

Landschaftsentwicklung und Klimawandel im südlichen Afrika

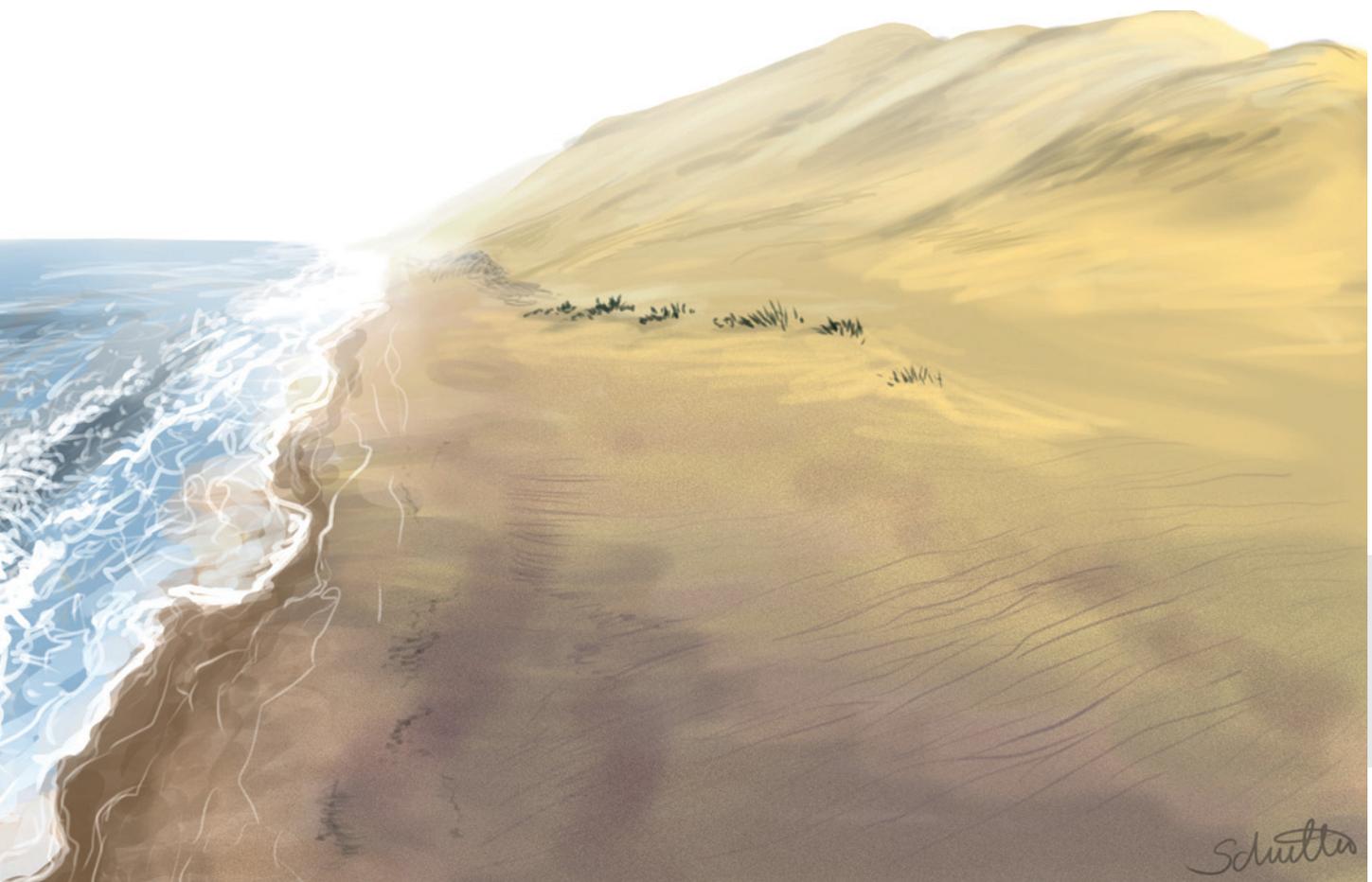
Heinz Wilkes¹, Oliver Bens¹, Sabine Chabrilat¹, Kai Mangelsdorf¹, Jörg Völkel², Dirk Wagner¹, Achim Wehrmann³

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Technische Universität München

³ Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven

In the context of global change, the Southern African region has to address great challenges in terms of its natural resources, in particular to cope with the impact of climate and land use change on the water balance, the soil fertility and the quantity of land suitable for common requirements. In the BMBF-funded project GeoArchives researchers from the German Research Centre for Geosciences, the Technical University of Munich and Senckenberg am Meer jointly exploit diverse Southern African archives of landscape development and climate change. The examination of these terrestrial and marine archives will provide deep insights into the climatic evolution and environmental conditions in Southern Africa during the Holocene. The highly interdisciplinary approach integrates geomorphology, soil science, sedimentology, inorganic and organic geochemistry, geomicrobiology and remote sensing. By assessing the possible impact of future climate change and land-use change on specific sensitive environments in Southern Africa we will provide future-oriented earth system management strategies with a geoscience rationale.



