



Diszlokációlavinák Zn egykristályokban: földrengések a mikronos skálán

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



Vázlatos felépítés

Földrengések

Empirikus törvények

Kísérleti összeállítás

Mikrooszlopok kialakítása

Mikrooszlopok deformációja

AE mérések

**Mi köze a mikrooszlopoknak
a földrengésekhez?**

Háttér

Mikromechanika

Deformációs lavinák

Akusztikus emisszió (AE)

Mérési eredmények

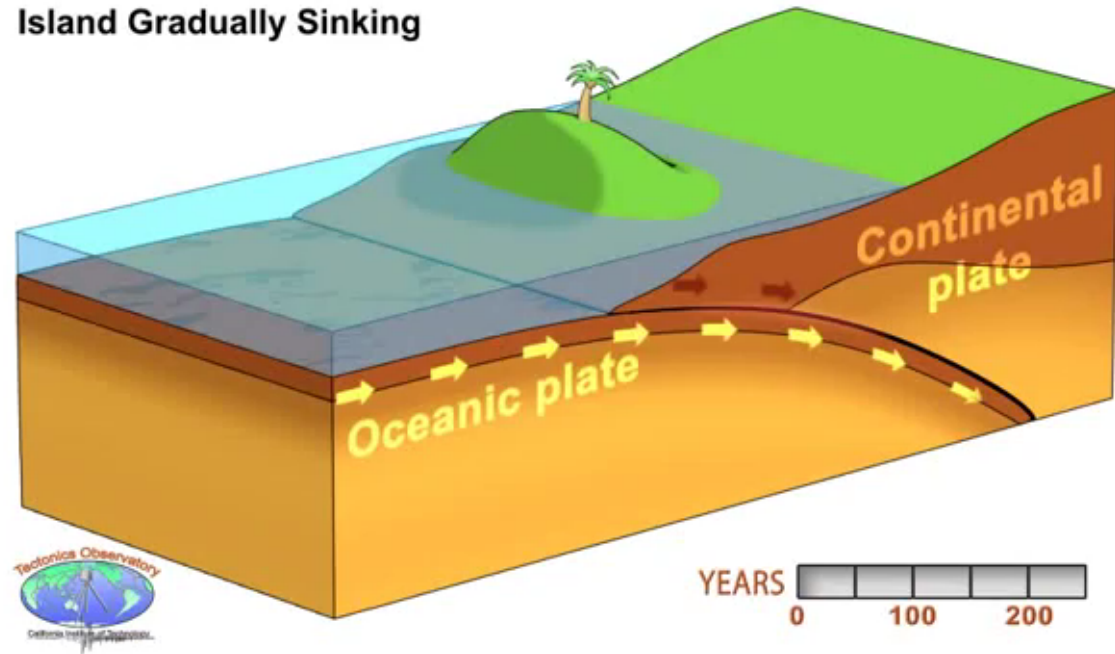
Feszültség-deformációs görbe

AE jelek analízise

Mi a földrengés?

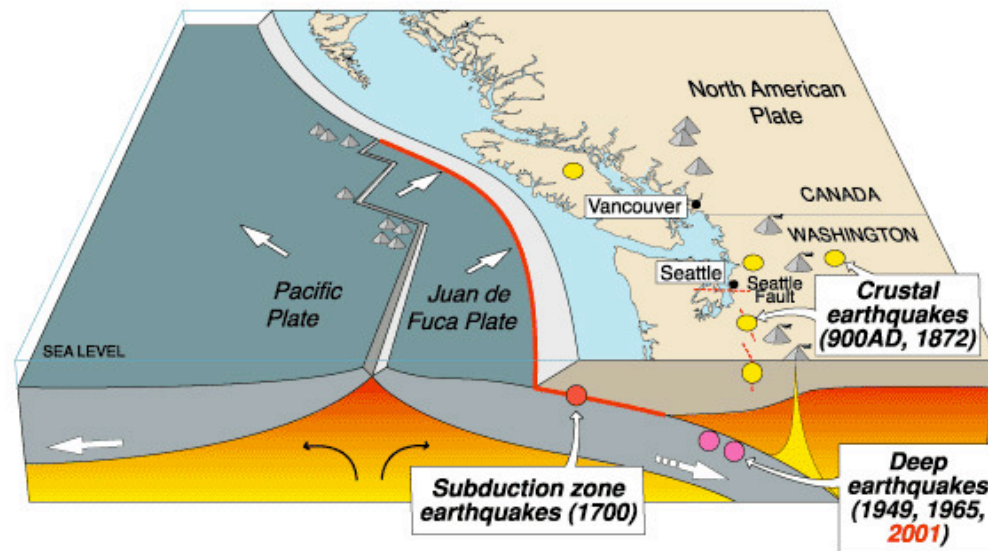
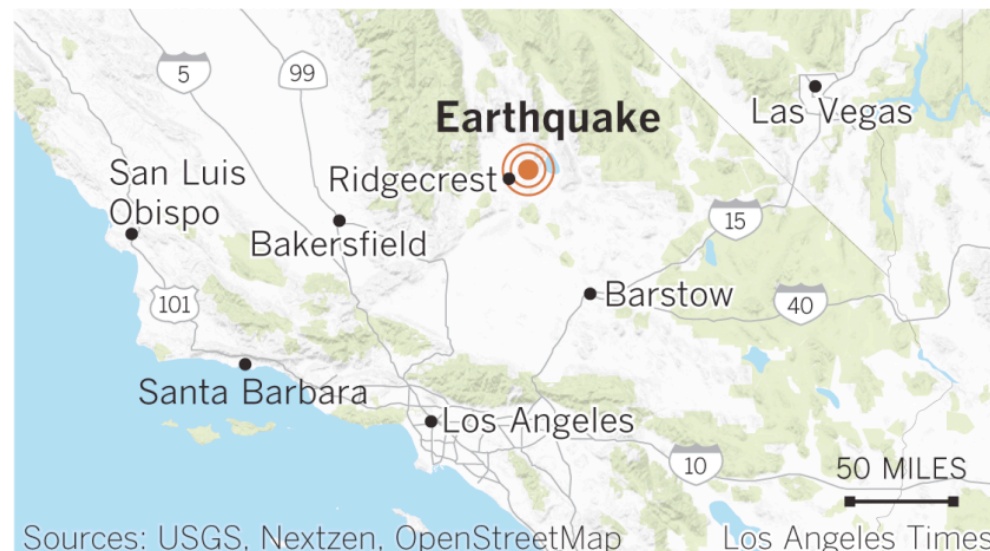
- A földrengés előtt belső rugalmas erők épülnek fel
- Maradandó alakváltozás során felszabadul a rugalmas energia
- Rugalmas hullámok formájában távozik

Island Gradually Sinking



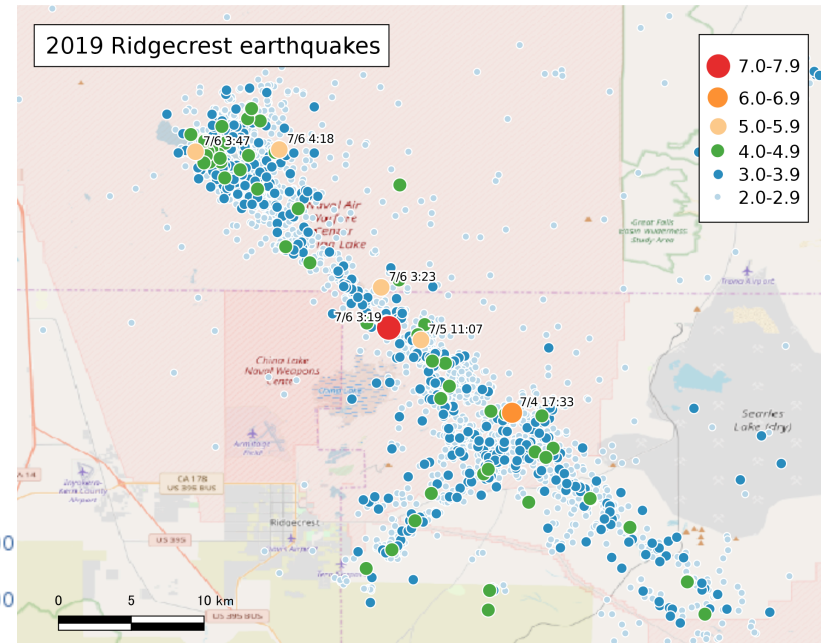
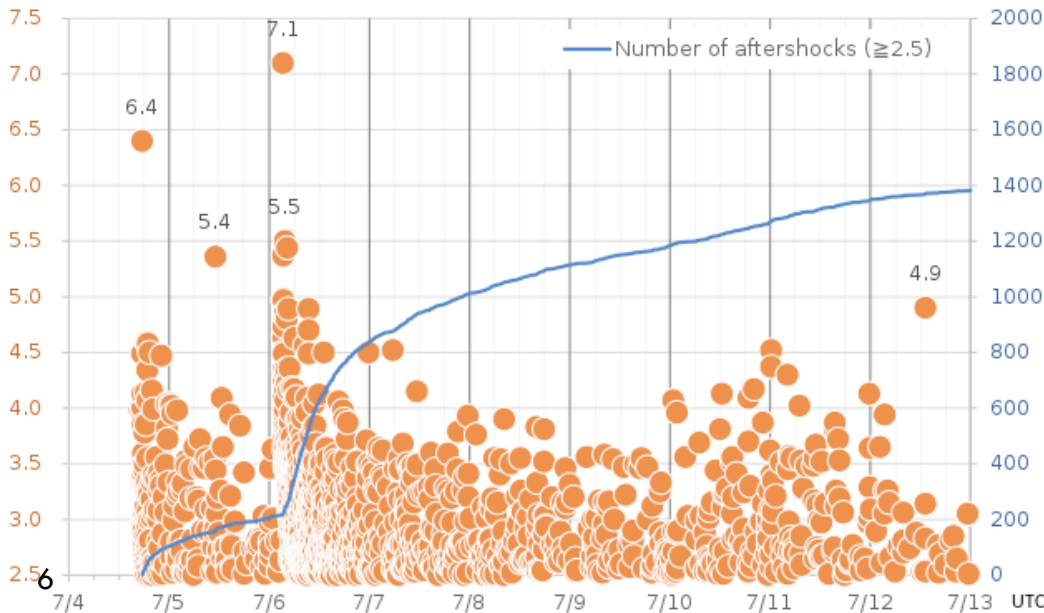
A 2019. évi Ridgecrest földrengés

