

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 58 (2017)
Heft: 3

Artikel: Kohlenstoffkreislauf und Landschaftswandel in der Grossen Karoo : eine methodologische Betrachtung
Autor: Krenz, J. / Kuhn, N. J. / Kuhn, B. / Greenwood, P. / Heckrath, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088146>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Kohlenstoffkreislauf und Landschaftswandel in der Grossen Karoo – eine methodologische Betrachtung

J. Krenz, N.J. Kuhn, B. Kuhn, P. Greenwood und G. Heckrath

Zusammenfassung

Landschaftsökologische Studien sind material- und zeitaufwändig und können nur jeweils repräsentative Ausschnitte der Erdoberfläche umfassen. Dort müssen systematisch Daten erhoben werden, die zum Verständnis des biogeochemischen Systemverhaltens beitragen und die im Anschluss eine Übertragung in die Region und idealerweise in den globalen Kontext ermöglichen. Die vorliegende Studie zeigt die Anwendung geographischer Theoriekonzepte in der Untersuchung der Folgen von Landdegradierung in Savannen auf den lokalen Kohlenstoffkreislauf und der Übertragung der Ergebnisse auf eine ökozonale Ebene.

1 Einleitung

Zwei Drittel der landwirtschaftlichen Nutzfläche auf der Erde sind nicht für Ackerbau geeignet. 29 % davon sind sogenannte “Rangelands”, Flächen, die aufgrund von Trockenheit oder niedrigen Temperaturen, oder beidem, eine relativ geringe Produktivität aufweisen und nur als Weideland genutzt werden können (Thornton et al. 2002). Als Folge – besonders von Überweidung – sind viele Rangelands degradiert (Dregne & Chou 1992; Oldeman et al. 1991). Aufgrund der topographischen und klimatischen Verhältnisse geschieht dies häufig durch Erosion durch Wasser. Allerdings sind relativ zu ihrer Ausdehnung und ökologischen Vielfalt nur wenige Daten für eine Bestimmung der Ursachen und Folgen sowie der Raten von Bodenerosion verfügbar (Doetterl et al. 2012). Aufgrund ihrer grossen Ausdehnung sind Rangelands trotz ihrer im globalen Vergleich geringen Biomasse für den Kohlenstoffkreislauf von Bedeutung (Reid et al. 2004). Das Wirkungsgefüge, das den Kohlenstoffhaushalt in Rangelands bestimmt, unterscheidet sich dabei von anderen Regionen, wie zum Beispiel Ackerflächen. Ein wesentlicher Unterschied ist der Nährstoffhaushalt: Auf intensiv genutzten Ackerflächen wird durch Düngung der Verlust von Nährstoffen ausgeglichen, auf extensiv genutzten Weideflächen nicht. Wenn Erosion organische Substanz und die

Adresse der Autoren: Juliane Krenz, Nikolaus J. Kuhn, Brigitte Kuhn und Philip Greenwood, Physiogeographie und Umweltwandel, Department Umweltwissenschaften, Universität Basel, Klingelbergstrasse 27, CH-4056 Basel; Email: Juliane.Krenz@unibas.ch; Goswin Heckrath, Department of Agroecology, Aarhus University, Blichers Allé 20, Postboks 50, DK-8830 Tjele

darin enthaltenen Nährstoffe abspült, sinkt die Produktivität des Bodens. Gleichzeitig wird weniger Kohlendioxid aus der Atmosphäre in den Boden durch Photosynthese aufgenommen und der im Boden gespeicherte Kohlenstoff nimmt ab. Das erodierte Bodenmaterial, einschliesslich organischer Substanz, wird in Senken verlagert, beispielsweise Kolluvien am Fuss von Hängen, Flussauen oder ultimativ die Ozeane. Dort ist es ganz oder teilweise für längere Zeiträume von einem Austausch mit der Atmosphäre ausgeschlossen. Bodenerosion führt also zu einer Verlagerung von Kohlenstoff aus dem relativ dynamischen Speicher im Boden in stabile Senken. Wenn durch Düngung die Produktivität der Böden erhalten wird, führt Erosion so zu einem Entzug von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (*Berhe et al. 2007; Stallard 1998; Van Oost et al. 2007*). Findet jedoch keine Düngung statt oder ein starker Verlust an Substrat und somit Produktivität der Böden, sinkt die Menge organischer Substanz im Bodenspeicher. Dieser zweite Vorgang ist in Rangelands weit verbreitet. Die Degradierung von Rangelands im 20. Jahrhundert lässt ausserdem vermuten, dass dort möglicherweise kurzfristig eine Senke für atmosphärisches Kohlendioxid existierte, die sich jedoch als Folge von Degradierung geschlossen hat. Aufgrund der potentiellen Bedeutung von Rangelands für den Kohlenstoffkreislauf und ihrer bisher ungeklärten Kohlenstoffbilanz ist es notwendig, dort die aktuelle und rezente Umverteilung von organischer Substanz durch Erosion im Detail zu untersuchen. Ziel der vorgestellten Arbeit im Trockengebiet der Karoo in Südafrika ist eine Rekonstruktion der Veränderung des Bodenkohlenstoffspeichers. Die für Rangelands typische heterogene und sich wandelnde Landschaft benötigt dazu einen adäquaten methodologischen Ansatz. Im Folgenden werden zunächst entsprechende theoretische Überlegungen präsentiert, dann die Arbeiten in einem ausgewählten Einzugsgebiet sowie erste Ergebnisse vorgestellt/dargelegt.

