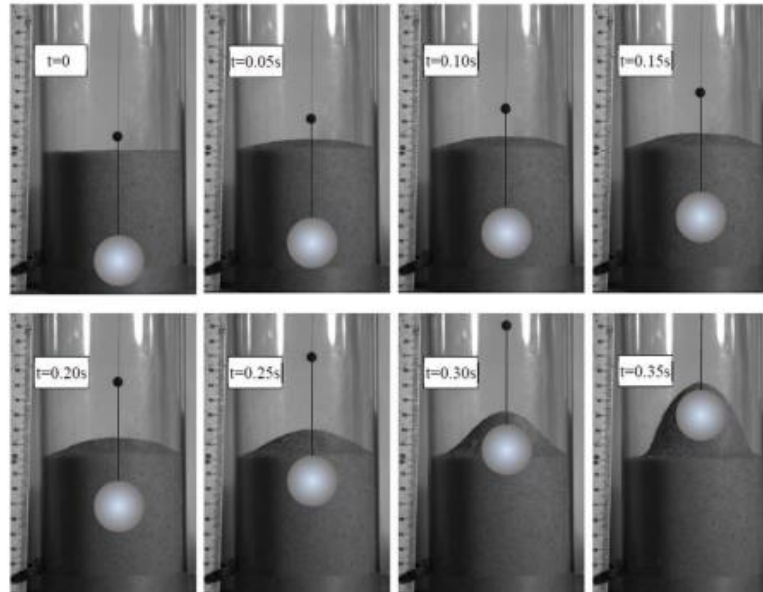


Rýžový kettlebell

Vezměte nádobu a nasypťe do ní **nějaký granulární materiál**, například rýži. Pokud do ní ponoříte **třeba lžíci**, pak za ní při určité hloubce ponoru můžete zvednout nádobu i s obsahem. Vysvětlete tento jev a prozkoumejte **relevantní parametry** systému.



...“skorolžice“

Zvednutí kettlebellu

- Problém, kdy lze kettle zvednout je z hlediska makroskopického působení sil triviální
 - Rovnováha gravitační a třecí síly
- Síla působící na vnořený předmět
 - Třecí síla bude záviset mimo jiné na velikosti a tvaru nádoby. Tím pádem na množství materiálu. Triviálně ovlivní to, jestli lze nádobu zvednout nebo ne.
 - Z hlediska fyziky je primárně zajímavé to, jak se mění síla v závislosti na „relevantních parametrech“.

Zvednutí kettlebellu

- Problém, kdy lze nádobu zvednout je z hlediska makroskopického působení sil triviální
 - Rovnováha gravitační a třecí síly
- Síla působící na vnořený předmět
 - Třecí síla bude záviset mimo jiné na velikosti a tvaru nádoby. Tím pádem na množství materiálu. Triviálně ovlivní to, jestli lze nádobu zvednout nebo ne.
 - Pozn: pokud třecí síla poroste rychleji než lineárně s hloubkou zanoření, pak vždy je možné zvednout dostatečně hlubokou nádobu
- Z hlediska fyziky je primárně zajímavé to, jak se mění síla v závislosti na „relevantních parametrech“.

Co jsou **relevantní parametry**?

Základní vlastnosti granulárních materiálů

□ Granulární materiály

- Směs zrn o velikost cca $> 100 \mu\text{m}$
- Tepelný Brownův pohyb nehraje roli (na rozdíl od koloidních směsí)
 - Nelze použít termodynamiku – atermální systém
- Tření a vzájemné srážky zrn
- Může obsahovat jak plyn tak i kapalinu
 - Van der Waalsovy síly pro malá zrna