- 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



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: $n(t) \sim 1/t$

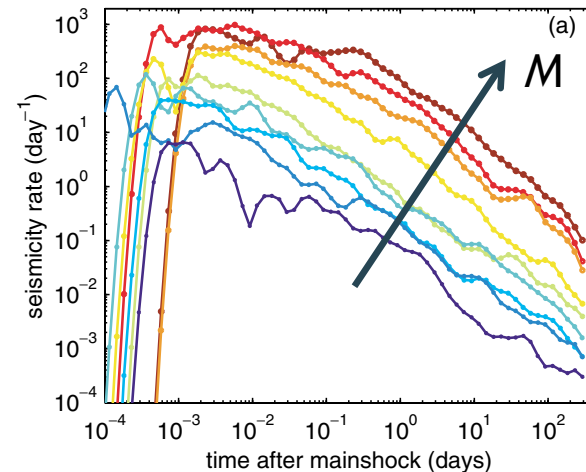
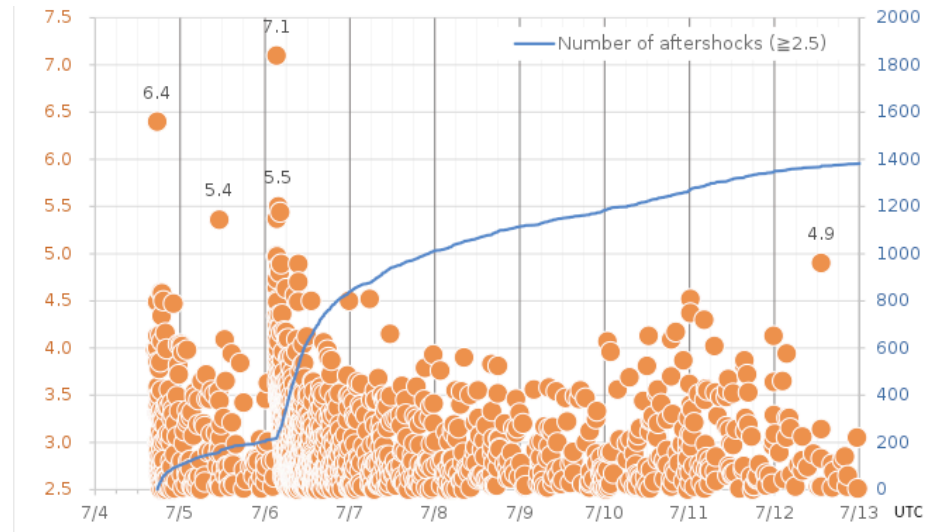
Fundamentális empirikus törvények

- Gutenberg-Richter-törvény:

- $P(E) \propto E^{-\tau}$
- Exponens $\sim 1,6$

- Produktivitási törvény

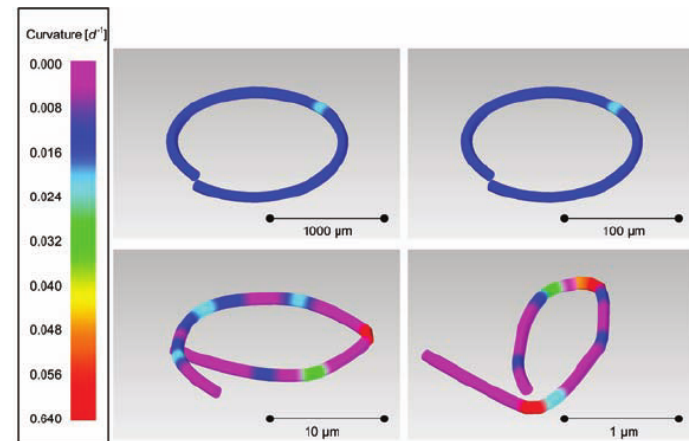
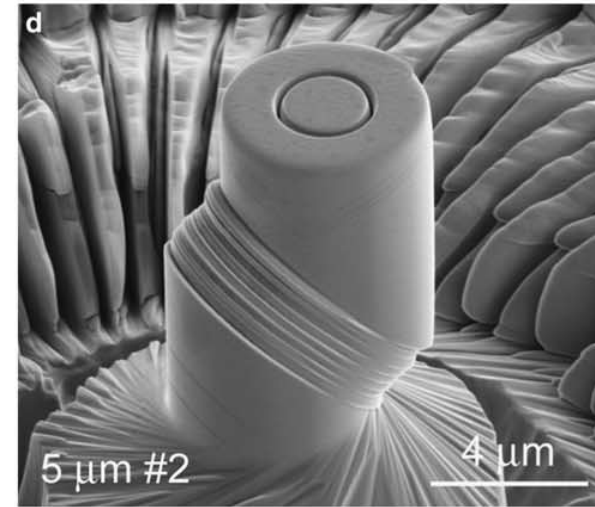
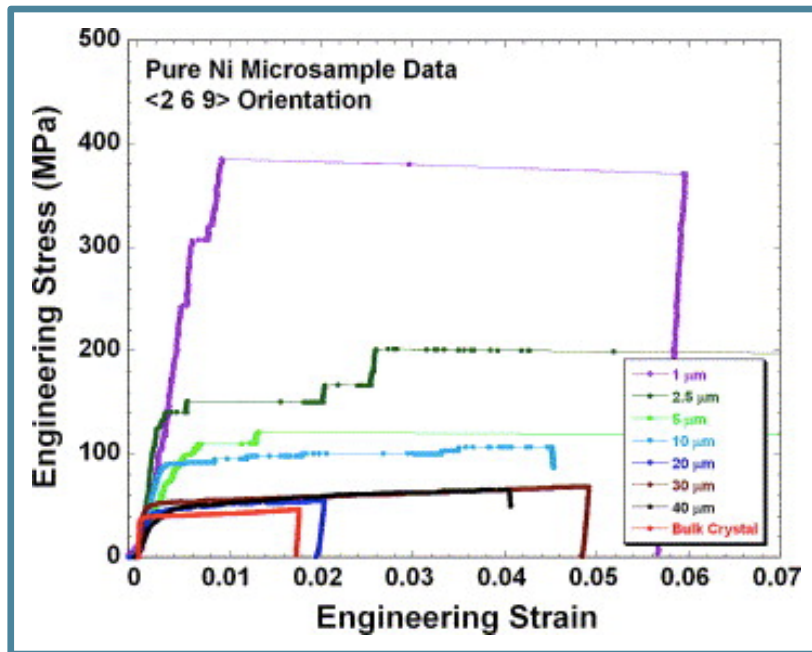
- $n(t) \propto E_{ms}^{\beta}$
- E_{ms} a főrengés energiája
- Exponens $\sim 0,5$



Helmstetter, PRL, 2003

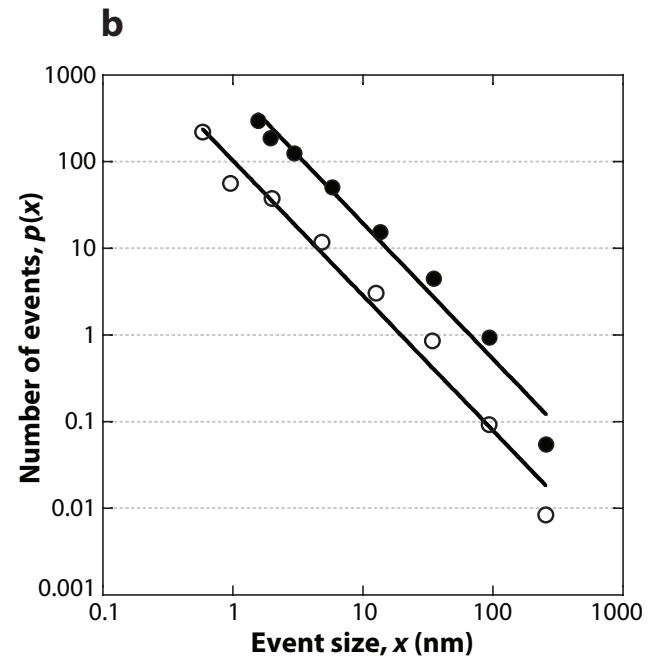
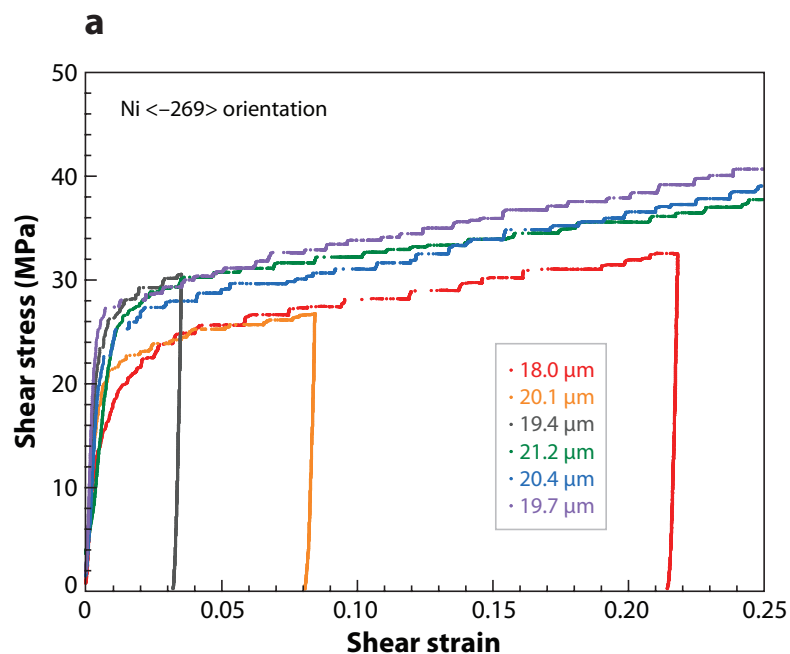
Kristályplaszticitás a mikronos skálán