Der globale Wandel stellt das südliche Afrika hinsichtlich seiner natürlichen Ressourcen vor große Herausforderungen. Dies betrifft besonders die Auswirkungen von Klimawandel und Landnutzung auf den Wasserhaushalt, die Bodenfruchtbarkeit und die Verfügbarkeit geeigneter Landflächen für den zukünftigen Bedarf der Bevölkerung. Von höchster Bedeutung sind daher eine effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen und zugleich ihr Erhalt. Klimatische Veränderungen und der menschliche Einfluss durch Landwirtschaft, Beweidung und Ackerbau können zu einer Degradation der Landschaft führen, sofern deren natürliche Stabilität und ihr Regenerationspotenzial überschritten werden. Dies führt unmittelbar zur Mobilisierung und Umlagerung von Sedimenten. Um die zugrundeliegenden Prozesse der Landschaftsentwicklung genau zu verstehen, müssen Archive erschlossen werden, die zur Dokumentation von Landschaftsentwicklung und Klimawandel geeignet sind. Da für das südliche Afrika schriftliche Aufzeichnungen erst seit etwa 300 Jahren existieren, sind natürliche Geoarchive umso wichtiger, die Auskunft über die Vergangenheit geben können.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Deutschen Geo-ForschungsZentrums GFZ, der Technischen Universität München und von Senckenberg am Meer führen seit Juli 2013 gemeinsam das Forschungsprojekt GeoArchives durch. GeoArchives wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen von „Science Partnerships for the Assessment of Complex Earth System Processes – SPACES“ gefördert. Südafrika ist bereits seit 1996 eines der Schwerpunktländer des BMBF für die wissenschaftlich-technologische Zusammenarbeit und bedeutendster Kooperationspartner in Subsahara-Afrika. Zentrales Ziel von GeoArchives ist die Erschließung und Interpretation von Archiven, mit denen die Landschaftsentwicklung und der Klimawandel im südlichen Afrika charakterisiert werden können (Abb. 1 und 2). GeoArchives zeichnet sich durch eine intensive Zusammenarbeit mit Kolleginnen und Kollegen an Universitäten und Forschungseinrichtungen in Südafrika und Namibia sowie eine enge Vernetzung mit anderen im Rahmen des SPACES-Programms laufenden Projekten aus, insbesondere mit „Regional Archives for Integrated iNvestigations – RAIN“ (Marum, Bremen, FSU Jena) und „Options for sustainable geo-biosphere feedback management in savanna systems under regional and global change – OPTIMASS“ (Universität Potsdam).

Links: I. Schüller (Projekt-Doktorandin), „Sandwich-Bay an der namibischen Küste“, Computerzeichnung, 2014

Left: I. Schüller (project PhD), „Sandwich Bay at the Namibian coast“, computer drawing, 2014

GeoArchives ist interdisziplinär ausgerichtet und integriert unterschiedliche Typen natürlicher Archive. Die Untersuchung geomorphodynamisch sensibler Landschaftselemente bietet das Potenzial, Veränderungen der Landoberfläche auf lokaler bis regionaler Skala hochauflösend zu dokumentieren. Da die Atlantikküste des südlichen Afrika durch starken Seegang und hochenergetische Ablagerungsbereiche gekennzeichnet ist, stellen Lagunen und die aus ihnen hervorgegangenen Salzpflanzen (pans) die einzigen niederenergetischen Bereiche dar, in denen es zu einer mehr oder weniger kontinuierlichen Ablagerung von Sedimenten sowohl mariner als auch terrestrischer Herkunft kommt. Gemeinsam öffnen diese marinen und terrestrischen Geoarchive einen tiefen Blick in die klimatische Entwicklung und die Umweltbedingungen im südlichen Afrika im Verlauf des Holozäns. Veränderungen wirken sich dabei auch auf die Zusammensetzung und Diversität ursprünglicher Mikroorganismengemeinschaften aus. Die angestrebte Rekonstruktion der Umweltveränderungen wird durch die Anwendung von Fernerkundungsmethoden gestützt, welche die direkte und indirekte Analyse von Geoarchiven und Landschaftsformen auf unterschiedlichen Skalen auf Grundlage geochemischer und physikalischer Parameter ermöglichen.

Landschaftsentwicklung im südlichen Afrika

Hänge, Schwemmfächer und Flussterrassen als Geoarchive

Hänge mit ihren Sedimenten, Schwemmfächer und Flussterrassen zählen zum natürlichen Forminventar der landschaftsprägenden Geomorphodynamik und entstanden über Jahrhunderte und Jahrtausende, bevor der Mensch intensive Landnutzung einleitete. Nicht zuletzt im südlichen Afrika gingen diese Prozesse bereits vor der Zeit des menschlichen Einflusses auf die Landschaft mit der Umlagerung gewaltiger Sedimentmengen einher. Aktivitätsphasen wechselten mit Stabilitätsphasen ab (Heine & Völkel, 2011). Sofern ausgeschlossen werden kann, dass menschliche Einflüsse ausschlaggebend für die Wechsel waren, müssen andere Faktoren wie etwa klimatische ursächlich sein. Mit dem Wissen um die paläoklimatischen Bedingungen der letzten Jahrhunderte in Südafrika können die Auswirkungen vormaliger Systemveränderungen auf Hänge, Hangsedimente und Flussterrassen aus den Geoarchiven ausgelesen und die Zusammenhänge im geomorphodynamischen System vor der menschlichen Einflussnahme rekonstruiert werden. Vor allem in Schwemmfächern, die bisher in der Paläoumweltforschung in Namibia und in den angrenzenden Untersuchungsgebieten Südafrikas weitestgehend unberücksichtigt blieben, liegt ein ausgesprochen hohes Erkenntnispotenzial, das es zu erschließen gilt.

