

# Anyagok mechanikai tulajdonságai és vizsgálatuk

Dr. Szabó Péter János  
[szpj@eik.bme.hu](mailto:szpj@eik.bme.hu)

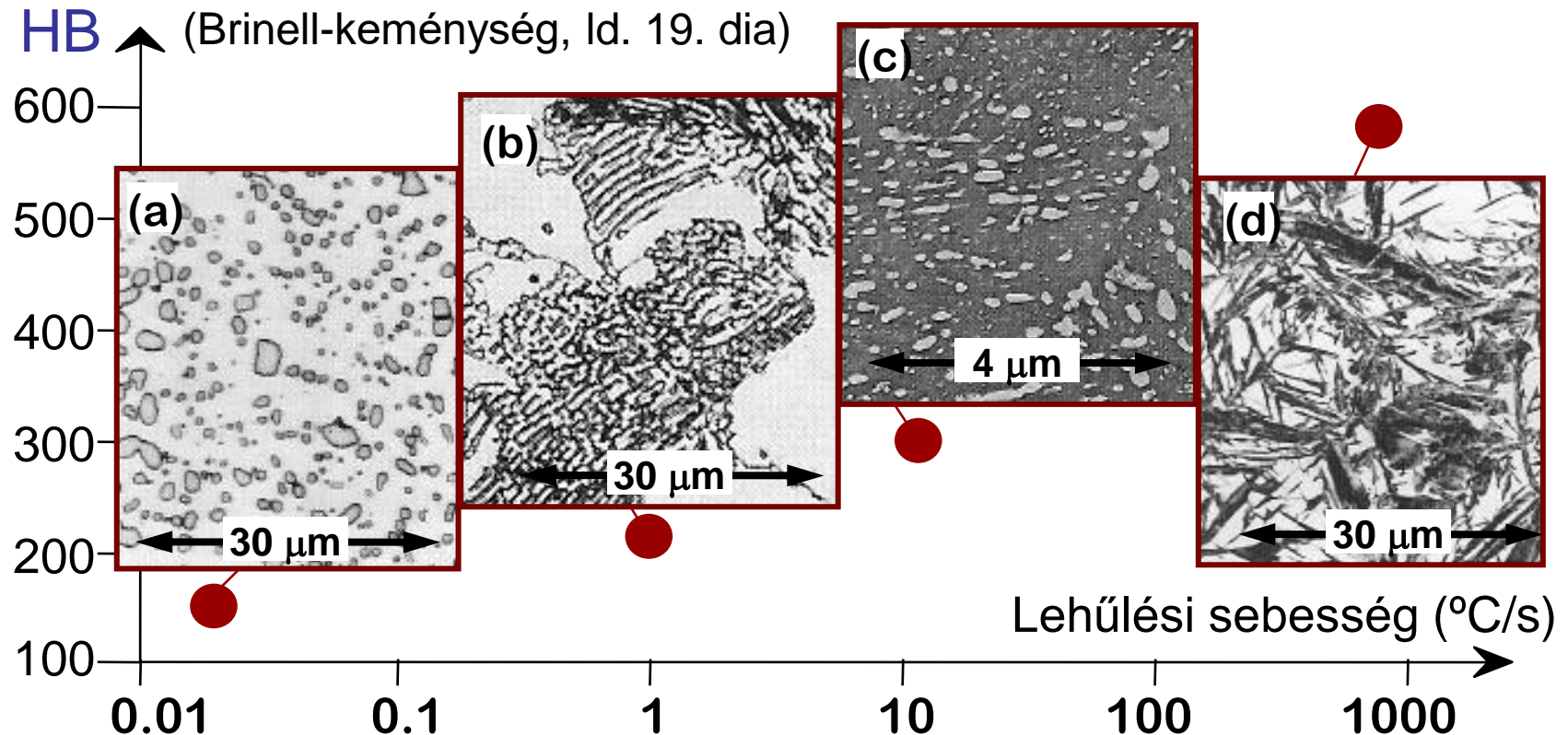
Elektronikai anyagtudomány  
BMEVIETAA01  
2022/2023/2

# AZ ELŐADÁS SORÁN MEGISMERJÜK:

- az alapvető anyagi tulajdonságok csoportosítását;
- a rugalmas és a képlékeny alakváltozás jellemzőit;
- a valódi és a mérnöki rendszer feszültség és alakváltozás fogalmát;
- a rugalmas test anyagjellemzőit;
- a szakítóvizsgálattal meghatározható alakváltozási, feszültségi és szívóssági mérőszámokat;
- a keménységmérést;
- a kúszás, a fáradás és a törés fogalmát.

# SZERKEZET, FOLYAMAT ÉS TULAJDONSÁGOK

- Az anyag **tulajdonsága** függ a **szerkezetétől**;  
Pl: az acél keménységének és szerkezetének kapcsolata

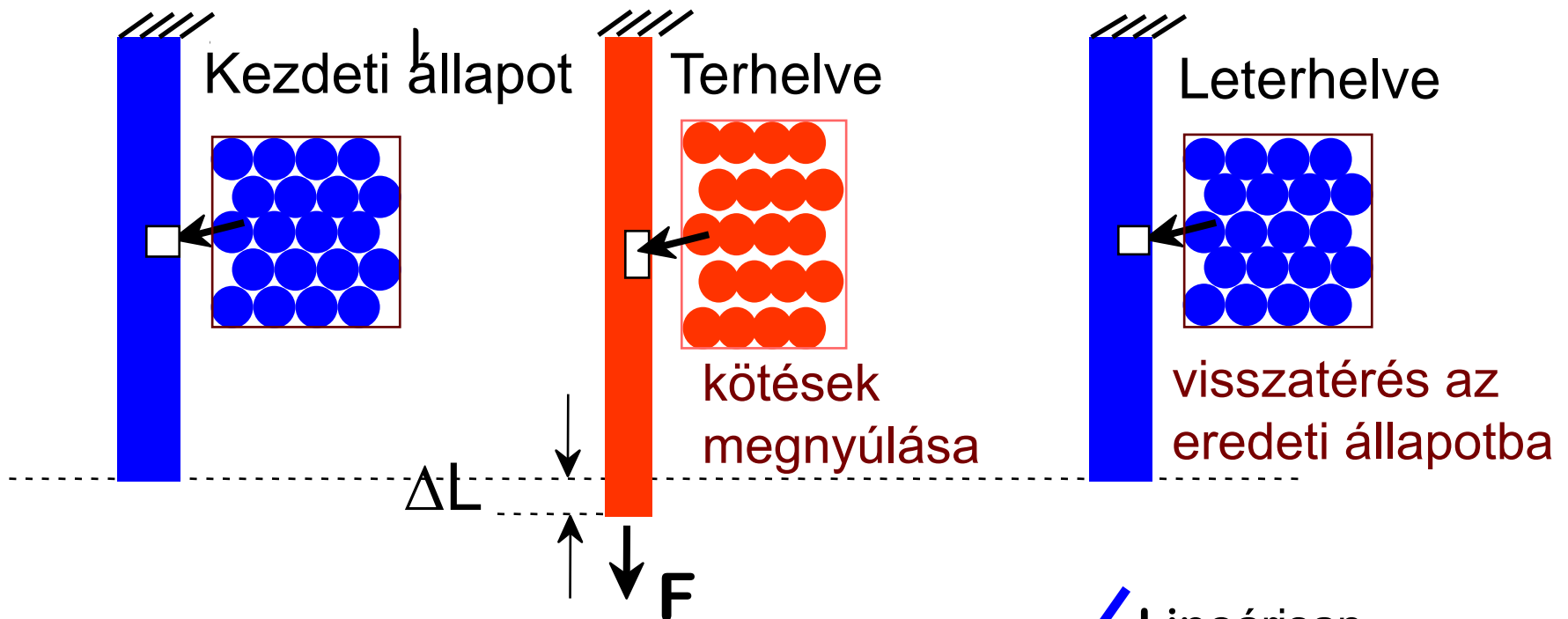


- Folyamat** is megváltoztathatja a **szerkezetet**;  
Pl.: Szerkezetváltozás a lehűlési sebesség hatására