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



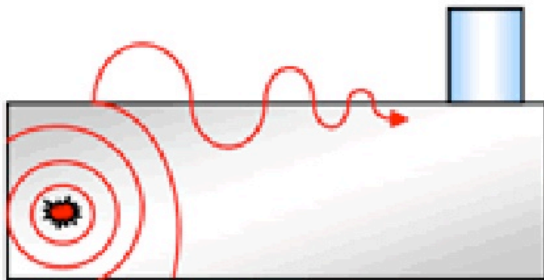
Deformációs/diszlokáció lavinák

- Véletlen deformációs ugrások
- Hatványfüggvény szerinti eloszlás: $P(s) = As^{-\tau} e^{-\frac{s}{s_0}}$
 - τ : lavina-exponens ($\approx 1,5$)
 - s_0 : levágás (cutoff) (≈ 100 nm)
- Ok: diszlokációk kollektív, lavina-szerű mozgása



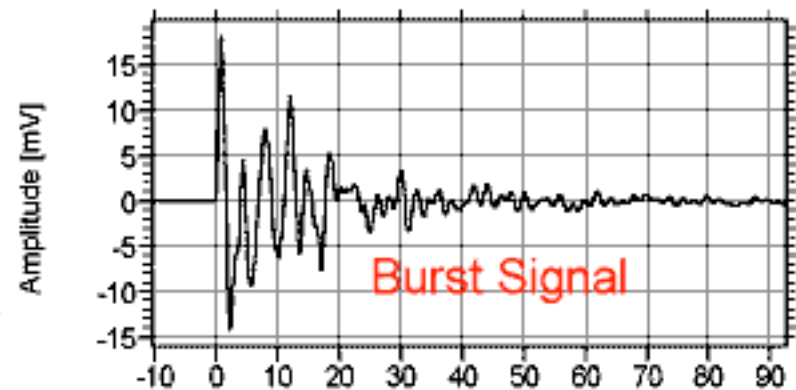
Akusztikus emisszió (AE) mérése

- 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

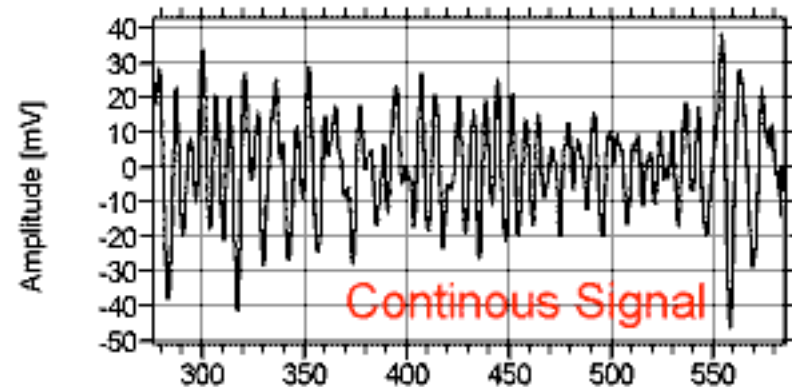


Acoustic Emission Signals

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]

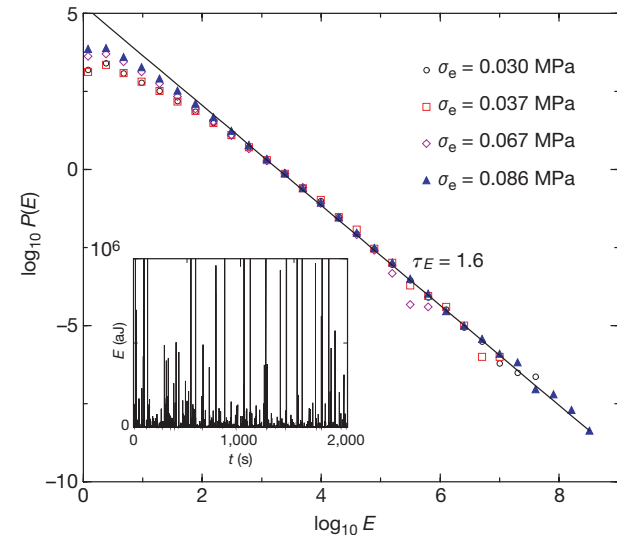
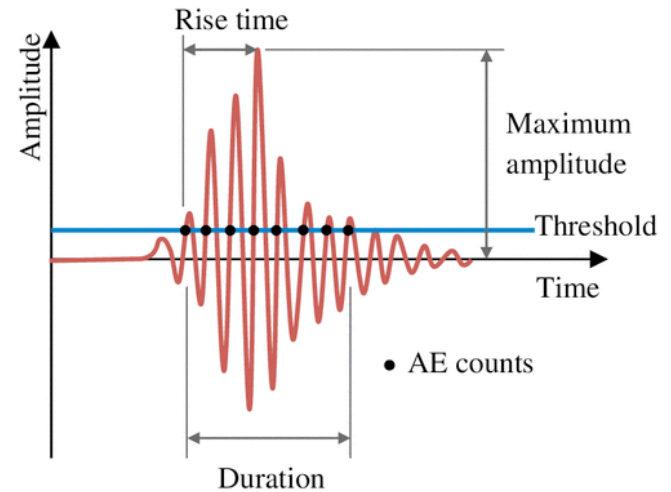


hcp egykristályok akusztikus emissziója

- AE jég, Cd és Zn mintákon
 - $P(E) \propto E^{-\tau_E}$
 - $\tau_E \approx 1,6$ (AE jel energiája)
 - $\tau_A \approx 2,0$ (AE jel amplitúdója)
 - Nincs levágás
 - Robosztus exponensek
 - Az események kiindulópontjai egy fraktált alkotnak
- Nyitott kérdés
 - Nem ismert, hogy az AE jelek milyen kapcsolatban vannak a lokális deformációval

Weiss *et al.*, PRB (2007)

11 Weiss *et al.*, Science (2003)



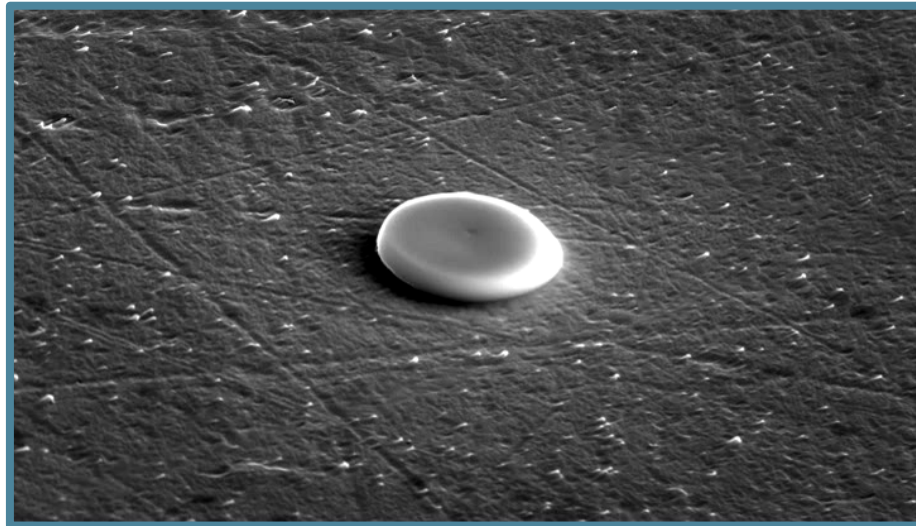
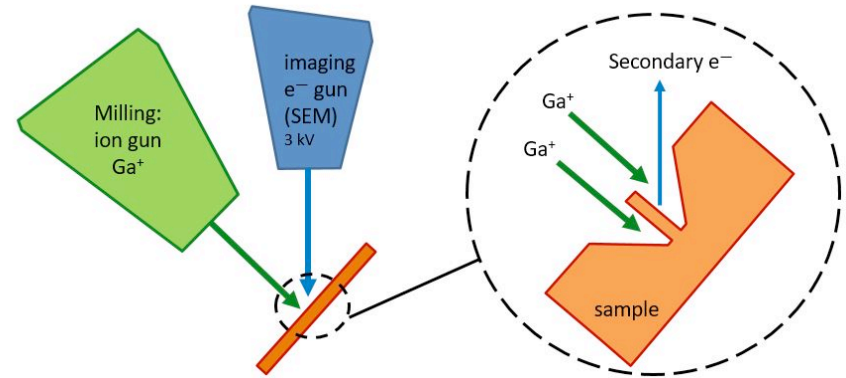
Miguel *et al.*, Nature (2001)

