

GEOfokus



Tiefe, semi-fossile Grundwasserleiter im südlichen Afrika

Hydrogeologische Untersuchungen im Norden von Namibia

Überflutete Bereiche der Oshanas
im Cuvelai-Etosa-Einzugsgebiet
2008

Tiefe, semi-fossile Grundwasserleiter im südlichen Afrika

Hydrogeologische Untersuchungen im Norden von Namibia

Thomas Himmelsbach · Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover

Einleitung

Die Georessource Grundwasser ist für viele Länder des südlichen Afrikas von zentraler Bedeutung. Aus diesem Grund ist die BGR schon seit vielen Jahren im Rahmen ihrer Projekte der Technischen Zusammenarbeit im Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie im Rahmen von Forschungsprojekten

seitens des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) tätig. Der vorliegende Bericht fasst zentrale Ergebnisse der Grundwassererkundung der letzten zehn Jahre zusammen und empfiehlt eine strategische Neuausrichtung der Grundwasserprospektion im südlichen Afrika.

Hydrologie von Namibia

Namibia ist ein Land der hydrologischen Extreme. Entlang seiner Küsten, z. B. der Skelettküste oder in der Namib-Wüste, herrschen hoch aride Klimabedingungen. In Richtung auf das Landesinnere steigen die jährlichen Niederschläge generell an und erreichen zuweilen Werte um 600 mm/a, weiter im Norden zur angolanischen Grenze können durchaus Werte von 800–900 mm/a erreicht werden (Abb. 1). Auf den ersten Blick sind diese Werte in etwa mit denen in Deutschland vergleichbar, allerdings übersteigt aufgrund der hohen mittleren Jahrestemperatur die potentielle Evapotranspiration die Niederschläge bei weitem. Während im Norden die Vegetation einer Trockensavanne bzw. einer offenen Baumsavanne ähnelt, sind die übrigen Landesteile durch Trockensteppen und Halbwüsten gekennzeichnet. Zurecht wird Namibia daher als eines der trockensten Länder des südlichen Afrikas bezeichnet.

Zudem sind die Jahreszeiten in ihrer Ausprägung sowie in ihrer zeitlichen Abfolge von starken Schwankungen gekennzeichnet. Der Süd-Winter zeichnet sich durch lange mehr-

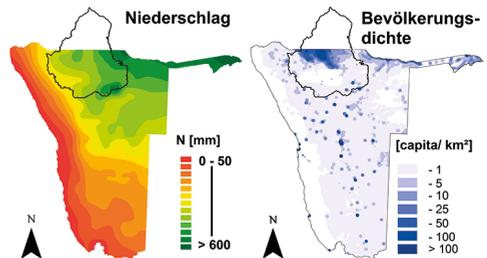


Abb. 1: Bevölkerungsdichte und Niederschlagshöhen von Namibia.

monatige Trockenperioden aus, während derer kaum Niederschläge fallen. Der Frühling sowie der Süd-Sommer sind durch die kleine Regenzeit bzw. die eigentliche, große Regenzeit charakterisiert. Die Hauptniederschläge fallen während der Regenzeit von Januar bis April. In dieser Zeit regenerieren sich die oberflächennahen Grundwasserleiter und auch die meisten Flüsse, in Namibia als Riviere bezeichnet, führen während einiger Monate Wasser. Im Zeitraum von ca. 10–15 Jahren wechseln sich lange Phasen mit allgemeiner Trockenheit und sehr niedrigen Jahresniederschlägen mit wenigen feuchteren, sogenannten „guten Jahren“ in Folge ab. So waren die Jahre 1992 und 1993



Abb. 2: Überflutete Bereiche der Oshanas im Cuvelai-Etosa-Einzugsgebiet.

durch eine extreme Dürre gekennzeichnet, die zu sehr großen Ernteaussfällen führte und einen hohen Verlust an Vieh von bis zu einem Drittel des Bestandes zur Folge hatte. Auf der anderen Seite gab und gibt es immer wieder extreme Niederschlagsperioden, die zu weiträumigen Überflutungen, insbesondere in den nördlichen Landesteilen, führen. So wurden in den Jahren 2009 bis 2011 weite Flächen des Landes wiederholt fast unpassierbar (Abb. 2).

