

# **Gép és szerkezeti elemek Mechanikai tulajdonságok**

Borbás Lajos

Prof. Emeritus

Bevezetés

Rugalmas és képlékeny alakváltozás

Egyszerű igénybevételek

Szakítóvizsgálat és mérőszámok

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;

**Mechanikai** (terhelés és alakváltozás hatása)

**Elektromos** (elektromos tér hatása)

**Hőfizikai** (hőmérséklet-mező hatása)

**Mágneses** (mágneses tér hatása)

**Optikai** (elektromágneses tér hatása)

**Kémiai**

# Külső terhek áttekintése, osztályozása

## **Jellegét tekintve:**

nyomó, húzó, nyíró, hajlító, csavaró

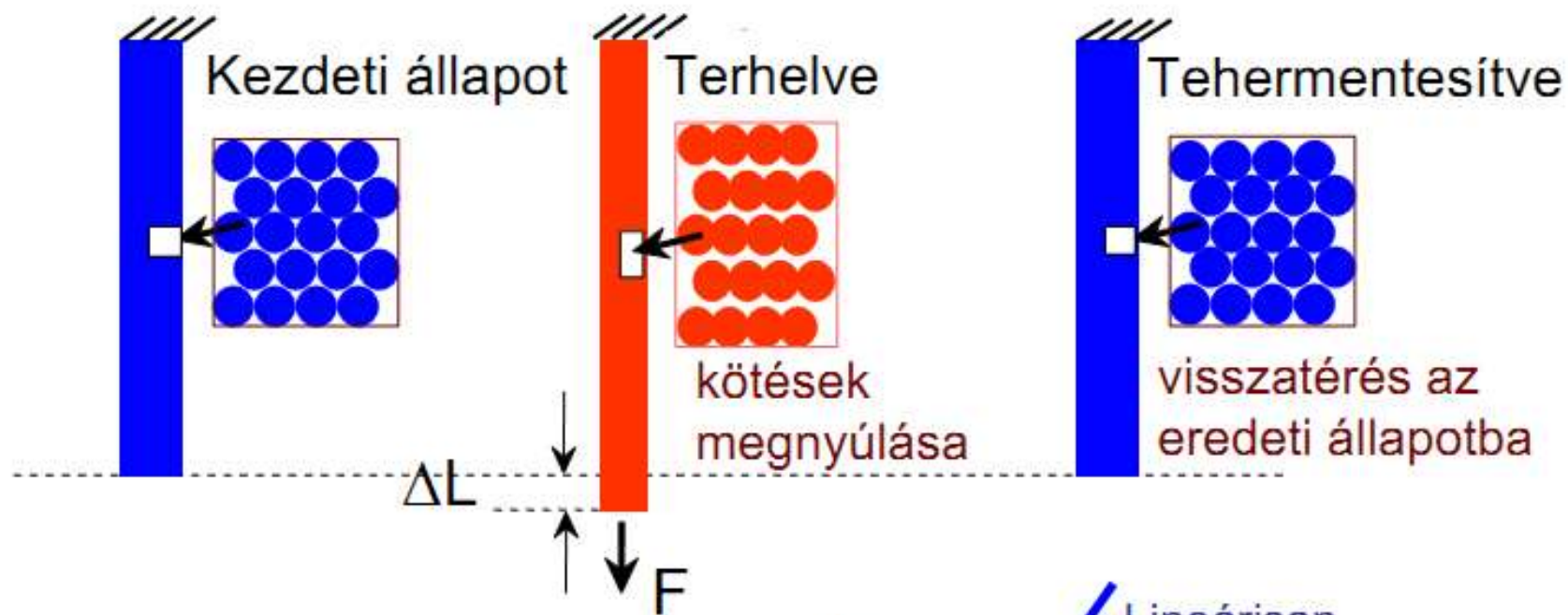
## **Hatását tekintve:**

pontszerű, koncentrikus, megoszló, szimmetrikus,  
aszimmetrikus,

## **Az idő vonatkozásában:**

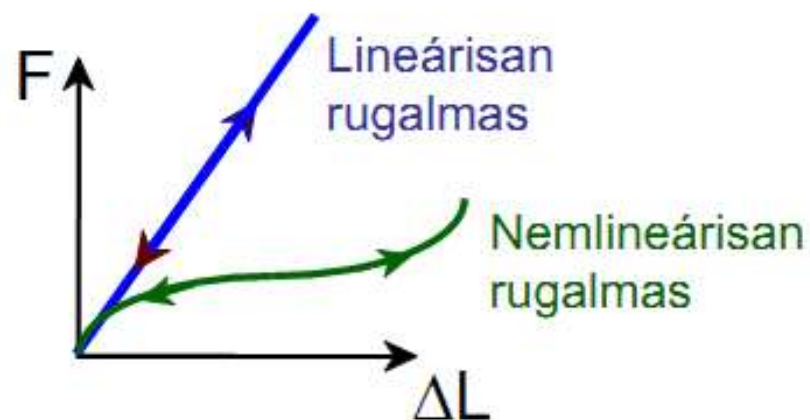
időben állandó (statikus),  
időben változó (ismétlődő)

# Rugalmas alakváltozás

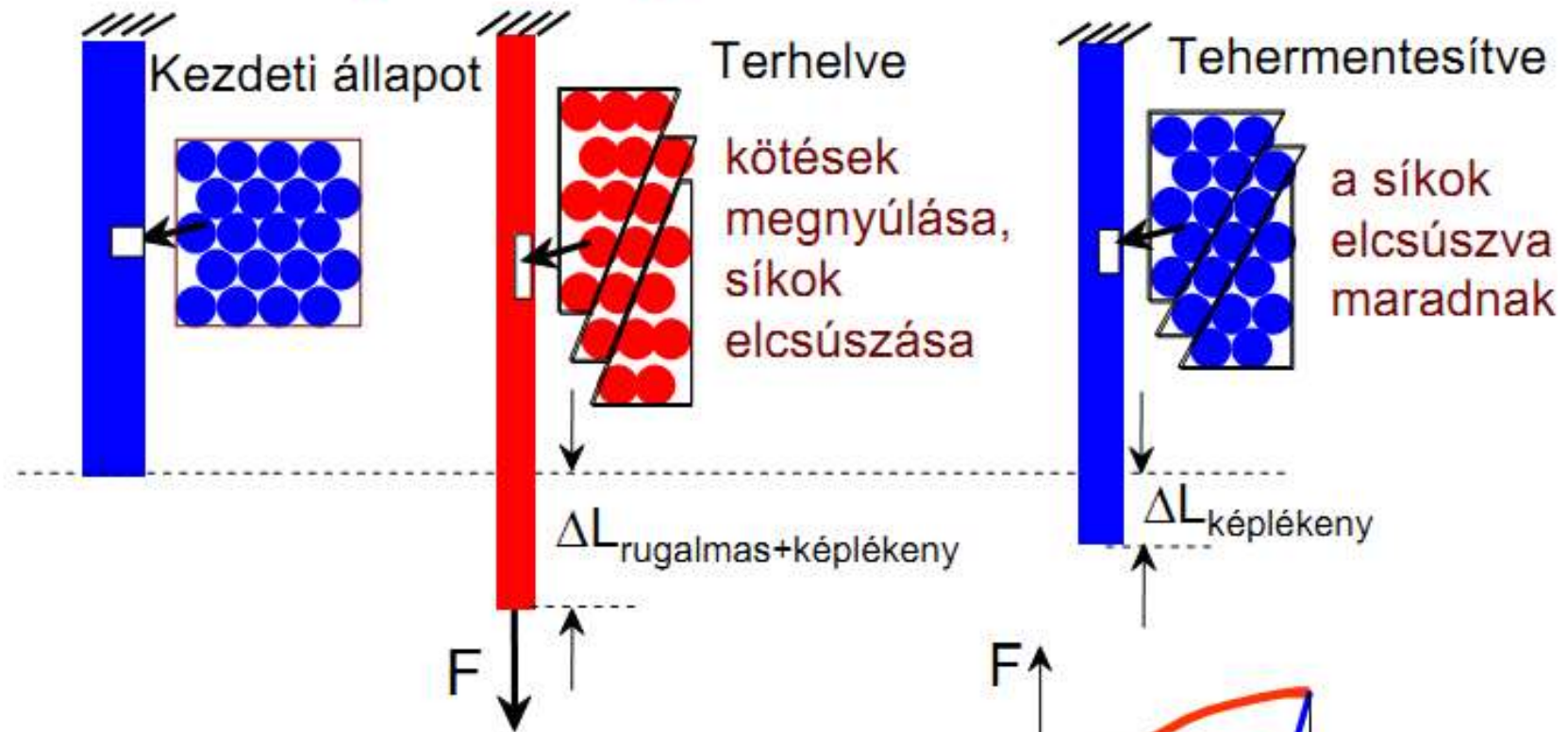


Rugalmas = reverzibilis

Rugalmas alakváltozásnál  
a térfogat nem állandó.

