



Földrengések Zn egykristály mikroszlopokban

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



EMPA Thun, Svájc Laboratory for Mechanics of Materials & Nanostructures

Kalácska Szilvia

Károly Egyetem Prága, Dept. of Materials Physics

Michal Knapek, Máthis Krisztián,
Frantisek Chmelík



Földrengések Zn egykristály mikrooszlopokban

Földrengések

Egykristályok deformációja

Mikrooszlopok deformációja

Mikrooszlopok készítése

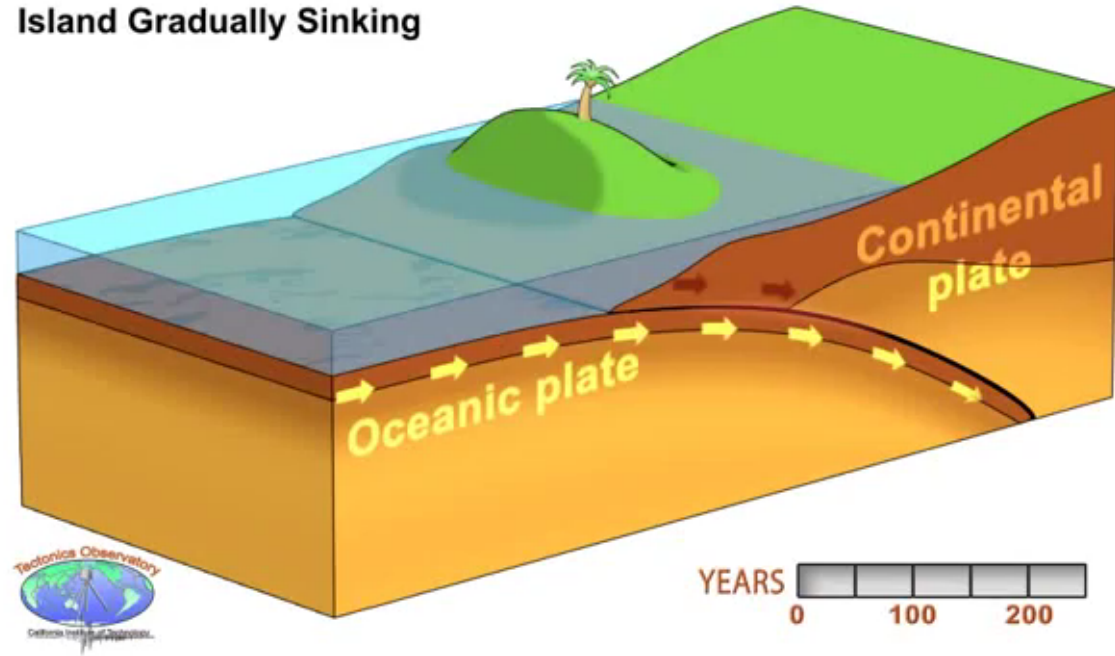
Akusztikus emisszió

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

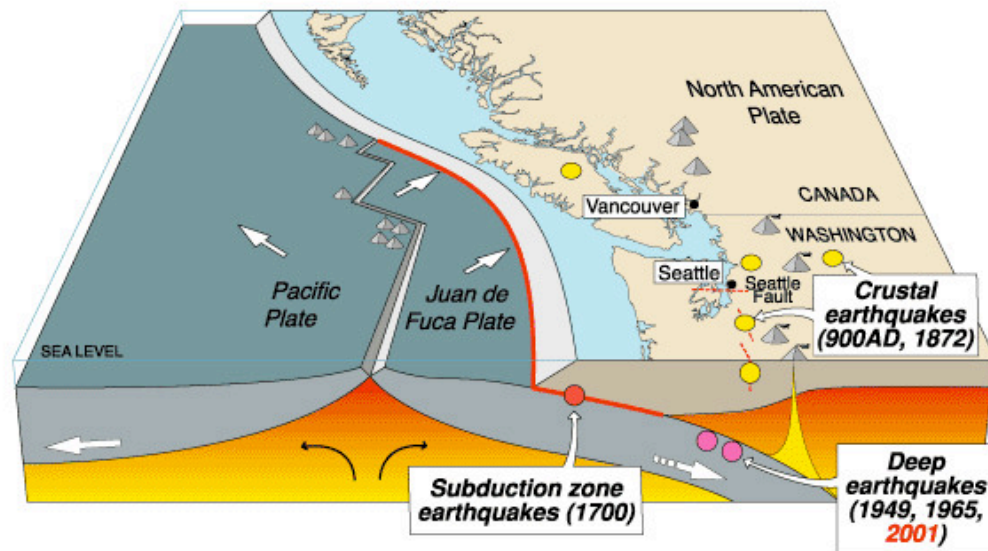
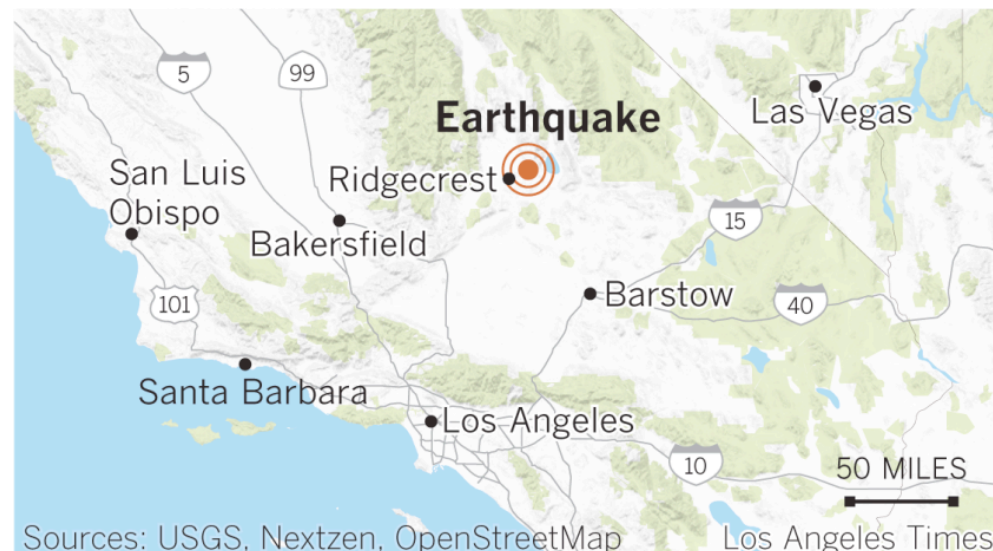
- Amíg felhalmozódik a rugalmas energia, addig nincs maradandó alakváltozás

Maradandó alakváltozás

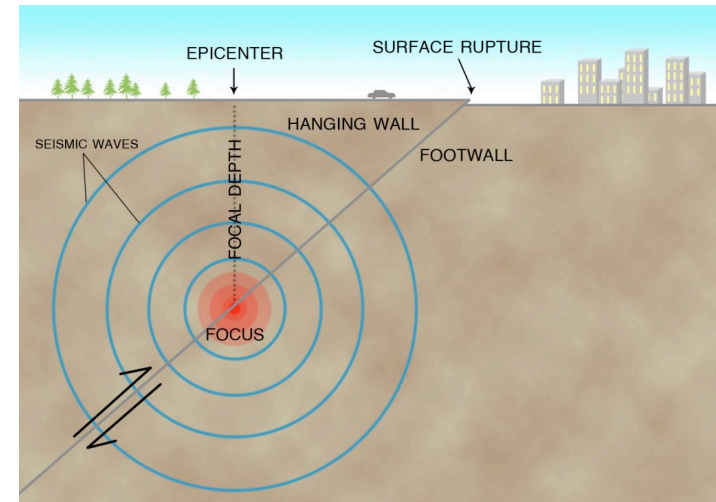
- A maradandó alakváltozás hatására szabadul fel a tárolt energia

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

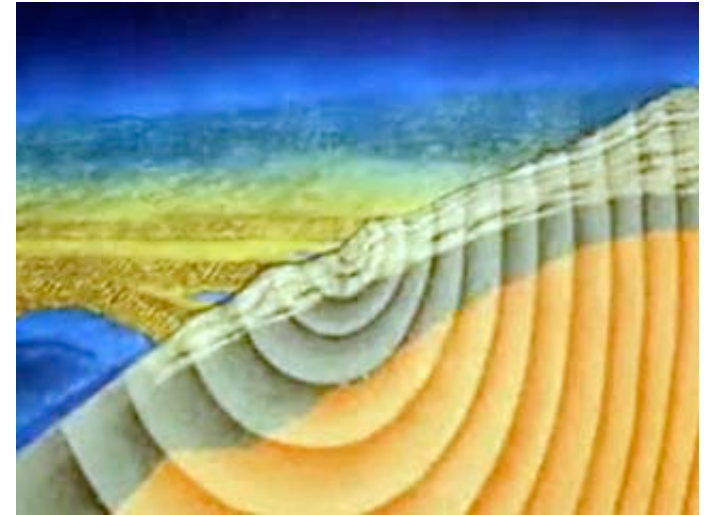


A földrengés hatásai: maradandó alakváltozás



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

EARTHQUAKE MAGNITUDE

Magnitude

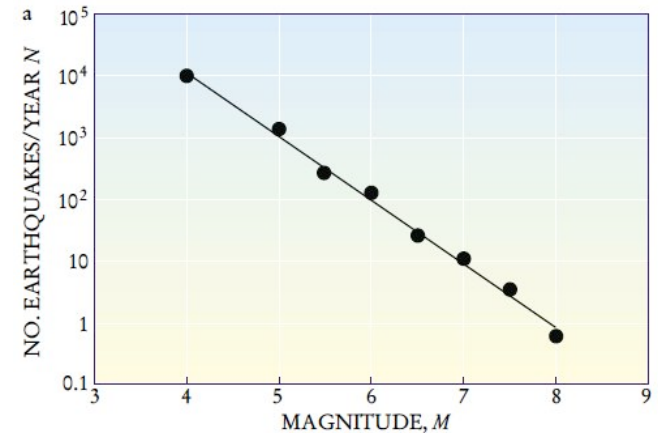
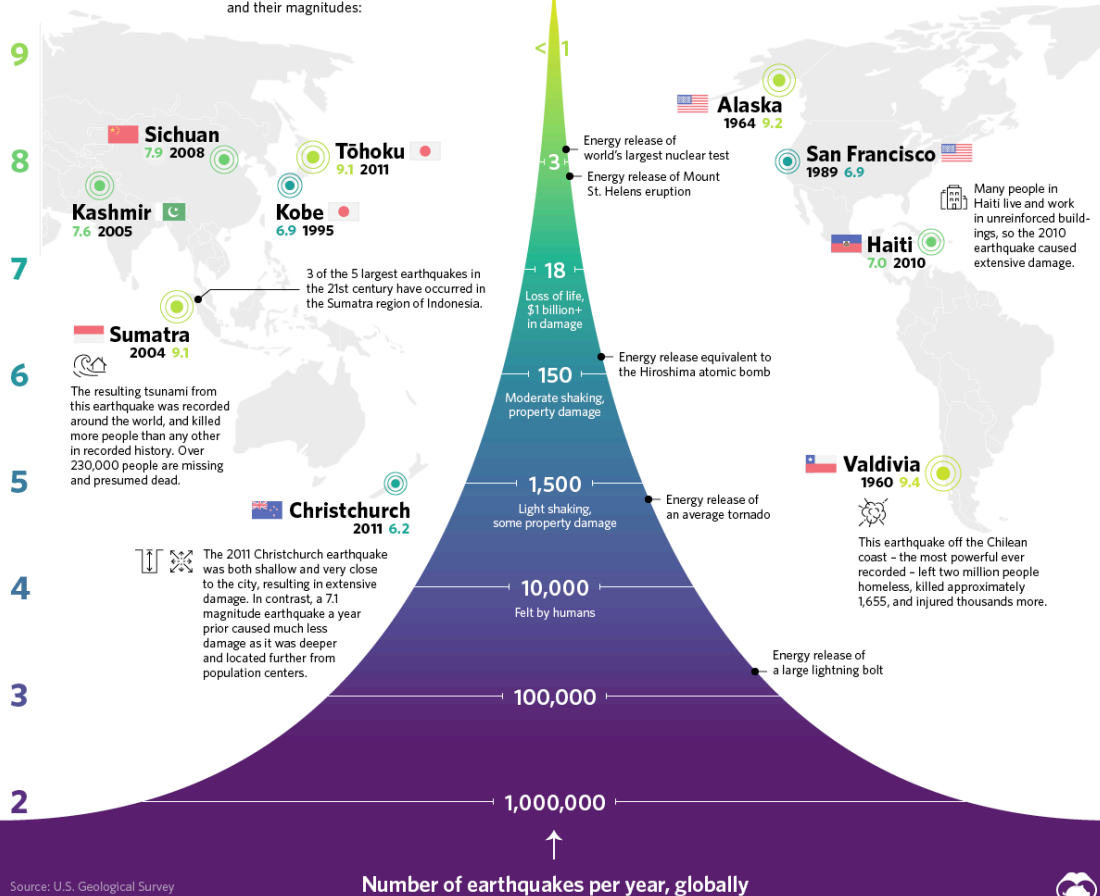
Seismic Wave Energy

10

Magnitude is a number that characterizes the relative size of an earthquake. Each whole number increase represents a tenfold increase in the measured amplitude, and **32 times more energy release**.

