

Polimerek reológiája és szimulációs technikái (BMEGEPTNG02)



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

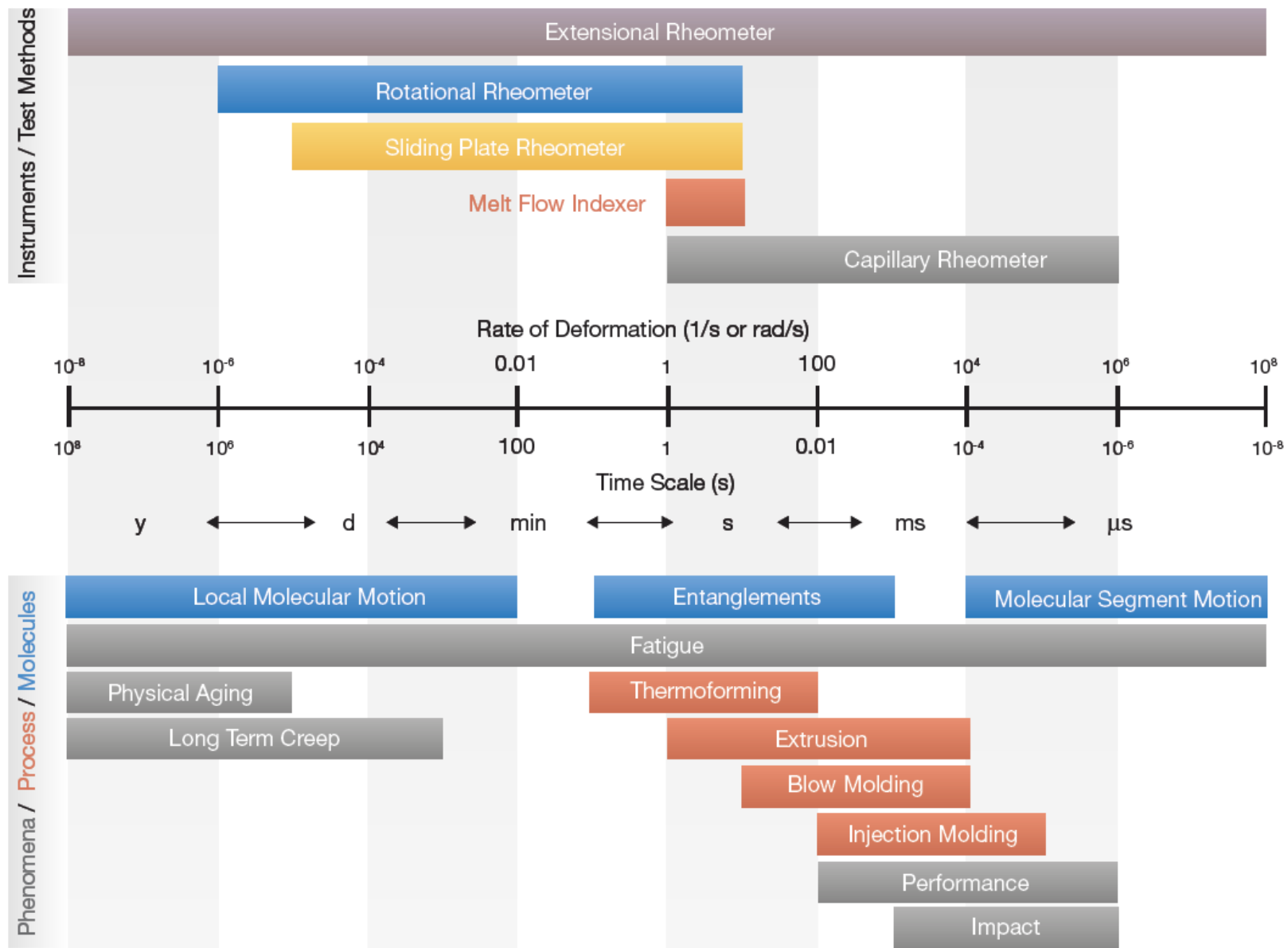


Szabó Ferenc

2023



Viszkozitás mérés



Rheometry

Characterization (offline)

Sliding plate rheometer (6.1)

Rotational rheometer:
Cone-plate (6.2),
Parallel-plate (6.3), Couette

Capillary Rheometer (6.4)

Extensional Rheometer (6.6)

Quality control (online/ inline)

Single-point test (MFI) (6.5)

Mold rheometer

Integrated mold sensors
for active process control (6.8)

- **Mérési módok:**

- **Abszolút mérési módszerek**

- Mérőrendszertől független eredmények
 - Több feltétel együttes teljesülése szükséges, ezek jellemzően:
 - Az áramlás stacioner, azaz minden pontjában időtől független
 - Az áramlás lamináris, a tehetetlenségi erő a súrlódási erőhöz képest elhanyagolható
 - Az áramlás izoterm, azaz hőmérsékletében homogén
 - A rendszer hidrodinamikailag teljesen kitöltött és homogén
 - Az ömledék összenyomhatatlan
 - A nehézségi erők elhanyagolhatók
 - Az áramlás és a nyomásesés is csak egyirányú (van kivétel)
 - A be- és kilépési hatások elhanyagolhatók
 - Az ömledék sebessége a falnál nulla (van kivétel)

- **Relatív mérési módszerek**

➔ **Amikor a fentiek nem (teljesen) teljesülnek**

-

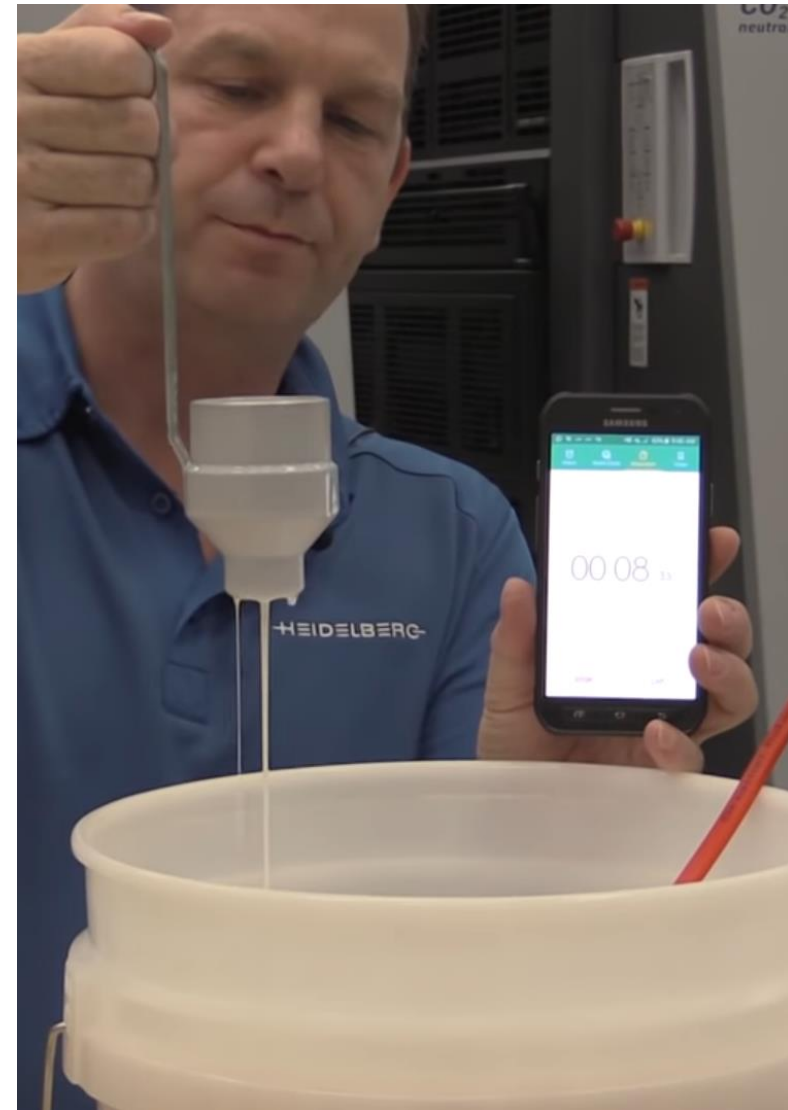
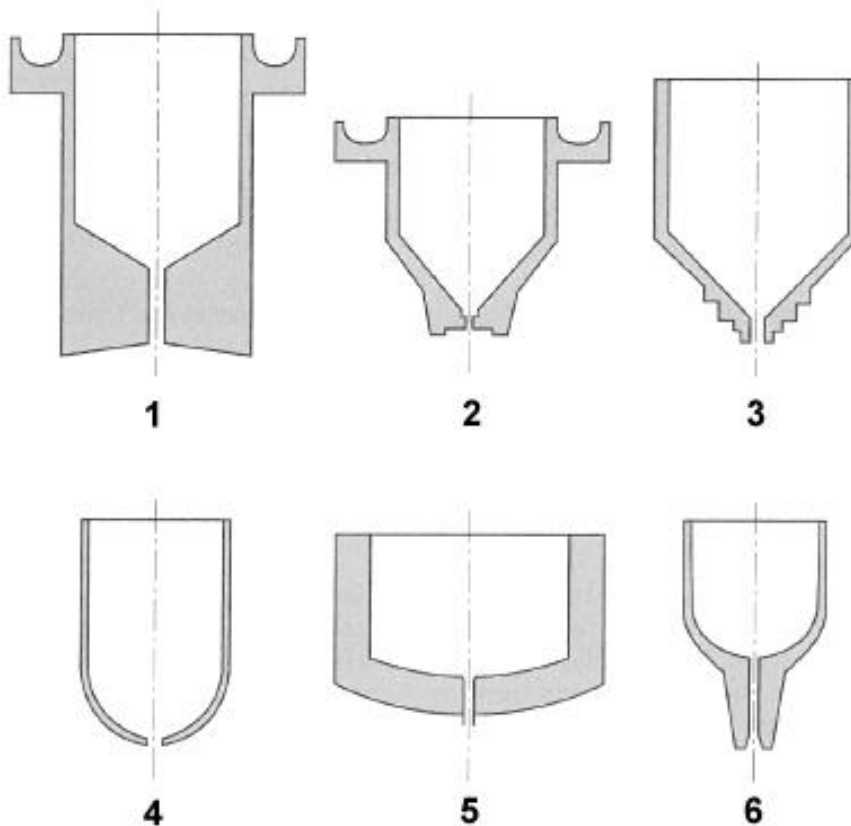
- **Sík lapon való elterülés mérése**



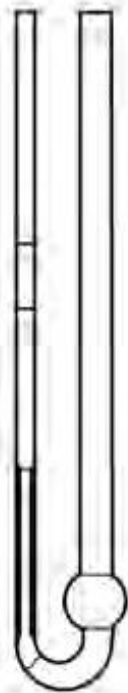
- Tartályból kifolyó anyag terülésének mérése



