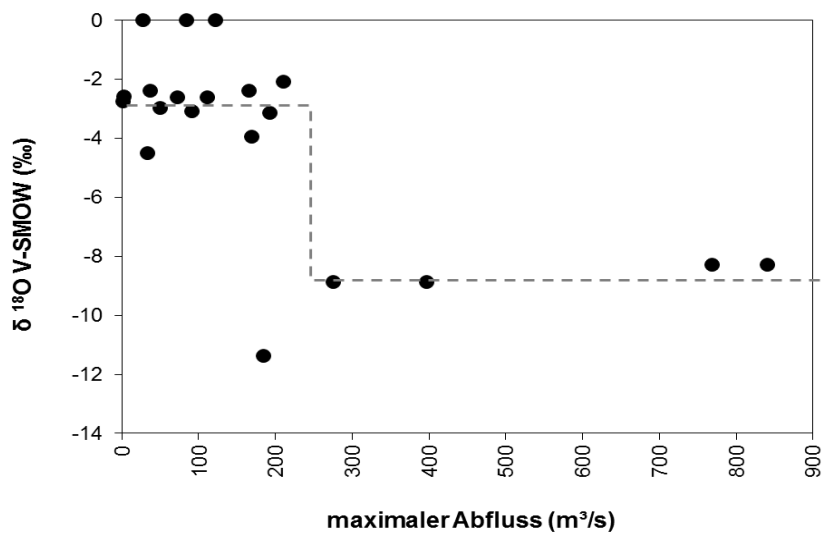

Abb. 5: Zusammenhang zwischen Isotopenwerten und den beobachteten maximalen Abflüssen im Kuiseb Einzugsgebiet, Station Schlesien.

Fig. 5: *Relationship between isotope values and observed maximum discharge in the Kuiseb bassin, gauging Station at Schlesien.*

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

In einem letzten Schritt wird davon ausgegangen, dass die im Grundwasser von alluvialen Aquiferen gemessene Isotopenzusammensetzung das mit den Grundwasserneubildungsanteilen gewichtete Mittel der Isotopenzusammensetzung der kleinen und großen Hochwässer darstellt. Finden sich im Grundwasser negative Werte deutlich kleiner als -5 ‰, so stammt dieses Grundwasser überwiegend aus der Infiltration von Abflüssen kleiner Hochwässer. Dominieren Werte kleiner als -10 ‰, so stammt das Grundwasser hauptsächlich aus der Infiltration und Grundwasserneubildung extremer Hochwasser-Ereignisse. Dieser grundlegende Interpretationsansatz konnte in der Namib-Wüste nach dem Aktualismus-Prinzip in einer Reihe von Detailuntersuchungen bestätigt werden. Es sind keine anderen Prozesse bekannt, die entsprechend leichte Isotopenverhältnisse erzeugen könnten. Die Variationen sind gegenüber den anderen Schwankungen der Isotopenverhältnisse und im Verhältnis zum Messfehler so ausgeprägt, dass weder Störungen noch Messungenauigkeiten Isotopenwerte von weniger als -5 ‰ $\delta\,^{18}O$ V-SMOW erklären können.

4. Ergebnisse

Eine Zusammenstellung der von GEYH (1994) erhobenen und von PLOETHNER (1998) neu kompilierten Grundwasserproben mit eigenen Daten aus alluvialen Aquiferen aus dem Einzugsgebiet des Kuiseb in der Namib zeigt bereits eine Häufung der ^{14}C Werte im Bereich von 75 bis 80 pmC und von 55 pmC. Bei einer Halbwertszeit von 5730 Jahren und unter der generell nach dem Vorschlag von VOGEL (1987) für die Region getroffenen Annahme einer Anfangskorrektur auf 85 bis 95 % pmC auf Grund der Lösung von Kalk bei der Grundwasserneubildung, entspricht dies einer Häufung von Proben mit einem Alter von ca. 1500 und 4500 Jahren (Abb. 6).

Diese Darstellung kann jedoch durch die räumliche Verteilung der Probenahmepunkte beeinflusst sein und gibt keinen sicheren Hinweis auf die Klimahistorie. Dazu ist der Einbezug der stabilen Isotope des Wassers erforderlich. Diese werden nach der in der Methodik dargestellten Fraktionierung nur durch extreme und besonders große und intensive Hochwasserereignisse gebildet. Die Häufung solcher Ereignisse führt dann über die Gewichtung der Grundwasseranteile zu einer „leichteren“ Zusammensetzung, wenn sich extreme Hochwasserereignisse häufen und zu einer „schwereren“ Zusammensetzung, wenn vor allem kleinere Hochwasserereignisse zur Grundwasserneubildung beigetragen haben. Diese Betrachtung der paläohydrologischen Bedingungen ist nicht von den Probenahmepunkten abhängig, da sie sich allein aus der Korrelation von Grundwasseraltern und den in der selben Probe bestimmten Isotopenverhältnissen des Sauerstoffs und Deuteriums im Wasser ergibt.