Eine Vielzahl von Vorgängerprojekten und die daraus resultierenden Fachkenntnisse schufen die Basis für die im Rahmen von GeoArchives laufenden Untersuchungen an unterschied-



Kontakt: H. Wilkes
(heinz.wilkes@gfz-potsdam.de)

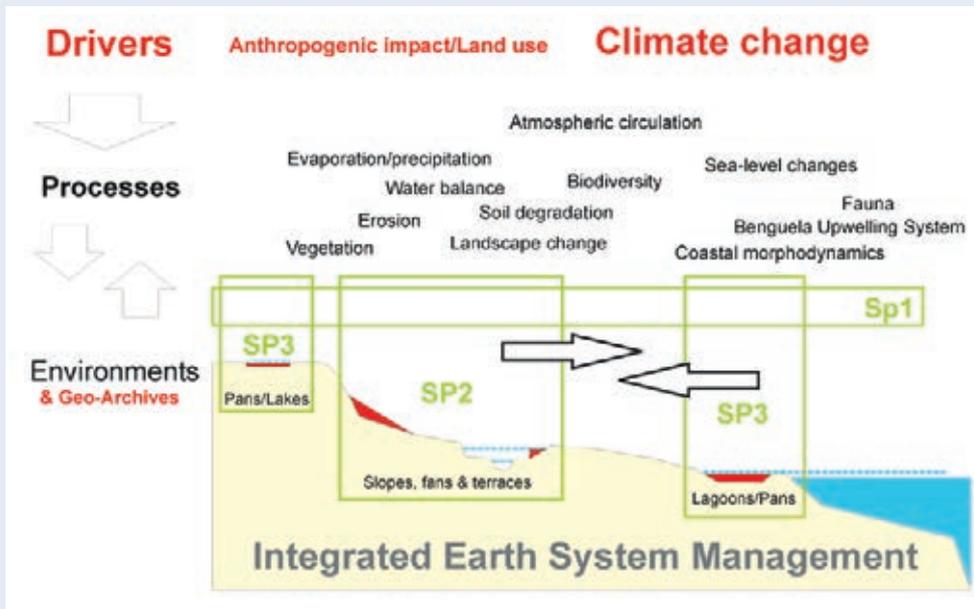


Abb. 1: Konzeptioneller Rahmen von GeoArchives; SP1 (Fernerkundung), SP2 (Hänge, Schwemmfächer und Flussterrassen) und SP3 (Salzpfannen und Lagunen) bezeichnen die drei Arbeitspakete von GeoArchives

Fig. 1: Conceptual framework of GeoArchives; SP1 (remote sensing), SP2 (slopes, fans and terraces) and SP3 (salt pans and lagoons) denote the three work packages of GeoArchives



Abb. 2: Karte der Untersuchungsstandorte (Grafik: R. Milewski, GFZ)

Fig. 2: Map of the investigation sites

lichen Landschaftselementen (u.a. Heine & Völkel, 2010; Hürkamp et al., 2011; Leopold et al., 2006). Mit Hilfe der Geoarchivanalyse dreier ineinandergreifender Systeme (Hang, Schwemmfächer, Flussterrasse) sollen aktuelle Fragen nach den Auswirkungen des Klima- und Nutzungswandels auf die heutigen Landschaftsökosysteme beantwortet werden, um geeignete zukunftsorientierte Landnutzungsstrategien mit fundierter geowissenschaftlicher Untermauerung formulieren zu können (Abb. 3). Die drei Archive schließen in unterschiedlicher Auflösung regionale und auch überregionale Einflüsse, sowohl klimatischer Veränderungen als auch der Landnutzung, auf. Die Hänge betreffend gilt es, über ihre

Sedimente (slope deposits) und die darin entwickelten Böden das Alter und die Frage der Stabilität des Hangsystems zu klären. Fragen vormaliger und aktueller Bodenerosion werden bearbeitet. Es zeigt sich, dass in den Arbeitsgebieten in der SW-Kalahari, am unteren Molopo im Mündungsbereich in den Oranje sowie in den Namib/Naukluft-Bergen Namibias (Tsauhabtal) mit erstaunlich hoher Systemstabilität zu rechnen ist, was nicht zuletzt Oberflächendatierungen belegen. Schwemmfächer von Hanggerinnen, die in den Vorfluter übertreten, schließen den Verschneidungsbereich des geomorphodynamischen Systems Hang mit dem Abflussgeschehen im Vorfluter (Molopo, Oranje, Tsauhab) auf.

