

Polimerek reológiája és szimulációs technikái (BMEGEPTNG02)



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK



Szabó Ferenc

2023

- **Kreditérték: 5 kp**
- **Félévzárás: szóbeli vizsga – jelenléti formában**
 - (MS Teams-es szóbeli vizsga esetén hang és video kapcsolatot fogok kérni!)
- **Megajánlott vizsga jegy: Fakultatív ZH ???, Mikor???**
- **Év végi jegy: 70% vizsga + 30% félévközi házi feladat**
- **Kiméret: heti 2 EA, 2 Labor gyakorlat**
- **Aláírás megszerzésének feltétele: Részvétel a laborgyakorlatokon (min. 80%) és a félévközi házi feladat prezentálása (min. 50%)**

- **Előadások helye, ideje: T200, hétfő 12-14 óra**
- **(((Az előadások meghallgatása kötelező (70%))))**

Hét	Óraszám			Dátum	Előadás (T200)
	E	G	L		
1	2	-	0	2023.02.27-03.03	Bevezetés, félévi követelmények ismertetése
2	2	-	2	2023.03.06-03.10	A polimerek reológiai tulajdonságai
3	2	-	2/0	2023.03.13-03.17	A polimerek feldolgozása és a reológia
4	2	-	2	2023.03.20-03.24	A kontinuummechanika alapjai
5	2	-	2	2023.03.27-03.31	Megmaradási egyenletek
6	2	-	2	2023.04.03-04.07	Reometria
7	0	-	0	2023.04.10-04.14	- Húsvét hétfő, kedd, szerda szünet
8	2	-	2	2023.04.17-04.21	Vendégelőadás – Heizer Bálint, Anton Paar Hungary Kft.
9	2	-	2	2023.04.24-04.28	Reológiai állapotegyenletek és fizikai állapotegyenletek
10	2	-	2	2023.05.01-05.05	A fröccsöntésszimuláció alapjai Hétfő ünnepnap, pénteken hétfői munkarend
11	2	-	2	2023.05.08-05.12	Az alapanyag áramlás modellezése
12	2	-	2	2023.05.15-05.19	A hűtési folyamat modellezése, zsugorodás, vetemedés, orientáció
13	2	-	2	2023.05.22-05.26	Vendégelőadás –eCon Engineering Kft.
14	0	-	0/2	2023.05.29-06.02	- Hétfő ünnepnap

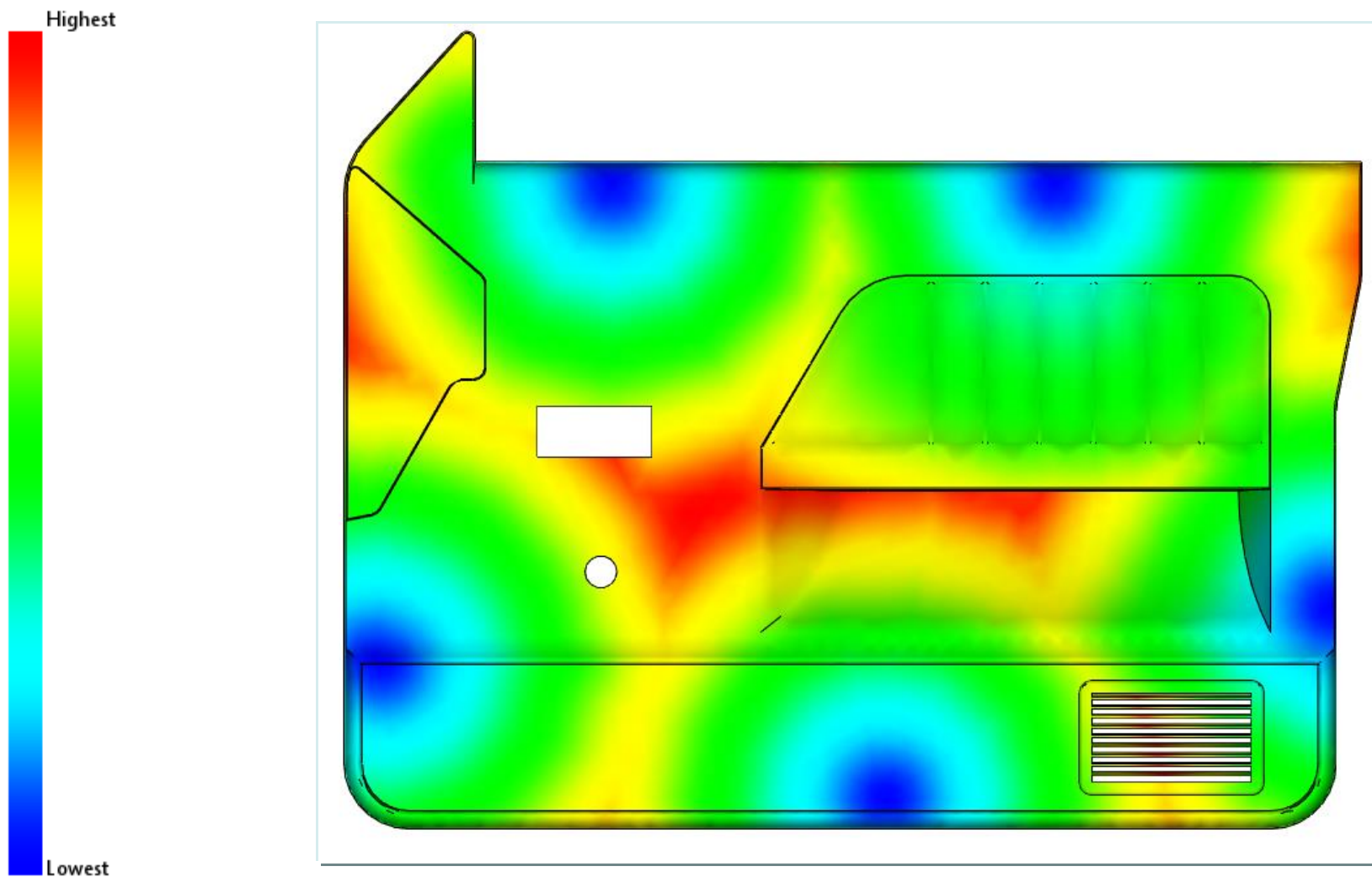
- **Laborgyakorlatok helye: T201, MT labor (Reológiai mérések)**
- **Az első héten nem tartunk laborokat**
- **A félév első részében szimulációs alapok, majd mérés és adatillesztés, az utolsó kb. 3 héten konzultáció**
- **Laborgyakorlatok időpontjai**
 - **Hétfő: 14-16, 16-18.**
 - **Szerda: (12-14), 14-16.**
 - **(Csütörtök: 12-14, 16-18.)**
- **A laborgyakorlatokon való részvétel (80%) az aláírás megszerzésének feltétele**
- **Laborgyakorlatok pótlása: nincs kiírt pótalkalom**
- **Gépterem: 12 számítógép, a hétfő 14-es csoportban nincs szabad hely**
- **A gépekre bejelentkezéshez saját azonosító**

- **Ütközés ???**
- **Ünnepnapok – laborok elmaradása**
- **Konzultációs lehetőségek**
- **Moldflow és Moldex3D szoftverek**
- **Az aláírással rendelkezőknek nem kötelezőek a laborok**
- **Laborvezetők:**
 - **L1 – Szabó Ferenc**
 - **L2 – Héri-Szuchács Anna**
 - **L3 – ☹**
 - **L4 – Zink Béla**
 - **L5 – ☹**
 - **L6 – ☹**
 - **+ Gere Dániel, Török Dániel**

Hét	Óraszám			Dátum	Labor (T201/MT labor)
	E	G	L		
1	2	-	0	2023.02.27-03.03	-
2	2	-	2	2023.03.06-03.10	A Moldflow/Moldex3D kezelésének alapjai, importálás, modell kezelés, fóliák kezelése.
3	2	-	2/0	2023.03.13-03.17	Végeselemes háló létrehozása, hálózási hibák típusai, hálózási hibák javítása. <u>Házi feladat kiadása.</u> Szerdai labor elmarad, március 15.
4	2	-	2	2023.03.20-03.24	Alapanyag tulajdonságok, alapanyag választás. Kitöltés szimuláció. <u>Házi feladat kiadása.</u>
5	2	-	2	2023.03.27-03.31	Gát kereső algoritmus, technológiai ablak meghatározása.
6	2	-	2	2023.04.03-04.07	Elosztórendszerek és hűtőkörök modellezése, az utónyomási és hűtési fázis szimulációja.
7	0	-	0	2023.04.10-04.14	- Húsvét hétfő, kedd, szerda szünet
8	2	-	2	2023.04.17-04.21	Zsugorodás és vetemedés számítása. Szerszámbetétek modellezése, szerszámblokk építése.
9	2	-	2	2023.04.24-04.28	Reológiai mérések (MT labor)
10	2	-	2	2023.05.01-05.05	Reológiai mérések adatsorainak kompenzációi. Adatillesztés, az alapanyag adatbázis kezelése. Hétfő ünnepnap, pénteken hétfői munkarend
11	2	-	2	2023.05.08-05.12	Házi feladatok konzultációja.
12	2	-	2	2023.05.15-05.19	Házi feladatok konzultációja.
13	2	-	2	2023.05.22-05.26	Házi feladatok prezentálása/ házi feladatok konzultációja.
14	0	-	0/2	2023.05.29-06.02	Házi feladatok prezentálása. Hétfő ünnepnap

- **Min. 50% elérendő, végső jegy meghatározásánál súlyozottan számít**
- **Szóbeli prezentáció, 5 + 2 perc**
- **Egyszerűsített ipari példa**
- **Mindenki eltérő modellt kap a munkához**
- **A kiírásban szereplő elvárásoknak való megfelelés nem opcionális!**
- **Hálózási hibák javítása**
- **Szimulációs modellek építése**
- **Gát keresés, technológiai ablak vizsgálata**
- **Alapanyag választás**
- **Elosztórendszer építése, vizsgálata**
- **Hűtőrendszer tervezése, vizsgálata**
- **Zsugorodások, vetemedések vizsgálata**
- **Eredményekből prezentáció készítése**
- **Az eredmények prezentációja (Várhatóan jelenléti formában)**