Examples of major earthquakes and their magnitudes:

Here are some factors that determine how destructive an earthquake can be:

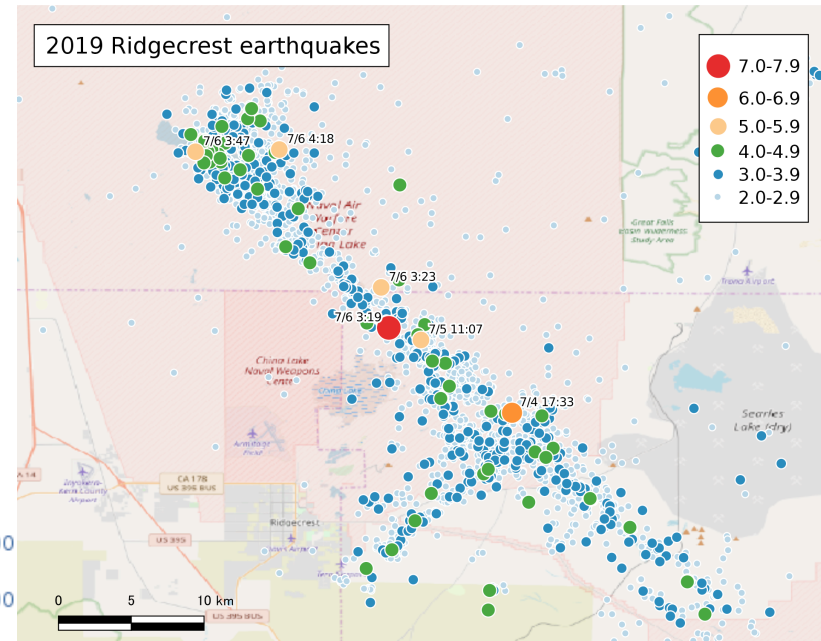
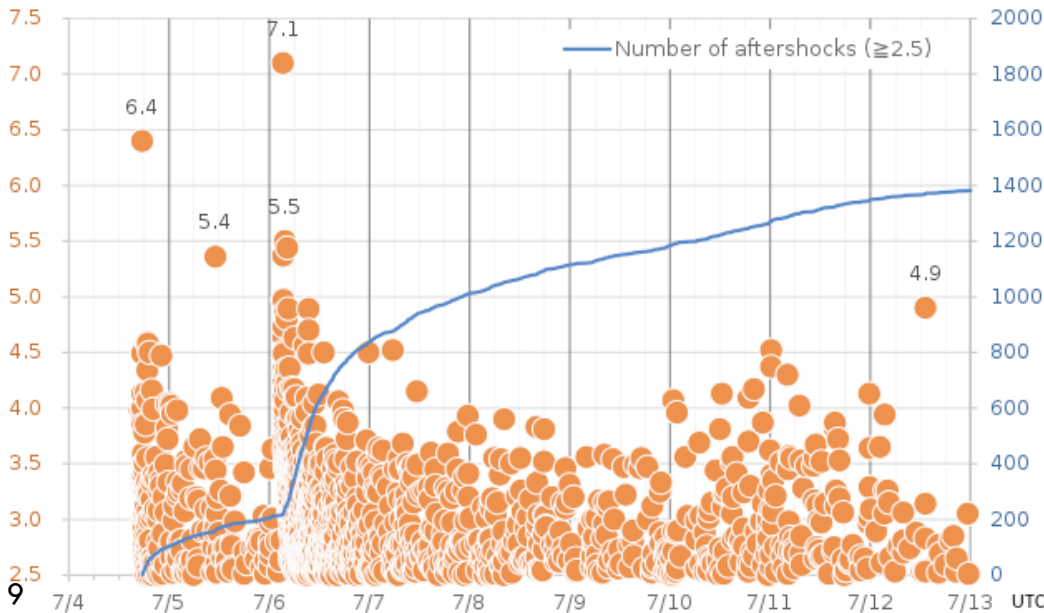


Gutenberg-Richter-tv:

- $N_{>M} = 10^{a-bM}$
- M: magnitúdó
- $b = 1,0$: exponens
- Skálafüggetlen eloszlás

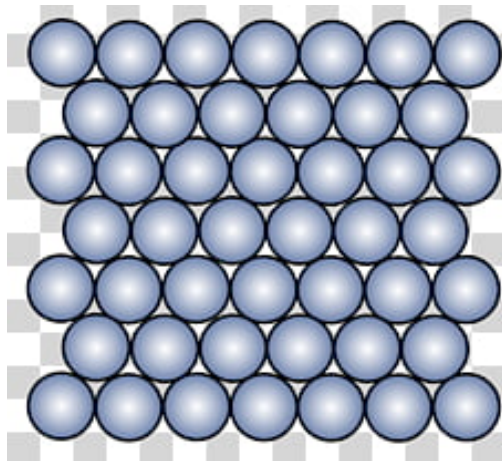
Utó rengések

- 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



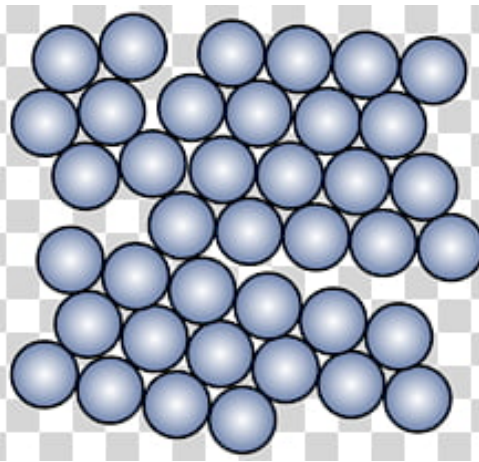
- Utó rengések rátája $n(t)$
 - n : egységnyi idő alatti utó rengések száma
 - t : főrengés óta eltelt idő
- Omori-törvény: $n(t) \sim 1/t$

Egykristály



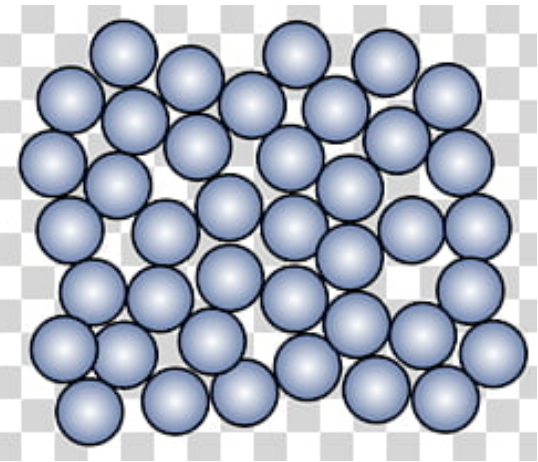
Egykristály

- Puha
- Képlékeny
- Deformáció függ az orientációtól



Polikristály

- Keményebb
- Kevésbé képlékeny
- Irányfüggetlen deformáció



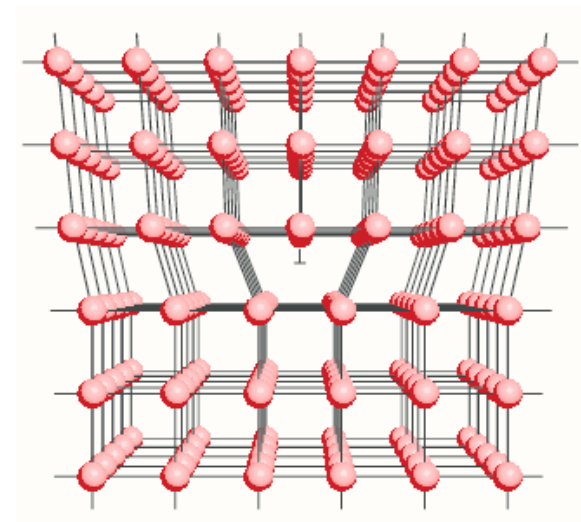
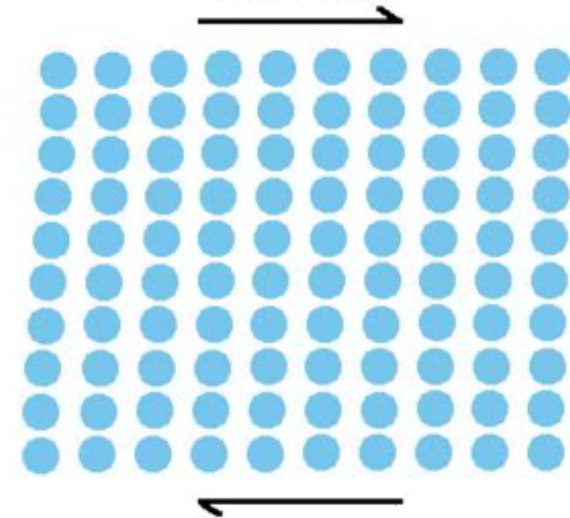
Amorf/fémüveg

- Nagyon kemény
- Rideg
- Irányfüggetlen deformáció

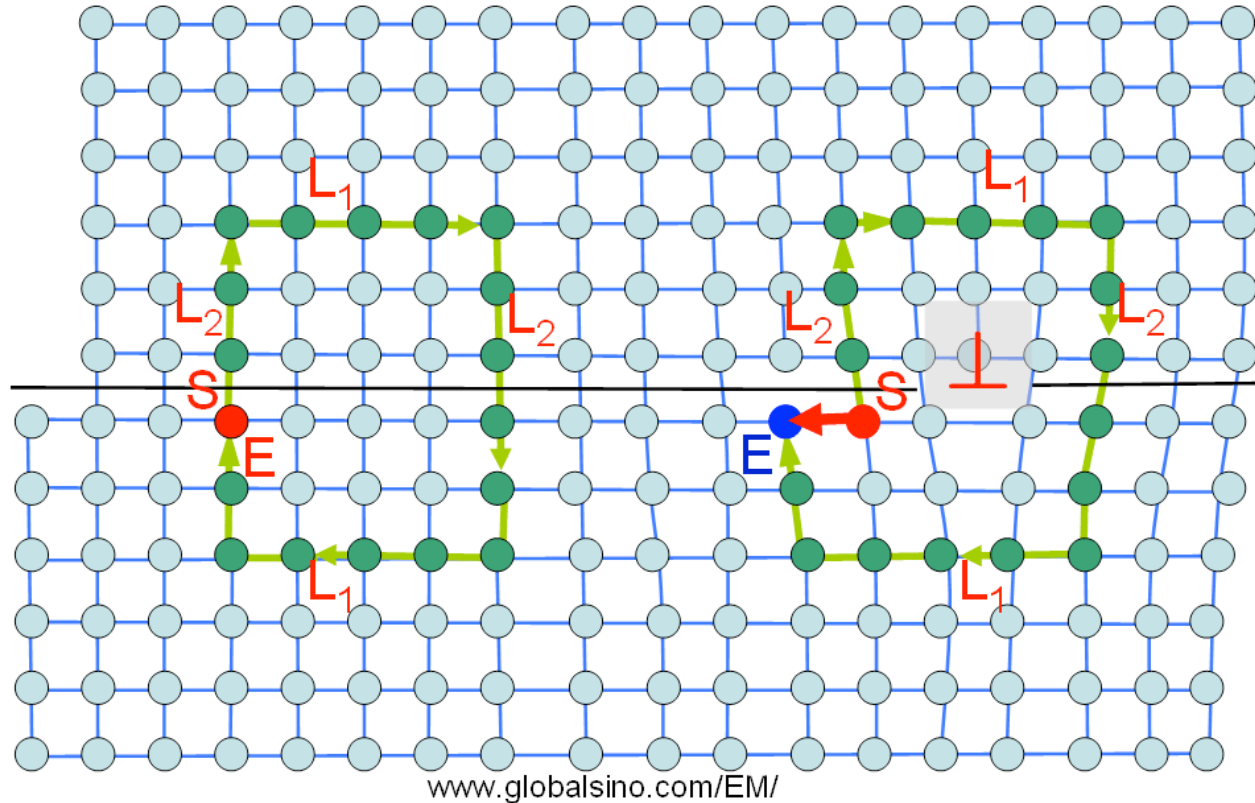
Diszlokáció fogalma

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



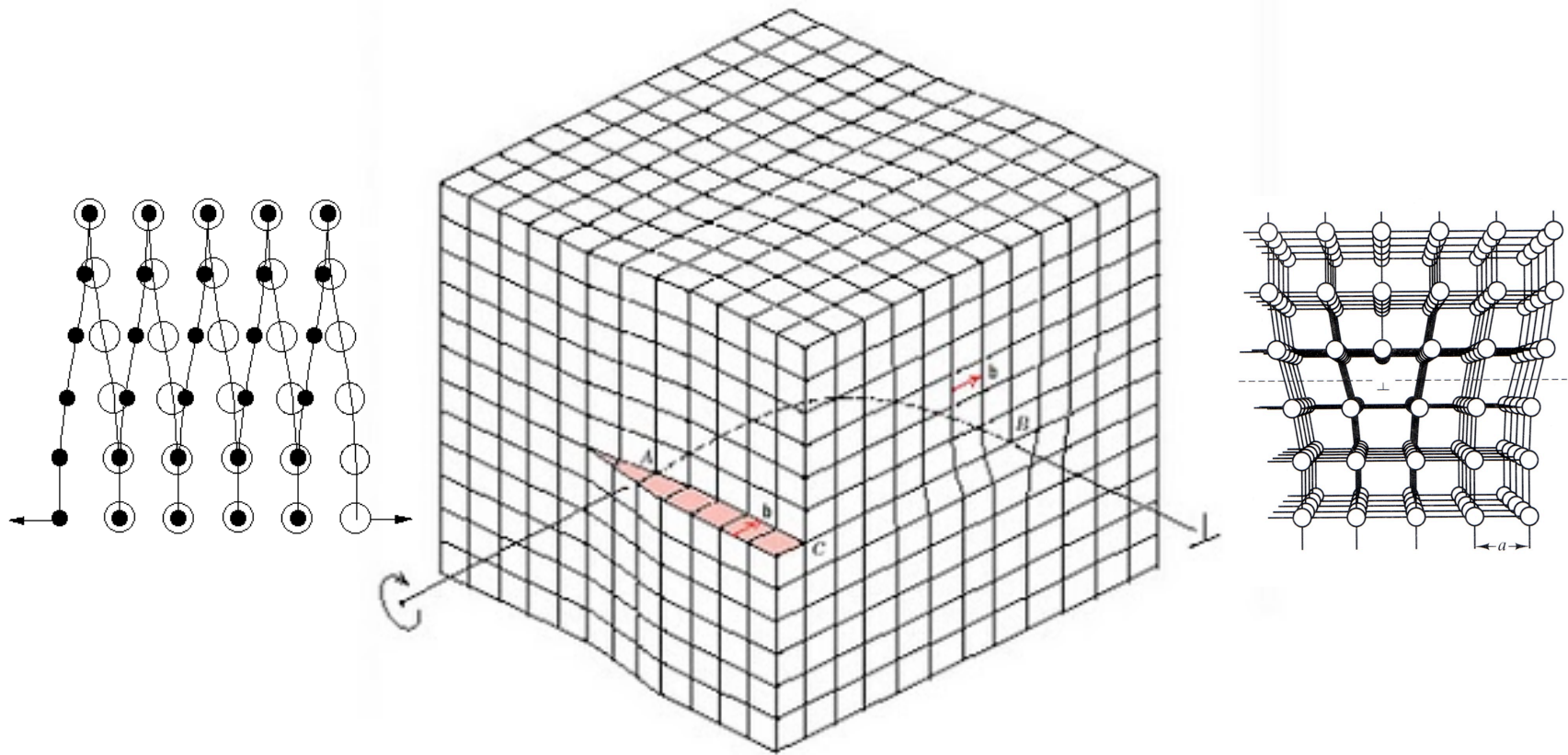
A Burgers-vektor



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

A Burgers vektor nem tűnik el az anyagban

Csavar- és éldiszlokáció fogalma



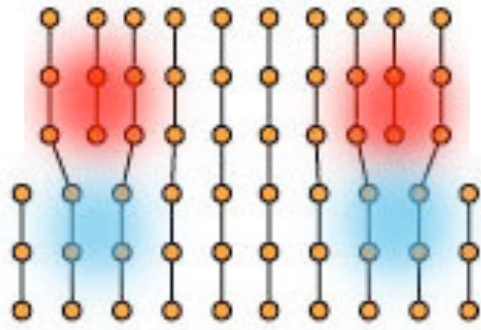
Csavardiszlokáció: $\mathbf{b} \parallel \mathbf{l}$