2 Physiogeographie und Umweltwandel

Wissenschaftstheoretisch tendiert Physiogeographie zu einem realistischen Ansatz, also der detaillierten Untersuchung einzelner Räume und einer Übertragung der Ergebnisse auf die nächsthöhere Massstabsebene (*Holden 2017*). Dies erfordert ein systematisches Vorgehen, um sowohl die Auswahl und Untersuchung des Forschungsgebiets wie auch die anschliessende Interpretation der Ergebnisse geowissenschaftlich plausibel zu gestalten. Die kleinsten räumlichen Einheiten, die in der Physiogeographie untersucht werden, sind Tope, oft auch als Geo- oder Ökotope bezeichnet (*Leser & Löffler 2017*). Tope umfassen einheitliche Areale an der Erdoberfläche mit einem einheitlichen Wirkungsgefüge zwischen den vorhandenen Arten, Boden, Atmosphäre und Wasserhaushalt. Ziel physiogeographischer Untersuchungen ist die räumliche Abgrenzung von Topen und das Verständnis für deren internes Wirkungsgefüge (*Mosimann 2016*). Sie sind nicht räumlich isoliert, sondern stehen in einem engen Austausch mit benachbarten Topen. Teilweise lassen sich die Eigenschaften eines Tops nur durch die Nachbarschaft mit einem oder mehreren anderen Topen erklären, beispielsweise als Folge von systematischen Mustern von Oberflächenprozessen. Gruppen von benachbarten und vernetzten Topen lassen sich zu Geosystemen zusammenfassen. Ein quantitatives Verständnis der Wirkungsgefüge der Tope eines Geosystems ermöglicht ein quantitatives Verständnis für das Wirkungsgefüge der Tope untereinander. Dies setzt jedoch ein entsprechend räumlich differenziertes Messprogramm voraus, das Tope und deren Zusammenwirken erfasst. Ein zweites wesentliches Ziel der physiogeographischen Erforschung von Umweltwandel ist die systematische Untersuchung von Topen und Geosystemen, speziell dem Schaffen eines funktionalen, quantitativen Verständnisses.

Aus praktischen Erwägungen ist die Anzahl an detaillierten Studien von Topen und Geosystemen beschränkt. Daher müssen ähnliche, benachbarte Geosysteme zu grösseren Flächen verknüpft werden. Die Identifikation von Räumen mit ähnlichen Mustern an Eigenschaften der Erdoberfläche ist traditionell die Kernaufgabe der Physiogeographie. Ziel war hier v. a., Landschaftsräume auf Basis der sichtbaren Unterschiede zu erfassen und darzustellen. Die Integration von Wirkungsgefügen in diese Aufgabe erfordert die Suche nach räumlichen Kovarianzen zwischen Unterschieden an der Erdoberfläche, in der Fläche zu messenden Grössen und dem Wirkungsgefüge in ausgewählten Topen und Geosystemen. Eine gute räumliche Kovarianz ermöglicht die Abgrenzung von Regionen, die nicht nur ähnliche Eigenschaften, sondern ein ähnliches Verhalten im geosphärischen Sinn zeigen. Im Kontext der Erforschung von Stoffkreisläufen stellen Regionen somit eine Gruppe von ähnlichen benachbarten Geosystemen dar. Methodologisch ist dieser Schritt eine Extrapolation der in einzelnen Geosystemen gewonnenen Erkenntnisse auf eine Fläche für die diese Erkenntnisse gelten, also im Fall des Zusammenwirkens von Klima und Boden ein Raum mit ähnlichem Verhalten im Stoffaustausch zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre. Für globale Betrachtungen können Regionen mit ähnlichen Eigenschaften und Stoffflüssen zu Zonen zusammengefasst werden.

