

Tektonická geomorfologie

RNDr. Petra Štěpančíková, Ph.D.

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

Oddělení inženýrské geologie

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
- 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.** Tektonika versus říční systém, 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 - rekonstrukce pohybů.

Parametry aktivních zlomů, intenzita pohybů, průměrná rychlost pohybů, rozložení zemětřesení na zlomu

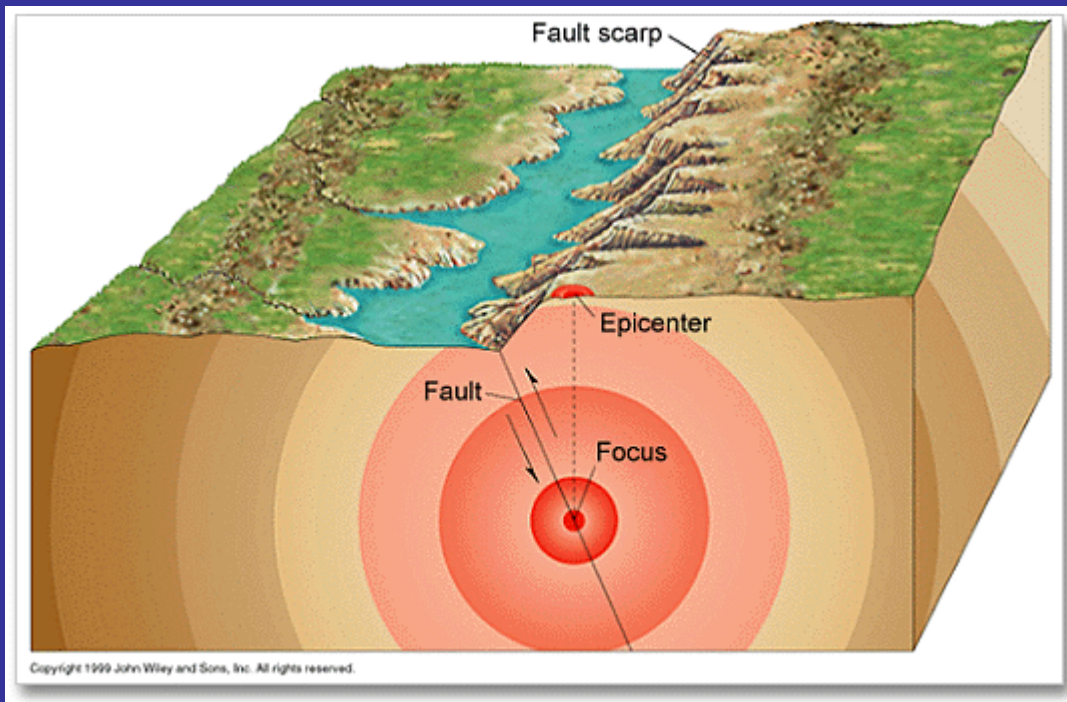
10. Geofyzikální a geodetické metody výzkumu aktivní tektoniky, Monitoringu současných pohybů

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)

