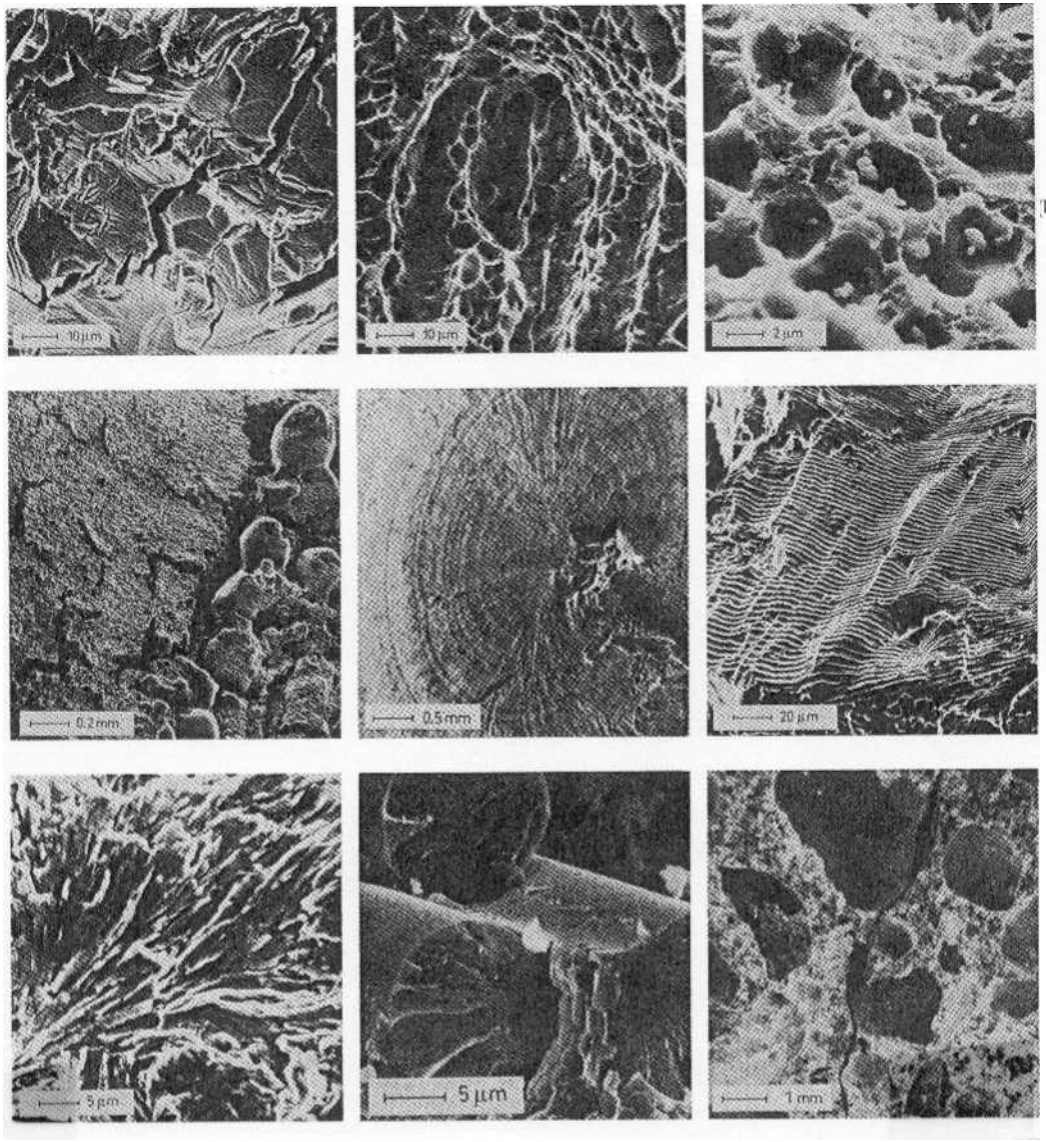
Rideg anyagok tönkremenetele

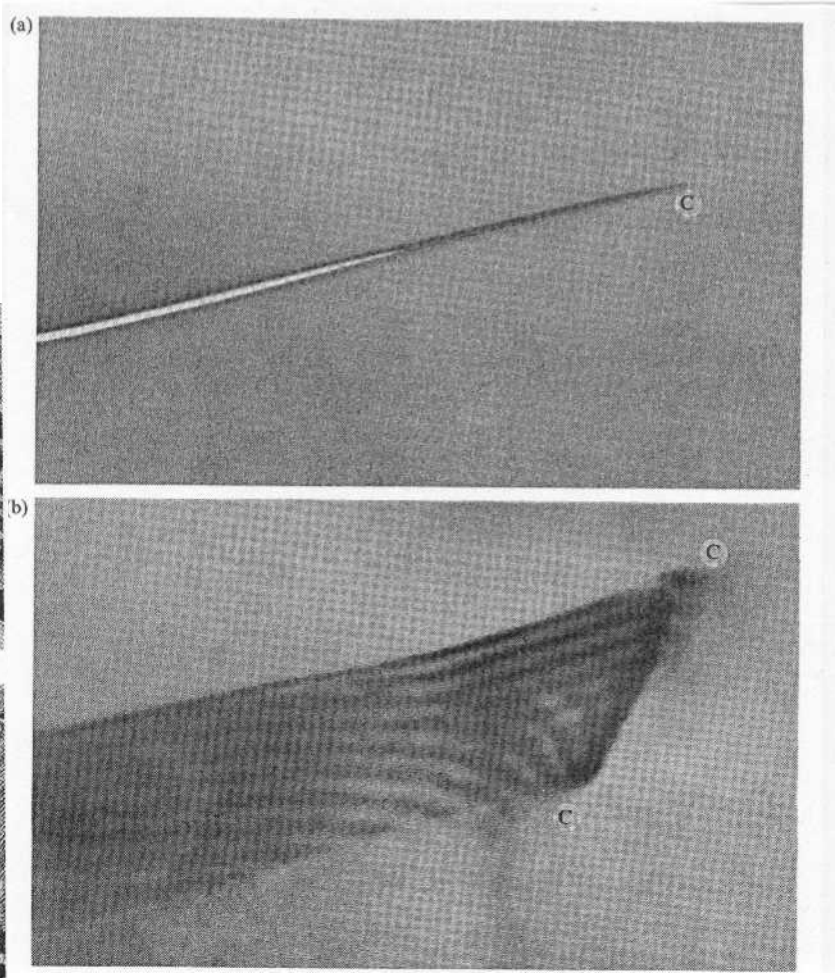
Ván Péter
BME, Kémiai Fizika Tanszék

- Kísérleti háttér, mérnöki tapasztalat
  - Mi a rideg anyag?
- Elmélet
  - Tradicionális kontinuumfizika
  - Termodinamika – statisztikus fizika
  - Hiperkontinuumok

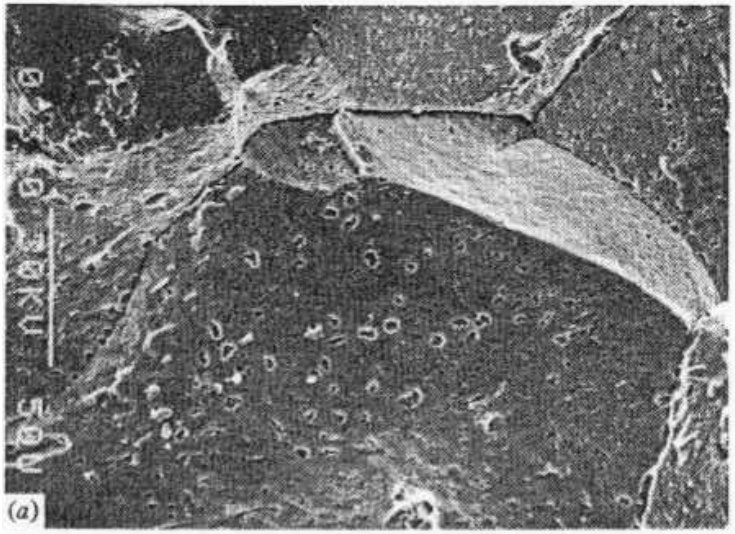
Köszönet: Gálos M., Imre E., W. Muschik, C. Papenfuss, Verhás J., Vásárhelyi B.

