

Szemcsés anyagok folyási jelenségei

MTA doktori értekezés tézisei

Börzsönyi Tamás



Magyar Tudományos Akadémia
Wigner Fizikai Kutatóközpont
Szilárdtest-fizikai és Optikai Intézet

Budapest, 2019.

A kutatás előzményei

A szemcsés anyagok folyása vagy deformálhatósága fontos tényező számos ipari folyamatban és természeti jelenségben [Duran 1997, Nedderman 1992]. Gondolhatunk a különböző módon (silókban, tartályokban) tárolt vagy mozgatott granulátumokra, mezőgazdasági terményekre, vagy a hegyoldalakon kialakuló kőlavínákra, földcsuszamlásokra, ill. a gátak stabilitására is. Ezért a szemcsés anyagoknak a tulajdonságai mind a mérnöki, mind pedig az alapkutatások szempontjából intenzíven vizsgált területek. Az alapkutatási laboratóriumi kísérleteknek abban van fontos szerepük, hogy megfelelően egyszerű rendszerekben kvantitatív információt adnak, ami közvetlenül összehasonlítható elméleti vagy numerikus számolásokkal [Andreotti 2013, GDR MiDi 2004]. Egyrészt így válik eldönthetővé, hogy a modellek felállításánál mely feltételezések bizonyulnak helyesek, és melyek nem. Másrészt pedig az ennek segítségével fejlesztett és tesztelt numerikus kódok ezután alkalmasak lesznek összetettebb, nagyobb skálájú rendszerek viselkedésének modellezésére, amivel a mérnöki munka jóval hatékonyabbá válik, és sok anyagi és emberi erőforrás megspórolható.

A szemcsés rendszereket vizsgáló felfedező kutatások egy jelentős része – akár numerikusan, akár kísérletileg – a legegyszerűbb, gömbszerű részecskékből álló rendszereket vizsgálta [GDR MiDi 2004]. Ezek a munkák sok alapvető összefüggésre rávilágítottak, de más vizsgálatokból kiderült, hogy a nem gömbszerű (szabálytalan alakú) részecskékből álló anyagok bizonyos folyási jelenségei gyökeresen eltérhetnek a gömbszerű részecskékből álló rendszerektől [Forterre 2003].

A szemcsés folyás jellemzésénél a disszipációt a nyírófeszültség és a nyomás hányadosaként adódó ún. effektív súrlódási együttható segítségével írhatjuk le. Fontos kérdés, hogy ez az effektív súrlódási együttható hogyan függ a nyírás rátától. Az egyik fontos geometriai elrendezés a lejtőn megfigyelhető folyás esete, melyet a legegyszerűbb módon a folyási sebesség és a rétegvastagság közötti összefüggéssel – az ún. folyási törvénnyel – írták le [Pouliquen 1999], de ebben az elrendezésben in-

formációt lehetett kapni az effektív súrlódás nyírási rátától való függésére is [GDR MiDi 2004]. A leírást azonban nehezíti, hogy a homogén áramlás többféle módon is instabillá válhat. Bizonyos esetekben a folyás felszakadozik, és az anyag a lejtőn nem folyamatosan, hanem egymást követő nagyobb csomagokban (lavinákban) halad lefelé [Forterre 2003, Daerr 1999]. Más esetekben (tipikusan nagyobb sebességű áramlásnál) az áramlási térben a részecskék közötti intenzív ütközések hatására az anyagban (térben és időben is) nagy sűrűség-ingadozások (gázszerű fázis megjelenése) jelenhetnek meg [Forterre 2001].

A nyugalomban lévő, terhelésnek kitett szemcsés rendszer egy bizonyos nyíróerő fölött megcsúszik. Az ilyenkor meginduló deformáció általában a rendszer egy szűkebb tartományára (a nyírási zónára) korlátozódik [Losert 2000, Fenistein 2004]. Fontos kérdés, hogy ez a tartomány mennyire kiterjedt, és hogy hol helyezkedik el a rendszerben [Unger 2004, Török 2007]. A mintát egy rendezetlen kezdőállapotból indítva, a nyírás hatására a kontakterők hálózata átrendeződik [Utter 2008] és az anyag kicsit ki is tágul [Reynolds 1885]. Ezalatt a folyamat alatt a nyírási zóna szélessége változik, mígnem eléri a stacionárius nyírásnak megfelelő állapotot [Ries 2007]. A nyírási zóna elhelyezkedése különösen érdekes egy inhomogén anyag esetében, ahol várható, hogy a zóna a könnyebben deformálható (kisebb effektív súrlódású) tartományokba húzódik [Unger 2007]. Elméleti és numerikus számolások megmutatták, hogy a zóna helye (mint optimális útvonal) matematikailag az inhomogén törésmutatójú anyagon áthaladó fény sugar útvonalaéhoz hasonló módon számolandó, ahol az optikai törésmutató helyét a szemcsés anyag effektív súrlódási együtthatója veszi át [Unger 2007].