Célkitűzés

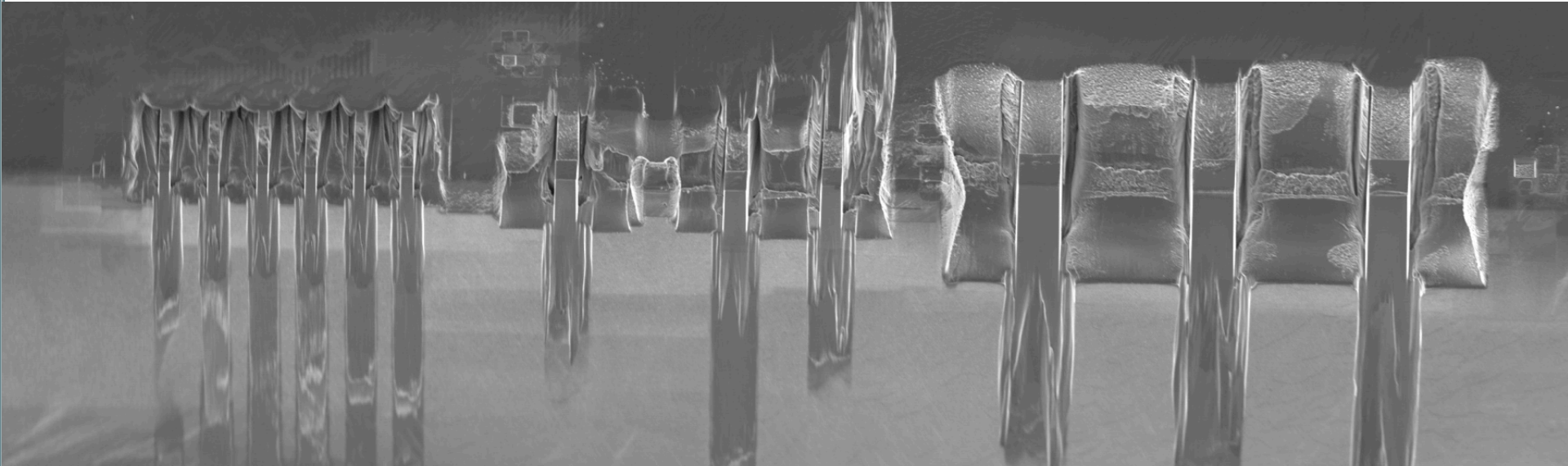
- Cél: összekapcsolni a mikrooszlop összenyomási és az AE kísérleteket
 - Bizonyítani az AE és a deformációs lavinák közti korrelációt
 - Értelmezni az AE jeleket a deformációs ugrások tulajdonságainak függvényében
 - Megérteni, hogy az AE jelek hogyan függenek a deformációs mechanizmustól

Mikrooszlop faragása

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



Zn mikrooszlopok



WD	HV	curr	mag	det
10.1 mm	20.00 kV	8.00 nA	120 x	ETD

500 μm
ELTE TTK

Minta:

- Bazális síkra orientált Zn (hcp) egykristály
 - nincs keresztcsúszás ill. ikresedés
- Egyszeres csúszás a bazális síkon

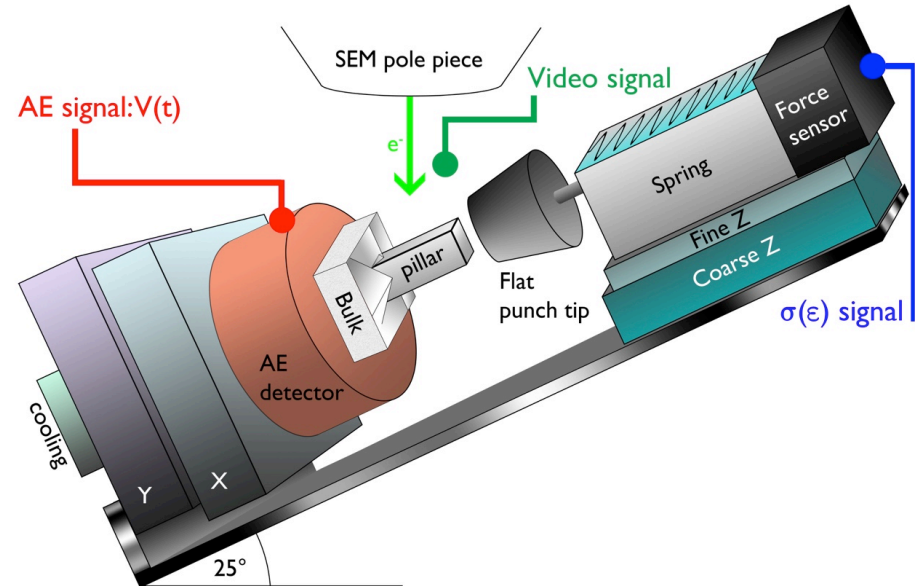
14

Mikrooszlop:

- Átmérő 8-32 μm
- Négyzet keresztmetszet

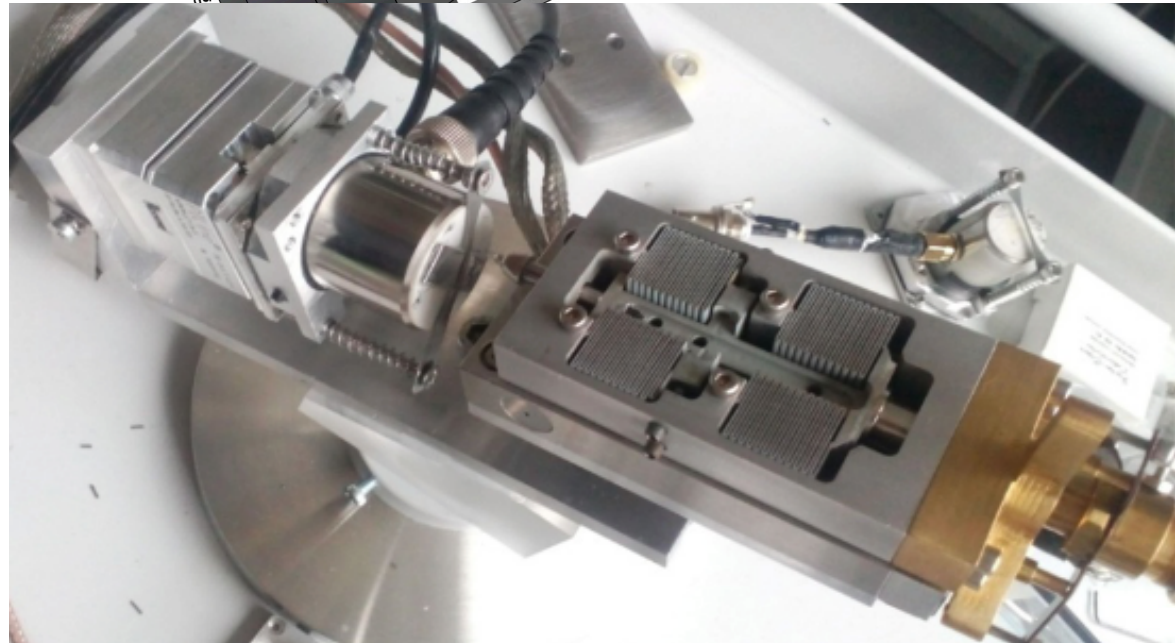
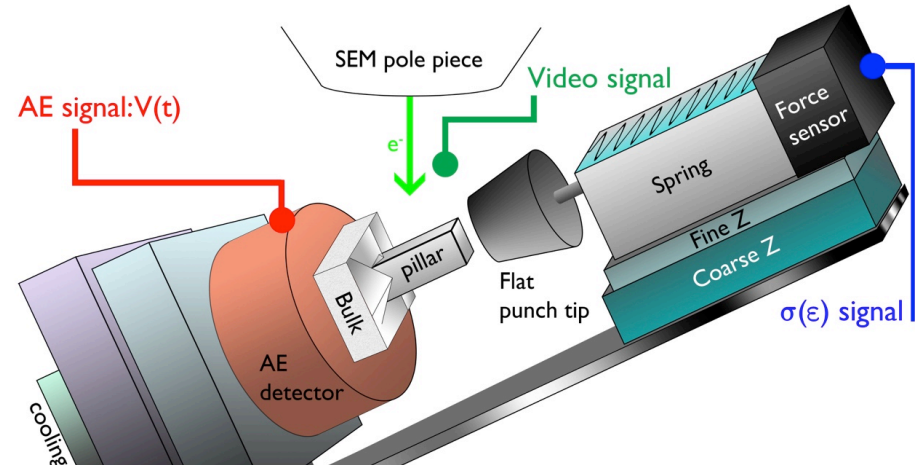
'Nanotest' in situ deformációs platform

