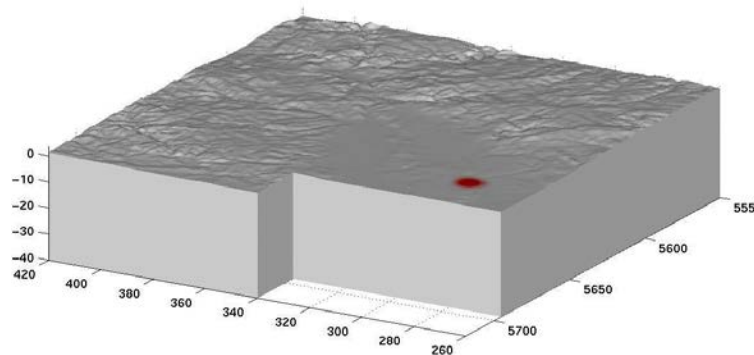


# Seismologie - fyzikální bádání, společenský přínos a očekávání

**J. Zahradník**

<http://geo.mff.cuni.cz/~jz/>

Matematicko-fyzikální fakulta  
Univerzita Karlova



Přednáška pro Učenou společnost ČR, 19. ledna 2021

Seismologie je observační věda s významným podílem modelování.

historická zemětřesení

účinky zemětřesení

měření seismický stanic

extrémní příklady

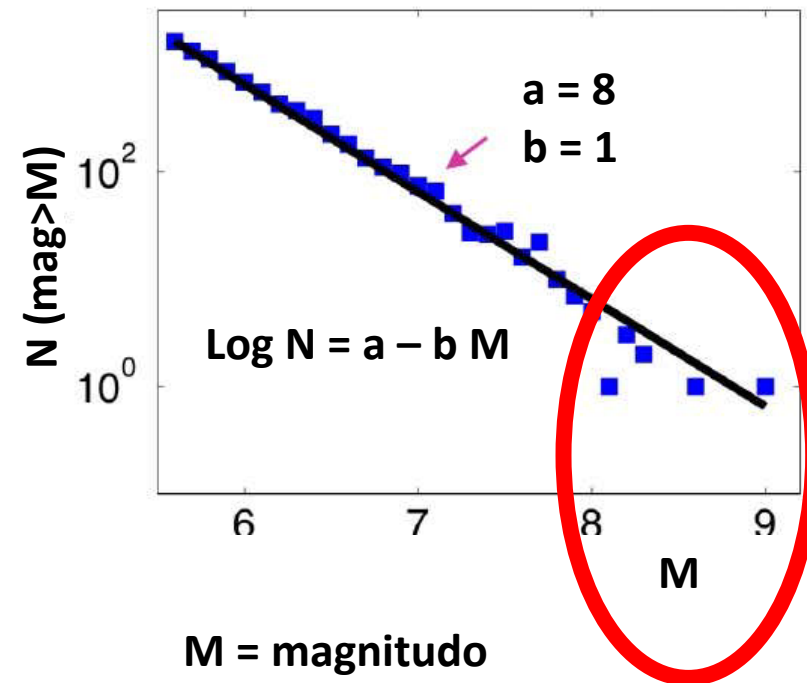
# Historická zemětřesení – vzácná data o řídkých velmi silných jevech



Lisabon 1755,  $M \sim 8.7$ , 70 000 obětí

Archiv J. Kozáka, GFÚ AV ČR

Gutenberg – Richterův zákon  
svět, 1976-2005, N za 1 rok



$M$  = magnitudo

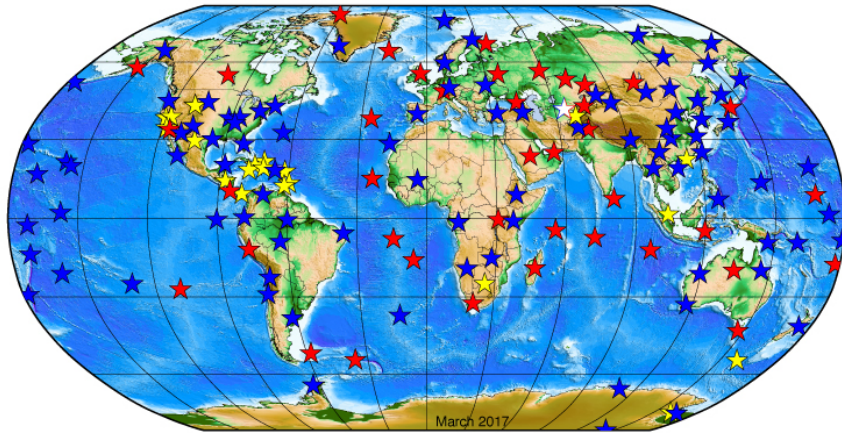
$E$  = energie

$\text{Log } E \text{ (J)} = 5 + 1.5 M$

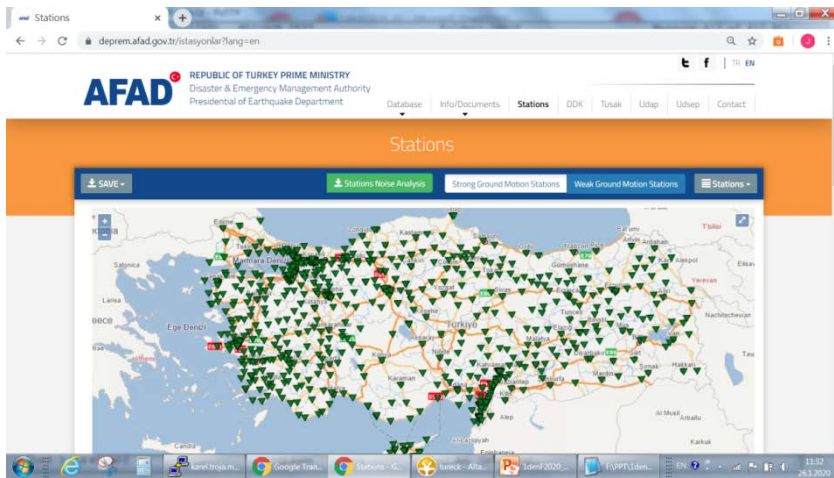
# Nedávné ničivé zemětřesení Atény 1999, M 5.9, 140 obětí



# Seismické sítě (globální, regionální, lokální)

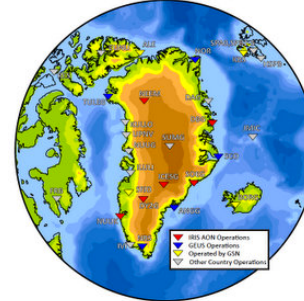


★ IRIS/IDA Stations   ★ IRIS/USGS Stations   ★ Affiliate Stations  
★ Planned Stations

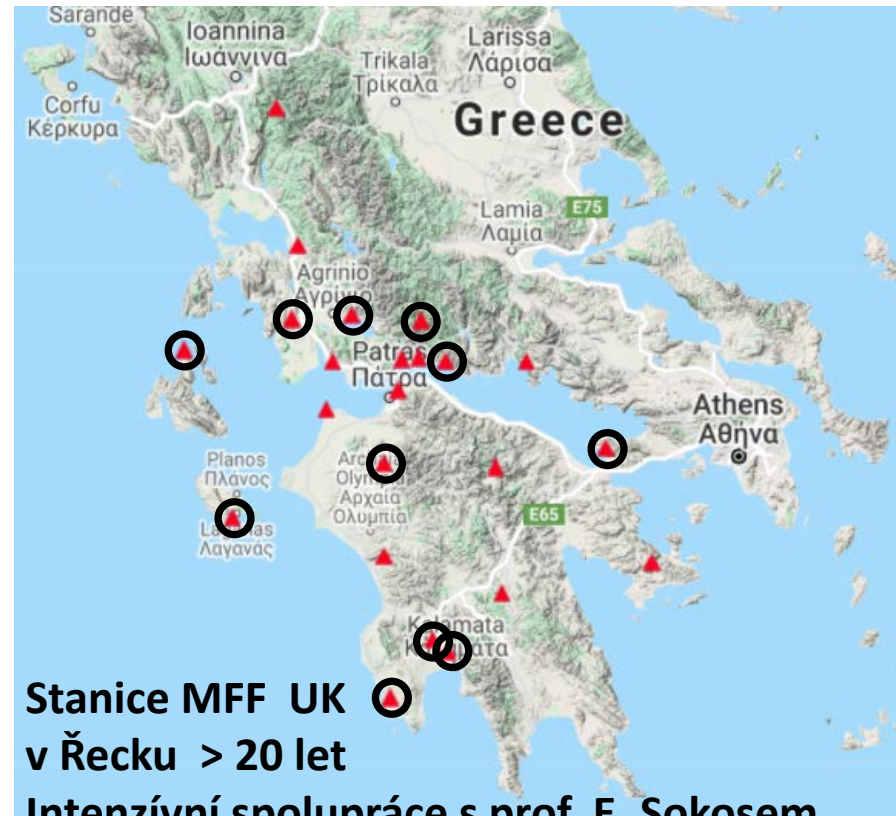


Turecko, hustá síť pro silná zemětřesení

Greenland Ice Sheet Monitoring Network



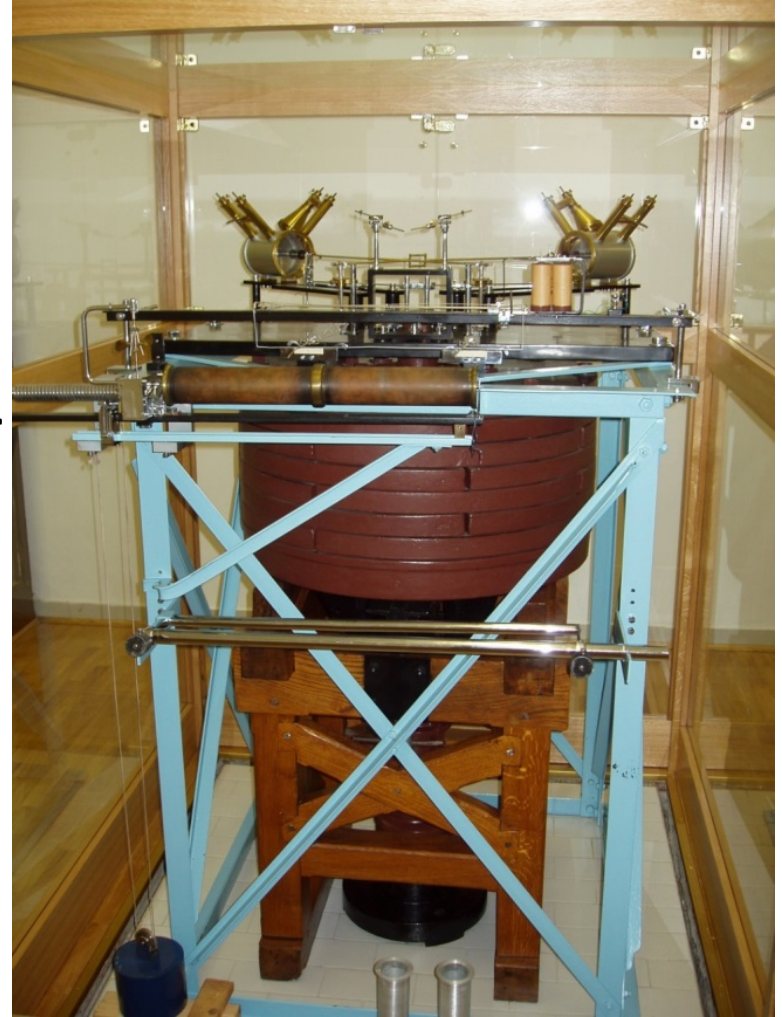
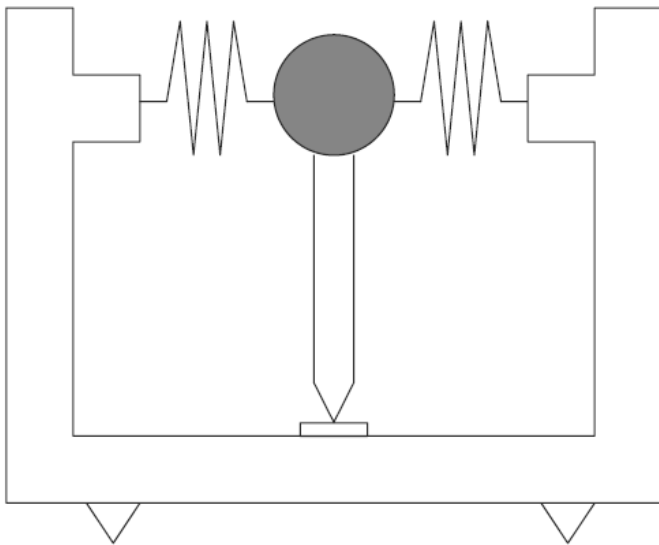
Grónsko  
lámání ledovců



Stanice MFF UK   ●  
v Řecku > 20 let  
Intenzivní spolupráce s prof. E. Sokosem  
(univerzita v Patrasu)

# Seismografy - historie

Např.: Wiechert 1909  
mechanický typ  
setrvačná hmota 1000 kg,  
vlastní perioda 10 s  
lineární harmonický oscilátor



# Využití historických záznamů

ISSN 0016-8696 · Gerlands Beitr. Geophysik · Leipzig · 96 (1987) 5 · S. 438–447

## Studying earthquake ground motion in Prague from Wiechert seismograph records

By O. Čadek, Prague\*)



Dnes:  
Člen Učené společnosti ČR

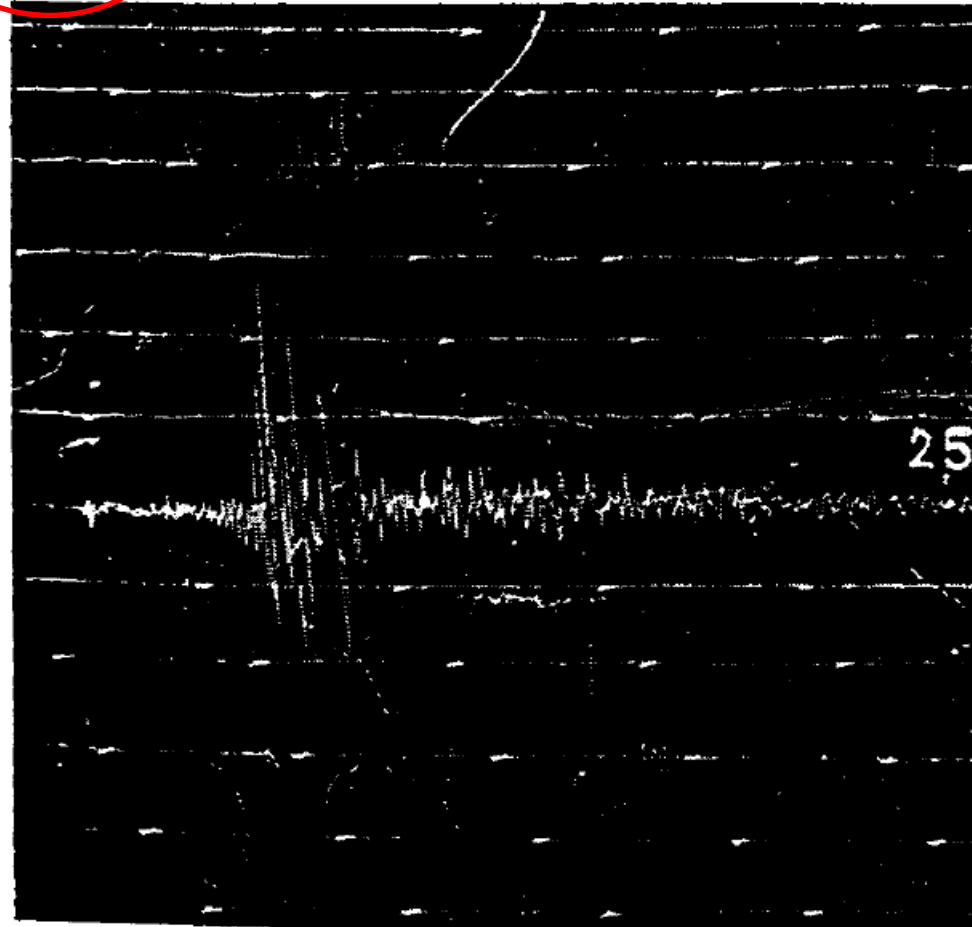
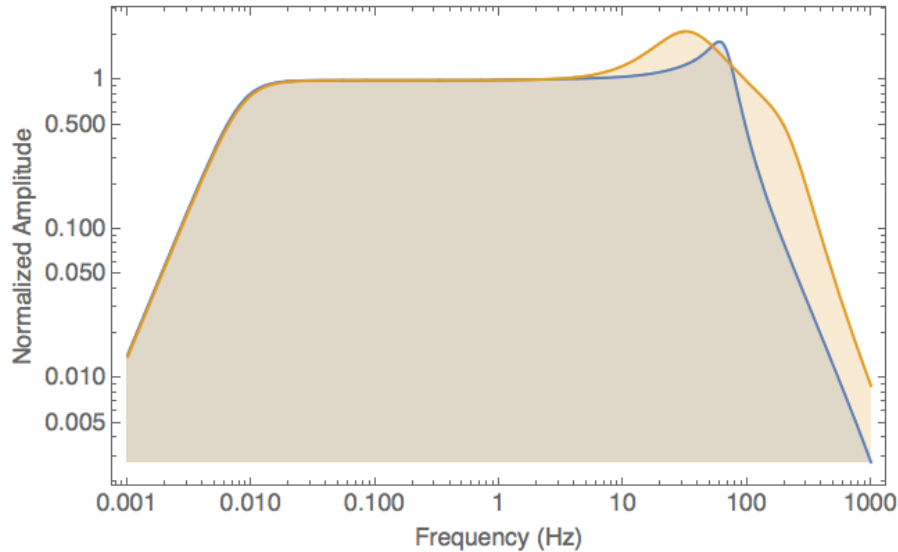


Fig. 1. A typical example of a WIECHERT seismograph record from the German earthquake of June 27, 1935. Magni

# Seismografy - současnost

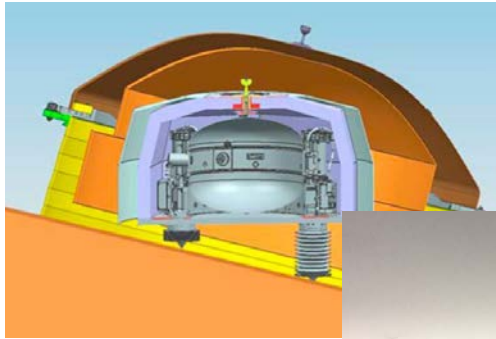


Např. Guralp  
setrvačná hmota 0.1 kg,  
vlastní perioda 100 s  
**širokopásmové**  
**zpětnovazební elmag. kompenzace**

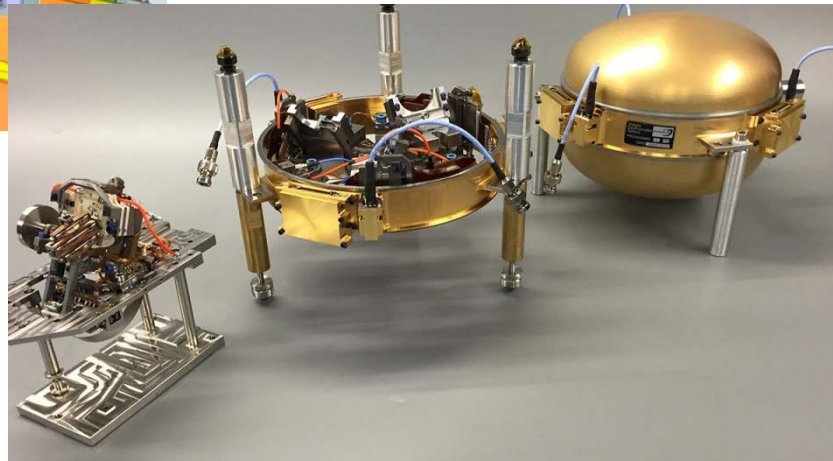




# Seismografy mise InSight, Mars

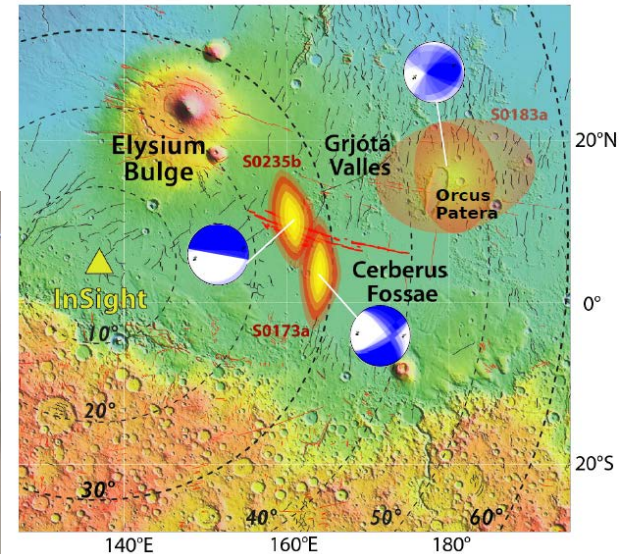


Přístroje se podařilo dopravit a uvést v činnost.

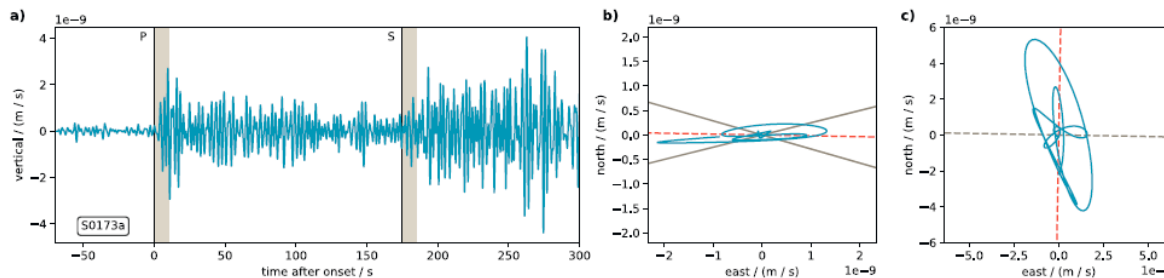


Lognonné et al.

Clinton et al.



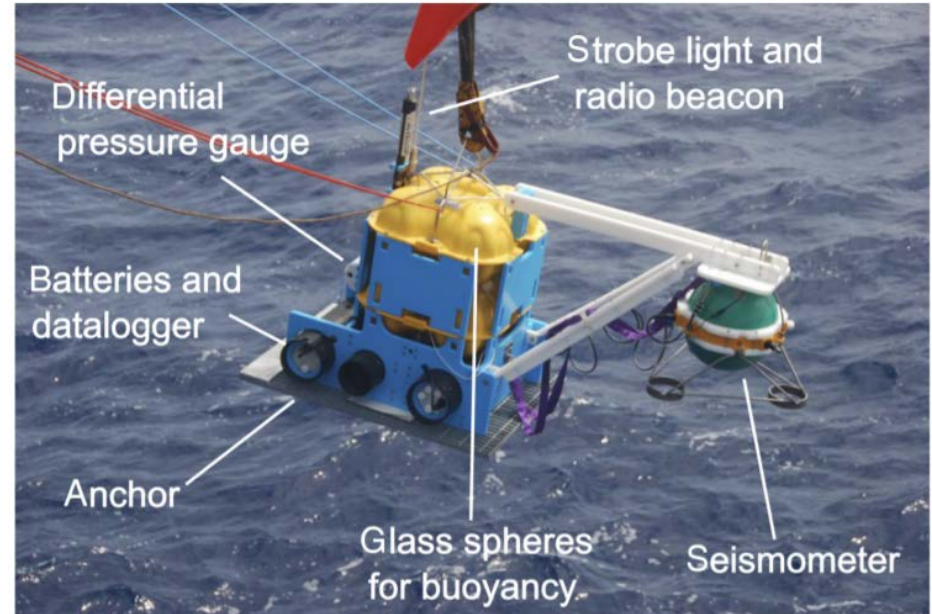
Brinkman et al.



Význam 1 stanice nelze přeceňovat.

