

# Tektonická geomorfologie

RNDr. Petra Štěpančíková, Ph.D.

Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., Praha

Oddělení neotektoniky a termochronologie

# Obsah:

- 1.** Tektonika a různé úrovně studia tektonických procesů podle prostorových a časových měřítek. Definice aktivní tektoniky, tektonických procesů, jejich typy v návaznosti na odlišné tektonické režimy podmíněné deskovou tektonikou.
- 2.** Zemětřesení a jeho příčiny, charakteristiky, primární a sekundární projevy zemětřesení. Seismické ohrožení
- 3.** Tektonická geomorfologie a její přístupy, obecné teorie role tektoniky při vývoji reliéfu, typy výzdvihu reliéfu
- 4.** Odraz tektonických procesů v říčním systému, asymetrie povodí, analýza údolní sítě. Analýza fluviálních tvarů reliéfu porušených tektonickými pohyby - říční terasy, aluviální kužely, analýza podélných a příčných profilů vodních toků

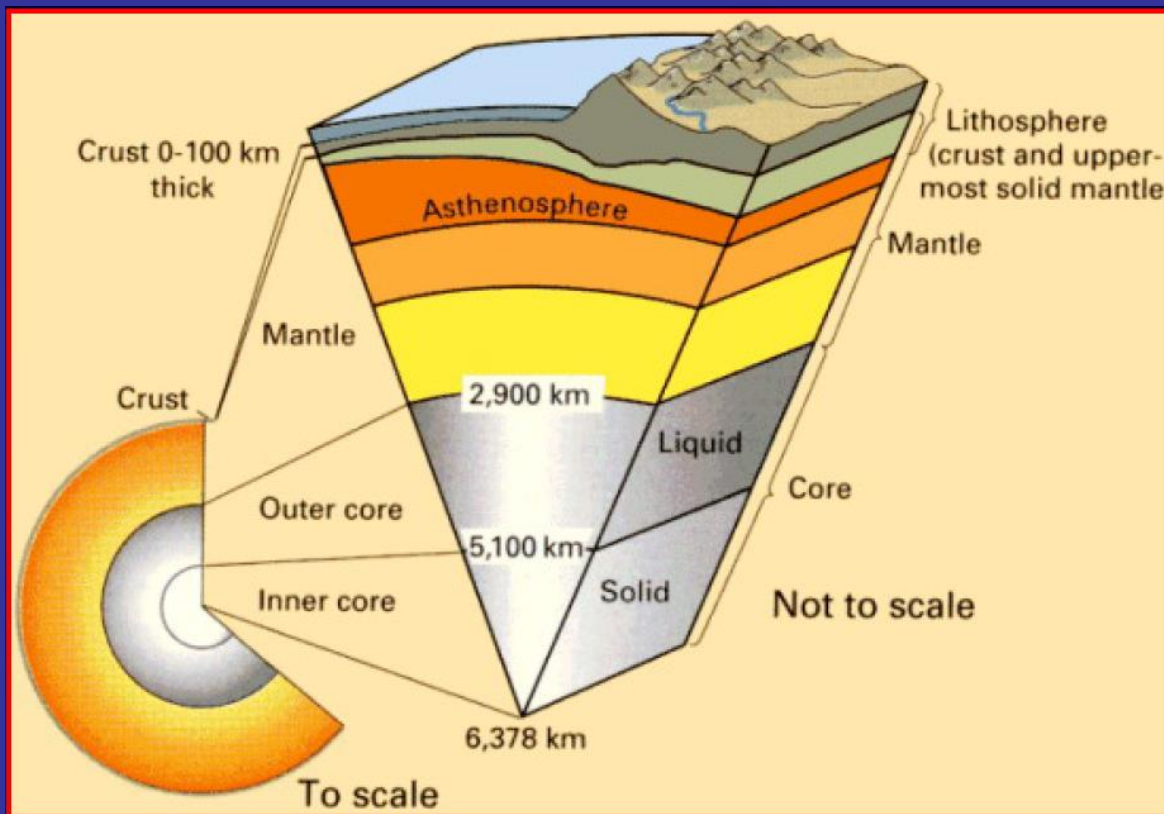
6. Aktivní okraje pohoří a jejich analýza. Zlomové svahy, jejich vývoj, degradace, možnosti jejich datování
7. Morfometrické metody analýzy reliéfu ovlivněného tektonickými procesy a hodnocení jejich intenzity, zarovnané povrchy a jejich různá pozice jako ukazatel potenciálních tektonických pohybů
9. Paleoseismologie, výzkum prehistorických zemětřesení z geologického záznamu, rekonstrukce pohybů. Studium paleoseismických parametrů aktivních zlomů, intenzita pohybů, průměrná rychlost pohybů, časoprostorové rozložení zemětřesení v rámci zlomu
10. Geofyzikální a geodetické metody výzkumu aktivní tektoniky, přehled metod monitoringu současných pohybů

# Doporučená literatura

- Bull W. B.. **Tectonic Geomorphology of Mountains**. Blackwell Publishing, 2007, 316. ISBN 978-1-4051-5479-6
- Burbank, D., W., Anderson, R., S.. **Tectonic Geomorphology**. Blackwell Science, Malden, 2001, 274. ISBN 0-632-04386-5
- Keller, E. A., Pinter, N.. **Active tectonics-Earthquakes, Uplift and Landscape**. 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey. 2002, 362, ISBN 0-13-088230-5
- McCalpin J. (ed.). **Paleoseismology**. 2nd ed., Academic Press, 2009, 613. ISBN 978-0-12-373576-8
- Schumm S. A., Dumont J. F., Holbrook J. M. **Active Tectonics and Alluvial Rivers**. Cambridge University Press, 2006, 276. ISBN 0521-89058-6

# 1. Aktivní tektonika, tektonické procesy a jejich typy v různých tektonických režimech

**Tektonika** – endogenní procesy, struktury a reliéf spojený s deformací zemské kůry (pohyb litosférických desek)



Litosféra = pevný obal Země (až do 100 km)

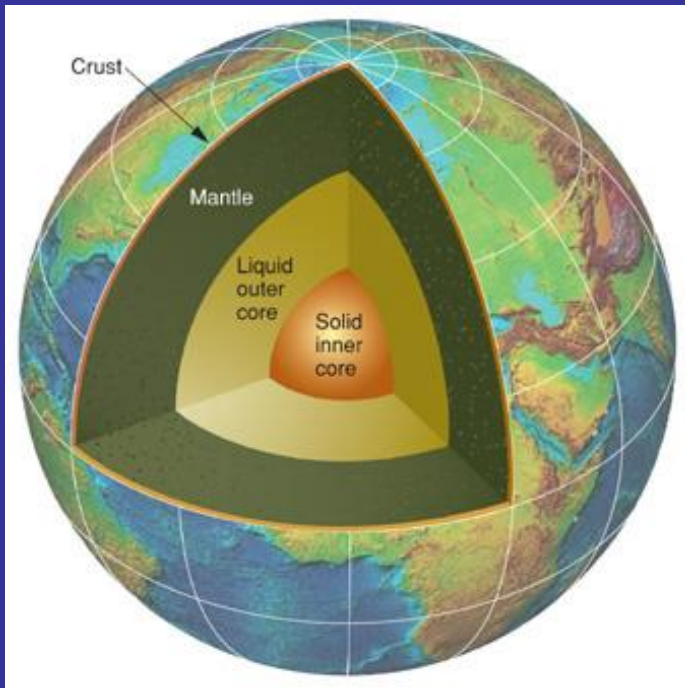
zemská kůra + svrchní plášť

kontinentální kůra (30-80km), hustota  $2,7 \text{ g/cm}^3$

Sedimenty, granity, basalty

oceánská kůra (5-10km), hustota  $2,9-3,0 \text{ g/cm}^3$

Sedimenty, basalty



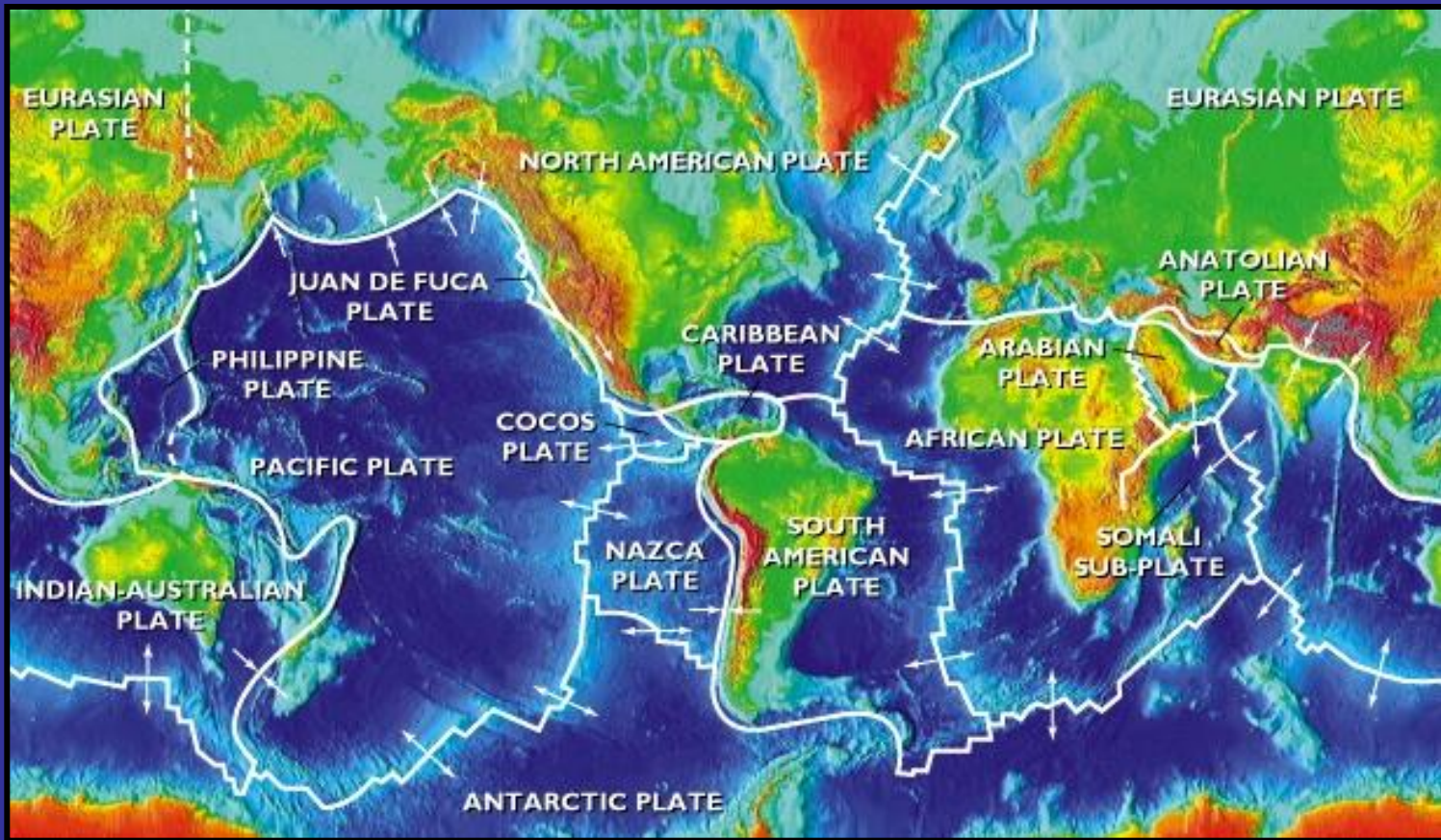
přímá pozorování – vrty, geol. informace (xenolity)  
nepřímá – rychlosti seismických vln

Mohorovičičova diskontinuita – kůra/plášť –  
změna hustoty, vyšší rychlosti P-vln

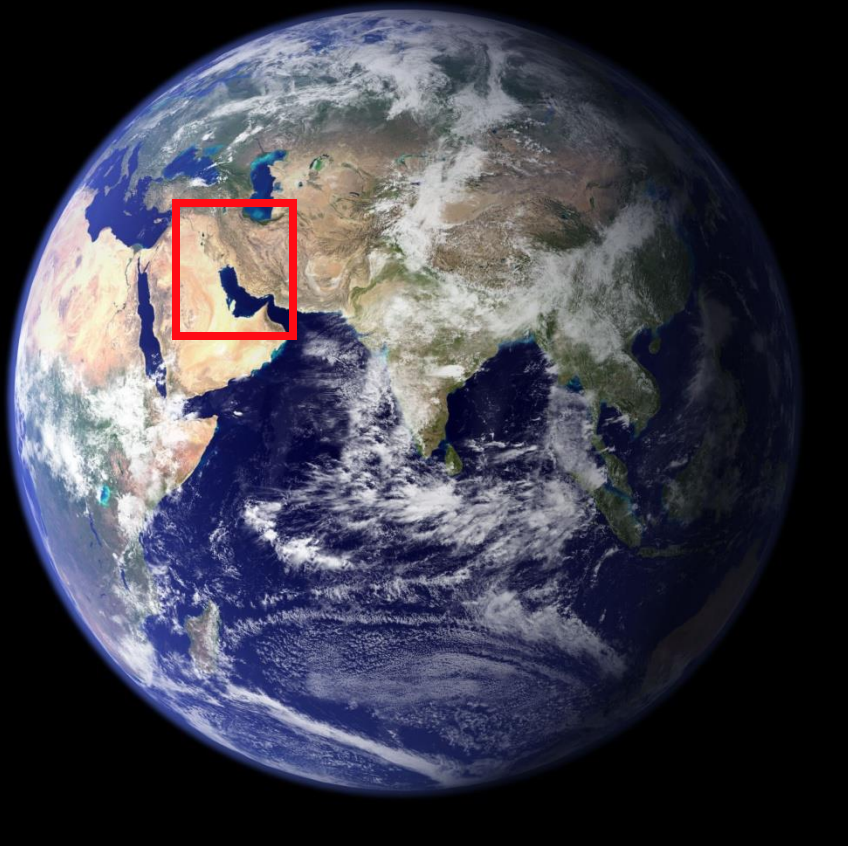
Litosféra/astenosféra (semifluidní) –  $3,6 \text{ g/cm}^3$ ,  
nižší viskozita pod litosf. deskami



# Globální tektonika: vznik kontinentů a oceánských pánví



Desková tektonika



$10^7$  m

10 000 km

Měřítko 1:100 000 000

Satellite images

mikrodesky

## Globální neotektonika

### Regionální neotektonika



$10^6$  m

1000 km

Měřítko 1:10 000 000

horská pásma



# Aktivní tektonika

## Tektonická geomorfologie



$10^5$  m

100 km

Měřítko 1:1 000 000



$10^4$  m

10 km

Měřítko 1:100 000



$10^3$  m

1 km

Měřítko 1:10 000

Lokální měřítko: jednotlivé tvary reliéfu – vrásy, zlomové svahy, tvary porušené zlomy

Satelitní snímky, mapy



$10^1$  m

10 m

**Měřítko 1:100**

offset channels

outcrop/ hand sample



$10^0$  m

1 m

**Měřítko 1:10**

tektonická brekcie

## Strukturní geologie Petrologie



$10^{-1}$  m

10 cm

**Měřítko 1:1**

## Časová škála tektoniky:

závisí na prostorovém měřítku ve kterém se procesy uplatňují:

Vývoj kontinentů - tisíce milionů let

Velké oceánské pánve - stovky milionů let

Malé horské hřbety - miliony let

Malé vrásky - drobné elevace - stovky tisíc let

Zlomový svah (fault scarp) - náhle při jednom větším zemětřesení



**Neotektonika** – korové pohyby začínající po nejmladší orogenní fázi nebo anebo podmíněné nejmladším napěťovým polem v kůře v pozdním mladším terciéru (neogénu) a kvartéru