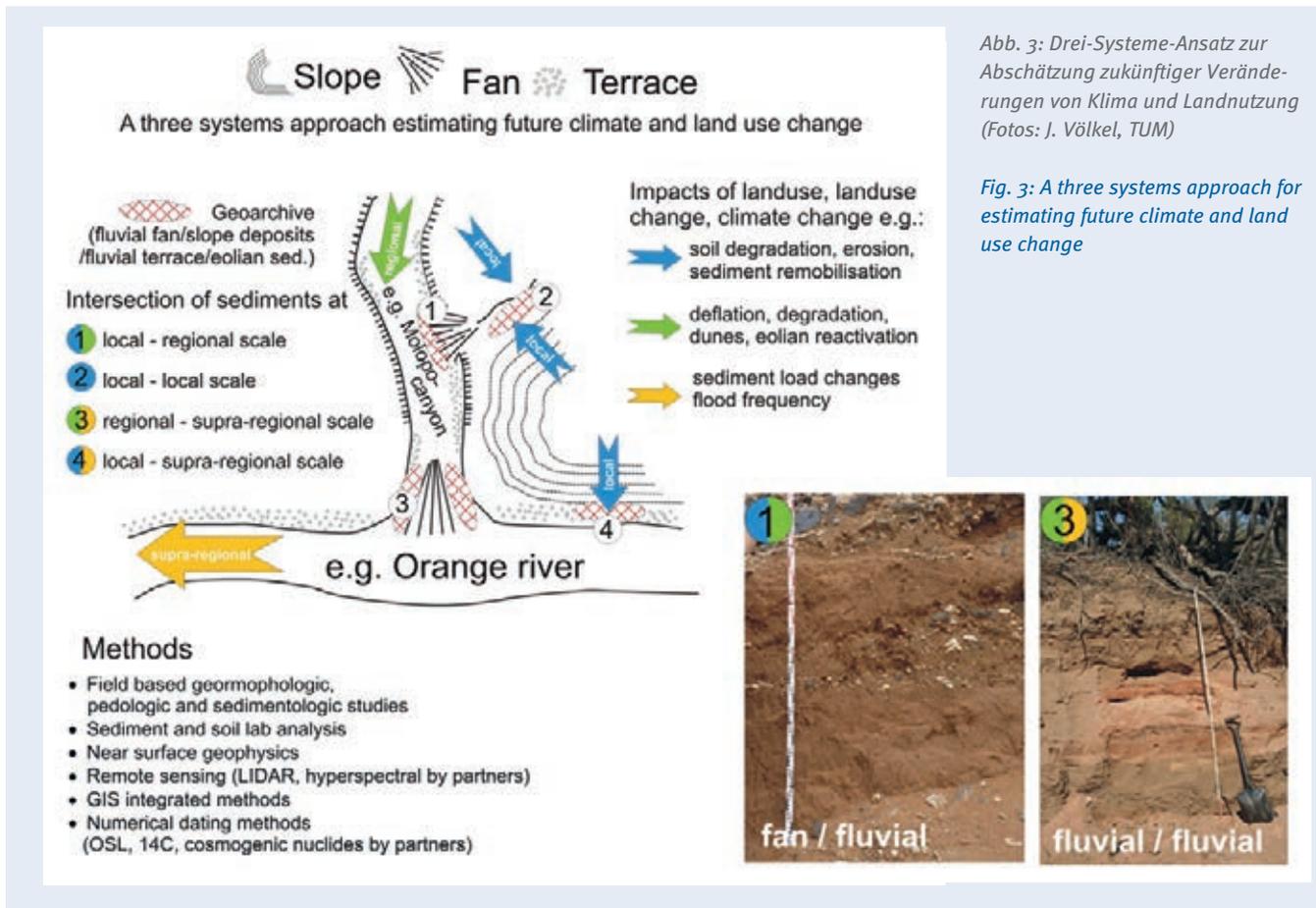


Abb. 3: Drei-Systeme-Ansatz zur Abschätzung zukünftiger Veränderungen von Klima und Landnutzung (Fotos: J. Völkel, TUM)

Fig. 3: A three systems approach for estimating future climate and land use change

Während die Sedimente der Hanggerinne und kleinerer Vorfluter dritter Ordnung (z. B. Unterlauf des Molopo) von lokalen Einflüssen über Raum und Zeit geprägt werden, sind etwa in den Sedimenten des Oranje die überregionalen Einflüsse geoarchival gespeichert. Terrassen sind Sedimentationskörper desselben Flusses und stellen mit ihrer Oberkante den ehemaligen Talboden bzw. die Fluthöhe eines Abflussereignisses dar. Im Falle sehr junger Sedimente sind diese nicht verfestigt. So hat der Klimawandel der sogenannten Kleinen Eiszeit zu einer massiven Zunahme von Abflussereignissen mit extremen Abflussspitzen geführt (Heine & Völkel, 2011). Am Oranje nutzen heute Farmen industriellen Zuschnitts in großer Zahl und Ausdehnung diese feinkörnigen, lockeren Sedimente für den Weinanbau. Es gilt zu verstehen, welche Wiederkehrwahrscheinlichkeit diese Hochflutereignisse haben und welchen Systemzuständen in der südafrikanischen Landschaft sie geschuldet waren. Dabei spielt auch die Materialverlagerung durch den Wind eine Rolle, weniger in Form von Flugsanden als von Staubastrag und Staubaablagerung (Hürkamp et al., 2011).