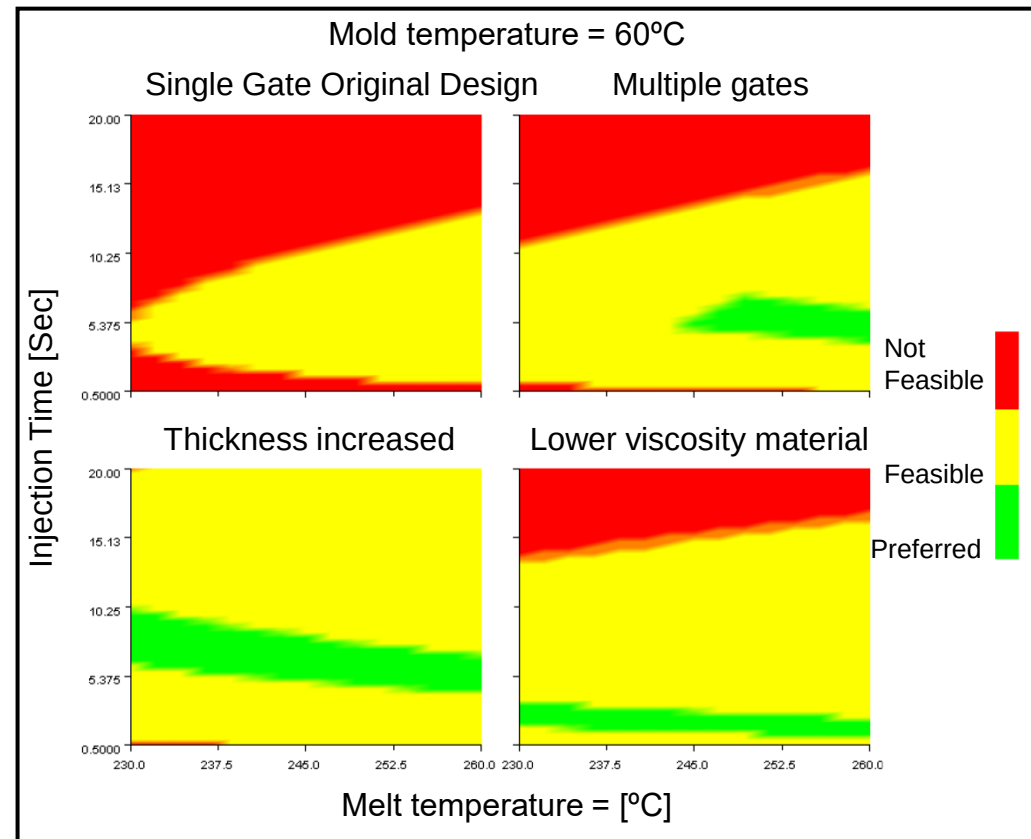
- Folyási ellenállás → Várható fröccsnyomás



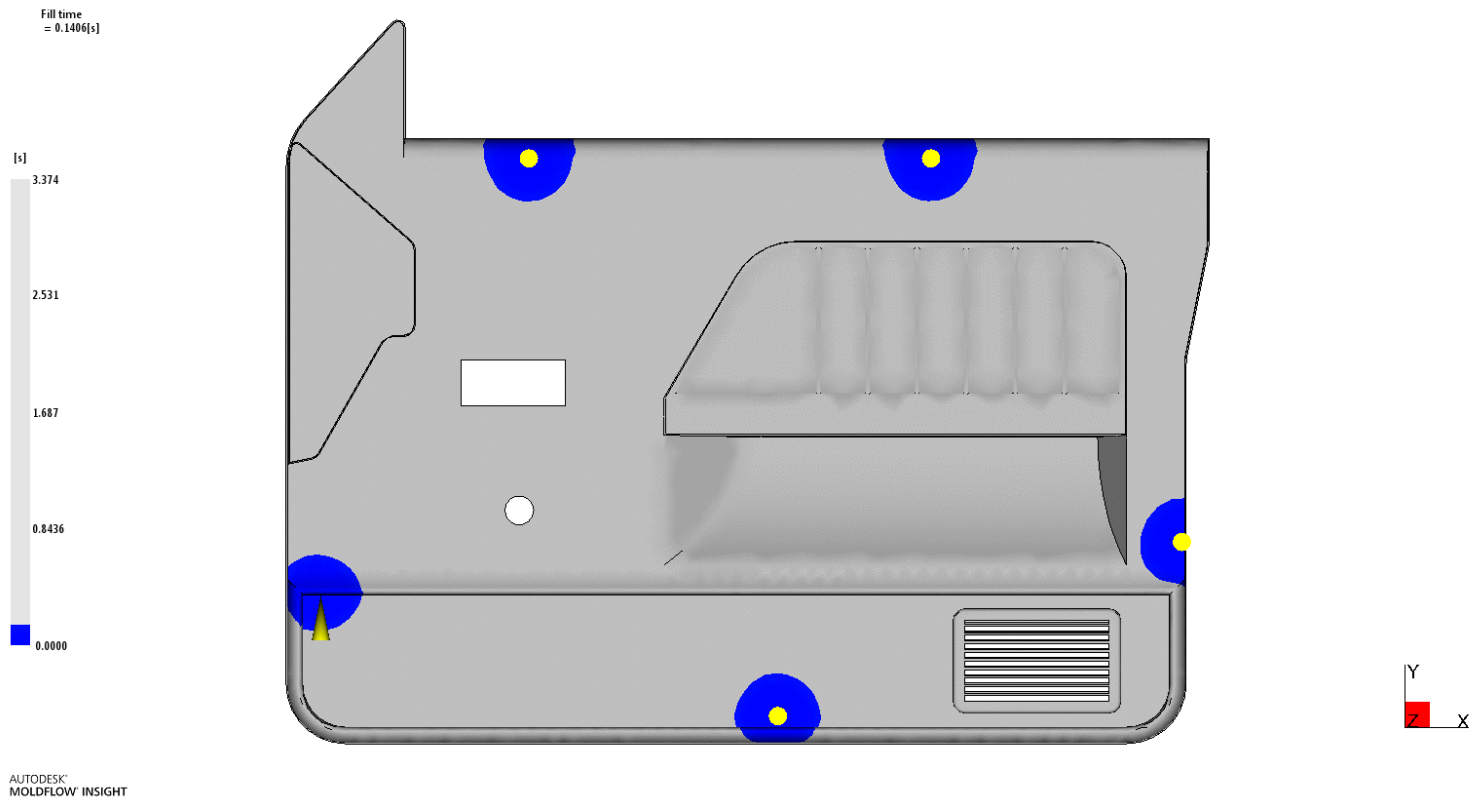
- Várhatóan milyen határok között választhatók meg a technológia legfőbb paramétereit