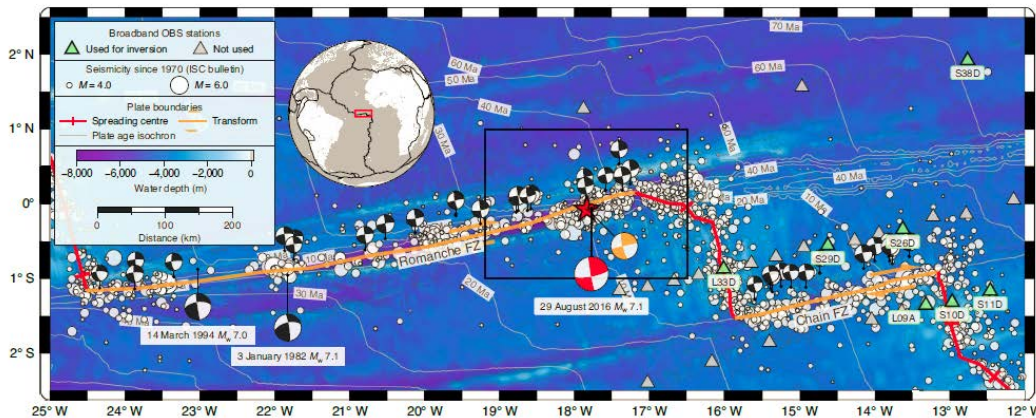
Zajímavé hlavně pro vývoj přístrojů potřebných na Zemi.

# Seismografy na mořském dně (OBS)



## ARTICLES

## NATURE GEOSCIENCE



Zúčastnili jsem se výzkumu  
zemětřesení Romache M7, 2016  
na transformním zlomu,  
části středoatlantického hřbetu

Hicks et al.

# Seismologické extrémy

2008 Iwate-Miyagi,  $M$  6.9

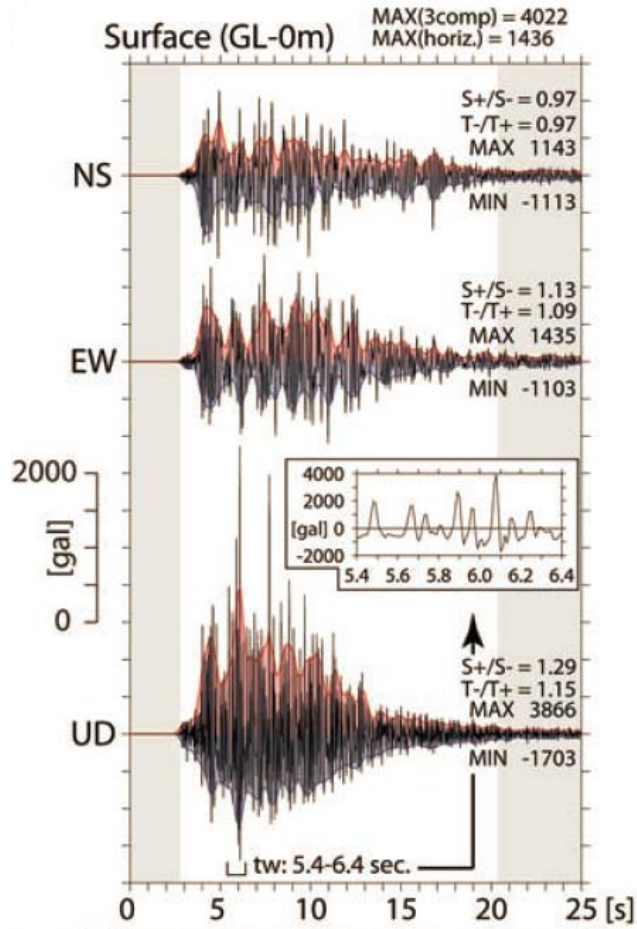
$E \sim 10^{15}$  J

Zrychlení téměř 4 g

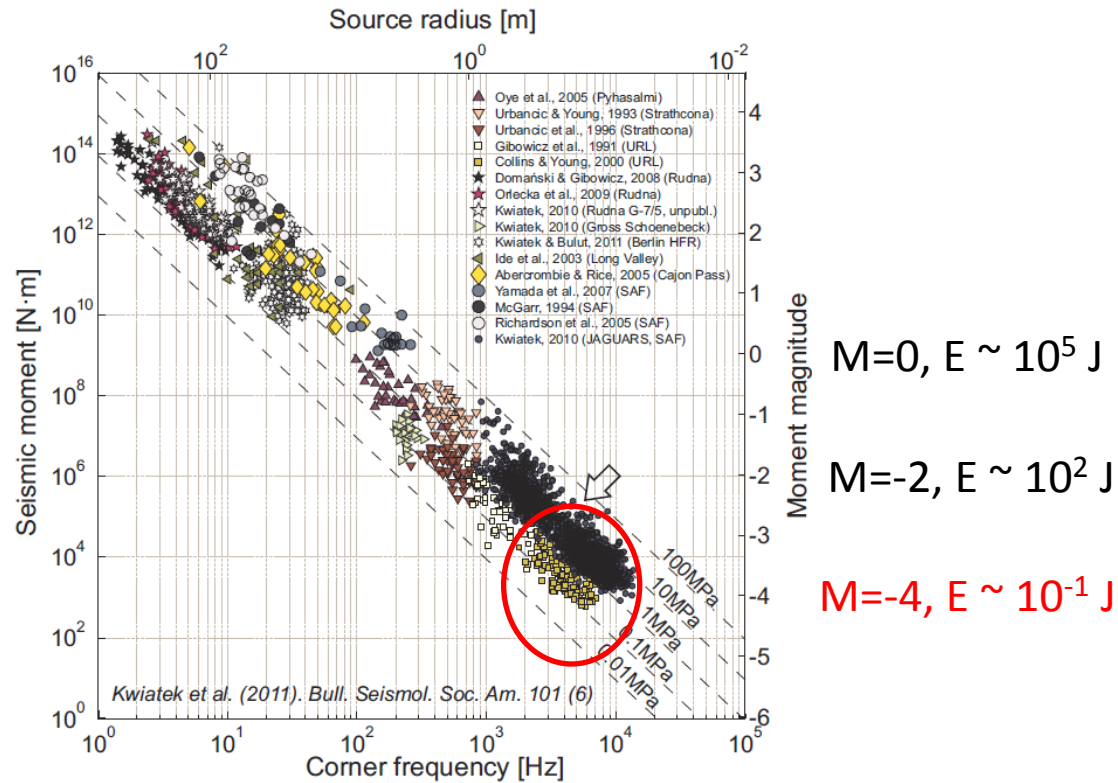
South-Africa gold mines

Nano-zemětřesení,  $M \sim -2$

Piko-zemětřesení,  $M \sim -4$



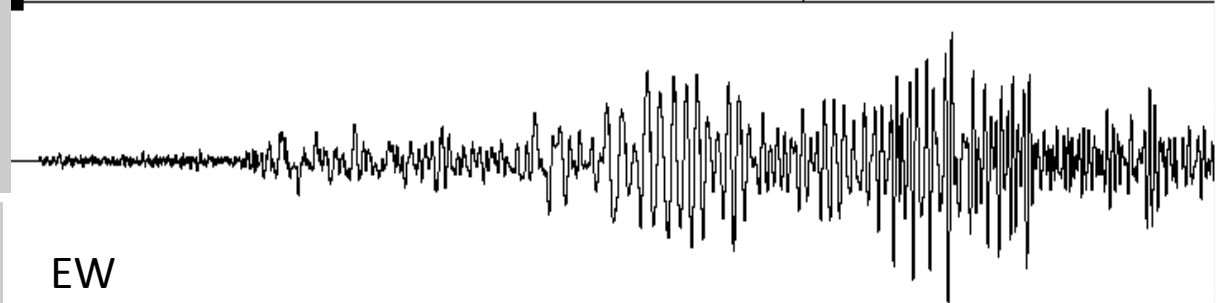
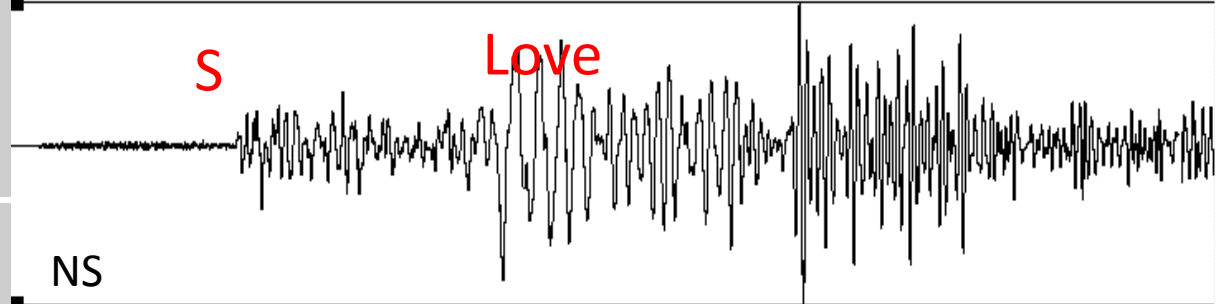
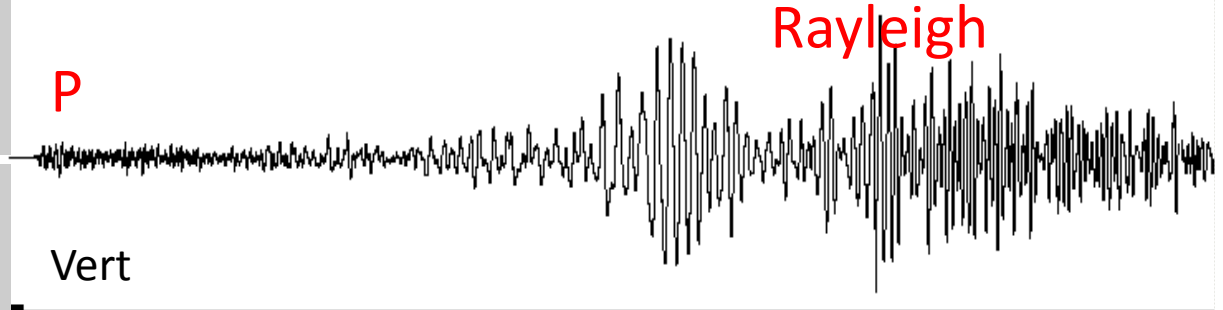
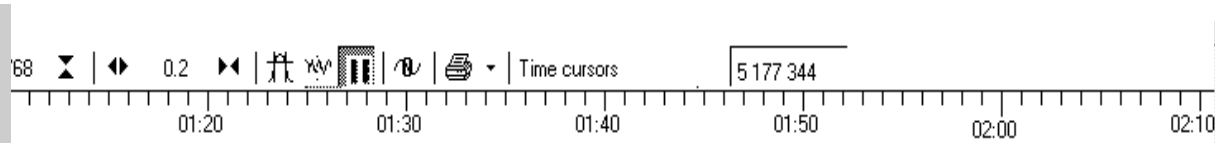
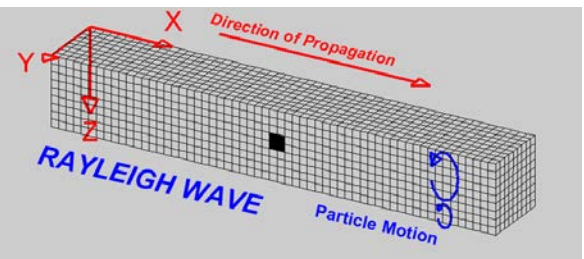
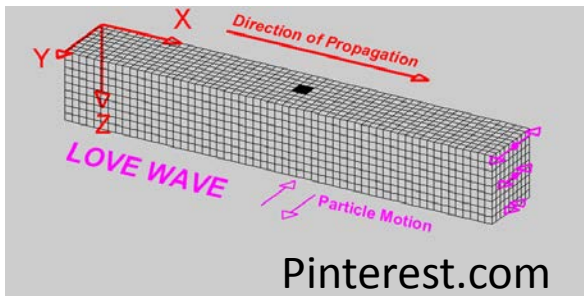
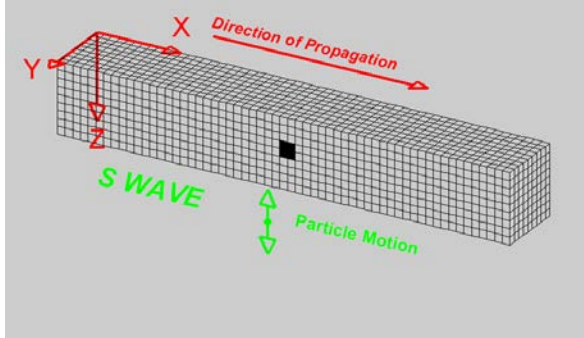
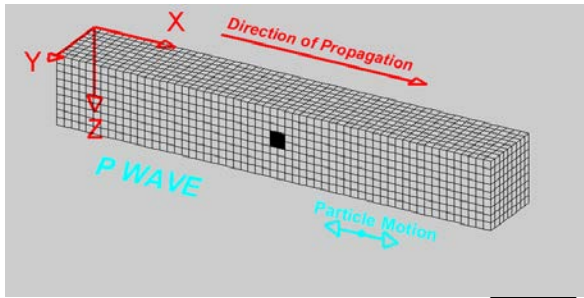
Aoi et al., Science 2008



Kwiatek et al., BSSA 2011

# Extrémy - Sumatra 2004, Mw 9.1

(1-hodinový záznam na seismické stanici Praha)



rychlost 1 mm/s, perioda 60 sec... posunutí ~ 1 cm  
deformace až  $10^{-7}$

# Významná zemětřesení která urychlila pokrok v seismologii a ve společnosti

- Kobe, Japonsko **1995**, M6.9, cca 5 000 obětí ... prudká modernizace celostátní **seismické sítě, včetně stanic do vrtů**
- Izmit, Turecko **1999**, M7.6, 17 000 ... **modernizace sítě stanic** pro silné pohyby
- Parkfield, Kalifornie **2004**, M6.6, 0, ... **konec optimismu o krátkodobých předzvěstných efektech**
- Sumatra **2004**, M9, 280 000 ... modernizace **rychlého varování před tsunami**
- Tohoku, Japonsko **2011**, M9, 15 000 ... zvýšení **zabezpečení jaderných elektráren**

Seismická data se užívají k výzkumu elastických parametrů zemského nitra, čili pro strukturní studie.

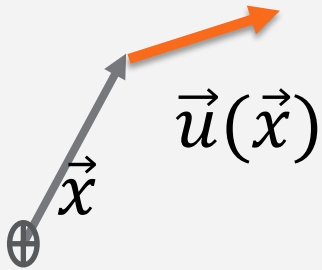
mechanika kontinua

malé elastické deformace

1D modely

3D tomografie

# Elasticita



$$\vec{u}(\vec{x}, t)$$

Vektor posunutí =  
vlny

$$\tau_{ij} v_j = T_i$$

Vektor trakce  $T$   
na ploše s normálou  $v$

$$\varepsilon_{ij} = (1/2) (u_{i,j} + u_{j,i})$$

Tenzor (malé) deformace

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

Tenzor napětí a Hookův zákon

**Tenzor elastických konstant  $C$**

resp.  $\lambda$  a  $\mu$  v izotropním prostředí,

Souvisí s rychlostí vln P a S

$$\tau_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i$$

Pohybová rovnice

(zde bez zdrojů)

# Rozhraní v Zemi (plochy nespojitosti C)

$$C_{ijkl}^+ = 0$$

$$C_{ijkl}^- \neq 0$$

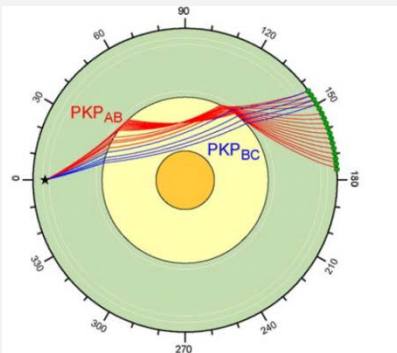
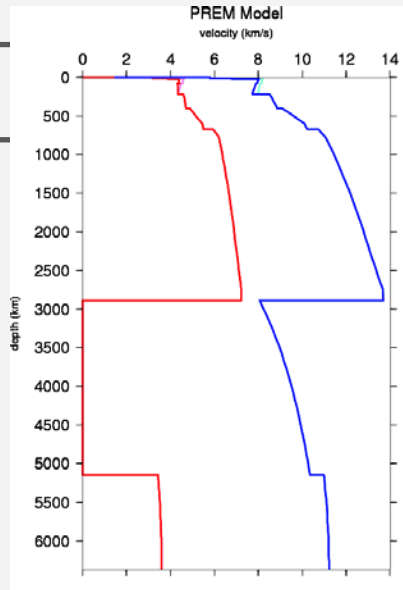
Volný povrch Země

Vnitřní rozhraní

$$C_{ijkl}^+ - C_{ijkl}^- = [\mathbf{C}] \neq 0$$

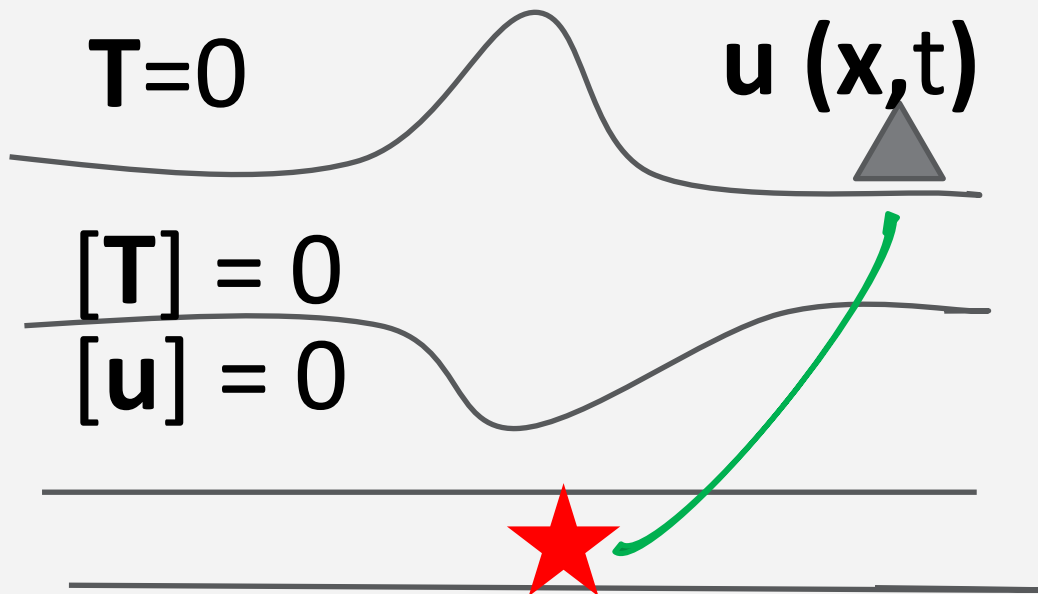
$$\mathbf{C}(\mathbf{x}) = ?$$

{strukturální seimologie}





# Výzkum elastických parametrů nitra pomocí seismických vln



Greenův tenzor:  
analytické řešení pro homogenní prostor  
maticové řešení pro vrstevnaté prostředí  
numerické řešení pro 3D prostředí

„Známe“ zdroj vlnění a vlny  $u$ ,  
počítáme  $C$

$$\tau_{ij,j} + \tilde{\tau}_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i$$

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} u_{k,l}$$

$$\rightarrow C(\mathbf{x})$$

**A obráceně:**

„Známa“ struktura ( $C$ )

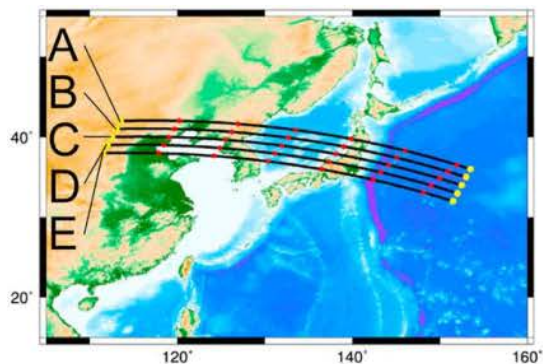
→ Možnost výpočtu

impulzní odezvy  $u$

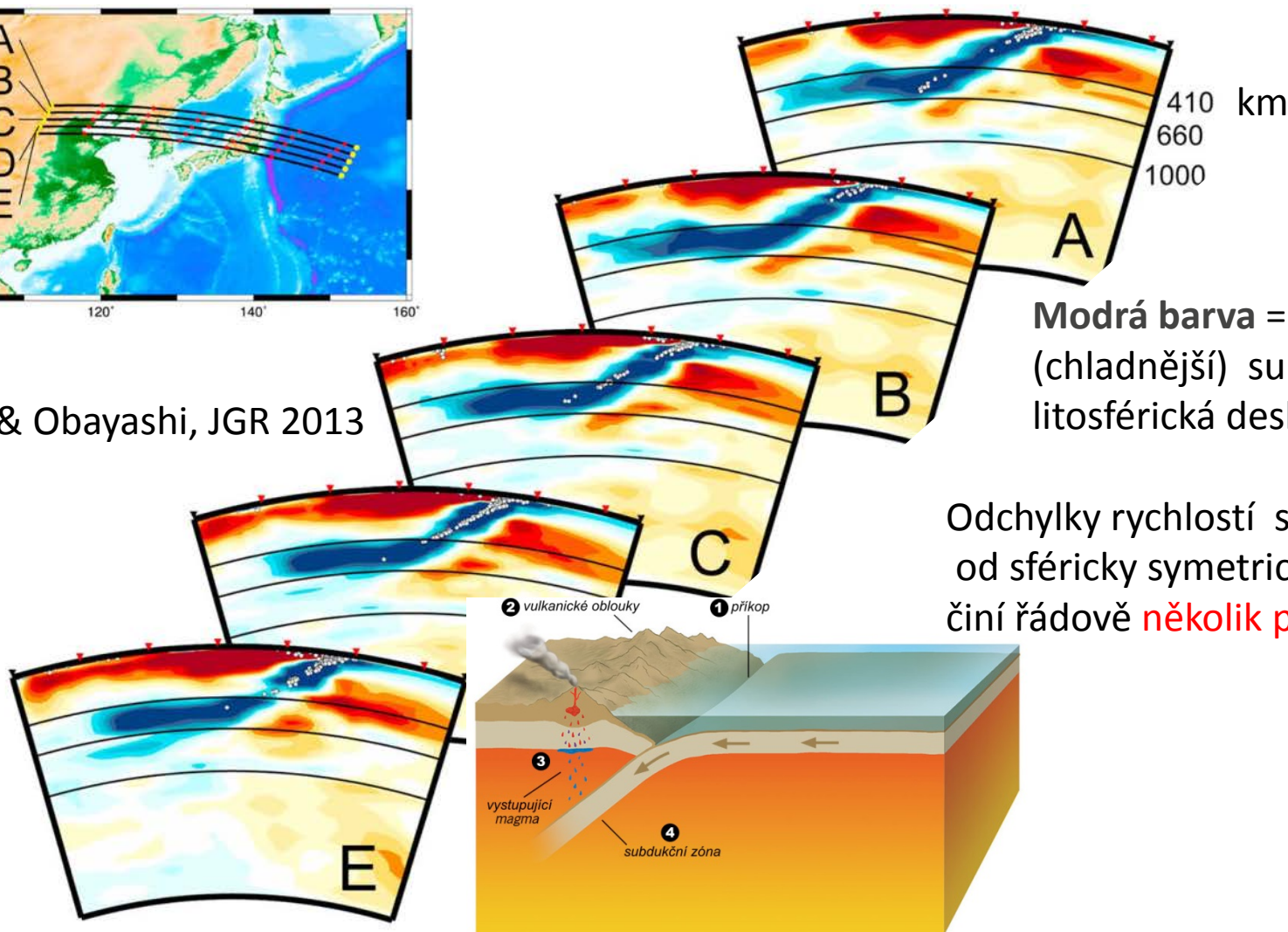
pro vtištěné síly ve zdroji

{Greenův tenzor}

# Seismická tomografie zemského nitra (např. 3D modely subdukce)



Fukao & Obayashi, JGR 2013



**Modrá barva** = rychlejší  
(chladnější) subdukcující  
litosférická deska.

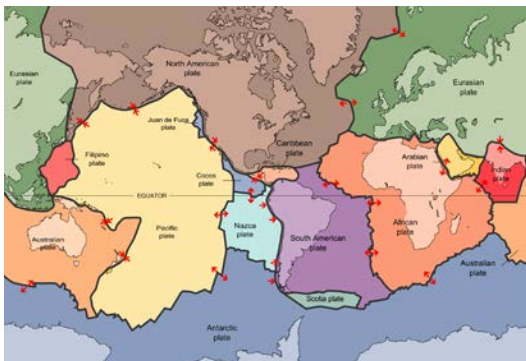
Odchytky rychlostí seismických vln  
od sféricky symetrického modelu  
činí řádově **několik procent**.