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

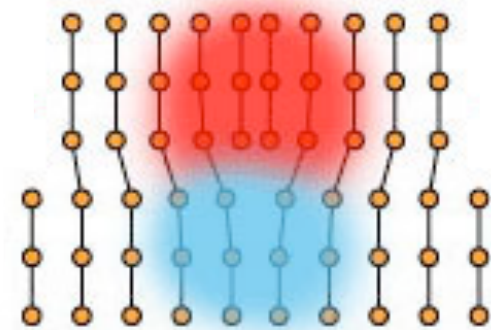
Diszlokációk kölcsönhatása

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



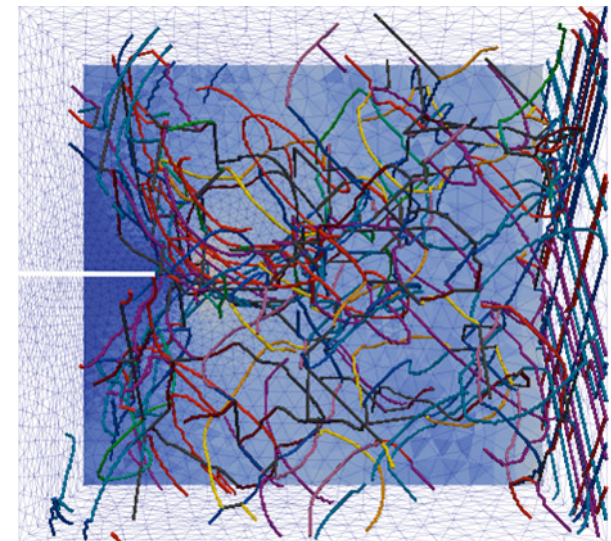
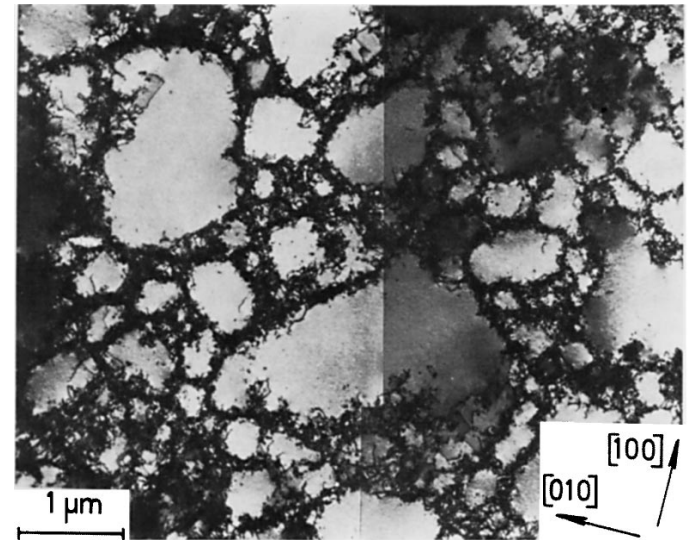
$$2 \times b$$
$$E \sim 2b^2$$



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

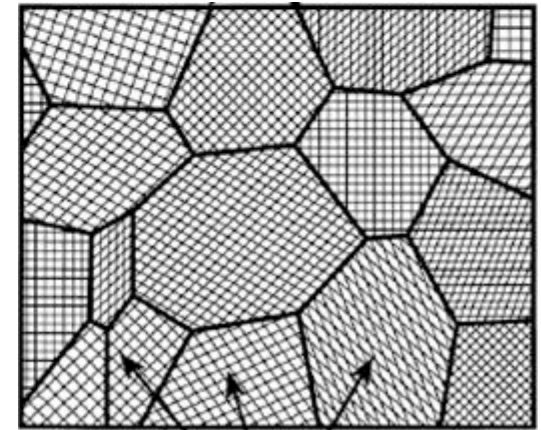
Diszlokáció mintázatok

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

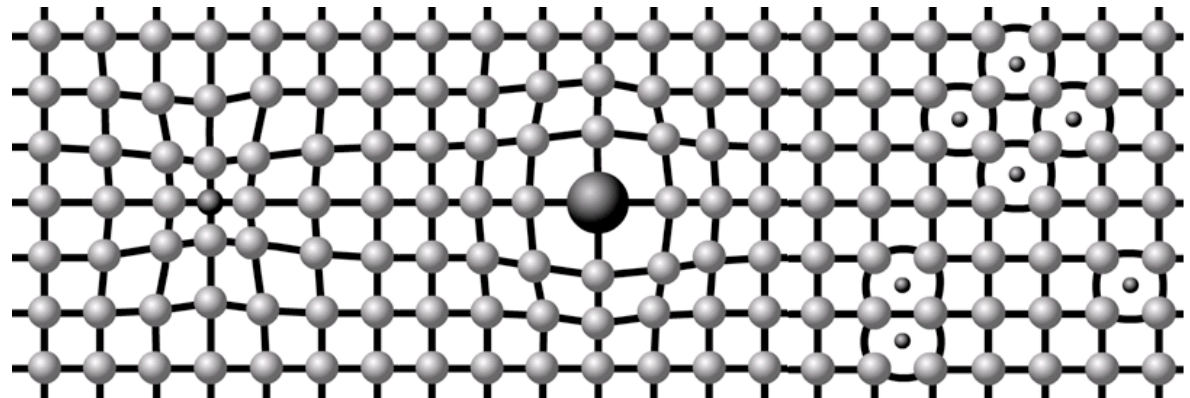
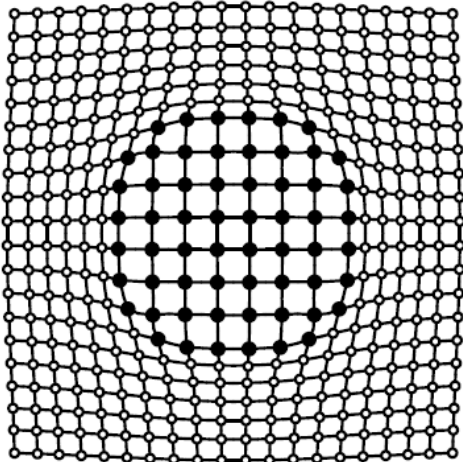


Kapcsolat a mechanikai tulajdonságokkal

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

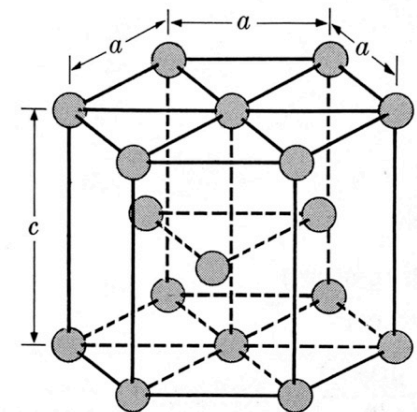
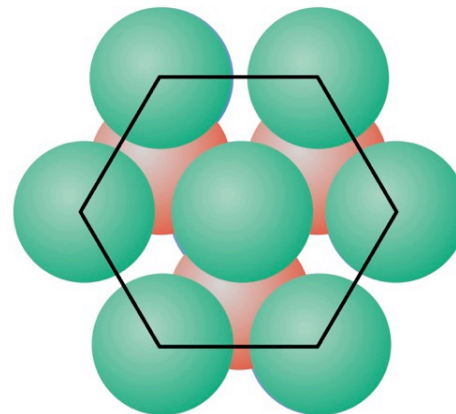
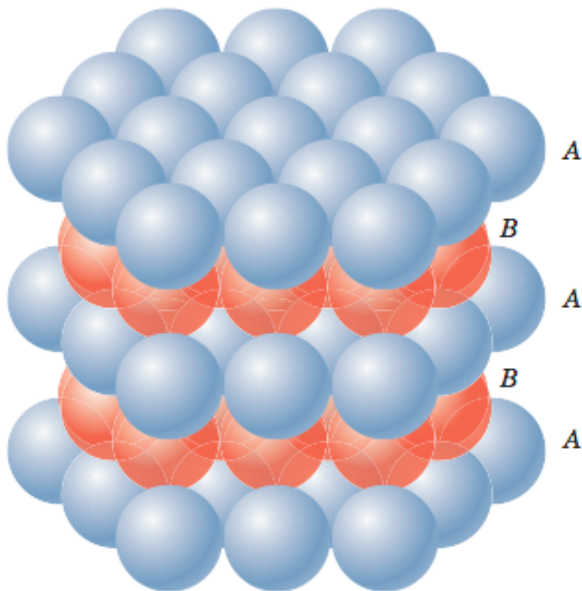
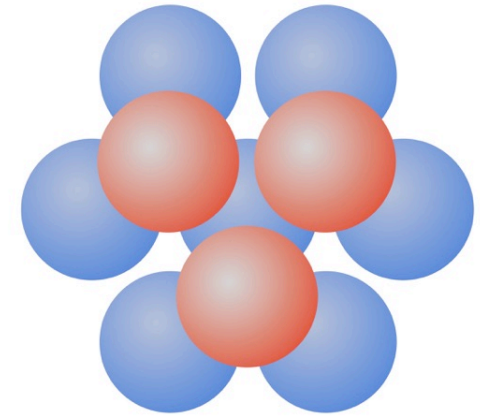
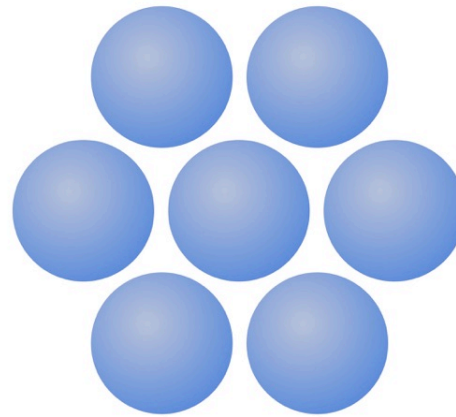


Szemcsék

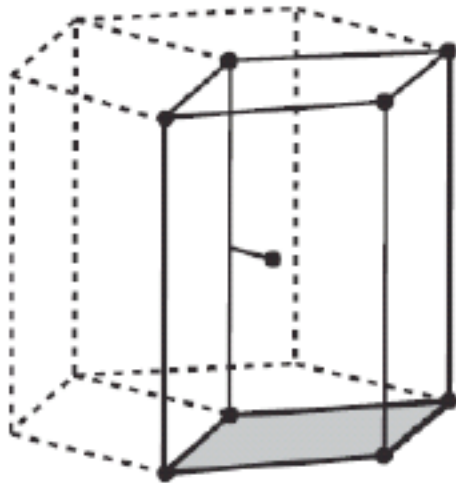


HCP kristályszerkezet

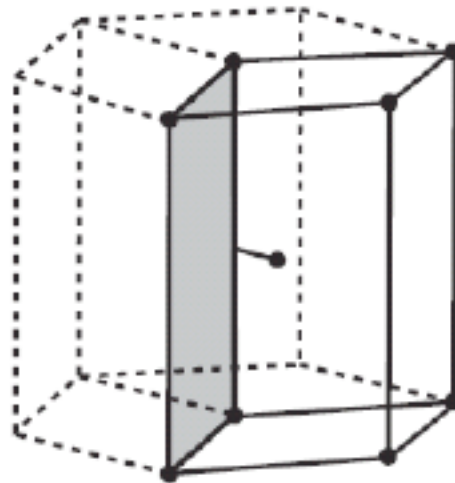
- Hatszöges szoros pakolású – hexagonal close packed
- Mg, Ti, Co, Zn, Zr



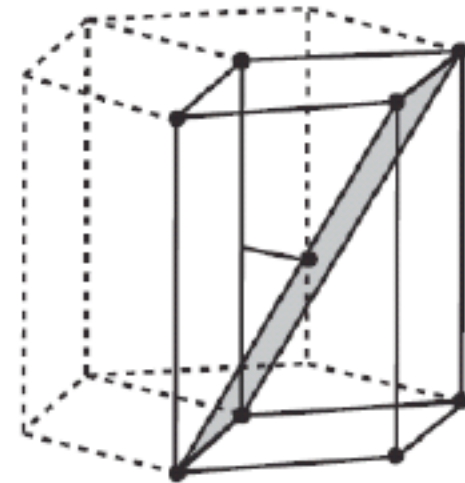
Csúszási síkok hcp anyagban



Basal



Prismatic



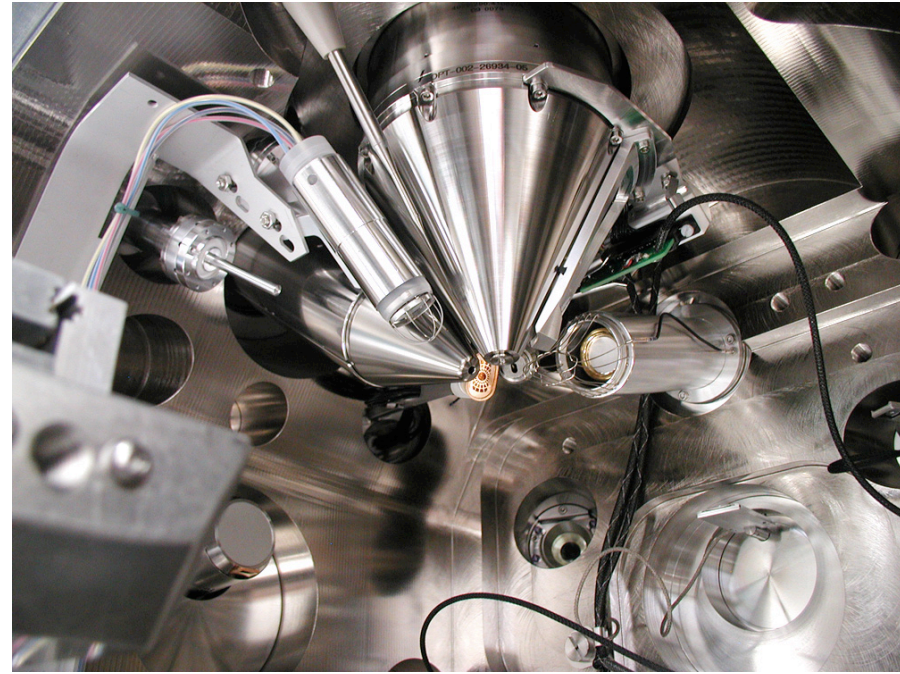
Pyramidal

- A diszlokációk legkönnyebben a bazális síkon keletkeznek és mozognak

Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)