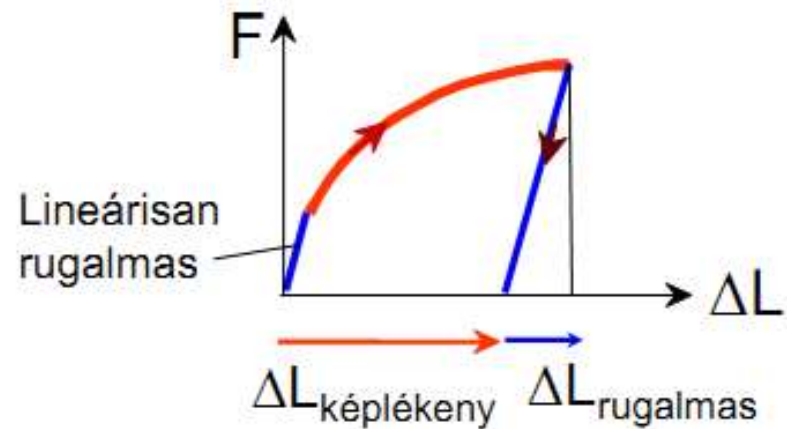


# Képlékeny alakváltozás

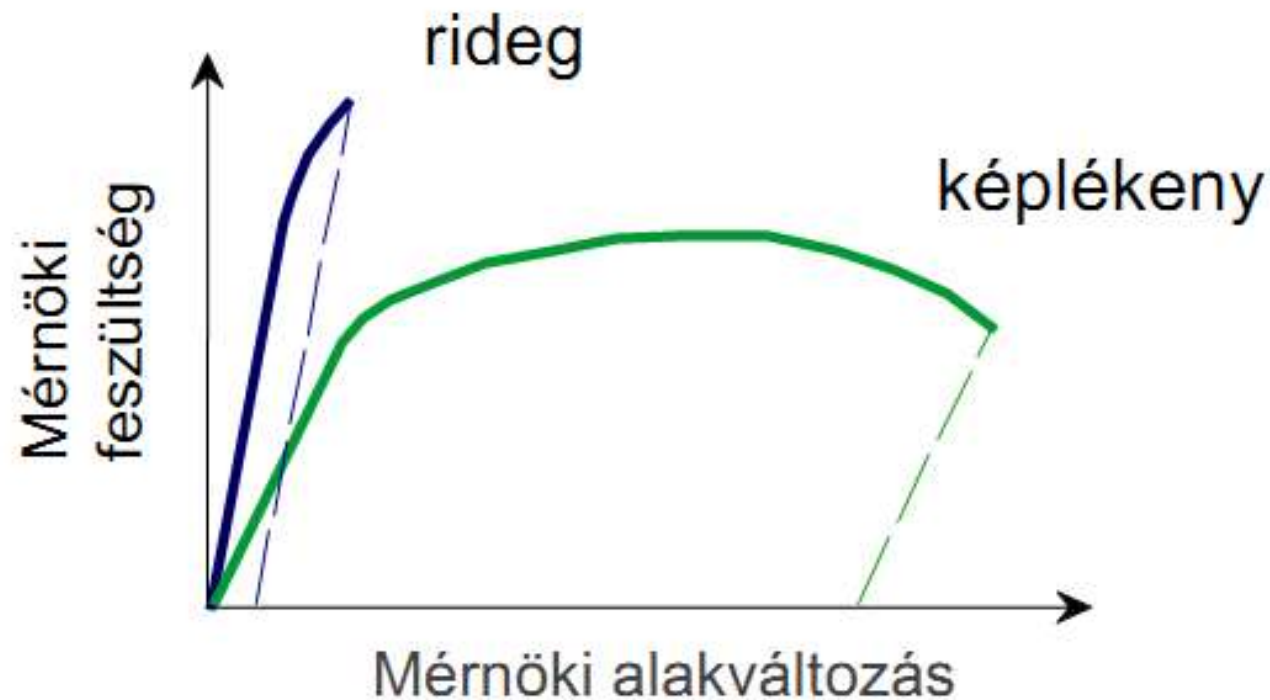


Képlékeny = maradó

**Képlékeny alakváltozásnál a térfogat állandó.**



# Képlékeny / rideg viselkedés



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



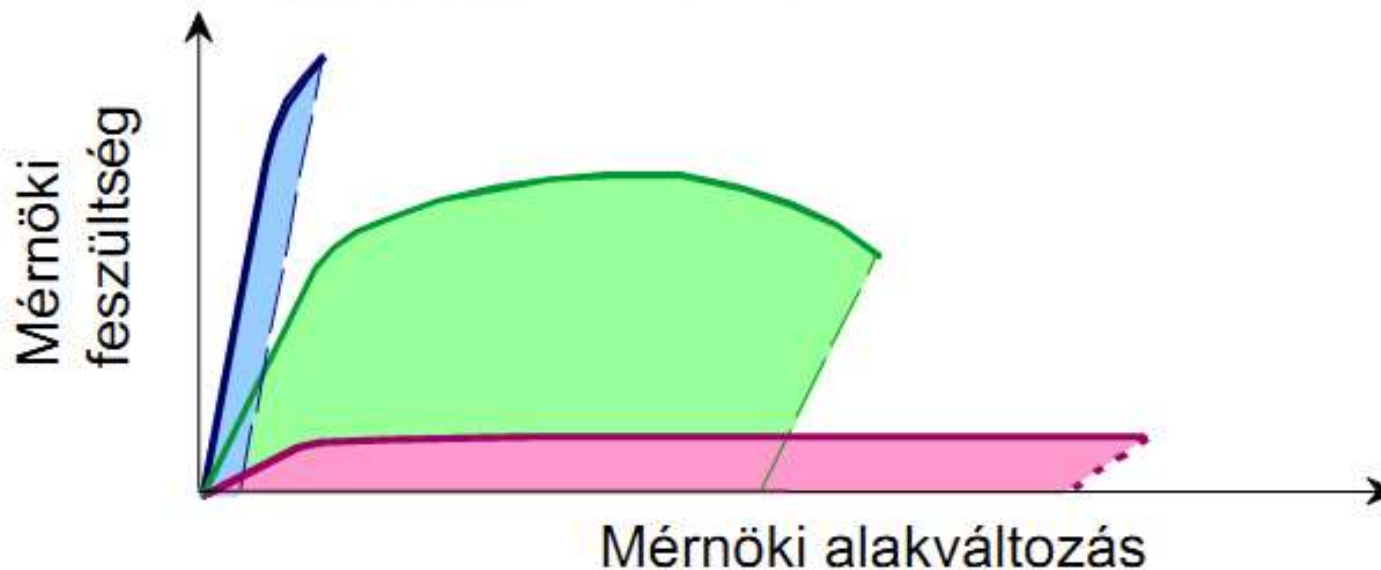
# Szívósság

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)



## Alakváltozás

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

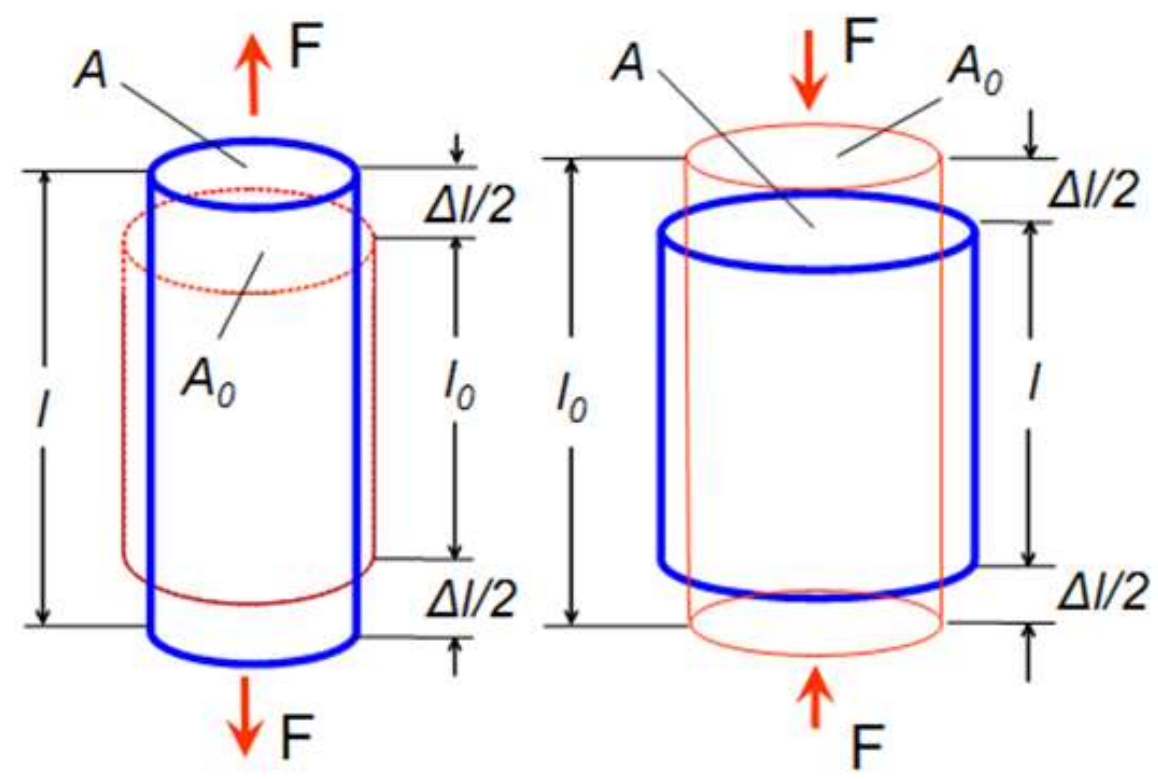
## Feszültség

$$\sigma = \frac{F}{A} \approx \frac{F}{A_0}$$

## Rugalmas állapotban

$$\sigma = E \varepsilon$$

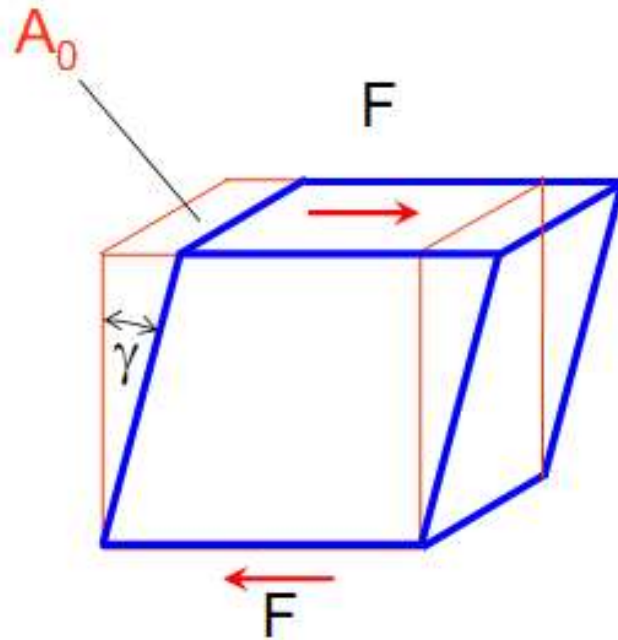
(Hooke-törvény)



Húzás

Nyomás

# Nyíró igénybevétel

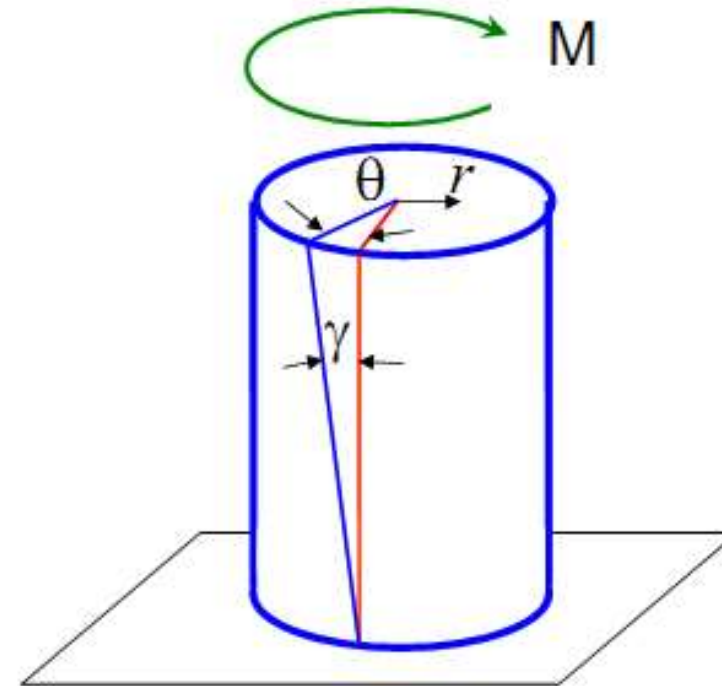


Egyszerű nyírás

$$\tau = \frac{F}{A} \approx \frac{F}{A_0}$$

Rugalmas állapotban

$$\tau = G\gamma$$

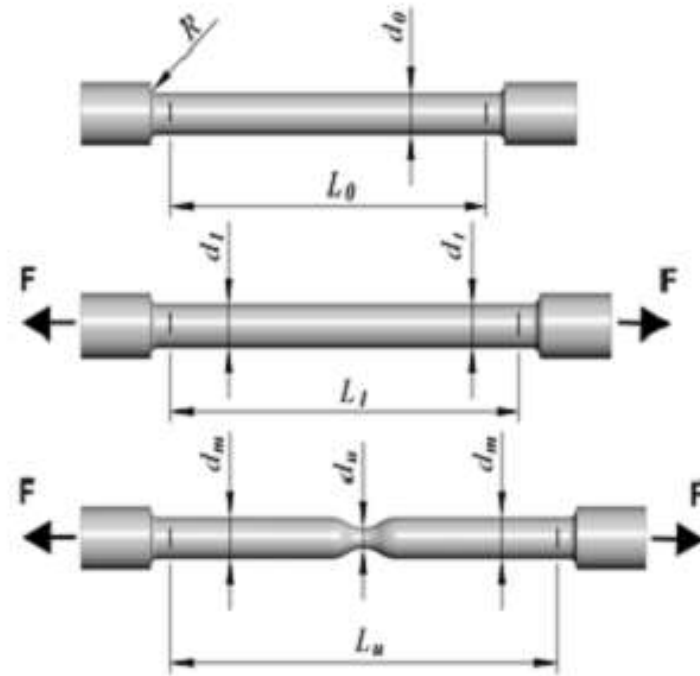
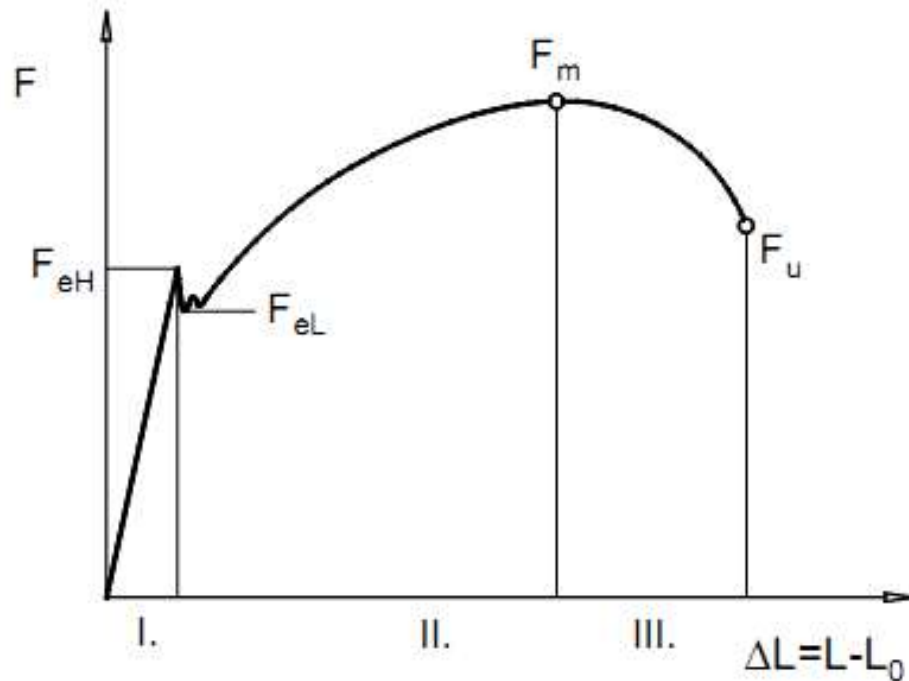