- 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



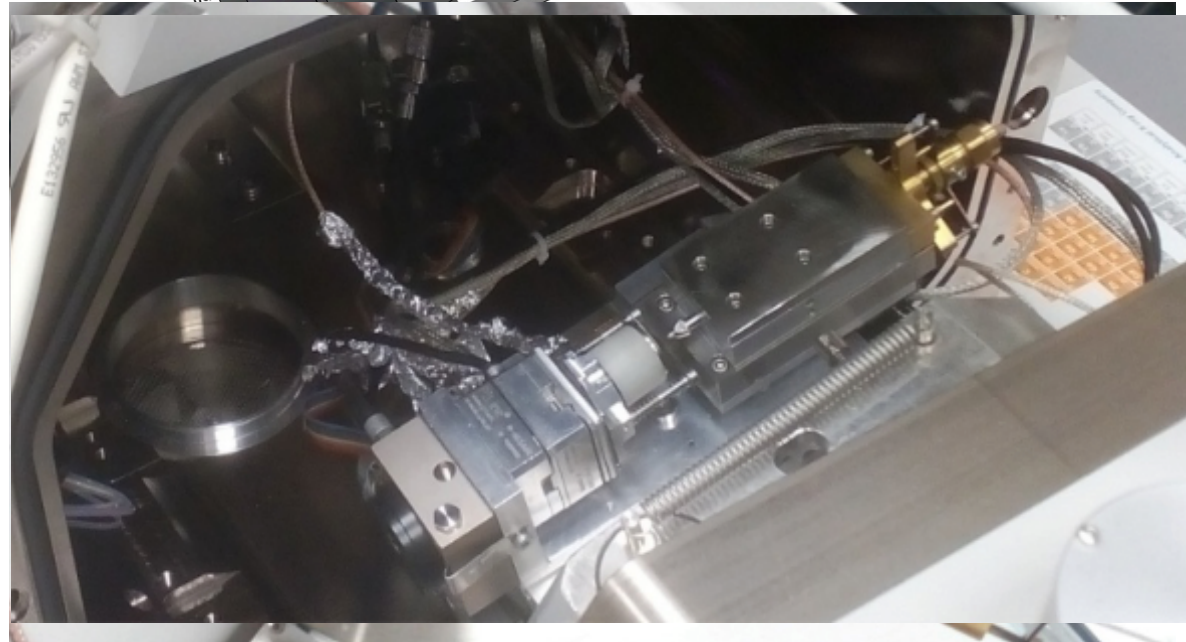
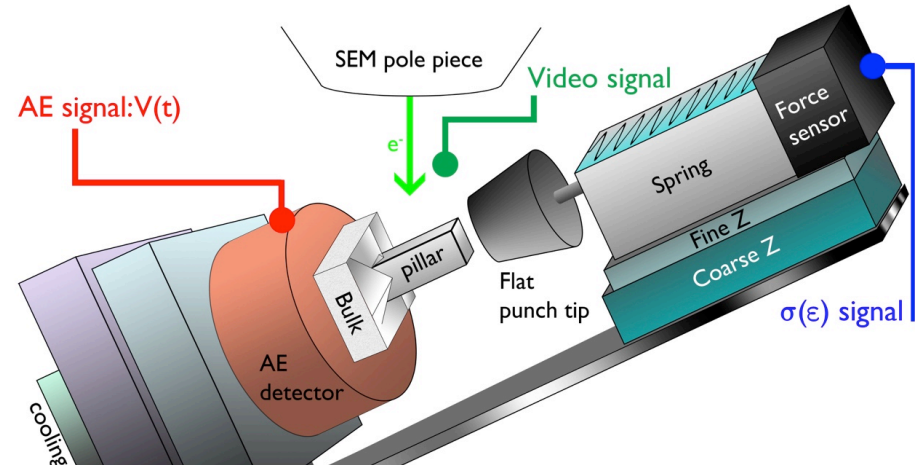
'Nanotest' in situ deformációs platform

- 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

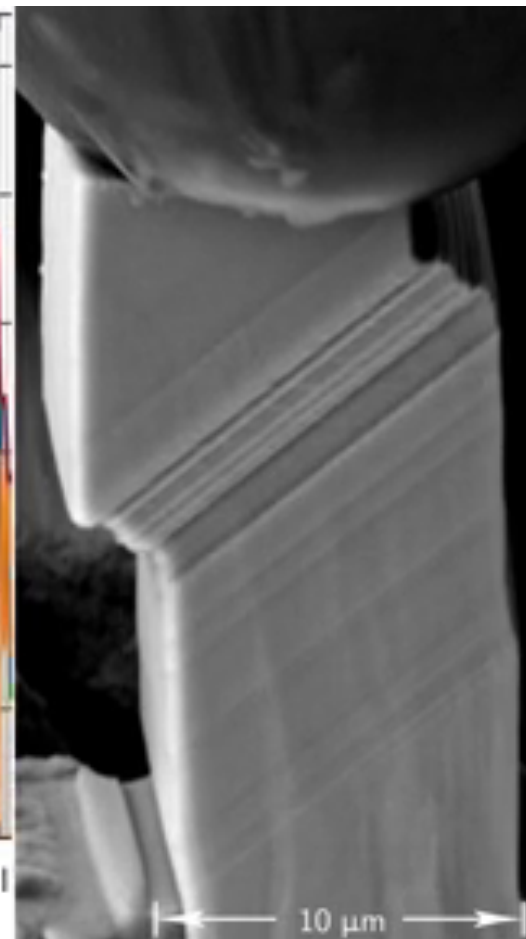
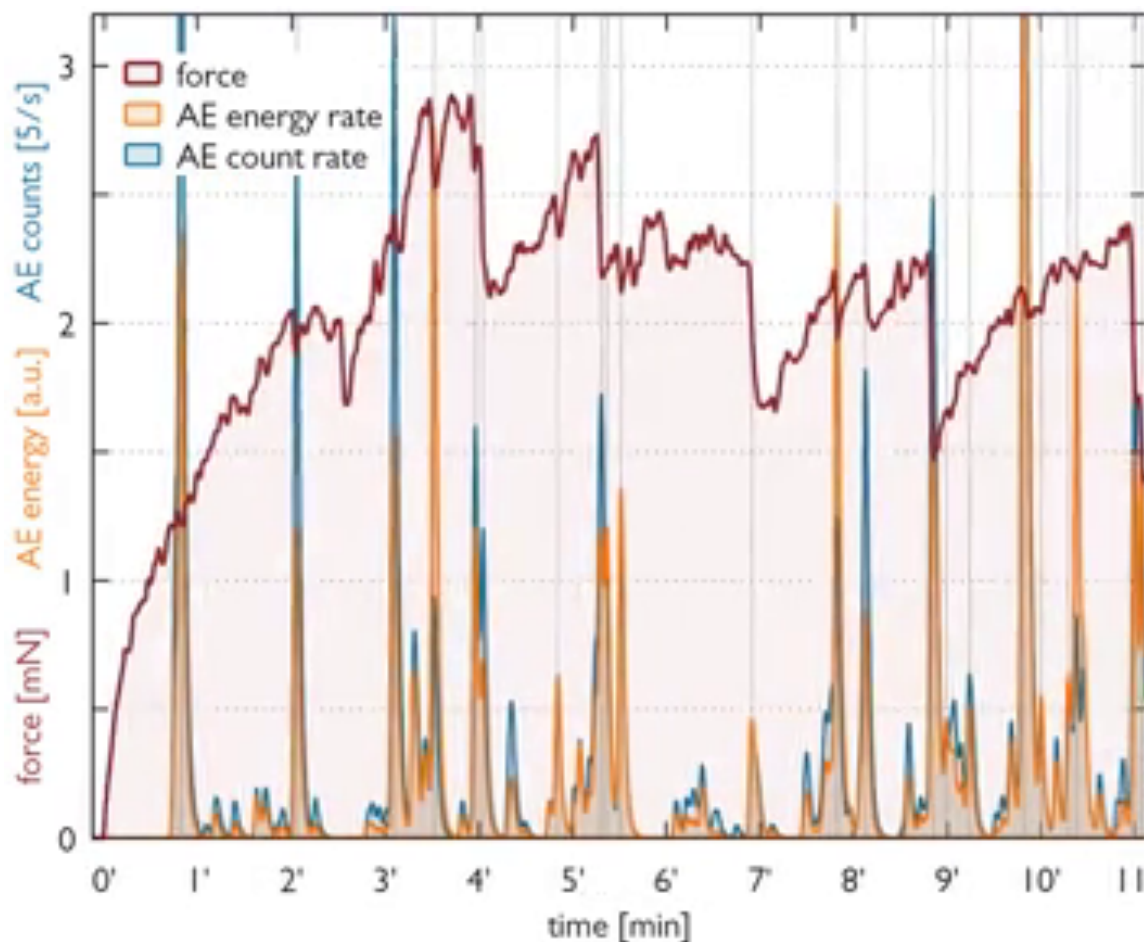


