REGIO BASILIENSIS 63/1 2022 S. 55-63

Physiogeographie und Umweltwandel – vom Prozess zum Planeten

Nikolaus J. Kuhn, Wolfgang Fister und Heleen Vos
Forschungsgruppe Physiogeographie und Umweltwandel, Uni Basel

Zusammenfassung
Die Physiogeographie befasst sich traditionell mit den natürlichen und quasi natürlichen Eigenschaften und Prozessen an der Erdoberfläche und versucht, diese zu einheitlichen Landschaften zu gruppieren. Lokaler und globaler Umweltwandel fügen dieser Aufgabe den Blick auf die zukünftige Entwicklung einzelner geographischer Räume, deren Bedeutung für die Nutzung durch die Menschen sowie ihre Wirkung auf die Stabilität des Systems Erde hinzu. Dazu muss Detailwissen zu Umweltwandel erarbeitet und in den Raum übertragen werden. Am Beispiel von Staubemissionen im südlichen Afrika wird diese Verknüpfung von Prozess und Planet als zentrale Aufgabe der Physiogeographie im 21. Jahrhundert erläutert.

1 Einleitung: Physiogeographie und Umweltwandel

Peter Haggett beschrieb die Geographie mit "Geography is what geographers do" (*Haggett* 1972). Seine etwas saloppe Aussage beschreibt die Geographie als eine Disziplin, deren Identität sich insbesondere aus ihrer wissenschaftlichen Arbeit ergibt. Dementsprechend zeigen gängige Definitionen von Physiogeographie auch eine Balance zwischen dem Studienobjekt Erdoberfläche einerseits und den Aufgaben, welche sich Geographinnen und Geographen bei dessen Erforschung stellen.

In einer Zeit, die von globalem Umweltwandel geprägt ist, hat die Physiogeographie dabei ein besonderes Spannungsfeld zu lösen. Einerseits versucht sie das Zusammenwirken der Sphären an einem Ort zu erfassen und auf einen Raum zu übertragen, für den dieses individuelle Zusammenwirken gilt; andererseits sollte mit Blick auf die Zukunft des Planeten Erde als Ganzem immer abgewogen werden, ob die Eigenschaften und Prozesse in diesem Raum für planetare biogeochemische Vorgänge von Bedeutung sind. Oder einfacher ausgedrückt, welchen Wert das Produkt aus Prozessraten und Fläche des untersuchten Raums im globalen Vergleich hat. Auf den ersten Blick deutet dieses Spannungsfeld an, dass sich Physiogeographinnen und -geographen nur grossen

Adresse der Autoren und der Autorin: Nikolaus J. Kuhn, Wolfgang Fister, Heleen Vos, Physical Geography and Environmental Change Research Group University of Basel, Klingelbergstr. 27, CH-4056 Basel; E-Mail: nikolaus.kuhn@unibas.ch

Definitionen Physiogeographie

Hartmut Leser, Wörterbuch der Geographie

Physiogeographie ist das Teilgebiet der Geographie, das sich mit abiotischen und biotischen Landschaftshaushaltsfaktoren sowie Geoökofaktoren beschäftigt. Dies geschieht in den Geofaktoren Einzellehren, für das Georelief beispielsweise in der Geomorphologie, aber auch im Gesamtfunktionszusammenhang des Landschaftshaushalts in der Landschaftsökologie oder der Geoökologie. Gegenstand ist sowohl die Kulturlandschaft wie auch die Naturlandschaft in ihrer überwiegend anthropogenen Veränderung.

Wikipedia.de, Zugriff am 22.12.2021

Die Physische Geographie ist der naturwissenschaftliche Ansatz der Geographie und stellt somit neben der Humangeographie einen der beiden wichtigsten Teilbereiche innerhalb der Geographie dar. Sie erfasst, beschreibt und erklärt die Erdoberfläche als ein Gesamtsystem, das sich aus unterschiedlichen Subsystemen zusammensetzt.

Nikolaus J. Kuhn, Einführung in die Physiogeographie, Vorlesung System Erde, Uni Basel

Die Physiogeographie erfasst, beschreibt und erklärt die natürlichen und von Menschen beeinflussten Eigenschaften und Entwicklungen der Erdoberfläche als Gesamtsystem. Die Erdoberfläche setzt sich aus den Subsystemen der bodennahen Atmosphäre, den Gesteinen, Landformen Prozesse der festen Erdoberfläche, der Hydros- und Cryosphäre, der Biosphäre einschliesslich des Bodens, sowie den von den Menschen gestalteten Räumen der Anthroposphäre zusammen.