# Zemětřesení je krátkodobý deformačních proces na zlomu, související s dlouhodobými pohyby desek.

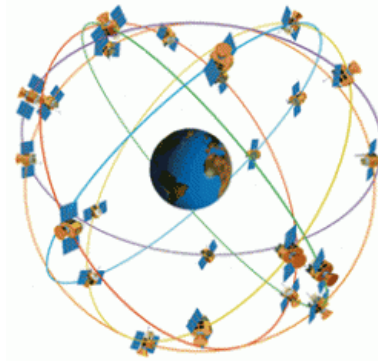
desky jako tuhá tělesa

desky jako pružná tělesa

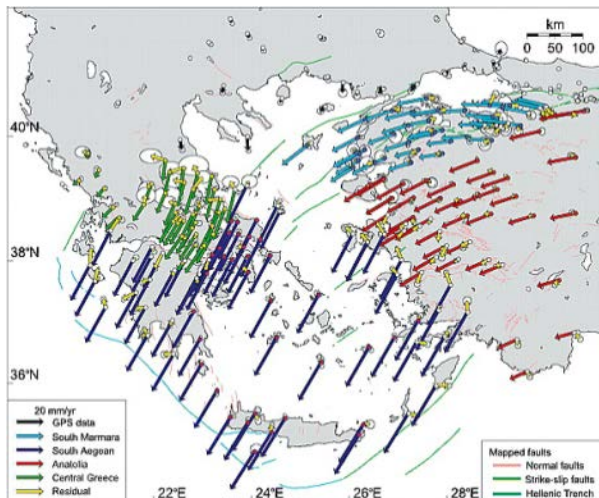
křehké porušení kontaktu na (existujícím) zlomu



# Deskové pohyby (cm/rok)

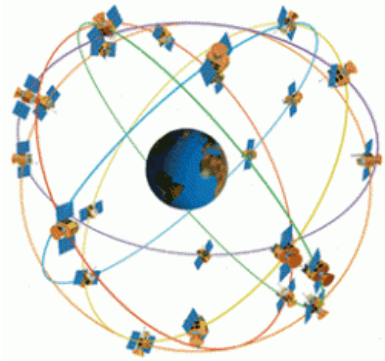


**GPS:** Radiový signál z družice obsahuje velmi přesný čas a polohu družice, umožňuje stanovit polohu přijímací stanice.

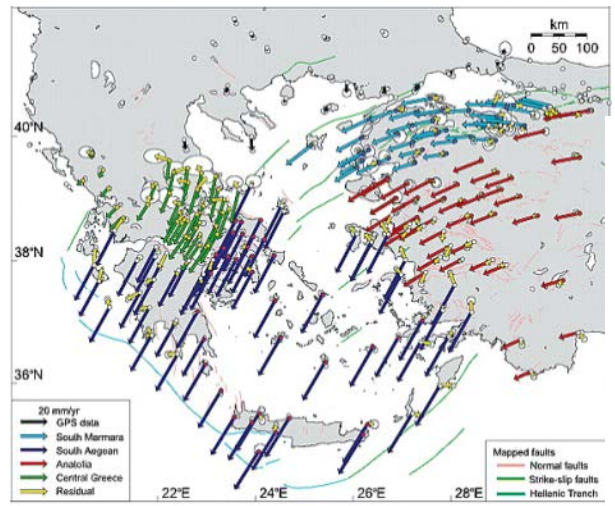


**Diferenciální GPS** (s „pevnou“) referenční stanicí dosahuje **centimetrové** rozlišení.

# Lokální (pomalá elastická) deformace na kontaktu desek

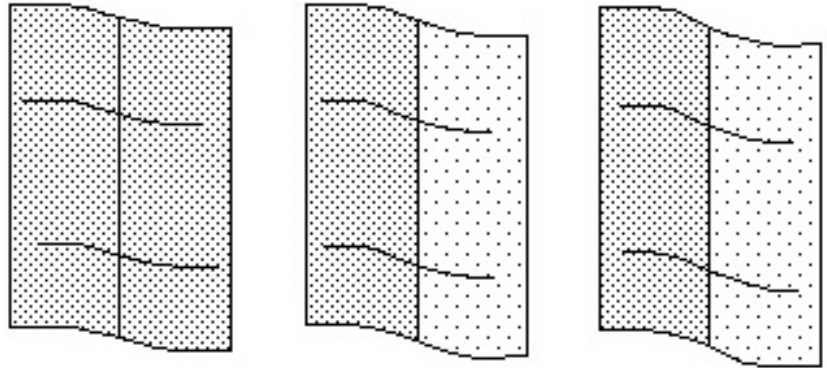


**GPS:** Radiový signál z družice obsahuje velmi přesný čas a polohu družice, umožňuje stanovit polohu přijímací stanice.



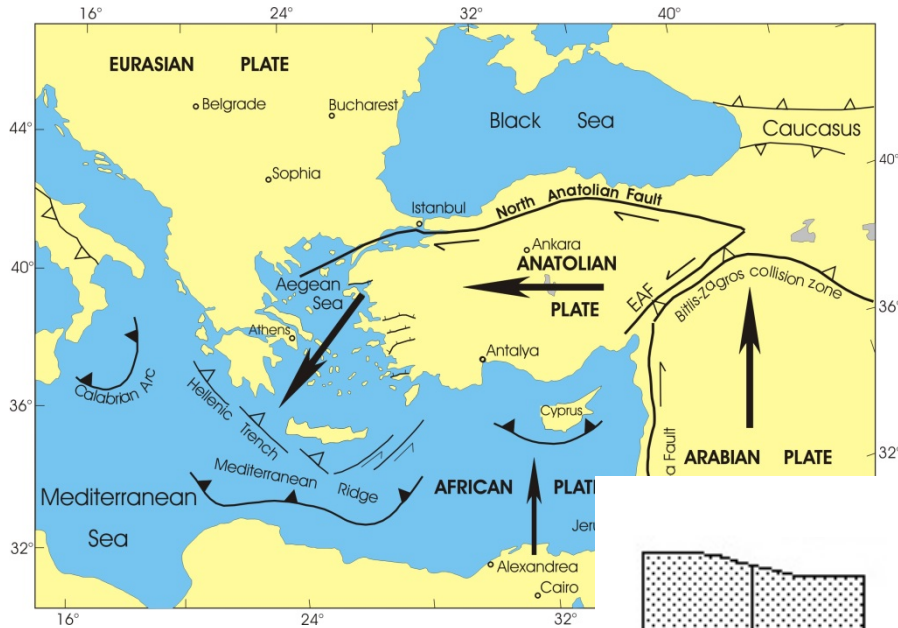
**Diferenciální GPS** (s „pevnou“) referenční stanicí dosahuje **centimetrové** rozlišení.

**Desítky-stovky let, cm/rok**



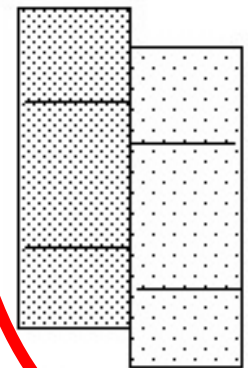
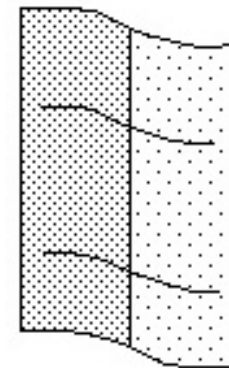
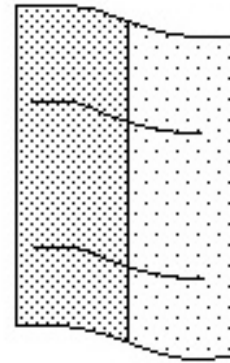
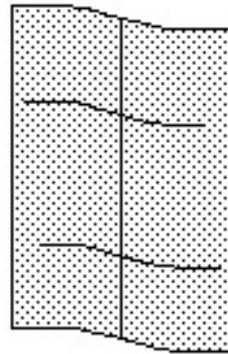
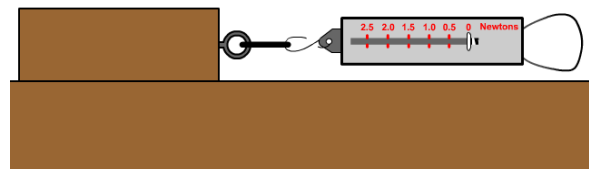
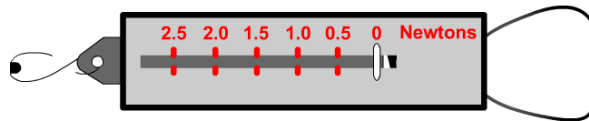
**Zlom nepraská (tření, pevnost)**

# Pomalá (elastická) deformace a rychlá relaxace zaklesnutých úseků



Desítky let  
GPS

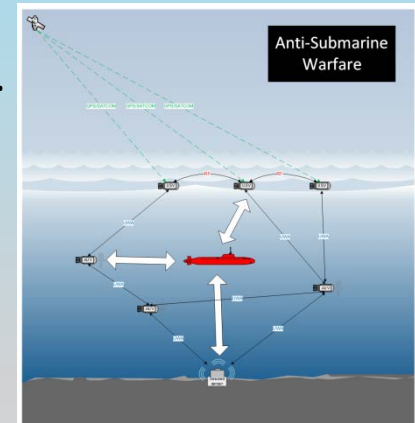
Sekundy,  
seismologie



Jen rychlá deformace vyvolá vlnění

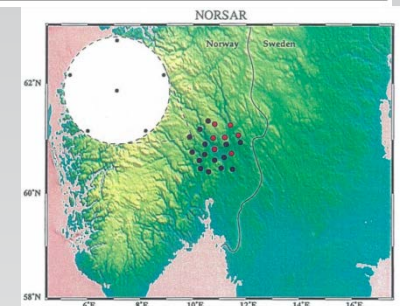
# Civilní (i seismologické) využití původně hlavně vojenských projektů

**Sledování ponorek („anti-submarine warfare“)** - hydrofony, OBS ...  
civilní použití zlepšilo studia **podmořských zemětřesení**,  
analýza **hlasů velryb**, atd.



**Jaderné zkoušky - seismické skupinové stanice („arrays“)** ... výrazně  
zpřesnily znalosti o **stavbě Země**, struktuře šumu, atd.

NORSAR



**Zbraně** (rakety s plochou drahou letu , bezpilotní letadla) -  
**vývoj GPS** ... od 80. let částečné uvolnění pro široké civilní  
použití, včetně **seismologie, měření deformací**

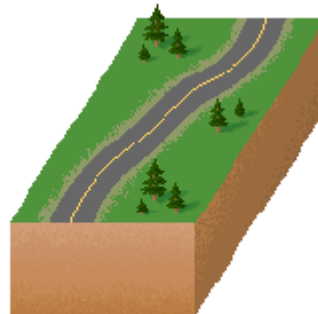


# Seismická data informují o časoprostorovém vývoji (smykových = střižných) trhlin na zlomech.

trhlina jako nespojitost posunutí

momentový tenzor

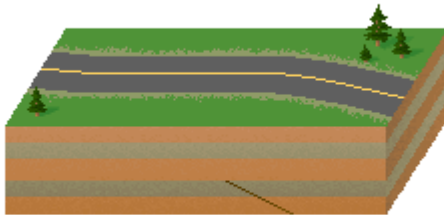
přímá a obrácená kinematická úloha





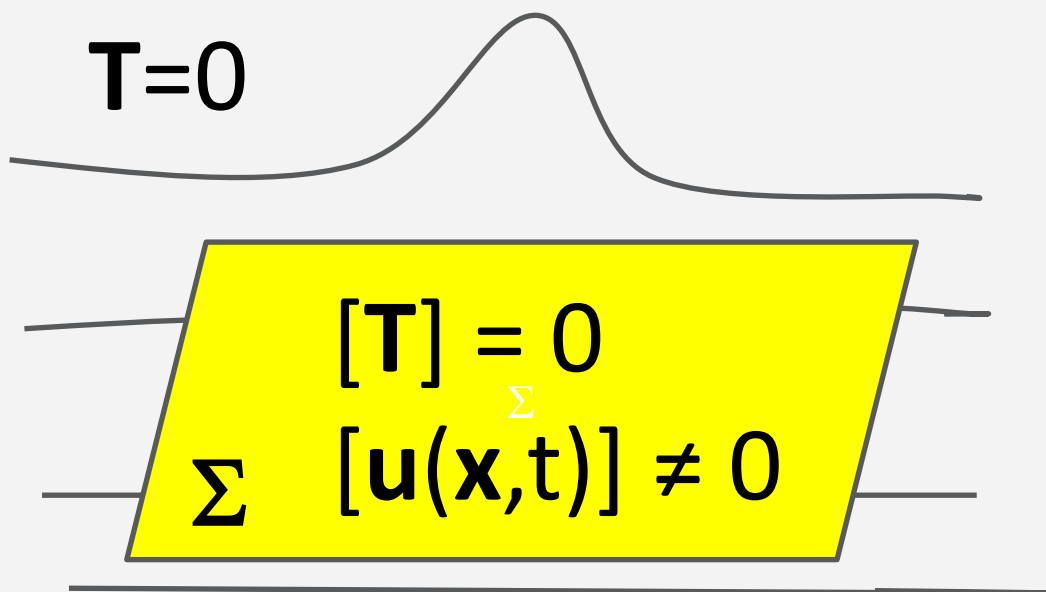
# Seismická data informují o časoprostorovém vývoji (smykových) trhlin na zlomech.

Trhliny většinou **pod** zemským povrchem.



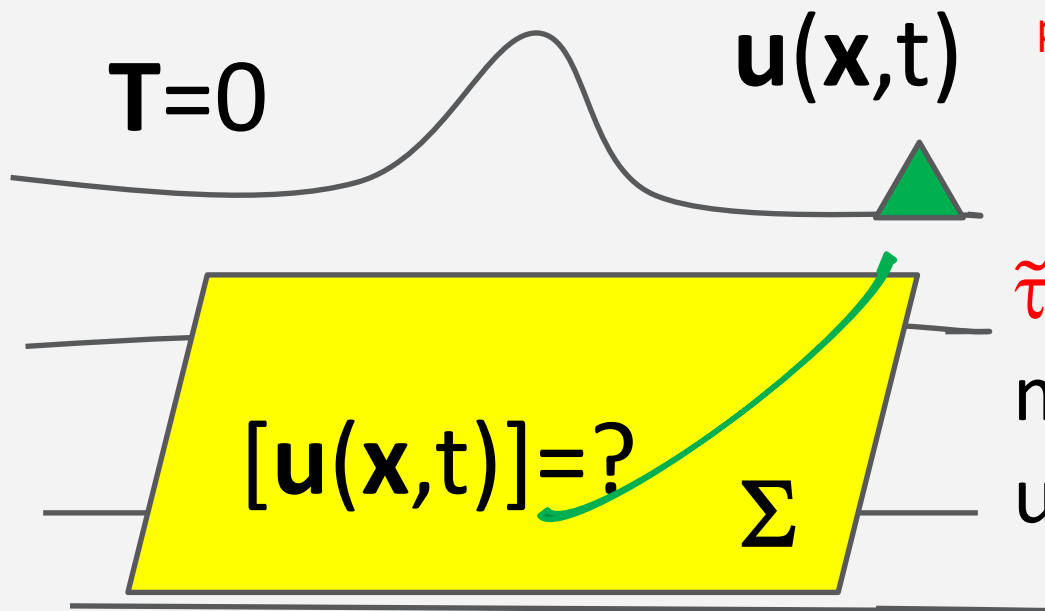
Zde výjimečný případ, trhliny i na povrchu.

# Zlom jako okrajová podmínka pro šíření vln (nespojitosť posunutí)



$[u]$  ... trhlina, skluz  
{kinematický model  
zemětřesného zdroje}

# Výzkum kinematiky zlomového procesu (obrácená úloha, od vln ke zdroji)



„Známe“ prostředí  $\mathbf{C}$  a vlnové pole  $\mathbf{u}$ ,  
počítáme model zdroje (trhliny)  $[\mathbf{u}]$ .

$$\tau_{ij,j} + \tilde{\tau}_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i$$

$$\tilde{\tau}_{ij} = m_{ij} \delta(\Sigma)$$

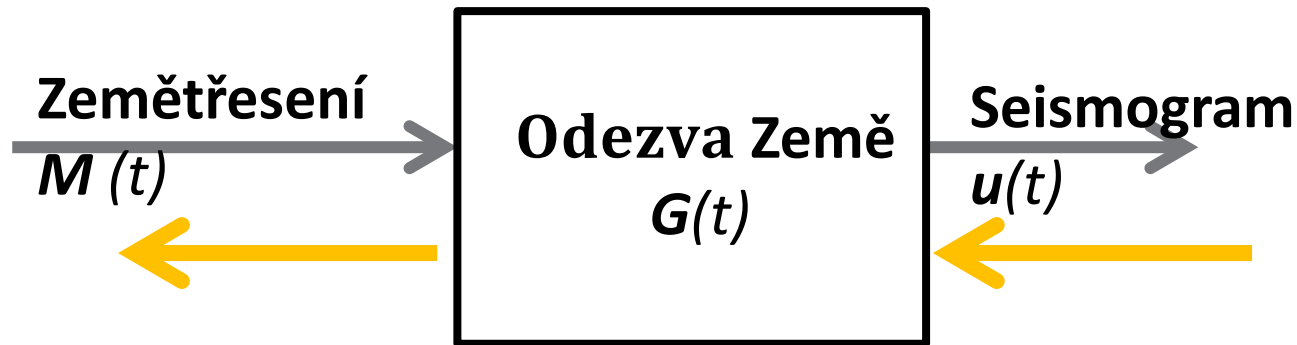
$$m_{ij} = C_{ijkl} [u_k] v_l$$

$$u_i = \int_{\Sigma} m_{pq} * G_{ip,q} d\Sigma$$

$\mathbf{G}$  = Greenův tenzor  
 $\mathbf{m}$  = tenzor hustoty  
 seismického momentu  
 \* = konvoluce

→  $[\mathbf{u}(x,t)]$   
 {časoprostorový vývoj skluzu  
 na zlomové ploše}

# Bodová aproximace zemětřesení – momentový tenzor **M**



Posunutí  
na povrchu

Odezva  
prostředí

Zdroj  
vlnění

$$u_i = G_{ip,q} * \left( \int_{\Sigma} m_{pq} d\Sigma \right) = G_{ip,q} * M_{pq}$$

Vlastní čísla tenzoru **M** charakterizují typ porušení.  
Většinou čistý smyk, **[u]** v rovině zlomu.

# Zemětřesení v lednu r. 2020, Mw 6.8

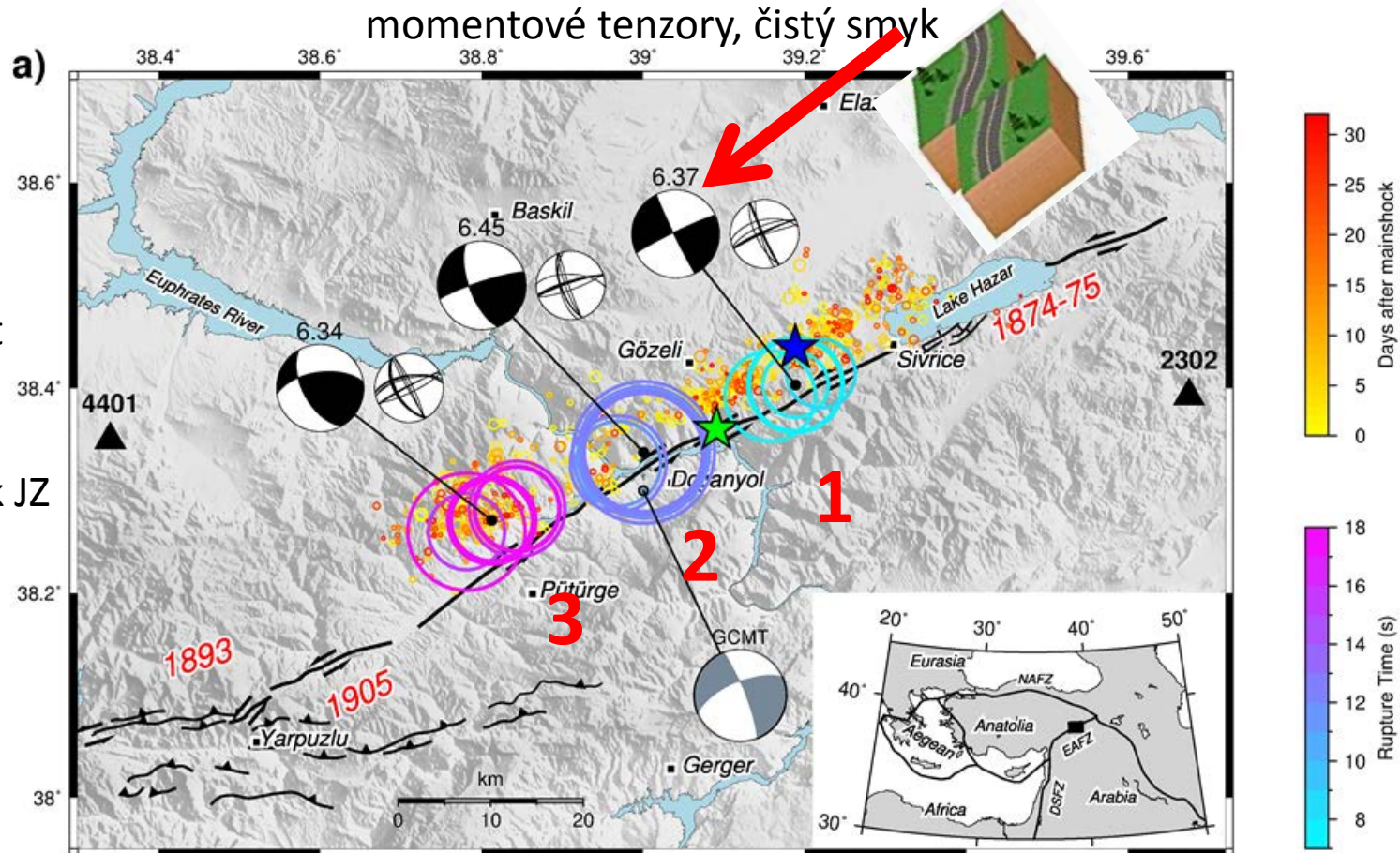
## Elazig, Turecko, východo-anatolský zlom

Tři hlavní **epizody** porušení zlomu („strike-slip“), **1-3** a jejich neurčitost

**Šíření trhliny** po zlomu od SV k JZ

**Trvání:**  
< 20 sekund

**Délka :**  
> 40 km



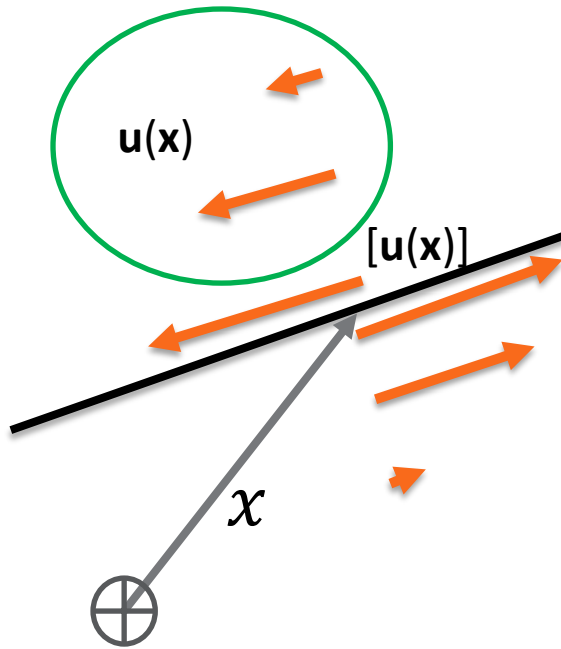
Bohatší informaci o zemětřesení poskytuje kombinace seismických dat s daty družicové geodézie.