- Tartályból való kifolyási idő mérése**



- Kapillárison való átfolyás idejének mérése**



Ostwald

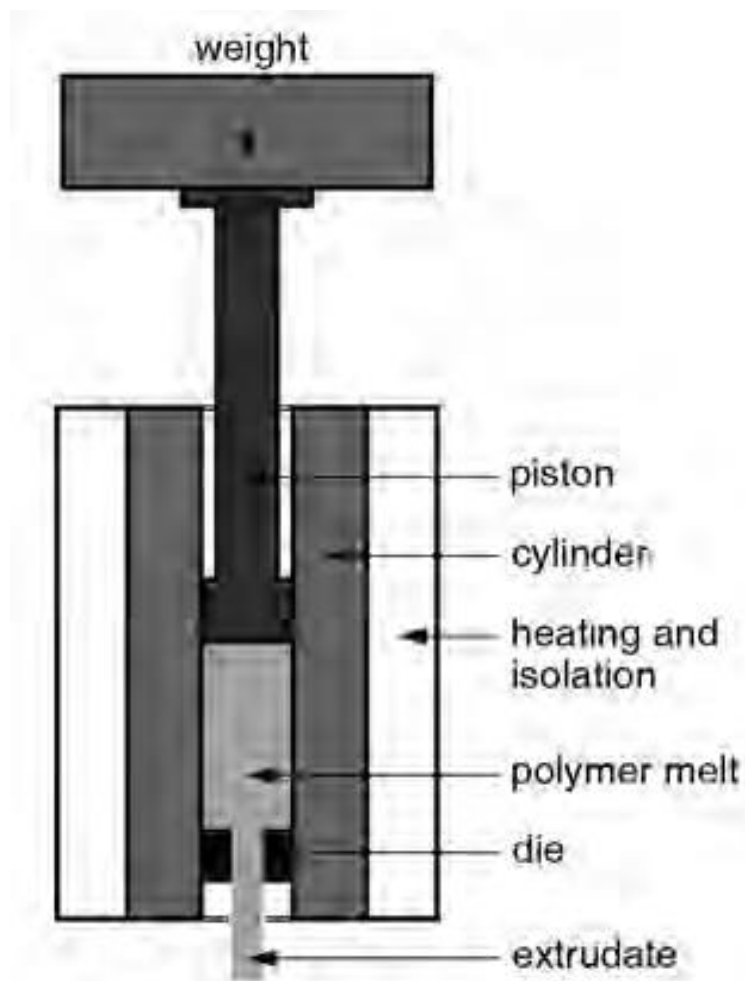


Ubbelohde

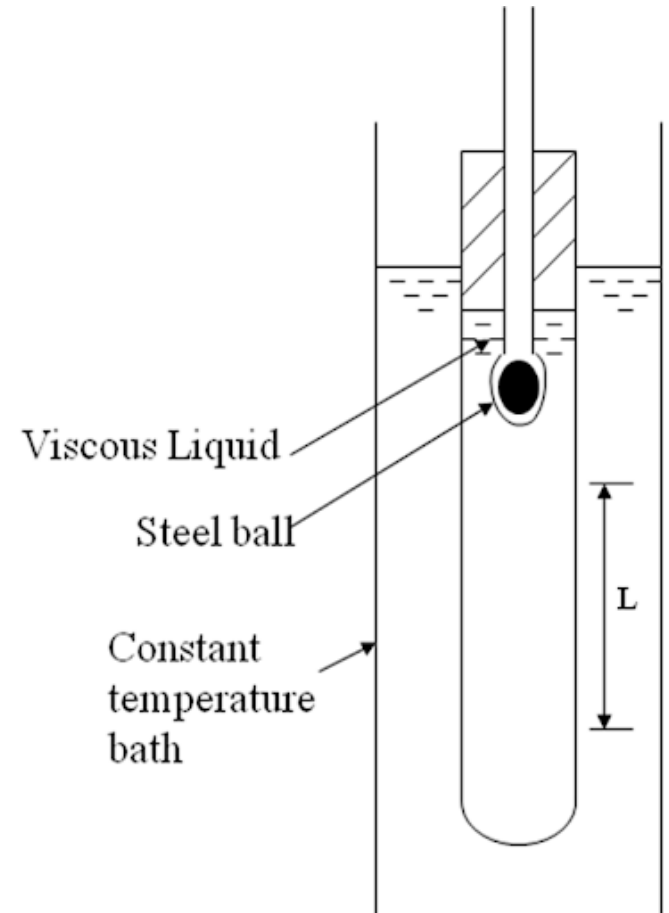


Cannon-Fenske

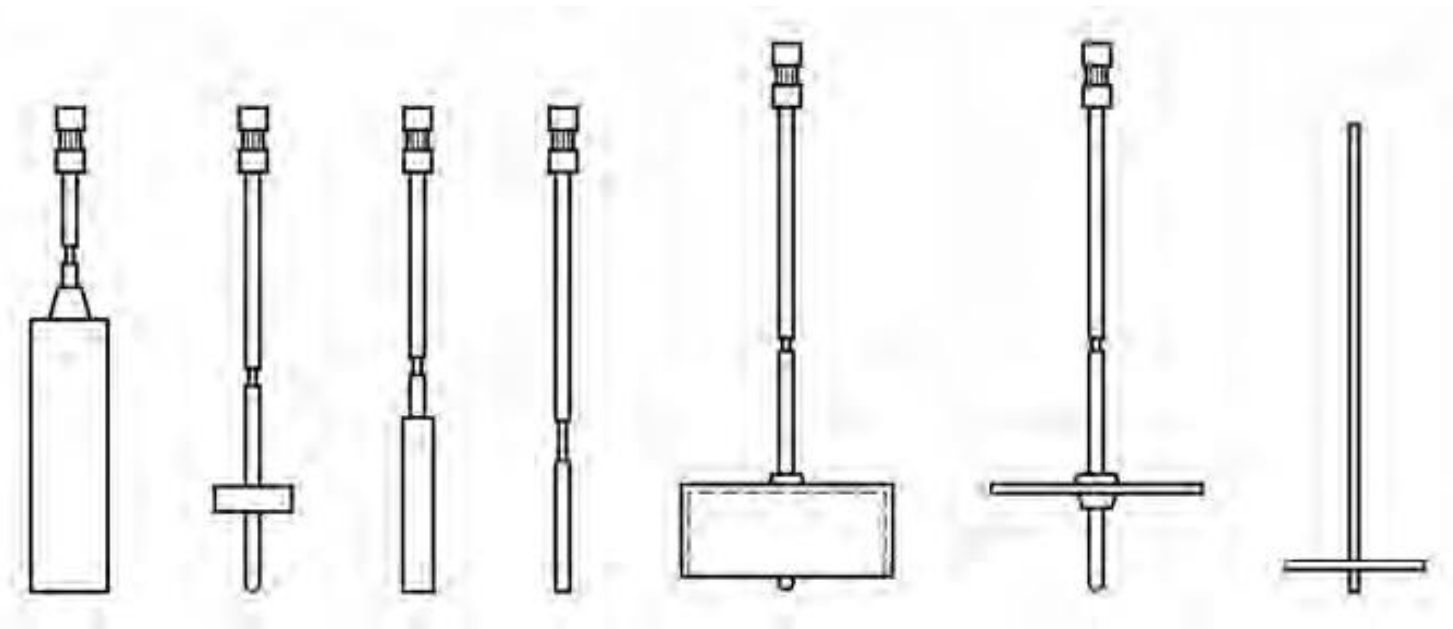
- Kapillárison való átfolyás idejének mérése - MFI**



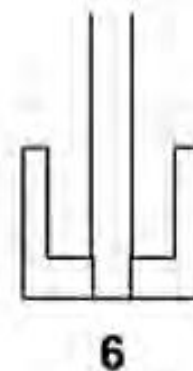
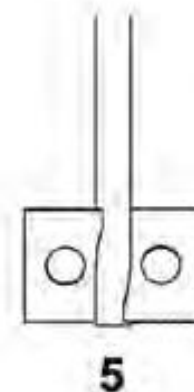
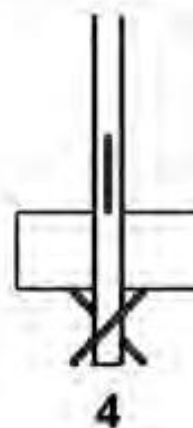
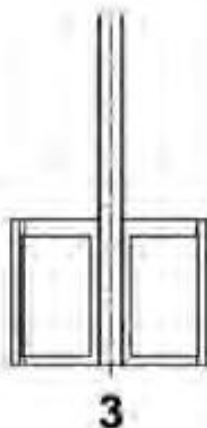
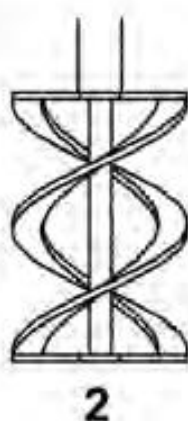
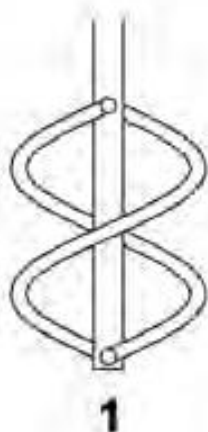
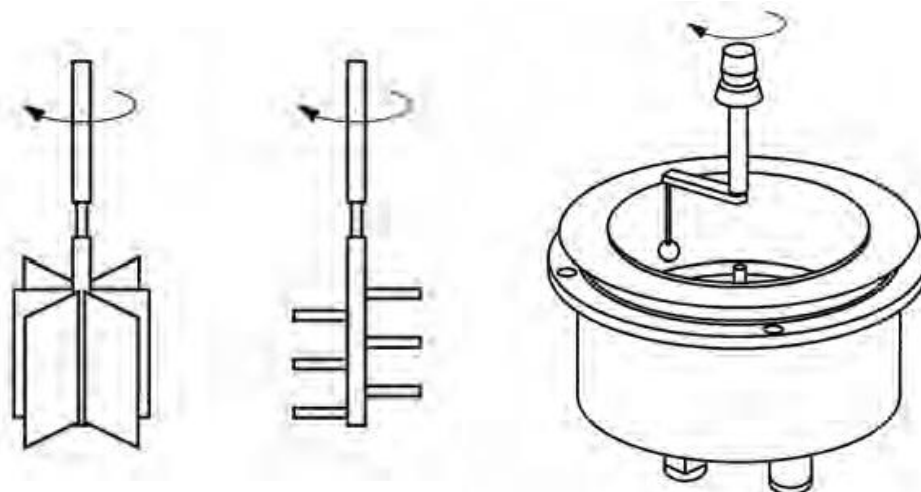
- Ejtősúlyos viszkoziméter



- **Különböző típusú rotorok**
 - Ragasztók,
 - Polimer emulziók,
 - Poliolok,
 - Olajok, hidraulika folyadékok,
 - Olvasztott üveg,
 - Aszfalt viszkozitásának mérésére

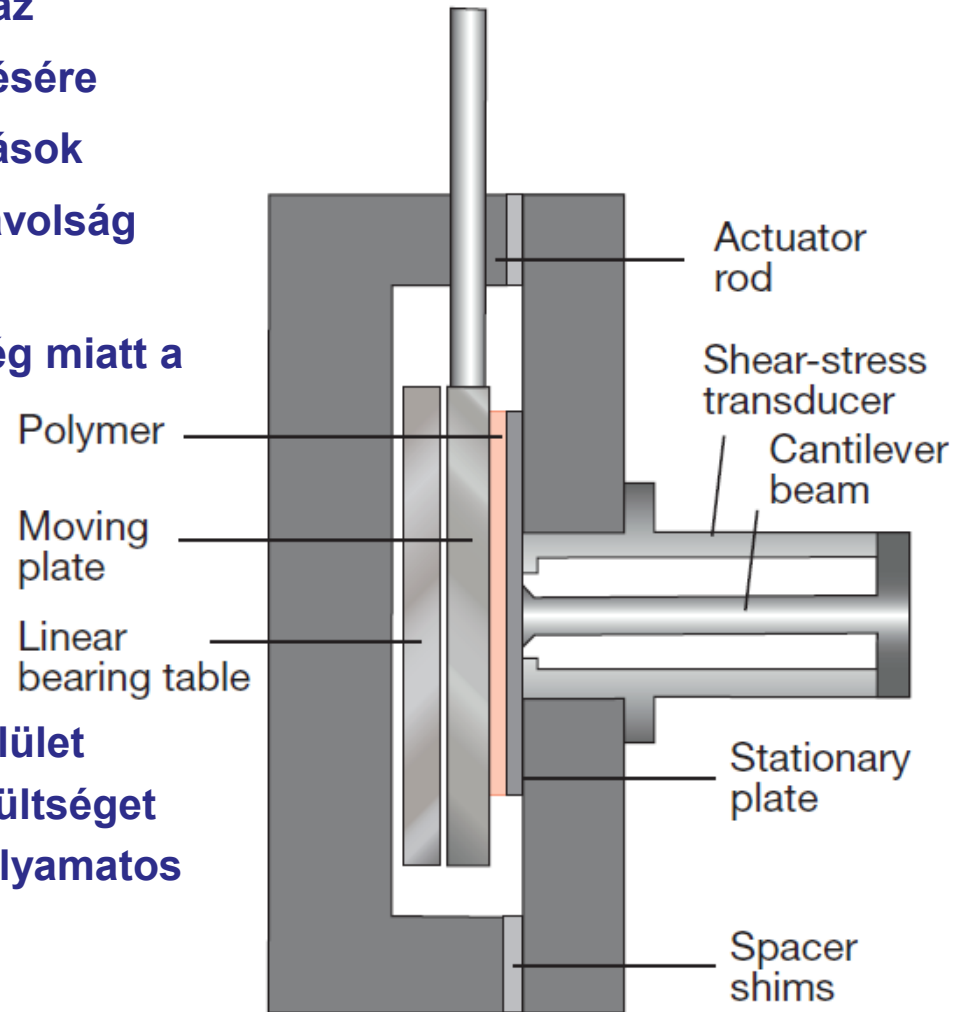


- **Különböző típusú rotorok**
 - Joghurtok,
 - Szószok,
 - Tészták,
 - Szemcsés anyagok mérésére (1-6)