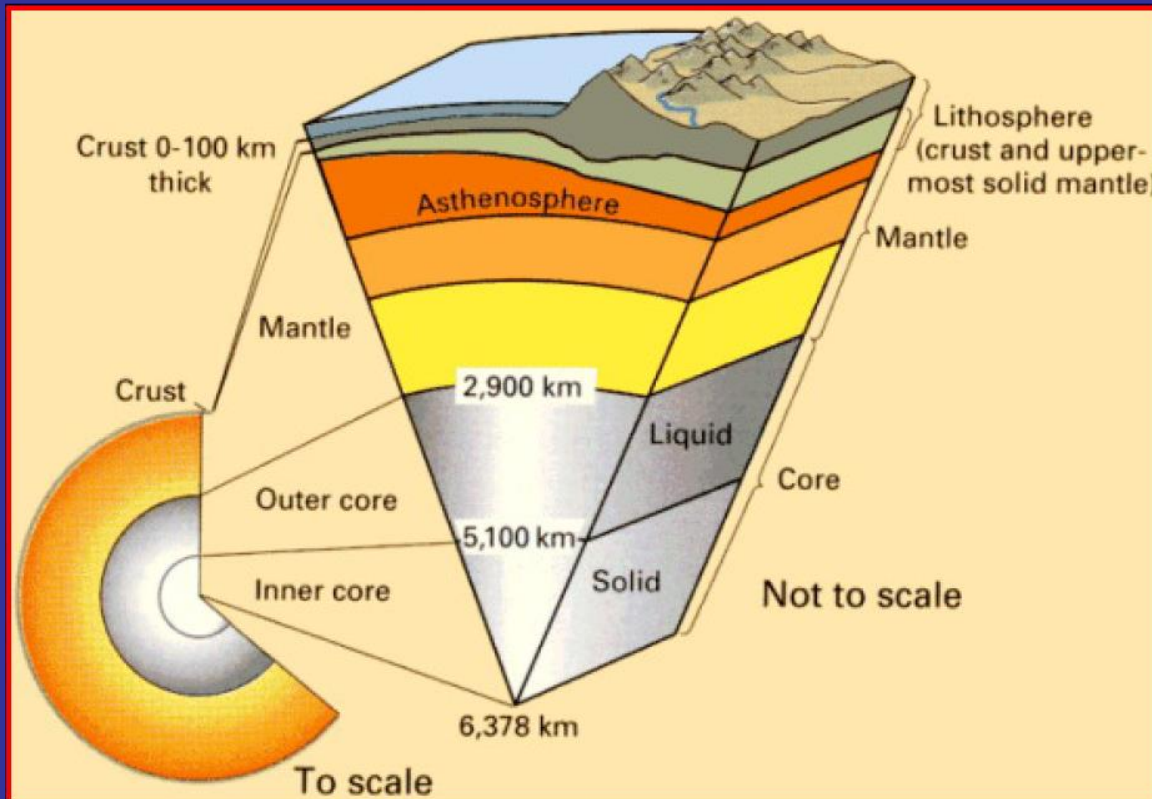
Zemská kůra + svrchní plášť

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

Sedimenty, granity, basalty

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

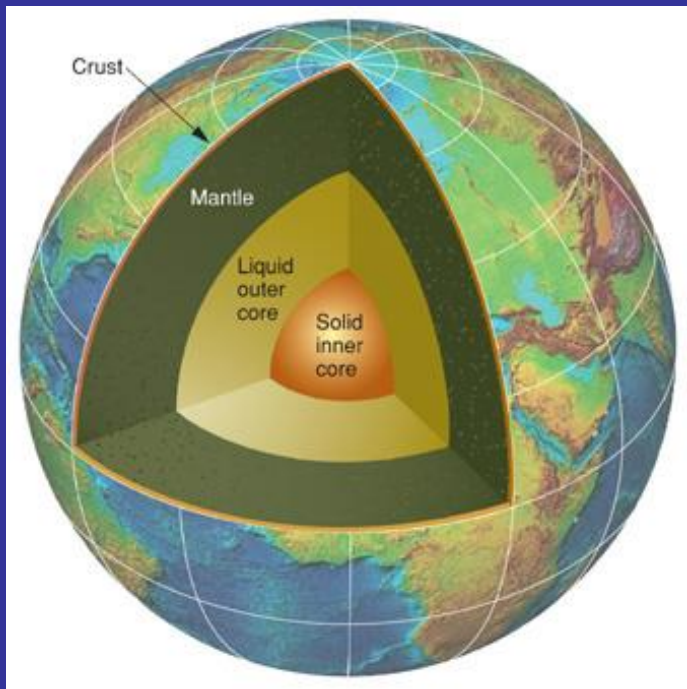
Sedimenty, basalty



Jak to víme?

přímá pozorování – vrty, geol. informace (xenolity)

