



# Földrengések Zn egykristály mikrooszlopokban

Ispánovity Péter Dusán

*ELTE TTK Budapest,  
Anyagfizikai Tsz.*

# Közreműködők

## ELTE TTK, Anyagfizikai Tanszék

Ispánovity Péter Dusán, Ugi Dávid,  
Péterffy Gábor, Dankházi Zoltán,  
Tüzes Dániel, Vida Ádám, Groma István



## Károly Egyetem Prága, Dept. of Materials Physics

Michal Knapek, Máthis Krisztián,  
Frantisek Chmelík



## Földrengések Zn egykristály mikrooszlopokban

Földrengések

Egykristályok deformációja

Mikrooszlopok deformációja

Mikrooszlopok készítése

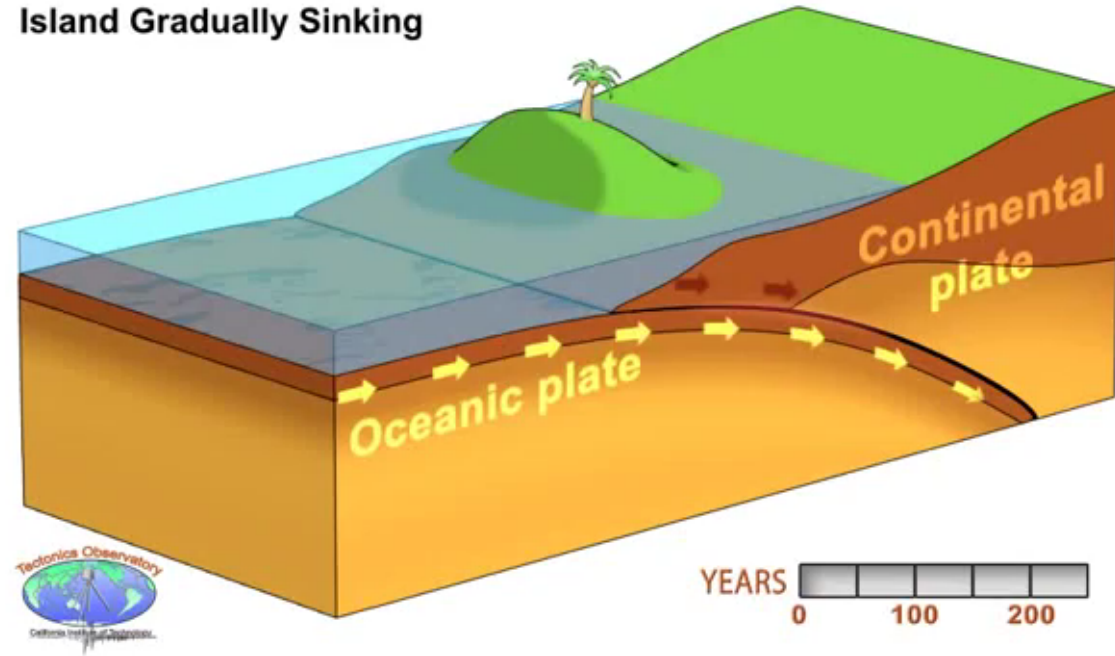
Akusztikus emisszió

Mi köze a mikrooszlopoknak  
a földrengésekhez?

# Mi a földrengés?

- Áramlik a magma a szilárd lemezek alatt
- Belső rugalmas erők épülnek fel
- Deformáció hatására felszabadul a rugalmas energia

Island Gradually Sinking



## Rugalmas alakváltozás

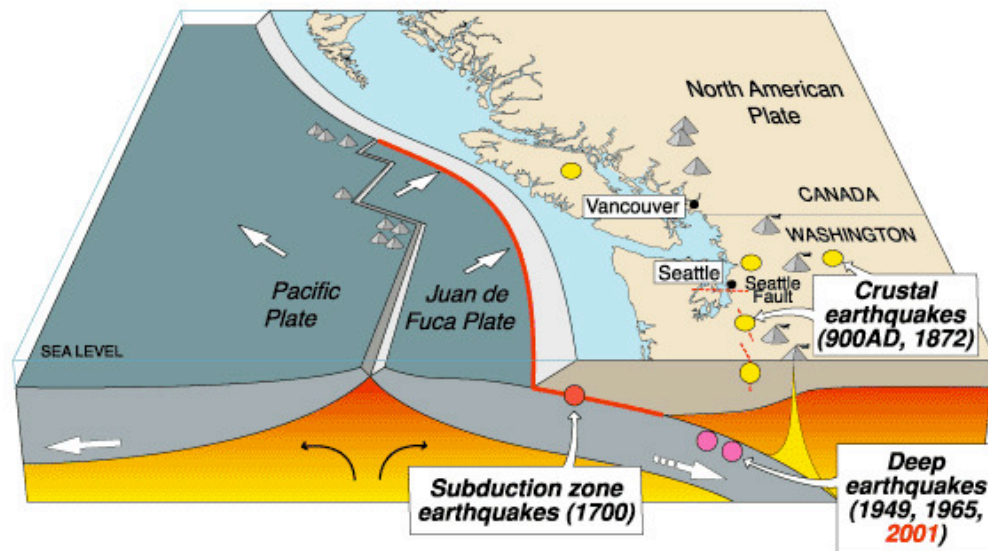
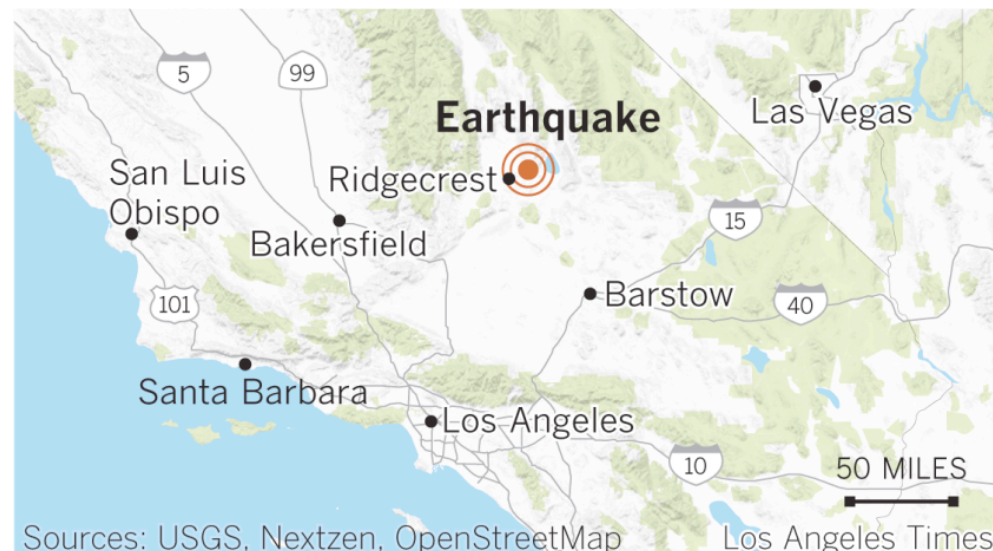
- Amíg felhalmozódik a rugalmas energia, addig nincs maradandó alakváltozás

## Maradandó alakváltozás

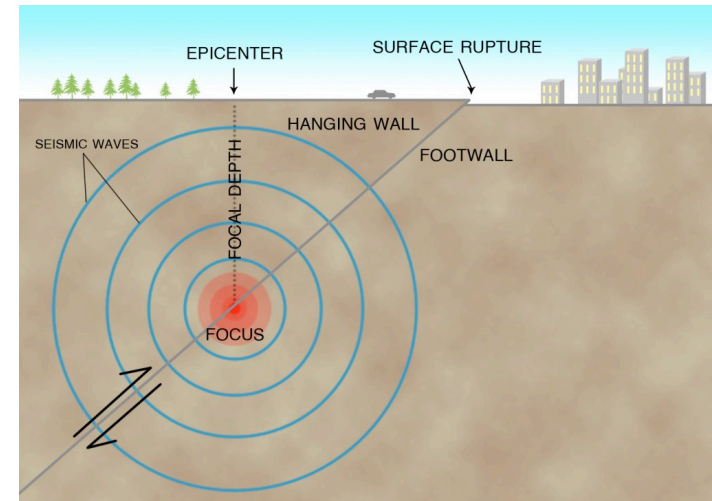
- A maradandó alakváltozás hatására szabadul fel a tárolt energia

# A 2019. évi Ridgecrest földrengés

- 2019. július 4-5.
- Richter skála szerinti 7,1-es földrengés
- Az elmúlt 20 év legerősebb földrengése Kaliforniában
- Los Angeles-től 200 km-re
- Mély földrengés: 10 km-rel a felszín alatt

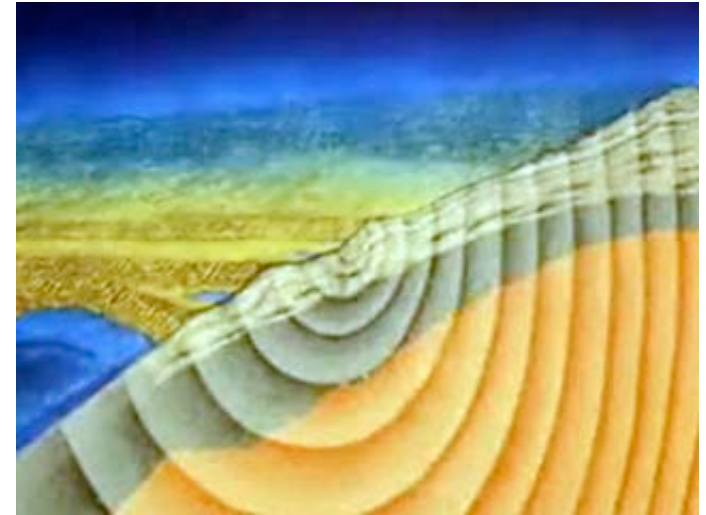


# A földrengés hatásai: maradandó alakváltozás

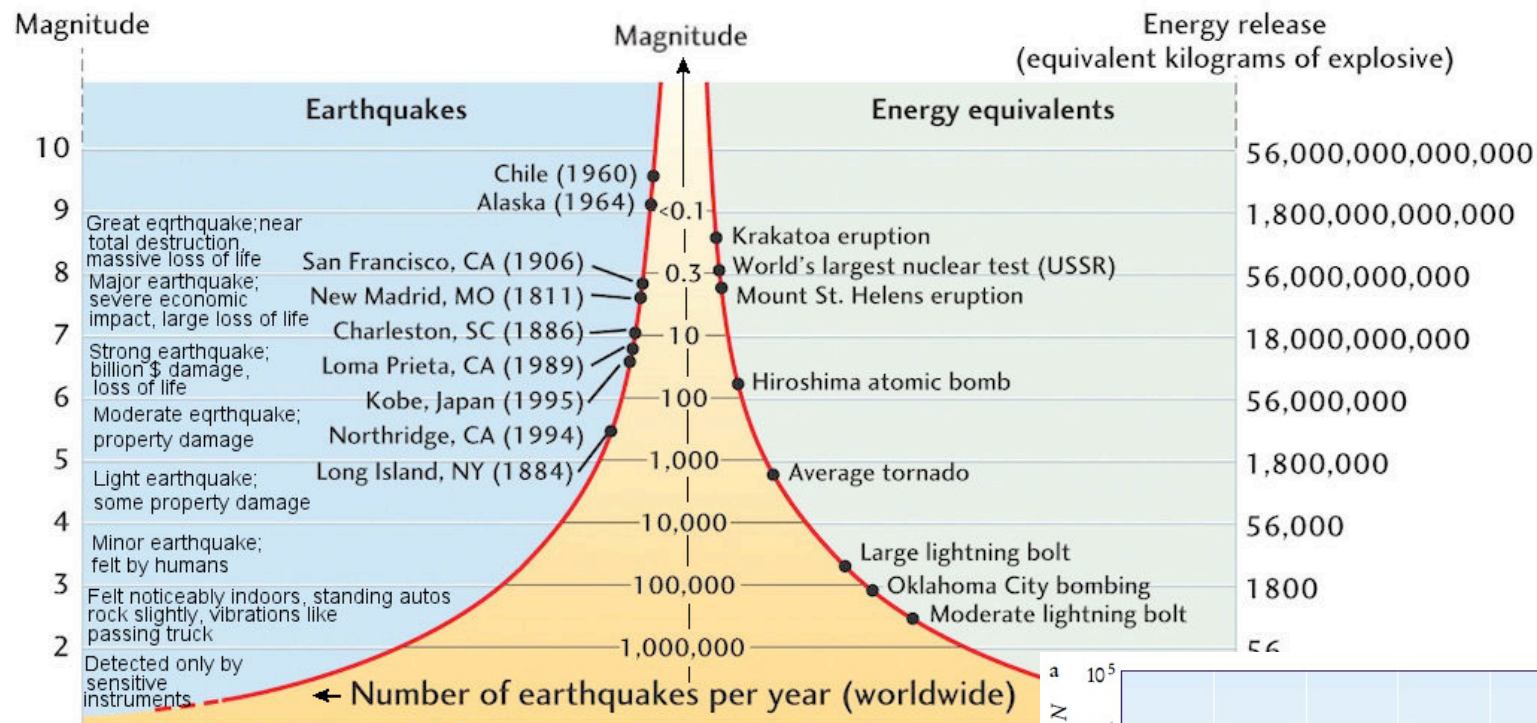


# A földrengés hatásai: rugalmas hullámok

- A felszabaduló rugalmas energia hullámokat kelt
- Ez okozza a pusztítás jelentős részét
- A Föld túloldalán is észlelhető
  - Törések, visszaverődések
  - Pl. atomrobbantások észlelése