GPS měření

InSAR měření

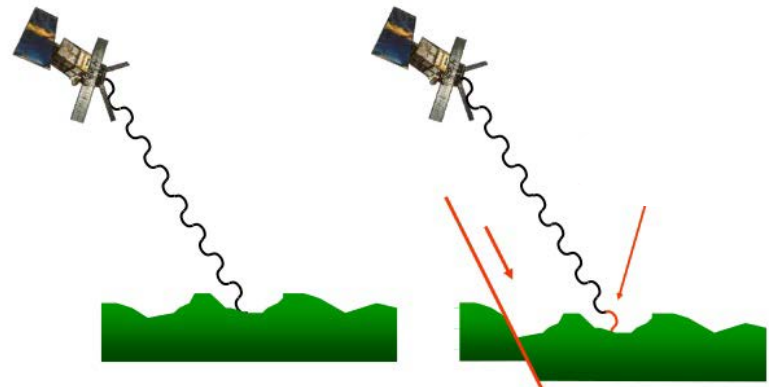
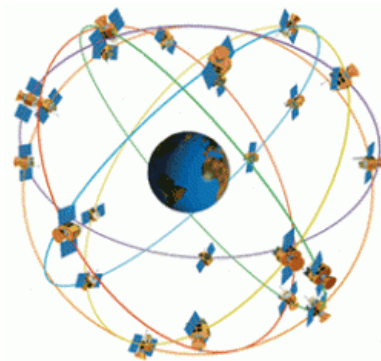
interpretace

# Finální posunutí na zlomu $[u(x)]$ (nespojité) a mimo něj $u(x)$ (spojité), při zemětřesení

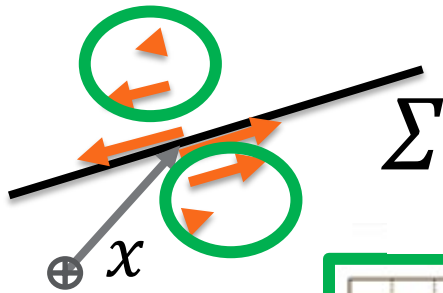


Výsledkem relaxace desek mimo zlom je i **statické (nevratné) posunutí  $u$** .

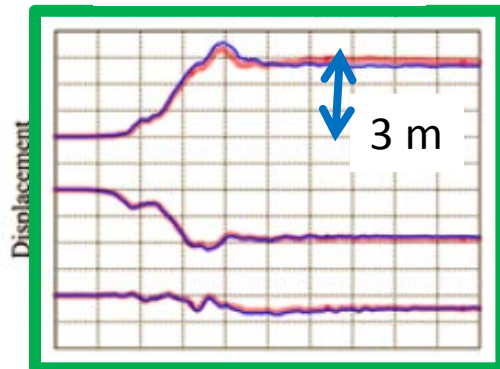
Mimo zlom je toto „**kosesimické posunutí**“ pozorovatelné metodami **družicové geodézie, GPS a InSAR**. V ČR: prof. J. Kostecký



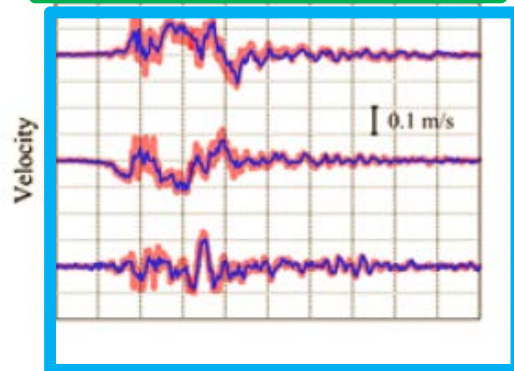
# Seismická a GPS data, M9 Tohoku 2011



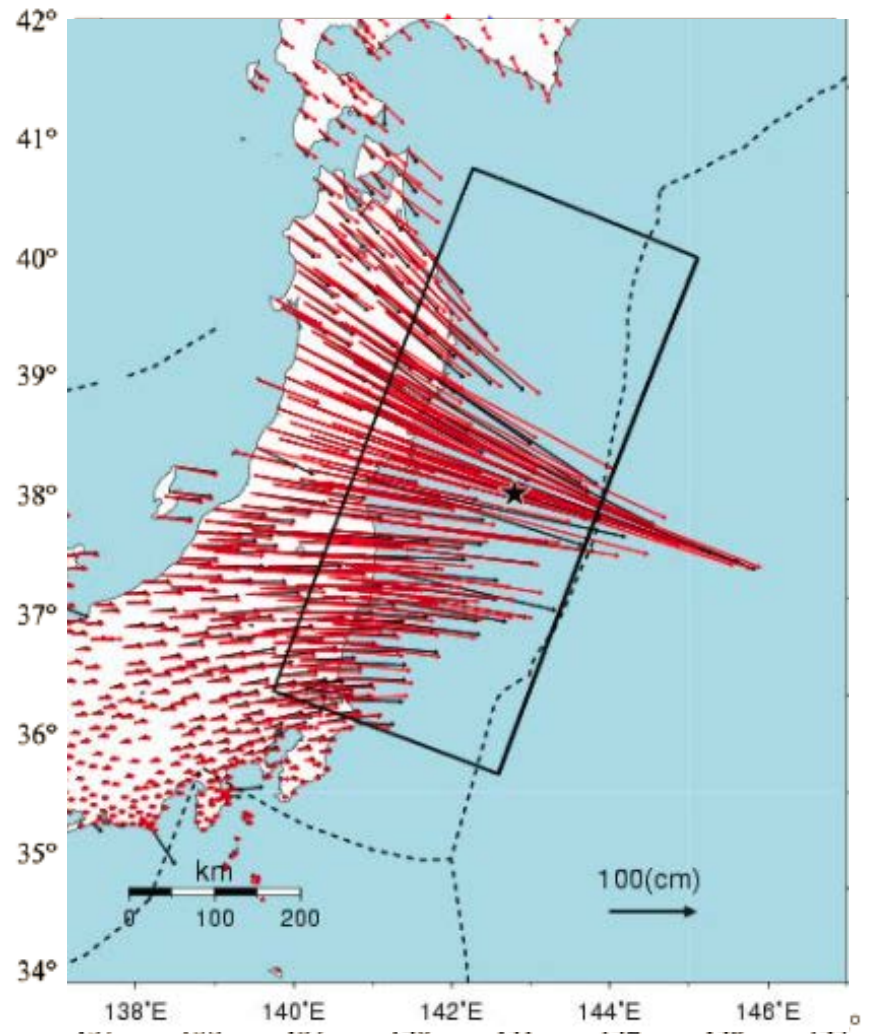
Nevratné  
posunutí  
mimo zlom,  
funkce času



Vratné  
posunutí  
mimo zlom,  
funkce času  
(kmity,  
seismogramy)

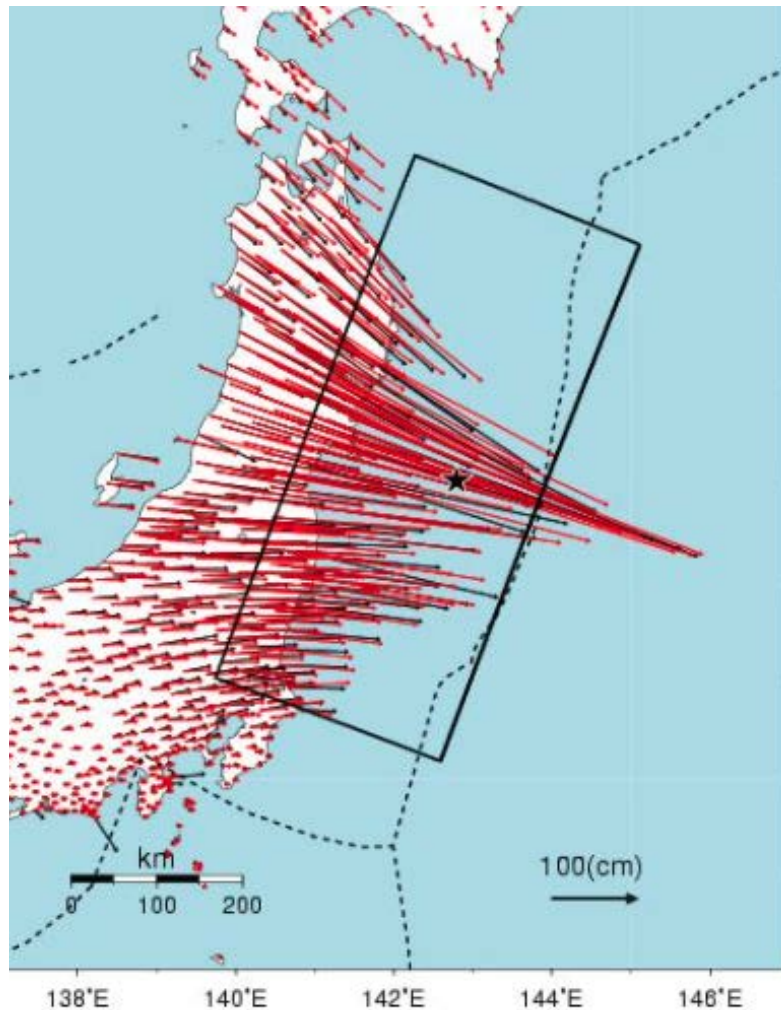


Wang et al., BSSA 2013

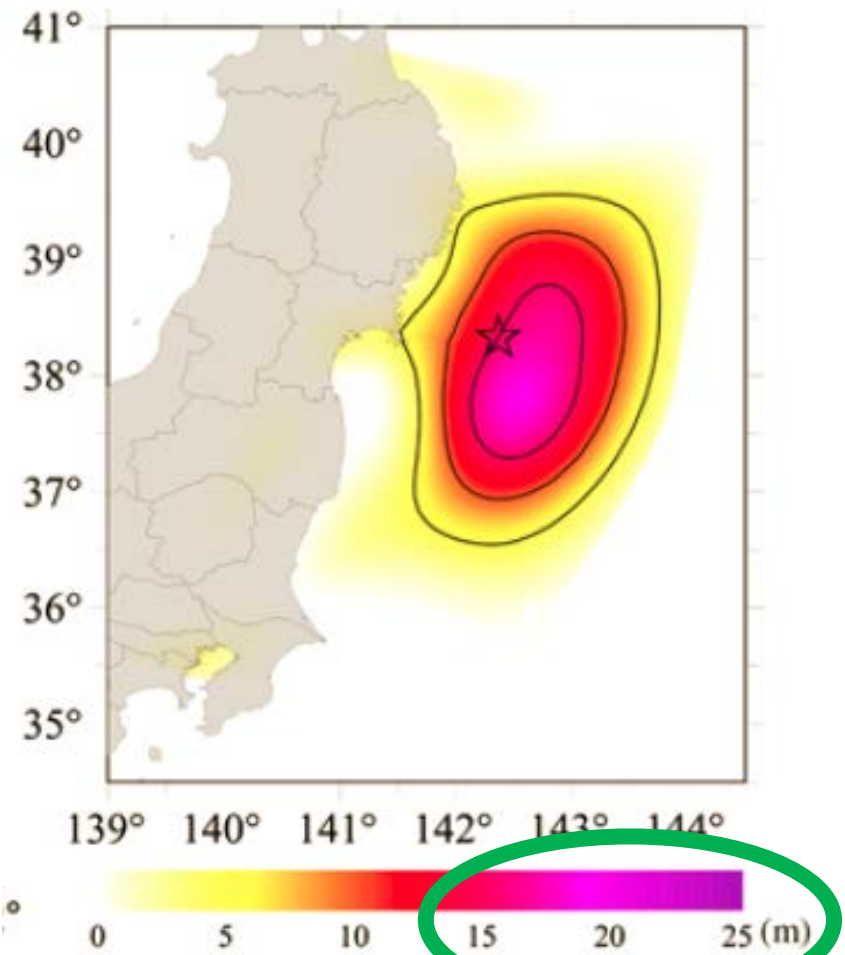




# Zemětřesení Tohoku 2011, koseismická posunutí, GPS a interpretace



Finální rozložení trhlin na zlomu

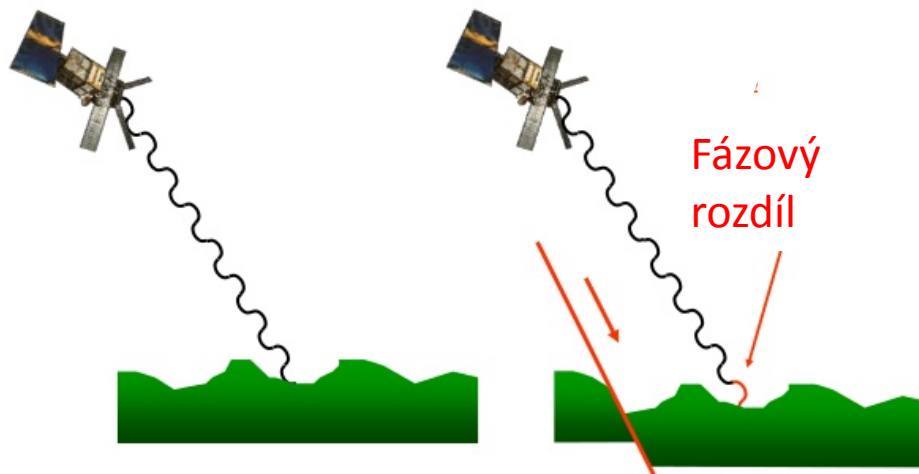


# Zemětřesení Tohoku 2011

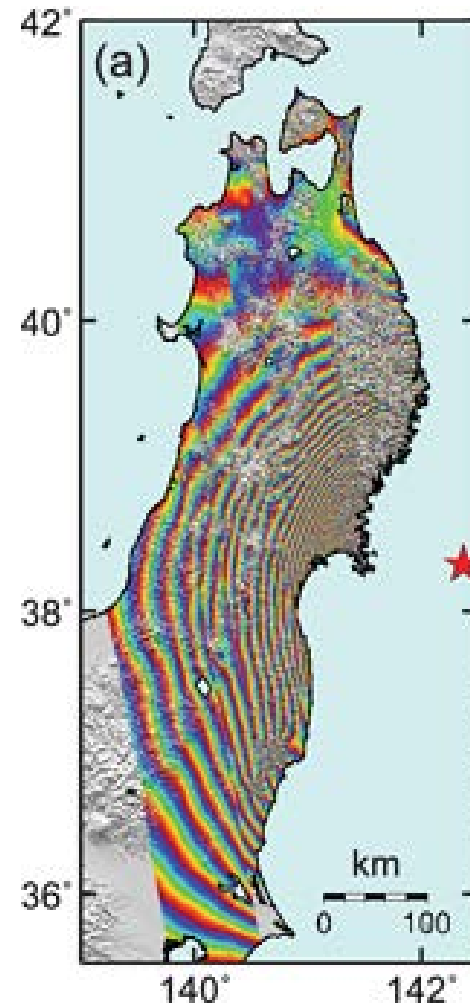
## družicová interferometrie (InSAR)

### Interferometric Synthetic Aperture Radar

Fázové rozdíly radarových signálů (vysílaných a přijímaných družicí) z přeletů před a po zemětřesením. Detailní pokrytí území.



<https://comet.nerc.ac.uk/earth-observation/insar/how-insar-works/>



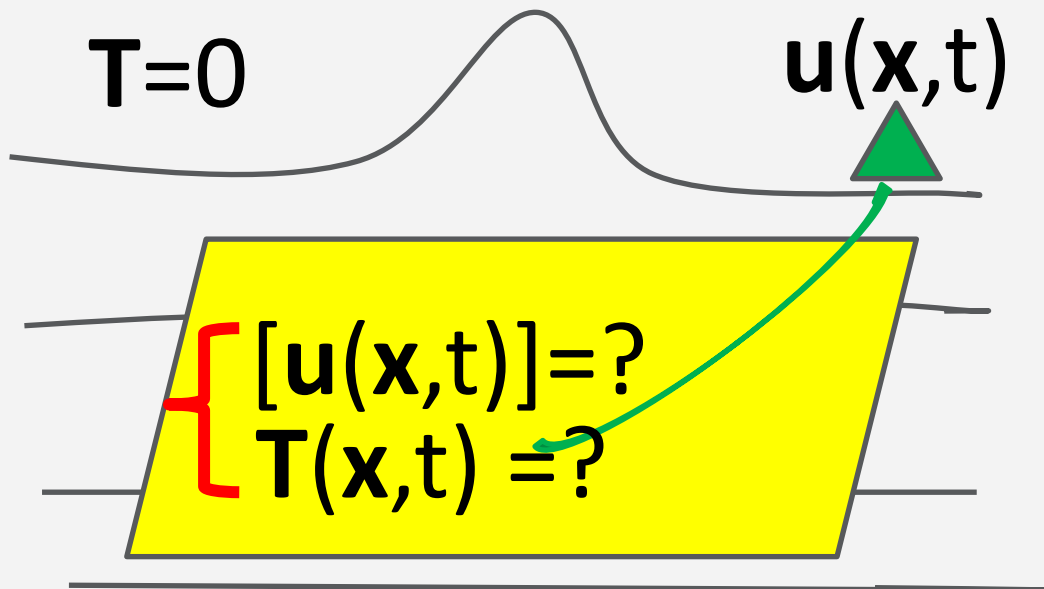
Interferogram:  
Fázové rozdíly poskytují relativní posunutí, zde 12 cm na 1 proužek

Feng &  
Jónsson

# Hlubší fyzikální pohled na zemětřesení poskytují dynamické modely.

střížné napětí a tření na zlomu  
konstituční vztah (reologie zlomu)  
otevřené problémy, výpočetní nároky

# Dynamická úloha, zlom jako plocha se „známým“ zákonem třením



„Známe“ vlny  $\mathbf{u}$  a zákon tření  $\mathbf{P}$ , na zlomu počítáme *současně* trakci  $\mathbf{T}$  a trhliny  $[\mathbf{u}]$ .

$$\tau_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i$$

$$T_s < \mathbf{P}([\mathbf{u}(t)], \dots)$$

smyková trakce menší než pevnost (s výjimkou „nukleační zóny“)

$$\mathbf{T} \parallel [\mathbf{u}]$$

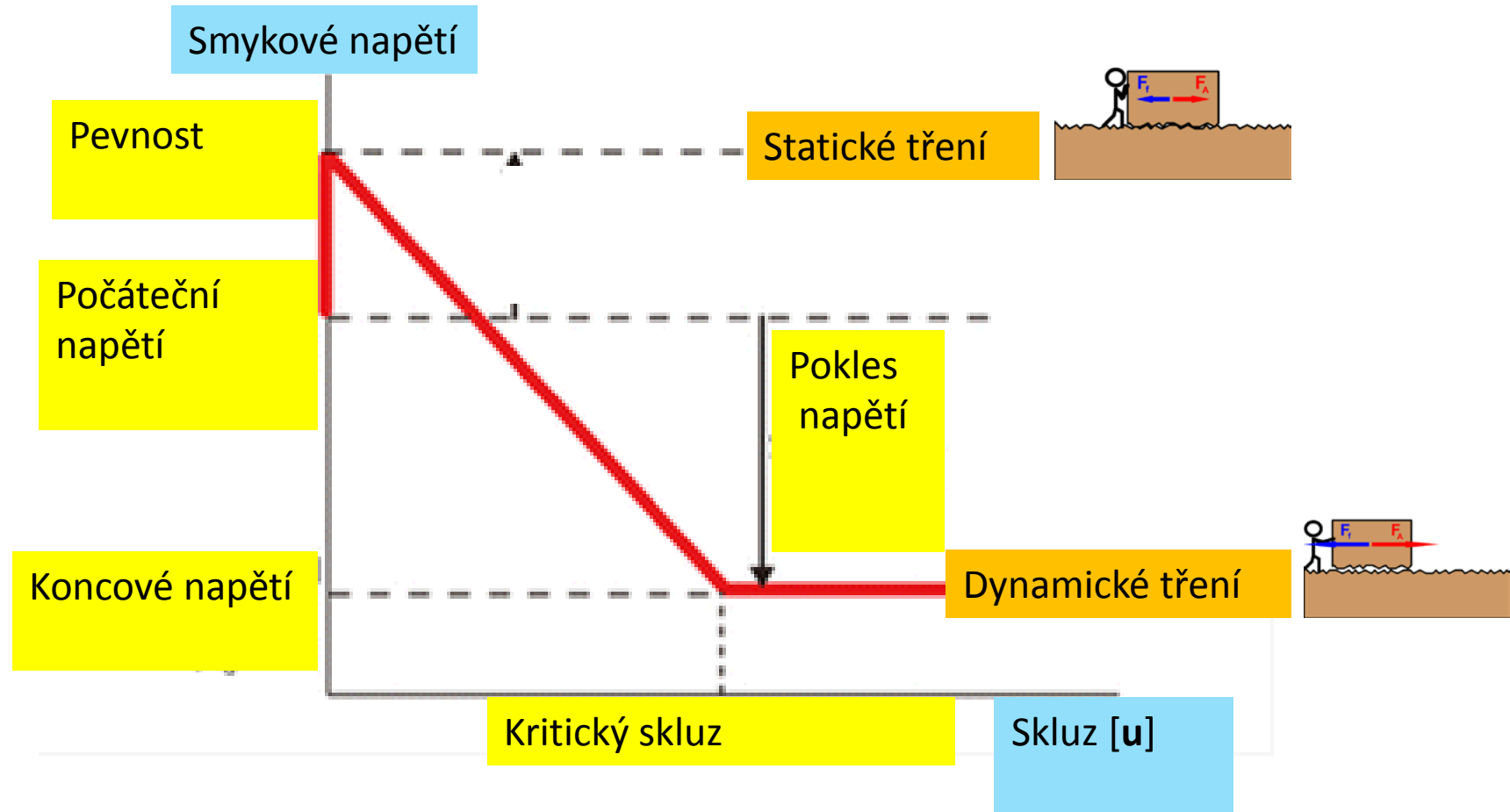
smyková trakce paralelní se kluzem

Rovnice pro  $\mathbf{T}$  and  $[\mathbf{u}]$  na zlomu se řeší numericky (konečné diference).

Vztah skluzu  $[\mathbf{u}]$  a vln  $\mathbf{u}$  na povrchu Země pomocí Greenova tenzoru  $\mathbf{G}$  jako v kinematické úloze.

Úloha je **nelineární**

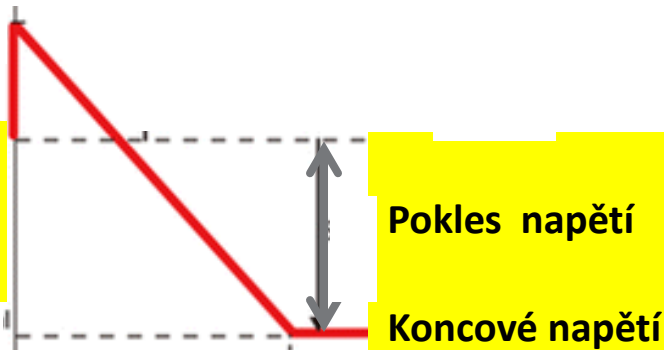
# Tření: zlom slábnoucí s rostoucím skluzem („slip-weakening“)



# Elazig, Turecko 2020, **obrácená** dynamická úloha. MFF UK – doc. F. Gallovič

Pevnost

Počáteční  
napětí



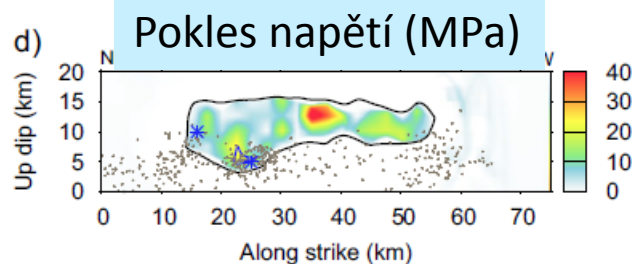
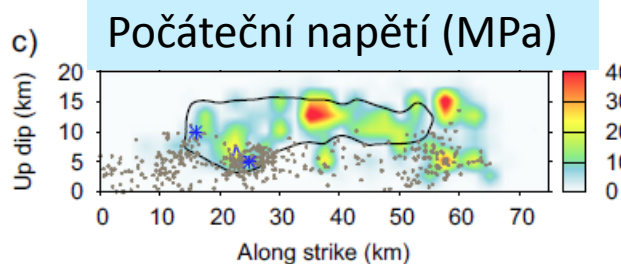
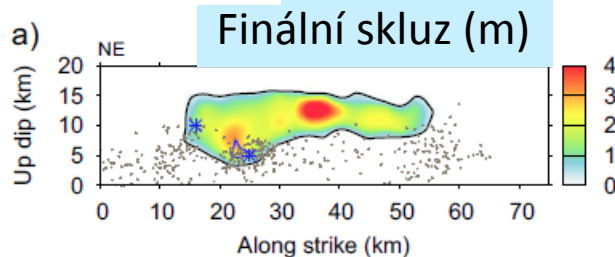
Pokles napětí

Koncové napětí

Ze seismogramů se počítá současně  
smykové napětí i skluz.

