Die Erosion des südafrikanischen Hochplateaus

Folgerungen für Tektonik, Klimageschichte und die Nachhaltigkeit der Bodenbewirtschaftung

Samuel Niedermann[1], John Decker[2], Alexandre Kounov[3], Maarten de Wit[4]

[1] *Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

[2] *Department of Geological Sciences, University of Cape Town, Südafrika; jetzt bei: New Zealand Petroleum and Minerals, Wellington, Neuseeland.*

[3] *Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Basel, Schweiz*

[4] *Africa Earth Observatory Network (AEON), Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth, Südafrika*

The South African landscape is characterized by a high plateau bound by an escarpment and passive continental margins. In this study, cosmogenic noble gas nuclides (^{3}He and ^{21}Ne) were applied to constrain erosion rates of quartzite and dolerite surfaces from the arid western to the more humid eastern areas of South Africa. The erosion rates averaged over the last few hundred thousand years are remarkably low, between about 1 and 3 m/Ma, with no obvious relation to climatic differences. This is in stark contrast to rates of tens to >100 m/Ma determined by thermochronology for the Cretaceous, probably reflecting the tectonic activity of that epoch which has largely faded since. A closer look at the data reveals that, contrary to expectations, late Quaternary erosion rates in the east are even lower than in the presently arid west, indicating that the western Karoo area may have experienced more humid climate conditions during northern hemisphere glacial periods. Finally, the fact that estimates of modern soil erosion rates are one to two orders of magnitude higher than the cosmogenic nuclide-based rock weathering rates demonstrates that current land use practices are unsustainable under prevailing tectonic and climatic conditions.

System Erde (2014) 4, 2 | DOI: 10.2312/GFZ.syserde.04.02.5

Die südafrikanische Landschaft ist im Landesinneren geprägt von einem Hochplateau auf über 1000 m Höhe, das über eine Steilstufe, das so genannte „Escarpment“, zu den tiefer gelegenen küstennahen Gebieten abfällt. Solche Landschaftsformen sind typisch für passive Kontinentalränder und kommen z. B. auch in Südamerika oder Australien vor. Ihre Entstehung dürfte mit dem Auseinanderbrechen des Superkontinents Gondwana vor rund 180 Mio. Jahren zusammenhängen. Für die weitere Entwicklung war das Zusammenspiel von tektonischen Hebungs- und Senkungsprozessen sowie von Sedimentation und Erosion von entscheidender Bedeutung. Ein Verständnis dieser Entwicklung setzt daher unter anderem eine bessere Kenntnis der Erosionsgeschichte Südafrikas voraus.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ hat im Rahmen der Forschungskooperation „Inkaba yeAfrica“ mit Südafrika untersucht, wie Erosion und Verwitterung die südafrikanische Landschaft in den letzten paar hunderttausend Jahren im Vergleich zu früheren Perioden der Erdgeschichte geprägt haben. Erosion, insbesondere die chemische Verwitterung von Gestein, hängt nicht nur von den tektonischen, sondern auch von den klimatischen Bedingungen ab und kann daher auch Informationen zur Klimageschichte liefern. Einen klaren Zusammenhang mit dem Klima scheint es nur in tektonisch aktiven Gebieten mit hohem Relief (z. B. Alpen, Himalaya) zu geben, während in tektonisch ruhigen Regionen (z. B. Kongo- und Amazonasbecken) selbst ein sehr feuchtes Klima keine erhöhten Erosionsraten bewirkt. Das tektonisch unauffällige Südafrika mit dem von West nach Ost feuchter werdenden Klima kann wichtige Beiträge zur Klärung dieser Zusammenhänge liefern.

Die dritte Motivation einer Erosionsstudie in Südafrika liegt in der Frage, inwiefern die heute angewandten Bodenbewirtschaftungsmethoden nachhaltig sind. Für eine gleichgewichtige Bodennutzung dürfte der Abtrag an fruchtbarem Boden durch menschliche Tätigkeiten nicht größer sein als die Menge des Bodens, der durch chemische, biologische und physikalische Verwitterung von Gesteinen neu gebildet wird.