Az elnyújtott alakú alkotóelemeket tartalmazó anyagok folyási jelenségeire nagyon széles méretskálán találhatunk példákat: a makroszkopikus szemcsés anyagokon (pl. búza, rizs) túl, a mikrométer nagyságú baktériumok vagy a nanorészecskés rendszerek, ill. atomi skálán a hosszúságú molekulák alkotta folyadékok (pl. a nematikus folyadékkristályok). Fontos kérdés, hogy a folyás hatására hogyan rendeződnek az elnyújtott alakú alkotóelemek, és hogy ez miként hat vissza az anyag folyási

tulajdonságaira (viszkozitására vagy effektív súrlódására). A felsorolt rendszerek nagyon különbözőek a részecskék kölcsönhatása szempontjából és az esetleges rendeződés ellen ható termikus zaj mértékét illetően is. Mégis, a folyás hatására bekövetkező rendeződésnek vannak nagyon hasonló elemei, de érdekes módon az ezirányú információk a makroszkopikus szemcsékből álló rendszerekről voltak a leghiányosabbak. A többi rendszert tekintve: a korábbi vizsgálatok szerint mind a nematikus fázisban [De Gennes 1993], mind a hosszúkás molekulákból álló anyag izotróp fázisában [Yuan 1997], mind pedig egy egymással nem kölcsönható elnyújtott részecskét tartalmazó (híg) szuszpenzióban [Dhont 2004] megfigyelhető, hogy nyírás hatására a részecskék irány szerint rendeződnek, és az átlagos irányuk nem a folyás irányába mutat. Ennek az ún. nyírási orientációnak a folyás irányával bezárt szöge a rendezettség (S) növekedésével csökken, függetlenül attól, hogy S értékét függetlenül tudjuk szabályozni (nematikus fázis), vagy pedig azt is a nyírás határozza meg (izotróp fázis, híg szuszpenzió). Egy lejtőn folyó szemcsés anyaggal (rizszel) végzett kísérletben viszonylag gyenge statisztikával kimutatták a részecskék rendeződését [Ehrentraut 2001]. Kis elnyújtottságú ($L/d < 2$) részecskékkel végzett numerikus szimulációkban szintén látható volt, hogy a részecskék átlagos iránya nem a folyás irányába mutat [Anki Reddy 2009, Campbell 2011].

A tartályba (silóba) helyezett szemcsés rendszer viselkedésének pontos leírása szintén kiemelkedően fontos jelentőségű. Itt is nagy a különbség egy hagyományos folyadékhoz viszonyítva, mivel a részecskék közötti erőláncok, boltívek kialakulása következtében a silókban nem hidrosztatikai, hanem attól jóval komplexebb nyomásviszonyok alakulnak ki [Janssen 1895, Sperl 2006]. Ezek olykor nagyon nagy mechanikai feszültségek megjelenéséhez és a siló falának megroppanásához is vezethetnek. A folyás során a silóban kialakuló áramlási tér ismerete is fontos, mivel általában ez igencsak inhomogén, és a falak mellett előfordulhat benne nagyon lassan folyó vagy stagnáló tartomány [Nedderman 1992]. Ez nem kívánatos sem a mezőgazdasági termények, sem pedig más, hosszútávon összetapadásra, nedvesedésre hajlamos anyagok esetében sem. A

kifolyó nyílás méretét csökkentve a relatív sebességfluktuációk mértéke megnő, és ezzel együtt annak a valószínűsége is, hogy egy spontán boltotatképződés következtében torlódás (bedugulás) lép fel [Zuriguel 2005]. Fémből készült silókban folyás közben nagy hanggal járó rezonanciajelenségek fordulhatnak elő, melyek akár a siló szerkezetének meggyengülését is okozhatják. Erre a jelenségre a korábbi munkák két különböző magyarázattal álltak elő. Az egyik a boltívképződéssel kapcsolatos időbeli nyomásingadozásokra [Wilde 2010, Niedostatkiwicz 2009], a másik pedig a fal mentén ereszkedő részecskék megtapad-megcsúszik ("stick-slip") jellegű mozgására [Muite 2004, Buick 2005] vezette vissza a jelenség okát.