Der nördliche Teil von Namibia wird zu großen Teilen von dem Cuvelai-Etosa-Einzugsgebiet eingenommen (Abb. 3, Abb. 4), in dem die Etosha-Pfanne, mit dem darin enthaltenen Salzsee, als heutiges Vorflutniveau des abflusslosen, intrakontinentalen Beckens fungiert. Der nördliche Teil des Einzugsgebietes erstreckt sich über große Teile von Angola bis in dessen Hochland im Südosten. Fast deckungsgleich mit dem Cuvelai-Etosa-Einzugsgebiet ist das Senkungs- und Sedimentationsgebiet des tektonisch angelegten Owambo-Beckens. In der Kreide, mit der Öffnung des Südatlantik, wird das Owambo-Becken Teil des größeren Kalahari-Basin-Systems. Ab der Kreide-Tertiär-Grenze beschleunigte

sich die Sedimentations- und Absenkungsrate, was letztlich zu einer Sedimentmächtigkeit von annähernd 400–600 m im Beckenzentrum führte. In die mächtige Wechselfolge aus Sand- und Tonsteinen sind kleinere Kohleflöze eingeschaltet. Eine bis in die 80er und 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts durchgeführte Exploration auf Kohlenwasserstoffe ergab hingegen keine Höflichkeit. Die im Zusammenhang mit diesen Explorationsbestrebungen durchgeführten geophysikalischen Messungen ergaben im Gegensatz zur ebenen Oberfläche eine stark gegliederte „Kristalline-Basis“ des Beckens, die bisher jedoch noch nie erbohrt wurde. Geophysikalische Messungen im Zusammenhang mit diesen Explorationsanstrengungen deuten zumindest am Beckenrand auf Rotations- und Kippschollen sowie Horst- und Grabenstrukturen hin, die sich – teilweise re-juveniert – bis in die sedimentäre Hülle fortsetzen und heute noch als Lineamente in Satellitenbildern zu erkennen sind.

Entgegen der landläufigen Meinung leben im Norden von Namibia auf einer vergleichsweise kleinen Fläche mehr Menschen als im übrigen

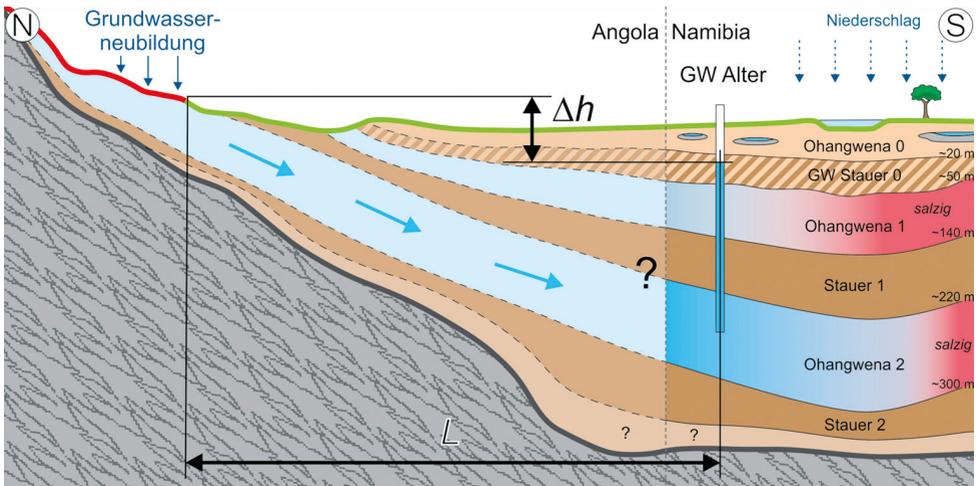


Abb. 5: Schematische und stark überhöhte Skizze der Grundwasserstockwerke: hängender Grundwasserleiter (ca. 0–20 m), Ohangwena I (ca. 50–140 m), tiefer Ohangwena II (ca. 220–300 m) sowie der Bereich der potentiellen Grundwasserneubildung in Angola.

Bewirtschaftung ihrer Grundwasservorkommen. Ein weiteres aktuelles Grundwasserprojekt ist mit dem BMBF-Forschungsvorhaben SASSCAL (*South African Science Service Center for Climate Change and Adaptive Landuse*) gegeben, welches ein multinationales und überregionales Projekt im südlichen Afrika darstellt. Als lokaler Partner der BGR fungiert hier die Universität von Namibia. Das Ziel dieses Forschungsprojekts liegt auf der Quantifizierung von Grundwasserneubildungsprozessen sowie auf der Abschätzung der Neubildungsrate des oberen Grundwasserleiters. Einen weiteren Aspekt stellt die Ermittlung nachhaltiger Entnahmeraten aus dem neu entdeckten und noch näher zu beschreibenden Grundwasserleiter Ohangwena II dar (Abb. 5).

Erst Zufallsfund, dann gezielte Exploration: Der Grundwasserleiter Ohangwena II

Im Rahmen des staatlichen Wassererschließungs- und Bohrprogrammes im nördlichen Namibia in den 1970er und 1980er Jahren wurde im NE des Cuvelai-Beckens in der Ohangwena-Region selten über 150 m tief gebohrt.