• Mérés síklapok között

- Az anyag az álló és mozgatható síklapok között helyezkedik el
- Tisztán nyíró igénybevételt alkalmaz
- Alkalmas orientációs hatások mérésére
- Nem jellemzőek a folyási instabilitások
- Nem egyszerű a síklapok közötti távolság állandó értéken tartása
- Az első normálfeszültség különbség miatt a mozgó lapot csapágyazni kell
→ súrlódás
- A második normálfeszültség különbség miatt az anyag kifolyhat a lapok közül
- A lap mozgatása során a kontaktfelület nagysága megváltozhat, így a feszültséget kisebb területen kell mérni, ahol folyamatos a kontaktus
- LAOS



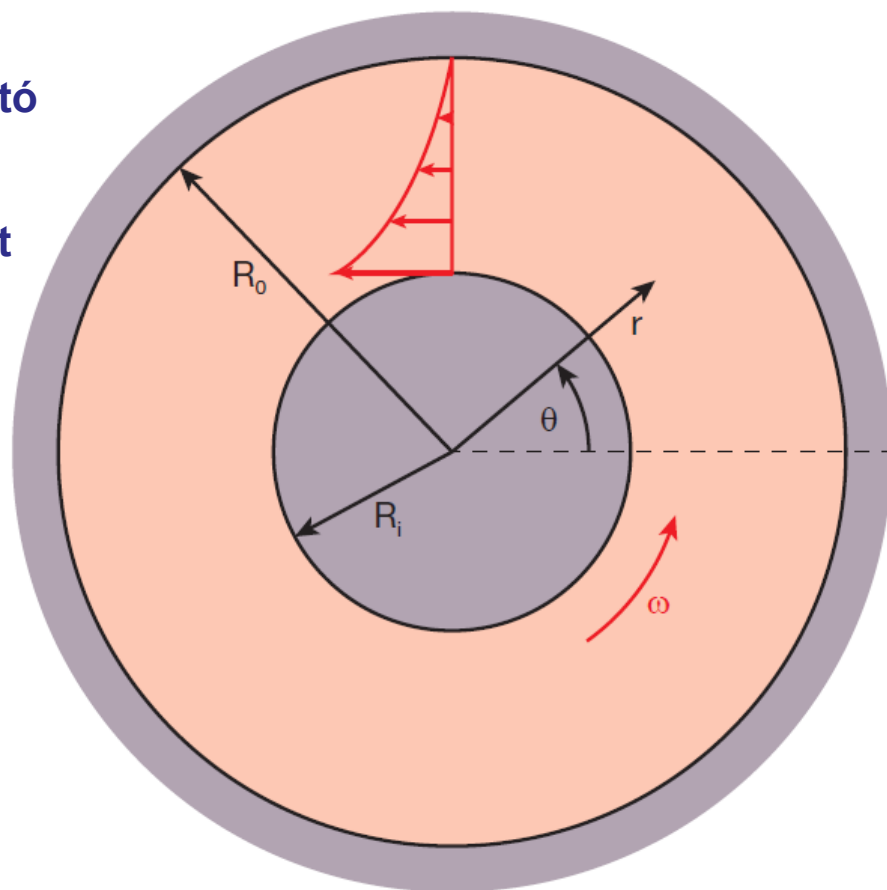
- Mérés koncentrikus hengerek között**

- A z és r irányú sebességkomponensek 0-val egyenlőek, így a sebességmező

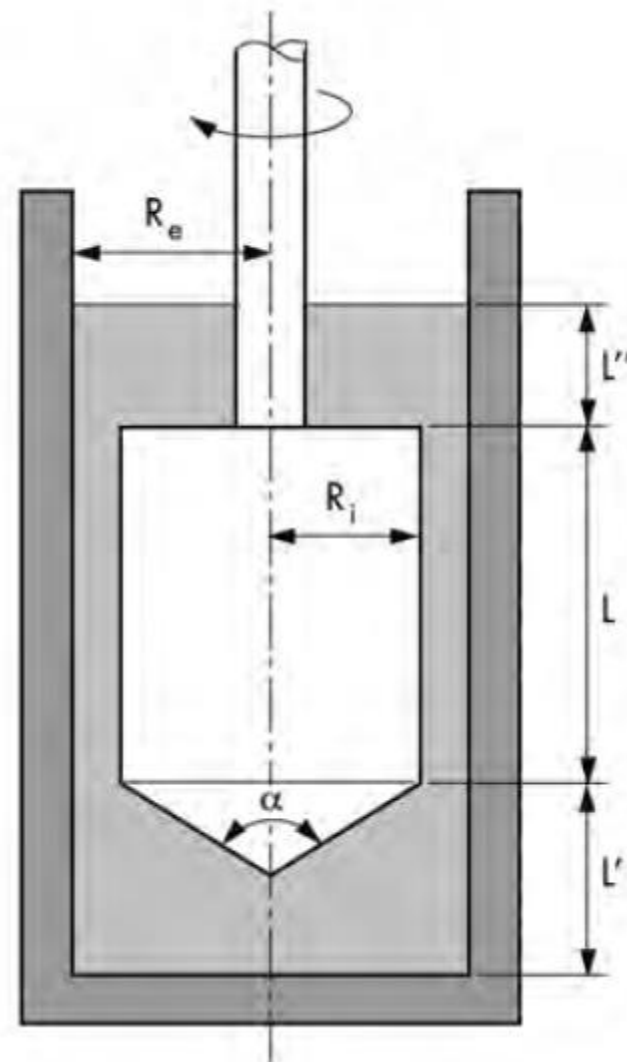
$$u = (0, u_\theta(r, 0, 0), 0)$$

- Izoterm eset, a disszipáció elhagyható
- u_θ független θ -tól
- A sebességmező csak a belső felület forgásának hatására alakul ki

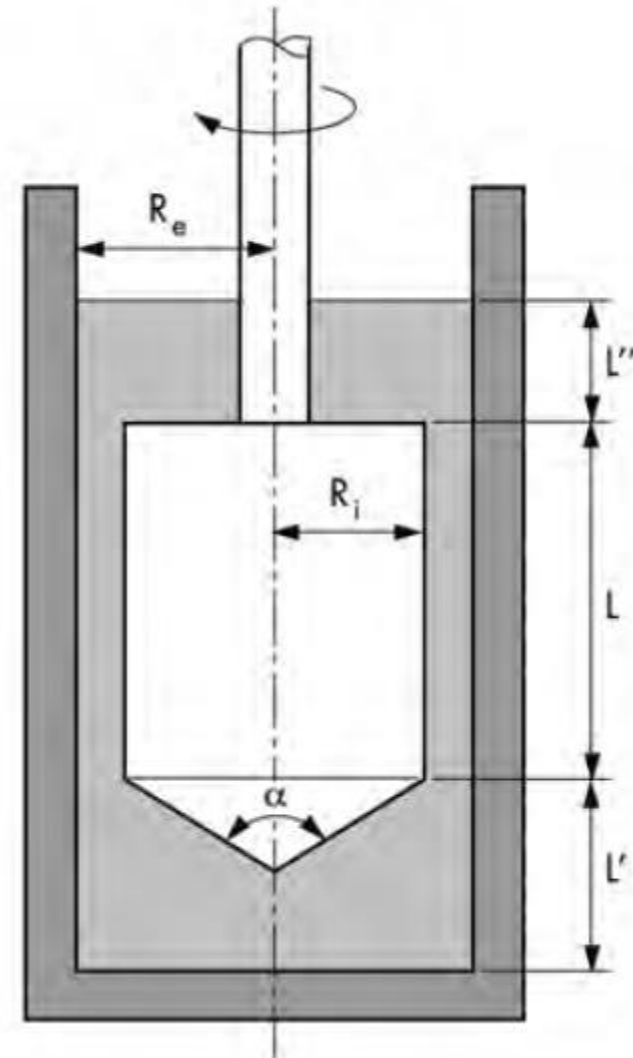
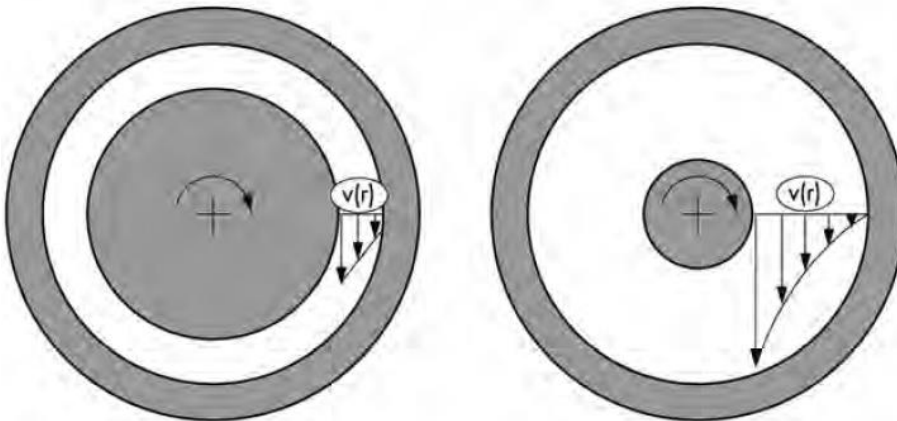
$$u_\theta(r) = \omega r \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{R_o} \right)^{-\frac{2}{n}} \right]}{\left[1 - \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^{-\frac{2}{n}} \right]}$$