Célkitűzések, megvalósítás

Több különböző mérési elrendezést állítottam össze, melyekben a szemcsés anyagok lejtőn megfigyelhető folyási jelenségeit, a nyírásnak kitett anyag viselkedését, valamint egy tartályban (silóban) ereszkedő szemcsés rendszer tulajdonságait elemeztem. Kísérleteimben többféle technikával gyűjtöttem adatokat: optikai digitális képfelvételek (leggyakrabban gyors kamerával a néhány 100 - néhány 1000 fps tartományban), röntgentomográf (CT), mágneses rezonancia képalkotás (MRI), valamint a folyás során kialakuló rezgések vizsgálatára mikrofonos és piezoelektromos rezgésdetektoros mérések segítségével. Munkámban különös hangsúlyt helyeztem annak a kérdésnek a vizsgálatára, hogy a nem-gömbszerű (elnyújtott vagy szabálytalan alakú) részecskékből álló rendszerek tulajdonságai miben térnek el a gömbszerű részecskékből álló rendszerekétől.

A lejtőn megfigyelhető homogén áramlásokat vizsgáló méréseim egyik célja az volt, hogy feltérképezsem, hogy több különböző anyag esetében minek adódik a felületi sebesség és rétegvastagság közötti lineáris összefüggés (folyási törvény) meredeksége, és hogy ez összefüggésbe hozható-e az anyag más jellemzőivel (pl. az effektív sűrűdást jellemző rézsűszöggel). A másik cél, hogy a nagyobb folyási sebességeknél megfigyelhető instabilitások következtében kialakult mintázatok részletes vizsgálatával

a korábbiaknál jobb betekintést nyerjek, hogy az effektív súrlódás hogyan függ a részecskék közötti ütközések intenzitását jellemző inerciális számtól.

A lejtőn megfigyelhető részecskecsomagok vizsgálatánál azt tűztem ki célul, hogy számszerűsítsem, hogy az érdes felületű lejtőn a folyás után ottmaradó stabil rétegen elengedett részecskecsomag (lavina) különböző anyagok esetében hogyan viselkedik, és tulajdonságai összefüggésbe hozhatók-e az anyag más jellemzőivel, pl. a rézsűszöggel vagy a homogén áramlások esetén mért felületi sebesség és rétegvastagság közötti lineáris összefüggés (folyási törvény) meredekségével.

Az osztott aljú nyíró cellában homogén szemcsés rendszerekkel végzett méréseimben azt tűztem ki célul, hogy számszerűsítsem, hogy egy rendezetlen kezdőállapotú rendszert nyírásnak kitéve, hogyan alakul ki a nyírási zóna. A kísérleteket gömbszerű, elnyújtott és szabálytalan alakú (homok) részecskékből álló mintákkal is elvégezve arra kerestem a választ, hogy a részecskék alakjának változtatása milyen hatással van a random rendszer deformációjakor megfigyelhető nyírási zóna kialakulására, ill. a Reynolds-tágulás mértékére.

A különböző súrlódási együtthatójú rétegeből álló szemcsés anyag deformációját vizsgáló méréseim célja egyrészt az Unger Tamás numerikus szimulációi által megjósolt zónatörési jelenségnek a kísérleti kimutatása, másrészt pedig a jelenségkör általánosabb vizsgálata volt.

Az elnyújtott alakú részecskékből álló szemcsés anyag folyását vizsgáló méréseimben azt tűztem ki célul, hogy a fenti kísérleti előzményeknél sokkal jobb statisztikával határozzam meg a nyírásnak kitétt anyagban megfigyelhető orientációs rendeződést, és megvizsgáljam, hogy ez egy széles ($1 < L/d < 5$) tartományban hogyan függ a részecskék elnyújtottságától, ill. a nyírási rátától. Céлом volt annak a számszerűsítése is, hogy az orientációs rendeződés hogyan befolyásolja az anyag effektív súrlódását. Mivel a részecskék egyenként követhetők, céлом volt a forgásuk nyomkövetése, és a viselkedésük összevetése a nyírásnak kitétt folyadékba helyezett kemény ellipszoid forgására vonatkozó Jeffery-féle eredményekkel [Jeffery 1922].

A tartályban folyó szemcsés rendszeren végzett méréseim egyik célja az volt, hogy szisztematikusan megvizsgáljam, hogy a kvázi-kétdimenziós elrendezésben a folyási tér alakja és időbeli fluktuációi hogyan függenek a részecskék alakjától gömb és elnyújtott alakú részecskék esetén, és számszerűsítsem a folyási tér Gauss-függvénytől való esetleges eltéréseit. A másik cél egy háromdimenziós silóban ereszkedő, elnyújtott részecskékből álló szemcsés rendszerben kialakuló részecskeorientációk meghatározása volt tomográfias (CT) mérések segítségével.

A szemcsés anyag tartályban folyásakor megfigyelhető rezonanciajelenségek (siló zene) vizsgálatára irányuló kísérleti vizsgálataimban azt tűztem ki célul, hogy a mások által használt mérési technikákat (mikrofonos felvételek, piezoelektromos rezgésmérés) gyors kamerás mérésekkel kiegészítve, komplex módon vizsgáljam meg ezt a jelenséget, és a különböző módszerek eredményeit összevetve próbáljak minél teljesebb képet alkotni róla.