Die Betrachtung dieser Daten (Abb. 7) zeigt, dass die mittlere Isotopenzusammensetzung gegenüber dem rezenten Wert von ca. -4.5 ‰ $\delta\,^{18}O$ V-SMOW bis vor ca. 1.500 Jahren abnimmt. In der Zeit von 2000 bis ca. 4.500 b.p. entsprechen die Werte ungefähr den rezent beobachteten. Eine einzige Probe fällt heraus. In der Zeit von 4.500 bis ca. 5.000 Jahren b.p. kam es erneut zu einer deutlich leichteren Isotopenzusammensetzung des Grundwassers. Dieses kann erneut als eine Häufung von extremen Hochwässern interpretiert werden. Es sind nur zwei Proben datiert, die weiter als 5.000 Jahre zurückreichen (Abb. 6). Die Isotopenverhältnisse dieser beiden Proben entsprechen allerdings wiederum weniger häufigen extremen Hochwässern und sind im Verhältnis zu den rezent beobachteten Werten sogar schwerer.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

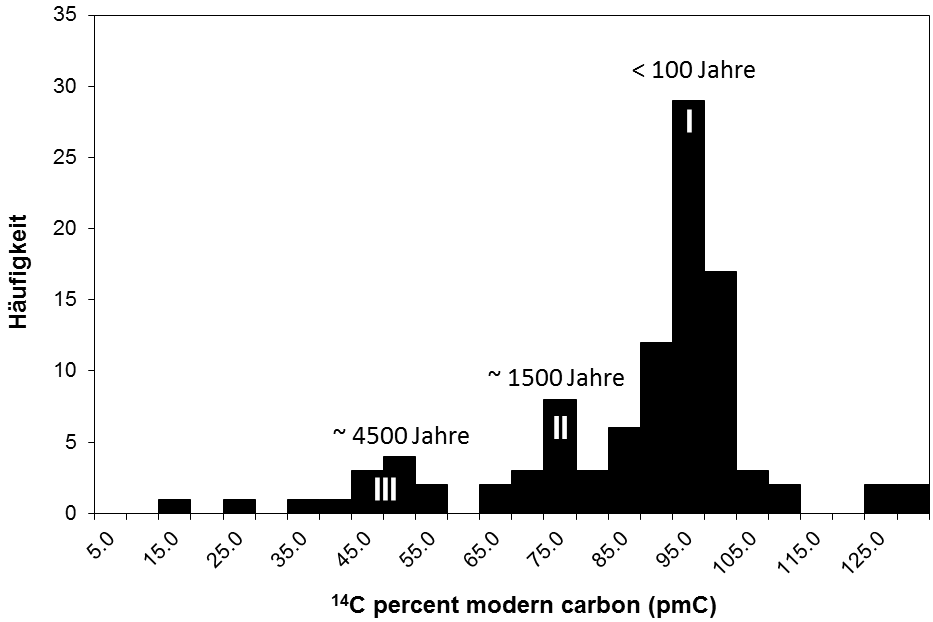

Abb. 6: Häufigkeitsverteilung der beobachteten ^{14}C Werte aus der Grundwasseraltersdatierung in pmC (percent modern carbon) für das Gebiet des alluvialen Aquifers und der angrenzenden Aquifere im Kuiseb Einzugsgebiet.

Fig. 6: *Frequency distribution of observed ^{14}C values obtained from groundwater age dating for the alluvial aquifers of the Kuiseb ephemeral river and adjacent groundwater bodies.*