Csavarás

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

# Szakítóvizsgálat

## Szakítódiagram



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

# 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*
- *Valódi rendszer*

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

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

**Alakváltozás**

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

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

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

**Feszültség**

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

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

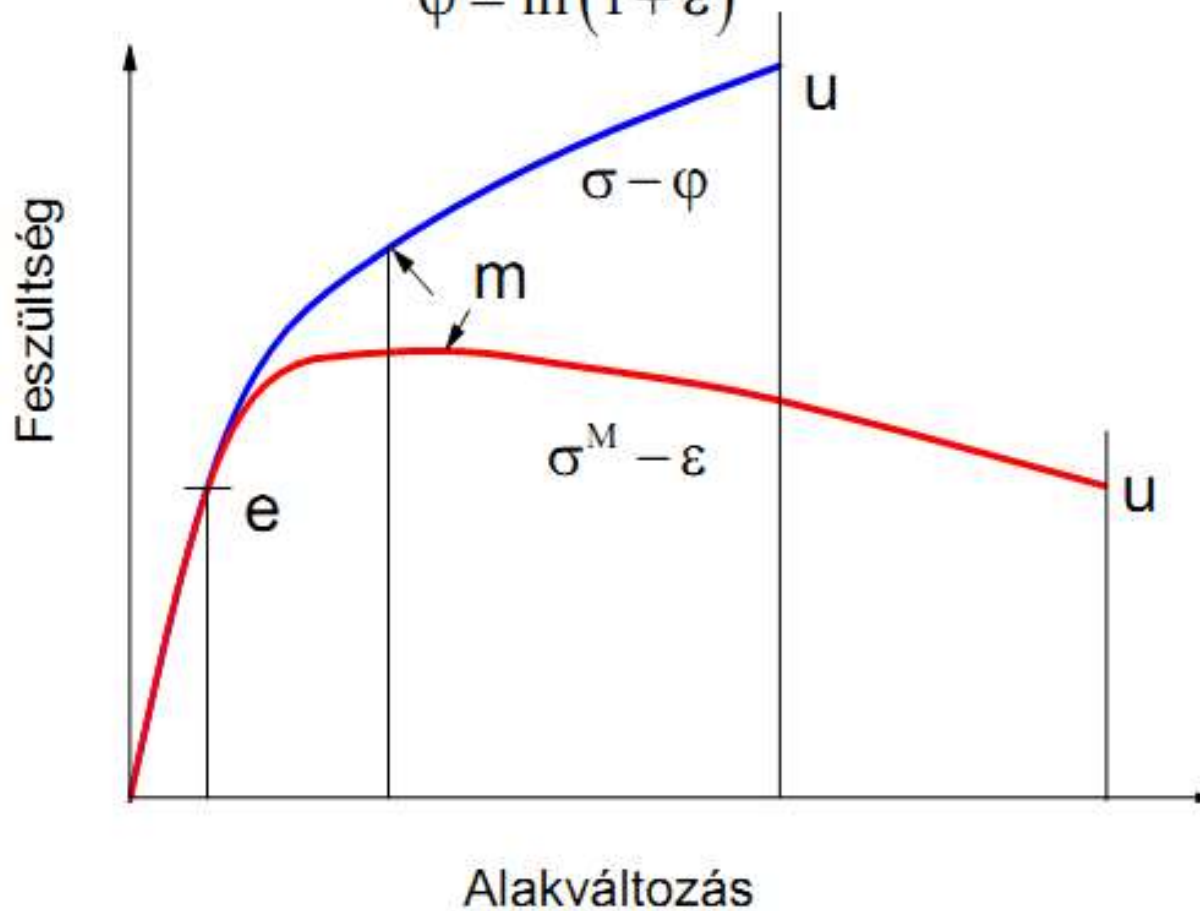
**Fajlagos törési munka [J/cm<sup>3</sup>]**

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

# Feszültség–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:

$$\sigma = E \varepsilon$$

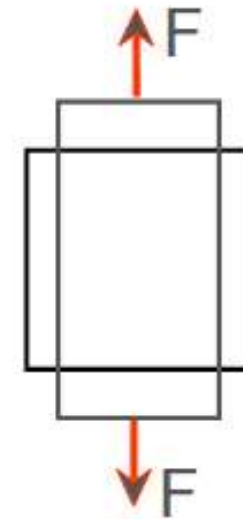
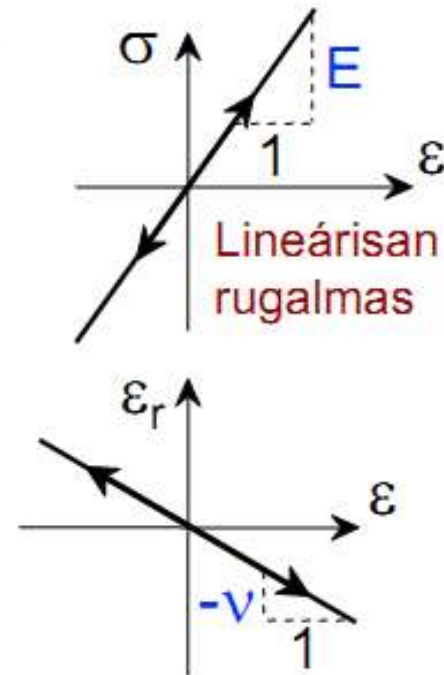
- Poisson-tényező,  $\nu$ :

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

fémek:  $\nu \sim 0,33$   
kerámiák :  $\nu \sim 0,25$   
polimerek :  $\nu \sim 0,40$

Egységek:

E: [GPa] vagy [MPa]  
 $\nu$ : dimenzió nélküli



Egytengelyű igénybevétel

$\varepsilon_r$  - radiális alakváltozás

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



- Csúsztató rugalmassági modulusz,  $G$

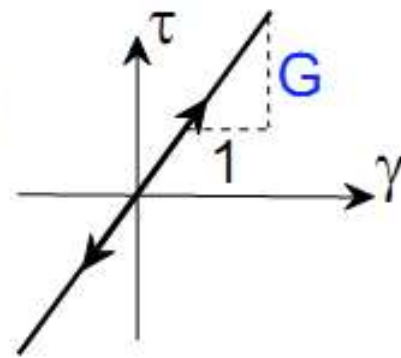
- Hooke- törvény:

$$\tau = G \gamma$$

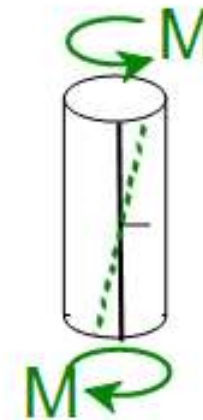
- Térfogati rugalmassági modulusz,  $K$

$$p = -K \frac{\Delta V}{V_0}$$

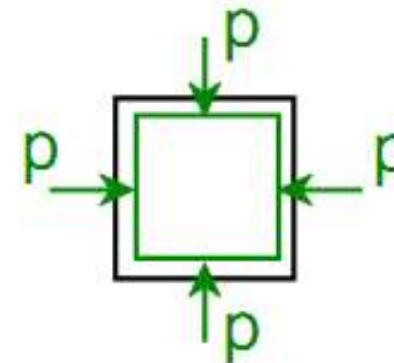
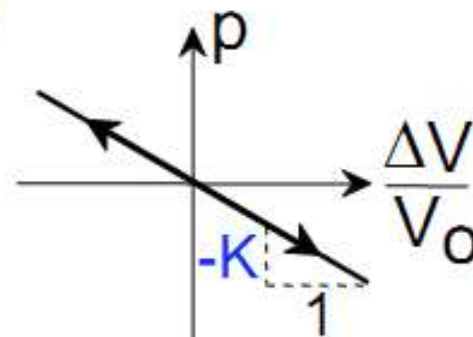
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$



$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$



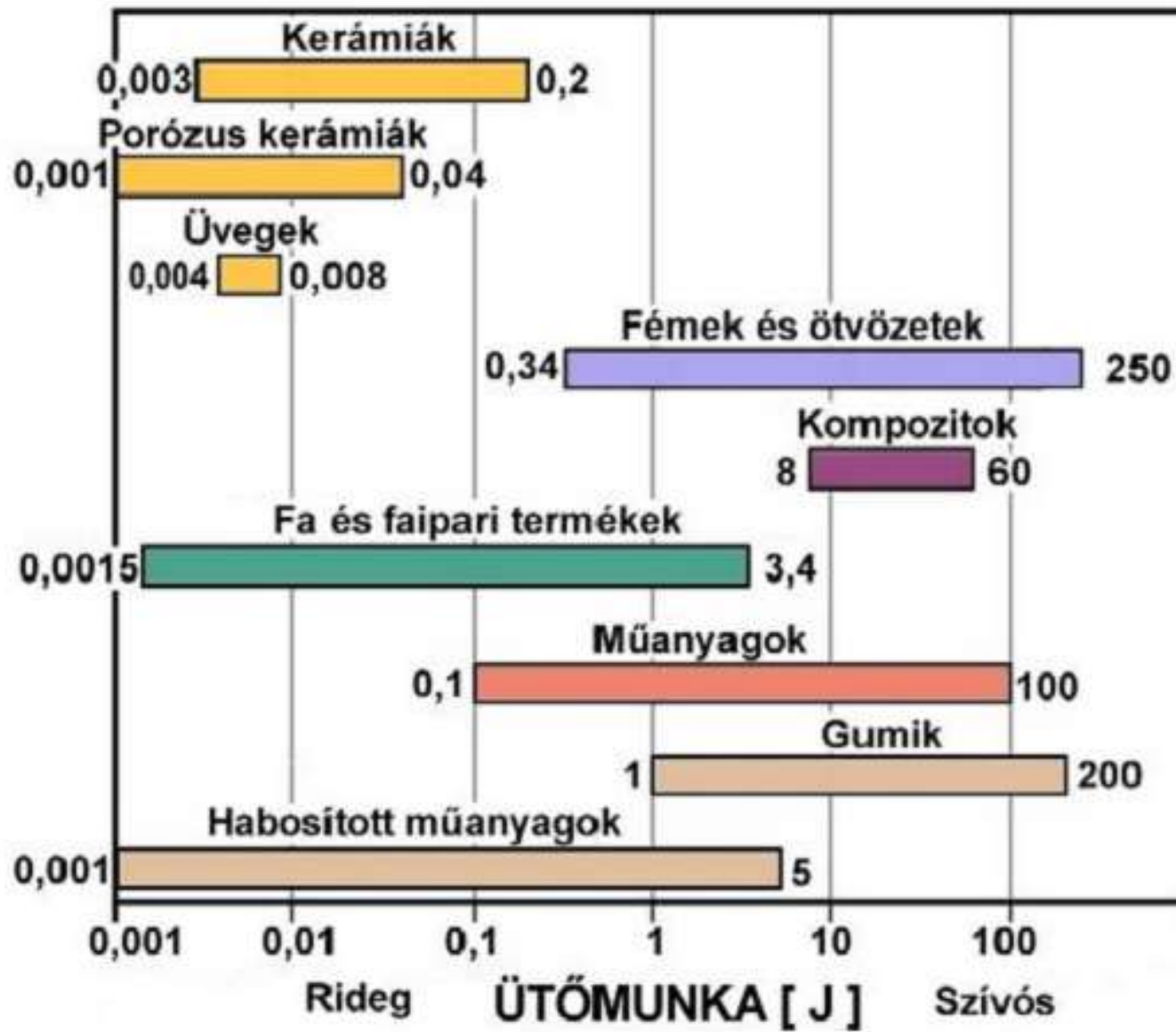
csavaró-  
vizsgálat



Hidrosztatikus nyomás alkalmazása

kezdeti térfogat :  $V_0$

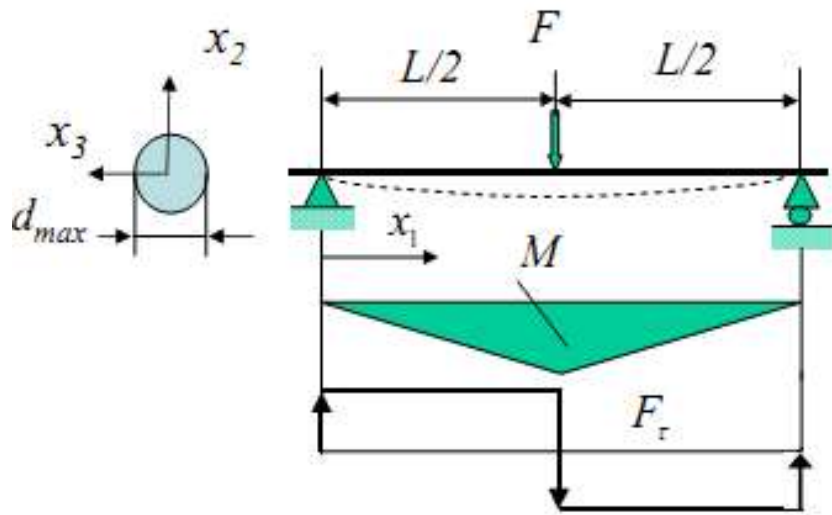
térfogat változás:  $dV$



## Különböző anyagok mechanikai tulajdonságai 20 °C-on

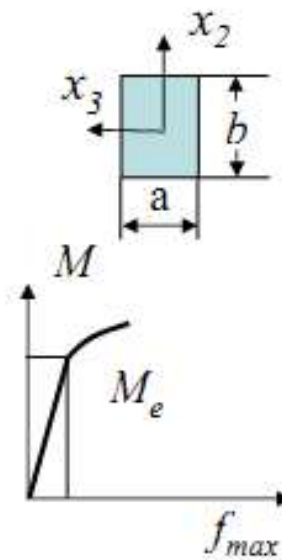
Anyag	E [GPa]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>50</sub> [%]
Acél	190-210	200-1700	400-1800	65-2
Alumínium-ötv.	69-79	35-550	90-60	45-4
Réz és ötv.	105-150	75-1100	140-1300	65-3
Titán és ötv.	80-130	340-1400	410-1450	25-7
Kerámiák	70-1000	-	140-2600	0
Gyémánt	820-1050	-	-	-
Polimerek	1,4-3,4	-	7-80	1000-5
Karbonszál	275-415	-	2000-3000	0
Kevlárszál	62-120	-	2800	0