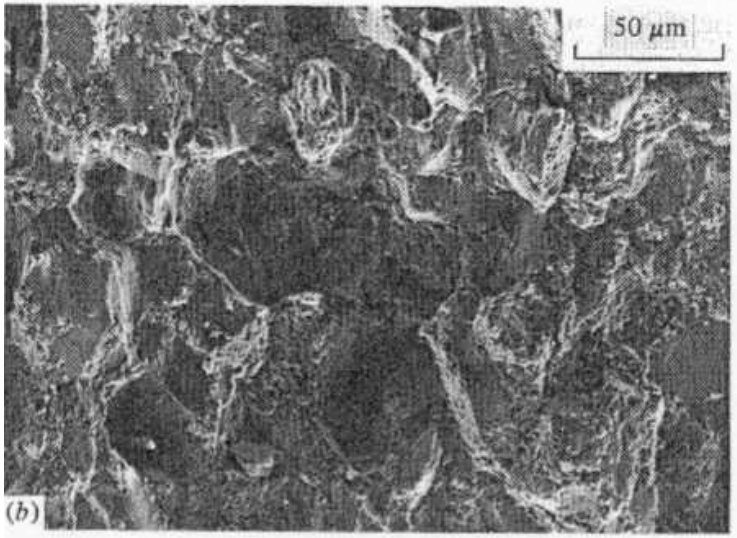
Mikron, fémek

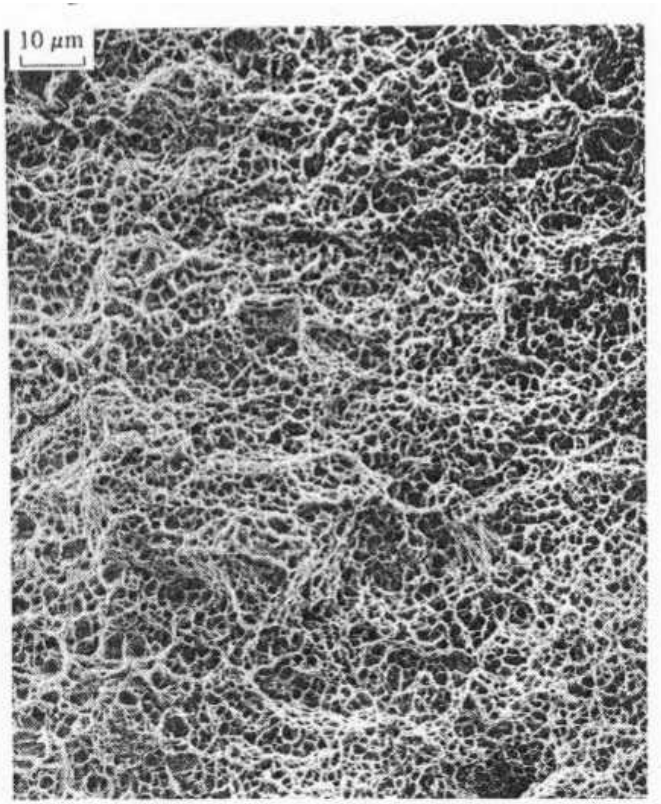




Acélok