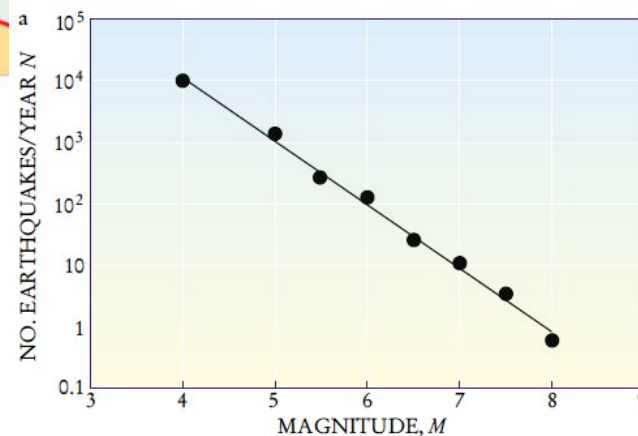


# Richter-skála



Gutenberg-Richter-tv:  $N_{>M} = 10^{a-bM}$

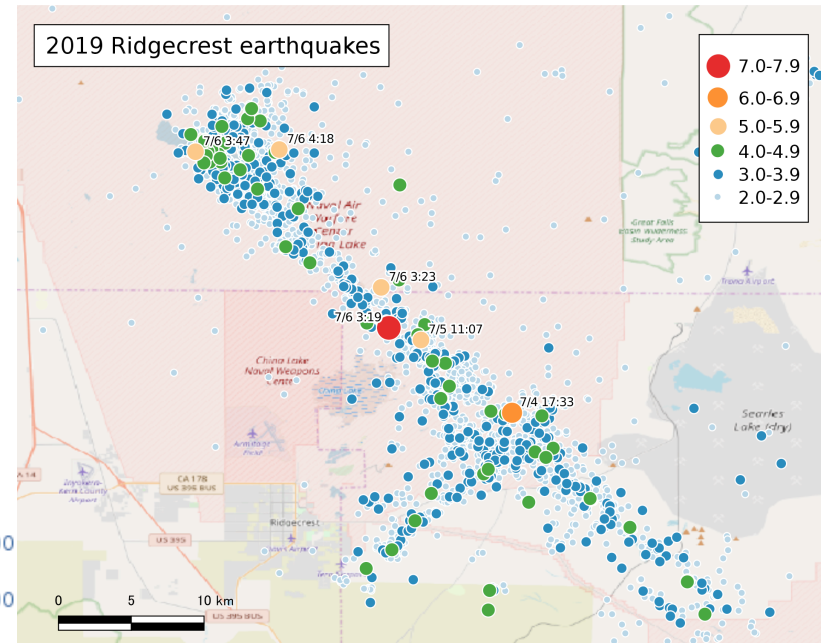
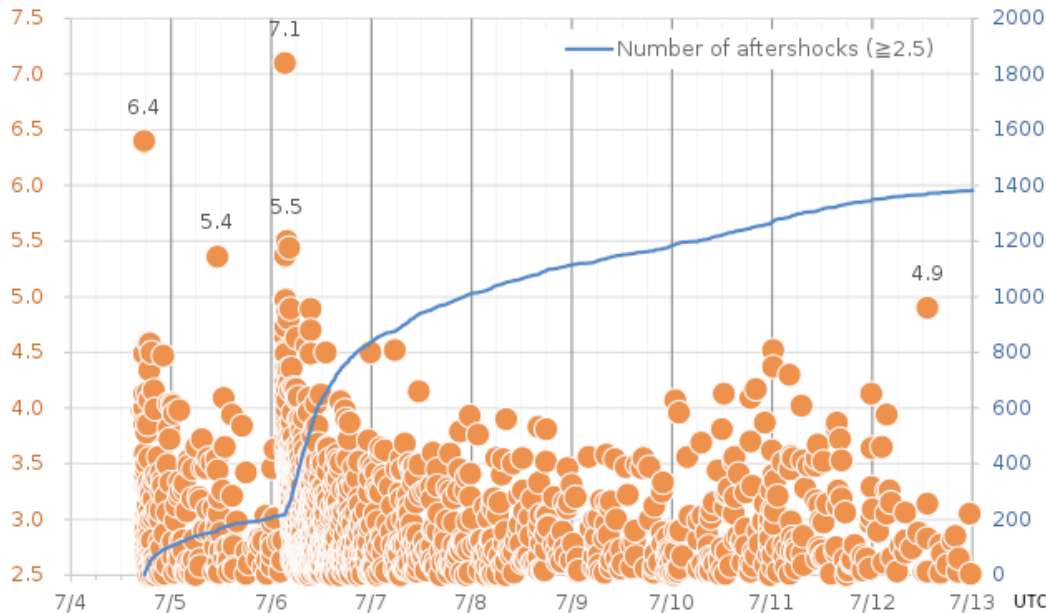
- $M$ : magnitúdó
- $b = 1,0$ : exponens
- Skálafüggetlen eloszlás





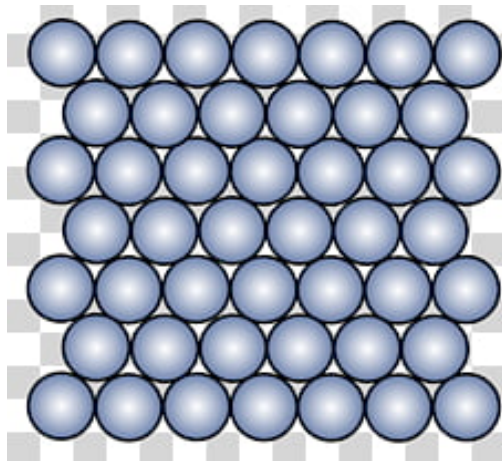
# Utó rengések

- Utó rengések száma:
  - 3 nap alatt kb. 4000
  - 6 hónap alatt kb. 40000
- Térbeli kiterjedés:
  - 50 km-es hosszban voltak utó rengések
  - az elmozdulás mértéke kb. 20 cm



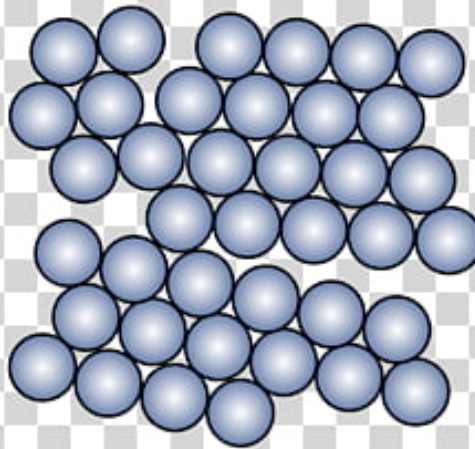
- Utó rengések rátája  $n(t)$ 
  - $n$ : egységnyi idő alatti utó rengések száma
  - $t$ : főrengés óta eltelt idő
- Omori-törvény:  $n(t) \sim 1/t$

# Egykristály



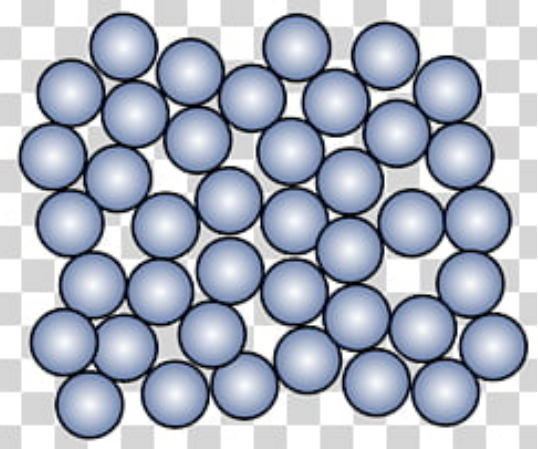
Egykristály

- Puha
- Képlékeny
- Deformáció függ az orientációtól



Polikristály

- Keményebb
- Kevésbé képlékeny
- Irányfüggetlen deformáció



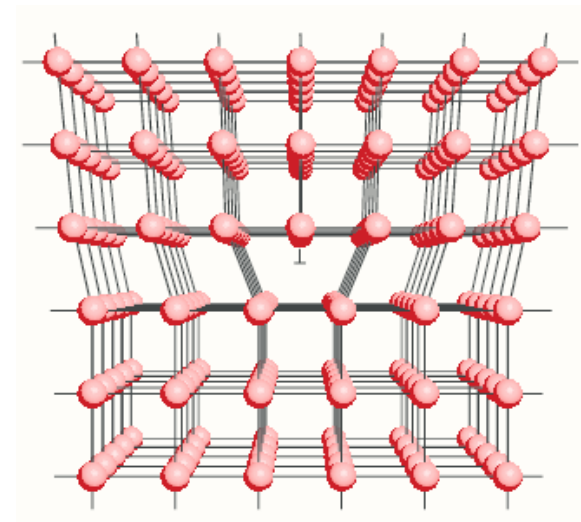
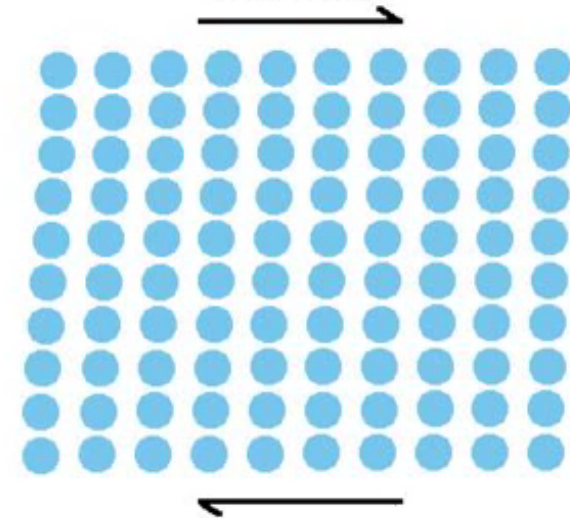
Amorf/fémüveg

- Nagyon kemény
- Rideg
- Irányfüggetlen deformáció

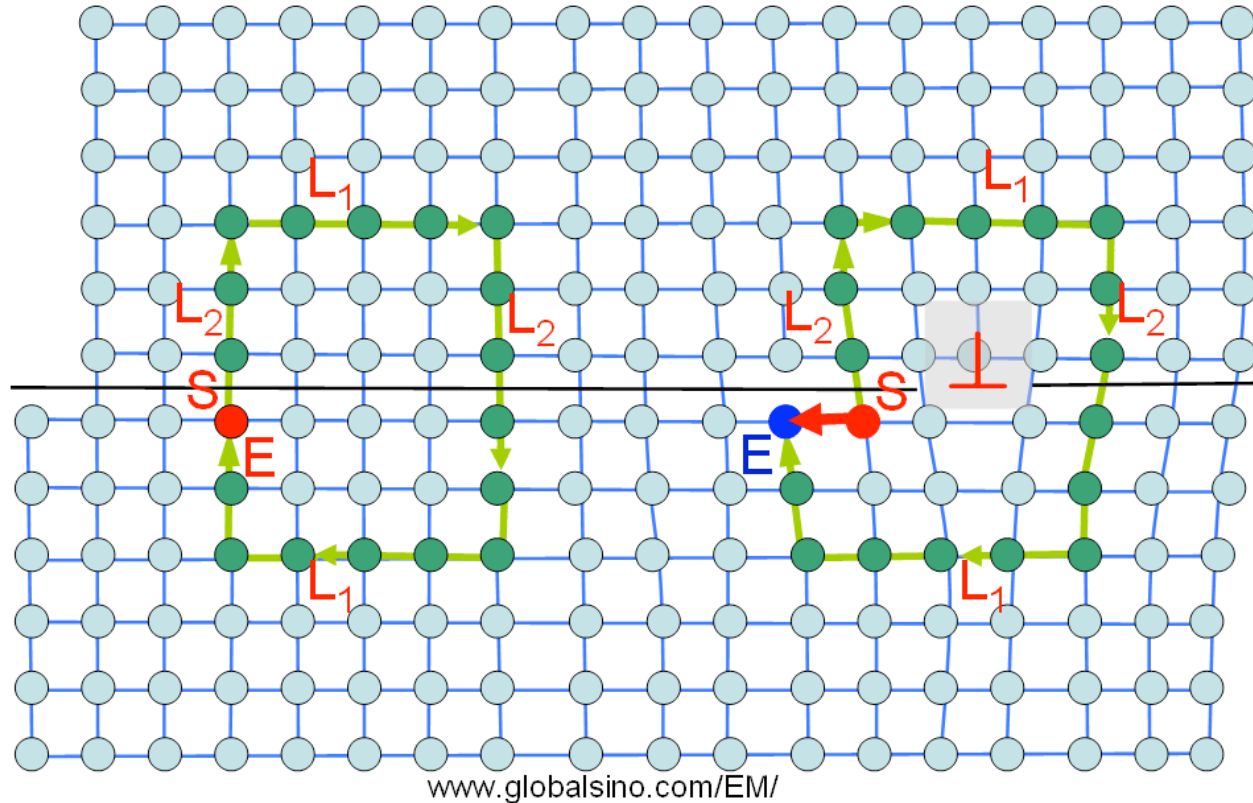
# Diszlokáció fogalma

## Diszlokáció

- 1936: Orován, Taylor, Polányi
- Ezek elmozdulása okozza a fémek maradandó alakváltozását
- Csak egy síkban mozoghatnak
- Nyírófeszültség hatására elmozdulnak
- Ha végighaladnak a kristályon az egy rácsállandónyi maradandó alakváltozást okoz