Aufgrund der geringen Bohrteufe konnte daher nicht erkannt werden, dass sich unterhalb des oberen Grundwasserstockwerkes weitere tiefe Grundwasserleiter mit Süßwasser befinden. Dieser Umstand wurde erstmalig bekannt, als im Zuge eines staatlichen Programms zur Abmilderung von Dürrefolgen bei einer Schule nahe Eenyama eine Aufschlussbohrung über die herkömmliche Teufe von 150 m bis zu einer Endteufe von 259 m gebohrt wurde, da der obere Grundwasserleiter hier sehr versalzen war. Nach dem Durchteufen einer Abfolge aus Silt- und Tonsteinen wurde ab ca. 240 m Tiefe überraschend wieder süßes Grundwasser in hervorragender Qualität angetroffen. Obwohl an dieser Bohrung die Basis des neuen Grundwasserkörpers nicht erbohrt war, wurde offensichtlich, dass dieser neue und gespannte Grundwasserleiter mit einem Druckspiegel oberhalb des flachen und versalzten oberen Grundwasserleiters einen hervorragenden, neuen Grundwasserspeicher darstellt (Abb. 6). Seitens der BGR wurde daraufhin ein umfangreiches geophysikalisches Erkundungsprogramm im Cuvelai-Becken des nördlichen Namibia aufgesetzt. Die entlang von Profilen durchgeführten Einzelmessungen des spezifi-

schen elektrischen Widerstandes mittels TEM (Transient-Elektromagnetik) ergaben ein spannendes Bild. Immer wieder wurden unterhalb von Bereichen mit vergleichsweise geringen Widerständen (Salzwasser und Tonsteine) in Teufen von 180–400 m größere und durchhaltende Bereiche mit höheren spezifischen Widerständen gemessen, die auf süßes Grundwasser hinwiesen. Aufgrund dieser Ergebnisse beschloss die namibische Wasserbehörde, in Zusammenarbeit mit der BGR und unter Einbeziehung von Fördermitteln der EU die systematische Erkundung des tieferen Grundwasserleiters voranzutreiben (Abb. 6).

Durch drei, teilweise gekernte Erdölexplorationsbohrungen aus den 1960er Jahren war die grobe stratigraphische Einordnung der Gesteine bekannt. Über die hydrologischen Randbedingungen des neu gefundenen tiefen Grundwasserstockwerkes oder gar dessen hydrogeologische Anbindung an rezente oder sub-rezente Neubildungsgebiete war zu diesem Zeitpunkt für das immerhin ca. 160.000 km² große Einzugsgebiet noch nichts bekannt. Durch das ab diesem Zeitpunkt begonnene und bis heute andauernde, umfangreiche Bohrprogramm wurde heute fast ein Dutzend neuer und tiefer Grundwassermessstellen und Pumpbrunnen gebohrt, von denen zwei als durchgehende Kernbohrungen abgeteufelt wurden.

Die Analysen der Kernstrecken zeigten kein homogenes Sedimentationsbild (Abb. 6). Seltene Einschaltungen von tonigen Bereichen wechseln sich mit feinsandigen und grobsandigen, semi-diagenetisch verfestigten Sandsteinen ab, die immer wieder durch *Calcrete*-Horizonte unterbrochen sind. Von großem wissenschaftlichem Interesse war jedoch die Untersuchung der hydraulisch wirksamen Trennschicht zwischen dem oberen, versalzten Grundwasserleiter und dem neu entdeckten süßen Grundwasserleiter Ohangwena II in größerer Teufe. So hatten erste sedimentologische Analysen der

Trennschicht entgegen der Erwartung gar keine durchgehende Tonformation ergeben. Vielmehr besteht die betreffende Schicht aus einer Wechselfolge von feinsandigen bzw. siltigen Sedimenten, die lediglich einen erhöhten Tonanteil aufweisen. Erst die Analyse der Sedimente und die Ergebnisse umfangreicher tonmineralogischer Untersuchungen ergaben, dass quellfähige Tonminerale im Porenraum für die hydraulische Abdichtwirkung der Trennschicht verantwortlich sind. Diese Hypothese wurde später durch hydraulische Versuche an wassergesättigten und triaxial eingespannten Sedimentproben eindrucksvoll bestätigt. Konnte man das getrocknete Bohrmaterial zwischen den Händen zerreiben oder zerbrechen, so ergaben hydraulische Versuche unter den o. a. Bedingungen aufgrund der Quellung der Tonminerale Durchlässigkeitsbeiwerte in der Größenordnung von 10⁻⁹ m/s und kleiner. Dieser Befund belegt zugleich die hohe Vulnerabilität der hydraulischen Sperrschicht gegenüber externen Einflüssen. Die Trennschicht ist mechanisch nicht stabil und muss daher mit größter Vorsicht durchbohrt werden und anschließend, aufgrund des internen, sehr hohen Quelldruckes, hinter einer entsprechend stabilen Vollverrohrung gesichert werden. Weiterhin müssen Tonsperren an deren Top und Basis eingebaut werden, um die langfristige Quellfähigkeit der Tonminerale zu sichern und eine etwaige, hydraulisch bedingte Erosion zu verhindern. Der Druckspiegel des neuen tiefen artesischen Grundwasserstockwerkes darf daher, bei der späteren Förderung von Grundwasser, nie unter die Obergrenze der hydraulisch wirksamen Trennschicht abfallen.