(zjistí se plošné rozložení parametrů  
předpokládaného modelu tření, např.  
**počáteční napětí, pokles napětí,**  
**lomová energie,** atd.)

[Gallovic etal CommsEnv2020.pdf](#)



Metody typu Monte Carlo  
Hustota pravděpodobnosti (Bayes)  
Výpočetní nároky, grafické karty (GPU)

Jaderné testy, nebo jevy vyvolané  
injektáží kapalin poskytují informace o  
nesmykových procesech porušení.

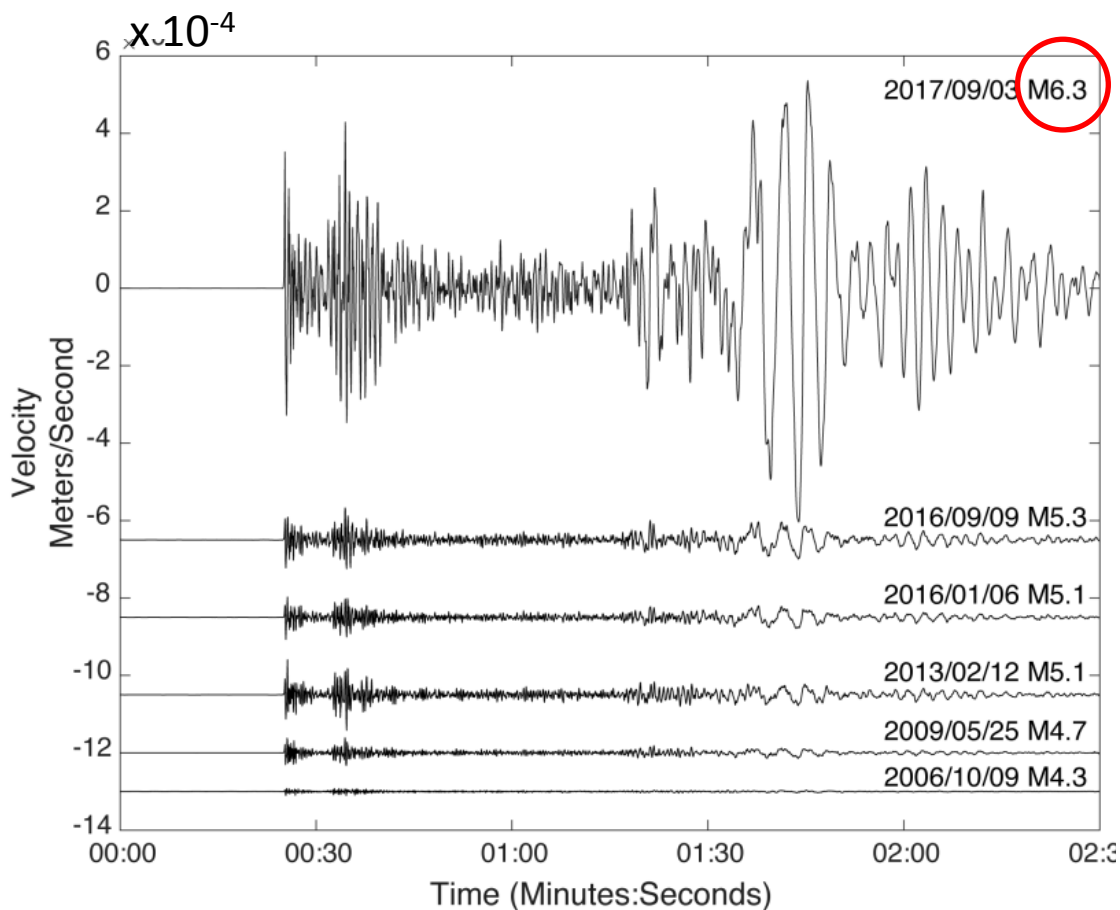
KLDR, jaderný test 2017

Čína, solné doly

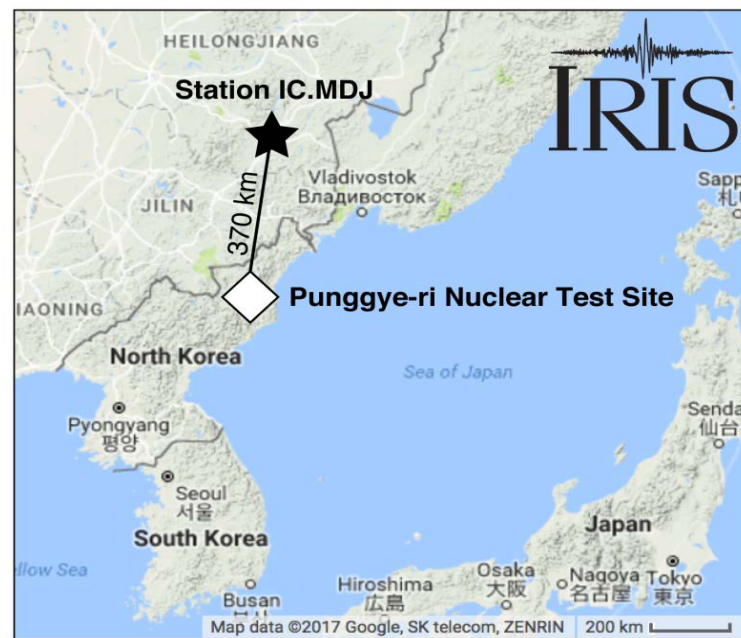
Seismické jevy vyvolané lidskou činností

# Dosud největší severokorejský test

## 3. září 2017

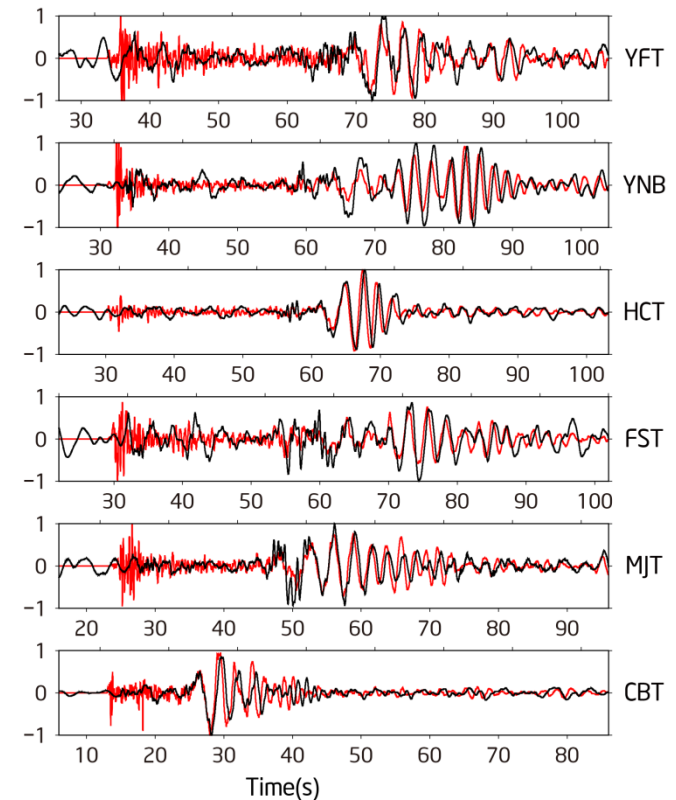
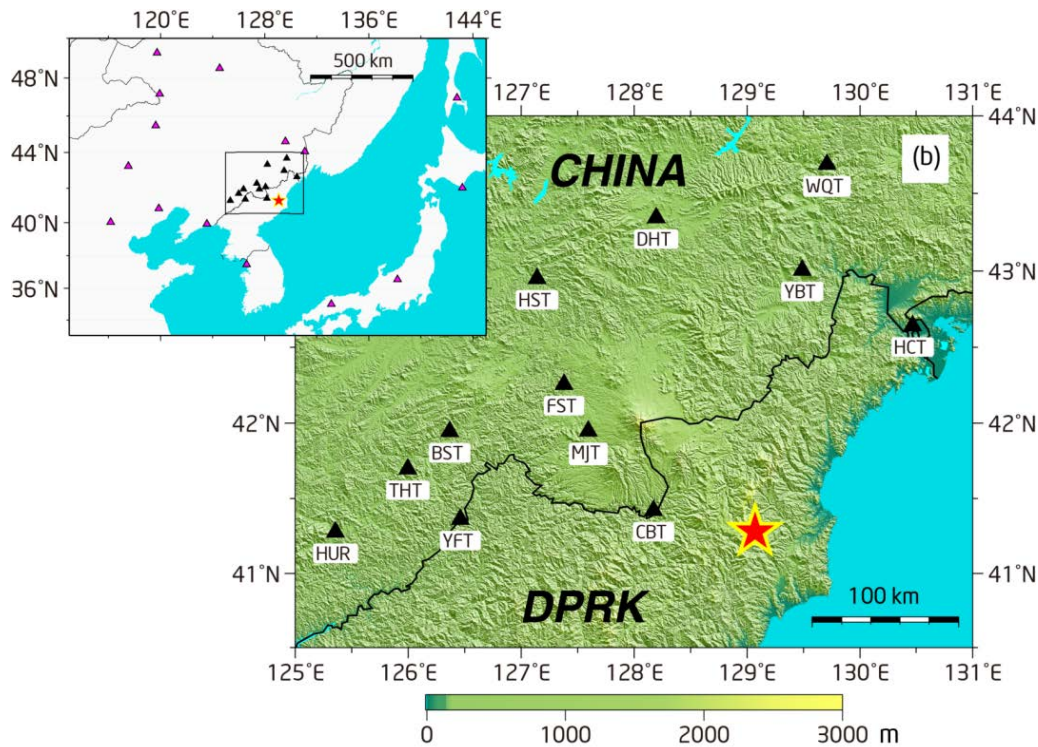


← Seismické účinky jako středně silné zemětřesení





# Test prokázal explozi a následný kolaps vytvořené dutiny (po 8 minutách)

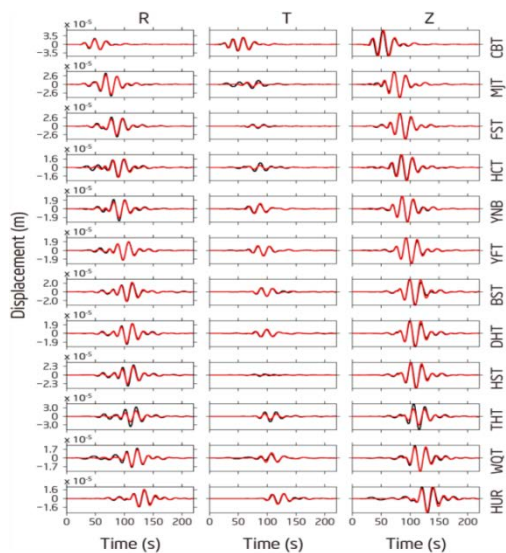
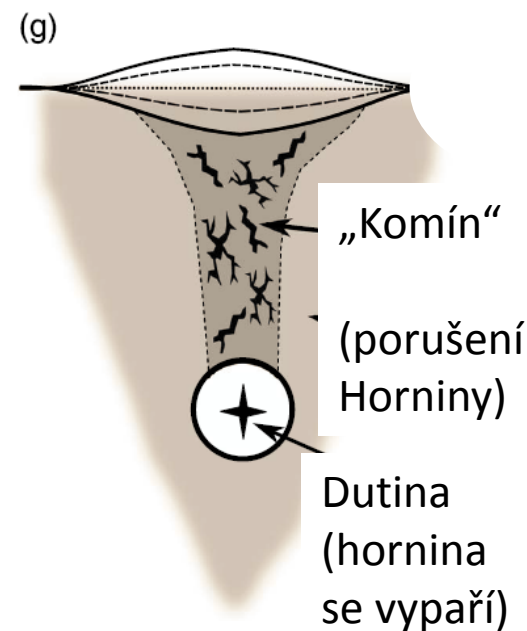
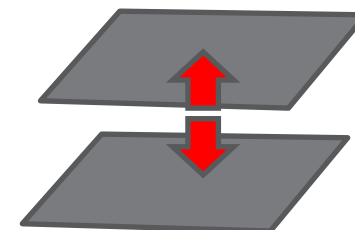
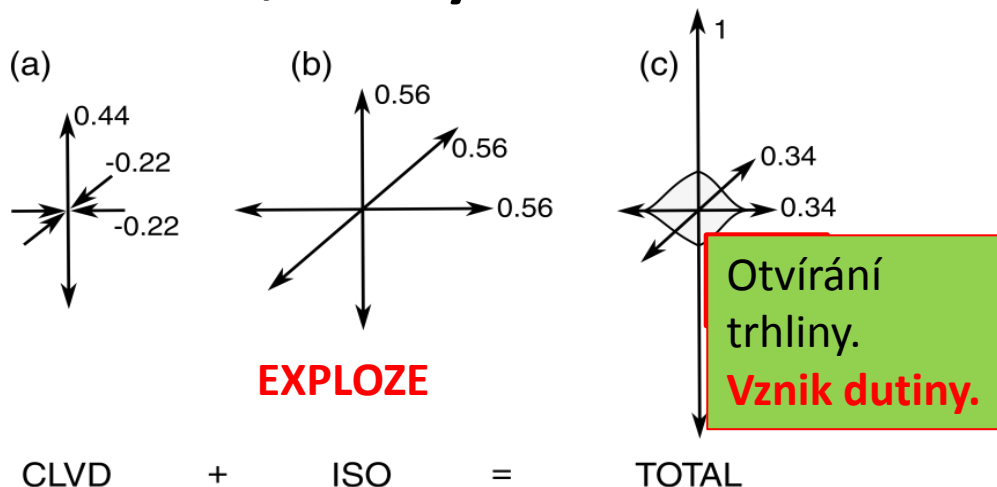


Liu J, Li L., Zahradník J, Sokos E, Liu C., Tian X. (2018):

North Korea's 2017 test and its nontectonic aftershock. *Geophys Res Lett* 45.

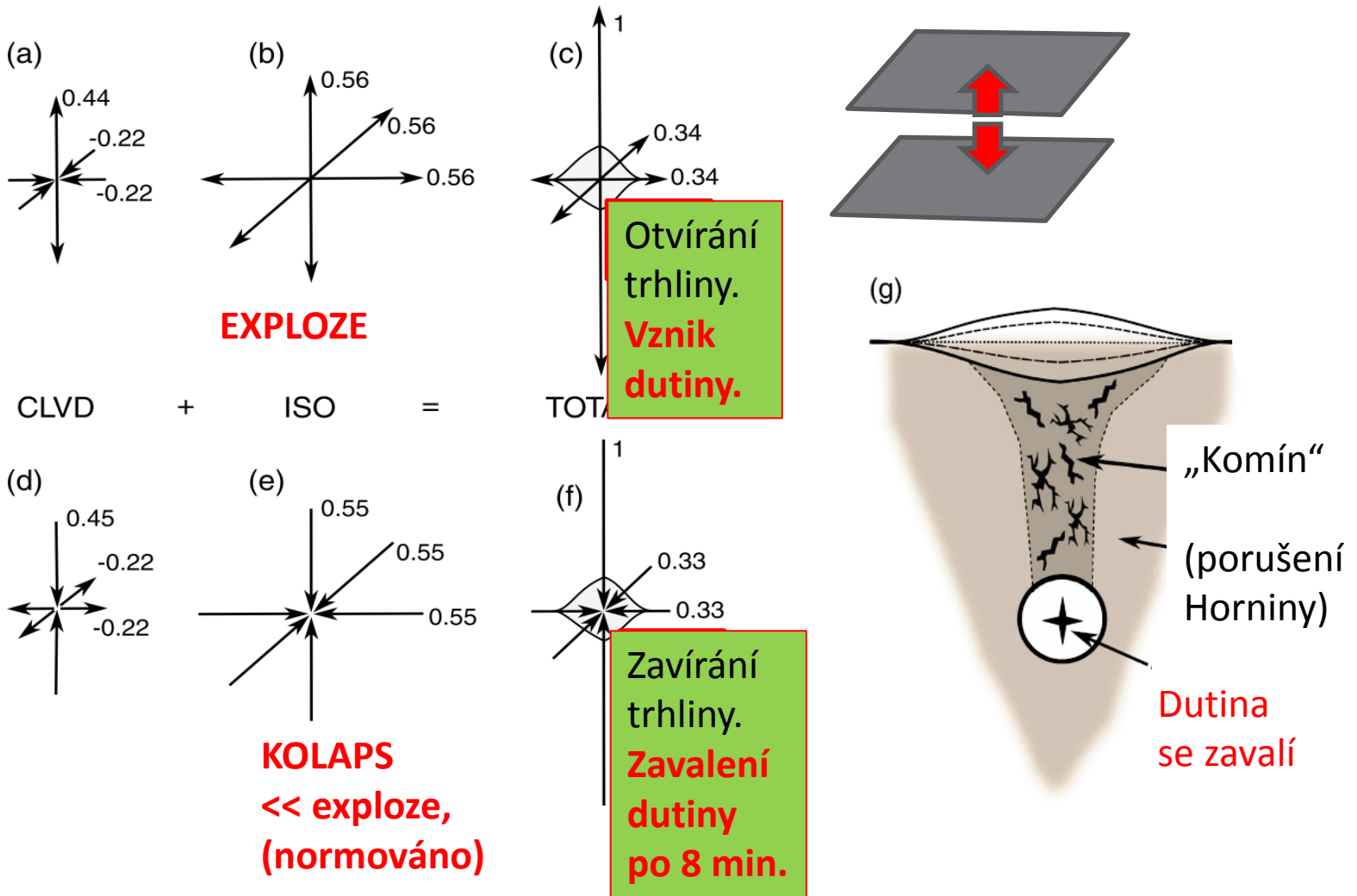
*Zrcadlová symetrie (normovaných) seismogramů obou etap jaderného testu*

# Dešifrování informace z momentového tenzoru, smyková část zanedbatelná



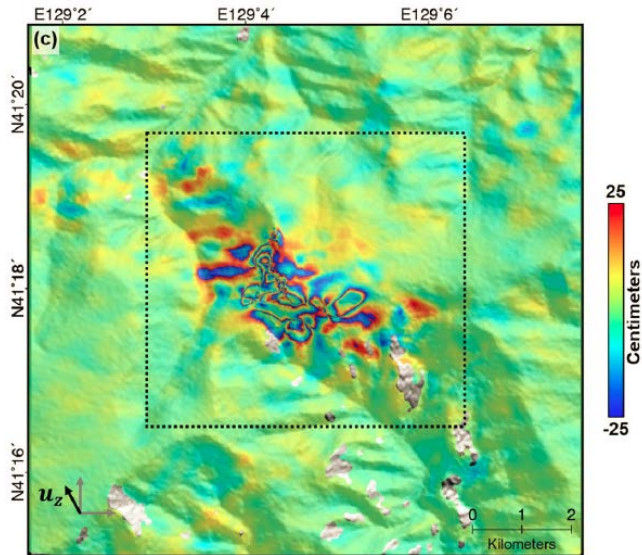
Příklad shody měření (černě) a výpočtu (červeně) pro optimální model

# Dešifrování informace z momentového tenzoru



*Model vysvětluje zrcadlovou symetrii seismogramů obou etap*

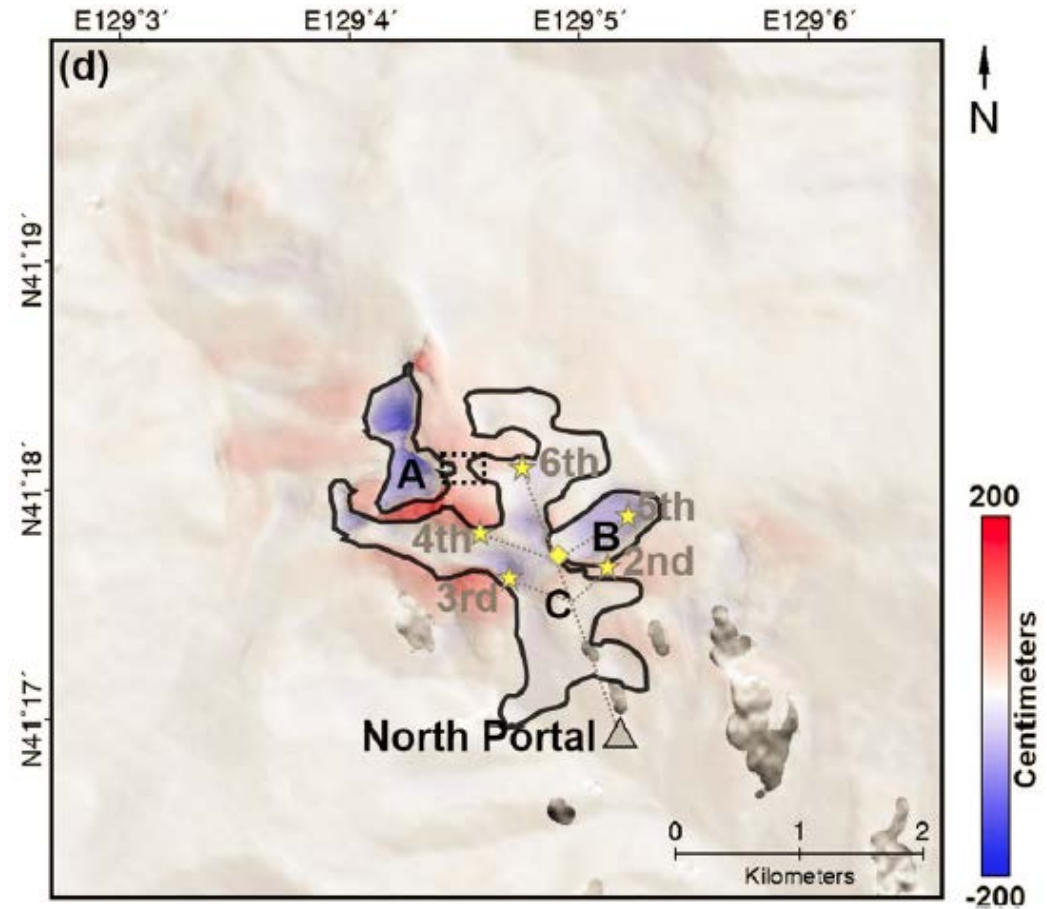
# Projevy exploze a kolapsu z InSAR



Vertikální posunutí:

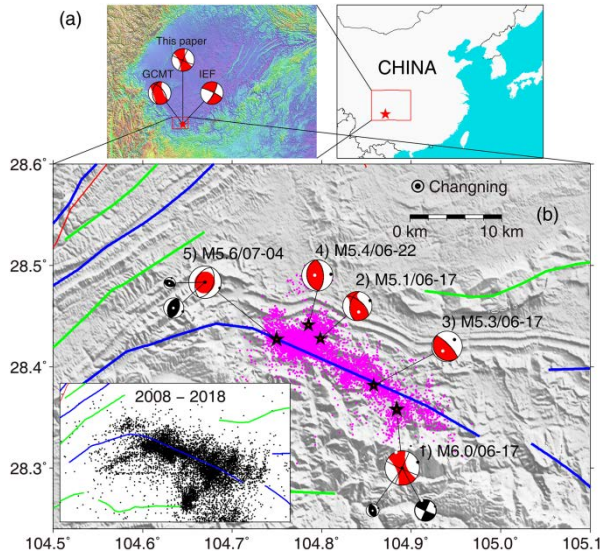
**Výzdvih** (exploze) cca 2 m

**Pokles** (kolaps) cca 70 cm



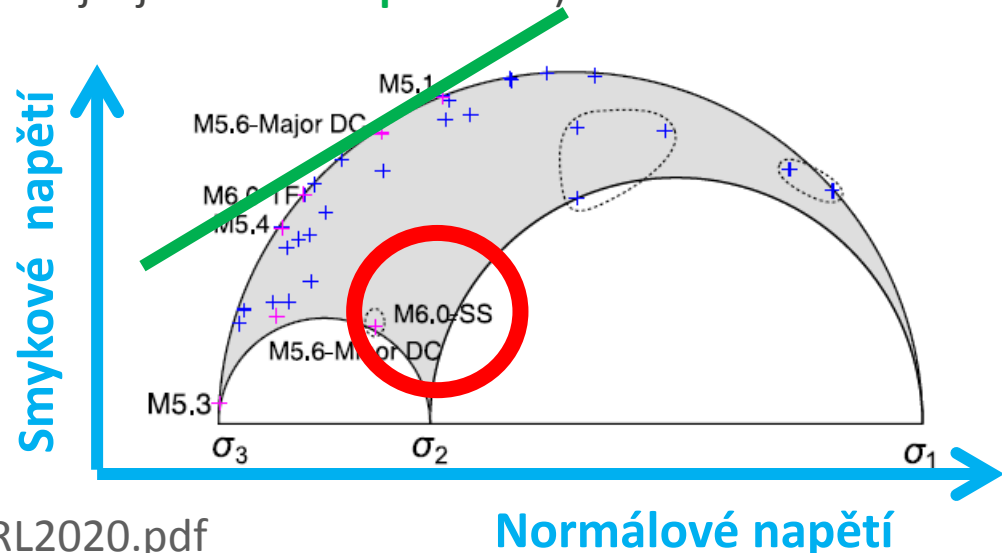
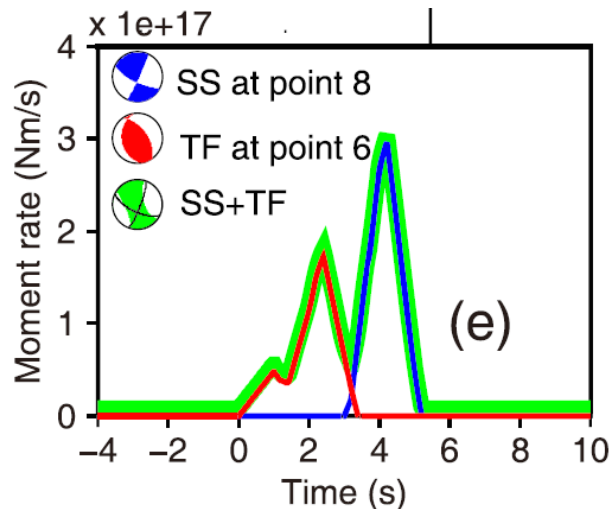
Baek et al.