# ANYAGTULAJDONSÁG CSOPORTOK

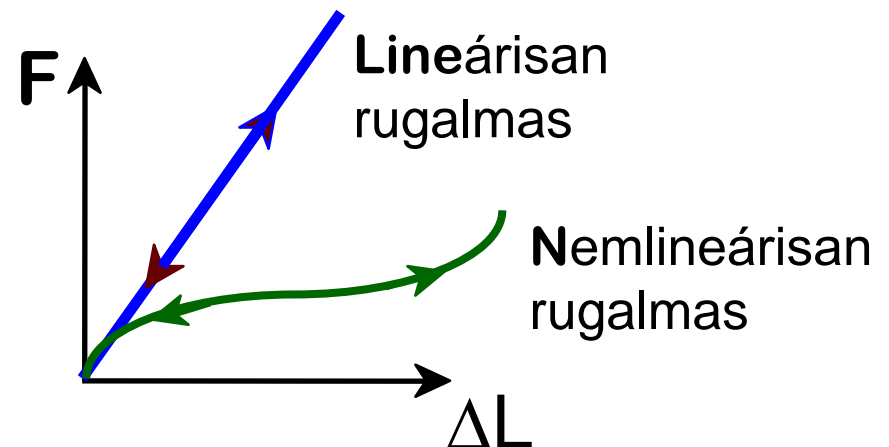
- **Mechanikai** (terhelés és alakváltozás hatása)
- **Elektromos** (elektromos tér hatása)
- **Hőfizikai** (hőmérsékletmező hatása)
- **Mágneses** (mágneses tér hatása)
- **Optikai** (elektromágneses tér hatása)
- **Károsodási** (kémiai reaktivitás hatása)