Räumen und dort Prozessen, die schnell die Erdoberfläche verändern, widmen sollten. Dies würde jedoch zu einer starken geographischen Generalisierung führen. Ausserdem würde es das Risiko mit sich bringen, dass Prozesse vereinfacht und gegebenenfalls auf falschen Skalenniveaus modelliert werden. Die Verringerung von Erosionsraten mit zunehmender räumlicher Auflösung der Simulation in globalen Modellen (*Borelli* et al. 2017) illustriert diese Problematik. Prozessstudien auf einer kleinen Skala bleiben daher von wesentlicher Bedeutung für den Beitrag, den physiogeographische Forschung zu den Ursachen und Folgen von globalen Veränderungen leisten kann. Das Ziel der Arbeit der Forschungsgruppe Physiogeographie und Umweltwandel ist es daher, das Verständnis für biogeochemische Prozesse an der Erdoberfläche mit deren Bedeutung für globalen Umweltwandel des Planeten Erde zu verknüpfen. In den folgenden Abschnitten dieses Beitrags wird die Vernetzung von Prozessstudien mit Daten aus der Fernerkundung, als Beispiel für den Versuch diesem Anspruch der Physiogeographie gerecht zu werden, dargestellt.

2 Staubemissionen im südlichen Afrika

Erosion durch Wind bewegt jährlich bis 5'000 Tg Staubpartikel mit einer Grösse von bis zu 20 Mikrometern in die Atmosphäre der Erde (*Kok* et al. 2021a). Der überwiegende Teil dieses Staubs wird auf Flächen mobilisiert, die nicht von Vegetation bedeckt sind (*Kok* et al. 2021b). Dementsprechend ist die Sahara die Region mit der grössten Staubemission in die Atmosphäre, gefolgt vom Mittleren Osten und Zentralasien. Diese Staubquellen sind alle aufgrund der in den jeweiligen Räumen herrschenden klimatischen Bedingungen, also aufgrund natürlicher Ursachen, weitgehend vegetationsfrei. In zunehmendem Mass wird jedoch auch auf anderen Flächen Staub produziert. Neben Feuern, die feine Rauchpartikel in die Atmosphäre freisetzen, sind dies insbesondere landwirtschaftliche Nutzflächen, die saisonal ohne Vegetationsbedeckung sind und bei tro-

ckenen und windigen Witterungsbedingungen Staub in die Atmosphäre freisetzen (*Chen* et al. 2018). Im südlichen Afrika können diese beiden Staubquellen in Satellitendaten identifiziert werden (*Eckardt* et al. 2020). Im Westen und Norden dominieren die natürlichen Quellen, insbesondere Namib und die Salzpfannen von Etoscha und Botswa. In Südafrika hingegen werden regelmässig Staubwolken beobachtet, die in den Savannen der Provinz Free State entstehen (Abb. 1). Dort schützt die natürliche Vegetation weitgehend den Boden. Ausnahme sind allenfalls die Folge von Bränden, welche temporär die Vegetation und damit den Erosionsschutz zerstören. Eine Auswertung von Daten des Spinning Enhanced Visible and Infra-red Imager (SEVIRI) an Bord der Meteosat Second Generation Wetterbeobachtungssatelliten von 2006 bis 2016 zeigte, dass sich das Gebiet, von dem am häufigsten Staubemissionen ausgehen, in der Region um die Stadt Bultfontein im Free State befindet. Die Emissionsereignisse häufen sich im Winterhalbjahr, schwanken allerdings stark von Jahr zu Jahr (Abb. 2). Da die natürlichen Savannen im Nordosten Südafrikas wesentlich grösser sind als das Ursprungsgebiet der Staubwolken, deutet die Häufung in der Region um Bultfontein an, dass die Landnutzung die Ursache für die Staubemissionen ist. Tatsächlich hat sich in den letzten Jahrzehnten in der Region um Bultfontein eine intensive ackerbauliche Nutzung des Landes entwickelt. Die an sich nicht sehr fruchtbaren Sandböden bieten jedoch beim Einsatz von Mineraldünger eine gute Grundlage für Ackerbau. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die im Pleistozän eingeblasenen Sande meist nur eine geringe Mächtigkeit haben und auf einer dichten Schicht aus Schiefergestein aufliegen. Diese bildet eine Sperre für die Infiltration, während die relativ tiefe Infiltration in den Sand das Wasser vor Verdunstung schützt und so pflanzenverfügbar hält. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat sich daher ein intensiver kommerzieller Ackerbau auf Farmen mit oft mehreren Tausend Hektaren Grösse entwickelt. Mais ist mit

