

POLIMERTECHNIKA
NGB_AJ050_1

Polimerek reológiája

DR Hargitai Hajnalka

2011.09.28.

Az anyag **deformációjának** és **folyásának** a tudománya.

„rheo” - a görög „rheos” szóból: folyam, folyás, áramlás
Panta rhei: minden folyik; Hérakleitosz i.e. VI sz.)

Az anyagok folyását és deformációját tanulmányozza külső feszültségek (erők) hatására (az idő függvényében).

1929. december 9: The Society of Rheology (E. C. Bingham és M. Reiner)

Deformáció: a test pontjainak relatív elmozdulása,
két típus:

1. **Folyás** a deformáció **irreverzibilis** része: amikor a feszültség megszűnése után az anyag nem nyeri vissza az eredeti alakját (a munka hővé alakul).
2. **Elasztikus** vagy **reverzibilis** deformáció. (A munkát visszanyerjük és a test felveszi eredeti alakját.)

GYAKORLATI JELENTŐSÉGE:

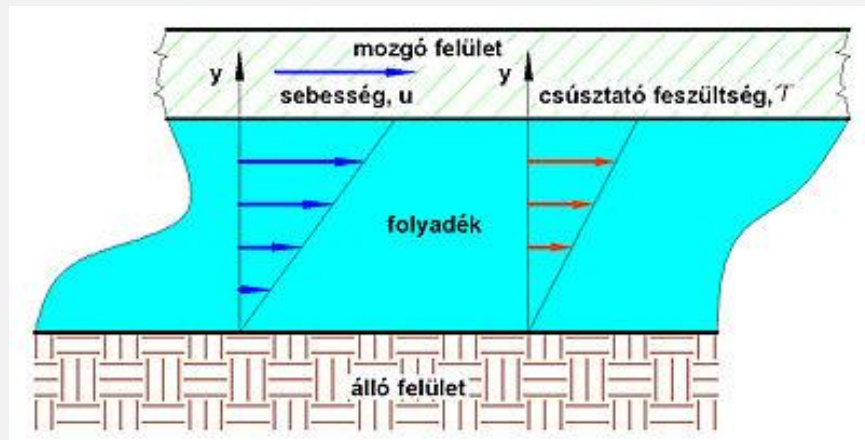
a polimer feldolgozási technológiáknál felmerülő
problémák megoldásánál

A folyási tulajdonságok alapvetően függenek:

- a molekulatömegtől,
- A polimer láncszerkezetétől, pl. lineáris (HDPE, PP, PS) vagy elágazó (LDPE),
- A feldolgozás hőmérsékletétől,
- Nyomás,
- Idő,
- Degradáció (molekulalánc tördelődés),
- Nyírási sebesség.

- **Viszkozitás (belső súrlódás, folyással szembeni ellenállás)** egy gáz vagy folyadék belső ellenállásának mértéke a csúsztató feszültséggel szemben.
- **Newton elmélete:**
 - Lamináris (réteges) áramlás

$$F = \eta A \frac{du}{dy}$$

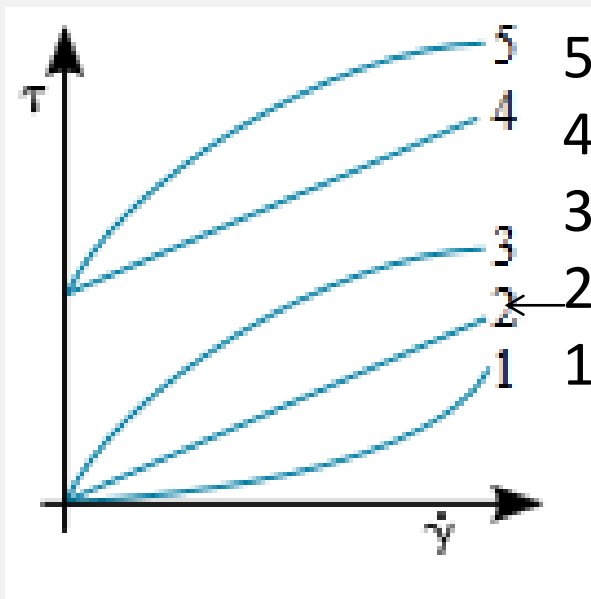


$$\tau = -\eta \frac{du}{dy} \Rightarrow \eta = -\frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

csúsztató feszültség:

nyírási sebesség

Newtoni és nem-newtoni folyadékok



- 5 – plasztikus folyadék
- 4 - Bingham folyadék,
- 3 - **Pszéudoplasztikus folyadék,**
- 2 – **Newtoni folyadék,**
- 1 – dilatáns folyadék,

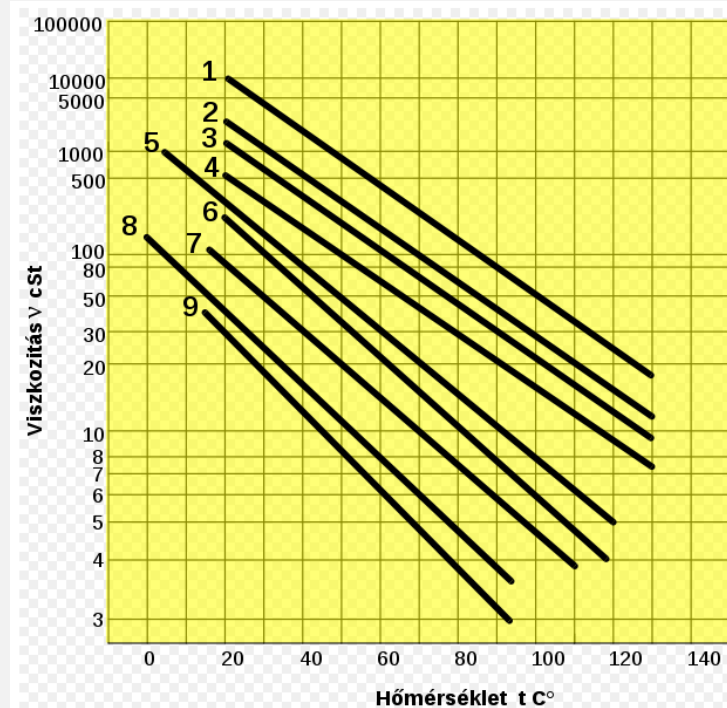
Viszkozitás [Pas]:

Víz: 10^{-3} , Etil-alkohol: $0,248 \times 10^{-3}$

Méz: 10, Vér: 25×10^{-3}

Kőolaj: $0,65 \times 10^{-3}$

Polimer: $10^2 - 10^5$ feldolgozás alatt



- Newtoni folyadékok esetén csak a hőmérséklettől függ.
- Nem-newtoni folyadékoknál változik a deformáció sebességével.