# Hajlítóvizsgálat



3 pontos hajlítás

$$E = \frac{FL}{4f_{\max}} \left( \frac{L^2}{12I} + \frac{\kappa}{A} \right)$$



4 pontos hajlítás

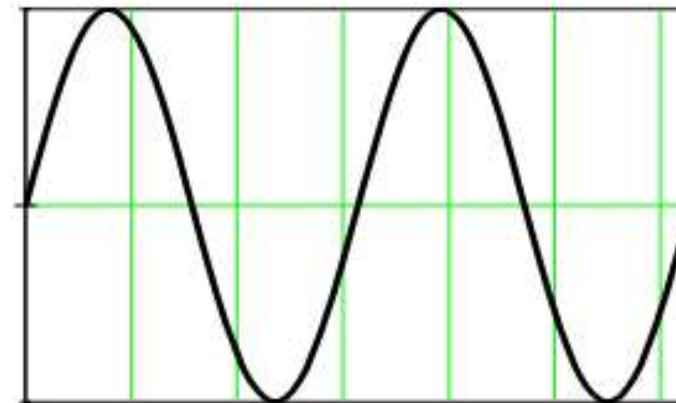
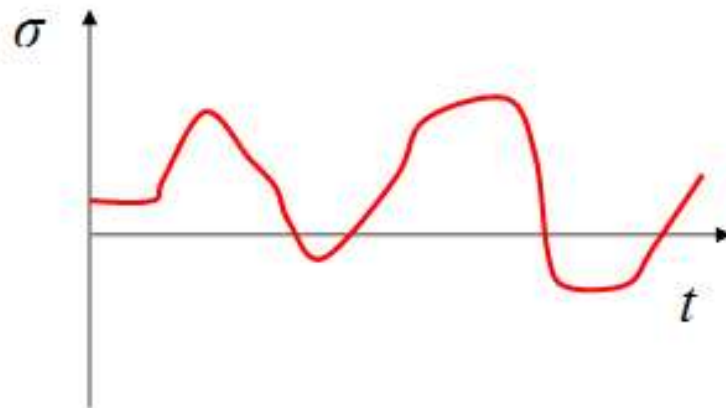
$$E = \frac{FL_1(3L^2 - 4L_1^2)}{48If_{\max}}$$

$$R_e = \frac{M_e}{I} r_{\max}$$

$$R_e = \frac{M_e}{2I} b$$

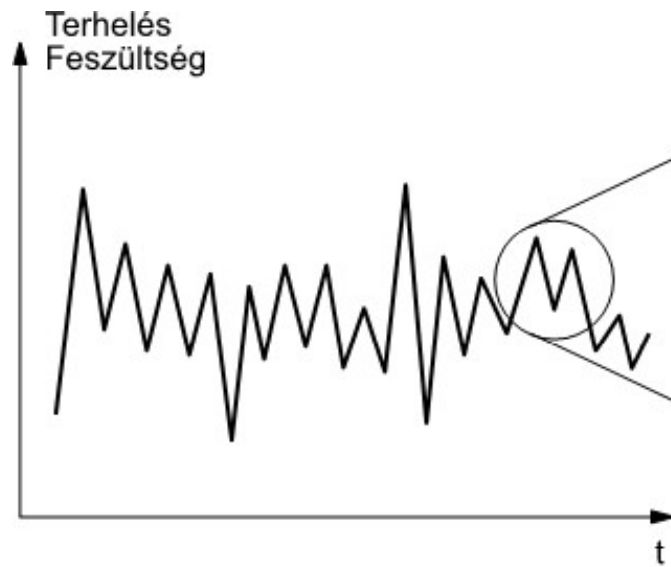
# Méretezés ismétlődő igénybevételekre

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.

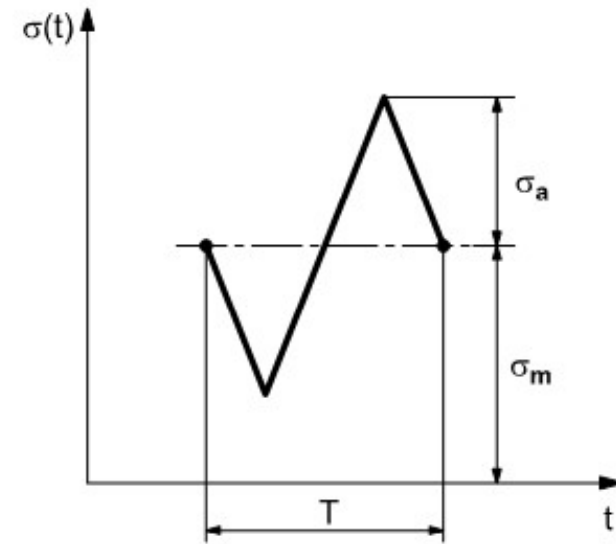
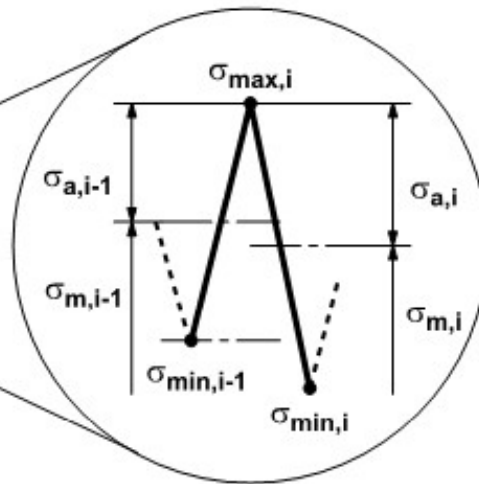


Szinuszos feszültségváltozás

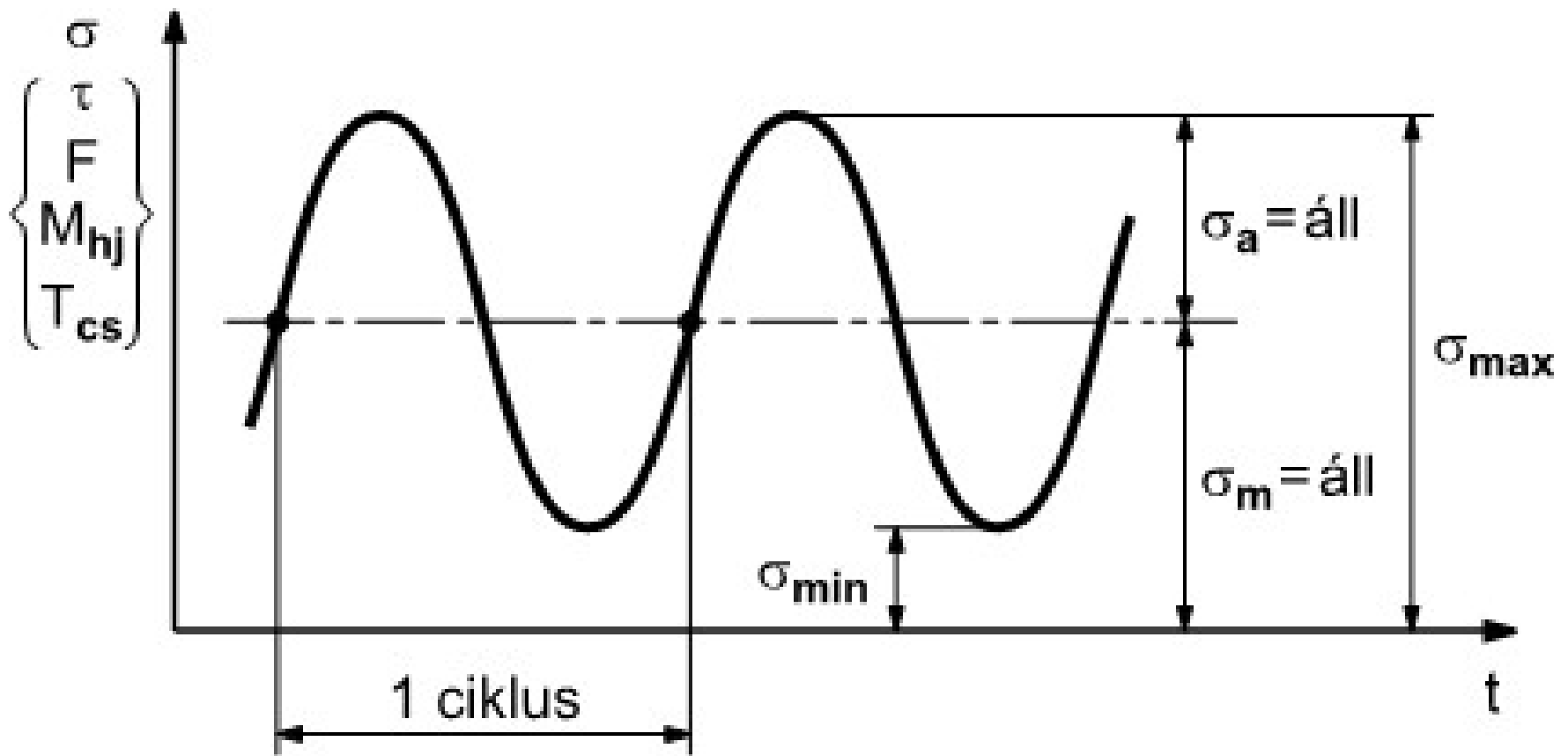
# Általános terhelési folyamat



a)



b)



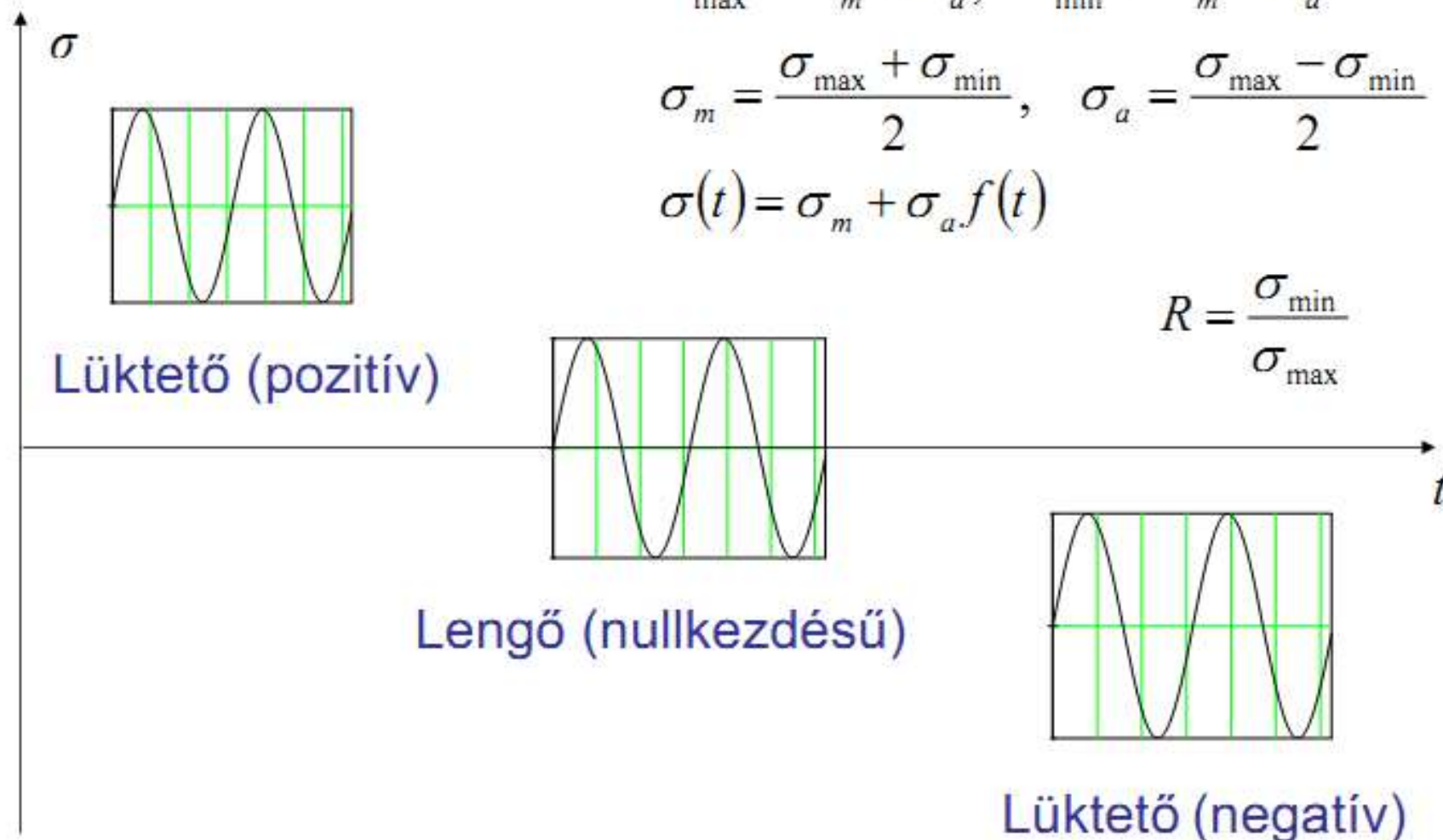
# Ciklikus terhelés jellemzői

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

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

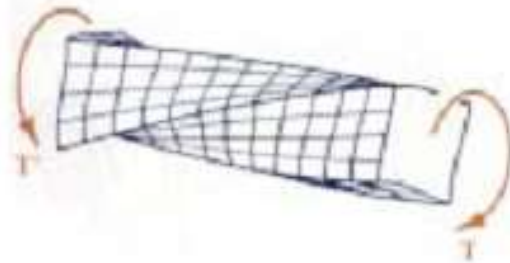
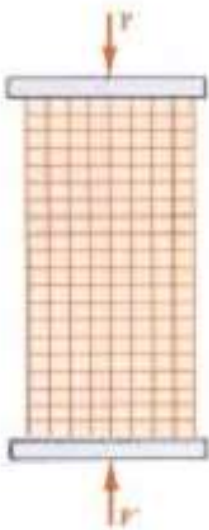
$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \cdot f(t)$$