# Zemětřesení Mw 5.7, 2019, v Sečuánské pánvi



Silná nesmyková složka je jen zdánlivá.  
Odhalení dvojice téměř současně praskajících  
smykových zlomů.  
Jeden z nich (SS) v dané oblasti **dosud neznámý**.

Zlom SS byl patrně **aktivován dlouhodobou  
injektáží kapalin v hlubinných solných dolech**  
(která snižuje efektivní normálové napětí a  
přibližuje jev k **obálce porušení**)



# Další seismické jevy vyvolané lidskou činností, narušení přirozeného napětí v Zemi

Důlní otřesy



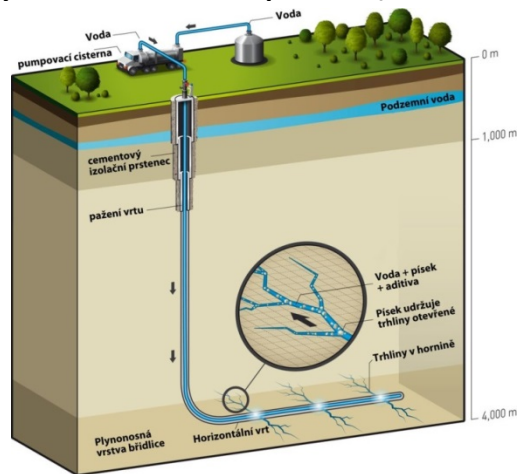
Sesuvy v dolech



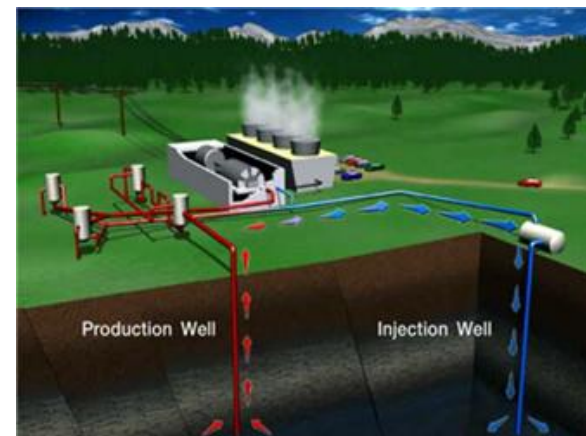
Velká přehrady



Hydraulické štěpení (břidlicový plyn)



Vrty pro geotermální elektrárny

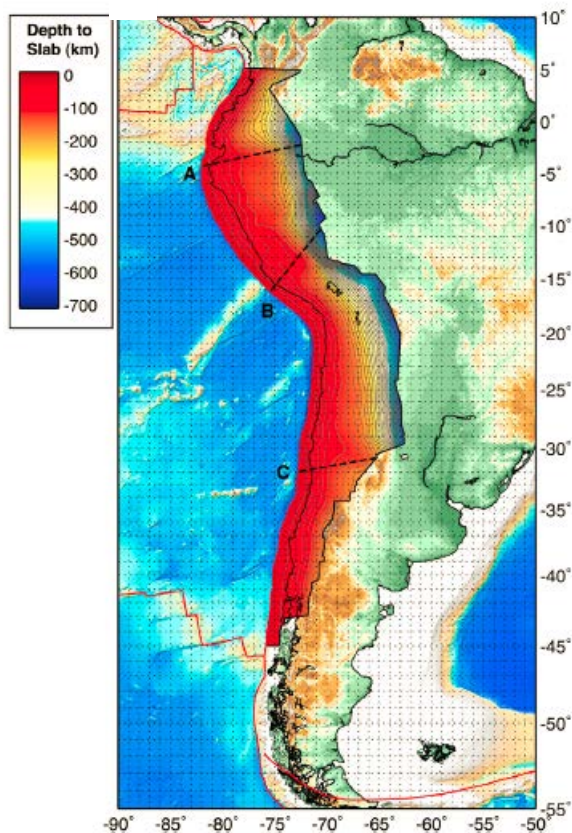


T. Buchta

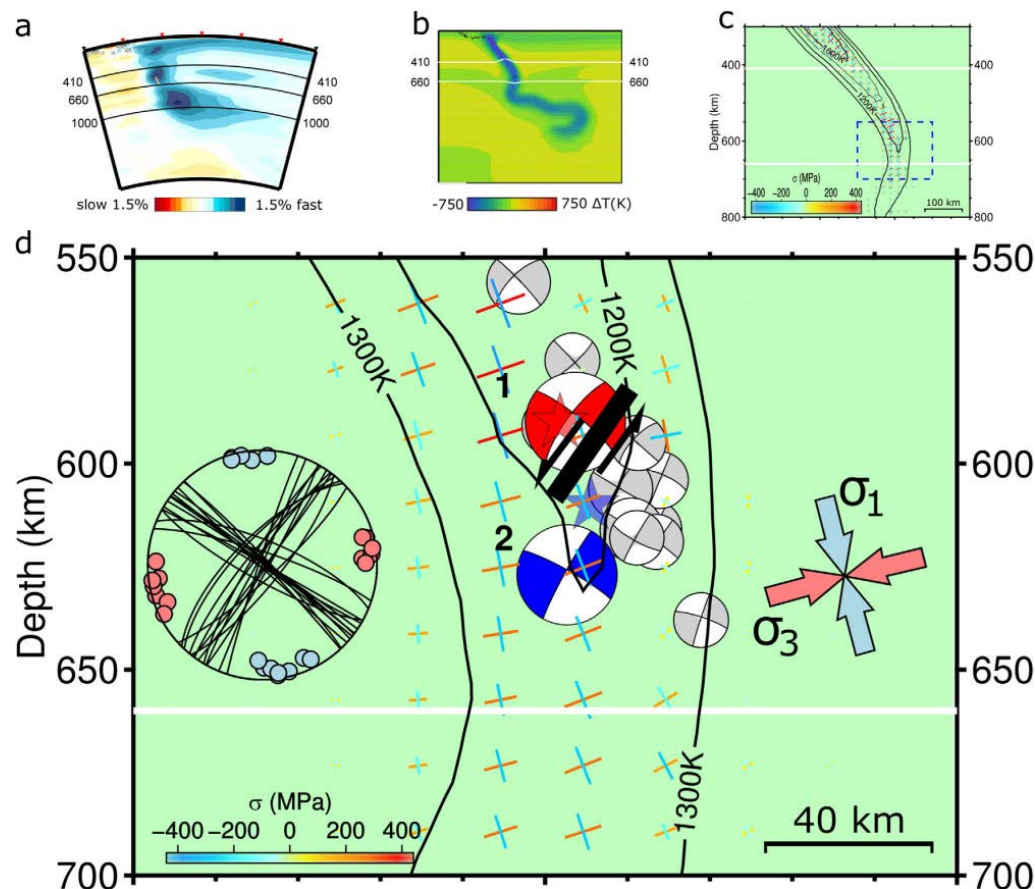
Fyzikální podstata nejhlubších zemětřesení (600 km) je zahalena tajemstvím. Vyžaduje také modelování tečení, P-T podmínek a mineralogie.

Seismologie a geodynamika subdukce  
Hypotézy vzniku hlubokých zemětřesení

# Zemětřesné „dvojče Mw 7+, Peru-Brazílie 2015: seismické a geodynamické modelování



Slab 1.0, Hayes et al., 2010



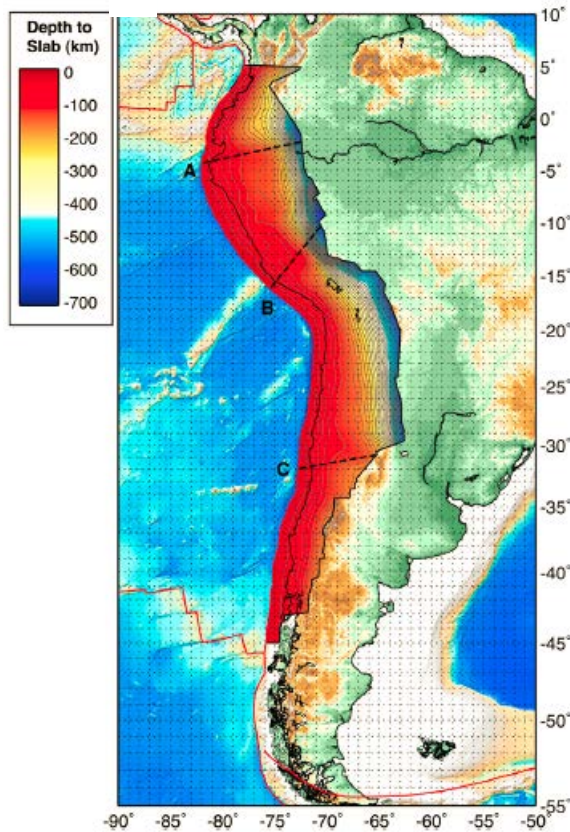
Lom podmíněný fázovými přechody („anti-trhliny“)  
Termální smyková nestabilita (kríp, tavení)  
Dehydratační zkrhčení (vysokotlaká varianta)

Spolupráce s geodynamiky:  
Doc. H. Čížková (MFF UK), C. Bina (USA)

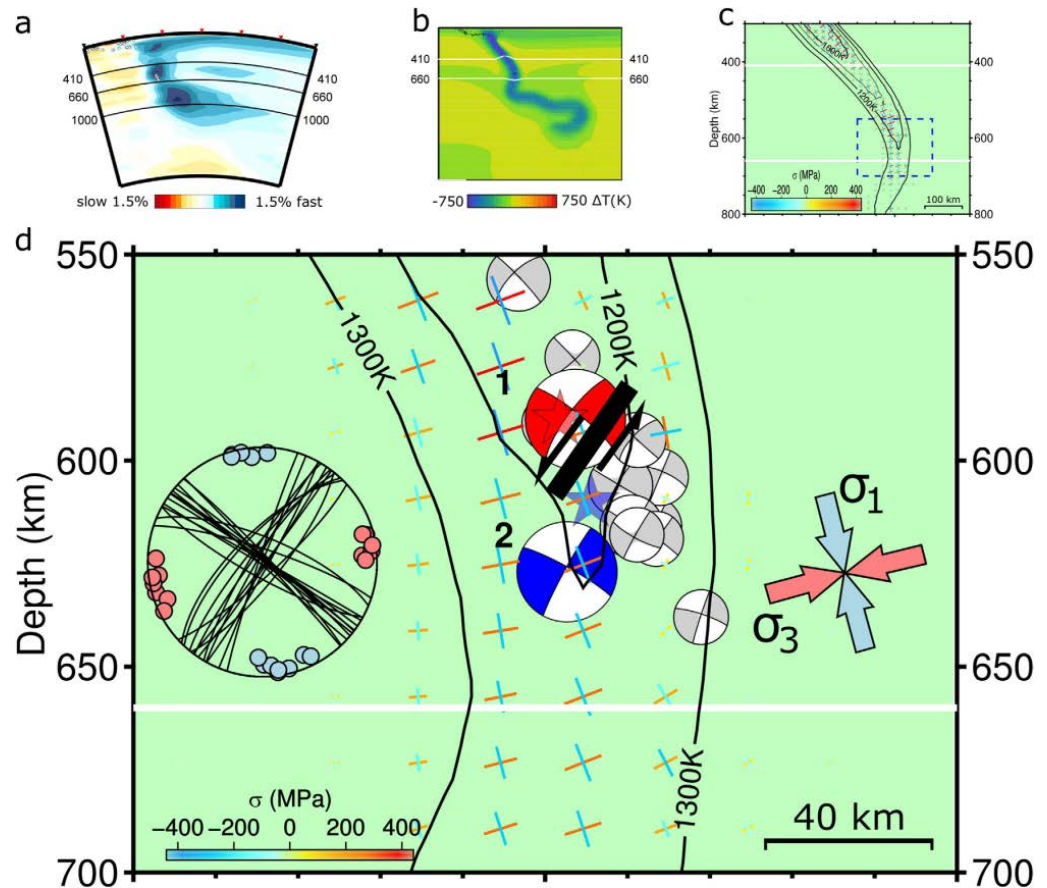
[zahradnik\\_et al\\_srep2017.pdf](#)



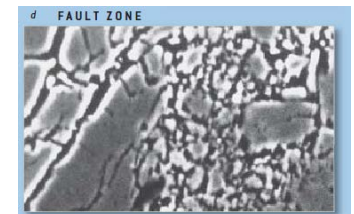
# Zemětřesné „dvojče Mw 7+, Peru-Brazílie 2015: seismické a geodynamické modelování



Slab 1.0, Hayes et al., 2010



„Anti-trhliny“ = Čocky vyplněné jemně zrnitou vysoko-hustotní spinelovou fází olivínu se mohou organizovat do obdoby „zlomových“ zón. (H.W. Green II)



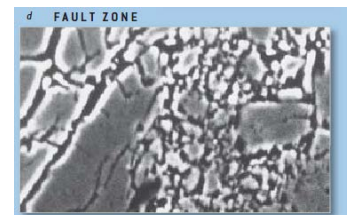


olivín



spinel

„Anti-trhliny“ = Čočky vyplněné jemně zrnitou vysoko-hustotní spinelovou fází olivínu se mohou organizovat do obdoby „zlomových“ zón. (H.W. Green II)



# Co se děje na zlomu mezi velkými zemětřeseními?

seismický cyklus

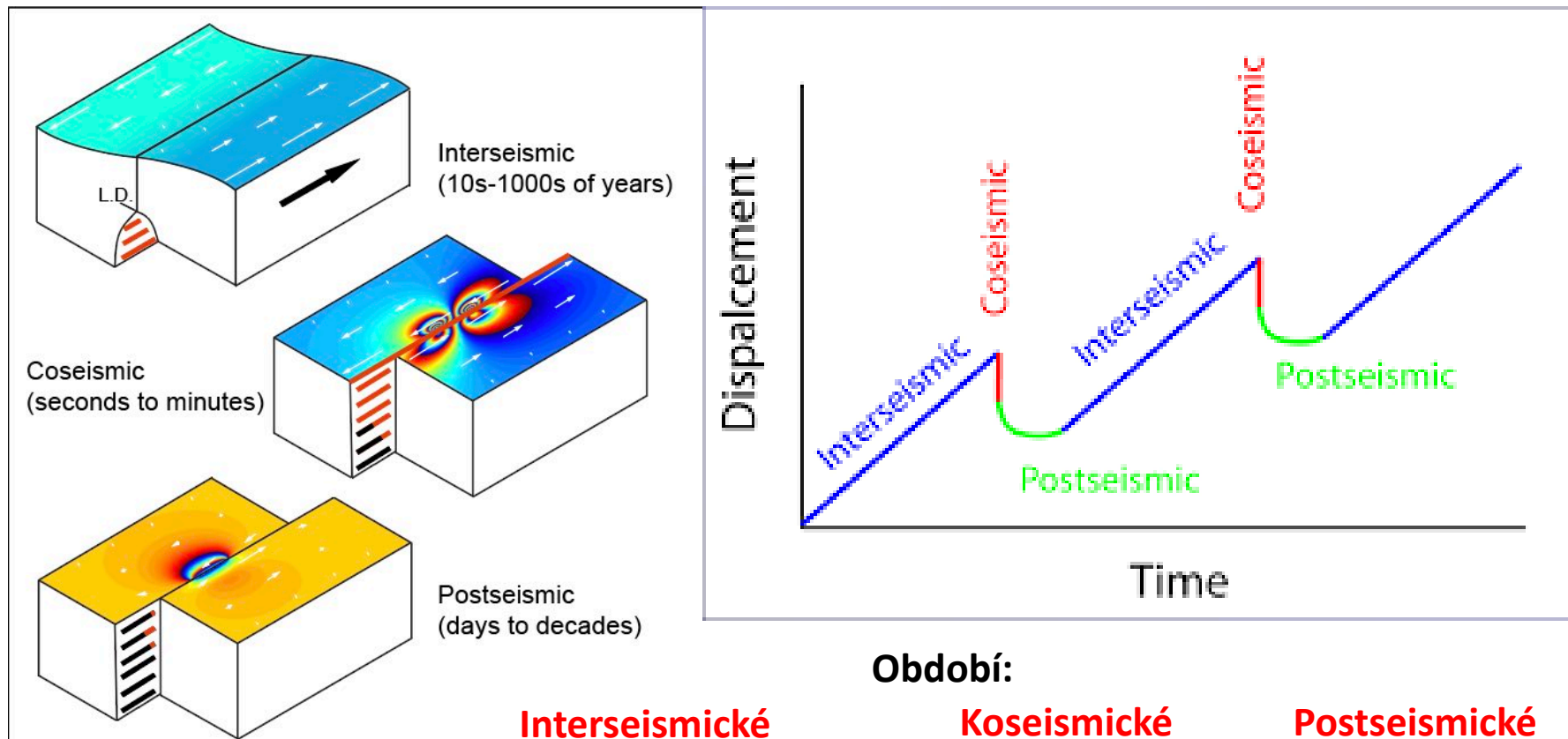
zaklesnutí nebo prokluz (kríp)

geodetická měření povrchová a družicová (GPS a InSAR)

měření pomocí extenzometrů, krípmetrů

modelování - elasticita, viskoelasticita

# Seismický „cyklus“



**Období:**

**Interseismické**  
desítky – stovky let

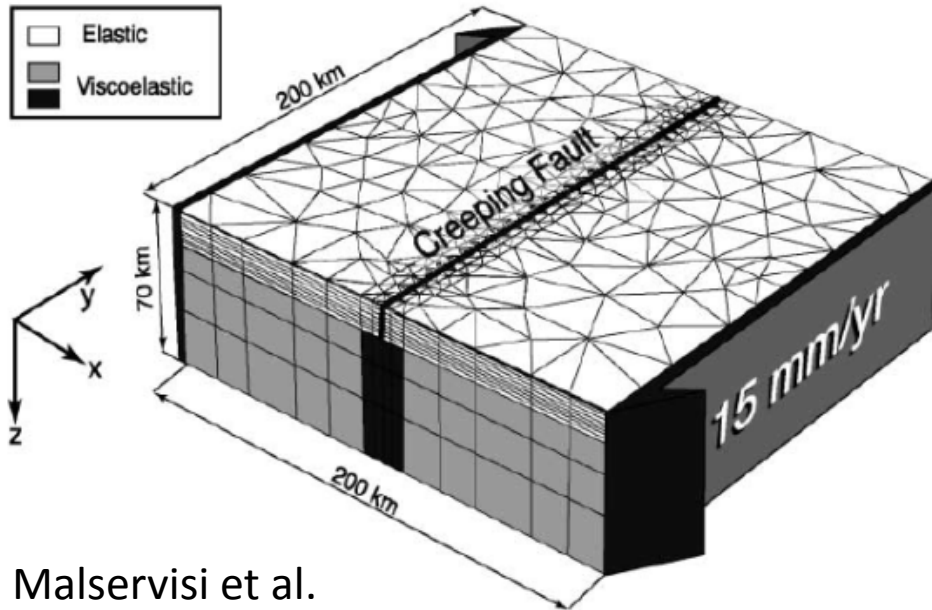
**Koseismické**  
sekundy-minuty

**Postseismické**  
dny-měsíce  
(dokluz, dotřesy...)

# Další rysy dlouhodobého života zlomu, aseismické pohyby zlomu

- **Pomalá („tichá“) zemětřesení** ... Lokální zaklesnutí zlomu existuje, ale uvolňuje se pomalu, v průběhů hodin, dnů. Nevyzařují se seismické vlny.
- **Kríp (mm/rok)** .... Část zlomu není zaklesnutá, probíhá volný prokluz. Povrchový kríp souvisí se zatěžováním zlomu zdola, viskoelastickou deformací litosféry, která je poháněna deskovým pohybem.

# Modelování krípu

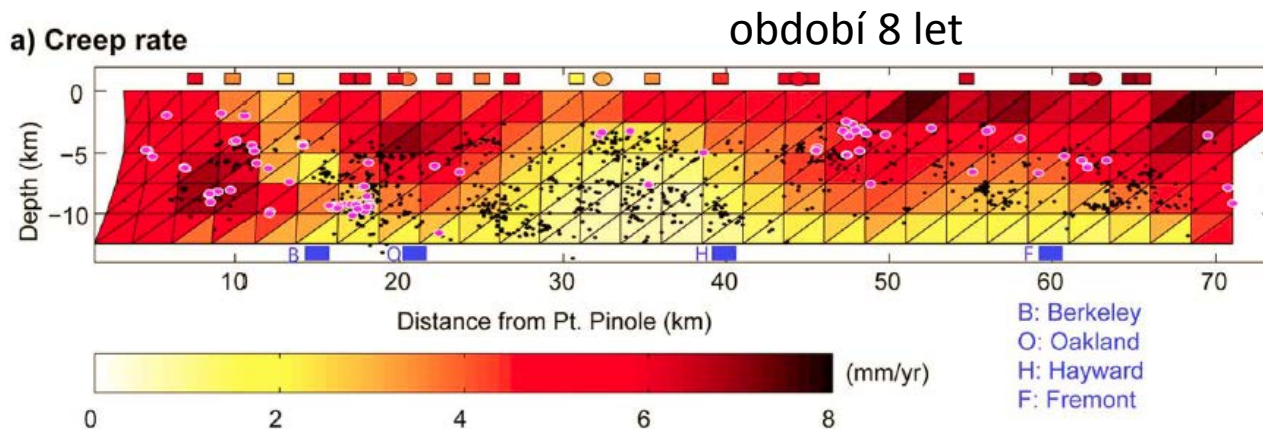


Malservisi et al.