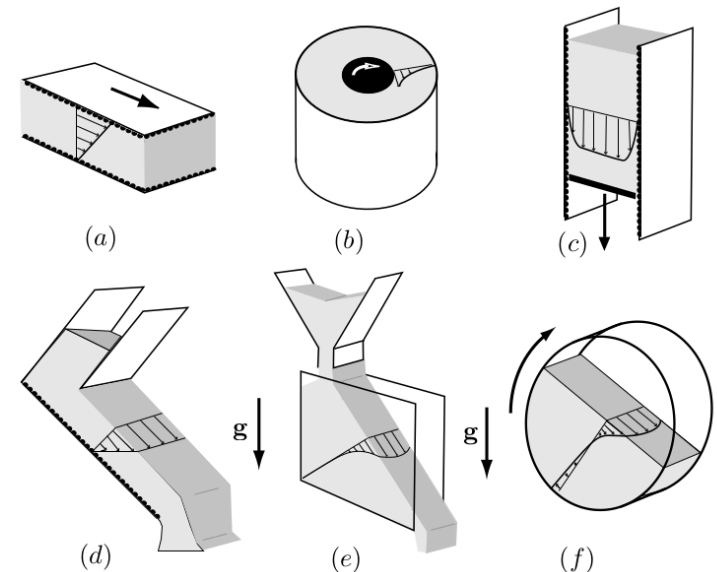
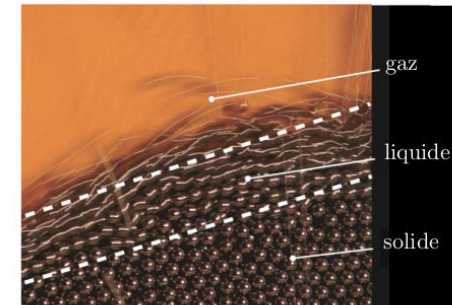
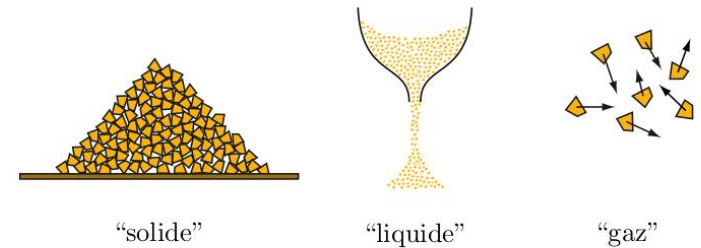
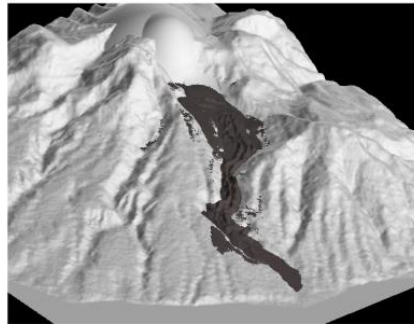
Základní vlastnosti granulárních materiálů

Granulární materiály – „nový stav“ hmoty

- Velké množství forem
- Velký význam pro aplikace
- Velmi komplexní chování za různých podmínek
 - Defomace jako u pevných těles
 - Mohou téci jako kapaliny (různé typy proudění)
 - Mohou být stlačeny jako plyny
 - Často ve formě metastabilních stavů

Vlastnosti toku a jeho různé „módy“ jsou velmi důležité pro průmysl.

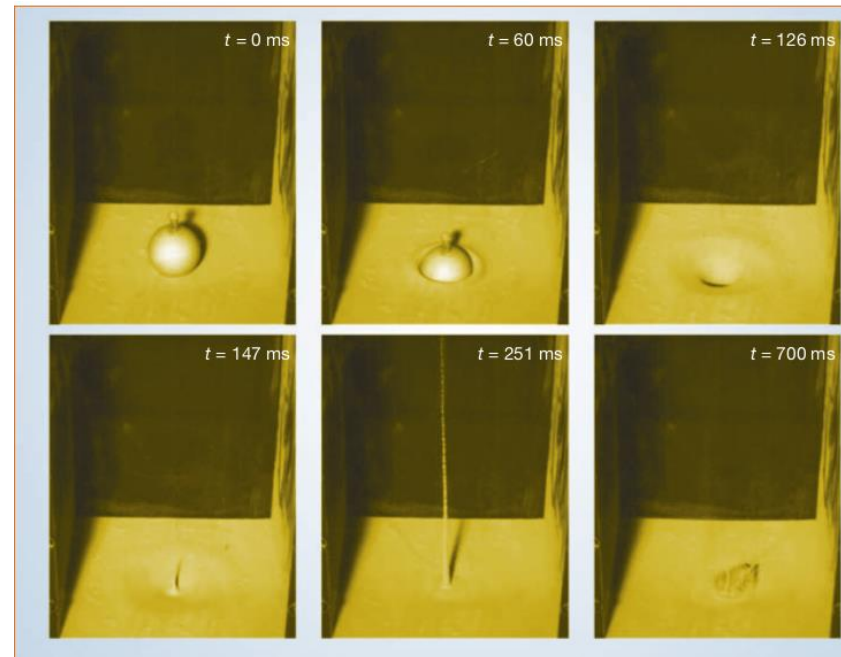
- Pro tuto úlohu TMF je důležitý pouze částečně.
- Pomůže pochopit vlastnosti granulárních materiálů.