Melt flow index/ Folyási mutatószám

- **MFI vagy MFR:** a szabványos mérőkészülékből adott hőmérsékleten és terhelőerő mellett 10 perc alatt kifolyt anyag mennyisége.
- PE (ASTM D-1238): $F=2,16\text{kg}$, kapilláris átmérője $D=2,095\text{ mm}$ és hossza: $L=8\text{mm}$. A vizsgálati hőmérséklet: 190°C .
- Mérése: kapilláris plasztométerrel.
- Kis MFI érték nagy molekulatömegű, nagy viszkozitású anyagot jelent.

Viszkoelasztikus anyagok

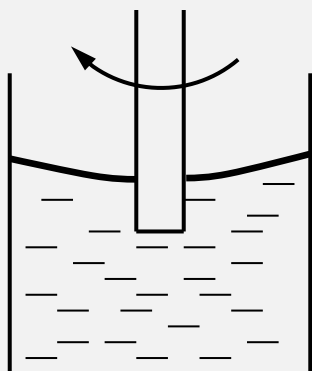
- **Viszkoelasztikus hatások**
 - Kifolyási duzzadás
 - Weissenberg hatás
 - Kaye hatás
- **Jelenségek**
 - Nyírási (nyomásra) vékonyodás (tixotróp anyagok) pl. festékek
 - Nyírási vastagodás(dilatáns anyagok)

Rúdra mászás (Weissenberg hatás)

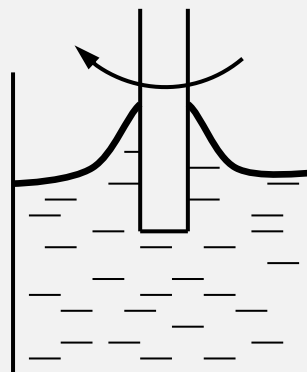
<http://www.youtube.com/watch?v=nX6GxoiCneY&NR=1>

<http://www.youtube.com/watch?v=hraaO3fhPz4>

Newtoni folyadék



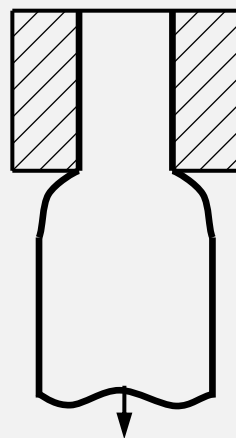
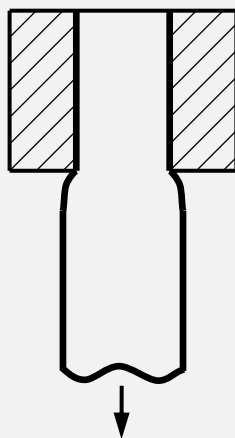
Viszkoelasztikus folyadék



Kifolyási duzzadás

Newtoni folyadék duzzadása
~13%

Viszkoelasztikus folyadék
duzzadása akár 400%



$$\frac{d}{D} = 4,00$$

Kifolyási duzzadás

A Reynolds szám határozza meg

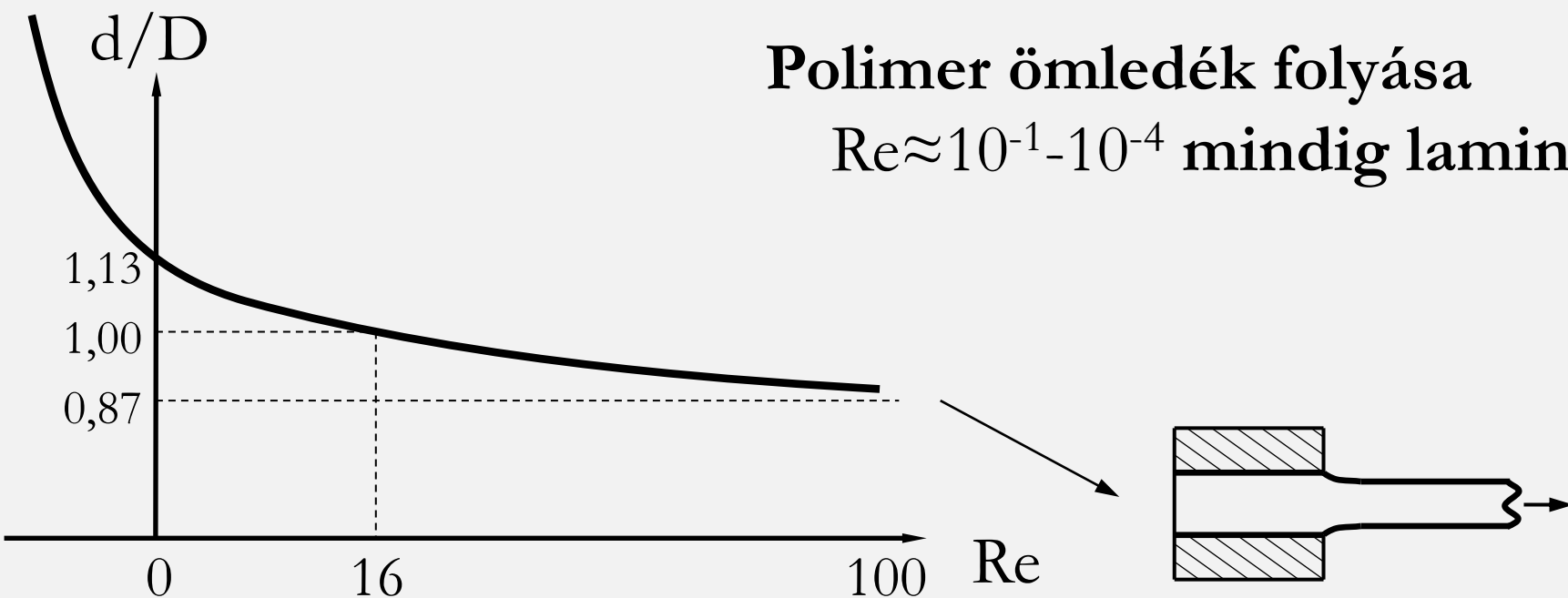
$$Re = \frac{\text{Nyomaték}}{\text{Viszkozitás}} = \frac{\rho v D}{\eta}$$

$Re > 2100$ Turbolens (i.e.
szabálytalan, zavaros folyás)

$Re < 2100$ Lamiáris

Polimer ömledék folyása

$Re \approx 10^{-1} - 10^{-4}$ mindig lamináris



Reynolds szám

Az áramlásra jellemző dimenzió nélküli szám.

Jele Re.