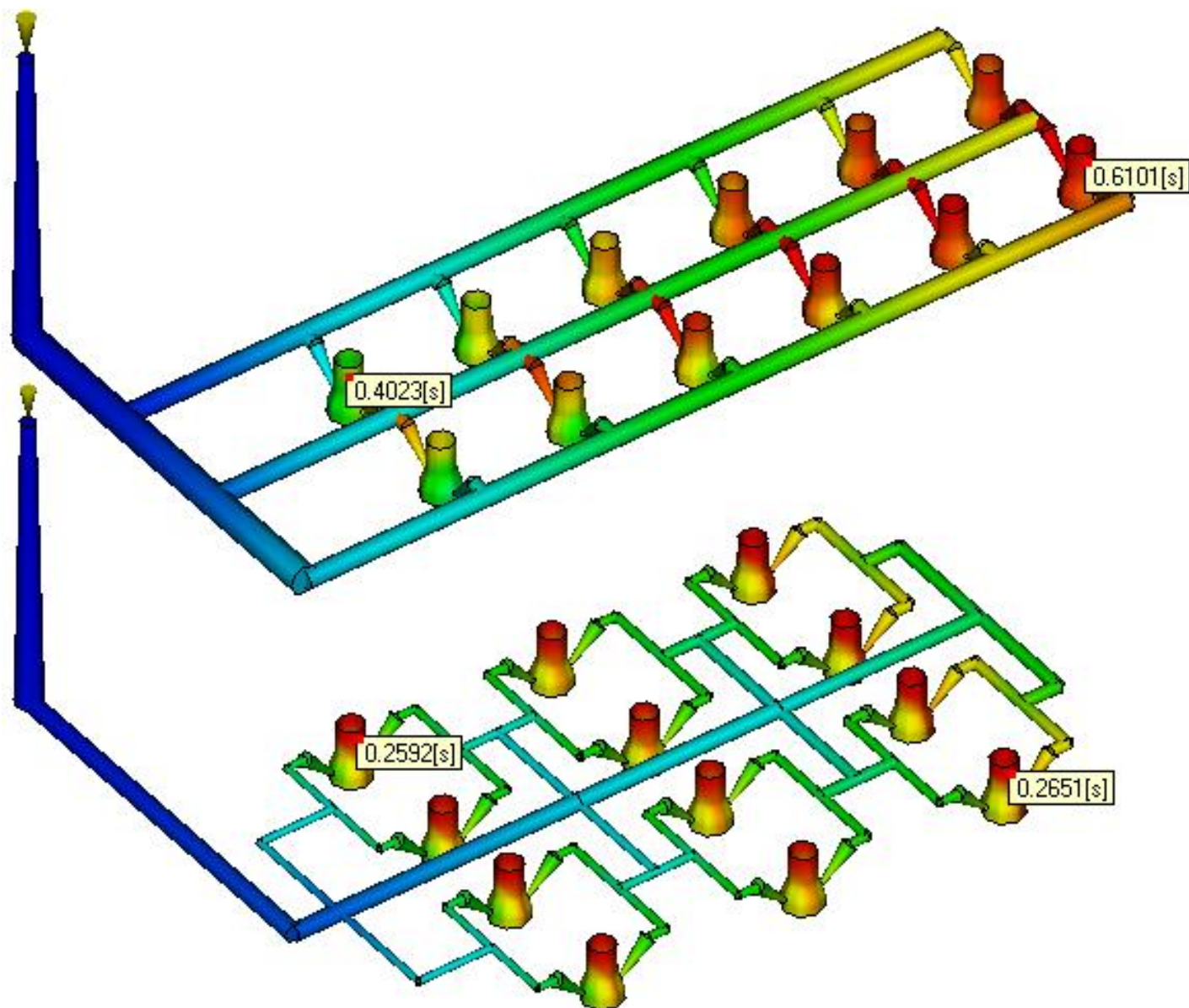


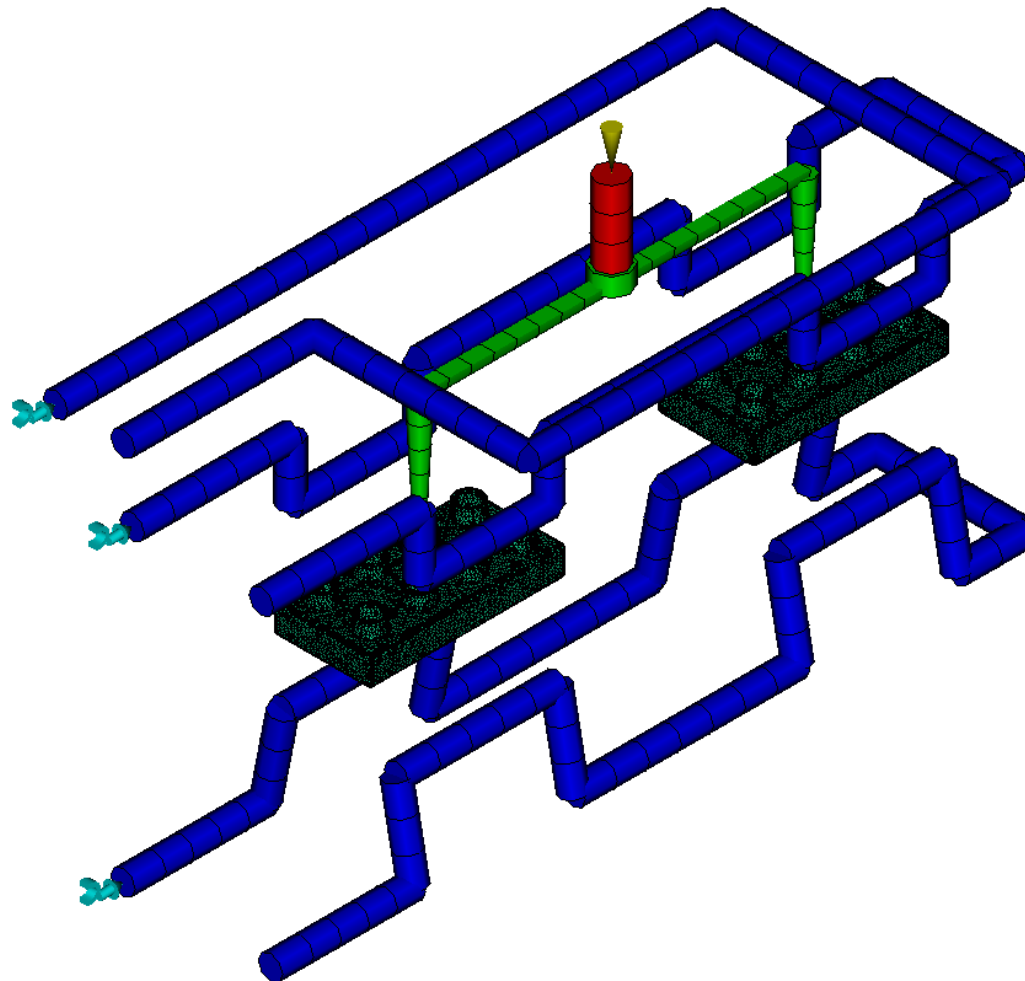
Scale (1000 mm)



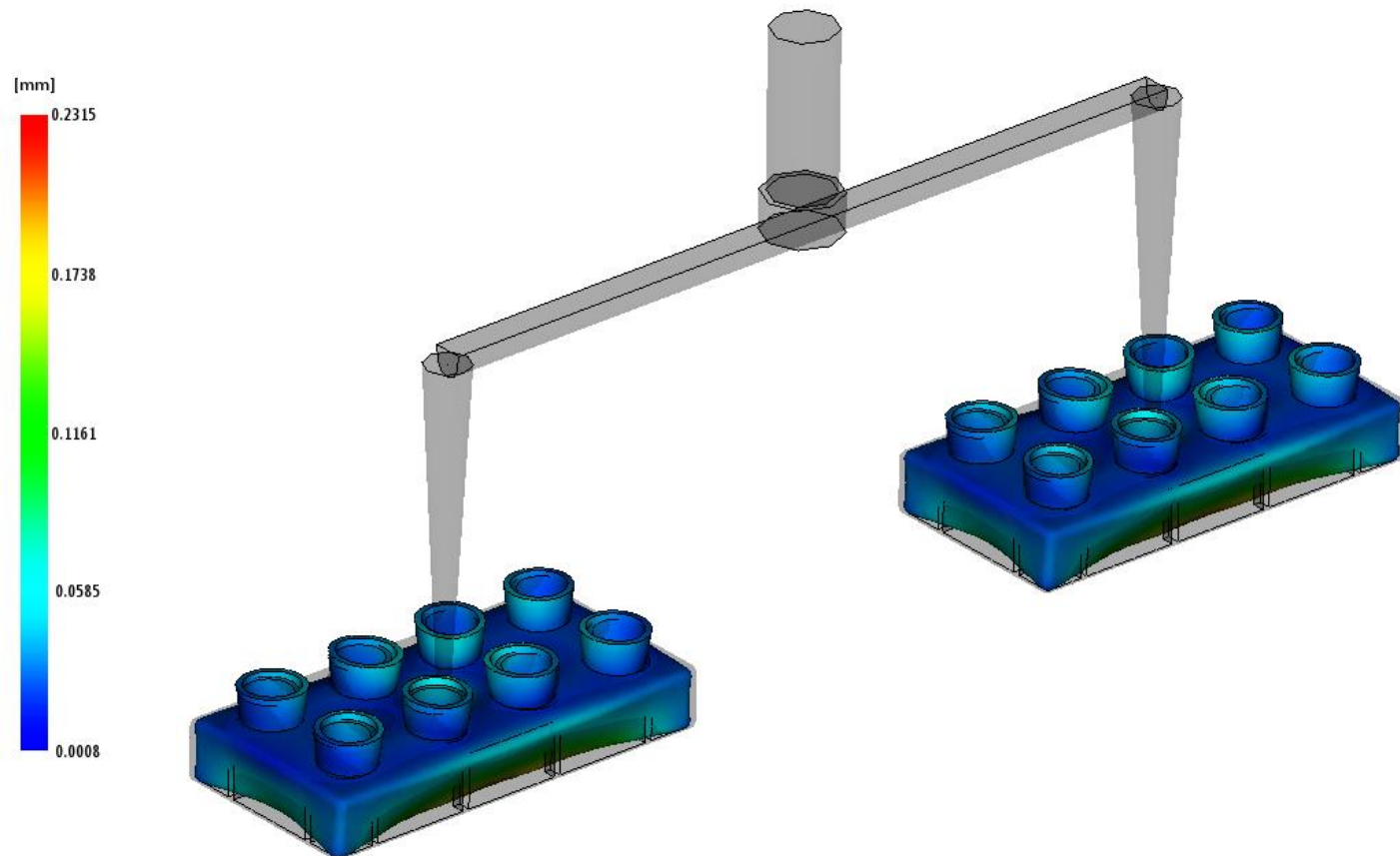
- Hiányos termék, hezitáció, egyenetlen töltődés, összecsapások, légbezáródás







- Zsugorodott/vetemedett alak számítása
- ➔ Geometria optimálás, falvastagságok, elődeformált szerszámgeometria, technológiai paraméterek hatása, alapanyag hatása, orientációs hatások



- **Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimerteknika alapjai. Műegyetemi kiadó, Budapest, 2000.**
- **Halász L., Molnár I., Mondvai I.: A polimerek feldolgozásának reológiai alapjai. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.**
- **Tim A. Osswald, Natalie Rudolph: Polymer Rheology Fundamentals and Applications. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014.**
- **Kennedy P., Zheng R.: Flow Analysis of Injection Molds - 2nd Edition. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013.**
- **Fridtjov Irgens: Rheology and Non-Newtonian Fluids, Springer International Publishing Switzerland 2014.**
- **Chang Dae Han: Rheology and Processing of Polymeric Materials, Volume 1: Polymer Rheology, Oxford University Press, Inc., 2007.**

A reológia könyvekkel Dunát lehetne rekeszteni, de ...