# RUGALMAS ALAKVÁLTOZÁS

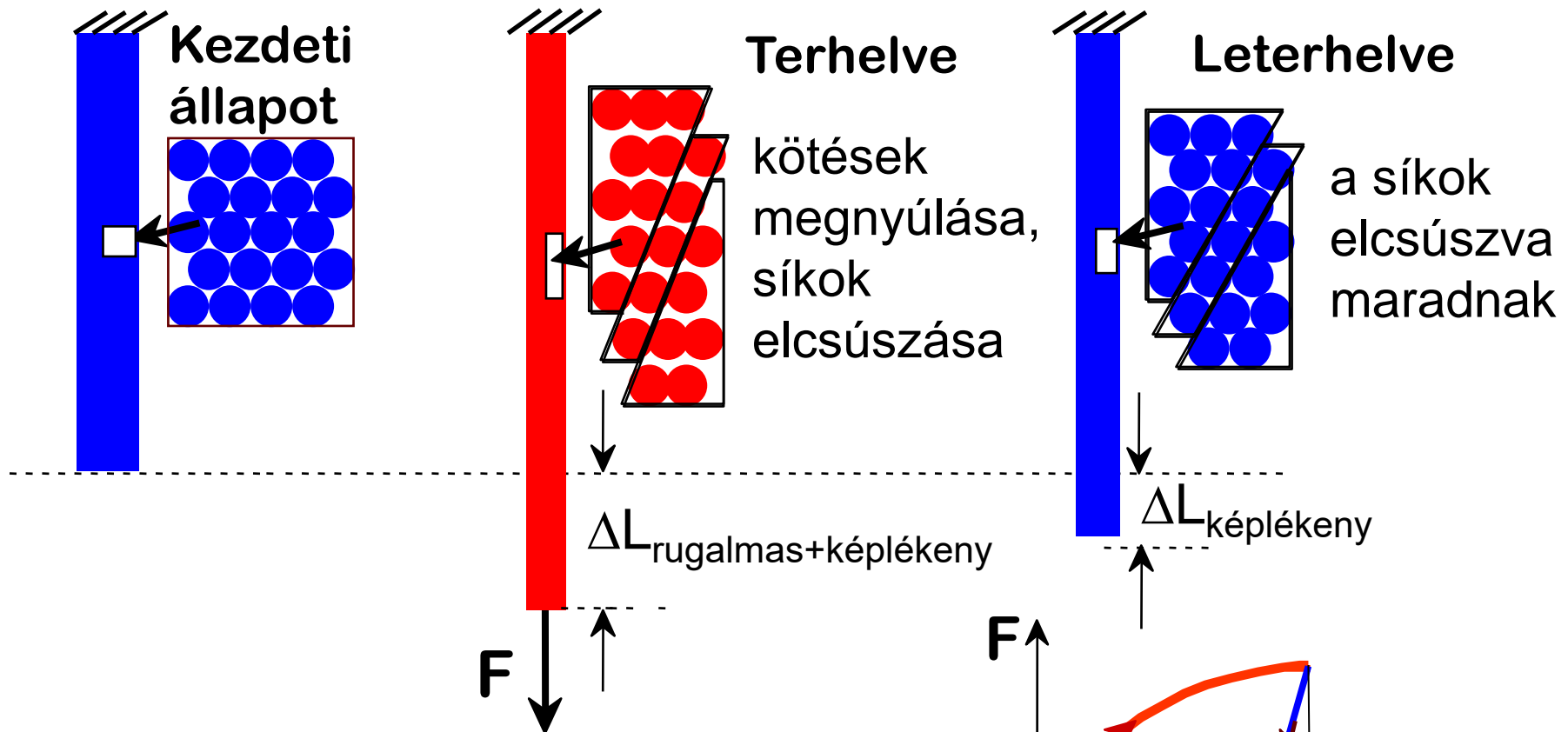


**Rugalmas = reverzibilis**

**Rugalmas alakváltozásnál a térfogat nem állandó.**

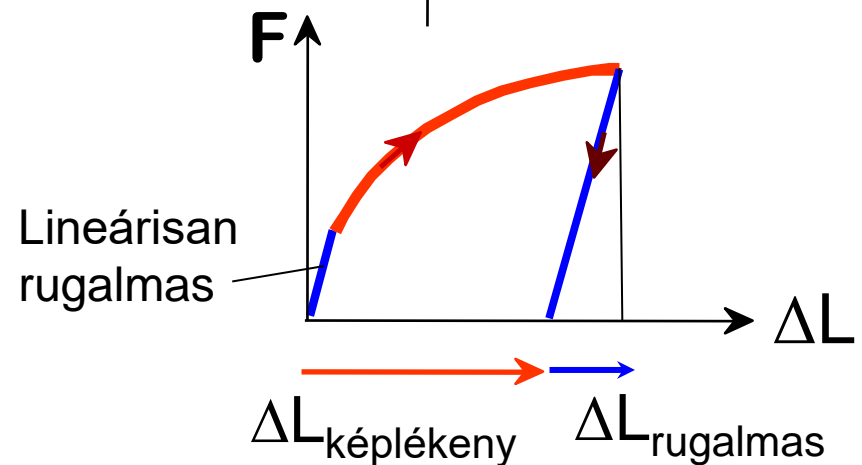


# KÉPLÉKENY ALAKVÁLTOZÁS



**Képlékeny = maradó**

**Képlékeny alakváltozásnál a térfogat állandó.**



# HÚZÓ ÉS NYOMÓ IGÉNYBEVÉTEL

Alakváltozás

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

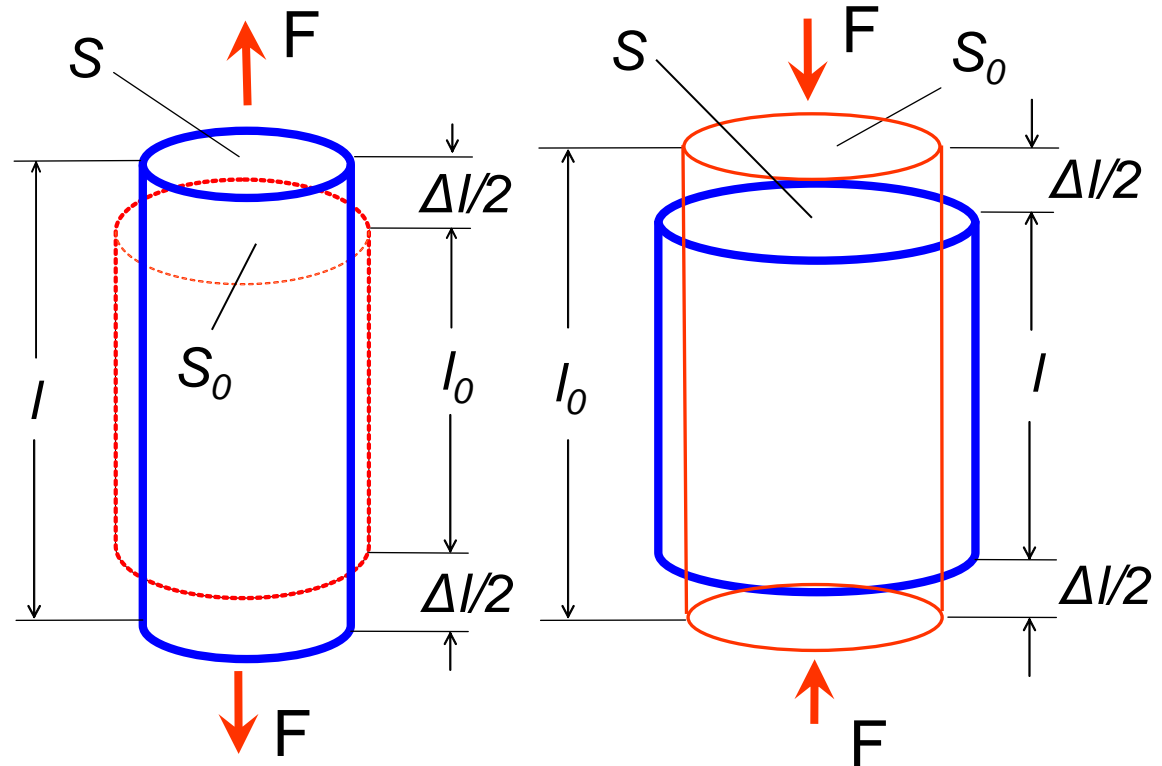
Feszültség

$$\sigma = \frac{F}{S} \approx \frac{F}{S_0}$$

Rugalmas állapotban

$$\sigma = E \varepsilon$$

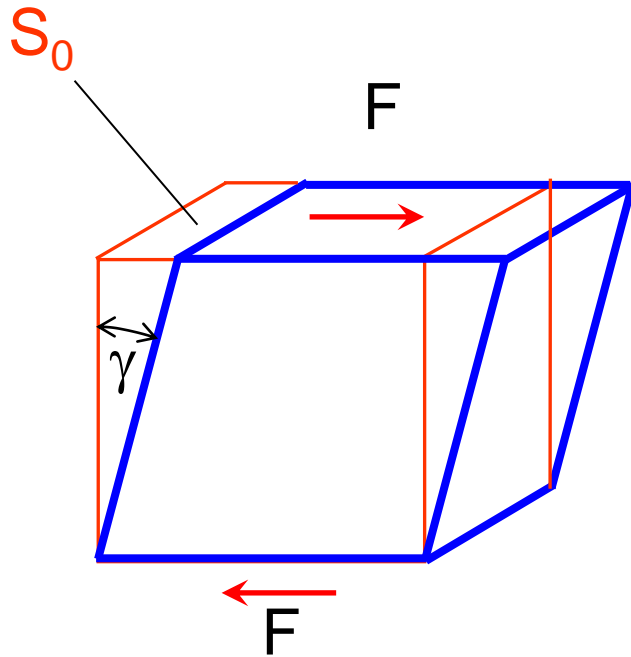
(Hooke-törvény)



Húzás

Nyomás

# NYÍRÓ IGÉNYBEVÉTEL

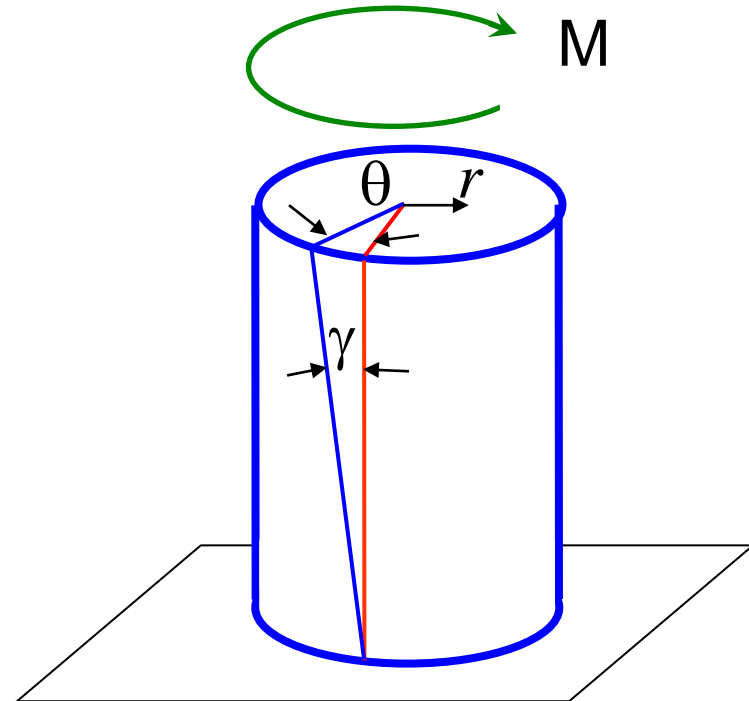


Egyszerű nyírás

$$\tau = \frac{F}{S} \approx \frac{F}{S_0}$$

Rugalmas állapotban

$$\tau = G\gamma$$



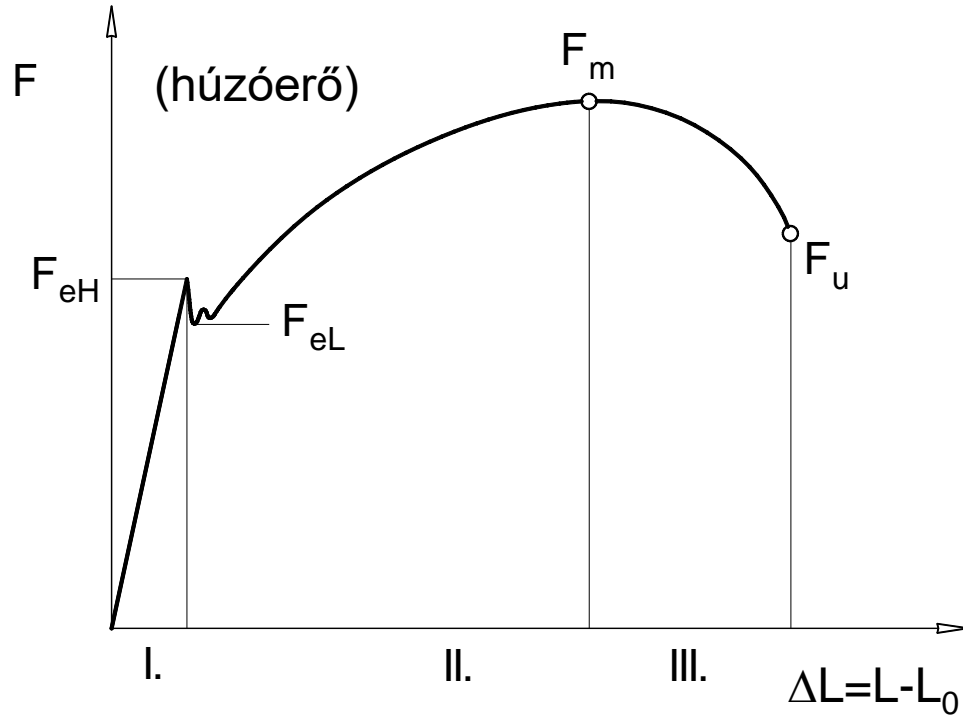
Csavarás

$$\tau = \frac{M}{I_p} r$$



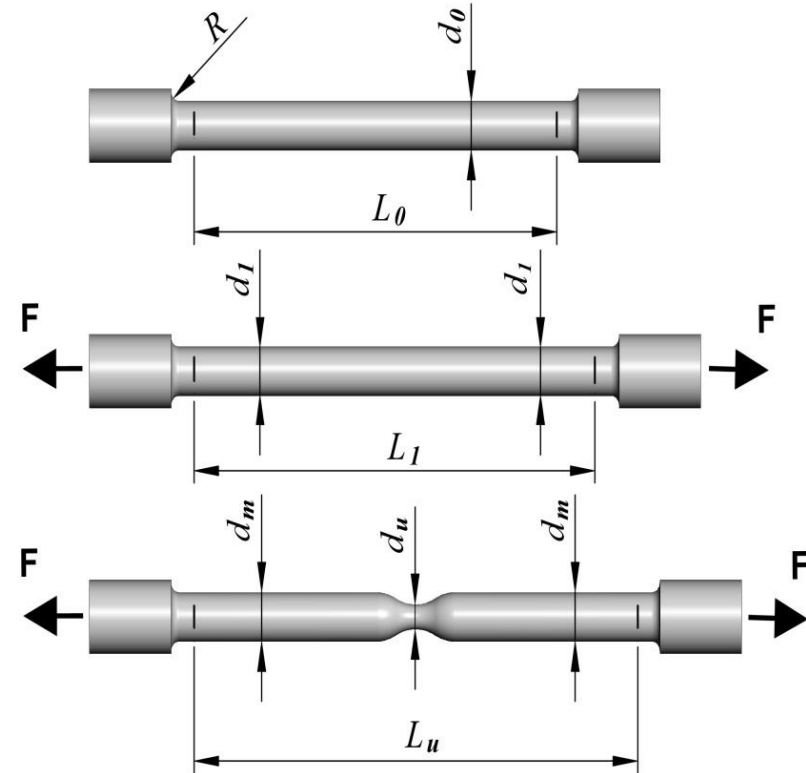
# SZAKÍTÓVIZSGÁLAT

## Szakítódiagram



- I. Rugalmas alakváltozás
- II. Egyenletes képlékeny alakváltozás
- III. Kontrakció

## Próbatestek



# SZABVÁNYOS MÉRŐSZÁMOK

## *Feszültségi mérőszámok*

### **Folyáshatár [MPa]**

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}, \quad R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$$