A d átmérőjű csőben v sebességgel áramló (ρ sűrűségű és n belső súrlódási együtthatójú folyadék esetén

$$\text{Re} = vd\rho/n.$$

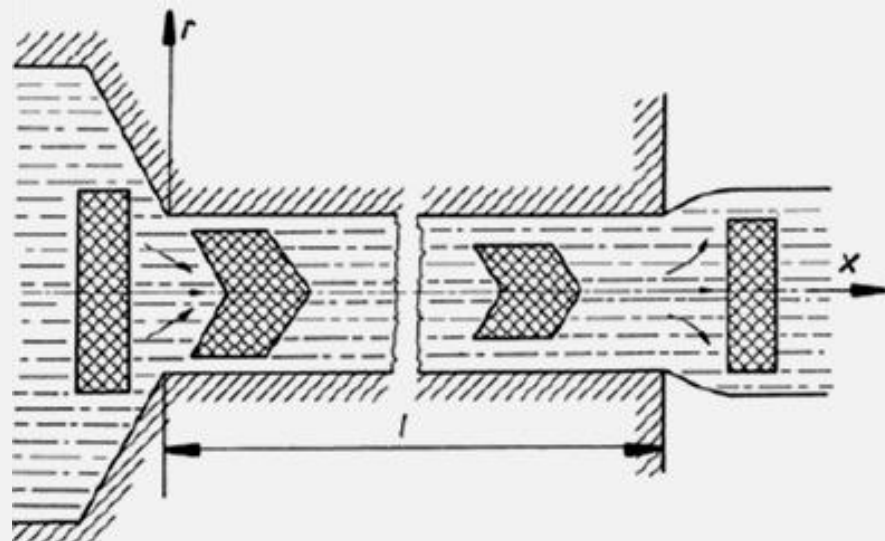
Osborne Reynolds (1842-1912) brit mérnökről nevezték el.

Ha a *Reynolds-szám* egy kritikus értéket túllép (2100), akkor az áramlás turbulenssé válik.

Kifolyási duzzadás

A „dugó” palástján τ_h nyírófeszültség ébred torzítja a dugót, és egy rugalmas nyíródeformációt ébreszt

Kilépéskor a feszültség feloldódik, a torzult dugó visszarugózik, az ömledék megduzzad.



A duzzadás mértéke csökkenthető:

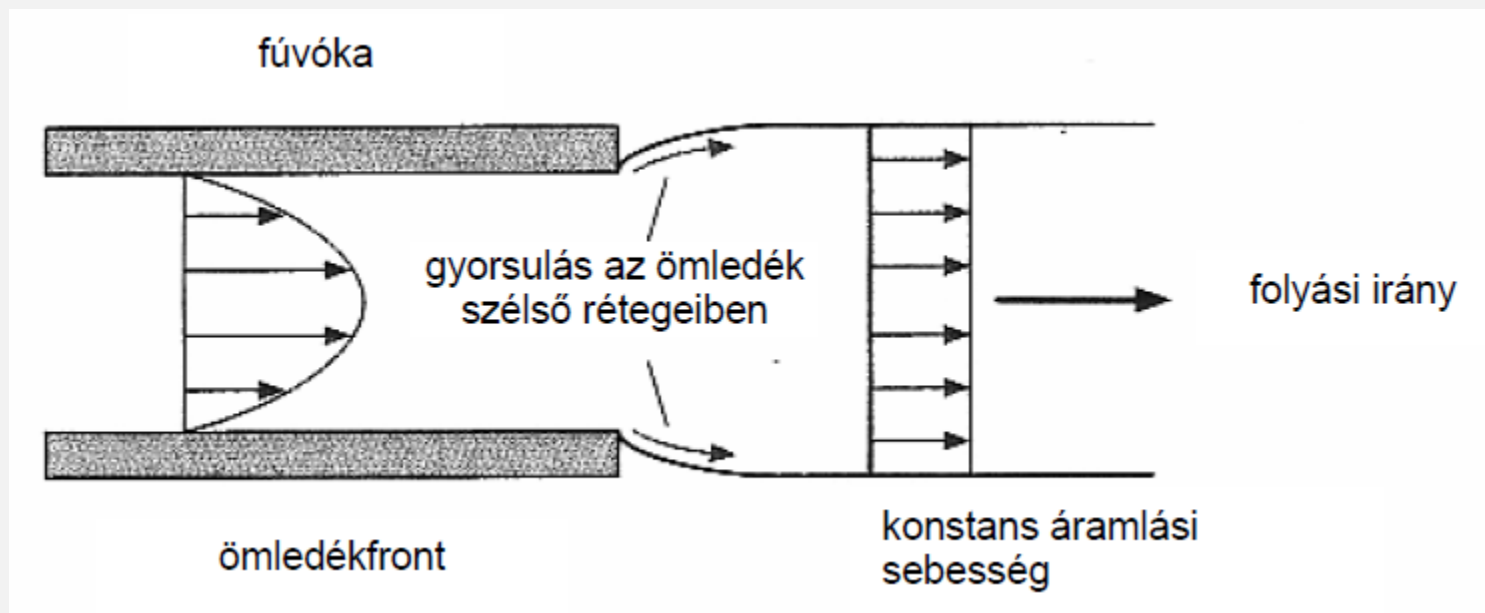
- a kapilláris l hosszának növelésével,
- a hőmérséklet növelésével,
- a kapillárisban töltött idő növelésével,
- az átlagos móltömeg csökkentésével.

Minél nagyobb a kapilláris hossza annál nagyobb a relaxáció, és így kisebb a duzzadás.

Extrudálásnál

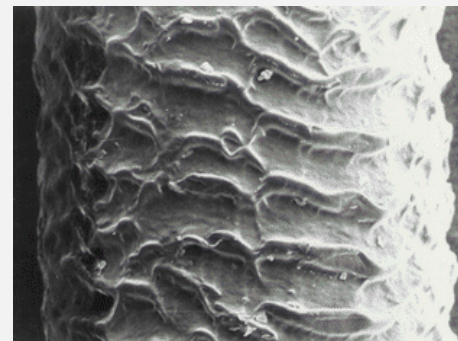
- **korlátozza a profilkialakítás szabadságát,**
- a kész termékek lehűtésekor, az extrudált profilokba befagyott feszültségek később, a tartós igénybevételek során helyileg eltérő relaxációs jelenségeket, méretváltozást, torzulást, feszültségi repedezést, **korai tönkremenetelt** okozhatnak.

Az ömledékfront változása kilépéskor



A külső molekuláknak a kilépéskor fel kell gyorsulniuk.
Ez egy húzó igénybevételt jelent rájuk nézve.

Ha ez a húzó igénybevétel nagyobb, mint az ömledék húzószilárdsága, akkor az **ömledék felülete felszakadozik**, pikkelyes, hártyás lesz.