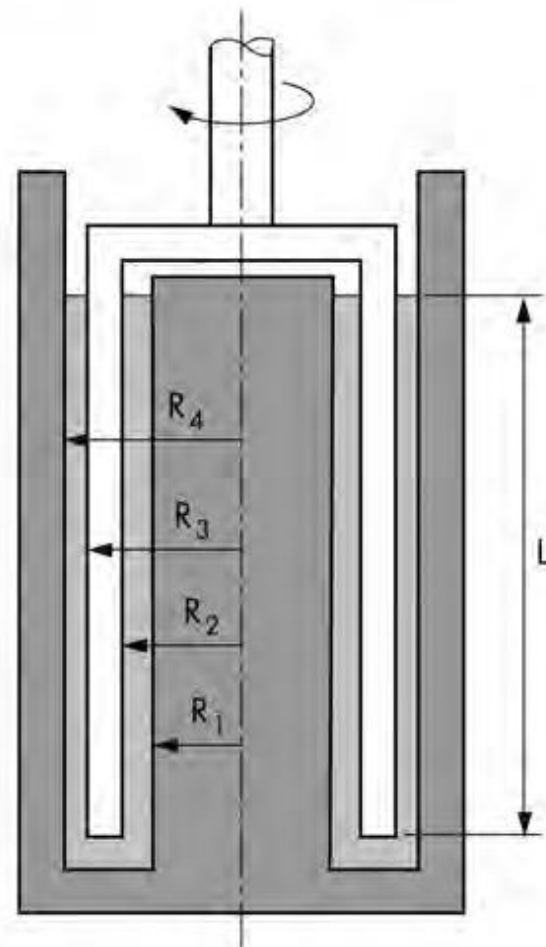
- **Mérés koncentrikus hengerek között**
 - Kis viszkozitású folyadékok esetén
 - Searle és Couette módszerek
 - A nyírósebesség a fordulatszám és a hengerek közötti rés függvénye
 - A nyírófeszültség a forgatónyomatékból számítható
 - Nagy résméret esetén másodlagos áramlások és turbulencia is kialakulhat
 - ➔ Tranziens effektusok fontossága
 - ➔ Inhomogén deformáció
 - Kis résméret alkalmazása esetén az alacsony viszkozitású folyadékok sem hajlamosak kifolyni a résből
 - Egyenletes hőmérséklet eloszlás
 - Elérhetőek egyszer használatos mérőtestek is (gyanta térhálósodása)



- A sebesség eloszlás a résméret növelésével egyre inkább eltér a lineáristól, így a nyírósebesség nem állandó a résben
→ jelentős pontatlanság nem-newtoni folyadék mérésekor
- Viszonylag sok alapanyag szükséges
- A berendezés tisztítása időigényes
- A mintában esetlegesen megtalálható buborékok csökkentik a pontosságot
- Az esetleges excentricitás rontja a pontosságot
- Nagy nyírósebességek esetén a fejlődő hő csökkenti a pontosságot



- **Mérés koncentrikus hengerek között – double gap**
 - Kis viszkozitású folyadékok esetén
 - A nyírósebesség a fordulatszám és a hengerek közötti rés függvénye
 - A nyírófeszültség a forgatónyomatékból számítható
 - Megnövelt felület a nagyobb nyomaték érdekében



• Kúp-sík elrendezés

- Fő jellemzők: kúpszög, mérőtest átmérő
- Mért mennyiségek: Szögsebesség, nyomaték, axiális erő, nyomás eloszlás
- Oszcillációs és rotációs üzemmód
- Jellemző kúpszög: 1-4°
→ állandó nyírósebesség
- Nyírósebesség:

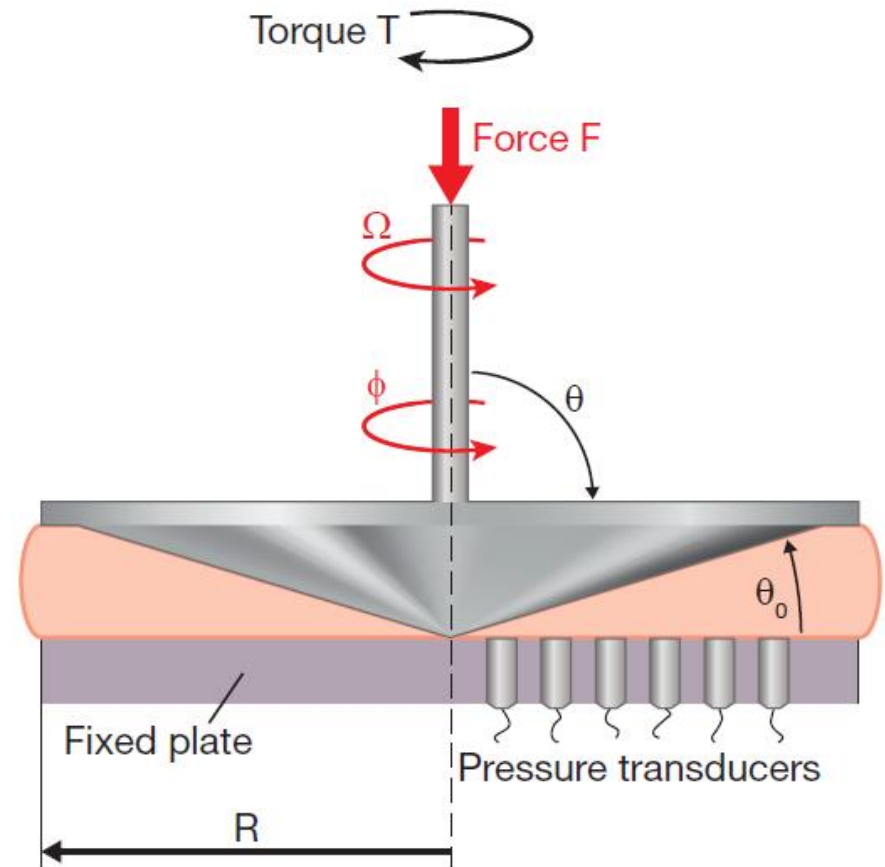
$$\dot{\gamma}_{\theta\phi} = \frac{\Omega}{\theta_0}$$

- Nyírófeszültség:

$$\tau_{\theta\phi} = \frac{3T}{2\pi R^3}$$

- Viskozitás:

$$\eta(\dot{\gamma}_{\theta\phi}) = \frac{\tau_{\theta\phi}}{\dot{\gamma}_{\theta\phi}} = \frac{3T}{2\pi R^3} \cdot \frac{\theta_0}{\Omega}$$

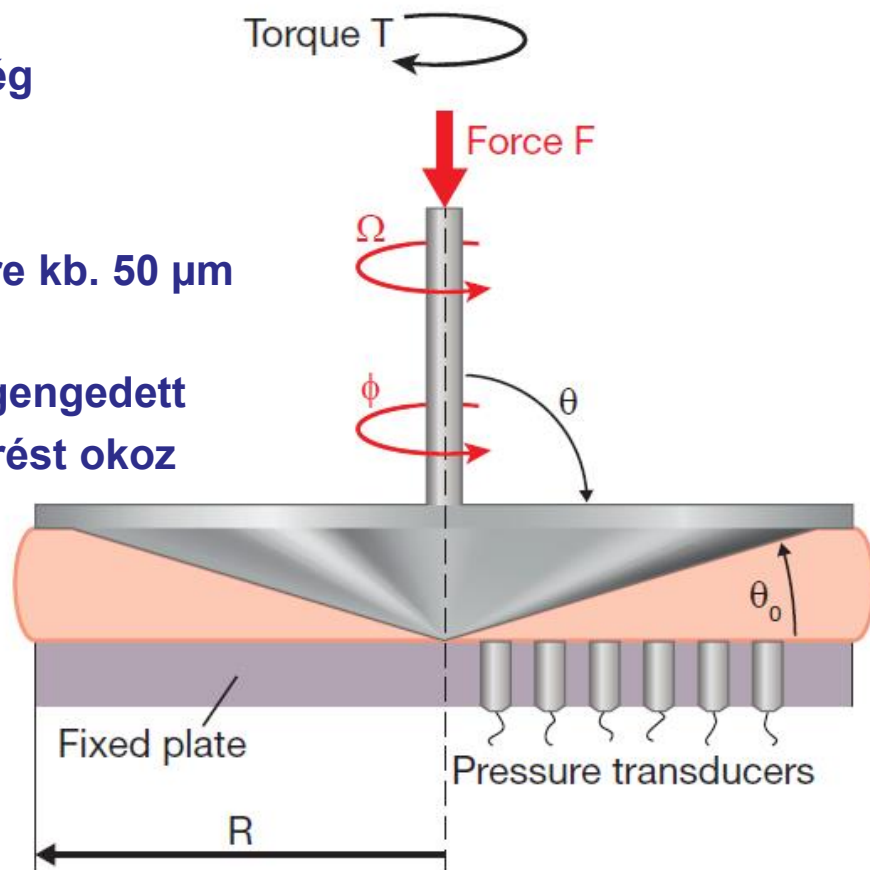


• Kúp-sík elrendezés

- Az első normálfeszültség különbség együtthatója:

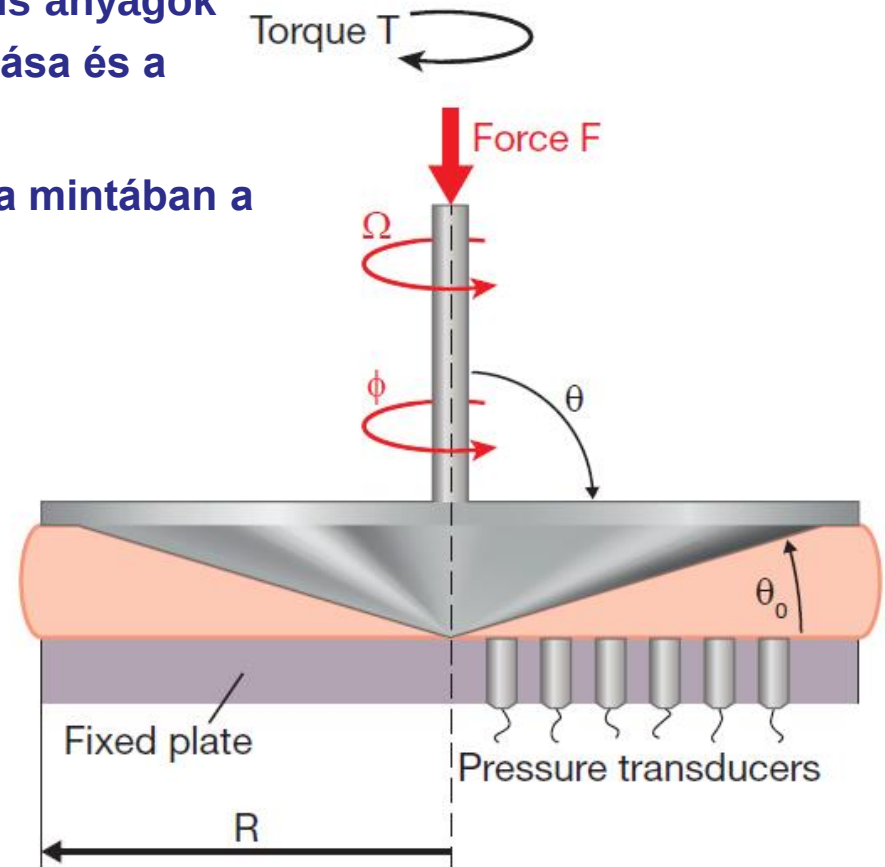
$$\psi_1 = \frac{N_1}{\dot{\gamma}_{\theta\phi}^2} = \frac{2F}{\pi R^2} \cdot \frac{1}{\dot{\gamma}_{\theta\phi}^2}$$

- A második normálfeszültség különbség
 - nyomáseloszlás
 - jellemzően pontatlan
- A mérőtestek kopásának megelőzésére kb. 50 μm távolság a kúp csúcsa és a sík között
 - csak < 10 μm töltőanyag méret megengedett
 - 5 μm axiális pontatlanság 10% eltérést okoz
- Kis viszkozitású anyagok mérésekor másodlagos áramlás alakulhat ki
- Viszkoelasztikus anyag mérésekor szélhatások kialakulása, instabilitás alakulhat ki