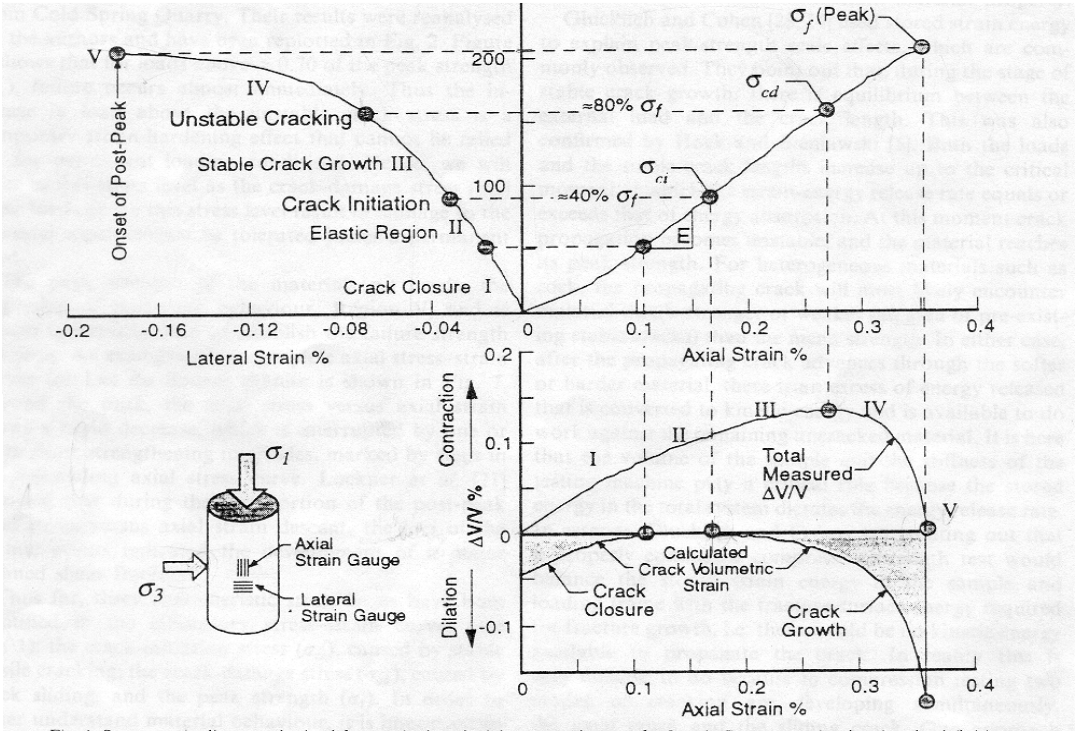




Rideg anyag

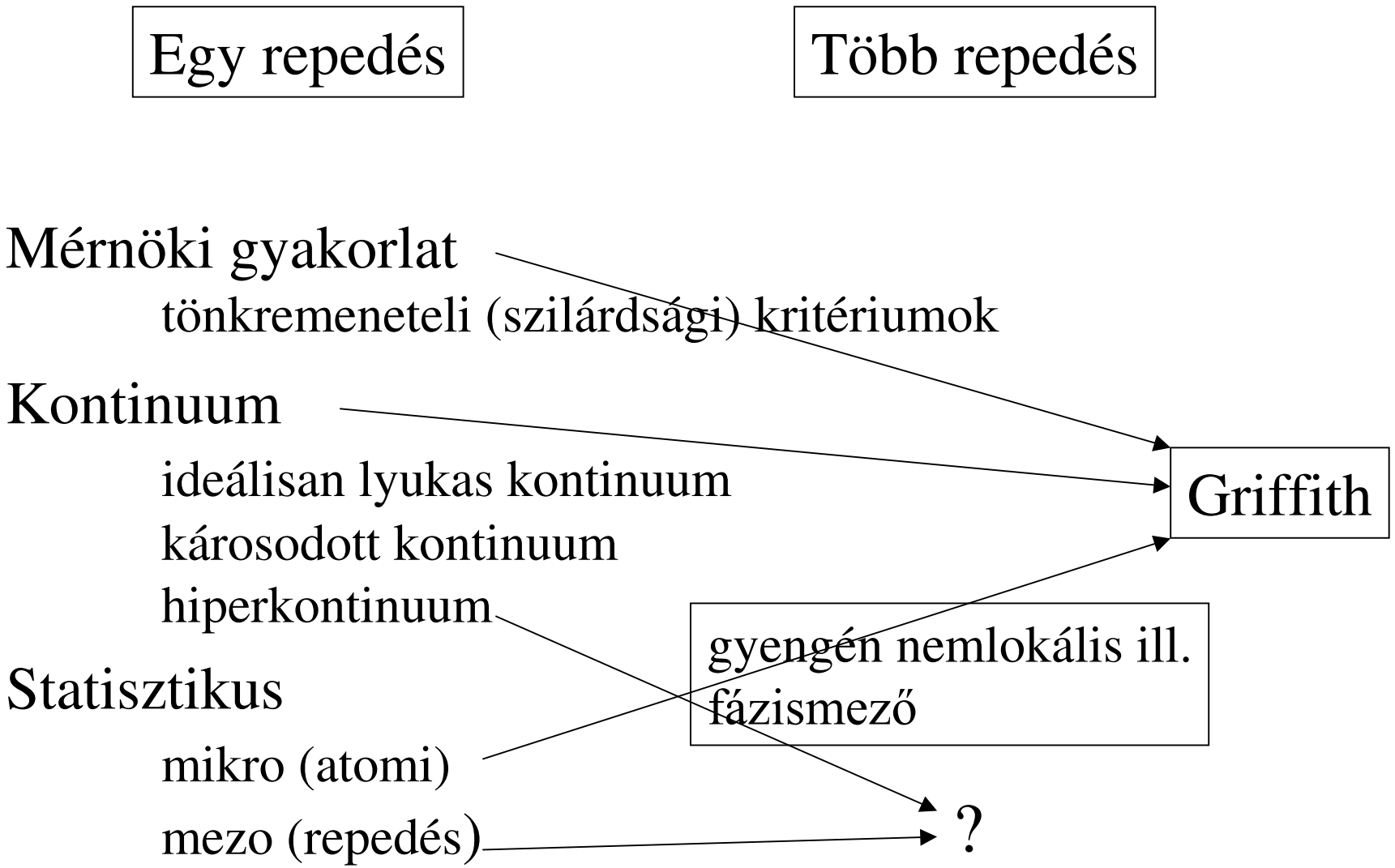
Tapasztalat:

- Unilaterális – Kaiser effektus
- Tönkremeneteli módok - lokalizáció
- Mikrorepedések
- Terhelési mód függő
- Dinamika fontos



Rózsaszín Lac du Bonnet gránit
(Martin and Chandler, 1994)

Elképzelések, elméletek

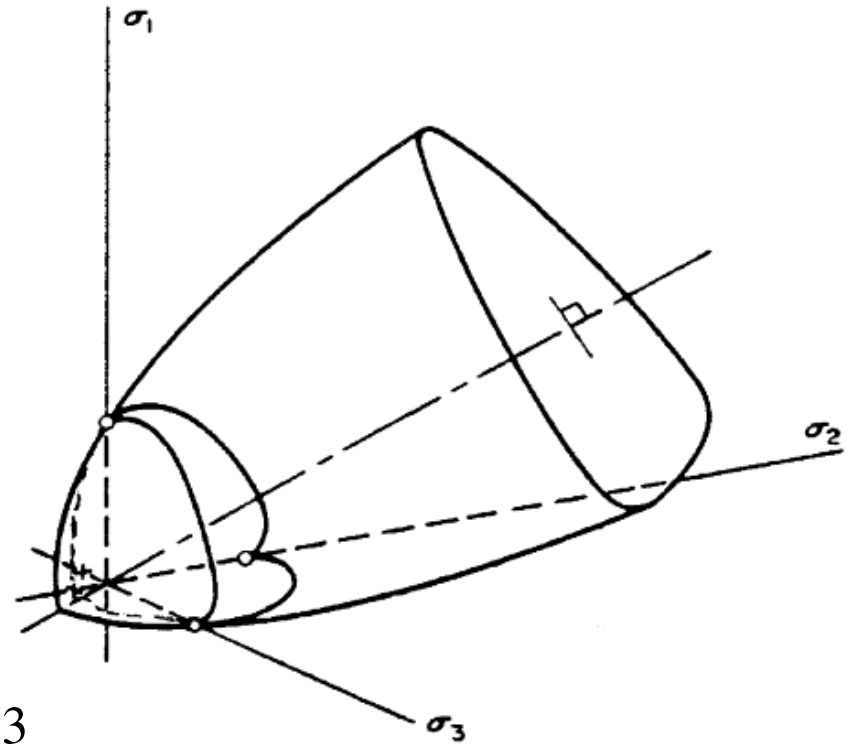


Mérnöki gyakorlat Plaszticitásként

tönkremeneteli (szilárdsági) kritériumok

Baj: mindenfélétől függ, nemcsak az anyagtól, dinamika?

kritikus szilárdság
kritikus deformáció
kritikus károsodás
kritikus energiamennyiség



Lade, 1993

Kontinuum

klasszikus lyukas kontinuum (rugalmas, plasztikus, stb…),

főleg 1 repedés

kritikus energiafelszabadulás

J integrál, Eshelby tenzor

Probléma: szingularitások: repedéscsúcs, repedéshatár

károsodott kontinuum

1 és több repedésre is

kritikus károsodás (!)

dinamikai szabadsági fok,
belső változó - II. főtétel

Probléma : mindenfélétől függ, dinamika?:

rengeteg paraméter

Általánosított kontinuum

Statisztikus

mikro (atomi) - szakadó rugók, rudak
Griffith problémája,
befagyott rendetlenség, unilaterális
többféle skálázás és fraktálos felületek

mezo (mikromechanika)- mikrorepedések statisztikája
anizotrop, nemlineáris,
végtelen hatótávolságú, unilaterális
még teljesen ideális repedésekre és kontinuumra is

Probléma : mások a kérdések (húzott repedések)
kritikus vagy nem, több karakterisztikus hossz, stb…

(fejletlen fenomenológia??)

Termodinamikai károsodás(mechanikai) modellek:

II. főtétel – univerzalitás

tönkremenetel és törés = termodinamikai stabilitásvesztés
nemegyensúlyi állapottérben (fázisátalakulás?)

Példák, alkalmazások:
törékeny anyagok tönkrementele (homogén),
talajdinamika (homogén)
porózus és granulált anyagok (gyengén nemlokális)

