

## Zárójelentés

### OTKA F-060157 sz. kutatási pályázat

Cím: Szemcsés anyagok dinamikai folyamatainak kísérleti vizsgálata

Témavezető: Börzsönyi Tamás

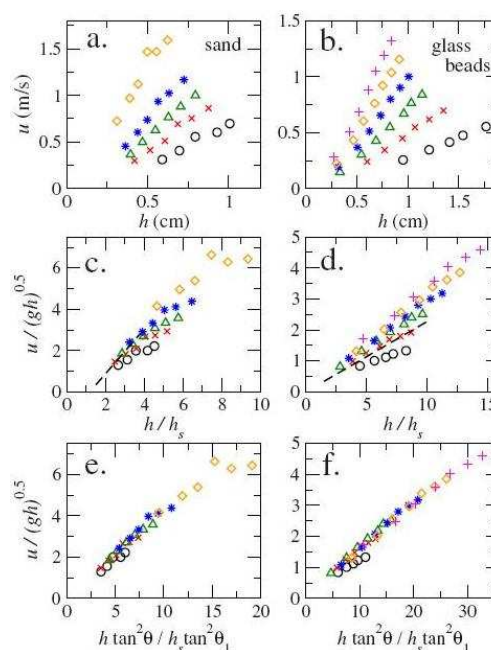
A kutatás célja a szemcsés anyagok dinamikájának jobb megértése modern technikai eszközöket felhasználó laboratóriumi vizsgálatok segítségével. Az MTA SZFKI-ban ilyen (szemcsés anyagokra irányuló) vizsgálatok korábban nem folytak, így az OTKA támogatás segítségével egy új kísérleti laboratórium jöhetett létre, melyben a témavezetőn kívül jelenleg 3 diplomamunkás hallgató is végzi a kutatásait.

A terveknek megfelelően beszerzésre kerültek a mérésekhez szükséges anyagok (kvarchomok, gránáthomok, üveggolyók, szilikagél, valamint acél- és réz-granulátumok) és a karakterizálásukhoz szükséges eszközök (sziták), valamint a mérési elrendezések építéséhez szükséges alkatrészek, optikai eszközök. A kutatás gerincét a mérési elrendezések összeállítása és a szemcsés anyagok folyási tulajdonságainak vizsgálata adta, elsősorban egy – gyors dinamikai folyamatok vizsgálatára alkalmas nagy sebességű (447-40000 kép/s) – CMOS kamera segítségével készített felvételek digitális feldolgozásával. Az áramlási terek feltérképezésére elsősorban saját készítésű szoftvereket (particle tracking, particle image velocimetry) ill. más hozzáférhető szoftvereket használtunk.

Az első (legnagyobb részletességgel) vizsgált témakör a lejtőn (ill. homokdomb felszínén) lefolyó szemcsés anyag esete. Ennek az elrendezésnek az az előnye, hogy az egyszerű határfeltételek következtében elméleti jóslatok is vannak a gravitációs tér hajtotta áramlás sebességének az áramló réteg vastagságától való függésére, amiket közvetlenül ellenőrizhetünk.

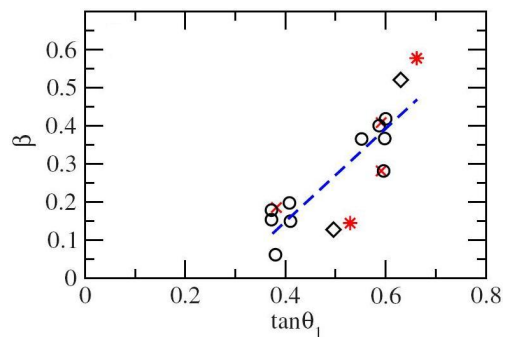
Az elméleti és gyakorlati szempontból is nagyon fontos kérdés az, hogy a szemcsés anyagok áramlásának legpontosabb (folyadékszerű) leírásához milyen összefüggést kell használnunk a nyírási feszültség (stress) és a sebességgradiens (shear rate) között. Egyszerű folyadékoknál a nyírási feszültség egyenesen arányos sebességgradienssel, az arányossági tényező – a viszkozitás – konstans. Komplex folyadékoknál (pl. polimeroldatok) a viszkozitás értéke függ a nyírás (sebességgradiens) mértékétől. Az elméleti jóslat szerint a szemcsés anyagok esetében sűrű áramlásoknál (ahol az anyag viszonylag lassan folyik és sűrűsége nem sokkal tér el a nyugalmi sűrűségtől), a nyírási feszültség a sebességgradiens második hatványával arányos, a disszipációt jellemző ún. belső súrlódási együttható pedig függ a nyírás mértékétől.