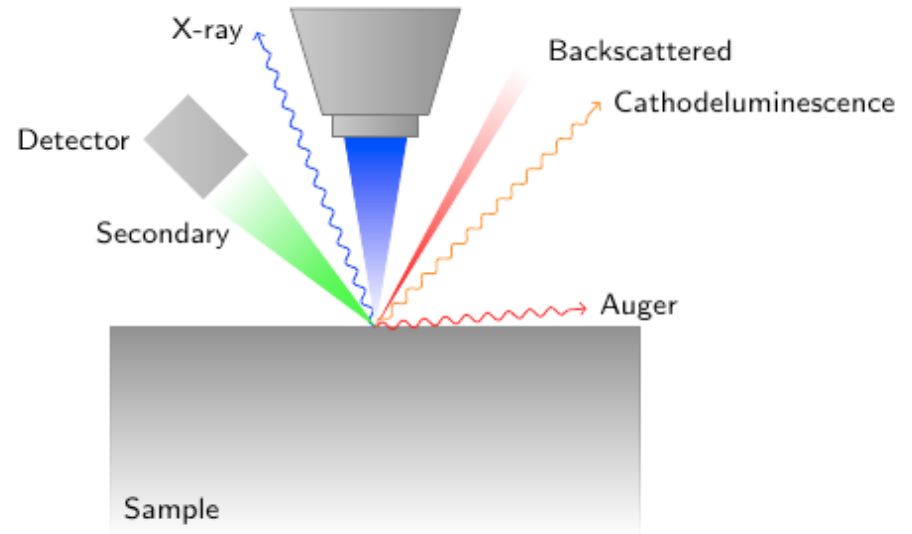
SEM labor az ELTE TTK-n



A mikroszkóp belülről

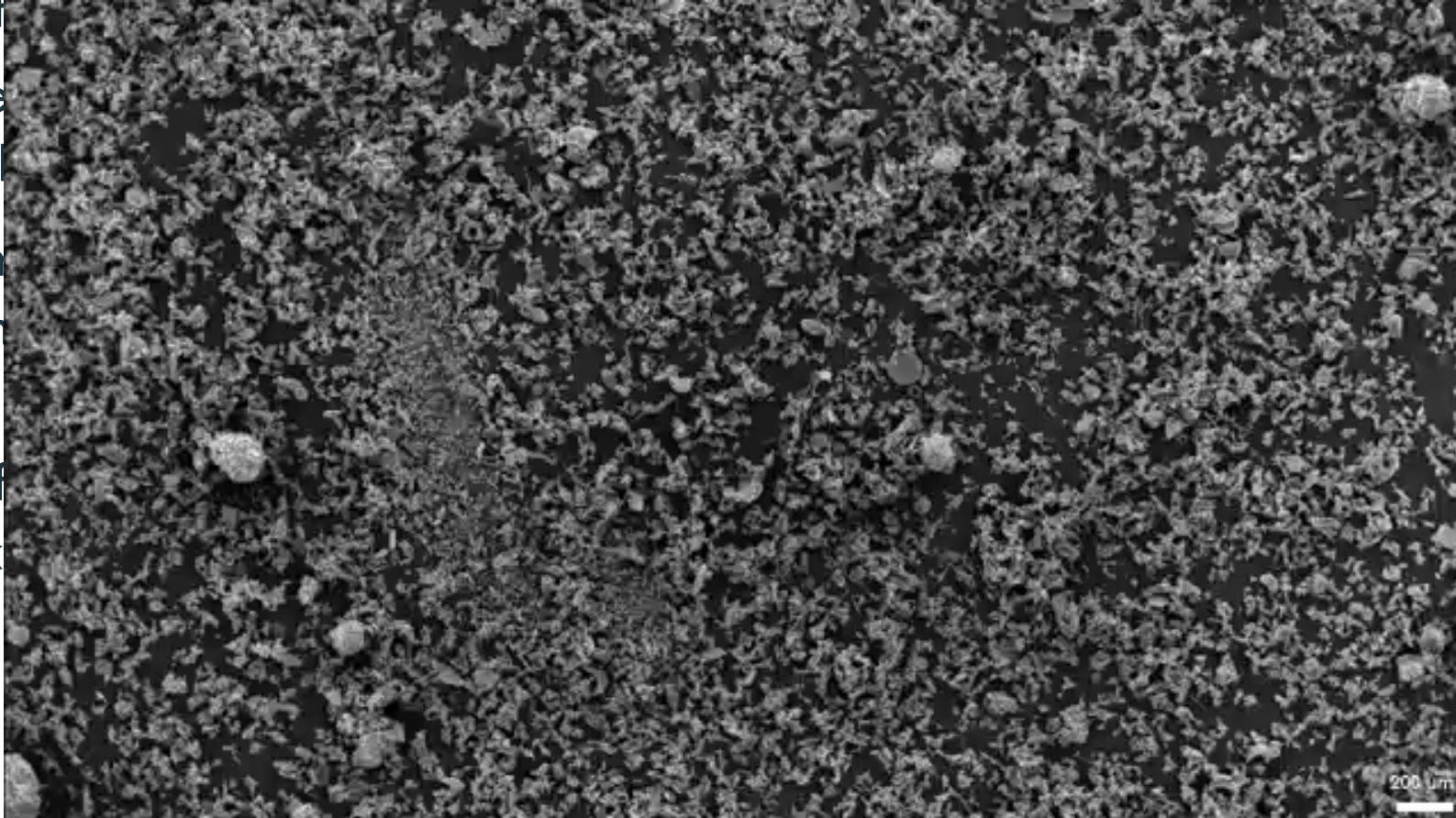
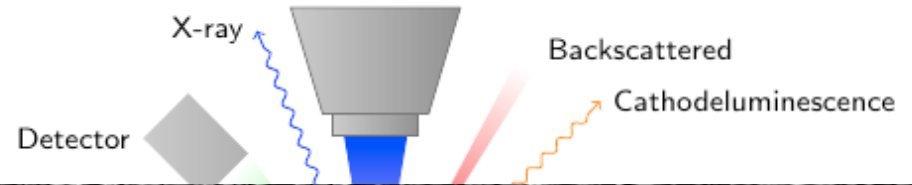
SEM működése

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



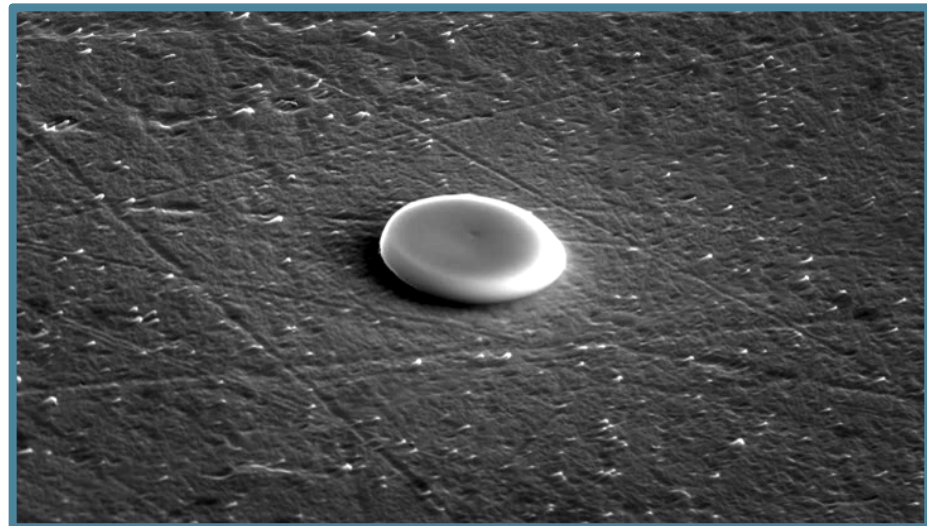
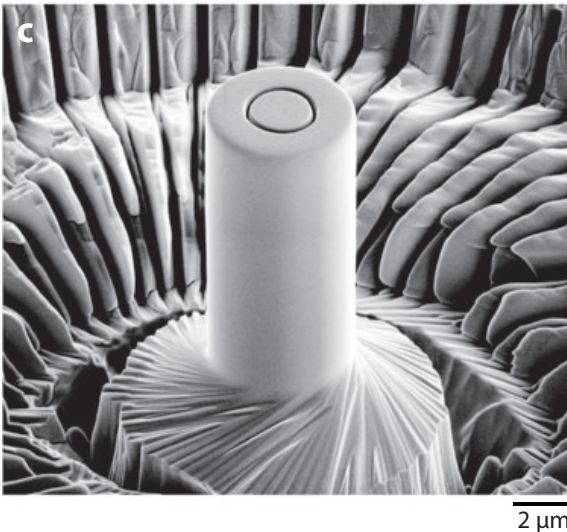
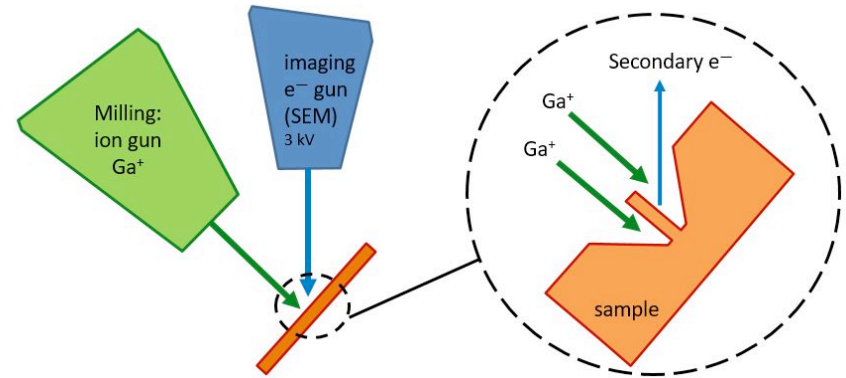
SEM működése

- Fókuszált elektronsugár egy pontban gerjeszti a minta felületét
- Az elektronok a minta felületén dolgoznak fel
- Maximális felbontás: 10 nm
- Csak fekete-fehér képek



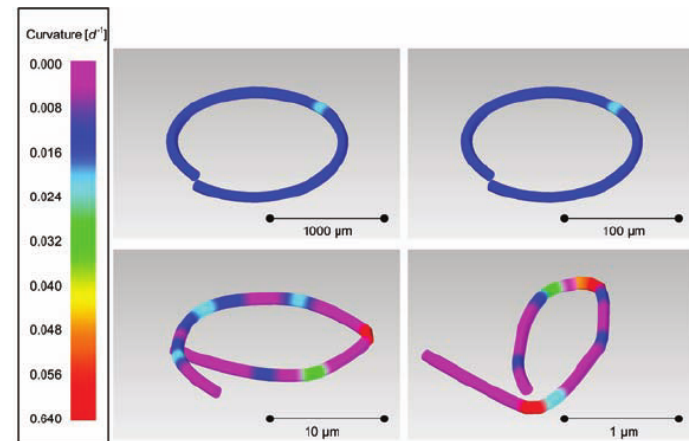
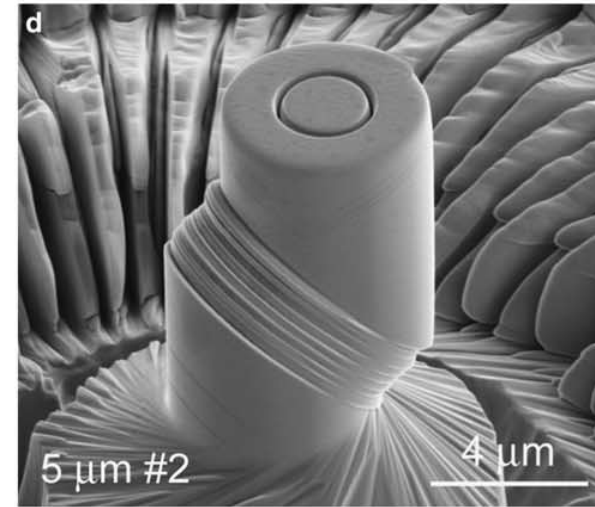
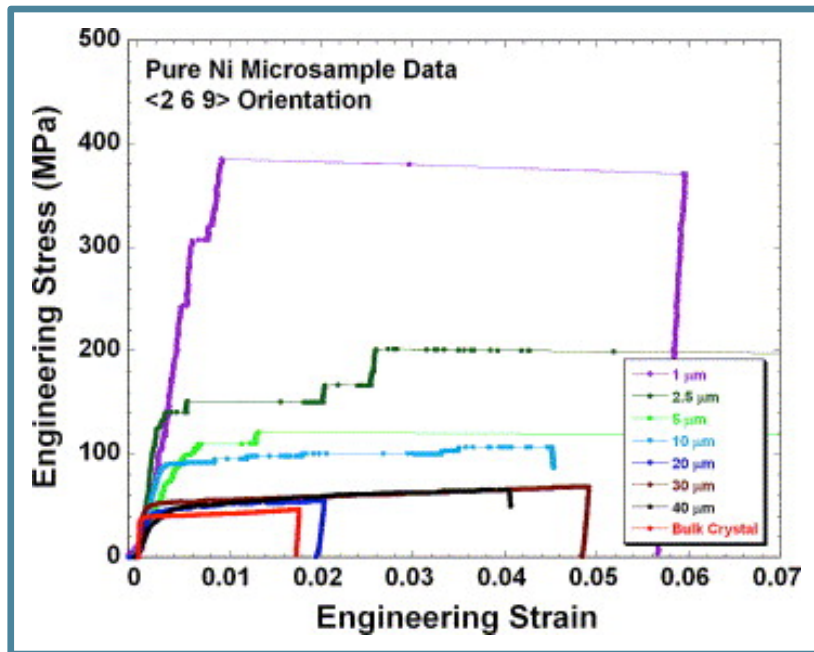
Mikrooszlop faragása