Die umfangreichen Untersuchungen der Kerne in der BGR (Geochemie, Schwerminerale, Tonminerale, sedimentologische, mikro-paläontologische sowie radiologische Untersuchungen wie z. B. *natural-γ*) ergaben ein differenziertes Bild des Sedimentationsgeschehens (Abb. 6). Zusammen mit Informationen aus weiteren Bohrungen und deren

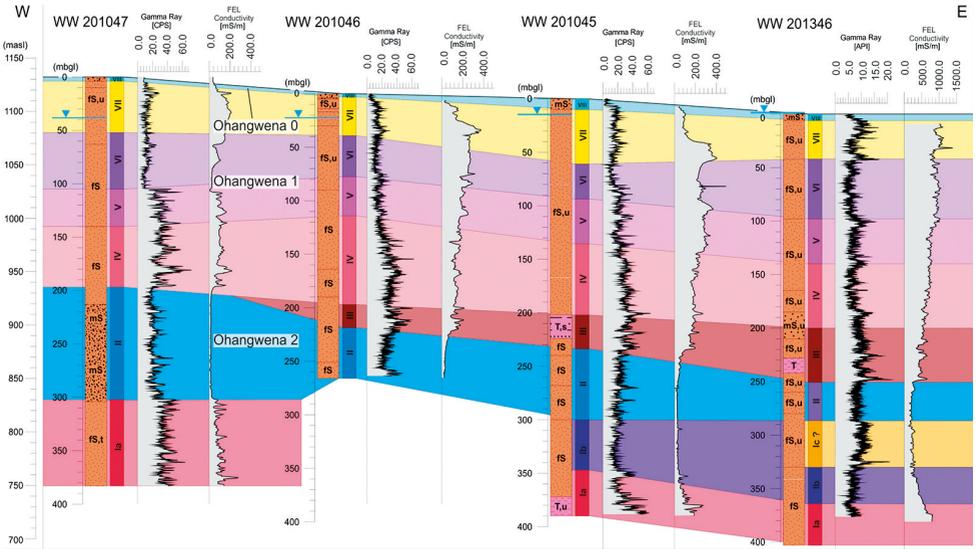


Abb. 6: Beispiel zusammengefasster sedimentologischer und bohrlochgeophysikalischer Untersuchungen (Spülbohrung und Kernbohrung)

räumlicher Interpolation entstand nach und nach ein kohärentes hydrogeologisches Gesamtbild einer diskreten Sedimentationseinheit im Cuvelai-Becken: der Cubango-Megafan mit seiner hydrogeologischen Funktion als riesiger Grundwasserspeicher (Abb. 4, Abb. 6). Der Fächer ist auf ein intra-kontinentales Delta des Paläo-Okavangos zurückzuführen, ähnlich zu dem heute weiter östlich gelegenen und bis heute aktiven Okavango-Delta. Ausgehend vom angolanischen Hochland begrenzt der heutige Okavango im Osten den Megafan, im Westen und Südwesten endet die Einheit an der Etosha-Ebene bzw. dem ebenfalls einzigartigen Oshana-Überschwemmungssystem. Die überwiegend feinsandigen Schichten der Deltaschüttungen sind durch mehrfache Wechsel der Klimabedingungen gekennzeichnet. Der Übergang von feuchten Klimabedingungen hin zu eher semi-ariden Bedingungen findet seinen Ausdruck in den *Calcrete*- und *Silcrete*-Bildungen sowie in teilweise eingeschalteten pelitischen Sedimenten, die den heutigen Salztzonenpfannen ähneln. Die feuchteren Perioden finden ihren Ausdruck hingegen in der

intensiven Bioturbation der Flachwasserbereiche. Die o. a. sedimentologischen Detailergebnisse weisen darauf hin, dass der zum Delta gehörende Süßwassersee wohl mehrfach trocken gefallen ist oder zumindest in seiner Fläche und Wassertiefe stark geschwankt hat. Erst in Richtung auf die Etosha-Pfanne im SW finden sich zunehmende Einschaltungen von Ablagerungen unter durchgehend aquatischen Bedingungen. Vereinzelt Funde von Diatomeen (*Cyclotella genus*) deuten auf ein mittel-miozänes Alter der Sedimente in ca. 250 m Tiefe hin.

Die hydraulischen Pumpversuche in dem Megafan ergaben Durchlässigkeitsbeiwerte in der Größenordnung von 10^{-6} bis 10^{-5} m/s. Diese Spannweite deckt sich in etwa mit der aus den Korngrößenverteilungen und aus den Durchströmungsversuchen abgeleiteten Durchlässigkeit. Aufgrund der hohen Mächtigkeit der Sedimentsäule und seiner hohen Porosität und Gleichförmigkeit ist der Grundwasserleiter insgesamt als sehr ergiebig einzustufen.