Links: Blick vom Barkley-Pass (Ostkap-Provinz) auf die Steilstufe am Rand des südafrikanischen Hochplateaus (Foto: J. Decker, UCT)

Left: View from Barkley Pass (Eastern Cape) to the South African escarpment at the edge of the high plateau

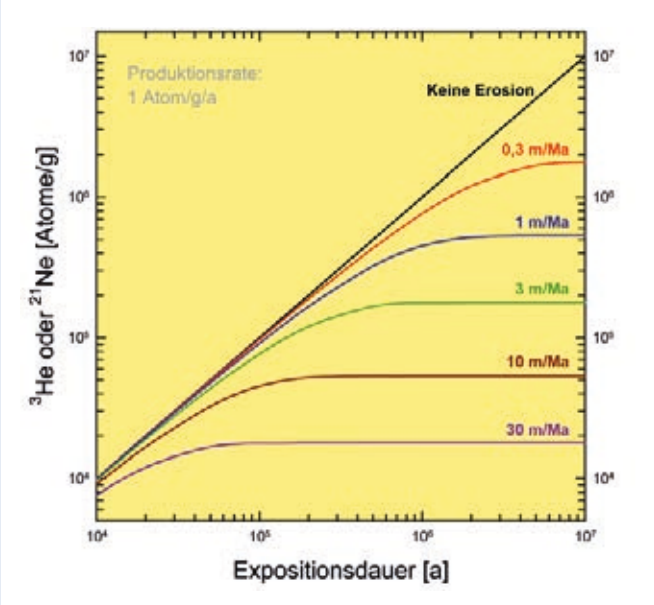

Abb. 1: Abhängigkeit der Konzentration von kosmogenem ^{3}He oder ^{21}Ne von der Expositionsdauer einer Oberfläche bei unterschiedlichen Erosionsraten. Die angenommene Produktionsrate beträgt 1 Atom/g/a; bei höheren Produktionsraten muss die Konzentrationsskala mit dem entsprechenden Faktor multipliziert werden.

Fig. 1: Dependence of the cosmogenic ^{3}He or ^{21}Ne concentration on the exposure duration of a surface at various erosion rates. The assumed production rate is 1 atom/g/a; at higher production rates the concentration scale has to be multiplied by the same factor.

Erosionsratenbestimmung mit kosmogenen Nukliden

Eine quantitative Bestimmung von Erosionsraten ist mit Hilfe der Analyse kosmogener Nuklide möglich (z. B. *Niedermann, 2002; Dunai, 2010*). Kosmogene Nuklide werden in Oberflächengesteinen durch die Einwirkung der kosmischen Strahlung, einer hochenergetischen Partikelstrahlung aus der Milchstraße, vor allem durch so genannte „Spallation“, d. h. Kernzertrümmerung erzeugt. Ein kosmisches Strahlungsteilchen (auf der Erdoberfläche ein sekundäres Neutron) trifft dabei auf einen Atomkern im Kristallgitter (z. B. Silizium) und spaltet einige Protonen und Neutronen davon ab, so dass ein leichterer Kern (z. B. Neon) übrigbleibt. Da Neon und insbesondere das Isotop ^{21}Ne in Gesteinen extrem selten vorkommen, führt eine längere Exposition des Gesteins (über Tausende bis Millionen von Jahren) zu einer messbaren Anreicherung, trotz geringer Produktionsraten

CC BY SA

Kontakt: S. Niedermann
(nied@gfz-potsdam.de)

von wenigen bis maximal einigen Hundert Atomen pro Gramm und Jahr. Damit lässt sich im Prinzip die Expositionsdauer an der Oberfläche bestimmen. Neben den seltenen stabilen Edelgasisotopen ^{3}He und ^{21}Ne, die am GFZ bestimmt werden, eignen sich für solche Untersuchungen auch gewisse langlebige Radionuklide wie ^{10}Be (Halbwertszeit $T_{1/2}$ = 1,387 Mio. Jahre (Ma)), ^{26}Al ($T_{1/2}$ = 0,708 Ma) oder ^{36}Cl ($T_{1/2}$ = 0,301 Ma).