Oka: nagy extrudálási sebesség

Legtöbbször fóliaextrudáláskor vagy fóliafúváskor,
rontja a fólia optikai tulajdonságait.

ÖMLEDÉKTÖRÉS (LÁGYTÖRÉS)

<http://www.youtube.com/watch?v=2j3phVcXhUM>

Áramlási rendellenesség

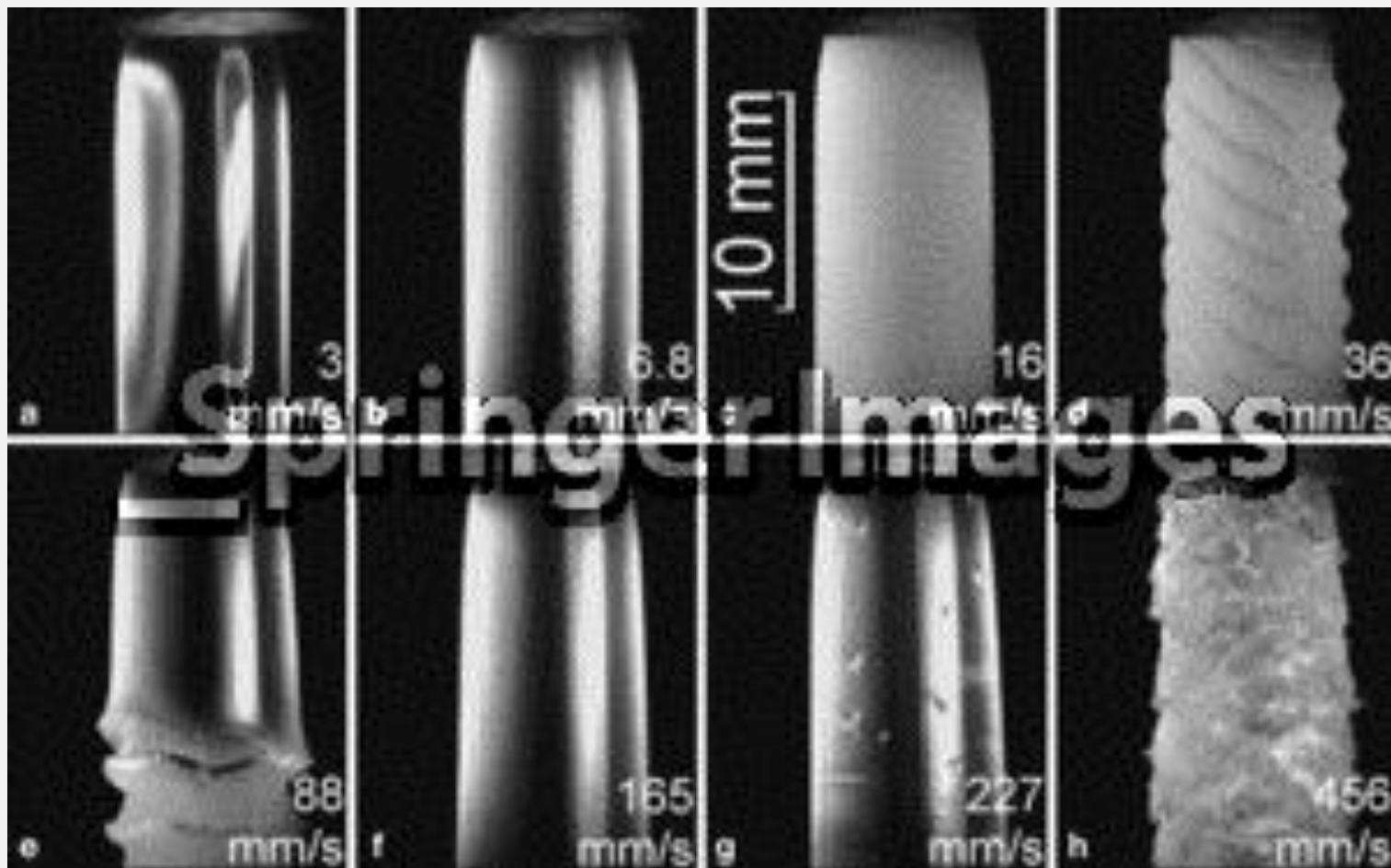
A polimer ömledéket **nagy keresztmetszetről kis keresztmetszetre** hirtelen akarjuk összenyomni (az ömledékben ébredő nyomófeszültség meghaladja az anyag nyomószilárdságát).

A polimer ömledék nehezen viseli el a hirtelen és jelentős keresztmetszet csökkenést.

A lágytörés után a **szűk keresztmetszetből kijövő anyag spirális** alakú lesz.

Általában akkor jelentkezik, ha a kapilláris falánál ébredő csúsztató feszültség 0,2 - 0,4 MPa.

ÖMLEDÉKTÖRÉS (LÁGYTÖRÉS)

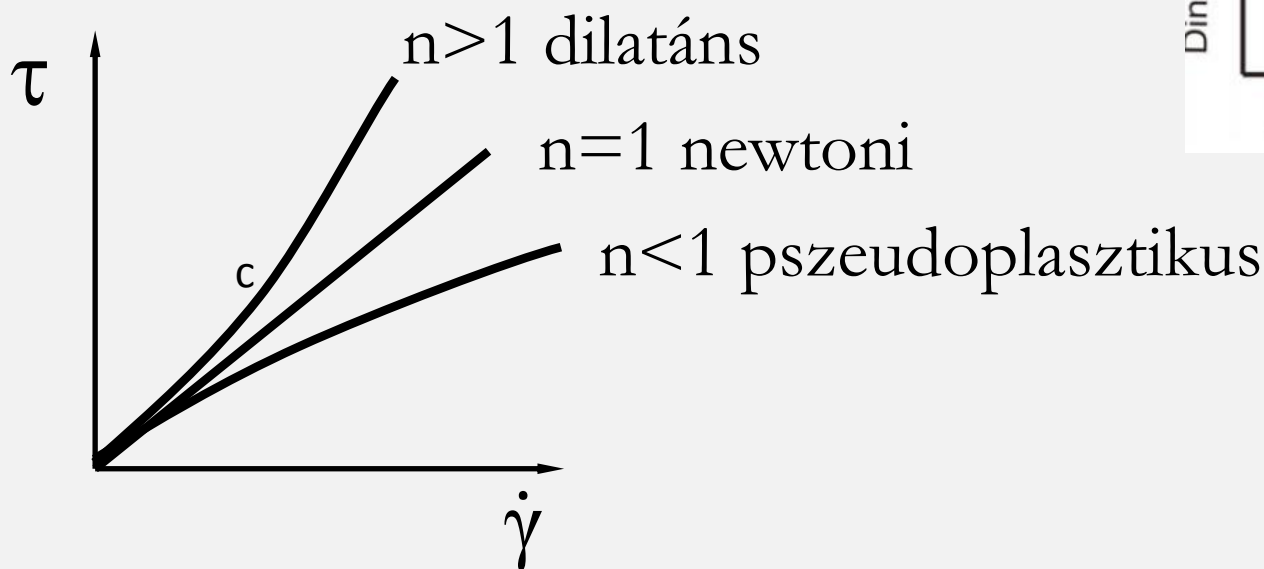


Pszudoplasztikus viselkedés (Nyírásra vastagodás)