Die Gretchenfrage: Fossiler Grundwasserkörper oder rezente Grundwasserneubildung?

Im Hinblick auf die zukünftige Nutzung des neu gefundenen Grundwasserleiters muss die Frage beantwortet werden, ob es sich um ein abgeschlossenes fossiles Vorkommen handelt, oder ob der Grundwasserleiter einen rezenten Anschluss an Grundwasserneubildungsgebiete hat. Auch wenn eine rezente Erneuerung sehr langsam stattfinden würde, könnten sich aufgrund der weitreichenden Flächen vergleichsweise große Wassermengen ergeben und perspektivisch nachhaltig gefördert werden. Würde es sich hingegen um einen fossilen Grundwasserleiter handeln, wäre vom Prinzip her keine nachhaltige Bewirtschaftung möglich. Das neue Grundwasservorkommen müsste daher als letzte verbleibende, strategische Ressource für extreme Trockenperioden betrachtet werden.

Ein vom BMBF gefördertes, überregionales Forschungsprojekt befasst sich daher auch mit der Grundwasserneubildung für diesen unteren Grundwasserleiter. Anhand von Satellitenbildauswertungen ergaben sich Hinweise auf potentielle Grundwasser-Neubildungsgebiete in den angrenzenden Ausläufern des angolischen Hochlandes. Leider sind die hydrogeologischen Informationen nördlich der namibisch-angolanischen Grenze dürftig. Die Region ist nach Beendigung des Bürgerkrieges in Angola 2002 nach wie vor kaum zugänglich, da der Bereich nicht abschließend von Sprengminen geräumt wurde. Der dortige Anteil des Cubango-Megafan sowie das angrenzende angolische Hochland bergen jedoch wahrscheinlich den Schlüssel zu einem überregionalen, grenzüberschreitenden Grundwassersystem. Über diese nördlichen Gebiete wurde daher von der BGR-Fernerkundung in Zusammenarbeit mit dem DLR ein Aufnahmestreifen in einem 14-tägigen Wiederholungsrythmus mit dem

TerraSAR-X-Satelliten mit Hilfe von Radarinterferometrie sowie Multispektralanalysen vermessen. Anhand der 14-tägigen Messungen zwischen Juli 2015 und Februar 2016 konnten zwei grundlegend unterschiedliche Bereiche in hoher horizontaler Auflösung von 3×3 m bei einer vertikalen Auflösung von wenigen Millimetern unterschieden werden. Einige Bereiche (rot markierte Flächen in Abb. 7) heben sich während der Regenzeit, während sich andere (blau) während der Trockenheit senken. Die Ursachen für die Hebungen und Senkungen sind vielfältig. Zum einen spielen Quellvorgänge in den Tonmineralen im Boden eine gewisse Rolle, zum anderen sind diese Hebungs- und Senkungsprozesse auf hydro-mechanische Effekte des Porenraums im Grundwasserleiter selbst zurückzuführen. Da in den Hebungsgebieten auf den Satellitenbildern während der Trockenzeit keinerlei Salzkrusten oder ähnliches zu erkennen sind und diese Gebiete auf Karten zudem als Feuchtgebiete ausgehalten werden, ist davon auszugehen, dass die Hebung in der Regenzeit jeweils durch eine Infiltration von neuem Grundwasser verursacht wird.

Die Summe aller bis dato gewonnenen Erkenntnisse aus den explorativen Untersuchungen, den Konzepten zur Grundwasserneubildung und der Satellitenbild-Auswertung bildeten in einem nächsten Schritt die Ausgangsbasis für ein überregionales, konzeptionelles numerisches Grundwassermodell. Es umfasst mit seinen Rändern das obere Cuvelai-Etoshabekken und beinhaltet sämtliche bekannten hydrologischen, hydraulischen, sedimentologischen und hydrogeologischen Informationen. Die bekannten hydraulischen Randbedingungen wurden einbezogen; in Bereichen, wo dies nicht möglich war, wurden entsprechende, erwartungstreue Annahmen getroffen. In diesem sogenannten hermeneutischen Modellierungsansatz wurden ca. 150 theoretisch mögliche und auch physikalisch sinnvolle Randbedingungen festgelegt und in die nachfolgende Variationsrechnung mit einbezogen. Anhand des Verfahrens der kleinsten Fehler-