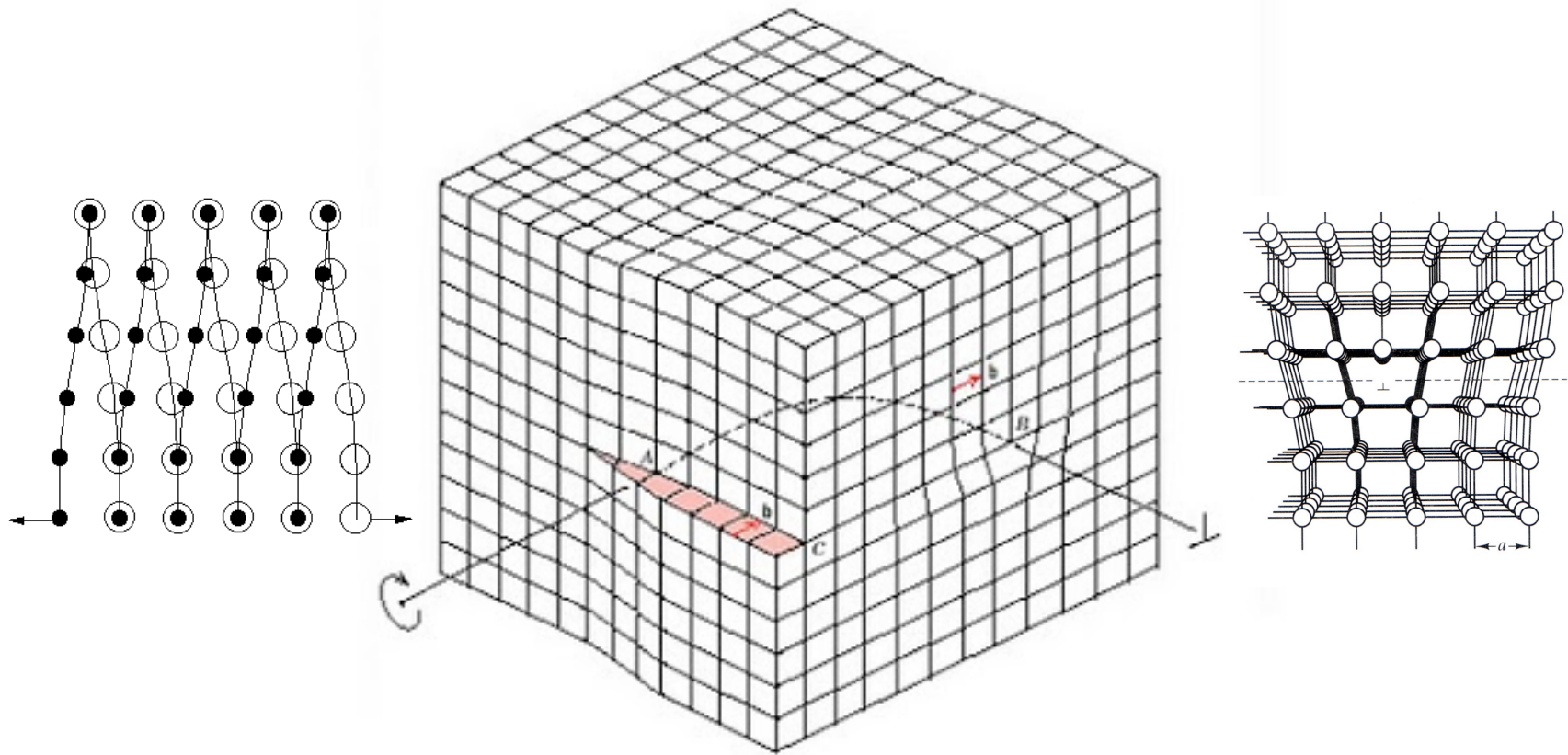
# A Burgers-vektor



- Burgers-vektor:  $\mathbf{b}$
- Irányvektor:  $\mathbf{l}$

A Burgers vektor nem tűnik el az anyagban

# Csavar- és éldiszlokáció fogalma



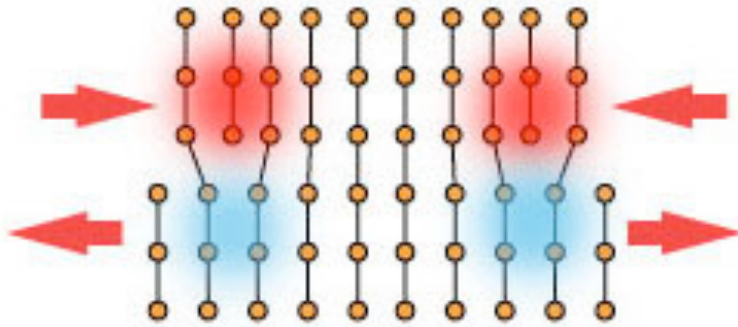
Csavardiszlokáció:  $\mathbf{b} \parallel \mathbf{l}$

Éldiszlokáció:  $\mathbf{b} \perp \mathbf{l}$

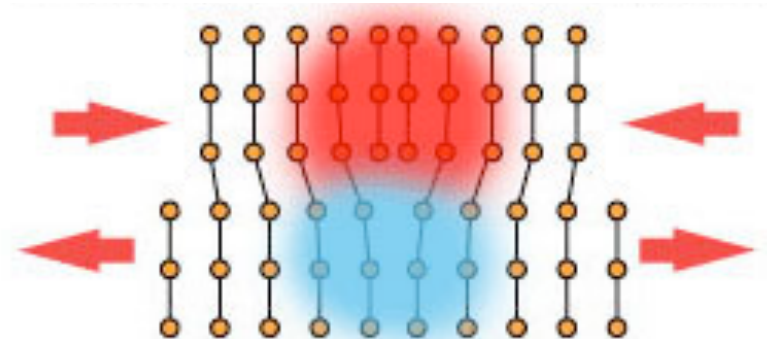
# Diszlokációk kölcsönhatása

## A diszlokációk

- rugalmas rácstorzulást (deformációt) és feszültséget keltenek a kristályrácsban:  $\sigma \sim \varepsilon \sim b$ 
  - A tárolt energia:  $E \sim \sigma\varepsilon \sim b^2$
- feszültség hatására mozognak



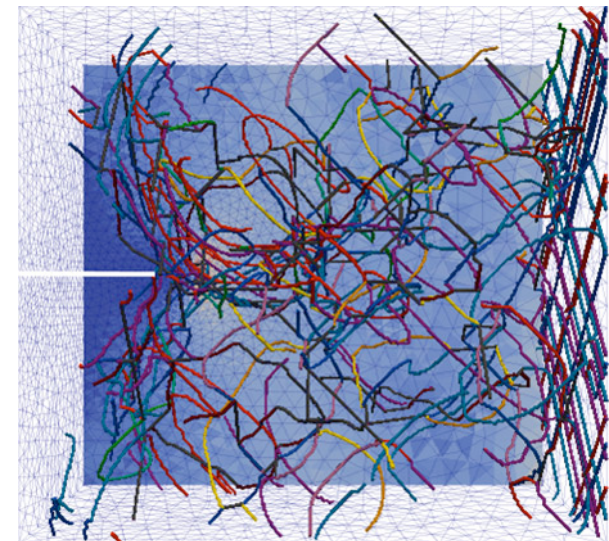
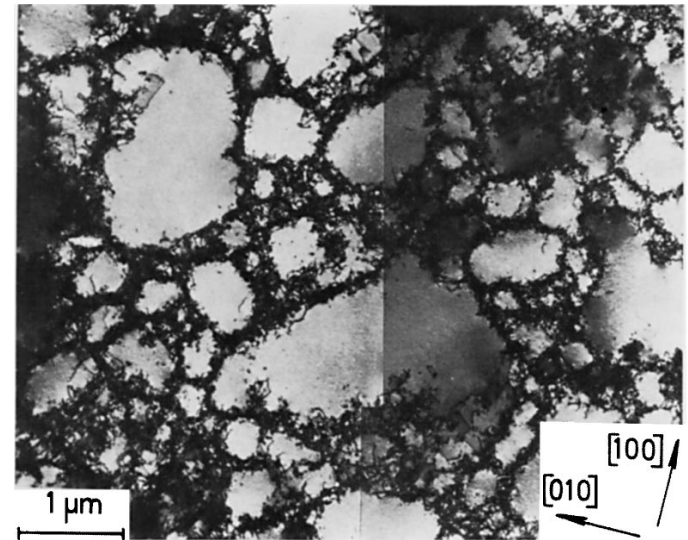
$$2 \times b$$
$$E \sim 2b^2$$



$$1 \times 2b$$
$$E \sim 4b^2$$

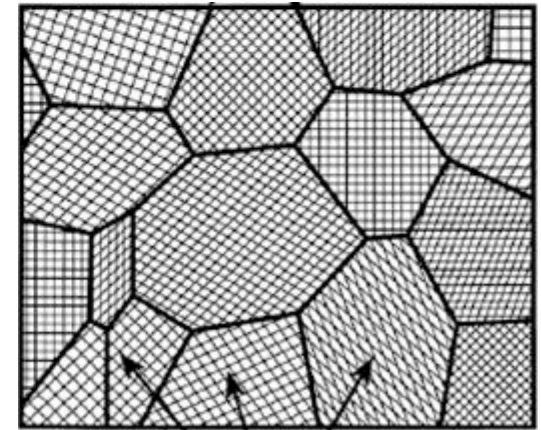
# Diszlokáció mintázatok

- Deformáció hatására a diszlokációk sokszorozódnak
- Összefonódás
  - Egymás mozgását akadályozzák
- Diszlokáció mintázatok
  - Diszlokációkban sűrű és ritka térrészek kialakulása

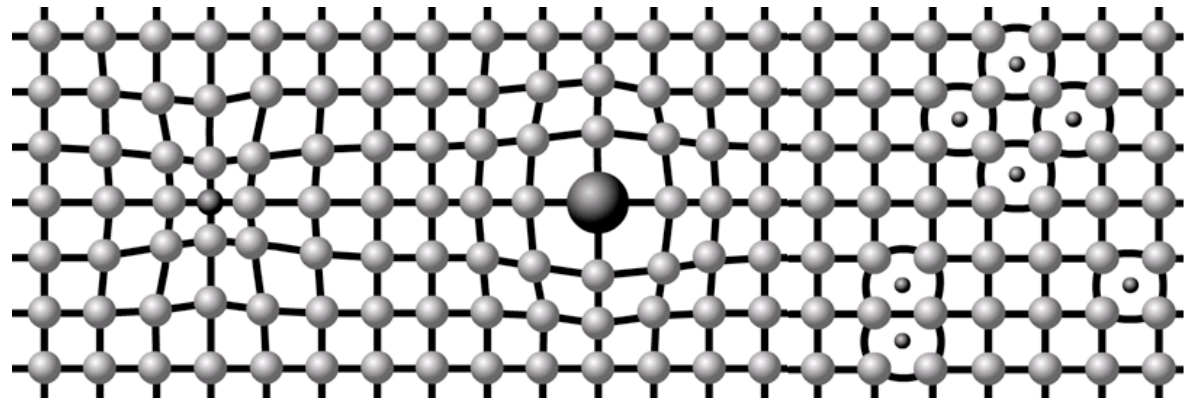
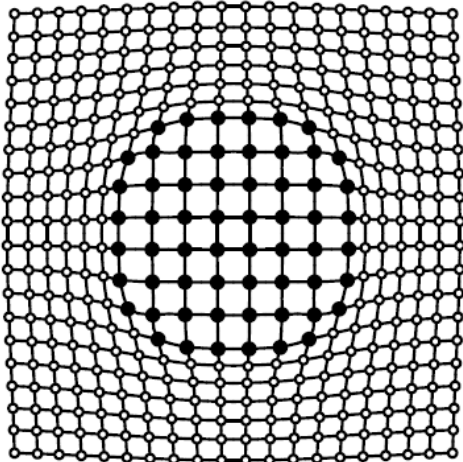