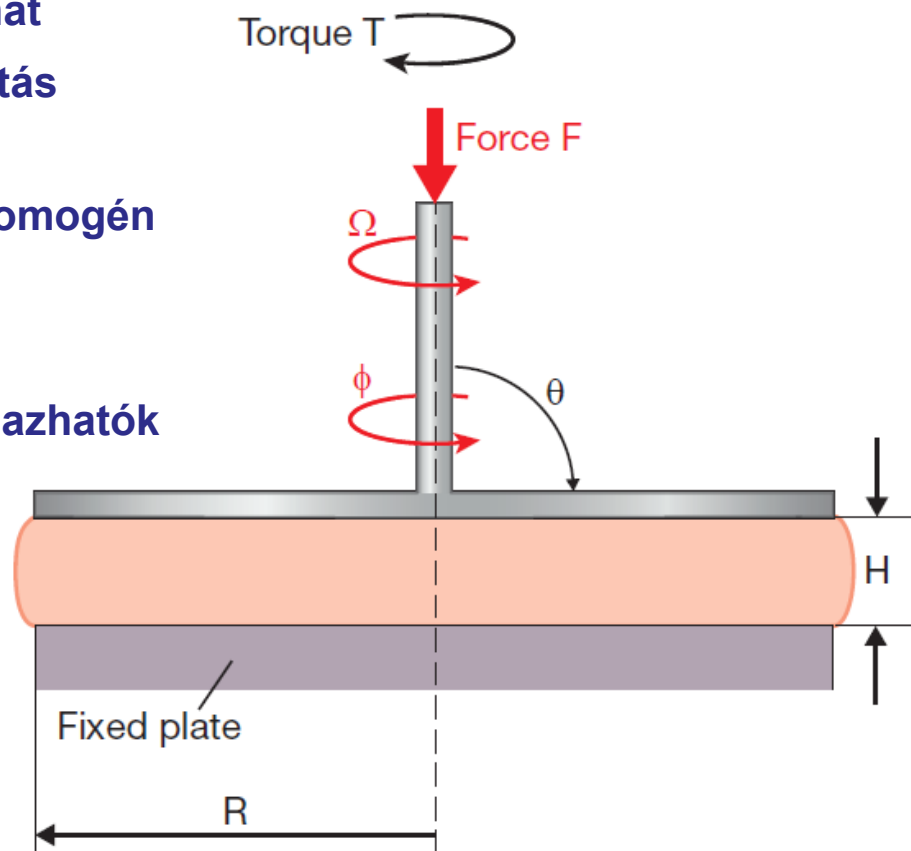
• Kúp-sík elrendezés

- Csak kis mennyiségű alapanyag szükséges a méréshez
- Egyszerű tisztítás
- A minta nem hajlamos levegősődésre
- Viszkózus anyagok és viszkoelasztikus anyagok mérésekor a megfelelő részméret beállása és a relaxáció időigényes
- A hőmérséklet gradiens nem állandó a mintában a növekvő részméret miatt

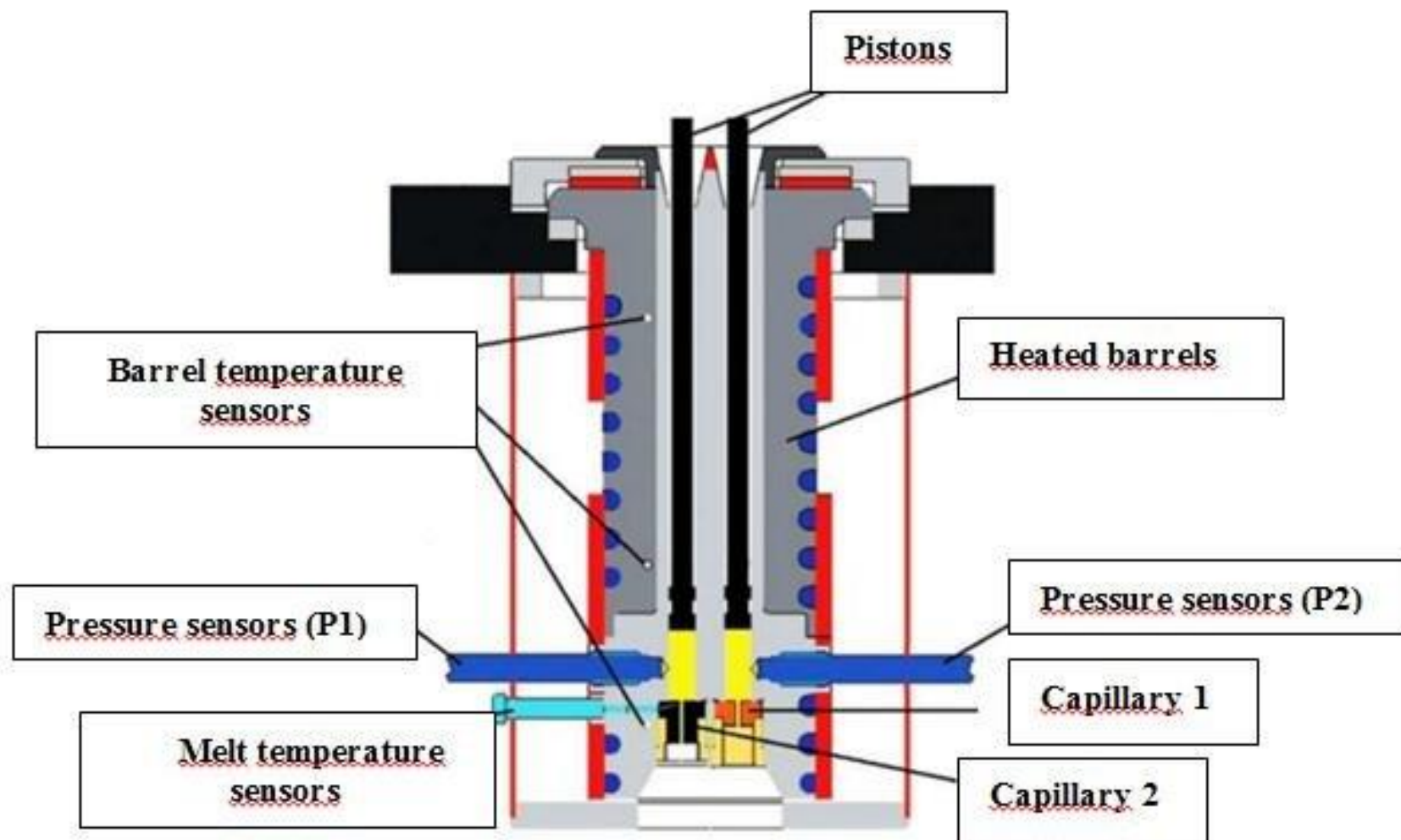


• Sík-sík elrendezés

- Alkalmas töltött anyagok mérésére is, jellemző töltőanyag méret $< H/5$
- A számított értékek kevésbé érzékenyek a résméret pontosságára
- Kis viszkozitású anyag mérésekor másodlagos áramlás, vagy turbulencia is kialakulhat
- Viszkoelasztikus anyagoknál instabilitás és tranziens effektusok léphetnek fel
- Géles és pasztaszerű anyagoknál inhomogén deformáció alakulhat ki
- Lényegesen kisebb relaxációs idő
- Struktúrált felületű mérőtestek alkalmazhatók az anyag megcsúszási hajlamnak csökkentésére
- Egyszer használatos mérőtestek is elérhetők (térhálós anyagok)
- Nagyobb hőmérséklet gradiensek a nagyobb minta vastagság miatt



- **Mérés kapillárisban – nagy nyomású módszer**



- Mérés kapillárisban – nagy nyomású módszer**

- Sebességeloszlás meghatározása**

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{\tau}{\eta}$$

- A falnál ébredő nyírófeszültség**

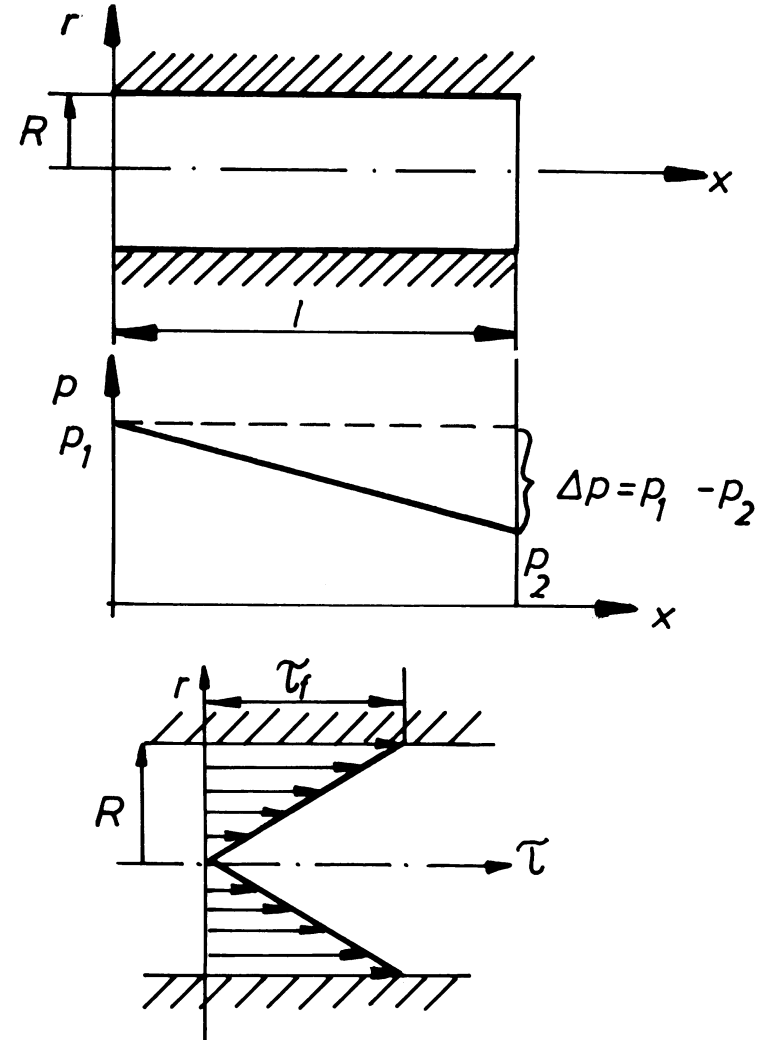
$$\tau_f = R \frac{\Delta p}{2l}$$

- Nyírófeszültség eloszlás**

$$\tau = r \frac{\Delta p}{2l}$$

- Behelyettesítés és integrálás után**

$$v(r) = -\frac{r^2 \Delta p}{4\eta l} + c$$



- Mérés kapillárisban – nagy nyomású módszer**

- $r=R$ helyen $v=0$, ebből

$$c = \frac{R^2 \Delta p}{4\eta l}$$

- Behelyettesítés után**

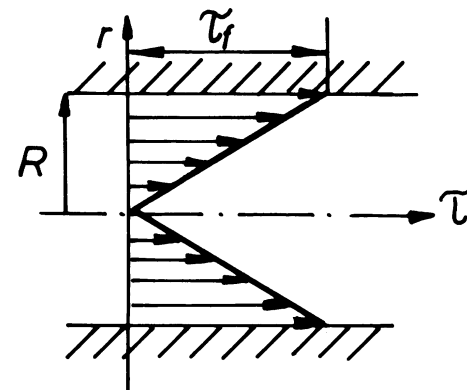
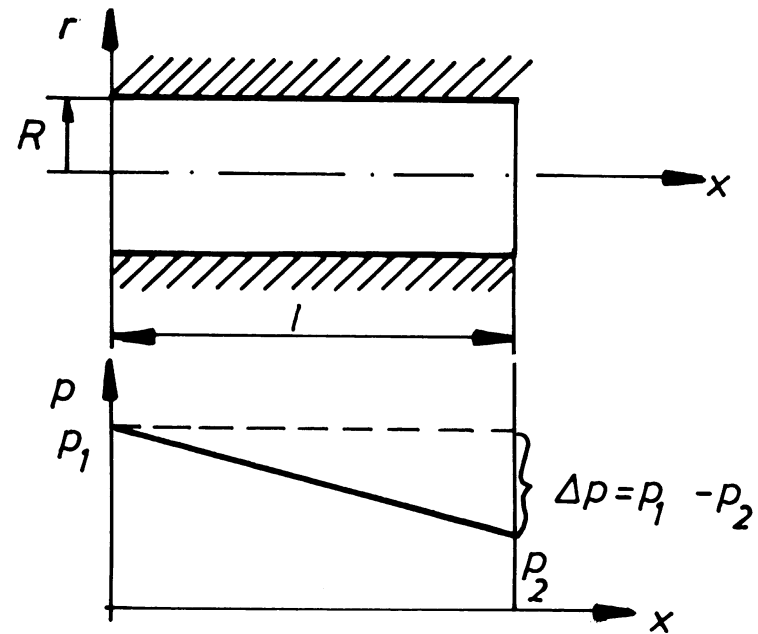
$$v(r) = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2)$$