Fernerkundung in der Untersuchung von Oberflächenveränderung und Landschaftswandel

Fernerkundungsmethoden erlauben die Gewinnung von Informationen über den Zustand und die Veränderung der Erdober-

fläche auf kleinen und großen räumlichen Skalen. Insbesondere sensible Prozesse wie Bodenerosion und -degradation werden durch den Einsatz innovativer Fernerkundungstechnologie aufgedeckt. Die fernerkundlichen Analysen im Rahmen von GeoArchives zielen auf (a) die auf hyperspektralen Fernerkundungsdaten basierende, präzise räumliche Charakterisierung verschiedener Landschaftseinheiten und Geoarchive im Untersuchungsgebiet (Salzpfannen der Kalahari, Tsauchabtal, Unterlauf des Molopo) und (b) die Untersuchung von Oberflächenprozessen durch multitemporale Auswertung von Satellitenzeitreihen, welche Erkenntnisse über die rezente Vegetations- und Landschaftsdynamik und hydrologische Veränderungen der letzten 10 bis 30 Jahre ermöglichen sollen. Die abbildende Spektroskopie (engl.: imaging spectroscopy/hyperspectral imaging) ist eine innovative Fernerkundungstechnologie, mit deren Hilfe ein größerer, weit über das sichtbare Licht hinausgehender Wellenlängenbereich mit vielen, stetig aneinander gereihten, schmalen Kanälen bildlich aufgezeichnet wird. Hyperspektrale Fernerkundung ermöglicht die genaue Quantifizierung von Boden- und Sedimentoberflächeneigenschaften (Chabrillat et al., 2013) und leistet durch deren Charakterisierung und Kartierung einen wichtigen Beitrag zur Interpretation von Paläoumweltarchiven und Oberflächenprozessen im südlichen Afrika. Besonders relevante Parameter für die Analyse von

Erosionsprozessen in Trockengebieten sind die quantitativen Anteile von Vegetation und unbedecktem Boden oder die Gehalte an organischer Substanz, Ton, Eisenoxid, Karbonaten (Abb. 4) und Salzen, die mit herkömmlichen Multispektralsensoren nicht in der bei Einsatz der Hyperspektraltechnologie erwarteten Güte bestimmbar waren (Ben-Dor et al., 2009). Detektierte Oberflächenveränderungen werden dem rezenten Status gegenüber gestellt, hinsichtlich der Entwicklung des Ökosystems analysiert und insbesondere im Zusammenhang mit Klimawandel und Landnutzungsänderungen interpretiert (Abb. 5). Das GFZ als wissenschaftlicher Leiter der zukünftigen hyperspektralen Weltraummission EnMAP (Environmental Mapping and Analyses Program) ist ein in der Algorithmenentwicklung und Anwendung von Hyperspektraldaten weltweit führendes Institut bei der Erforschung global gekoppelter Umweltprozesse und -veränderungen. In diesem Zusammenhang zielt der Fernerkundungsanteil in GeoArchives auch auf die Entwicklung und Unterstützung verfügbarer und zukünftiger Methoden zur Erdbeobachtung für die Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungswandel auf Ökosysteme und leistet so einen Beitrag für ein nachhaltiges und zukunftsorientiertes Umweltmanagement.

Neue Klima- und Umweltarchive in Namibia und Südafrika

Salzpfannen in der Kalahari und an der Skelettküste

Terrestrische Salzpfannen, die z. B. in der Kalahari verbreitet auftreten, sind Sedimentationssysteme, die nur episodisch Wasser führen. Mögliche Mechanismen ihrer Entstehung und der in ihnen ablaufenden Prozesse werden kontrovers diskutiert und sind bislang nicht umfassend verstanden. Eine wichtige Komponente des Projekts GeoArchives besteht darin, das Potenzial der Salzpfannen in der Kalahari und an der Skelettküste als Archive der Landschaftsentwicklung und des Klimawandels zu erkunden (Abb. 6). In fünf Salzpfannen der Kalahari in Namibia und Südafrika (Omongwa, Toasis, Koës, Branddam East und Witpan) wurden bis zu 3 m lange Sedimentkerne gewonnen. Das Probenmaterial wird in umfassender Weise mit sedimentologischen, geochemischen und mikrobiologischen

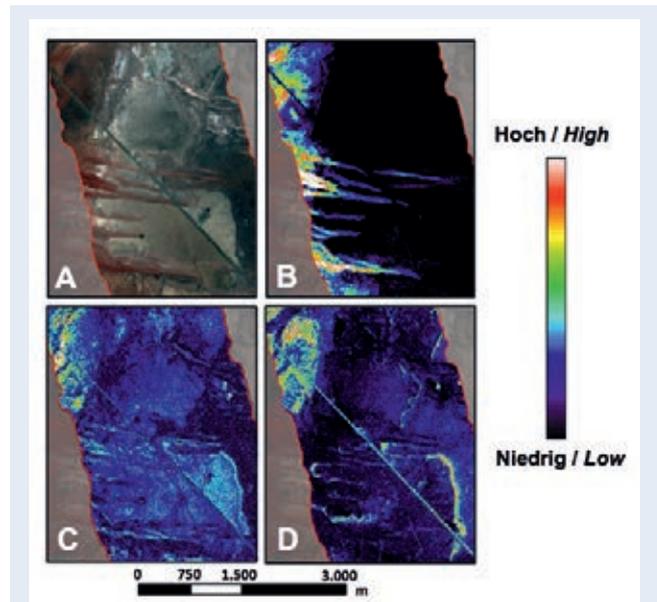


Abb. 4: Ableitung von Bodenkenngrößen aus Hyperspektraldaten aus dem Unterlauf des Molopo mit Hilfe der HYSOMA-Bodenalgorithmen.