Abb. 1 Staubsturm in der Nähe von Bultfontein im August 2018. *Foto: N.J. Kuhn*

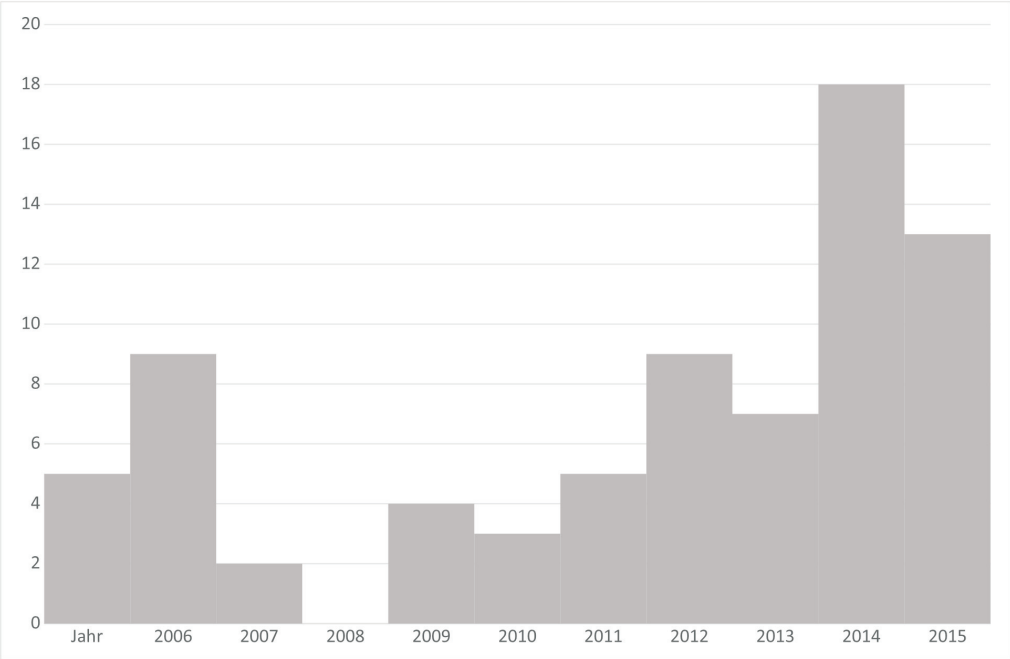

Abb. 2 Staubstürme in den SEVIRI-Daten zwischen 2006 und 2016 (aus *Eckardt* et al. 2020).

einem Anteil von 60 % dabei die am häufigsten angebaute Nutzpflanze, gefolgt vom Sonnenblumen und Soja, ausserdem nehmen Brachflächen insbesondere in trockenen Jahren bis zu 50 % des Ackerlandes ein (*Vos* et al. 2022). Die Nachhaltigkeit dieser Landnutzung ist durch den Verlust des geringen Anteils an feinem Bodenmaterial durch selektive Winderosion gefährdet (*Wiggs & Holmes* 2011). Ausserdem tragen die im Winter häufig von West nach Ost wehenden Winde den Staub in die Region Johannesburg, was dort zu hohen Feinstaubbelastungen in der Luft beiträgt (*Salawu-Rotimi* et al. 2021). Die Bahnen des Staubs sind ausserdem häufig bis über den Indischen Ozean zu verfolgen, was die Frage nach deren Bedeutung für den Nährstoffeintrag in Ozeane aufwirft.

