

# Die wunderbare Welt der Dünen

Entstehung und Bewegung von Dünen

**Hans Herrmann**



Computational Physics, IfB, ETH Zürich

**Kolloquium Oldenburg**

**12. Dezember, 2011**

Mitarbeiter:

- Eric Parteli
- Gerd Sauermaun
- Veit Schwämmle
- Klaus Kroy
- Luis Parente
- Orencio Duran

Es gibt noch viele alltägliche Phänomene,  
die wir nicht verstehen,  
Beispiel: der Sand

Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Dünen der Namib

**ETH**



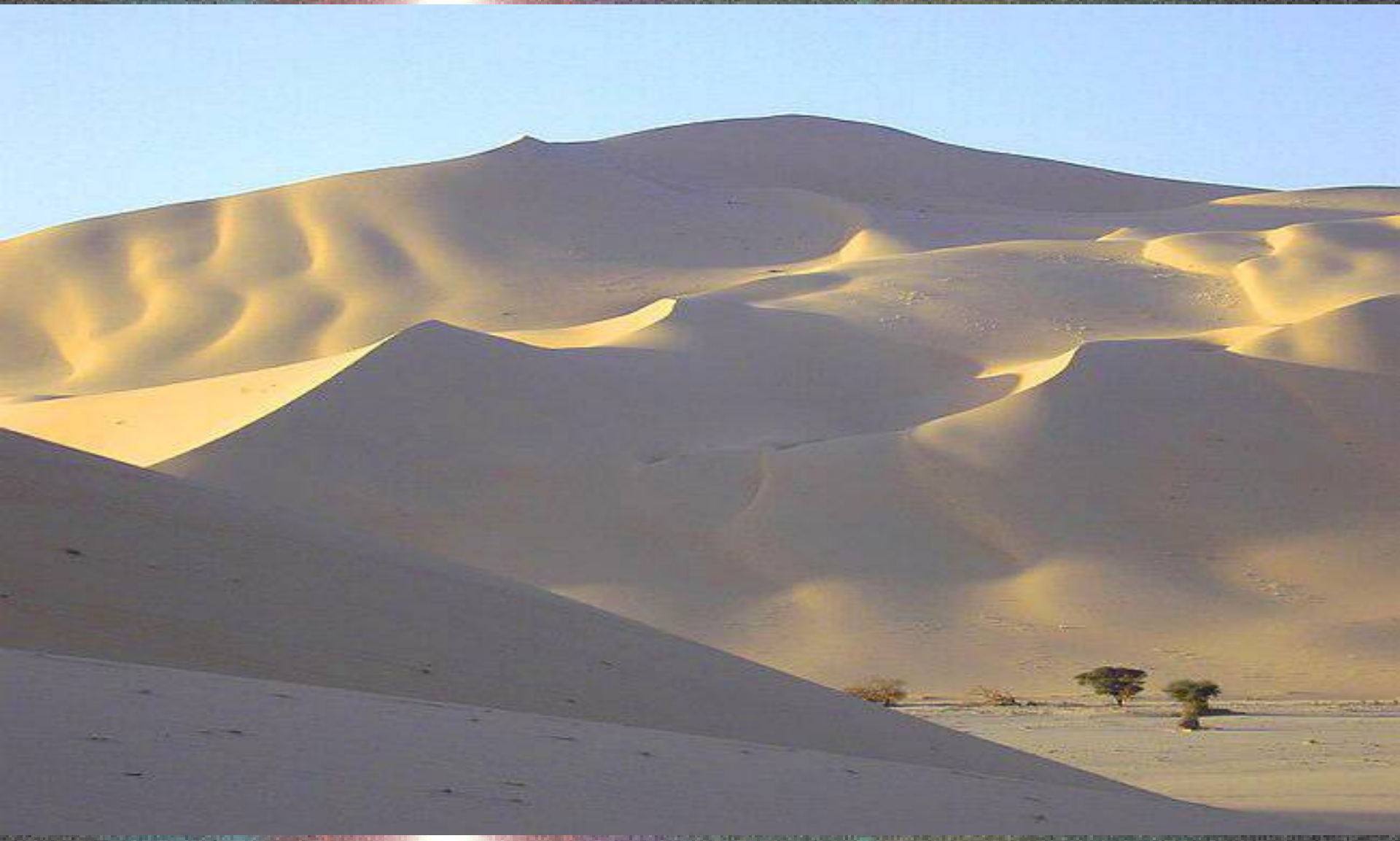
Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# südliches Marokko



# Temet, in der Sahara

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Libysche Wüste, Um el-Maa

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Abendstimmung in der libyschen Wüste

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Merzouga, Marokko

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Merzouga, Marokko

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011



# in Deutschland: Düne auf Sylt

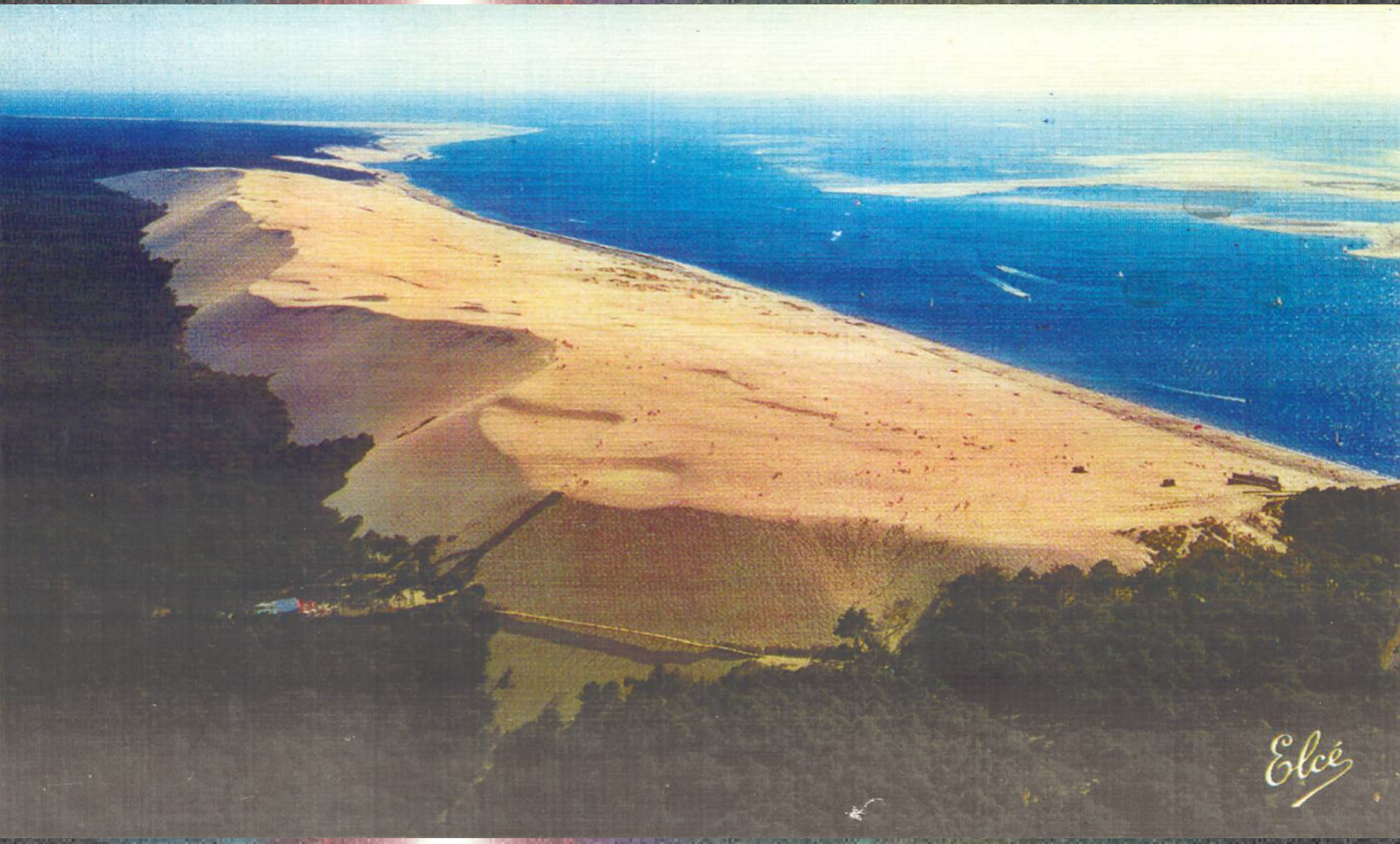
**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Düne von Pyla, Frankreich

**ETH**



*Elcé*

Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Sanddecke in Nordbrasilien

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Ägypten: Strasse zu!!

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Abbau einer Dünen, welche den Verkehr behindert, Brasilien

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Kleine Dünen wandern schneller

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Lukratives Geschäft

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

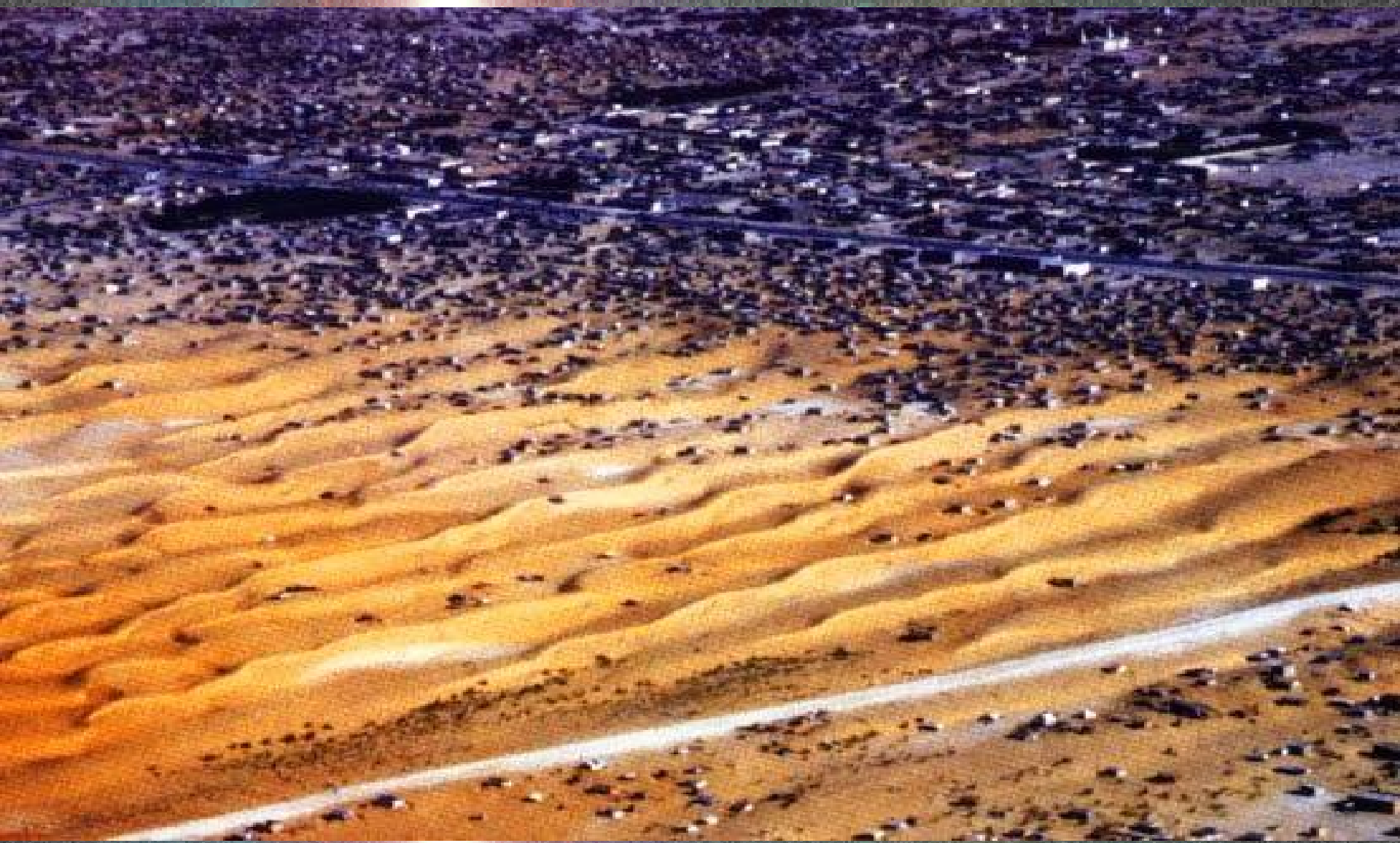
# Nouakchott, Mauritien





# nochmal Nouakchott

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Algerien

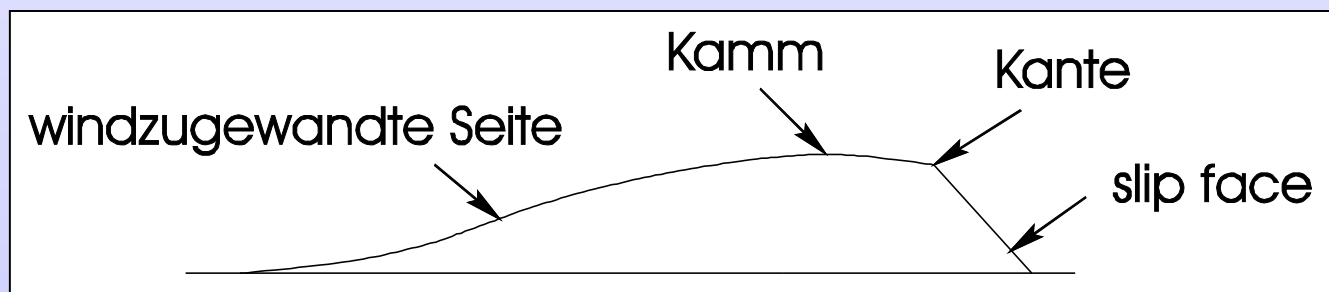
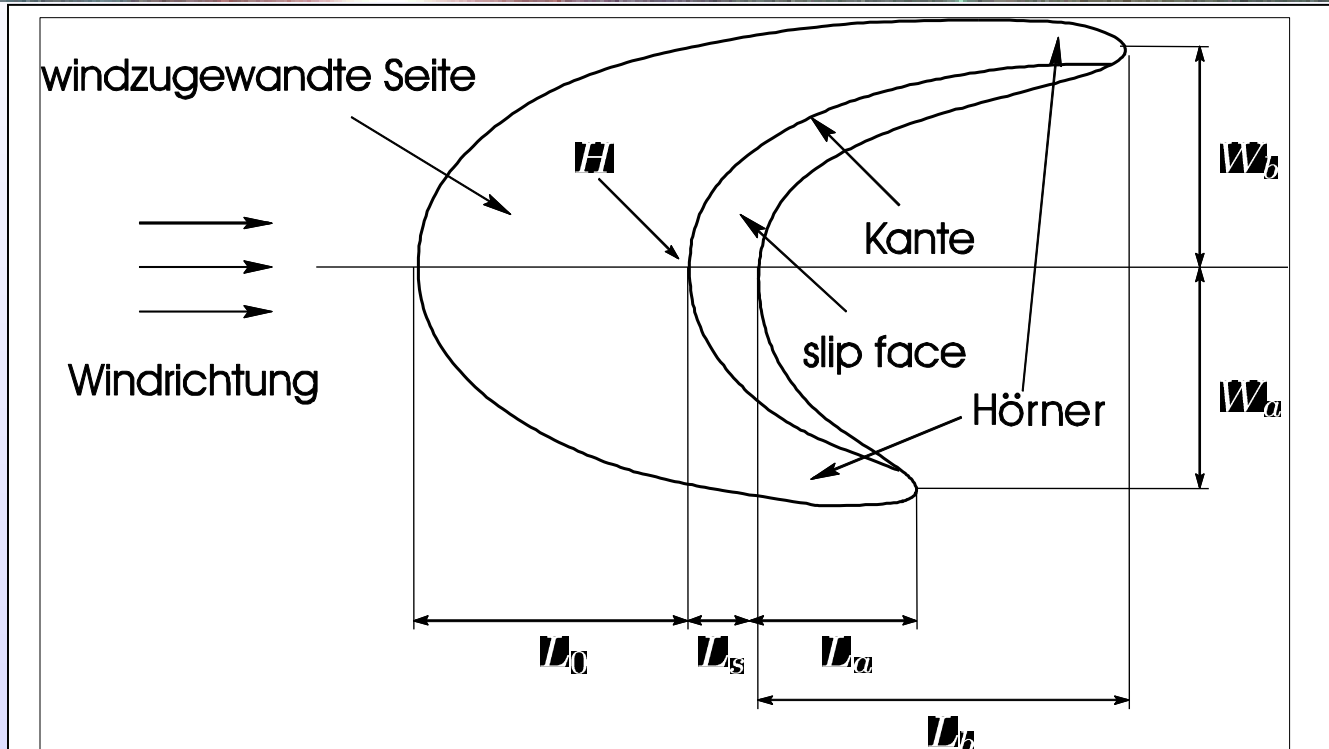
**ETH**



Copyright Georg Gerster/Comstock, Inc.