### **Szakítószilárdság [MPa]**

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

## *Alakváltozási mérőszámok*

### **Kontrakció**

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100 \text{ [\%]}$$

### **Szakadási nyúlás**

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100 \text{ [\%]}$$

# MECHANIKAI MENNYISÉGEK

- *MéRNÖKI rendszer*

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$\varepsilon = \frac{S_0}{S} - 1$$

$$\sigma^M = \frac{F}{S_0}$$

$$W_c = \int_0^{\varepsilon_u} \sigma^M d\varepsilon$$

- *Valódi rendszer*

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0}$$

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S}$$

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$W_c = \int_0^{\varphi_u} \sigma d\varphi$$

**Alakváltozás**

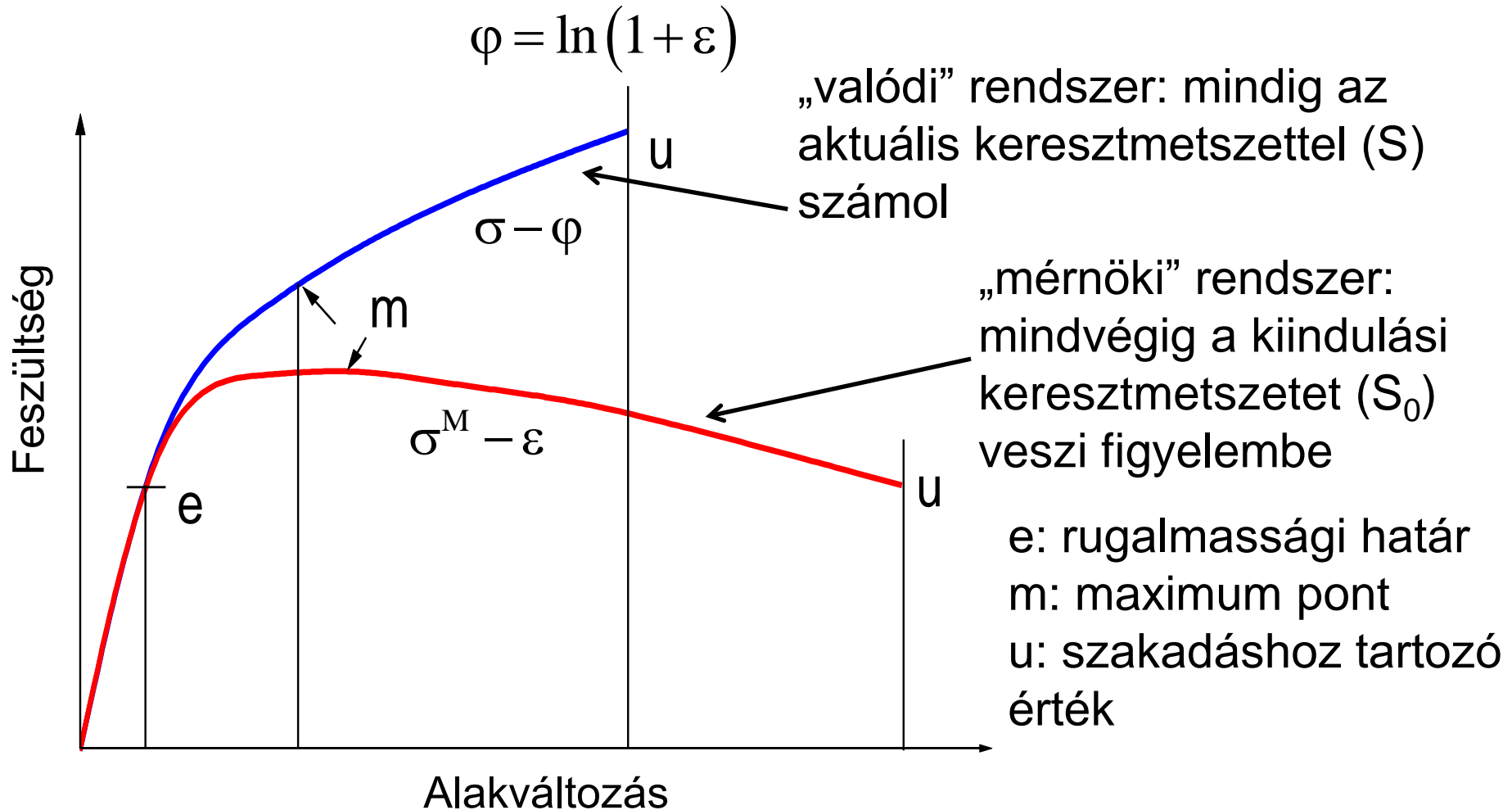
**Feszültség**

**Fajlagos törési  
munka [J/cm<sup>3</sup>]**

# FESZÜLTSG-ALAKVÁLTOZÁS GÖRBÉK

$$F = \sigma S = \sigma^M S_0 \Rightarrow \sigma = \sigma^M (1 + \varepsilon)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon)$$



# LINEÁRIS RUGALMAS TULAJDONSÁGOK

- Rugalmassági modulusz:  
 $E$  (Young-modulusz)

- Hooke- törvény:

$$\sigma = E \varepsilon$$

- Poisson-tényező,  $\nu$ :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon}$$

fémek:  $\nu \sim 0,33$

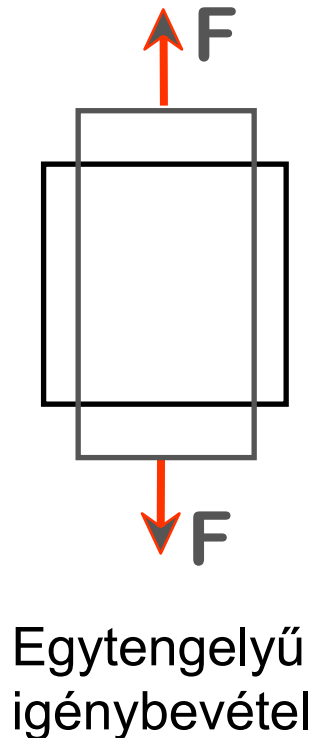
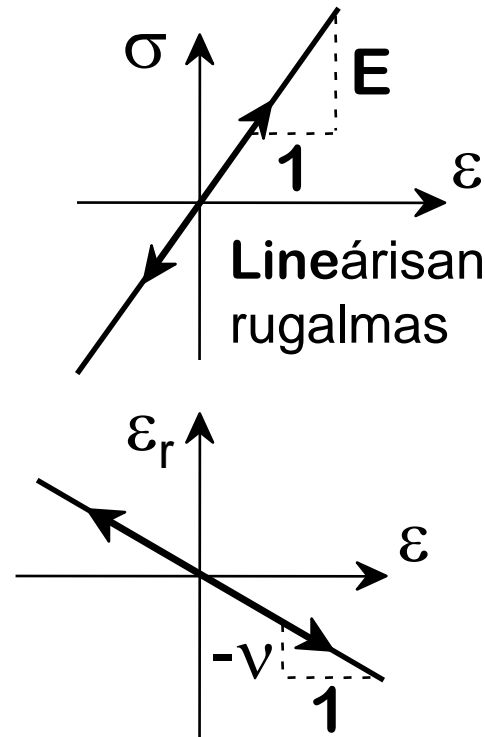
kerámiák :  $\nu \sim 0,25$

polimerek :  $\nu \sim 0,40$

Egységek:

$E$ : [GPa] vagy [MPa]