Základní vlastnosti granulárních materiálů

- Teoretický popis vlastností - neexistuje jednotný přístup
 - **Základem jsou disipativní (třecí) síly** mezi zrny
 - Nelze snadno aplikovat přístupy statistické pro rovnovážné stavy (Boltzmannova rovnice)
 - Nelineární jevy
 - Makroskopické modely - různé pro různé typy chování
 - Reologické chování
 - Mikroskopické modely
 - Metody konečných prvků
 - Molekulární dynamika

Teoretický popis obecně velmi složitý.
Zároveň se jedná hodně studované systémy.
Co je relevantní?



Pohyb a tření unvitř granulárních mat.

- Síly působící (skrze tření) na objekt, který se snaží pohybovat granulárním materiálem
 - Většinou studováno pro horizontální pohyb
 - Fluktuující síla (slip-stick effect)
 - Indukované napěchováním materiálu: jamming effect
- Hlavní proces – periodické přeuspořádání (komprese) a zhroucení struktury (uvolnění)
 - vliv velikosti nádoby – závislost na hloubce

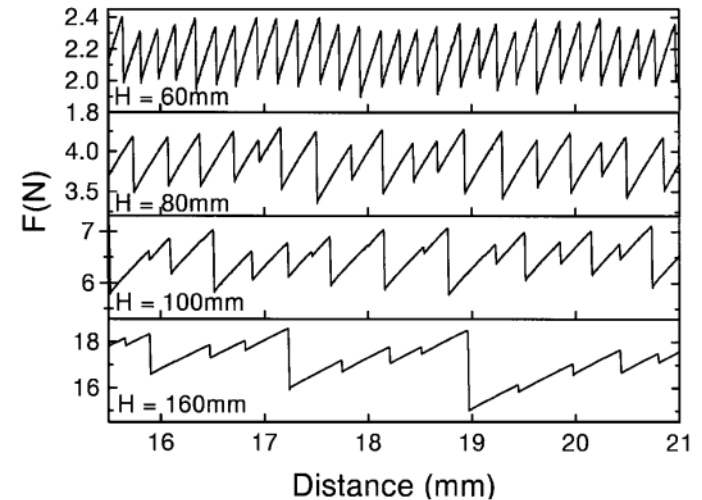
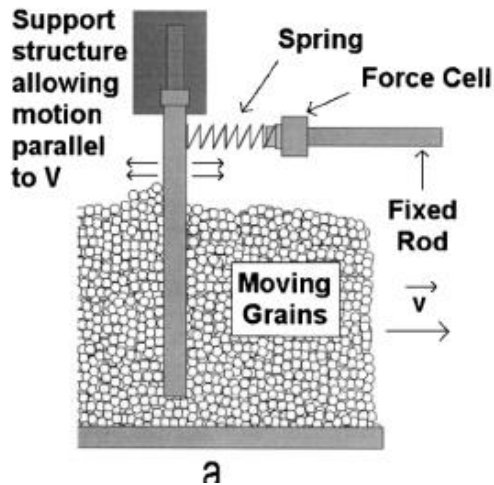


FIG. 2. The characteristic fluctuations in the drag force at four different values of H for $d_c = 10$ mm. Note the transition from purely periodic fluctuations $H \leq 60$ to stepped fluctuations with increasing depth $H \geq 100$.

Force chains a jamming effect

- Základní kvalitativní vysvětlení
 - v materiálu vznikají tzv “force chain” – silové řetězce
 - Přenos síly pouze ve směru řetězce
 - Obecně přenos tlaku
 - Dokáže udržet vysoké stříhové napětí (jammed state)
 - Pod tlakem dojde k určitému sebeuspořádání (emergentní struktury)
 - Nutná určitá kritická hustota
 - Při změně směru tlaku se musí přeuspořádat