Da die Produktion kosmogener Nuklide mit der Tiefe unter der Oberfläche schnell abnimmt (Halbwertstiefe ~60 cm), hängt ihre Konzentration aber nicht nur von der Bestrahlungsdauer ab, sondern auch davon, wie schnell die Oberfläche erodiert wird. Erosion führt nämlich zum laufenden Verlust der obersten Gesteinsschicht mit der höchsten Konzentration an kosmogenen Nukliden. Je höher die Erosionsrate, desto geringer wird daher – bei gleicher Expositionsdauer – die Konzentration der kosmogenen Nuklide (Abb. 1). In Oberflächen, die seit sehr langer Zeit exponiert sind und gleichzeitig erodiert werden, stellt sich schließlich ein Gleichgewicht zwischen Produktion und Abtragung ein, so dass aus der gemessenen Konzentration eines kosmogenen Nuklids direkt die langfristige Erosionsrate berechnet werden kann.

Probenmaterial

Im Rahmen dreier Expeditionen wurden Oberflächenproben aus verschiedenen Regionen Südafrikas genommen, vom steil abfallenden Escarpment nahe der Westküste über das zentrale Hochplateau bis in die Nähe des östlichen Kontinentalrands (Abb. 2). Zwei typische Lithologien wurden beprobt, nämlich Quarzite der Table Mountain Group und des Cape Fold Belt im Westen sowie Karoo-Dolerite in den zentraleren und östlichen Regionen. Diese Lithologien sind besonders hart und erosionsresistent und sind daher für die Gesamterosion des Hochplateaus bestimmend. Die einzelnen Proben stammen vom Inneren des Hochplateaus, von seinem Rand, dem Escarpment und von Gebieten unterhalb des Haupt-Escarpments. Mehrheitlich wurden horizontale Oberflächen beprobt, in einigen Fällen aber auch geneigte oder vertikale Flächen. Die Probennahmestellen liegen in verschiedenen Klimazonen, von jährlich <200 mm Niederschlag im Westen bis 1000 mm im Osten. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Genauere Beschreibungen der einzelnen Probennahmegebiete und aller Resultate und Interpretationen findet man bei *Kounov et al. (2007, 2014)* und *Decker et al. (2011, 2013)*.

Analytik

Die Gesteinsproben wurden zerkleinert und gesiebt, und aus den Korngrößenfraktionen von 250 bis 500 µm wurden mit Hilfe geeigneter Methoden wie Magnettrennung, Dichtetrennung, Säurebehandlung und Handauslese saubere Quarz- bzw. Pyroxenseparate hergestellt. Proben von 0,5 bis 1,0 g wurden in Aluminiumfolie eingepackt und in das Probenkarussell über dem Ultrahochvakuum-Extraktionsofen des Edelgaslabors gelegt. Dieses wurde etwa eine Woche gepumpt und auf 100 °C