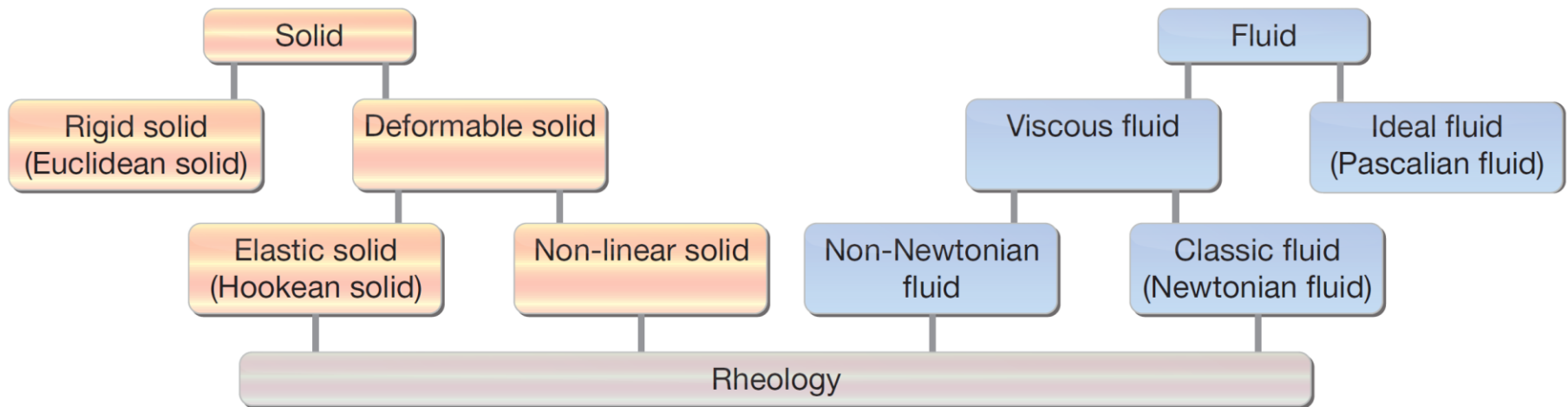
- Az anyagok deformációjával, folyásával, azok feszültségekkel való összefüggésével foglalkozik.
- Reometria: Reológiai anyagjellemzők mérése
- Simplicius és Heraclitus: “Πάντα ῥεῖ” (Panta rei), minden folyik



Eugene Bingham, 1929

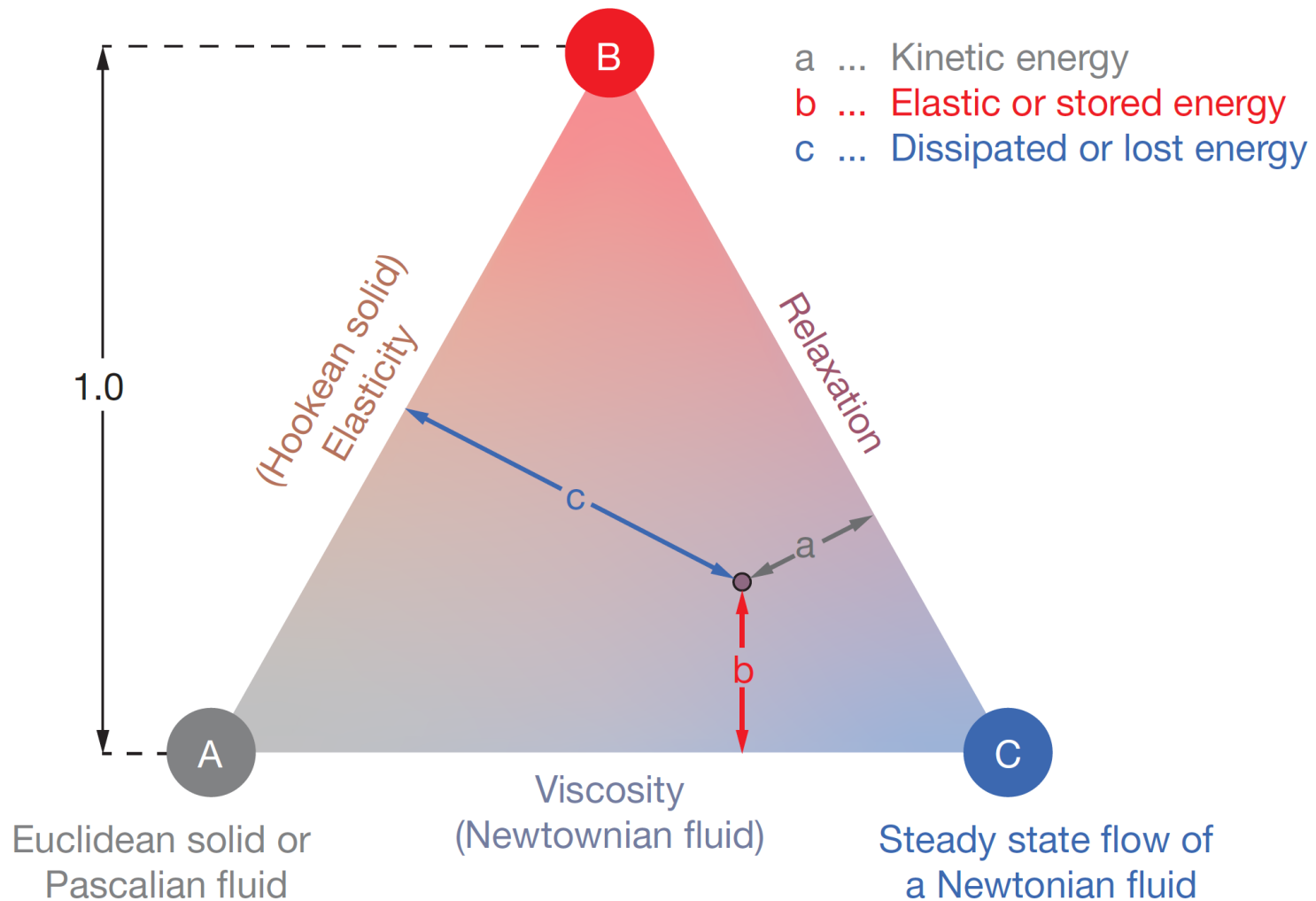
Society of Rheology

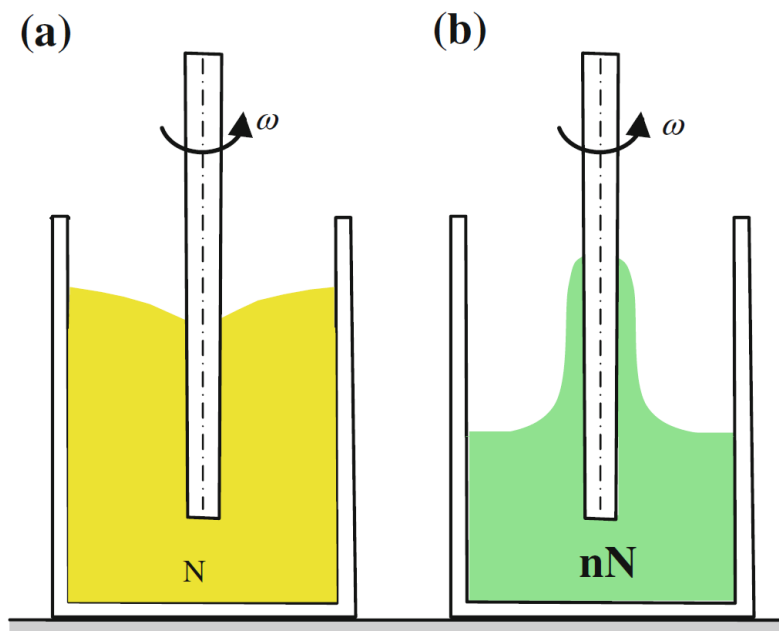
- **Pascal, 1663, Ideális folyadékok**
- **Hooke, 1678, Elaszticitás**
- **Newton, 1687, Viszkózus folyadékok**
- **Navier, 1820, Navier-Stokes összefüggés, Newtoni folyadékok áramlása**
- **Hagen, 1839, Az első kapilláris reométer**
- **Stokes, 1851, Ejtősúlyos viszkoziméter**
- **Maxwell, 1867, Viszkoelaszticitás**
- **Couette, 1886, Nyíró áramlás koncentrikus hengerek között**
- **Trouton, 1905, Nyíró és nyújtó viszkozitás közötti összefüggés**
- **Einstein, 1906, Szuszpenziók viszkozitásának modellezése**
- **Bingham, 1916, Folyáshatárral rendelkező folyadék**
- **Williams, Landel, Ferry, 1955, Hőmérséklet-idő szuperpozíció**
- **Cross, 1965, Nyírásra vékonyodó folyadékok, Newtoni platóval**



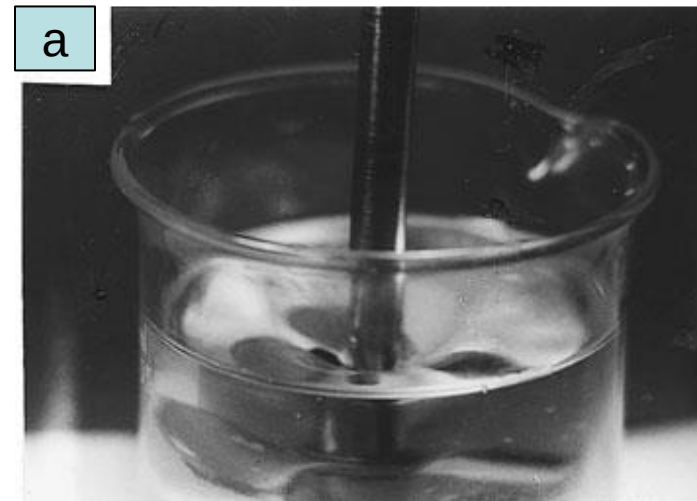
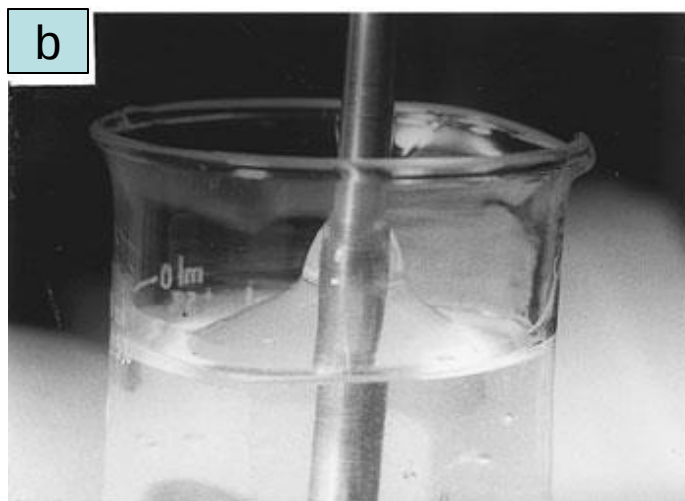
Kontinuum mechanika