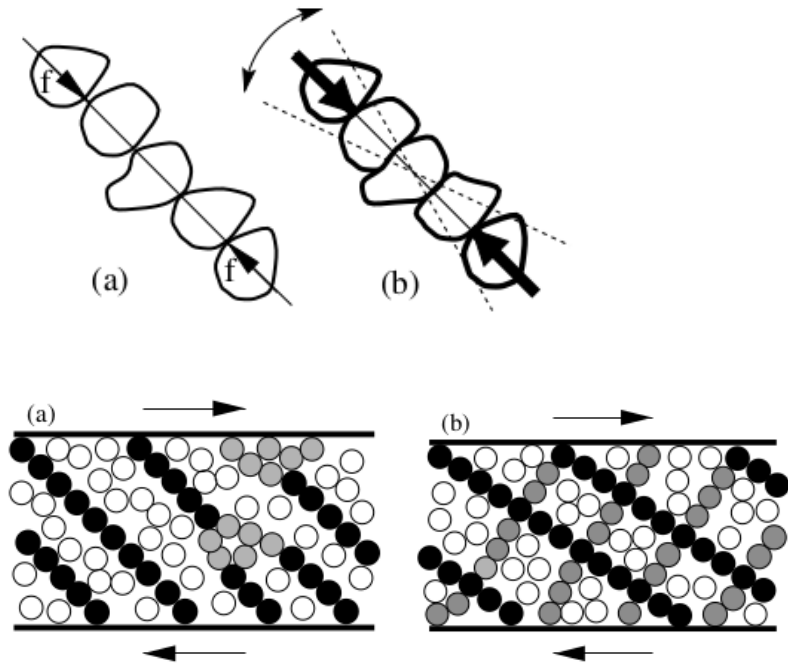
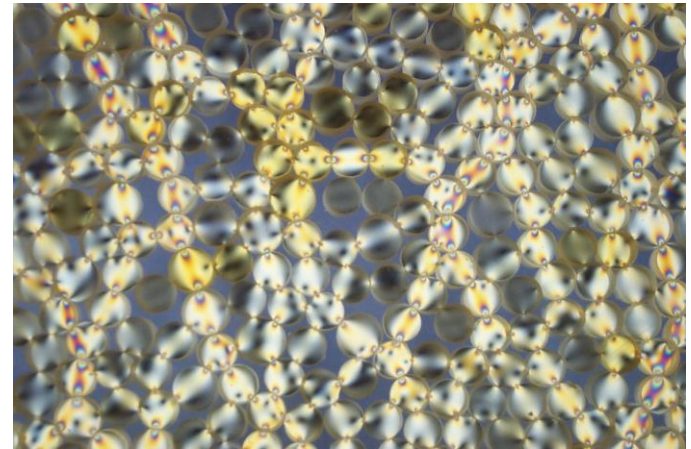


FIG. 1. (a) A jammed colloid (schematic). Black: force chains; grey: other force-bearing particles; white: spectators. (b) Idealized rectangular network of force chains.

Force chains a jamming effect

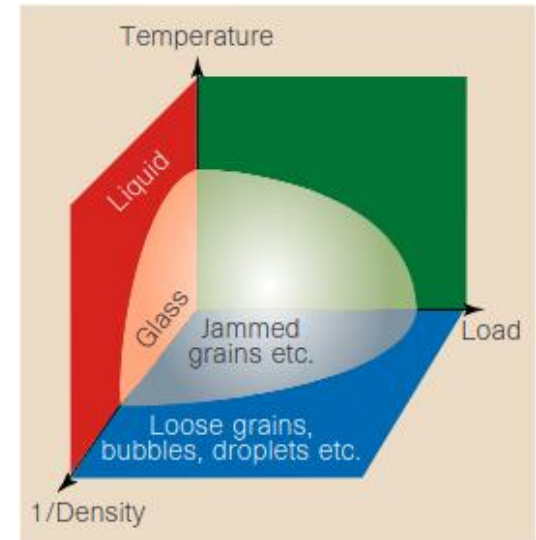
- Základní kvalitativní vysvětlení
 - v materiálu vznikají tzv “force chain” – silové řetězce
 - Přenos síly pouze ve směru řetězce
 - Obecně přenos tlaku
 - Dokáže udržet vysoké stříhové napětí (jammed state)
 - Pod tlakem dojde k určitému sebeuspořádání (emergentní struktury)
 - Nutná určitá kritická hustota
 - Při změně směru tlaku se musí přeuspořádat
- Konkrétní vlastnosti závisí na vlastnostech granulátu
 - Složení, packing fraction, koeficient tření, velikost systému, ...
 - Dokonce hraje roli i tvar a kompresibilita zrna
 - Velmi složité modely
 - Dokonce i umělá inteligence