A) Hyperspektralaufnahme (HyMap 2009), B) Eisenoxidgehalt, C) Tongehalt, D) Karbonatgehalt (Grafik: R. Milewski, GFZ)

Fig. 4: Determination of soil indicators from hyperspectral imagery in the Molopo river valley based on the HYSOMA software interface. A) Hyperspectral image (HyMap 2009), B) iron oxide content, C) clay content, D) carbonate content

Arbeitsmethoden untersucht. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die zuverlässige Altersdatierung der Sedimente, bei der die Radiokohlenstoff-Methode (^{14}C) an biogenem Material (Pflanzenreste, Schneckengehäuse, Muschelschalen etc.) und die optisch stimulierte Lumineszenz (OSL) zur Altersdatierung von Sedimenten über die Mineralkörner selbst eingesetzt werden. Die Sedimente der Kalahari-Salzpfannen sind in ihrer Korngröße, die ein entscheidender Parameter der Transportenergie ist, sowohl intern als auch regional sehr unterschiedlich zusammengesetzt. Dies gilt auch für die Sedimentpetrographie,

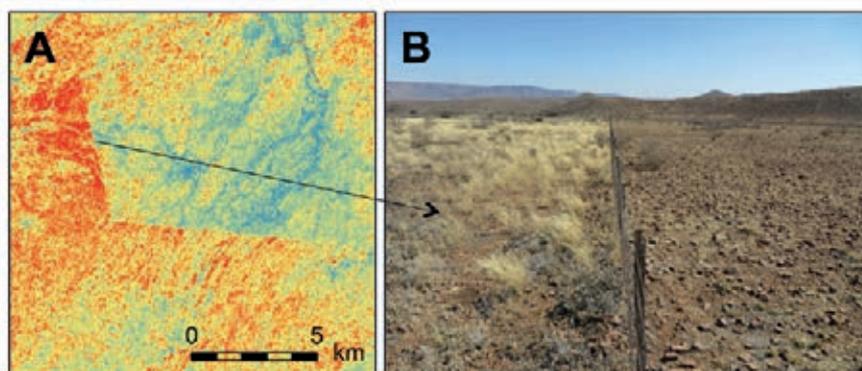


Abb. 5: Folgen der Überweidung (rechts vom Zaun) im Tsauchabtal (Naukluft, Namibia). A) Veränderungsdetektionsanalysen Landsat 30 m (1984-2013) mit Hilfe des IMAD-Algorithmus (Grafik: R. Behling, GFZ), B) Zustand während einer GeoArchives-Feldkampagne im Oktober 2014 (Foto: S. Chabrilat, GFZ)

Fig. 5: Consequences of overgrazing (right from fence) in Tsauchab Valley (Naukluft, Namibia). A) Change detection analyses Landsat 30 m (1984-2013) based on IMAD Algorithm, B) state during a GeoArchives field campaign in October 2014



Abb. 6: Salzpflanzen in der Kalahari und an der Skelettküste als neue Klima- und Umweltarchive. A) Koës-Pfanne mit Trockenriss-Struktur (Foto: S. Genderjahn, GFZ), B) Omongwa-Pfanne mit Salzküste (Foto: I. Schüller, SaM), C) Schurf in der Toasis-Pfanne (Foto: S. Genderjahn, GFZ), D) Bohrarbeiten in Walvis Bay (Foto: H. Wilkes, GFZ), E) Bohrkern aus der White Lady-Salzpflanze (Foto: I. Schüller, SaM)

Fig. 6: Salt pans in the Kalahari and at the Skeleton Coast as new archives of climatic and environmental change. A) Koës Pan with desiccation cracks, B) Omongwa Pan with salt crust, C) trench in the Toasis Pan, D) drilling at Walvis Bay, E) drill core from the White Lady Salt Pan

also die Zusammensetzung der (Ton-)Minerale. Aus randmarinen Salzpflanzen und Lagunen an der Küste Namibias wurden ebenfalls Sedimentkerne gewonnen. Dieses Material wird mit denselben Methoden untersucht, die auf die Salzpflanzen der Kalahari angewendet wurden. Die vergleichende Interpretation der Ergebnisse soll zur Identifizierung derjenigen Pflannen führen, die für weitere detaillierte Untersuchungen im Sinne der grundlegenden Ziele des Projekts GeoArchives besonders geeignet sind.