Törékeny anyagok

Griffith általánosítása (3D)
vektori dinamikai változó
izotrop

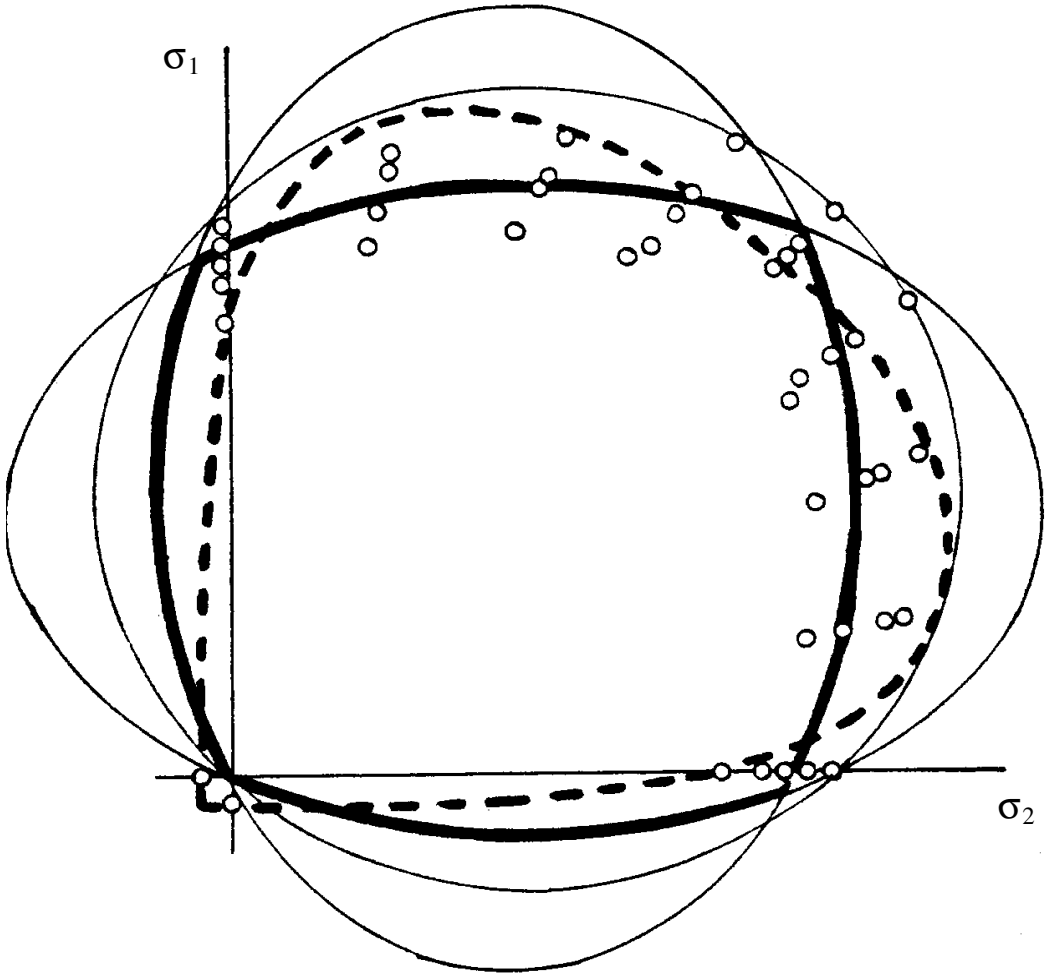
… Landau

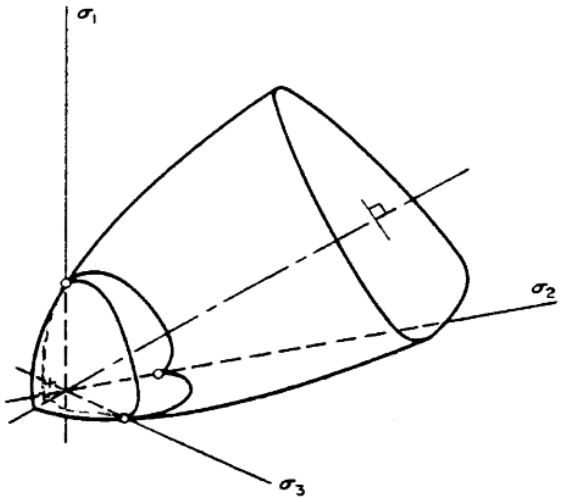
$$\psi(\boldsymbol{\sigma},\boldsymbol{\alpha}) = \frac{\varsigma}{2}\boldsymbol{\alpha}^2 + (\delta + k_\delta \boldsymbol{\alpha}^2)Tr\boldsymbol{\sigma} + (\mu + \frac{k_\mu}{2}\boldsymbol{\alpha}^2)\boldsymbol{\sigma}:\boldsymbol{\sigma} +$$

$$+\frac{1}{2}(\lambda + k_\lambda \boldsymbol{\alpha}^2)(Tr\boldsymbol{\sigma})^2 + \frac{1}{2}(\beta + k_\beta Tr\boldsymbol{\sigma})\boldsymbol{\alpha}\cdot\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{\alpha} + + \frac{\gamma}{2}\boldsymbol{\alpha}\cdot\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{\alpha}.$$

- termodinamikai stabilitás természetes sérülése
  $\Rightarrow$ lokalizáció (nyírófelületek, stb…)
- károsodásdinamika (unilaterális)

Tönkremeneteli határ, biaxiális és triaxiális

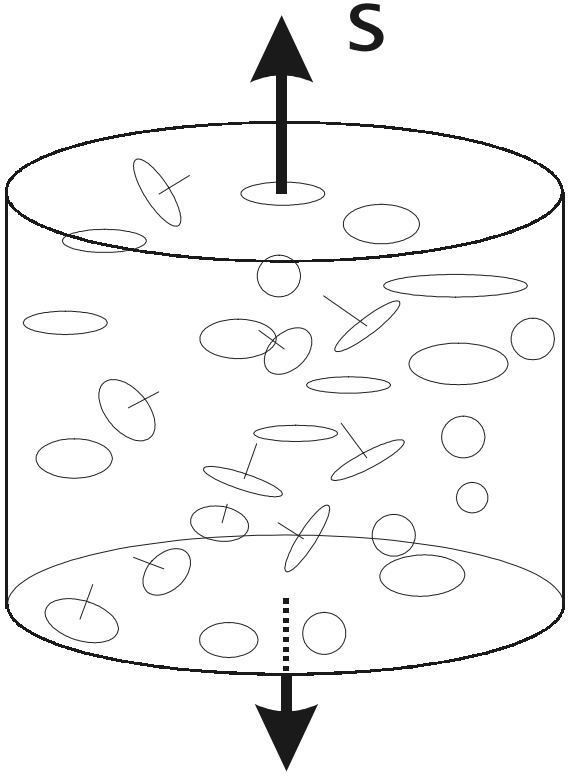




Általánosított kontinuumok, hiperkontinuumok,

Régi: Cosserat testvérek, 1909 – mikrokristályos anyagok
Nemlokalitás (mezoszkópikus)