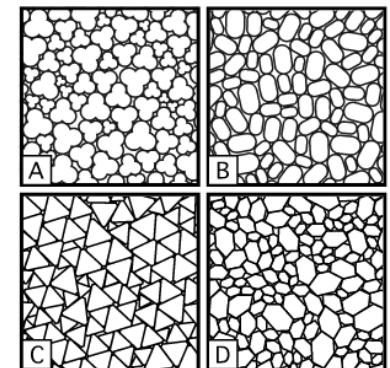
Force chains in a photoelastic granular material
(https://danielslab.physics.ncsu.edu/dcp_0866/)

Přechod do jammed phase (zablokované fáze)

- K přechodu z tekoucí do zablokované fáze
 - Závisí na hustotě a tlaku (v našem případě neuvažujeme teplotu)
 - Podmínky přechodu do zablokované fáze mohou být jiné, než zpět
- Co se děje při zanořování tyče
 - dochází vytlačování materiálů (jako u tekutin)
 - ale také ke zhutnění, změně hustoty
- Vliv změny hustoty (zhutnění)
 - Studován detailně pro kulatá zrna
 - Komplikovanější pro rýži
 - Vliv nesféricity a stlačitelnosti
 - Zdá se, že rýži lze dobře vyplnit prostor (malá frakce) vzduchu – může mít vliv



<https://condor.wesleyan.edu/gvoth/phys573/jamming.pdf>
<https://www.youtube.com/watch?v=JnPRXMHfSgM>

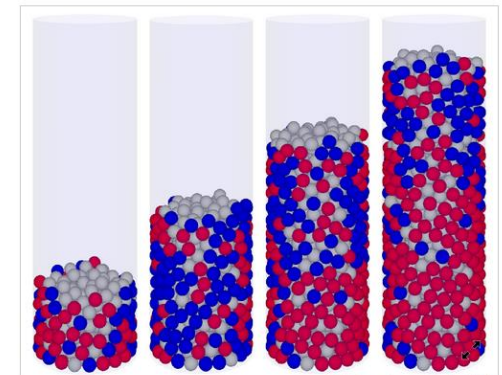
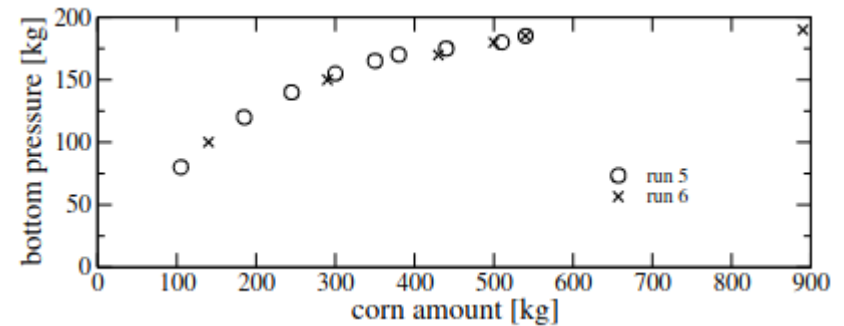


<http://www.lmgc.univ-montp2.fr/perso/franck-radjai/research/particle-shape-effects/>
Europhysics Letters, Volume 98, Number 4

Vliv stěn

- Jak závisí tlak (třecí síla) na velikosti nádoby?
- Bude se měnit velikost síly v závislosti na velikosti nádoby?
 - Jak vypadá limita volně loženého materiálu?
- Tvaru nádoby?
 - Omezení vytlačení zrn - větší komprese
- Janssenův efekt
 - Pozorováno v obilných silech
 - Interakce se stěnou - přenos tlaku na stěny
 - Tlak roste pouze do určité hloubky
 - Závisí na způsobu plnění
 - Různé zajímavé efekty – lze některé proměřit?
 - Zajímavé techniky měření.