**Aktivní tektonika** – tektonické procesy, které deformují zemskou kůru na lokálním měřítku a na časové škále významné pro lidskou populaci (zemětřesení - EQs)

**Aktivní zlomy** (active faults) – pohyb během posledních 10 000 let  
– holocén (paleoseismologie)

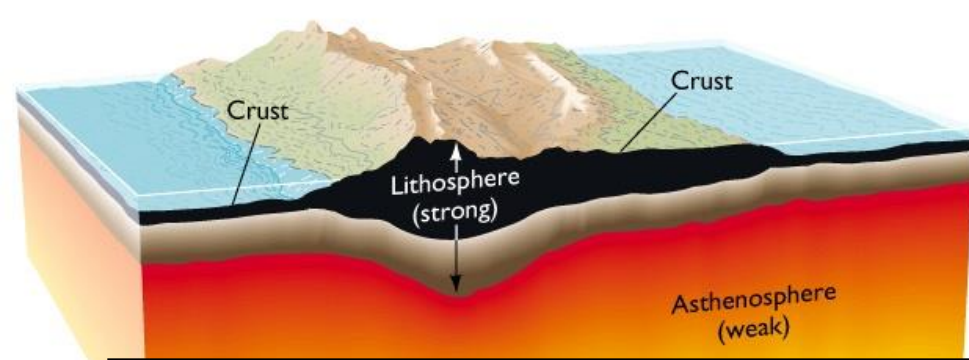
**Potenciálně aktivní zlomy** (capable faults) – aktivita během kvartéru  
(2,6 mil. let)

**Rychlosti** tektonických procesů:

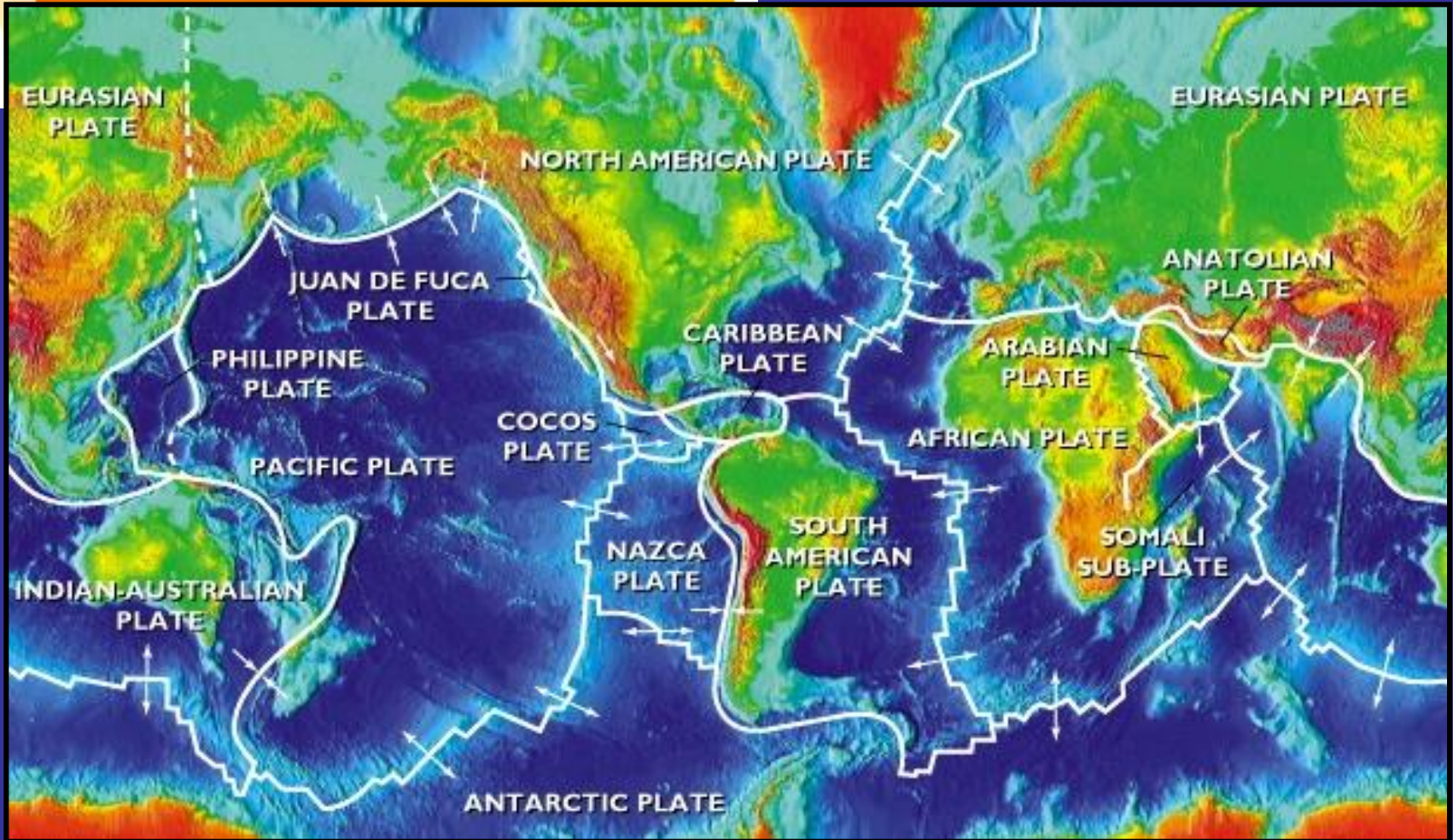
Velmi variabilní – 0,00X-X mm/rok pro pohyb na zlomu

X cm/rok pro pohyb na deskovém rozhraní





Tektonické procesy – řízeny silami v hloubce, které deformují kůru => vznik oceán. pánví, kontinentů, pohoří



Litosféra rozbitá do desek – relativní pohyby, triple junction



## Desková rozhraní

typ tektonického režimu

- divergentní (rifty, oc.hřbety) (spreading)
- konvergentní (subdukce) (shortening)
- transformní

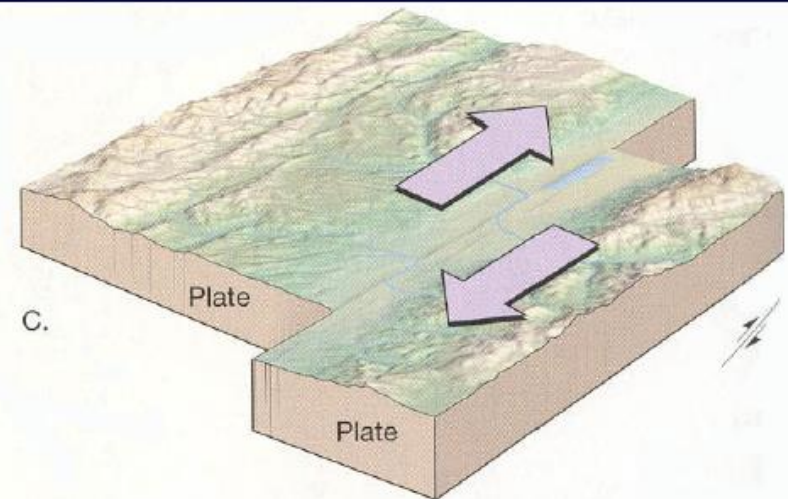
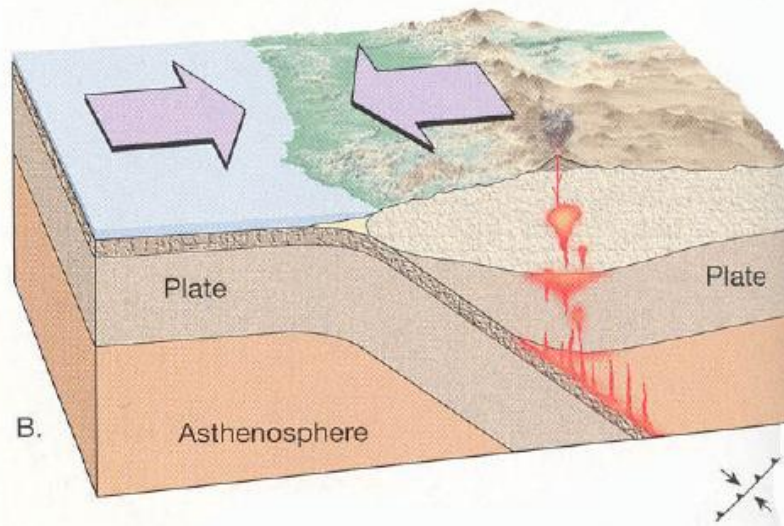
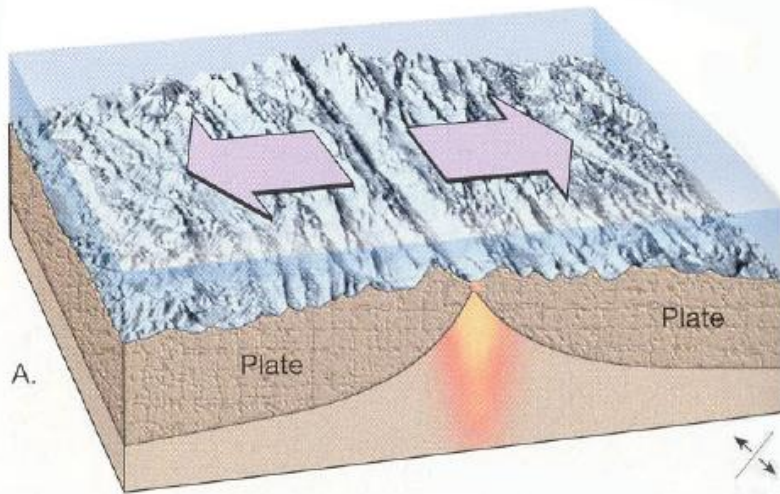
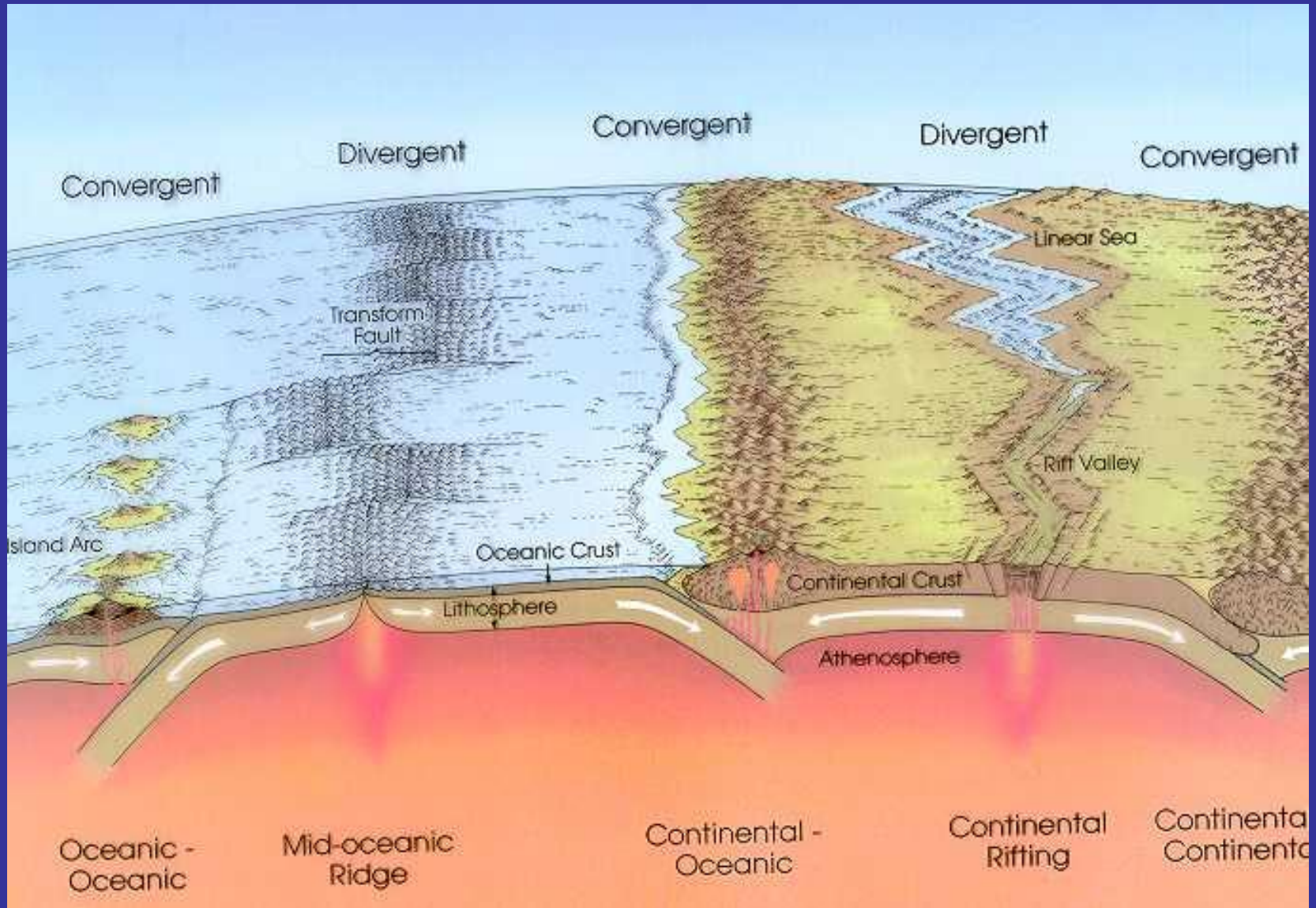


Figure 7.9 The three types of plate boundaries. A. Divergent boundary. B. Convergent boundary. C. Transform fault boundary.