Diese theoretischen Betrachtungen zeigen, dass eine Untersuchung der Folgen von Landdegradierung in Rangelands auf den globalen Kohlenstoffkreislauf in drei wesentliche Arbeitsschritte unterteilt werden kann: erstens die Untersuchung von Topen und Geosystemen in einem ausgewählten Arbeitsgebiet und zweitens die Identifikation der Region, die ein ähnliches Verhalten zeigt wie das untersuchte Geosystem und schliesslich drittens eine Übertragung der Ergebnisse in einen globalen biogeochemischen Kontext. Diese Untersuchung und Gliederung der Erdoberfläche stellt einen wesentlichen Beitrag der Physiogeographie zur Erforschung des Systems Erde dar. Wichtig ist dabei die Trennung zwischen Raumeinheiten, für die ein quantitativ-funktionales Verständnis existiert (Tope und Geosysteme), und solche, die auf Basis von ausgewählten Kovarianzen und Parametern als im Sinne der Fragestellung “ähnlich” betrachtet werden (Regionen und Zonen).

3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst das Einzugsgebiet eines versandeten Reservoirs und ist Teil der südafrikanischen Karoo, einer zergliederten Landschaft aus Ebenen und abgeflachten Gebirgsketten, die etwa 30 % der Fläche Südafrikas einnimmt. Es befindet sich innerhalb des Klein See-koei Flussbeckens, welches den Orange River speist, und liegt etwa 70 km nördlich der Stadt Graff-Reinett. Es erstreckt sich über eine Höhe von 1650 m bis hin zu 2502 m (Compassberg) und eine Fläche von etwa 35 km². Aufgrund der Höhenlage ist es generell feuchter als das umliegende Tiefland. Die jährlichen Niederschlagsraten liegen bei etwa bei 460 mm, weisen jedoch eine starke zwischenjährliche Variabilität auf; Sommer (Oktober–März) ist die regenreichste Zeit (*Keay-Bright & Boardman* 2006, 2007). Die Karoo bietet mit ihrer jungen landwirtschaftlichen Nutzung und zahlreichen Sedimentarchiven eine gute Möglichkeit, den Landschaftswandel zu untersuchen. Erst im 18. Jahrhundert begann eine landwirtschaftliche Nutzung, vorrangig mit Schaf- und Viehzucht sowie Alfalfa und gelegentlich Weizen (*Boardman & Foster* 2008). Die Produktivität der Landwirtschaft nahm zu und erreichte in den 1920er Jahren ihren Höhepunkt mit Besatzdichten von 20 LSU pro 100 ha und war somit zwei- bis dreimal höher als heute (*Boardman et al.* 2003). Mit der Veränderung der Niederschlagsverhältnisse wurden zahlreiche Dämme errichtet, um in Trockenperioden ausreichend Wasser für Viehzucht und Getreideproduktion zu haben, von denen mittlerweile fast alle mit Sedimenten gefüllt sind. Sie speichern nur noch wenig Wasser,

einige sind durchbrochen, und kürzlich gespeicherte Sedimente tragen nun zum Sedimentaustrag flussabwärts bei (Boardman & Foster 2008). Das abgelagerte Material in den Dämmen ist ein hervorragendes Umweltarchiv, anhand dessen Prozesse der Landnutzungsveränderung analysiert sowie der Kohlenstoffkreislauf innerhalb des Einzugsgebietes rekonstruiert werden können. Die Degradierung der Landschaft zeigt sich besonders an der Entwicklung von Ödland entlang der Hangfussflächen der höheren Lagen und an leicht ansteigenden Hängen holozäner Hangsedimente sowie der Formung von Erosionsrinnen in den Tälern (Boardman et al. 2003). Rillen und Erosionsrinnen dringen häufig bis zum Grundgestein durch und sind teilweise bis zu 5 m tief und 20 m breit.

4 Methoden

Ziel der Forschungsarbeit in der südafrikanischen Karoo ist einerseits die Rekonstruktion des Kohlenstoffkreislaufs in einem typischen Einzugsgebiet der Region. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse auf Landschafts- und geosphärische Massstabebene übertragen werden, um damit die Rolle von Rangelands im globalen Kohlenstoffkreislauf besser zu verstehen. Dazu müssen Daten erhoben werden, die zum Verständnis des biogeochemischen Systemverhaltens beitragen und die im Anschluss eine Übertragung in die Region sowie eine Diskussion der Ergebnisse im globalen Kontext ermöglichen.