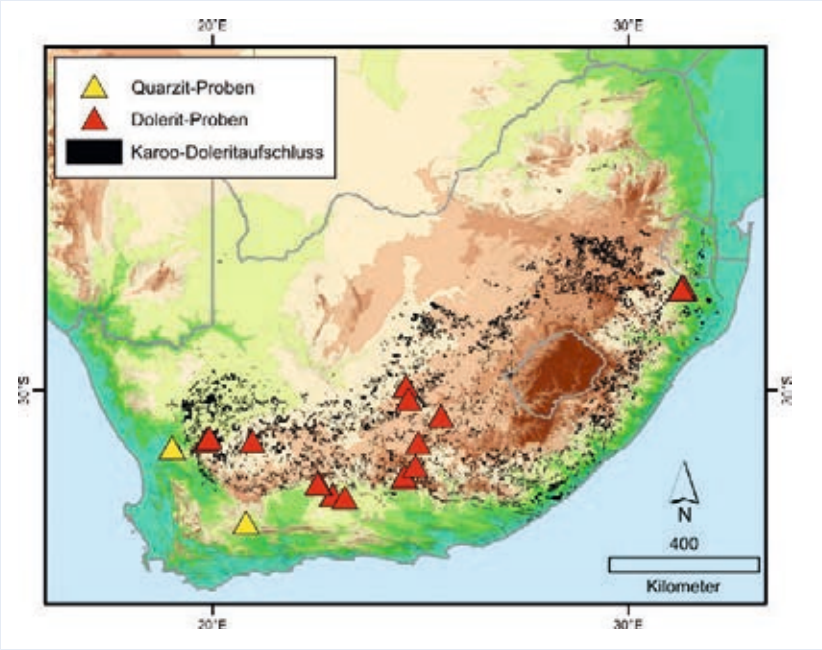

Abb. 2: Karte von Südafrika mit Höhenverteilung (Farbstufen), Auftreten von Doleritaufschlüssen (schwarz) und den Probennahmestellen von Quarziten (gelb) und Doleriten (rot).

Fig. 2: Map of South Africa showing elevation (color shading), dolerite outcrops (black) and sampling locations of quartzite (yellow) and dolerite (red).

System Erde (2014) 4, 2 | DOI: 10.2312/GFZ.syserde.04.02.5

beheizt, um atmosphärische Edelgase von den Kornoberflächen zu entfernen. Die Proben wurden dann im Tantal-Tiegel des Extraktionsofens in mehreren Heizstufen entgast (Quarze: 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1200 °C; Pyroxene: 600 °C, 900 °C und 1750 °C). Die chemisch aktiven Gase (z. B. O_2, N_2, H_2O, CO_2) wurden in einer mit Trockeneis gekühlten Kühlfalle, zwei Titanschwamm-Gettern und zwei ZrAl-Gettern abgetrennt. Anschließend wurden die Edelgase in einem Adsorptionskryostaten bei 11 K (-262 °C) an Aktivkohle ausgefroren und nach stufenweisem Hochheizen einzeln zur Bestimmung der Konzentration und Isotopenzusammensetzung ins Massenspektrometer eingelassen. Eine genauere Beschreibung der Methoden ist in *Niedermann et al. (1997)* zu finden.

Die Konzentrationen C der kosmogenen Nuklide ^{3}He und ^{21}Ne in den untersuchten Proben wurden aus den gemessenen Isotopenzusammensetzungen ermittelt (*Niedermann, 2002*). Mithilfe der bekannten, auf die entsprechende Probennahmestelle skalierten Produktionsrate P (siehe *Niedermann, 2002; Dunai, 2010*), der ebenfalls bekannten Konstante Λ=160 g/cm², die die Verringerung der Produktionsrate mit der Tiefe beschreibt, sowie der Gesteinsdichte (ρ=2,7 g/cm³ für Quarzit bzw. ρ=3,0 g/cm³ für Dolerit) lässt sich die Erosionsrate ε an der entsprechenden Stelle errechnen (z. B. *Niedermann, 2002*):

$$\varepsilon = (P\,\Lambda) / (C\,\rho) \qquad (1)$$

Grundsätzlich handelt es sich um eine maximale Erosionsrate, die nur dann der tatsächlichen Erosionsrate entspricht, wenn die Oberfläche über einen langen (wiederum von der Erosionsrate abhängigen) Zeitraum keinen anderen Prozessen wie etwa Sedimentablagerung, episodischer Abspaltung von Gesteinsblöcken etc. ausgesetzt war. Zumindest für die horizontalen Oberflächen dürften im untersuchten Gebiet die berechneten Erosionsraten den tatsächlichen sehr nahe kommen.