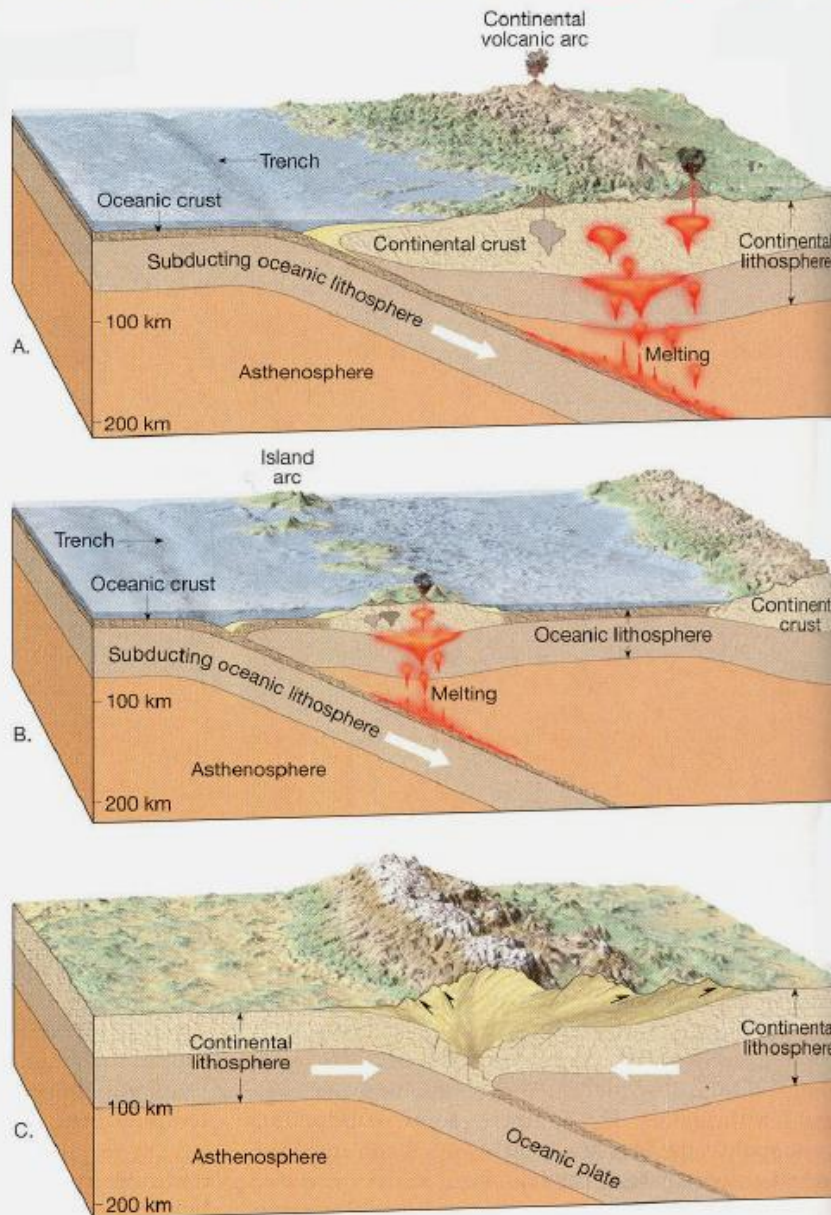
Pohyby na okrajích litosférických desek – produkují **napětí** (stress) (jednotka tlaku na plochu) a vytvářejí **deformaci** (strain) (změna v délce, objemu atd.) [video!](#)

# Tektonický cyklus



[Video!](#)





## Three types of convergent Plate boundaries :

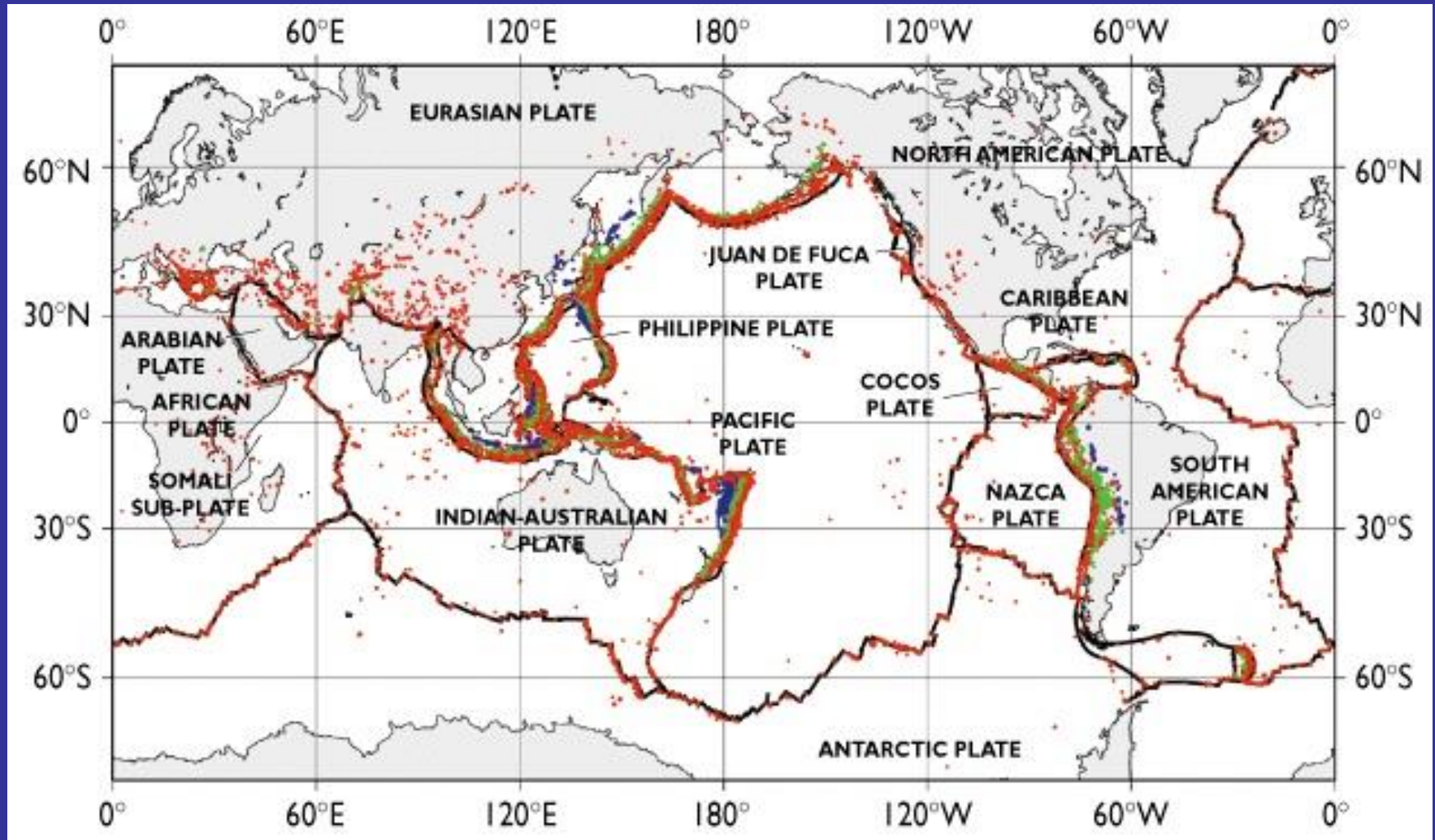
A. Oceanic-continental

B. Oceanic-oceanic

C. Continental-continental

[Video!](#)

# Aktivní tektonika: potvrzení deskové tektoniky



- Zemětřesení (Earthquakes)
- Vulkány
- Zlomy (Faults)
- Topografie
- Deformace povrchu

World Seismicity, 1963–2000

[Video!](#)

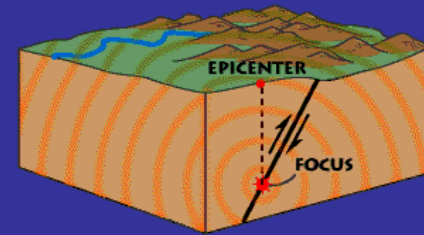
# Tektonické pohyby

## Seismické pohyby

- doprovázené zemětřeseními

## Aseismické pohyby (tektonický creep)

- více či méně kontinuální pohyby s minimální seismicitou, omezené na úzkou zónu



## Seismické tektonické pohyby

### Zemětřesení:

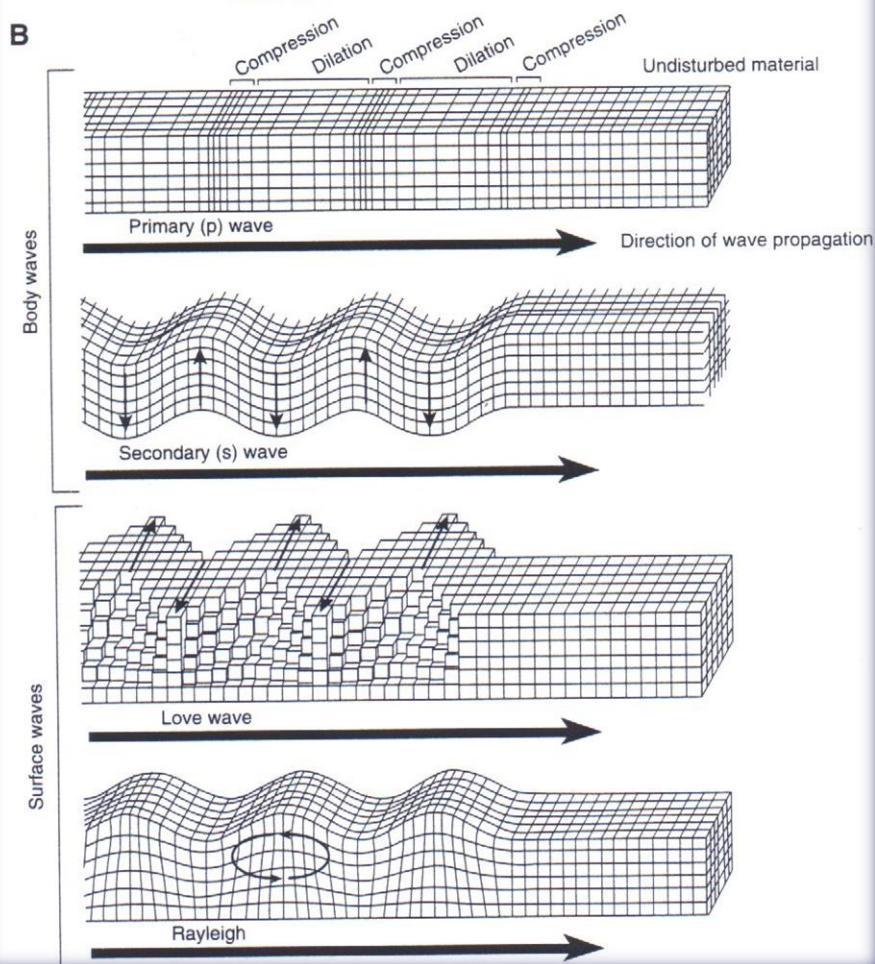
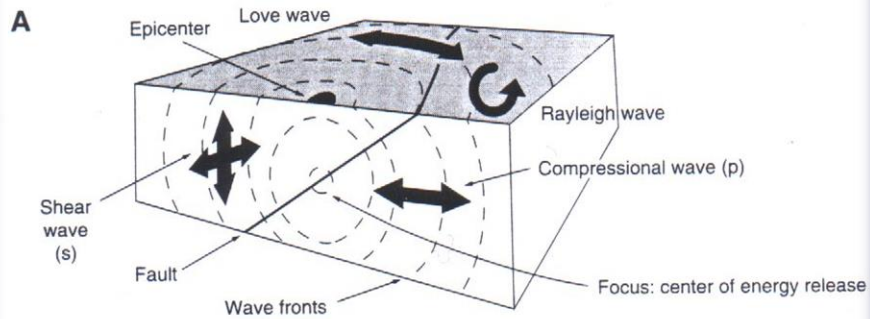
- napětí překročí mez pevnosti horniny, vznik trhliny nebo pohybu na již existující
- uvolnění energie - zemětřesení (seismické vlny - elastické)
  - pohyb na zlomu (faulting) (porušení hornin + deformace)

Předtřesy (foreshocks) - nízká intenzita

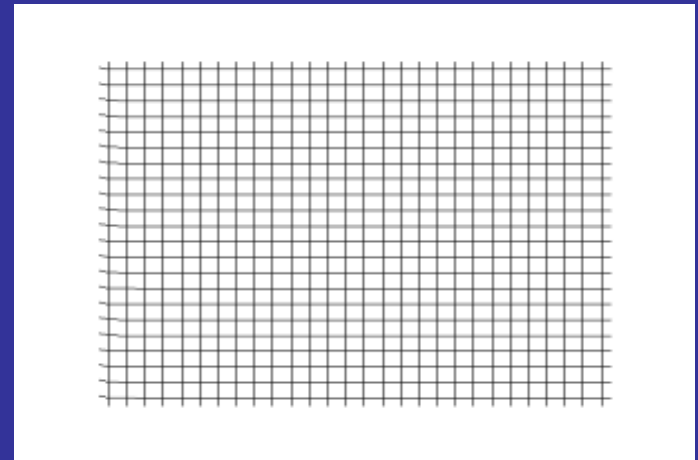
Hlavní otřes (main shock) - desítky sekund až minut s max. intenzitou

Dotřesy (aftershocks) - i několik měsíců se slábnoucími účinky



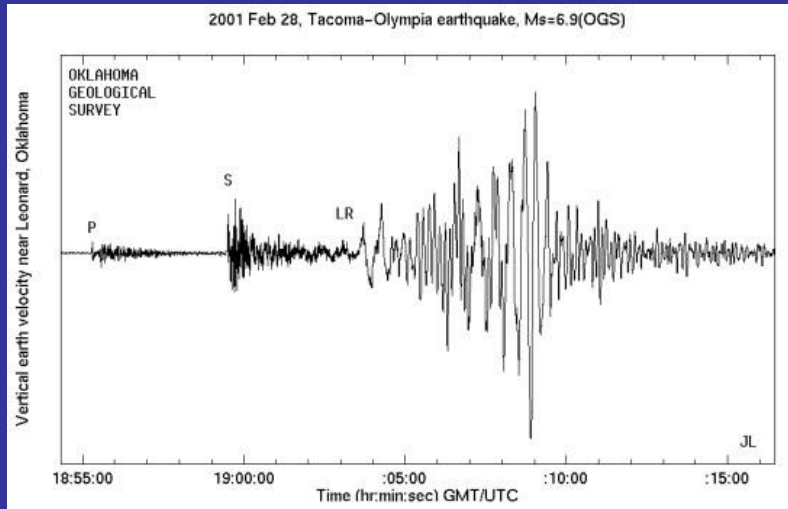


P-vlny (podélné)  
 S-vlny (příčné)  
 Povrchové vlny - složené -  
 Loveho, Reyleighovy

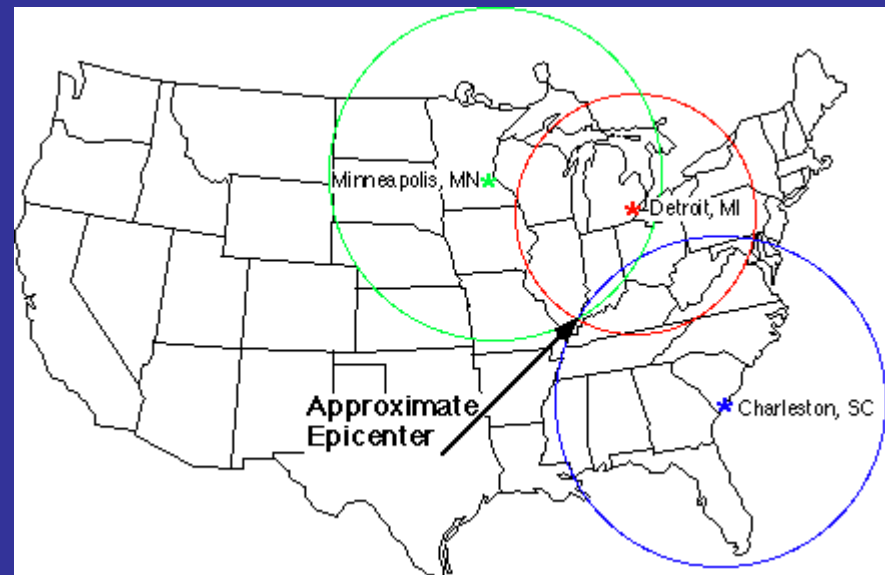
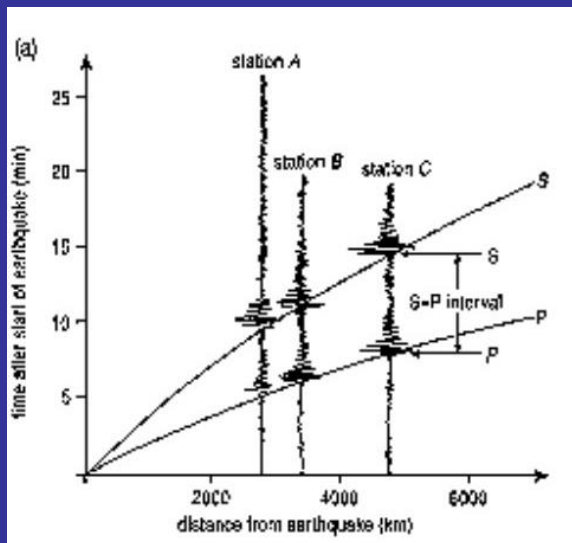
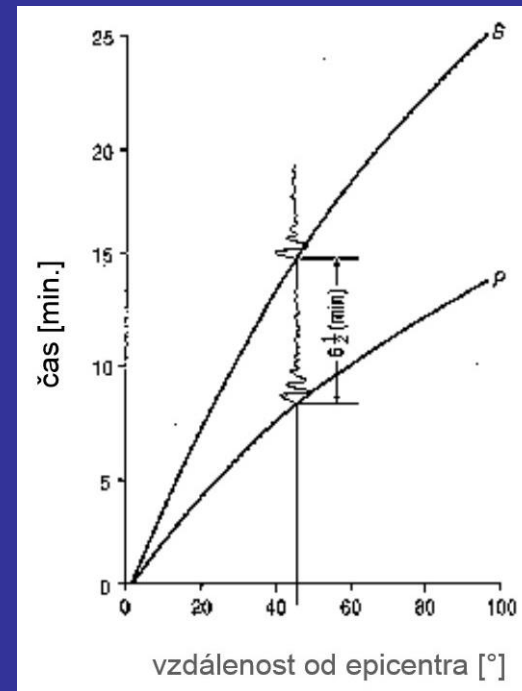