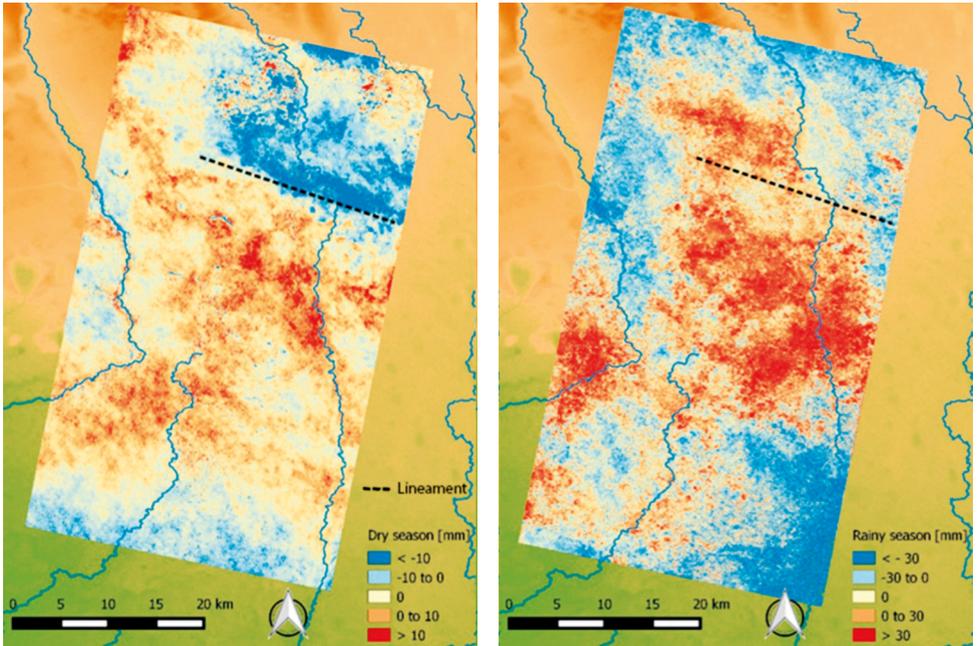


Abb. 7: Ausbiss des Grundwasserleiters und vermuteter Bereich mit Grundwasserneubildung (rot gekennzeichnet) im Hochland von Angola

quadrate (*Least-Square-Verfahren*) wurden nun diejenigen Realisationen ausgefiltert, die mit den gemessenen Grundwasserständen, der generellen Fließrichtung aus den Grundwassergleichenplänen sowie den anhand der Radio-Karbon-Methode (^{14}C -Messungen) bestimmten Grundwasseraltern am besten übereinstimmen. Die Ergebnisse dieser Modellläufe scheinen die Existenz von Grundwasserneubildungsgebieten in den Ausläufern des angolanischen Hochlands grundsätzlich zu bestätigen (Abb. 8). Die Annahme einer alleinigen Grundwasserneubildung aus dem angolanischen Hochland ergibt die beste Anpassung an die gemessenen Grundwasserstände und Grundwasseralter aus den ^{14}C -Analysen sowie ein plausibles Fließfeld.

Von der Exploration zur Nutzung

Die Entdeckung der neuen Grundwasserressource hat die Situation der Wasserversorgung in Namibia deutlich verändert, was auch in der

nationalen und internationalen Presse gewürdigt wurde. Nach den feuchten Jahren 2009–2011 ist erneut eine längere Dürreperiode eingetreten, die den neuen Grundwasserfund in den Fokus des Interesses gerückt hat. Dem neu entdeckten Grundwasserleiter Ohangwena II wird seitens der politischen Entscheidungsträger in Namibia daher eine Schlüsselrolle für die zukünftige Wasserversorgung des nördlichen Namibia zugesprochen. Obwohl bisher nur für ca. 20 Prozent des Beckens gesicherte Daten über die Ausdehnung und den internen Aufbau des Grundwasserleiters bekannt sind, steht bereits jetzt fest, dass mit den bisherigen Bohrungen ein strategisches, regional bedeutendes und auch schützenswertes Grundwasservorkommen erschlossen wurde. Es ist ein besonderes Verdienst des TZ-Projektes der BGR, den Schutz des Vorkommens hervorgehoben zu haben. Dieser besondere Schutzstatus ist in die nationale Planung und Gesetzgebung eingeflossen.