**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Skizze einer Wanderdüne (=Barchan)



**Kamm und Kante können zusammenfallen oder auch nicht.**

# Feld von Wanderdünen in Pampa de La Joya, Peru

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Wanderdünen auf dem Mars

## Mars Global Surveyor: 26 Juli 1998



# Brasilien

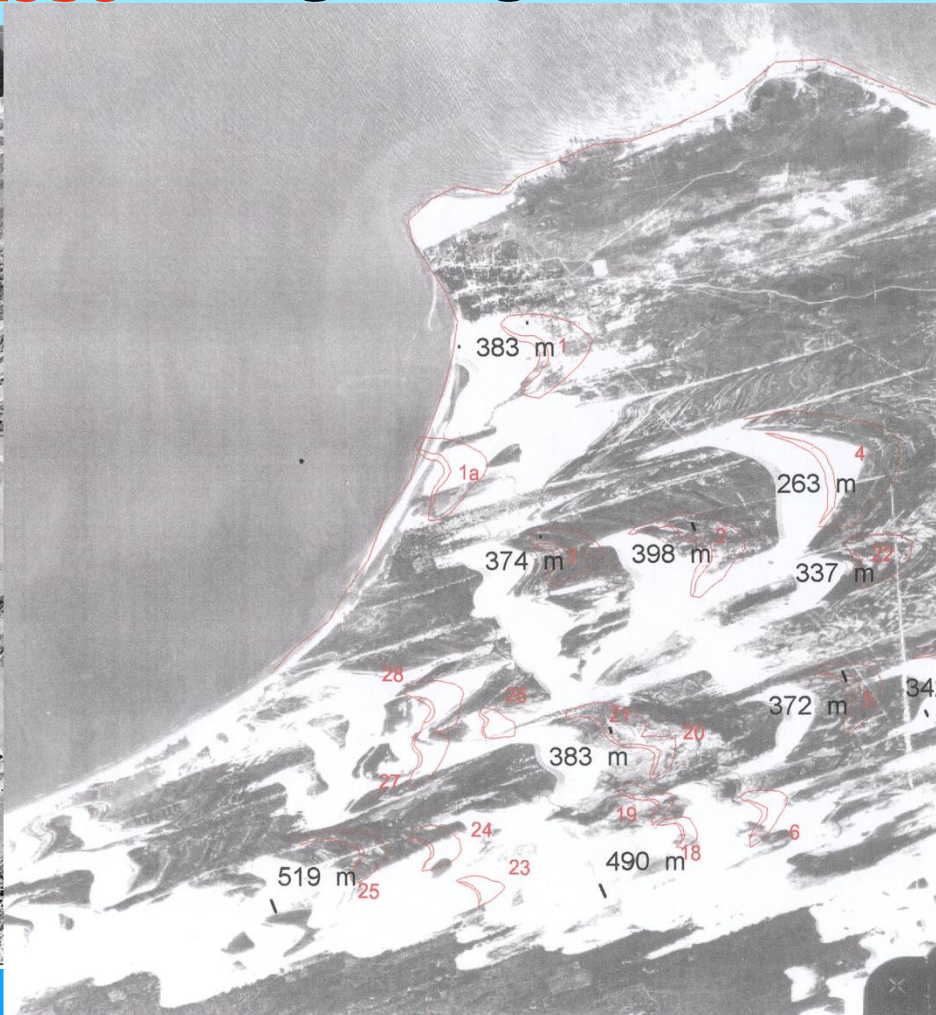


Lençóis Maranhenses

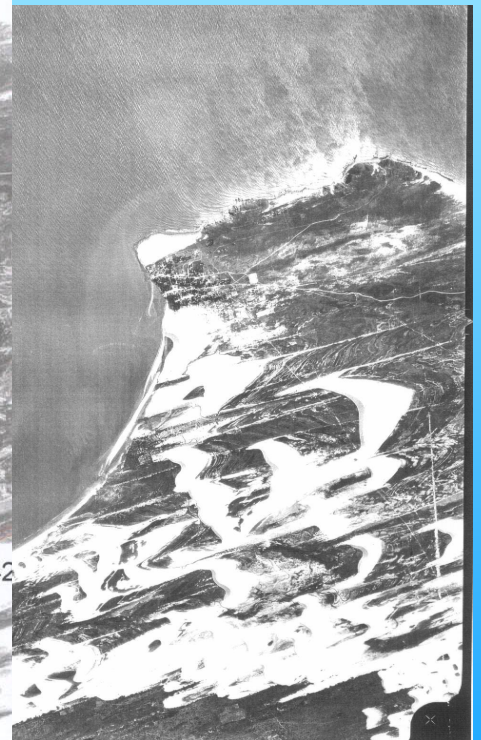
Jericoacoara

# Jericoacoara in Brasilien

## 1958 Überlagerung der Fotos



88



# Grosse Düne in Jericoacoara

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**



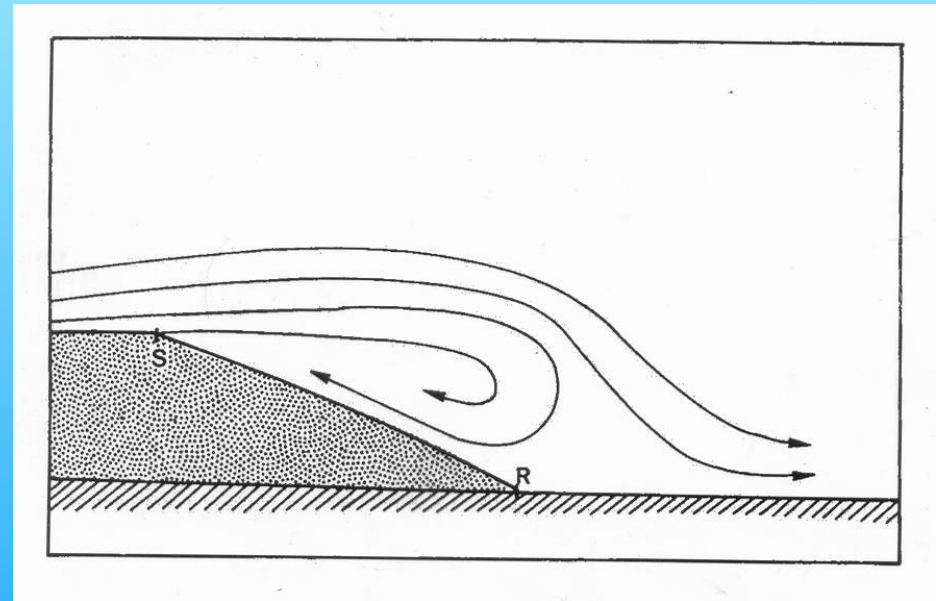
# Blick von oben

**ETH**

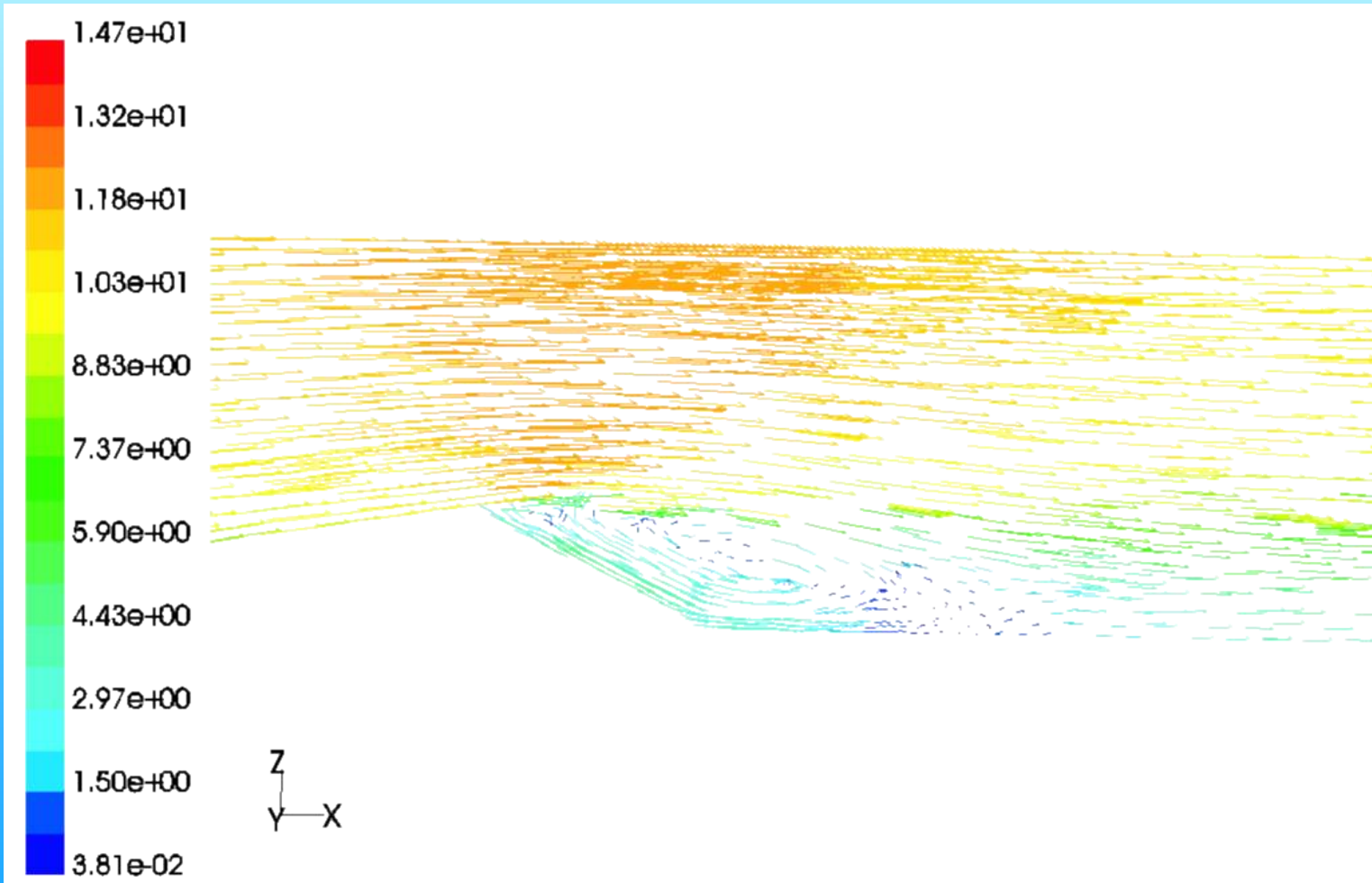


Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Wind über einer Düne



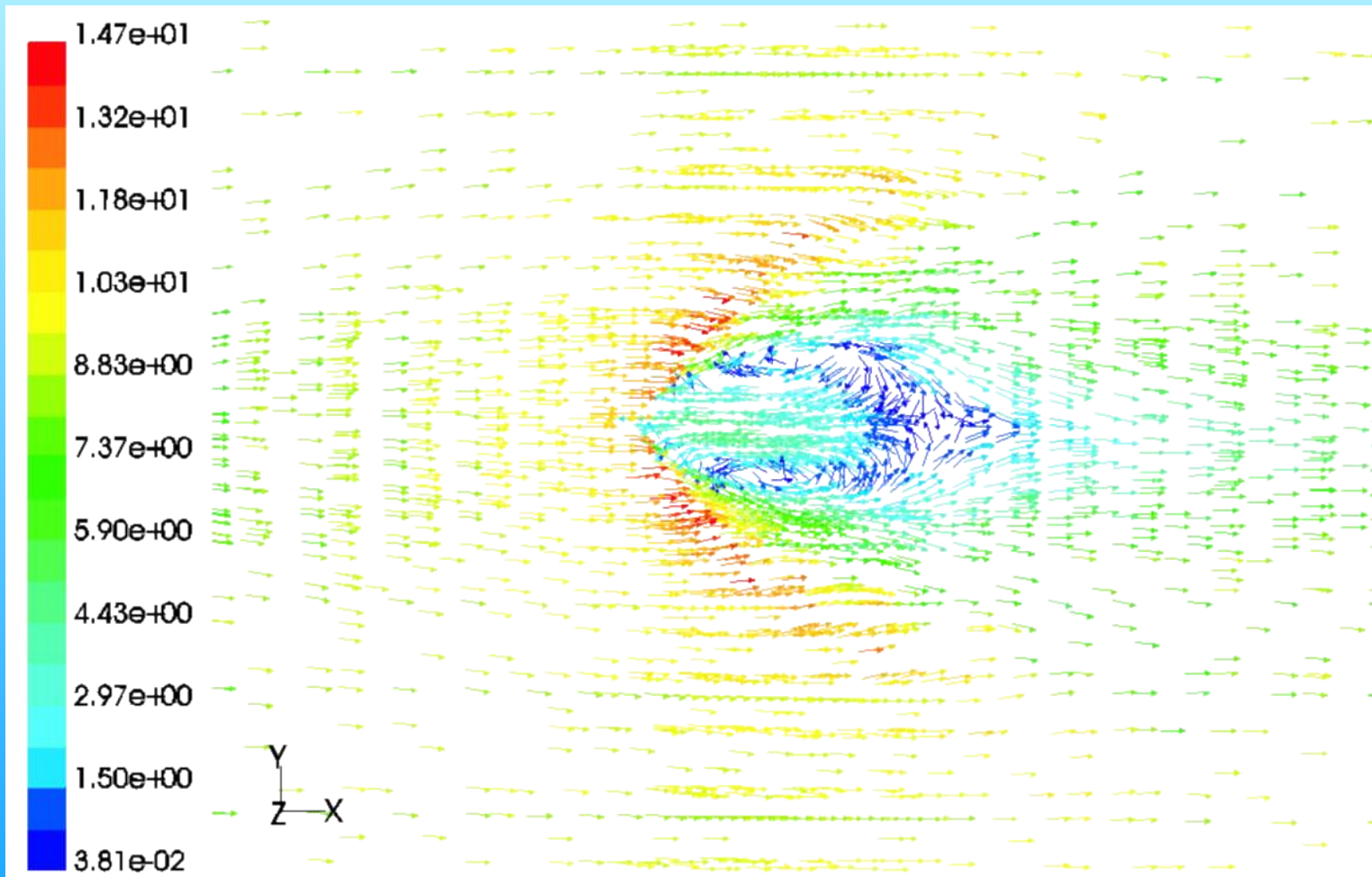
# Geschwindigkeitsfeld in der Windebene



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Apr 17, 1999  
Gerd Sauer mann

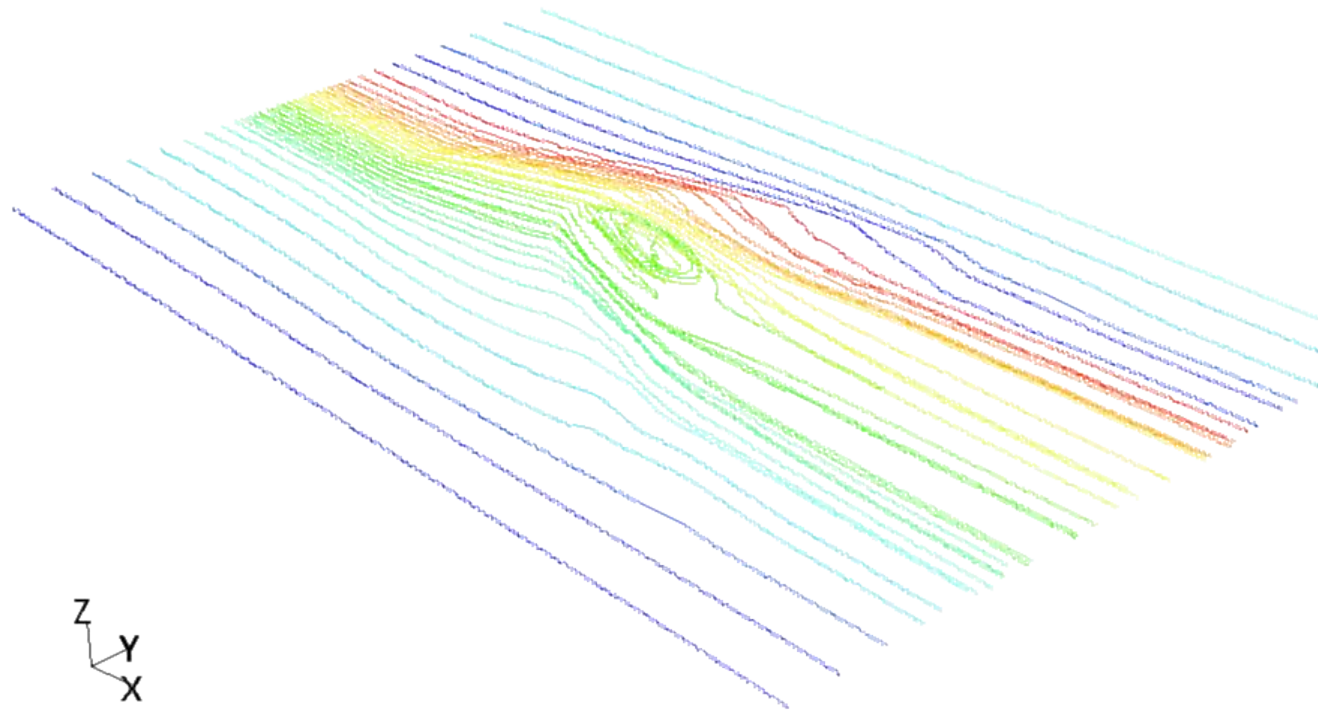
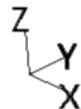
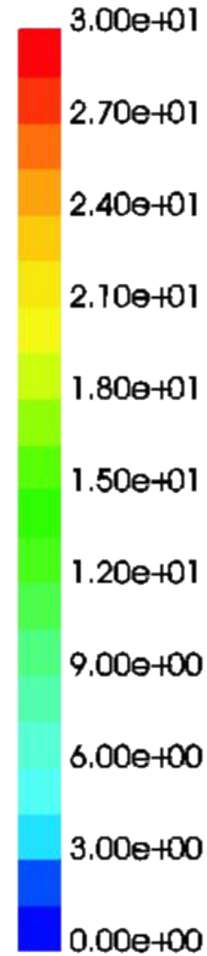
# Projektion des Geschwindigkeitsfeldes



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Apr 17, 1999  
Gerd Sauer mann

# Trajektorien von Testteilchen über Wanderdüne

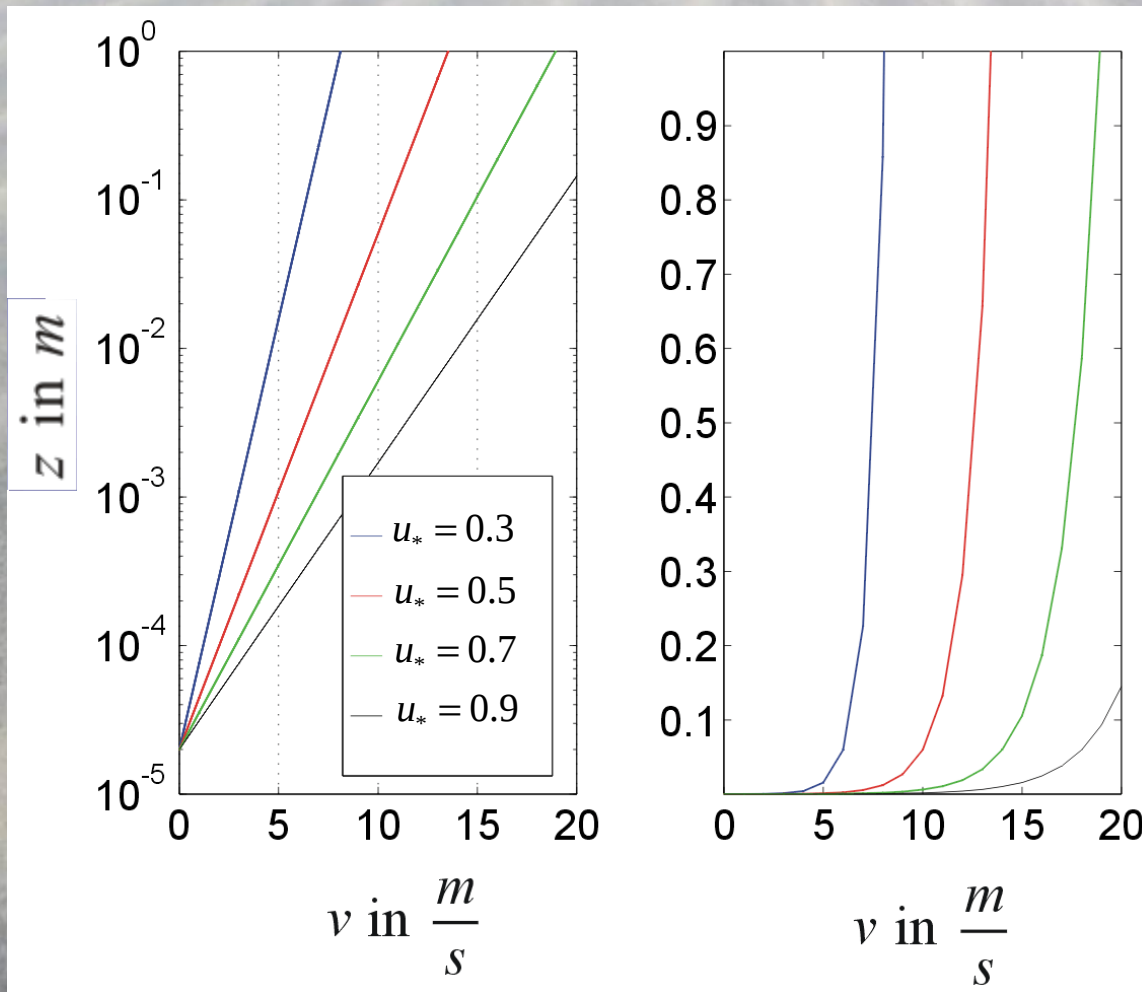


Path Lines Colored by Particle Id

Apr 17, 1999  
Gerd Sauer mann

# Aeolischer Transport

## Profil der atmosphärischen Grenzschicht



Geschwindigkeit wächst logarithmisch mit der Höhe an. Der Vorfaktor dieses logarithmischen Gesetzes, genannt  $u_*$ , beschreibt die globale Stärke des Windes.

$$v(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}$$

mit 
$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_{air}}}$$

$z_0$  : Rauigkeitslänge

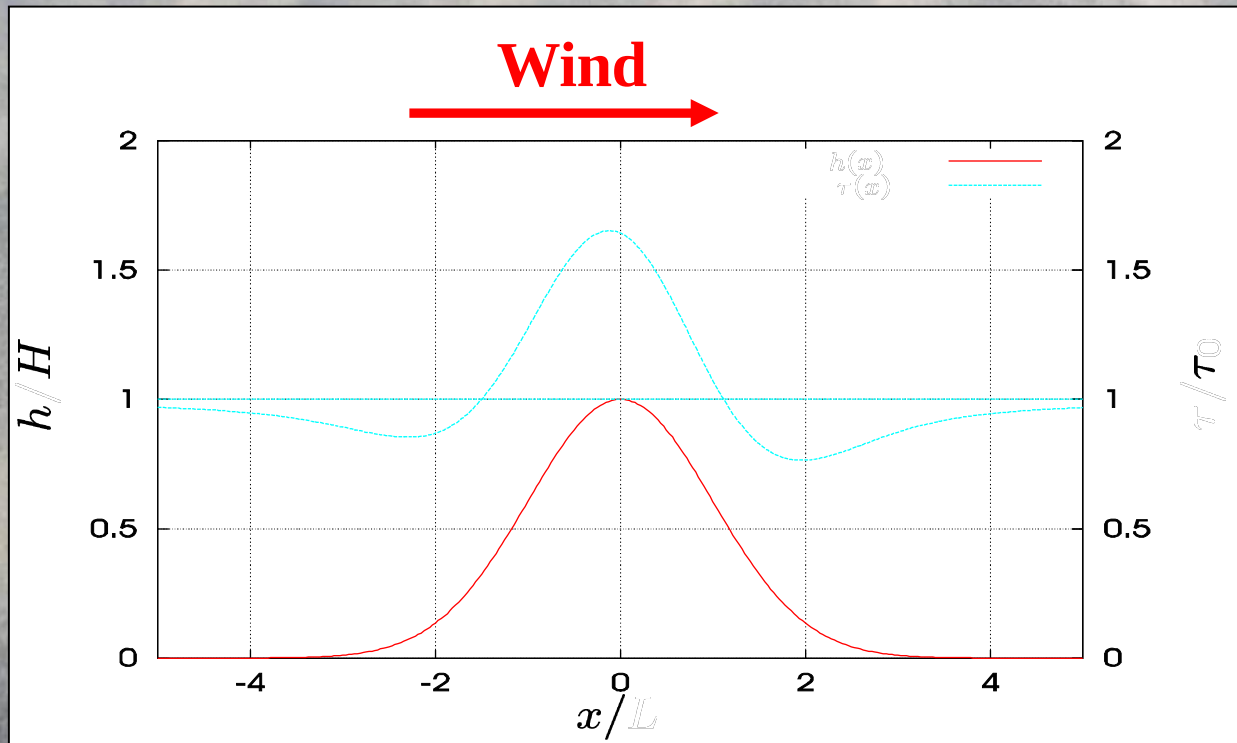
$\tau$  : Scherkraft

$u_*$  : Schergeschwindigkeit

$\kappa$  : von Kármán Konstante

# Scherkraft am Boden

Eine komplizierte Rechnung von Jackson und Hunt hat es erlaubt, die Scherkraft des Windes als Funktion der Steigung der Landschaft zu beschreiben. Dieser Ausdruck enthält zwei Terme: einen lokalen Anteil und einen Ausdruck, welcher die Fernwirkung der Windes berücksichtigt.



rote Kurve: Form des Hügels

blaue Kurve: darauf wirkende Scherkraft des Windes am Boden

# Die Gleichungen



P. S. JACKSON and J. C. R. HUNT, Q. J. R. Meteorol. Soc. 101, 929 (1975)

**eindimensional:** 
$$\tau(x) = \tau_0 \left( 1 + A \left[ \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h'}{x - \xi} d\xi + Bh' \right] \right)$$

**zweidimensional:** 
$$\tau_x^0 = \frac{h^2 \rho^2}{|k_x|} \frac{2}{u^2(l)} \pm \frac{2}{z} \ln \frac{l}{z} \frac{|k|^2}{k^2} \frac{K_1(2\sigma)}{K_0(2\sigma)}$$

$$\tau_y^0 = \frac{h^2 \rho^2 k_y}{|k|} \frac{2}{u^2(l)} 2\sqrt{2} K_1(2\sqrt{2} \sigma) \quad \text{mit} \quad \sqrt{\sigma E k z_0}$$

**$K_0$  und  $K_1$  sind modifizierte Besselfunktionen,  
 $u(l)$  ist das normalisierte Geschwindigkeitsprofil,  
 $K_x$  und  $k_y$  sind die Komponenten des Wellenvektors,**

**„~“ heisst Fouriertransformation und  $z_0 = 1\text{mm}$ .**



# Ralph A. Bagnold

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, . Dezember,

# Transportmechanismen von Sand in Luft

## Reptation

- große Körner ( $d > 0.4 \text{ mm}$ )
- Kriechen auf der Oberfläche

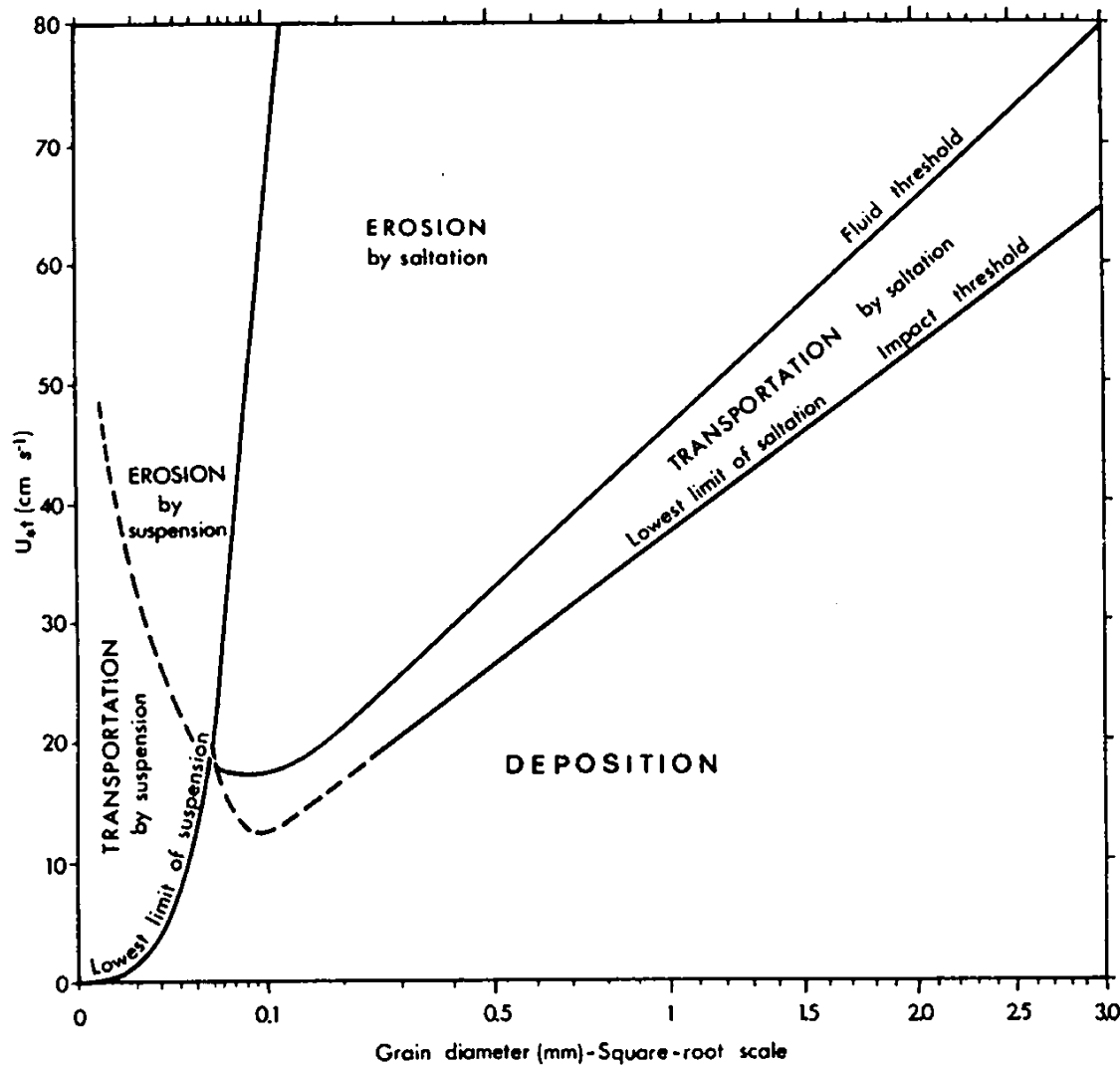
## Saltation

- typische Körner ( $0.1 \text{ mm} < d < 0.3 \text{ mm}$ )
- Aufprallen nach kurzen Trajektorien

## Suspension

- kleine Körner ( $d < 0.06 \text{ mm}$ )
- Legt große Entfernungen in der Atmosphäre zurück.

