

## Wind in den Dünen

Mit einem Modell, das unterschiedlich große Sandkörner berücksichtigt, lässt sich erklären, wie Zwergdünen entstehen.



Auf den über hundert Meter langen Dünen des brasilianischen Dünenfeldes „Lençóis Maranhenses“ befinden sich zentimetergroße Rippel.

**W**ind erzeugt in Wüsten- und Küstengebieten der Erde zwei Haupttypen wellenförmiger Sandstrukturen auf unterschiedlichen Längenskalen: Zentimetergroße Rippel sowie Dünen, die mindestens zehn Meter groß sind, aber auch kilometerlang ausgehnt sein können. Ihnen liegt der Transportmechanismus der Saltation zugrunde: Vom Wind beschleunigt, folgen die Körner nahezu ballistischen Flugbahnen und verursachen bei der Kollision mit dem Boden einen „Splash“. Dadurch steigt der so genannte Saltationsfluss, also der Massenfluss der Saltationsteilchen pro Zeit- und Längenskala, kaskadenförmig an [1, 2].

Rippel und Dünen teilen manchmal die Bühne mit einer dritten Sandwellenart, deren Existenz sich Erklärungsversuchen lange entzog: so genannte Megarippel. Ihre Größe liegt zwischen der von

Rippeln und Dünen – genau in dem Wellenlängenbereich, den Standardtransportmodelle als verboten vorhersagen [2, 3]. Warum sie dennoch existieren, hat nun Marc Lämmel von der Universität Leipzig mit Kollegen erklärt. Die Ergebnisse zeigen auch, wie Megarippel Klimaforscher künftig unterstützen können [4].

Dünen gehen aus einer hydrodynamischen Instabilität hervor. Ein Sandhügel stellt für den Wind ein Hindernis dar und verursacht somit eine Störung des mittleren turbulenten Windfeldes über dem flachen Boden. Als Ergebnis der Störung verdichten sich die Stromlinien, und die Windgeschwindigkeit am Hügelkamm nimmt zu (Abb. 1). Aufgrund der Fernwirkung turbulenter Fluktuationen verlaufen die Stromlinien jedoch nicht in Phase mit dem Hügelprofil. Insbesondere liegt die höchste Windgeschwindigkeit – selbst für einen

perfekt symmetrischen Hügel – bereits auf dessen windzugewandter Seite, der Luvseite. Diese stromaufwärts gerichtete Verschiebung des Windmaximums stellt die Grundlage für die asymmetrische Form einer Düne dar, mit den typischen abgeflachten Luv- und steilen Lee-seiten [5].

Wird Sand am Hügelkamm abgeschieden, kann der Hügel zu einer Düne heranwachsen. Doch der Sandfluss ist dem Windprofil gegenüber phasenverzögert, weil die Teilchentrajektorien eine Relaxationslänge  $L_s$  – auch Saturationslänge genannt – benötigen, um sich an eine Windveränderung anzupassen [2]. Damit sich eine Düne bildet, muss der maximale Sandfluss  $Q_{\max}$  noch vor dem Hügelkamm erreicht werden – eine Bedingung, die nur Hügel erfüllen, deren Größe etwa die zwanzigfache Relaxationslänge übersteigt. Kleinere Hügel werden vom Wind weg-erodiert [2].

Auch Rippel entstehen durch Saltation, allerdings hat deren Instabilität einen anderen Ursprung als bei Dünen. Nach dem Splash der Sandkörner tragen viele Partikel aufgrund ihrer geringen Energie nicht zur Saltationswolke bei. Stattdessen ballen sie sich in Sandhügeln von einigen Korngrößen Höhe um die Einschlagsorte der Saltation zusammen – den Rippeln. Da die Winderosion mit der Rippelgröße zunimmt, bleiben Rippel immer