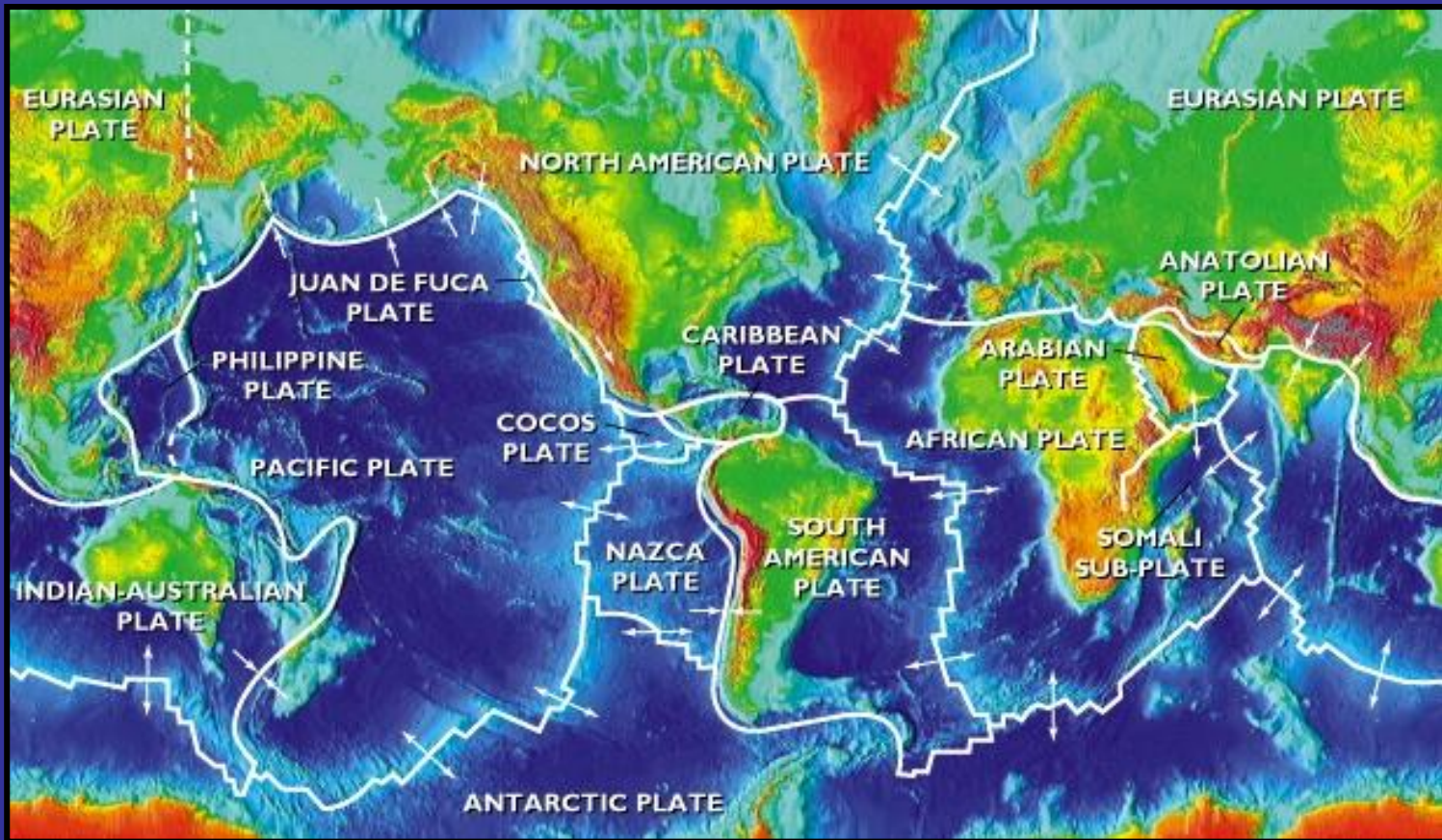
nepřímá – rychlosti seismických vln



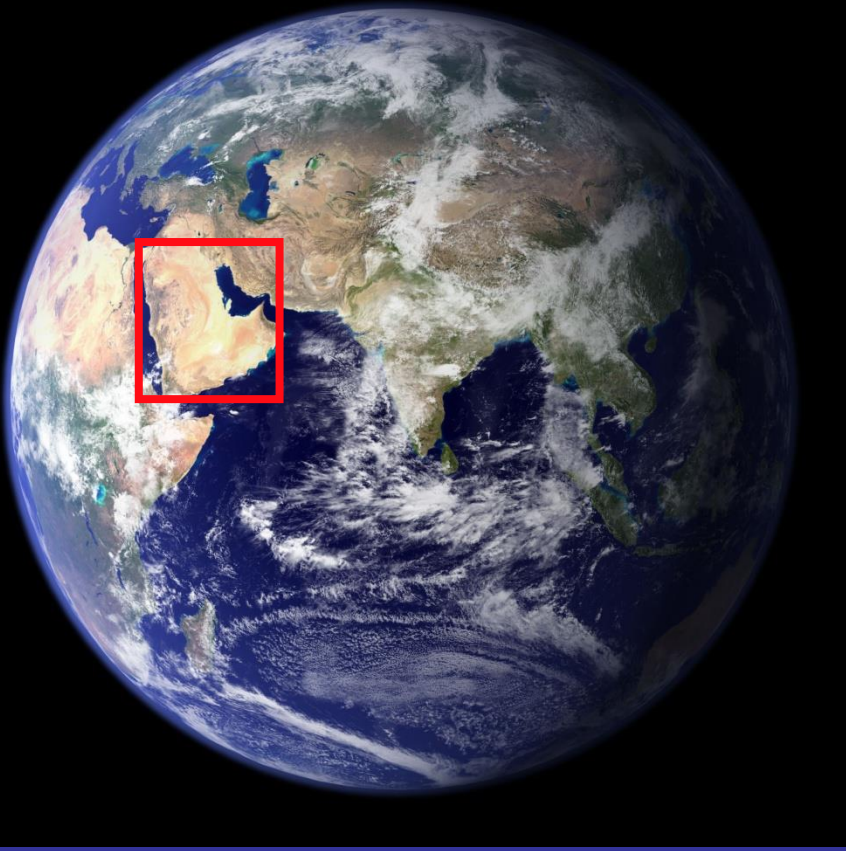
Mohorovičičova diskontinuita – kůra/plášť –
změna hustoty, vyšší rychlosti P-vln

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

satellite images

Strukturní geologie Petrologie



10^1 m
10 m

Měřítko 1:100

Odskočená údolí
(offset channels)



10^0 m
1 m

Měřítko 1:10

tektonická brekcie



10^{-1} m
10 cm

Měřítko 1:1

Výchoz - outcrop/ hand sample

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 napětovým polem v kůře v pozdním mladším terciéru (neogénu – 23-2,6 Ma) a kvartéru