3 Prozesse an der Erdoberfläche

Die grossen Unterschiede in der Anzahl der jährlichen Emissionsereignisse können nicht auf unterschiedliche Windverhältnisse zurückgeführt werden (*Eckardt* et al. 2020, *Vos* et al. 2021), daher liegt die Vermutung nahe, dass die Oberflächenverhältnisse und deren jeweiliger Zustand im Winter für die Emissionen verantwortlich sind. Ziel der Arbeit der Forschungsgruppe Physiogeographie und Umweltwandel im Rahmen des vom Schweizer Nationalfond und des South African Research Council geförderten Projekts *South African cropland dust emission risks: Physical thresholds, environmental and socio-economic impacts* war es daher, die für die Emission von Staub relevanten Eigenschaften der Bodenoberfläche zu identifizieren. Grundsätzlich bestimmen Korngrösse, Kohäsion, Rauigkeit und Bedeckung das Risiko von Winderosion und Staubemission. Korngrössen im feinen sandigen und schluffigen Bereich sind besonders anfällig für Windero-

sion, da die einzelnen Körner nur eine schwache Bindung miteinander eingehen, sie aufgrund ihrer geringen Grösse aber bereits bei relativ niedrigen Windgeschwindigkeiten mobilisiert werden. Grössere Sandkörner benötigen wegen ihrer im Verhältnis zur Angriffsfläche für den Wind grösseren Masse höhere Windgeschwindigkeiten zur Mobilisierung. Feine Schluff- und Tonpartikel hingegen formen Aggregate oder kohäsive Krusten, die ebenfalls erst bei höheren Scherkräften des Windes mobilisiert werden. Feuchte Bodenverhältnisse können ebenfalls die Kohäsion fördern. Im Free State wird Ackerbau vorwiegend auf sandigen Böden betrieben, da diese einen vorteilhaften Wasserhaushalt besitzen. Dennoch können sich Krusten bilden, die bereits nach 10 bis 20 mm Niederschlag die Winderosion signifikant vermindern (*Vos* et al. 2020).

Die Rauigkeit der Bodenoberfläche erhöht ebenfalls den Widerstand gegen Erosion, insbesondere wenn grössere Schollen oder stehende Stoppeln die bodennahe Windgeschwindigkeit stark verringern. Eine Bedeckung des Bodens mit losem Stroh verringert ebenfalls die Schwerkräfte des Windes, die auf den Boden wirken. Ziel der Arbeit im Free State war es daher, die Bedeutung und das Zusammenwirken dieser einzelnen Eigenschaften der Bodenoberfläche zu identifizieren und daraus Empfehlungen für die Verringerung von Staubemissionen für die Landwirtschaft abzugeben.

4 Bedeutung von Oberflächeneigenschaften für Winderosion und Staubemissionen

Im Rahmen eines Work Packages des Projekts So*uth African cropland dust emission risks: Physical thresholds, environmental and socio-economic impacts* wurde das Zusammenwirken von Wind und Bodenoberfläche einerseits für den Zustand des Bodens selbst, andererseits für dessen Bedeckung untersucht. Zunächst wurde die Staubemission für typische Bodenzustände auf Mikroplots mit Hilfe des Portable In-Situ Wind Erosion Laboratory (PI-SWERL) ermittelt. Der PI-SWERL (Abb. 3) besteht aus einer Haube, in der ein Propeller eine laminare, kreisförmige Windströmung erzeugt. Die Geschwindigkeit dieser Strömung kann systematisch erhöht werden. Aus der Haube wird konstant Luft in ein Gerät zur Messung der Staubkonzentration abgesaugt. Die Gegenüberstellung der Drehzahl des PI-SWERL und der Staubkonzentration erlaubt so die Identifikation der Windgeschwindkeit, bei der die Emission von Staub einsetzt. Typische Bodenzustände auf den Ackerflächen des Free State im Winter wurden für die Messungen mit dem PI-SWERL ausgewählt. Diese umfassten: losen Boden nach der Ernte von Erdnüssen, verkrusteten Boden auf einer Brachfläche, eine Fahrspur mit zerstörter Kruste auf einem Maisfeld und eine durch Abwalzen der Stoppeln teilweise zerstörte Kruste auf einem Feld, auf dem Sonnenblumen angebaut worden waren. Die Messungen mit dem PI-SWERL erfassen lediglich den Einfluss von Korngrösse und Kohäsion, daher wurden Sedimentfallen des Typs Big Spring Number Eight (BSNE) und ein Mast mit Anemometern in verschiedener Höhe auf den Feldern aufgestellt, um den Sedimentfluss in Abhängigkeit der Bodenbedeckung zu messen (Abb. 4).