# Aeolischer Transport



Erosion

und

Ablagerung

K. Pye 1990

mit Daten von

Bagnold and Chepil

# Saltation



# Saltation auf nassem Boden

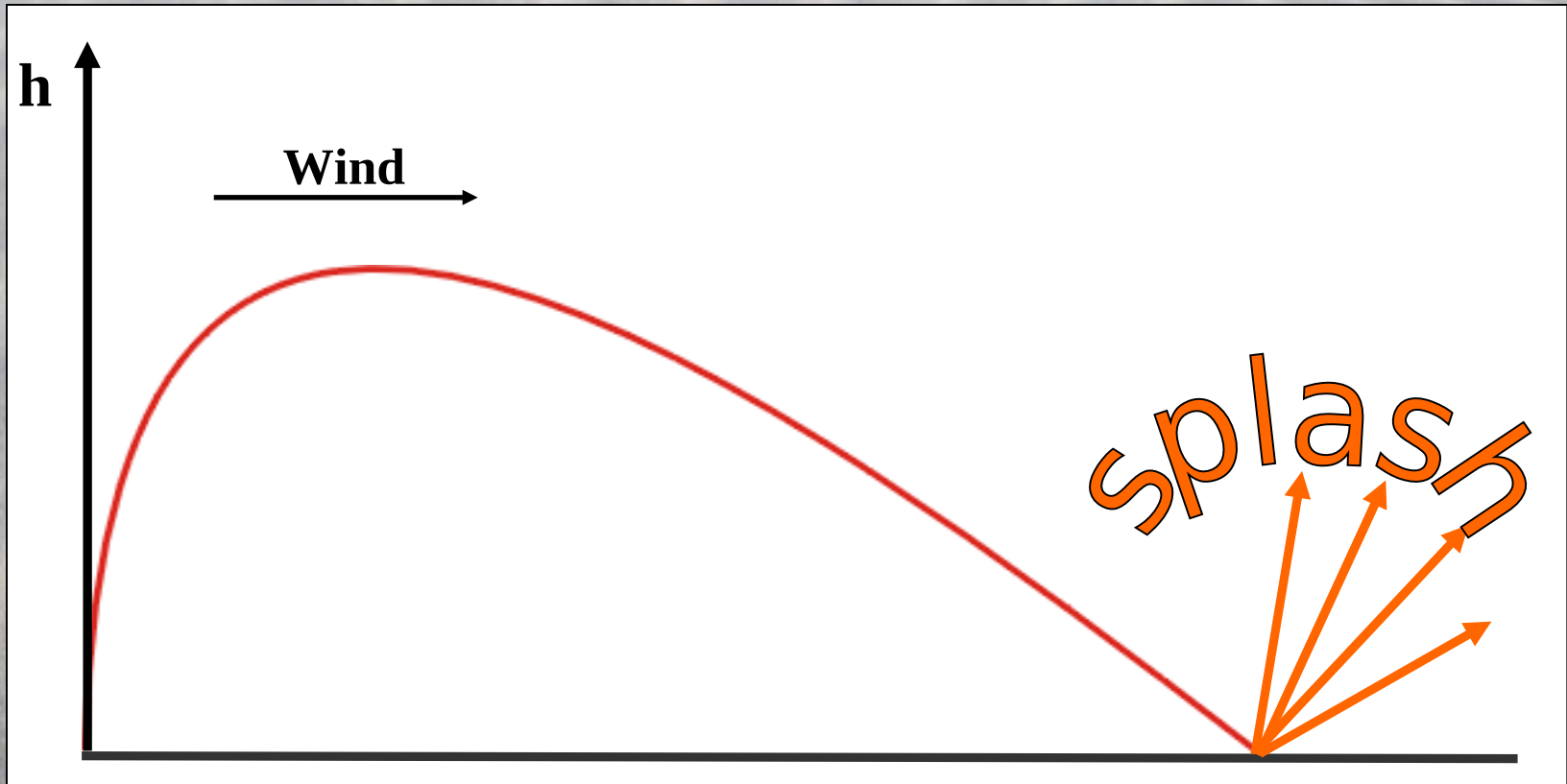
**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Saltationsmechanismus

Körner werden aus dem Boden gezogen und durch den Wind beschleunigt.



Mit hoher Energie prallen sie wieder auf und lösen dabei mehrere neue Körner aus dem Boden, die in einer Kaskade immer mehr Körner in Saltation versetzen.

# Ripples

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Ripples

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**



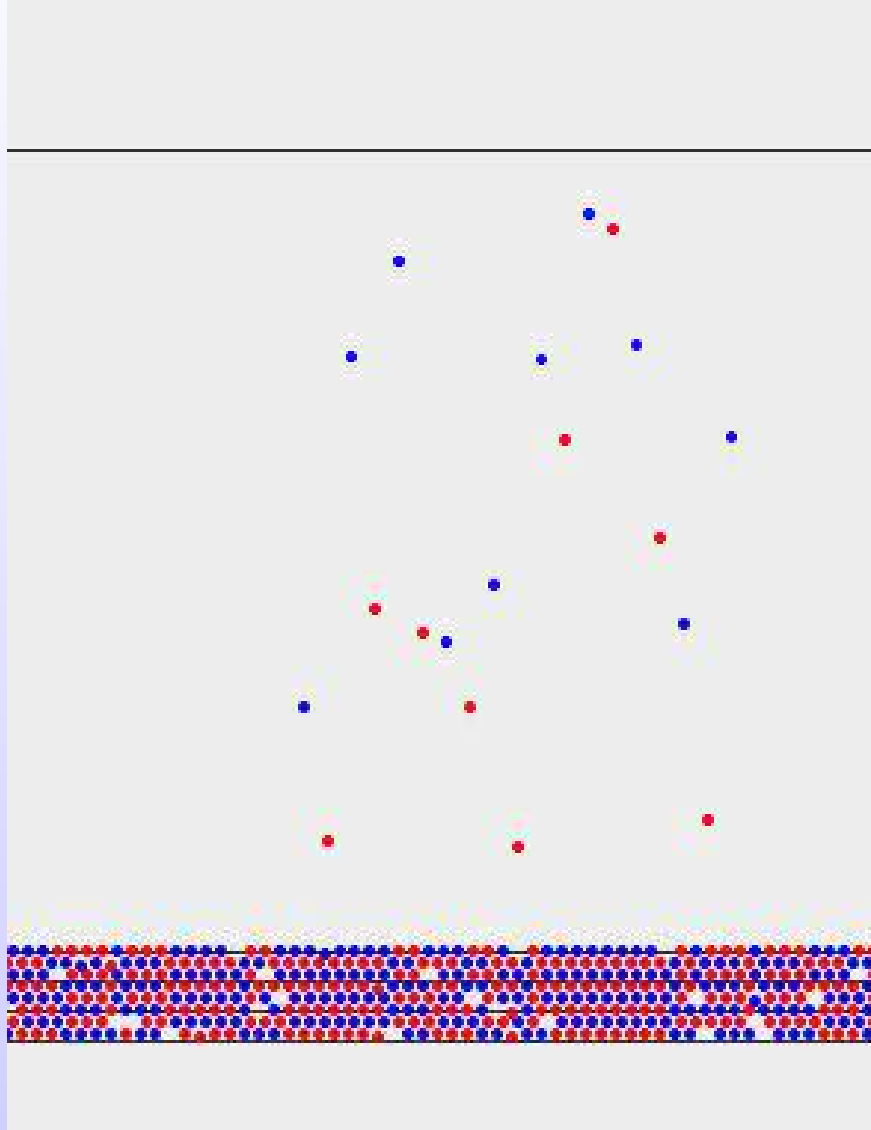
# Megaripples

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# DEM Simulation für $u_* = 0.67 \text{ m/s}$



M.V. Carneiro, T. Pächt and HJH  
Phys. Rev.Lett., 107, 098001 (2011)

# Saturierter Fluss mit DEM

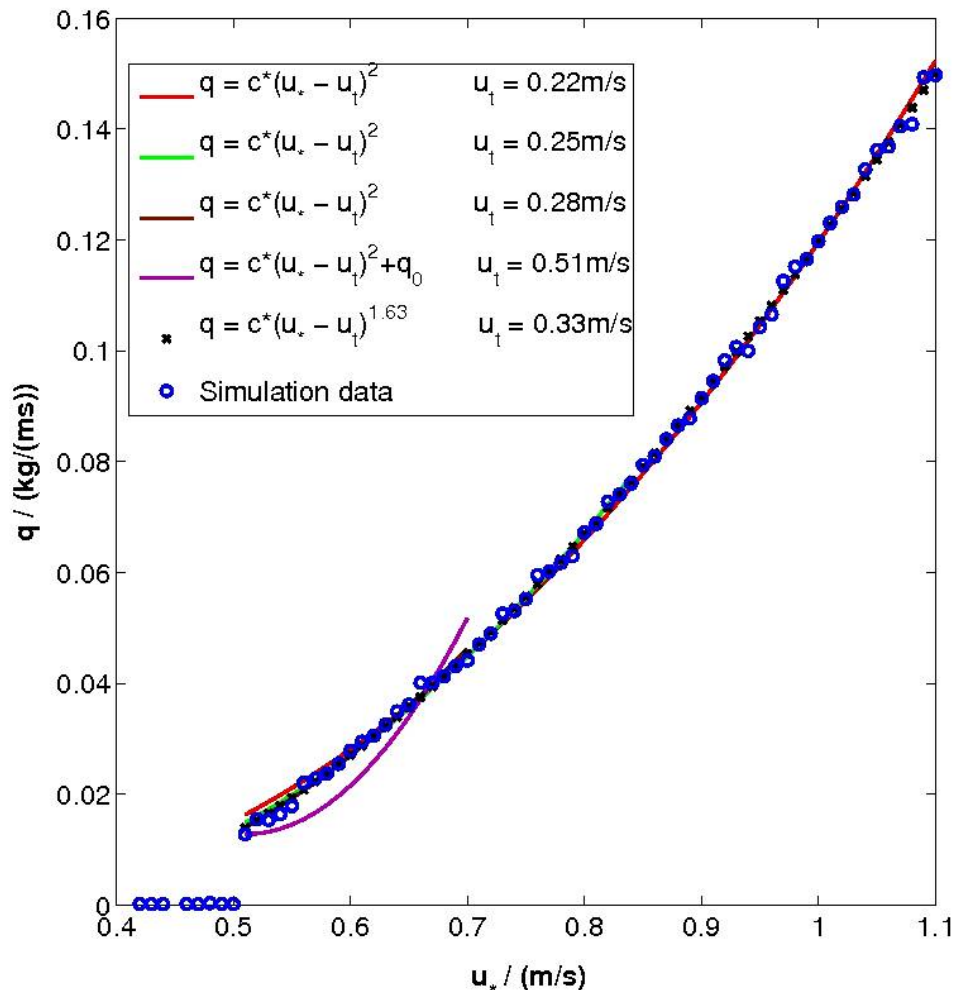
## Vergleich mit empirischen Formeln

Bagnold:

$$q_s \propto u_*^3$$

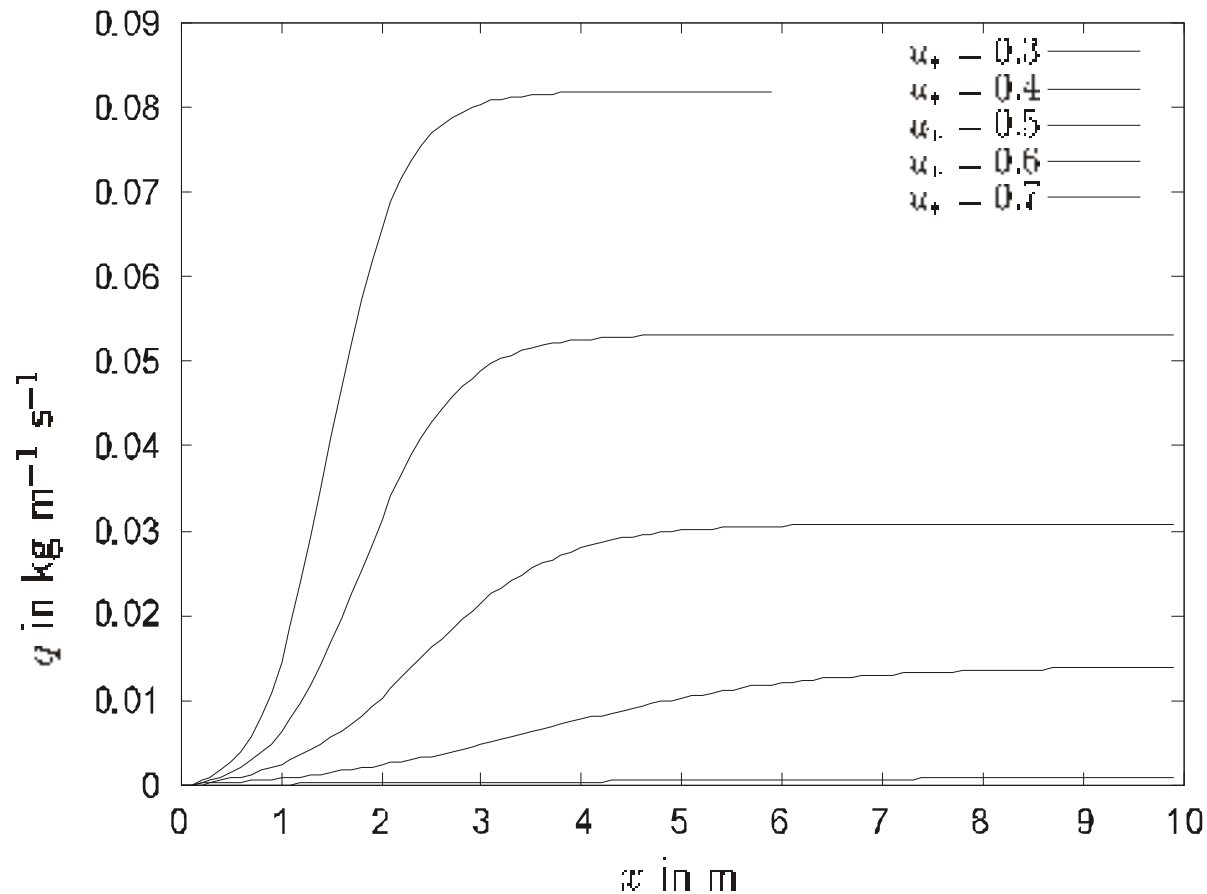
Lettau and Lettau:

$$q_s = C_L \frac{\rho}{g} u_*^2 (u_* - u_t)$$



# Saltation

Anwachsen des Sandflusses bis zum Sättigungswert für verschiedene Windstärken



# Saturierter Sandfluss $q_s$

Es existieren empirische Ausdrücke für den saturierten Fluss, welche heutzutage in Windkanälen bestimmt werden. Der erste Ausdruck stammt von Bagnold (1941).

Heute wird meistens eine Variante von Lettau und Lettau (1978) benutzt.

Aus dem Saltationsprozess kann man eine Gleichung herleiten, um die Entwicklung des Sandflusses hin zum saturierten Wert zu beschreiben. Dies wurde in der Doktorarbeit von Gerd Sauermann erstmalig bewerkstelligt.

Die resultierende Gleichung ist die aus der Populationsdynamik bekannte „logistische Gleichung“:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{1}{l_s(u_*)} q \left( 1 - \frac{q}{q_s(u_*)} \right)$$

Außer dem saturierten Fluss  $q_s$  geht auch noch die Saturationslänge  $l_s$  ein.

Beides sind nicht-lineare Funktionen der Scherkraft des Windes.

# Gleichungen zum Sandfluss $q$



K. KROY, G. SAUERMAN, H.J. HERRMANN, Phys. Rev. Lett. 88, 054301 (2002)

## Sandflussevolution:

Logistische Gleichung

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{1}{l_s(u_*)} q \left( 1 - \frac{q}{q_s(u_*)} \right)$$

Saturationslänge:

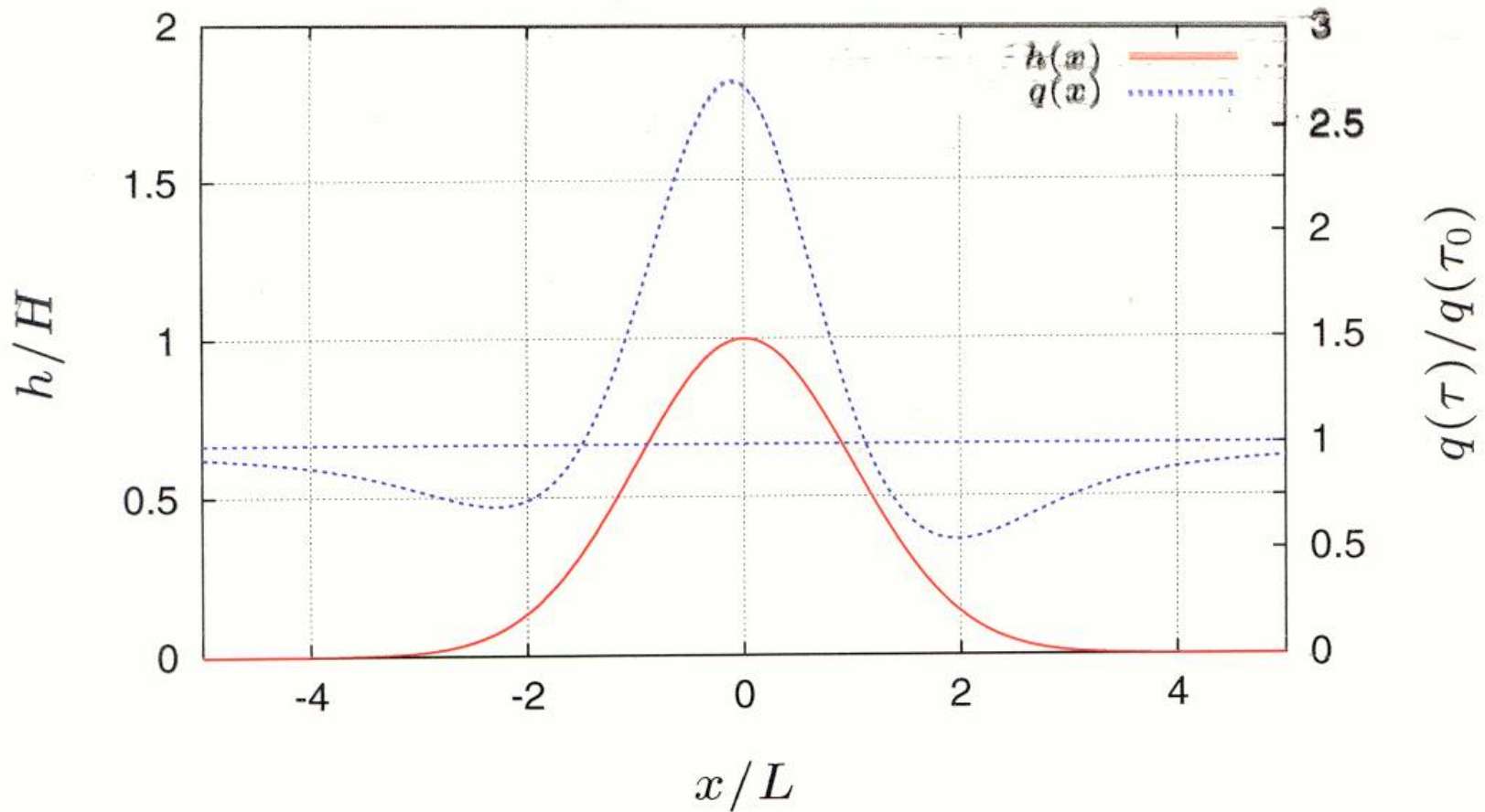
$$l_s(u_*) = \frac{C}{\gamma} \frac{u_{*t}^2}{u_*^2 - u_{*t}^2} \frac{u_*^2}{g} \frac{\tau}{\tau - \tau_t}$$

## Gesättigter Fluss $q_s$ :

Lettau & Lettau (1978)

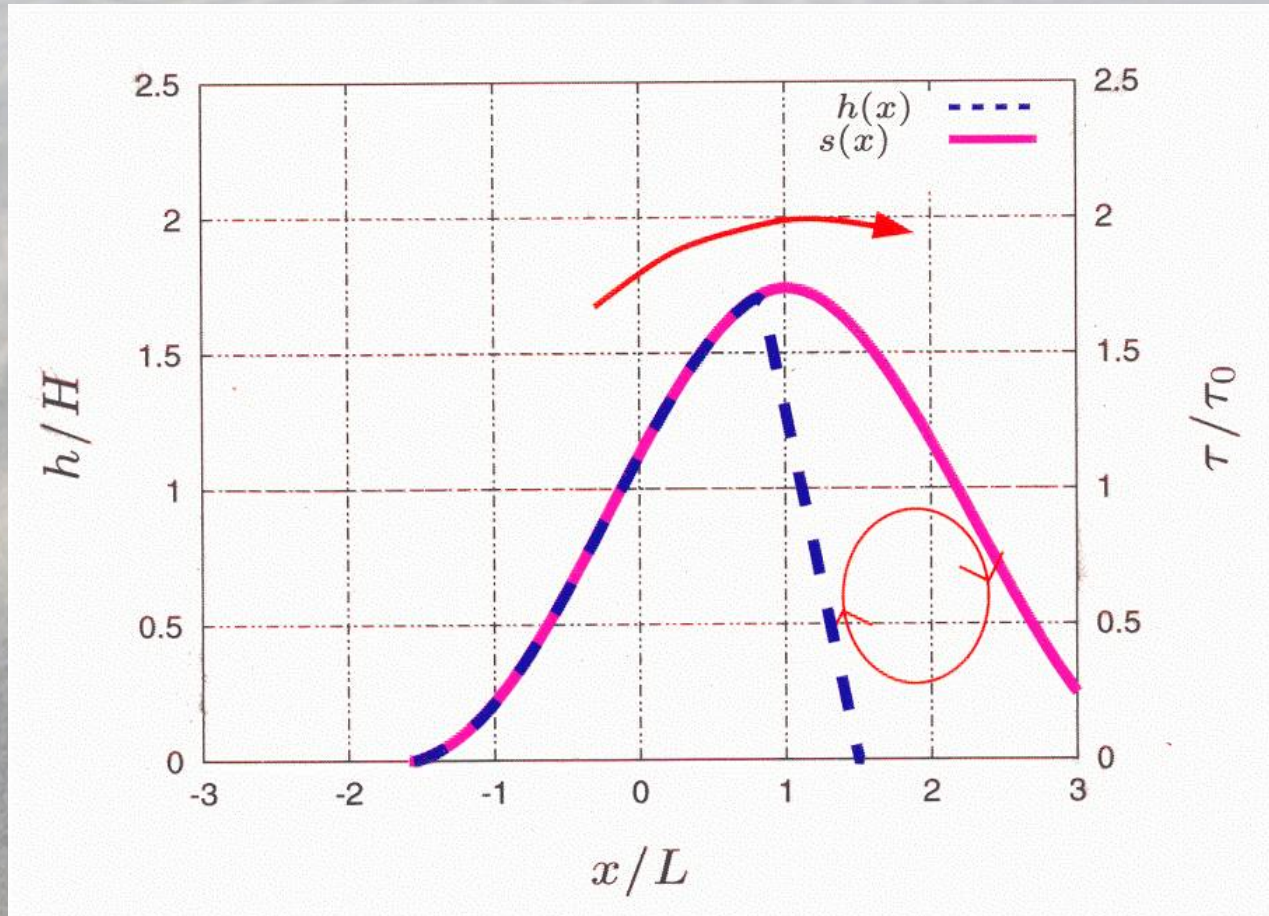
$$q_s = C \frac{\rho_{air}}{g} u_*^2 (u_* - u_{*t})$$

# Sandfluss über einen Hügel



blaue Kurve: Sandfluss  
rote Kurve: Form des Hügels

# Abtrennungsblase



Phenomenologisches Modell: Polynom 3. Grades

Die Einhüllende wird benutzt, um die Scherkraft  $\tau$  zu bestimmen.