A kutatások első részét posztdoktorként a Los Alamos-i (USA) kutatóintézetben végeztem (ennek az eredményeit az 1.a,b tézispontok foglalják össze), majd az MTA Szilárdtest-fizikai és Optikai Kutatóintézetébe hazatérve felépítettem egy labort, mivel az ilyen jellegű vizsgálatok itt egy új témát jelentettek. Erre két általam elnyert OTKA projekt (F-060157, 2006-2009 és NN-107737, 2013-2017) nyújtott anyagi segítséget. Az itt készült vizsgálatok eredményeit a 2-4 tézispontok foglalják össze.

Új tudományos eredmények (Tézisek)

1.a) Szemcsés anyag lejtőn, folyási törvény, instabilitások, effektív súrlódás [1, 2, 3]

Az érdes felületű lejtőn folyó szemcsés anyag viselkedését gyors kamerás mérések segítségével tanulmányoztam, és több különböző anyagra meghatároztam a felületi sebesség és rétegvastagság közötti összefüggést (folyási törvény) [1,2]. Megállapítottam, hogy ennek meredeksége tendenciózan növekszik az anyagot jellemző rézsűszög tangensével, mely az anyag belső súrlódását jellemzi [2]. Meghatároztam a nagyobb sebességű áramlásoknál fellépő instabilitás következtében kialakuló áramlási struktúra tulajdonságait [3]. Az eredményeket numerikus számolásokkal összevetve, információt kaptam az anyag effektív súrlódásának az inerciális számtól való függésére. Ez nem monoton függést mutatott, mely magyarázhatja magának az instabilitásnak a létrejöttét is [3].

1.b) Részecskecsomagok (lavinák) lejtőn [4,5]

Meghatároztam az érdes felületű lejtőn lévő stabil szemcsés rétegen haladó részecskecsomagok (lavinák) tulajdonságait. Megmutattam, hogy a lavinákat jellemző három mennyiség (i) a lavinák sebességének növekedési üteme a lavinaméret növekedésével, (ii) a lavinák dimenziótlanított magassága, és (iii) a részecske sebesség/frontsebesség hányados szisztematikusan növekszik a szemcsés anyag belső súrlódását jellemző rézsűszög tangensének növekedésével [4,5]. Érdes, szabálytalan alakú részecskekék esetén (pl. homok) a lavina magasabb, a frontjánál van egy dinamikus magja, melyben a részecskekék gyorsabban mozognak, mint maga a front. A simább felületű golyók (üveggolyók) esetében laposabb, kevésbé dinamikus lavinák figyelhetők meg, melyben a részecskekék lassabban mozognak, mint maga a lavina. A két markánsan eltérő viselkedés számos aspektusa leírható egy egyszerű mélységátlagolt (Saint-Venant féle) megközelítéssel [4,5].

2.a) Nyírási zónák kialakulása, Reynolds-tágulás [6, 7]

Egy terhelésnek kitett homogén szemcsés anyagban kialakuló deformációs tartomány (nyírási zóna) kialakulását tanulmányoztam az ún. hengeres, osztott aljú nyíró cellában felszíni és tomográfias méréseim segítségével, és számszerűsítettem, hogy a zóna mérete, ill. az anyag térkitöltése hogyan változik a folyamat során különböző alakú részecskék esetén [6,7]. Megmértem a rendezetlen kezdeti állapotú mintákban viszonylag gyorsan kialakuló Reynolds-tágulást, és megmutattam, hogy ezt elnyújtott alakú részecskékből álló minta esetében egy lassabb orientációs rendeződés követi, amely csak részben kompenzálja a kezdeti térfogatnövekedést [7]. A táguláshoz és az átlagos orientációs szög beálltához szükséges karakterisztikus deformáció a vizsgált L/d tartományban nem függött a részecske elnyújtottságának mértékétől, a nyírási zóna szélességének és a rendezettség mértékének stacionáriussá válásához szükséges karakterisztikus deformáció viszont szisztematikusan növekedett L/d növelésével [6]. A szabályos gömbökből álló mintában hatszöges struktúra alakult ki, melyben a golyók folyásirányú láncokba rendeződtek, aminek következtében a minta térkitöltése megnőtt [7].