Vor Ort erfolgte zunächst eine Kartierung von Strukturen wie z. B. Erosionsspuren, Vegetation und Boden. Diese Kartierung diente der Identifikation von Topen und entsprechenden Beprobungsstandorten. Eine Bodenbeprobung ist wichtig, um durch nachfolgende Laboruntersuchungen die Korngrößenverteilung und Kohlenstoffgehalte der jeweiligen Bodenhorizonte und damit eventuell verbundene Kohlenstoffverluste als Folge von Erosion zu analysieren. Es wurden Bodenprofile gegraben, von denen jeweils für jeden Bodenhorizont Bodenproben genommen und die Lagerungsdichte bestimmt wurde. Zusätzlich wurden für die Untersuchung von Oberflächenprozessen an jedem Standort Oberflächenproben genommen. Um herauszufinden, ob sich die Erosions- und Ablagerungsprozesse innerhalb des Reservoirs im Laufe der Zeit verändert haben, wurden Sedimentschichten eines 4.5 m tiefen Profils in der Nähe eines Dammdurchbruchs beprobt. Abschliessend erfolgte eine Kartierung des Einzugsgebietes mittels eines Unmanned Aerial Vehicle (UAV, "Drohne"). Das damit produzierte hochauflösende Orthophoto diente der Identifikation aller im Arbeitsgebiet vorhandenen Tope und verschafft einen Überblick über deren Zusammenwirken als Geosystem. Weiterhin wurde aus den gewonnenen UAV-Daten ein Höhenmodell (DEM) erstellt, das der Simulation von Stoffflüssen dient.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Topeneinteilung und Charakterisierung

Das generierte Orthophoto (Abb. 1) zeigt, wie zergliedert die Landschaft des Untersuchungsgebietes ist. Mit einer Auflösung von 3.12 x 3.12 cm pro Pixel lassen sich Unterschiede im Bedeckungsgrad des Bodens sowie in der Art der Vegetation erkennen. Großräumige Strukturen, die auch vor Ort bei der Feldbegehung kartiert wurden, sind gut identifizierbar. Dazu gehören z. B. stark degradierte Flächen (Badlands), der ehemalige Staudamm und das dazugehörige versandete Reservoir sowie grössere Erosionsrinnen und das Flussbett. Jedoch ist die Abgrenzung auf dem

Orthophoto einfacher möglich als im Feld. Mit Hilfe des Orthophotos, eines Höhenmodells und der Informationen aus der Feldbegehung wurde das Untersuchungsgebiet in vier grossflächige Tope unterteilt (Tab. 1, Abb. 2): Zonen, in denen vorrangig Ablagerung stattfindet (Top 4), Zonen, die nur leicht degradiert sind und auf denen keine starke Erosion stattfindet (Top 3), und zwei Zonen, die stark degradiert sind (Top 2 und 1), sich aber durch ihre Form und Funktion unterscheiden. Diese beiden Tope stehen stark in Verbindung miteinander. Während Top 1 flächenhaft erodiert ist und dadurch kleinere Erosionsrinnen verbindet, ist Top 2 eher tiefgründig statt flächenhaft erodiert. In diesem Top sind hauptsächlich stark ausgeprägte Erosionsrinnen zu finden, in denen sich erodiertes Material aus Top 1 sammelt und weiter zum Flussbett transportiert wird. Bevor der Damm durchbrach, hat sich der Grossteil des erodierten Materials im Reservoir angesammelt, welches dann zunehmend versandete.

Tab. 1 Charakteristische Merkmale der identifizierten Tope.

Top	Name	Charakterisierung
1	Stark erodiert (Quelle)	Starke flächenhafte Degradierung von Boden und Vegetation, starke Erosion und vermutlich die Hauptsedimentquelle
2	Stark erodiert (Quelle)	Starke Degradierung von Boden und Vegetation, rinnenförmig, vermutlich vorrangig Transport des erodierten Bodenmaterials
3	Leicht erodiert	Leichte Degradierung von Boden und Vegetation, keine starke Erosion
4	Deposition	Deposition, kaum Anzeichen von Degradierung der Vegetation oder des Bodens, keine Erosion