P - rychlejší  
 S - pomalejší

# Lokalizace epicentra



určení vzdálenosti ohniska  
- časový rozdíl příchodu P a S vln



# Magnitudo

## Richterovo magnitudo $M$

### Logaritmická stupnice

- logaritmus největší amplitudy vlny 100km od ohniska

$$M = \log a$$

## Momentové magnitudo $M_w$

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 10.7,$$

Seismický moment  $M_0$  - celkové množství energie transformované během zemětřesení

Energie se transformuje do

- vzniku trhlin a deformace hornin
- tepla
- vyzařené seismické energie  $E_s$

Empirický vzorec - energie (MJ)

$$\log E = 11,8 + 1,5 M$$

např.  $M=7$  (30x více  $E$  než  $M=6$  a 300x více než  $M=5$ )

Tabulka 1. Četnosti ročního výskytu zemětřesení ve světě podle velikosti otřesů

Charakteristik a zemětřesení	Velikost otřesu (magnitudo)	Roční průměrný počet otřesů	Uvolněná energie (ekvivalent kg explosiv)
Ničivé	8.0 a více	1	56.000.000.000
Velké	7.0 - 7.9	18	1.800.000.000
Silné	6.0 - 6.9	120	56.000.000
Střední	5.0 - 5.9	800	1.800.000
Lehké	4.0 - 4.9	6 200	56.000
Menší	3.0 - 3.9	49 000	1.800
Velmi slabé	2.0 - 2.9	365 000	56

# Intenzita

Veličina určovaná na základě pozorování **makroseismických účinků**

- škody na budovách, povrchu, atd.
- subjektivní veličina závislá na určení míry škod spojených s otřesy
  - klesá se vzdáleností od epicentra

## Makroseismické stupnice

Rossi - Forei - **X.** stupňová (1883) nejstarší stupnice

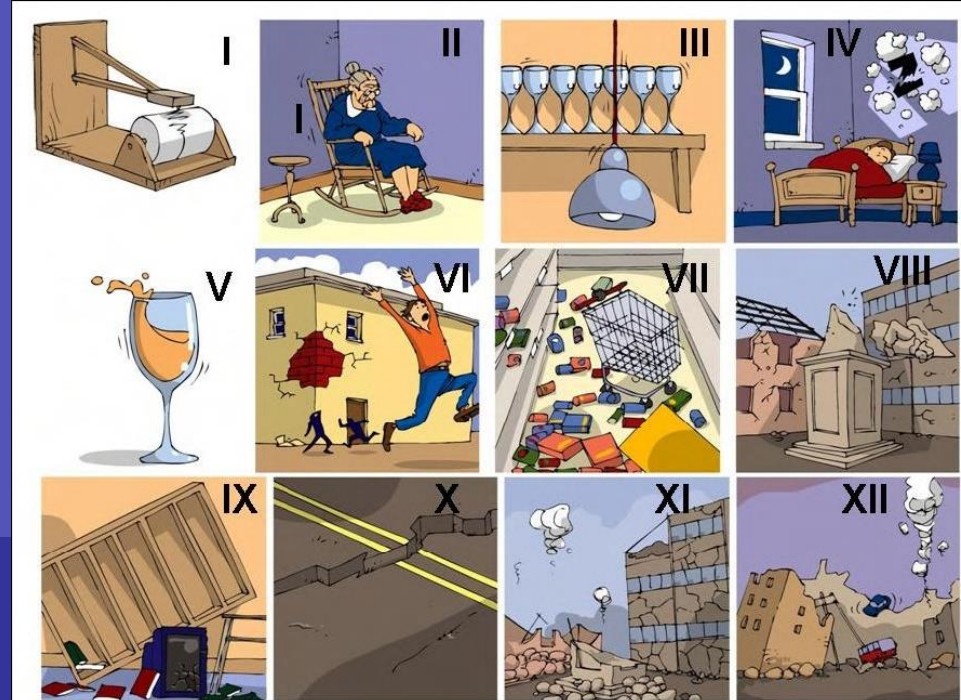
ostatní - **XII.** stupňové škály

MCS - Mercalli - Cancani - Sieberg (1902)

MSK -64 - Medveděv-Sponheuer-Kárník

MMI - Modified Mercalli (USA)

EMS-98 - European Macroseismic Scale



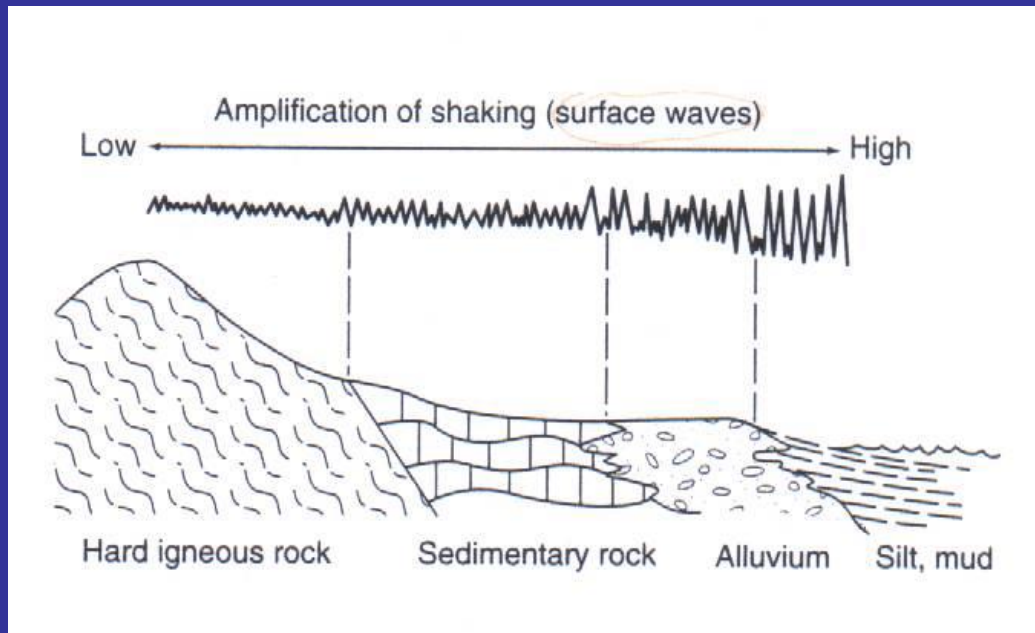
# EMS-98 - European Macroseismic Scale

I. Nepocítěno	Zemětřesení nebylo pocítěno.
II. Stěží pocítěno	Pocítěno jen velmi málo jednotlivci v klidu v domech.
III. Slabé	Pocítěno uvnitř budov některými osobami. Lidé v klidu pociťují jako houpání nebo lehké chvění.
IV. Značně pozorované	Zemětřesení uvnitř budov cítí mnozí, venku jen výjimečně. Někteří lidé jsou probuzeni. Okna, dveře a nádobí drnčí.
V. Silné	Uvnitř budov cítí většina, venku někteří. Mnozí spící se probudí. Někteří jsou vystrašení. Budovy vibrují. Visící objekty se značně houpají. Malé předměty se posouvají. Dveře a okna se otvírají a zavírají.
VI. Mírně ničivé	Mnozí lidé jsou vystrašeni a vybíhají ven. Některé předměty padají. Mnohé budovy utrpí malé nestrukturální škody jako např. vlásečnicové trhliny nebo odpadnuté malé kousky omítky.
VII. Ničivé	Většina lidí je vystrašena a vybíhá ven. Nábytek se posouvá. Předměty padají z polic ve velkém množství. Mnohé dobře postavené běžné budovy utrpí střední škody: malé trhliny ve zdech, opadá omítka, padají části komínů; ve stěnách starších budov jsou velké trhliny a příčky jsou zřícené.
VIII. Těžce ničivé	Mnozí lidé mají problémy udržet rovnováhu. Mnohé domy mají velké trhliny ve stěnách. Některé dobře postavené běžné budovy mají vážně poškozené stěny. Slabé starší struktury se mohou zřítit.
IX. Destruktivní	Všeobecná panika. Mnoho slabých staveb se řítí. I dobře postavené běžné budovy utrpí velmi těžké škody: těžké poškození stěn a částečně i strukturální škody.
X. Velmi destruktivní	Mnohé dobře postavené běžné budovy se řítí.
XI. Devastující	Většina dobře postavených běžných budov se řítí. I některé seismicky odolné budovy jsou zničeny.
XII. Úplně devastující	Téměř všechny budovy jsou zničeny.



# Makroseismické účinky na povrchu - ovlivňující faktory

- velikost zemětřesení, hloubka ohniska, vzdálenost od epicentra, odezva povrchových vrstev, zrychlení pohybu podloží
- bezprostřední blízkost zlomů, orientace zlomů v ohniskové oblasti
- lokálně - složení a fyzický stav hornin, hloubka hladiny podzemní vody, geologická stavba (site effect)



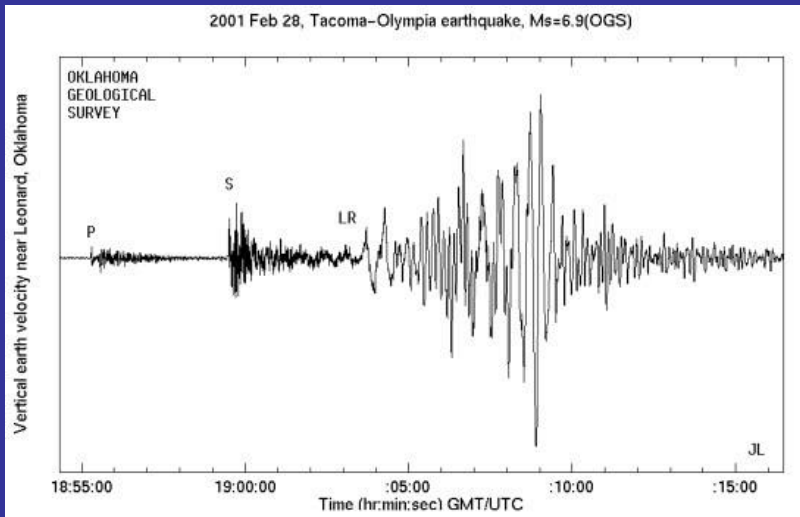
- **Nezpevněné sedimenty a půda při povrchu**  
(otřesy amplifikovány v nezpevněných sedimentech)
- **Mocnost sedimentů nad pevným podložím**  
(otřesy amplifikují, když jsou sedimenty mocnější)

Mexico city 1985,  $M = 8$  s epicentrem 350km, 10.000 obětí

# Vzdálenost od epicentra - typ vln

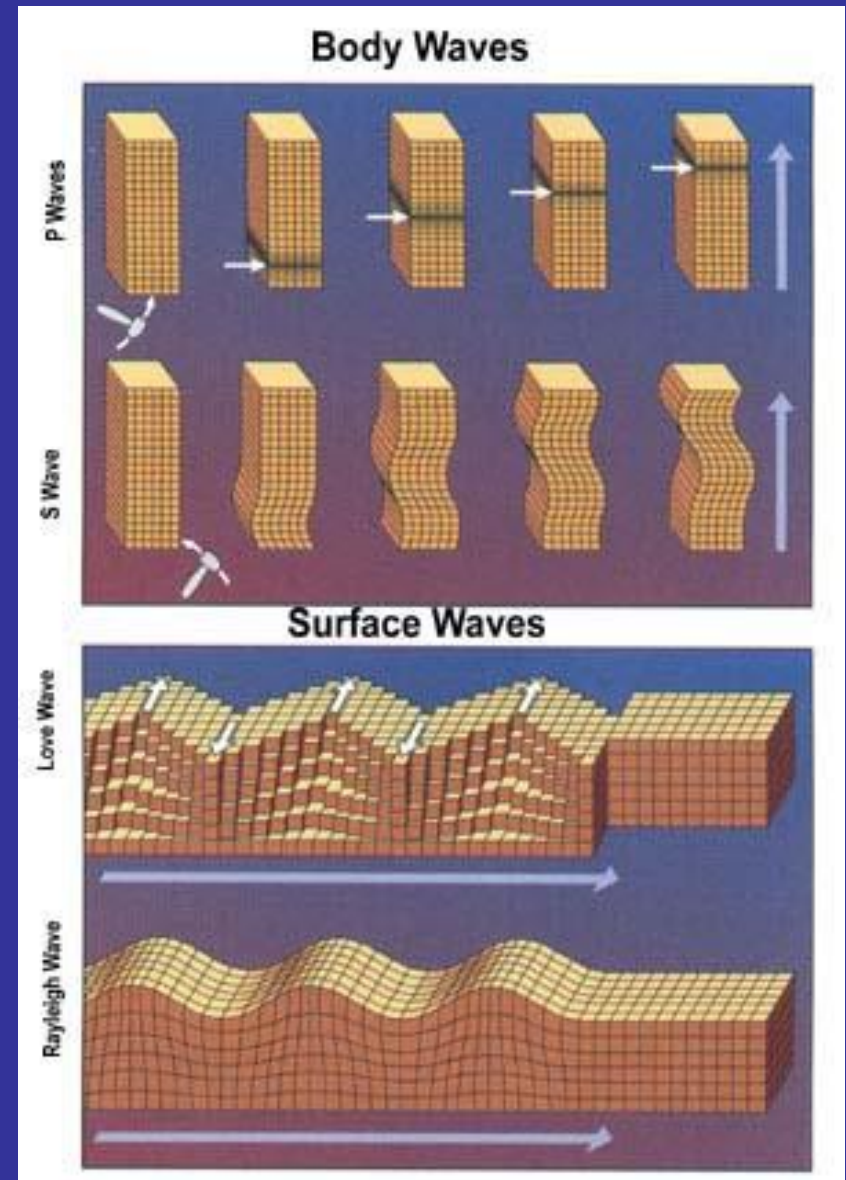
P, S vlny - vysoká frekvence

Povrchové vlny - interferencí  
prostorových vln (P,S), nízká  
frekvence, největší amplitudy  
dále od epicentra



Nízké budovy - vysoká vlastní  
frekvence

Výškové budovy - nízká vlastní  
frekvence



## Zrychlení pohybu podloží (ground motion acceleration)

vertikální složka (amplitudy o 50% menší než u horizontální)

horizontální složka - peak horizontal ground acceleration (PHA)

- špičkové zrychlení

PHA - rozhodující pro stavební normy (jaderné el. v ČR - 0,1g)

