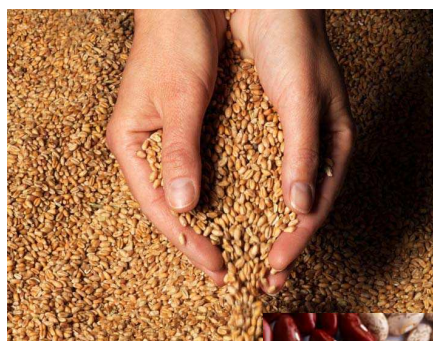


# Hogyan folyik a szemcsés anyag?

Börzsönyi Tamás

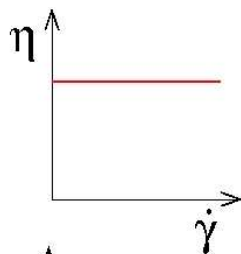
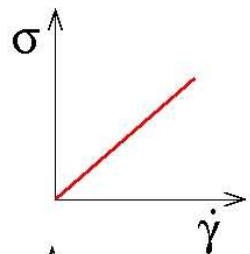
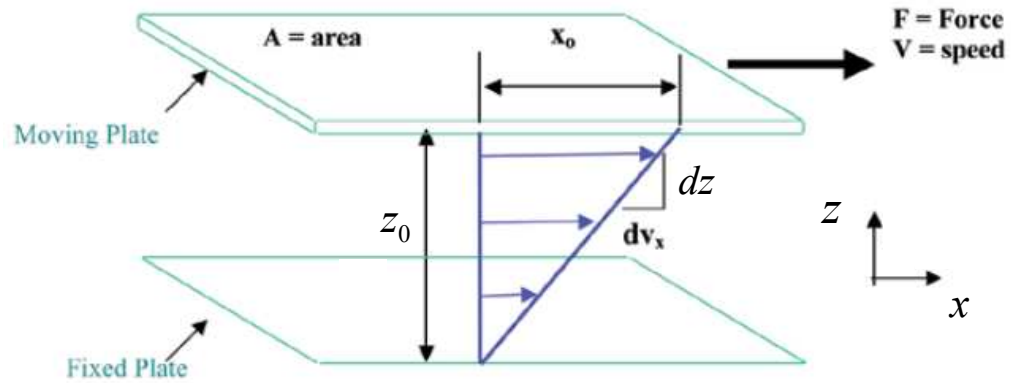
*Magyar Tudományos Akadémia, Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet,  
Komplex Folyadékok Osztály*



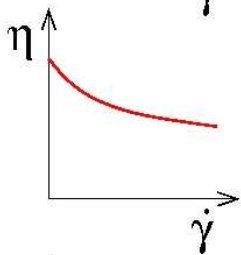
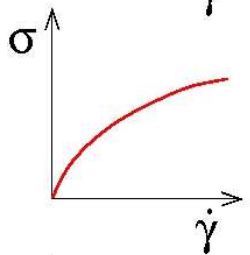
# Komplex folyadékok

Nyírási ráta:  $\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dz}$

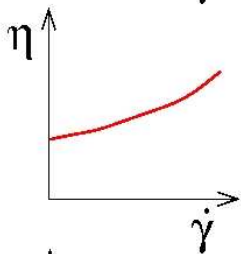
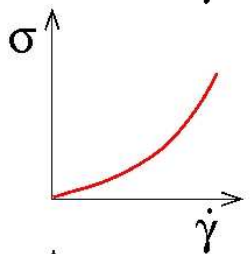
Viszkozitás:  $\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = \frac{F}{A\dot{\gamma}}$



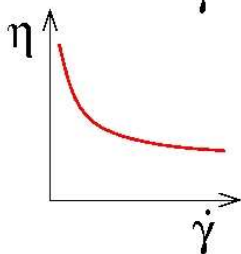
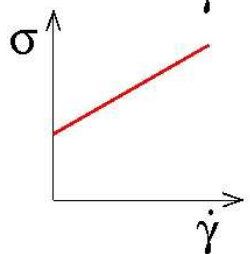
newtoni: víz, méz



Nyírásra híguló (shear thinning):  
polimeroldatok, festékek



Nyírásra sűrűsödő (shear thickening):  
gyanták, sűrű szuszpenziók



Bingham plasztikus: fogkrém, majonéz

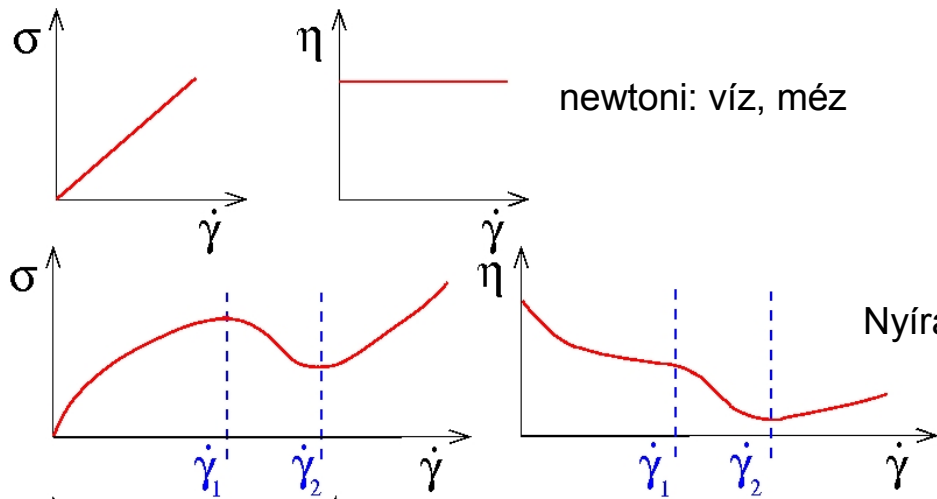
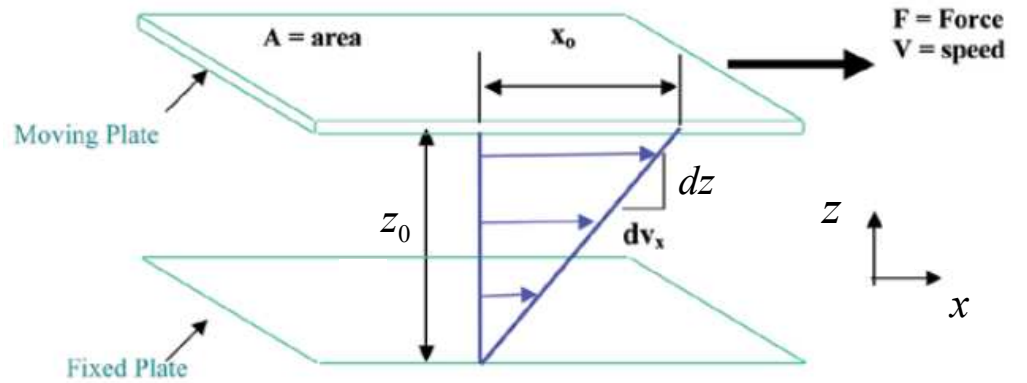




# Komplex folyadékok

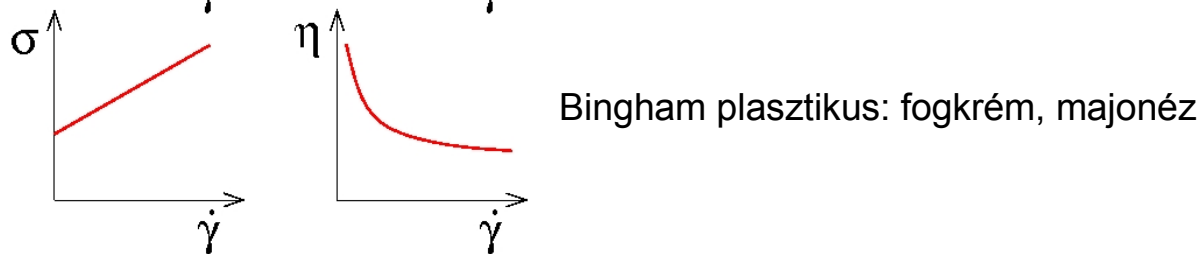
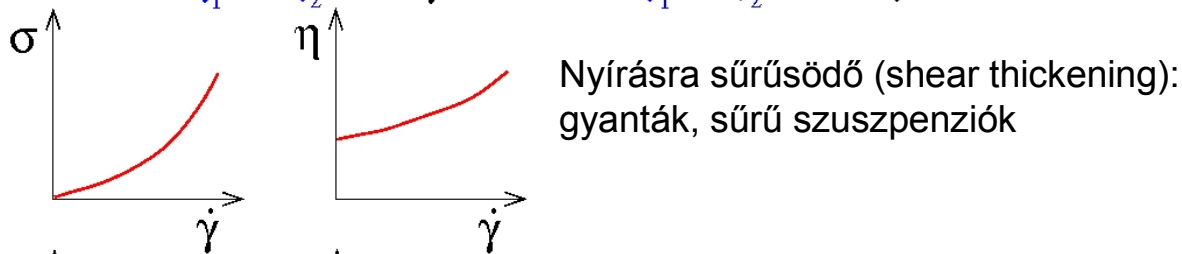
Nyírási ráta:  $\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dz}$

Viszkozitás:  $\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = \frac{F}{A\dot{\gamma}}$



Nyírásra híguló

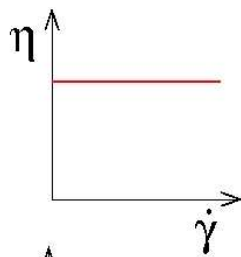
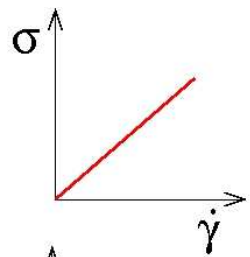
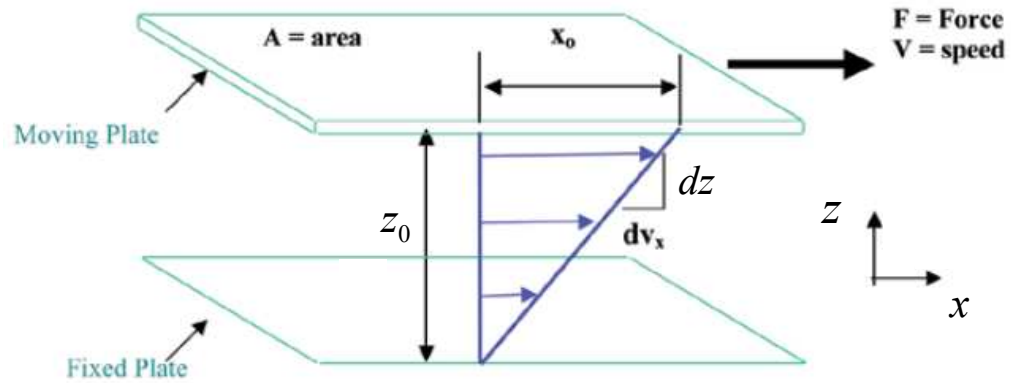
**nyírási sávok**



# Komplex folyadékok

Nyírási ráta:  $\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dz}$

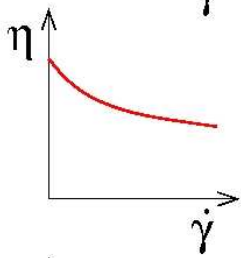
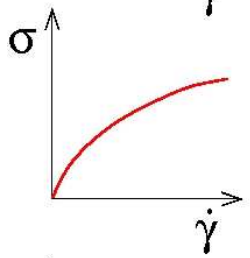
Viszkozitás:  $\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = \frac{F}{A\dot{\gamma}}$



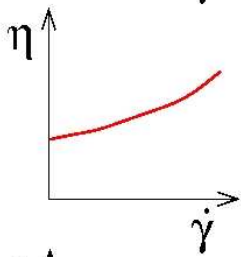
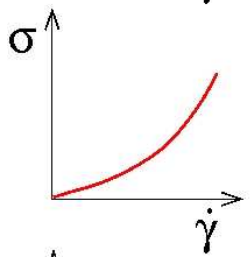
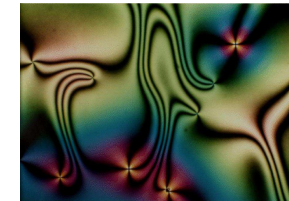
newtoni: víz, méz



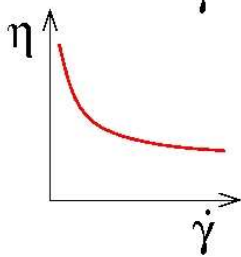
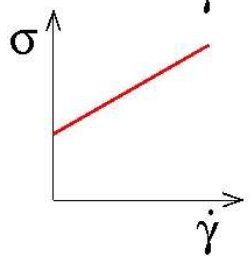
Folyadék-kristályok



Nyíráásra híguló (shear thinning):  
polimeroldatok, festékek



Nyíráásra sűrűsödő (shear thickening):  
gyanták, sűrű szuszpenziók



Bingham plasztikus: fogkrém, majonéz

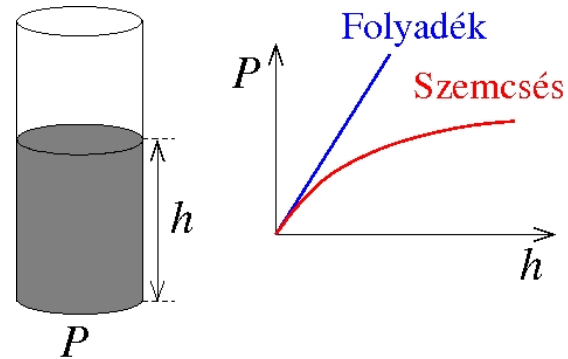




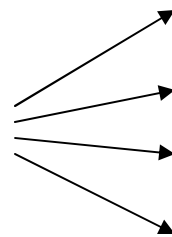
# Szemcsés anyagok

Janssen effektus

Szilárd



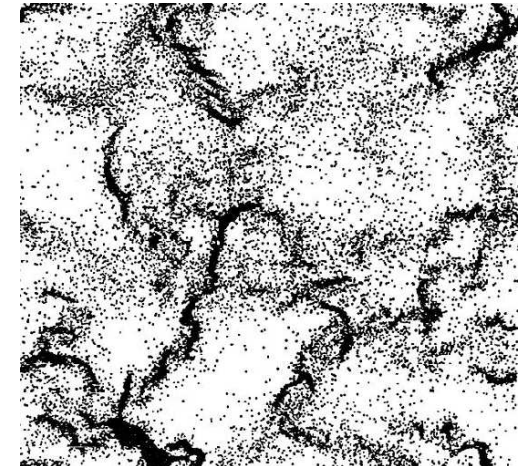
Folyadék



- Reynolds tágulás
- Nyírési lokalizáció
- Szegregáció
- Áramlási instabilitások

Gáz

Rugalmatlan ütközések  
(spontán csomósodás)