2.b) Nyírási zónák törése, elhajlása [8, 9]

Kísérletileg igazoltam egy korábbi numerikus és elméleti számolás eredményeit, melyek szerint egy különböző belső súrlódású tartományokból álló szemcsés anyagot deformálva, a nyírási zóna olyan trajektória mentén szeli át a rendszert, amelyben a kontaktusokhoz tartozó súrlódási erők összege minimális – összhangban a „leggyengébb láncszem szakad el” elvvel [8,9]. Ennek egyik következménye, hogy megfelelő konfiguráció esetén a zóna irányt változtat a különböző súrlódású rétegek határán, amely hasonlóan írható le a geometriai optikából ismert fénytörés jelenségéhez [8]. Megmutattam azt is, hogy más esetben a zóna áthúzódhat a nem túl távol lévő (szomszédos) kisebb súrlódású tartományba, ill. el is hajolhat, hogy elkerüljön egy nagyobb súrlódású tartományt [9]. A kísérleti eredményeim jó számszerű egyezést mutatnak a numerikus modellel [8,9].

3.a) Nyírási orientáció [10, 11, 12, 13]

A nyírás hatására kialakuló orientációs rendeződést vizsgáltam elnyújtott alakú részecskékből álló szemcsés anyagban felszíni (optikai) és térfogati (tomográfiás) mérések segítségével [10, 11, 12, 13]. Számszerűsítettem, hogy a rendezettség mértéke hogyan nő a részecskék elnyújtottságának (L/d) növelésével. A részecskék irány szerinti eloszlása az L/d növelésével egyre keskenyebbnek adódott, hasonlóan a nyírásnak kitett folyadékba helyezett, egymással nem kölcsönható ellipszoidokéhoz. Számszerűsítettem, hogy az átlagos orientációnak a folyás irányától való eltérése – ami viszont már a részecskék kölcsönhatásának következménye – hogyan csökken L/d növelésével [10, 11, 12, 13]. Az átlagos szög a rendezettség függvényében a nematikus folyadékkristályokban megfigyelhető hasonló csökkenő tendenciát mutat. Megmutattam, hogy a vizsgált tartományban sem a rendezettség mértéke, sem az átlagos szög nem függ, vagy csak kis mértékben függ a nyírási rátától [10, 11]. Rendezetlen kezdőállapotból indulva megmértem, hogy hogyan (milyen gyorsan és mennyivel) csökken a minta nyírással szembeni ellenállása (effektív súrlódása) a rendeződés következtében [10, 11].

3.b) Másodlagos konvekció [14, 15]

Röntgen CT mérésekkel igazoltam, hogy az elnyújtott részecskékből álló szemcsés rendszert az osztott aljú hengeres elrendezésben nyírva, a mintában bizonyos töltési magasságnál az eredeti nyíró áramlásra mérőleges másodlagos konvekció alakul ki [14, 15]. Komputertomográfiás méréseim segítségével számszerűsítettem az áramlási teret és a hozzá tartozó orientációs eloszlást [14]. Megmutattam, hogy a másodlagos konvekció nem csak egy tranziens jelenség, hanem folyamatosan jelen van, viszont iránya időlegesen megfordul, ha a nyírás irányát megfordítjuk [14, 15]. Kimutattam, hogy a másodlagos konvekció a nyírási orientáció következtében kialakult szimmetriatöréssel szoros kapcsolatban van [14].

4.a) Szemcsés anyag tartályban [16, 17]

A silóban ereszkedő szemcsés anyag áramlási terét kísérletileg vizsgálva megmutattam, hogy míg gömbszerű részecskék esetén a sebességprofil a korábbi modelleknek megfelelően Gauss-függvénnyel illeszthető, egyre elnyújtottabb alakú részecskék esetén ettől eltérő alakot vesz fel [16]. Az L/d elnyújtottság növelésével a folyási tartomány egyre inkább a siló közepére koncentrálódik, a sebességprofil pedig egy egyre markánsabb plató jellemzi, melyet két (egyre keskenyebb) nyírási zóna fog közre [16]. Kimutattam, hogy az L/d növelésével a folyási sebesség időben egyre jobban ingadozik, és számszerűsítettem a sebességfluktuációk növekedésének mértékét [16]. Komputertomográfias vizsgálataim segítségével megmutattam, hogy egy 3 dimenziós siló belsejében a nyírásnak kitett tartományokban az elnyújtott alakú részecskék irány szerinti rendezettsége az ereszkedés során egyre nő, és meghatároztam az egyes tartományokat jellemző orientációs eloszlásokat [17].