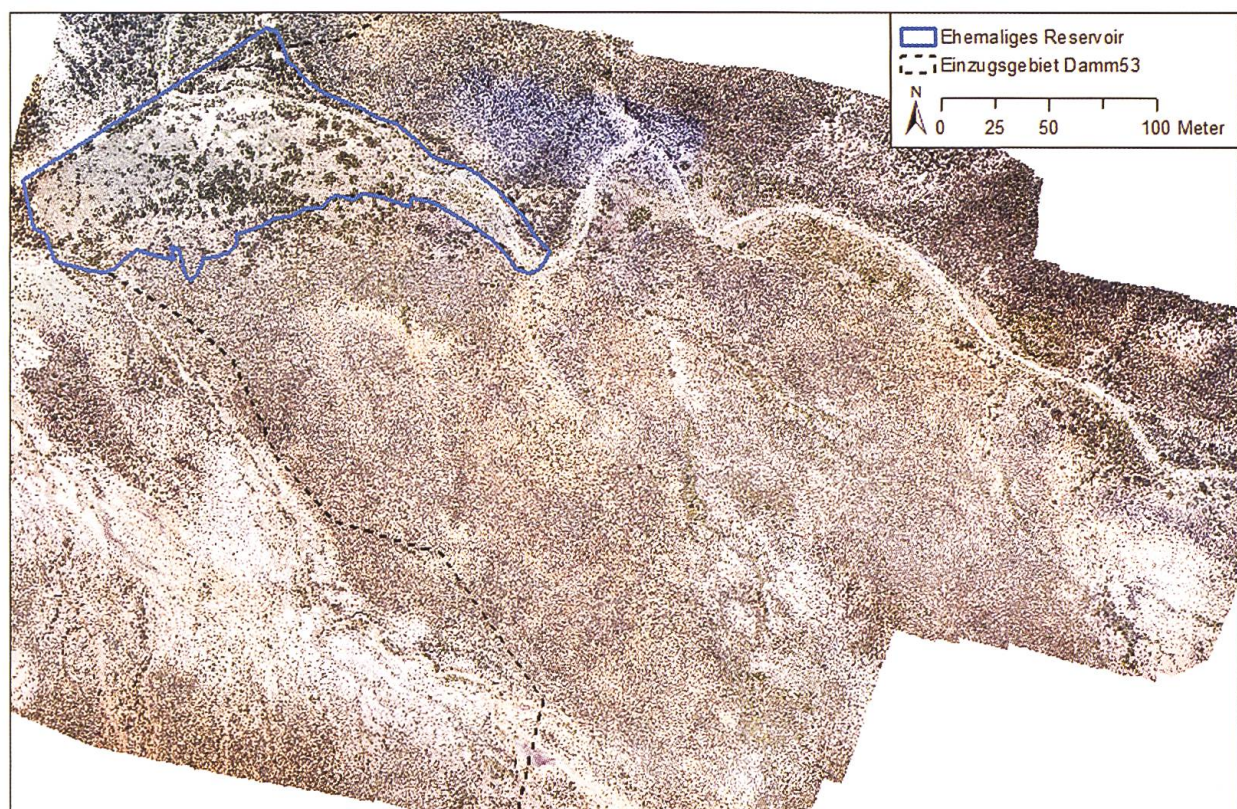


Abb. 1 Orthophoto des Untersuchungsgebietes. Das ehemalige Reservoir sowie der Staudamm und einzelne stark degradierte Flächen sind sehr gut zu erkennen.