# Szemcsés “folyadék”

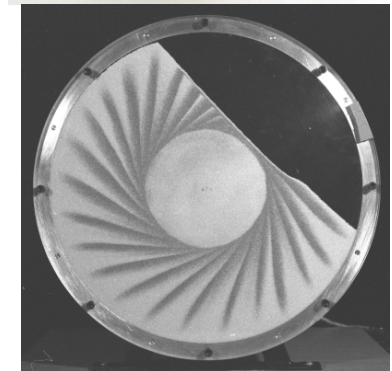
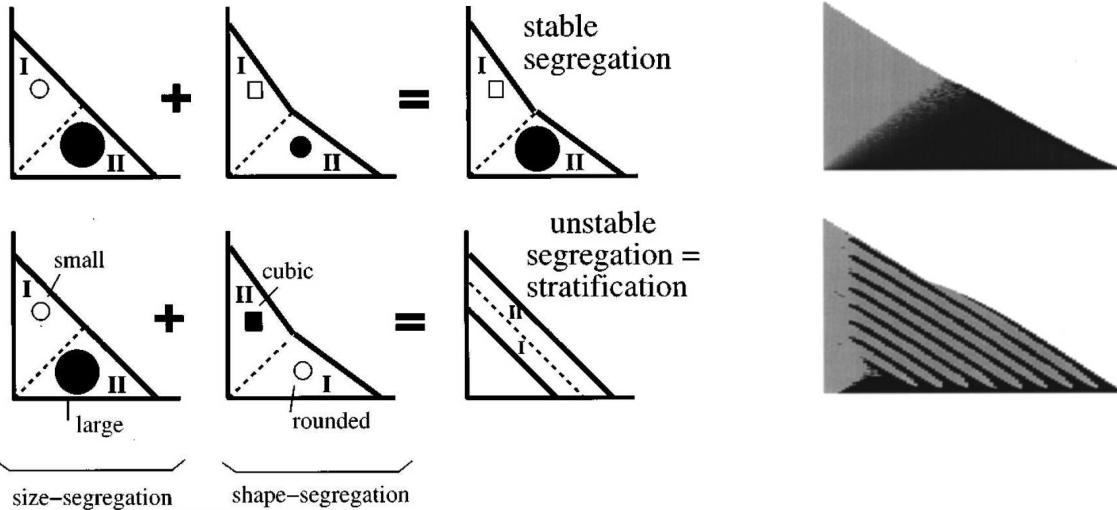
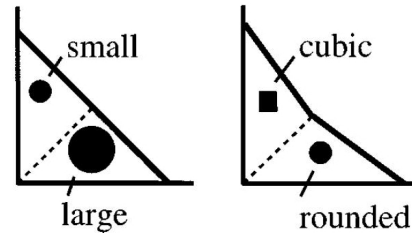
Reynolds tágulás

Nyírési lokalizáció

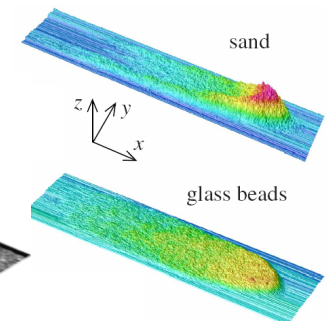
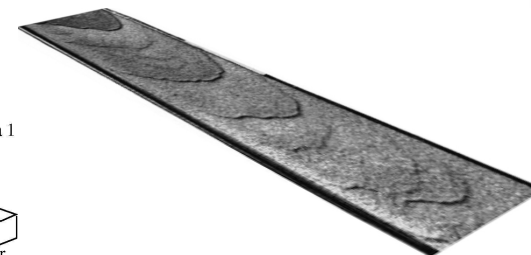
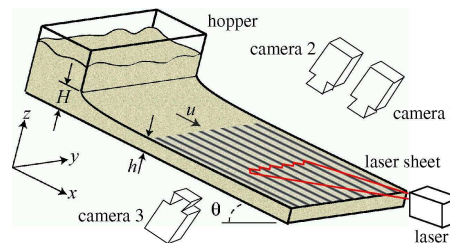
Szegregáció



Paradió (brazil dió) effektus

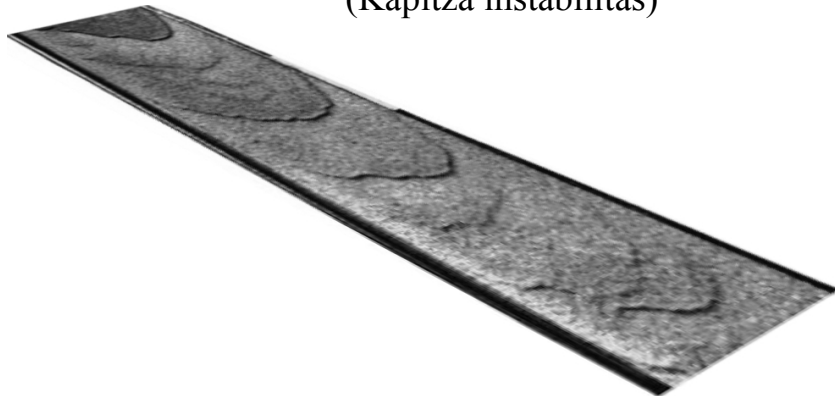


Áramlási instabilitások,  
lavinák



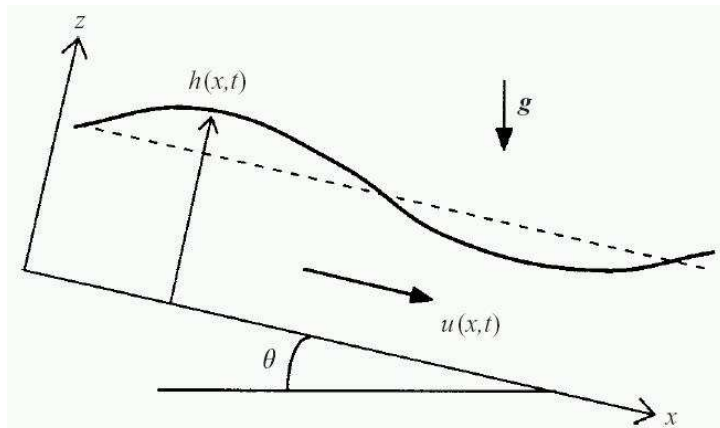
# Hogyan folyik a szemcsés anyag? – Instabilitások

Hullámok  
(Kapitza instabilitás)

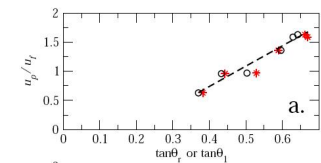
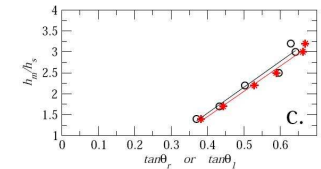
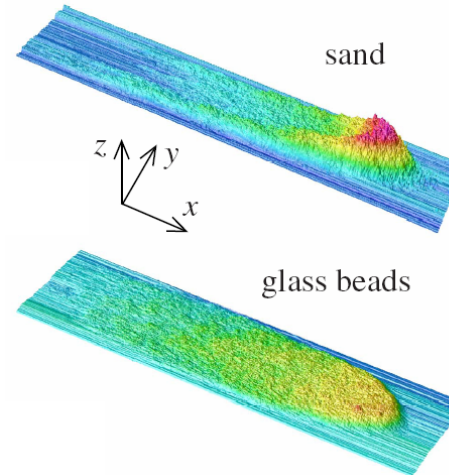


Azonos instabilitási mechanizmus a folyadékok és a szemcsés anyagok esetén

Y. Forterre and O. Pouliquen, *J. Fluid. Mech.* (2003).



Lavinák (részecskék alakjának a szerepe)

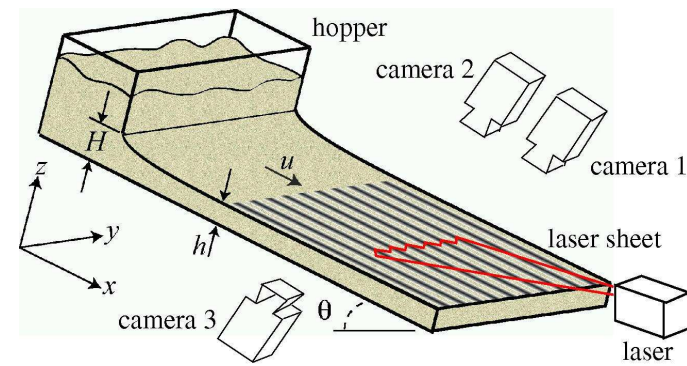


T. Börzsönyi, T.C. Halsey and R.E. Ecke, *Phys. Rev. Lett.* (2005).

T. Börzsönyi, T.C. Halsey and R.E. Ecke, *Phys. Rev. E* (2008).

Videofelvételek itt találhatóak: [www.szfki.hu/~btamas/gran/avalanche.html](http://www.szfki.hu/~btamas/gran/avalanche.html)

Szabályos csíkok kialakulása

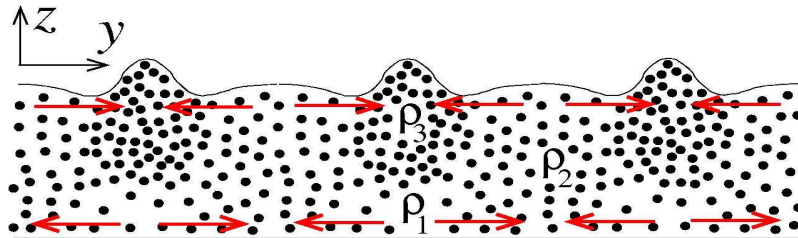
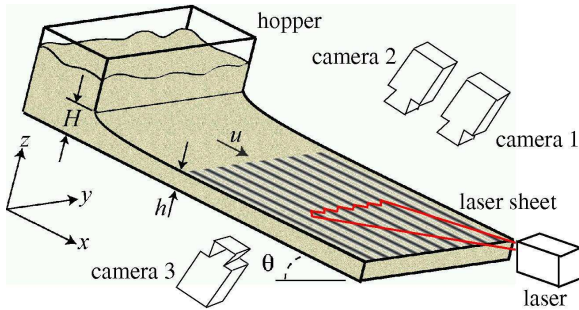


T. Börzsönyi, R.E. Ecke and J.N. McElwaine, *Phys. Rev. Lett.* (2009).

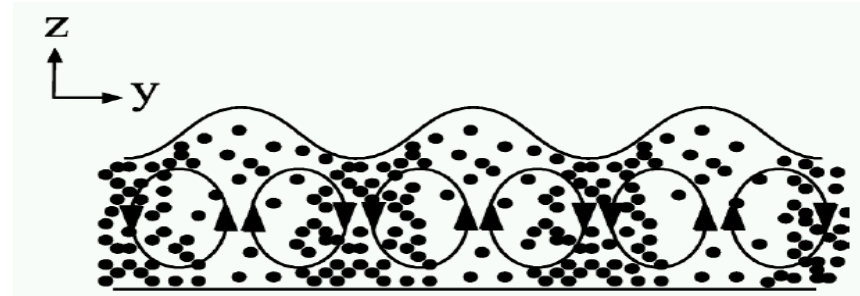


# Hosszanti csíkokból álló mintázat spontán kialakulása

Érdes felületű lejtőn, gyorsabb áramlás esetén figyelhető meg.

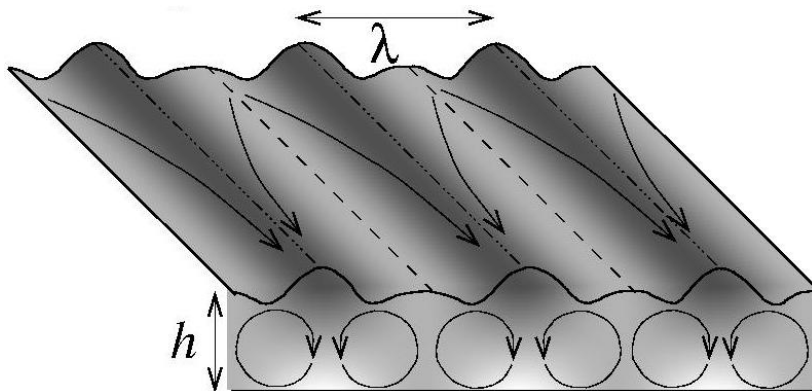


T. Börzsönyi, R.E. Ecke and J.N. McElwaine, Phys. Rev. Lett. **103**, 178302 (2009).

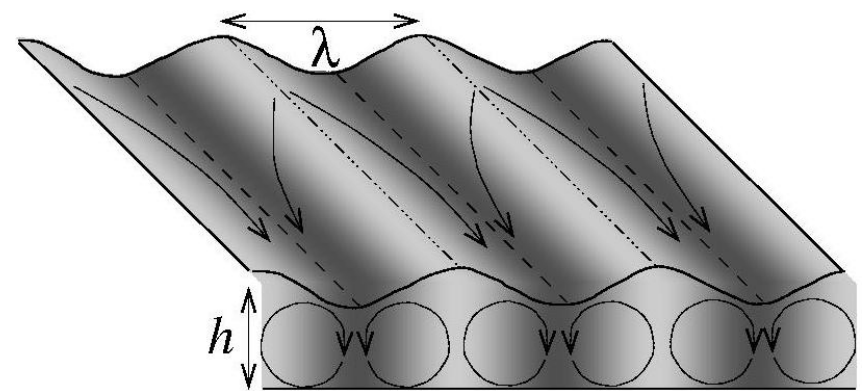


Y. Forterre and O. Pouliquen, Phys. Rev. Lett. **86**, 5886 (2001)

A videofelvételek itt tekinthetők meg:  
[www.szfk.hu/~btamas/gran/stripes.html](http://www.szfk.hu/~btamas/gran/stripes.html)

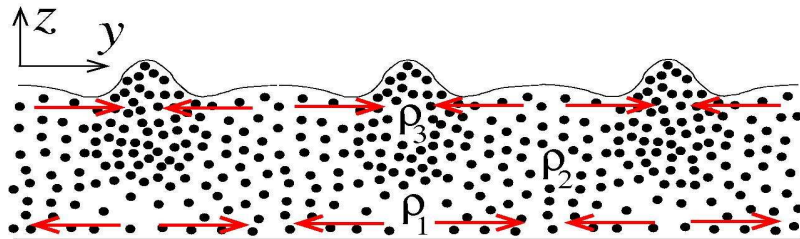
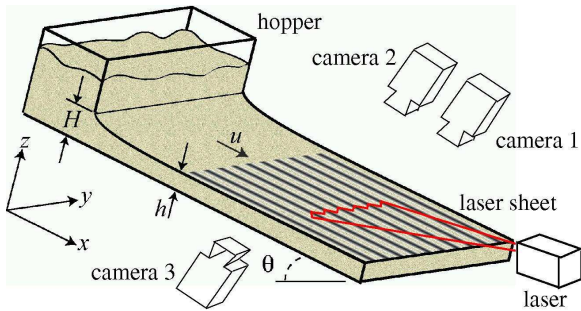