'Nanotest' in situ deformációs platform

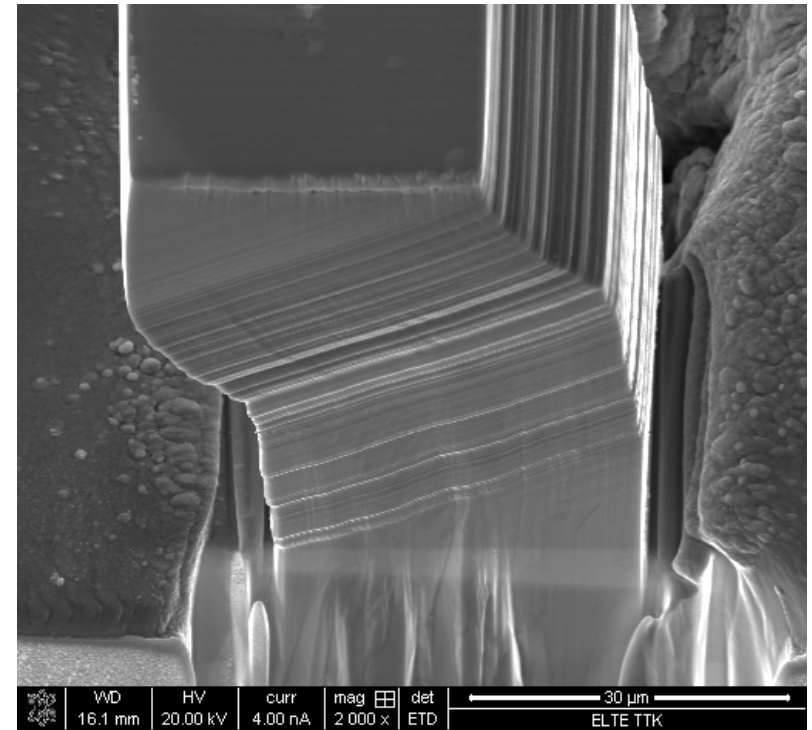
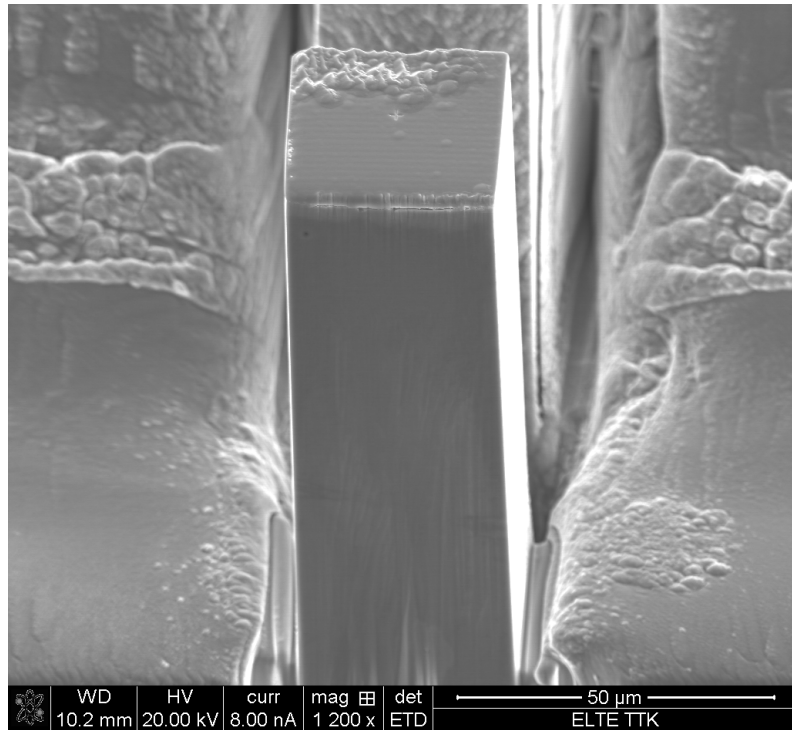
- In situ deformáció a SEM vákuumkamrában
- Precízió
 - xy : $0.5 \mu\text{m}$
 - z : 1 nm
 - erő: $1 \mu\text{N}$
- Maximum $10 \mu\text{m}$ elmozdulás z irányban
- Változtatható rugóállandó (jelenleg $1 \text{ mN}/\mu\text{m}$ vagy $10 \text{ mN}/\mu\text{m}$)
- Mintavétel: 200 Hz



In situ videó: deformáció + AE események

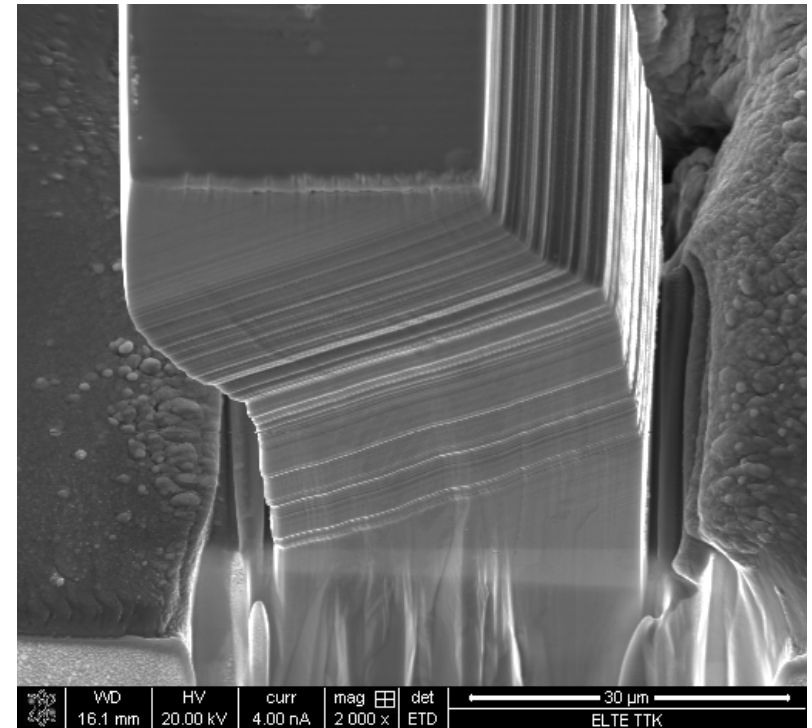
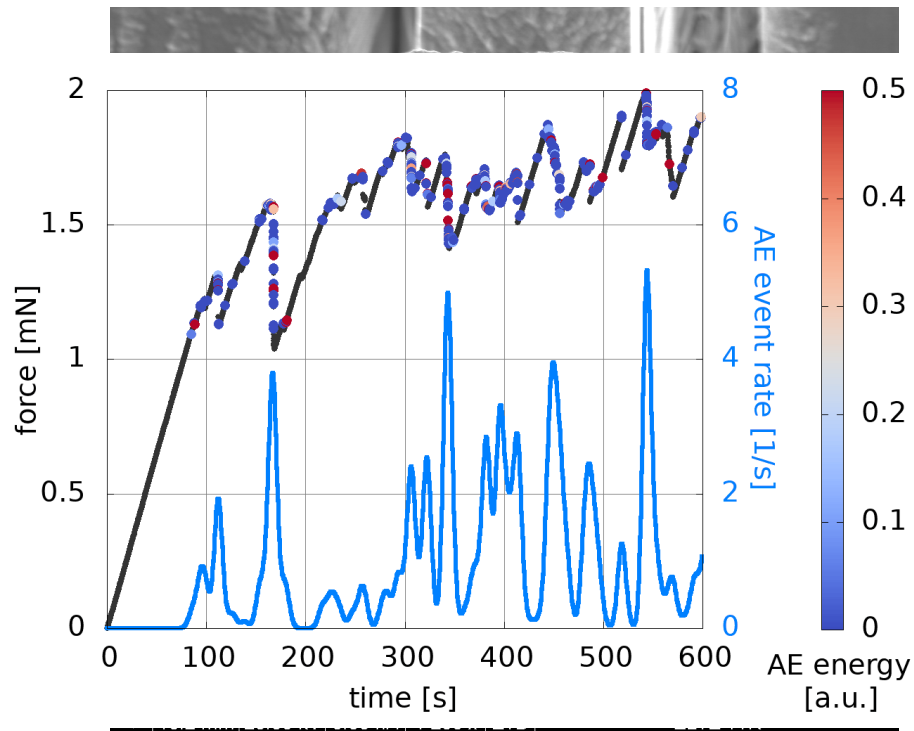


Korreláció a lavinák és az AE jelek között



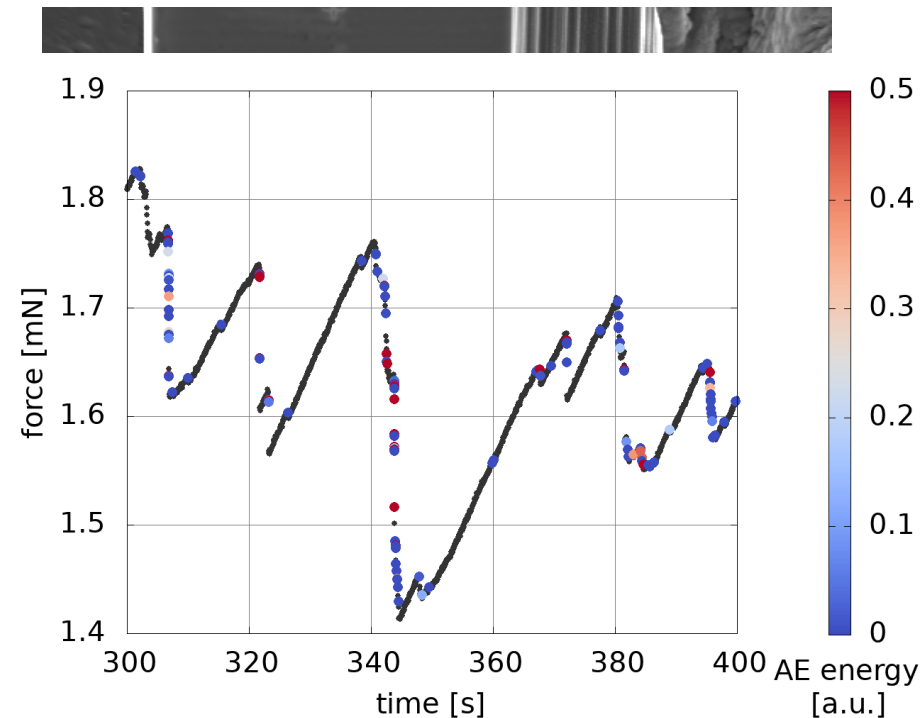
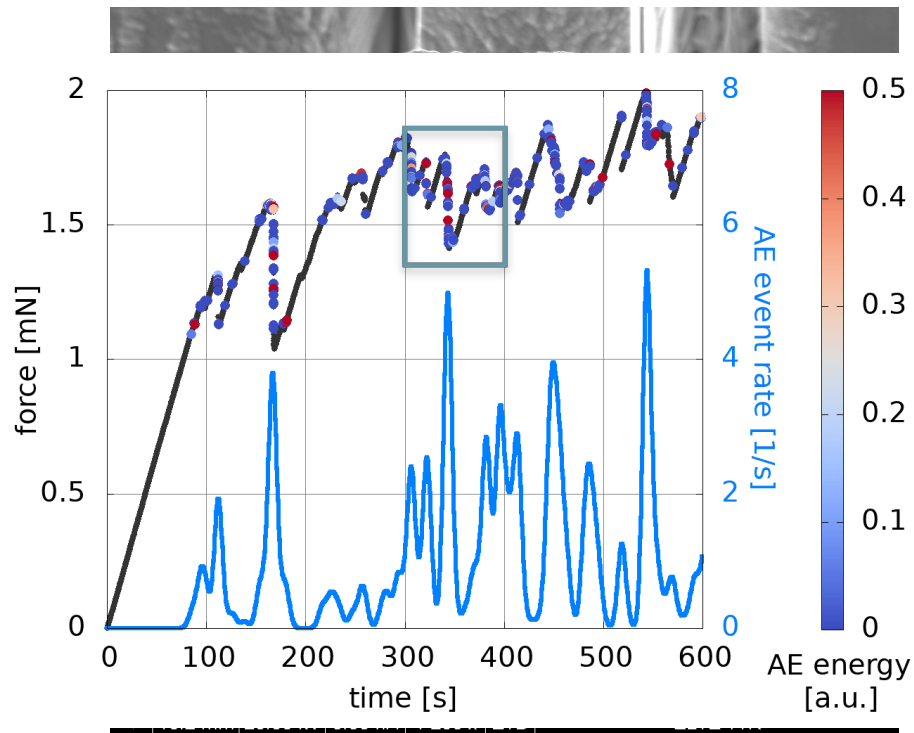
- Csak diszlokációcsúszás figyelhető meg a bazális síkon
- Korreláció a feszültségesések és az AE jelek között
- Számos AE esemény detektálható egy feszültségesés alatt
- ¹⁹Gyakorlatilag nincsenek AE jelek a rugalmas szakaszokban