# Kapcsolat a mechanikai tulajdonságokkal

- Ha könnyen mozognak: lágy anyagok
- Ha nehezen mozognak: kemény anyagok
- Akadályok:
  - Többi diszlokáció
  - Kiválás
  - Oldott (szubsztitúciós vagy intersticiális) atom
  - Vakanciák
  - Szemcsehatár



Szemcsék

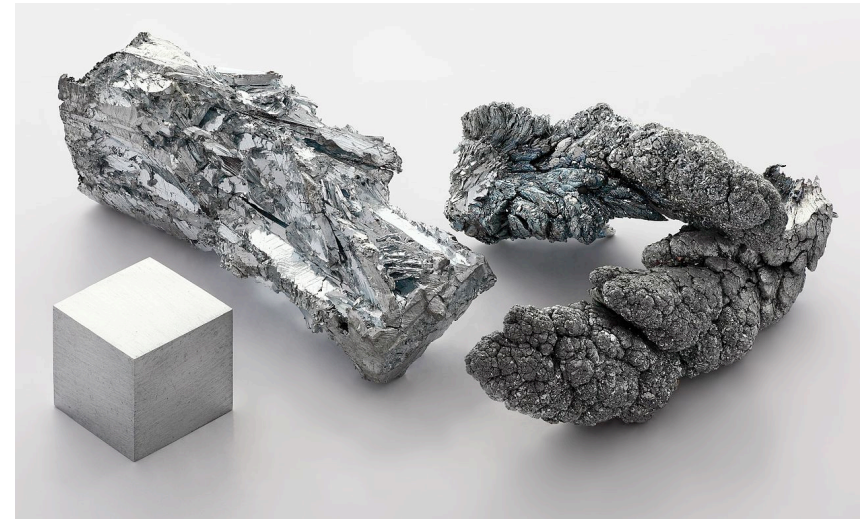




# Cink

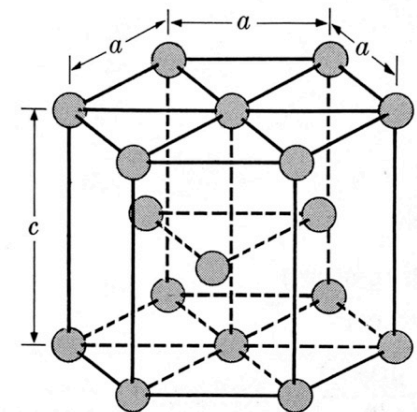
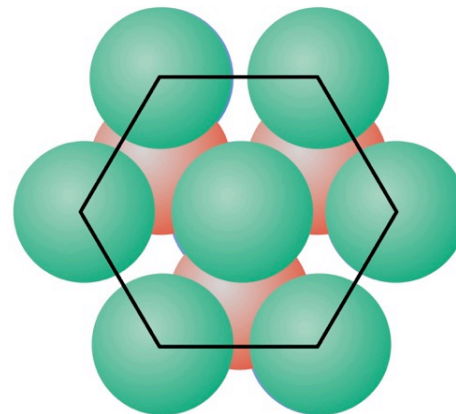
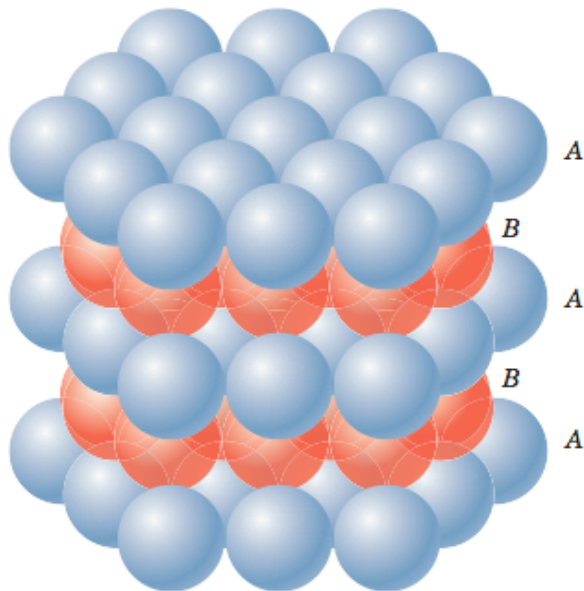
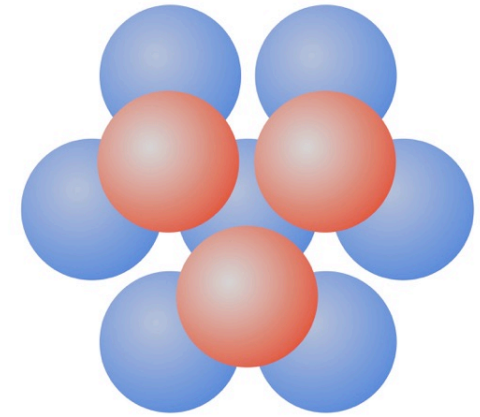
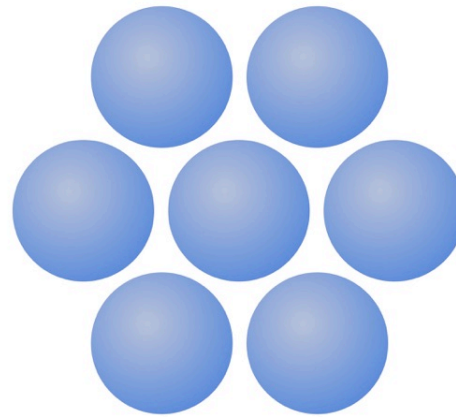
- A réz és a gallium között helyezkedik el
- Rézzel ötvözve: sárgaréz
- Leggyakoribb alkalmazás: acél korróziógátló bevonata (horganyzás, galvanizálás)

The image shows a periodic table with the element Zinc (Zn) highlighted in a light blue box. The box contains the atomic number 30, the symbol Zn, and the atomic weight 65.38. The word "Zinc" is written below the symbol. The periodic table is color-coded by groups, and the highlighted box is positioned over the transition metals, specifically between Copper (Cu) and Gallium (Ga).

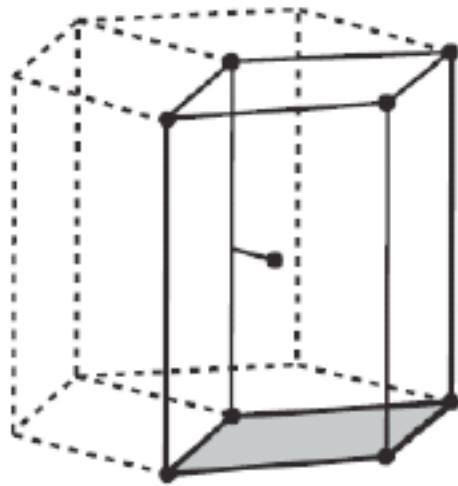


# HCP kristályszerkezet

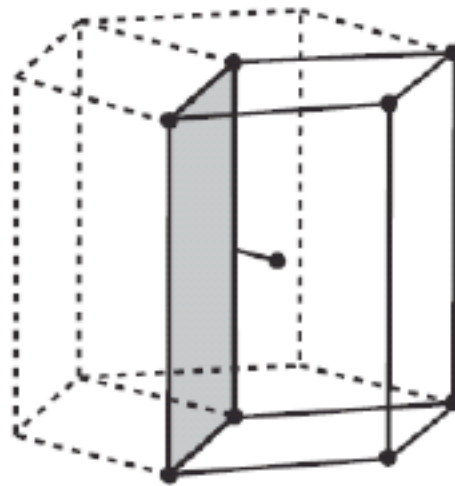
- Hatszöges szoros pakolású – hexagonal close packed
- Mg, Ti, Co, Zn, Zr



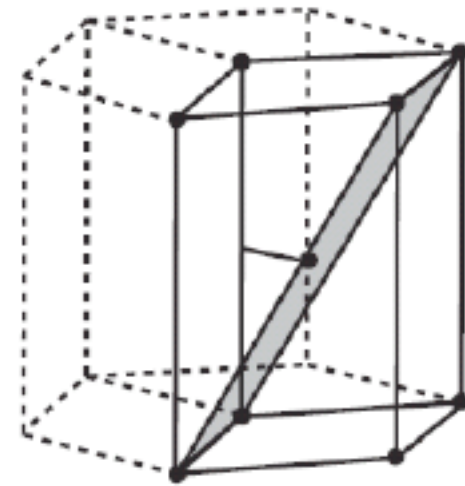
# Csúszási síkok hcp anyagban



Basal



Prismatic



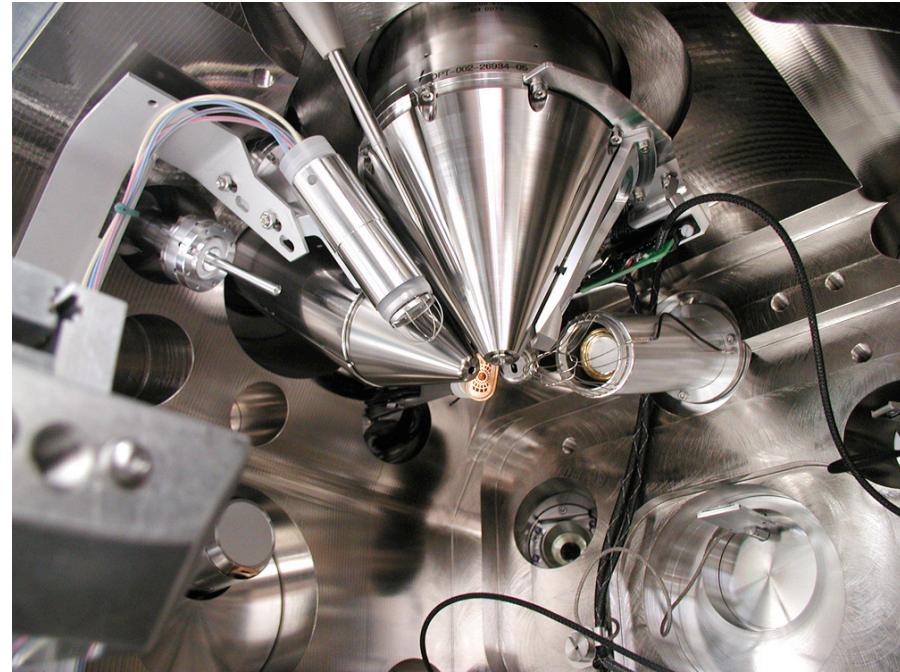
Pyramidal

- A diszlokációk legkönnyebben a bazális síkon keletkeznek és mozognak

# Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)



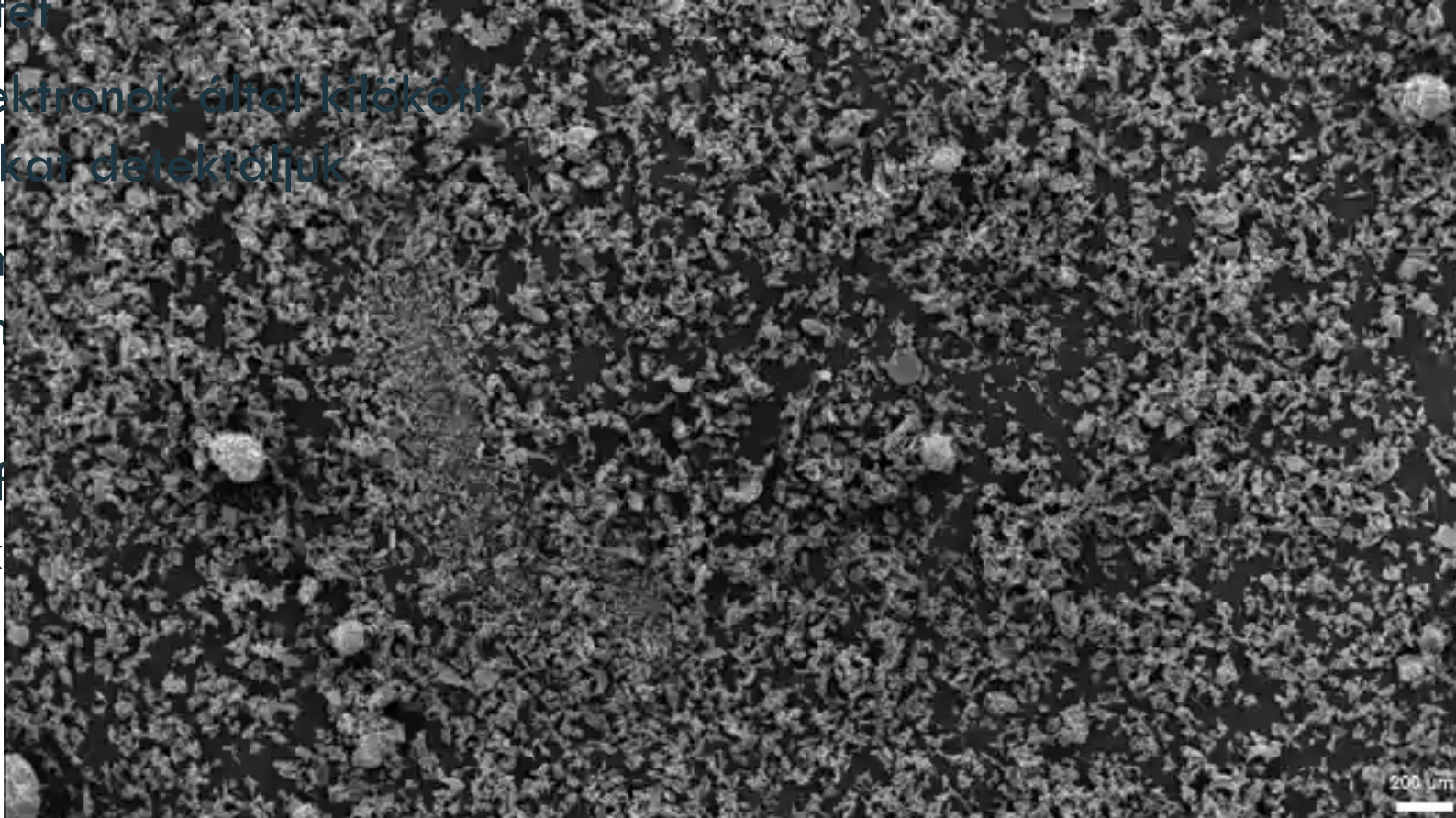
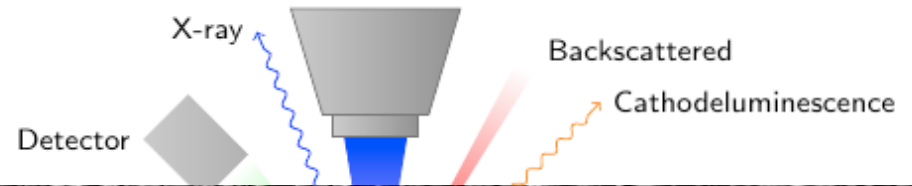
SEM labor az ELTE TTK-n