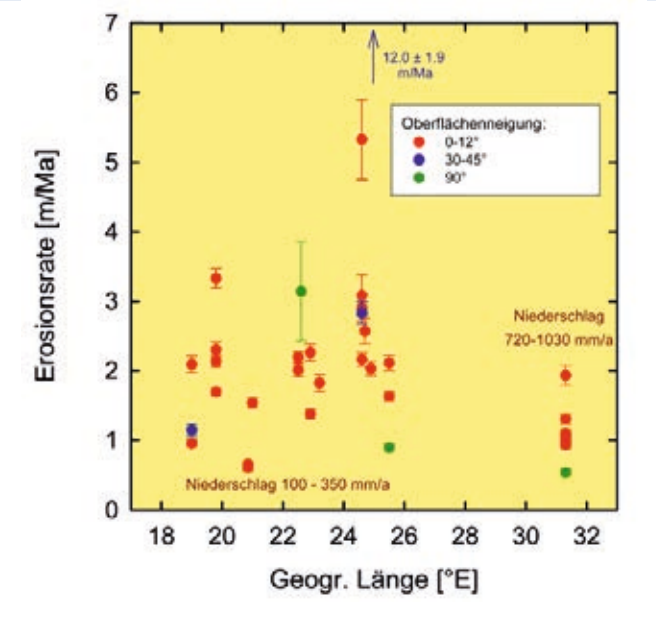

Abb. 3: Für Dolerit- und Quarzitoberflächen bestimmte Erosionsraten auf dem südafrikanischen Hochplateau und angrenzenden Gebieten, aufgetragen gegen die geografische Länge. Unterschiedliche Oberflächenneigungen sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet.

Fig. 3: Erosion rates determined for dolerite and quartzite surfaces on the South African Plateau and in neighboring areas, plotted versus geographic longitude. Different slopes are shown by different colors. Annual precipitation is 100-350 mm/a in the west and 720-1030 mm/a in the east.

Verteilung der Erosionsraten im Untersuchungsgebiet

In Abb. 3 sind die gemessenen Erosionsraten gegen die geografische Länge aufgetragen. Es fällt auf, dass die meisten Werte zwischen etwa 1 und 2 m/Ma liegen und damit im globalen Vergleich sehr gering sind. Erosionraten über 3,5 m/Ma kommen im gesamten Probensatz nur zweimal vor: 5,3 m/Ma bei 24.6°E und ~12 m/Ma bei 24.9°E; der letzte Wert liegt außerhalb der Skala von Abb. 3 und ist daher nicht eingezeichnet. Drei von den sechs Proben mit ≥30° Oberflächenneigung zeigen relativ hohe Werte von 2,8, 3,1 und 12 m/Ma. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Erosion geneigter bzw. vertikaler Oberflächen häufiger als bei horizontalen nicht kontinuierlich abläuft, sondern durch die episodische Abspaltung größerer Blöcke gekennzeichnet ist. Erfolgte eine solche Abspaltung vor relativ kurzer Zeit, wird die nach Gleichung (1) berechnete Erosionsrate überschätzt. Eine Block-Abspaltung kann auch bei horizontalen Oberflächen vorkommen und könnte vielleicht für den zweithöchsten Wert von 5,3 m/Ma verantwortlich sein.

Ein klimatischer Einfluss ist aus den Daten auf den ersten Blick nicht zu erkennen. In den ariden westlichen Gebieten mit Jahresniederschlägen zwischen etwa 100 und 350 mm/a liegen die Erosionsraten im selben Bereich wie im deutlich humideren Einzugsgebiet des Pongola River (~31°E), wo die jährlichen Niederschlagsmengen zwischen 720 und 1030 mm/a betragen. Tendenziell scheinen die Erosionsraten dort sogar eher geringer zu sein. Dies bestätigt die Vermutung, dass die Erosion einer Landschaft bei fehlender tektonischer Aktivität nicht wesentlich vom Klima beeinflusst wird. Ähnlich geringe Erosionsraten wurden mit ^{10}Be auch im Cape Fold Belt nahe der Südküste nachgewiesen (*Scharf et al., 2013*).