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





# Alapvető ciklikus igénybevételek

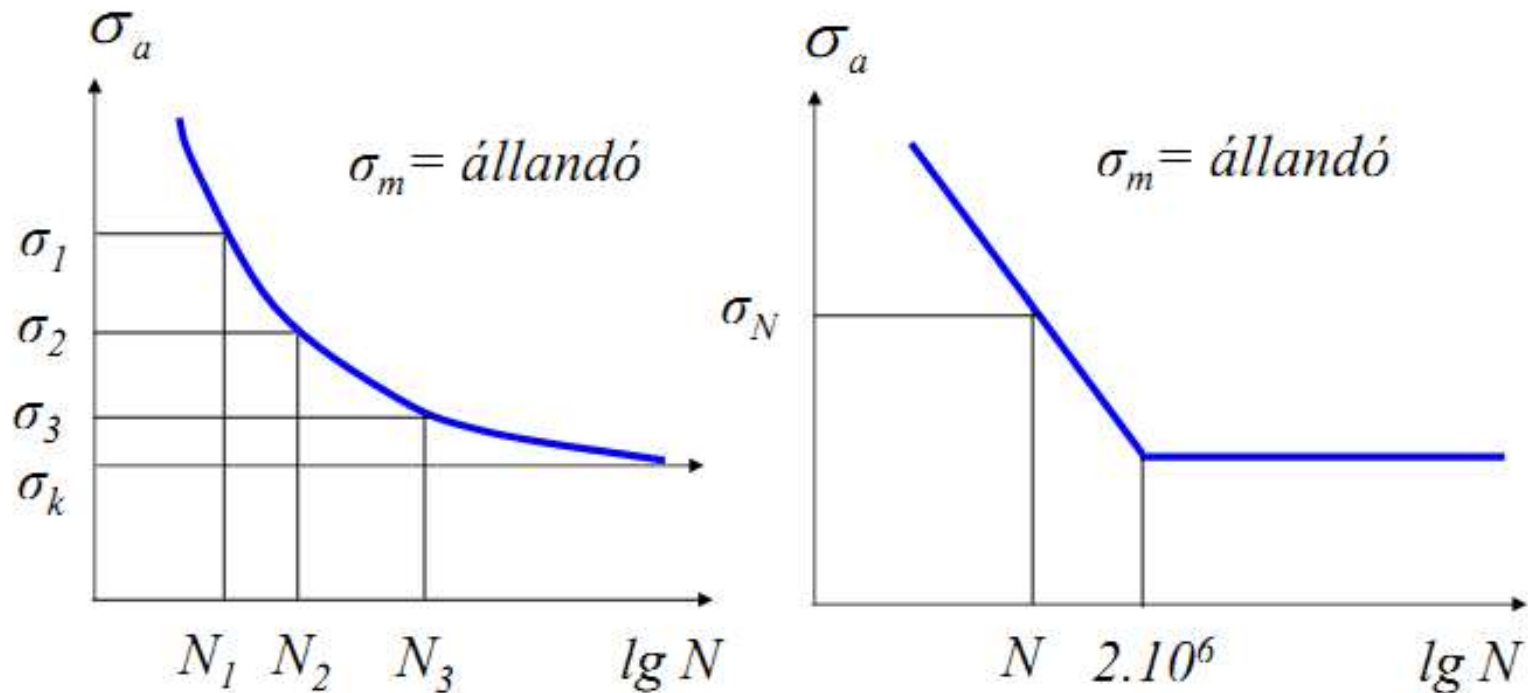


Húzás-nyomás    Változó csavarás    Változó hajlítás

És még sok-sok más igénybevétel, pl. hő okozta terhelések okozta változó igénybevételek, nedvességtartalom hatására bekövetkező igénybevételek (polimerek, faanyagok),...

# Kifáradás jelenségének leírása

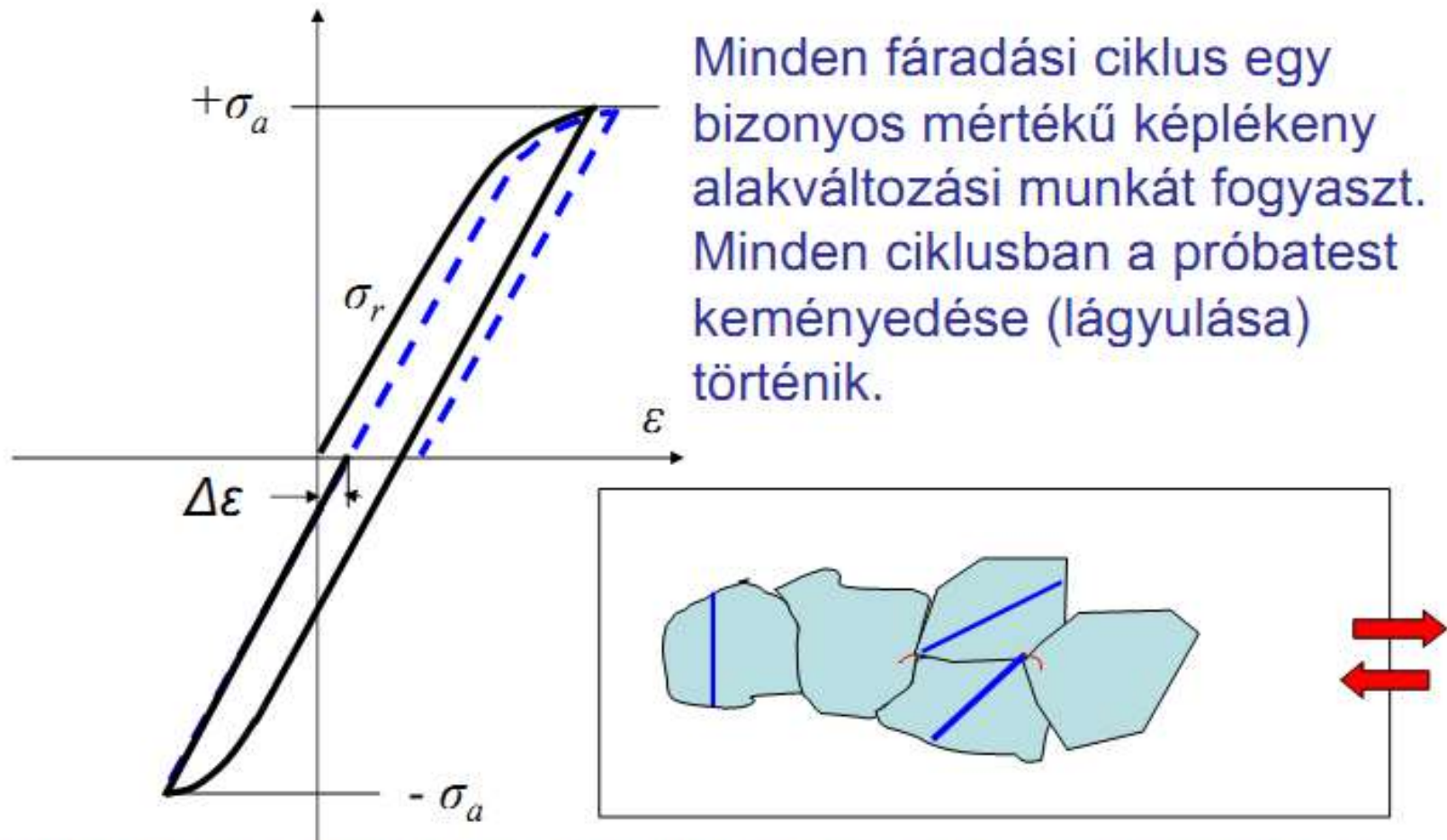
## Wöhler-görbe



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

**Tartamszilárdság:** az a feszültségamplitudó (adott közép feszültségnél), amely megadott igénybevételi számig nem okoz törést.

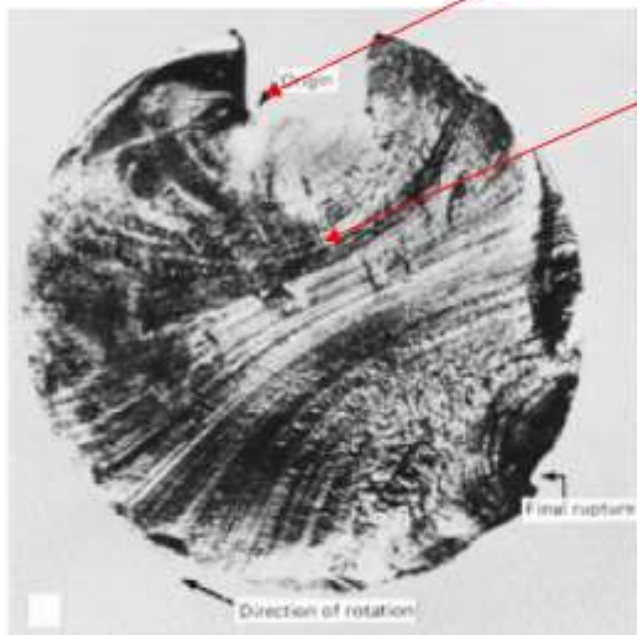
# A fáradás mechanizmusa



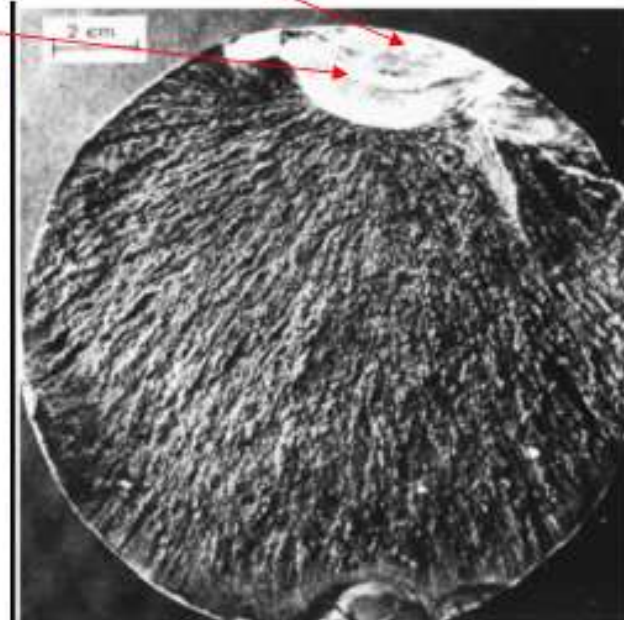
Minden fáradási ciklus egy bizonyos mértékű képlékeny alakváltozási munkát fogyaszt. Minden ciklusban a próbatest keményedése (lággyulása) történik.

1. Repedések keletkezése;
2. Nem terjedő repedések szakasza;
3. Repedés terjedés szakasza;

## Repedés keletkezés

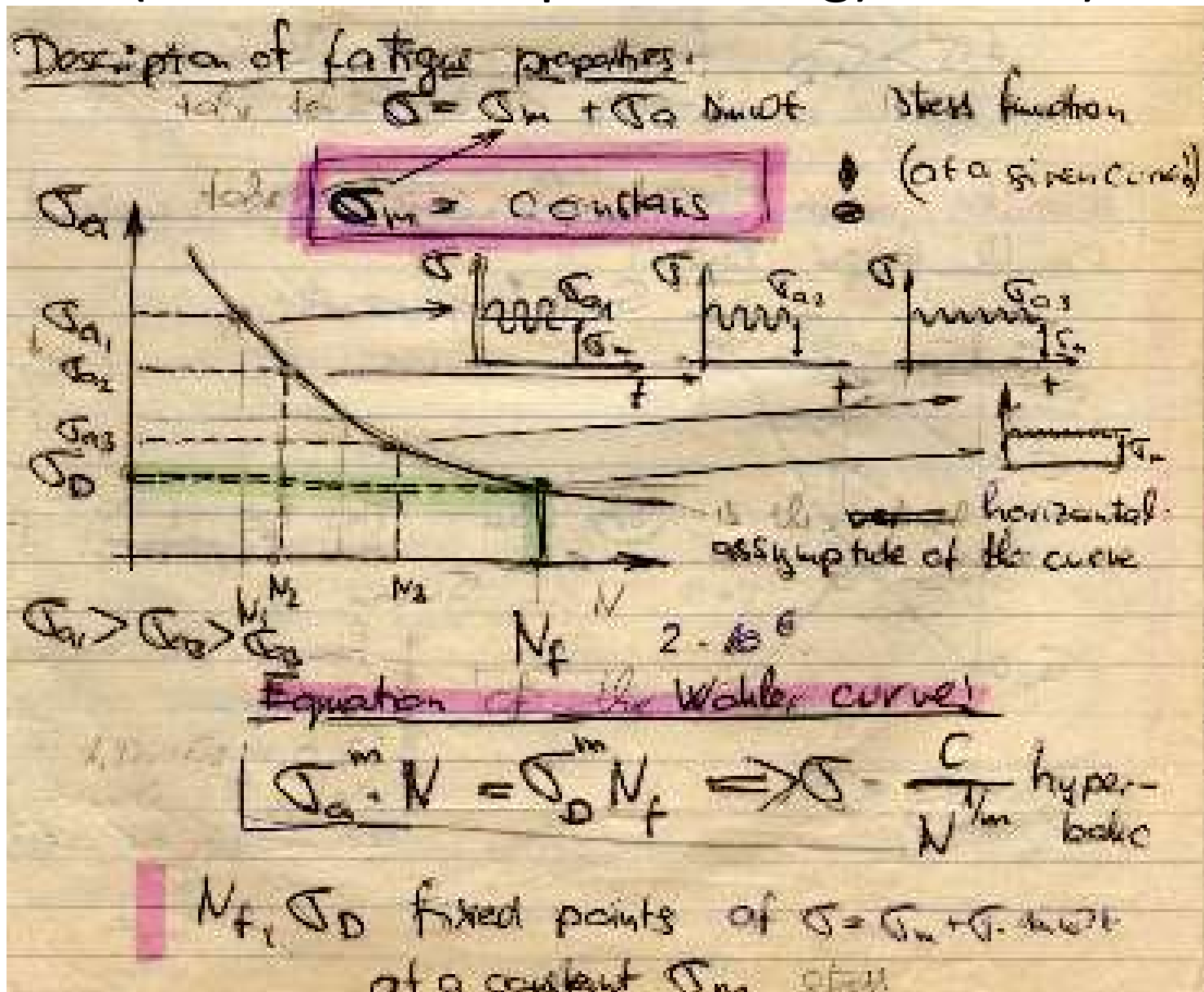


Lassú terjedés  
(kagylós felület)