Abb. 3 Portable In-Situ Wind Erosion Laboratory (PI-SWERL) bei der Messung des Schwellenwertes der Windgeschwindigkeit zur Mobilisierung von Staub und dessen Emissionsrate auf einem abgeernteten Maisfeld in der Nähe von Bultfontein, Free State, Südafrika. *Foto: H.C. Vos*

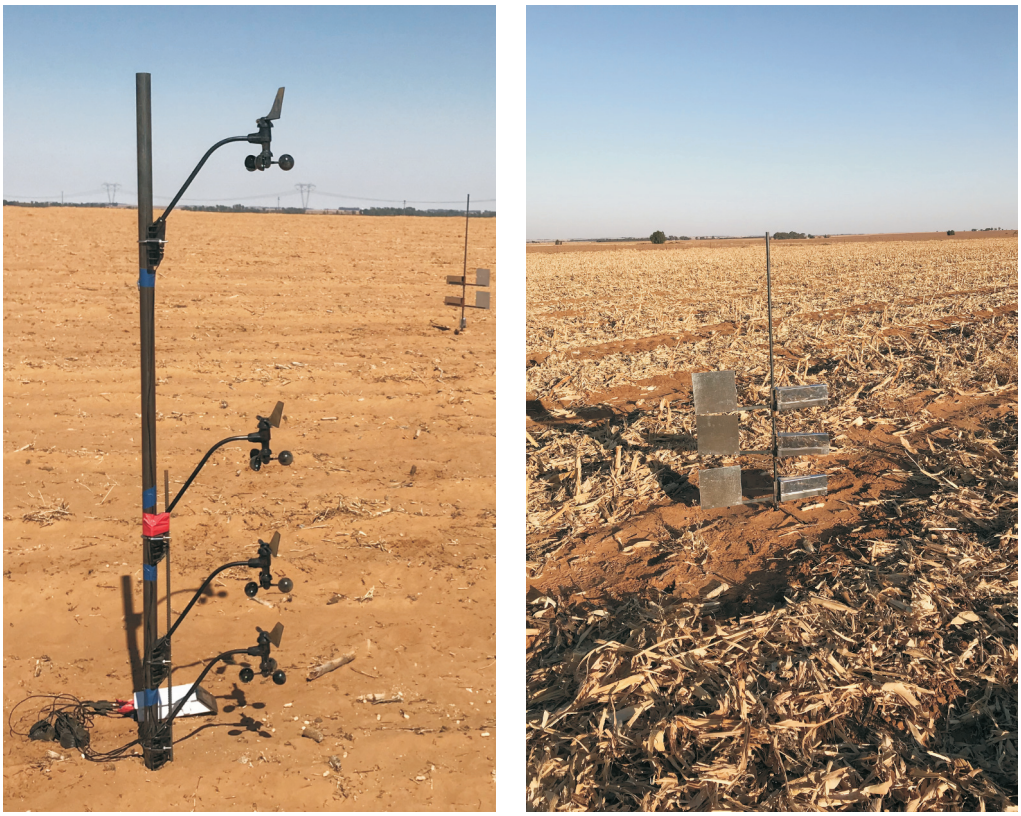

Abb. 4 Anemometermast auf einem abgeernteten Erdnussfeld (links) und BSNE Sedimentfallen auf einem abgeernteten Maisfeld (rechts) in der Nähe von Bultfontein, Free State, Südafrika.

5 Zusammenwirken von Boden und Vegetation zum Schutz von Ackerböden vor Erosion durch Wind

Die wesentlichen Eigenschaften des Bodens und der Bedeckung sowie die Staubemission und Sedimentfluss sind in Tab. 1 dargestellt. Die höchsten Staubemissionen und Sedimentflüsse wurden auf dem abgeernteten Erdnussfeld beobachtet, die geringsten auf der verkrusteten Brachfläche bzw. dem Feld mit Maisstoppeln und -stroh. Zunächst entsprechen diese Ergebnisse den Erwartungen, weil Kohäsion und Bedeckung die Winderosion vermindern. Im Detail sind sie allerdings in mehrerer Hinsicht bemerkenswert. Allgemein würde man erwarten, dass Flächen mit geringer Kohäsion und hoher Winderosion, also das abgeerntete Erdnussfeld, auch grosse Staubemissionen generieren. Dies ist jedoch im Vergleich mit den anderen Flächen nicht der Fall, die Staubemissionen sind lediglich etwa doppelt so hoch wie auf den übrigen Flächen, wohingegen die Winderosion insgesamt etwa 20-mal höher ist. Eine mögliche Erklärung ist die langjährige selektive Erosion auf dem Erdnussfeld. Sand wird bei gleicher Windgeschwindigkeit über wesentlich kürzere Strecken transportiert als Staub. Im Laufe der Zeit verliert der Boden daher an Ton und