$\theta = 42.6^\circ$

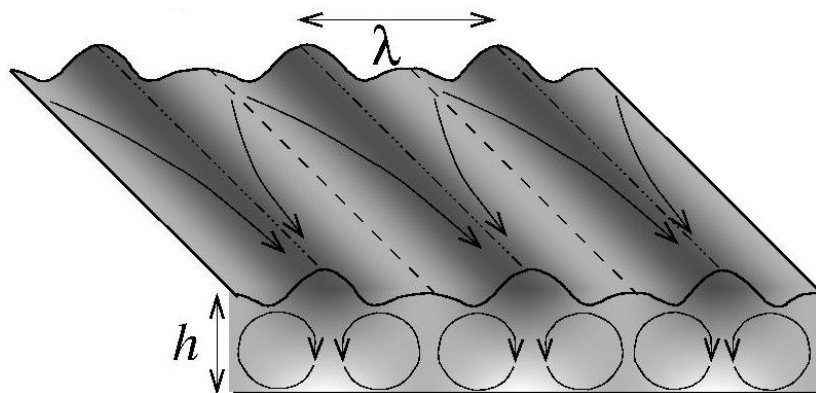


$\theta = 52.2^\circ$

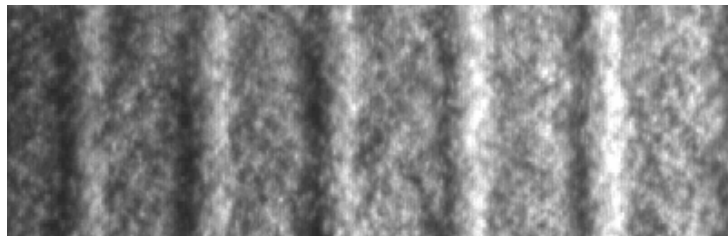




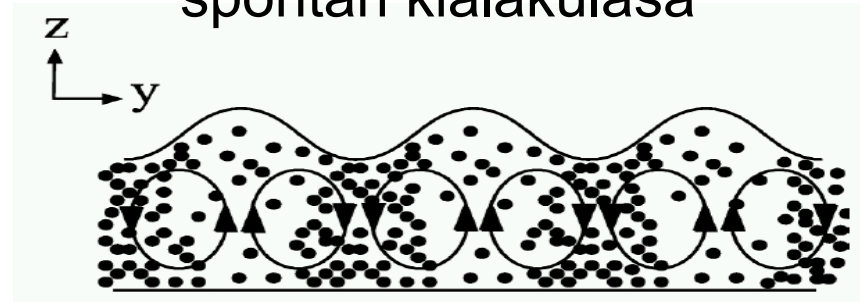
T. Börzsönyi, R.E. Ecke and J.N. McElwaine,  
Phys. Rev. Lett. **103**, 178302 (2009).



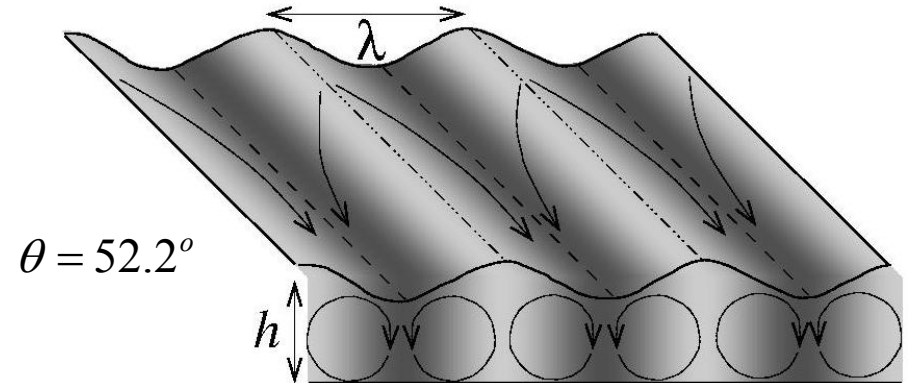
$\theta = 42.6^\circ$



## Hosszanti csíkokból álló mintázat spontán kialakulása



Y. Forterre and O. Pouliquen, Phys. Rev. Lett. **86**, 5886 (2001)



## Rayleigh-Bénard instabilitás alulról fűtött folyadék rétegben

cold



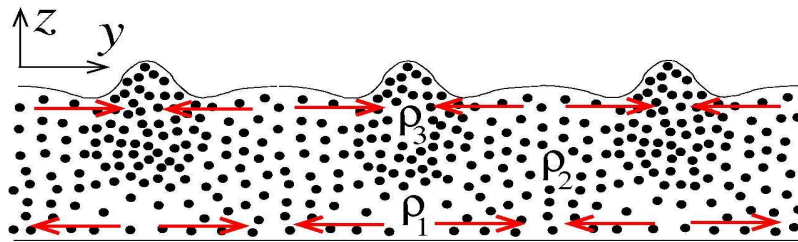
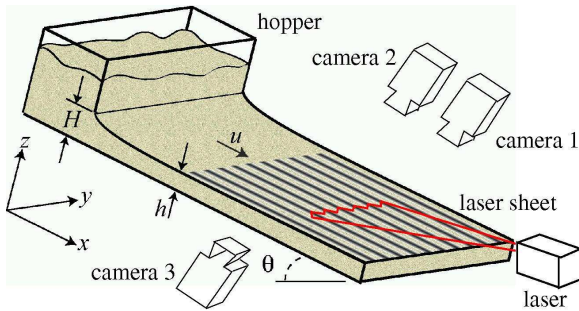
hot



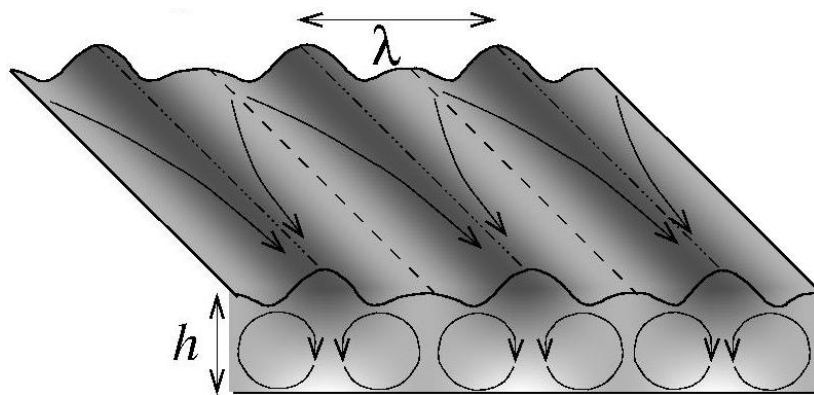
# Numerikus szimuláció

Jim McElwaine

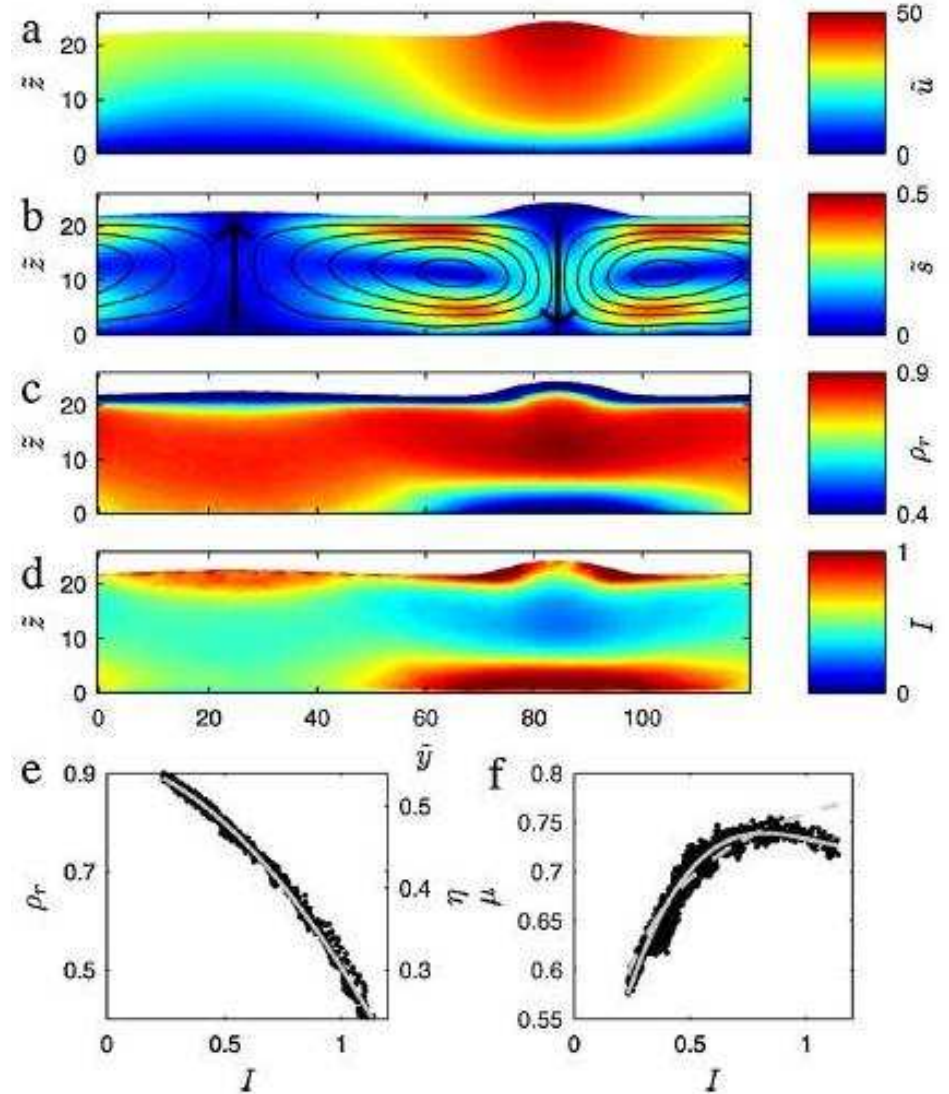
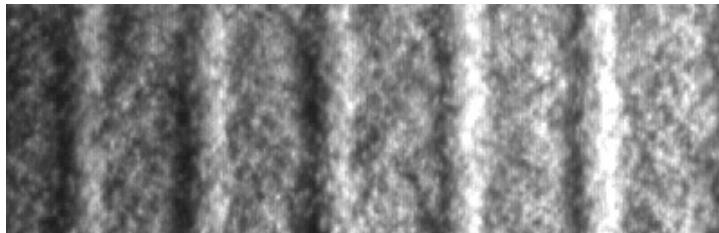
DAMTP, Cambridge, UK



T. Börzsönyi, R.E. Ecke and J.N. McElwaine,  
Phys. Rev. Lett. **103**, 178302 (2009).



$\theta = 42.6^\circ$



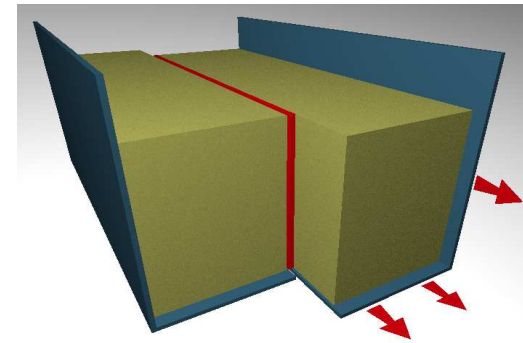
Inerciális szám:  $I = \frac{\dot{\gamma}d}{\sqrt{P/\rho}}$   
(dimenziótlan nyírási ráta)



# Nyírási lokalizáció homogén szemcsés anyagokban

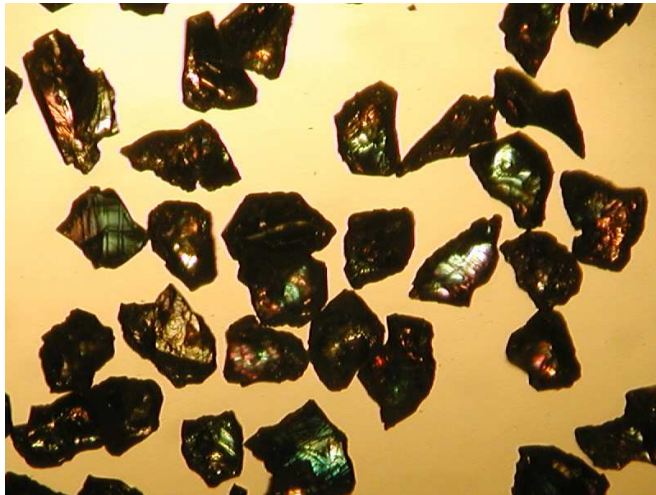


A szemcsés anyagot a határoló fal mozgásával deformáljuk. A deformáció lokalizálódik, így alakul ki a nyírási zóna (piros vonal).

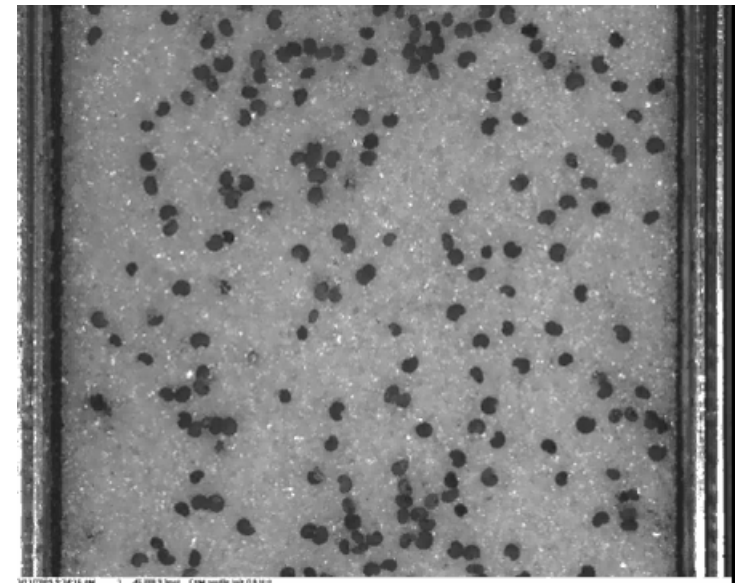


felülnézet:

(korund mákszemekkel)

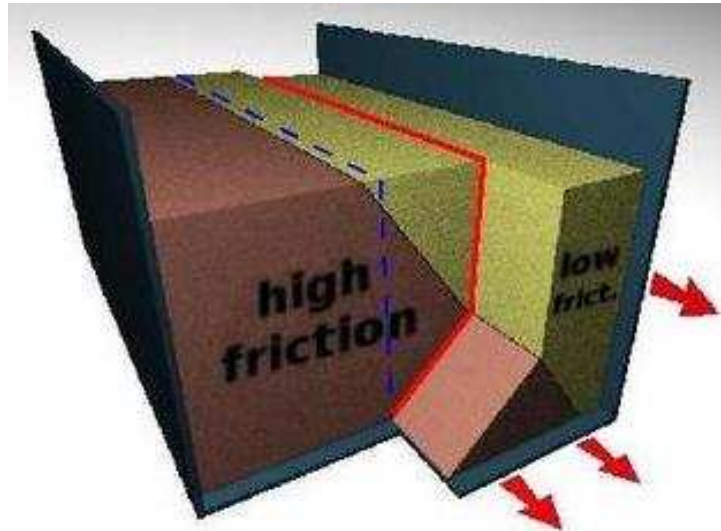


korund  
szemcsék



# Nyírási lokalizáció inhomogén (rétegzett) szemcsés anyagokban

A nyírási zóna igyekszik hamar elhagyni a nagy súrlódású réteget és a kis súrlódású rétegben jön a felszínre. Ez az "optimális" útvonal hasonló elv alapján alakul ki, mint a fénysugár útja inhomogén optikai közegben.