- 20keV-es fókuszált 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

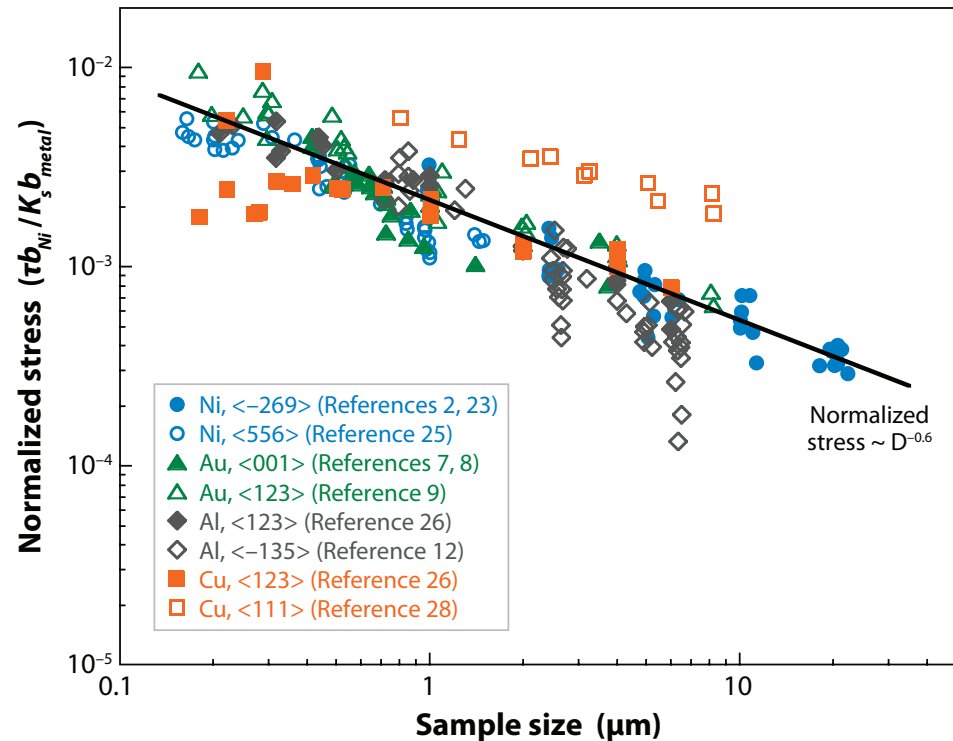


Méreteffektusok

- Csökkenő mérettel növekvő keménység:

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

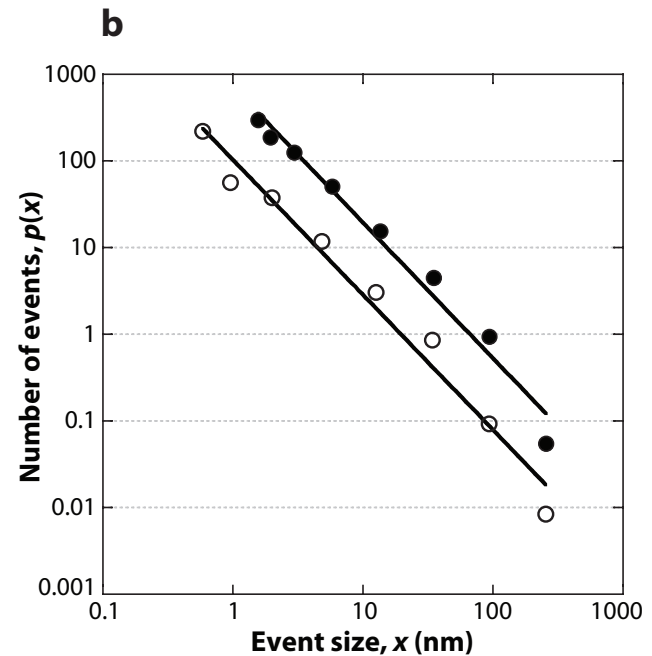
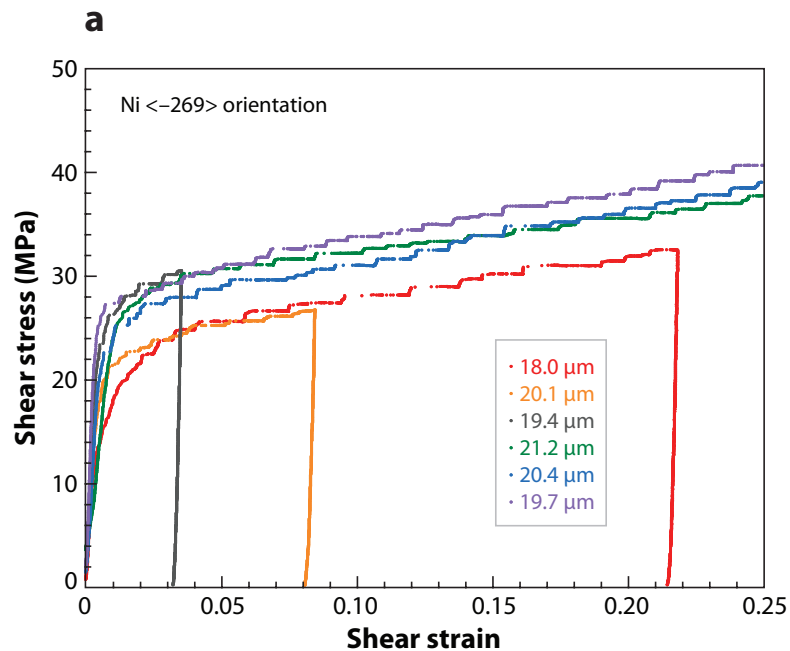
- d : átmérő
- τ_0 : tömbi folyásfesz.
- $n \approx 0,6$
- Normálás a Burgers vektorral ill. a nyírási modulusszal \rightarrow univerzális viselkedés



Deformációs/diszlokáció lavinák

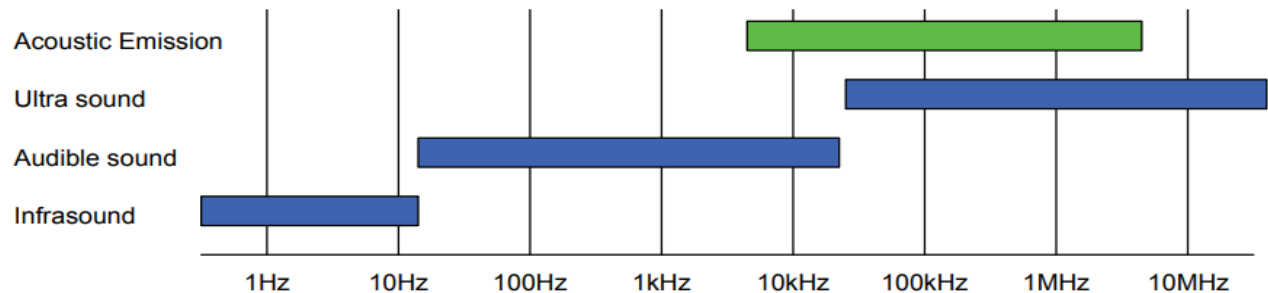
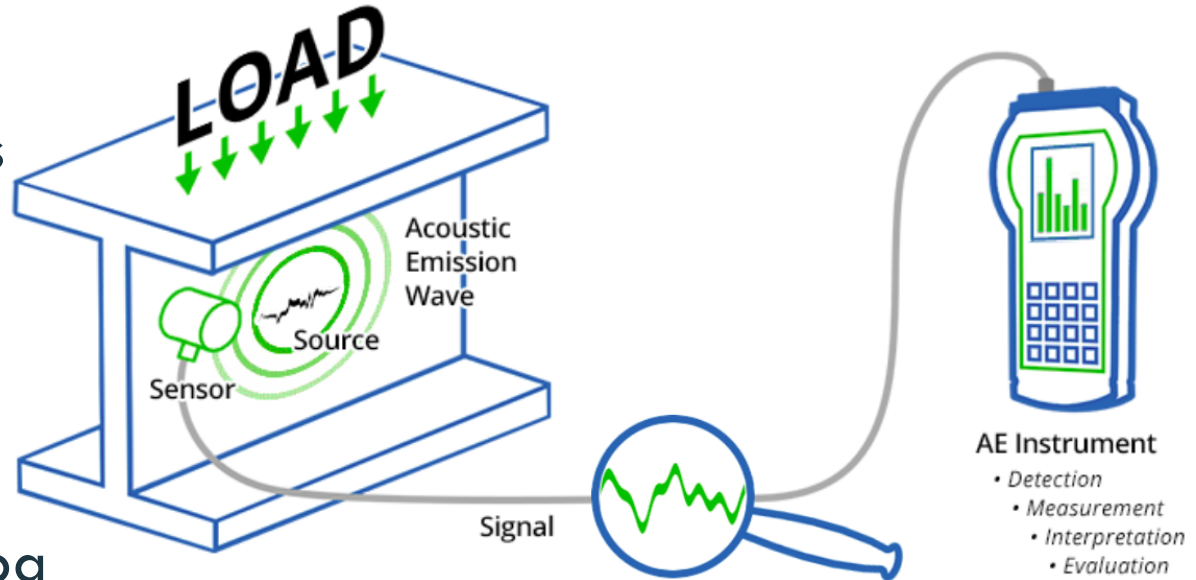
- Véletlen diszlokáció lavinák

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



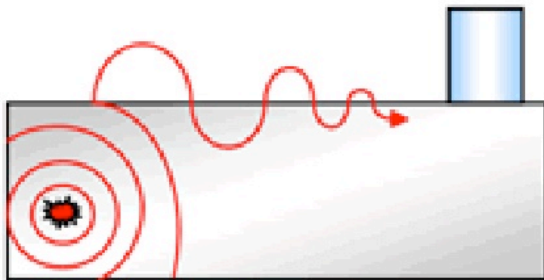
Akusztikus emisszió

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



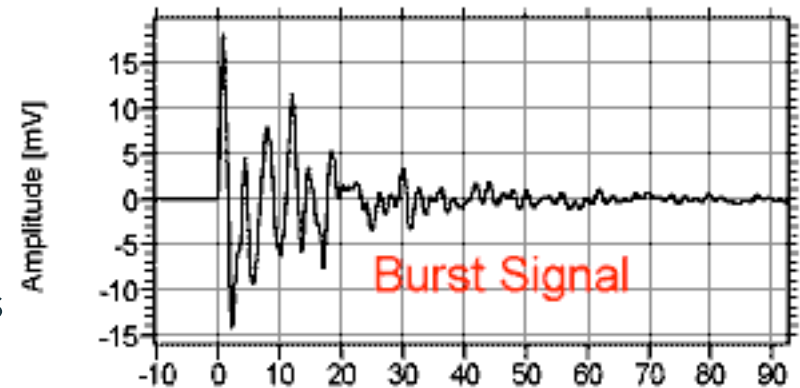
AE mérés

- 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

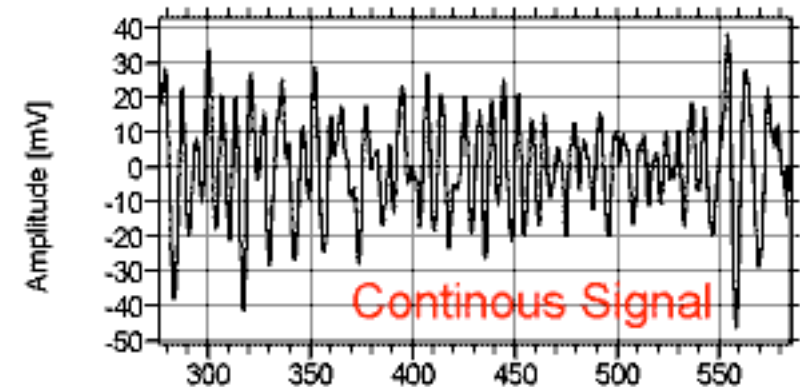


Acoustic Emission Signals

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



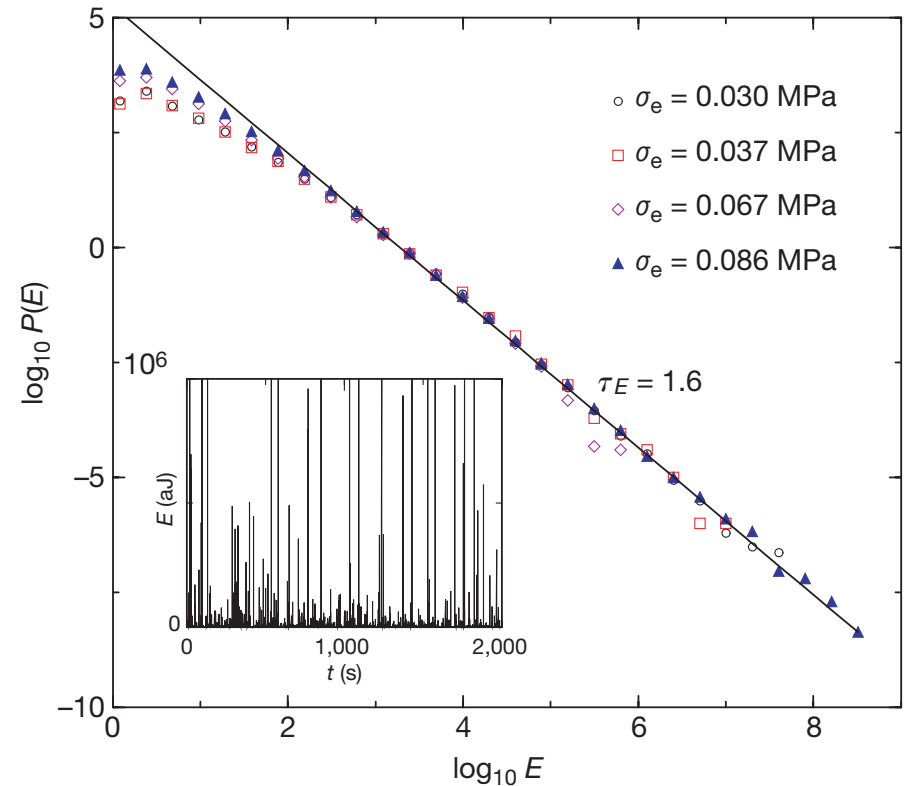
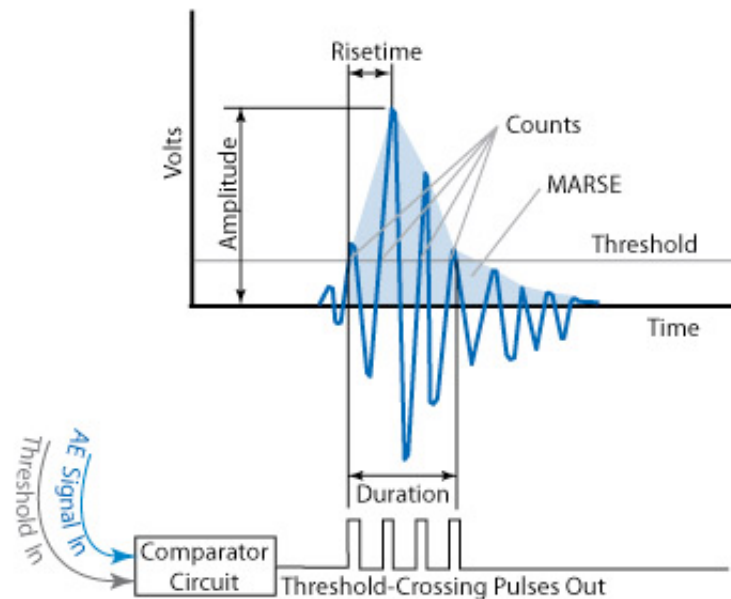
Chan: 4 Set: 2 Index: 21 8 14:27:41 700.6297 Time [μs]