Tab. 1 Grenzgeschwindigkeit für Staubemissionen und Sedimentfluss auf Ackerböden in typischen Winterzuständen im Free State, Südafrika.

Fläche	Ton und Schluff (%)	Bedeckung (%)	Kohäsion (kPa)	Staubemission ($mg^{-2}s^{-1}$)	Sedimentfluss ($g\ m^{-2}$)
Erdnussfeld	11.3	11	6	2	95
Maisstoppeln	15.2	66	7	0.9	0.5
Abgeerntete Sonnenblumen	12.9	38	9	0.8	2.5
Brache nach Mais im Vorjahr	21.2	40	14	0.7	5.5

feinen Schluffpartikeln. Dieser Verlust erhöht die Anfälligkeit für Bodenerosion, da der Boden kaum noch Aggregate bilden oder verkrusten kann. Gleichzeit nimmt die Staubemission als Folge des Verlustes von feinen Bodenpartikeln ab. Bemerkenswert ist auch die relativ hohe Staubemission auf den durchgehend verkrusteten Brachflächen. Diese wird auf die Abrasion durch Sandkörner zurückgeführt (*Vos* et al. 2020). Ein erwarteter Trend ist die Abnahme von Winderosion mit Bodenbedeckung und Rauigkeit. Hier ist anzumerken, dass die Bedeckung nicht nach einem konventionellen Verfahren kartiert, sondern mit Hilfe der Analyse von Drohnendaten bestimmt wurde. Bemerkenswert daran ist, dass die beiden Verfahren relativ ähnliche Werte für eine starke Abnahme der Winderosion bei einer Bedeckung von ca. 40 % liefern. Dieses Ergebnis ist ermutigend, da die Erfassung von Bodenbedeckung mit Drohnen wesentlich schneller ist als eine manuelle Kartierung im Feld.

6 Vom Prozess zum Planeten

Die Ergebnisse der Messungen zu Staubemissionen und Winderosion im Free State in Südafrika zeigen ein differenziertes Bild des jeweiligen Risikos als Folge der jeweiligen Eigenschaften von Boden, dessen Bearbeitung und Bedeckung. Die hohe Anzahl an Staubstürmen in den Wintern 2016 und 2017 kann als Folge der Dürre der beiden Jahre betrachtet werden, da grosse Flächen für zwei Jahre in Folge brach lagen und daher kaum mehr eine Bedeckung aufzeigten (*Vos* 2021). Diese Situation entsteht, wenn der kritische Zeitpunkt für die Einsaat von Mais verpasst wird und in der Folge entweder nur Sonnenblumen oder sogar gar keine Ackerfrucht eingesät wird. Im folgenden Winter entsteht dann das Risiko einer wenig oder gar nicht bedeckten Fläche, die für den Wind angreifbar ist. Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Messungen zeigen auch, dass insbesondere eine Brache dabei zu einer Situation führt, in der den Landwirtinnen und Landwirten nur noch die Möglichkeit bleibt, über die Kohäsion und Rauigkeit der Bodenoberfläche die Winderosion und Staubemission im folgenden Winter zu reduzieren, da Stroh und Stoppeln während des Sommers weitgehend abgebaut werden. Da der Anbau von Sonnenblumen oder Erdnüssen nur geringen bzw. kaum Bestandsabfall hinterlässt und ausserdem bei der Ernte der Erdnüsse der Boden noch stark aufbricht, ergibt sich bei diesen Feldfrüchten praktisch in jedem Jahr ein erhöhtes Risiko für Staubemissionen und Winderosion. Das in Zukunft potentiell variablere Klima im südlichen Afrika erhöht diese Risiken. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen jedoch auch, dass ein bewusstes Management der Kohäsion der Bodenoberfläche, insbesondere der Krusten, ein konsequentes Vermeiden des Anbaus von Erdnüssen sowie der Anbau von Wintergetreide

auf Brachflächen die Staubemissionen reduzieren können. Sie zeigen ebenso, dass zur Abschätzung des zukünftigen Wandels von Staubemissionen und Winderosion auf regionaler und globaler Skala ein detailliertes Verständnis des Zusammenwirkens der Oberflächeneigeschaften und deren Entwicklung notwendig ist.