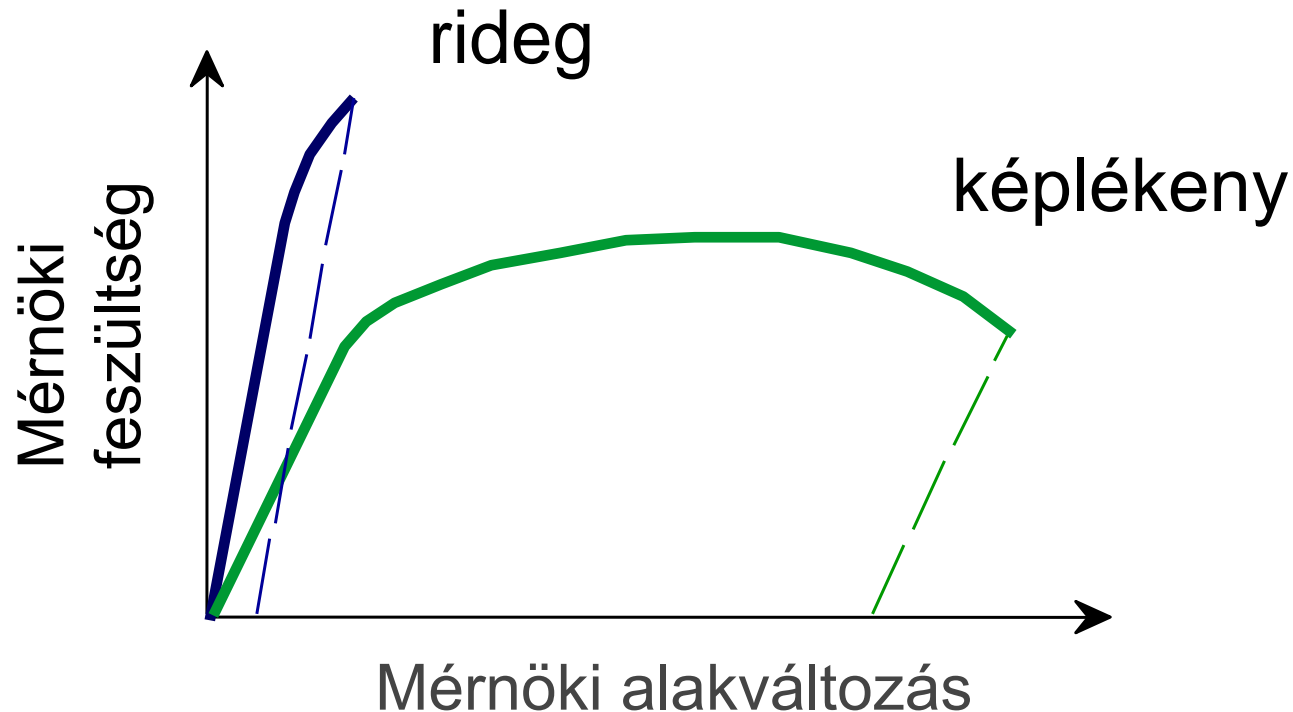
$\nu$ : dimenzió nélküli



$\varepsilon_r$  - radiális alakváltozás

$$E_{\text{kerámia}} > E_{\text{fém}} \gg E_{\text{polimer}}$$

# KÉPLÉKENY / RIDEG VISELKEDÉS



ha a maradó alakváltozás közel nulla, akkor rideg,  
ha a maradó alakváltozás jelentős, akkor képlékeny

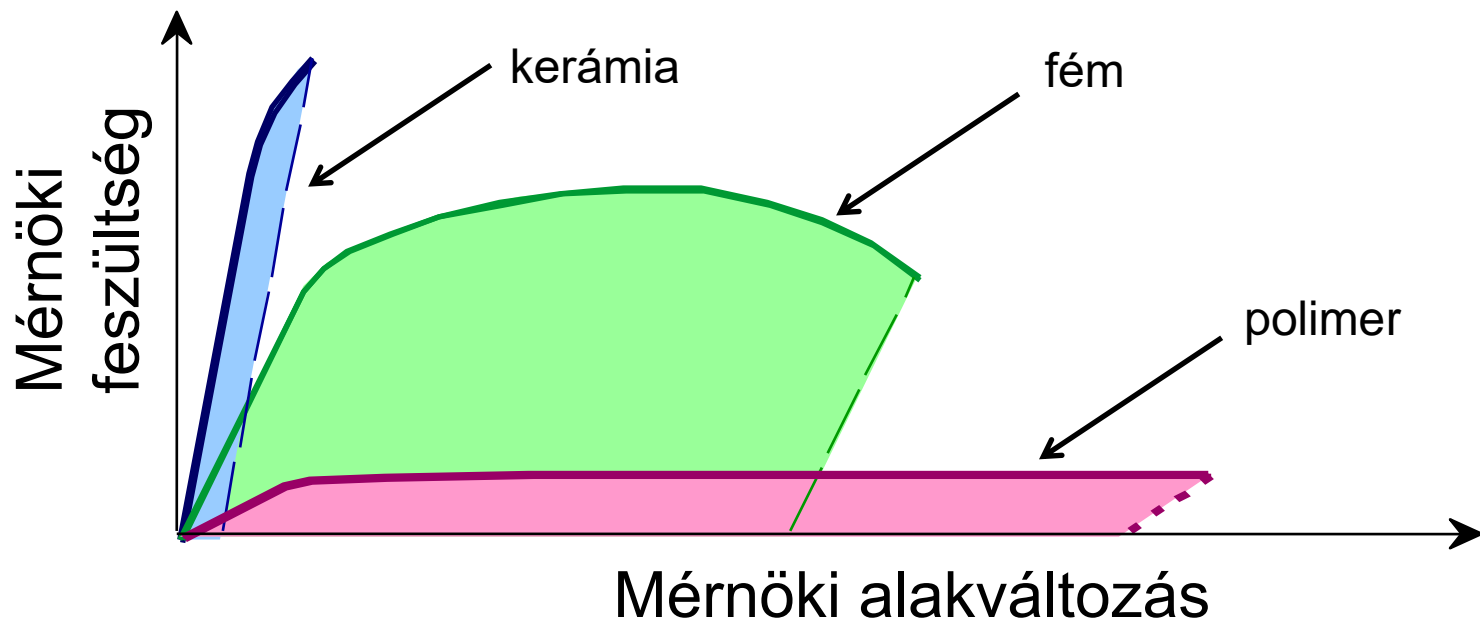
# SZÍVÓSSÁG

Az anyag törésig tartó energiaelnyelő képessége.

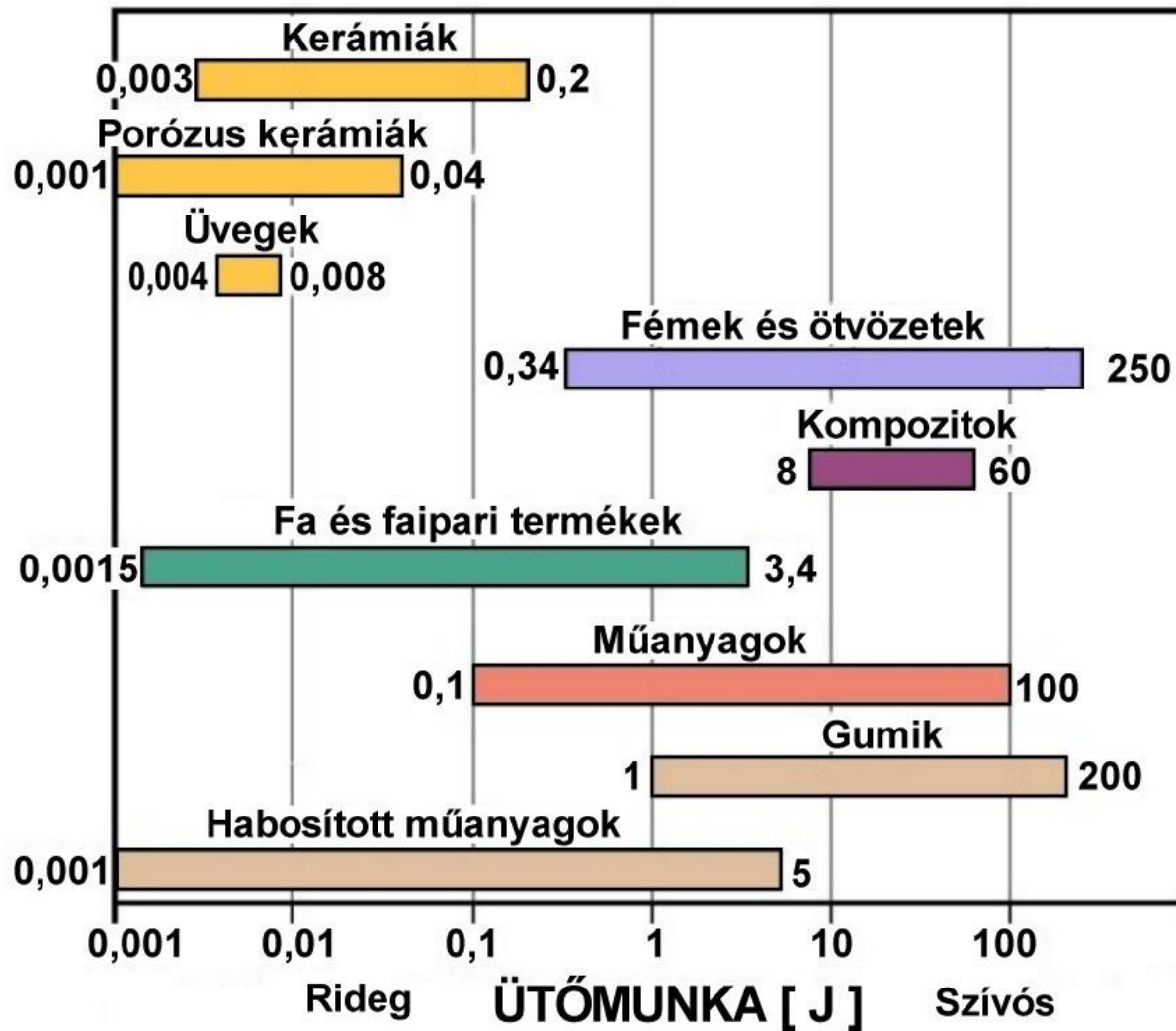
**kerámia:** kis szívósság (nagy szilárdság, rideg viselkedés)