T. Börzsönyi, T. Unger and B. Szabó, Phys. Rev. E (2009).

$$\int \mu^{eff} P ds = \min.$$

$$\int \mu^{eff} ds = \min.$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\mu_1^{eff}}{\mu_2^{eff}}$$

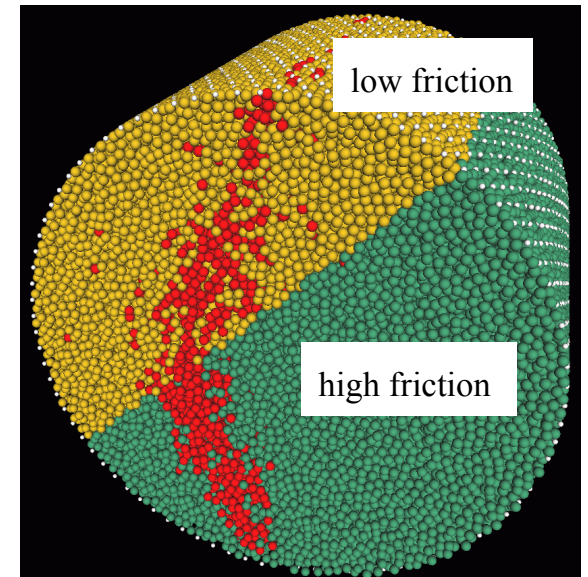
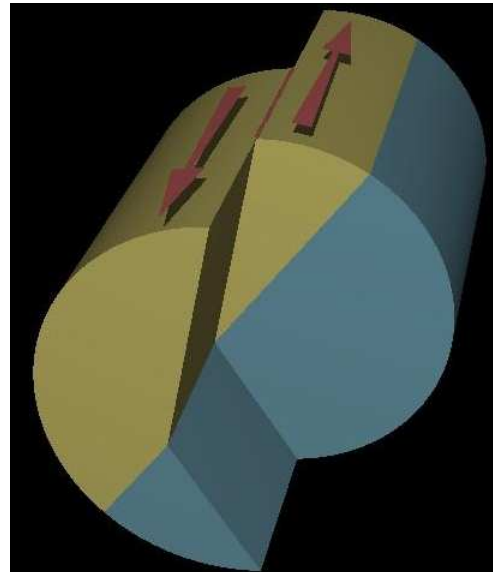
Optika:

Fermat elv

$$\int n ds = \min.$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2}$$

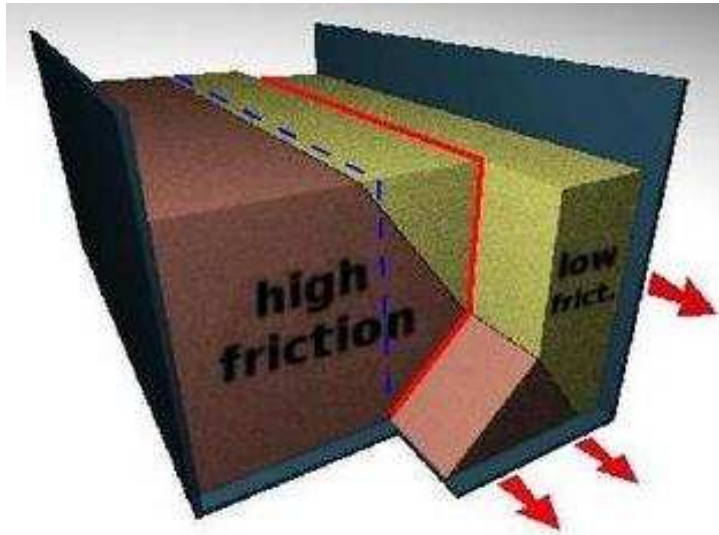
Unger Tamás, Phys. Rev. Lett. (2007)



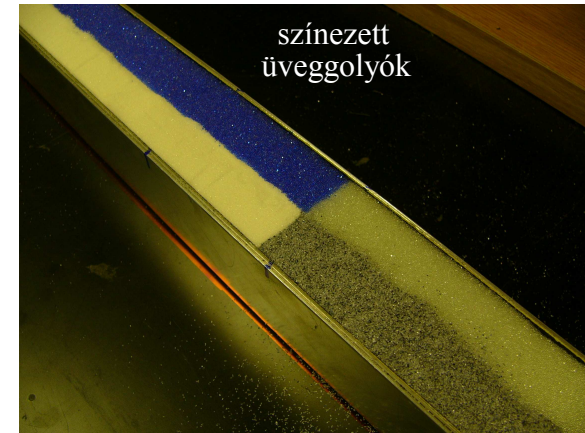


# Nyírási lokalizáció inhomogén (rétegzett) szemcsés anyagokban

Színezett mintát használva a mérés elvégzése után láthatóvá válik a kialakult deformáció.



korund

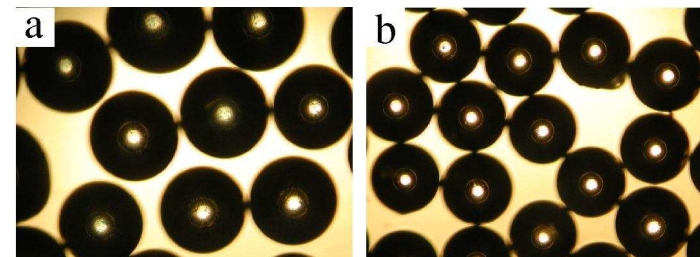


üveggolyók

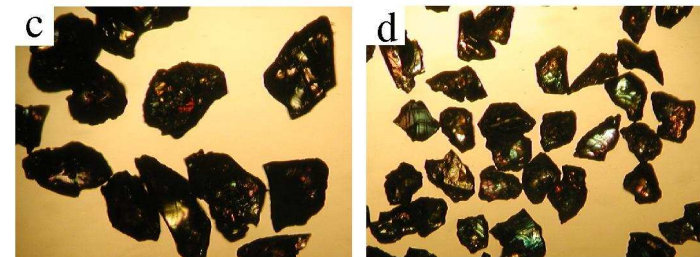
színezett korund



üveggolyók

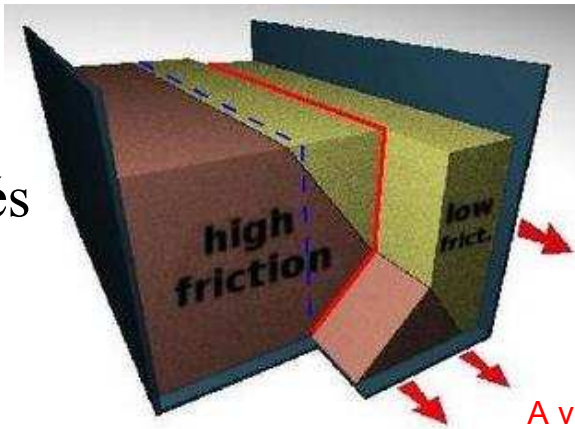


korund

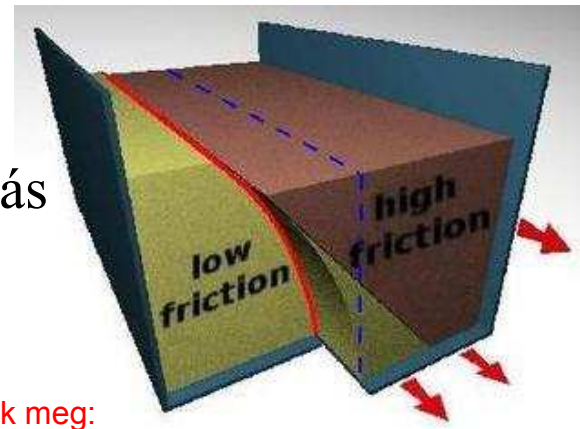




Törés

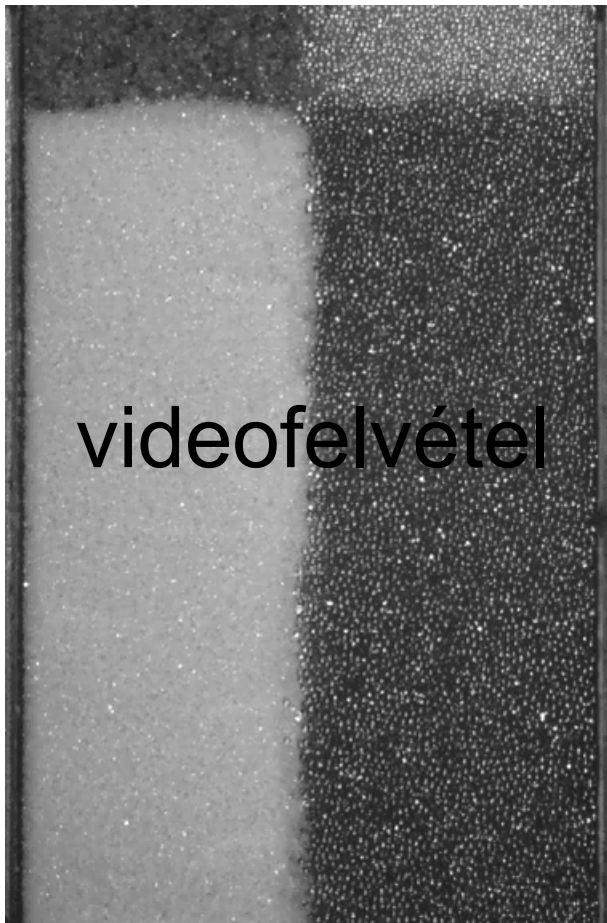


Elhajlás



A videofelvételek itt tekinthetők meg:  
[www.szfki.hu/~btamas/gran/shearzone.html](http://www.szfki.hu/~btamas/gran/shearzone.html)

színezett korund



üveggolyók

színezett üveggolyók



korund

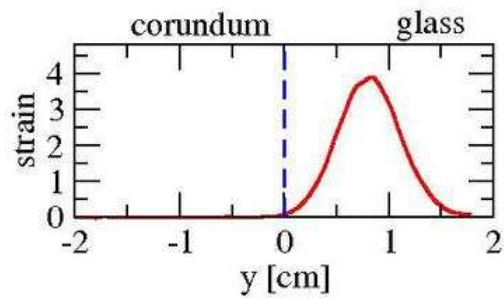
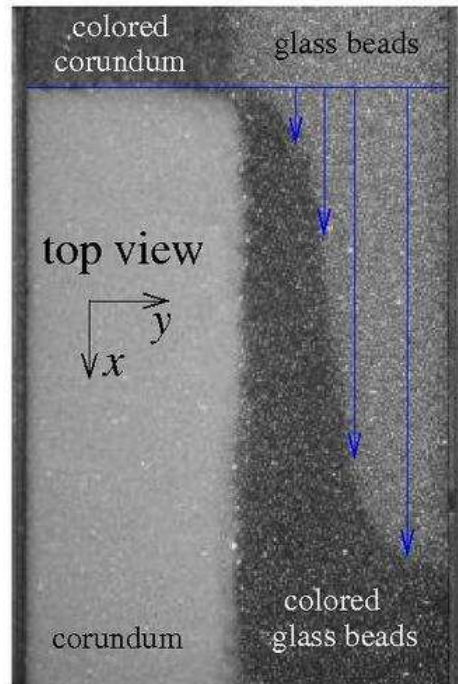
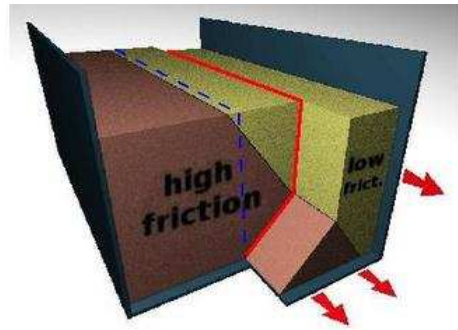
korund

színezett üveggolyók

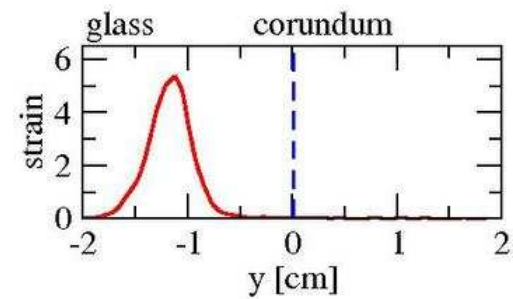
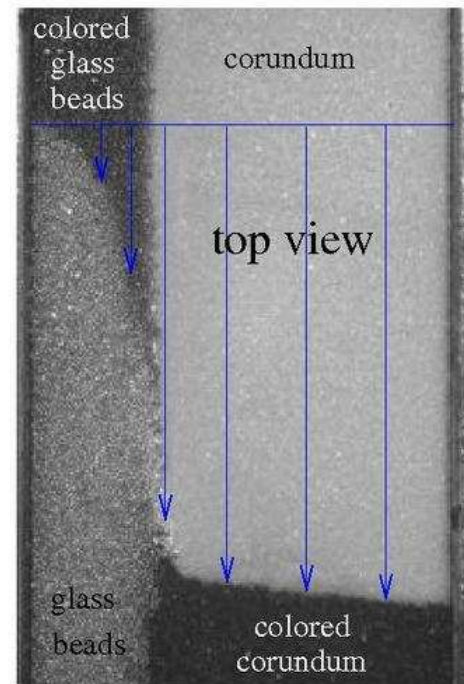
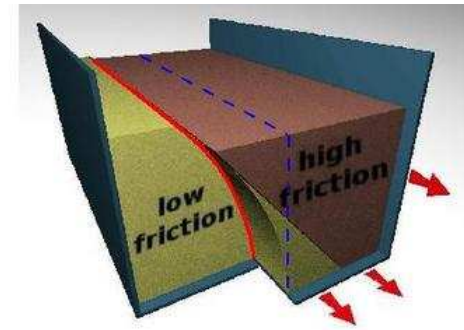
üveggolyók