4.b) Siló zene [18]

A silóban kialakuló rezonancia során akusztikai és rezgésdetektorokkal vizsgáltam a jelenség időfejlődését, és gyors kamerás felvételek segítségével elemeztem a részecskék oszcilláló sebességű mozgását. Kimutattam, hogy a rendszerben sűrűség hullámok haladnak függőleges irányban [18]. Ezeknek a felfelé haladó hullámoknak a sebességét meghatározva azt találtam, hogy a cső alján kimutathatóan nagyobb a hullámsebesség, mint a cső felső felében [18]. Ez alátámasztja azt az érvelést, miszerint a rezonancia a cső alsó feléből ered, ahol a föntről párhuzamosan futó áramvonalak konvergálnak az alsó nyílás irányába, és ahol a legerősebb nyomásoszcillációkat mérték. Megmutattam, hogy a részecskék sebességoszcillációja növekszik a magassággal, és a cső felső felében már a megtapad-megcsúszik ("stick-slip") mozgás is megfigyelhető [18]. Ez alátámasztja azt az érvelést, miszerint a falakkal való megfelelő mértékű súrlódás fontos eleme a felfelé haladó sűrűség hullámok felerősödésének, és döntő szerepe van az erős rezonancia kialakulásában.

A dolgozat alapjául szolgáló saját publikációk

- [1] **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)
- [2] **T. Börzsönyi** and R.E. Ecke: *Flow rule of dense granular flows down a rough incline*, Phys. Rev. E **76**, 031301 (2007)
- [3] **T. Börzsönyi**, R.E. Ecke, and J.N. McElwaine: *Patterns in flowing sand: understanding the physics of granular flow*, Phys. Rev. Lett. **103**, 178302 (2009)
- [4] **T. Börzsönyi**, T.C. Halsey, and R.E. Ecke: *Two scenarios for avalanche dynamics in inclined granular layers*, Phys. Rev. Lett. **94**, 208001 (2005)
- [5] **T. Börzsönyi**, T.C. Halsey, and R.E. Ecke: *Avalanche dynamics on a rough inclined plane*, Phys. Rev. E **78**, 011306 (2008)
- [6] B. Szabó, J. Török, E. Somfai, S. Wegner, R. Stannarius, A. Böse, G. Rose, F. Angenstein, and **T. Börzsönyi**: *Evolution of shear zones in granular materials*, Phys. Rev. E **90**, 032205 (2014)
- [7] S. Wegner, R. Stannarius, A. Böse, G. Rose, B. Szabó, E. Somfai, and **T. Börzsönyi**: *Effects of grain shape on packing and dilatancy of sheared granular materials*, Soft Matter **10**, 5157 (2014)
- [8] **T. Börzsönyi**, T. Unger, and B. Szabó: *Shear zone refraction and deflection in layered granular materials*, Phys. Rev. E **80**, 060302(R) (2009)
- [9] **T. Börzsönyi**, T. Unger, B. Szabó, S. Wegner, F. Angenstein, and R. Stannarius: *Reflection and exclusion of shear zones in inhomogeneous granular materials*, Soft Matter **7**, 8330 (2011)

- [10] **T. Börzsönyi**, B. Szabó, G. Törös, S. Wegner, J. Török, E. Somfai, T. Bien, and R. Stannarius: *Orientational order and alignment of elongated particles induced by shear*, Phys. Rev. Lett. **108**, 228302 (2012)
- [11] **T. Börzsönyi**, B. Szabó, S. Wegner, K. Harth, J. Török, E. Somfai, T. Bien, and R. Stannarius: *Shear induced alignment and dynamics of elongated granular particles*, Phys. Rev. E **86**, 051304 (2012)
- [12] **T. Börzsönyi** and R. Stannarius: *Granular materials composed of shape-anisotropic grains*, (Review article) Soft Matter **9**, 7401 (2013)
- [13] S. Wegner, **T. Börzsönyi**, T. Bien, G. Rose and R. Stannarius: *Alignment and dynamics of elongated cylinders under shear*, Soft Matter **8**, 10950 (2012)
- [14] G. Wortel, **T. Börzsönyi**, E. Somfai, S. Wegner, B. Szabó, R. Stannarius and M. van Hecke: *Heaping, secondary flows and broken symmetry of elongated granular particles*, Soft Matter **11**, 2570 (2015)
- [15] D. Fischer, **T. Börzsönyi**, S. R. Nasato, T. Pöschel and R. Stannarius: *Heaping and secondary flows in sheared granular materials*, New J. Phys. **18**, 113006 (2016)
- [16] B. Szabó, Zs. Kovács, S. Wegner, A. Ashour, D. Fischer, R. Stannarius **T. Börzsönyi**, *Flow of anisometric particles in a quasi-2D hopper*, Phys. Rev. E **97**, 062904 (2018)
- [17] **T. Börzsönyi**, E. Somfai, B. Szabó, S. Wegner, P. Mier, G. Rose, and R. Stannarius: *Packing, alignment and flow of shape-anisotropic grains in a 3D silo experiment*, New J. Phys. **18**, 093017 (2016)
- [18] **T. Börzsönyi** and Zs. Kovács: *High speed imaging of traveling waves in a granular material during silo discharge*, Phys. Rev. E **83**, 032301 (2011)

A dolgozat témájához kapcsolódó, de a tézispontokban nem szereplő további saját publikációk