Granular Matter volume 8, pages 59–65 (2006)
<https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0511618.pdf>



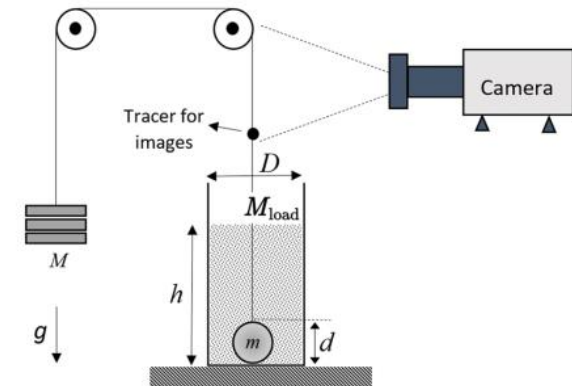
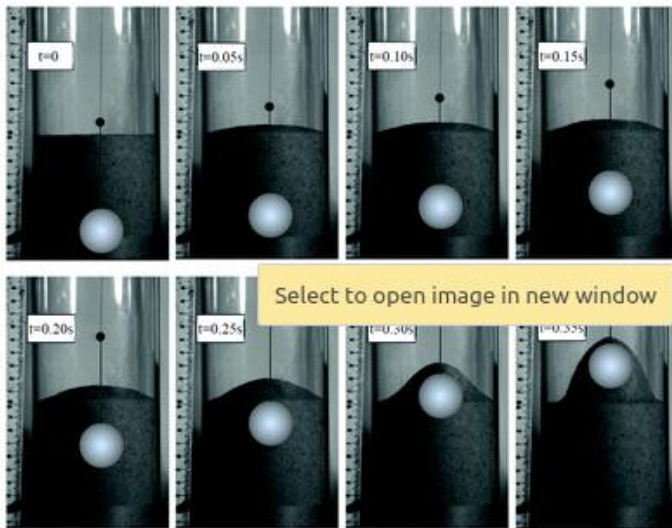
M. P. Ciamarra/Nanyang Technological Univ.

Weight problem. Numerical simulations that accompanied experiments showed that a cylinder wall exerts a frictional force that can either support particles against gravity (red), as predicted by well-established models, or push particles downward (blue). In some situations, the total downward force results in a measured weight exceeding the true weight of the particles. [Show Less](#)

<https://physics.aps.org/articles/v13/46>

Vytahování kuličky

- V TMF je vnořena lžice
- V literatuře experimenty s kuličkou
 - Lze dobře pozorovat základní chování
 - Jak velký bude rozdíl? Zajímavá otázka.
 - Lze využít zkušenosti se stavbou aparatury



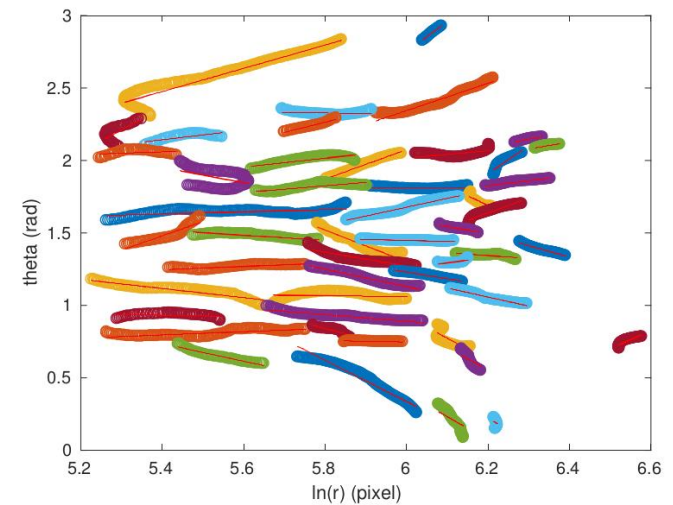
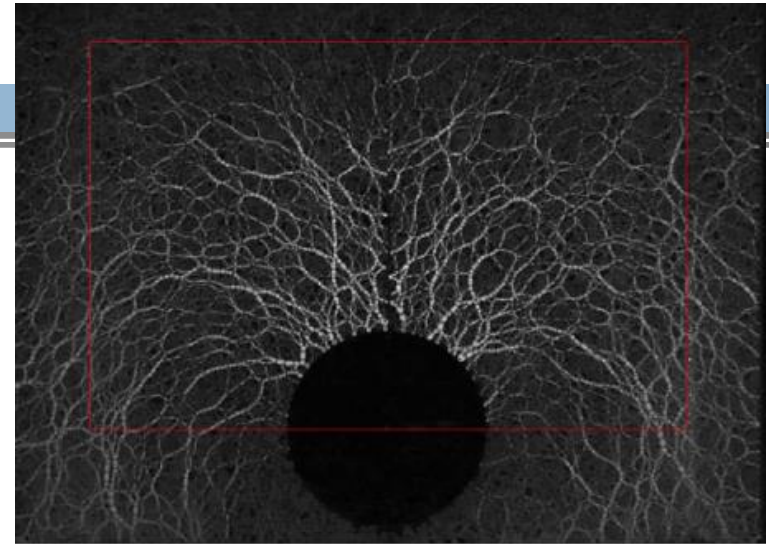
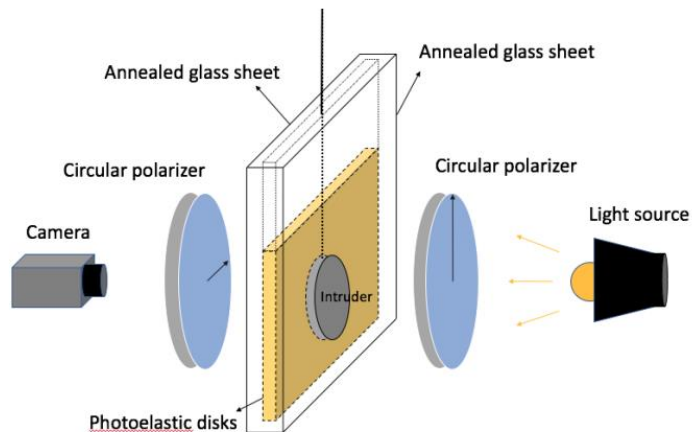
[Soft Matter](https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/sm/d0sm01914c), 2021, 17, 2832-2839