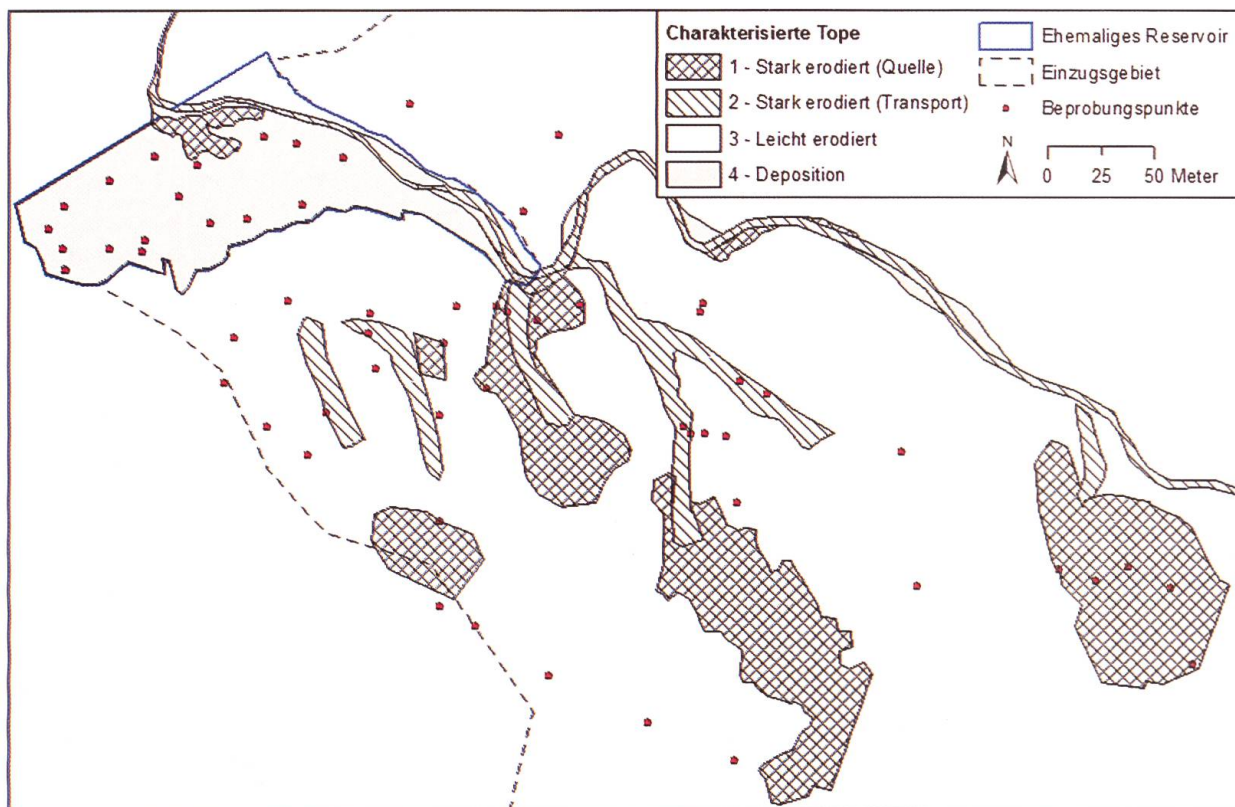


Abb. 2 Schematische Darstellung des Geosystems Damm53 mit den charakterisierten Topen innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Die Laboranalyse der Oberflächenproben zeigt, dass sich der Boden der unterschiedlichen Topen besonders hinsichtlich des organischen Kohlenstoffgehaltes (TOC) unterscheidet (Tab. 2). Während die Mittelwerte der Gehalte an anorganischem Kohlenstoff (TIC) in den identifizierten Topen relativ gleich sind (0.014 bis 0.021 %), ist der TOC-Gehalt im Top 3 (leicht erodiert) mehr als doppelt so hoch wie in Top 1 (stark erodiert). Das bestätigt die Annahme, dass der Kohlenstoffgehalt in degradierten Böden, besonders im Oberboden, abnimmt. Da degradierte Böden meist eine geringere Vegetationsbedeckung besitzen, könnte ein verminderter Streueintrag zu niedrigeren TOC-Gehalten im Oberboden führen. Auch die Bodenproben in der Depositionszone (Top 4) besitzen geringe TOC-Anteile. Das weist darauf hin, dass das im Reservoir abgelagerte Material vermutlich aus den stark erodierten Bereichen stammt.

Tab. 2 Ausgewählte physicochemische Eigenschaften der Oberflächenbodens der charakterisierten Topen. Die Topen 1–3 wurden jeweils direkt an der Oberfläche beprobt, wohingegen Proben in Top 4 in 50 cm Tiefe genommen wurden. Mit Ausnahme der Probenanzahl (N) sind alle Angaben in [%].

		N	TOC	TIC	Total C	Clay	Silt	Sand
1	Stark erodiert (Quelle)	11	0.48 ± 0.36	0.014 ± 0.003	0.49 ± 0.36	6.67 ± 2.87	27.54 ± 7.35	65.80 ± 9.90
2	Stark erodiert (Transport)	7	0.62 ± 0.20	0.016 ± 0.004	0.63 ± 0.20	9.81 ± 4.32	35.76 ± 10.59	54.43 ± 14.48
3	Leicht erodiert	24	1.02 ± 0.65	0.021 ± 0.008	1.04 ± 0.65	6.91 ± 2.35	33.06 ± 6.40	60.04 ± 8.08
4	Deposition	19	0.48 ± 0.37	0.017 ± 0.08	0.50 ± 0.38	7.12 ± 5.25	33.65 ± 19.33	59.23 ± 24.44

5.2 Sedimentanalyse

Die Sedimentanalyse des Dammpfils zeigt einen Trend zu höheren Gehalten an organischem Bodenkohlenstoff (TOC) mit zunehmender Tiefe bei relativ konstanter Partikelgrösse (Abb. 3). Das heisst, die ältesten abgelagerten Sedimente haben einen grösseren Bodenkohlenstoffanteil als die jüngeren. Es wird vermutet, dass sich der TOC-Gehalt des Ausgangsmaterials verändert hat. Dies könnte einerseits darauf hinweisen, dass sich das Einzugsgebiet, in dem Erosion stattfindet, geändert hat, andererseits könnte es auch ein Anzeichen für die fortschreitende Bodendegradierung sein.