$\tilde{N}(\mathbf{x},t)$



$N(\mathbf{l},\mathbf{x},t)$

mikroszerkezet
(mikrorepedések - axiálvektor)

N - repedésszám sűrűség

$$\tilde{N}(\mathbf{x},t)=\int N(\mathbf{l},\mathbf{x},t)dV_l$$

klasszikus térelmélet – kvantumtérelmélet
hiperkontinuum – húremélet

Dinamika

Keverékek: “folytonos index” $\Longrightarrow$ mérlegek

$$\boxed{\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot N\mathbf{v} + \nabla_l \cdot N\mathbf{v}_l = \sigma_l}$$

+ energia, impulzus, stb…

f - eloszlásfügvény $\qquad f(\mathbf{l},\mathbf{x},t) := \dfrac{N(\mathbf{l},\mathbf{x},t)}{\tilde{N}(\mathbf{x},t)}$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot f\mathbf{v} + \nabla_l \cdot f\mathbf{v}_l = -\frac{f}{\tilde{N}}\dot{\tilde{N}} + \sigma_l$$

Egyszerűsítő feltételek

- Nincs független spin
- Nincs forgatónyomaték, külső erőtér, repedésforrás
- Lokális mechanikai egyensúly ($\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{0}$)
- Baricentrikus mezosebesség = makrosebesség

Összes mérlegből marad:

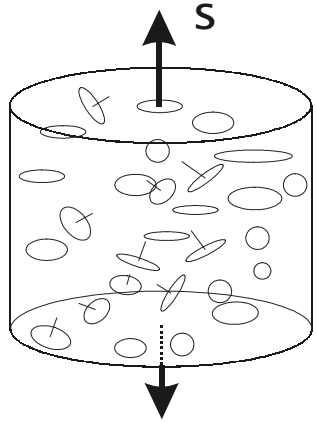
$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla_l \cdot f\mathbf{v}_l = 0$$

(általánosított) Liouville egyenlet

mikrodinamika

$$\dot{\mathbf{l}} = \frac{d\mathbf{l}}{dt}$$

Rice-Griffith mikrodinamika



$$G(\sigma,l) = \alpha l - \frac{\beta}{2}\sigma^2 l^2 - \frac{\gamma}{2}\sigma^2$$

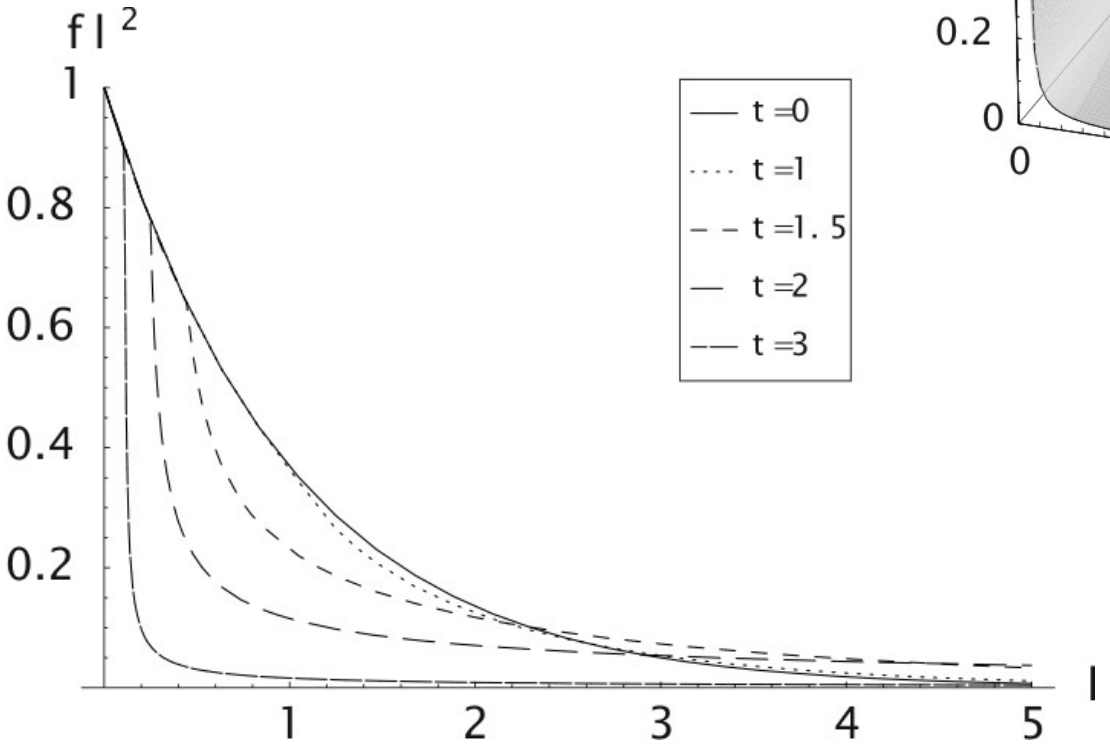
$$\varepsilon = -\frac{\partial G}{\partial \sigma} = (\gamma + \beta l^2)\sigma$$ mechanikai egyensúly