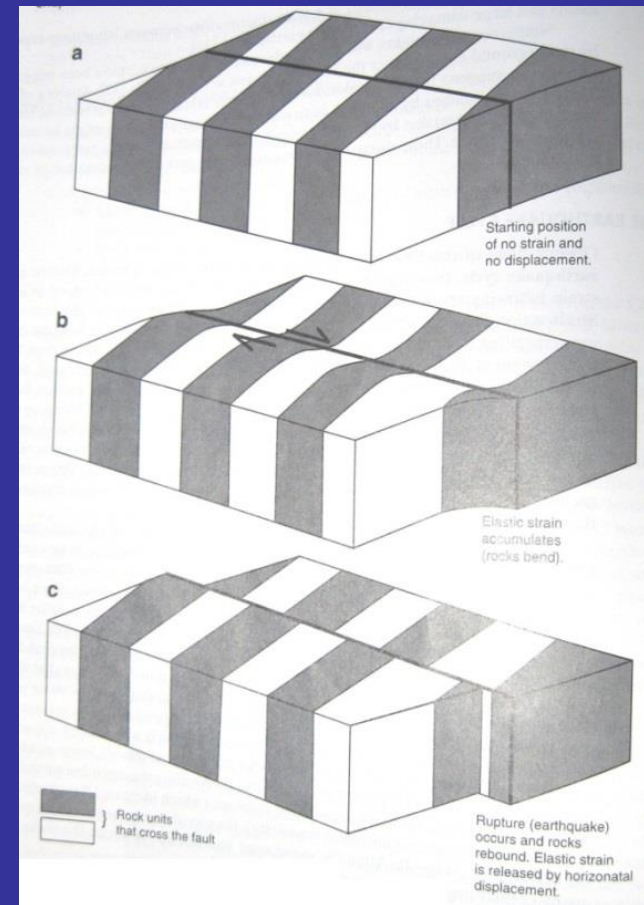
Magnitude	Area Felt Over (square kilometers)	Distance felt (kilometers)	Intensity (maximum expected Modified Mercalli)	Ground Motion: (Average peak horizontal acceleration g = gravity = 9.8 meters per second per second)
3.0–3.9	1,950	25	II–III	Less than 0.15 g
4.0–4.9	7,800	50	IV–V	0.15–0.04g
5.0–5.9	39,000	110	VI–VII	0.06–0.015g
6.0–6.9	130,000	200	VII–VIII	0.15–0.30g
7.0–7.9	520,000	400	IX–X	0.50–0.60g
8.0–8.9	2,080,000	720	XI–XII	Greater than 0.60g

### Vztah magnituda a intenzity

Tohoku 2011 M=9, 2,7g; Christchurch 2011 M=6,4, 2,13g; Kobe 1995 M=6,8, 0,8g

## Seismický cyklus:

1. Akumulace napětí = elastická deformace
2. Během zemětřesení napětí uvolněno a dochází k permanentní deformaci - porušení hornin, napětí klesne (stress drop) = elastic rebound (deformovaný materiál do původního tvaru - vyrovnání)





# Účinky zemětřesení

## Primární efekty:

ground-shaking motion a porušení povrchu - surface rupture, vydutí, úklon povrchu atd.

(porušení a kolaps velkých, vysokých budov, mostů, přehrad, tunelů, potrubí atd.)



Chi-chi EQ Taiwan 1999 with  $M=7.6$



Landers EQ, Emerson fault, CA 1992,  $M=7.3$

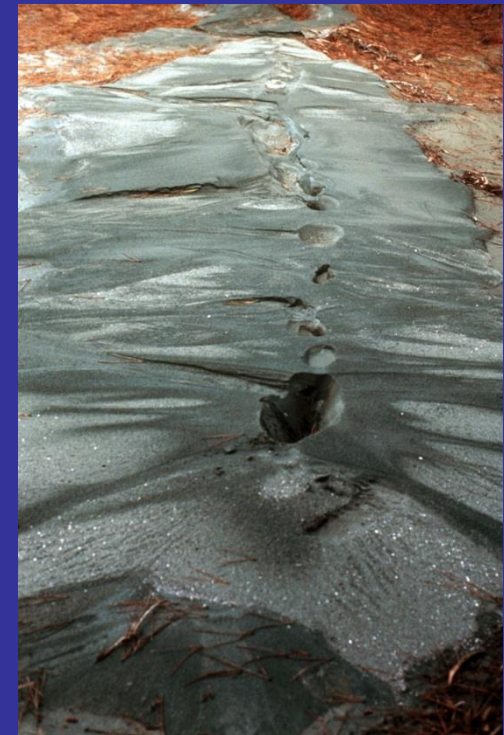
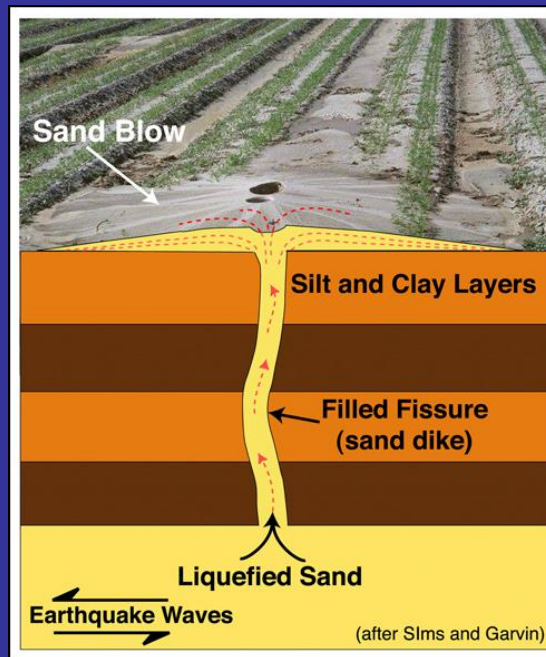


## Sekundární efekty: Krátkodobé

**Likvefakce** (ztekucení půdy) - vodou nasycený materiál se při třesení transformuje do tekutého stavu (nezpevněná půda v bláto), kompakce způsobí nárůst pórových tlaků = materiál ztrácí pevnost a teče.

Voda pod půdou uniká pryč a dochází k poklesům povrchu - rozsáhlé škody na budovách, silnicích.

### Sand volcanoes, sand dykes



1964, Japonsko

Vrstvy písku pod povrchem ztekutí a pod tlakem svrchních vrstev využijí všechny trhliny či linie oslabení, aby vytekly vzhůru a vytryskly jako erupce písku a vody water.

[Video!](#)



# Seismicity (seismites)



Escape structures



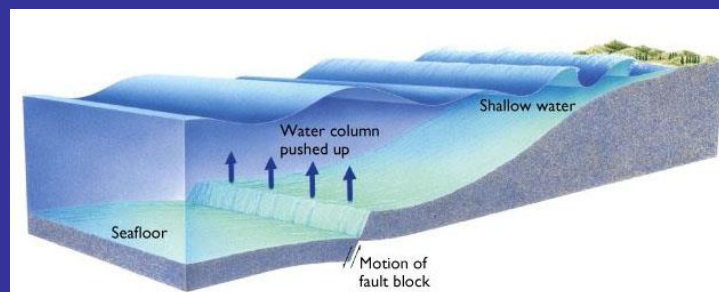
## Sesuvy

Kostarika 2009, Mw=6,2, hloubka 6km, 550 foreshoks, 180 sesuvů



Video - bez deště, pouze sesuv+ porová voda

Tsunami – seismické mořské vlny



Požáry

Povodně - po kolapsu hrází

Video!

# Dlouhodobé následky

Regionální subsidence

Změna v hladině podzemní vody



Ghost forest

Změna pobřežní morfologie

subsidence





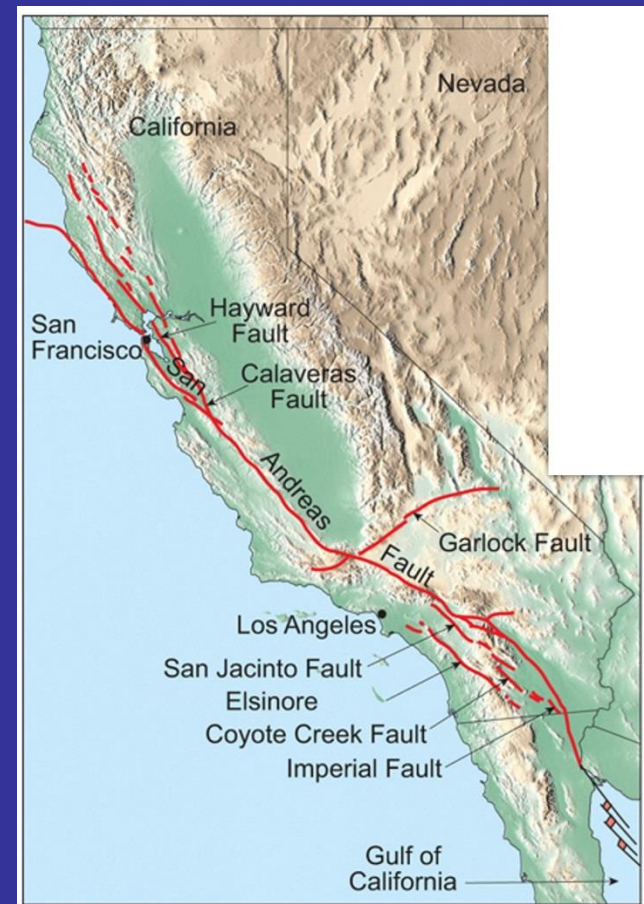
# Tektonický creep – aseismické pohyby

Pohyb na zlomu doprovázen minimem zemětřesení, více méně kontinuální, omezen na úzkou zónu

Geodeticky detekovatelný (GPS, InSAR, creepmeter etc..... )

Méně škody z creepu – obecně podél úzkých zlomových zón s pomalým pohybem

Nepříliš prozkoumán – nepředstavuje seismické ohrožení



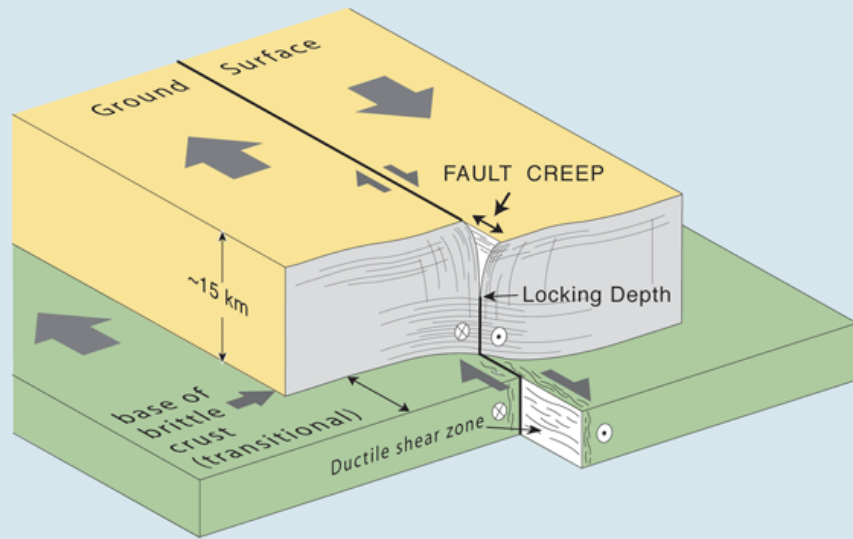


Creepmeters

Hayward fault – SAF zone, San Francisco Bay area



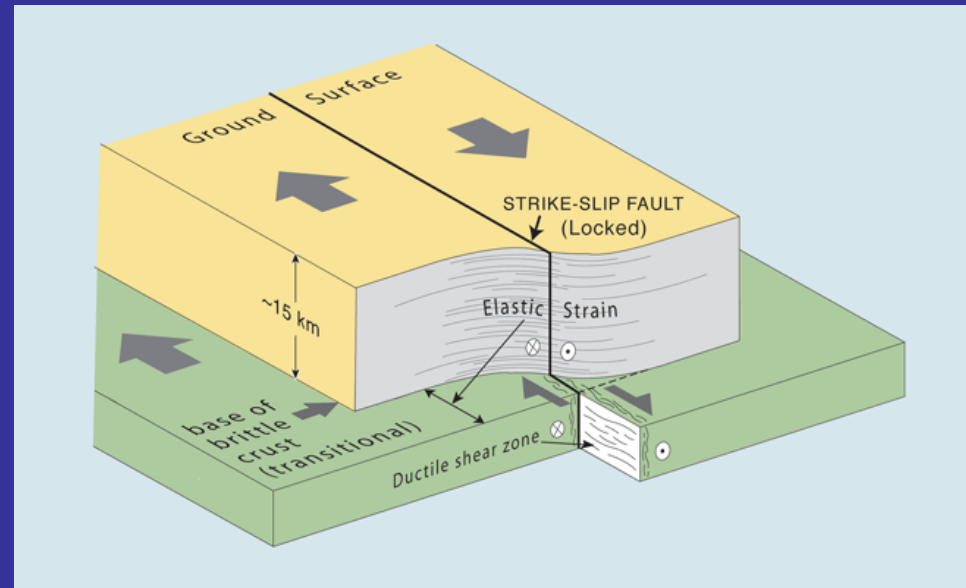
Rychlost creepu měřena creepmetry instalovanými napříč zlomem - typicky 5 mm/rok, max. ve Fremont 7,8 – 8,5 mm/rok



V hloubce mezi 5 a 12 km - pohyb uskutečněn zcela pouze při zemětřeseních - povrch a nejhlubší část však také creepuje

Creep od r. 1896 velkého zemětřesení (EQ), creep částečně uvolňuje napětí a energii na zlomu

Vysoká rychlost: postupná pomalá deformace vozovky, budov, chodníků





## Berkeley – Memorial stadium



3,2 cm za 11 let,  
periodické opravy







Contra Costa,



Berkeley, offset na chodníku

Hayward, offset plotu

Vysoká rychlost (creep rate):

## Calaveras fault (SAF zone)

Creep rate – mění se v průběhu doby

1910-1929 žádný creep, (offset na 2 chodnících postavených 1910 a 1929, a vodovodu z r. 1929)

1929 .....- začátek creepu, 8 mm/rok (průměr)

1961 - 1967, slip rate 15 mm/rok

1979....2 lokality monitorovány v Hollistere 6,6 mm/yr a 12 mm/yr (2,3km NW)



Hollister, twisted house

20 000 EQs ročně – **malá**, napětí není akumulováno a uvoňováno pomalým creepem – nemožno podmínit velké zemětřesení





# Calaveras fault - vinařství





## Creepující strom





# Seismické ohrožení

Seismické ohrožení (seismic hazard) lokality - velikost zemětřesení (měřená intenzitou zemětřesení nebo maximálním zrychlením seismických vln), kterou lze v daném místě očekávat za specifikovaný časový interval s určitou pravděpodobností (obvykle 0,95).

Seismické riziko (seismic risk) - soubor jevů, které nastanou při dopadu zemětřesení.

- seismické ohrožení dané lokality
- zranitelnost objektů, technologických zařízení a podloží,
  - v jedné lokalitě s daným seismickým ohrožením - seismická rizika různých objektů různá
  - objekty s rizikovými technologiemi - vyšší seismické riziko (při poškození dopady na člověka, majetek a životní prostředí vyšší)

**Snižování seismického rizika** konkrétního technologického celku - snižováním seismické zranitelnosti objektů pomocí technických prostředků (právní předpisy, normy, technické standardy a pravidla)

# Seismické ohrožení

## funkce místa a času

- poloha lokality vůči ohniskovým oblastem se zemětř. s makroseismickými projevy
  - tj. závisí na velikosti maximálních možných zemětřeseních v jednotlivých ohniskových oblastech, na parametrech šíření seismických vln mezi ohniskovou oblastí a lokalitou a na vzdálenosti mezi lokalitou a ohniskovými oblastmi,
- období (časovém intervalu), ve kterém je seismické ohrožení zvažováno. Protože četnost velkých zemětřesení je malá, tak hodnota ohrožení je jiná pro různé časové intervaly; roste s růstem délky období.