Ennek az alapvető kérdésnek a vizsgálatára az ún. folyási törvényt szokták meghatározni, amikor is a mélységátlagolt (vagy felületi) sebességet ( $u$ ) ábrázolják a vastagság ( $h$ ) függvényében. Ilyen görbéket láthatunk az (a) és (b) ábrákon, melyeket különböző lejtőszögeknél vettünk fel homok és üveggolyók esetén. Ha a nyírási feszültség a sebességgradiens négyzetével arányos, abból az következik, hogy a felületi sebesség a rétegvastagság  $3/2$ -k hatványával növekszik [1,2]. Sok anyagon



végzett méréseim adatainak összevetésével sikerült megmutatnunk [Phys. Rev. E, **76**, 031301 (2007)], hogy a legjobb skálázás egy korábbi javaslat [1] módosításaként érhető el, azaz ha az arányossági tényező tartalmazza a  $\tan\theta / \tan\theta_1$  hányados második hatványát, ahol  $\theta$  a lejtő szöge és  $\theta_1$  (gyakorlatilag) a rézsűszög. A (c) és (d) ábrák a görbék a korábbi javaslat [1] szerinti egybeesítését tartalmazzák, míg az (e) és (f) ábrák az általunk javasolt skálázást.

Ez az eredmény több okból is érdekes. Egyrészt kísérleti bizonyíték J.T. Jenkins friss elméletére, aki azt javasolta, hogy a lassú áramlásoknál fontos figyelembe venni, hogy ellentétben a ritkább rendszerekkel (ahol a pillanatszerű ütközések dominálnak) esetünkben bizonyos kontaktusok viszonylag hosszú ideig élnek, aminek következtében az ütközési disszipáció csökken, viszont az impulzusátadás továbbra is megtörténik. Másrészt a szemcsés anyagok egységes osztályozásának irányába nagy lépést tettünk, mivel megmutattuk, hogy a megfelelően skálázott  $u(h)$  adatok minden anyaghoz egy számot rendelnek hozzá (nevezetesen a föntebbi (e) és (f) ábrákon levő adatsor meredekségét, amit  $\beta$ -val jelölünk), amiről azt is megmutattuk, hogy a rézsűszög növekedésével a jobbra lévő ábra szerint szisztematikusan nő [Phys. Rev. E, **76**, 031301 (2007)]. Megmutattuk továbbá azt is, hogy a szemcsés kísérletekben leggyakrabban használt homok ill. üveggolyókhoz képest kicsit puhább (pl. fém) részecskéket véve, ahol az ütközési disszipációt leíró ún. restitúciós együttható csökken az ütközési sebesség növekedésével, a fenti skálátörvények már nem működnek.

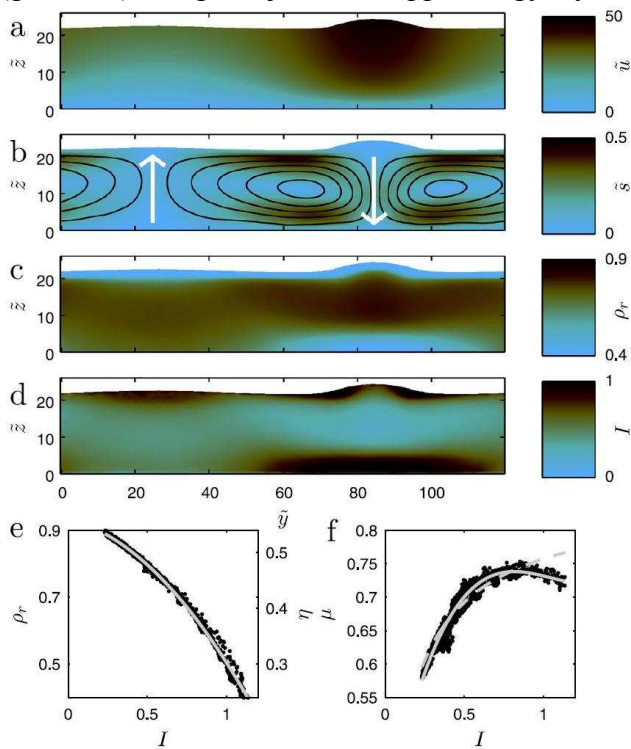
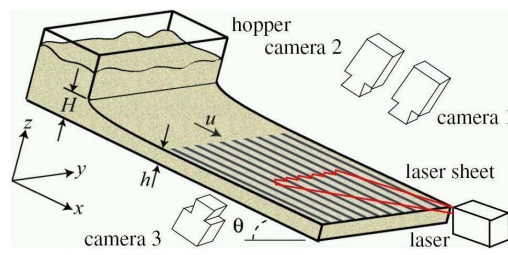