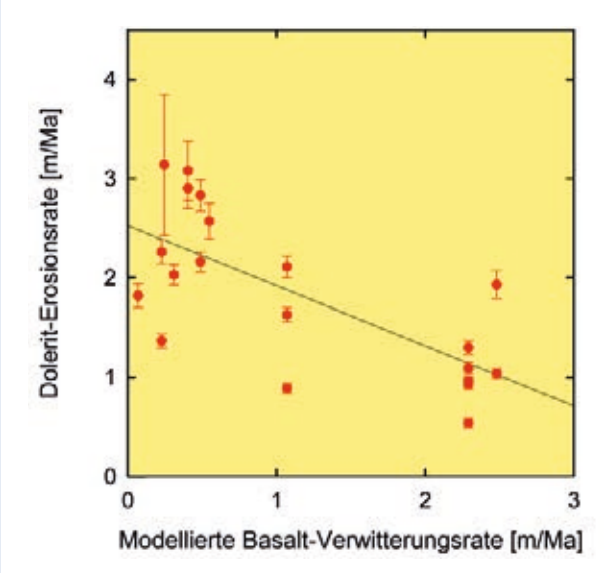

Abb. 4: Dolerit-Erosionsraten aufgetragen gegen modellierte Basalt-Verwitterungsraten nach Dessert et al. (2003). Eine leicht negative Korrelation ist erkennbar (siehe Text).

Fig. 4: Dolerite erosion rates plotted versus modeled basalt weathering rates according to Dessert et al. (2003). A slightly negative correlation is indicated (see text).

Implikationen für Tektonik- und Klimageschichte

Die mit Hilfe der kosmogenen Nuklide bestimmten geringen Erosionsraten stehen im Kontrast zu wesentlich höheren Werten bis >100 m/Ma, die aus thermochronologischen Untersuchungen hervorgehen (z. B. *Tinker et al., 2008; Kounov et al., 2009*). Die Methoden der Thermochronologie (Spaltspurendatierung oder U/Th-He-Datierung) bestimmen, wann sich eine Gesteinsformation in der Erdkruste unter eine bestimmte Temperatur (um 100 °C, abhängig vom untersuchten Mineral) abgekühlt hat. Die Abkühlung erfolgt durch die Abtragung darüber liegender Gesteinsschichten und lässt daher Rückschlüsse auf die Erosionsgeschichte zu. Allerdings liegen die relevanten Zeiträume für Untersuchungen mittels Thermochronologie typischerweise bei 10^7 bis 10^8 Jahren, während kosmogene Nuklide maximal etwa 10^6 Jahre abdecken. Daher können die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Methoden dahingehend interpretiert werden, dass die Abtragung im südlichen Afrika während der Kreidezeit um eine bis zwei Größenordnungen höher war als im Tertiär und insbesondere im Quartär. Vermutlich fand die tektonische Hebung des südafrikanischen Inlandplateaus also gegen Ende des Mesozoikums statt, zu einer Zeit, als auch häufige Kimberlit-Intrusionen und die Eruption des submarinen Agulhas-Plateaus auf verstärkte magmatisch-tektonische Aktivität hindeuten. Seit dem frühen Tertiär scheint diese Aktivität weitgehend abgeklungen zu sein, womit auch die Erosionsraten drastisch zurückgingen.