# Lawinen

**Falls die Steigung irgendwo größer ist als der Böschungswinkel, so wird die Oberfläche so geändert, daß die Steigung maximal den Böschungswinkel erreicht.**

**Dies bewerkstelligt das Modell durch eine Art Glättung, welche auf eine klassische Arbeit von Bouchaud, Cates, Ravi Prakash und Edwards zurückgeht, das sogenannte “BCRE Modell”.**

(J. P. Bouchaud, M. E. Cates, J. R. Prakash and S. F. Edwards, Phys. Rev. Lett. 74, 1982 (1995))

# Resultierendes System von gekoppelten Differentialgleichungen

Wir haben drei variable Felder:  $\tau(x), q(x), h(x)$

Jackson & Hunt 
$$\tau(x) = \tau_0 \left( 1 + A \left[ \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h'(\zeta)}{x - \zeta} d\zeta + Bh'(x) \right] \right)$$

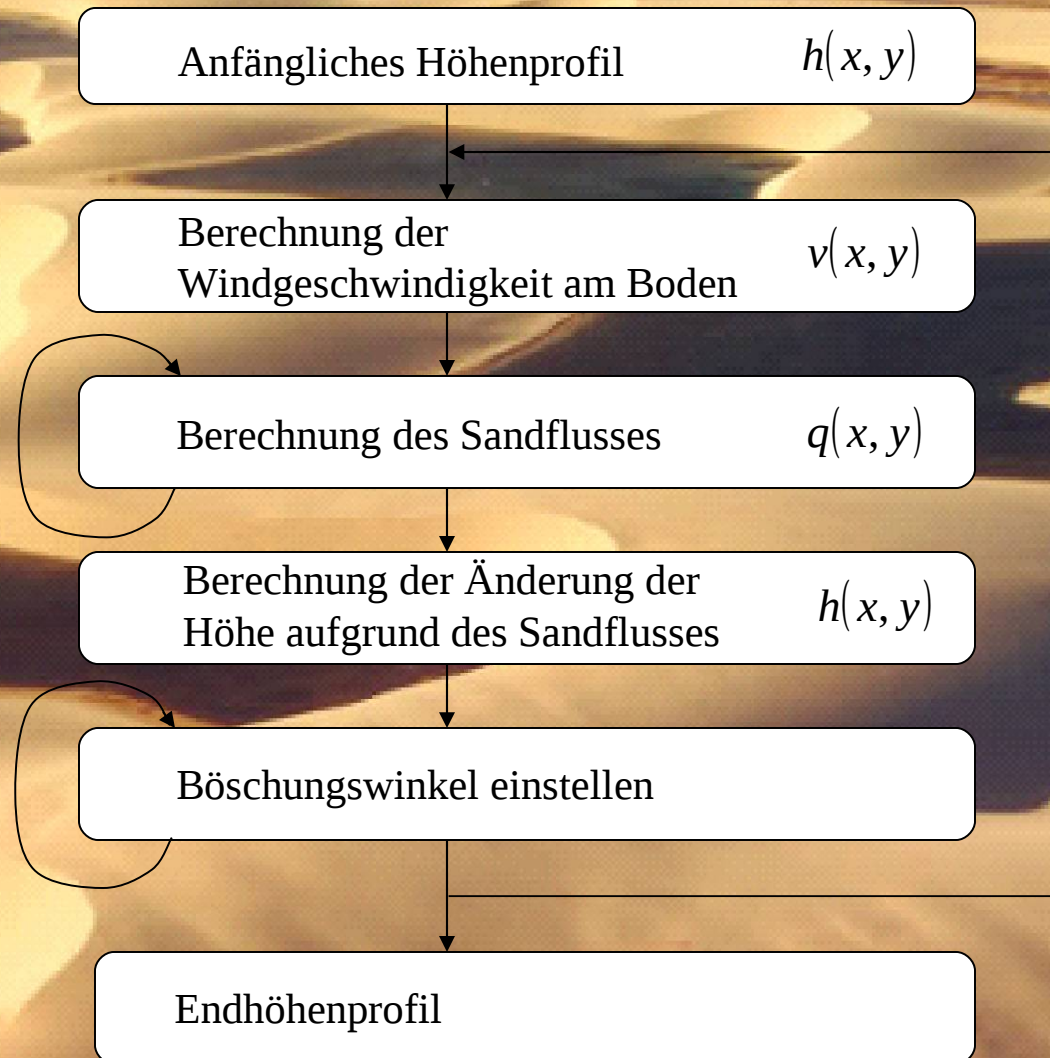
Sandfluss: 
$$q'(x) = \frac{q(x)}{l_s(\tau)} \left( 1 - \frac{q(x)}{q_s(\tau)} \right)$$

mit 
$$l_s(\tau) = \frac{a\tau(x)}{(\tau(x) - \tau_t)}, \quad q_s(\tau) = b\tau(x)(\tau(x) - \tau_t)^{\frac{1}{2}}$$

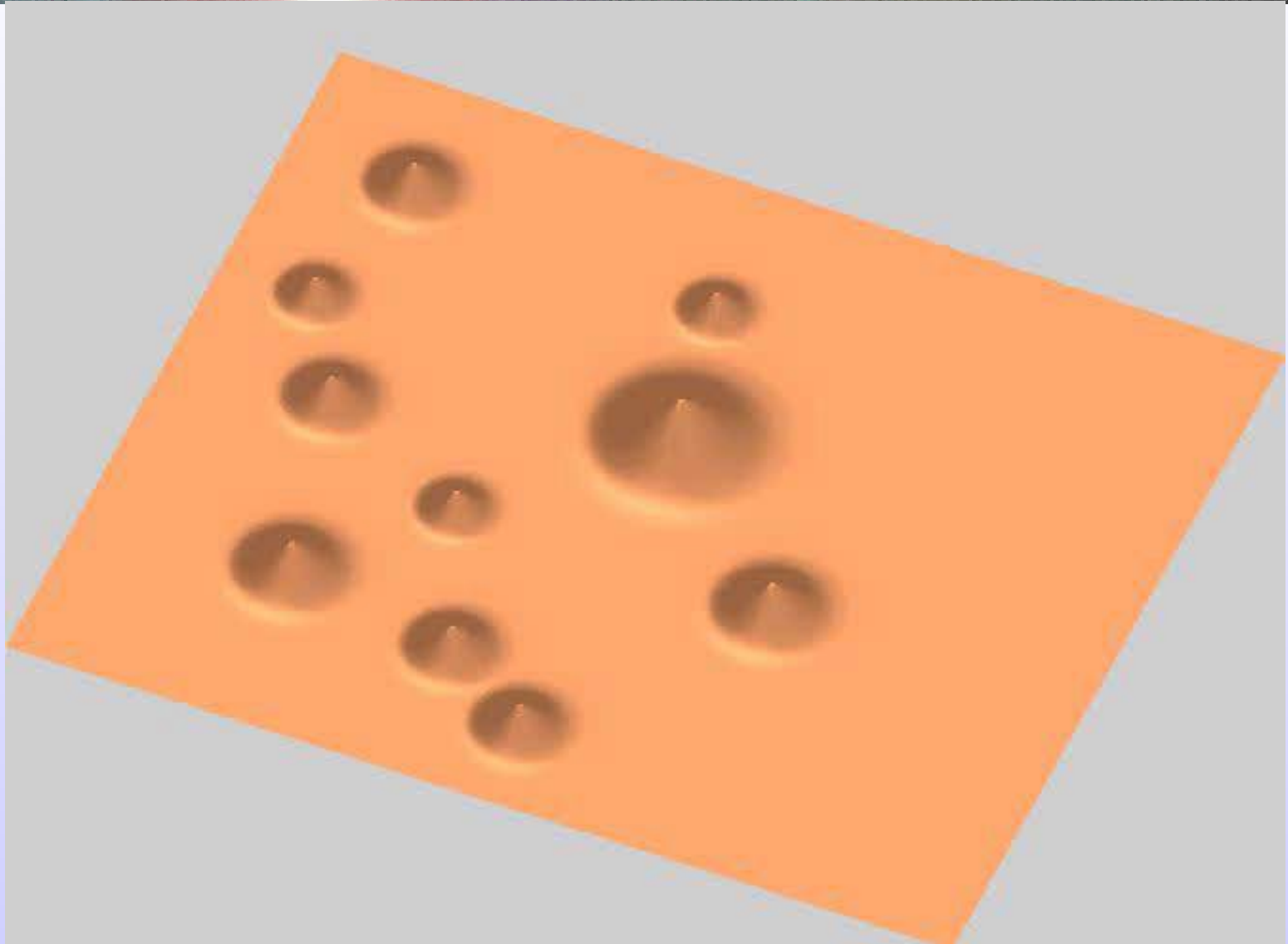
Massenerhaltung: 
$$\frac{\partial h(x)}{\partial t} = \frac{1}{\rho} q'(x)$$

Nebenbedingung: 
$$|h'(x)| \leq \tan \Theta$$

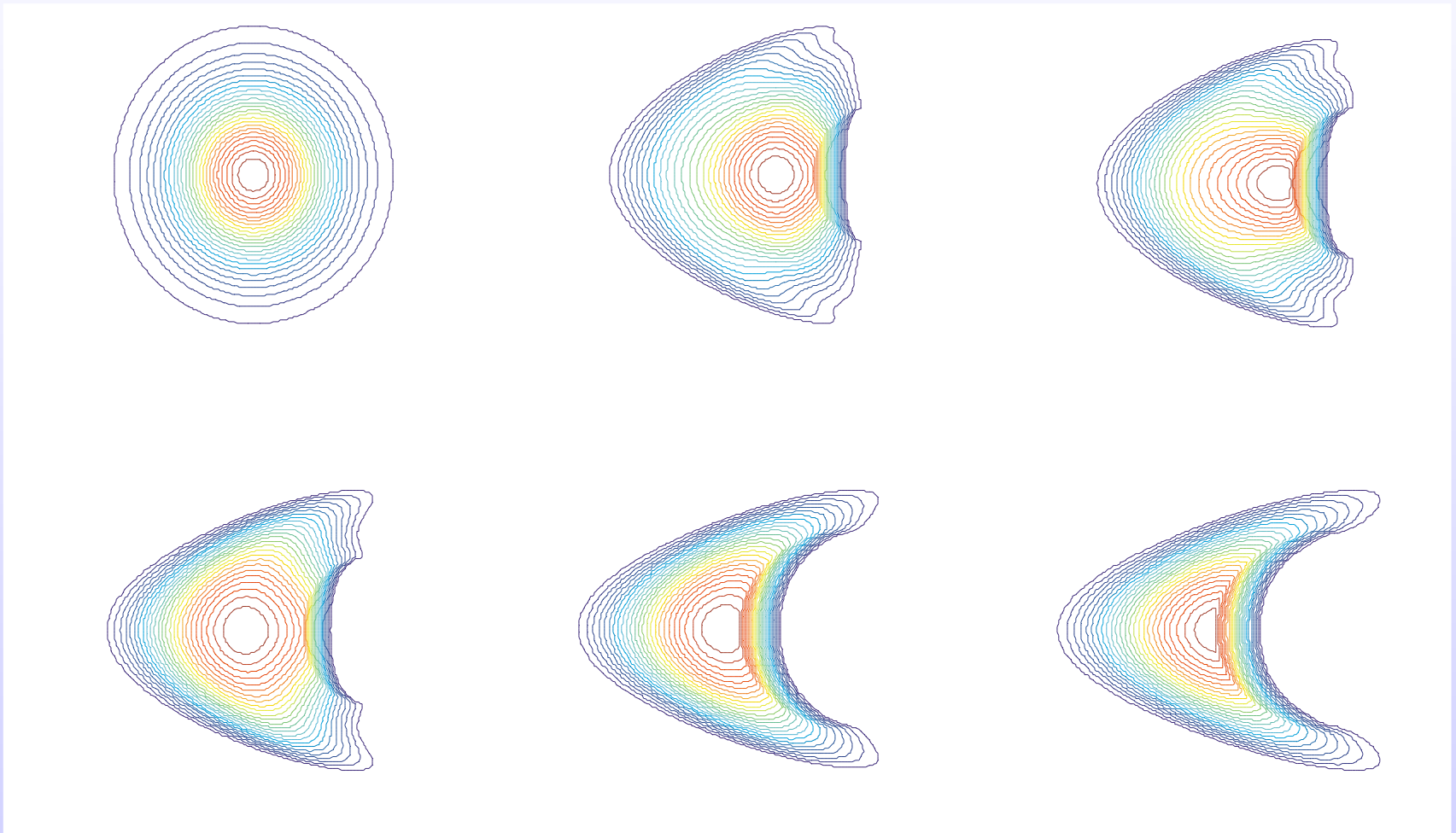
# Lösung des Gleichungssystems



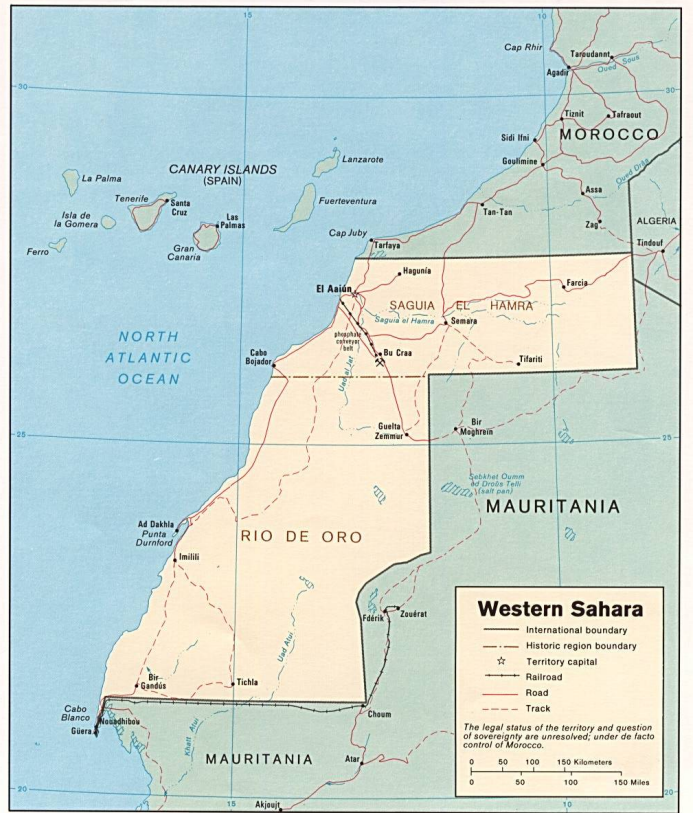
# Simulation eines Dünenfeldes



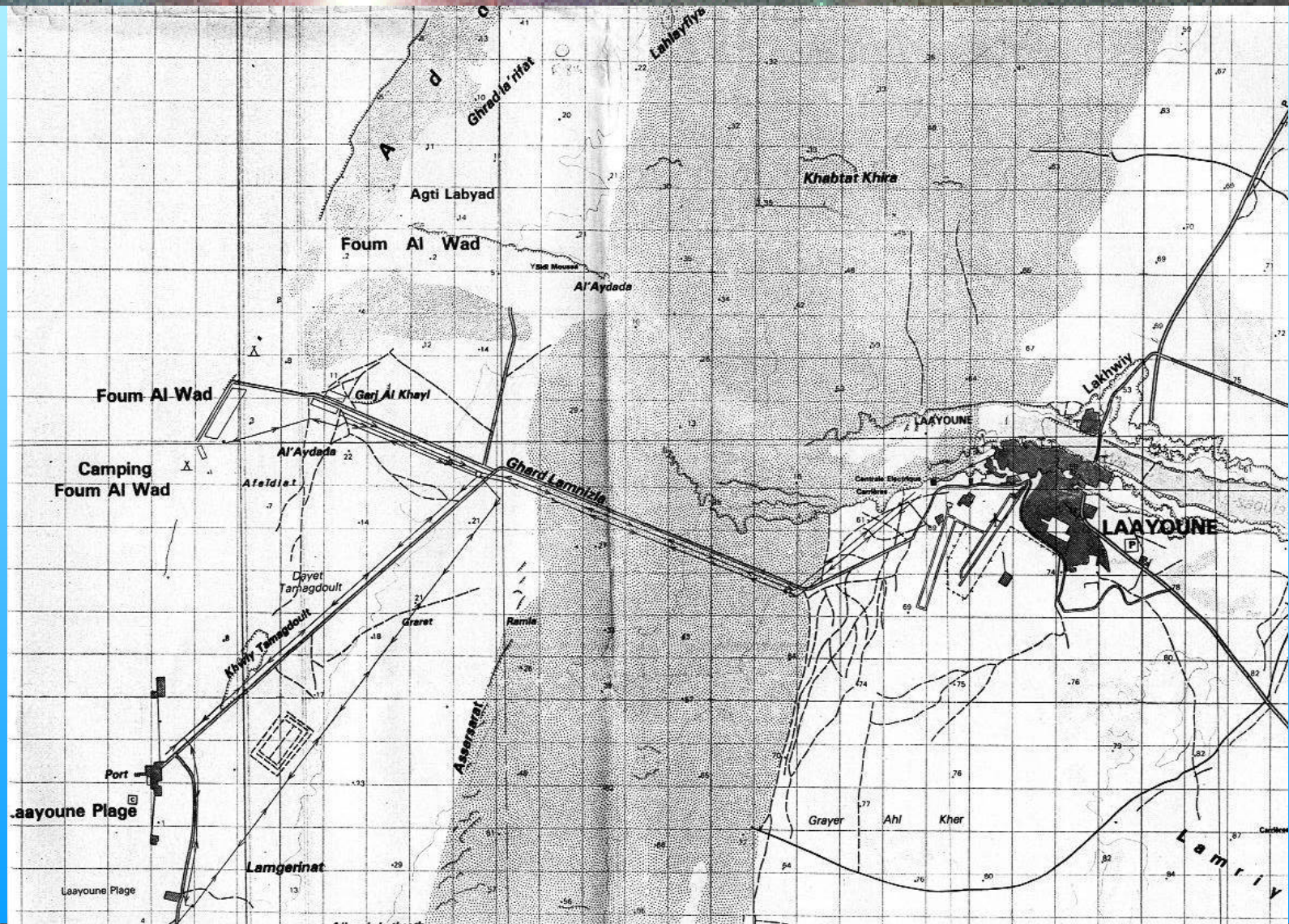
# Entwicklung zur Wanderdüne



# Marokko



# Gegend von Laayoune



# Luftaufnahme des Dünenfeldes





# ..und auf dem Boden

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Das Team

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Fahrt zum Dünenfeld

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Blick aus dem Fenster

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Gleitfläche der Wanderdüne

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Die Kante rutscht

**ETH**

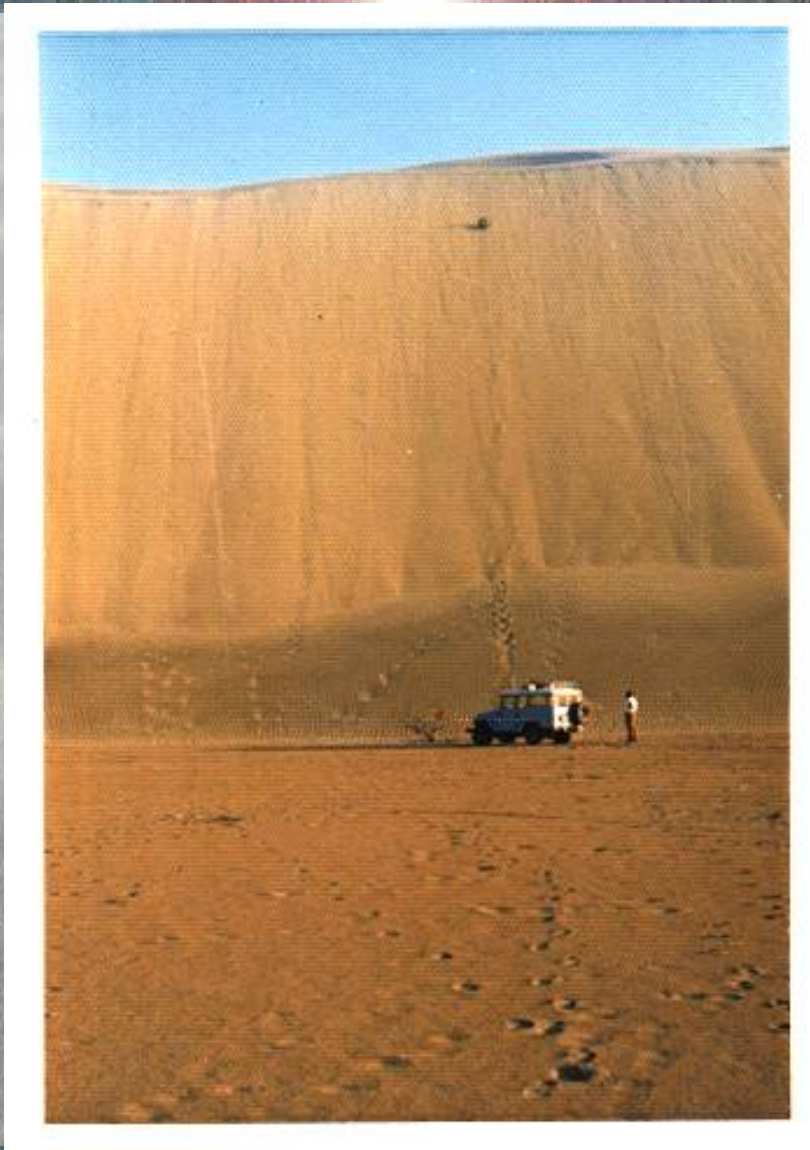
**...bis nach unten**

**ETH**



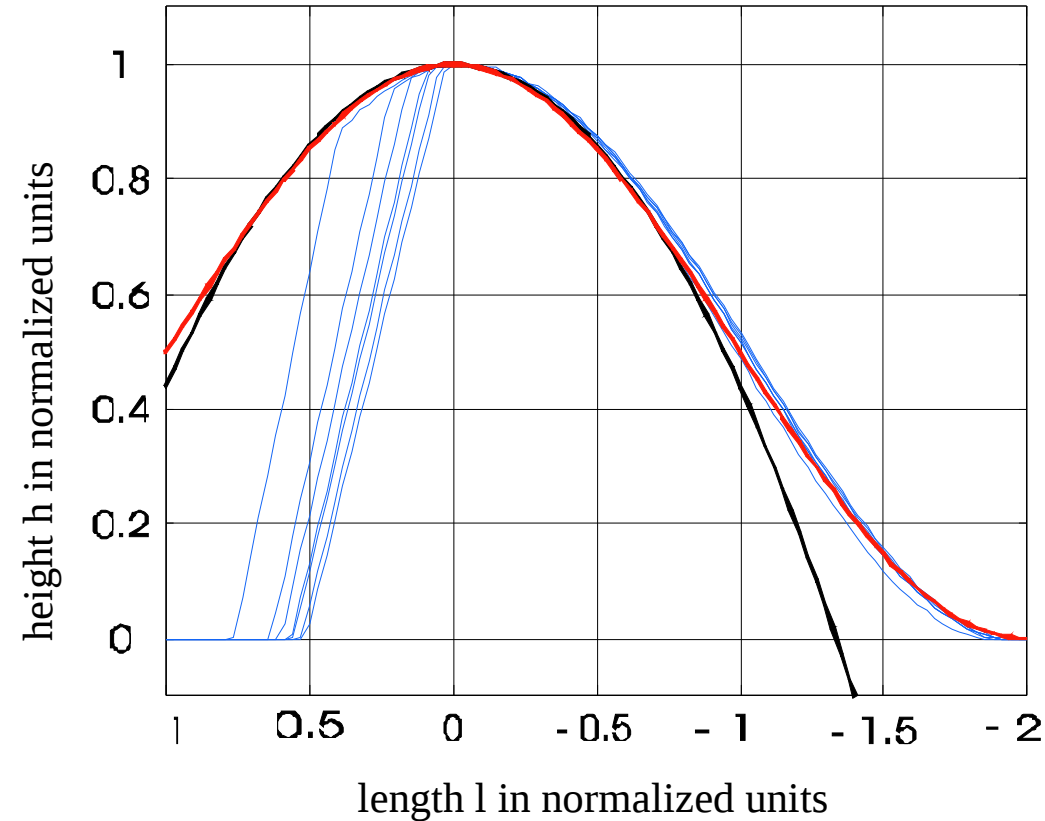
**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Der Gesang der Dünen