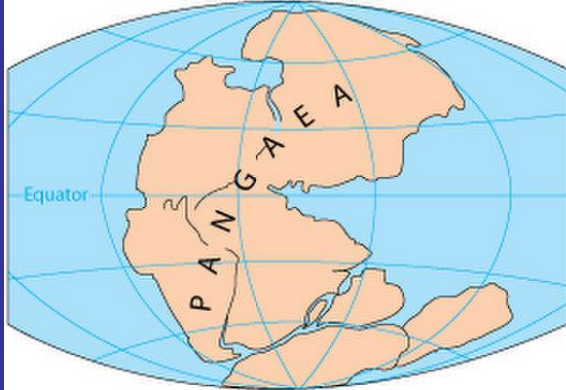
Aktivní tektonika – tektonické procesy, které deformují zemskou kůru na lokálním měřítku a na časové škále významné pro lidskou populaci (EQs)

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

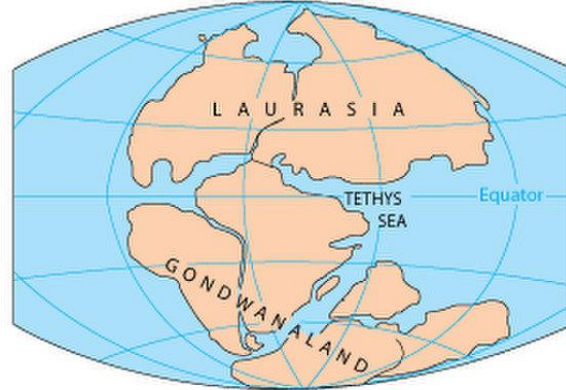
Potenciálně aktivní zlomy (capable faults) – aktivita během kvartéru
(2,6 mil. let)

Rychlosti tektonických procesů:

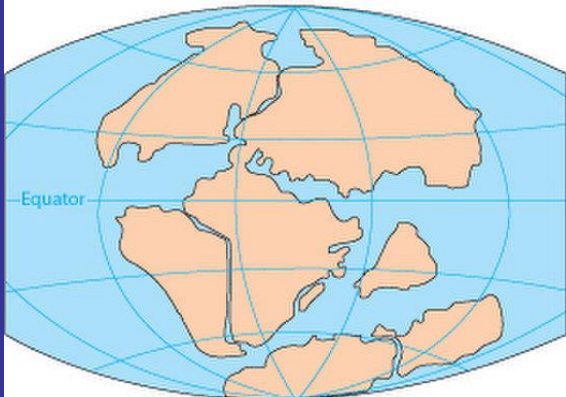
- Velmi variabilní
- cm/rok pro pohyb na deskovém rozhraní
 - 0,00X-X mm/rok pro pohyb na zlomu
 - až 5m pohyb na zlomu při zemětřesení