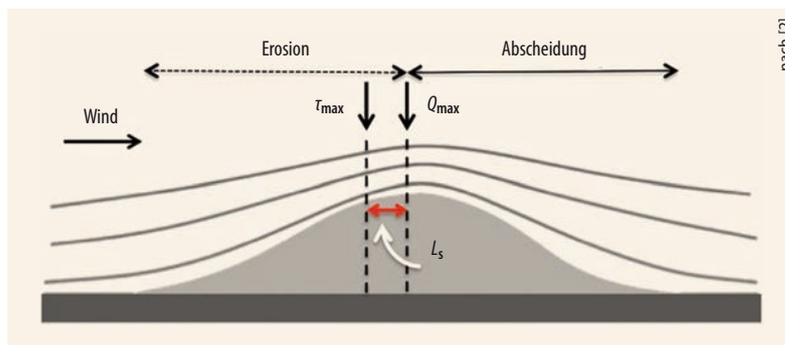
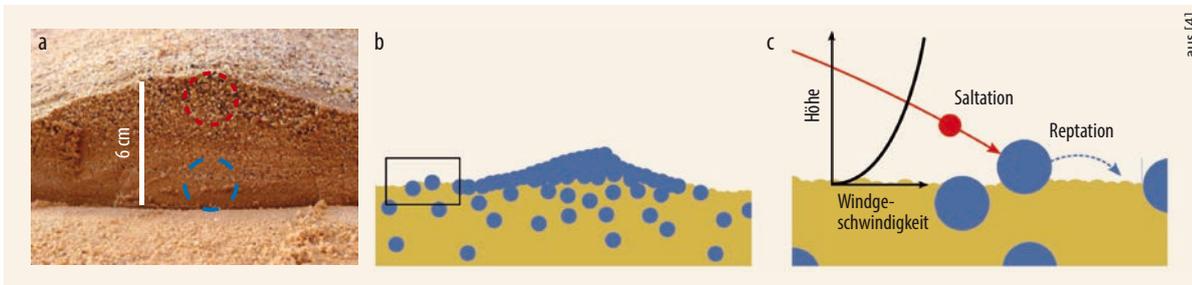


Abb. 1 Die Instabilität von Dünen beruht auf der maximalen Scherspannung des Windes am Boden ( $\tau_{\max}$ ) und einem maximalen Sandfluss ( $Q_{\max}$ ).



**Abb. 2** Megarippel, wie hier in der israelischen Negev-Wüste, entstehen durch die Polydispersität von Sand (a). Eine grobkörnige Panzerung (rot) bedeckt die

feineren Teilchen unter der Oberfläche (blau). Die Teilchen an der Oberfläche sind millimetergroß und bewegen sich durch Reptation (b, Vergrößerung: c).

Stöße kleinerer Sandteilchen treiben die Reptationspartikel an, die sich in Saltation bewegen. Die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe logarithmisch zu.

niedriger als etwa einen Zentimeter bei einer Wellenlänge, die zehn Zentimeter nicht übersteigt.

Neben Rippel- und Dünenbildung verursacht Wind einen weiteren Vorgang, der in manchen industriellen Verfahren wohlbekannt ist: die Sortierung der Teilchen nach ihrer Größe, auch Segregation genannt. Wüstensedimente sind grundsätzlich polydispers und umfassen neben Sandkörnern mit Durchmessern von  $d \approx 200 \mu\text{m}$  auch millimetergroße Partikel. Die minimale Windgeschwindigkeit für die Saltation skaliert jedoch mit  $\sqrt{d}$ , sodass Sandpartikel bei durchschnittlichen Wüstenwinden weiterfliegen, während gröbere Teilchen zurückbleiben. Dadurch werden Dünen windabwärts monodisperser [1], was die Annahme eines konstanten Durchmessers von  $d \approx 200 \mu\text{m}$  in Saltationsmodellen rechtfertigt [1–3].