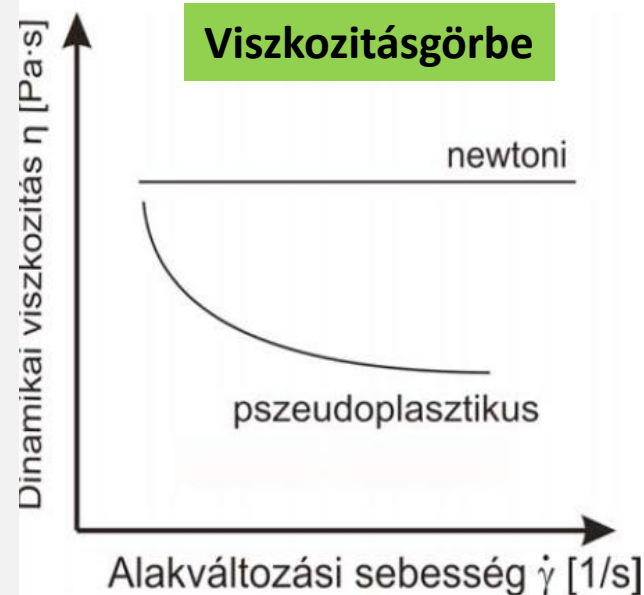
Newtoni: $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$

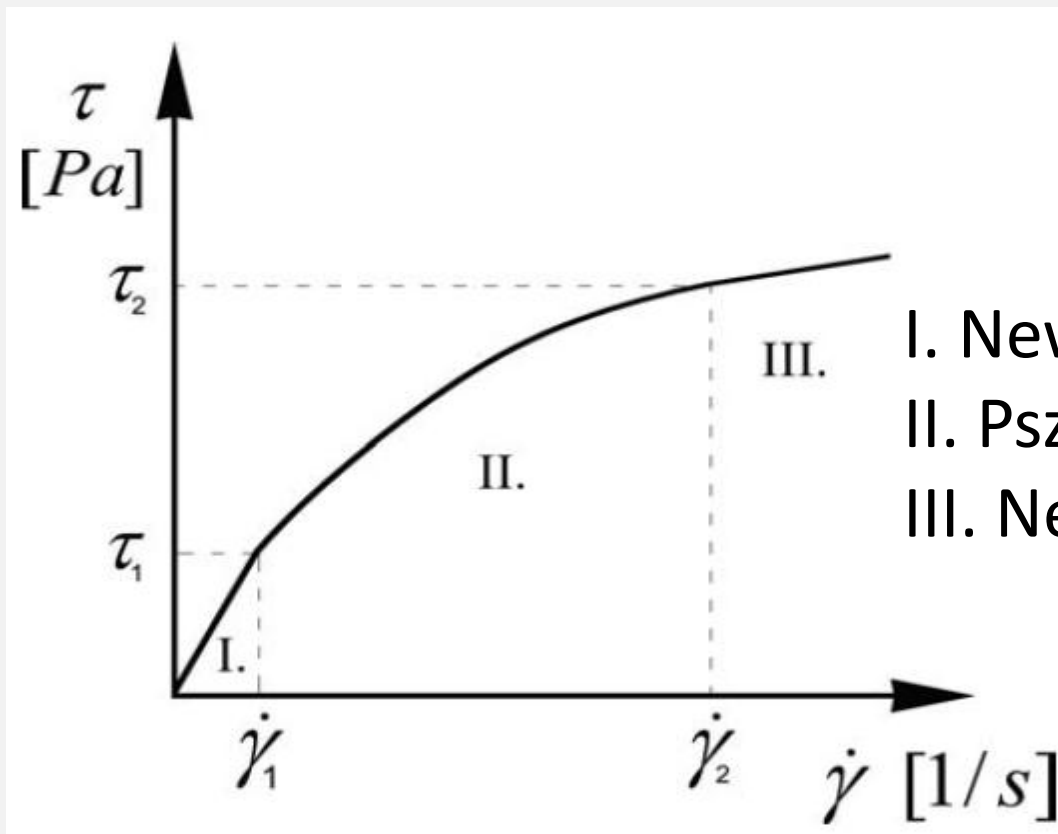
Nem-Newtoni: $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$

Folyásgörbe



Viszkozitásgörbe





- I. Newtoni viselkedés
- II. Pszeudoplasztikus viselkedés
- III. Newtoni viselkedés

Feszültség-deformáció kapcsolat polimer rendszereknél

Reológia: Testek deformációs mechanizmusával foglalkozó tudomány

A terhelés hatására az anyagokon létrejövő teljes alakváltozást komponensekre bontjuk

$$\varepsilon_{\ddot{o}} = \varepsilon_{pr} + \varepsilon_{kr} + \varepsilon_m$$

Az alakváltozások időbeli lefutását leíró függvények a számítások elvégezhetősége érdekében egyszerűsített törvényeket használunk.

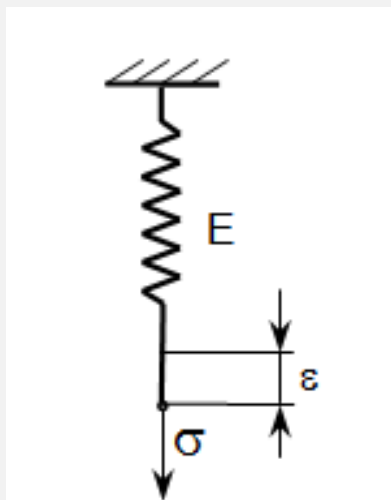
pillanatnyi rugalmas alakváltozás: **Hooke törvény**