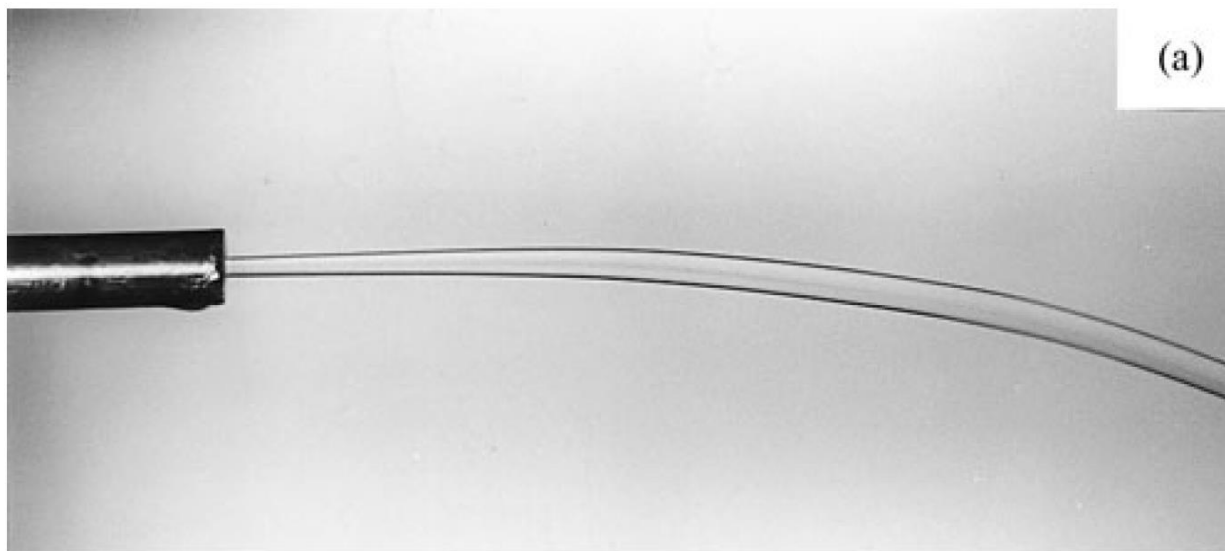
Áramlástan





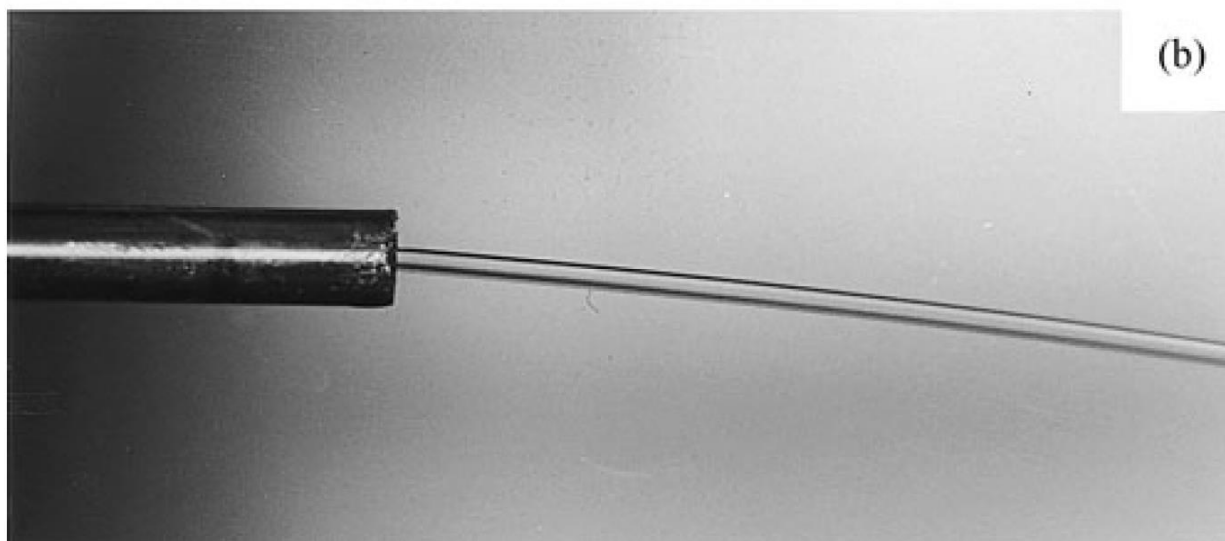
- a) Newtoni folyadék
- b) nem Newtoni folyadék





(a)