Databáze - geologické, geofyzikální, geotechnické a seismologické

- neotektonická aktivita - seismogenní zóny, oblasti
- seismická aktivita - historická zemětřesení
  - instrumentální seismicita
  - prehistorická seismicita

# Seismické ohrožení jaderných elektráren:

## Informace o:

- geologické stavbě v horizontální a vertikální rovině,
- strukturních a zlomových rozhraních,
- tektonickém vývoji (tj. chronologický model pohybů),
- seismoaktivních úsecích zlomů a o vlastnostech seismogenních pohybů,
- ohniskových oblastech,
- hydrologickém režimu,
- rychlosti smykových vln,
- složení svrchních partií zemské kůry, sesuvech půdy, ztekucení podloží a o seismogenních technogenních zásazích.



## Metody určení seismického ohrožení

**PSHA (Pravděpodobnostní výpočet seismického ohrožení)**

Od 90.let 20.století

Zdokonalení PEGASOS (Abrahamson et al, 2002)

**DSHA (Deterministický výpočet seism. ohrožení)**

Dnes je na ústupu

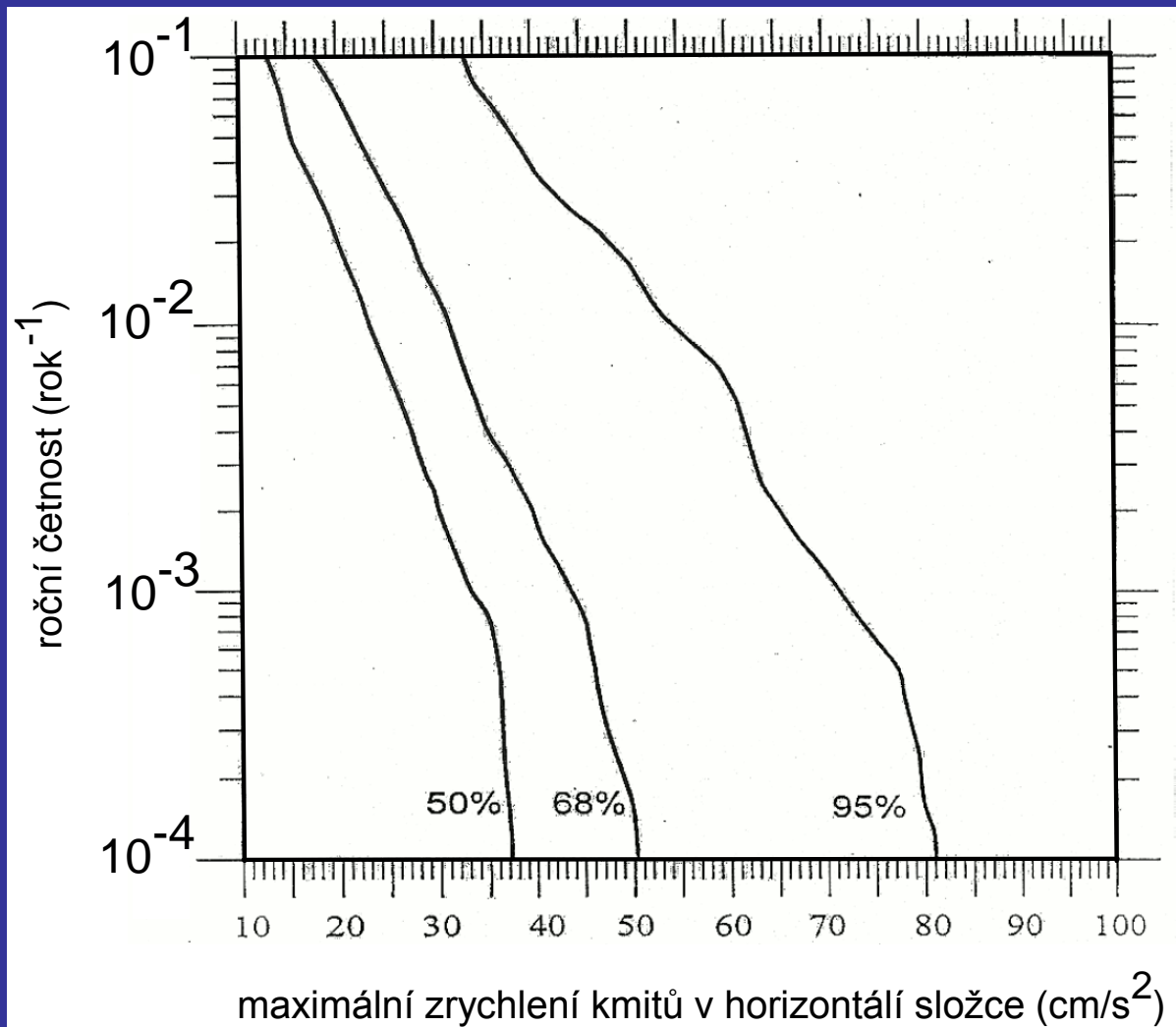
**NDSHA (Neodeterministický výpočet seism. ohrožení)**

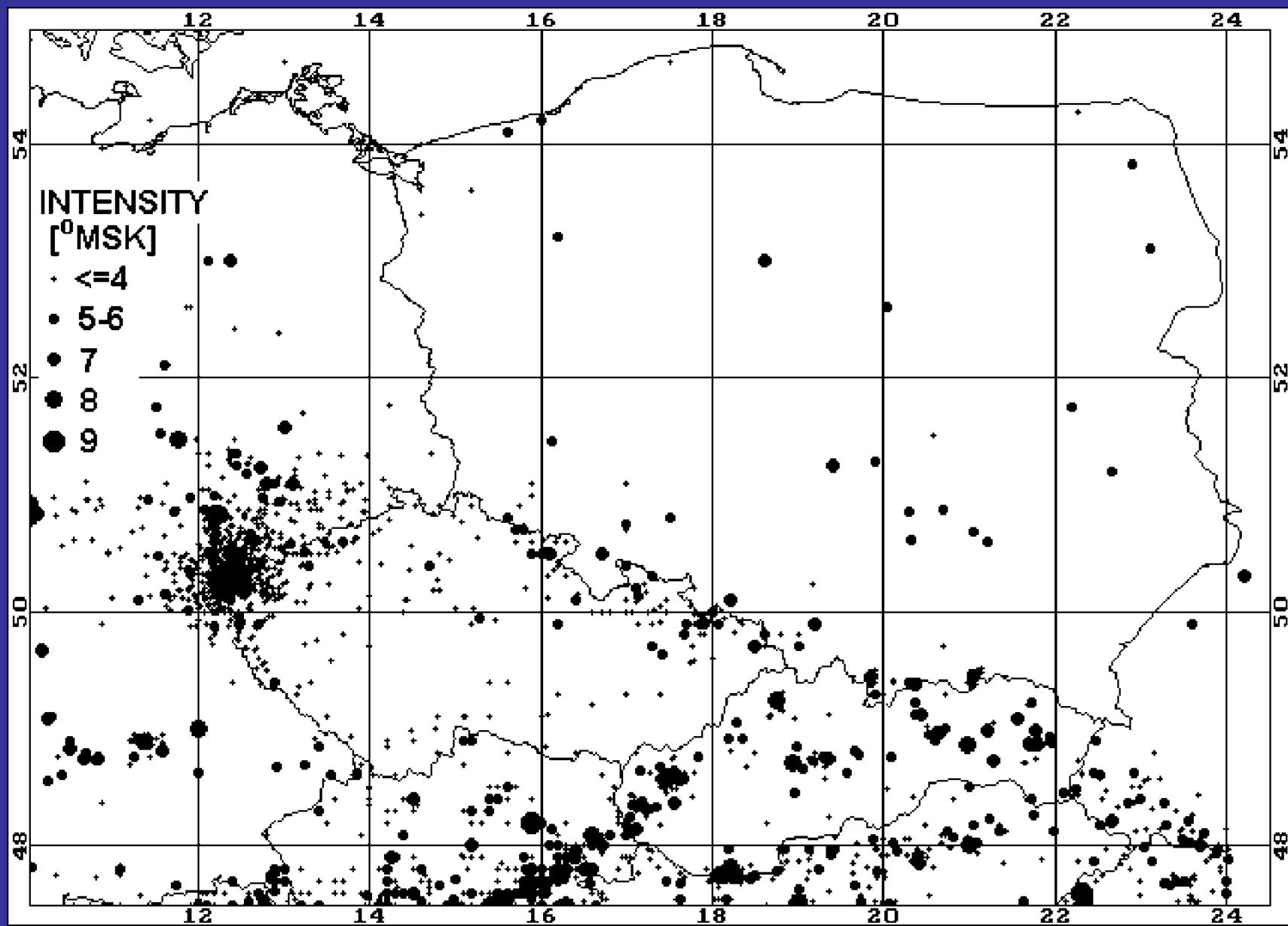
Konkurenční přístup (Panza, Klugel)

- definuje se seismický zdroj pro danou oblast (zlom, seism. region)
- maximální možné očekávané magnitudo zemětřesení
- četnost versus magnitudo
- site effects atd.....

# Příklad - PSHA Temelín

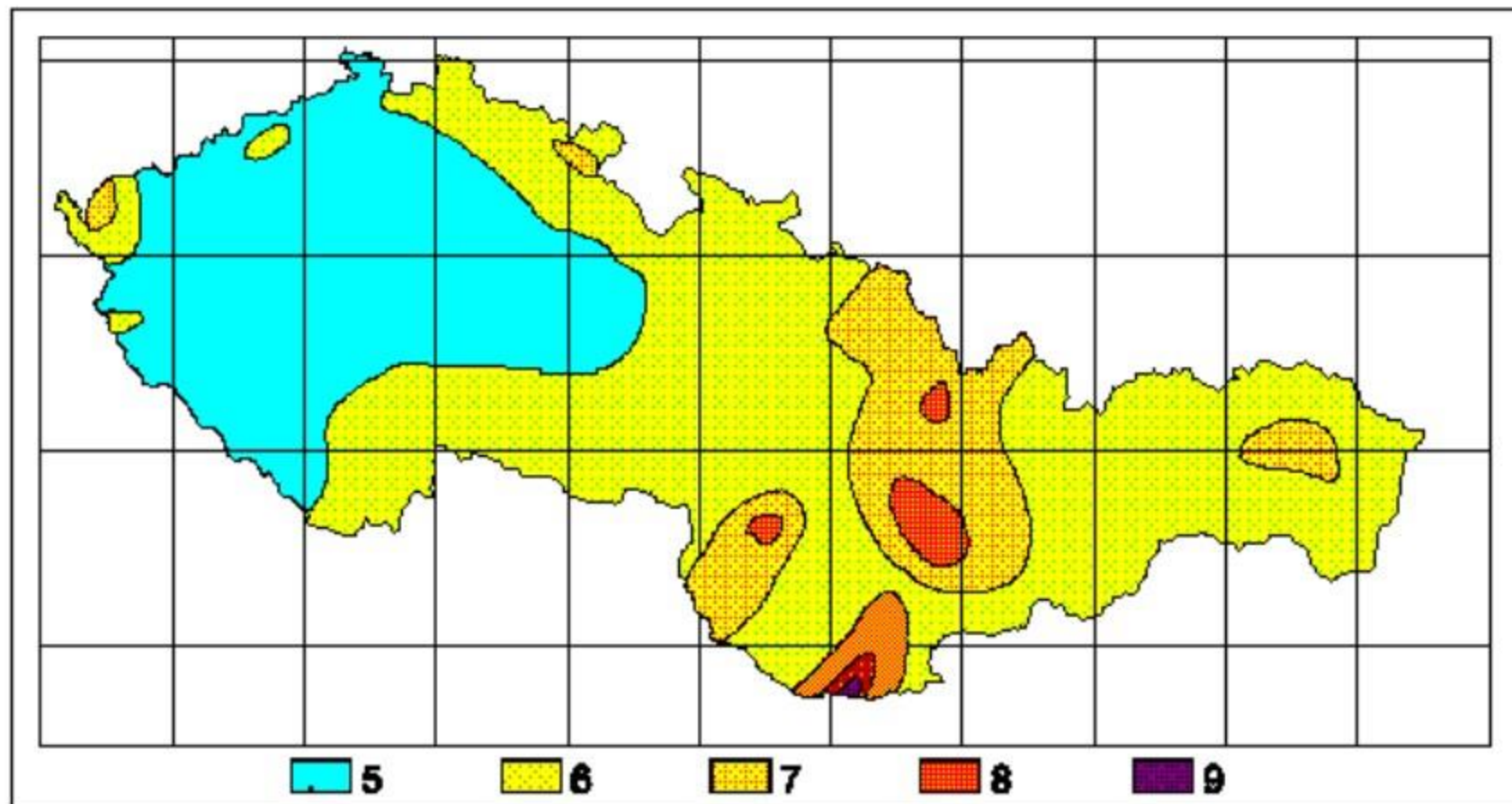
Pravděpodobnostní křivky seismického ohrožení:



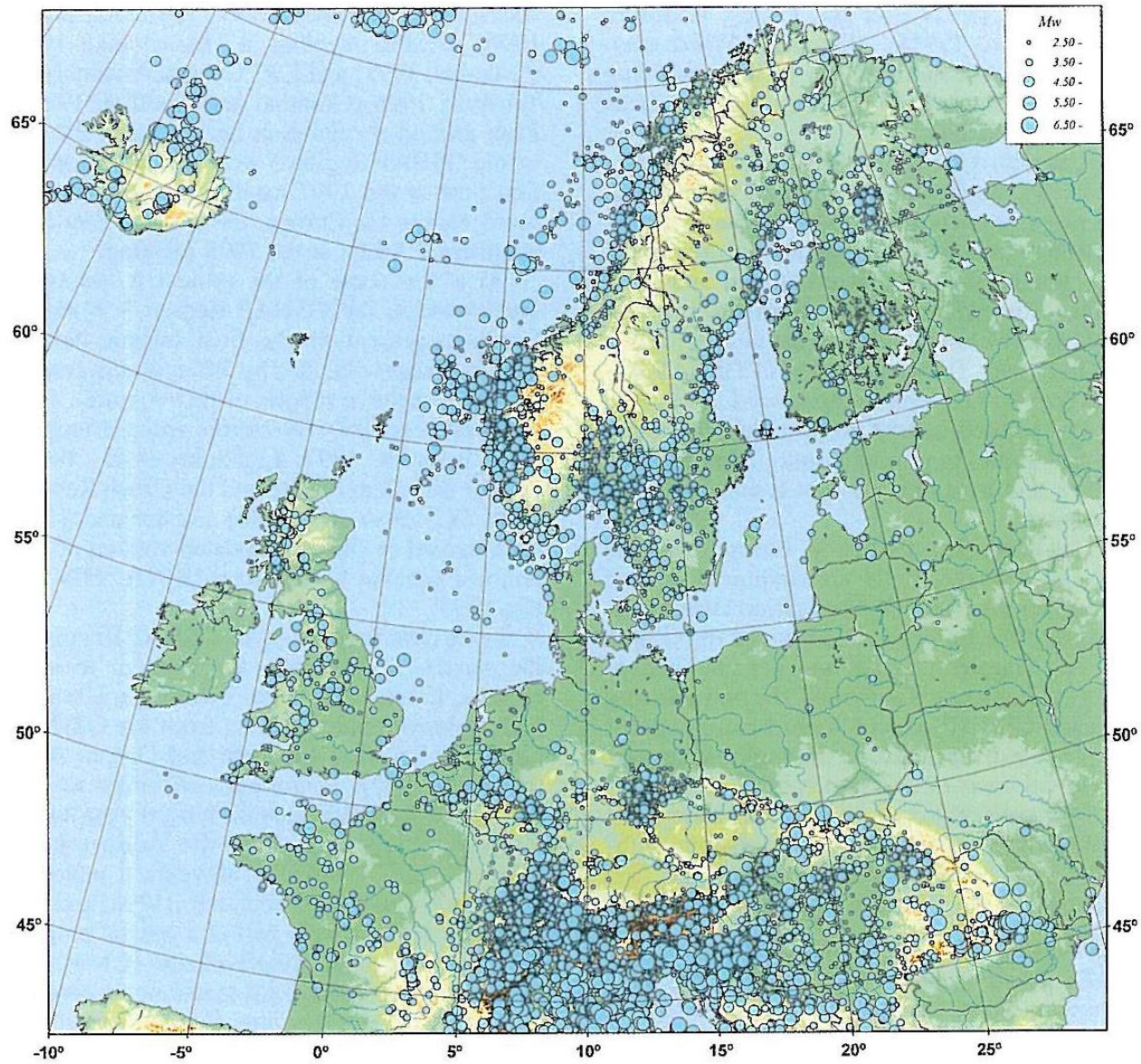


Katalog zemětřesení - Schenková et al. 1999)





Mapa maximálních očekávaných intenzit zemětřesení na území České republiky a Slovenska



**Fig. 2.** Epicentre map for the GSHAP Region 3 according to the seismicity working-file for this area. Moment magnitudes,  $M_w$ , are used. The data sources used for creating the working-file are mentioned in the text.