A fenti vizsgálatokhoz segítségünkre volt egy további adathalmaz, melyet egy kis szélességű cellán vettünk föl. Ennek a berendezésnek előnyös tulajdonsága, hogy együtt vizsgálható a felszíni  $u(y)$  sebességprofil, valamint az átlátszó üvegfalakon keresztül detektálható  $u(z)$  mélységfüggés. Ebben a geometriában a folyási rétegvastagság  $h$  kisebb, de nem lényegesen kisebb, mint a cella szélessége, így egy komplex 3 dimenziós sebességtér alakul ki. Vizsgáltuk a lejtőn kialakuló vékonyrétegű áramlásokat, és homokdombok felszíni folyásait is. Ezek az adatok ugyan önmagukban nem kerültek publikálásra, mégis fontos támpontot adtak a széles lejtőn kapott eredmények értelmezéséhez.

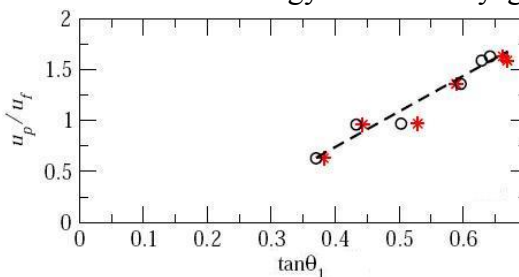
Egy négy hetes tanulmányút keretében méréseket végeztem a Los Alamos-i kutatóintézet folyadékdinamikai csoportjában, ahol egy már meglévő, viszonylag egyedi berendezésen lehetőség nyílt a hatékony adatgyűjtésre. (A nagy mennyiségű adat feldolgozása teljes egészében itthon történt.) A berendezést az teszi egyedivé, hogy annak ellenére, hogy nagy méretű, könnyen kezelhető, mivel a lejtő egy zárt térben (csőben) helyezkedik el, aminek dőlésszöge könnyen állítható, valamint a csőben lévő gáz nyomása is csökkenthető viszonylag alacsony (0.5mbar) tartományig. Így vizsgálhatjuk a nagy sebességgel áramló szemcsés anyag és levegő kölcsönhatását is. Kidolgoztam egy technikát a lejtőn lefolyó anyag sűrűségének mérésére. Köztudott, hogy az áramló szemcsés anyag sűrűsége a nyírás növelésével csökken. A lejtőn lefolyó szemcsés anyag a lejtő meredekségének növelésével egyre nagyobb felületi sebességgel folyik, így a növekvő nyírás sűrűség-csökkenéssel párosul, melynek mértékét a dőlésszög függvényében meghatároztam. A különböző (folyadékszerű, gázszerű) áramlási módusokat és mintázatképző (hullámokat, longitudinális csíkokat formáló) instabilitásokat fázisdiagrammon ábrázoltam. Megmutattuk, hogy a légellenállás hatása csak a nagyon híg, gázszerű fázisban (amikor a sűrűség már kevesebb mint 10%-a a statikus sűrűségnek) válik összemérhetővé a többi (súrlódás, rugalmatlan ütközés) disszipációs folyamattal [Phys. Rev. E, **74**, 061301 (2006)].