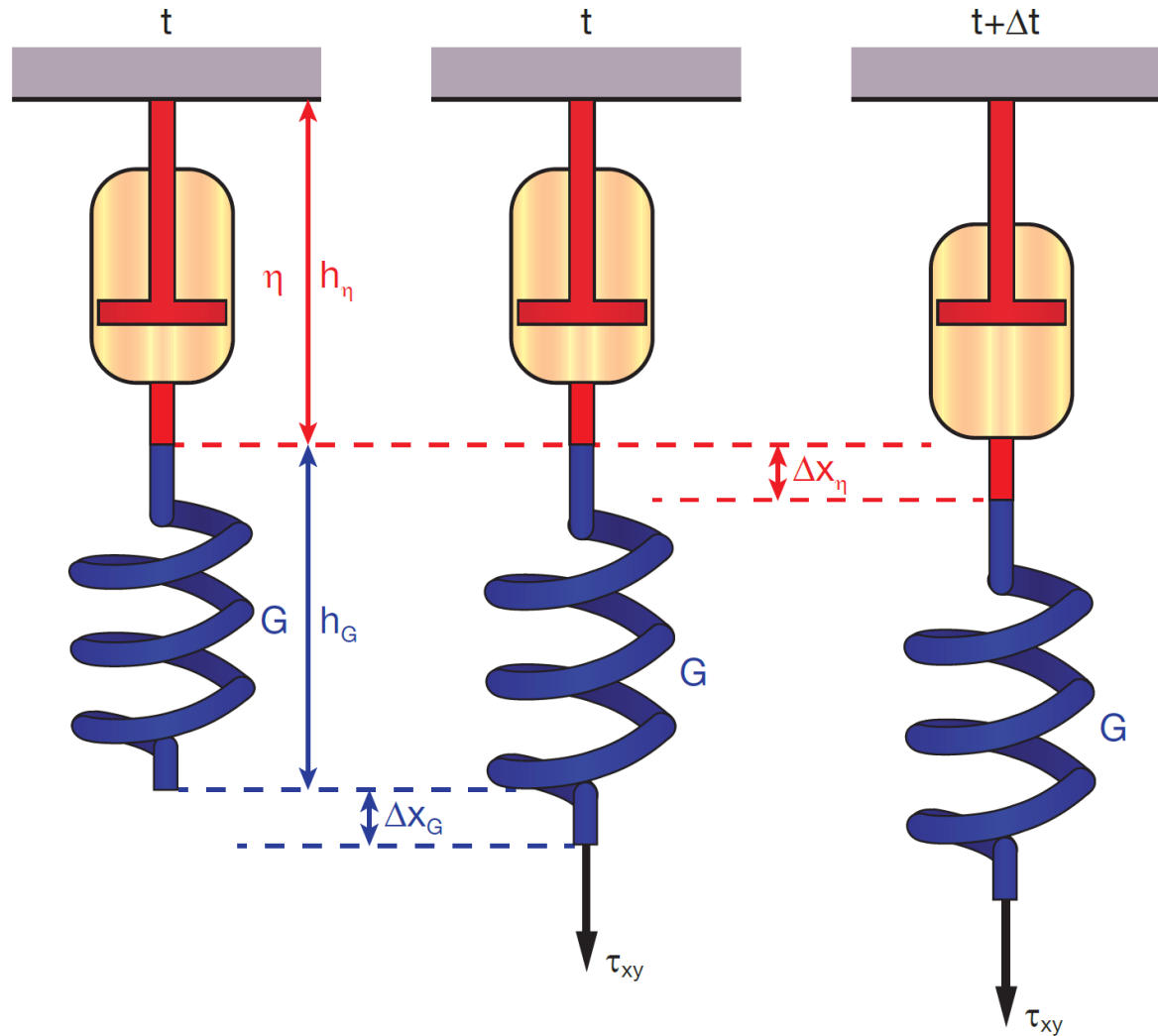
a) Poliakrilimid oldat

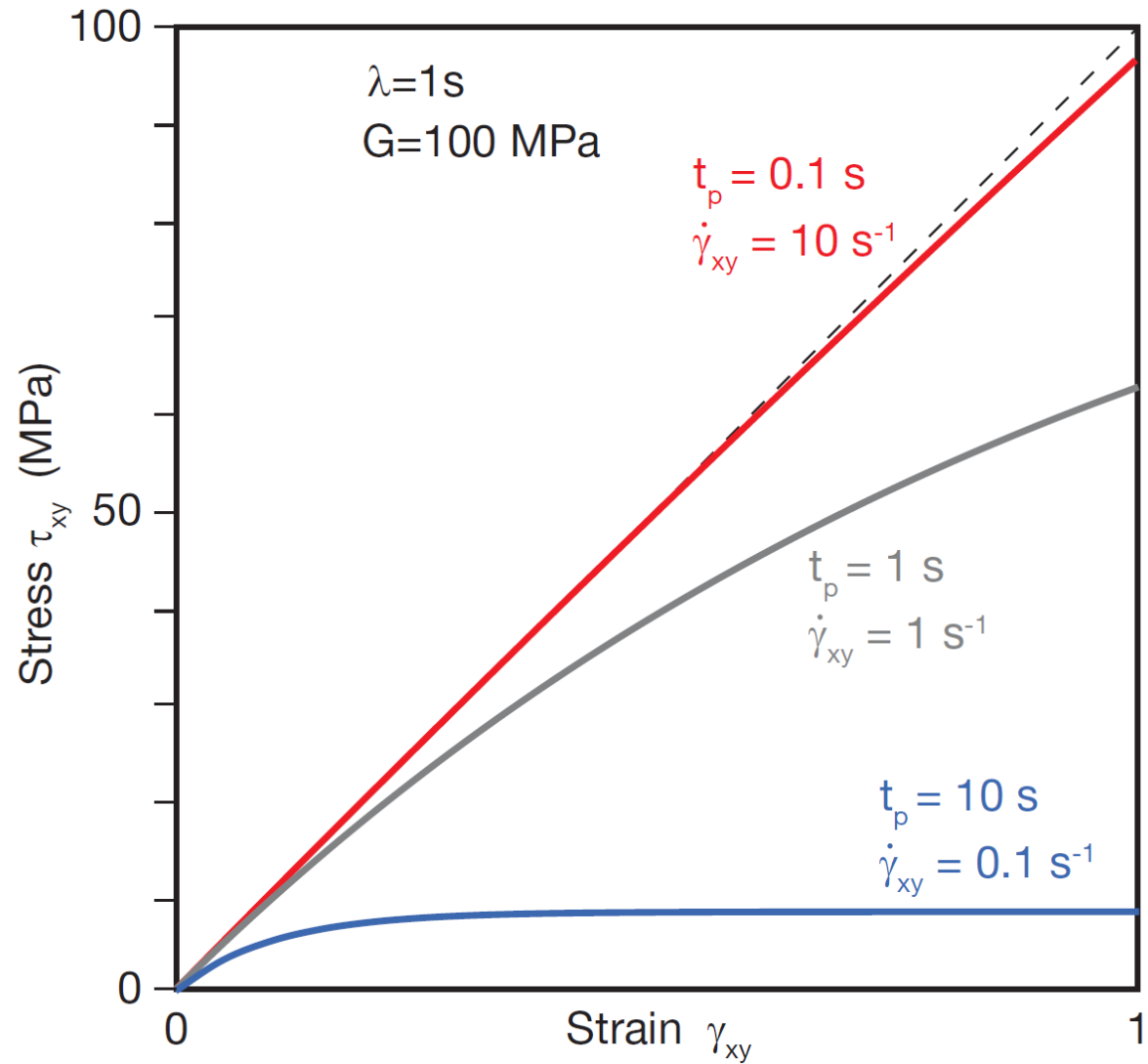


(b)

b) Glicerín

- **Gépzsírok viselkedése**
 - <https://www.youtube.com/watch?v=6RzuW954fno>
- **Keményítő vizes diszperziója**
 - <https://www.youtube.com/watch?v=tvRc4BAYtsk>





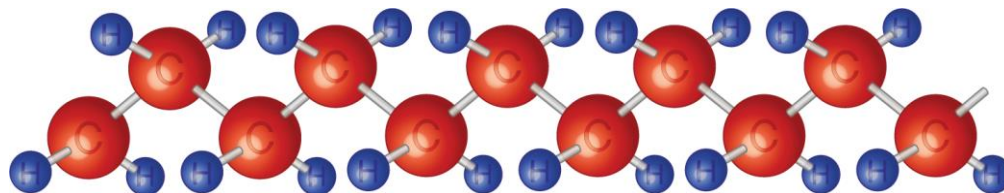
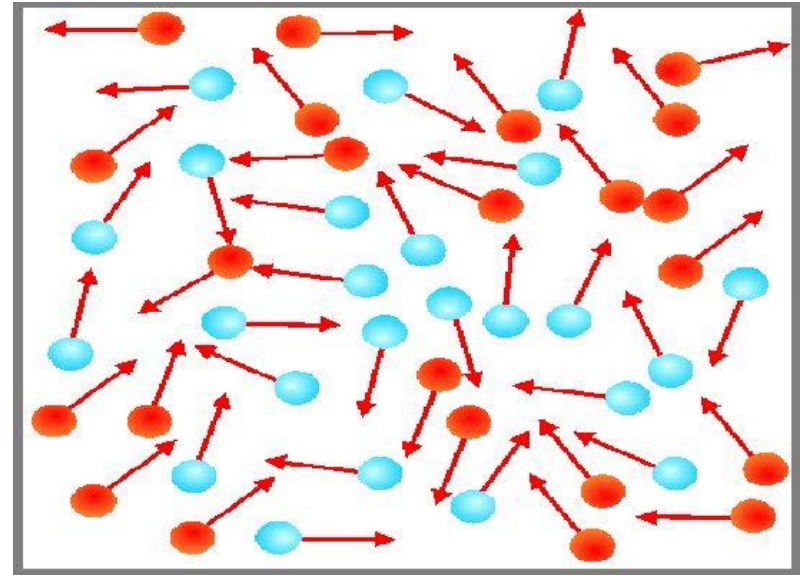
- Reiner, 1964

$$De = \frac{\lambda}{t_p}$$

- A folyamatra jellemző időállandó vs a megfigyelés időtartama
- Tisztán elasztikus esetre: $\lambda = \infty$
- Tisztán viszkózus esetre: $\lambda = 0$
(víz: $\lambda = 10^{-12}$ s)
- Minden folyik, csak idő kérdése...



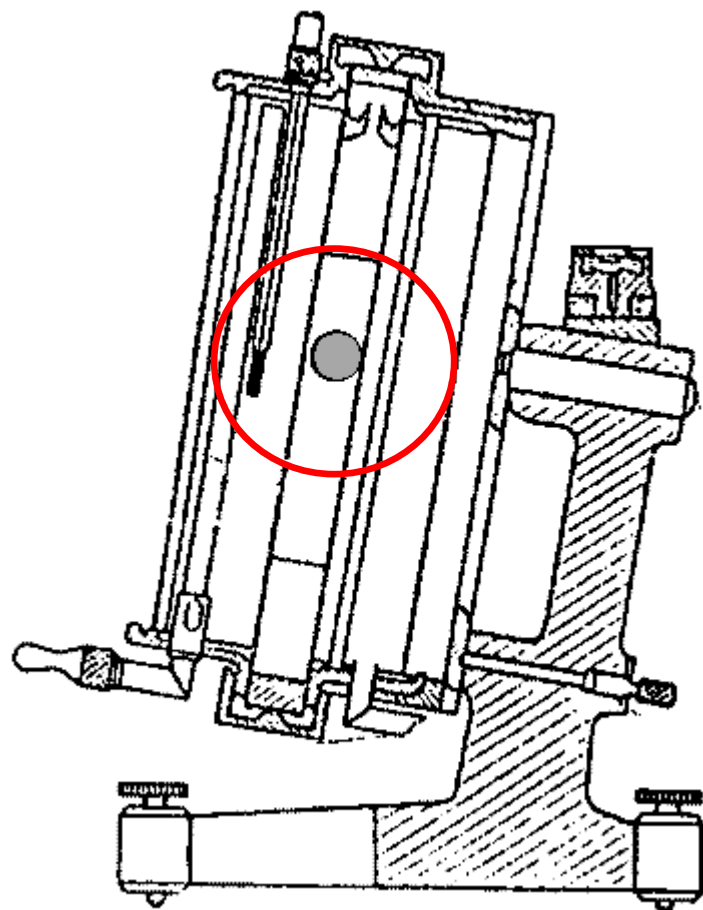
- **Viszkozitás: Belső súrlódás**
- **Gázok: (Hőmérséklet függés?)**
- **Folyadékok: (Hőmérséklet függés?)**
- **Polimerek: (Hőmérséklet függés?)**