**fém:** nagy szívósság (közepes szilárdság, képlékeny viselkedés)

**polimer:** kis szívósság (kis szilárdság, képlékeny viselkedés)



# SZÍVÓSSÁG



(töréshez szükséges fajlagos energia)



# KÜLÖNBÖZŐ ANYAGOK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI 20 °C-ON

Anyag	E [GPa]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]
Acél	190-210	200-1700	400-1800	65-2
Alumínium-ötv.	69-79	35-550	90-60	45-4
Réz és ötv.	105-150	75-1100	140-1300	65-3
Titán és ötv.	80-130	340-1400	410-1450	25-7
Kerámiák	70-1000	-	140-2600	0
Gyémánt	820-1050	-	-	-
Polimerek	1,4-3,4	-	7-80	1000-5
Karbonszál	275-415	-	2000-3000	0
Kevlárszál	62-120	-	2800	0

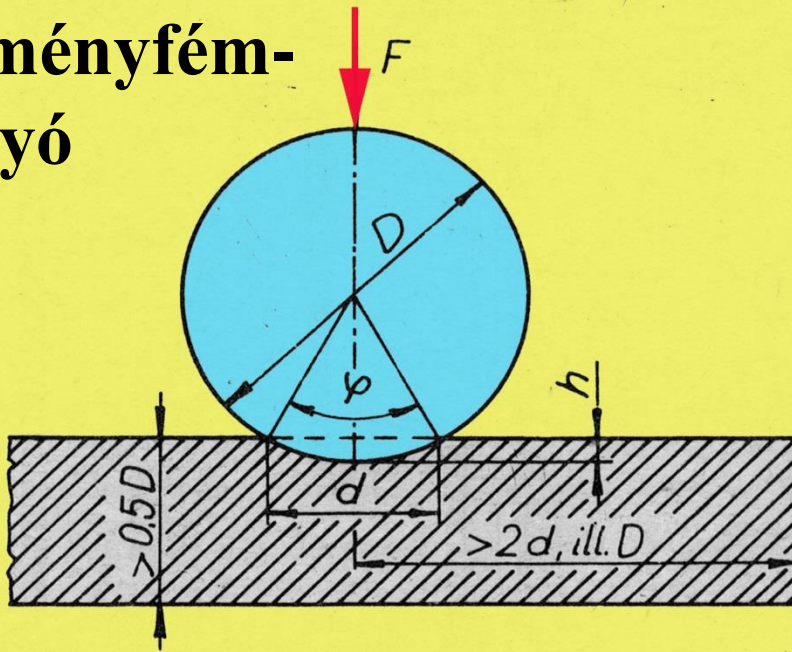
# KEMÉNYSÉGMÉRÉS

- **A (statikus) keménység fogalma:**
  - A vizsgált anyag ellenállása az adott geometriájú szűrőszerszám behatolásával szemben.
- **A keménység kapcsolata más tulajdonságokkal:**
  - Keménységi adatokból becsülhetők a szilárdsági és technológiai tulajdonságok.
- **A keménységmérés kivitelezése:**
  - Alakváltozás létrehozásával
  - Fizikai hatások alkalmazásával

# BRINELL-KEMÉNYSÉGMÉRÉS

$$HBW = \frac{0.102F}{A} = \frac{0.102F}{D\pi h} = \frac{0.204F}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

**keményfém-  
golyó**



$F$  – terhelő erő  $[N]$

$A$  – lenyomat felület  $[mm^2]$

$D$  – golyóátmérő  $[mm]$

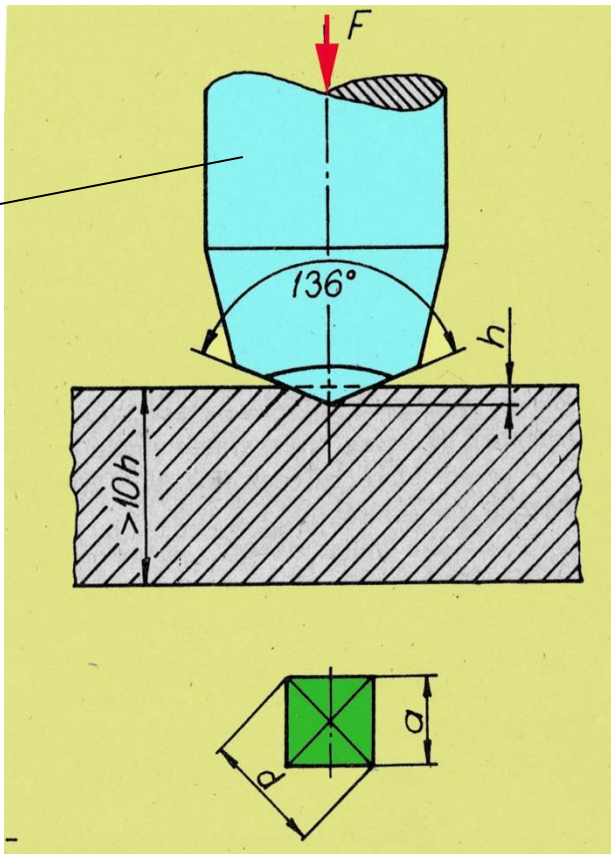
$d$  – lenyomat átmérő  $[mm]$

$h$  – lenyomat mélység  $[mm]$

Átlagos keménység értéket ad (inhomogén anyag vizsgálatánál előnyös). Következtetni lehet az anyag szilárdságára. Öntöttvasak, színes- és könnyűfémek, lágyacélok mérésére alkalmazható.

# VICKERS-KEMÉNYSÉGMÉRÉS

gyémánt-  
gúla



$$HV = \frac{0.102F}{A} = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

$F$  – terhelő erő  $[N]$

$A$  – lenyomat felület  $[mm^2]$

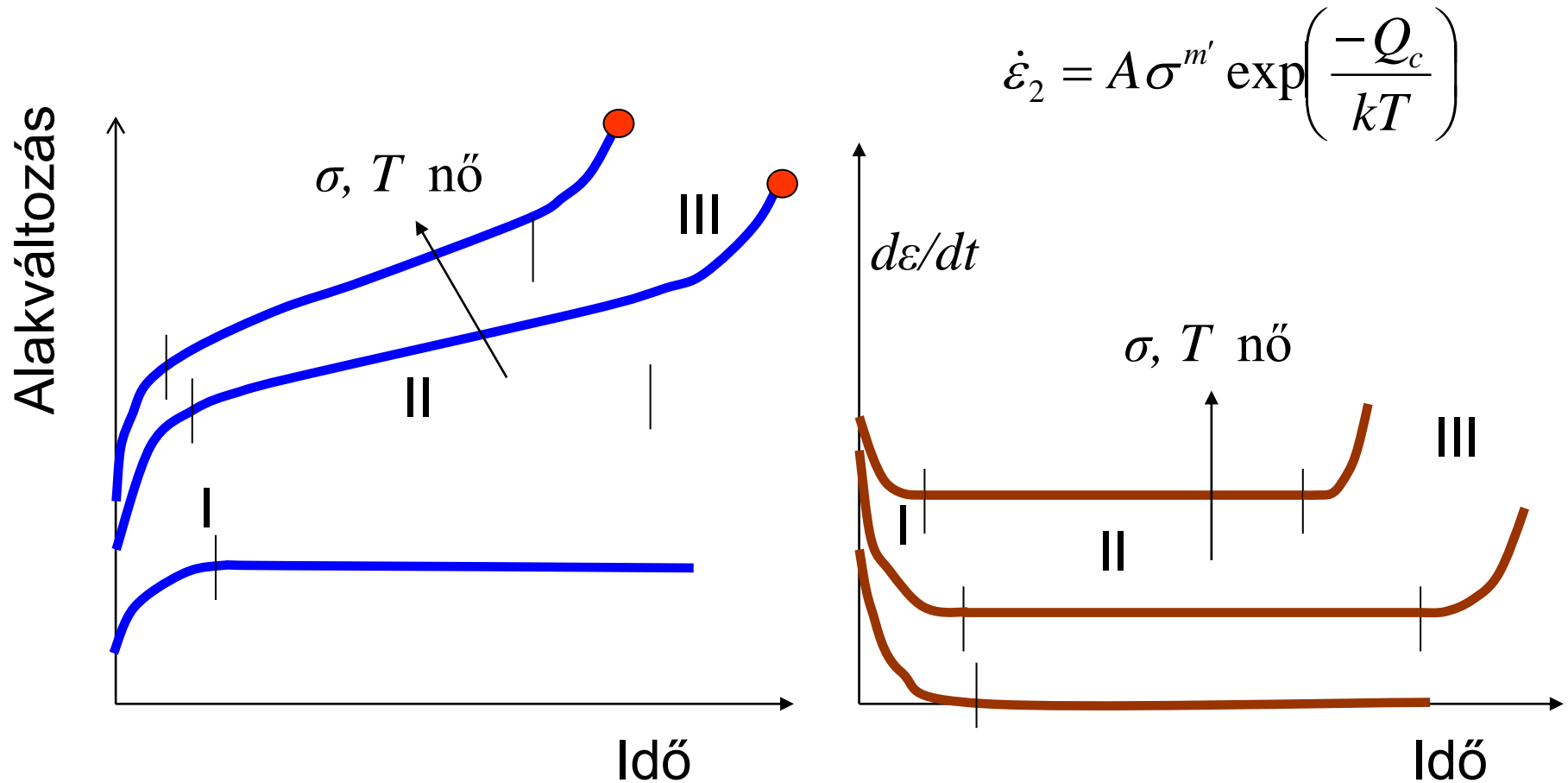
$d$  – lenyomat átló  $[mm]$

Lokális keménység pontos meghatározása. Tetszőleges anyagminőség laboratóriumi vizsgálata. A kis terhelésű és mikro-Vickers eljárás vékony lemezek, rétegek és szövetelemek vizsgálatára használható.