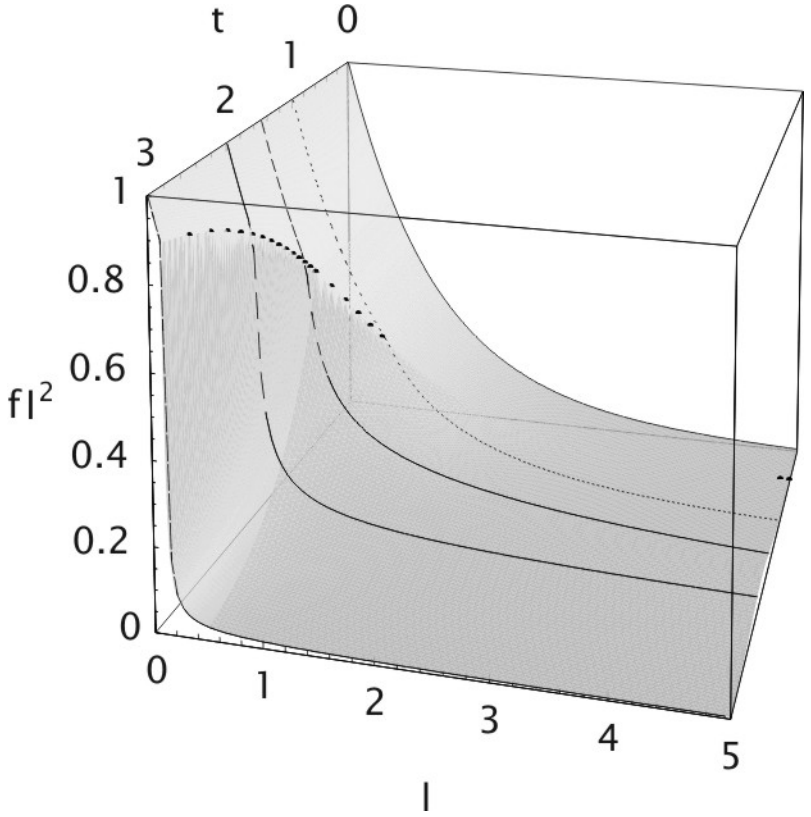
$$\dot{l} = \begin{cases} -L\dfrac{\partial G}{\partial l} = -\alpha' + \beta' l\sigma^2, & \text{ha} \quad \alpha' \le \beta' l\sigma^2 \\ 0 \qquad\qquad , & \text{máskor} \end{cases}$$

unilaterális

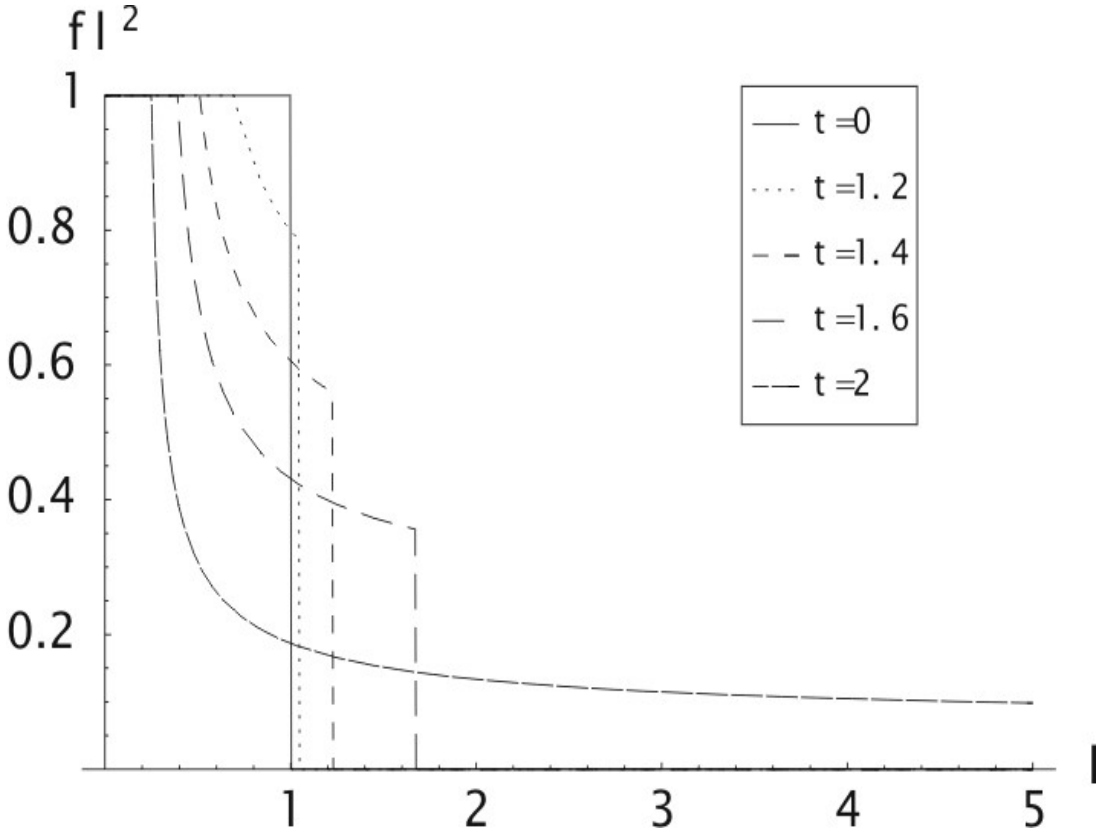
analitikusan megoldható $\sigma(t) = v_\sigma t$