7 Fazit: die physiogeographische Perspektive auf Umweltwandel

Die Kombination der Auswertung von Satellitendaten und Feldmessungen zur Untersuchung der Ursachen von Staubemissionen auf Ackerflächen im Free State in Südafrika illustriert exemplarisch die wesentlichen Schritte physiogeographischen Arbeitens: Die Identifikation einer Veränderung des Zustands an der Erdoberfläche, in dem dargestellten Beispiel die Staubstürme im südlichen Afrika, gefolgt von der Erfassung von dessen räumlicher und zeitlicher Dynamik in Satellitendaten, einer Erklärung für die beobachteten Muster mit Hilfe von Prozessstudien am Boden und einer Vorhersage der Folgen von Klimawandel einerseits und dem Aufzeigen von Möglichkeiten zur Reduzierung der negativen Folgen andererseits. Es wird ausserdem deutlich, wie die Physiogeographie mit ihren Werkzeugen Prozesse an der Erdoberfläche erfasst, erklärt und deren Bedeutung für den globalen Umweltwandel abschätzt. Eine wesentliche Aufgabe der Physiogeographie zum Verständnis und dem Umgang mit Umweltwandel wird ebenfalls deutlich: Die Bedeutung einzelner Prozesse an der Erdoberfläche wird über Skalen hinweg mit dem Zustand und der Entwicklung des Planeten Erde verknüpft.

Literatur

Chen S., Jiang N., Huang J., Xu X., Zhang H., Zang Z., Huang K., XuYun Wie X., Guan X., Zhang X., Luo Y., Hu Z. & Feng T. 2018. Quantifying contributions of natural and anthropogenic dust emission from different climatic regions. *Atmospheric Environment* 191: 94–104; https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.043.

Eckardt F.D., Bekiswa S., von Hold J.R., Jack C., Kuhn N.J., Mogane F., Murray J.E., Ndara N. & Palmer A.R. 2020. South Africa's agricultural dust sources and events from MSG SEVIRI. *Aeolian Research* 47: 100637; https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100637.

Haggett P. 1972. *Geography – a modern synthesis*. New York, 1–483.

Kok, J. F., Adebiyi A. A., Albani S., Balkanski Y., Checa-Garcia R., Chin M., Colarco P. R., Hamilton D. S., Huang Y., Ito A., Klose M., Leung D. M., Li L., Mahowald N. M., Miller R. L., Obiso V., Pérez García-Pando C., Rocha-Lima A., Wan J. S., and Whicker C. A. 2021a. Improved representation of the global dust cycle using observational constraints on dust properties and abundance. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21: 8127–8167; https://doi.org/10.5194/acp-21-8127-2021.

Kok J. F., Adebiyi A. A., Albani S., Balkanski Y., Checa-Garcia R., Chin M., Colarco P. R., Hamilton D. S., Huang Y., Ito A., Klose M., Li, L., Mahowald N. M., Miller R. L., Obiso V., Pérez García-Pando C., Rocha-Lima A., and Wan J. S. 2021b. Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust, *Atmospheric Chemistry and Physics* 21: 8169–8193; https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021.

Vos H.C., Fister W., Eckardt F.D., Palmer A.R. & Kuhn N.J. 2020. Physical Crust Formation on Sandy Soils and Their Potential to Reduce Dust Emissions from Croplands. *Land* 9: 503; doi:10.3390/land9120503.

Vos H.C., Fister W., von Holdt J.R., Eckardt F.D., Palmer A.R. & Kuhn N.J. 2021. Assessing the PM10 emission potential of sandy, dryland soils in South Africa using the PI-SWERL. *Aeolian Research* 53, 100747.

Vos H.C., Karst I.G., Eckardt F.D, Fister W. and Kuhn N.J. 2022. Influence of Crop and Land Management on Wind Erosion from Sandy Soils in Dryland Agriculture. *Agronomy* 12: 457; https://doi.org/10.3390/agronomy12020457