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



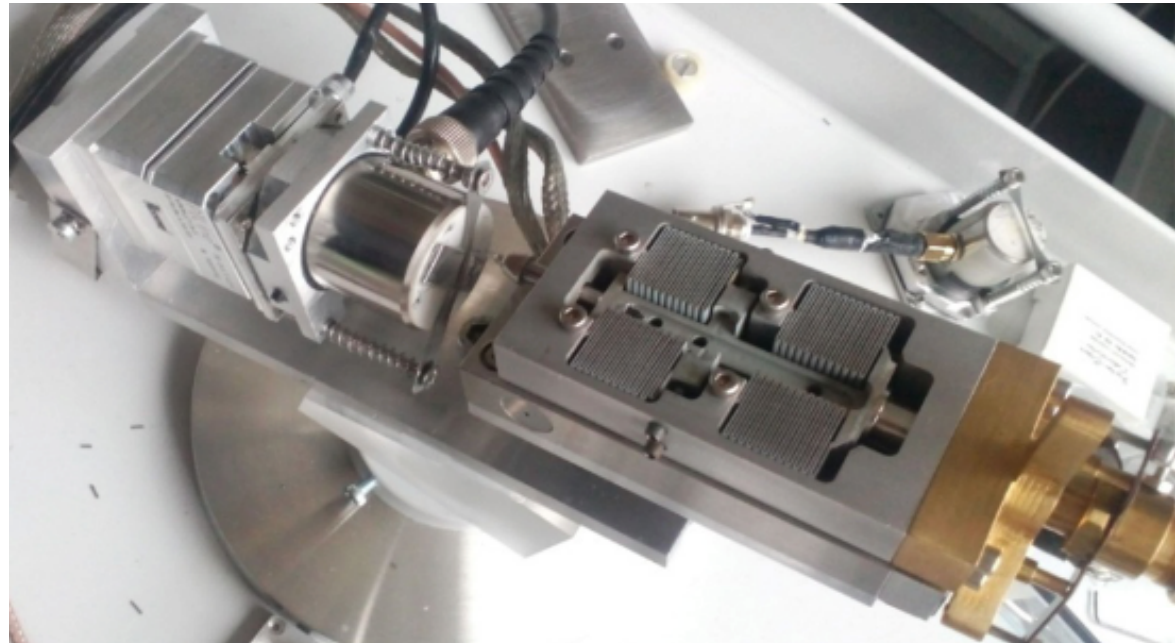
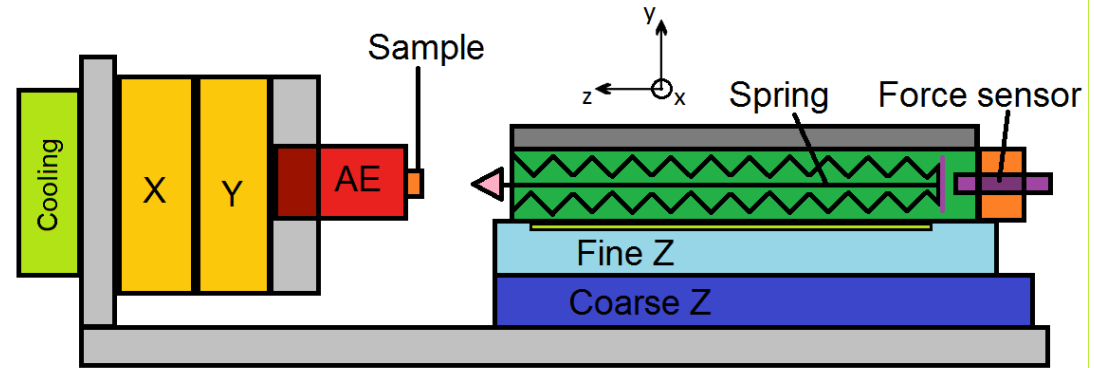
[Miguel *et al.*, Nature (2001)]

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

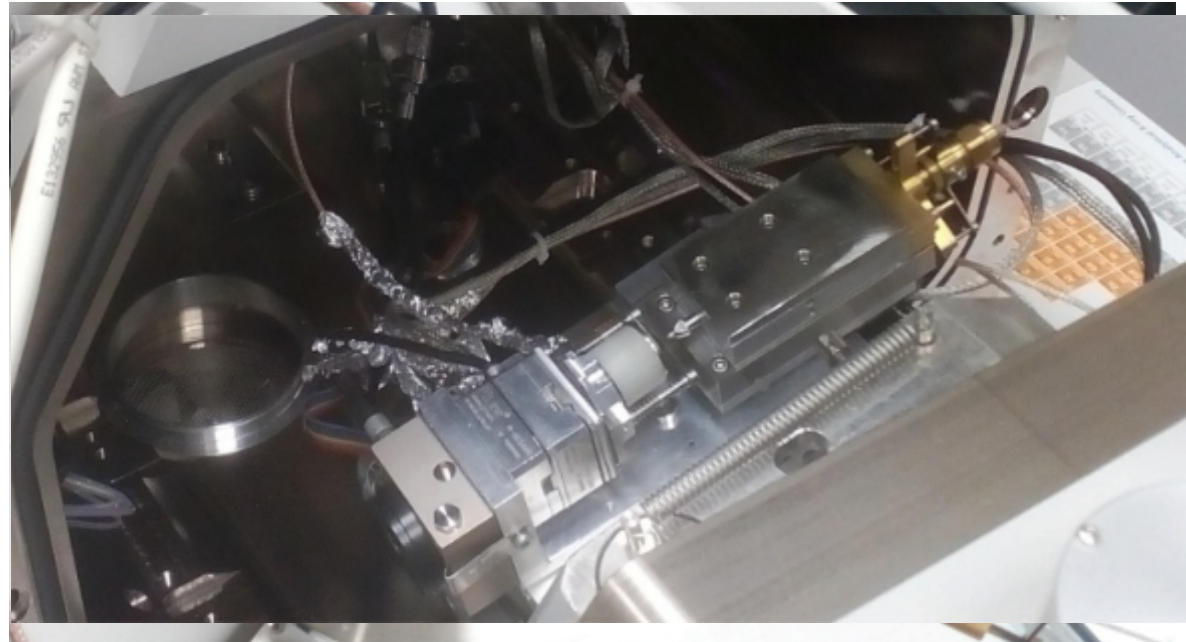
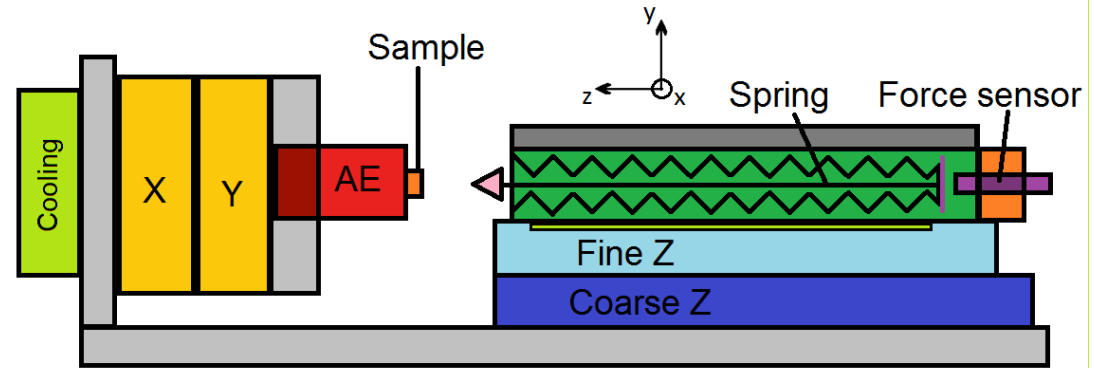
'Nanotest' in situ deformációs stage

- In situ deformáció a SEM vákuumkamrában
- Precízió
 - xy: 0.5 μm
 - z: 1 nm
 - erő: 1 μN
- Maximum 10 μm elmozdulás z irányban
- Változtatható rugóállandó (jelenleg 1 mN/ μm vagy 10 mN/ μm)
- Mintavétel: 200 Hz



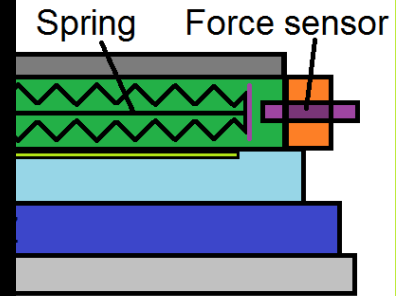
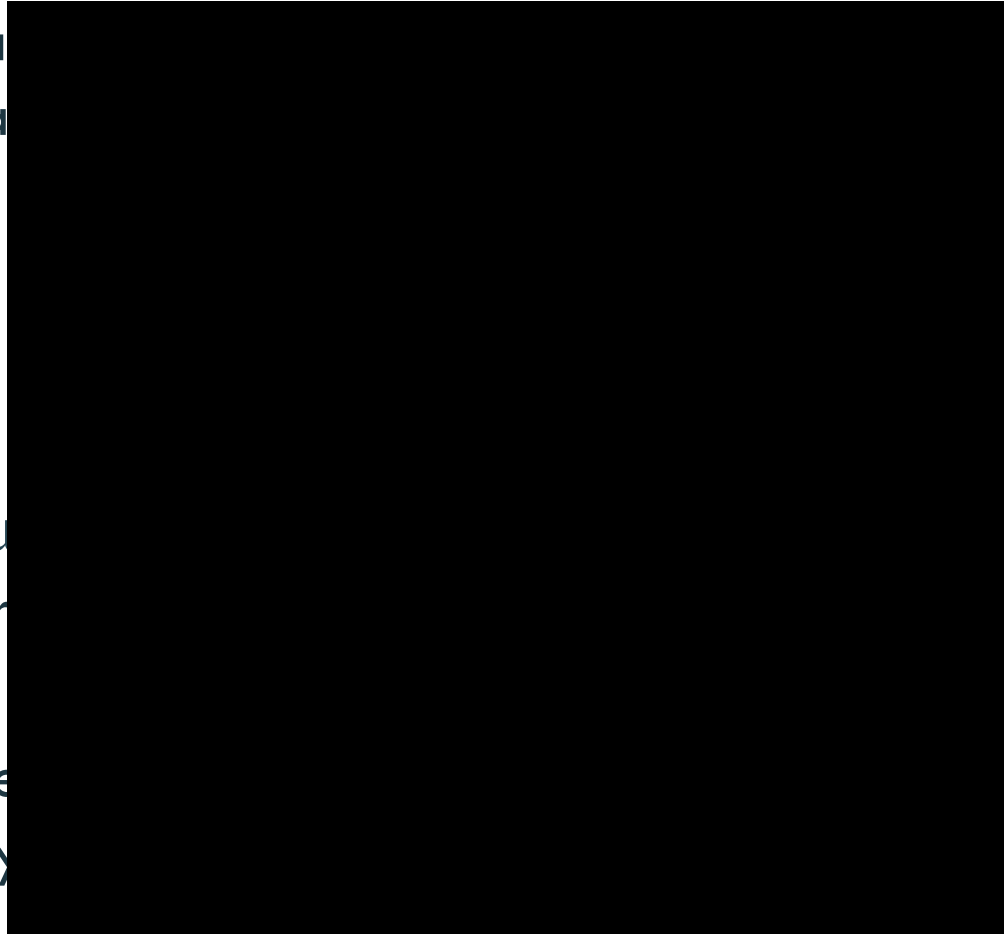
'Nanotest' in situ deformációs stage

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



'Nanotest' in situ deformációs stage

- In situ deformáció SEM vákuumkambiumban
- Precízió
 - xy: $0.5 \mu\text{m}$
 - z: 1 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: $200 \times$