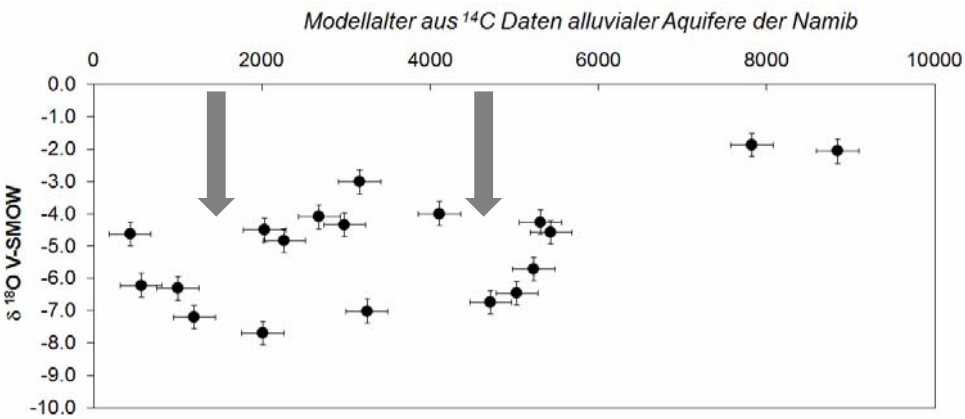

Abb. 7: Hinweise auf einen höheren Anteil von starken Niederschlägen und korrelierten höheren Abflüssen im Kuiseb vor ca. 1500 Jahren, angezeigt durch signifikant geringere Sauerstoffisotopenverhältnisse bei Grundwasserproben diesen Alters.

Fig. 7: *Variation of $\delta^{18}O$ V-SMOW with groundwater residence time and groundwater model ages. More depleted values indicate a higher frequency of extreme floods about 1500 years before sampling.*

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

5. Diskussion

Die absolute Datierung dieser Zeiträume ist trotz Unsicherheit und Fehlerquellen bei der ^{14}C Datierung in Grundwasser mit einem Fehler von ca. ± 250-500 Jahren möglich. Die chronologische Folge der Daten kann jedoch als gesichert angesehen werden. Der Einfluss von Karbonatlösung und Austausch mit deutlich älteren und ^{14}C-freien Karbonaten ist in der Umgebung der Namib-Wüste mit hyperaridem Klima nicht sehr ausgeprägt, da eine Fällung der Karbonate und Karbonatbildung in Böden bereits erfolgt ist und sich in dieser Klimazone bereits Gips-Evaporite bilden (ECKHARDT & SPIRO 1999). Der vorhandene geringe Einfluss wird durch Korrekturverfahren berücksichtigt. Die Veränderungen der Sauerstoffisotopenverhältnisse und der damit korrelierenden Wasserstoffisotopenverhältnisse des Grundwassers sind stark ausgeprägt und daher nur mit geringen Messfehlern behaftet. Die beobachteten Abweichungen deuten gegenüber den heutigen Bedingungen auf erhebliche klimatische Veränderungen und Häufungen extremer Ereignisse hin. Es muss in der Vergangenheit Phasen mit starken Häufungen von extremen Hochwässern gegeben haben. Diese Phasen extremer Hochwässer übersteigen die aus der Zeit hydrologischer Messungen während der letzten 100 Jahre bekannten Häufigkeiten deutlich. Andere Ursachen für die Veränderungen der Grundwasserisotope können nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Es liegen jedoch aus anderen Untersuchungen keine Hinweise auf andere Ursachen für Veränderungen der Isotopenwerte im Niederschlag vor (LANCASTER 2002). Die Entstehung leichter Isotopenzusammensetzungen im Grundwasser durch den Mengeneffekt bei Starkregenereignissen und durch die ausgelösten Abflussereignisse konnte dargestellt werden und bildet die Grundlage des Interpretationsansatzes.

6. Schlussfolgerungen

Die Kombination von ^{14}C-Grundwasseraltern mit den stabilen Isotopen des Grundwassers alluvialer Aquifere in der Namib-Wüste ergibt Hinweise auf die Häufung von extremen Ereignissen vor ca. 1500 bis 2000 und vor 4.500 bis 5000 Jahren. Die in dieser Studie verwendete Methode der Alters-Isotopenkorrelation kann eine wichtige Ergänzung früherer paläohydrologischer Studien liefern (HEINE 2004, VOGEL 1989). Insbesondere die indirekte Grundwasserneubildung, die sonst nur durch sehr aufwändige Prozessstudien und Modellierungen ermittelbar ist (MORIN et al. 2009), kann über dieses Verfahren geschätzt werden. Damit liefert die Studie Daten für das nachhaltige Wassermanagement in dieser von knappen Ressourcen geprägten Region (MANNING & SEELY 2005).

Eingang des Manuskripts 07. Februar 2012

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Angeführte Schriften

Benito, G., Rohde, R., Seely, M., Külls, C., Dahan, O., Enzel, Y., Todd, S., Botero, B., Morin, E., Grodek, T. & Roberts, C. (2010): Management of Alluvial Aquifers in Two Southern African Ephemeral Rivers: Implications for IWRM. Water Resources Management 24(4): 641-667.