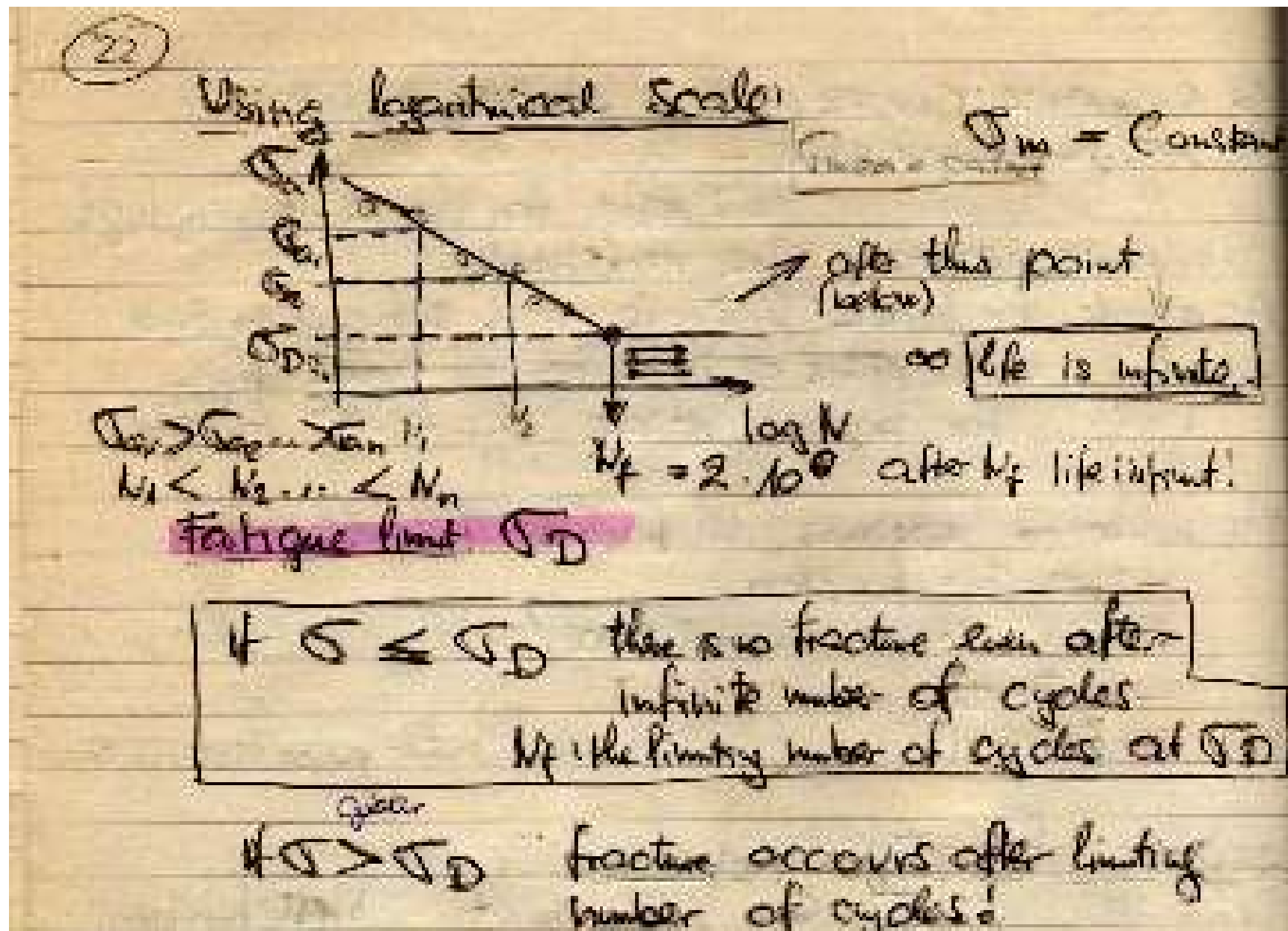


Ridegtörés

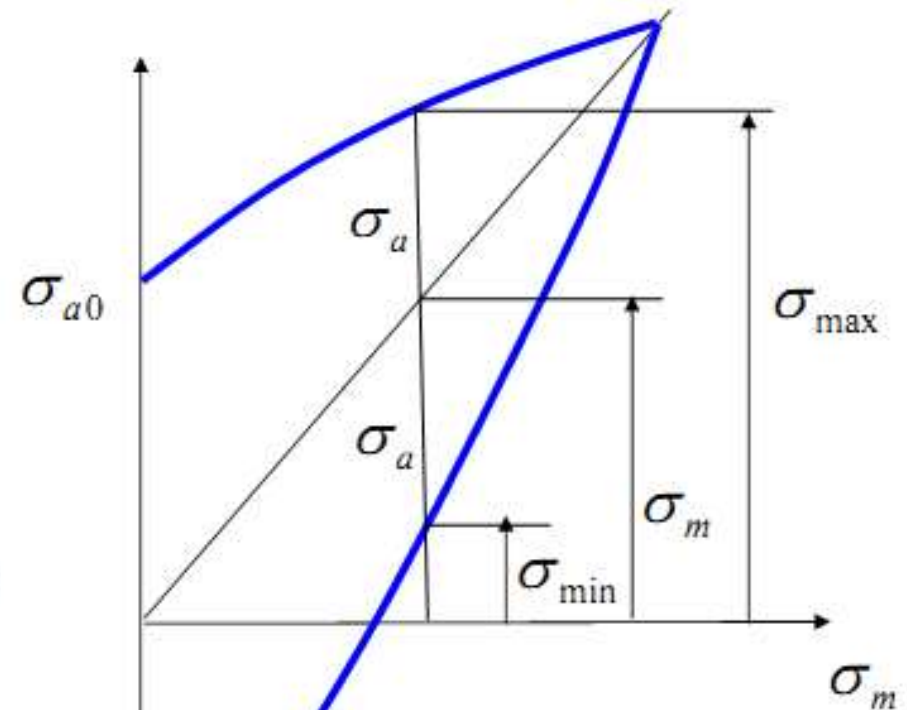
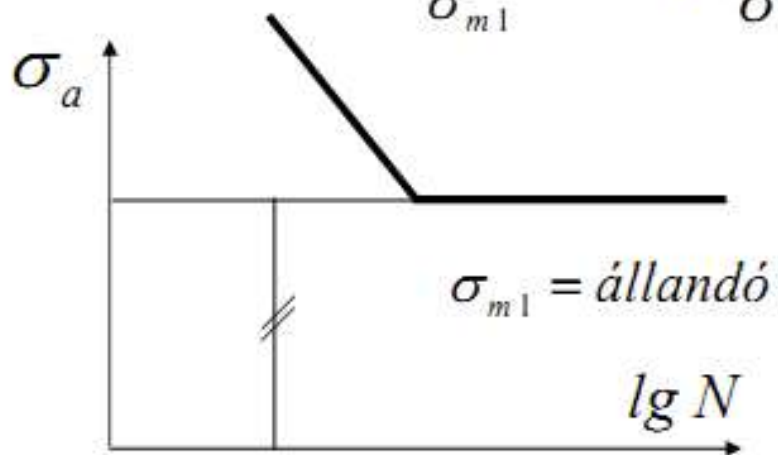
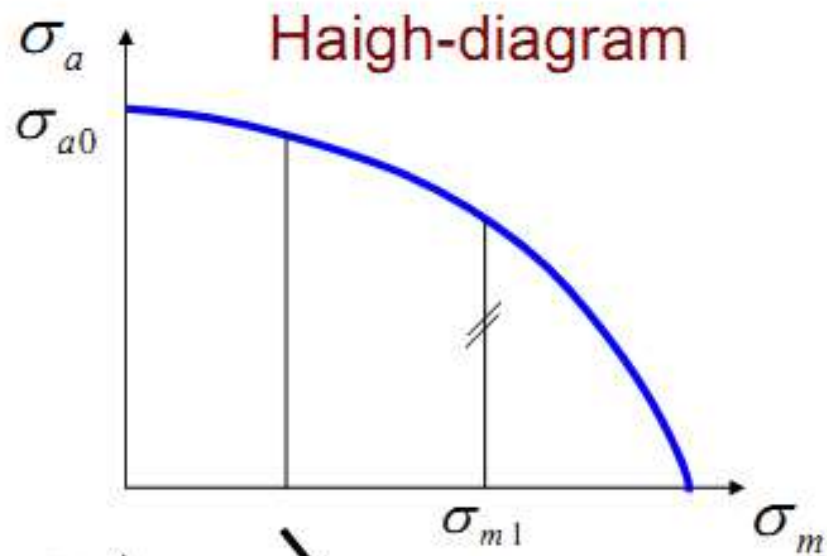
# Kifáradás jelensége időben változó terhelés (konstans közép feszültség) esetén