Obwohl ein direkter Zusammenhang von Erosion und Klima aus Abb. 3 nicht ersichtlich ist, lohnt eine genauere Betrachtung dieses Aspekts. Nach *Dessert et al. (2003)* lässt sich die chemische Verwitterungsrate von Basalt f_w im Einzugsgebiet eines Flusses über dessen jährliche Abflussmenge R_f und die dort herrschende mittlere Jahrestemperatur T abschätzen:

$$f_w = R_f \times 0{,}01841\, e^{0{,}553T} / \rho \qquad (2)$$

(mit f_w in m/Ma, R_f in mm/a, T in °C und $\rho = 3$ g/cm³). Für eine Teilmenge unserer Proben (Dolerite aus *Decker et al., 2013*, ohne Proben mit Verdacht auf Block-Abspaltung) ist in Abb. 4 die modellierte Verwitterungsrate nach Gleichung (2) gegen die auf kosmogenen Nukliden basierende Erosionsrate aufgetragen. Es zeigt sich, dass die modellierten und gemessenen Werte zwar im gleichen Bereich zwischen etwa 0 und 3 m/Ma liegen, die erwartete positive Korrelation ist aber nicht zu erkennen. Vielmehr deutet sich eine leicht negative Korrelation an, wenn auch die Streuung der Daten recht groß ist. Bei der Interpretation ist zu bedenken, dass sich die modellierten Raten auf heutige Klimabedingungen beziehen, während die gemessenen Werte über Zeiträume von mehreren Hunderttausend Jahren mitteln. Genaue Paläoklimadaten aus dem südlichen Afrika fehlen, es gibt aber Hinweise auf deutliche Klimaschwankungen. Insbesondere könnte während der Eiszeiten das heute auf die Kapregion beschränkte Winterregen-Gebiet weiter nach Norden gewandert sein, wodurch möglicherweise die heute ariden westlichen Gebiete mehr Niederschlag bekommen hätten als die östlichen Regionen am Indischen Ozean. Dies könnte die negative Korrelation in Abb. 4 erklären.

Bodenerosion und Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Anbaumethoden

Wenn die mit kosmogenen Nukliden bestimmten Dolerit-Erosionsraten im Wesentlichen durch chemische Verwitterung bestimmt werden und repräsentativ für die Erosion des gesamten südafrikanischen Hochplateaus sind, müssten sie auch die langfristige Rate der Bodenbildung wiedergeben. Es ist daher aufschlussreich, sie mit Schätzungen moderner Bodenerosionsraten zu vergleichen. Die Schätzungen beruhen auf verschiedenen Methoden, insbesondere auf der Sedimentführung von Flüssen (siehe *Decker et al., 2011*), und sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Dennoch liegen alle Schätzungen für die Gebiete unserer Probenlokationen um eine bis zwei Größenordnungen über den Dolerit-Erosionsraten, nämlich zwischen etwa 20 und 300 m/Ma. Auch unter Berücksichtigung der Unsicherheiten lässt sich daher feststellen, dass eine ähnlich hohe Erosion in Südafrika seit der Kreidezeit nicht mehr aufgetreten ist und menschliche Aktivitäten die Landschaft offenbar so stark verändern wie die damalige tektonisch aktive Phase der Hebung des Kalahari-Plateaus (Abb. 5). Unter den gegenwärtigen tektonisch-klimatischen Bedingungen sind daher die derzeit angewandten landwirtschaftlichen Anbaumethoden keineswegs nachhaltig.

System Erde (2014) 4, 2 | DOI: 10.2312/GFZ.syserde.04.02.5

Abb. 5: Dieses Bild aus dem östlichen Probennahmegebiet zeigt verstärkte Bodenerosion, vermutlich als Folge heutiger Landbaumethoden. Im Hintergrund ist ein Dolerit-Sandstein-Felsmassiv zu sehen. (Foto: J. Decker, UCT)

Fig. 5: This picture from the eastern sampling area shows enhanced soil erosion, probably due to present land use practices. A dolerite-sandstone cliff is visible in the background.

Zusammenfassung und Ausblick

Unsere Untersuchung hat gezeigt, dass die südafrikanische Landschaft seit mindestens mehreren Hunderttausend Jahren durch außerordentlich geringe Erosionsraten im Bereich von etwa 1 bis 3 m/Ma geprägt war. Dies hängt mit der tektonischen Stabilität der Region zusammen. Dennoch gibt es Hinweise, dass auch wechselnde klimatische Verhältnisse in der Vergangenheit einen Einfluss auf die Erosion ausgeübt haben. Die gegenwärtig verbreiteten landwirtschaftlichen Anbaumethoden in Südafrika beschleunigen die Bodenerosion deutlich und sind daher nicht als nachhaltig anzusehen.