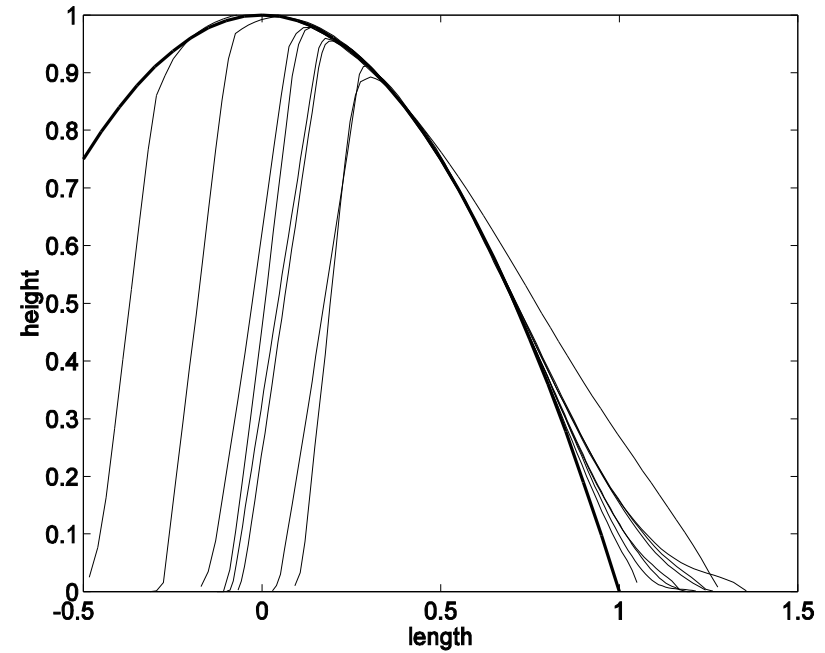




# Längsprofil: Vergleich mit Theorie

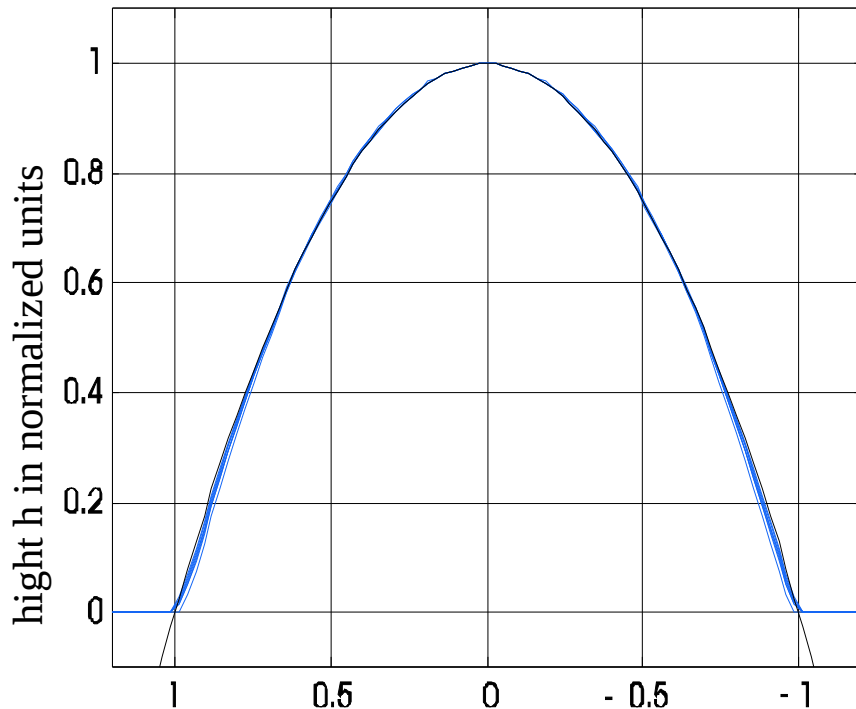


**Berechnung**



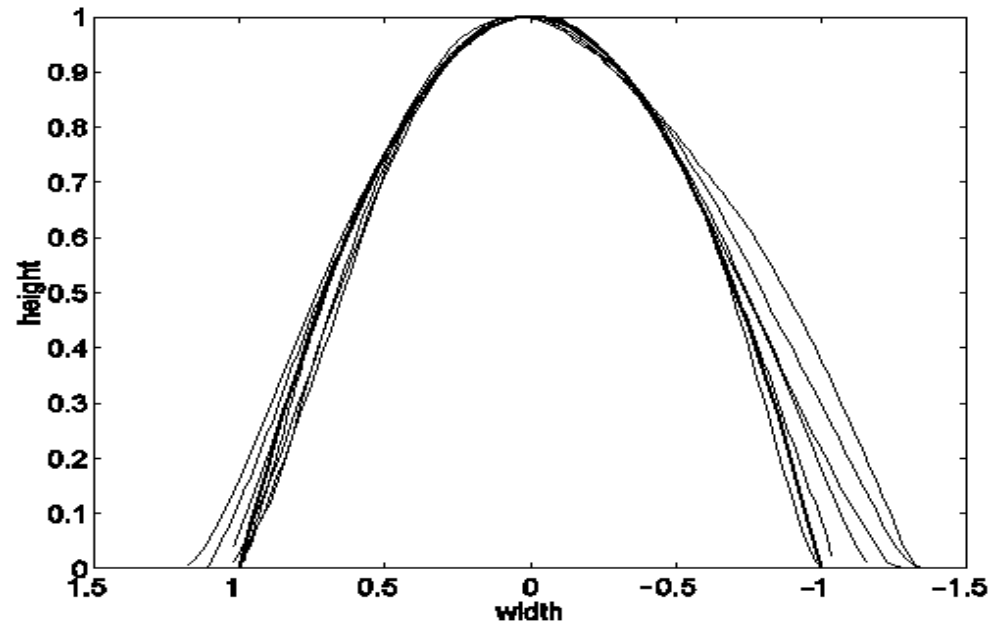
**Feldmessung**

# Querprofil: Vergleich mit Theorie



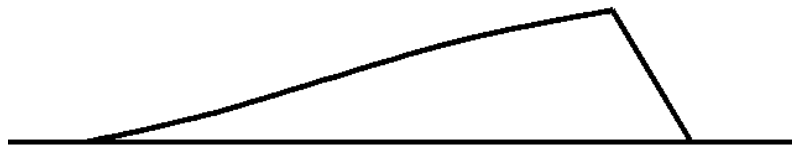
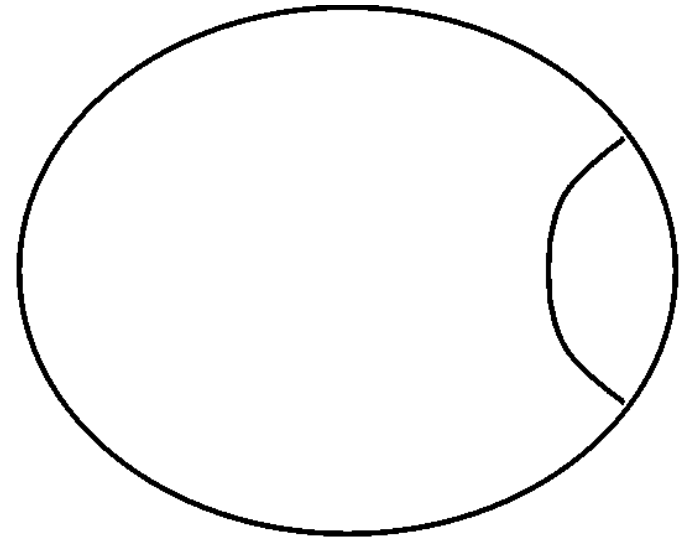
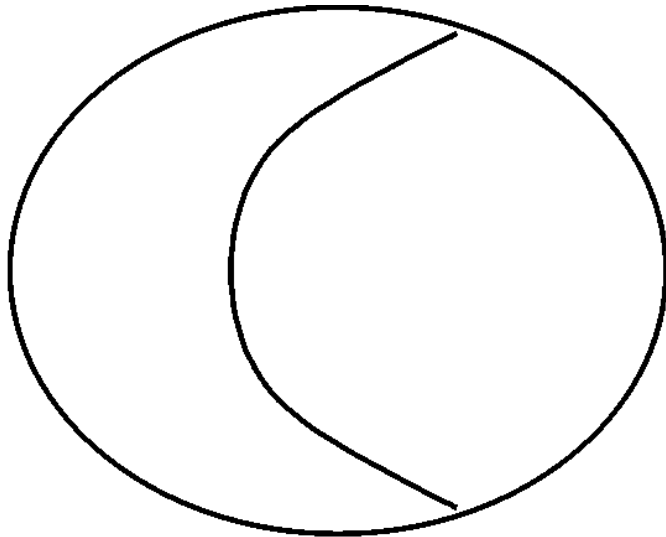
width w in normalized units

**Berechnung**



**Feldmessung**

# Kleine und große Dünen

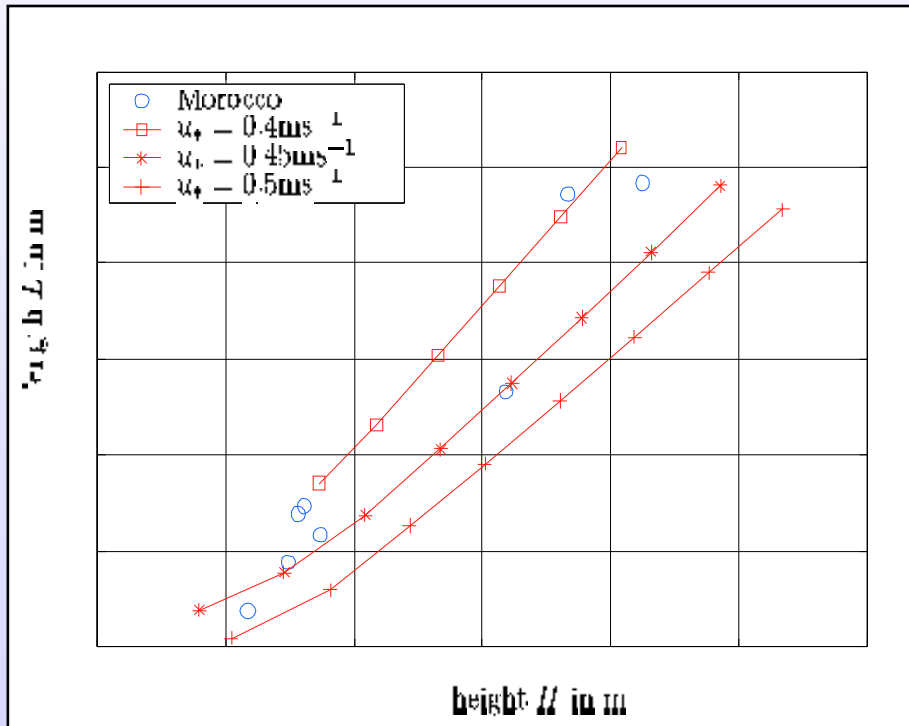


**gross**



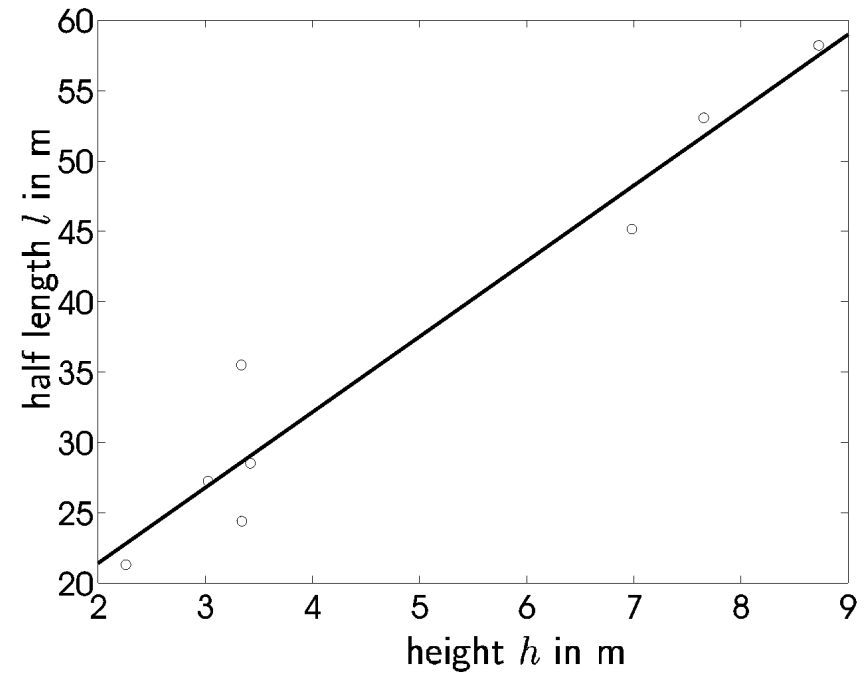
**klein**

# Länge - Höhe



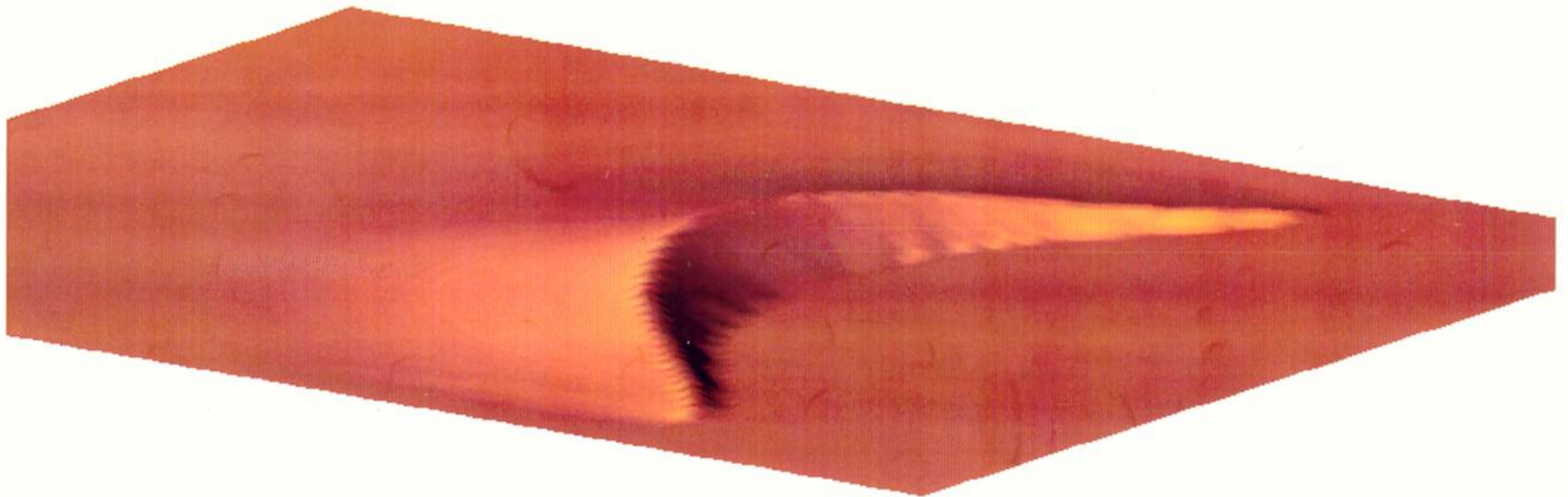
Berechnung

Length  $l$  vs Height  $h$



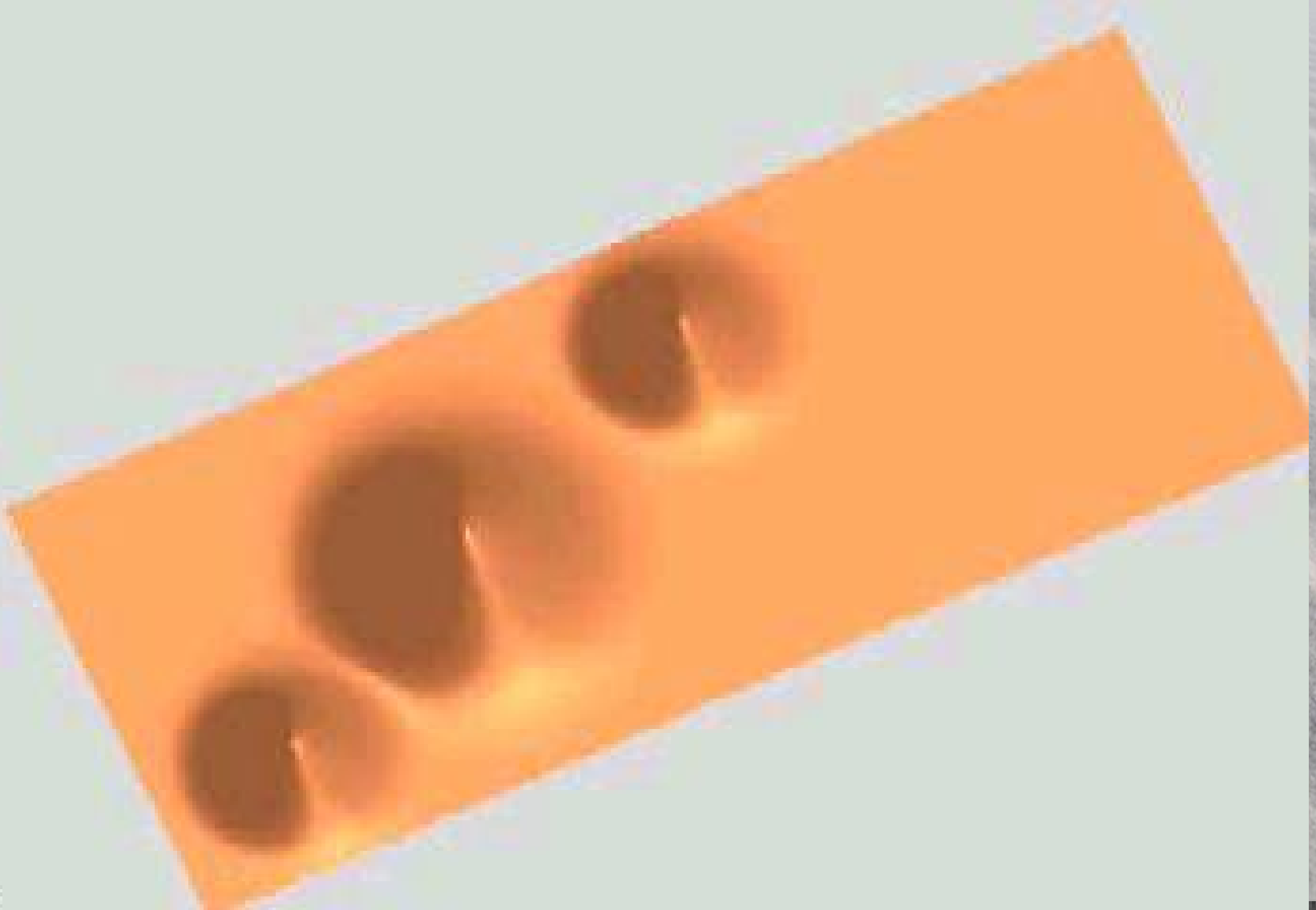
Feldmessung

# Virtuelle Wanderdüne



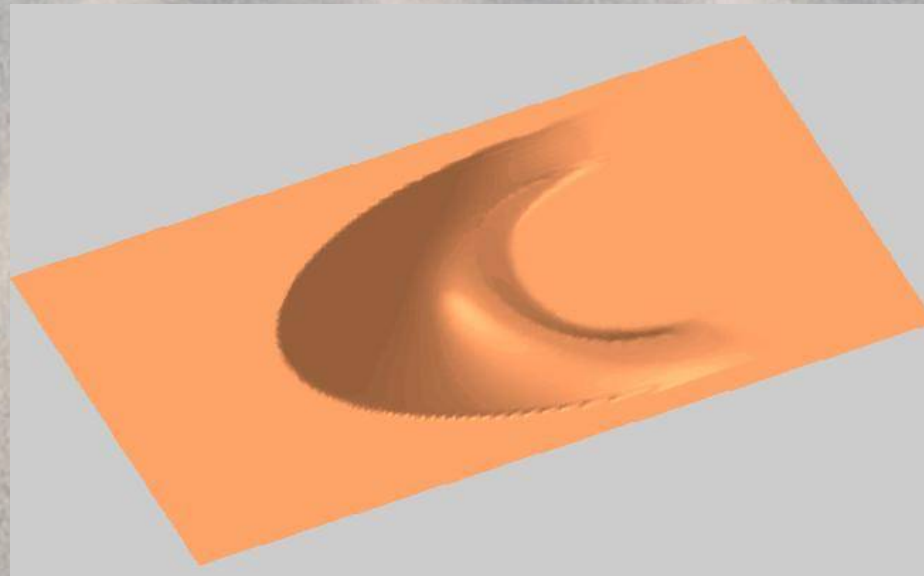
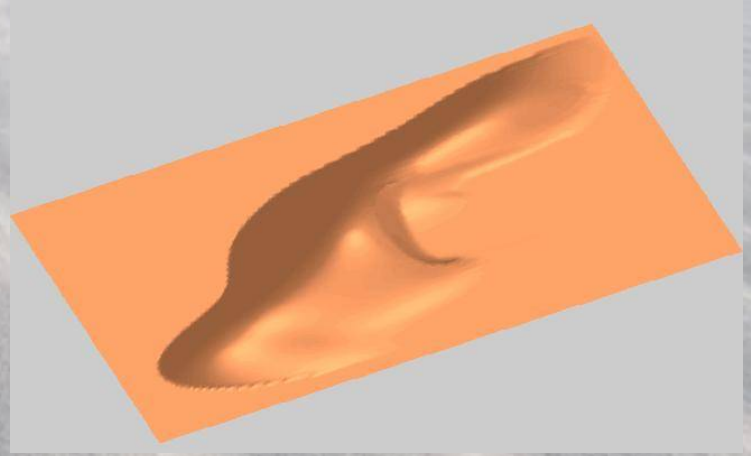
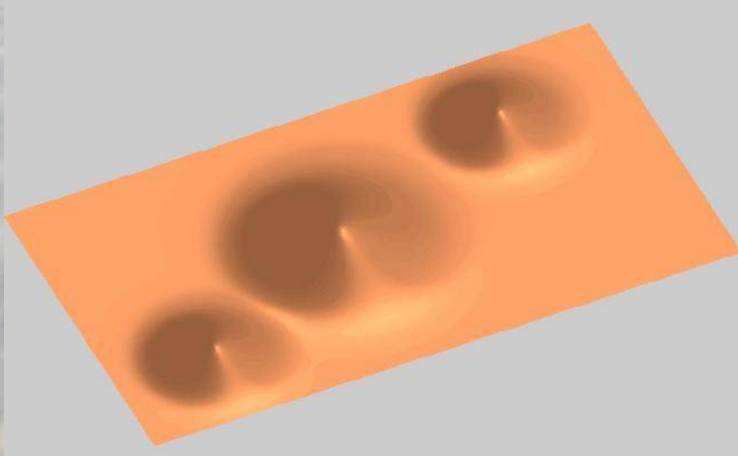
# Entwicklung von drei kegelförmigen Hügeln

**ETH**

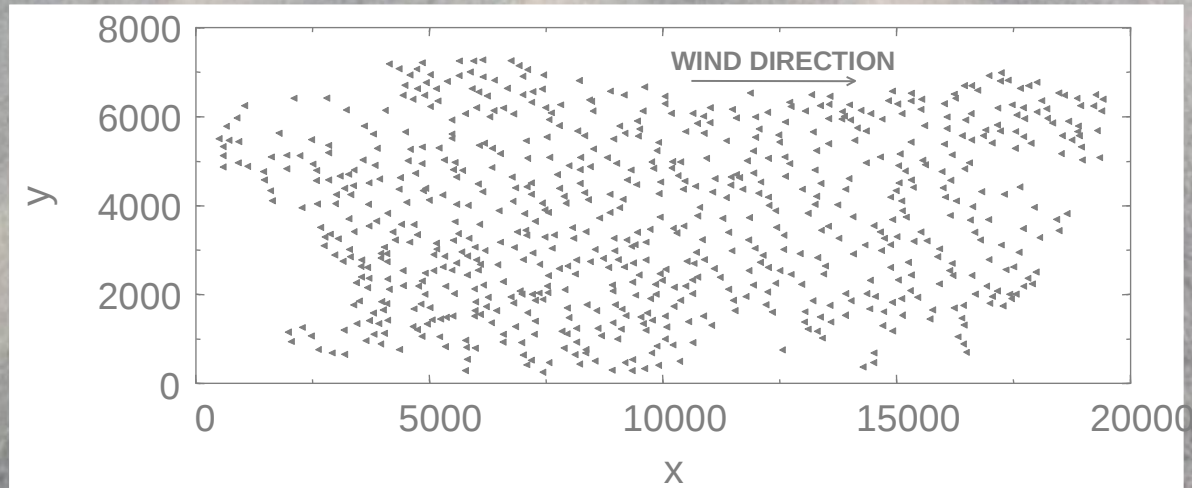
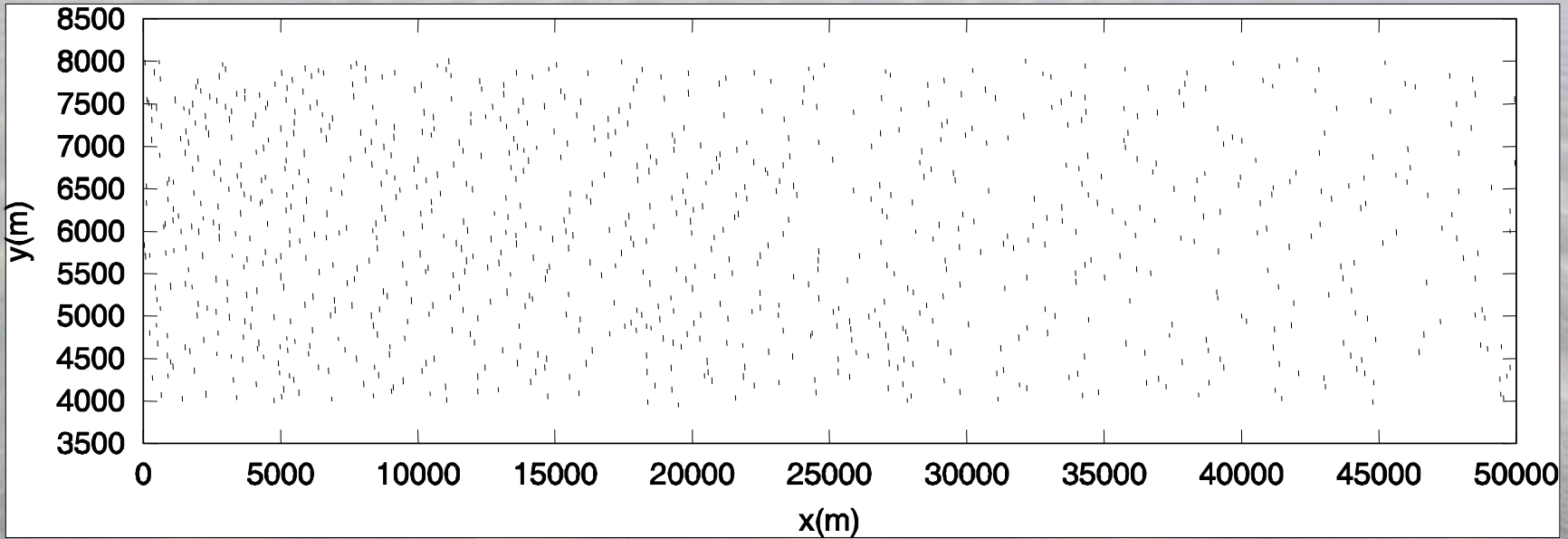


Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Endresultat hat Barchanform

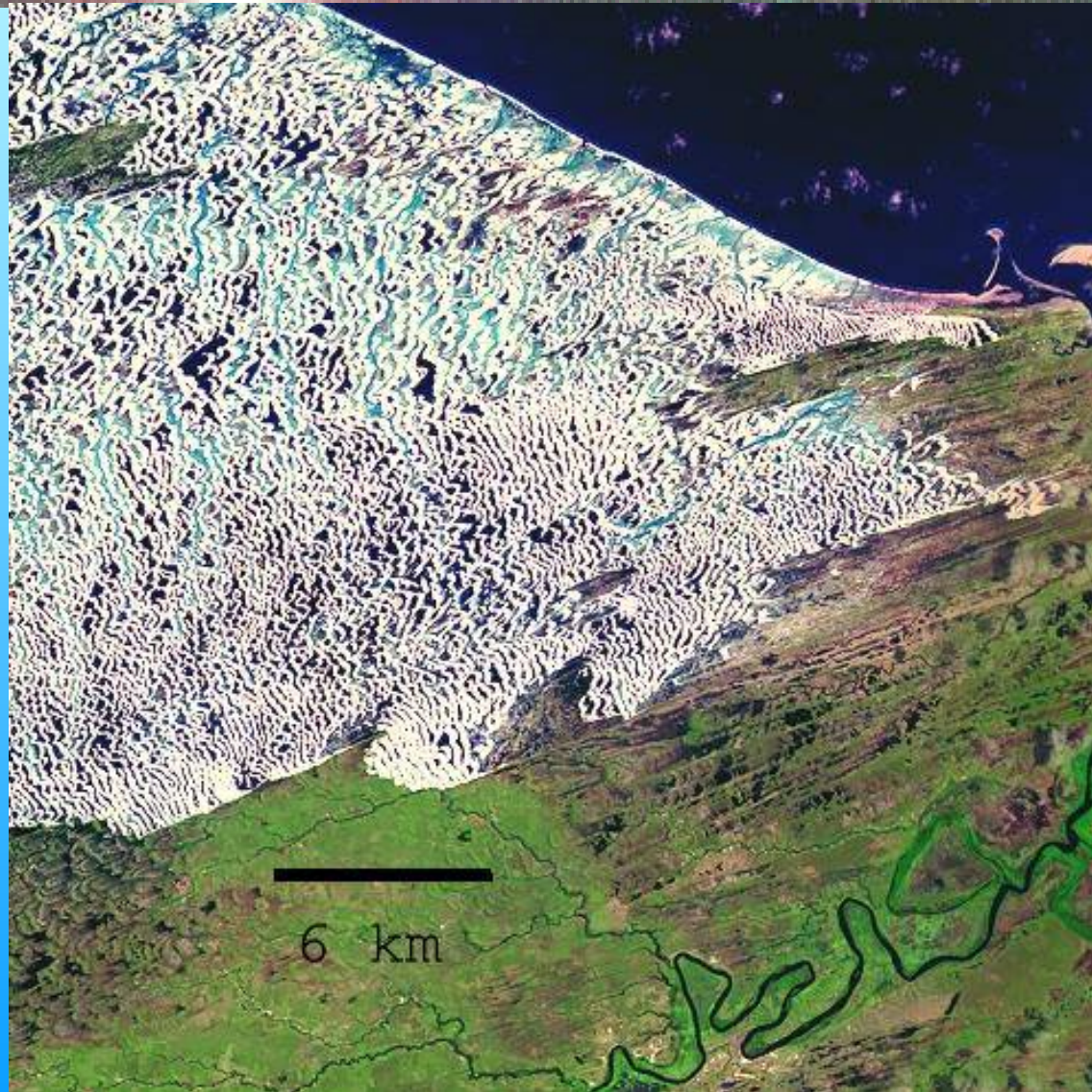


# Vergleich von Simulation und Realität eines Dünenfeldes





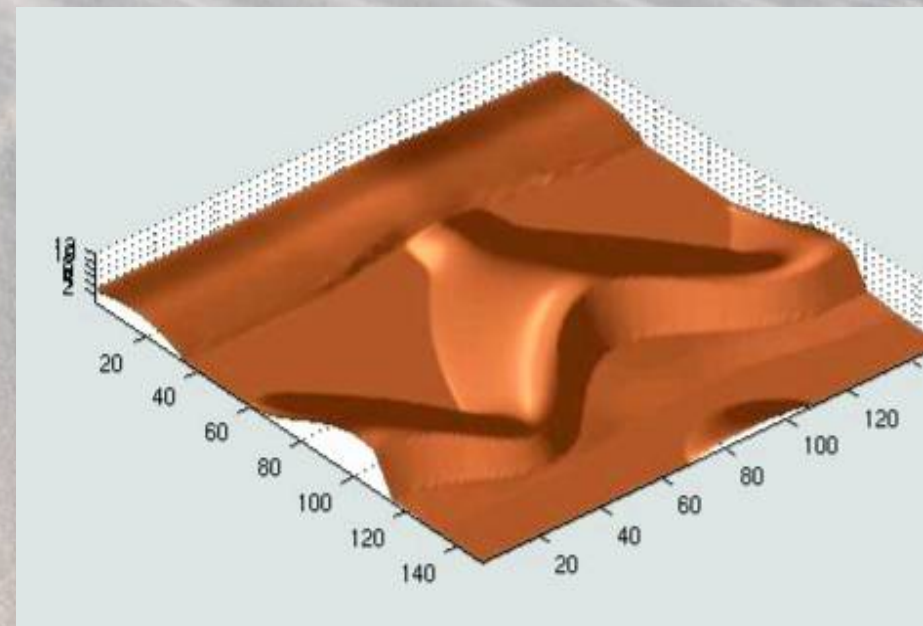
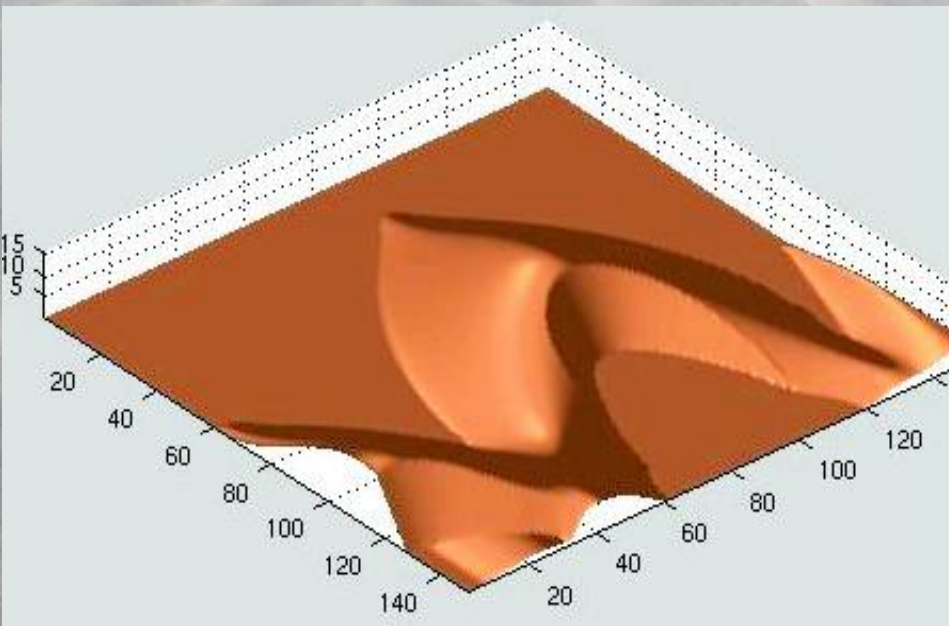
# Lençóis Maranhenses, Brasilien



# Lençóis Maranhenses



# Barchanoide (Simulation)



# Dünenfeld mit Wasser

(Simulation)



# Ein Bad gefällig?

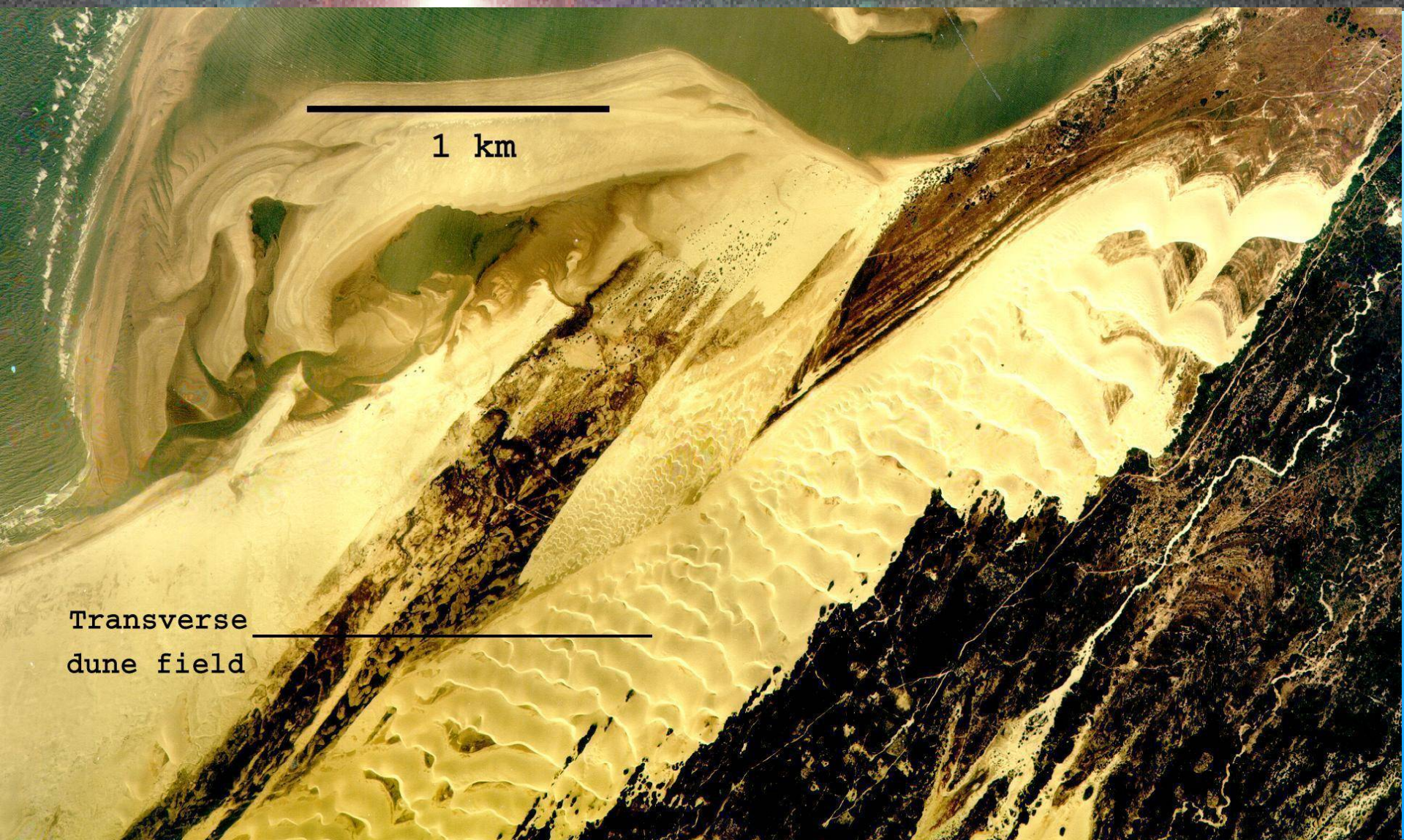
**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Lençóis Maranhenses vom Sateliten

ETH



1 km

Transverse  
dune field

# Das Team

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 01. Dezember, 0000

# Fahrt zu den Lençóis Maranhenses

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**



**Hier braucht man eine Sonnenbrille**

**ETH**

**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Das Tachimeter

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Vermessung

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Messstation

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Sandflussmessgerät

**ETH**

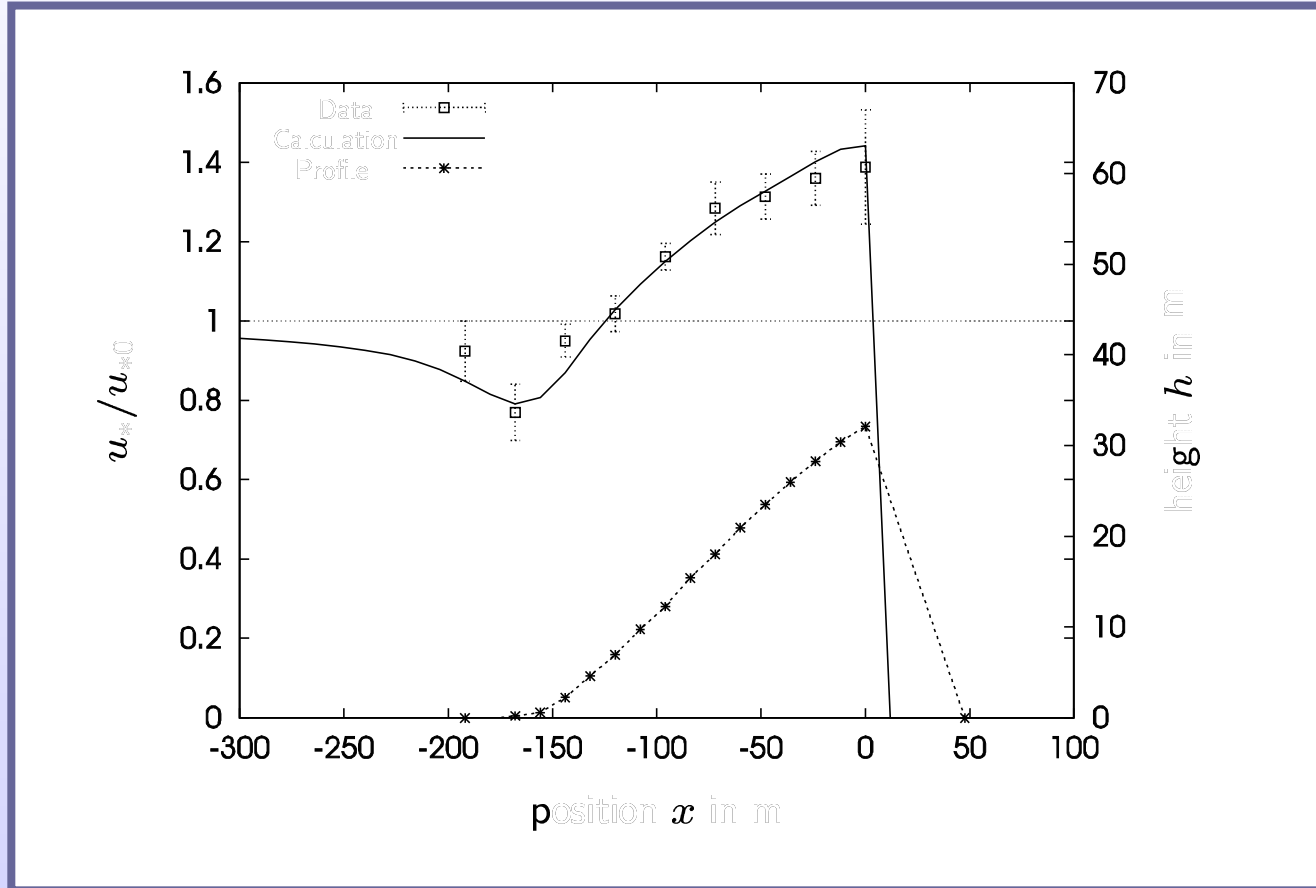


Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Auswertung am Abend

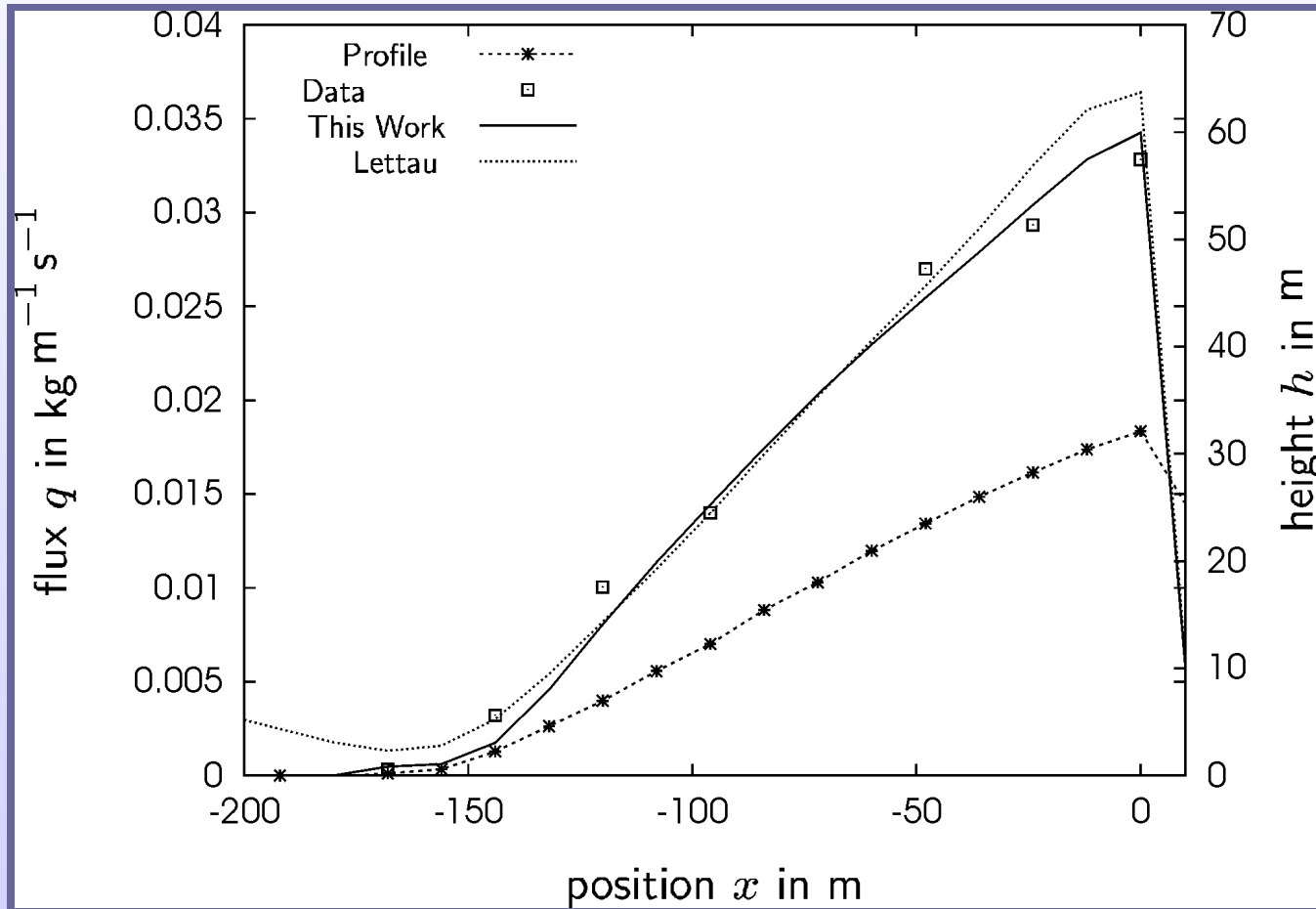


# Windgeschwindigkeit



G. SAUERMANN et al, *Geomorphology* 1325, 1-11 (2003)

# Sandfluss



G. SAUERMANN et al, *Geomorphology* 1325, 1-11 (2003)



# Es gibt Vegetation

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

**welche auch wieder vergeht.**

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

## Vegetationswachstumsmodell

$$\frac{dh_v}{dt} = \frac{H_v - h_v}{\tau_v} - \left| \frac{\partial h}{\partial t} \right|$$



## Reduktion der Scherspannung

$$\tau_{sand}(x, y) = \frac{\tau(x, y)}{(1 - c_1 h_v^2)(1 + c_2 h_v^2)}$$

### Parameter

$H_v$  maximale Vegetationshöhe

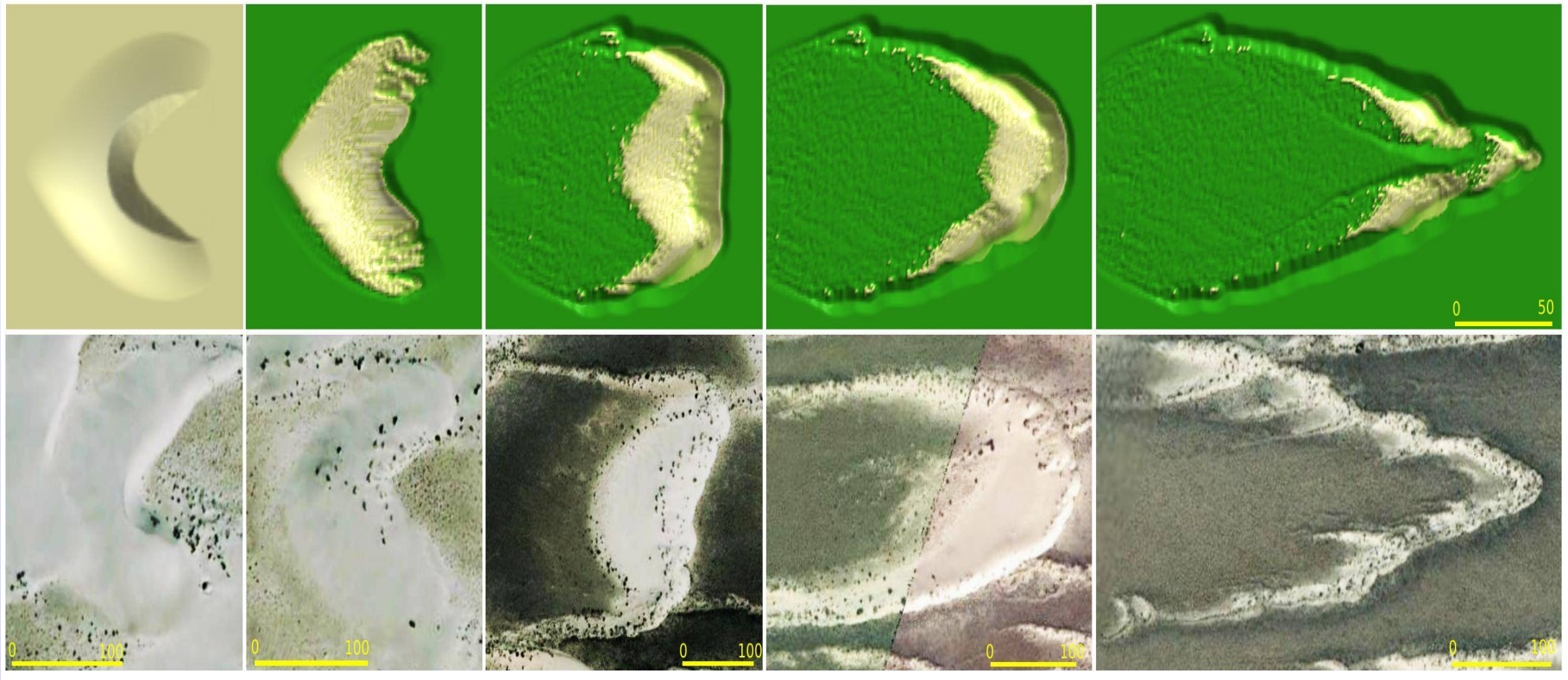
$\tau_v$  Charakteristische Wachstumszeit