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/sm/d0sm01914c>

<https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/handle/10161/17433>

Vytahování kuličky

- V TMF je vnořena lžice
- V literatuře experimenty s kuličkou
 - Lze dobře pozorovat základní chování
 - Jak velký bude rozdíl? Zajímavá otázka.
 - Lze využít zkušenosti se stavbou aparatury
- Experimenty s fotoelastickými kuličkami
 - V případě lžice (tyče) bude rozložení řetězců jiné
 - Bude možné nějak interpolovat?



[Soft Matter](https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/sm/d0sm01914c), 2021, 17, 2832-2839

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/sm/d0sm01914c>

<https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/handle/10161/17433>

Vytahování kuličky

- V TMF je vnořena lžice
- V literatuře experimenty s kuličkou
 - Lze dobře pozorovat základní chování
 - Jak velký bude rozdíl? Zajímavá otázka.
 - Lze využít zkušenosti se stavbou aparatury
- Experimenty s fotoelastickými kuličkami
 - V případě lžice (tyče) bude rozložení řetězců jiné
 - Bude možné nějak interpolovat?
- Výsledky s kuličkou v písku
 - Nelineární závislost na hloubce
 - Vliv velikosti nádoby
 - Redukovaná hloubka síla
 - Zajímavé škálování

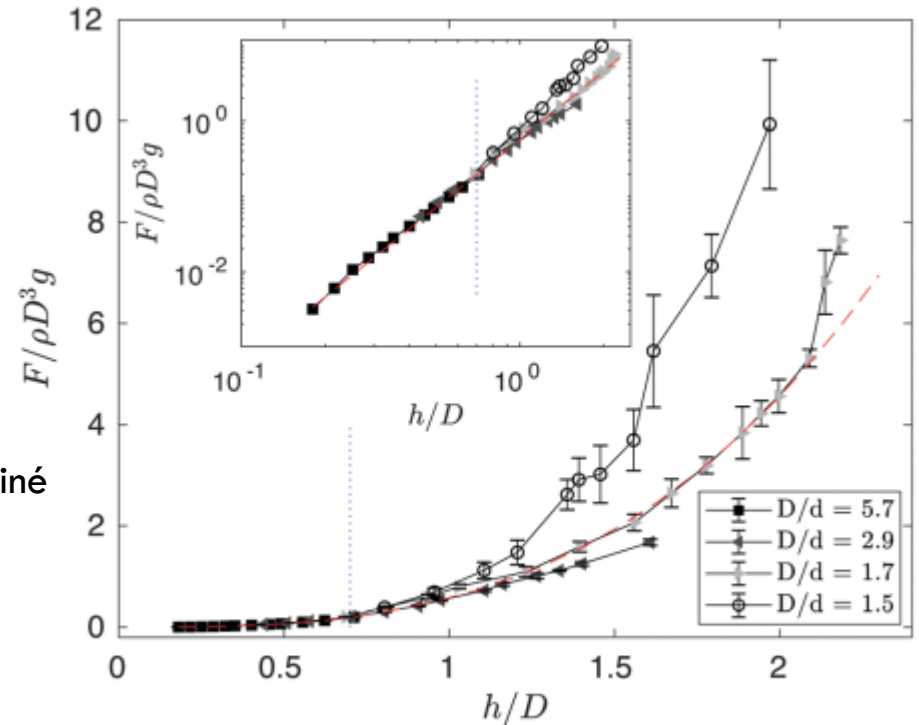


Fig. 6 Dimensionless pullout force at failure $F/(\rho g D^3)$ vs. dimensionless filling height h/D for different tube diameter D : $D/d = 1.5$ (open circles),