Megmutattuk, hogy a lejtőn megfigyelhető áramlásban spontán kialakuló longitudinális csíkok (lásd az ábrát) már a nagy sűrűségű lassú áramlásokban is létrejönnek és struktúrájuk lényegesen eltér a gyorsabb, ritkább áramlásokban már korábban megfigyeltől. Egy igen hosszú (5.7 m) lejtőt összeállítva megmutattuk, hogy a korábbi elképzelésünkkel [Fizikai Szemle LVII (7), 217 (2007)] ellentétben, a mintázat kialakulása nem köthető szorosan a gyorsuláshoz, vagyis a stacionárius áramlás instabilitásáról van szó [Phys. Rev. Lett. **103**, 178302 (2009)]. Így könnyebben tesztelhetjük az instabilitási mechanizmusra vonatkozó feltételezéseinket numerikus módszerekkel (ez a megközelítés a nem-stacionárius esetben lényegesen bonyolultabb lenne). Részletesen feltérképeztük az áramlási struktúrát, majd az adatok birtokában elméleti irányban léptünk tovább. Mivel a kontínuum modellek sok feltevésen alapulnak szerencsésebb molekuladinamikai számolást alkalmazni, amire egy jó nevű Cambridge-i (DAMPT) csoport vállalkozott is. A számolások tökéletes összhangban vannak a kísérleti eredményekkel és világossá vált, hogy az instabilitás során egy nagyobb sűrűségű tartomány felgyorsulva csúszik egy ritkásabb (gázszerű) réteg tetején, ami épp a nagy nyírás hatására marad "felforr" állapotban [Phys. Rev. Lett. **103**, 178302 (2009)]. Az ábrákon a szimulációs eredmény keresztmetszete látszik, a rendszer csak egy csíkot tartalmaz. Az (a) panelen a lejtő irányú sebesség látszik, míg a (b) panel megmutatja, hogy a keresztmetszet síkjában egy nagyon lassú körkörös áramlás alakult ki. A (c) panel ábrázolja a sűrűséget míg a (d) panel az  $I$  inerciális szám (dimenziótlan nyírás) térbeli eloszlását mutatja. Látható a gyors-sűrű és alatta a ritka – nagy nyírásnak kitett tartomány. Ez a konfiguráció sokban hasonlít az ún. Lidenfrost jelenséghez, amikor is egy forró lap tetején a vízcsepp "szalad", mivel alatta kis viszkozitású gőz van.

Ennek a jelenségnek a részletes tanulmányozásával betekintést nyertünk a szemcsés áramlások alaptulajdonágaiba. Először is meghatároztuk, hogy hogyan csökken a sűrűség (hogyan tágul ki az anyag) a növekvő nyírás (inerciális szám) hatására, amit az (e) ábrán láthatunk. Másodszor pedig megmutattuk [(f) ábra], hogy az effektív súrlódás hogyan változik a nyírás növelésével – amit nagyon fontos eredménynek tartunk. Először – a sűrűbb tartományban – az eddigi ismereteinkkel (szaggatott vonal) megegyező módon növekszik, majd visszafordul és csökkenni kezd. Ez a "visszafordulás" az oka az instabilitásnak, ugyanis ha ezt elérjük (mondjuk a lejtő meredekségének növelésével), akkor a rendszer szétválhat két tartományra. Az egyikben tovább növekvő nyírással csökken a súrlódás (felforr tartomány) a másikban pedig lecsökken a nyírás és így súrlódás is (sűrű tartomány) [Phys. Rev. Lett. **103**, 178302 (2009)].

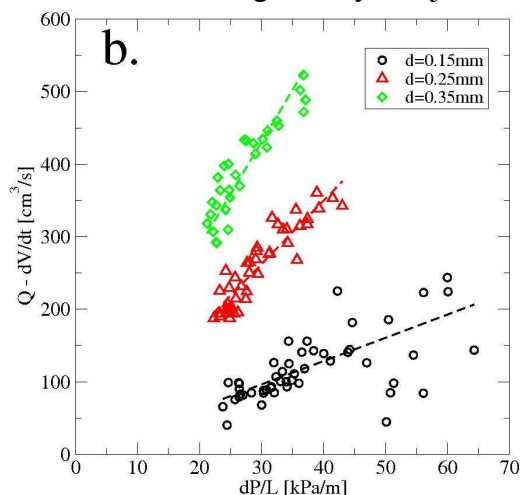
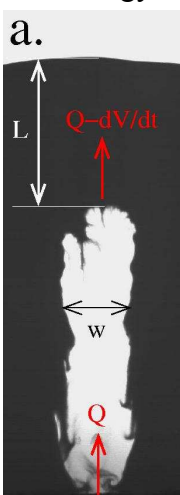