$c_1, c_2$  Reduktionsparameter

M. R. RAUPACH et al. J. Geo. Res.96 (1993)

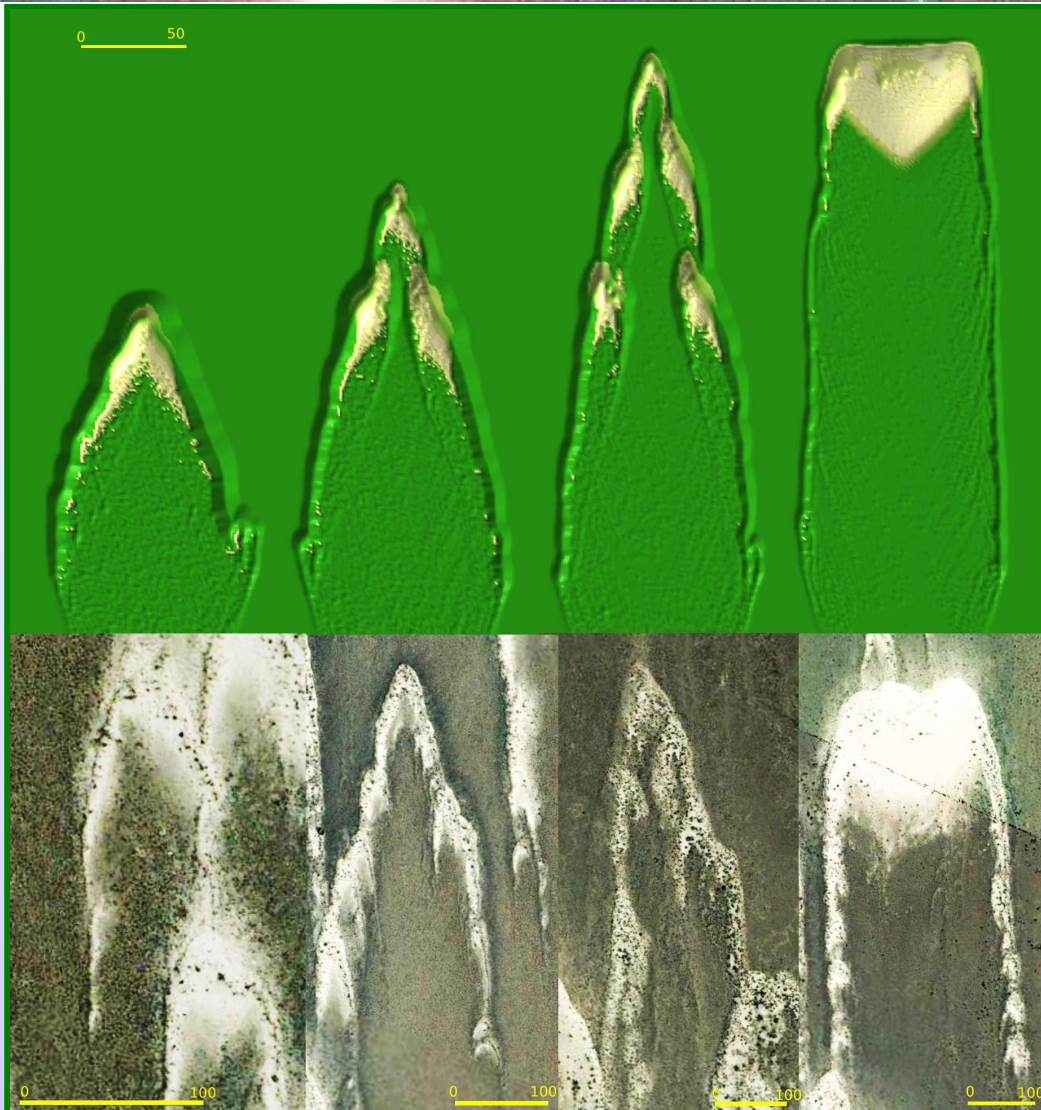
# Barchan → Paraboldüne

## Numerische Simulation



## Bilder von Google Maps

# Paraboldünen



**Simulation**

**Google Maps**

# Paraboldünen an der Küste



Google map



Simulation

**Sieh mal was ich gefunden habe!**

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

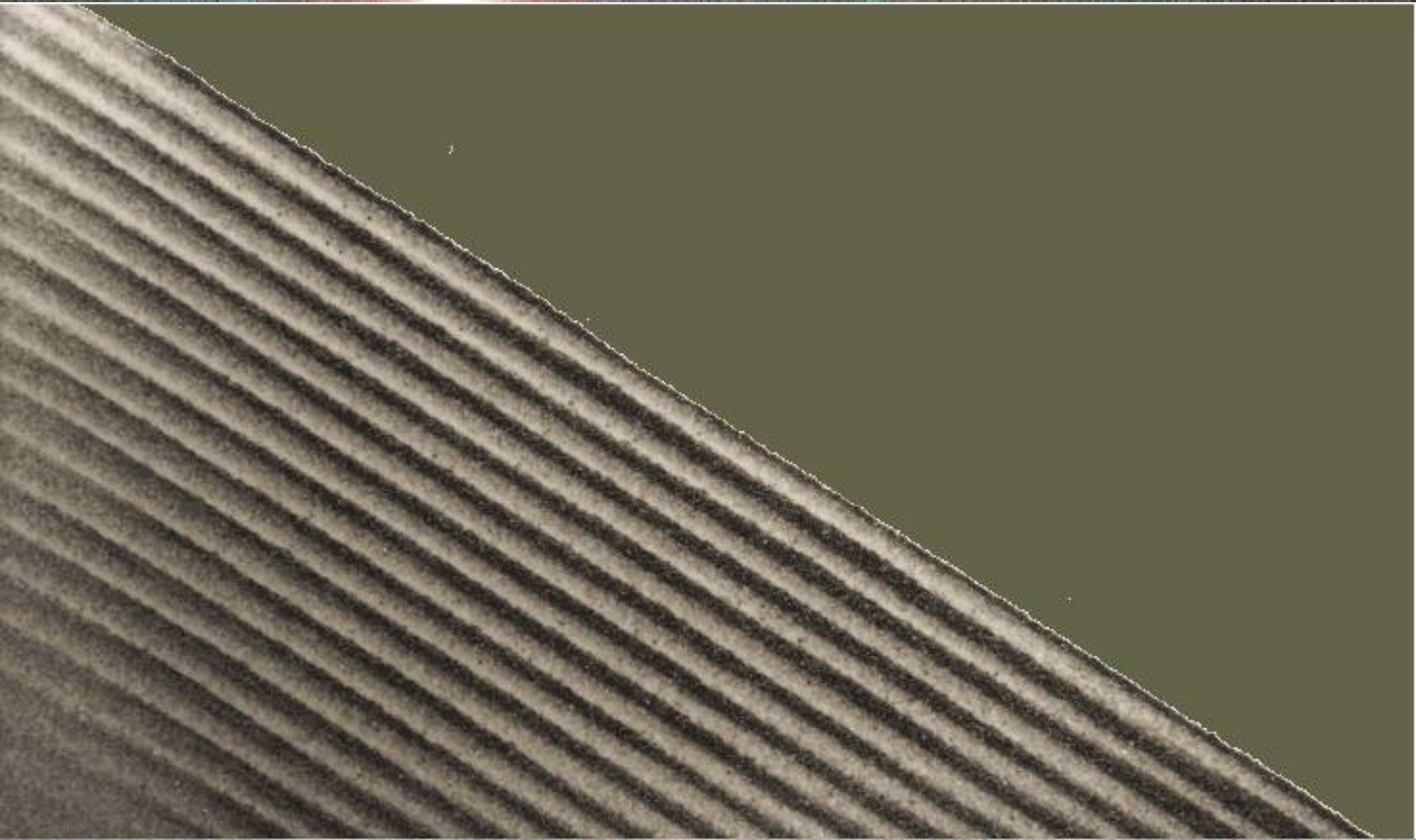
# Woher kommen die Streifen?





# Stratifizierung im Labor

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Neue Rätsel

**ETH**



Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Geburt von Barchanen



# Baby Barchan

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Barchankind

**ETH**



**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Jugendlicher Barchan

**ETH**



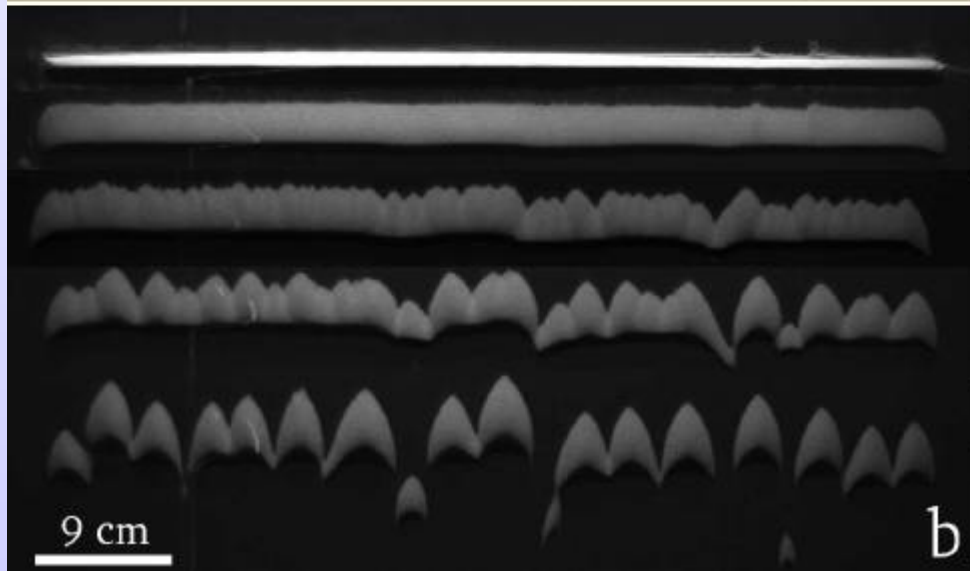
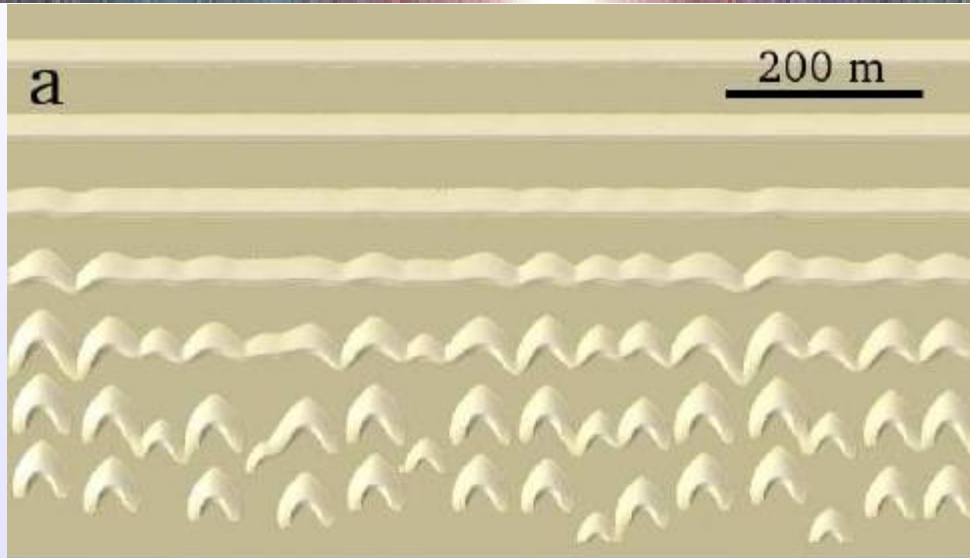
Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Genesis am Strand

**ETH**

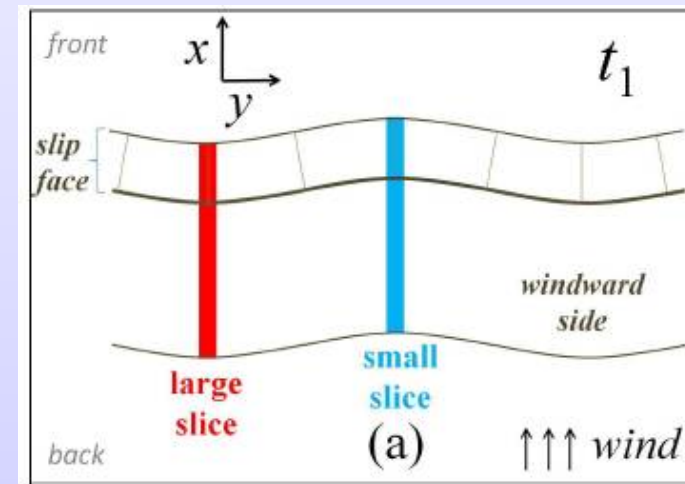
Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Instabilität von Transversaldünen



## Vergleich mit Laborexperimenten in Wasser

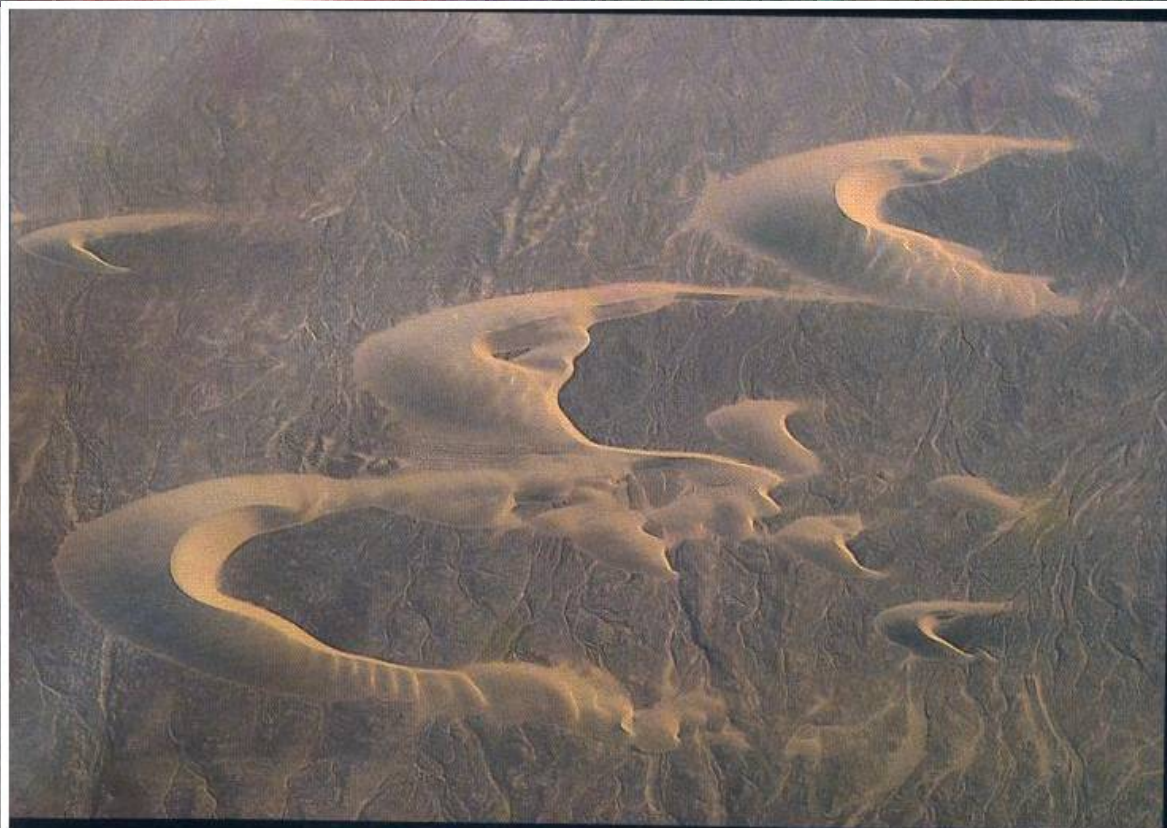
Lineare Stabilitätsanalyse:



E.J.R. Parteli, J.S. Andrade, H.J.H.,  
Phys. Rev. Lett. 107, 188001 (2011)

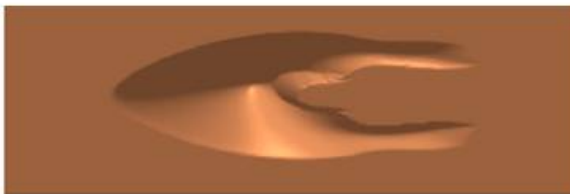


# Vermehrung in der Natur



**b**

wind →

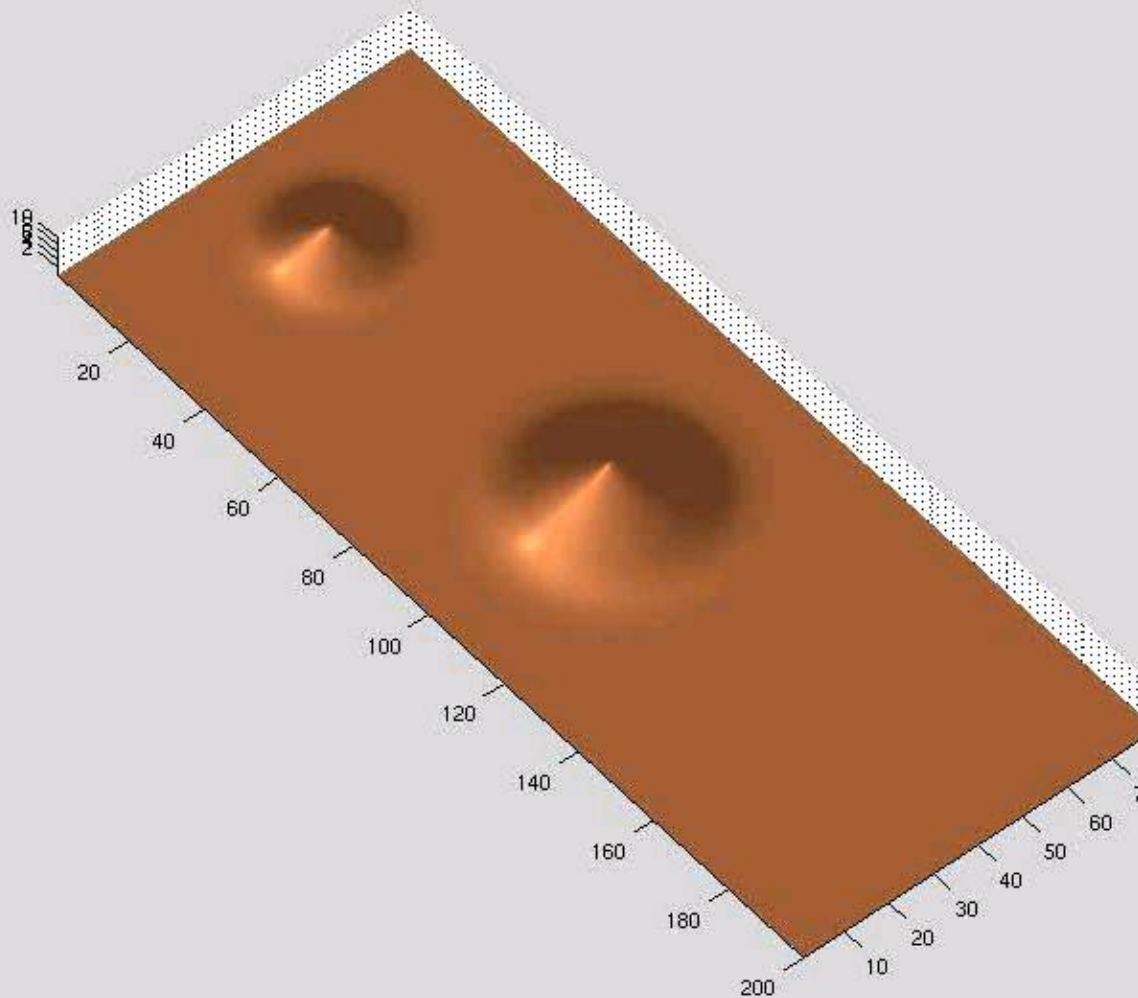


**c**

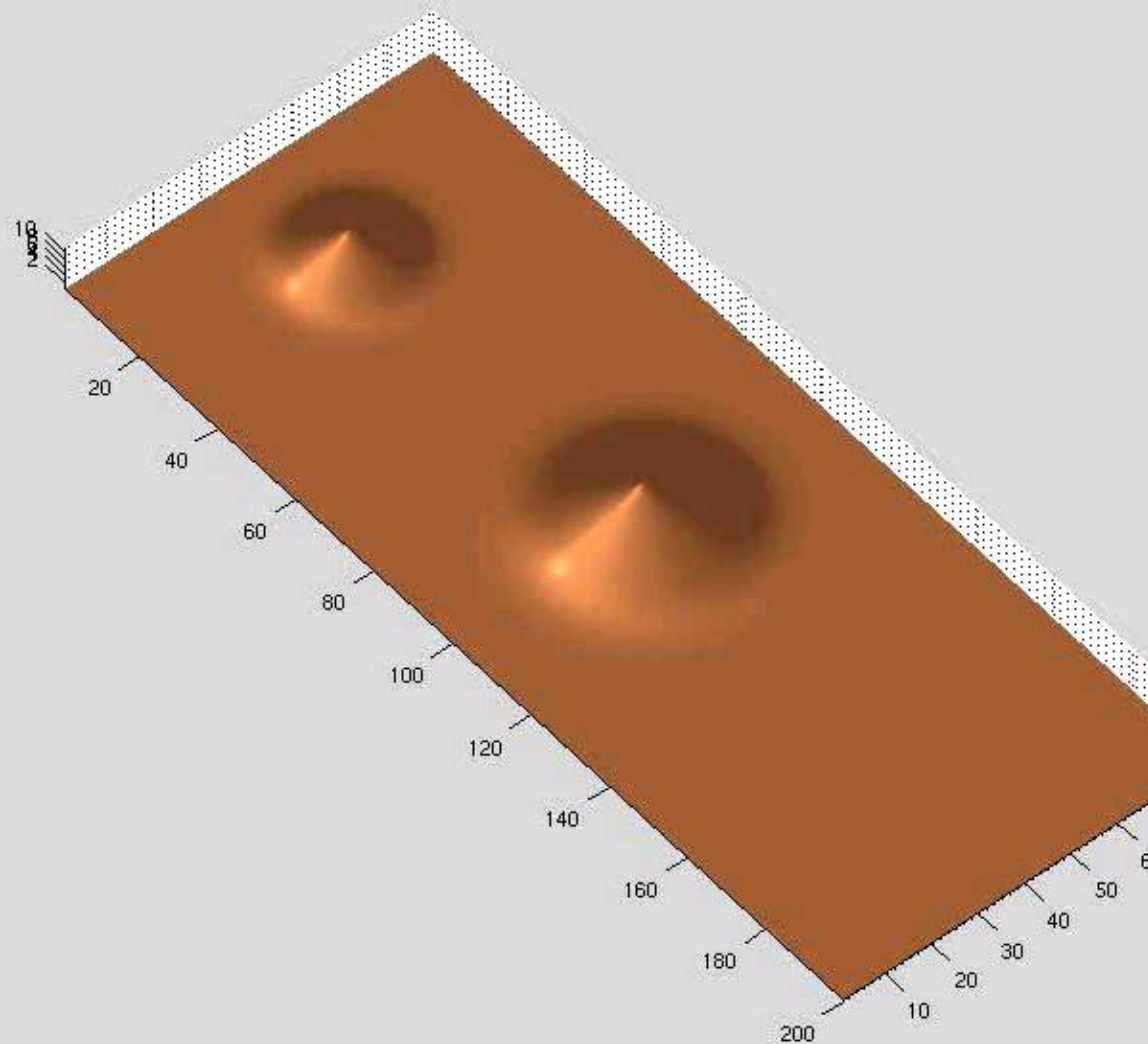
wind →



# Breeding



# Simulation solitären Verhaltens



# Breeding

**ETH**



V. SCHWÄMMLE, H.J. HERRMANN, *Nature* **426**, 619-620 (2003)

**Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011**

# Maßnahmen gegen Versandung

- **Gegendünen**
- **Befestigung durch Bedeckung**
- **“bofix”- Befestigung durch Vegetation**
- **Windbeschleunigung**
- **Planieren**
- **Gekippte/Schräge Strassen**
- **Brücken, Tunnels, etc.**

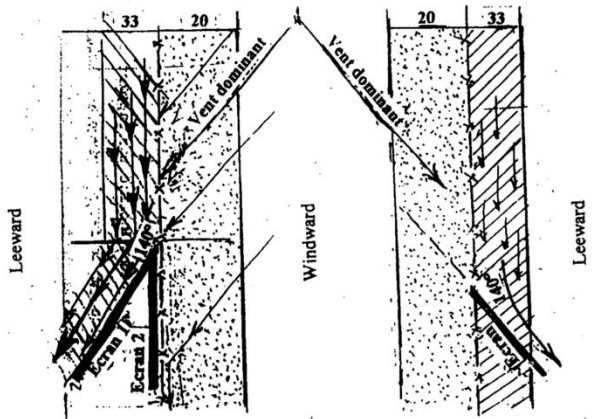
# Bofix (Meunier)



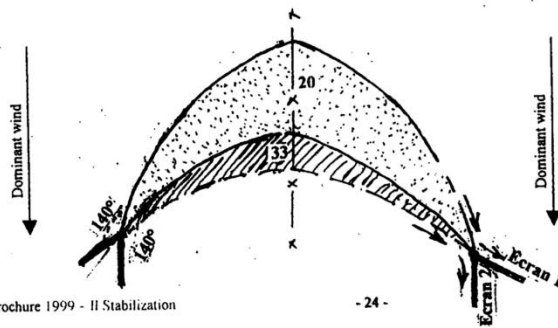
**POINT AND HORN IMMOBILIZATION**  
thanks to the separation of the two flanks by BURSTING technics  
on a similar way to beanpod dehiscence

**TECHNICS OF THE SCREENS**  
producing a 140° deviation

## II. SNAKE POINTS



## I. TURTLE HORNS



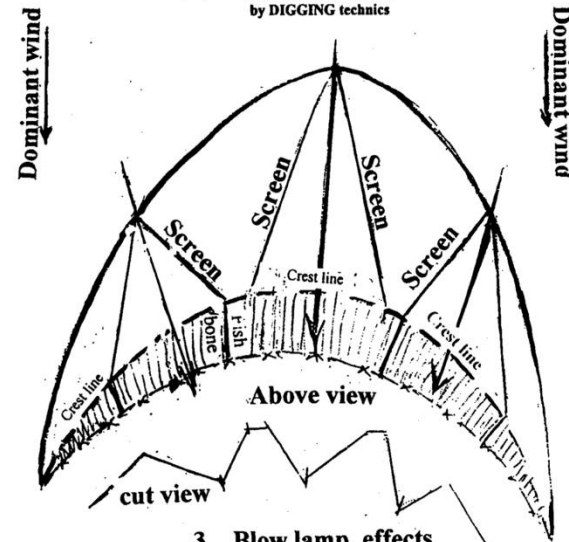
**Points and horns progression stoppage**  
(see drawings p.24)

In both types, snakes and turtles (see analogies page 24 on the left), immobilization by burs technics are similar. One must:

1. Interrupt the opposition of the two deposits coming from both 20 and 33
2. Impede the major flow issued from the 33 to hurt the flow issued from the 20, which results in an addition of their two deposits
3. Separate the two antagonistic flows by means of screens with a 140° inclination with the normal sand flow trajectory.