Das Zusammenspiel von Klima und Tektonik soll auch weiter nördlich untersucht werden, wo ein neu anlaufendes Projekt unter GFZ-Beteiligung die Entwicklung der westnamibischen Flusssysteme seit dem Eozän erforschen wird. Die Ergebnisse werden zusammen mit den hier vorgestellten zu einem besseren Verständnis der Landschaftsentwicklung im Süden Afrikas beitragen.

Literatur

Decker, J. E., Niedermann, S., de Wit, M. J. (2011): Soil erosion rates in South Africa compared with cosmogenic ^{3}He-based rates of soil production. - South African Journal of Geology, 114, 3-4, p. 475-488. DOI: http://doi.org/10.2113/gssajg.114.3-4.475

Decker, J. E., Niedermann, S., de Wit, M. J. (2013): Climatically influenced denudation rates of the southern African plateau: Clues to solving a geomorphic paradox. - Geomorphology, 190, p. 48-60. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.007

Dessert, C., Dupré, B., Gaillardet, J., François, L. M., Allègre, C. J. (2003): Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. – Chemical Geology, 202, 3-4, p. 257-273. DOI: http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.10.001

Dunai, T. J. (2010): Cosmogenic nuclides: Principles, concepts and applications in the Earth surface sciences, Cambridge [u.a.]: Cambridge University Press, 187 p.

Kounov, A., Niedermann, S., Viola, G., Andreoli, M., Erzinger, J. (2007): Present denudation rates at selected sections of the South African escarpment and the elevated continental interior based on cosmogenic ^{3}He and ^{21}Ne. - South African Journal of Geology, 110, 2-3, p. 235-248. DOI: http://doi.org/10.2113/gssajg.110.2-3.235

Kounov, A., Niedermann, S., de Wit, M. J., Codilean, A. T., Viola, G., Andreoli, M., Christl, M. (2014, accepted): Cosmogenic ^{21}Ne and ^{10}Be reveal more than 2 Ma old alluvial fan flanking the Cape Mountains, South Africa. - South African Journal of Geology.

Kounov, A., Viola, G., de Wit, M., Andreoli, M. A. G. (2009): Denudation along the Atlantic passive margin: new insights from apatite fission track analysis on the western coast of South Africa. - In: Lisker, F., Ventura, B., Glasmacher, U. A. (Eds.), Thermochronological Methods: From Palaeotemperature Constraints to Landscape Evolution Models, (Geological Society Special Publications; 324), London: The Geological Society, p. 287-306. DOI: http://doi.org/ 10.1144/SP324.19

Niedermann, S. (2002): Cosmic-ray-produced noble gases in terrestrial rocks: dating tools for surface processes. - In: Porcelli, D., Ballentine, C. J., Wieler, R. (Eds.), Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry, (Reviews in Mineralogy and Geochemistry; 47), Mineralogical Society of America; Geochemical Society, p. 731-784.

Niedermann, S., Bach, W., Erzinger, J. (1997): Noble gas evidence for a lower mantle component in MORBs from the southern East Pacific Rise: Decoupling of helium and neon isotope systematics. - Geochimica et Cosmochimica Acta, 61, 13, p. 2697-2715. DOI: http://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00102-6

Scharf, T. E., Codilean, A. T., de Wit, M., Jansen, J. D., Kubik, P. W. (2013): Strong rocks sustain ancient postorogenic topography in southern Africa. - Geology, 41, 3, p. 331-334. DOI: http://doi.org/10.1130/G33806.1

Tinker, J., de Wit, M. J., Brown, R. (2008): Mesozoic exhumation of the southern Cape, South Africa, quantified using apatite fission track thermochronology. - Tectonophysics, 455, 1-4, p. 77-93. DOI: http://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.10.009