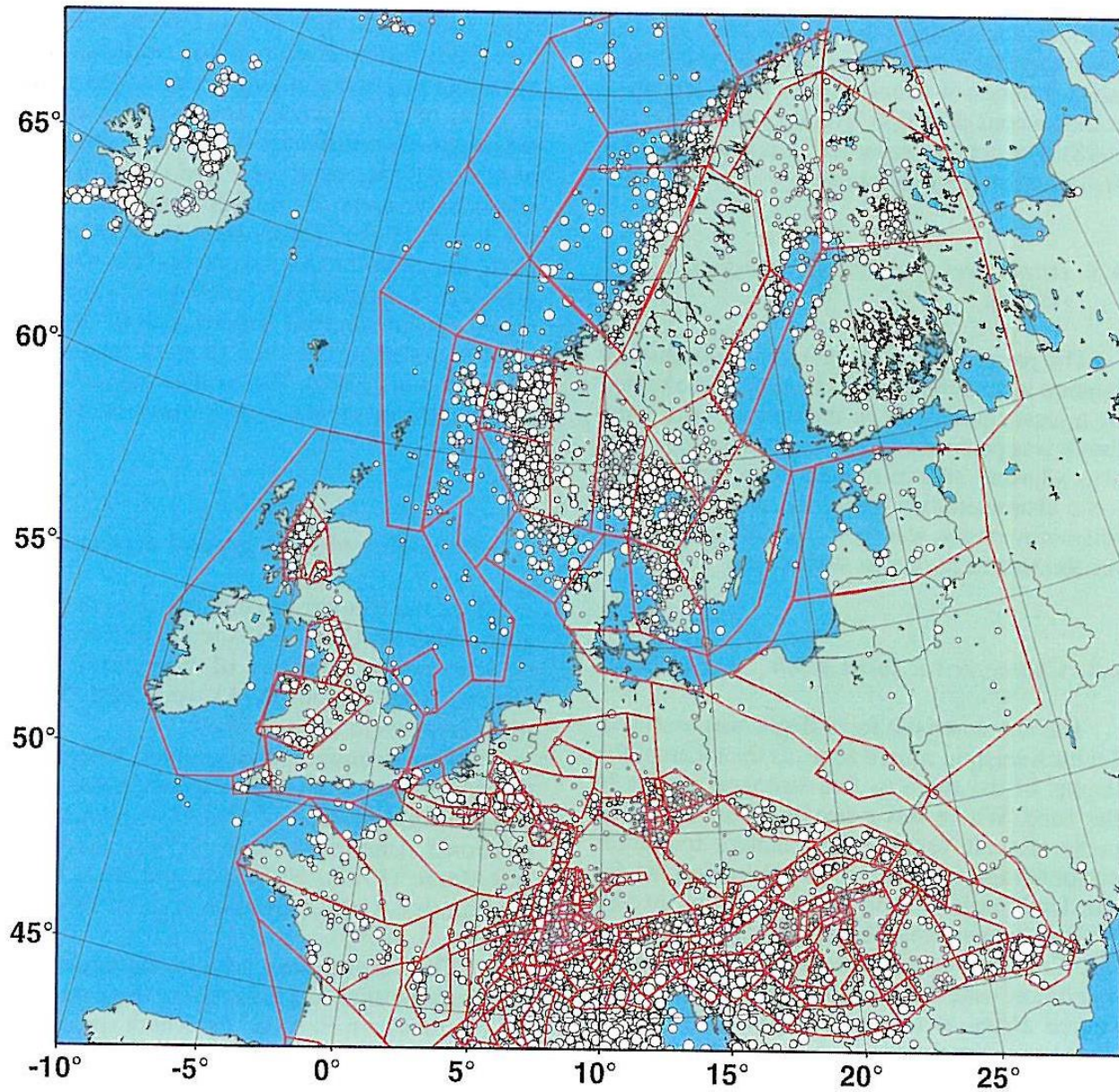


Fig. 3. Seismic source zones for the GSHAP Region 3 defined from seismicity distribution and seismotectonic criteria.



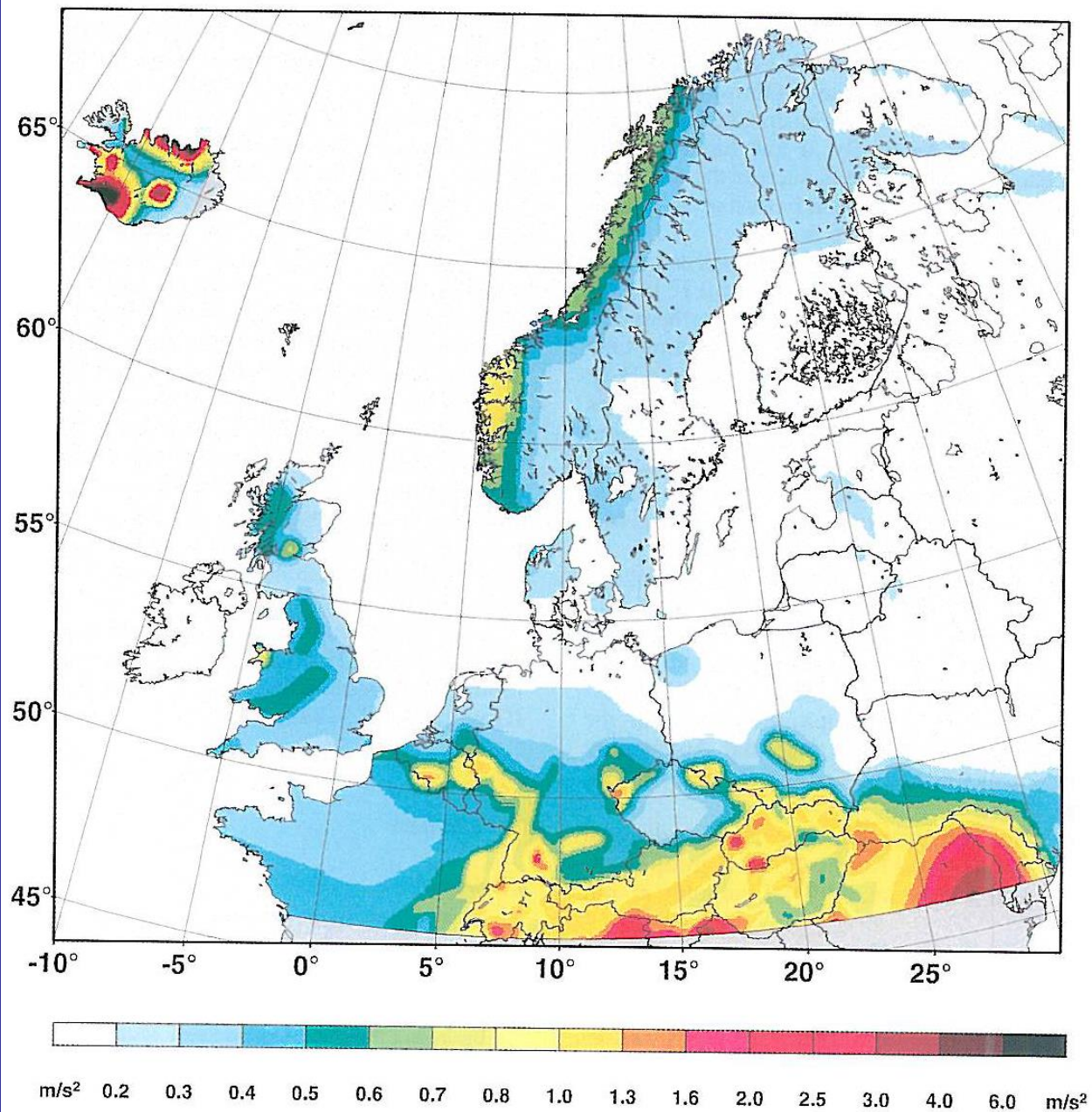
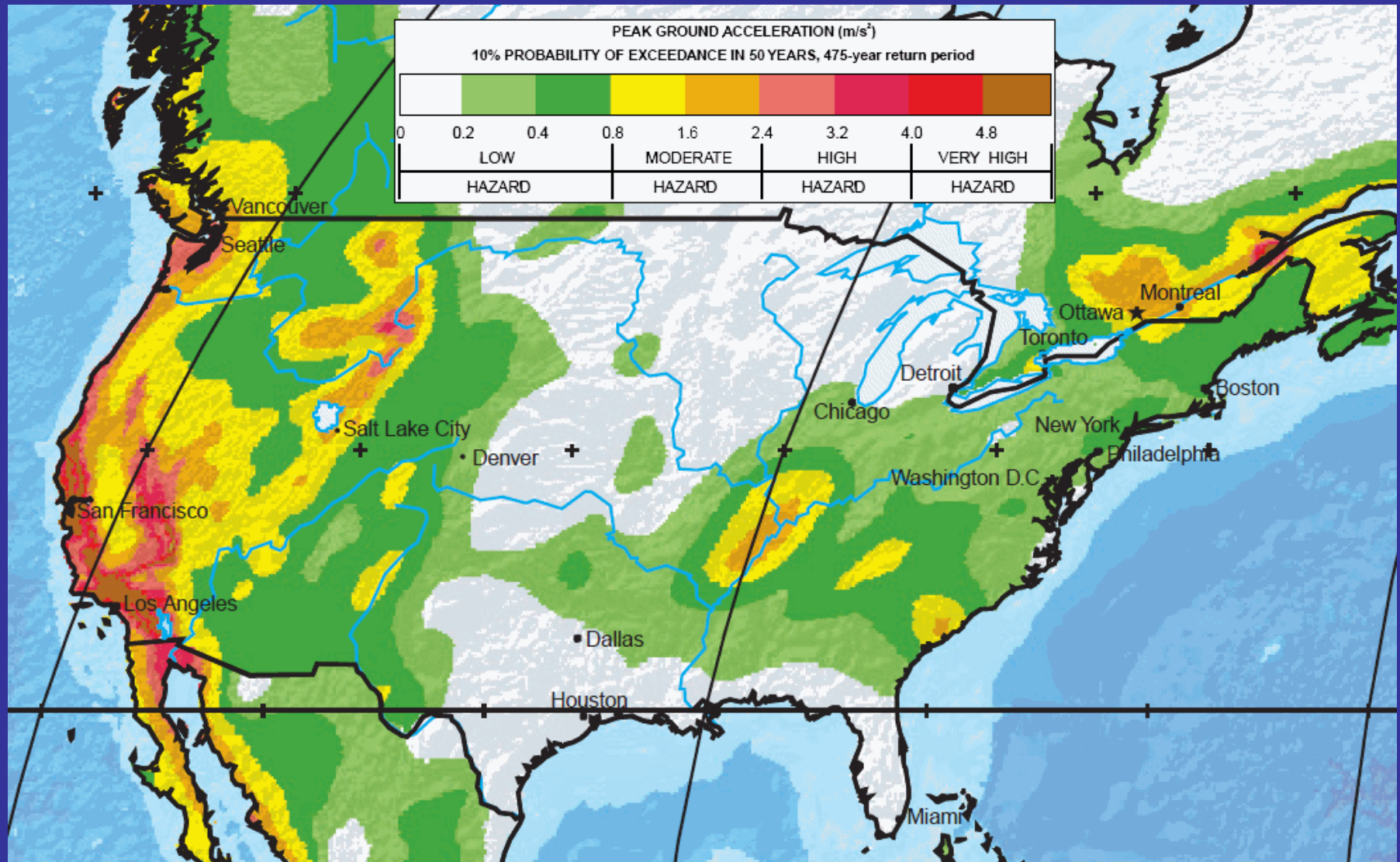


Fig. 4. Horizontal peak ground acceleration seismic hazard map representing stiff site conditions for an exceedance or occurrence rate of 10% within 50 years.

# Seismické ohrožení v USA



## 2. Tektonická geomorfologie, role tektoniky ve vývoji reliéfu

Tvary reliéfu (landforms) vytváří celkový morfologický obraz krajiny

Všechna měřítka – pohoří, náplavové kužely, údolí, svahy atd.

Geomorfologie – studium povahy, původu a vývoje reliéfu

**A) Geologické faktory** – důležité, vývoj reliéfu je vázán na horninové podloží

Struktura – zahrnuje typ horniny, přítomnost četných trhlin, zlomů, vrás

**B) Geomorfologické procesy** – zvětrávání (fyzické, chemické), fluviální eroze/akumulace, glaciální, eolická, mass wasting (svahové procesy, sesuvy), tektonické, vulkanické procesy

**C) Přírodní podmínky** – geologie, klima, vegetace, erozní báze, zásah člověka – ovlivňují typ a rychlost procesů



## Modely : Process-response

- kvalitativně i kvantitativně reprezentují, jak procesy ovlivňují vývoj reliéfu
- např. aluviální kužely – výsledek tektonických procesů, fluviálních procesů a/nebo změn v klimatických podmínkách (různé příčiny)

Potřeba rozumět všem procesům – rozlišovat mezi nimi (Španělsko vs Český masív – terasy, kužely)

**Tektonická geomorfologie** – studium reliéfu vytvořeného tektonickými procesy; ovlivnění eroze, ukládání, tvary; z morfologie možno odvodit kinematiku zlomů

Geomorfologie – cenný nástroj ve studiu aktivní tektoniky; mladé procesy se odrážejí v reliéfu a kvartérních sedimentech na konkrétním místě

Např. studium vodních toků a odvozených sedimentů porušených pohyby na zlomech – odhalení intenzity pohybů, hodnoty posunu, časové zařazení zemětřesení na místě – kritické pro hodnocení seismického ohrožení

## Výzdvih (uplift)

Různé teorie o interakci mezi tektonikou a vývojem reliéfu

Neexistuje pouze čistý výzdvih – kombinace vertikálních a horizontálních pohybů (neexistuje „černo-bílá“ definice)