# A folyamat logaritmusos koordináta rendszerben

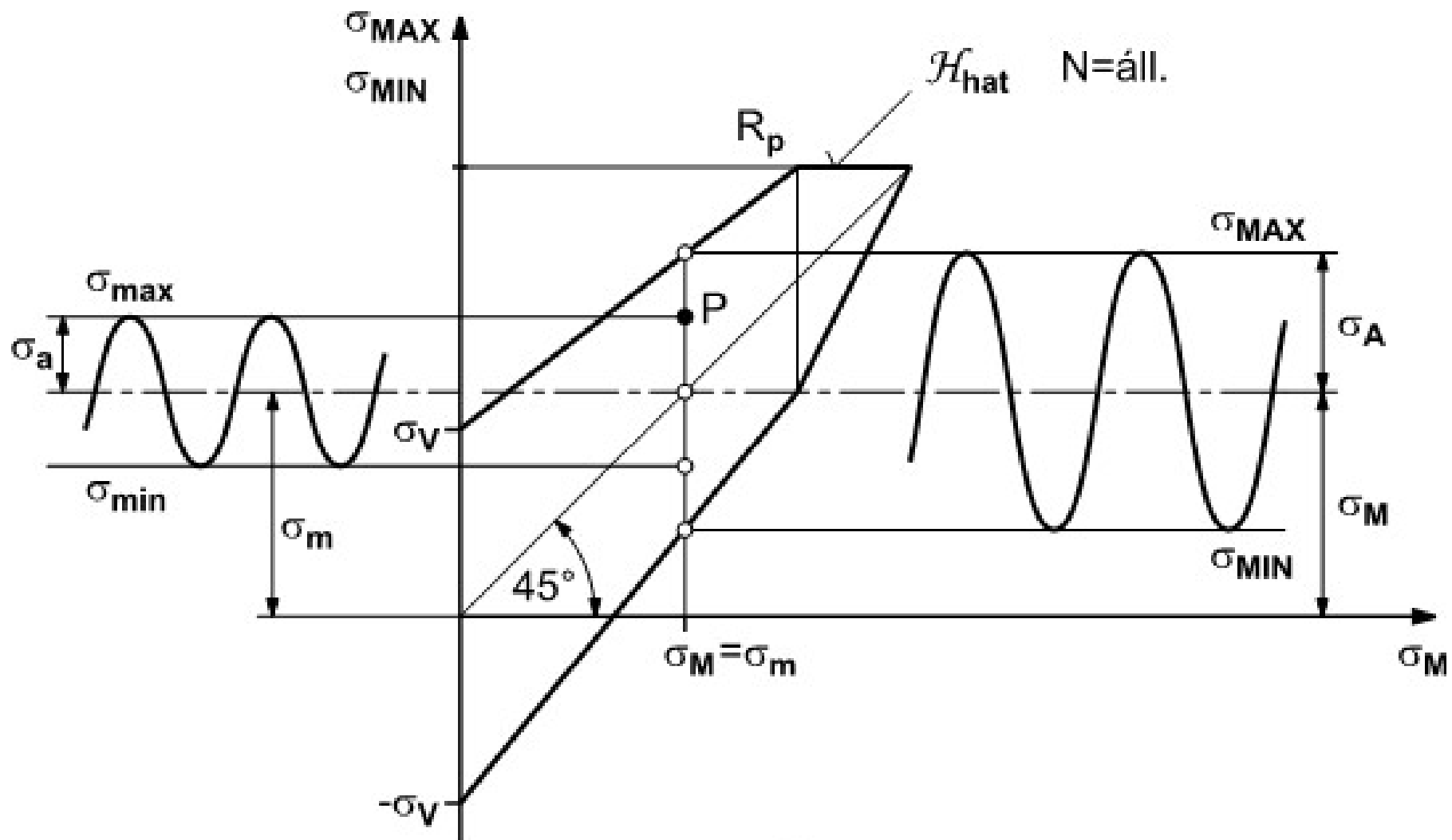


# Statikus és váltakozó feszültség együttes hatása

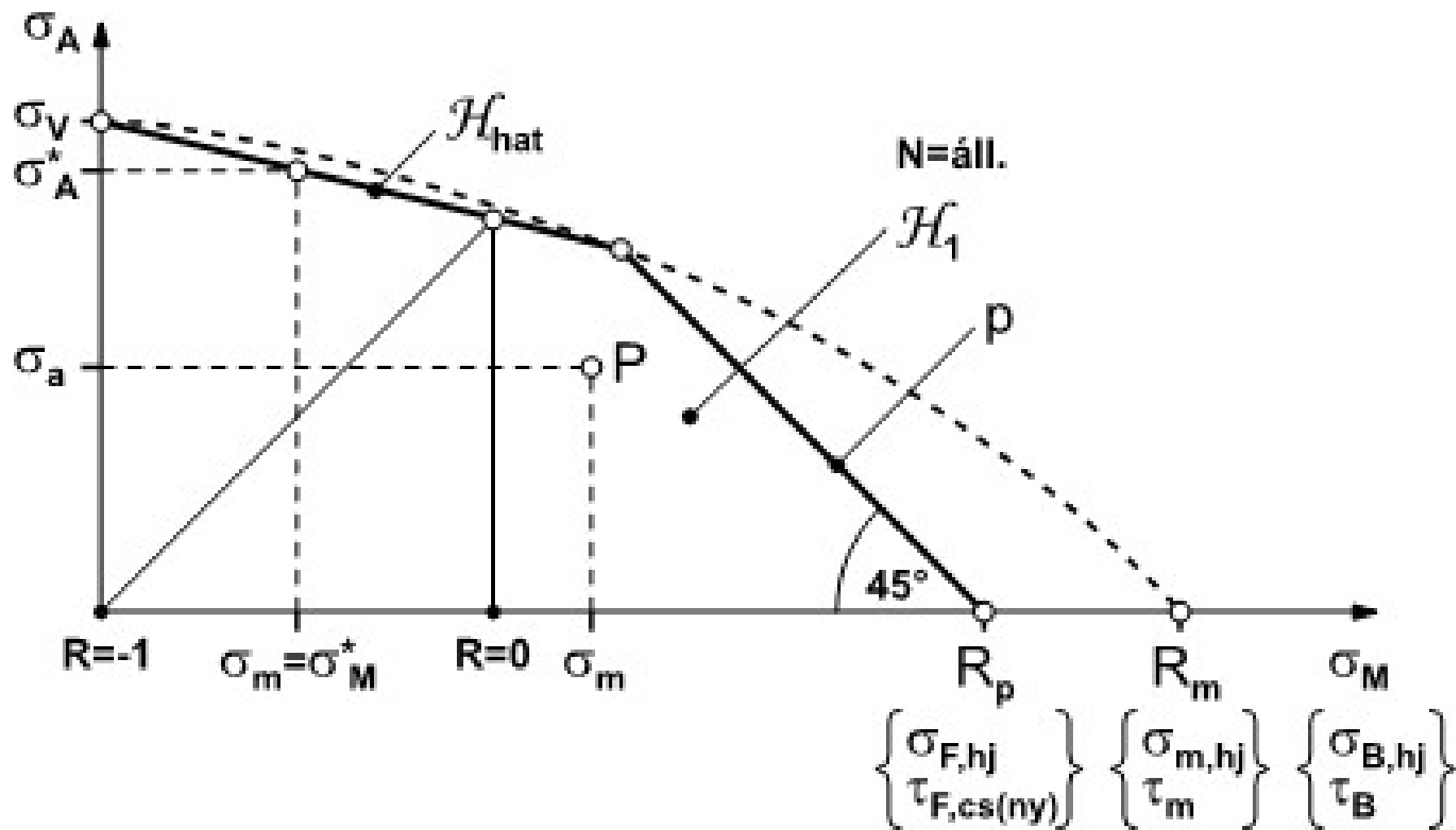


Smith-diagram

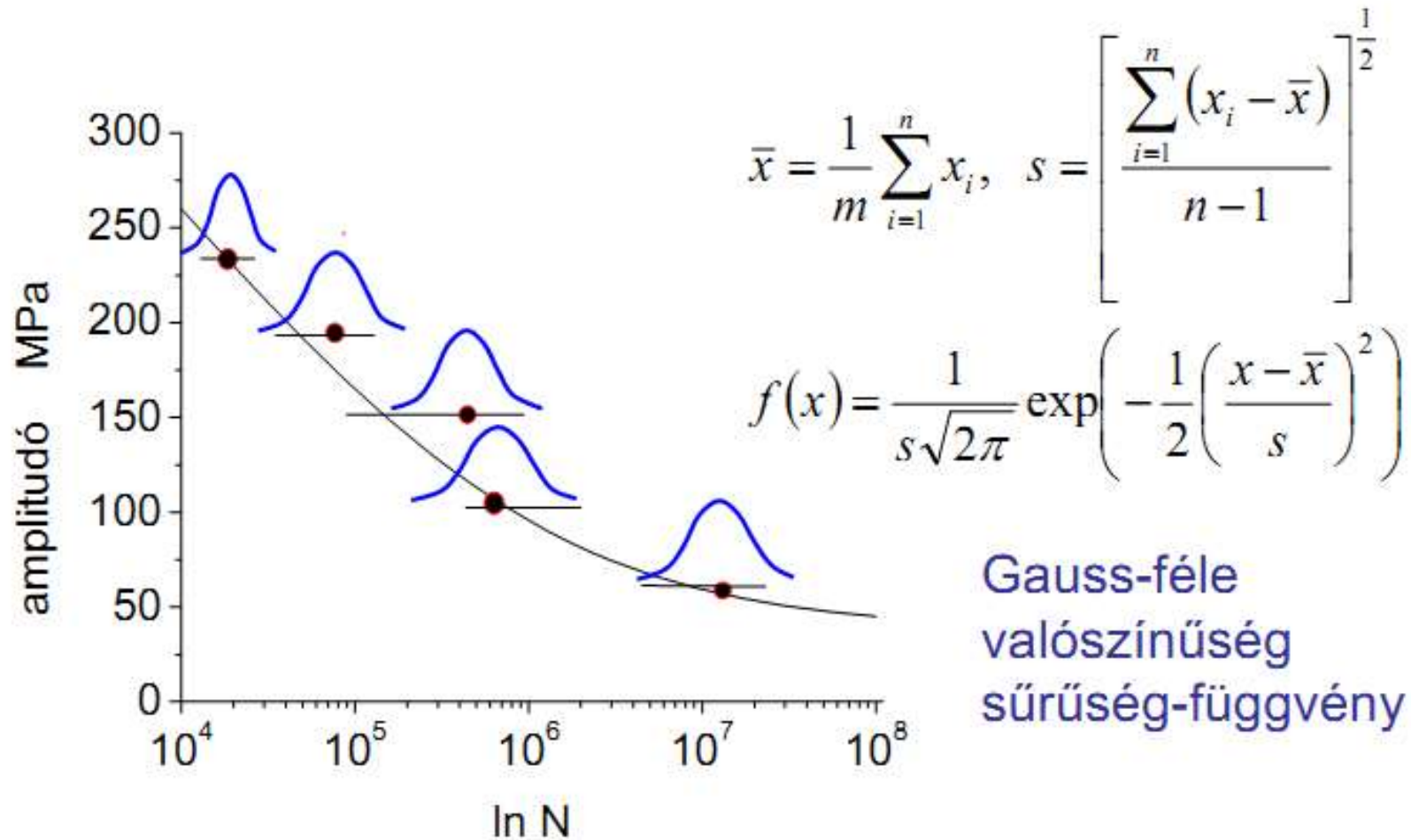
Biztonsági diagram





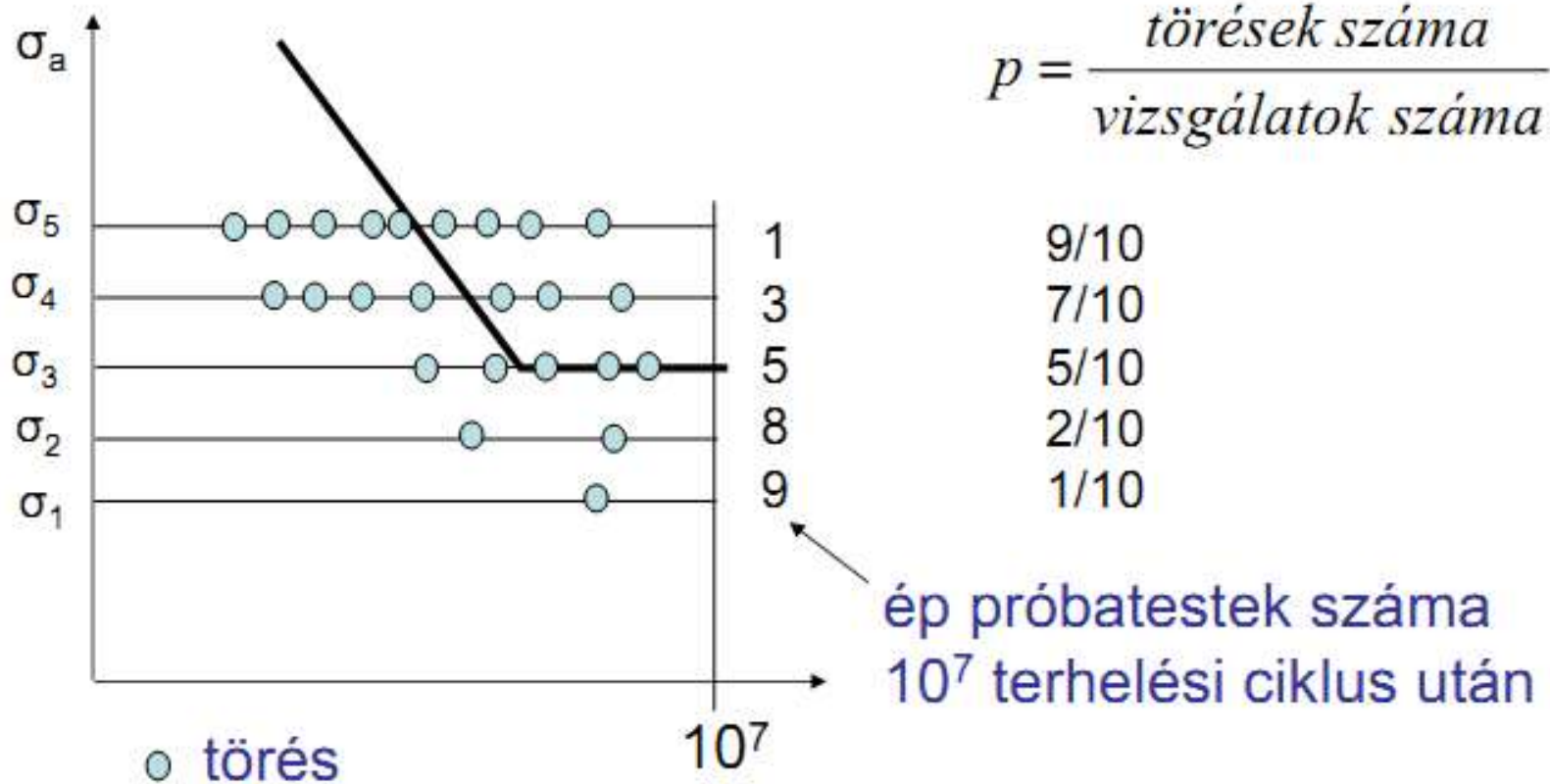


# A fáradás statisztikus jellege

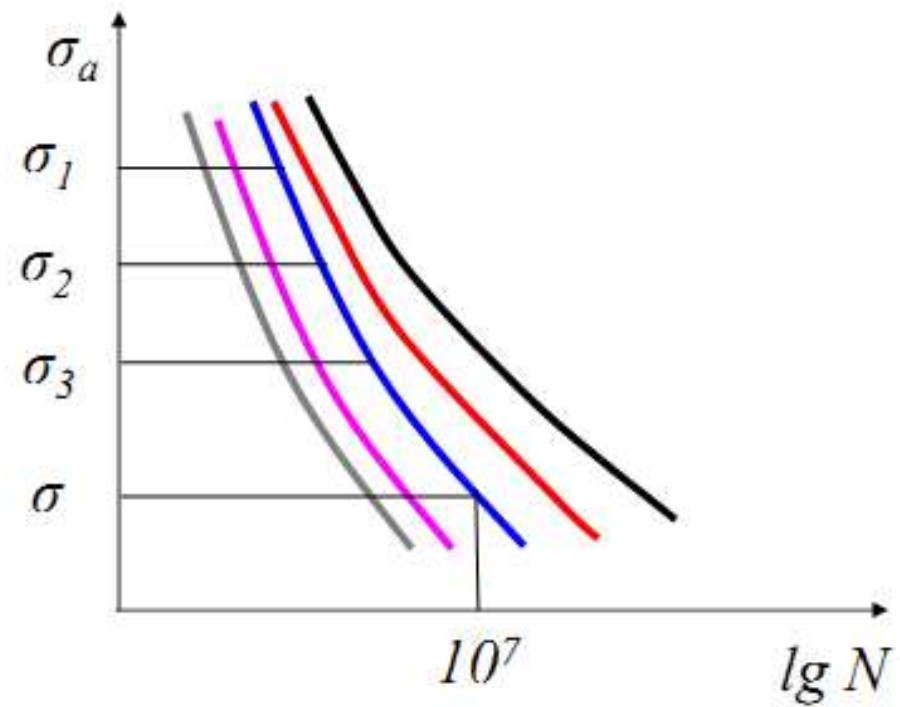
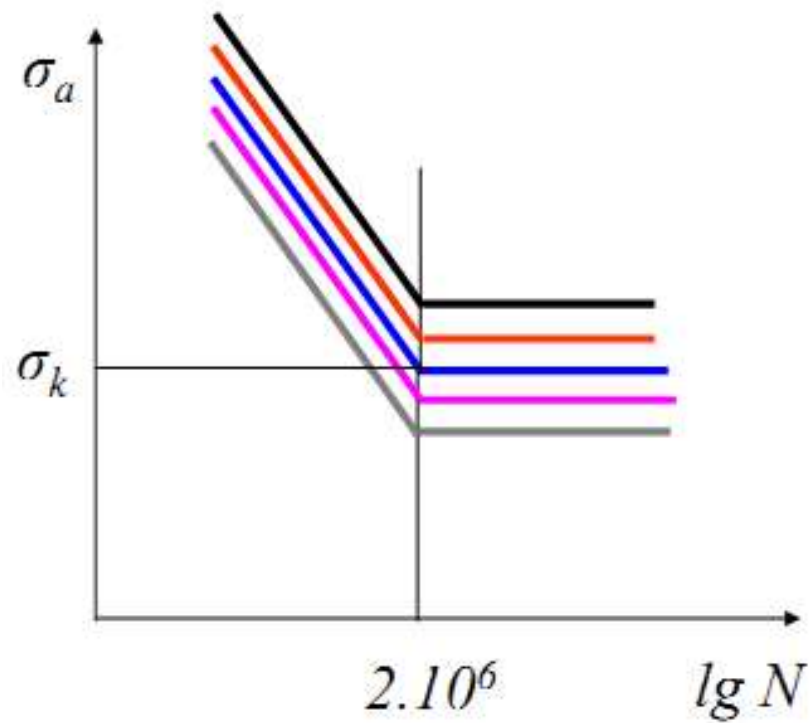


# Törési valószínűség

Szintenként 10 db próbatest vizsgálata:

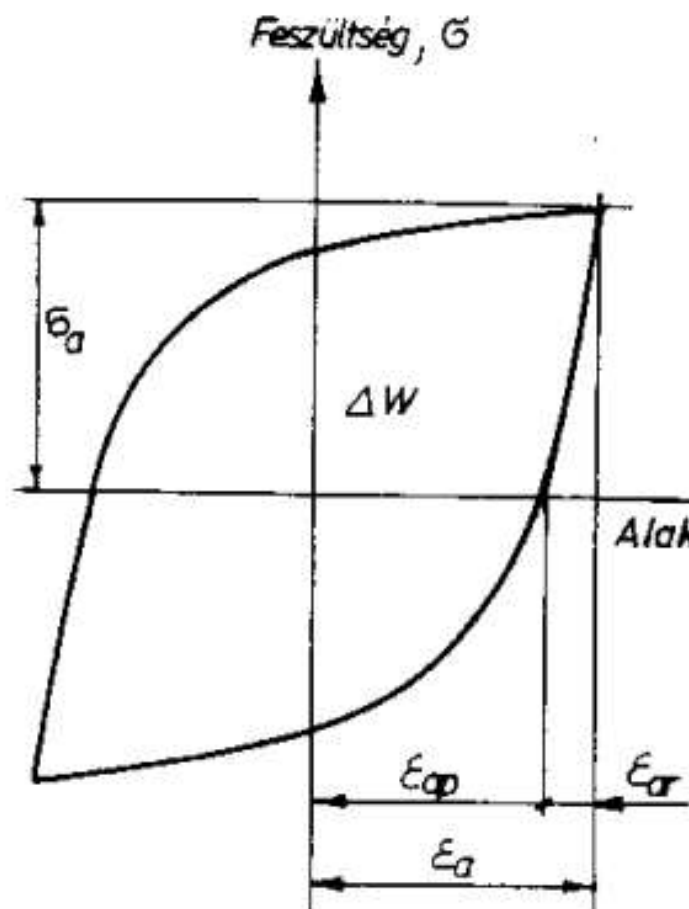


# Valószínűségi értékelés



$p = 0.99, 0.9, 0.5, 0.1, 0.01$

# Feszültség-alakváltozás diagram

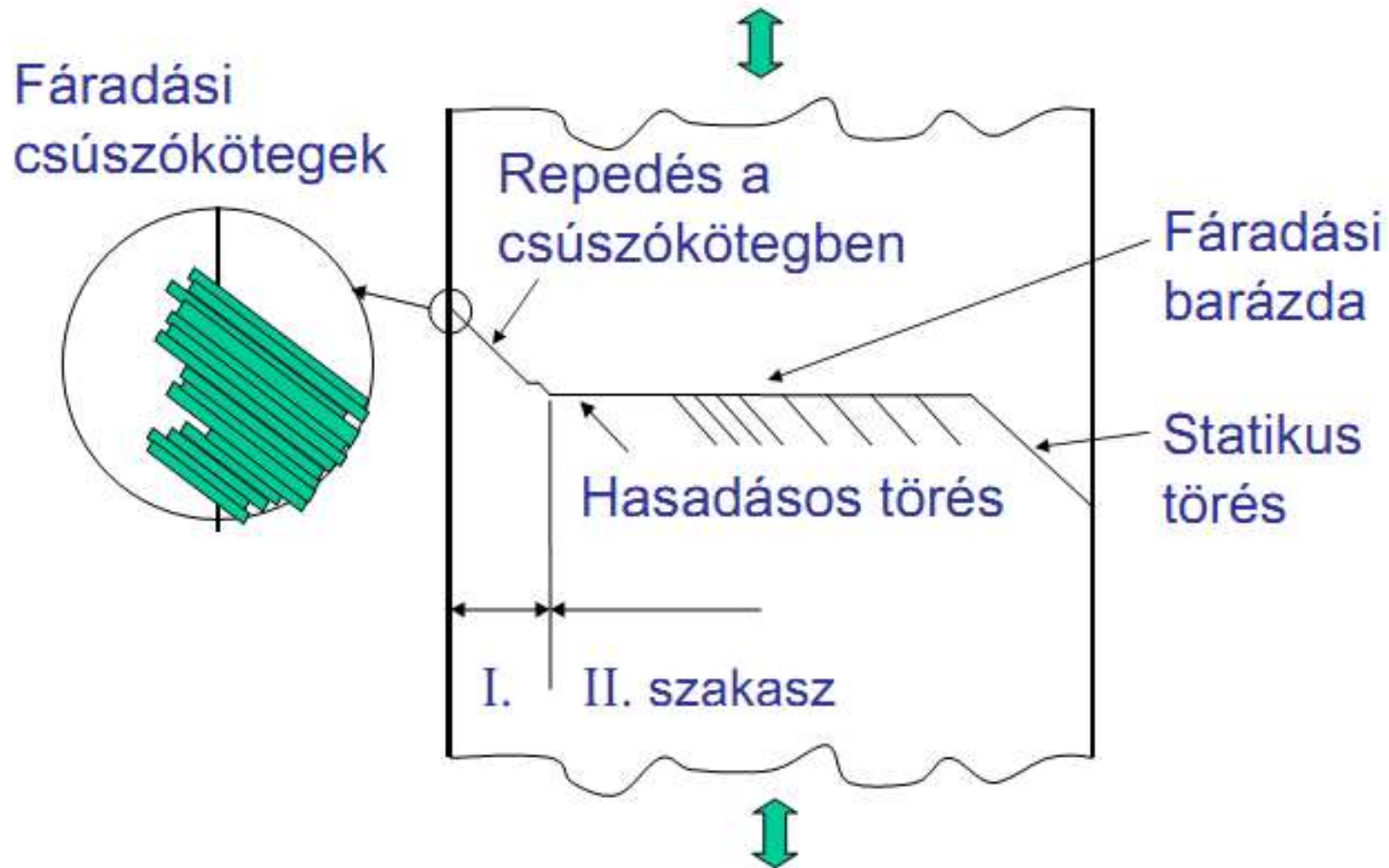