A mikroszkóp belülről

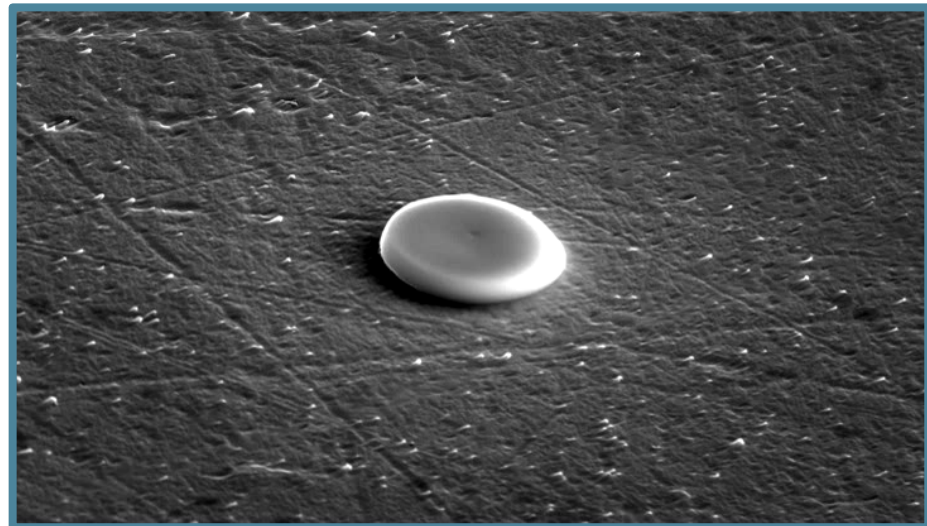
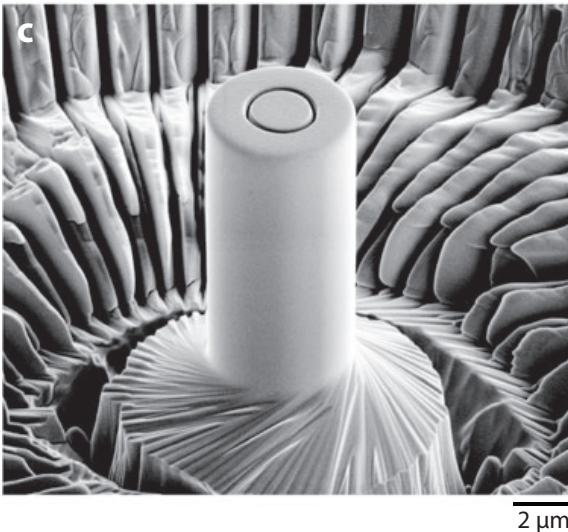
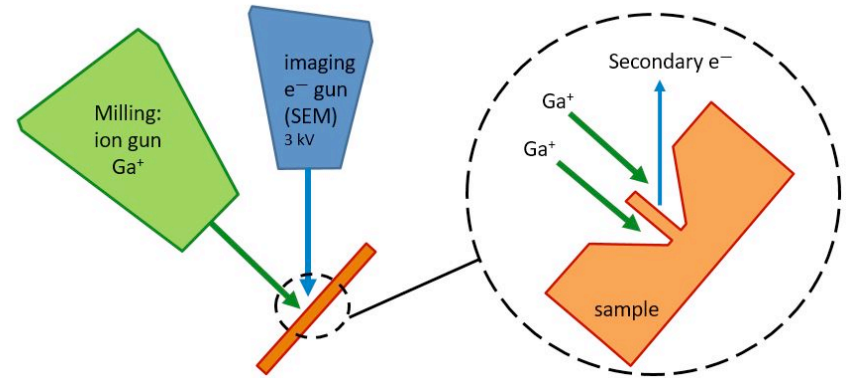
# SEM működése

- Fókuszált elektronsugár egy pontban gerjeszti a minta felületét
- Az elektronok által keltett dolgokat detektáljuk
- Maximális felbontás 10 nm
- Csak fekete-fehér képek



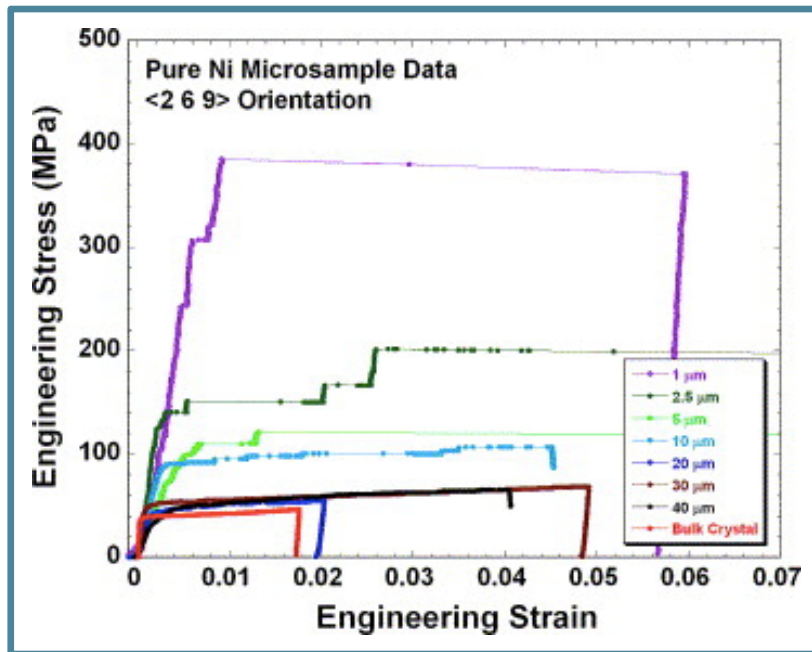
# Mikrooszlop faragása

- 20keV-es fókuszált  $\text{Ga}^+$  ionokkal bombázzuk a felületet
- Módszerek
  - Felülről lefelé ill. oldalról
  - Opcionális amorf Pt réteg

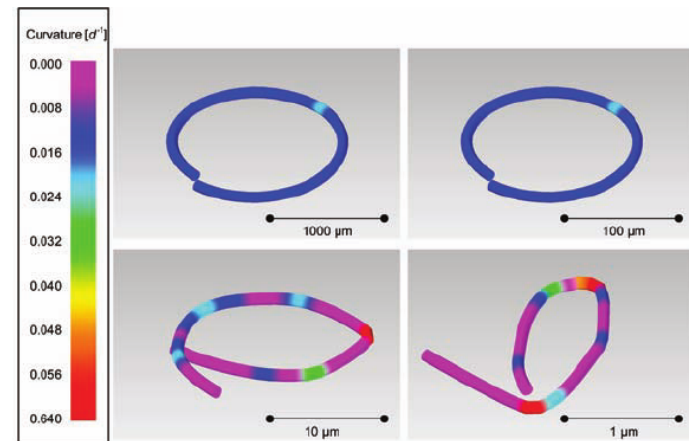
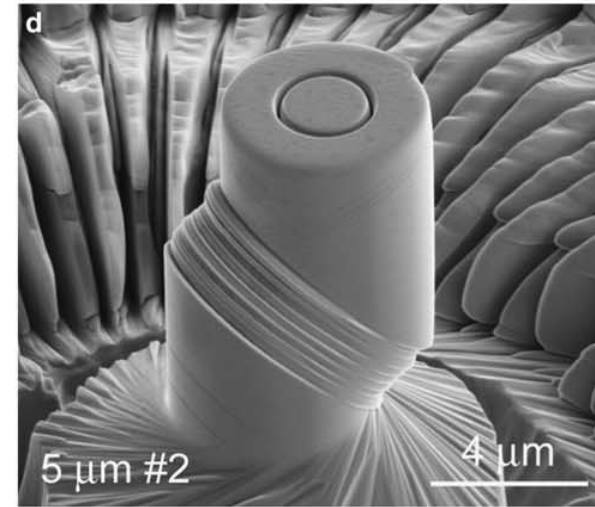


# Kristályplaszticitás a mikronos skálán

- Mikron méretű minták (mikrooszlopok)
  - Méreteffektusok
  - Nagy, véletlenszerű deformációs ugrások
  - Megjósolhatatlan deformáció



D. M. Dimiduk *et al.*, Science, 2006



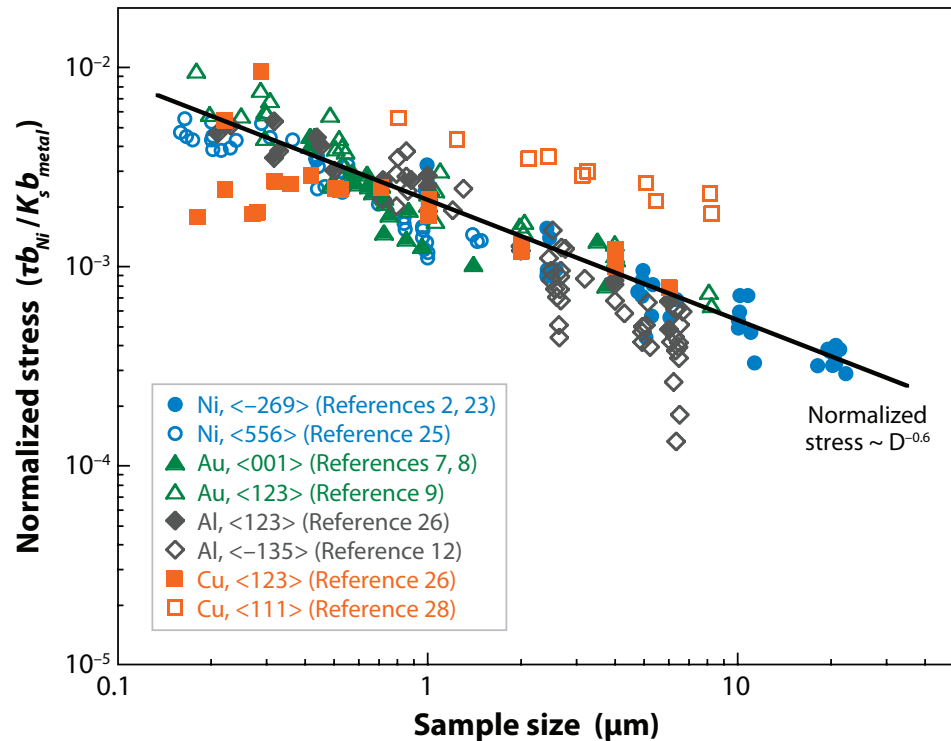
Csikor *et al.*, Science, 2007

# Méreteffektusok

- Csökkenő mérettel növekvő keménység:

$$\tau_Y = \tau_0 + Bd^{-n}$$

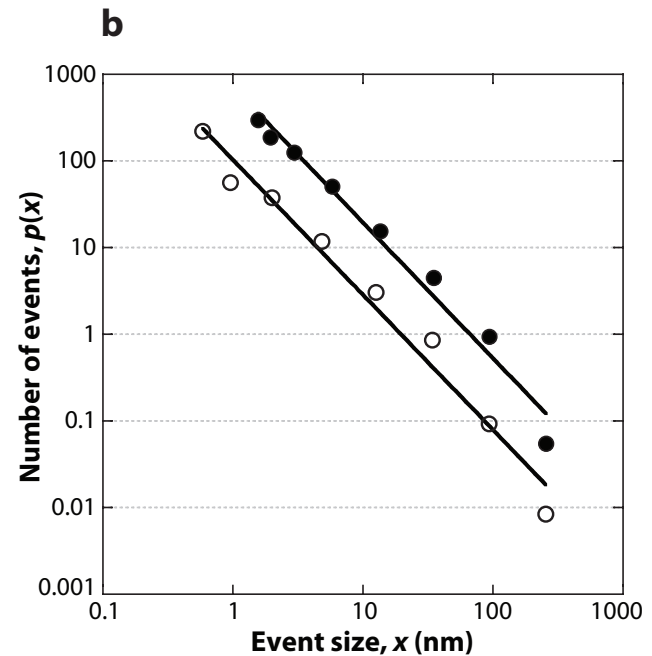
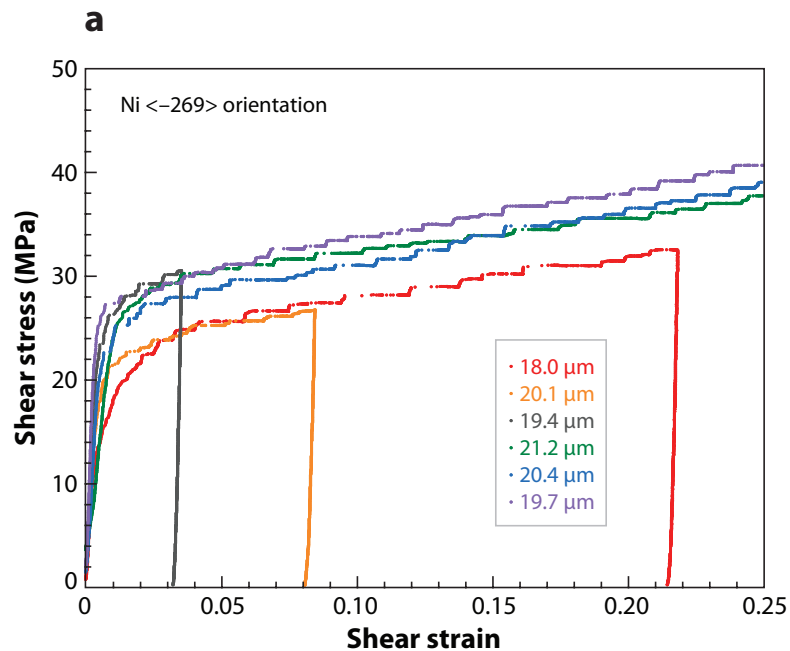
- $d$ : átmérő
- $\tau_0$ : tömbi folyásfesz.
- $n \approx 0,6$
- Normálás a Burgers vektorral ill. a nyírási modulusszal  $\rightarrow$  univerzális viselkedés





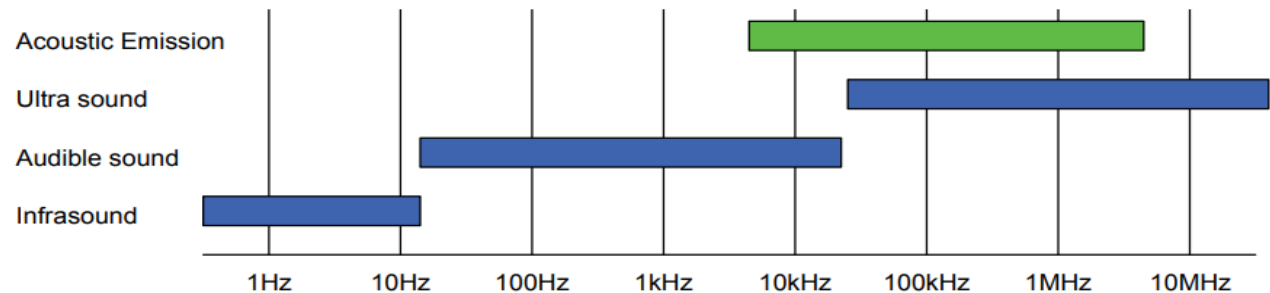
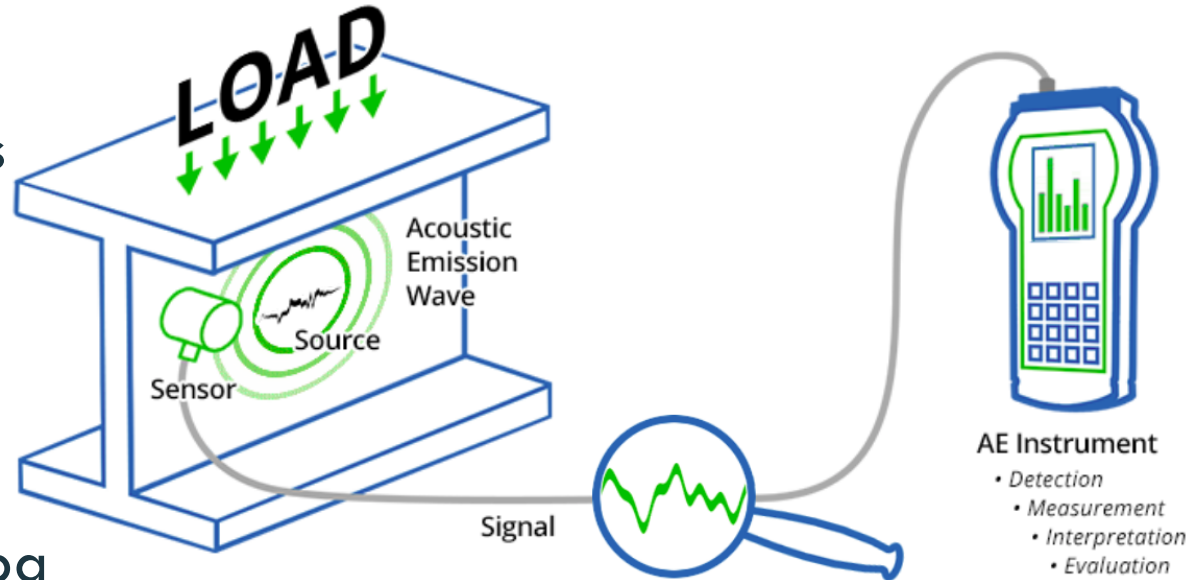
# Deformációs/diszlokáció lavinák

- Véletlen diszlokáció lavinák
- Hatványfüggvény szerinti eloszlás:  $P(s) = As^{-\tau} e^{-\frac{s}{s_0}}$ 
  - $\tau$ : lavinaexponens ( $\approx 1,5$ )
  - $s_0$ : levágás (cutoff) ( $\approx 100$  nm)



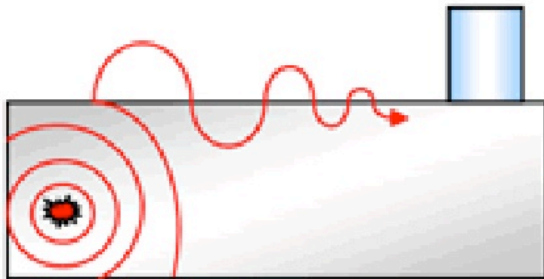
# Akusztikus emisszió

- Pl. repedés rugalmas hullámokat hoz létre
- Komplex szerkezetek minőségellenőrzése
- A jelek az ultrahang frekvenciatartományba esnek



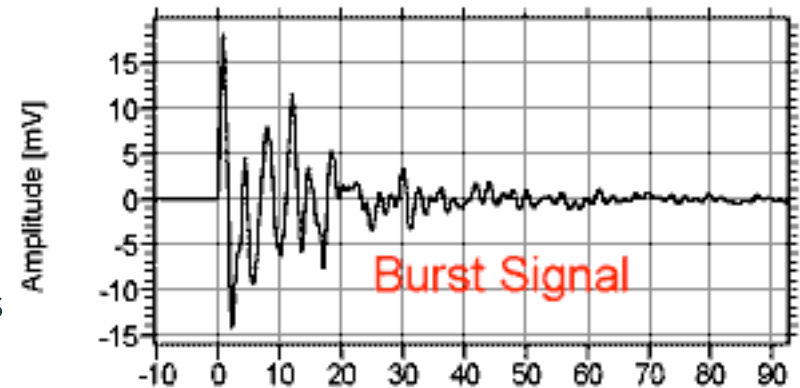
# AE mérés

- Akusztikus jelek detektálása a minta felszínén piezoelektromos detektorral
- A detektált jel
  - jellemző a forrásra és a detektorra is
  - függ a forrás és a detektor távolságától
  - lehet folytonos vagy szaggatott

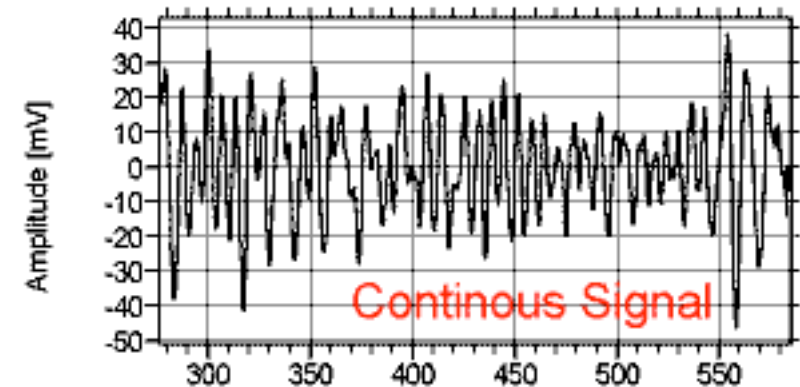


## Acoustic Emission Signals

Chan: 1 Set: 53 Index: 53 14 11:43:52 556.4534 Time [μs]

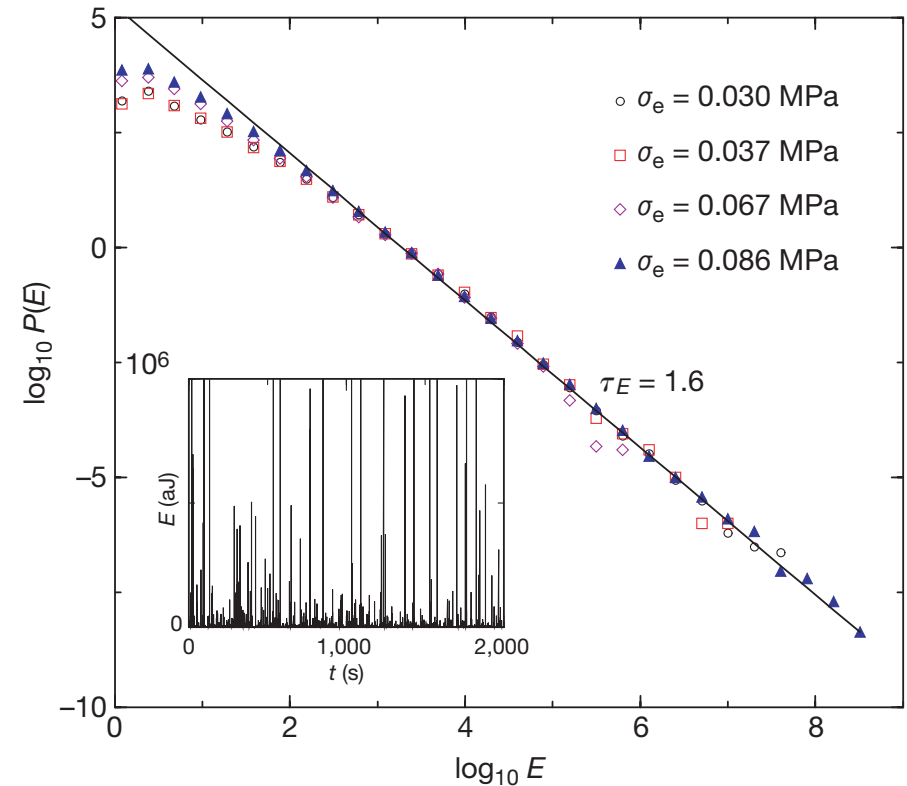
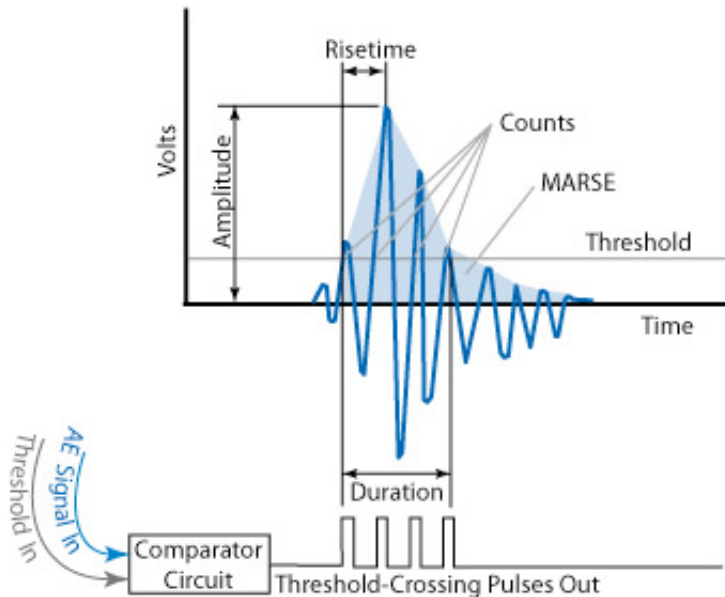