To take a comparison with the legumes,  
One must impose splitting of the dry bean pods.

**TURTLE DEFLATION**  
by DIGGING technics



**3 Blow lamp effects**  
used for  
**TURTLE CARAPACE DIGGING**  
(see text p. 27)

# Bofix in Mauretanien



# Pallissaden in Bofix





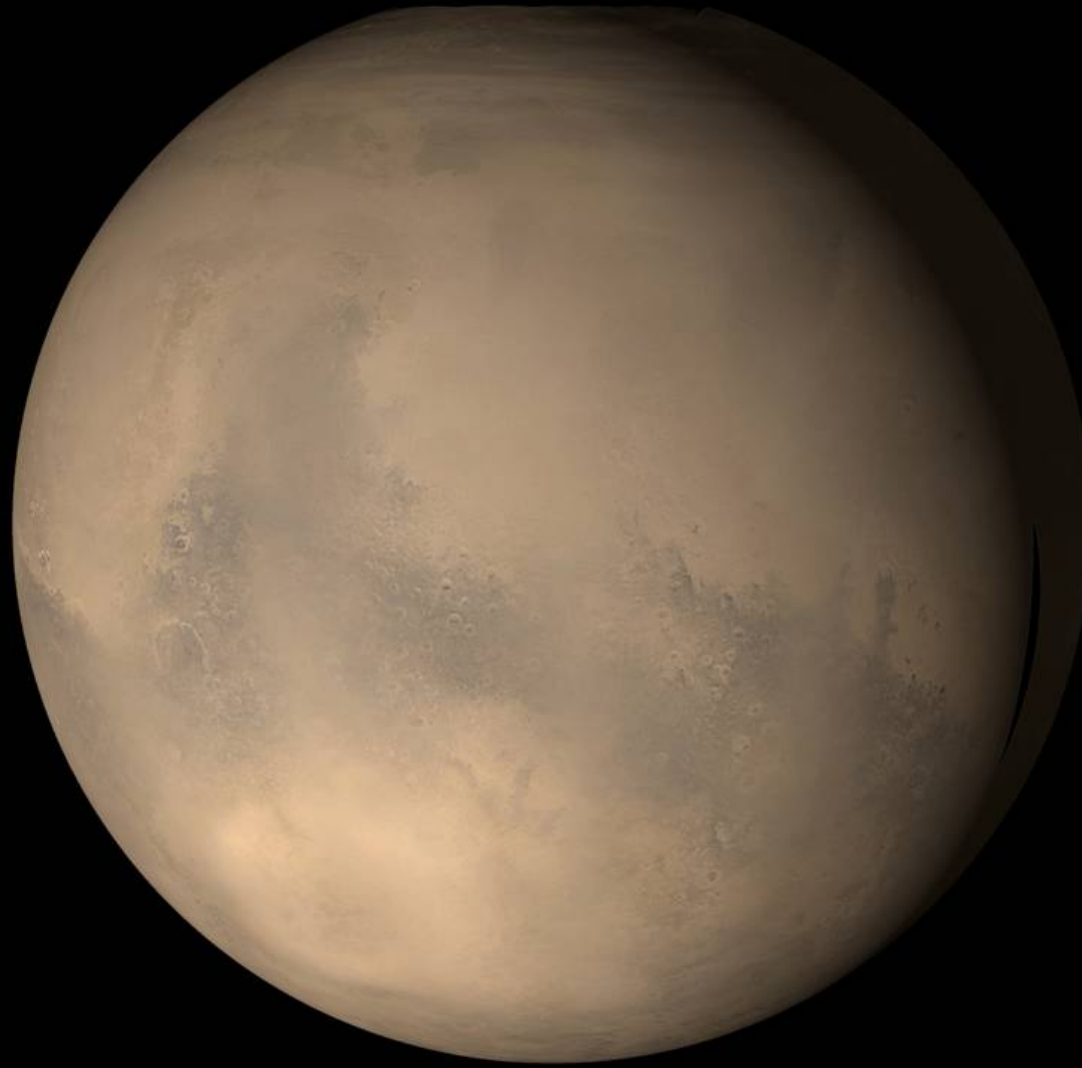
# Versuchsfeld in Tunesien

**ETH**

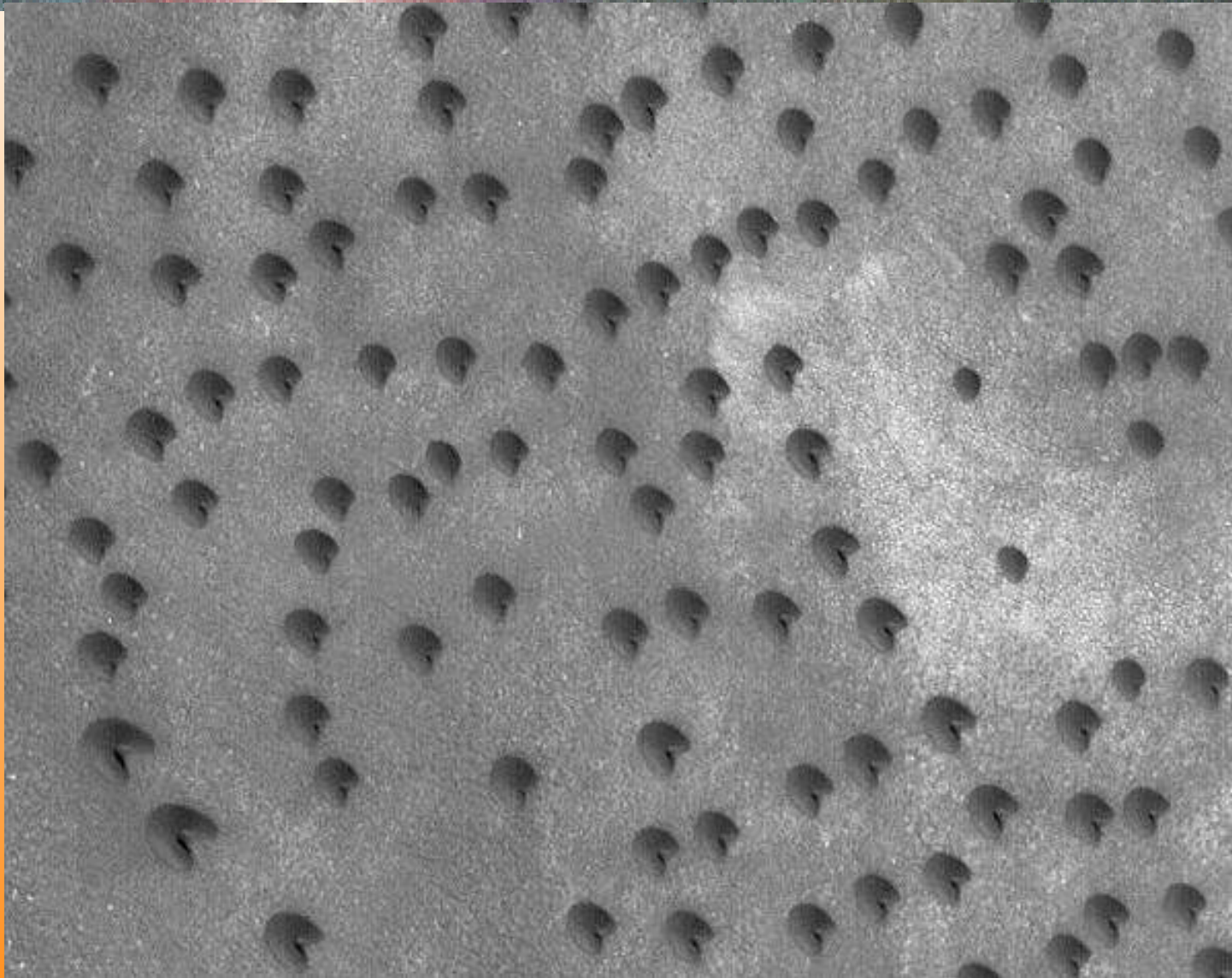


Kolloquium Oldenburg, 12. Dezember, 2011

# Der Planet Mars



# Wanderdünenfeld am Südpol

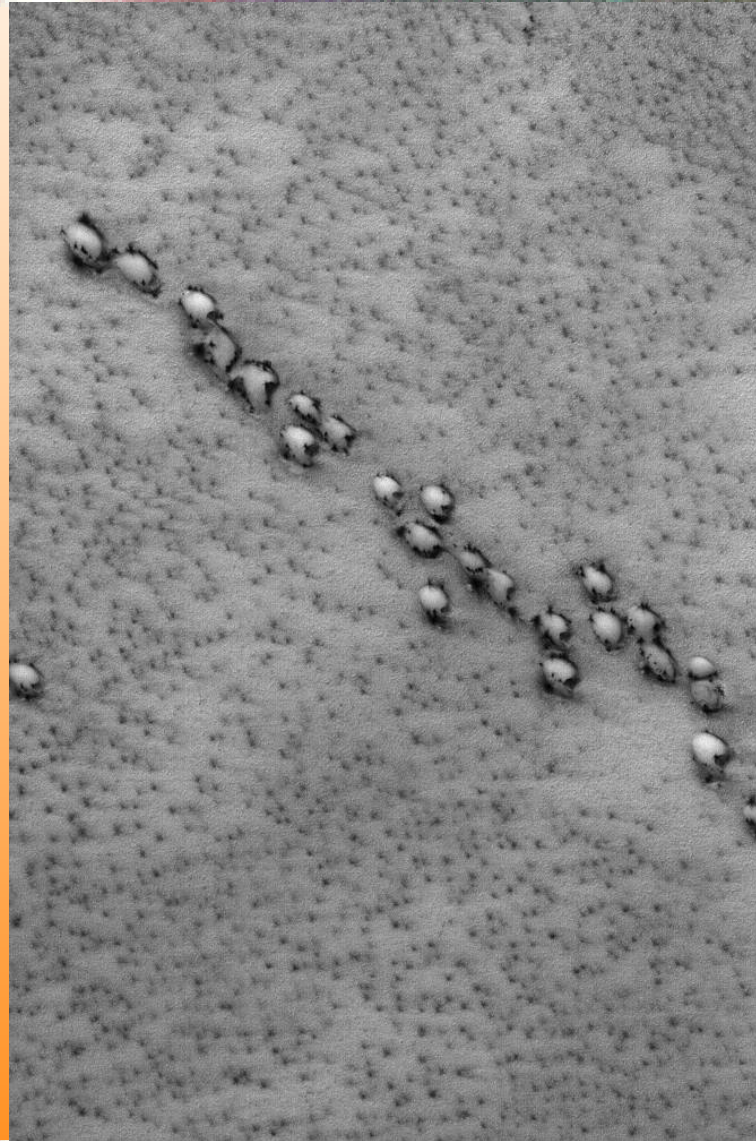


# Wanderdünen im Arkhangelsky Krater



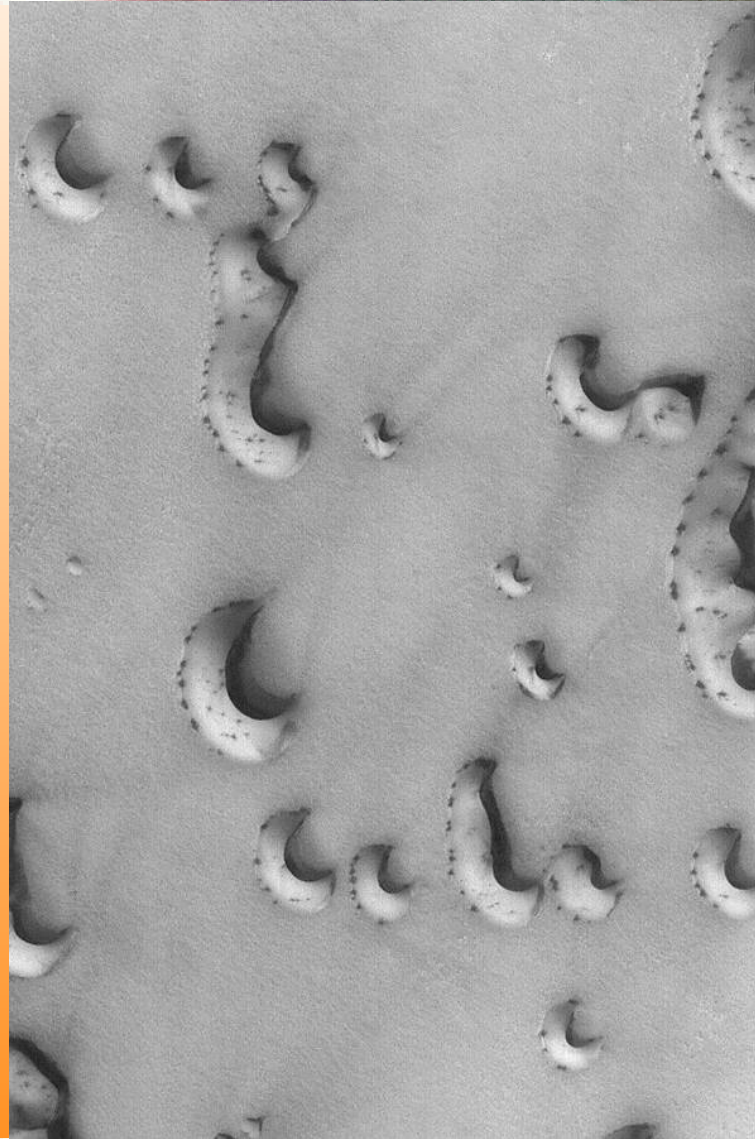
# Von Frost bedeckte Wanderdünen am Nordpol

**ETH**

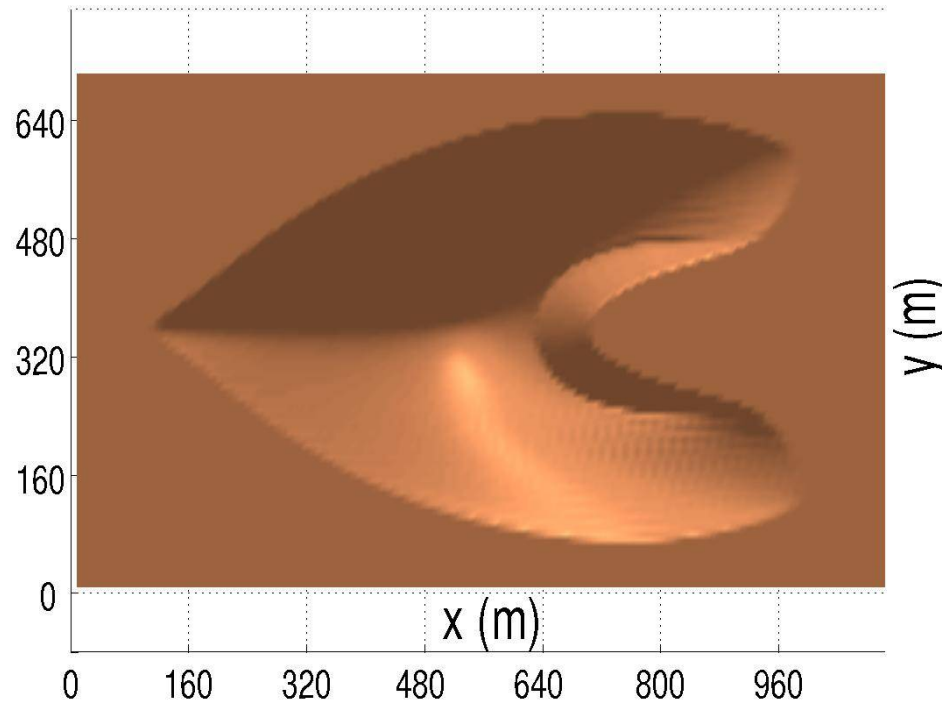


Kolloquium Oldenburg, . Dezember,

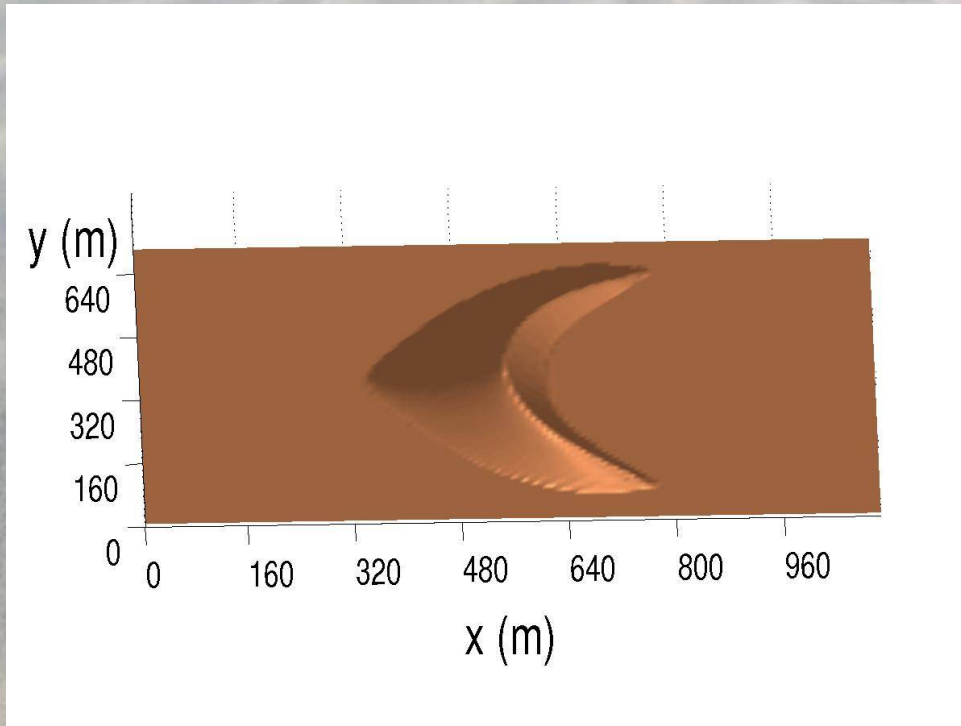
# Bei schwarzen Punkten ist Eis sublimiert



# Simulation der Marsdünen

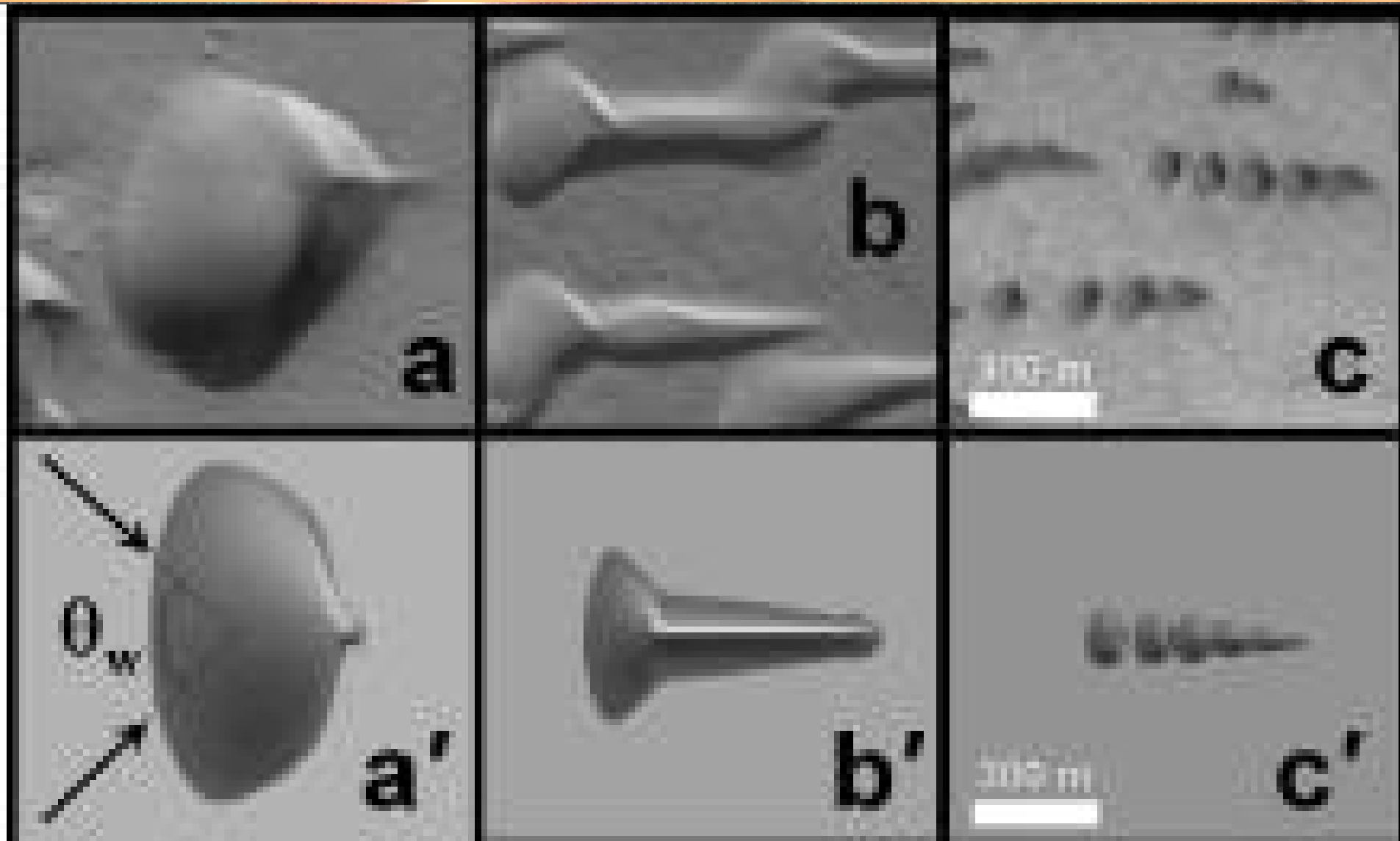


# Auf der Erde ist die Form anders!





# Exotische Marsdünen



# Ausblick

- **Untersuchung von Dünen anderer Form**
- **Zeitliche Veränderung der Windrichtung**
- **Kopplung an Meteorologie**
- **Techniken zur Dünenvernichtung (Meunier)**
- **Unterwasserdünen**
- **Verschiedene Vegetationstypen**
- **Stabilität von Dünen**