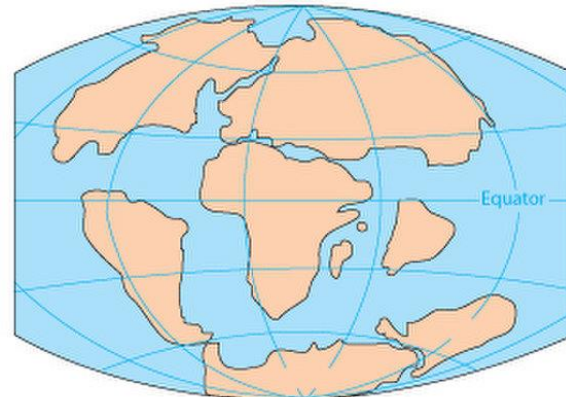
PERMIAN
250 million years ago



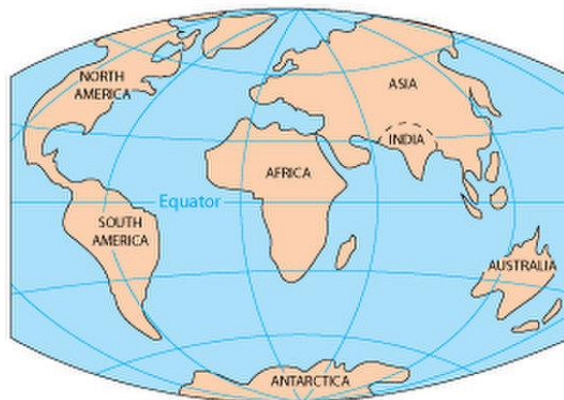
TRIASSIC
200 million years ago



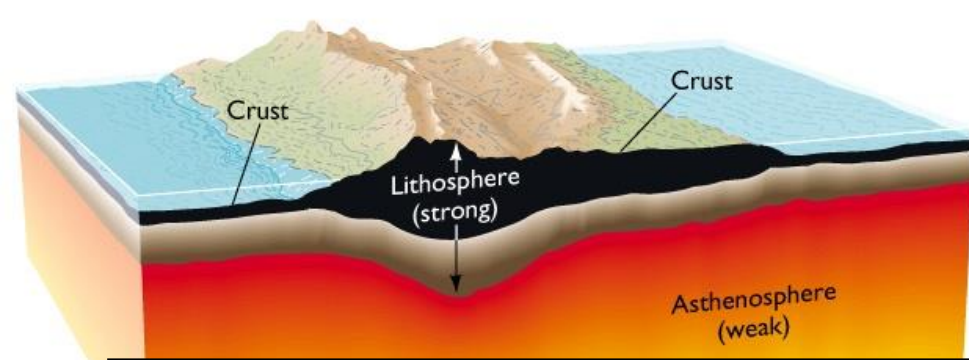
JURASSIC
145 million years ago



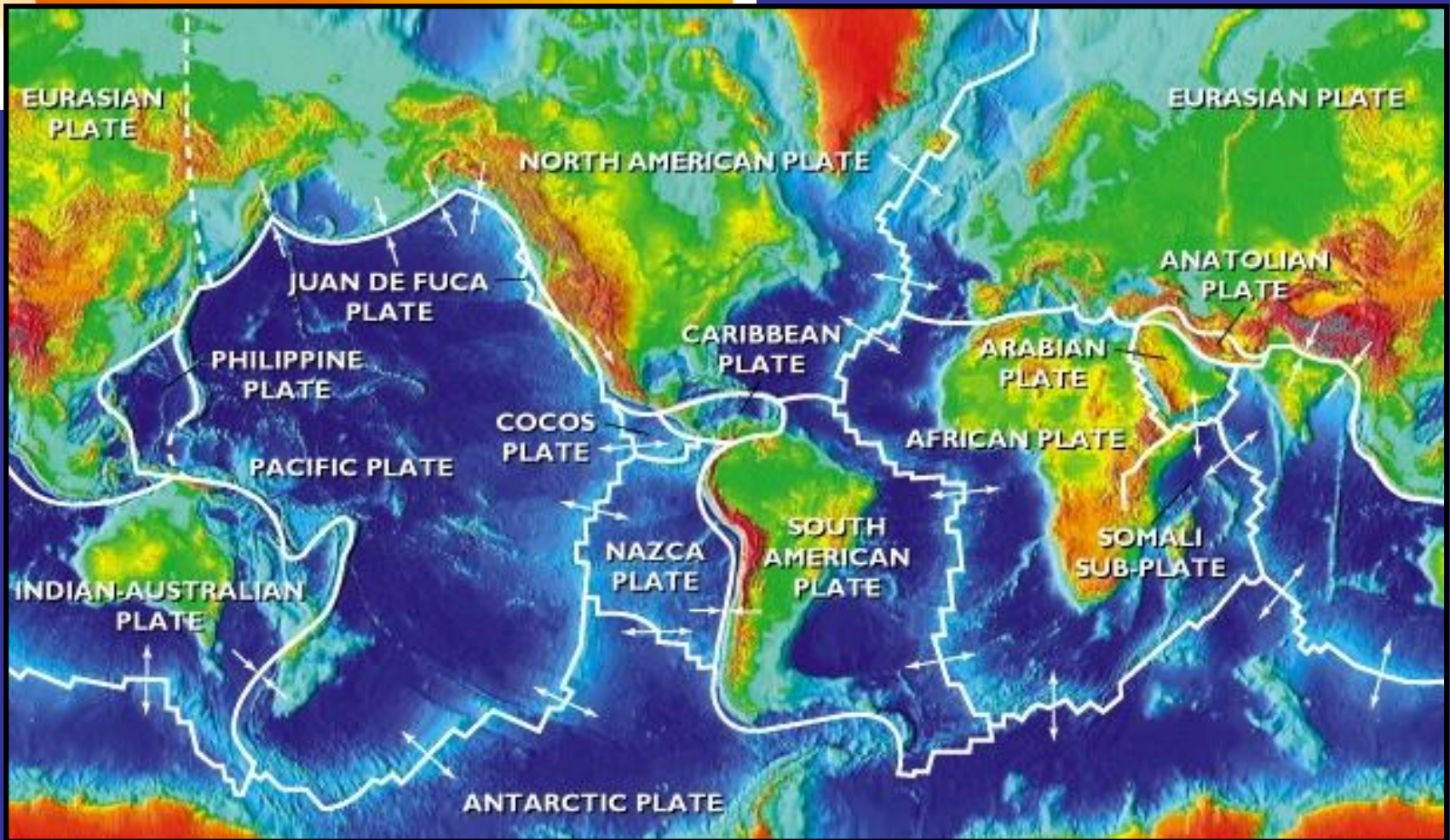