Megmutattuk, hogy az érdes felületű lejtőn megfigyelhető lavinák több lényeges tulajdonsága (lavinamagasság, lavinasebesség növekedési üteme a lavinaméret növelésével, és a részecskesebesség-frontsebesség hányadosa) szisztematikusan növekszik az egyik fontos anyagi paraméter – a rézsűszög – növelésével [Phys. Rev. E. **78**, 011306 (2008)]. Példaként, az ábrán a részecskesebesség-frontsebesség hányadost láthatjuk a rézsűszög függvényében. Így megjósolhatóvá vált, hogy a különféle alakú szemcsékből álló (azaz különböző rézsűszögű) anyagokban milyen lesz a lavinák viselkedése. Ezt az eredményt az előző bekezdésben tárgyalthoz hasonlóan azért tartjuk különösen értékesnek, mert a szemcsés anyagok dinamikájának bonyolultsága miatt ritkán adódik mód kvantitatív előrejelzésre [Phys. Rev. E. **78**, 011306 (2008)].

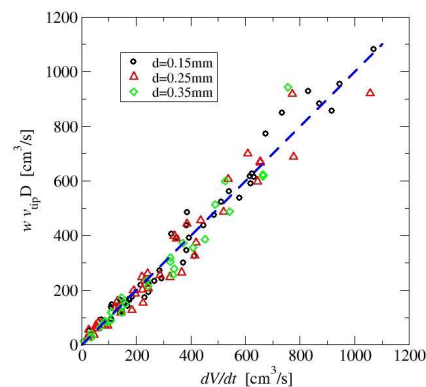


A második témakör keretében két függőleges üveglap között elhelyezkedő szemcsés rétegbe (kvázi 2-dimenziós elrendezés) bepréslt levegő által kialakított struktúrákat tanulmányoztuk. Egy tipikus mérés úgy zajlott, hogy a levegőt állandó tömegárammal engedték a cellába alulról, és átmenő fényben rögzítettük az így kialakult és növekvő légzárvány alakját. Az

(a) képen a 80 x 60 cm-es cellának csak egy 16 x 45 cm-es részlete látszik. A szemcsés anyag magassága 40 cm. Mérjük továbbá az időegység alatt bepréslt levegő-mennyiséget ( $Q$ ) és a nyomást ( $P$ ) a zárványon belül. Az időegység alatt bepréslt levegő ( $Q$ ) egy része a zárvány térfogatát növeli ( $dV/dt$ ), másik része pedig átszökik a fölötte lévő szemcsés anyagon ( $Q - dV/dt$ ). Elsőként azt teszteltük, hogy az átszökő anyagmennyiségre igaz-e a porózus anyagokra vonatkozó Darcy-törvény, mely a (b) panelen lineárisan növekvő összefüggésnek felel meg. Mint látjuk sok különböző  $Q$  értékkel elvégzett kísérlet adatai a várt lineáris összefüggést adják, sőt, a görbék meredeksége – ami a szemcsés anyag permeabilitásával arányos – szintén a várt módon növekszik a  $d$  szemcsemérettel (vagyis a tipikus pórusmérettel).

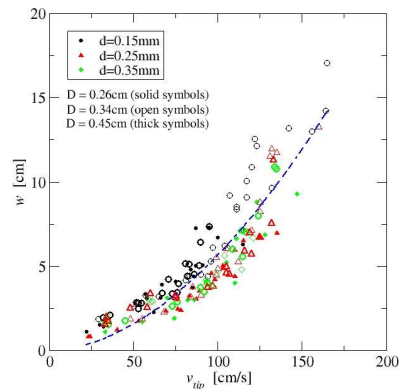


A következőkben azt mutatjuk meg, hogy a szemcsés anyagba bepréslt levegő (bizonyos határok között) egy jól definiált ( $w$ ) szélességű csatornát képez – amire példa a fenti kép is. Ezt a legkönnyebben úgy demonstrálhatjuk (lásd az ábrát jobbra), hogy a zárvány csúcsának sebességének ( $v_{tip}$ ) és a mögötte (bizonyos távolságra) mért csatornaszélességnek ( $w$ ) és a cellavastagságnak ( $D$ ) a szorzatát ábrázoljuk  $dV/dt$  függvényében. Ha a csatorna tényleg állandó vastagságú, akkor a két mennyiségnek meg kell egyeznie egymással (szagatott kék vonal), ami a gyakorlatban meg is valósul.