- Ebből a térfogatáram**

$$d\dot{V} = v(r)dA \quad dA = 2r\pi dr$$

$$\dot{V} = \frac{\Delta p}{4\eta l} 2\pi \int_0^R r(R^2 - r^2) dr$$

$$\dot{V} = \frac{R^4 \pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{l}$$



- **Mérés kapillárisban – nagy nyomású módszer**

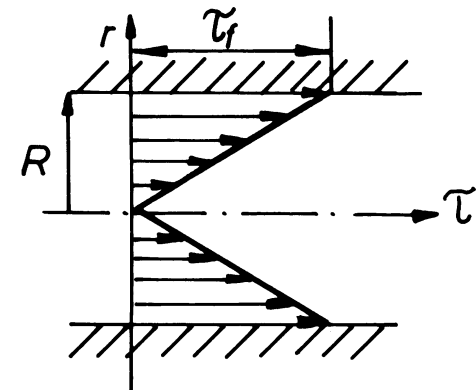
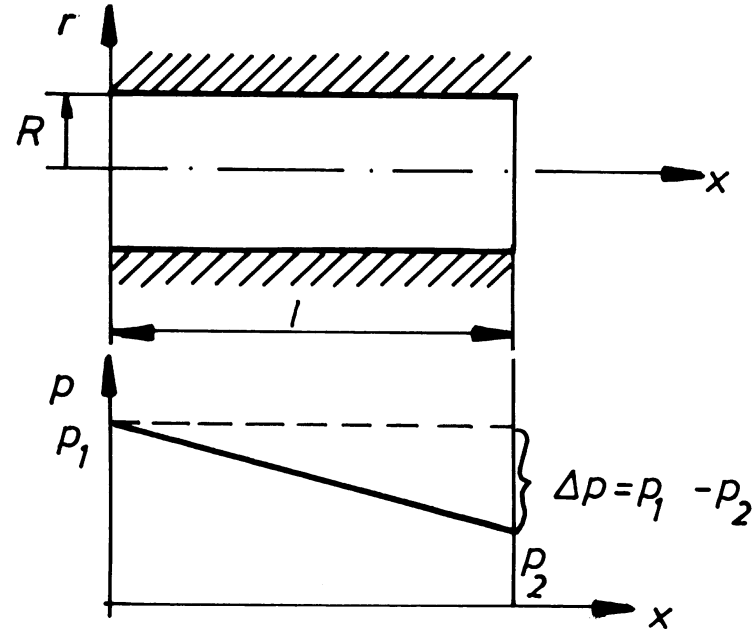
- Átrendezést követően a fal menti nyíró seb.

$$\dot{\gamma}_f = \frac{4\dot{V}}{R^3\pi}$$

- A levezetés hatványtörvényt követő esetre is elvégezhető, de...
- ... a választott modell befolyásolja a kapillárisban feltételezett sebesség eloszlást, így hatással van a fal menti nyírósebességre és így a számított viszkozításra is

➔ **Weissenberg-Rabinowitsch korrekció**

- A térfogatáram számítása során nem feltételezünk sebesség eloszlást, hanem parciálisan integrálunk



- **Mérés kapillárisban – nagy nyomású módszer**

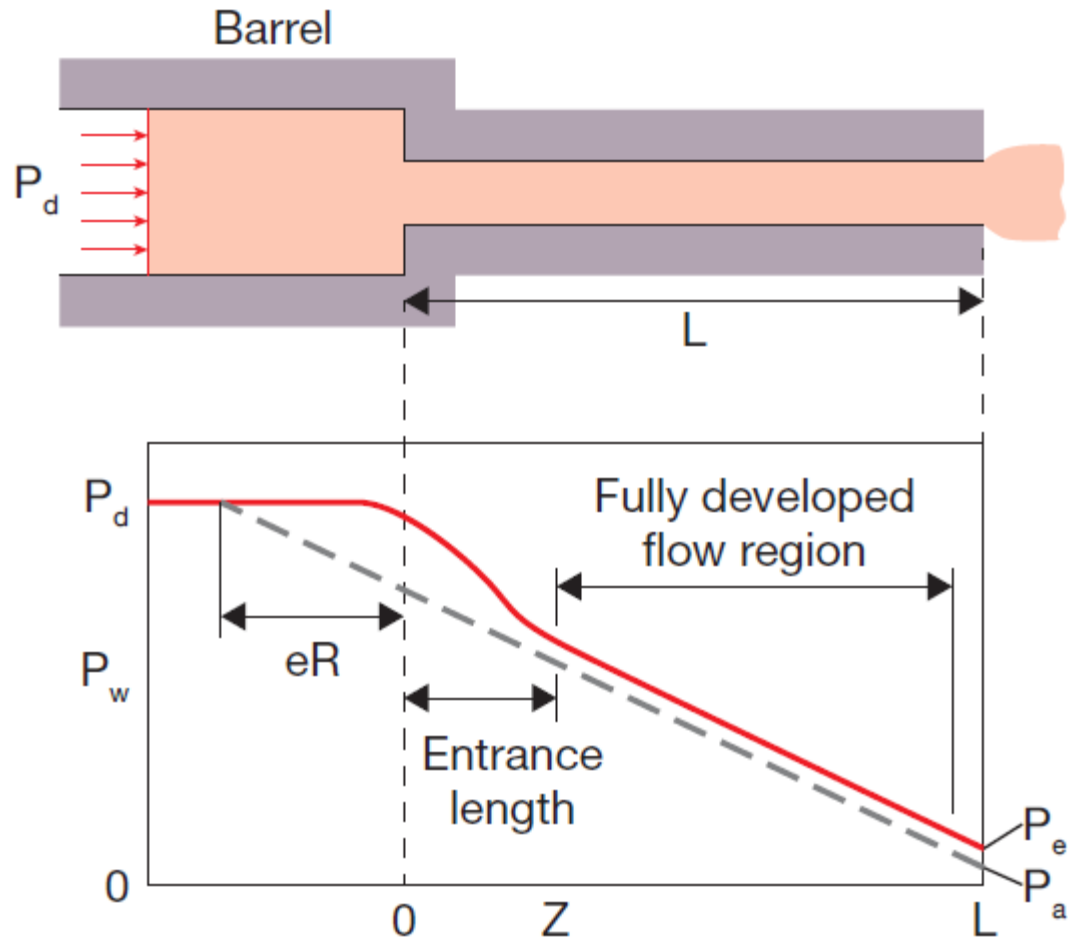
➔ **Weissenberg-Rabinowitsch korrekció**

- **A valós nyírósebesség a fal mentén**

$$\dot{\gamma}_f = \frac{4\dot{V}}{R^3\pi} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d(\log \dot{V})}{d(\log \Delta p)} \right)$$

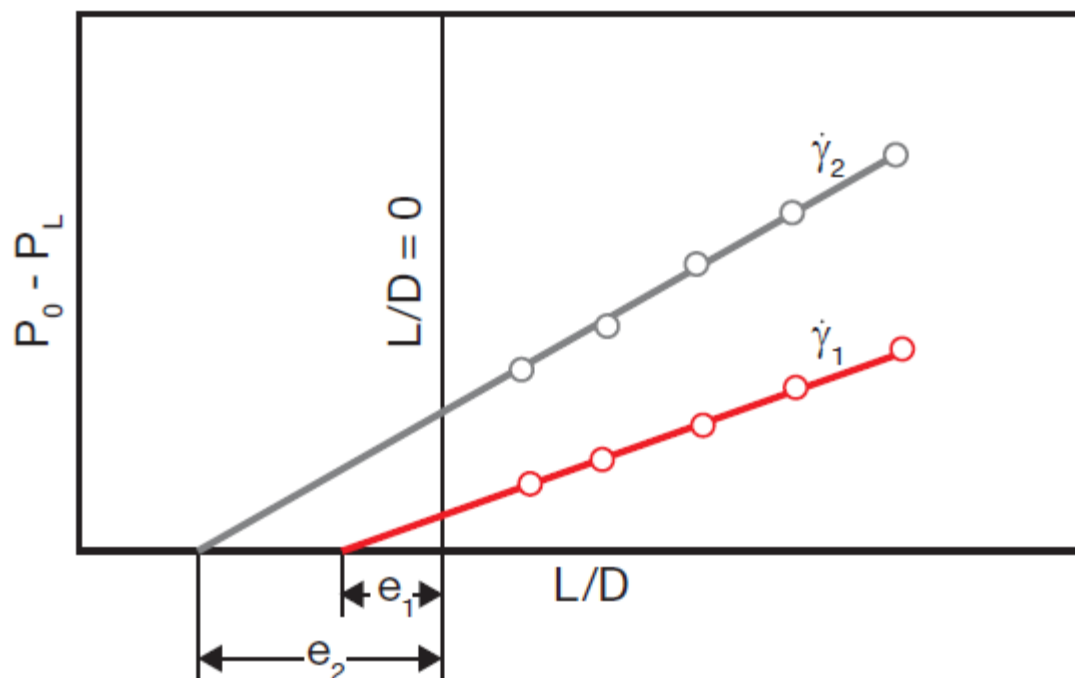
- **A newtoni folyadékoknál felírt összefüggés is megjelenik, így az azzal számított értéket látszólagos értéknek nevezik nem-newtoni esetben**

- **Mérés kapillárisban – nagy nyomású módszer**
 - Vizsgáljuk meg a nyomás alakulását a rendszerben



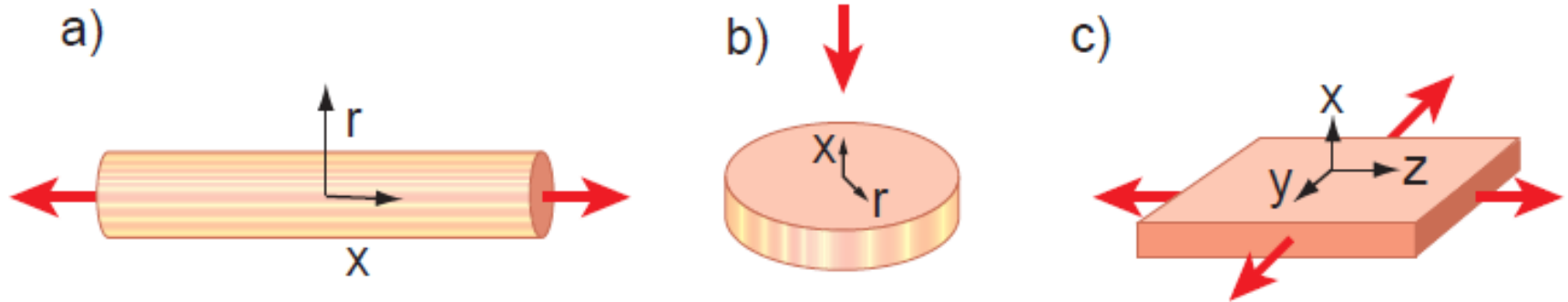
- **Mérés kapillárisban – nagy nyomású módszer**
 - **Vizsgáljuk meg a nyomás alakulását a rendszerben**
 - A kapillárisnak hosszúnak kellene lennie, így a belépési és kilépési hatások csökkenthetők → jelentős disszipáció, nem lesz állandó a hőmérséklet
 - Mérés több, rövidebb kapillárisal, korrekció → Bagley korrekció
 - **A korrekció nélküli értékeket látszólagos értéknek nevezik**