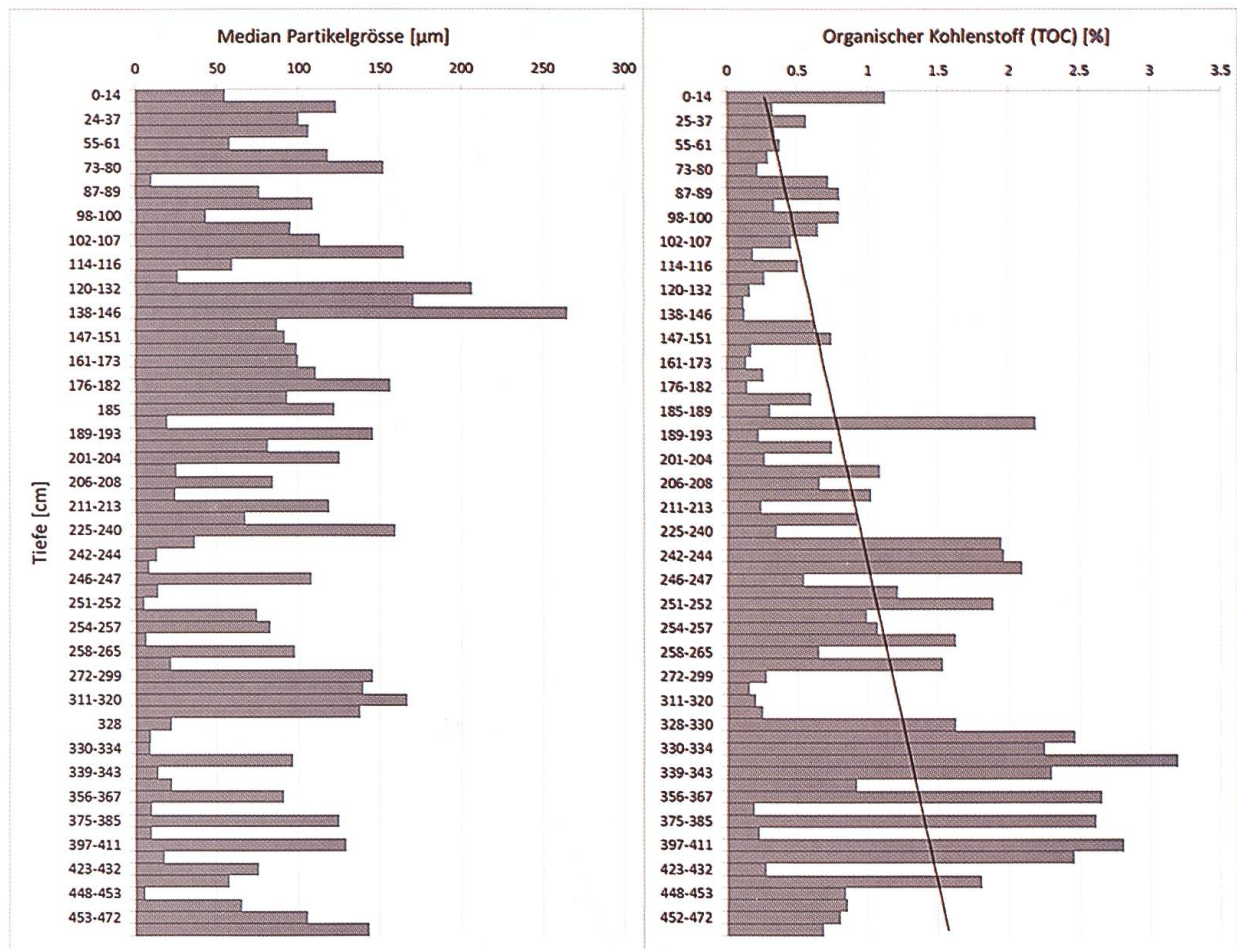


Abb. 3 Partikelgrösse (Median) und organischer Kohlenstoff(%) im abgelagerten Material am versandeten Dam53; Ergebnisse der ersten Erkundungsexkursion von Prof. Dr. Kuhn und Dr. Greenwood 2014. Der Anstieg des organischen Kohlenstoffes mit zunehmender Tiefe lässt vermuten, dass Landdegradierung während und nach der Besiedlung zu verstärkter Erosion geführt hat.