# KÚSZÁS

- Tartósfolyás vagy kúszás: állandó terhelés hatására növekszik az anyag alakváltozása
- Tartósfolyási határ: az a feszültség, amely végtelenül hosszú idő alatt sem okoz az előírtnál nagyobb alakváltozást ( $\sigma_{T0.2}$ )
- Időtartam szilárdság: az a feszültség, amely  $t$  idő alatt előírt  $\varepsilon_t$  alakváltozást hoz létre (pl.  $\sigma_{0.2/10^3}$ )
- Tartósfolyás tipikusan nagy hőmérsékleten lejátszódó jelenség.  $T > 0.4 T_{olv}$  [K]
- Alacsony olvadáspontú fémek, ötvözetek (pl. forraszkok) kúszási jelensége már szobahőmérsékleten is jelentős lehet
- Mérnöki alkalmazás: gázturbina üzemi hőmérséklete 1300 °C
- Utasszállító repülőgép leszállás nélkül átrepüli az óceánt

# A KÚSZÁS ÁLTALÁNOS GÖRBÉJE



$A, m'$  - anyagjellemzők,  $Q_c$  - aktivációs energia,  
 $k$  – Boltzmann állandó,  $\sigma$  - terhelő feszültség

# A KÚSZÁSI GÖRBE HÁROM SZAKASZA

## I. Elsődleges (primer) kúszás

Az alakváltozási sebesség az idővel és az alakváltozással csökken. A diszlokáció sűrűség nő, a diszlokációs cellaméret csökken az idővel és az alakváltozással.

## II. Másodlagos (szekunder) kúszás (állandósult állapot)

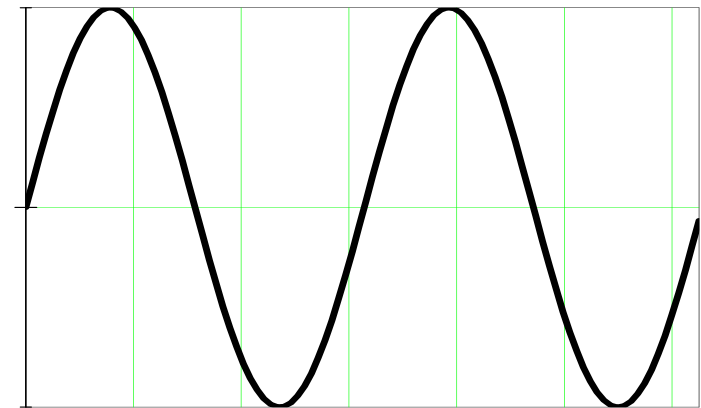
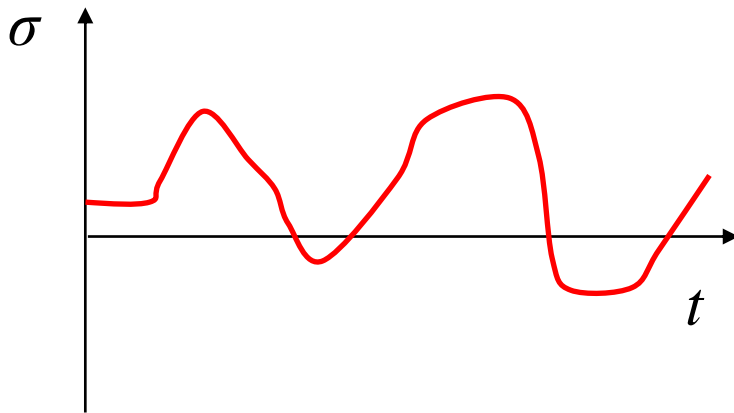
A keményedési és a megújulási folyamatok egyensúlyban vannak.

## III. Harmadlagos (tercier) kúszás

Rekrisztallizáció, a második fázisú részecskék durvulása kezdődik, az üregek és repedések kialakulása indul be.

# FÁRADÁS

A kifáradás jelenségét A. Wöhler ismerte fel az 1800-as évek végén. Biztonságra méretezett vasúti tengelyek hosszabb üzemidő után az ismétlődő igénybevételek hatására eltörtek, annak ellenére hogy a terhelő feszültség **jóval a folyáshatár alatt** volt. Ez a jelenség hívta fel a figyelmet a kifáradásra.



Szinuszos feszültségváltozás



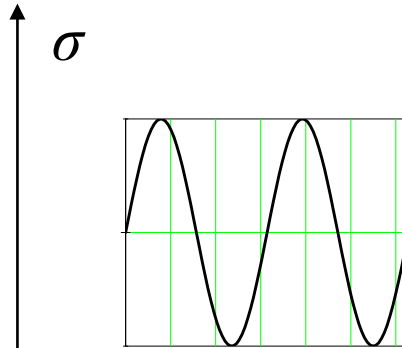
# CIKLIKUS TERHELÉS JELLEMZŐI

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$$

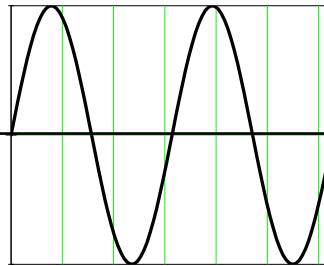
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a f(t)$$

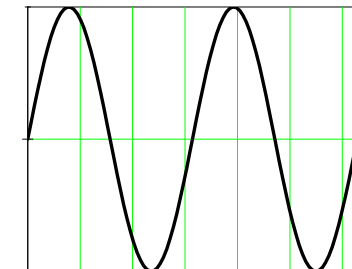
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$



Lengő (pozitív)



Lüktető (nullkezdésű)

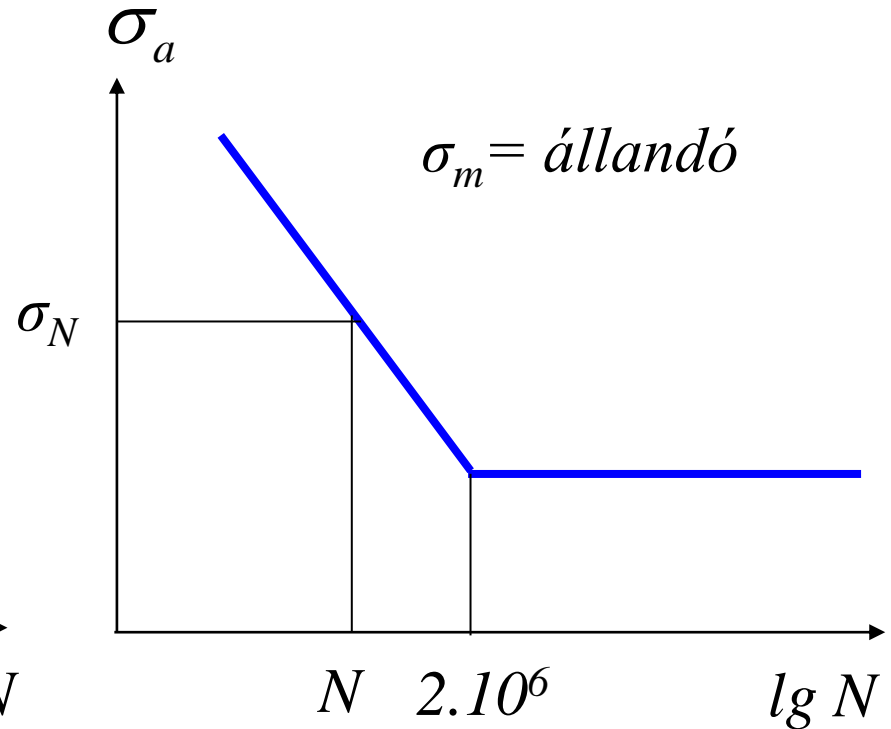
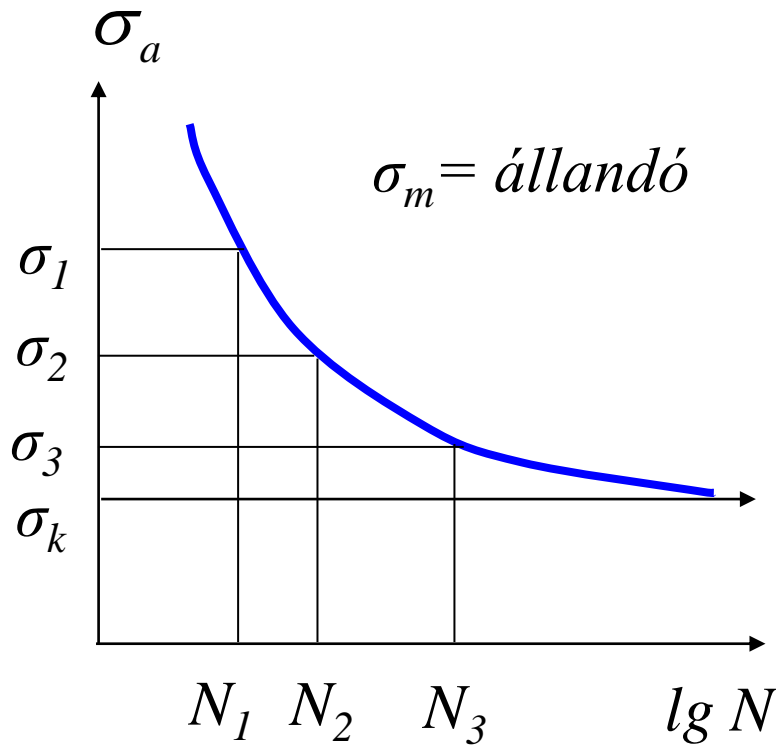