késleltetett rugalmas alakváltozás: **Kelvin-Voigt mozgástörvény**

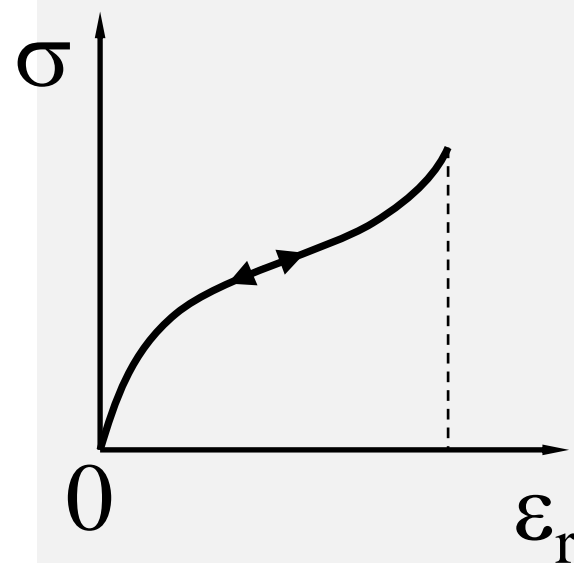
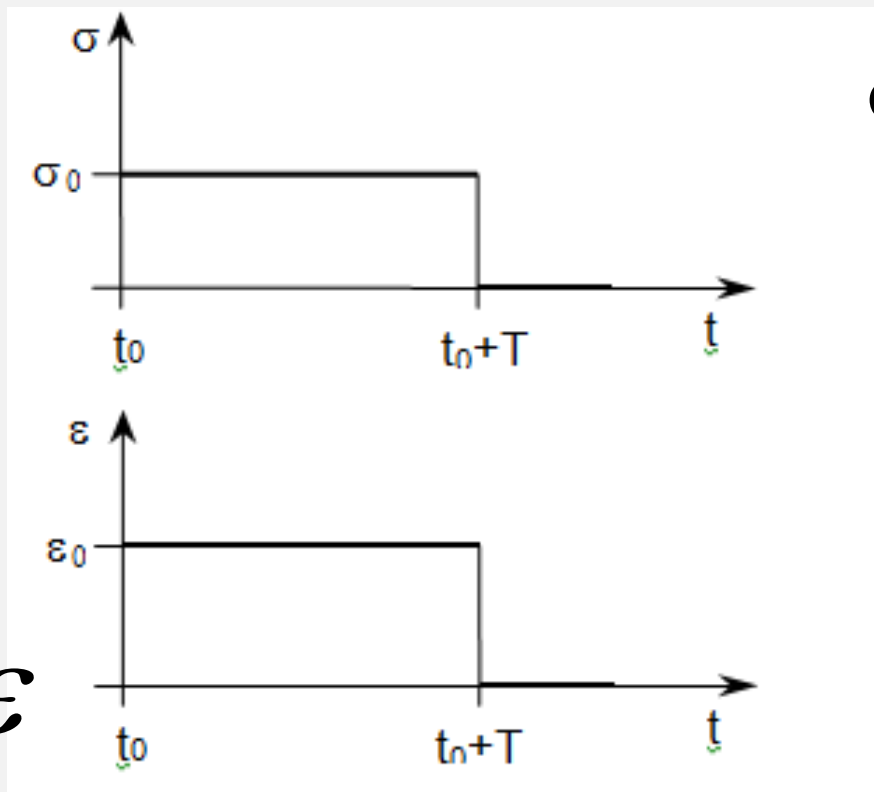
maradó alakváltozás: **Newton-törvény**

Hooke test

- Ideálisan rugalmas viselkedés

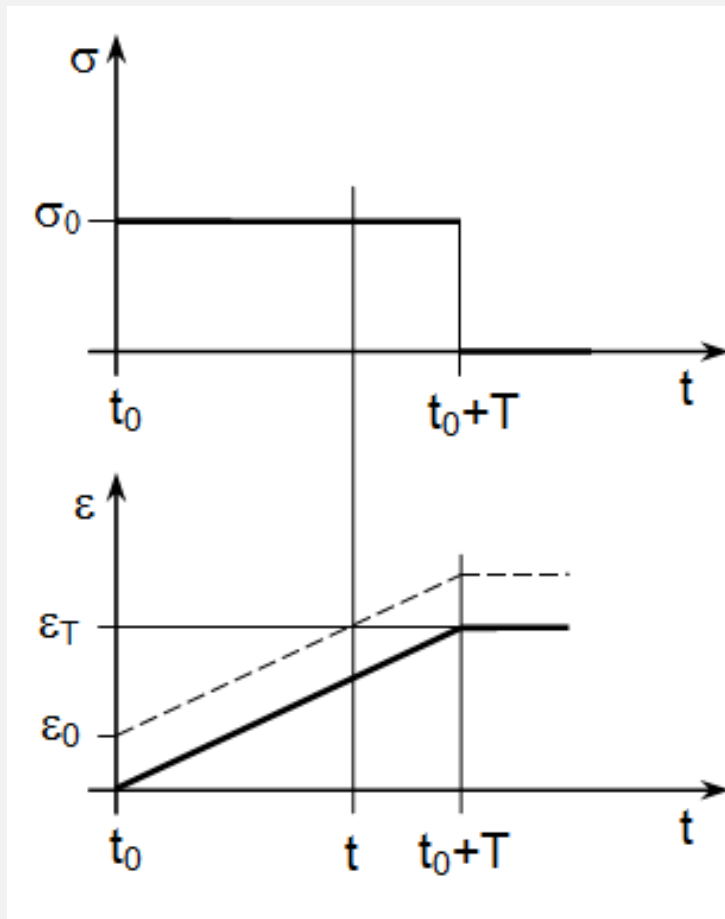
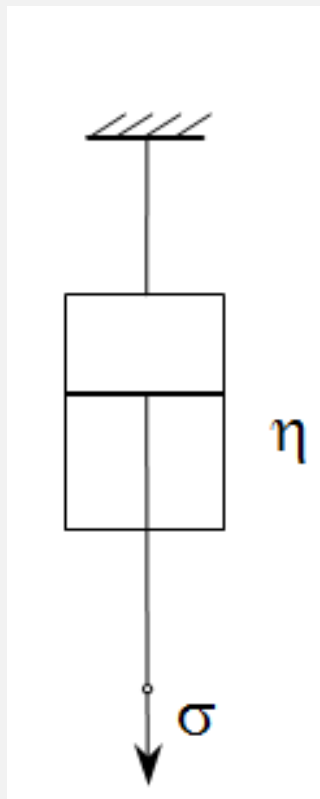