Měříme posunutí na povrchu (GPS, InSAR, extenzometry) a modelujeme prokluz na kontaktu (funkce  $y$ ,  $z$  a času).

Např. elastická vrstva na viskózním podkladu, s okrajovou podmínkou deskového pohybu.

Metoda konečných prvků.



[hayward\\_creep.mp4](#)

M. Shirzaei & R. Bürgmann

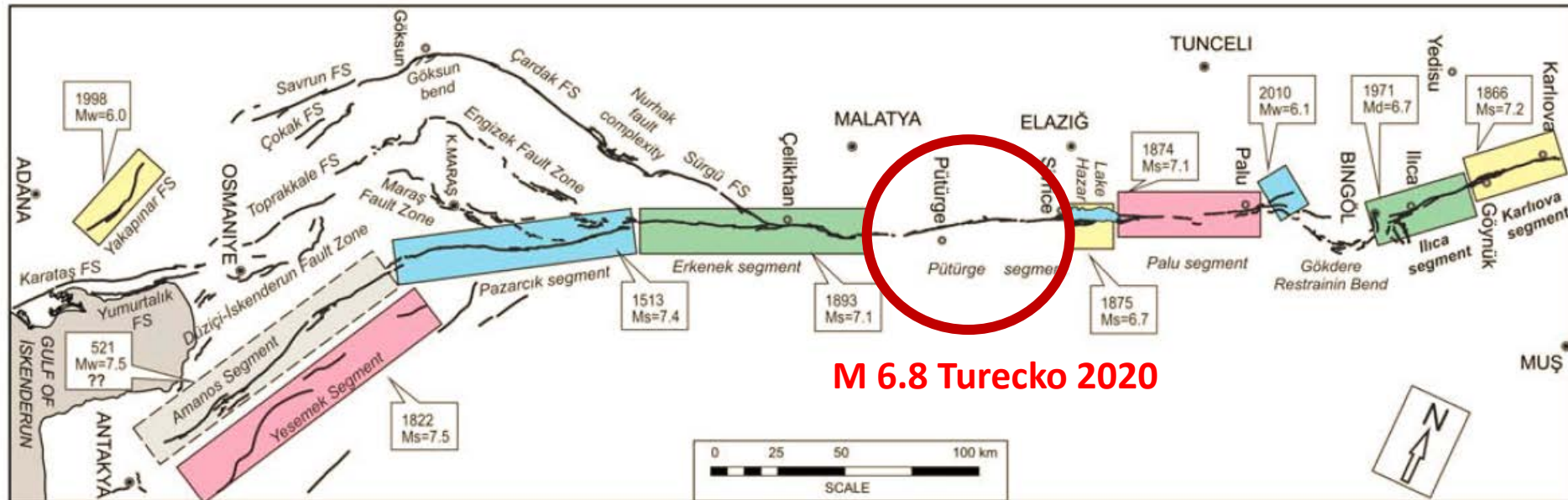
# Život zlomů je monitorován a modelován, Turecko, východo-anatolský zlom

Rychlý pohyb, trhlina, zemětřesení

Aseismický pomalý skluz (kríp)

Oblasti které dlouho nepraskly buď kloužou nebo chystají velké z.

**(Změříme-li malý kríp, je silná indikace zaklesnutí)**



I mělká zemětřesení mohou geneticky  
úzce souviset s hlubinnými procesy.  
Například zemětřesení v případě  
některých sopek.

souvislost se subdukcí

souvislost s magmatickými procesy

tečení, termodynamika, chemické procesy

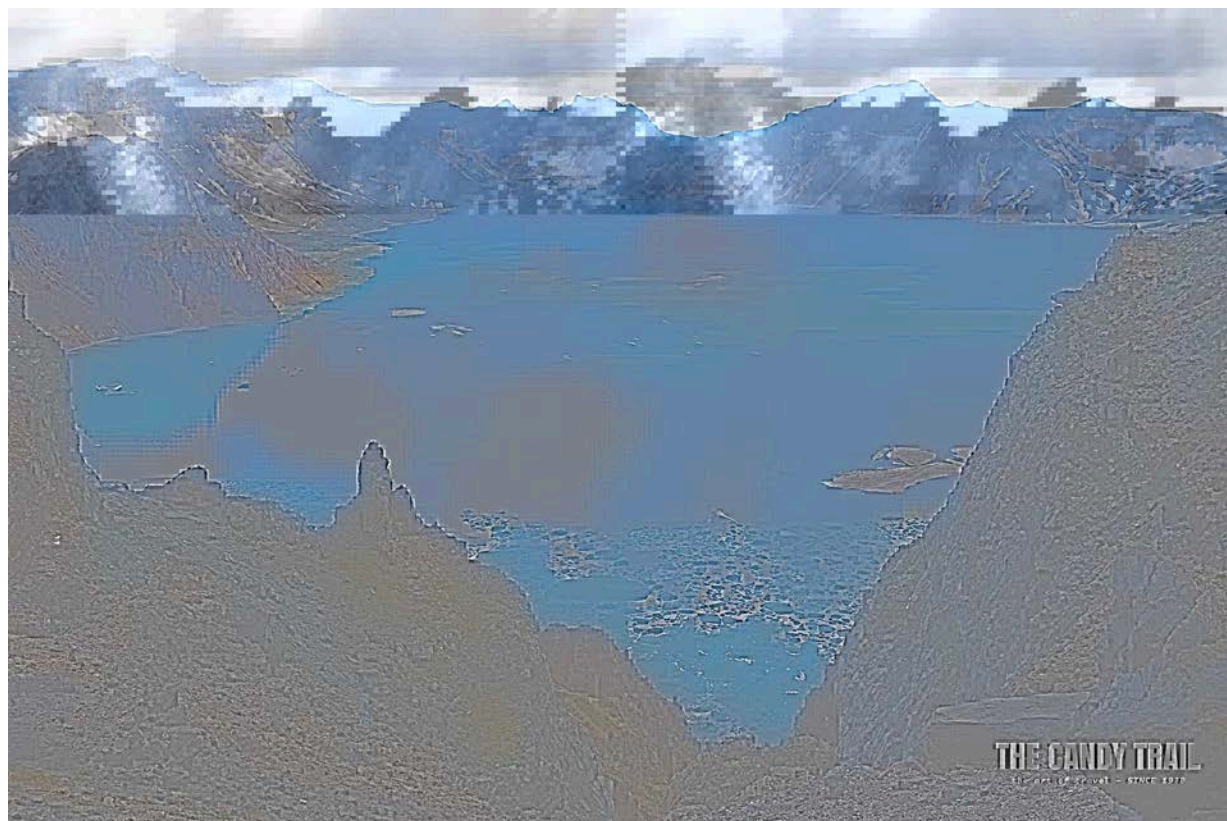


# Changbaishan, Mt. Paektu

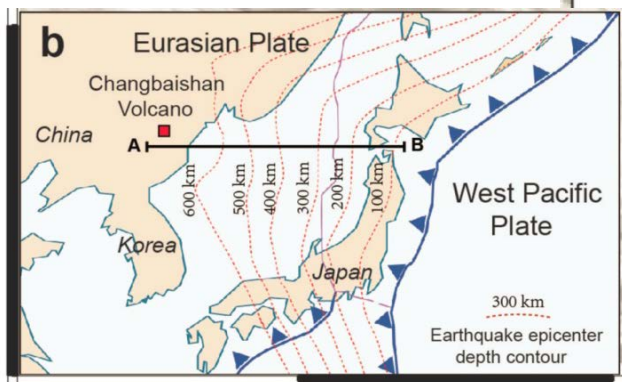
R. 946 jedna z největších erupcí za 5000 let



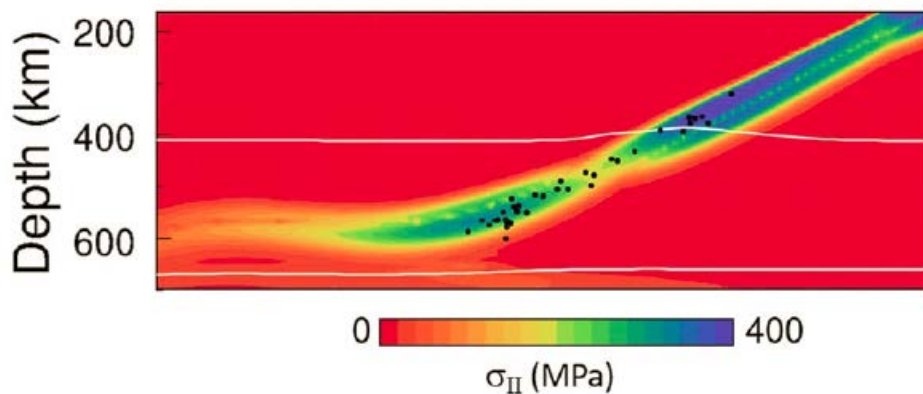
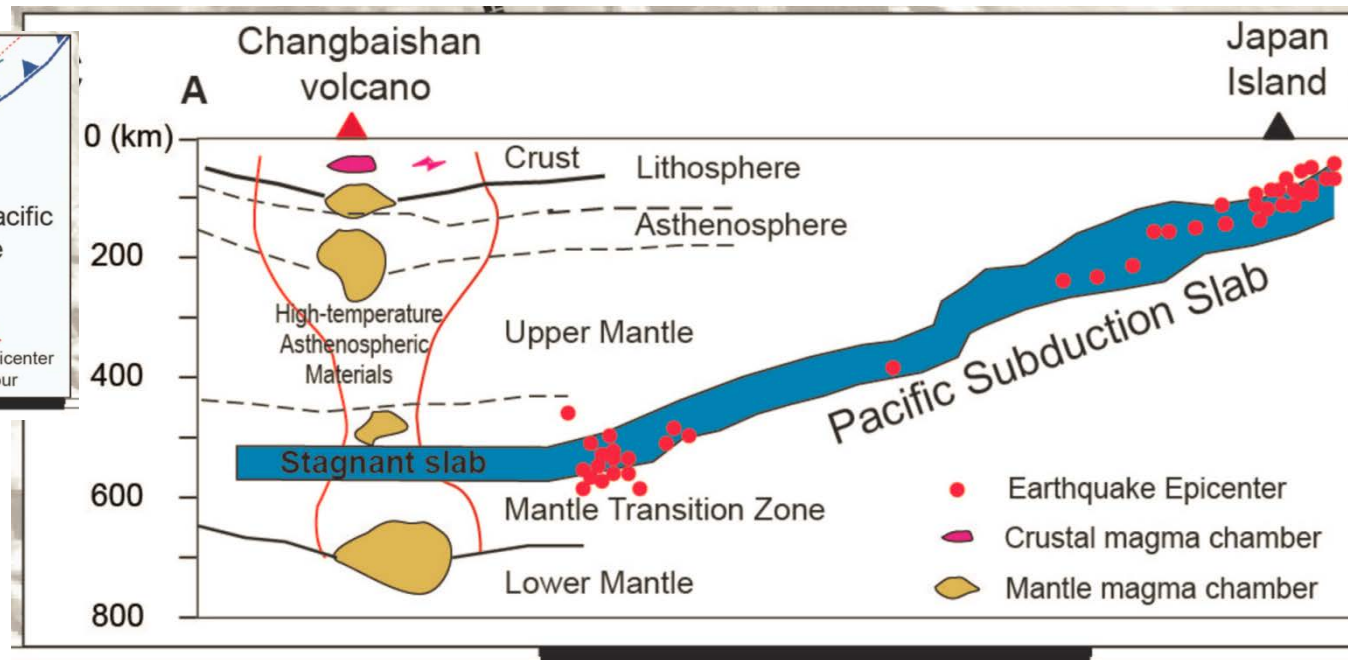
„Millenium eruption“



# Changbaishan a subdukce, daleko od japonských sopek

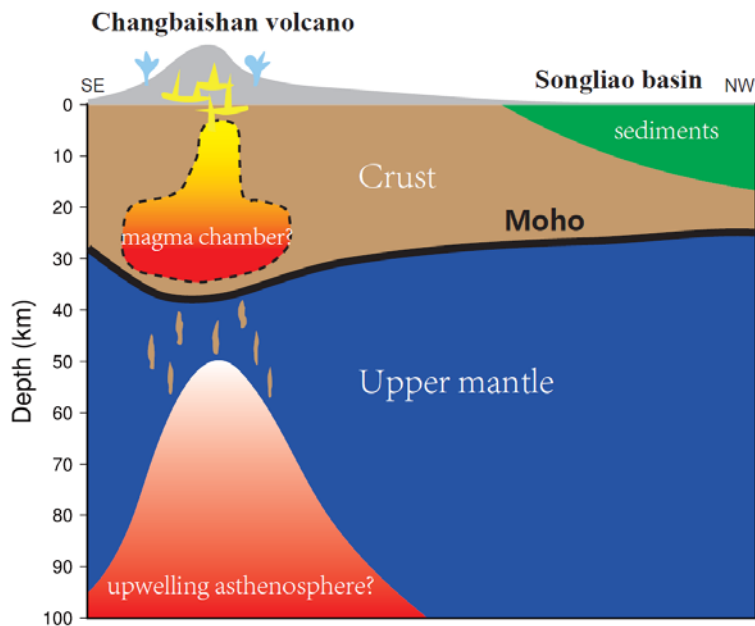


Xu et al.

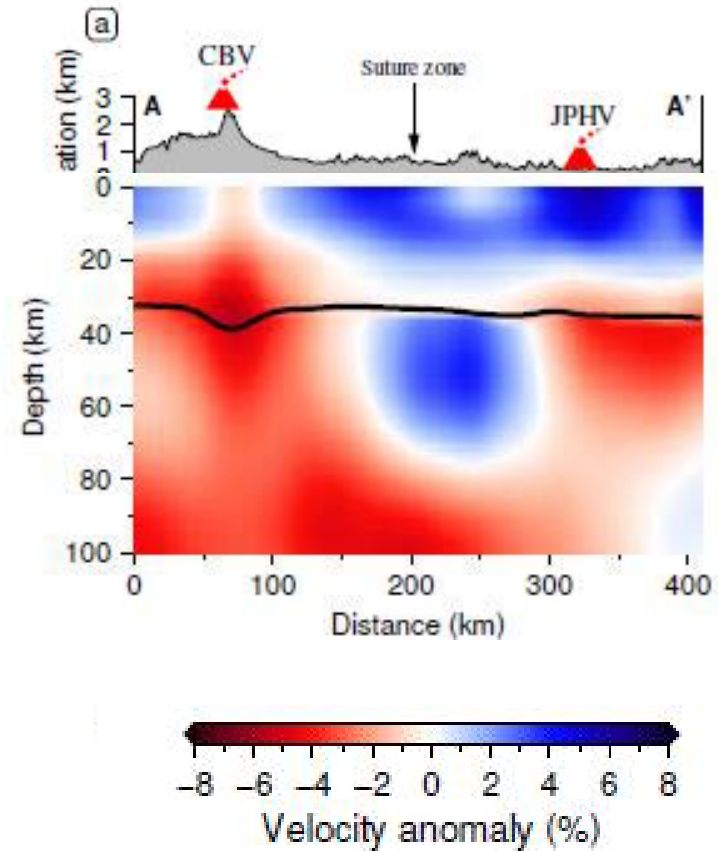
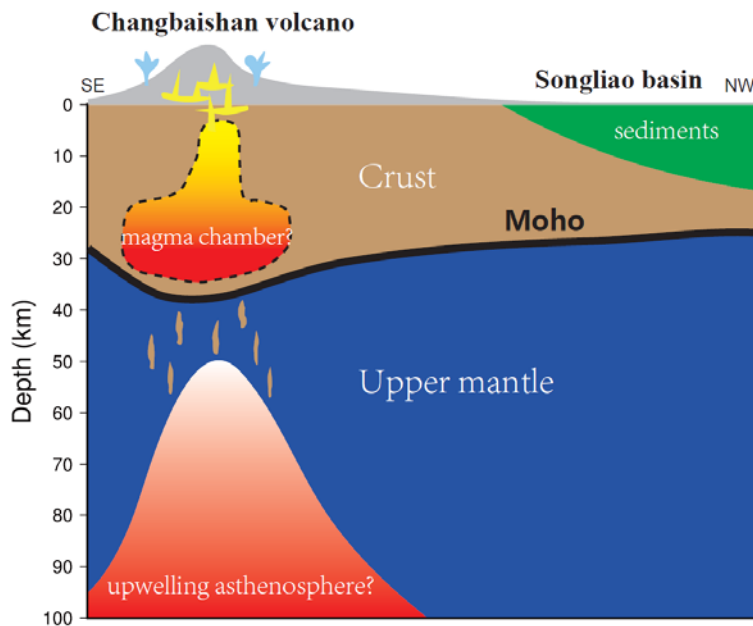


Na MFF UK: doc. H. Čížková  
Cizkova\_et al\_SciRep2020.pdf

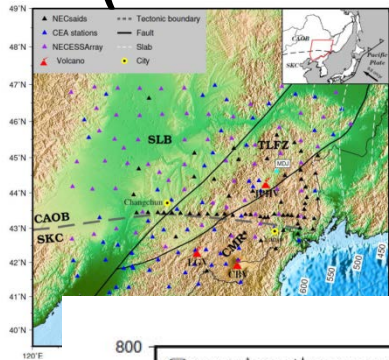
# Koncept souvislosti hlubinného a mělkého procesu



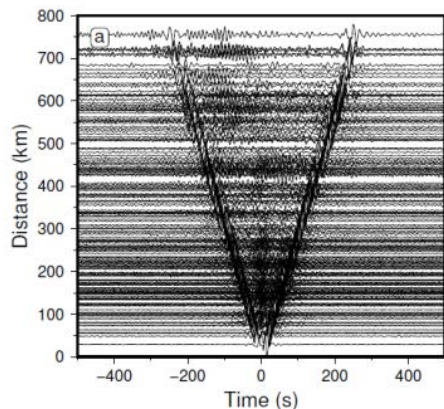
# Koncept a skutečnost (tomografie ze seismického šumu)



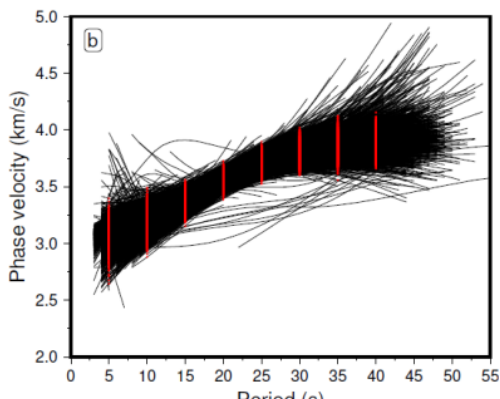
# Tomografie ze seismického šumu (strukturní informace získaná bez zemětřesení)



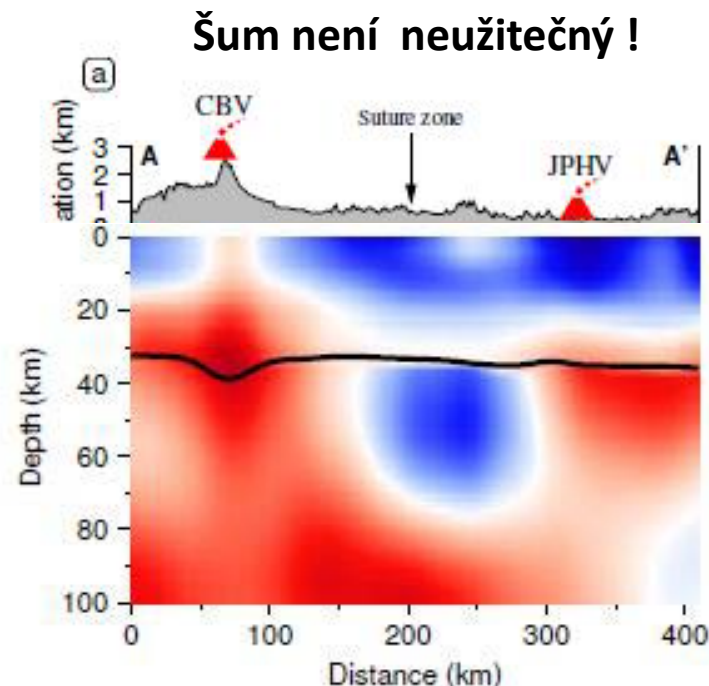
Hustá síť stanic



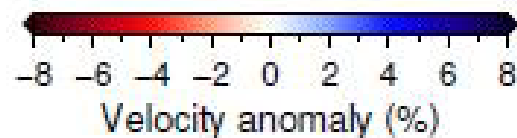
Korelace šumu  
na dvojicích  
stanic



Disperzní  
křivky



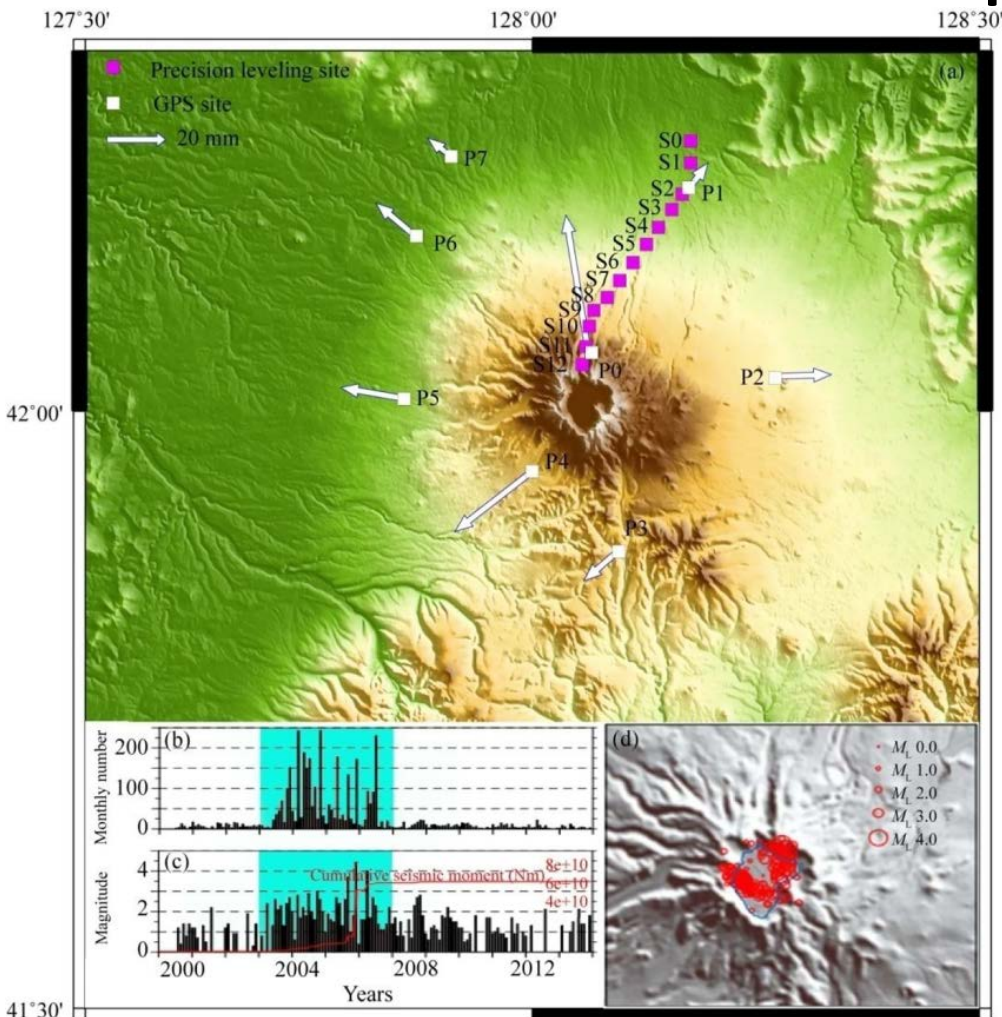
Šum není neúčinný!



Fan & Chen

Na MFF podobný výzkum: Dr. L' Valentová

# Changbaishan – seismická a GPS měření, mělkého procesu



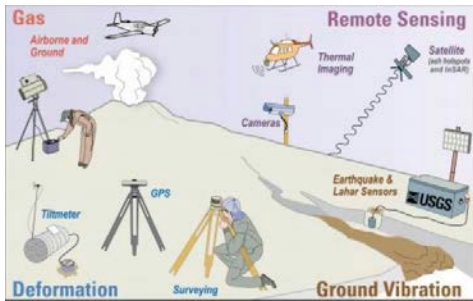
- Zvýšení tlaku **magmatu**
- Coulombova napěťová změna
- Zatížení existujících zlomů
- Vznik seismických **rojů**,  
(hloubka cca 7 km)

Jistá podobnost s roji  
v západních Čechách.  
Uvolňování **plášťového CO<sub>2</sub>**  
„ventilovým“ efektem  
(Fischer et al., 2017).  
Na MFF UK modeluje  
doc. C. Matyska.