- **Víz?**
- **Méz?**
- **Polimer?**
- **Ablaküveg?**

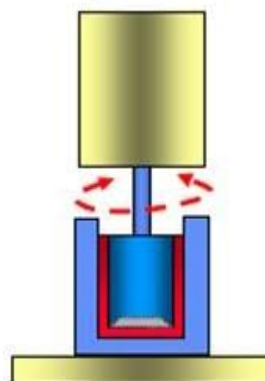






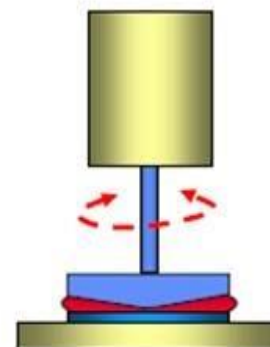


Concentric
Cylinders



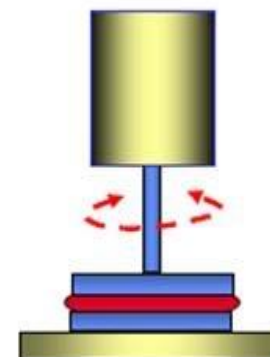
Very Low to
Medium
Viscosity

Cone and
Plate

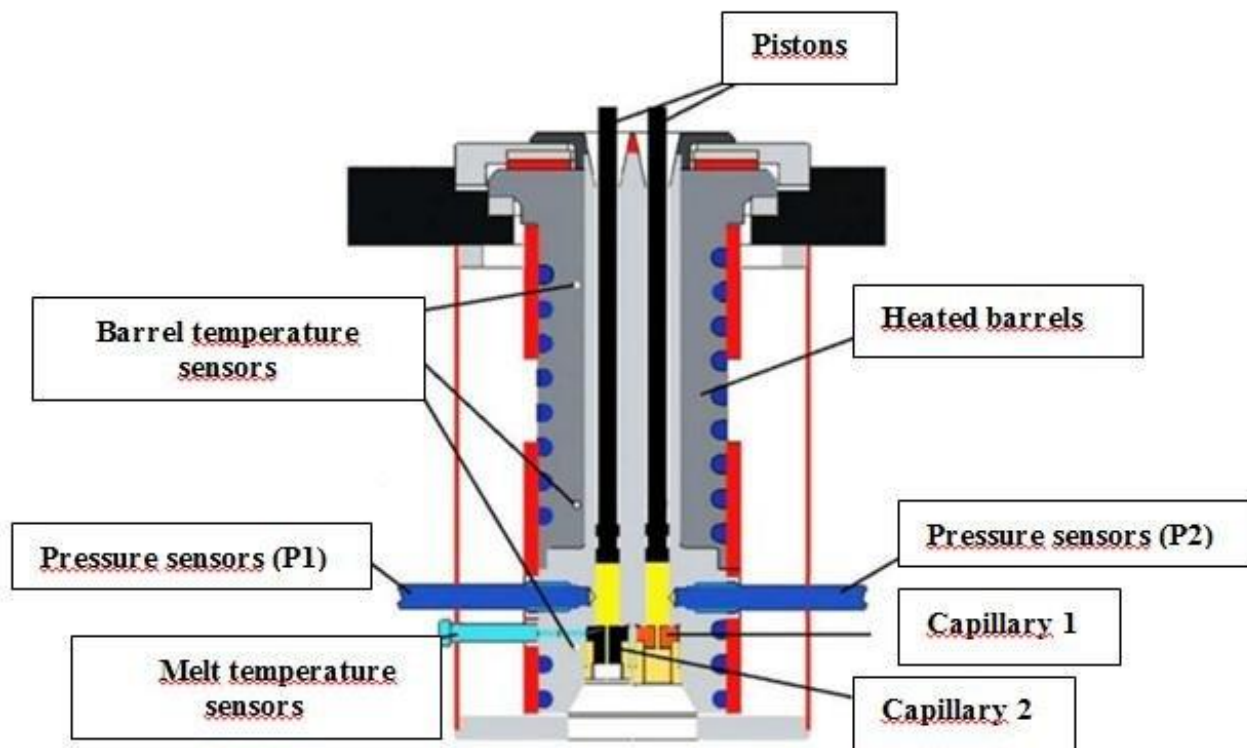


Very Low to
High
Viscosity

Parallel
Plates



Low Viscosity
to soft
Solids



- Írjuk fel a Navier-Stokes egyenletet hengerkoordináta rendszerben:

Cylindrical Coordinates (r, θ, z) :

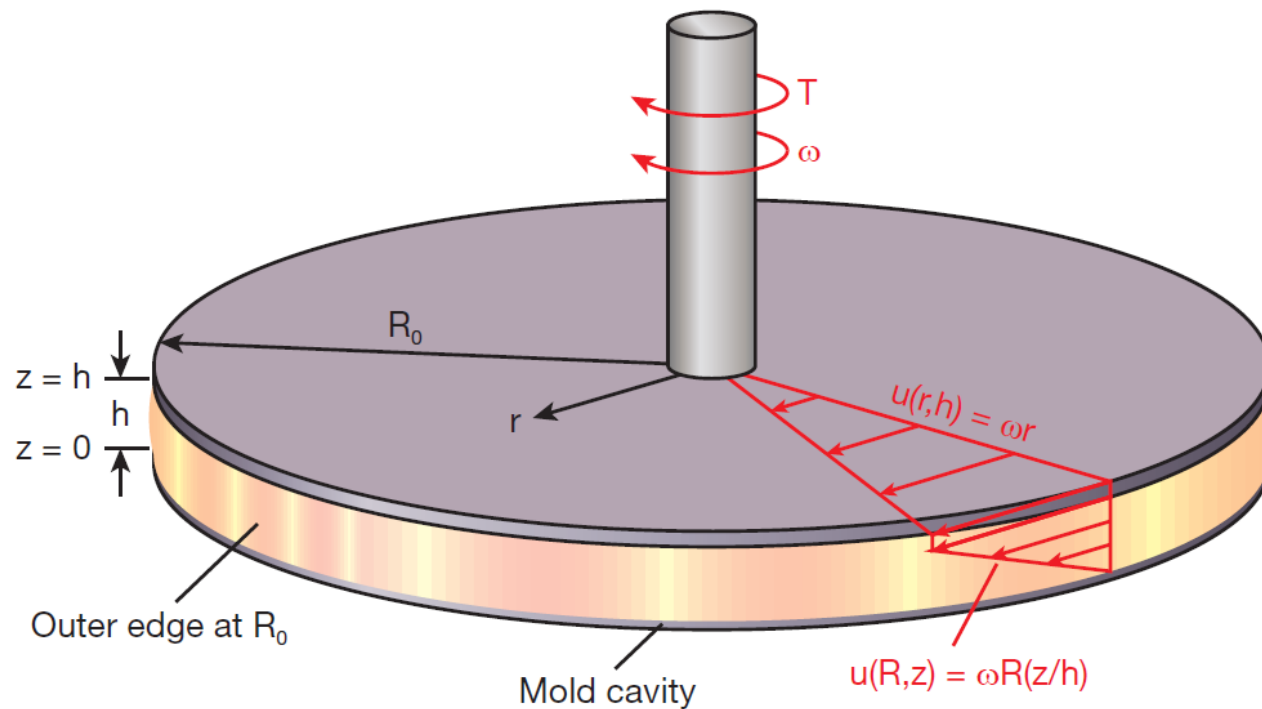
$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right\} + \rho g_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_\theta) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right\} + \rho g_\theta \end{aligned}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_z) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right\} + \rho g_z$$

- Válasszunk egy „kellemes” geometriát, egyszerűsítsünk:

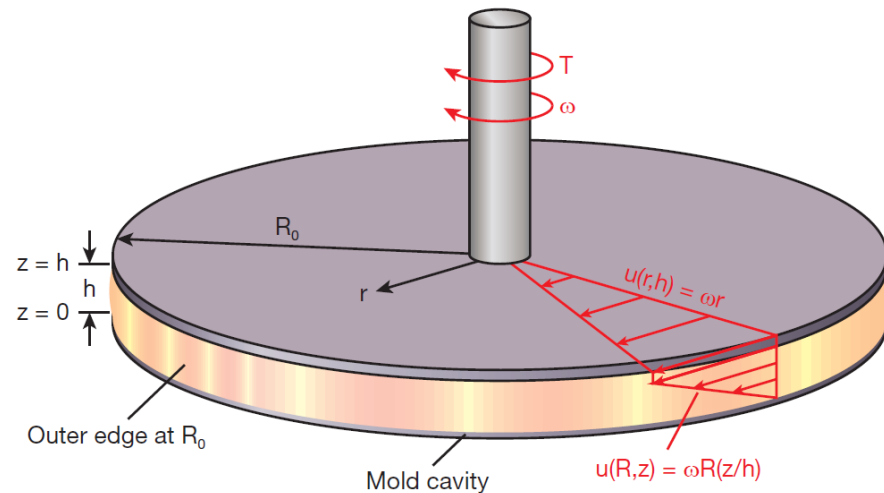
$$u = (0, u_\theta(r, 0, z), 0)$$



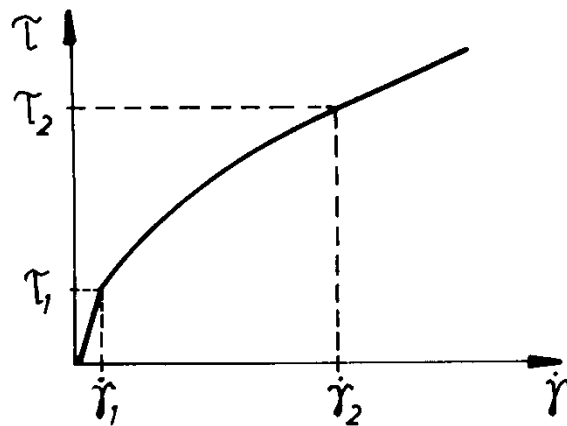
- Egy kevés „varázslást” követően higgyük el, hogy:

$$\eta(\dot{\gamma}_{r_0}) = \frac{1}{2\pi r_0^3} \frac{T}{\dot{\gamma}_{r_0}} \left[3 + \frac{d \ln \left(\frac{T}{2\pi r_0^3} \right)}{d \ln \dot{\gamma}_{r_0}} \right]$$

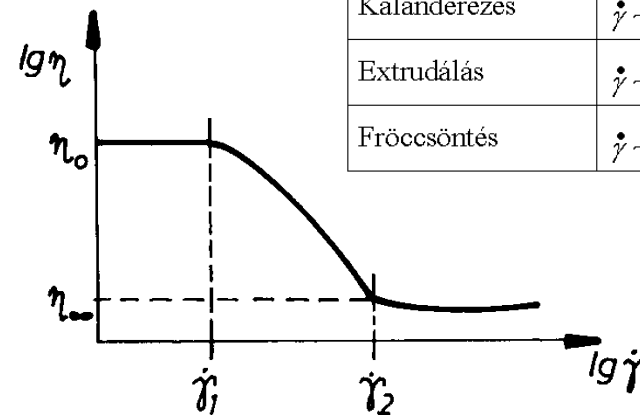
$$u = (0, u_\theta(r, 0, z), 0)$$



Szerkezeti – vagy struktúrvizskózus ömledék:



folyásgörbe



viszkozitásgörbe

Sajtolás	$\dot{\gamma} \sim 10^1 \text{ [sec}^{-1}\text{]}$
Kalanderezés	$\dot{\gamma} \sim 10^2 \text{ [sec}^{-1}\text{]}$
Extrudálás	$\dot{\gamma} \sim 10^3 - 10^4 \text{ [sec}^{-1}\text{]}$
Fröccsöntés	$\dot{\gamma} \sim 10^4 - 10^6 \text{ [sec}^{-1}\text{]}$

Mai ismereteink szerint azt mondjuk, hogy a reális (valós) polimer ömledék **struktúrvizskózusan** viselkedik. Ennek az a sajátossága, hogy az ömledék (extrém) kis ill. (extrém) nagy igénybevételek tartományában newtoni jelleget mutat, a kettő között, a feldolgozási technológiák tartományában pedig a hatványtörvényt követi