$$\sigma = E\varepsilon$$

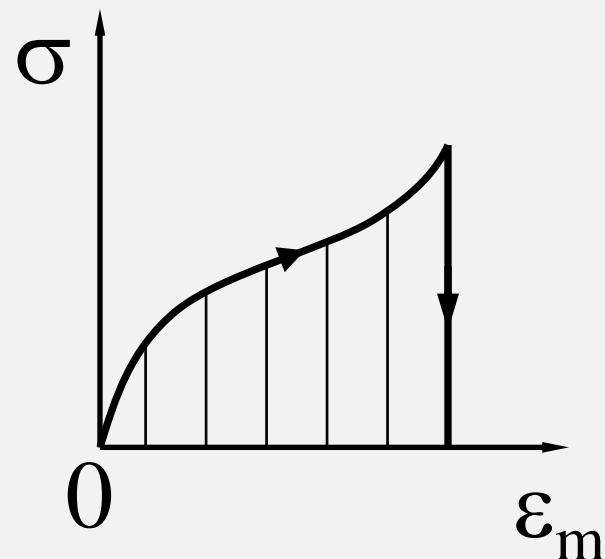


Newtoni test

Egyszerű folyadék (viszkózus) modell



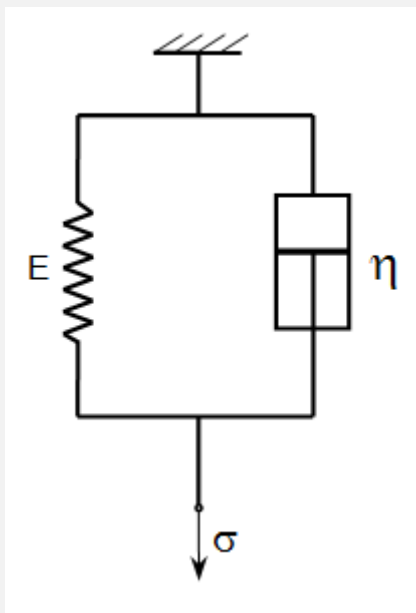
$$\sigma = \eta_0 \dot{\varepsilon}$$



$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\eta} \sigma_0 \cdot t + \varepsilon_0$$

Kelvin-Voight modell

A LEGEGYSZERŰBB KÉSLELTETETT RUGALMAS MODELL

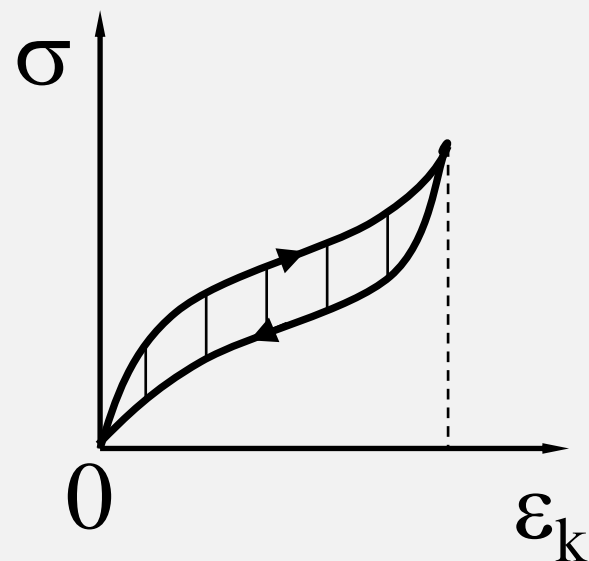


$$\varepsilon_{\ddot{o}} = \varepsilon_E = \varepsilon_{\eta}$$

$$\sigma_{\ddot{o}} = \sigma_E + \sigma_{\eta}$$

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\sigma = E\varepsilon + \eta_0 \dot{\varepsilon}$$



Polimerek időfüggő viselkedése

Kúszás:

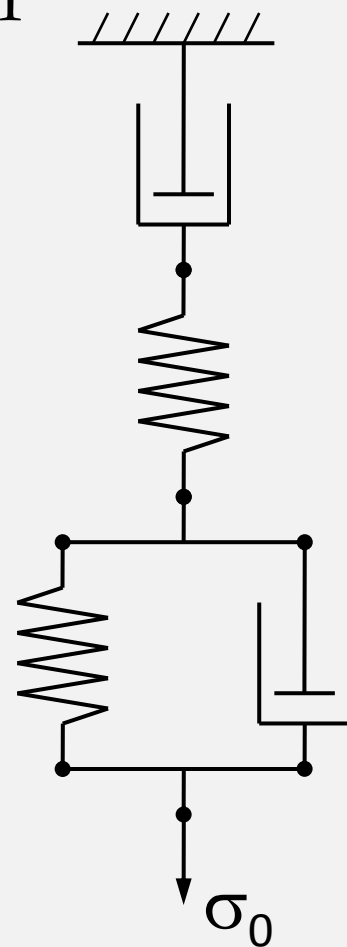
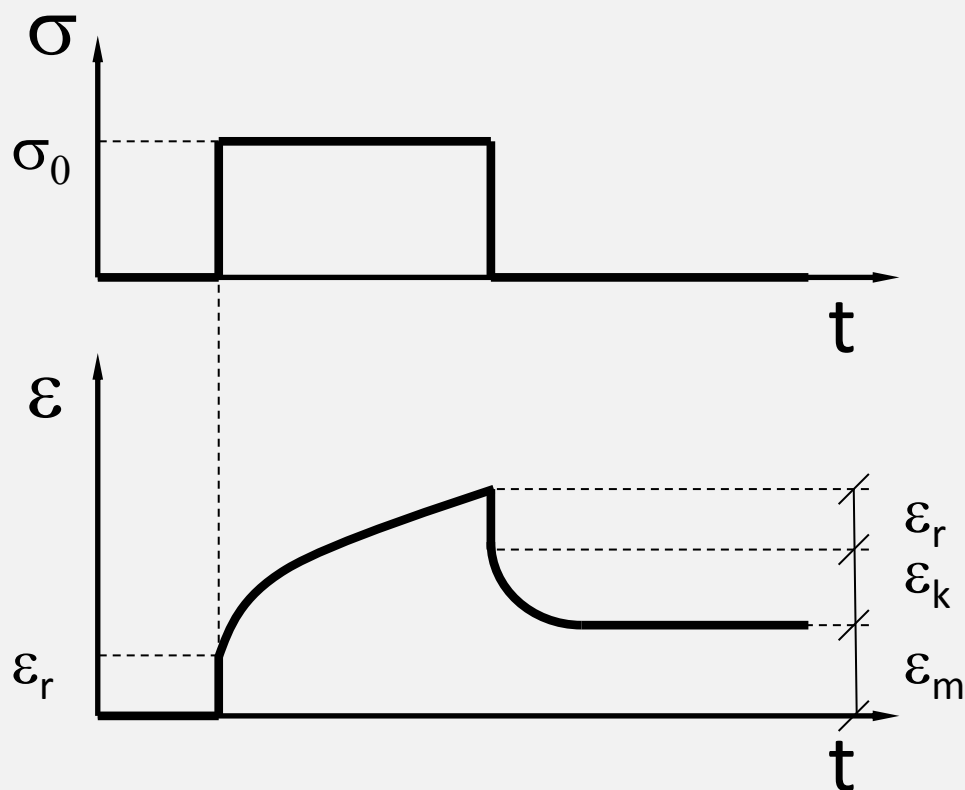
állandó (konstans) feszültség mellett a deformáció idővel növekszik. Ez a molekulaláncok átrendeződésével magyarázható, azaz a szilárd műanyagok „erő hatásra folynak”.