Chan: 4 Set: 2 Index: 21 8 14:27:41 700.6297 Time [μs]



# AE tömbi mintákon

- Jég kúszása (kevesebb, mint 0,1 Mpa feszültségnél)
  - $P(E) \propto E^{-\tau_E}$
  - $\tau_E \approx 1.6$  (jel energiája)
  - $\tau_A \approx 2.0$  (jel amplitúdója)
  - Nincs levágás



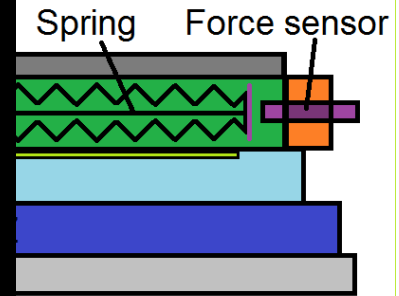
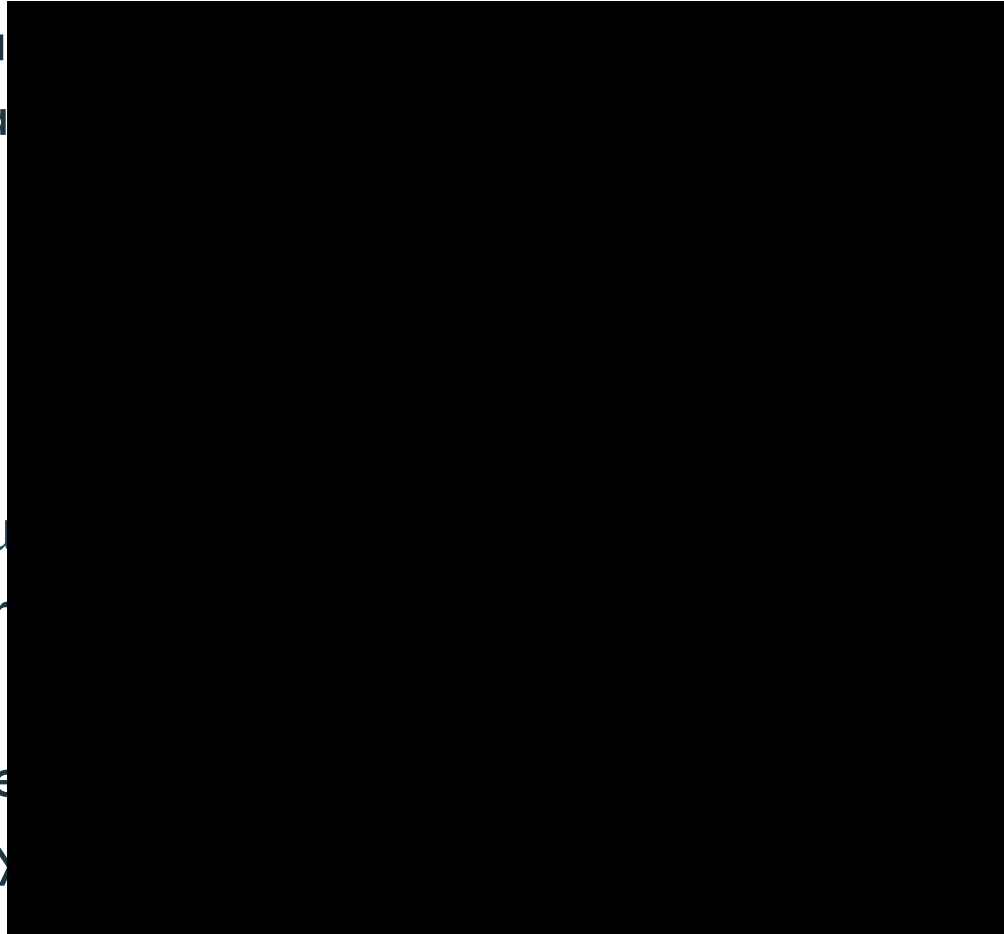
[Miguel *et al.*, Nature (2001)]

# Célkitűzés

- Cél: összekapcsolni a mikrooszlop összenyomási és az AE kísérleteket
  - Bizonyítani az AE és a deformációs lavinák közti korrelációt
  - Értelmezni az AE jeleket a deformációs ugrások tulajdonságainak függvényében
  - Megérteni, hogy az AE jelek hogyan függenek a deformációs mechanizmustól

# 'Nanotest' in situ deformációs stage

- In situ deformáció SEM vákuumkambiumban
- Precízió
  - xy:  $0.5 \mu\text{m}$
  - z:  $1 \text{ nm}$
  - erő:  $1 \mu\text{N}$
- Maximum  $10 \mu\text{m}$  elmozdulás z irányban
- Változtatható rugóállandó (jelölés:  $1 \text{ mN}/\mu\text{m}$  vagy  $0.1 \text{ mN}/\mu\text{m}$ )
- Mintavétel:  $200 \times$



Cu mikrooszlop összenyomása

# AE mérések

- Vallen AMSY-6 eszköz
  - Mintavételezési frekvencia: 2 MHz
  - Folytonos adatfelvételi mód (data streaming)
    - Lehetséges az utólagos adatelemzés
  - Physical Acoustic piezoelektromos szenzorok



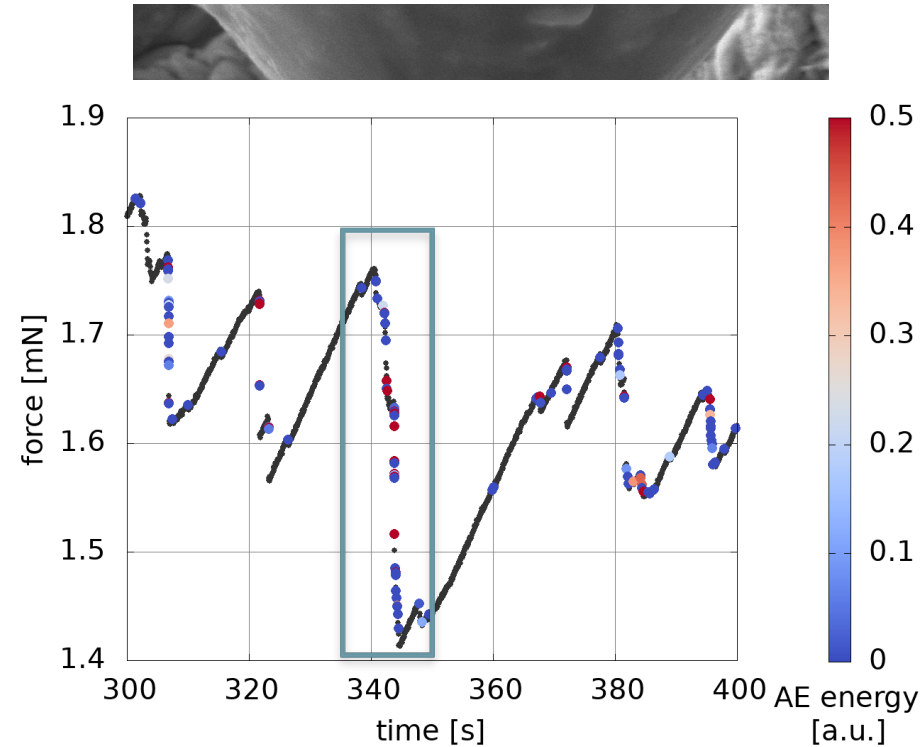
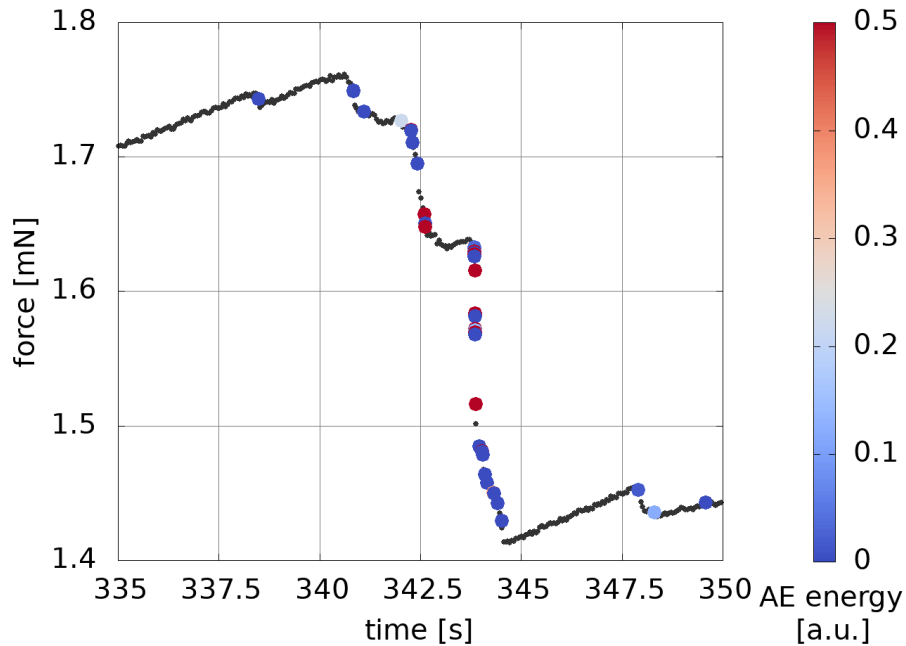
# In situ videó: deformáció + AE események



- Mikrooszlop
  - $8 \times 8 \times 24 \mu\text{m}^3$
  - Bazális síkra orientált Zn
- Csak egyszeres csúszás a bazális síkon
  - nincs ikresedés
  - nincs keresztcsúszás



# Nagyított ábrák + korreláció

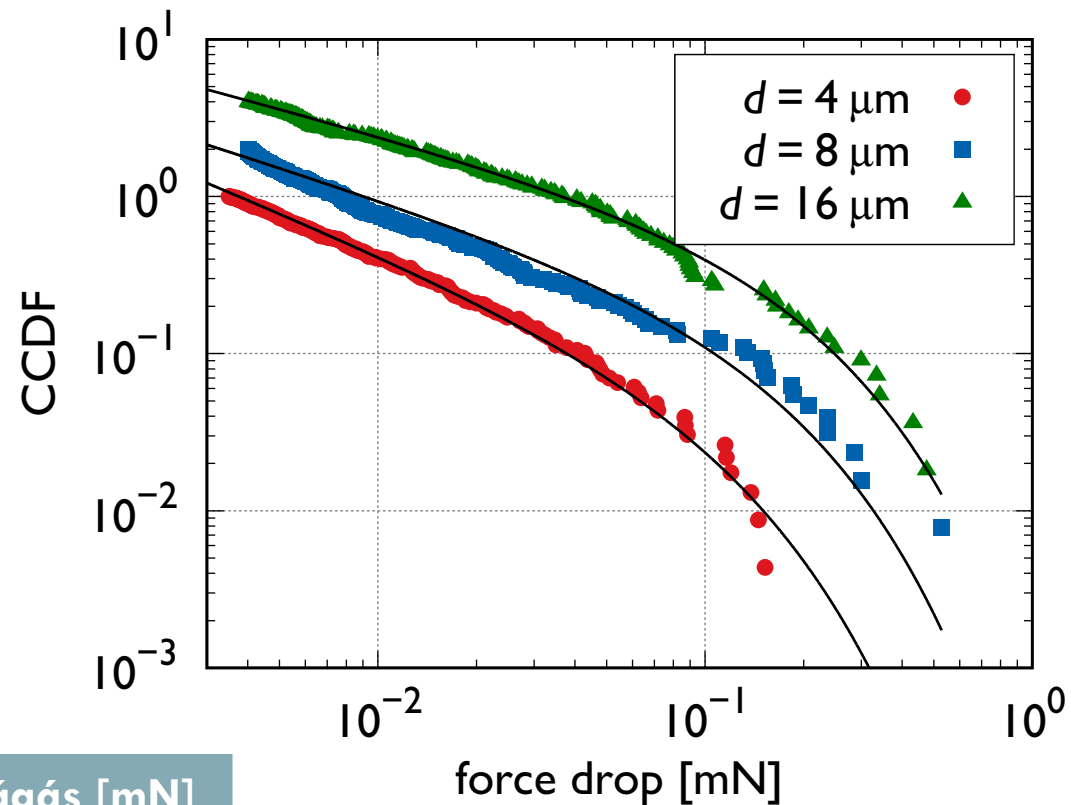


10.00 kV 8.00 nA 4 997 x ETD 10 µm ELTE TTK

- Korreláció a feszültségesések és az AE jelek között
- Számos AE esemény egy feszültségesés alatt
- Nincsenek AE jelek a rugalmas szakaszokban

# A feszültségesegek statisztikája

- Skálafüggetlen eloszlások
  - Az átmérővel enyhén csökkenő exponensek
  - Az átmérővel enyhén növekvő levágások