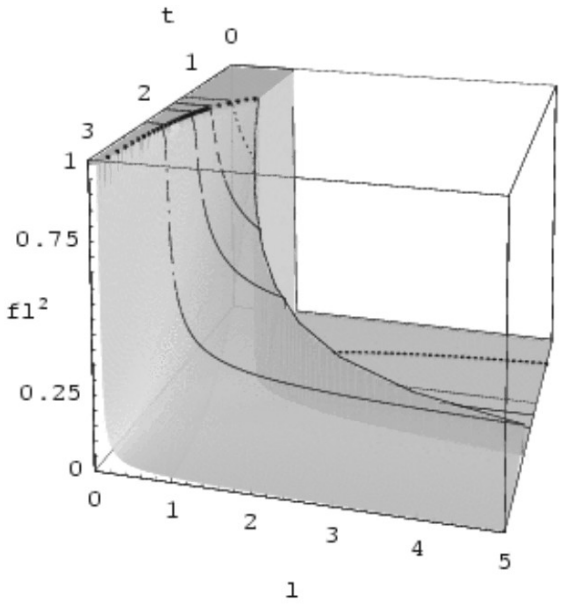
Exponenciális kezdeti eloszlás

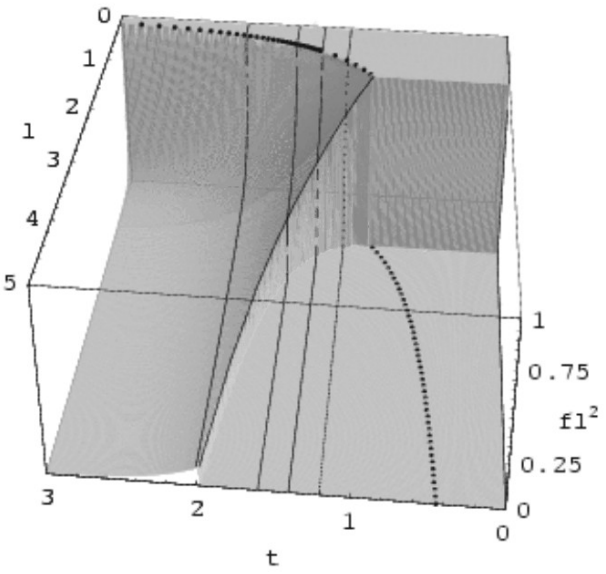




Lépcsős kezdeti eloszlás







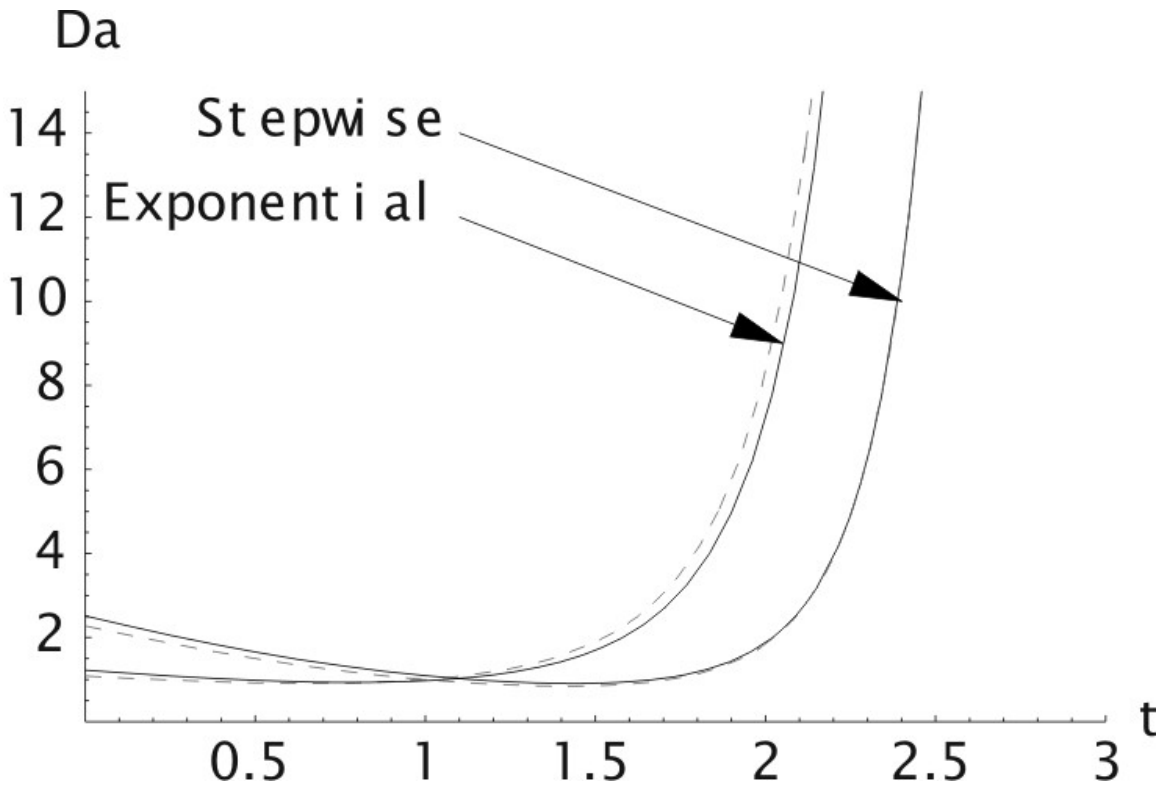
Átlagdinamika

Károsodás: $D(t) := \int_0^\infty l^3 f(l,t)\,dl$

$$\dot{D} = -a + bt^2 D$$

——— illesztett kezdeti feltétel

	$D(t_0)$	a
Exp.	1	0.395
	1.2226	0.5681
Ugrás	1	1.6852
	1.0941	1.0871



Összefoglalás

Kísérleti tapasztalat sokrétű

Általános elvek – univerzalitás (anyagjellemzők)

Többféle nézőpont – alaposabb megértés