CRETACEOUS
65 million years ago



PRESENT DAY



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

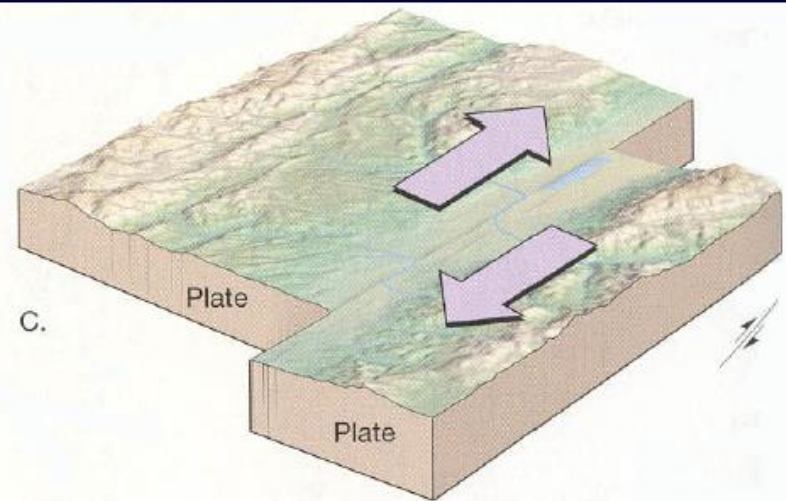
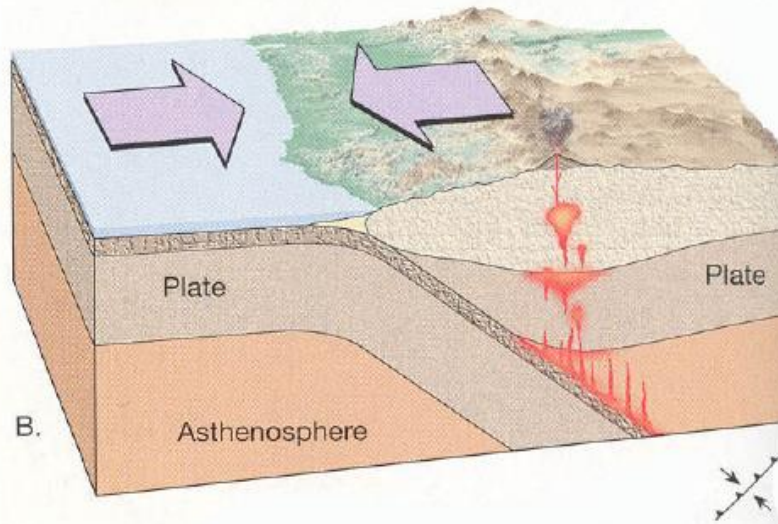
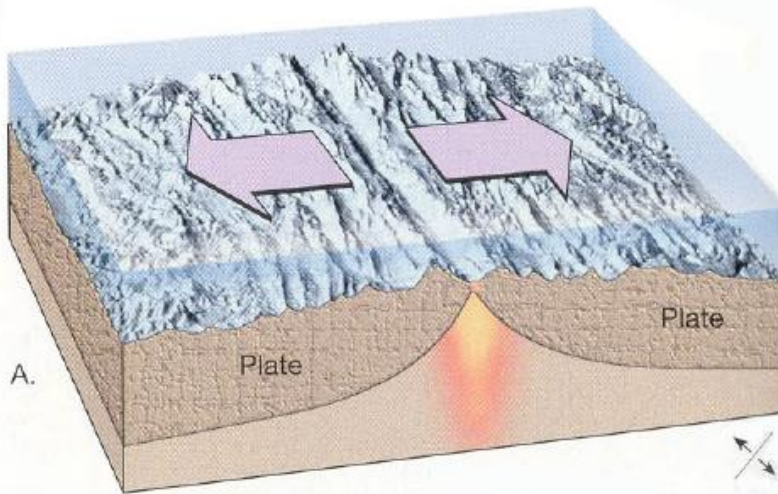
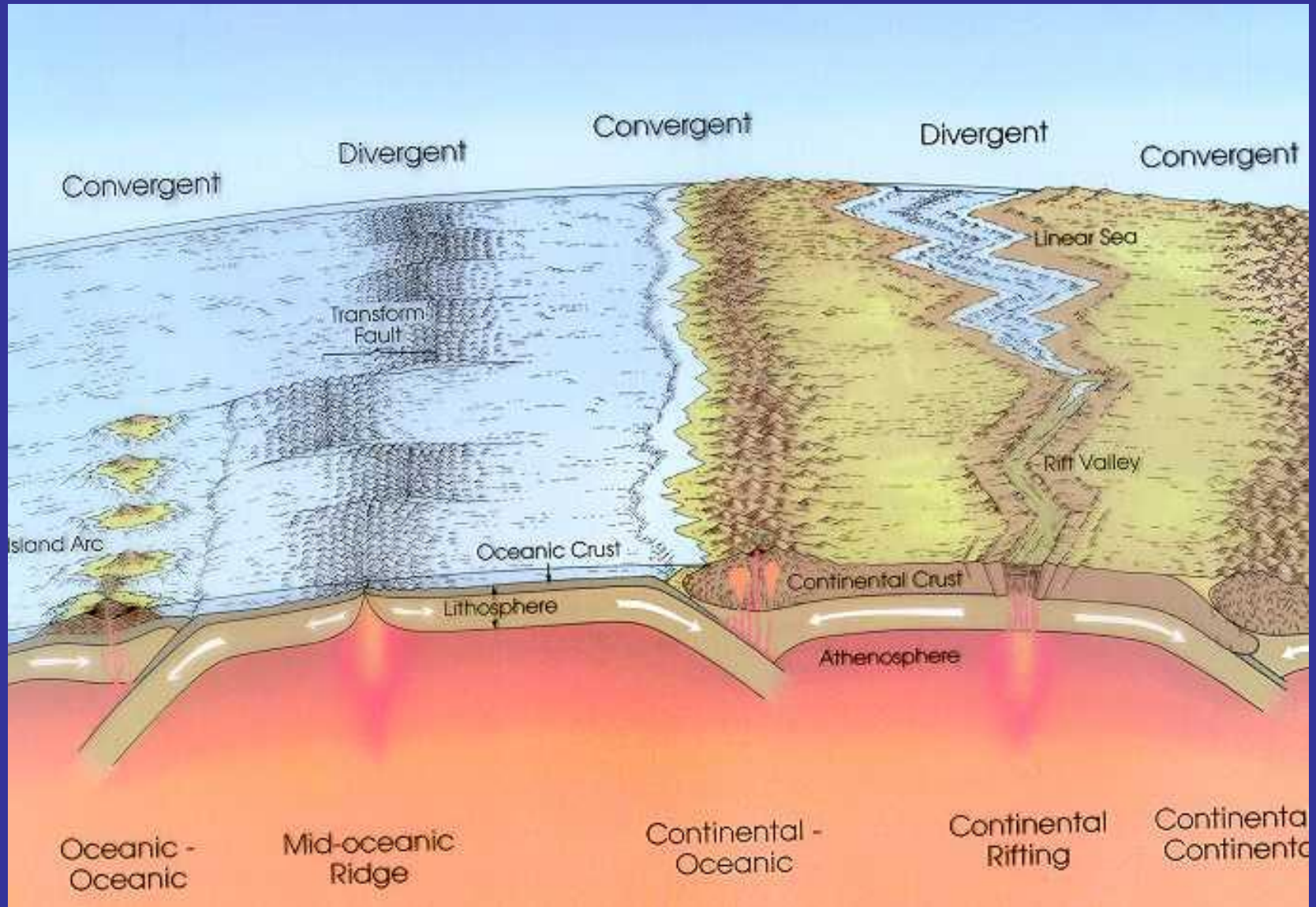