[Soft Matter](https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/sm/d0sm01914c), 2021, 17, 2832-2839

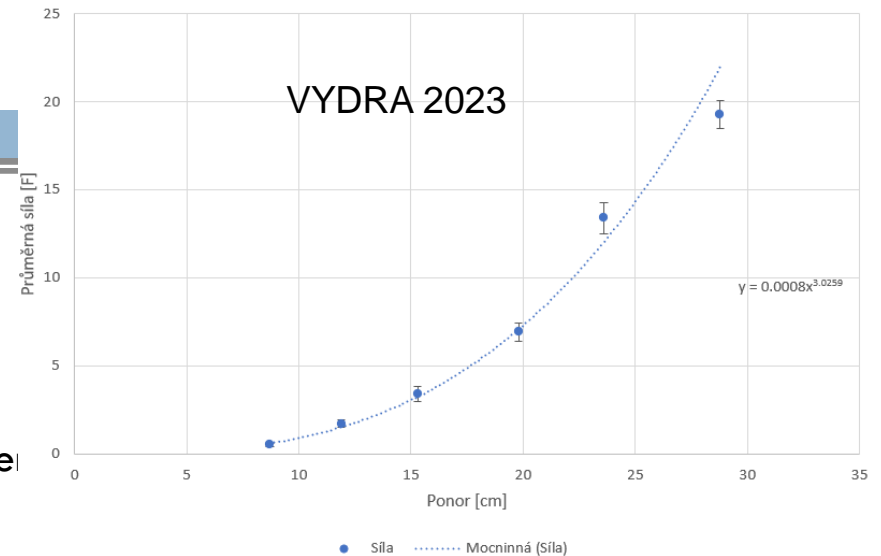
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/sm/d0sm01914c>

<https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/handle/10161/17433>

Jak úlohu řešit

Vařečka v rýži

VYDRA 2023



- Velmi zajímavý jev a komplexní
- Základní fyzikální principy jsou dobře známy
 - Jejich aplikace je velmi složitá
 - Existují zajímavé výsledky z příbuzných experimentů
 - Odhad předpokládaného chování
- Lze ověřit obdobné chování
 - Např. škálování s různými proměnnými
- Zkusit vymyslet jiné efekty a proměřit
 - např, závislost na změně objemu, typu zrn, ...
 - Nepůjde popsat z teorie, ale je to originální výsledek
- **Experimentálně dobře uchopitelné**
 - Využijte toho

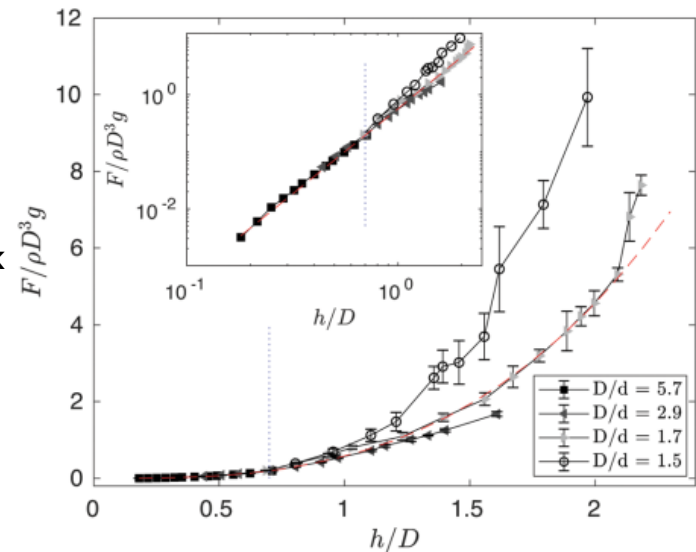


Fig. 6 Dimensionless pullout force at failure $F/(\rho g D^3)$ vs. dimensionless filling height h/D for different tube diameter D : $D/d = 1.5$ (open circles),