Adatok – reológia



Thermoplastics material

Optical Properties | Environmental Impact | Quality Indicators | Crystallization Morphology | Stress - Strain (Tension) | Stress - Strain (Compression) | Description | Recommended Processing | Rheological Properties | Thermal Properties | pvT Properties | Mechanical Properties | Shrinkage Properties | Filler / Fiber

Viscosity

Default viscosity model: Cross-WLF [View viscosity model coefficients...](#) [Plot Viscosity](#)

Juncture loss method coefficients

c1: Paⁿ[1-c2]

c2:

Transition temperature: 226 C

Moldflow Viscosity Index: VI(290)0055

Melt mass-flow rate (MFR)

Temperature:

Load:

Measured MFR:

☐ Extension viscosity

Cross-WLF Viscosity Model Coefficients

Cross-WLF viscosity model

n: 0.5382

Tau*: 12266.3 Pa

D1: 8.14922e+23 Pa-s

D2: 373 K

D3: 0 K/Pa

A1: 62.757

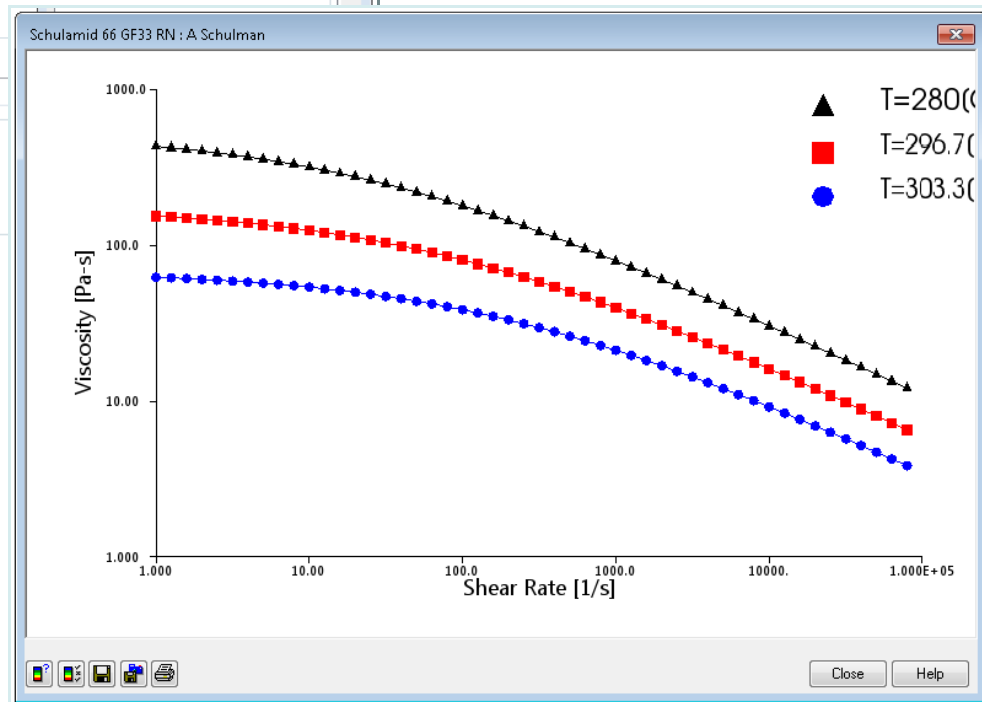
A2~: 51.6 K

[Plot Viscosity](#) [View test information...](#)

OK SÚGÓ

Name: Schulamid 66 GF33 RN : A Schulman

OK SÚGÓ



- Modell**

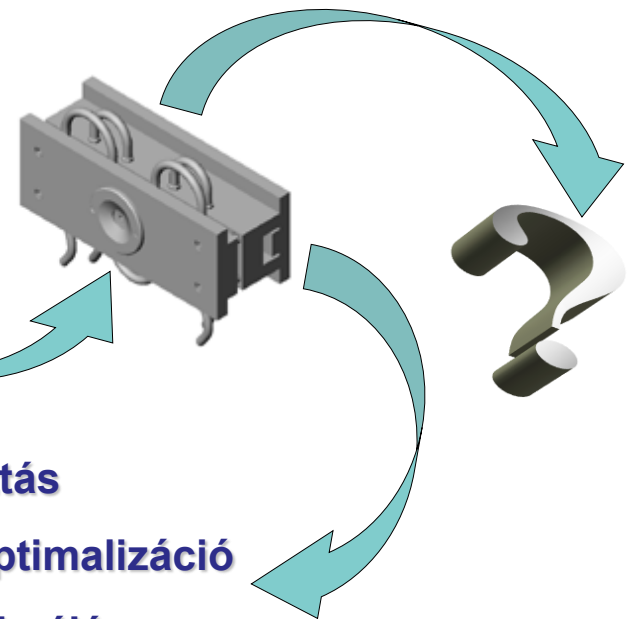
- Valamilyen rendszer leképezése hasonló viselkedésű, de más eszközökkel. A fizikai modell hasonló fizikai elveket használ, pl. áramló közegek helyett villamos áramokat, tároló elemek helyett kondenzátorokat. A matematikai modell a rendszer matematikai leírása, olyan matematikai összefüggések felírása, mely hasonló eredményt ad a számítás során, mint a rendszer a benne folyó átalakítással.



- Szimuláció**

- A rendszer viselkedésének elemzése a modell segítségével
- (Szinte) sosem egy kísérlet

Anyag választás
Geometriai optimalizáció
Folyamat optimálás
Stb.



A valódi probléma

↓ modellhiba, mérési (öröklött) hiba

Tudományos modell

↓ képlethiba

Matematikai modell

↓ diszkretizációs hiba

Numerikus modell

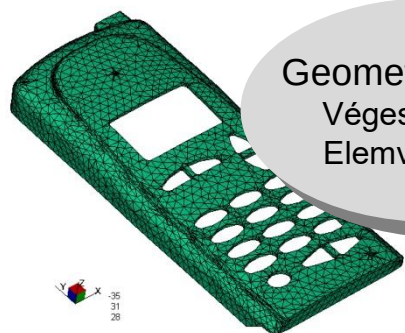
↓ kerekítési és ábrázolási hiba

Számítógépes modell

- **Elegendő egy „jó” becslés**
- **Csak akkor megfelelő a számítógépes modell, ha az egyszerűsítések és hibák ellenére megfelelő pontossággal írja le a valódi rendszer viselkedését**
- **Eredmények értékelése?**

- **Hibák típusai**

- **Modellhiba:** Általában a tudományos modellek nem tükrözik teljesen a valóságot, az ebből származó hibát modellhibának nevezzük. (pl.: pontszerű kiterjedés feltételezése, tömegek elhanyagolása, közegellenállás elhanyagolása stb.)
- **Mérési hiba:** A valódi probléma vizsgálatához szükségünk van bizonyos paraméterek mérésére, amely hibával terhelt. (pl.: hossz, tömeg, hőmérséklet mérése stb.)
- **Képlethiba:** Amikor egy képletet kezelhetőségének érdekében úgy egyszerűsítünk, hogy bizonyos részeit elhagyjuk, vagy egyszerűbbel helyettesítjük, képlethiba keletkezik. (pl.: végtelen sor helyett csak az első néhány taggal számolunk)
- **Diszkretizációs hiba:** A numerikus eljárások során keletkező hiba a diszkretizációs hiba. (pl.: a deriváltat differenciahányadossal, az integrált részletösszeggel helyettesítjük)
- **Kerekítési és ábrázolási hiba:** A bevitt adatokat a számítógép a saját számrendszerében ábrázolja, az ebből eredő hiba az ábrázolási hiba. A számítások során kerekíteni fog a számítógép, azaz kerekítési hibát követ el.



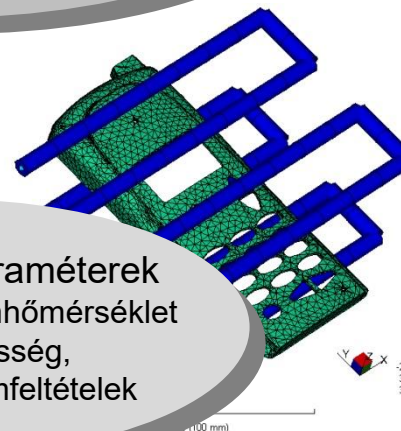
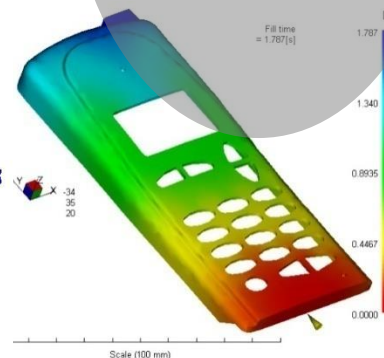
Geometriai modell
Végeselemháló
Elemvastagság



Feldolgozó gép adatai
Max. fröccsnyomás
Max. záróerő

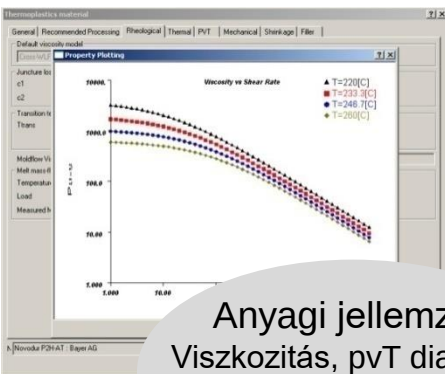
megoldó algoritmus
Kontinuitás egyenlet, Impulzusegyenlet
Energia egyenlet, Reológiai egyenlet

Eredmények
Időfüggvények,
Csomóponti
eredmények,
Elem eredmények,
Vastagság menti
eredmények



Technológiai paraméterek
Anyag- és szerszámhőmérséklet
Fröccs sebesség,
Geometriai peremfeltételek

Anyagi jellemzők
Viszkozitás, pVT diagram,
Hőtani állandók,
Sűrűség



- Mechanikai + Moldflow kapcsolt analízissel
 - Alkatrész méretezés