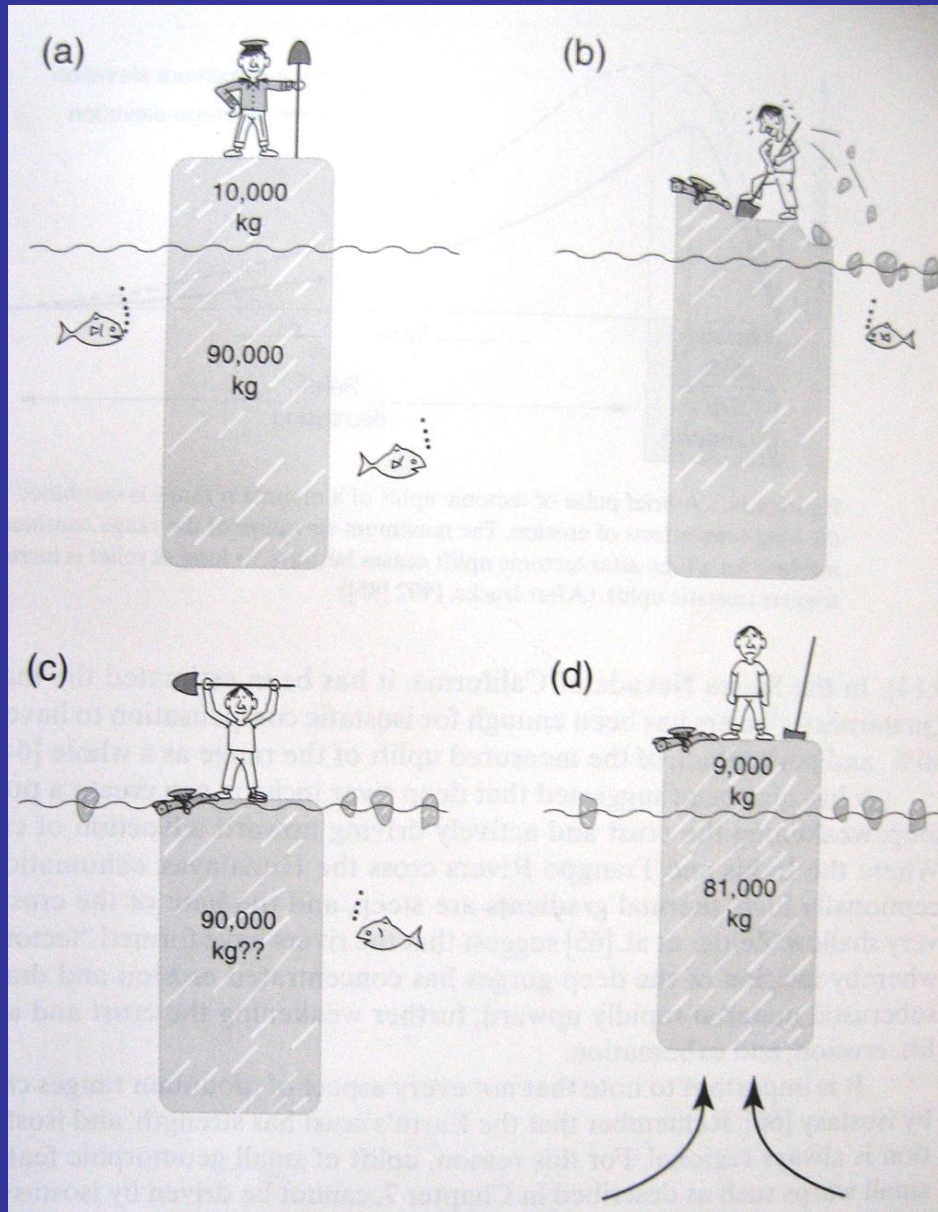
Vertikální pohyby způsobují vznik velkých forem reliéfu na zemském povrchu

**Bedrock uplift** – ovlivněn jak tektonikou, tak geomorfologickými procesy

- eroze, denudace, akumulace, zvětrávání

Bedrock uplift = izostatický výzdvih + tektonický výzdvih

## Izostatický výzdvih



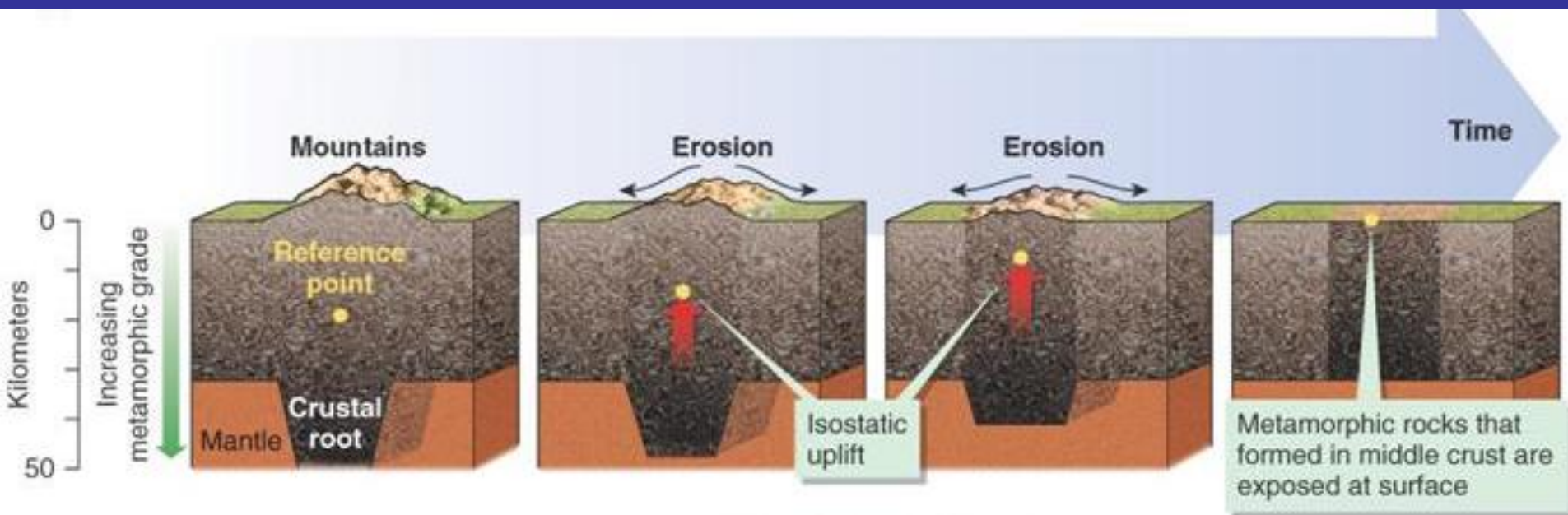
Srážky nikdy nejsou dostatečné na to, aby snížily efektivně povrch icebergu k hladině vody. Led odtavený nad hladinou je značně nahrazen výzdvihem ponořeného ledu..

Isostatický výzdvih – led má 90% hustoty mořské vody

Pokud 10 tun roztaje z povrchu icebergu, je to kompenzováno 9 tunami ledu, který se vztlakem dostane na povrch isostatickým výzdvihem – **isostatic rebound** = čistý výzdvih (bez deformace ledu)



# Izostaze pohoří



Copyright © 2006 Pearson Prentice Hall, Inc.

Kontinentální kůra (hustota cca  $2700 \text{ kg/m}^3$ ) „plave“ na plášti s hustotou  $3300 \text{ kg/m}^3$  – hustotní rozdíl 82% (90% pro oceánskou kůru s hustotou  $3000 \text{ kg/m}^3$ ) – analogie s ledem

Fluviální a glaciální denudace 1000 m sníží - zarovná významně pouze horské hřbety, protože je kompenzována 820 m současného izostatického reboundu.

[Video!](#)

Fluviální a glaciální eroze – izostatický výzdvih způsobený hlavně v údolích (video)

Denudace (mass removal) – čistý izostatický výzdvih ve všech částech krajiny

Čistý výzdvih, tektonická denudace či pohřbení - ve **velkém prostoru** a při **dlouhodobém** působení

Tektonické pohyby (na zlomech) a geomorfologické procesy – menší formy za kratší dobu

### ***Tektonický výzdvih***

- řízen tektonickými procesy, orogenními (mountain-building) – konvergentních deskových rozhraních

Působení tektonických orogenních sil – může ustát, izostatické vyrovnání bude pokračovat, dokud budou toky erodovat a transportovat materiál z pohoří do oceánu.

# Bedrock uplift = Tektonický výzdvih + izostatický výzdvih

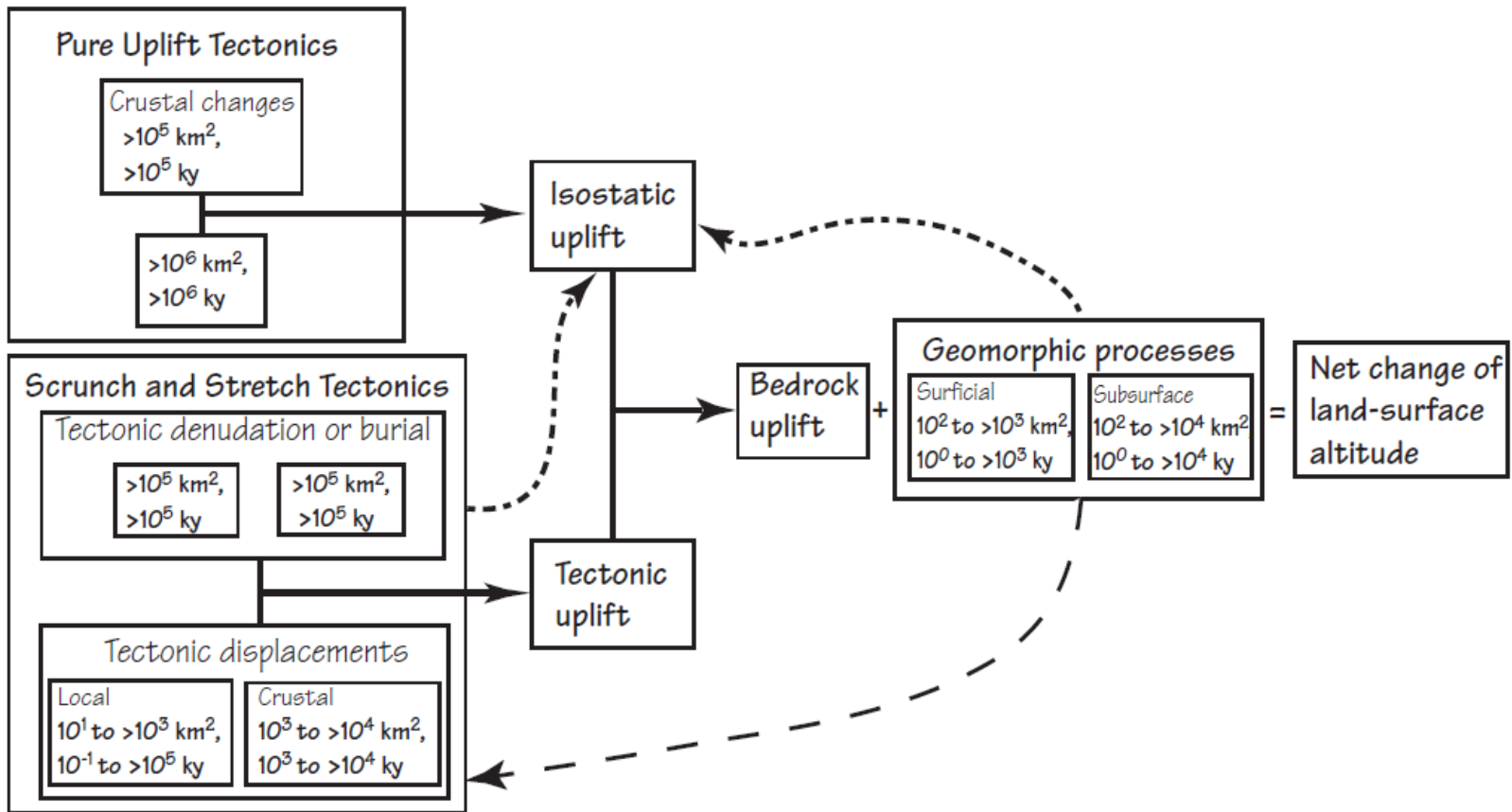


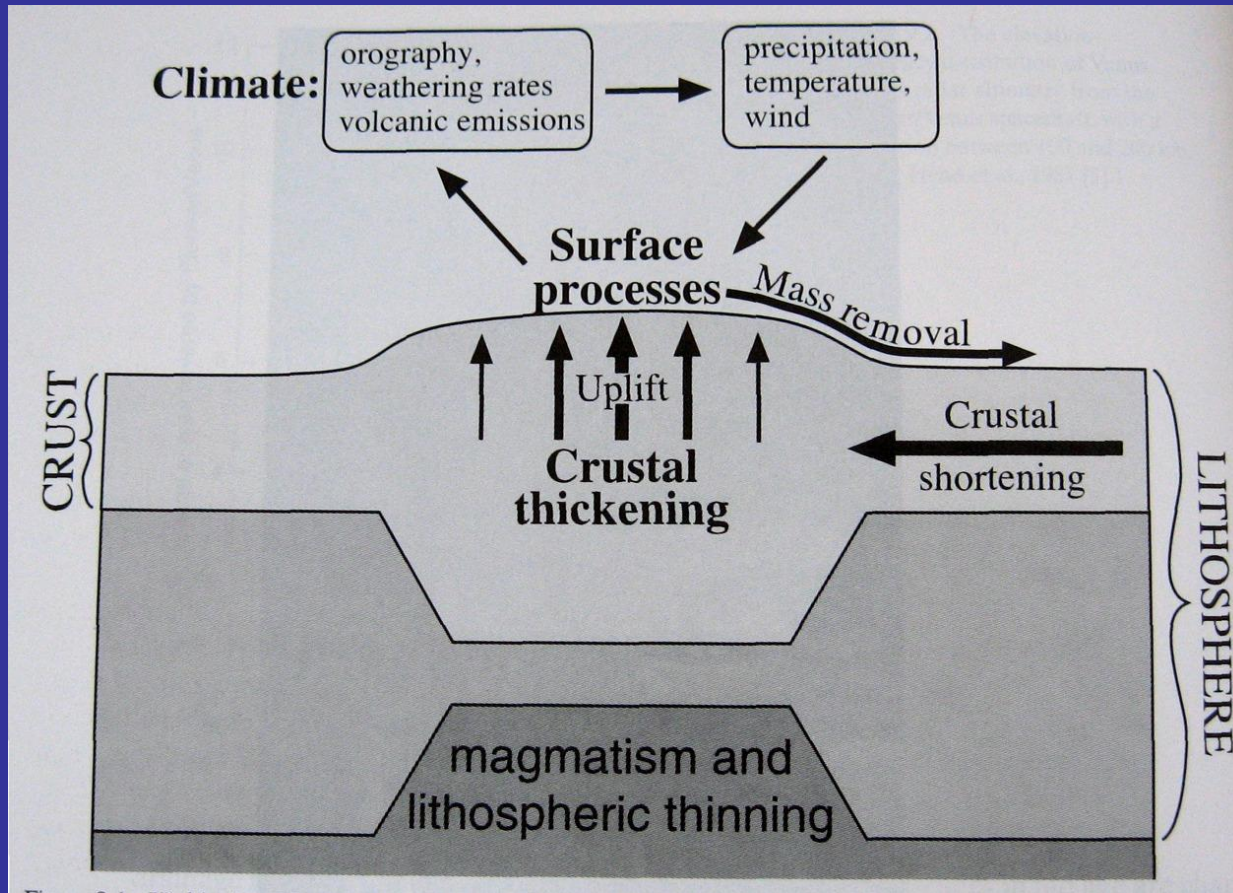
Figure 1.4 Links between tectonic, isostatic, and nontectonic variables affecting landscape altitudes and bedrock uplift. Feedback mechanisms to isostatic and tectonic uplift are shown with dashed lines.

*Tectonic geomorphology of mountains, Bull 2007*

Tektonický výzdvih – vyvolává vyšší erozi,  
 Vyšší nadmořská výška – odlišné klima, odlišné procesy – ovlivňuje izostatický výzdvih



# Výzdvih povrchu - změny nadmořské výšky ovlivňují geomorfologické procesy (coupled system)



Klimatické změny převládají, protože rychle ovlivňují geomorfologické procesy v povodí – srážky, průtok

X výzdvih na lokální úrovni – na zlomech – nárůst reliéfu postupuje proti směru toku relativně pomalu

## Tektonický výzdvih vyvolává erozi



Povrchová „ruptura“ (surface rupture) zemětřesení 1999 Ch-Chi vytvořila vodopády 8m vysoké. Říční eroze – zahlazuje stupeň – ústup o n- metrů