Feszültség relaxáció:

állandó értéken tartott deformáció mellett idővel az anyagban csökken, feloldódik az anyagban ébredő feszültség.

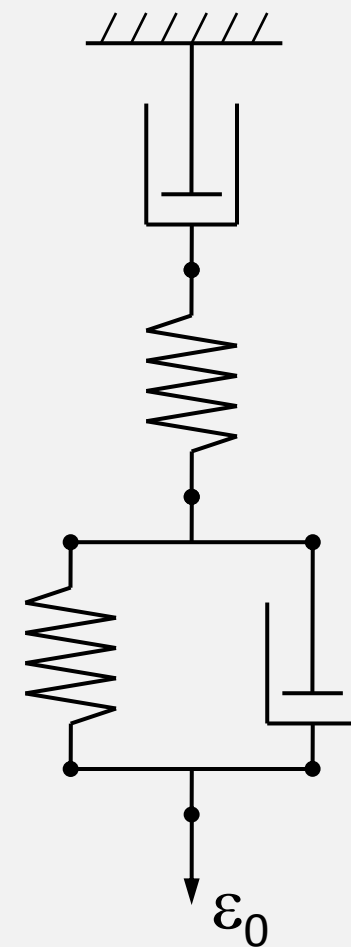
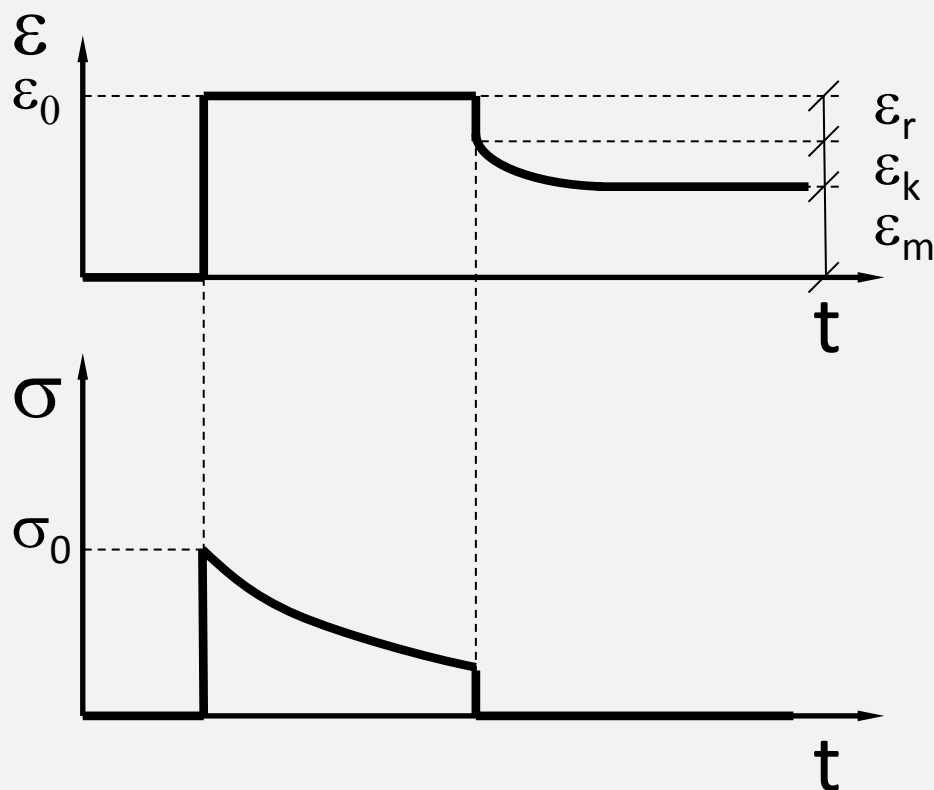
A kúszás modellezése

- Burgers-féle négyparaméteres modell



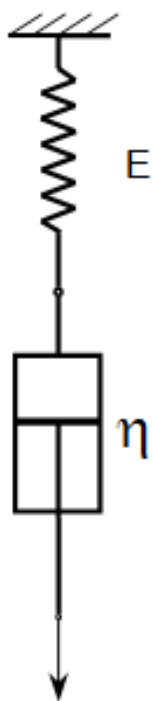
A feszültség relaxáció modellezése

- Burgers modell



A feszültség relaxáció modellezése

MAXWELL MODELL

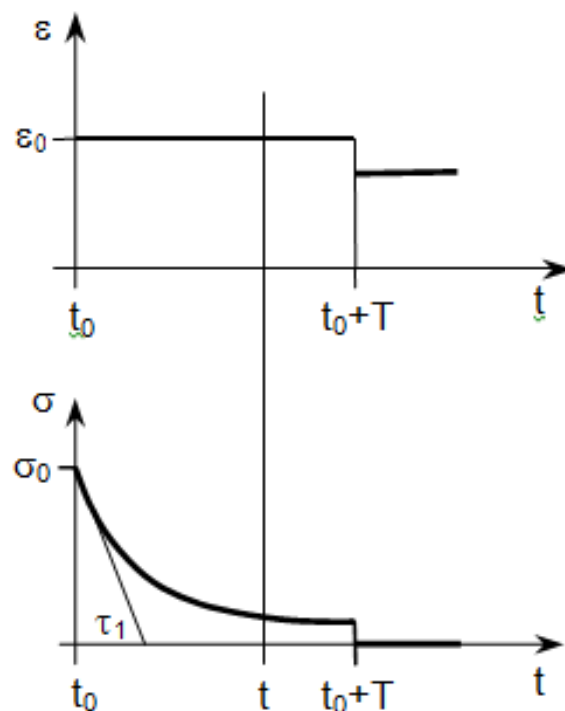


$$\sigma_{\ddot{o}} = \sigma_E = \sigma_{\eta}$$

$$\varepsilon_{\ddot{o}} = \varepsilon_E + \varepsilon_{\eta}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{\eta} \int \sigma(t) dt$$

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{E}{\eta} t}$$



- A műanyagok viszkozitása nemcsak a hőmérséklettől, de az igénybevételtől (nyírási sebesség) is függ.
- A polimerek viszkoelasztikus anyagok (nyírási vastagodás, rúdramászás, kifolyási duzzadás, ömledéktörés, cápabőr).
- Tulajdonságai időfüggőek (kúszás, feszültségrelaxáció).

POLIMERTECHNIKA

NGB_AJ050_1

Köszönöm a figyelmet!

hargitai@sze.hu

DR Hargitai Hajnalka

2011.09.14.