6 Fazit

Die Ergebnisse zeigen, wie Tope in einem Geosystem zusammenwirken. Dieser theoretische Ansatz praktisch umgesetzt, legt die Grundlage für eine prozessbasierte Modellierung der Erosion, einschliesslich des Stoffkreislaufes wichtiger Elemente wie C, N und P. Die Analyse der Sedimentarchive dient dabei als wichtige Kontrolle der Plausibilität der Ergebnisse, insbesondere hinsichtlich des Zusammenspiels des Wirkungsgefüges. Auf dieser Basis kann eine Extrapolation auf topographisch und klimatisch ähnlichen Flächen in der Karoo erfolgen. Weiterhin könnten diese Ergebnisse mit anderen Grasländern verglichen und auf eine geosphärische Dimension skaliert werden. Hauptunterschied dieses Ansatzes ist die strikte Betrachtung des Systemzusammenhangs auf topischer und Geosystemebene (Leser & Löffler 2017) und darüber hinaus eine Aufskalierung, die eine klare Verknüpfung zwischen Systemfunktion und räumlicher Kovarianz zeigt. Die Interpretation von Landschaftssystemtheorie mit klassischem geographischem Vorgehen sichert so eine adäquate Erfassung und Darstellung des Landschaftshaushaltes in grossskaligen Simulationen von Umweltwandel. Sie dient aber auch dazu, in kleinräumigem Massstab präzise das Wirken des Menschen zu bewerten.

Literatur

- Berhe A.A., Harte J., Harden J.W. & Torn M.S. 2007. The Significance of the Erosion-induced Terrestrial Carbon Sink. *BioScience* 57, 337–346. doi: 10.1641/B570408
- Boardman J. & Foster I. 2008. Badland and gully erosion in the Karoo, South Africa. *J. Soil Water Conserv.* 63, 121A–125A. doi: 10.2489/jswc.63.4.121A
- Boardman J., Parsons A.J., Holland R., Holmes P.J. & Washington R. 2003. Development of badlands and gullies in the Sneeuwberg, Great Karoo, South Africa. *CATENA, Gully Erosion and Global Change* 50, 165–184. doi: 10.1016/S0341-8162(02)00144-3
- Dregne H.E. & Chou N.-T. 1992. Global desertification dimensions and costs. *Degrad. Restor. Arid Lands*, 73–92.
- Doetterl S., Van Oost K. & Six J. 2012. Towards constraining the magnitude of global agricultural sediment and soil organic carbon fluxes. *Earth Surf. Process. Landf.* 37, 642–655. doi:10.1002/esp.3198
- Holden J. 2017. *An introduction to physical geography and the environment*, 4. ed. London, 1–840.
- Keay-Bright J. & Boardman J. 2006. Changes in the distribution of degraded land over time in the central Karoo, South Africa. *Catena* 67, 1–14. doi:10.1016/j.catena.2005.12.003
- Keay-Bright J. & Boardman J. 2007. The influence of land management on soil erosion in the sneeuwberg mountains, central Karoo, South Africa. *Land Degrad. Dev.* 18, 423–439. doi:10.1002/ldr.785
- Leser H. & Löffler J. 2017. *Landschaftsökologie*, 5. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart, 1–414.
- Mosimann T. 2016. Einführung in die Landschaftsökologie: der ökologische Blick auf die Landschaft. In: Gebhardt H., Glaser R., Radtke U., Reuber P. & Meyer S. (Hrsg.): *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. Berlin, 606–638.
- Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A. & Sombroek W.G. 1991. Global assessment of human-induced soil degradation (GLASOD). World Map Status Hum.-Induc. Soil Degrad. Wageningen. Neth. Winand Star. Centre-ISSSFAO-ITC.
- Reid R.S., Thornton P.K., McCrabb G.J., Kruska R.L., Atieno F. & Jones P.G. 2004. Is it possible to mitigate greenhouse gas emissions in pastoral ecosystems of the tropics? In: Wassmann R. (Hrsg.): *Tropical Agriculture in Transition – Opportunities for Mitigating Greenhouse Gas Emissions?* Berlin, 91–109.
- Stallard R.F. 1998. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Glob. Biogeochem. Cycles* 12, 231–257. doi:10.1029/98GB00741
- Thornton P.K., Kruska R.L., Henninger N., Kristjansson P., Reid R.S., Atieno F., Odero A.N. & Ndegwa T. 2002. Mapping poverty and livestock in the developing world. *ILRI*, 1–118.
- Van Oost K., Quine T.A., Govers G., Gryze S.D., Six J., Harden J.W., Ritchie J.C., McCarty G.W., Heckrath G., Kosmas C., Giraldez J.V., Silva J.R.M. da & Merckx R. 2007. The Impact of Agricultural Soil Erosion on the Global Carbon Cycle. *Science* 318, 626–629. Doi:10.1126/science. 1145724