Korreláció a lavinák és az AE jelek között



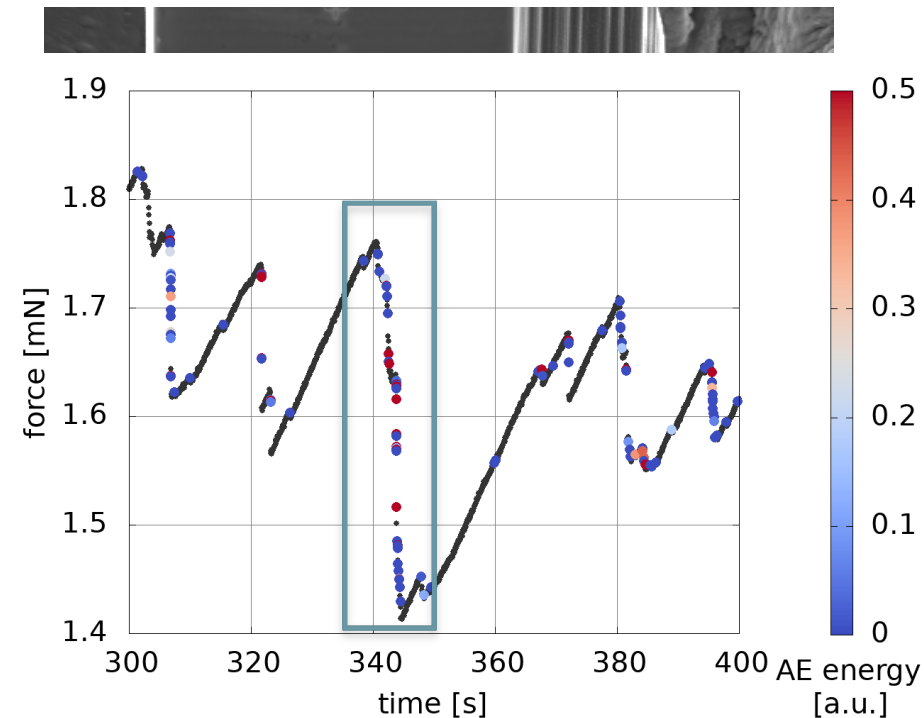
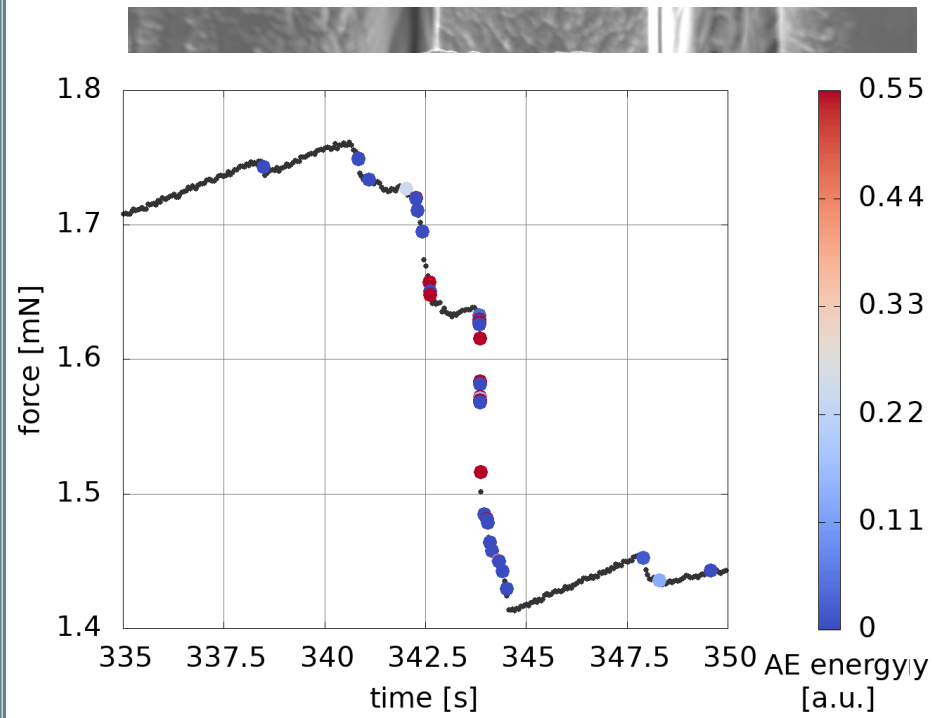
- Csak diszlokációcsúszás figyelhető meg a bazális síkon
- Korreláció a feszültségesések és az AE jelek között
- Számos AE esemény detektálható egy feszültségesés alatt
- ²⁰ Gyakorlatilag nincsenek AE jelek a rugalmas szakaszokban

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
- ²¹ Gyakorlatilag nincsenek AE jelek a rugalmas szakaszokban

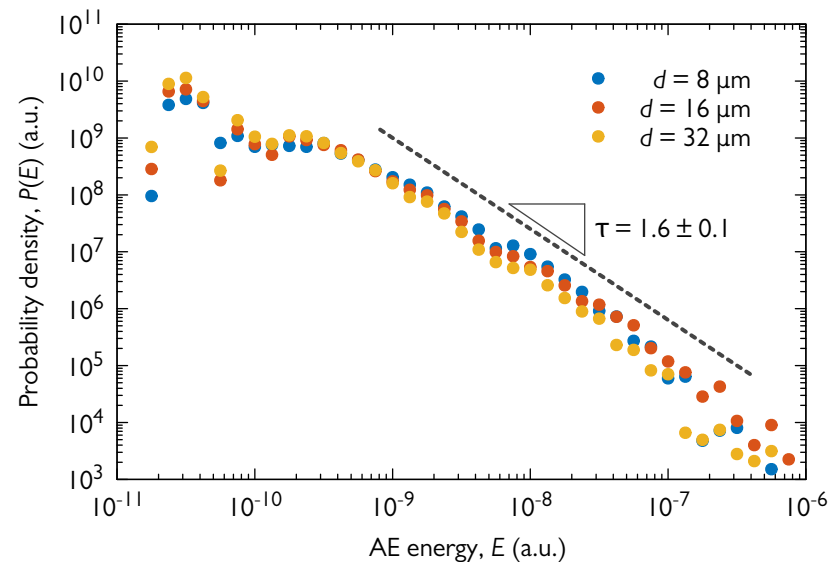
Korreláció a lavinák és az AE jelek között



- Csak diszlokációcsúszás figyelhető meg a bazális síkon
- Korreláció a feszültségesések és az AE jelek között
- Számos AE esemény detektálható egy feszültségesés alatt
- ²² Gyakorlatilag nincsenek AE jelek a rugalmas szakaszokban