A legérdekesebb kérdés ezek után az, hogy mitől függ  $v_{tip}$  és  $w$  értéke, és ezek milyen viszonyban vannak egymással. Megmutattuk, hogy  $w$  nem függ a részecskemérettől és  $v_{tip}$  függvényében hatványszerű viselkedést mutat, ahol az exponens kb.  $3/2$ -nek felel meg. Mint az ábrán látható, az adatok nemcsak a különböző szemcseméretű anyagokra esnek egybe, hanem a méréseket különböző ( $D$ ) vastagságú cellákon elvégezve is. Ezt egy nagyon fontos és érdekes eredménynek tartjuk, mivel nem következik a rendszer alaptulajdonságaiból, így további vizsgálatokra (elméleti magyarázat keresésére) ad módot. Ezekről az eredményekről egy publikáció előkészületben van.



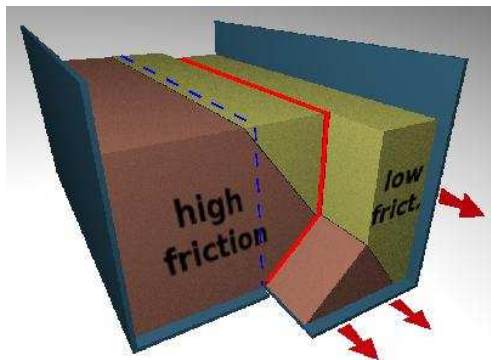
A mérésekkel kapcsolatban meg kell említeni, hogy nagyon fontos a reprodukálható kezdeti feltétel biztosítása. A szemcsés anyagban ugyanis a kísérletek végzése alatt sűrűség-inhomogenitások ill. mechanikai feszültségek alakulhatnak ki. Ezt a hatást elkerülendő a cellát minden egyes kísérlet előtt többször a feje tetejére állítva, majd visszafordítva az inhomogenitásokat megszüntettük. Így minden mérés nagyjából homogén sűrűségű, reprodukálható kezdeti állapotból indult.

A harmadik témakör a nyírási lokalizáció kialakulása lassan folyó szemcsés anyagokban. Az alábbiakban bemutatásra kerülő vizsgálatok nem voltak konkrétan tervbe véve az eredeti pályázatban, viszont annak témájába tökéletesen beleillenek. Egy nagyon friss [3] elméleti jóslat lehetséges igazolása reményében fogtunk ebbe a munkába, aminek további nagy előnye, hogy ebben a témában élő munkakapcsolat alakult ki a BME Fizikai Intézetének szemcsés anyagokkal foglalkozó (elméleti) csoportjával.

Szemcsés anyagokban a lassú nyírás hatására kialakuló deformáció keskeny tartományokba koncentrálódik, amiket nyírási zónáknak neveznek. Ezek a zónák belső csúszósíkokként viselkednek az anyag szilárdszerű (deformálatlan) tartományai között. A nyírási zónák kialakulása fontos deformációs mechanizmus porokban, homokban és a földben (földcsuszamlások). A geológiai törésvonalak a nyírási zónák nagy skálán megfigyelhető mintapéldái.

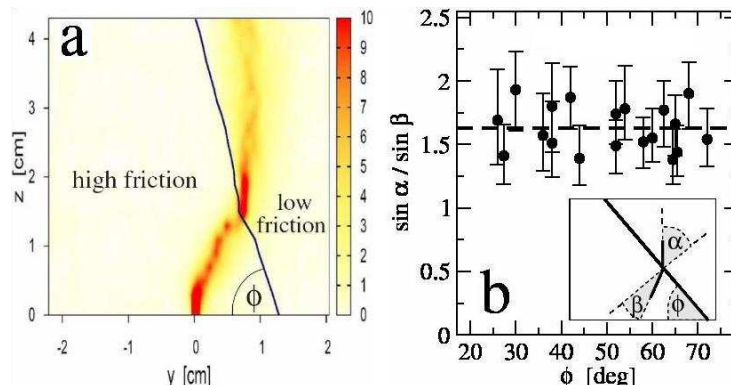
Inhomogén anyagban a zónák igyekeznek elkerülni (vagy gyorsan elhagyni) a nagyobb belső súrlódással jellemezhető "keményebb" tartományokat. Más szóval, az anyag a "leggyengébb láncszem szakad el" elv alapján deformálódik. A célunk annak az elméleti jóslatnak [3,4] a kísérleti igazolása, ill. tanulmányozása volt, hogy a nyírási zónák viselkedése nagy hasonlóságot kell mutasson a geometriai optikával. Réteges szemcsés anyagokban ugyanis a zónáknak a fénytöréshez hasonlóan kellene irányt változtatniuk a réteghatárokon való áthaladáskor, de ebben az esetben az anyag belső súrlódási tulajdonságai töltik be az optikai törésmutató szerepét.