színezett korund

# Törés



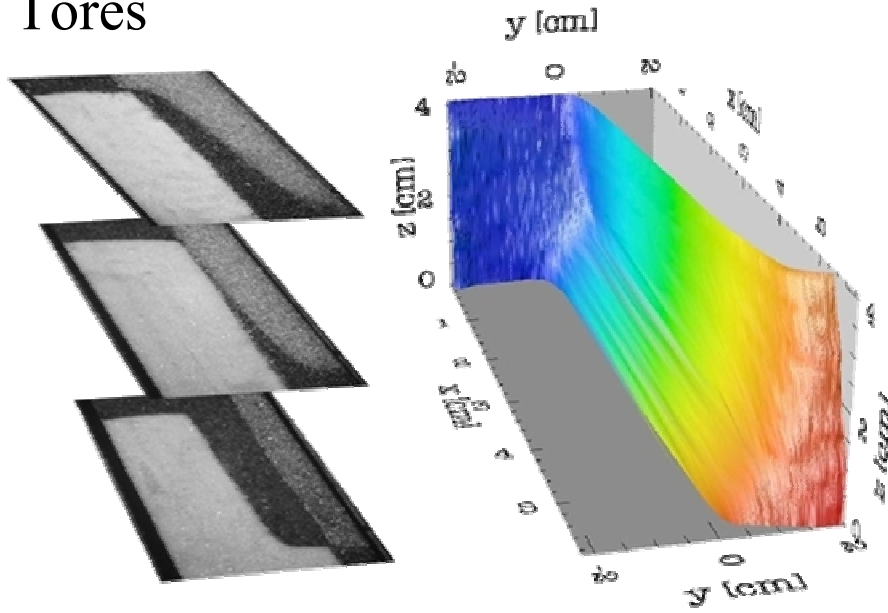
# Elhajlás



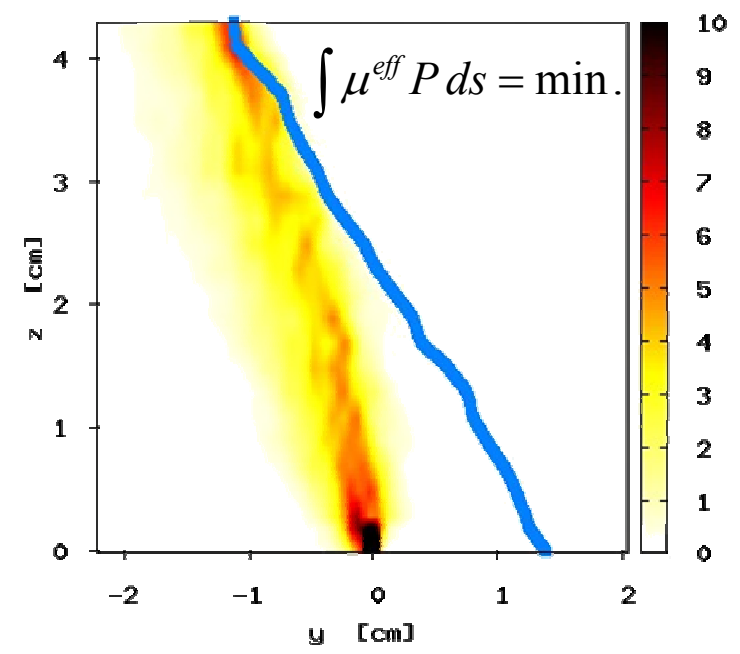
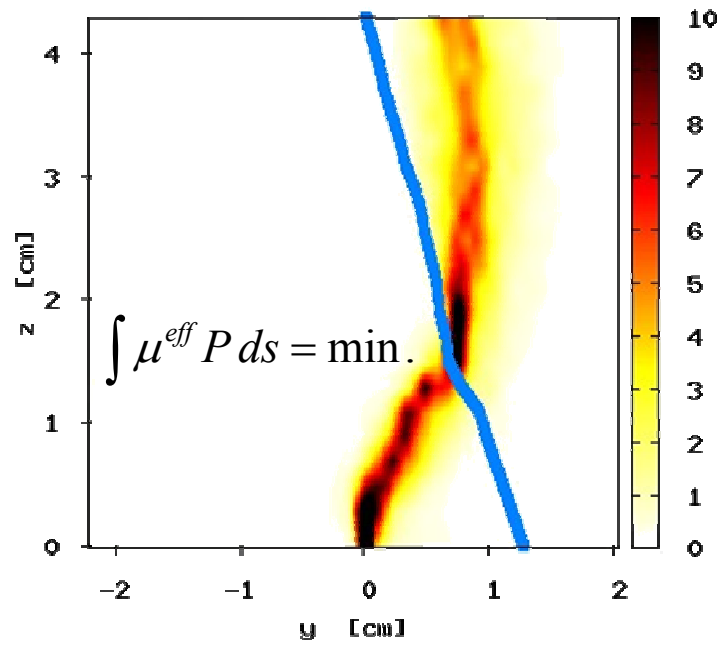
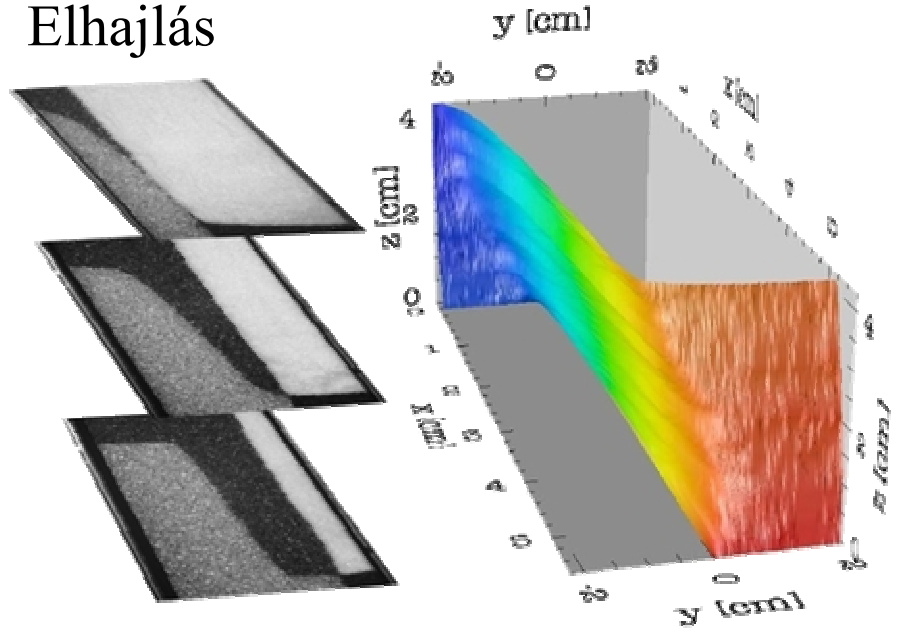
← A kialakult deformációs profil látható a felszínen →

A mintát rétegenként feltárva meghatározhatjuk az anyag belsejében kialakult deformációt

### Törés



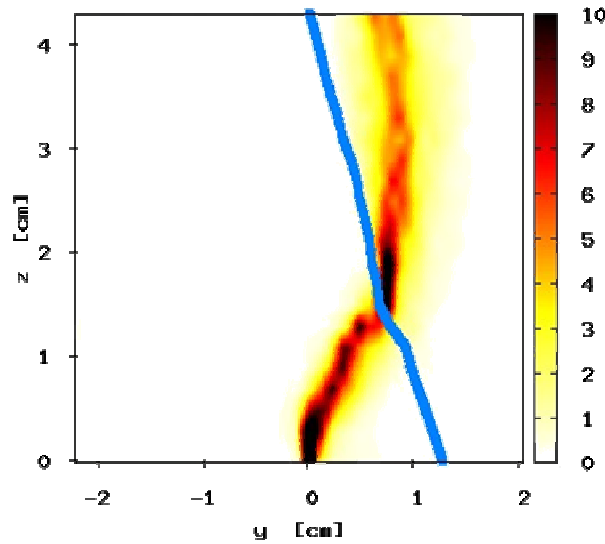
### Elhajlás



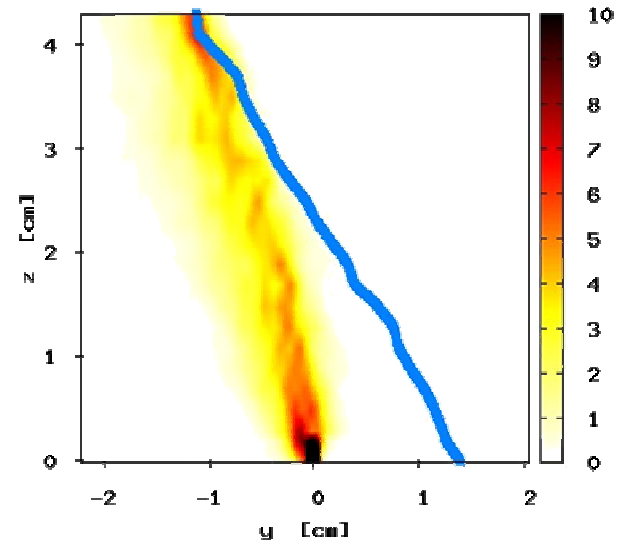


Kísérlet

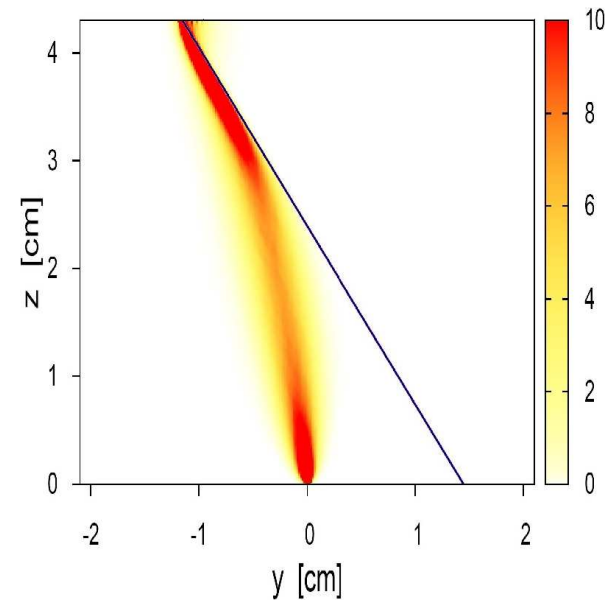
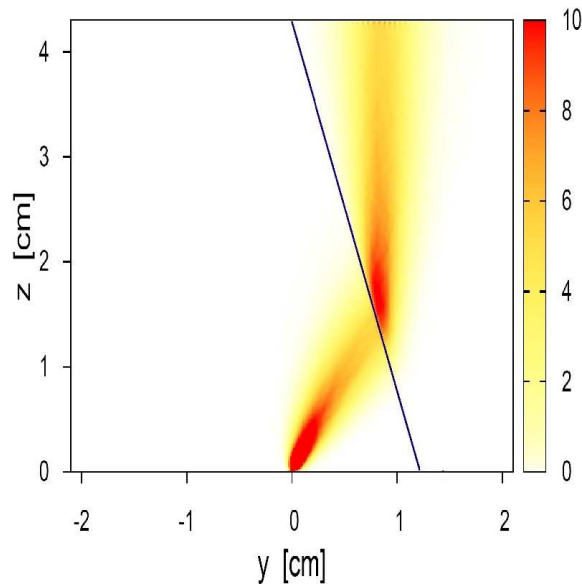
Törés



Elhajlás



Szimuláció



Szimulációk: Unger Tamás BME, Fizikai intézet (Fluctuating narrow band model, J. Török et al. Phys. Rev. E, 2004)

Teljesül-e az optikából ismert Snellius-Descartes törvény?

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\mu_{\text{corundum}}^{\text{eff}}}{\mu_{\text{glass}}^{\text{eff}}}$$

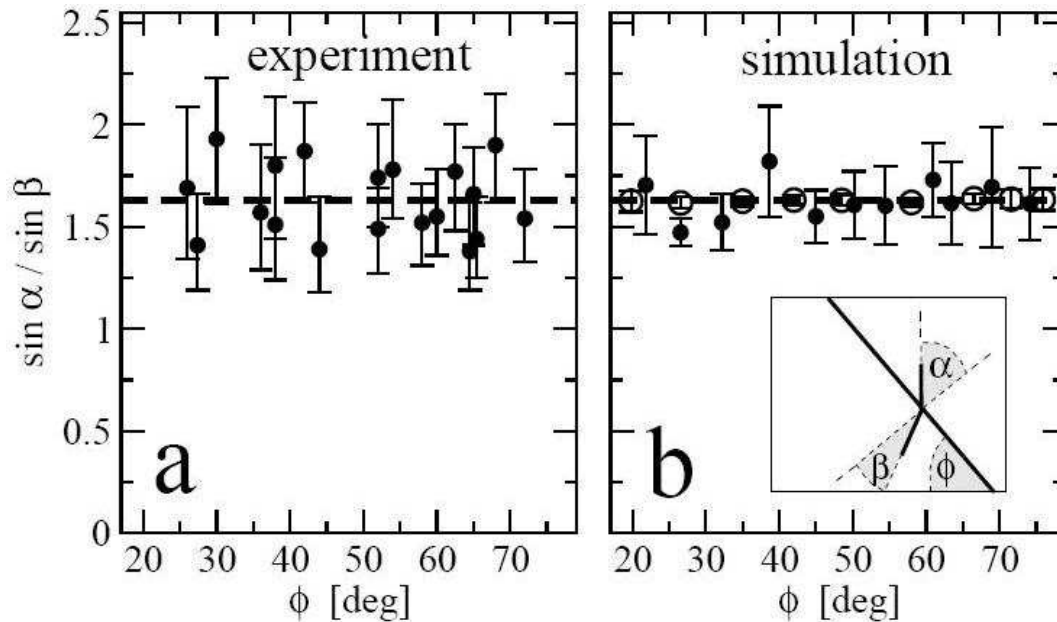
Becslés  $\frac{\mu_{\text{corundum}}^{\text{eff}}}{\mu_{\text{glass}}^{\text{eff}}}$  értékére

a rézsűszögek mérésével:

$$\frac{\mu_{\text{corundum}}^{\text{eff}}}{\mu_{\text{glass}}^{\text{eff}}} = \frac{\tan \theta_r^{\text{corundum}}}{\tan \theta_r^{\text{glass}}} = \frac{\tan 33.2^\circ}{\tan 21.9^\circ} = 1.63$$

# Teljesül-e az optikából ismert Snellius-Descartes törvény?

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\mu_{\text{corundum}}^{\text{eff}}}{\mu_{\text{glass}}^{\text{eff}}}$$



Becslés  $\frac{\mu_{\text{corundum}}^{\text{eff}}}{\mu_{\text{glass}}^{\text{eff}}}$  értékére  
a rézsűszögek mérésével:

$$\frac{\mu_{\text{corundum}}^{\text{eff}}}{\mu_{\text{glass}}^{\text{eff}}} = \frac{\tan \theta_r^{\text{corundum}}}{\tan \theta_r^{\text{glass}}} = \frac{\tan 33.2^\circ}{\tan 21.9^\circ} = 1.63$$

T. Börzsönyi, T. Unger and B. Szabó, Phys. Rev. E (2009).



# Részecskemozgás vizualizálása az anyag belsejében MRI segítségével

Bruker BioSpec 47/20 MRI scanner  
[200 MHz, proton rezonancia  
frekvencia (4.7 T)]  
Leibniz Institute for Neurobiology,  
(Magdeburg)