$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_f^* (2N_t)^c$ , Manson - Coffin  
képlékeny alakváltozás

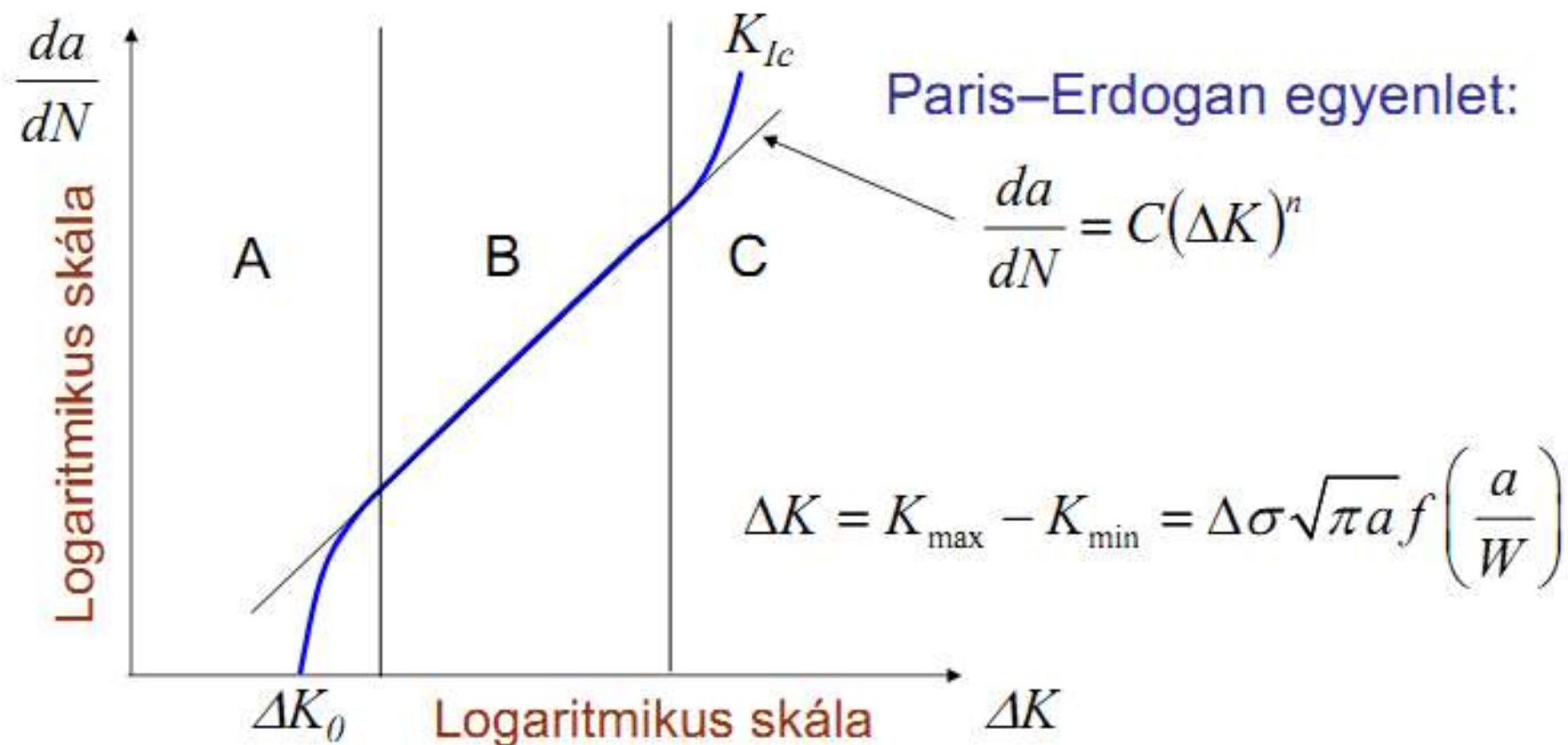
$\varepsilon_{ar} = \frac{\sigma_f^*}{E} \varepsilon_f^* (2N_t)^b$ , Wöhler  
rugalmas alakváltozás

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ar} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_f^*}{E} \varepsilon_f^* (2N_t)^b + \varepsilon_f^* (2N_t)^c$$

# Repedésterjedés váltakozó terhelés esetén



# Repedésterjedés törvényszerűsége



$K_{\max}, K_{\min}$  – a legnagyobb és legkisebb feszültségintenzitási tényező

$\Delta\sigma$  – feszültségváltozás,  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  – geometriai tényező.