

Wie stoppt man eine Wanderdüne?

Laborexperimente zeigen, welche Hindernisse Sanddünen effektiv aufhalten.

Eric Parteli

Die Wanderung der Sanddünen zählt zu den wichtigsten Ursachen für die Ausbreitung von Wüstengebieten. Daher stellt sich die Frage, ob sich die Dünen stoppen lassen, etwa mit Hindernissen. Ein Team um Karol Bacik von der Universität Cambridge in Großbritannien hat vielversprechende Erkenntnisse zum Design der perfekten Dünenfalle gewonnen [1].

Je nachdem, wie viel Sand verfügbar ist und wie der Wind seine Richtung im Laufe des Jahres ändert, entstehen verschiedene Dünenformen [2]. Bei stetiger Windrichtung bilden sich Barchan- bzw. Wanderdünen (**Abb. 1**). Sie besitzen zwei in Windrichtung zeigende „Hörner“ und können hundert Meter pro Jahr zurücklegen. Seit pharaonischen Zeiten stabilisieren Pflanzen solche Wanderdünen; doch steigende Temperaturen auf der Erde bedrohen viele bewachsene Dünengebiete [3]. In Windkanälen wird daher intensiv nach künstlichen Hindernissen für den Sand gesucht [4], obwohl sich hier die Dünenmorphodynamik nicht vollständig erfassen lässt. Viele bahnbrechende Erkenntnisse zur Dynamik äolischer Dünen, die durch Wind entstehen, stammen tatsächlich aus

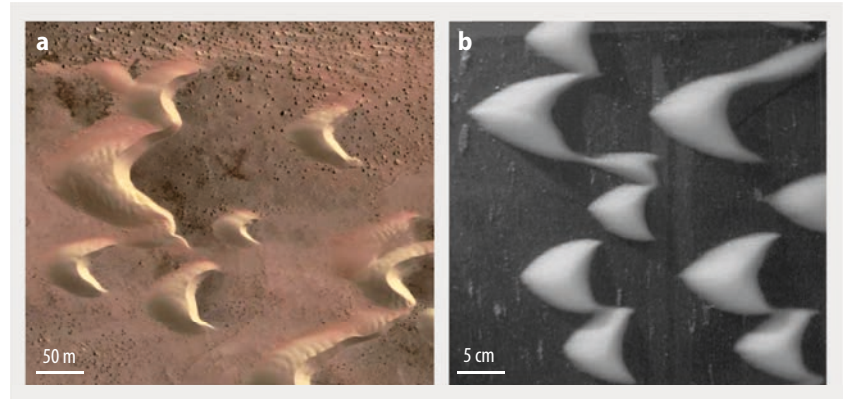


Abb. 1 Bei Wanderdünen (a) in Südmarokko und in einem Wasserkanalexperiment (b) zeigen die Dünenhöcker immer in Richtung der Wind- bzw. Wasserströmung.

Experimenten mit „Miniaturdünen“ im Wasserkanal [1, 2, 5, 6].

Die für die Dünenphysik relevante Längenskala ist die sogenannte Sättigungslänge des Sedimentflusses L_{sat} [2, 6, 7]. Der Massenfluss der Sandpartikel in der Transportschicht benötigt diese Relaxationslänge, um sich veränderten Transportverhältnissen anzupassen – etwa bei einer neuen Strömungsgeschwindigkeit oder anderer Sandverfügbarkeit auf dem Boden. Trifft der Wind auf einen Sandhügel, steigt der Sandfluss in Windrichtung zunächst exponentiell an: Jedes Sandkorn in der Luft

vollführt wegen der Beschleunigung durch den Wind eine nahezu ballistische Flugbahn und verursacht bei der Kollision mit dem Sandboden einen heftigen Splash, der noch mehr Partikel in die Luftströmung schleudert. Nach einer zu L_{sat} proportionalen Länge geht der Massenfluss in Sättigung. Für Hügel größer als $\approx 10 L_{\text{sat}}$ scheidet sich am Dünenkamm Sand ab: Die Düne wächst. Kleinere Hügel überleben den exponentiellen Anstieg des Massenflusses nicht und werden vollständig erodiert.