$$\tau_w = \frac{1}{2} \frac{(p_0 - p_L)}{(L/D + e)}$$



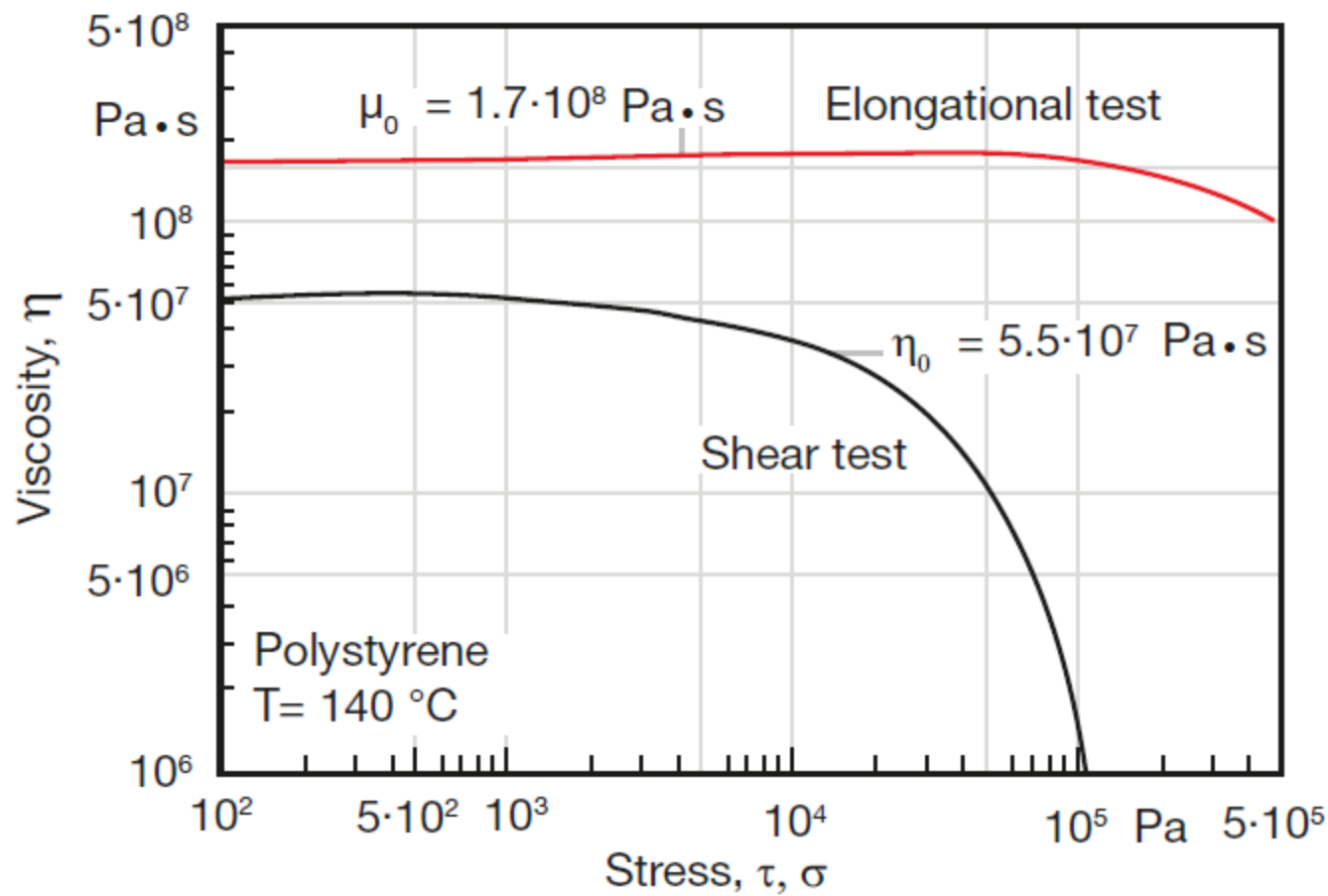
- **Az eddigiekben ismertetett eljárások nyíró igénybevétellel dolgoznak**
 - A polimerek másként reagálnak nyújtásra, mint nyírásra
 - A nyírás vizsgálatára fejlesztett berendezések kevésbé alkalmasak nyújtás vizsgálatára
 - A legkevésbé megértett terület a polimer reológiában, mivel a megfelelő mérőberendezések csak a 70-es évektől kezdve váltak elérhetővé
 - A nyújtás a domináns igénybevétel:
 - Fólia fúvásnál
 - Extrúziós fúvásnál
 - Termoformázásnál
 - Habképzésnél
 - Szálgyártásnál
 - Alakadó szerszámokban való áramlás során a jelentős keresztmetszet változásoknál

- Nyújtó viszkozitás, jellemző igénybevételi módok

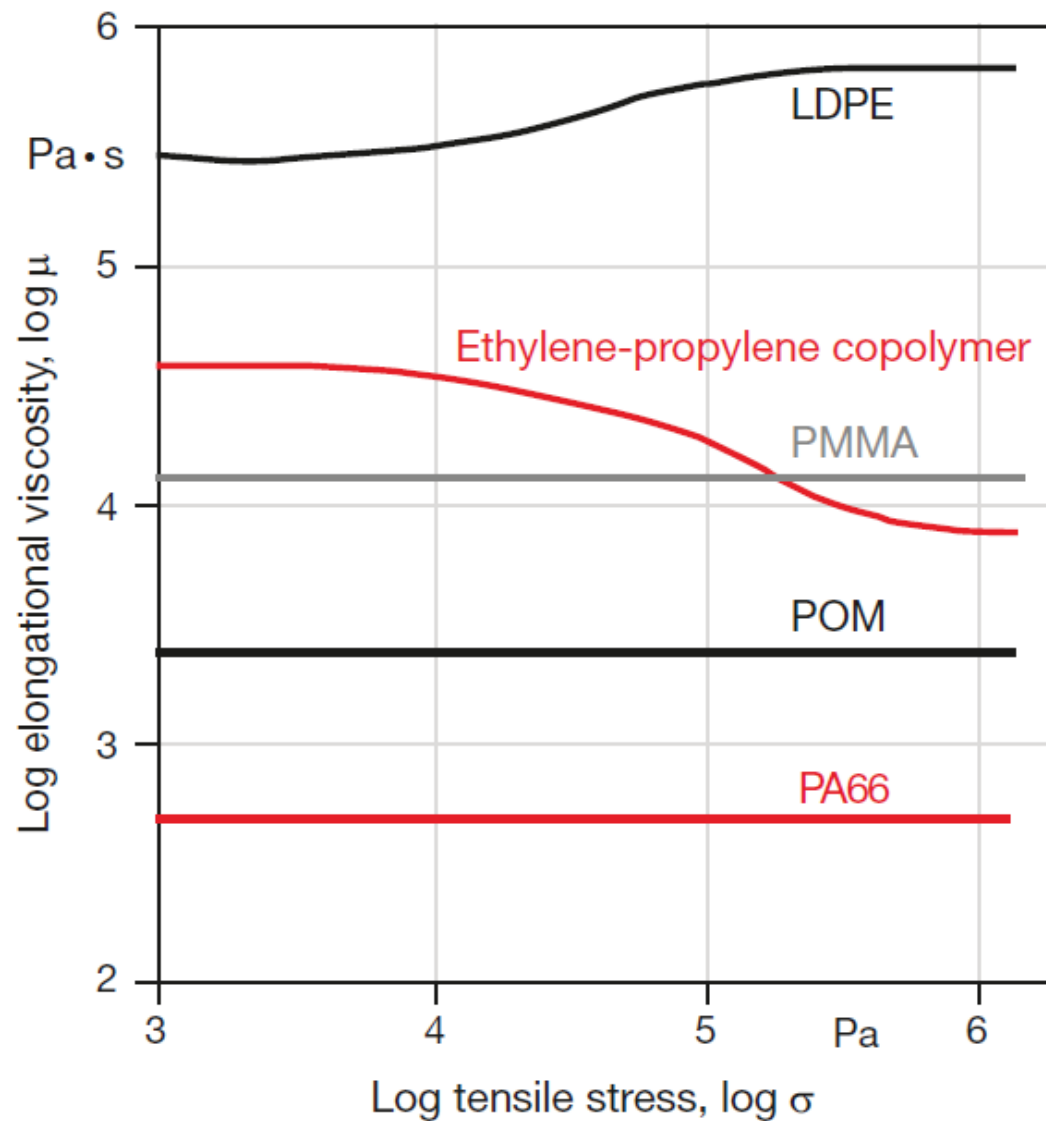


- a) filament nyújtása
- b) alapanyag préselése kör keresztmetszetű síklapok között
- a) lemez biaxiális nyújtása