Tekercs átmérő = 7cm

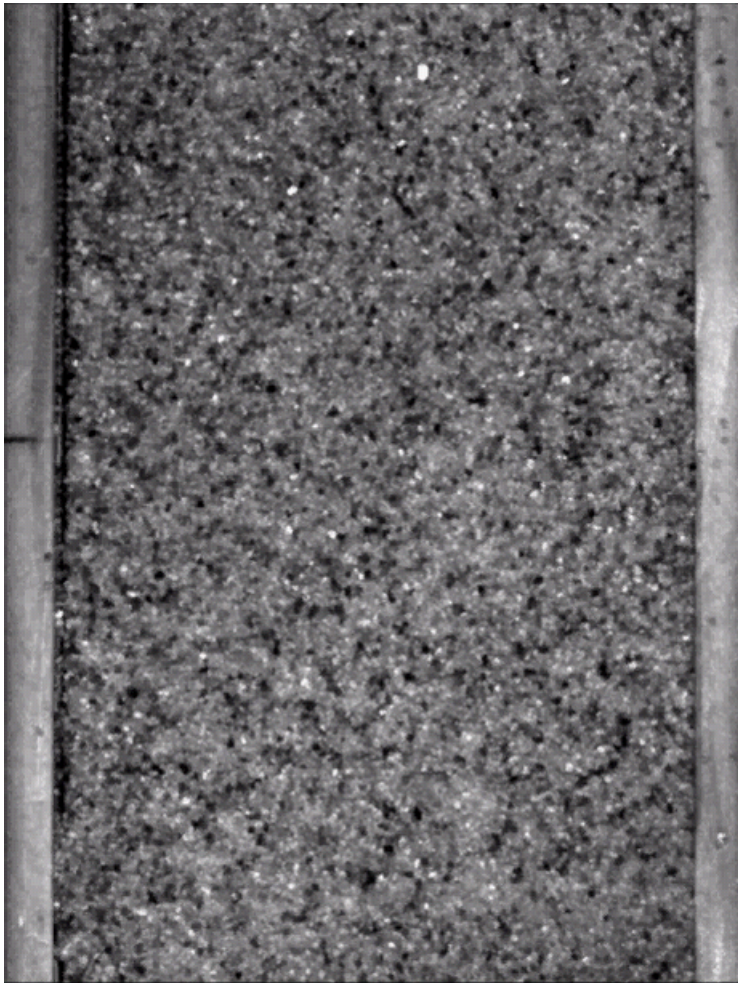


Korund mákszemekkel  
( $d = 0.7-0.8\text{mm}$ )

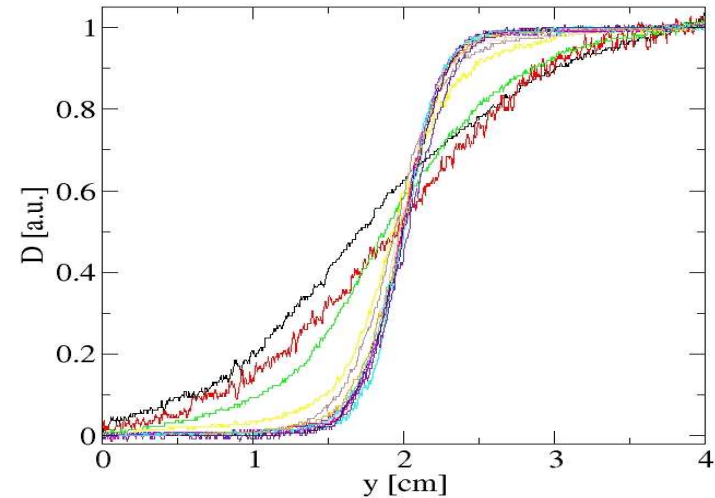


# Miért kell MRI mérést csinálni?

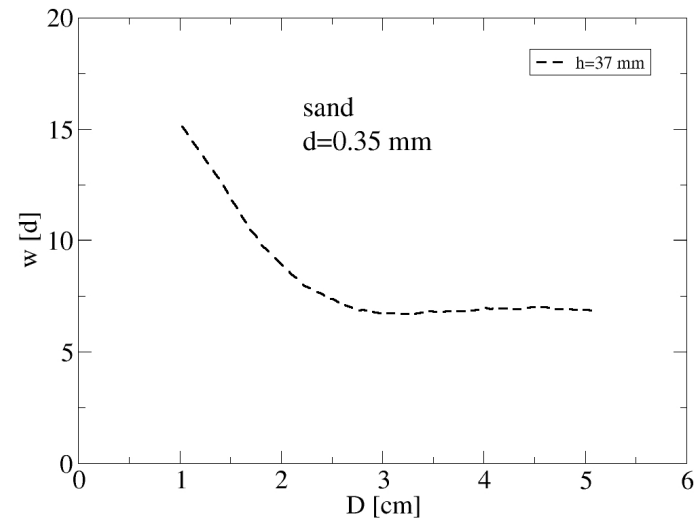
A nyírási zóna helye és kiterjedése egy kezdeti tranzienst után éri el az optimálisat. Az előzőekben bemutatott színezett mintát használó mérésekkel ellentétben az MRI segítségével a minta belsejében is nyomon követhetjük a tranzienst, és különválaszthatjuk azt a kialakult "optimális" konfigurációtól.



A deformáció a folyamat előrehaladtával egyre jobban lokalizálódik, és kialakul az ún. nyírási zóna.



A nyírási zóna szélességének ( $w$ ) változása a kezdeti tranzienst alatt. A határoló fal elmozdulásának ( $D$ ) növelésével a zónaszélesség csökken, míg el nem éri az optimális értéket.

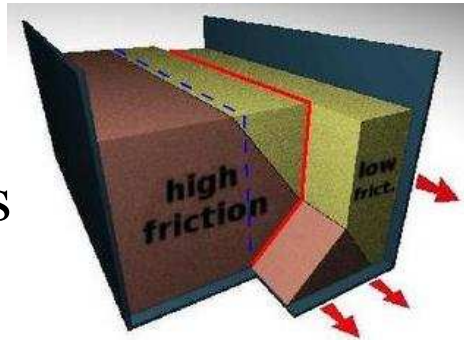




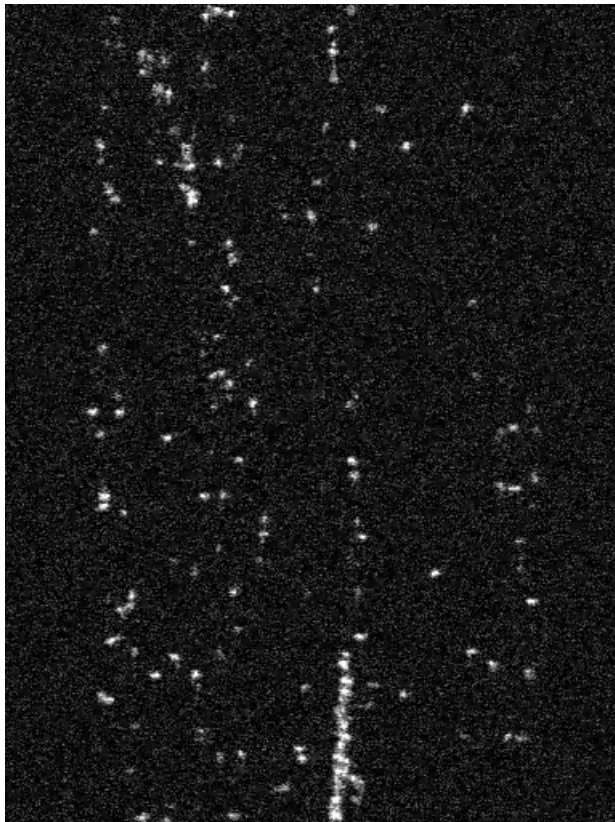
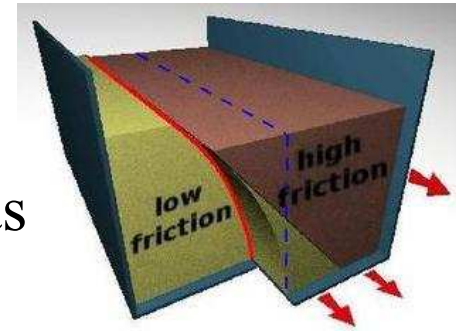
# Részecskemozgás vizualizálása az anyag belsejében MRI segítségével

mák = világos foltok  
üveggolyók, korund = fekete

Törés



Elhajlás



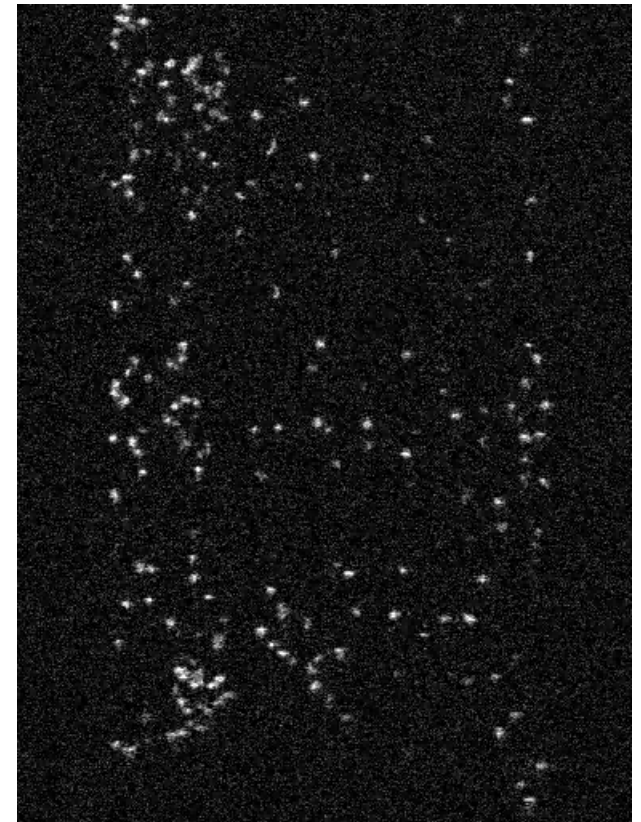
55 hasonló szelet  
síkok közötti távolság = 0.8mm

síkon belüli pixelméret  
= 0.15mm x 0.15mm

1 mérés

= 1 felvétel

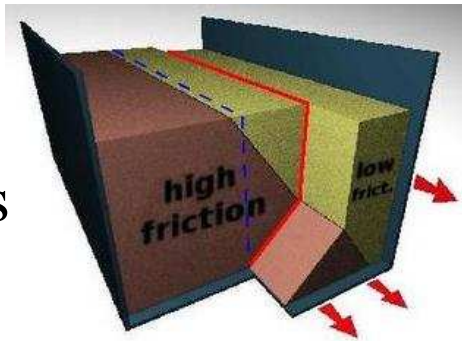
= 10 perc



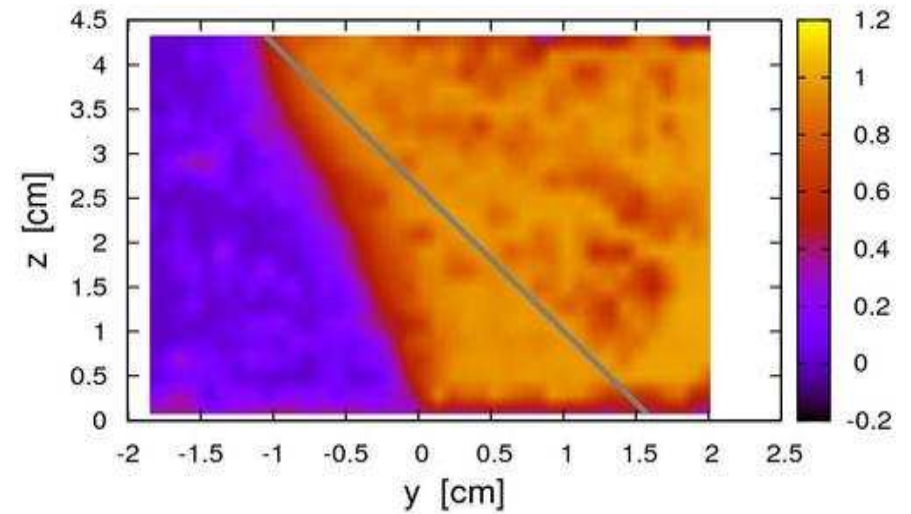
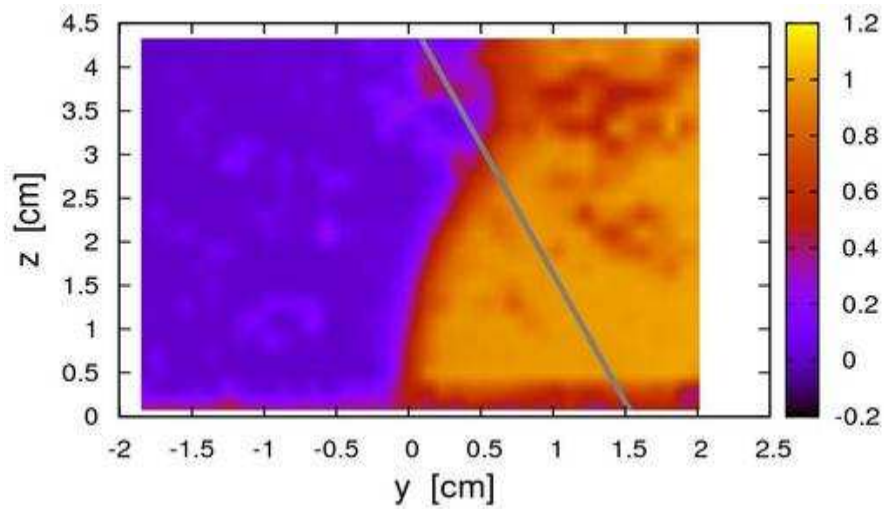
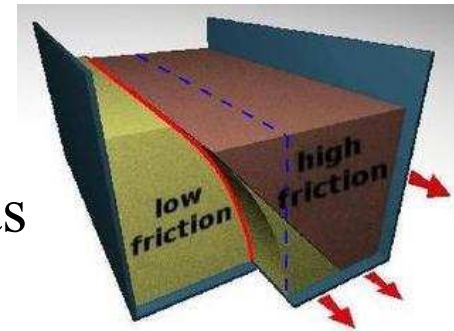