Ähnlich entstehen Wanderdünen auch unter Wasser, allerdings auf einer

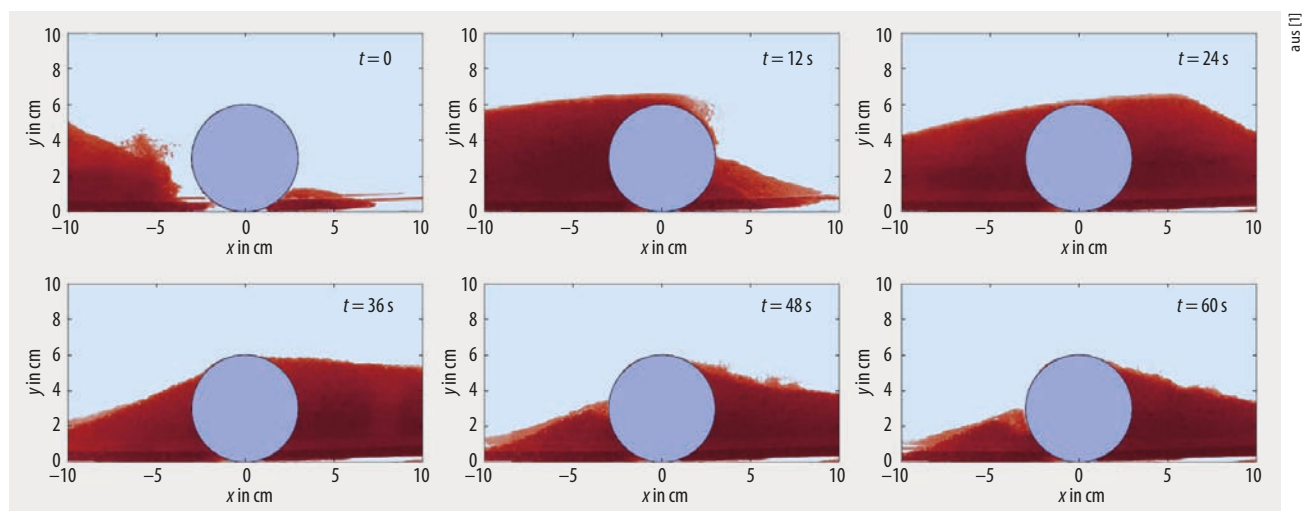


Abb. 2 Eine unterwässrige Sanddüne (rot) wechselwirkt mit einem Hindernis (blau). In den Momentaufnahmen kommt die Strömung von links; millimetergroße Glaskugeln ersetzen im Experiment die Sandkörner der Düne.

tausendmal kleineren Dünenskala. Ein empirisch festgestelltes Skalengesetz erklärt den Größenunterschied [5]: $L_{\text{sat}} \approx 2sd$ mit dem Quotienten aus Partikel- und Luftdichte s und der mittleren Partikelgröße d . Für äolischen Wüstensand mit $d \approx 230 \mu\text{m}$ und $s \approx 2200$ ergeben sich $L_{\text{sat}} \approx 1 \text{ m}$ und eine Mindestgröße $W_{\text{min}} \approx 10 \text{ m}$. Unter Wasser verkleinert die höhere Fluidichte den Faktor s um drei Größenordnungen, sodass die Mindestgröße einige Zentimeter beträgt – bei ähnlicher Morphologie.

Auf der strömungszugewandten Seite der Düne steigt die Strömungsgeschwindigkeit mit der Höhe an, und die Erosion flacht diese Seite ab. Auf der strömungsabgewandten Seite verlangsamt sich die Strömung wieder. Dort lagert sich bei einer Hügelbreite $W > W_{\text{min}}$ Sand ab. Die Neigung wächst an, bis diese den Böschungswinkel des Granulats erreicht. Für Natursand beträgt dieser etwa 34° : Darüber rutscht der Sand durch Lawinen den Hang hinunter. Diese Dynamik führt unter Wasser und in der Luft zur Barchanform (Abb. 1). Strukturen ähnlich der großen Wüstendünen der Erde lassen sich en miniature unter Wasser „simulieren“ [2, 5, 6].

Karol Bacik und sein Team fanden zwei Regimes für das Verhalten unterwässriger Dünen [1], abhängig vom Quotienten aus Hindernis- und Dünengröße η sowie von der Form des Hindernisses. Bei $\eta \ll 1$ bleibt etwas Sand am Hindernis hängen. Doch die Düne kann das Hindernis weitgehend überqueren und ihre Wanderung mit etwas kleinerem Volumen fortsetzen (Abb. 2, „Crossing“-Regime). Ab einem kritischen Wert η_c setzt das „Trapping“-Regime ein, in dem das Hindernis den ganzen Dünensand aufhält.

Über η_c entscheidet die Hindernisform [1], da sie die Luftströmung nahe dem Hindernis steuert. Die Stromlinie löst sich an der Spitze des Hindernisses von dessen Oberfläche und schlägt später auf dem Boden auf. Unterhalb dieser Stromlinie bildet sich eine Ablösezone oder Separationsblase (Abb. 3a). Hier liegt eine stark reduzierte Strömung vor, und der Transport in Windrichtung ist vernachlässigbar. Die Effektivität der

Sandfalle hängt maßgeblich von der Größe der Separationsblase ab: je größer die Separationsblase, desto kleiner η_c . Eine quantitative Beschreibung der Windströmung benötigt aufwändige numerische Simulationen [4, 8].