Společenský aspekt.  
Systemy rychlého varování a rychlé reakce.  
Příprava na zemětřesení.

Varování před sopečným výbuchem,  
před seismickými účinky vln  
před tsunami.  
Hodnocení ohrožení, osvěta.

# Varování před sopečnou erupcí (dny)

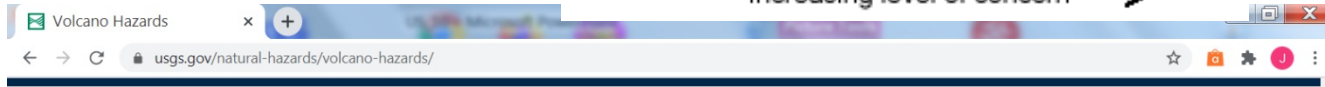


## Allowed Combinations for Volcano Updates

### Aviation Color Code

	Green	Yellow	Orange	Red	Inc. level of concern ↓
Normal					
Advisory					
Watch					
Warning					

← Increasing level of concern →



## Volcano Hazards

**Kilauea**  
Color Code: ORANGE  
Alert Level: WATCH

Zoom to

## Etna volcano - eruption update

### Intense strombolian activity from New SE crater and Voragine

Update Sun 03 Jan 2021 18:44



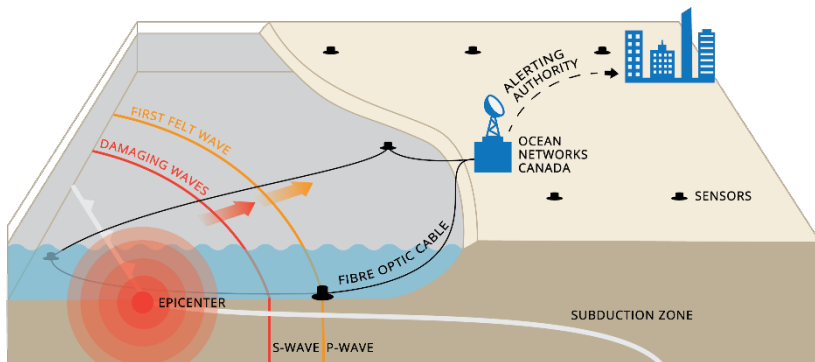
Strombolian eruption from Etna's Voragine central crater (I) and strong glow from the SE crater in the right foreground (image taken on 2 Jan 2021 evening by Domenico Mazzaglia / facebook)

<https://www.usgs.gov/natural-hazards/volcano-hazards/>

<https://www.nap.edu/read/24650/chapter/6#55>

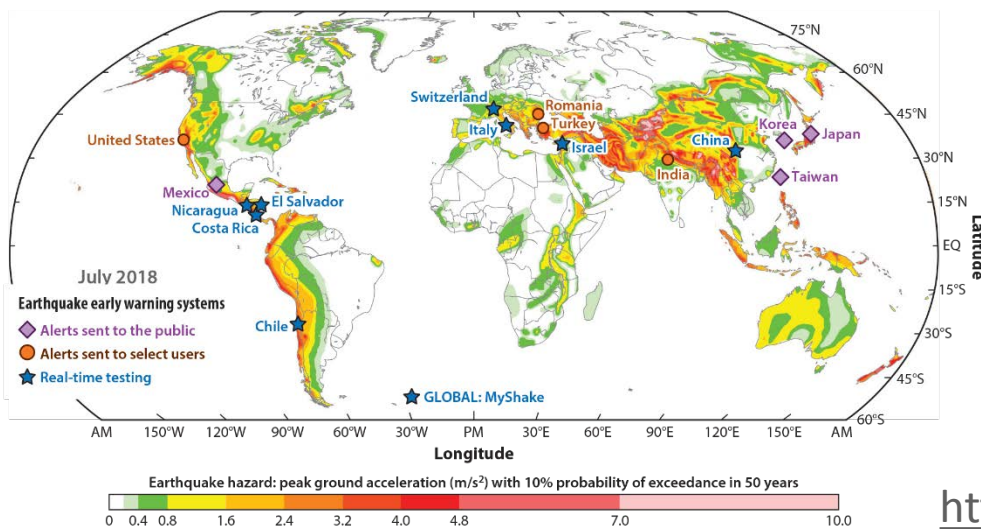


# Včasné varování před silnými vlnami při zemětřesení (sekundy)



<https://www.oceannetworks.ca/innovation->

<https://www.universityofcalifornia.edu/new>



## Osvěta

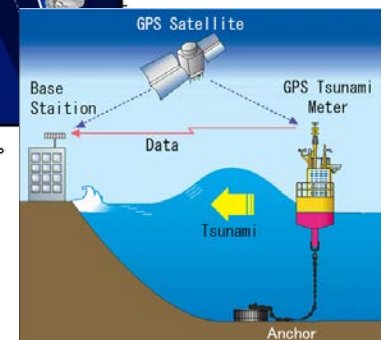
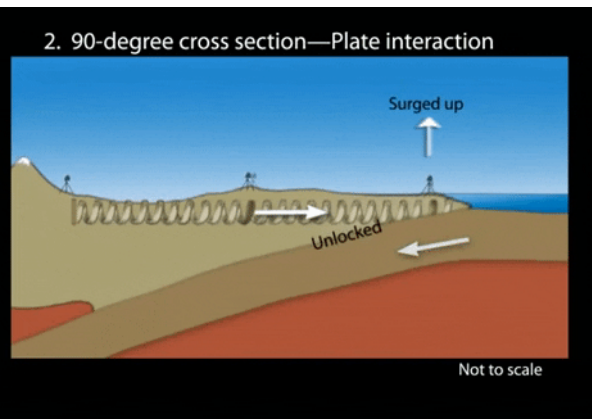
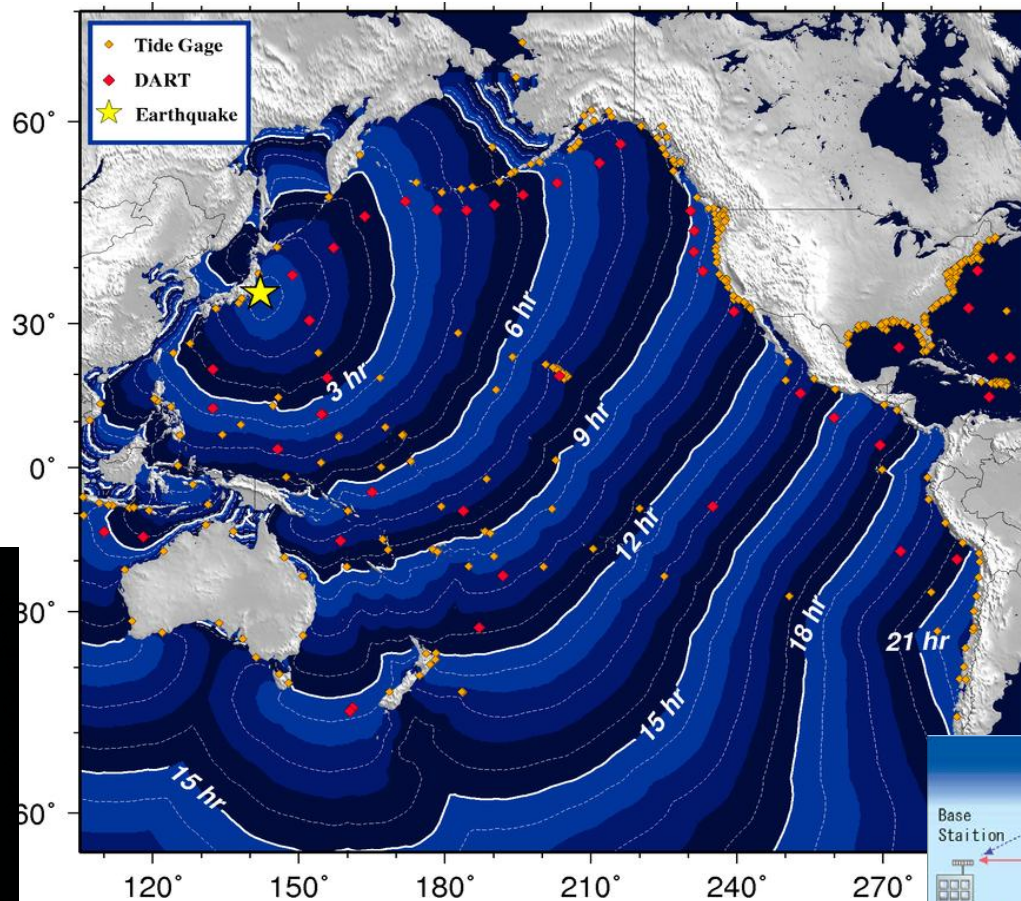


<https://www.earthquakeauthority.com/Blog/2>

# Varování před tsunami (hodiny)

vlna tsunami  
cca 800 km/hod

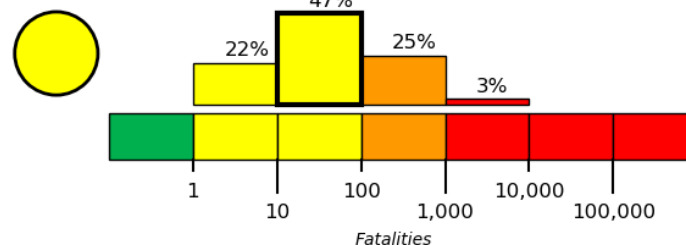
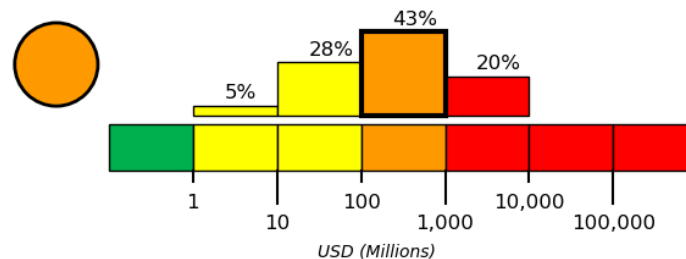
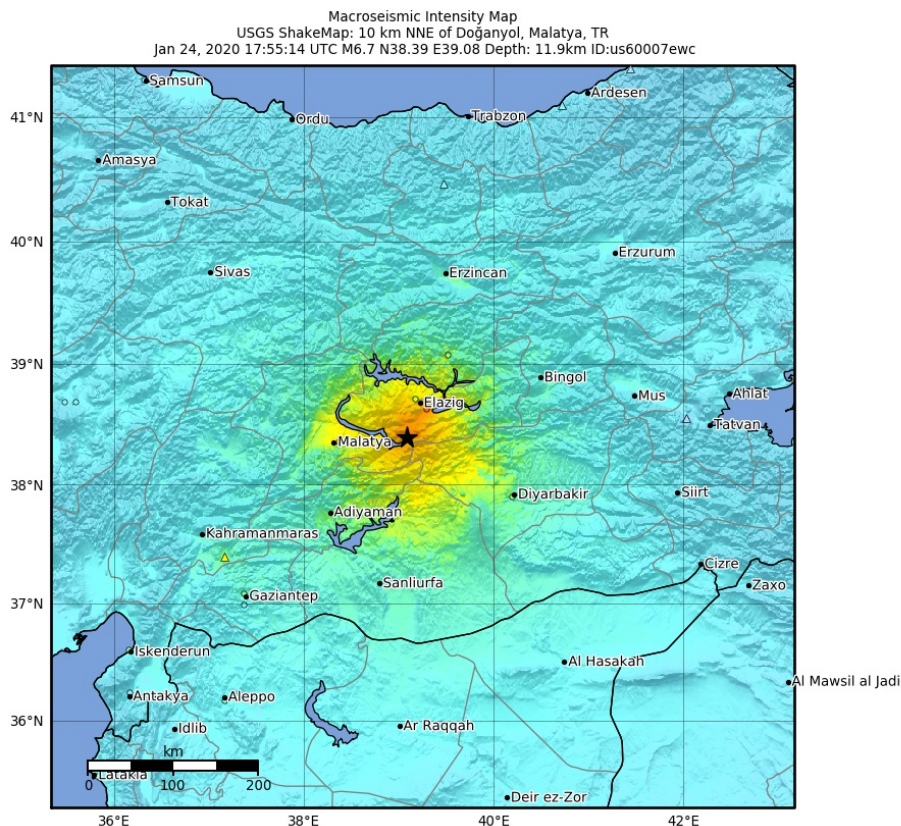
seismická vlna  
5.5 km/s, t.j. cca  
20 000 km/hod



Nelineární 3D pohybová rovnice,  
aproximace pro „mělkou vodu“ s  
okrajovou podmínku (tvar dna, pohyb dna v ohnisku)

# Systemy rychlé reakce, odhad účinků pro řízení státu a záchranáře, USGS

## M 6.7 Turecko Elazig, 24. 1. 2020



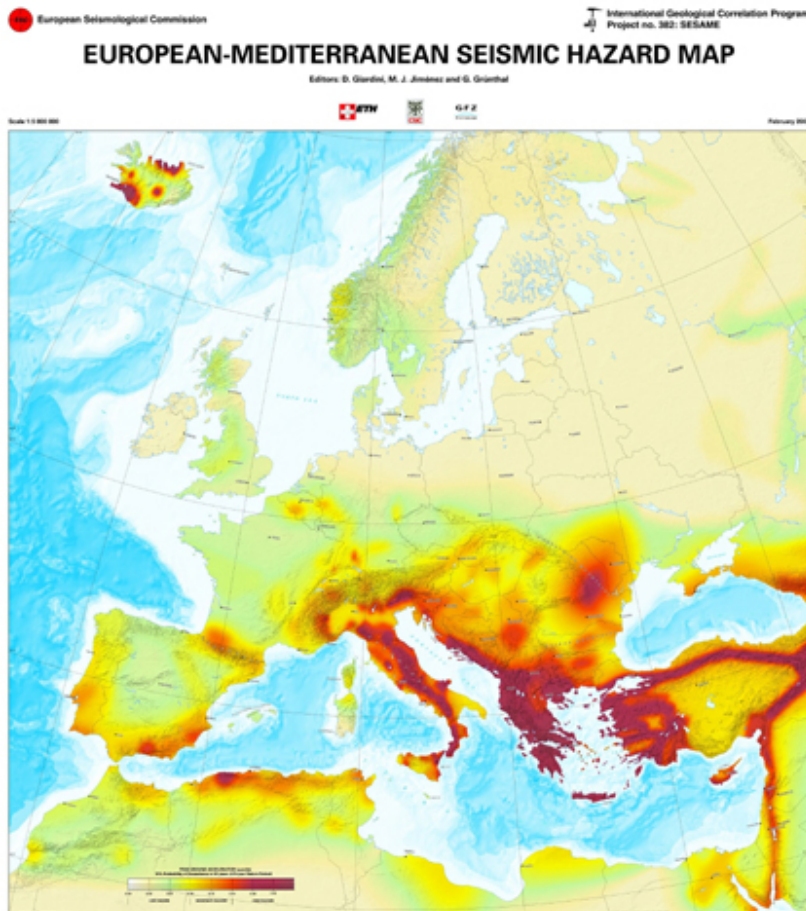
SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
DAMAGE	None	None	None	Very light	Light	Moderate	Moderate/heavy	Heavy	Very heavy
PGA(%g)	<0.05	0.3	2.76	6.2	11.5	21.5	40.1	74.7	>139
PGV(cm/s)	<0.02	0.13	1.41	4.65	9.64	20	41.4	85.8	>178
INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based on Worden et al. (2012) Version 7: Processed 2020-01-25T17:56:13Z  
 △ Seismic Instrument ○ Reported Intensity ★ Epicenter

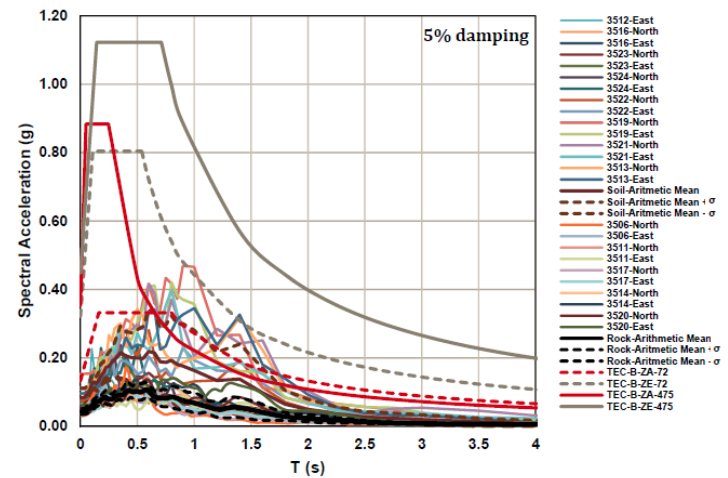
[https://en.wikipedia.org/wiki/2020 Elazi%C4%B1](https://en.wikipedia.org/wiki/2020_Elazi%C4%B1)

<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/latest-earthquakes/map/>

# Hodnocení ohrožení pro výstavbu, zejména pro kritické objekty. Předpověď možných účinků (kmitů, sesuvů, místního zesílení).



Konfrontace předpovědí účinků a skutečnosti (příklad: M7, Samos, Řecko, říjen 2020)



Projektová a reálná spektra odezvy

# Odolné nové stavby, zpevnění starých

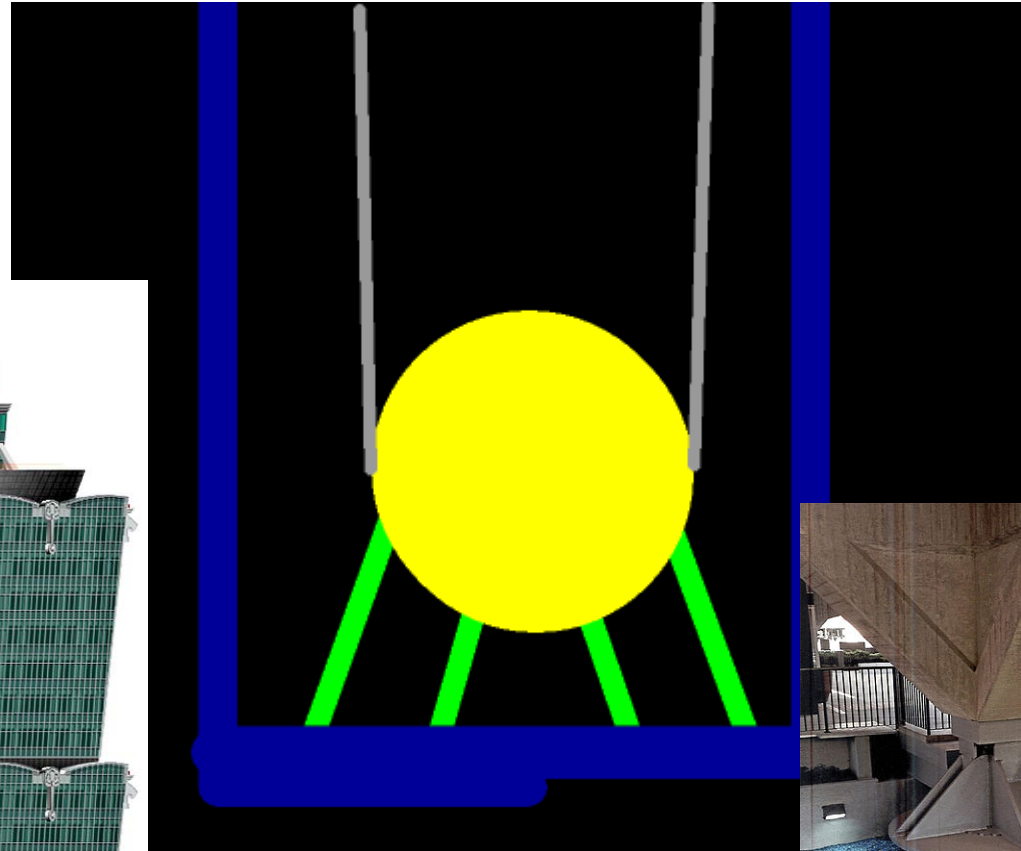
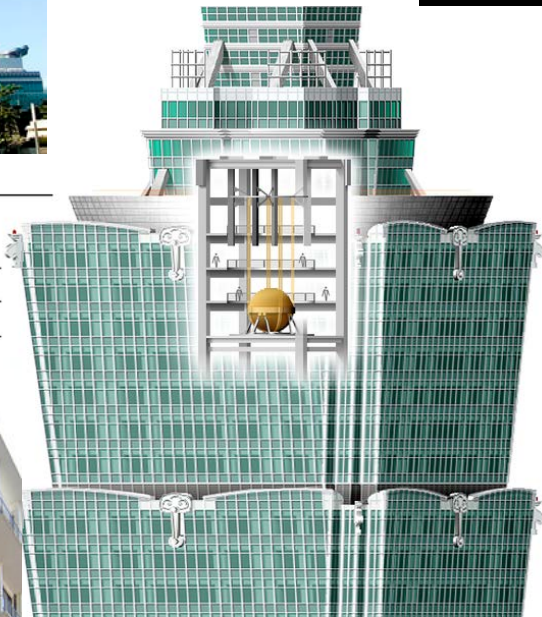


91st Floor (390.60 m)  
(Outdoor Observation Deck)

89th Floor (382.20 m)  
(Indoor Observation Deck)

88th Floor

87th Floor



K potlačení rezonance



[https://en.wikipedia.org/wiki/Tuned mass damper#/media/File:Taipei\\_101](https://en.wikipedia.org/wiki/Tuned_mass_damper#/media/File:Taipei_101)

# Společenské souvislosti, politika

- Sparta, Řecko, rok **464** př. n.l. .... faktor **peloponéských válek**
- Lisabon, Portugalsko **1755**, M8.7, 70 000 obětí ... Osvícenství, **Voltaire**, převrat v jeho filozofickém myšlení , *Poème sur la désastre de Lisbonne*.
- Caracas, Venezuela **1812** dočasná porážka **S. Bolívara** (ale později urychlení osvobození pro koloniální nadvládu)
- Kanto, Japonsko **1923**, M7.9, 140 000 ... **K. Čapek** , *Chvějící se svět*, ale také **růst moci japonské armády**
- Managua, Nikaragua **1972**, M6.3, cca 10 000 obětí ... vzrůst lidové podpory **sandinistů**
- Tangshan , Čína **1976**, M7.2, cca 400 000... **urychlení konce „kulturní revoluce“**

Politické a vládní změny např. také Indie **2001**, Chile **2010**, atd.

# Poselství

- **Měření** (seismika a kosmická geodézie) jsou na vysoké úrovni (hustota, přesnost).
- Data umíme (**částečně**) **modelovat**, tj. odvodit fyzikální modely zemského nitra dlouhodobých deformací desek a krátkodobých procesů na zlomech.
- Některé modely lze přetvořit ve **společenské produkty ke zmírnění následků** (dlouhodobá předpověď ohrožených míst, rychlé varování v průběhu z., atd.)
- **Čím více víme, tím víc ještě chceme zjistit.** Pokrok vyžaduje **lépe poznat zlomový proces** v široké škále prostorových a časových měřítek, a to jak z hlediska **fyziky**, tak **i geologie, chemie, mineralogie**. **Snad hlubinné sítě optických kabelů do nitra zlomových systémů?**
- **Zabývat se seismologií na MFF UK a ve světě je vzrušující, perspektivní a užitečné.**

**K. Čapek, *Chvějící se svět***

Lidové noviny 6.9.1923 (po  
zemětřesení Kanto, Japonsko)

„Lidé slyšte, stalo se na obzoru  
velké neštěstí: Je nutno podniknout  
sbírku. Ale ne sbírku haléřů a  
milosrdenství. Je nutno sesbírat  
v lidstvu vše, co pojí nás, veškeré  
děti této chvějící se nebeské koule:  
solidaritu, bratrství...“

Děkuji  
za pozvání  
a za pozornost.

<http://geo.mff.cuni.cz/~jz/>