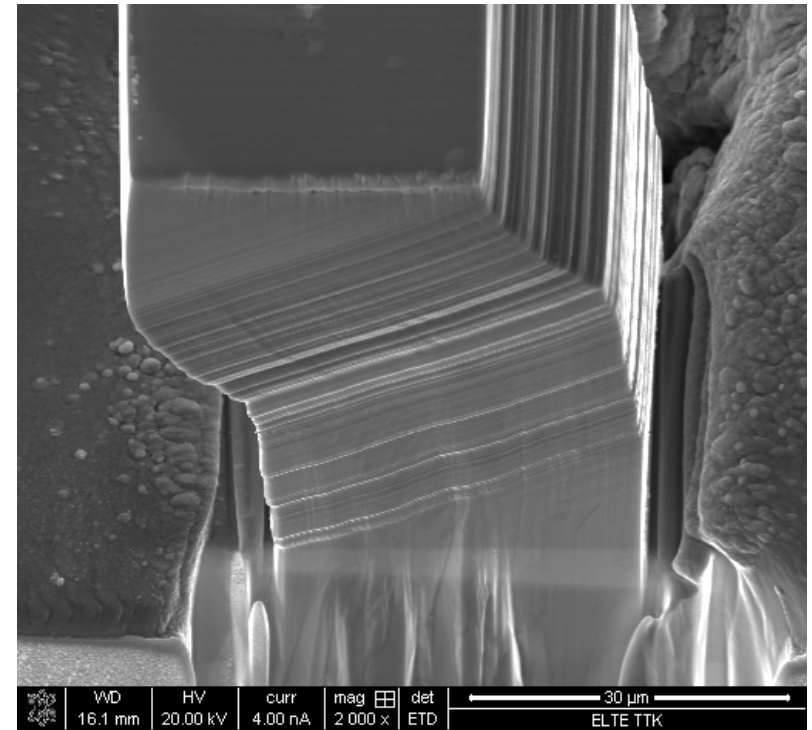
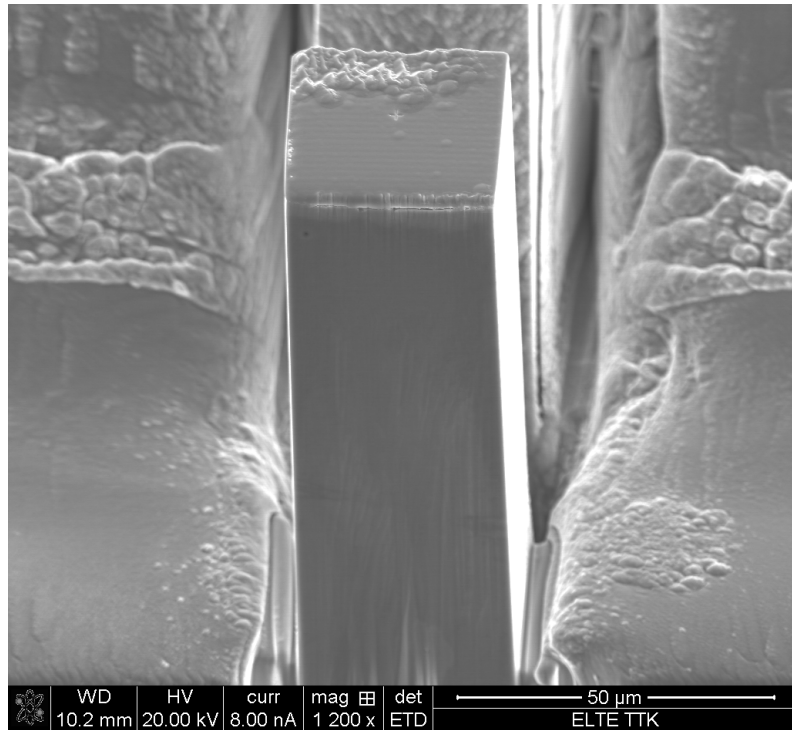
Cu mikrooszlop összenyomása

AE mérések

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

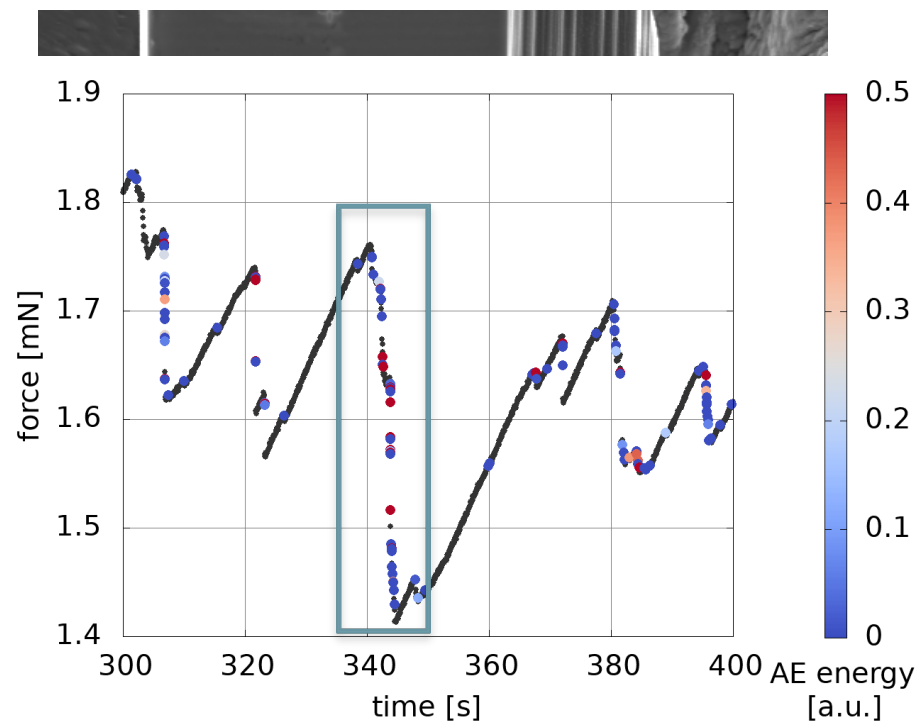
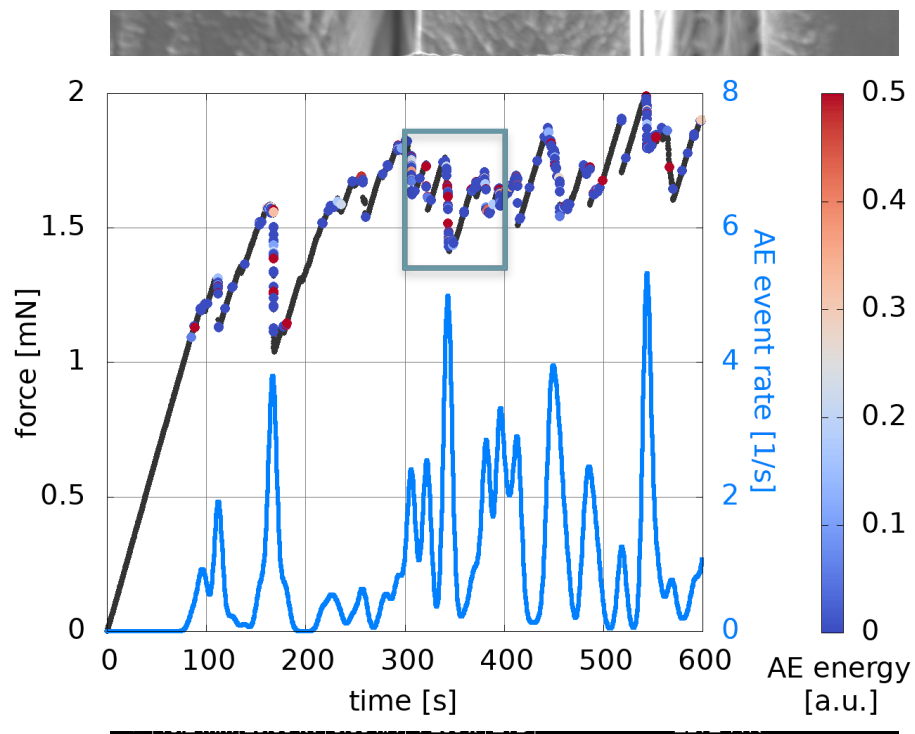


Korreláció a lavinák és az AE jelek között



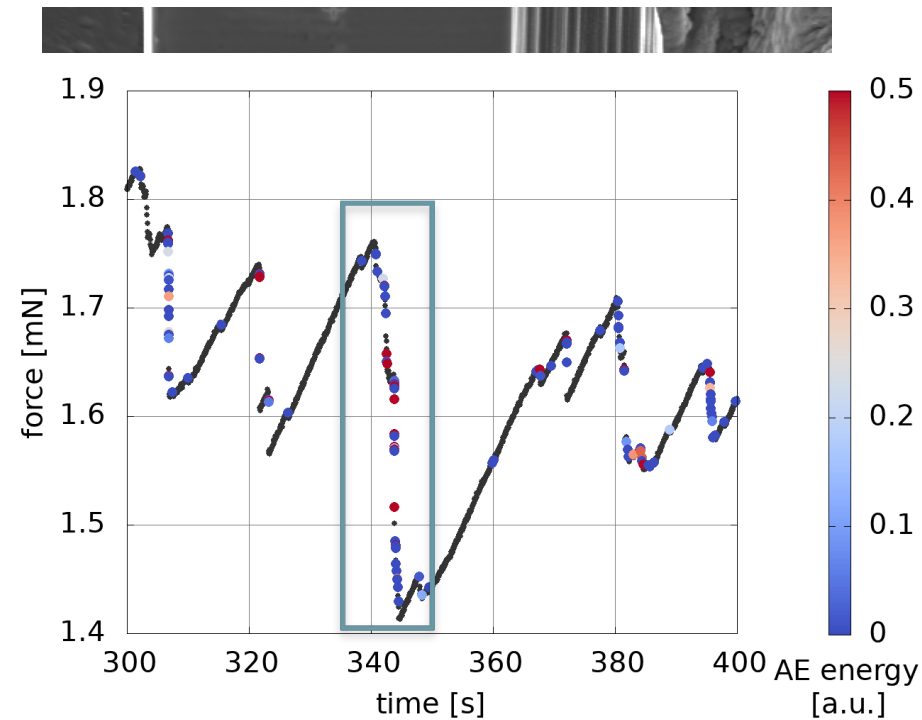
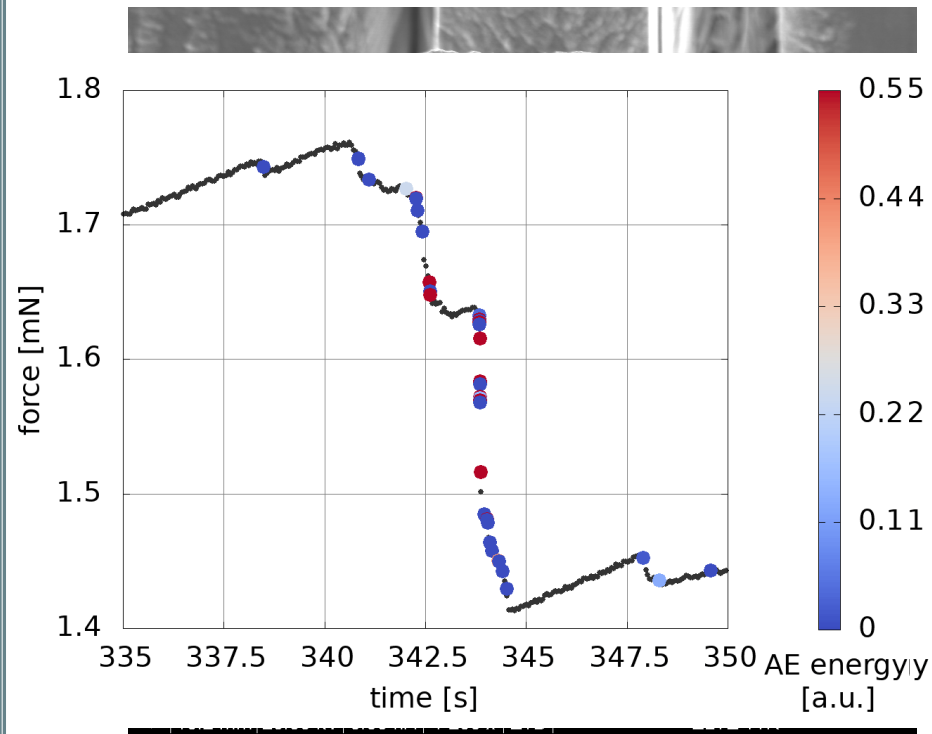
- Csak diszlokációcsúszás figyelhető meg a bazális síkon
- Korreláció a feszültségesések és az AE jelek között
- Számos AE esemény detektálható egy feszültségesés alatt
- ³⁵ Gyakorlatilag nincsenek AE jelek a rugalmas szakaszokban

Korreláció a lavinák és az AE jelek között



- Csak diszlokációcsúszás figyelhető meg a bazális síkon
- Korreláció a feszültségesések és az AE jelek között
- Számos AE esemény detektálható egy feszültségesés alatt
- ³⁶ Gyakorlatilag nincsenek AE jelek a rugalmas szakaszokban

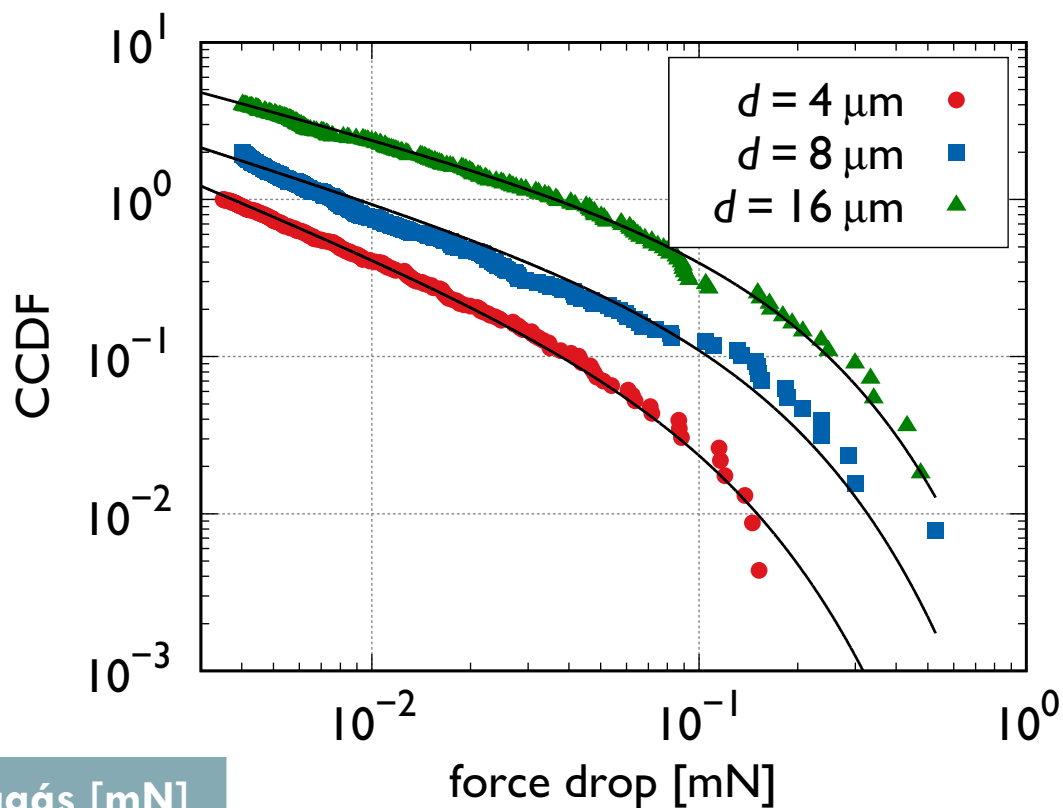
Korreláció a lavinák és az AE jelek között



- Csak diszlokációcsúszás figyelhető meg a bazális síkon
- Korreláció a feszültségesések és az AE jelek között
- Számos AE esemény detektálható egy feszültségesés alatt
- ³⁷ Gyakorlatilag nincsenek AE jelek a rugalmas szakaszokban