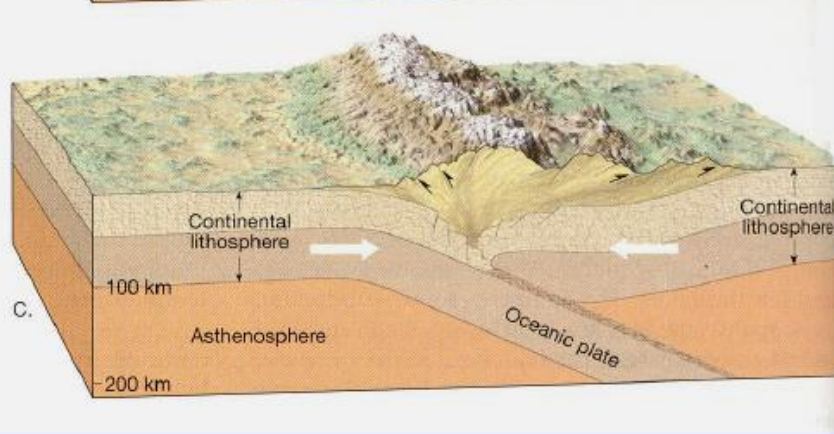
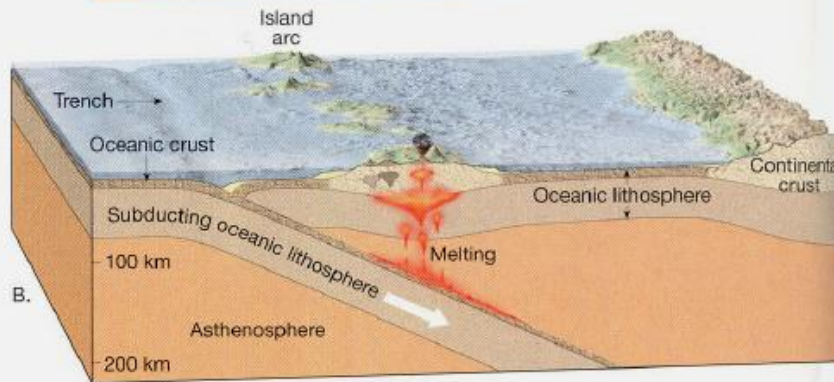
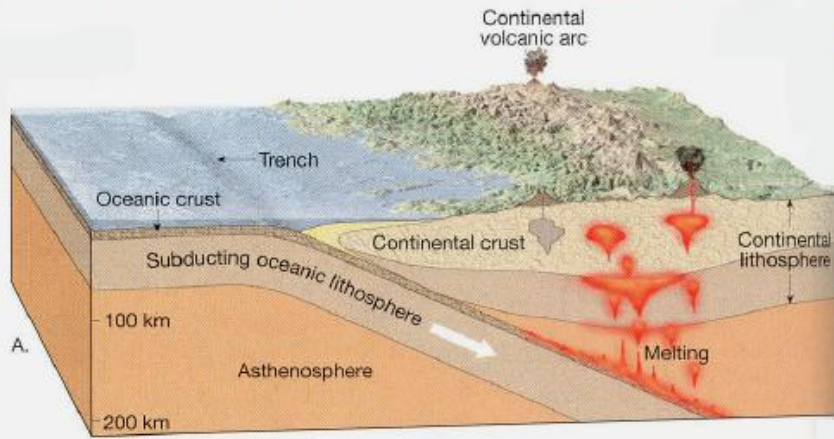
Figure 7.9 The three types of plate boundaries. A. Divergent boundary. B. Convergent boundary. C. Transform fault boundary.