Doch die jüngste Arbeit aus Leipzig hat gezeigt, dass der Schlüssel zum Verständnis der Megarippel im äolischen Sieben des polydispersen Wüstensandes liegt [4]. Die Teilchensegregation führt zu einer Ansammlung der für die Saltation zu tragen Partikel auf der Oberfläche: Tatsächlich sind Megarippel mit millimetergroßen Teilchen bedeckt (Abb. 2a, b), die Bedeutung dieser grobkörnigen Panzerung für die Physik hinter den Megarippeln blieb jedoch lange unterschätzt. Angetrieben von den Saltationsstößen vollführen die großen Teilchen kleinere, aber sichere Sprünge windabwärts. Diese Miniaturform der Saltation heißt auch Reptation (Abb. 2c) So verringern die größeren Partikel die äolische Satu-

rationslänge und damit auch die Mindestgröße der Dünen.

Die Forscher erweiterten daher das Transportmodell um die beobachtete Polydispersität und zeigten, dass Megarippel sich morphologisch und dynamisch identisch wie kleine Reptationsdünen verhalten. Megarippel sind also eigentlich „Zwergdünen“ [4]. Anders als bei einem Rippelzug wandern sie mehr oder weniger isoliert voneinander. Ihre Physik lässt sich deshalb wie bei Dünen anhand ihrer Basislänge beschreiben und nicht durch den Abstand zweier Megarippelkämme. Weiterhin sind Megarippel instabil gegen konstante Windrichtung [6] – ebenfalls eine Eigenschaft der Dünen [7] – und nehmen bei geringer Verfügbarkeit von Sand die typische sichelförmige Dünenform an.

Während Sanddünen sich jedoch robust gegenüber Variationen der Windstärke verhalten, zeigen sich Megarippel hier extrem anfällig. Heftige Stürme versetzen alles in Saltation und zerstören ihre grobkörnige Panzerung binnen Sekunden. Deshalb können Megarippel nur dort entstehen, wo die geologische Zeitskala für die Bildung ihrer grobkörnigen Struktur den Abstand zweier Stürme nicht überschreitet [4].

Diese Entdeckungen schreiben ein neues Kapitel der äolischen Forschung und sind für verschiedene Disziplinen von Bedeutung. Für die Klimaforschung ist besonders wichtig, dass Megarippel sensibel auf Windschwankungen reagieren. Änderungen der Verhältnisse spiegeln sich in der Korngrößenabhängigen Schichtung von Megarippeln wider

– ähnlich wie sich das Klima aus den Jahresringen von Bäumen rekonstruieren lässt [4]. Außerdem ist damit das Rätsel um den Ursprung der so genannten Transverse Aeolian Ridges gelöst – der Sandgebilde auf dem Mars [8]. Das neue Modell ergibt, unter Einbeziehung der Marsatmosphäre, dass Transverse Aeolian Ridges aus der Reptationsdüneninstabilität stammen. Sie sind also die Gegenstücke irdischer Megarippel auf dem Mars [4]. Diese Schlussfolgerung wurde kurz darauf anhand hochaufgelöster Untersuchungen der Morphologie der Transverse Aeolian Ridges bestätigt [8]. Damit öffnen sich neue Türen zur Erforschung des Klimas und der Geologie des Roten Planeten.

Polydispersität ist eine intrinsische Eigenschaft äolischer Partikelsysteme, welche die Sandtransporttheorie lange nicht berücksichtigt hat. Ein Fehler, zeigen doch schon die erwähnten ersten Anwendungen des neuen Transportmodells außergewöhnliche Erfolge.

**Eric Parteli**

- [1] I. Livingstone und A. Warren, *Aeolian Geomorphology*, Longman, Essex (1996)
- [2] K. Kroy et al., *Phys. Rev. E* **64**, 031305 (2002)
- [3] F. Charru et al., *Ann. Rev. Fluid Mech.* **45**, 469 (2013)
- [4] M. Lämmel et al., *Nature Physics*, DOI: 10.1038/s41567-018-0106-z
- [5] E. Parteli, *Physik Journal*, September 2016, S. 22
- [6] H. Yizhaq et al., *Geology* **40**, 459 (2012)
- [7] E. J. R. Parteli et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 188001 (2011)
- [8] D. C. Berman et al., *Icarus* **312**, 247 (2018);

Dr. Eric Parteli, Department Geowissenschaften, Universität zu Köln, Pohligstr. 3, 50969 Köln