# Részecskemozgás vizualizálása az anyag belsejében MRI segítségével

Törés

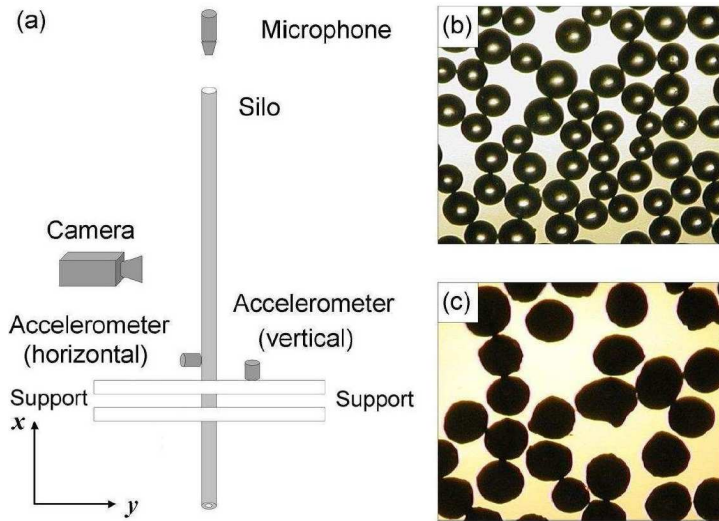


Elhajlás

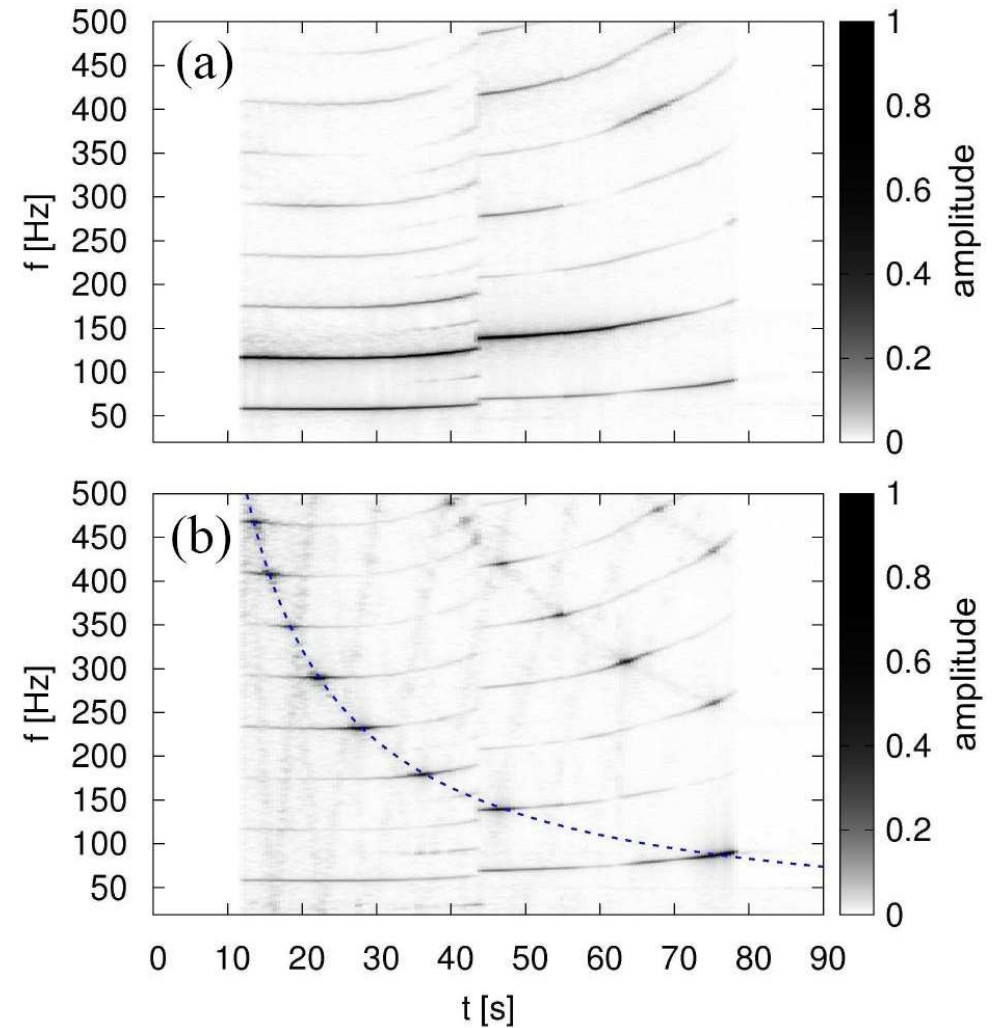
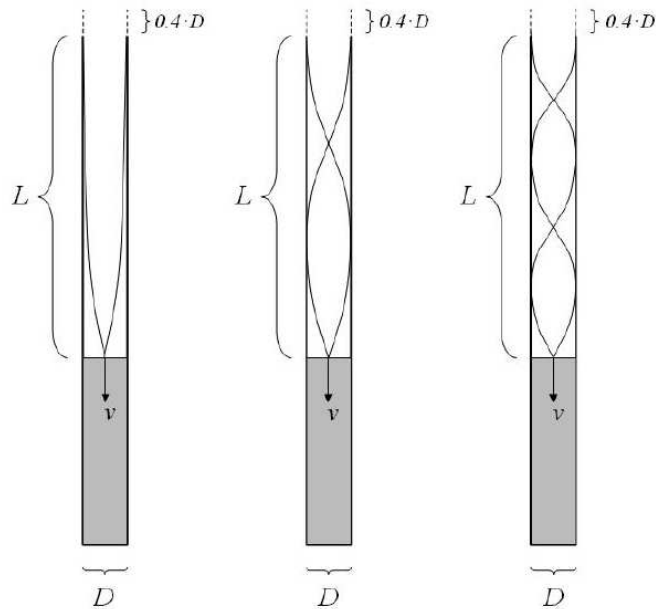


# Siló zene (Silo music)

Egy függőleges csőből lassan kifolyó szemcsés anyag rezonanciája



$$L + 0.4 \cdot D = \frac{1}{4}\lambda \quad L + 0.4 \cdot D = \frac{3}{4}\lambda \quad L + 0.4 \cdot D = \frac{5}{4}\lambda$$



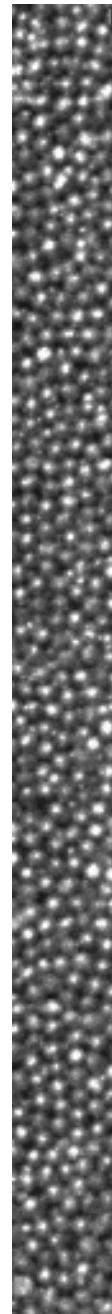
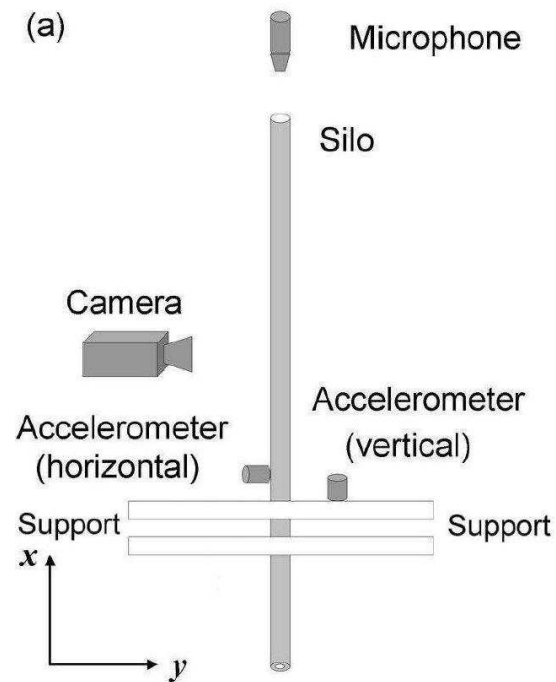
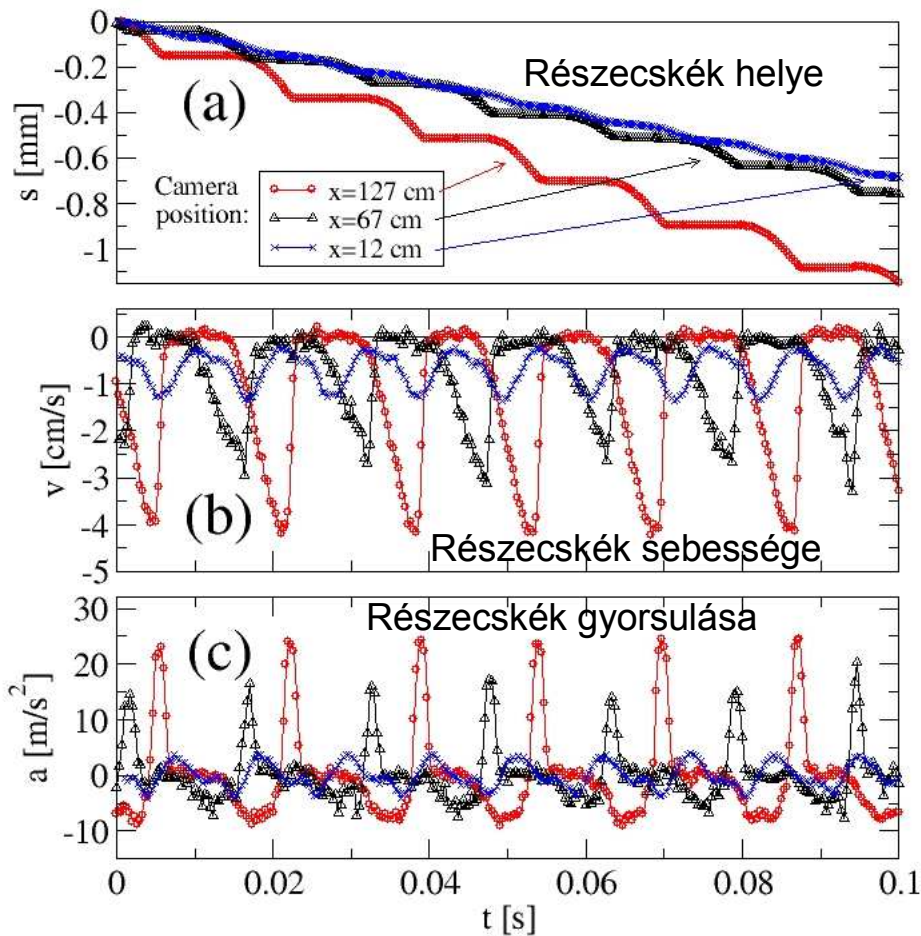
Kísérletek: Kovács Zsolt (ELTE / MTA SZFKI)

# Siló zene (Silo music)

## Gyors kamerás mérések

Megtapad-megcsúszik (stick-slip) jellegű mozgás csak a cső felső részében látható

3000 kép/s

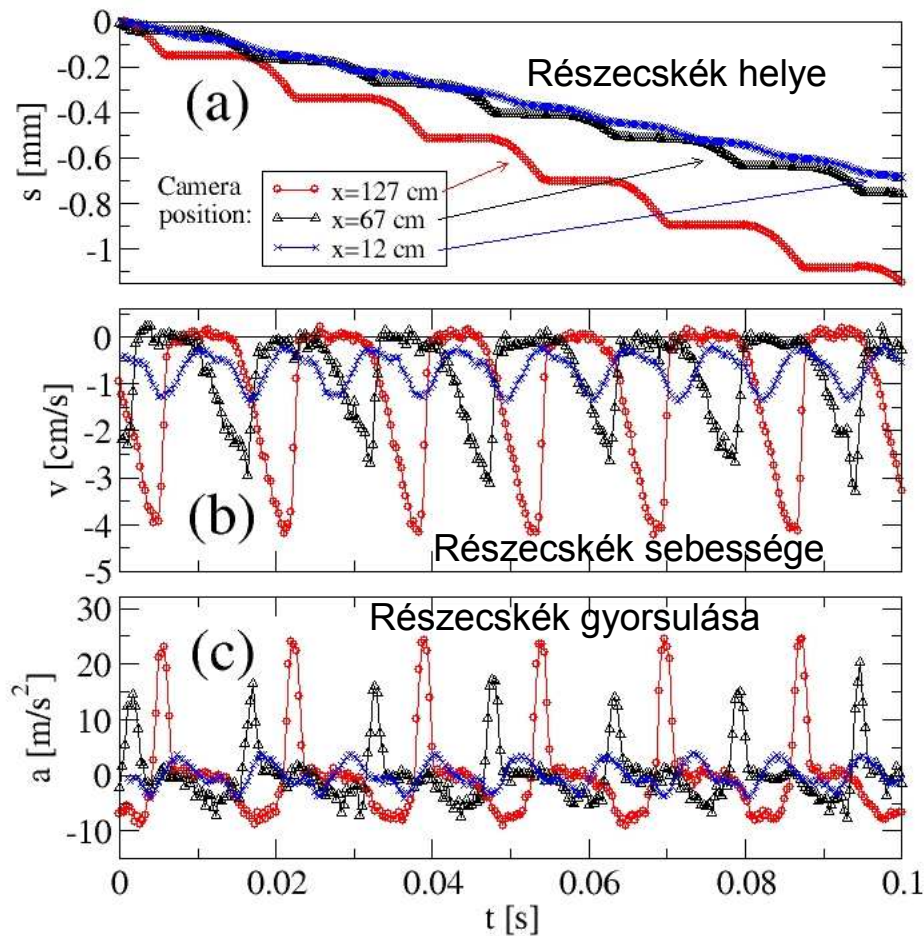




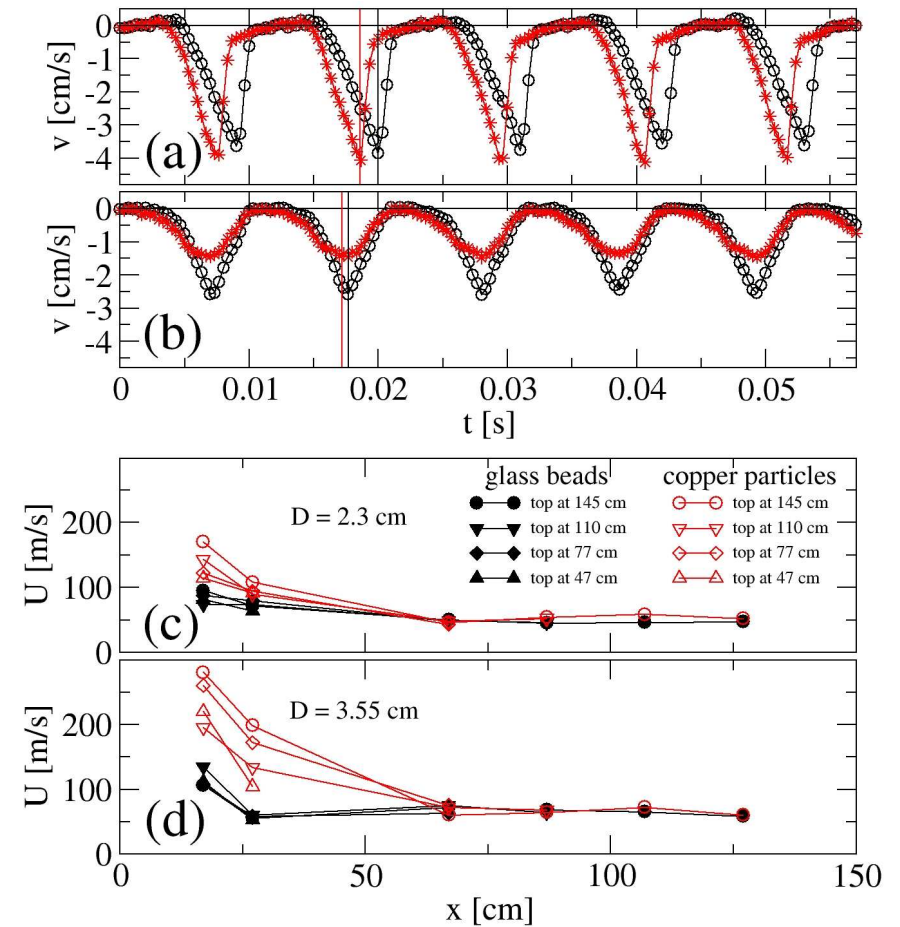
# Siló zene (Silo music)

## Gyors kamerás mérések

Megtapad-megcsúszik (stick-slip) jellegű mozgás csak a cső felső részében látható



Egymáshoz közel levő ( $dx=10$  cm) helyeken nem azonos fázisban rezegnek a részecskék. A csőben hanghullámok terjednek felfele  $U$  sebességgel.  $U$  értéke nagyobb a cső alján, ami erősen megnövekedett nyomásviszonyokra utal.