- [19] K.A. Gillemot, E. Somfai, and **T. Börzsönyi**, *Shear-Driven Segregation of Dry Granular Materials with Different Friction Coefficients*, *Soft Matter* **13**, 415 (2017)
- [20] T. Finger, F. von Rüling, S. Lévy, B. Szabó, **T. Börzsönyi**, and R. Stannarius, *Segregation of Granular Mixtures in a Spherical Tumbler*, *Phys. Rev. E* **93**, 032903 (2016)
- [21] A. Ashour, S. Wegner, T. Trittel, **T. Börzsönyi**, and R. Stannarius: *Outflow and clogging of shape-anisotropic grains in hoppers with small apertures*, *Soft Matter* **13**, 402 (2017)
- [22] A. Ashour, T. Trittel, **T. Börzsönyi**, and R. Stannarius, *Silo outflow of soft frictionless spheres*, *Phys. Rev. Fluids* **2**, 123302 (2017)
- [23] D.B. Nagy, P. Claudin, **T. Börzsönyi**, and E. Somfai, *Rheology of dense granular flows for elongated particles*, *Phys. Rev. E* **96**, 062903 (2017)
- [24] S. Lévy, D. Fischer, R. Stannarius B. Szabó, **T. Börzsönyi**, and J. Török, *Frustrated packing in a granular system under geometrical confinement*. *Soft Matter* **13**, 396 (2017)
- [25] R.C. Hidalgo B. Szabó, K.A. Gillemot, **T. Börzsönyi**, and T. Weinhart, *Rheological response of non-spherical granular flows down an incline*, *Phys. Rev. Fluids* **3**, 074301 (2018)

Referált konferencia-kiadványban megjelent publikációk

- [26] R. Stannarius, S. Wegner, B. Szabó, **T. Börzsönyi**, *Shear alignment and orientational order of macroscopic rodlike grains*, Powders and Grains 2013, AIP Conf. Proc. 1542, pp. 74-77 (2013)
- [27] **T. Börzsönyi**, E. Somfai, B. Szabó, S. Wegner, A. Ashour and R. Stannarius, *Elongated grains in a hopper*, Powders and Grains 2017, EPJ Web of Conf. **140**, 06017 (2017)
- [28] E. Somfai, D.B. Nagy, P. Claudin, A. Favier, D. Kálmán, and **T. Börzsönyi**, *Effective friction of granular flows made of non-spherical particles*, Powders and Grains 2017, EPJ Web of Conf. **140**, 03062 (2017)
- [29] J. Török, S. Lévy, B. Szabó, E. Somfai, S. Wegner, R. Stannarius, **T. Börzsönyi**, *Arching in three-dimensional clogging*, Powders and Grains 2017, EPJ Web of Conf. **140**, 03076 (2017)
- [30] R. Stannarius, D. Fischer, and **T. Börzsönyi**, *Heaping and secondary flows in sheared granular media*, Powders and Grains 2017, EPJ Web of Conf. **140**, 03025 (2017)

A dolgozat témájához kapcsolódó, magyar nyelvű (ismeretterjesztő) publikációk

- [31] **Börzsönyi T.**, *Lejtőn lefolyó szemcsés anyag dinamikája: instabilitások, lavinák*, Fizikai Szemle LVII, (7) 217 (2007)
- [32] Gillemot K., Somfai E., **Börzsönyi T.**, *Szegregáció nyírt, szemcsés keverékekben*, Fizikai Szemle LXVII, (11) 376-380 (2017)
- [33] **Börzsönyi T.**, Somfai E., Szabó B. és Török J., *Elnyújtott alakú részecskék rendeződése nyíró áramlásban*, Fizikai Szemle LXVIII, (4) 118-123 (2018)

Irodalomjegyzék

- [Andreotti 2013] B. Andreotti, Y. Forterre and O. Pouliquen, *Granular Media: Between Fluid and Solid*, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK, (2013).
- [Anki Reddy 2009] K. Anki Reddy, V. Kumaran and J. Talbot, *Oriental Ordering in Sheared Inelastic Dumbbells*, Phys. Rev. E **80**, 031304 (2009).
- [Buick 2005] J.M. Buick, J. Chavez-Sagarnaga, Z. Zhing, J.Y. Ooi, D.M. Pankaj, D.M. Cambell, C.A. Greated, *Investigation of Silo Honking: Slip-Stick Excitation and Wall Vibration*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE **131**, 299 (2005).
- [Campbell 2011] C.S. Campbell, *Elastic Granular Flows of Ellipsoidal Particles*, Phys. Fluids **23**, 013306 (2011).
- [Dhont 2004] J.K.G. Dhont and W.J. Briels, *Rod-like Brownian Particles in Shear Flow*, in *Soft Matter: Complex Colloidal Suspensions*, (G. Gompper and M. Schick eds.) p. 147-283. Wiley, Berlin (2004).
- [Douady 1999] S. Douady and A. Daerr, *Two Types of Avalanche Behaviour in Granular Media*, Nature, **399**, 241 (1999).
- [Duran 1997] J. Duran, *Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials*, Springer, New York, (1997).
- [Ehrentraut 2001] H. Ehrentraut *Anisotropie Fluids: From Liquid Crystals to Granular Materials* in *Continuum Mechanics and Applications in Geophysics and the Environment*, (B. Straughan, R. Greve,