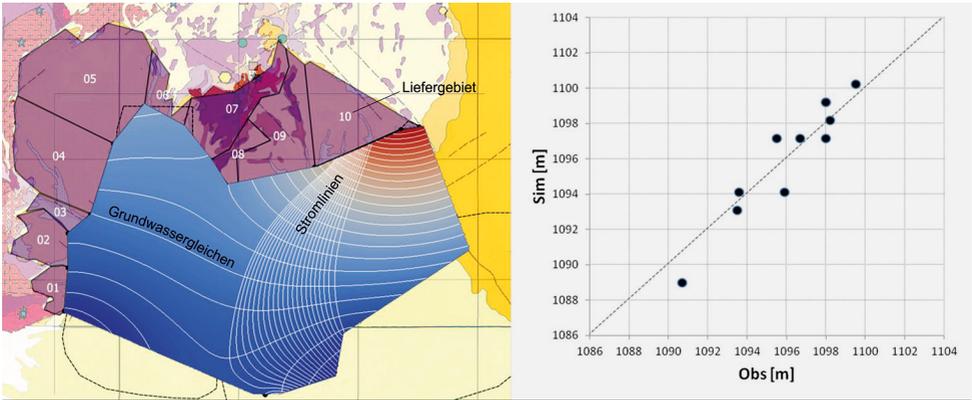


Abb. 8: Bestmögliches Szenario der Grundwassermodellierungen für den Grundwasserleiter Ohangwena II mit Grundwassergleichen und Stromlinien sowie den möglichen Liefergebieten (Karte links). Die modellierten Grundwasserhöhen (Sim) passen gut mit den gemessenen Grundwasserständen (Obs) überein (rechtes Diagramm).

Mittlerweile sind erste Brunnen des nationalen Wasserversorgers an das Pipelinesetz angeschlossen und hydraulische Tests durchgeführt worden. Weitere Überwachungsmaßnahmen in Form von Grundwassermessstellen sind empfohlen, um bereits schon im Frühstadium das hydraulische Verhalten des Grundwasserleiters bei der derzeit noch geringen Nutzung erfassen zu können. Für die langfristige und nachhaltige Nutzung muss allerdings die interne Dynamik des Grundwasserleiters durch bessere Grundwassermodelle erfasst und beschrieben werden. Parallel hierzu muss die Effizienz der bisherigen Ressourcennutzung verbessert sowie in eine sparsame Wassernutzung investiert werden. So müssen die Leitungsverluste in dem weitverzweigten Pipelinesystem auf ein Minimum reduziert und auch die Verdunstungsverluste in den offenen Kanälen im Oberstrom zum Pipelinesetzwerk verringert werden.

Die numerischen Modellberechnungen ergeben bisher Grundwasserneubildungen von wenigen Millimetern im Jahr, wir gehen zum derzeitigen Stand von 1–3 mm/a aus. Nur aus der schieren Größe der hierfür zur Verfügung stehenden Fläche entstehen Wasservolumina, die für eine vorsichtige, dann aber nachhaltige

Nutzung des Grundwasserleiters für die Versorgung der ansässigen Bevölkerung ausreichen werden. Die Nutzung des Grundwasserleiters als Beitrag für eine langfristige Fernwasserversorgung, z. B. nach Windhoek, ist daher mit Skepsis zu betrachten. Dies könnte den Grundwasserleiter überfordern und langfristig auch zum Verlust des selbigen führen.

Die Anbindung des neu entdeckten Grundwasserleiters an andere, tiefer gelegene Vorfluterniveaus ist derzeit noch nicht endgültig geklärt. Da es im Bereich der östlichen, dünn besiedelten Kalahari kaum Bohrungen mit entsprechender Teufe gibt, können nur Hypothesen aufgestellt werden. Als eine der plausibelsten erscheint die Annahme, dass es sich beim östlichen Teil des Grundwasserleiters um extrem langsame Fließsysteme handelt, die vermutlich zu Verweilzeiten des Grundwassers von 100.000 Jahren und mehr führen. Um diese Datierungslücke mit Hilfe der Analyse radioaktiver Edelgase zu schließen (¹⁴C-Analysen reichen hierfür nicht mehr aus), wurden vor kurzem entsprechende Kontakte zur Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) in Wien geknüpft. Diese Fließsysteme könnten Anschluss an das Grabenbruch-System in Botswana haben, welches ebenfalls durch tief liegende und

aller Voraussicht nach auch süße Grundwasserleiter gekennzeichnet ist und in Richtung auf den Sambesi im Osten entwässert.

Ausblick

Aufbauend auf dem bereits existierenden Grundwassermodell werden weitere numerische Modelle vorbereitet. Die Modellierungen bestehen sowohl aus lokalen Detailmodellen wie auch aus abgestuften regionalen Modellierungen. Alle diese Modelle sind darauf ausgelegt, den wachsenden Informationsgrad bezüglich der Struktur und vor allem der klimatischen und hydrologischen Anfangs- und Randbedingungen aufzunehmen. Auch wenn im Hinblick auf die Grundwasserneubildung im Randbereich des Cuvelai-Beckens deutliche Fortschritte erzielt wurden, so wird dieser Parameter nach wie vor derjenige mit der größten Unsicherheit bleiben.