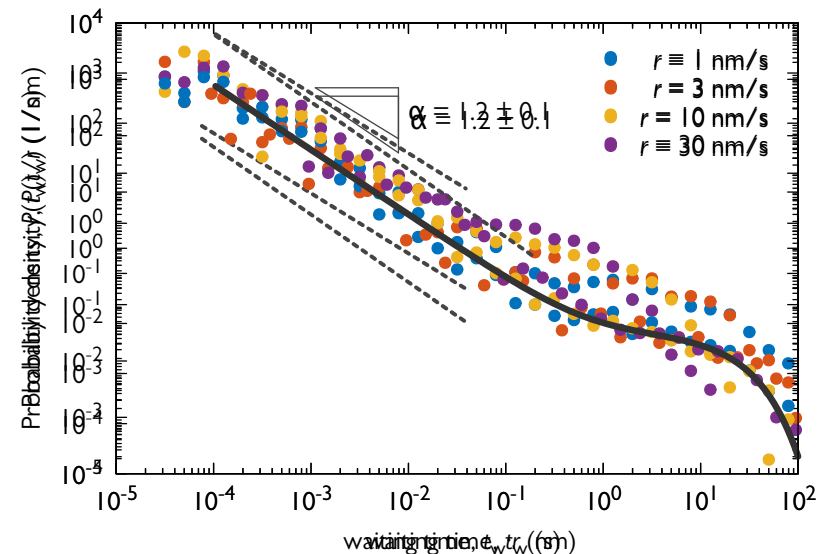
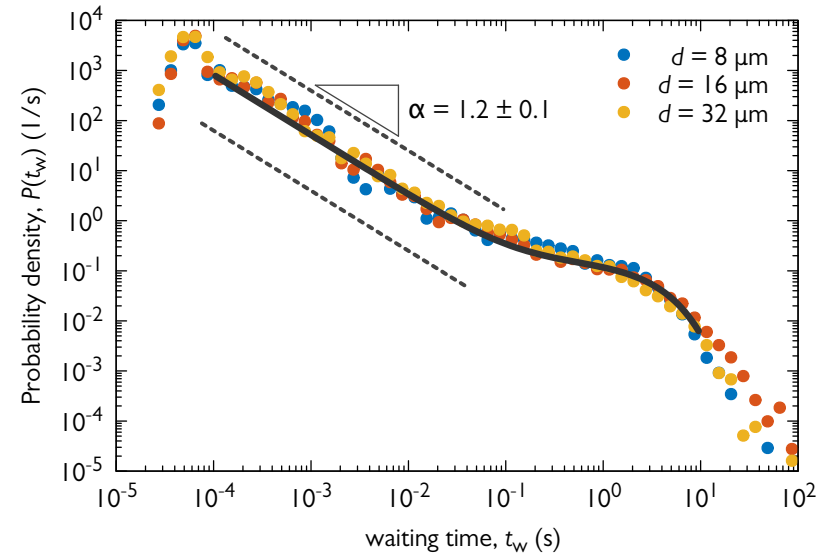
Gutenberg-Richter-törvény

- 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
 - $\tau \approx 1,6$



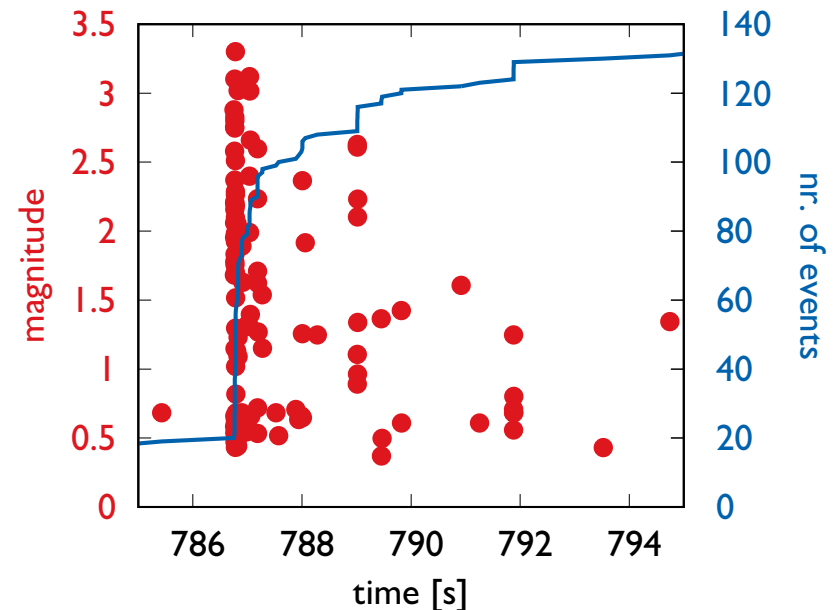
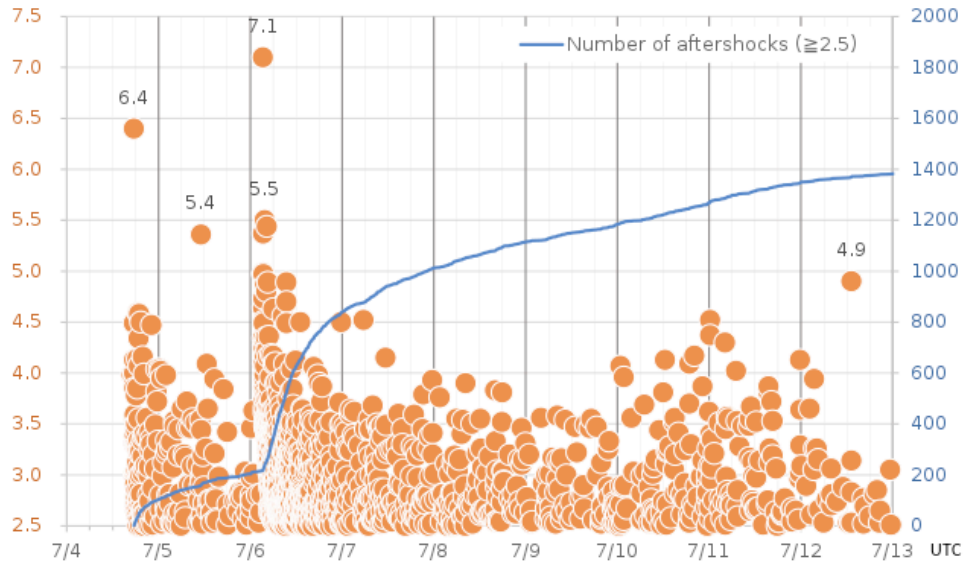
Várakozási idők eloszlása

- 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
 - Függs a deformációs rátától
 - Poisson-szerű



Utó rengések

- Egy nagy magnitúdójú jel után számos „utó rengés” figyelhető meg
- Legnagyobb jel esetén kb. 120 utó rengés
- Az utó rengések rátája és átlagos amplitúdója időben csökken



Omori-törvény

- Utóregések rátája

- $n(t) \propto \frac{1}{t^p}$

- Exponens $\sim 1,1$

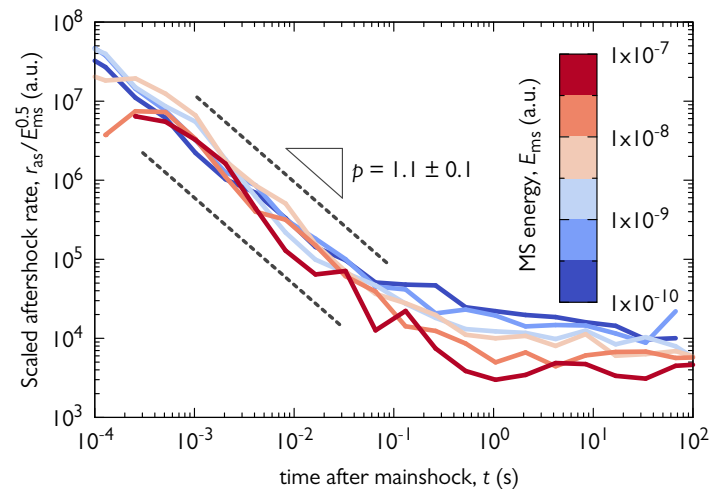
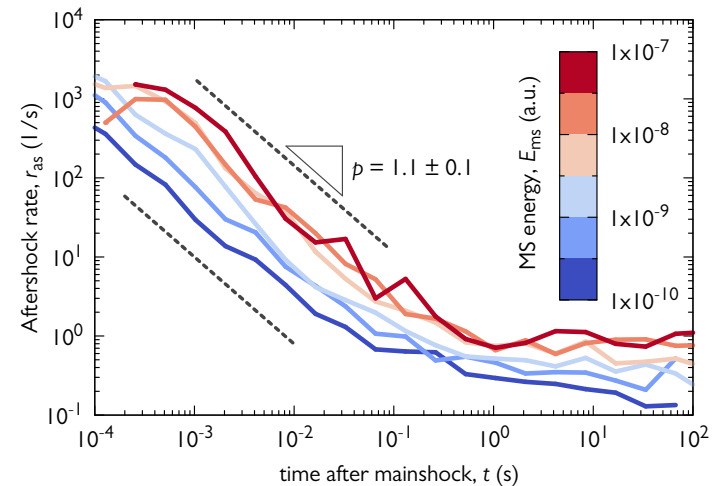
- Három nagyságrenden át kb. 100 ms-ig

- Hosszabb idők esetén konstans ráta

- Produktivitási tv.

- $n(t) \propto E_{ms}^\beta$

- Exponens $\sim 0,5$



Földrengések vs. diszlokációlavinák

	Földrengések	Diszlokációlavinák
Mechanizmus	Elcsúszás/repedés	Diszlokációmozgás
Kiterjedés	Síkban	Síkban
Tipikus méret	m	nm
Tipikus kiterjedés	km	μm
Tipikus idő	perc-hónap	ms-s
Méreteloszlás	Gutenberg-Richter	Gutenberg-Richter
Utórengések	Omori-tv. + Produkt. tv.	Omori-tv. + Produkt. tv.

Miért jó ez?

- Elsőként sikerült AE jeleket detektálni mikronos méretű próbatestek esetén
 - Új in situ mérési eljárás
- Feltártuk az akusztikus emissziós jelek kapcsolatát az őket keltő lokális deformációval
 - Lehetőséget az az akusztikus jelek gyakorlati alkalmazásának továbbfejlesztésére tömbi minták esetén
- Az AE jelek a magas mintavételezés miatt alkalmasak a diszlokációlavinák finomszerkezetének vizsgálatára
 - Elméleti statisztikus fizikai modellek ellenőrzése/kidolgozása
- További tervek:
 - Bonyolultabb szerkezetű kristályok (ponthibák/besugárzás, fcc)
 - Amorf szerkezetű anyagok

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