Karol Bacik setzte daher mit seinem Team einen unkonventionellen datengesteuerten Ansatz um [1] und analysierte die Hauptkomponenten des Strömungsgeschwindigkeitsprofils aus Experimenten mit verschiedenen Hindernisformen bzw. -größen und Strömungsgeschwindigkeiten. In jedem Experiment bildet die zeitlich gemittelte horizontale Strömungsgeschwindigkeit als Funktion der Position und Höhe ein zweidimensionales Feld, das als Datensatz \bar{U}_i betrachtet und als Linearkombination der Hauptkomponenten \hat{u}_j genähert wird: $\bar{U}_i \approx \sum \alpha_{ij} \hat{u}_j$. Dabei werden die Hauptkomponenten \hat{u}_j nach dem Energieinhalt $\sqrt{\sum \alpha_{ij}^2}$ geordnet.

Die erste Hauptkomponente korreliert mit der lokalen Strömungsgeschwindigkeit, die zweite beschreibt die Strömungsverzögerung über dem Hindernis und auf dessen Leeseite [1]. Das „Crossing“-Regime geht ab einem kritischen Wert des Koeffizienten α_{12} in das „Trapping“-Regime über (Abb. 3b, gestrichelte Linie). Die Dynamik von Wanderdünen an einem Hindernis lässt sich allein aus der Betrachtung der Fluidströmung

vorhersagen, noch bevor die Düne sich dem Hindernis genähert hat.

Der neue Ansatz ebnet einen vielversprechenden Weg für optimierte Maßnahmen gegen die Dünenmigration. Um die Ergebnisse quantitativ auf äolische Dünen zu übertragen, ist es nötig, die Effekte der Dünengröße und der turbulenten Windfluktuationen zu untersuchen. Zudem gilt es, den Einfluss von L_{sat} auf die genaue Dynamik der Sandabscheidung um das Hindernis zu verstehen. Bahnbrechend sind die Experimente, weil sie das große Potenzial der datengesteuerten Wissenschaft für die Erforschung der Dünenphysik verdeutlichen.

- [1] K. A. Bacik et al., Phys. Rev. Fluids **6**, 104308 (2021)
- [2] J. F. Kok et al., Rep. Prog. Phys. **75**, 106901 (2012)
- [3] D. S. G. Thomas et al., Nature **435**, 1218 (2005)
- [4] L. Raffaele et al., J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. **214**, 104653 (2021)
- [5] P. Hersen et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 264301 (2002)
- [6] E. Reffet et al., Geology **38**, 491 (2010)
- [7] K. Kroy et al., Phys. Rev. E **66**, 031302 (2002)
- [8] I. A. Lima et al., Aeolian Research **43**, 100574 (2020)

Der Autor

Dr. Eric Parteli, Fakultät für Physik, Universität Duisburg-Essen, Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

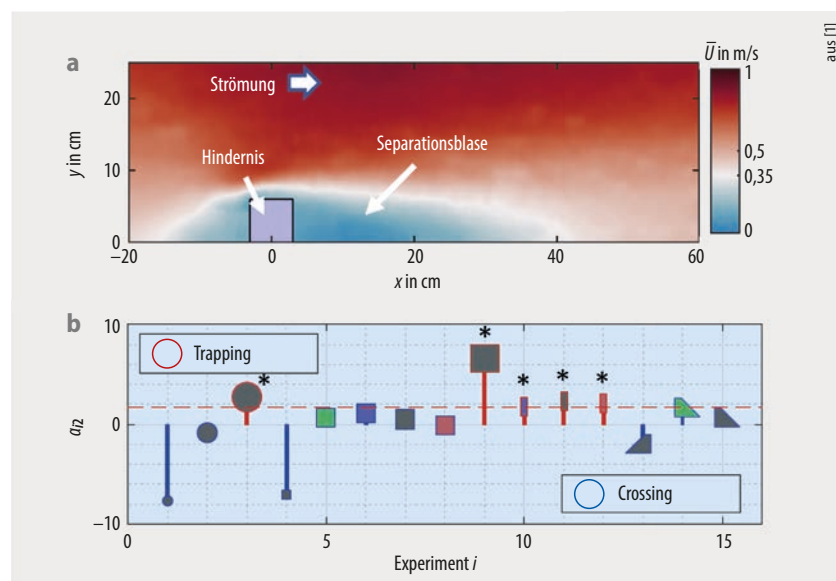


Abb. 3 Eines der sechs Zentimeter hohen Hindernisse ($i = 7$) hält die Sanddüne nicht komplett auf; gezeigt ist das Strömungsgeschwindigkeitsfeld (a). Anderen Hindernissen gelingt dies (b, Sterne): Den Übergang vom „Crossing“- in das „Trapping“-Regime bestimmen hauptsächlich Größe und Form der Hindernisse und weniger die Strömungsgeschwindigkeit.