Organisches Material in Sedimenten zeichnet die Vergangenheit auf

In einer Vorläuferstudie wurde die Eignung organisch-geochemischer Proxyparameter zur Klimarekonstruktion im südlichen Afrika am Beispiel des Tswaing-Sees in der Nähe von Pretoria demonstriert (Abb. 7). Der See befindet sich in einem Krater, der vor etwa 200 000 Jahren durch einen Meteoriteneinschlag entstanden ist, und enthält 90 m mächtige Sedimentschichten. Der Vergleich der Zusammensetzung des organischen Materials im heutigen See und in alten Sedimentschichten eröffnet einen umfassenden Einblick in die Entwicklung dieses Ökosystems (Kristen *et al.*, 2010). Dabei stehen sogenannte Biomarker oder chemische Fossilien im Mittelpunkt des Interesses, die charakteristisch für bestimmte Organismen sind. Die Zusammensetzung des organischen Materials spiegelt also wider, welche Organismen zu einem bestimmten Zeitpunkt im Ökosystem des

Sees gelebt haben. Diese Informationen werden in Beziehung zu anderen organischen Indikatoren gesetzt, die Auskunft über die Klimaentwicklung geben. Besonders nützlich sind dabei die Wasserstoffisotopenwerte der *n*-Alkane, bei denen es sich um Bestandteile der Blattwache von Land- und Wasserpflanzen handelt. Sie zeichnen den Wechsel zwischen feuchteren und trockeneren Phasen in der Entwicklung eines Ökosystems auf. Die Untersuchung der Sedimente aus dem Tswaing-See hat gezeigt, dass Änderungen im Wasserhaushalt während der letzten 84 000 Jahre gut mit den bekannten Schwankungen der Oberflächentemperaturen des Meerwassers im südwestlichen Indik und im südöstlichen Südatlantik korrelieren (Schmidt *et al.*, 2014). Erwartungsgemäß weisen die Sedimente der Kalahari-Salzpflanzen erheblich geringere Gehalte an organischem Material auf als die Sedimente des Tswaing-Sees. Am Beispiel der Omongwa-Pfanne konnte jedoch bereits gezeigt werden, dass dies ausreicht, um Isotopenmessungen an *n*-Alkanen aus Blattwachsen durchzuführen, um auch dort Aufschluss über historische Änderungen von Vegetation und Wasserhaushalt zu erhalten.

Von Überlebenskünstlern und Extremisten

Die bisher untersuchten Salzpflanzen der Kalahari sind aufgrund ihrer klimazonalen Lage durch eine hohe Verdunstungsrate und

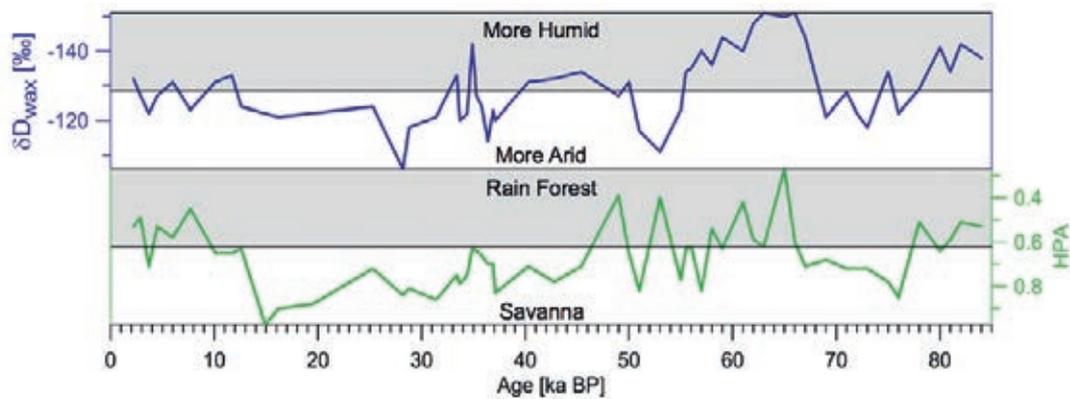


Abb. 7: Der Tswaing-See in Südafrika ist ein wichtiges Klimaarchiv für die Südhemisphäre (Fotos: H. Wilkes, GFZ). Die Wasserstoffisotopenwerte der n-Alkane von Blattwachsen (δD_{wax}) zeichnen hydrologische Veränderungen auf. Die Reaktion der Vegetation kann mit dem Higher Plant Alkane (HPA)-Index nachvollzogen werden (Schmidt et al., 2014).

Fig. 7: Lake Tswaing in South Africa is an important climate archive for the Southern Hemisphere. The hydrogen isotope values of n-alkanes from cuticular waxes (δD_{wax}) record changes in hydrology. The response of the vegetation can be assessed using the Higher Plant Alkane (HPA) Index (Schmidt et al., 2014).

damit einhergehend hohe Salzgehalte an der Oberfläche gekennzeichnet. Da Wasser eine grundlegende Voraussetzung für jedwede Form von Leben ist, stellen diese Bedingungen eine besondere Herausforderung für die Besiedlung durch Organismen dar (Abb. 8). Unter den vorherrschenden Bedingungen können nur Organismen mit einer hohen Anpassungsfähigkeit existieren. Diese sogenannten extremophilen Mikroorganismen haben ihren Stoffwechsel und bestimmte Zellbestandteile wie beispielsweise die Zellmembran soweit angepasst, dass sie extreme Trockenheit, geringe Nährstoffgehalte und intensive UV-Strahlung, wie sie im Untersuchungsgebiet vorkommen, überstehen und aktiven Stoffwechsel betreiben können. Die