Lengő (negatív)

$\sigma_m = \text{középfeszültség}$

$\sigma_a = \text{feszültségamplitúdó}$

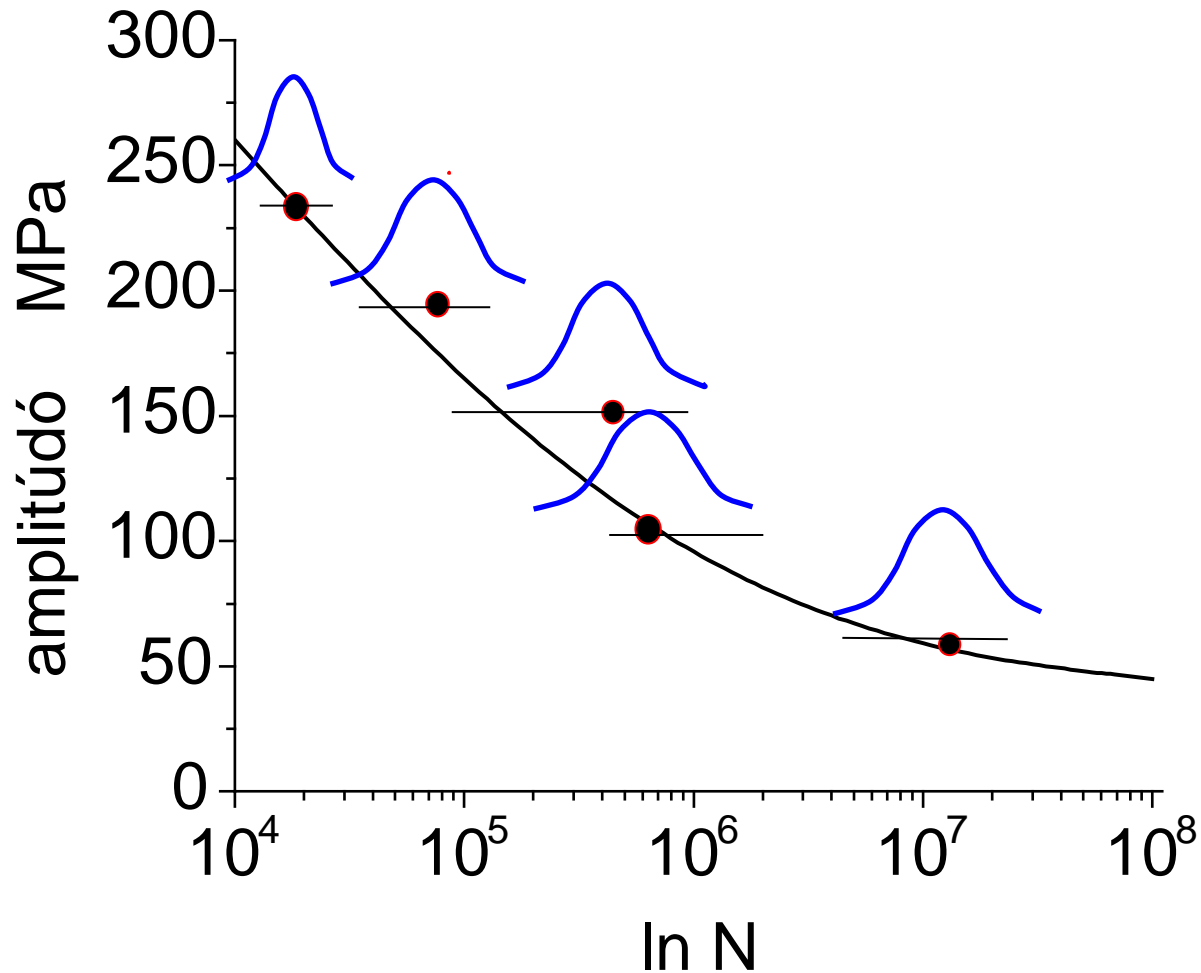
# WÖHLER-GÖRBE



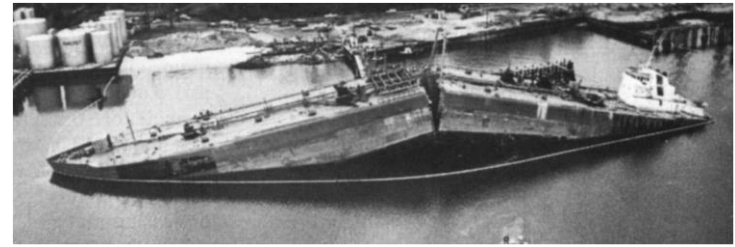
Kifáradási határ: az a feszültség-amplitúdó (adott közép feszültségnél), amely végtelen sok igénybevétel esetén sem okoz törést.

Tartamszilárdság: az a feszültség-amplitúdó (adott közép feszültségnél), amely megadott igénybevételi számig nem okoz törést.

# A FÁRADÁS STATISZTIKUS JELLEGŰ



# TÖRÉS



**Törés:** az anyagban folytonossági hiány jön létre, amitől darabokra eshet szét.

**Törés folyamata:**

- Repedés keletkezése;
- Repedés terjedése és a törés létrejötte.

**Képlékeny (szívós) törés:** a törést megelőzően jelentős mértékű képlékeny alakváltozás lép fel.

**Ridegtörés:** hirtelen bekövetkező jelenség, minimális képlékeny alakváltozás előzi meg. A kis hőmérséklet, a bonyolult húzó feszültségi állapot és a nagy terhelési sebesség elősegíti a ridegtörés fellépését.

**Repedés mindig van az anyagban, legfeljebb nem tudjuk kimutatni.**

# REPEDÉS KELETKEZÉSE AZ ÜZEMELÉS SORÁN

- Időleges túlterhelés, illetve környezeti tényezők hatása
- Korróziós fáradás
- Feszültségkorrózió
- Hidrogén okozta elridegedés
- Hőmérséklet és mechanikai terhelés együttes hatása, kúszási repedés
- Hősokek okozta repedés.

## **Repedések kimutatása:**

roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerekkel.

# Ellenőrző kérdések

## **Alapfogalmak definiálása:**

- rugalmas alakváltozás
- képlékeny alakváltozás
- folyáshatár
- szakítószilárdság
- kontrakció
- szakadási nyúlás
- mérnöki és valódi rendszer közti különbség
- szívósság
- szakítóvizsgálat
- keménységmérés (Brinell, Vickers)
- kúszás, kúszáshatár
- fáradás, kifáradási határ
- Wöhler-görbe

# Igaz-hamis kérdések

- Rugalmas alakváltozás során a terhelés megszűnése után az anyag visszanyeri az eredeti alakját. (I)
- A képlékeny alakváltozás térfogatváltozással jár. (H)
- A folyáshatár mértékegysége N (Newton). (H)
- A Vickers-keménységmérés mérőszerszáma egy gyémánt gúla. (I)
- A kúszás ismétlődő igénybevétel hatására bekövetkező tönkremeneteli folyamat. (H)
- A szívósság az anyag törésig tartó energiaeinyelő képessége. (I)