Az ábrán látható egyszerű geometriában a nyírást a kísérleti cella egyik ( $L$  keresztmetszetű) falának az elcsúsztatásával hoztuk létre, és a nyírási zóna homogén anyag esetében a zóna közepén áthaladó függőleges sík mentén lenne, ahogy azt a szaggatott kék vonal jelzi. Ezzel szemben egy réteges anyagban, ahol az egyik rétegben nagyobb a súrlódás mint a másikban (lásd az ábrát), a zóna egy rövidebb úton elhagyja a nagyobb súrlódási együtthatójú réteget



és irányt változtat a réteghatáron, ahogy azt a piros vonal jelzi. Ez az optimális útvonal a minimális disszipáció koncepciójából következik [4].

A kísérletet színezett anyagokkal elvégezve, majd az anyagot fölülől rétegenként eltávolítva rekonstruáltuk a zóna térbeli elhelyezkedését az anyagon belül. Egy ilyen mérésből kapott deformációs teret láthatunk az (a) panelen. A határfelület  $\phi$  szögét változtatva sok ilyen mérést végeztünk el, és ellenőriztük, hogy a  $\sin\alpha/\sin\beta$  értéke visszaadja-e a két anyag effektív súrlódási együtthatóinak hányadosát, amit más módszerrel megmérve 1.63-nak találtunk. Mint a (b) panelen látható adatok mutatják, az egyezés hibahatáron belül jó, tehát a Snellius-Descartes törvény a várt módon írja le a zónatörés jelenségét [Phys. Rev. E **80**, 060302(R) (2009)].



#### Az eredményekből eddig az alábbi publikációk születtek:

- T. Börzsönyi and R.E. Ecke: *Rapid granular flows on a rough incline: phase diagram, gas transition, and effects of air drag*, [Phys. Rev. E \*\*74\*\*, 061301 \(2006\)](#).
- T. Börzsönyi and R.E. Ecke: *Flow rule of dense granular flows down a rough incline*, [Phys. Rev. E \*\*76\*\*, 031301 \(2007\)](#).
- Börzsönyi T.: *Lejtőn lefolyó szemcsés anyag dinamikája: instabilitások, lavinák*, [Fizikai Szemle \*\*LVII\*\* \(7\), 217 \(2007\)](#).
- T. Börzsönyi, T.C. Halsey and R.E. Ecke: *Avalanche dynamics on a rough inclined plane*, [Phys. Rev. E \*\*78\*\*, 011306 \(2008\)](#).
- T. Börzsönyi, J.N. McElwaine and R.E. Ecke: *Patterns in flowing sand: Understanding the physics of granular flow*, [Phys. Rev. Lett. \*\*103\*\*, 178302 \(2009\)](#).
- T. Börzsönyi, B. Szabó and T. Unger: *Shear zone refraction and deflection in layered granular materials*, [Phys. Rev. E \*\*80\*\*, 060302\(R\) \(2009\)](#).

#### További hivatkozások

- [1] O. Pouliquen: *Scaling laws in granular flows down rough inclined planes*, *Physics of Fluids* **11**, 542 (1999).
- [2] L.E. Silbert, D. Ertas, G.S. Grest, T.C. Halsey, D. Levine and S.J. Plimpton: *Granular flow down an inclined plane: Bagnold scaling and rheology*, *Phys. Rev. E* **64**, 051302 (2001).
- [3] T. Unger: *Refraction of Shear Zones in Granular Materials*, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 018301 (2007).
- [4] T. Unger, J. Török, J. Kertész and D.E. Wolf: *Shear Band Formation in Granular Media as a Variational Problem*, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 214301 (2004).