Átmérő [ $\mu\text{m}$ ]	Exponens	Levágás [mN]
4	1,85	0,1
8	1,65	0,15
16	1,55	0,17

# AE események

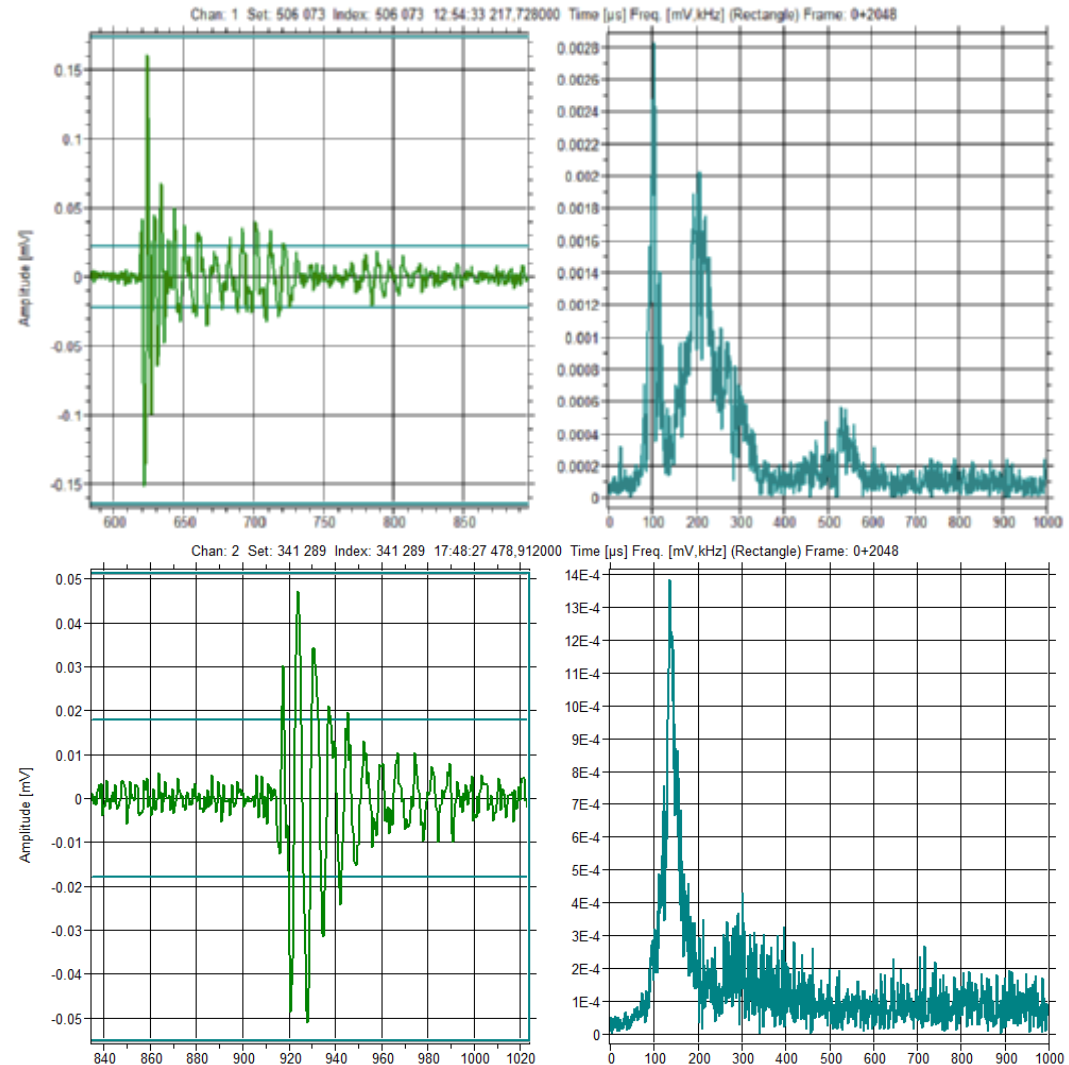
- A detektálható események spektruma azonos
  - Csak egyféle deformációs mechanizmus
  - A jelalak függ a detektortól

A szenzor

B szenzor

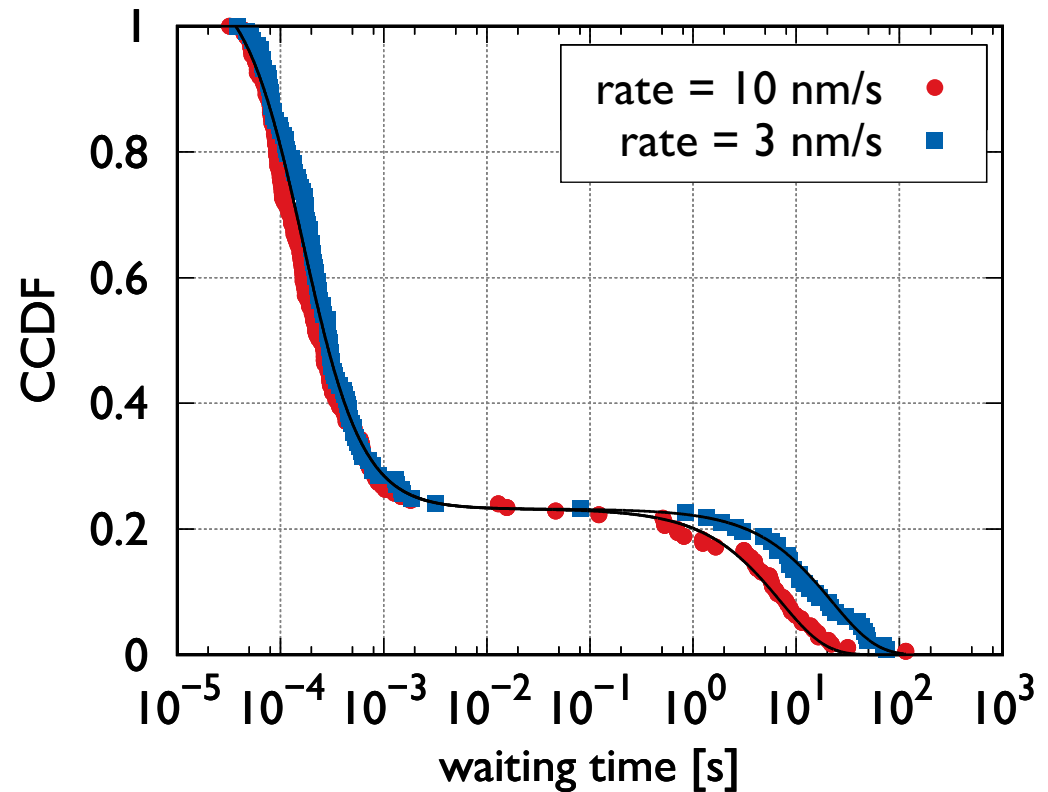
## Jelalak

## Spektrum



# Várakozási idők eloszlása

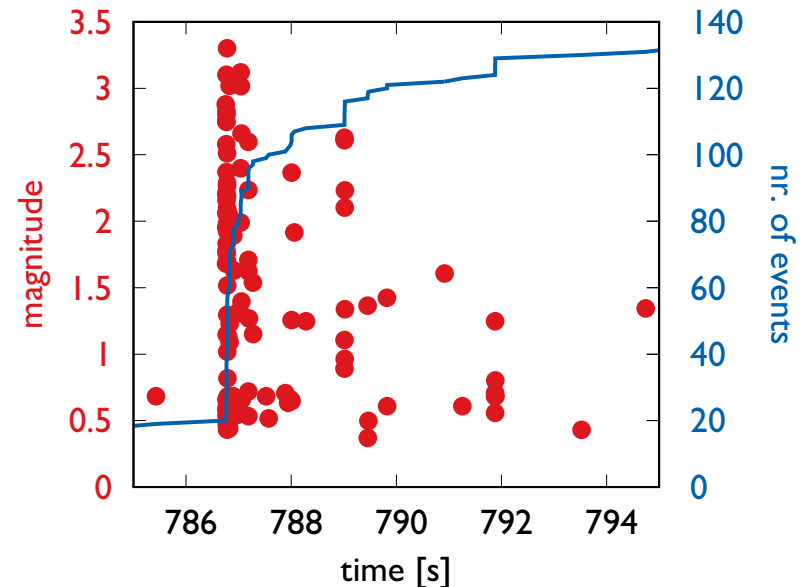
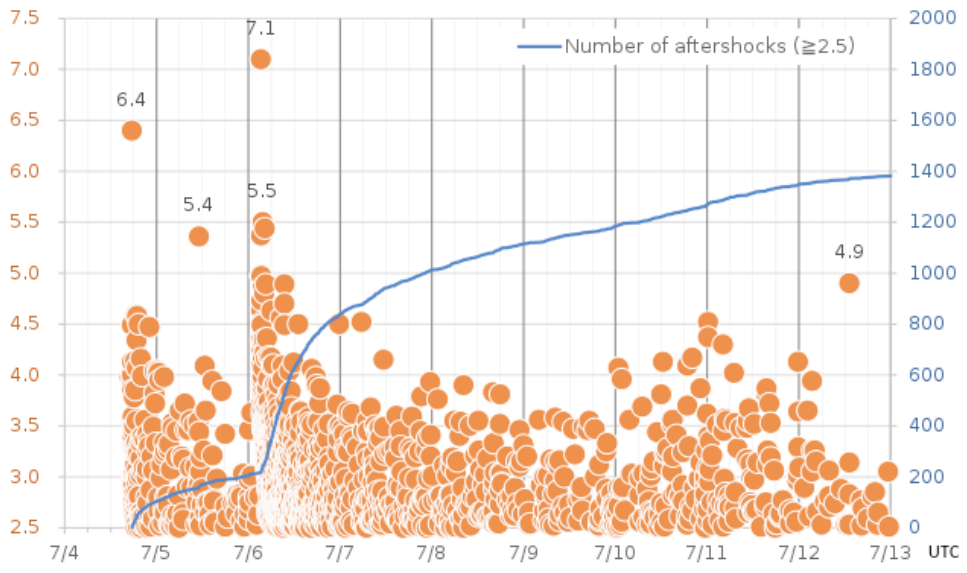
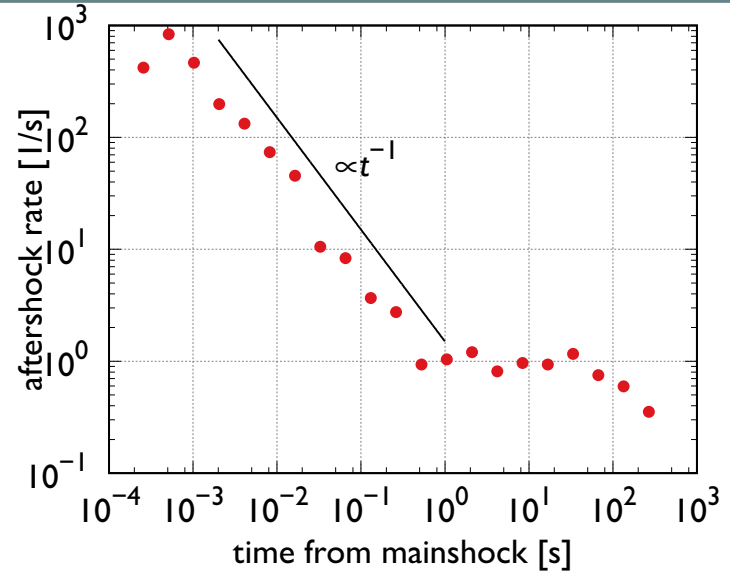
- Bi-modális eloszlás
  - Gyors jelek: ugyanabból az eseményből
  - Lassú jelek: egymást követő eseményekből
- A lavinák időskálája:  
**~1 ms**
- Közeli jelek:
  - Skála-független eloszlás
  - Független a deformációs rátától
  - Exponens  $\sim 1,5$
- Távoli jelek
  - Exponenciális levágás
  - Független a deformációs rátától
  - Poisson-szerű



$$f(t) = \left( \frac{1 - a}{1 + b t^p} + a \right) e^{-t/t_0}$$

# Utórengések

- Egy nagy magnitúdójú jel után számos „utórengés”
- Legnagyobb jel esetén kb. 120 utórengés
- Omori tv. is teljesül



# Földrengések vs. diszlokációlavinák

	<b>Földrengések</b>	<b>Diszlokációlavinák</b>
Mechanizmus	Repedés	Diszlokációmozgás
Kiterjedés	Síkban	Síkban
Tipikus méret	km	$\mu\text{m}$
Tipikus idő	perc-hónap	ms-s
Méreteloszlás	Gutenberg-Richter	Gutenberg-Richter
Utórengések	Omori-tv.	Omori-tv.

# Összefoglalás

- Zn mikrooszlopok in situ összenyomása
  - Deformáció diszlokációmozgással
  - Méreteffektusok
  - Lavina-szerű deformáció
- A lavinák során feszültségeseések és AE jelek
- Kvalitatív egyezés a földrengésekkel
  - Síkbeli terjedés
  - Skálafüggetlen méreteloszlás
  - Utóregések csökkenő rátával