Existenz dieser Überlebenskünstler in den Salzpflanzen wird durch die relativ hohen Zellzahlen mit bis zu 100 Mio. Zellen pro Gramm Sediment bestätigt. Da der Gehalt an organischem Kohlenstoff, der als Indikator für die Nährstoffversorgung dient, in den meisten Sedimenten der Untersuchungsstandorte extrem gering ist, kann davon ausgegangen werden, dass zumindest ein Teil der Mikroorganismengemeinschaften zur autotrophen Lebensweise, also zur Nutzung von Kohlendioxid als alleiniger Kohlenstoffquelle, befähigt ist. Über die genaue Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften in den Sedimenten der Salzpflanzen und später auch in den Lagunen-Sedimenten sollen moderne molekularbiologische und biogeochemische



Abb. 8: Geschichtete Mikrobenmatte in einer Salzpfanne an der Skelettküste (Foto: M. Alawi, GFZ)

Fig. 8: Layered microbial mat in a salt pan on the Skeleton Coast

Methoden Aufschluss geben. Mit diesen Verfahren kann die Struktur und Funktion der mikrobiellen Gemeinschaften im Detail aufgeklärt und durch Einbeziehung weiterer Umweltdaten (z.B. Temperatur, Salzgehalt, Kohlenstoff, Stickstoff, lösliche Ionen) deren Reaktion auf Änderungen der Umwelt in der Vergangenheit rekonstruiert werden.

Fazit und Ausblick

GeoArchives nutzt bestehende und entwickelt zukünftige Werkzeuge der Erdsystemanalyse in kontinentalen und marinen Bereichen, um wissenschaftliche Entscheidungsgrundlagen im Hinblick auf die Anpassung an die globalen Veränderungen zu liefern. Ziel ist es, unter Berücksichtigung zurückliegender langfristiger Entwicklungen Szenarien aufzuzeigen, die sich in Folge zukünftiger Landschafts- und Klimaveränderung im südlichen Afrika ergeben könnten. Auf Grundlage der Analyse der terrestrischen und marinen Geoarchive wird das Verbundprojekt einen Wissenstransfer zwischen Forschung, Wirtschaft und der Gesellschaft liefern. Die Erforschung sensibler Regionen Südafrikas hinsichtlich der Auswirkungen künftiger klimatischer Veränderungen und veränderter Landnutzung wird ein zukunftsorientiertes Management des *human habitat* vor einem geowissenschaftlichen Hintergrund ermöglichen.

Zitierte und weiterführende Literatur

- Ben-Dor, E., Chabrillat, S., Demattê, J. A. M., Taylor, G., Hill, J., Whiting, M. L., Sommer, S. (2009): Using imaging spectroscopy to study soil properties. - *Remote Sensing of Environment*, 113, Suppl. 1, p. S38-S55. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.019>
- Chabrillat, S., Ben-Dor, E., Viscarra Rossel, R. A., Demattê, J. A. M. (2013): Quantitative Soil Spectroscopy. - *Applied and Environmental Soil Science*, 13, ID 616578. DOI: <http://doi.org/10.1155/2013/616578>
- Heine, K., Völkel, J. (2011): Extreme floods around AD 1700 in the southern Namib Desert, Namibia, and in the Orange River catchment, South Africa. - *Where they forced by a decrease of solar irradiation during the Little Ice Age?* – *Geographica Polonica*, 84, Special Issue Pt. 1, p. 61-80. DOI: <http://dx.doi.org/10.7163/GPol.2011.S1.5>
- Heine, K., Völkel, J. (2010): Soil clay minerals in Namibia and their significance for the terrestrial and marine past global change research. - *African Study Monographs, Suppl.* 40, p. 31-50.
- Hürkamp, K., Völkel, J., Heine, K., Bens, O., Leopold, M., Winkelbauer, J. (2011): Late quaternary environmental changes from aeolian and fluvial geoarchives in the Southwestern Kalahari, South Africa: implications for past african climate dynamics. - *South African Journal of Geology*, 114, 3-4, p. 459-474. DOI: <http://doi.org/10.2113/gssaig.114.3-4.459>
- Kristen, I., Wilkes, H., Vieth-Hillebrand, A., Zink, K.-G., Plessen, B., Thorpe, J., Partridge, T. C., Oberhänsli, H. (2010): Biomarker and stable carbon isotope analyses of sedimentary organic matter from Lake Tswaing: evidence for deglacial wetness and early Holocene drought from South Africa. - *Journal of Paleolimnology*, 44, 1, p. 143-160. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10933-009-9393-9>
- Leopold, M., Völkel, J., Heine, K. (2006): A ground-penetrating radar survey of late Holocene fluvial sediments in NW Namibian river valleys: characterization and comparison. - *Journal of the Geological Society*, 163, 6, p. 923-936. DOI: <http://doi.org/10.1144/0016-76492005-092>
- Schmidt, F., Oberhänsli, H., Wilkes, H. (2014): Biocoenosis response to hydrological variability in Southern Africa during the last 84kaBP: A study of lipid biomarkers and compound-specific stable carbon and hydrogen isotopes from the hypersaline Lake Tswaing. - *Global and Planetary Change*, 112, p. 92-104. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.11.004>