- H. Ehrentraut and Yongqi Wang eds.) p. 18-43. Springer, Berlin, (2001).
- [Fenistein 2004] D. Fenistein, J.W. van de Meent and M. van Hecke, *Universal and Wide Shear Zones in Granular Bulk Flow*, Phys. Rev. Lett. **92**, 094301 (2004).
- [Forterre 2001] Y. Forterre and O. Pouliquen, *Longitudinal Vortices in Granular Flows*, Phys. Rev. Lett. **86**, 5886 (2001).
- [Forterre 2003] Y. Forterre and O. Pouliquen, *Long-Surface-Wave Instability in Dense Granular Flows*, J. Fluid Mech. **486**, 21 (2003).
- [GDR MiDi 2004] GDR MiDi, *On Dense Granular Flows*, Eur. Phys. J. E **14**, 341 (2004).
- [De Gennes 1993] P. G. de Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, Clarendon Press, Oxford, (1993).
- [Janssen 1895] H. A. Janssen, *Versuche über Getreidedruck in Silozellen*, Zeitschr. d. Vereines Deutscher Ingenieure, **39** 1045-1049 (1895).
- [Jeffery 1922] G. B. Jeffery, *The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid*, Proceedings of the Royal Society Series A, **102**, 161 (1922).
- [Losert 2000] W. Losert, L. Bocquet, T.C. Lubensky, and J.P. Gollub, *Particle Dynamics in Sheared Granular Matter*, Phys. Rev. Lett. **85**, 1428 (2000).
- [Muite 2004] B.K. Muite, F.S. Quinn, S. Sundaresan, K.K. Rao, *Silo Music and Silo Quake: Granular Flow-Induced Vibration*, Powder Technology **145**, 190 (2004).
- [Nedderman 1992] R.M. Nedderman, *Statics and Kinematics of Granular Materials*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, (1992).

- [Niedostatkiewicz 2009] M. Niedostatkiewicz, J. Tejchman, Z. Chaniecki, K. Grudzień, *Determination of Bulk Solid Concentration Changes During Granular Flow in a Model Silo With ECT Sensors*, Chemical Engineering Science **64**, 20 (2009).
- [Pouliquen 1999] O. Pouliquen, *Scaling Laws in Granular Flows Down Rough Inclined Planes*, Phys. of Fluids **11**, 542 (1999).
- [Reynolds 1885] O. Reynolds, *On the Dilatancy of Media Composed of Rigid Particles in Contact*, Phil. Mag., **20**, 469 (1885).
- [Ries 2007] A. Ries, D.E. Wolf, and T. Unger, *Shear Zones in Granular Media: Three-Dimensional Contact Dynamics Simulation*, Phys. Rev. E **76**, 051301 (2007).
- [Sperl 2006] M. Sperl, *Experiments on corn pressure in silo cells – translation and comment of Janssen’s paper from 1895*, Gran. Matt. **8**, 49 (2006).
- [Török 2007] J. Török, T. Unger, J. Kertész, and D.E. Wolf, *Shear Zones in Granular Materials: Optimization in a Self-Organized Random Potential*, Phys. Rev. E. **75**, 011305 (2007).
- [Unger 2004] 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).
- [Unger 2007] T. Unger, *Refraction of Shear Zones in Granular Materials*, Phys. Rev. Lett. **98**, 018301 (2007).
- [Utter 2008] B. Utter and R. P. Behringer, *Transients in sheared granular matter*, Eur. Phys. J. E, **14**, 373 (2004).
- [Yuan 1997] X.-F. Yuan and M.P. Allen, *Non-Linear Responses of the Hard-Spheroid Fluid Under Shear Flow*, Physica A **240**, 145 (1997).

- [Wilde 2010] K. Wilde, J. Tejchman, M. Rucka, M. Niedostatkiewicz, *Experimental and Theoretical Investigations of Silo Music*, Powder Technology **198**, 38 (2010).
- [Zuriguel 2005] I. Zuriguel, A. Garcimartín, D. Maza, L. A. Pugnaloni, and J. M. Pastor, *Jamming During the Discharge of Granular Matter from a Silo*, Phys. Rev. E **71**, 051303 (2005).