A feszültségesegek statisztikája

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



Átmérő [μm]	Exponens	Levágás [mN]
4	1,85	0,1
8	1,65	0,15
16	1,55	0,17

AE események

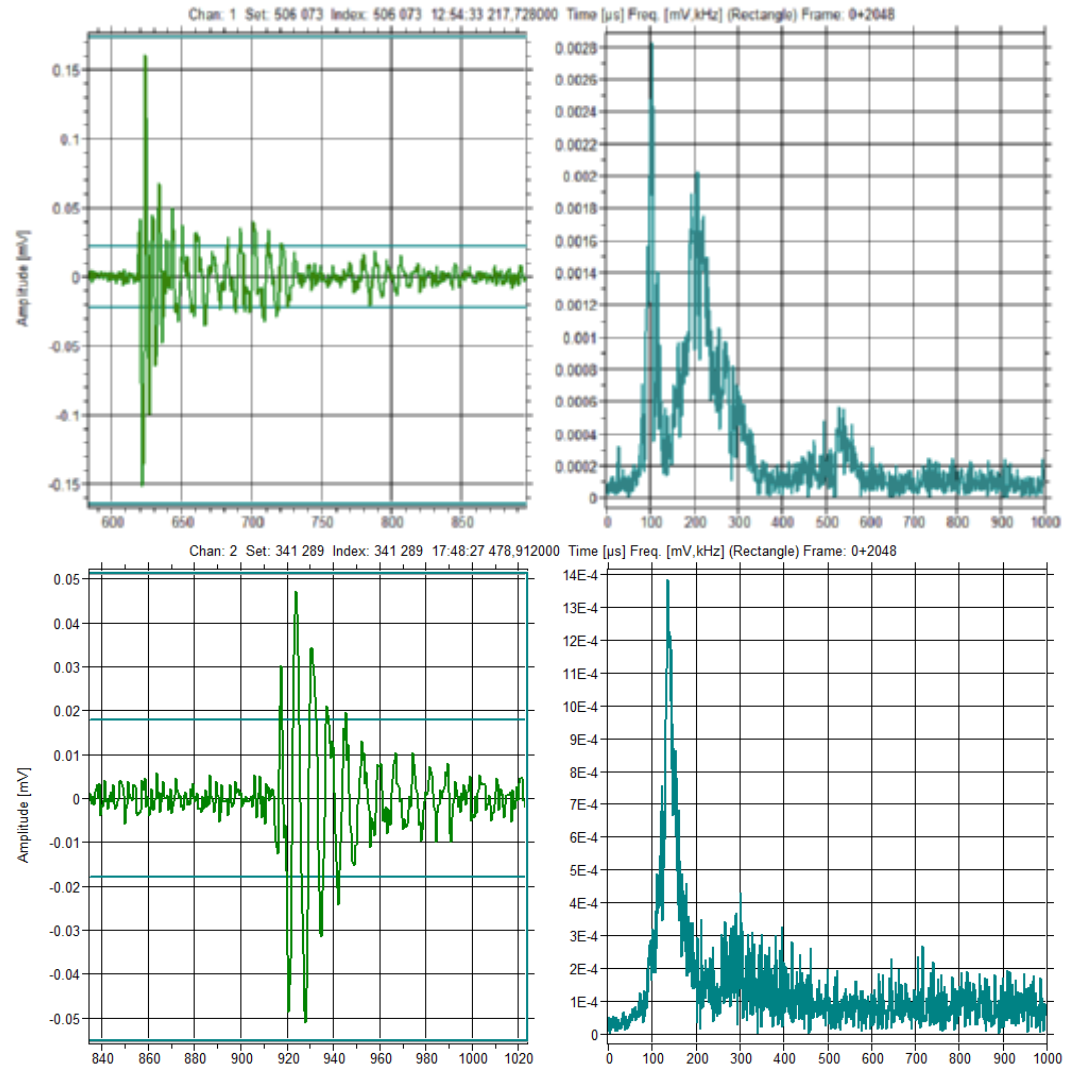
- A detektálható események spektruma azonos
 - Csak egyféle deformációs mechanizmus
 - A jelalak függ a detektortól

A szenzor

B szenzor

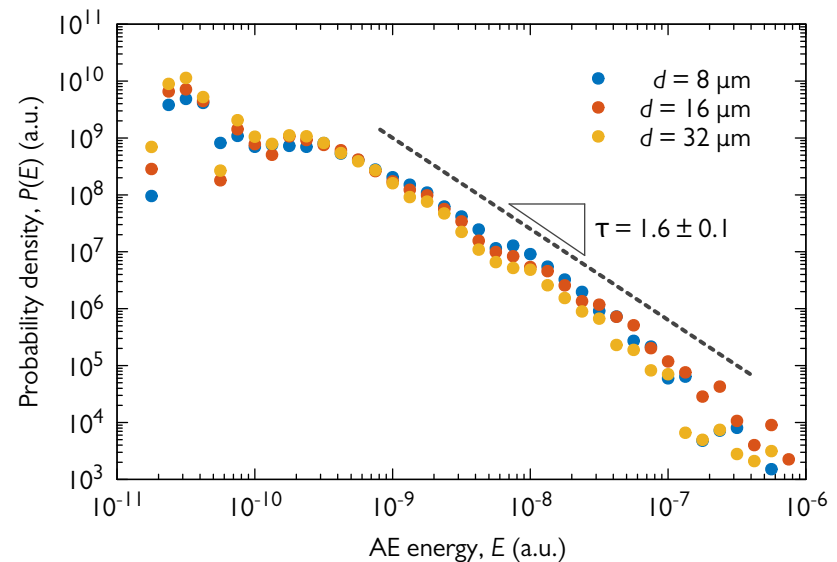
Jelalak

Spektrum



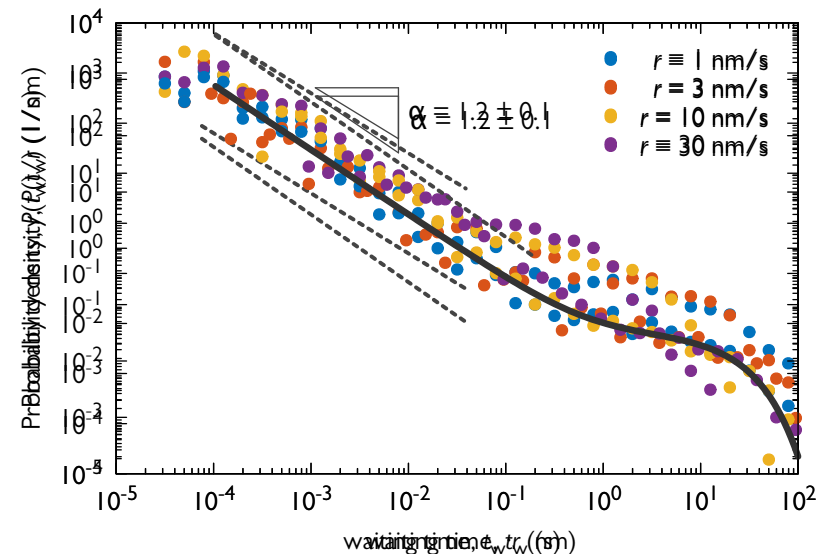
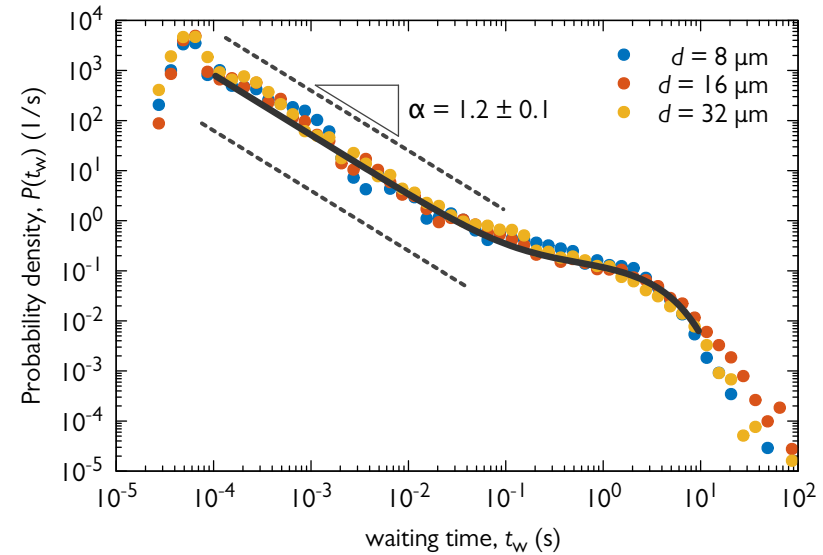
Gutenberg-Richter-törvény

- Az egyedi AE jelek energiájának eloszlása:
 - $P(E) \propto E^{-\tau}$
 - Exponens $\sim 1,6$
- Jó egyezés a tömbi mintákon végzett AE mérésekkel
 - Azonos exponens
 - Rövidebb skálatartomány
- Földrengések esetén
 - $\tau \approx 1,6$



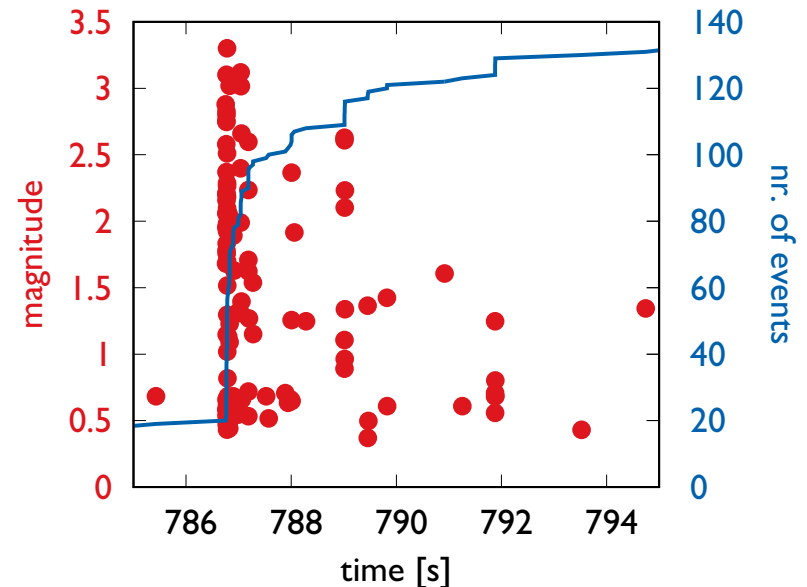
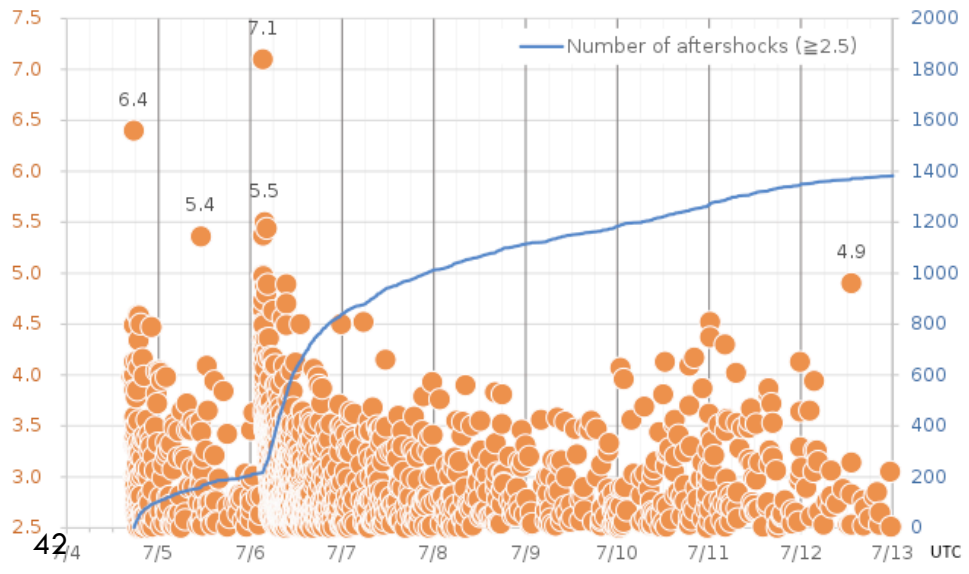
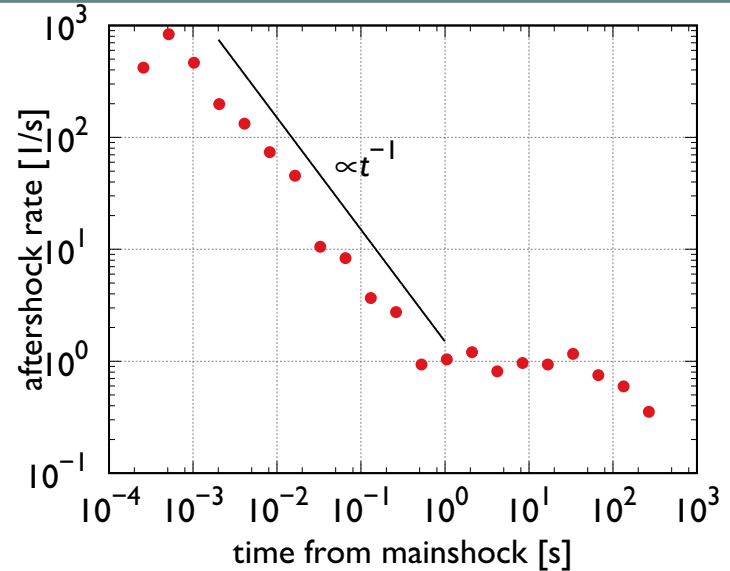
Várakozási idők eloszlása

- Bi-modális eloszlás
 - $P(t_w) = (At_w^{-\alpha} + a) e^{-t_w/t_0}$
 - Közeli jelek: ugyanabból az eseményből
 - Távoli jelek: egymást követő eseményekből
- A lavináknak nincs kitüntetett időskálája, de a véges ráta miatt max. kb. **100 ms**-ig tudjuk megfigyelni őket
- Közeli jelek:
 - Skála-független eloszlás
 - Független a deformációs rátától
 - Exponens $\sim 1,2$
- Távoli jelek
 - Exponenciális levágás
 - Független a deformációs rátától
 - Poisson-szerű



Utó rengések

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



Földrengések vs. diszlokációlavinák

	Földrengések	Diszlokációlavinák
Mechanizmus	Repedés	Diszlokációmozgás
Kiterjedés	Síkban	Síkban
Tipikus méret	km	μm
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