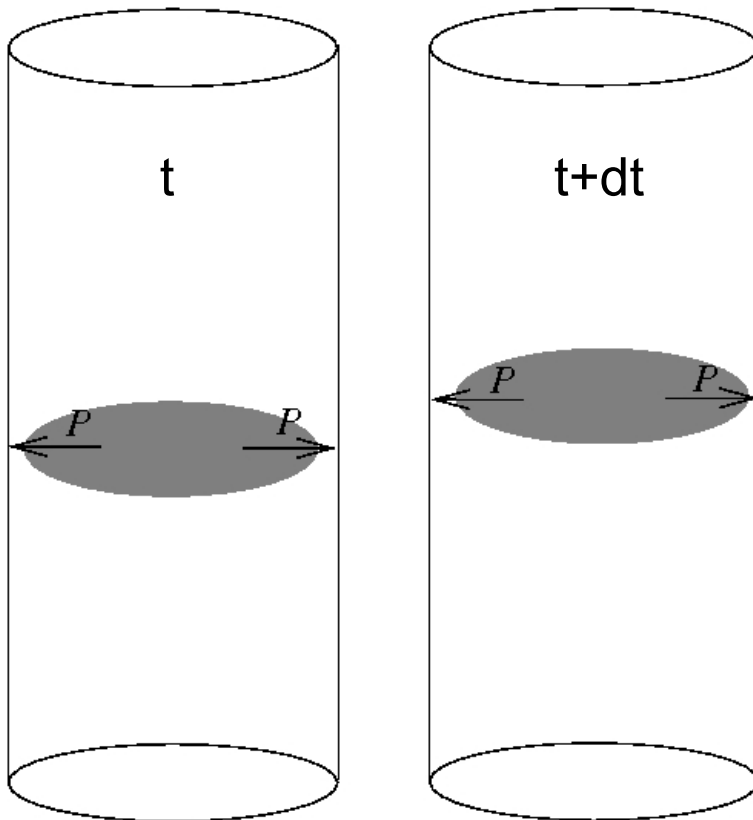


# Siló zene (Silo music)

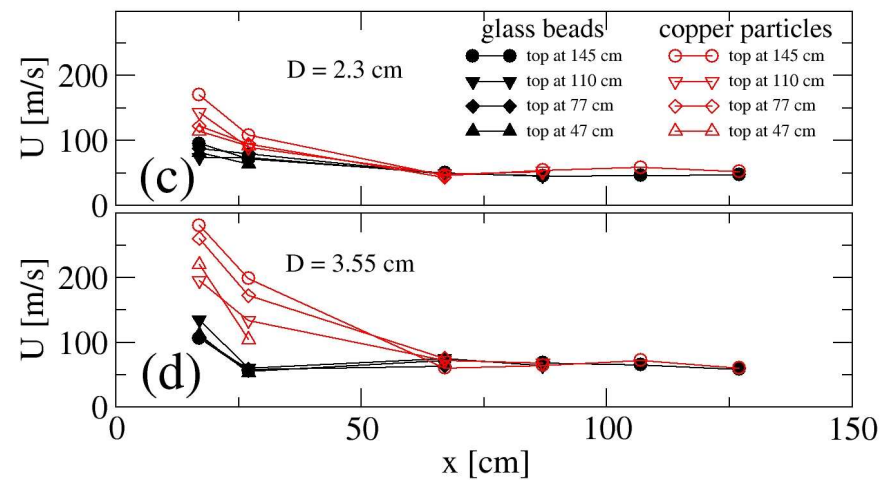
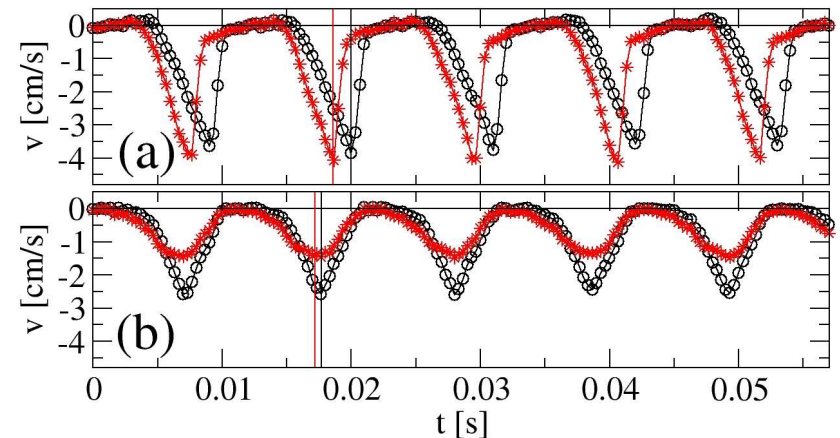
## Gyors kamerás mérések

Miért fölfelé terjednek a sűrűség hullámok?

Egy picit nagyobb sűrűségű tartomány megjelenése a folyás lassulásához vezet lokálisan, mivel itt megnő a súrlódás a falakkal. A lelassult folyás következtében a nagyobb sűrűségű tartomány felső részén feltorlódik az anyag, az alsó részén pedig elfolyik alóla, tehát a tartomány följebb mozdul, vagyis a csőben a hanghullámok fölfelé terjednek.



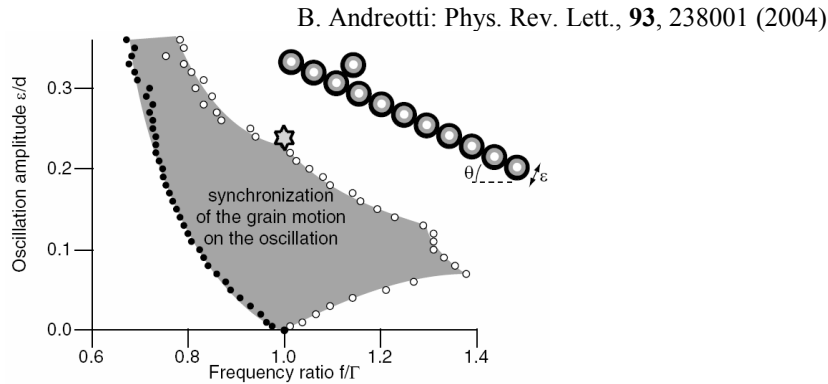
Egymáshoz közel levő ( $dx=10$  cm) helyeken nem azonos fázisban rezegnek a részecskék. A csőben hanghullámok terjednek fölfelé  $U$  sebességgel.  $U$  értéke nagyobb a cső alján, ami erősen megnövekedett nyomásviszonyokra utal.



# Éneklő homokdűnék (Singing sand dunes)

Ha bizonyos dűnék felületén nagyobb mennyiségű homok folyik le, mély rezonáló hangot hallhatunk. Néhány tucat ilyen tulajdonságú dűne ismert a földön.

További képek, filmek: <http://www.pmmh.espci.fr/fr/morphodynamique/SongOfDunes.html>

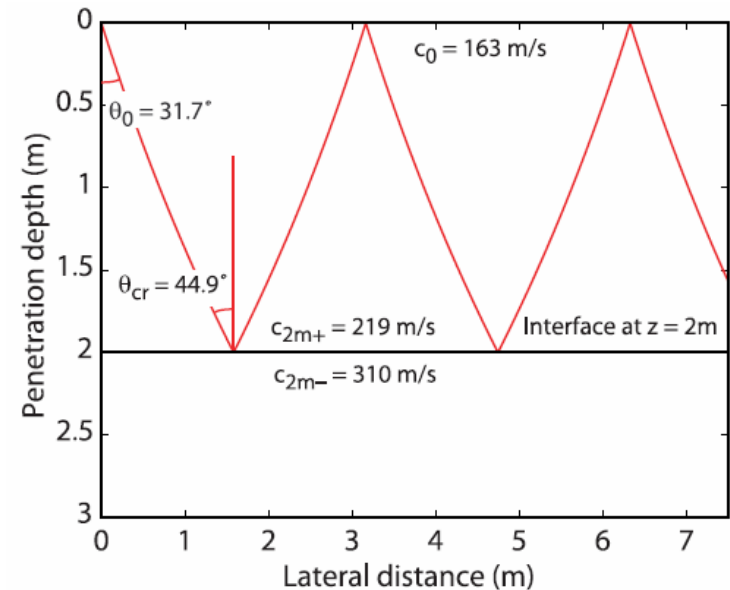
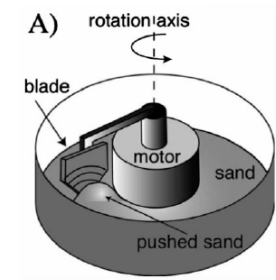
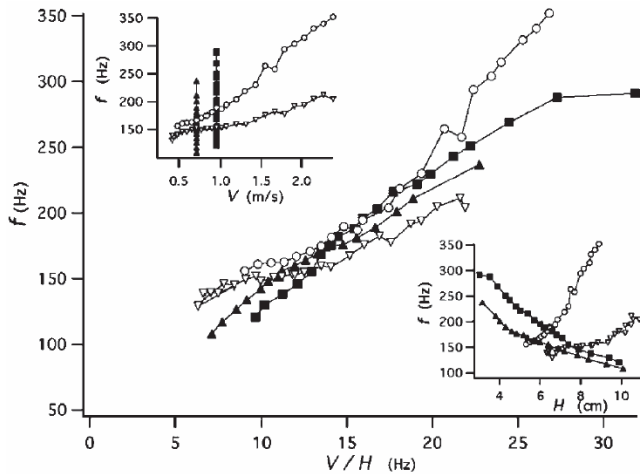


N. Vriend et. al.: Geophys. Res. Lett., **34**, L16306 (2007)

A dűne felszínén egy 1-2 méteres száraz réteg van, ami alatt nedvesebb homok található. A felszíni réteg hullámvezetőként működik, és felerősíti a felszíni folyás során keletkező rezgéseket.

Laboratóriumi kísérletek alátámasztják, hogy a részecskék nyírás hatására létrejövő szinkronizált mozgása hangot generálhat, aminek a frekvenciája szépen emelkedik a nyírás növelésével. A szinkronizációhoz szükséges, hogy a részecskék azonos méretűek legyenek, de maga a dűne nem kell hozzá.

S. Douady: Phys. Rev. Lett., **97**, 018002 (2006)





# Együttműködők:

Szabó Balázs

ELTE / MTA SZFKI, Budapest

Kovács Zsolt

ELTE / MTA SZFKI, Budapest

Unger Tamás

BME, Fizikai intézet, Budapest

Sandra Wegner

Univ. Magdeburg, Németország

Ralf Stannarius

Univ. Magdeburg, Németország

Frank Angenstein

Leibniz Institute, Magdeburg, Németország

Jim N. McElwaine

DAMPT, Cambridge Univ., Anglia

Robert E. Ecke

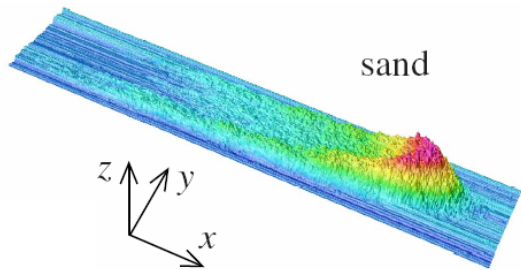
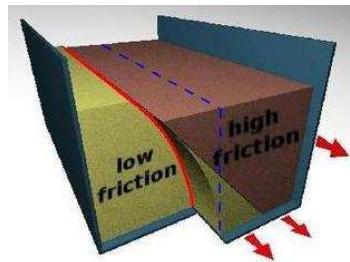
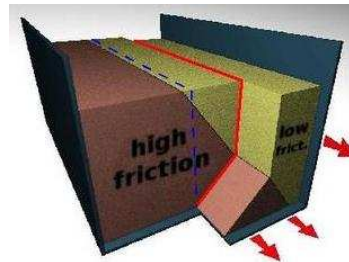
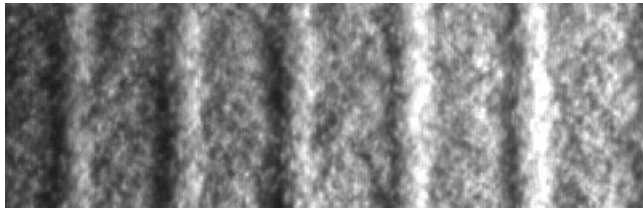
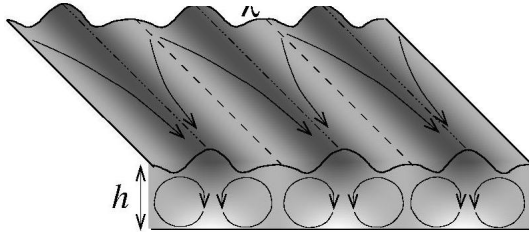
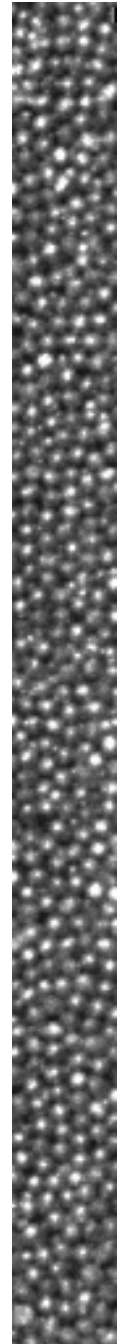
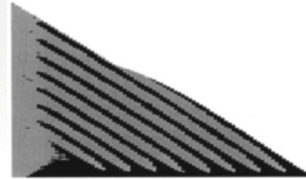
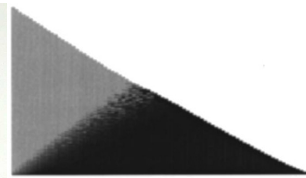
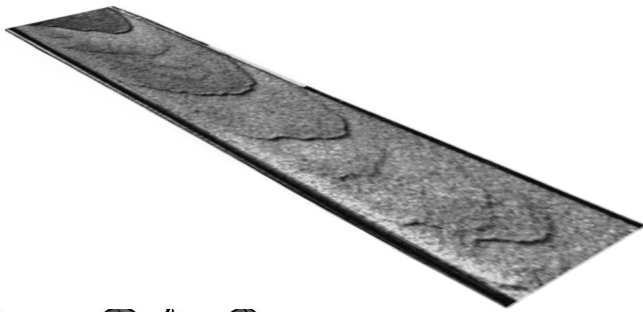
CNLS, Los Alamos National Laboratory, USA

Thomas C. Halsey

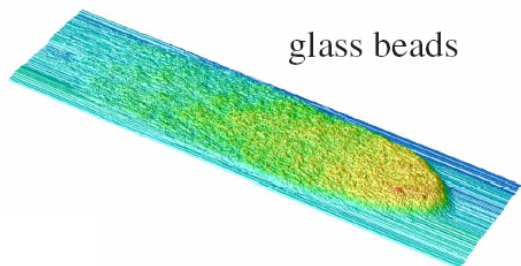
ExxonMobil, Upstream Research Co., USA

# Támogatók:

OTKA, MTA (Bolyai Ösztöndíj)



sand



glass beads