Conway, D., Persechino, A., Ardoin-Bardin, S., Hamandawana, H., Dieulin, C. & Mahe, G. (2009): Rainfall and Water Resources Variability in Sub-Saharan Africa during the Twentieth Century. Journal of Hydrometeorology, 10(1): 41-59.

Dahan, O., Tatarsky, B., Enzel, Y., Külls, C., Seely, M. & Benito, G. (2008): Dynamics of flood water infiltration and ground water recharge in hyperarid desert. Ground Water, 46(3): 450-461.

Diester-Haass, L., Heine, K., Rothe, P. & Schrader, H. (1988): Late Quaternary history of continental climate and the Benguela current off Southwest Africa. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 65(1-2): 81-91.

Eckardt, F. D. & Spiro, B. (1999): The origin of sulphur in gypsum and dissolved sulphate in the Central Namib Desert, Namibia. Sedimentary Geology, 123(3-4): 255-273.

Geyh, M.A. (1995): Geochronologische Aspekte paläohydrologischer und paläoklimatischer Befunde aus Namibia. Geomethodica, 20: 75– 99.

Geyh, M.A. (BGR-Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (1994): Technical Cooperation, Project No. 89.2034.0, German-Namibian Groundwater Exploration Project, Isotope Hydrological Study in Namibia. Hannover, 126 S.

Geyh, M.A. & Schleicher, H. (1990): Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and their Application. Springer Verlag, Berlin, Federal Republic of Germany, 503 S.

Heine, K. (2004): Flood reconstructions in the Namib Desert, Namibia and Little Ice Age climatic implications: Evidence from slackwater deposits and desert soil sequences. Journal of the Geological Society of India, 64(4): 535-547.

Heine, K. & Heine, J. T. (2002): A paleohydrologic reinterpretation of the Homeb Silts, Kuiseb River, central Namib Desert (Namibia) and paleoclimatic implications. Catena 48(1-2): 107-130.

Kok, O. B. & Nel, J. A. J. (1996): The Kuiseb River as a linear oasis in the Namib desert. African Journal of Ecology, 34(1): 39-47.

Külls, C. (2001): Groundwater of the North-Western Kalahari. Hydrogeologie und Umwelt, 28: 192 S.

Lancaster, N. (2002): How dry was dry? Late Pleistocene paleoclimates in the Namib desert. Quaternary Science Reviews, 21: 769-782.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Lange, J. (2005): Dynamics of transmission losses in a large and stream channel. Journal of Hydrology, 306(1-4): 112-126.

Leibundgut, C., Maloszewski, P. & Külls, C. (2009): Tracers in Hydrology. Wiley-Blackwell, 1. Auflage: 452 S.

Manning, N. & Seely, M. (2005): Forum for Integrated Resource Management (FIRM) in Ephemeral Basins: Putting communities at the centre of the basin management process. Physics and Chemistry of the Earth, 30(11-16): 886-893.

Morin, E., Grodek, T., Dahan, O., Benito, G., Külls, C., Jacoby, Y., Van Langenhove, G., Seely, M. & Enzel, Y. (2009): Flood routing and alluvial aquifer recharge along the ephemeral arid Kuiseb River, Namibia. Journal of Hydrology, 368(1-4): 262-275.

Pearson F.J. & White D.E. (1967): Carbon-14 ages and flow rates of groundwater. Water Resources Research, Vol. 3(1): 251ff.

Ploethner, D. (1998): Isotope Hydrological Study on the Kuiseb Dune Area, Koichab Area (Lüderitz) and Omaruru Delta (Omdel). Report of the GNP, Vol. D-II, Windhoek, DWA and BGR (Hannover), unpublished.

Stone, A. E. C., Thomas, D. S. G. & Viles, H. A. (2010): Late Quaternary palaeohydrological changes in the northern Namib Sand Sea: New chronologies using OSL dating of interdigitated aeolian and water-lain interdune deposits. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 288(1-4): 35-53.

Vogel, J.C. (1987): Chronological framework for palaeoclimatic events in the Namib. NPRL Research Report CFIS 145. CSIR, Pretoria, 20 pp.

Vogel, J.C. (1989): Evidence of past climatic change in the Namib Desert. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 70: 355– 364.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau

Jahr/Year: 2011

Band/Volume: 101

Autor(en)/Author(s): Külls Christoph

Artikel/Article: Rekonstruktion hydrologischer Extreme in der Namibwüste 69-81