- Szálhúzás

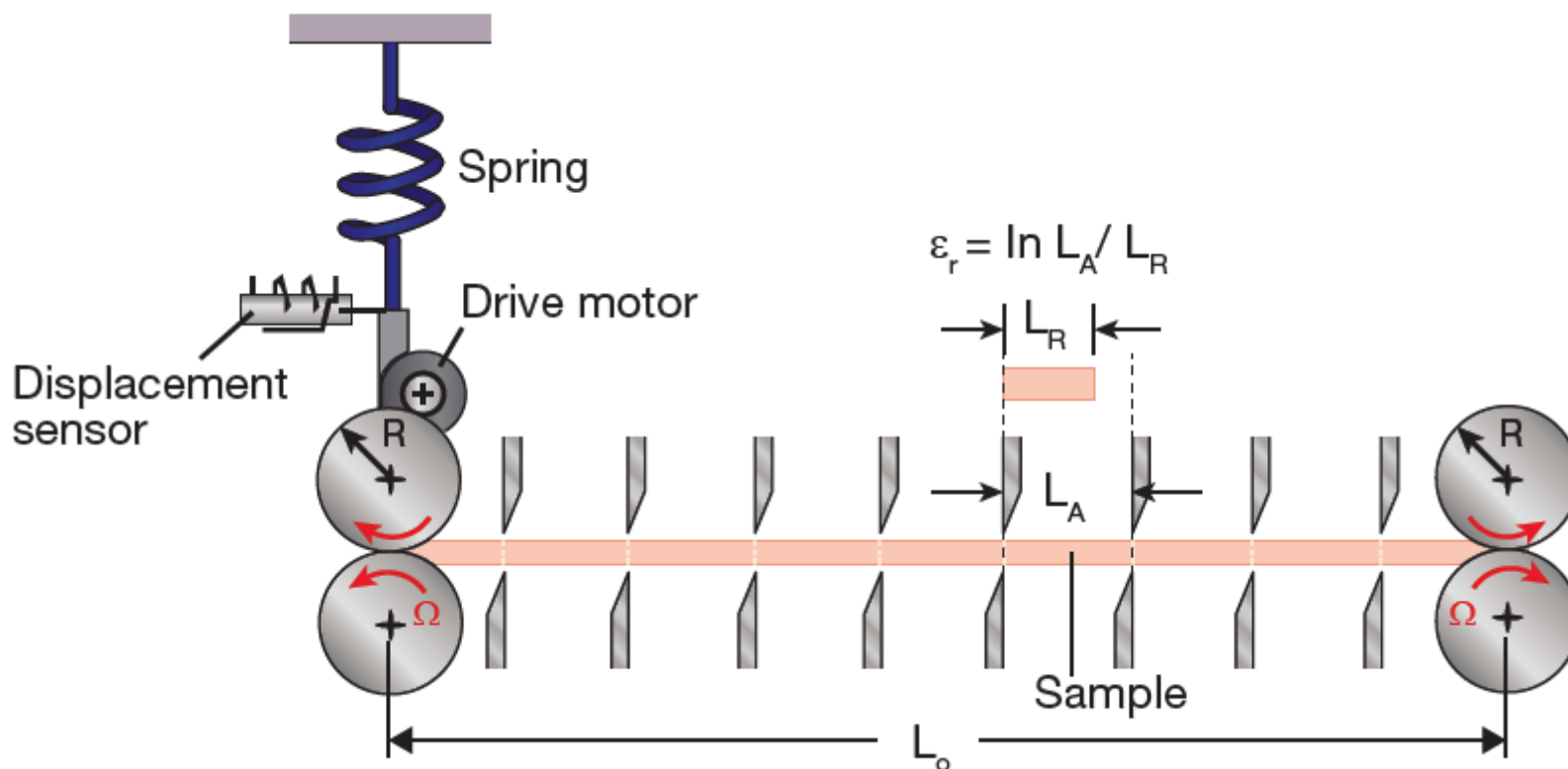


- Szálhúzás

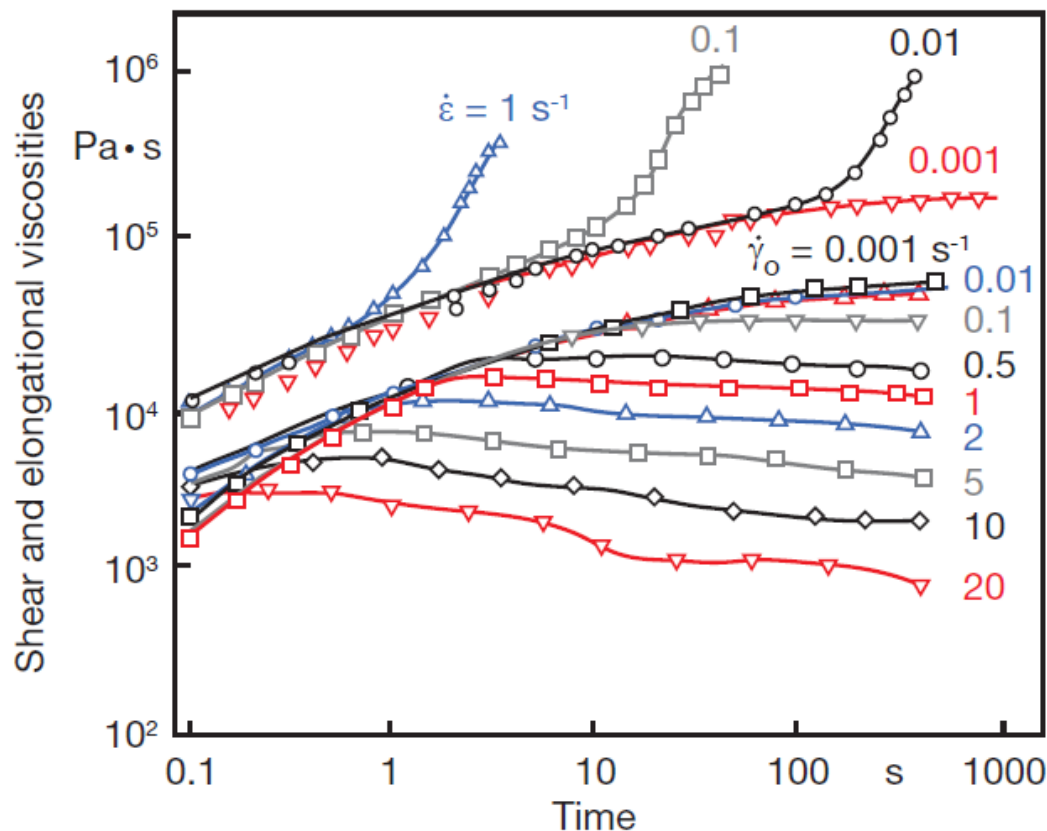


• Egytengelyű nyújtás

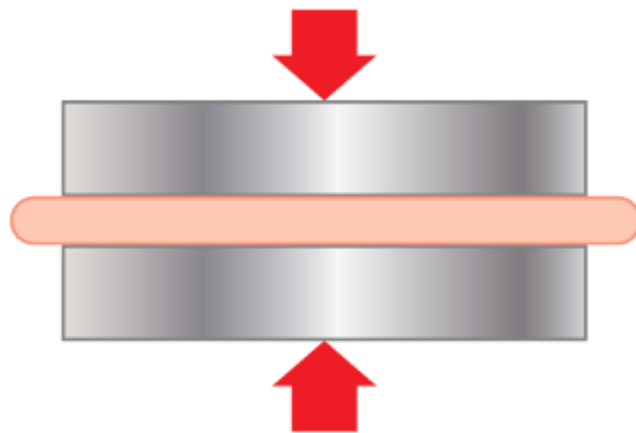
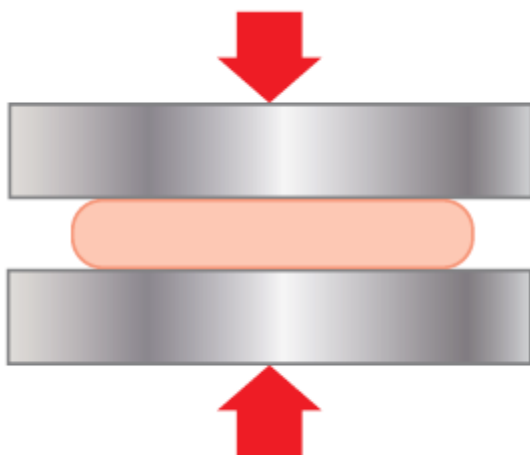
- Problémás a darab befogása, legtöbbször fogazott hengereket alkalmaznak
- Az állandó igénybevételi sebességhez a darabot exponenciálisan növekvő sebességgel kell nyújtani
- Nincs állandósult állapot, az eredmények időfüggők



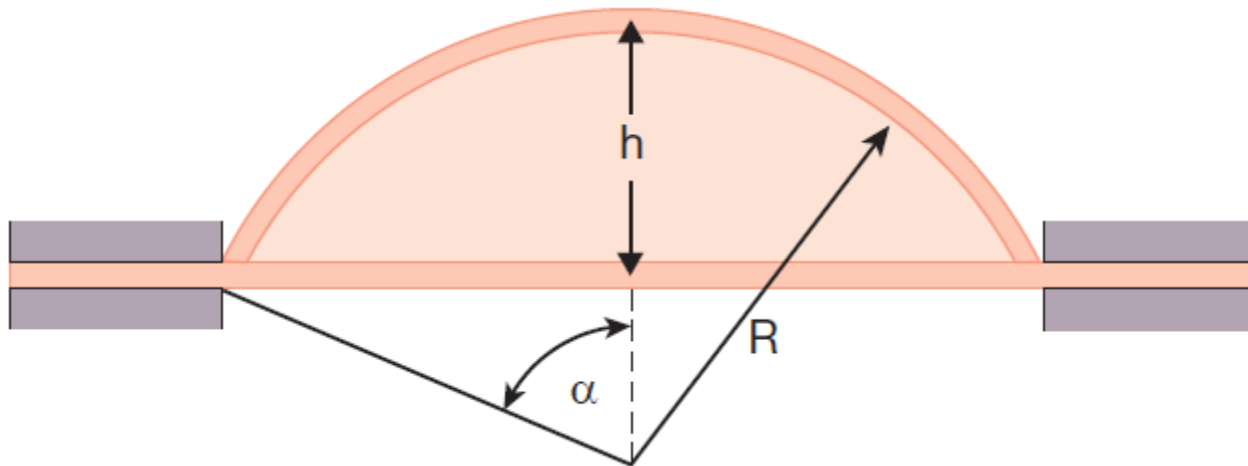
- Egytengelyű nyújtás
 - Az eredmények erősen függenek a polimer molekuláris szerkezetétől
 - Gyakran jelentkezik felkeményedés



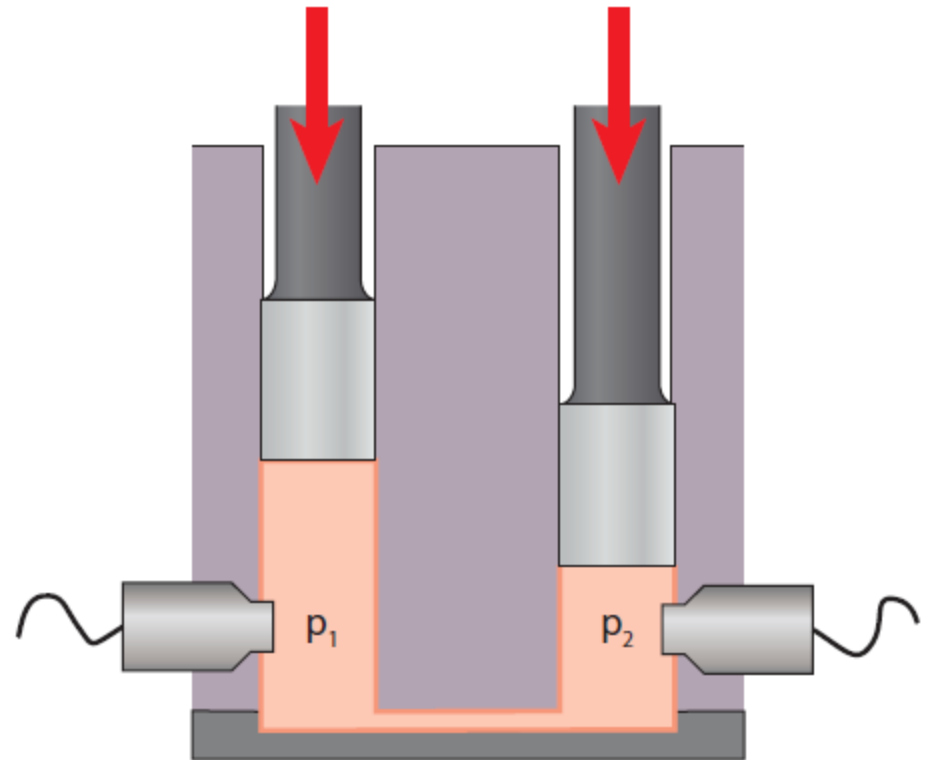
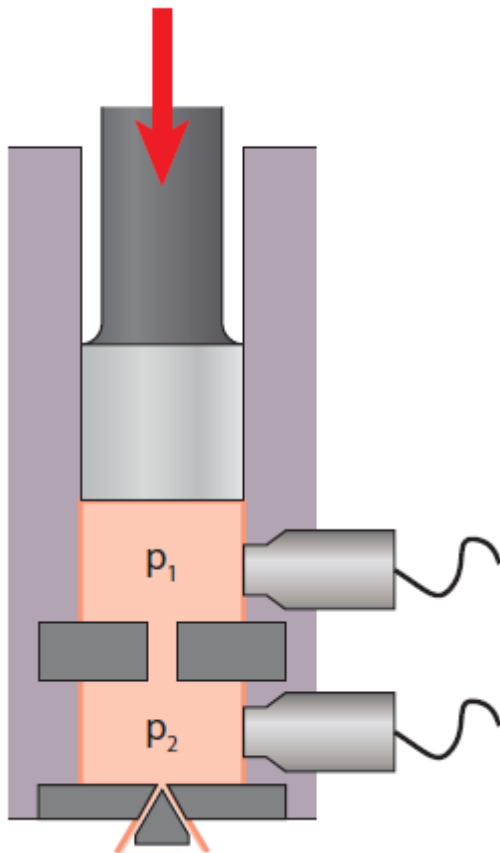
- **Préselés kör keresztmetszetű síklapok között**
 - Nincsenek befogási problémák
 - Az alapanyag és a szerszám közötti súrlódás minimalizálása → olajfürdő
 - Lényegesen kisebb orientáció, kevésbé érzékeny a szerkezetre
 - „Vékonyodó” jelleget mutat, jellemzően nagyobb igénybevételi sebességek mentén, mint nyíráskor



- **Biaxiális nyújtás**
 - **Buborék fújás**
 - **Körkörös befogás alkalmazása**
 - **A nyomásszükségletből és a buborék méreteiből számítható az igénybevételi sebesség és a feszültség**
 - **A vastagság térfogatállandóság feltételezéséből származtatható**



- A nyomás hatásának vizsgálata



- Szerszámba épített nyomásmérő szenzorok