Der neu gefundene tiefe Grundwasserleiter Ohangwena II muss streng genommen eher als Zufallstreffer denn als strategischer Aufsuchungsfund betrachtet werden. Um dies in Zukunft zu umgehen, sollte die Grundwassererschließung im südlichen Afrika neu ausgerichtet werden. Im Gegensatz zu bisherigen Aufschlussbohrungen, die in eine zumeist unbekannt Schichtenfolge mit unbekanntem tektonischen Aufbau und unbekannter Sedimentationsgeschichte abgeteuft werden, sollte die zukünftige Exploration auf Grundwasservorkommen ähnlich wie für die Erschließung von Kohlenwasserstoffen betrieben werden. Erst aus der Kenntnis der tektonischen Rahmenbedingungen, den sich daraus abzuleitenden tektonischen Strukturelementen und Begrenzungen sowie dem sedimentologischen Aufbau, der seinerseits wieder die hydraulischen Eigenschaften bestimmt, können potentielle, überregionale Grundwasserleiter identifiziert werden. Ein derartiges Vorgehen hätte den prinzipiellen Vorteil, dass finanzielle Mittel eingespart und kostenträchtige Fehlbohrungen verhindert werden könnten, und

würde darüber hinaus wichtige Grundlagen für die politischen Entscheidungsträger vor Ort bereitstellen.

Ein derartiges Vorgehen setzt aber auch voraus, dass die Exploration auf diese Grundwasservorkommen von langer Hand vorbereitet und fachlich entsprechend begleitet wird. Es ist wohl müßig zu betonen, dass Projekte generell interdisziplinär aufzusetzen sind. So wird es unabdingbar sein, von Anbeginn an zur Exploration regionale geophysikalische Erkundungen wie auch satellitengestützte Fernerkundungsmethoden einzubeziehen.

Die bisher erzielten vielversprechenden Ergebnisse aus Grundwasserprojekten der BGR auch in anderen Ländern des südlichen Afrikas geben berechtigten Anlass zur Hoffnung, dass die großen interkontinentalen Becken des südlichen Afrikas weitere tiefe und semi-fossile, bisher nicht erschlossene Grundwasserleiter beinhalten. Diese neuen Ressourcen müssen folgerichtig als strategische Langzeitversorgung einer rasch wachsenden Bevölkerung betrachtet werden. Nur so lässt sich in Zukunft die Anpassung an den sich abzeichnenden Klimawandel bewerkstelligen.

Danksagung

Die Arbeiten wurden in dankenswerter Weise finanziert seitens BMZ („Grundwasser für den Norden von Namibias“) sowie BMBF („South African Service and Science Center for Climate Change and Adaptive Land Use, SASSCAL“)

—

Die vorliegende Studie ist das Ergebnis einer interdisziplinären Arbeitsgruppe aus Wissenschaftlern innerhalb und außerhalb der BGR: Beukes, H.; Beyer, M.; Christelis, G.; Dill, H. G.; Dohrmann, R.; Fenner, J.; Frei, M.; Gaj, M.; Grünberg, I.; Hahne, K.; Houben, G.; Kaufhold, S.; Kringel, R.; Königer, P.; Lindenmaier, F.; Lohe, C.; Ludwig, R-R.; Miller, R. McG.; Nick, A.; Noell, U.; Quinger, M.; Schildknecht, F.; Wallner, M.; Zauter, H.; van Wyk, B.

www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/projekte_node.html

www.spiegel.de/wissenschaft/natur/gigantischer-trinkwasserspeicher-unter-namibia-gefunden-a-845638.html

Einführende Literatur

Beyer, M., Koeniger, P., Gaj, M., Hamutoko, J.T., Wanke, H. & Himmelsbach, T. (2015): A Deuterium-based labeling technique for the investigation of rooting depths, water uptake dynamics and unsaturated zone water transport in semiarid environments. – *J. Hydrol.* **533**, 627–643.

Ferretti, A. (2014): *Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space.* – Eage Publications bv, Houten, The Netherlands.

Gaj, M., Beyer, M., Koeniger, P., Wanke, H., Hamutoko, J. & Himmelsbach, T. (2015): In-situ unsaturated zone stable water isotope (^2H and ^{18}O) measurements in semi-arid environments using tunable off-axis integrated cavity output spectroscopy. – *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **12**(6), 6115–6149; doi:10.5194/hessd-12-6115-2015.

Hanssen, R. F. (2001): *Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis.* – Delft University of Technology, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.

Lindenmaier, F., Miller, R., Fenner, J., Christelis, G., Dill, H.G., Himmelsbach, T., Kaufhold, S., Lohe, C., Quinger, M., Schildknecht, F., Symons, G., Walzer, A. & Wyk, B. van (2014): Structure and genesis of the Cubango-Megafan in northern Namibia: implications for its hydrogeology. – *Hydrogeology Journal*, **22**(6), 1307–1328; doi: 10.1007/s10040-014-1141-1.

Miller, R. (2008): *The Geology of Namibia – Volume 1–3.* Ministry of Mines and Energy, Geological Survey, Windhoek.

Miller, R. M., Pickford, M. & Senut, B. (2010): The geology, paleontology and evolution of the Etosha Pan, Namibia: Implications for terminal Kalahari deposition. – *South African Journal of Geology*, **113**(3), 307–334. doi:10.2113/gssaig.113.3.307