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 :

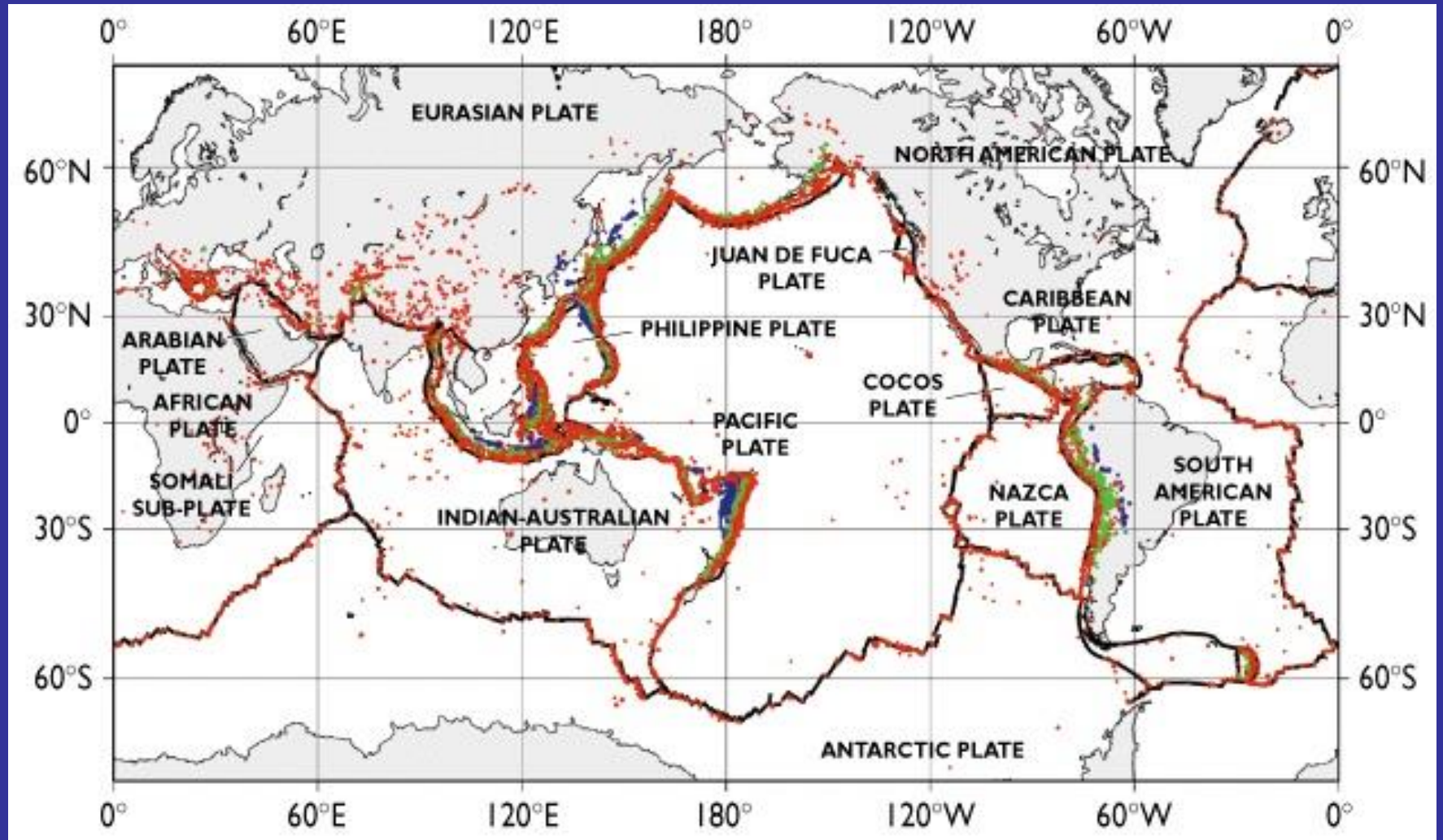
A. Oceanic-continental

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!](#)

Exercise!

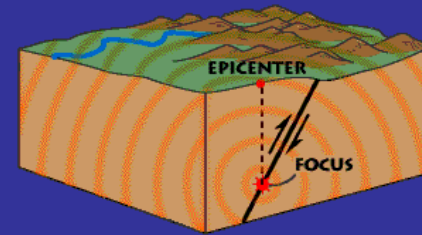
Tektonické pohyby

Seismické pohyby

- doprovázené zemětřeseními

Aseismické pohyby (tektonický creep)

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



Seismické tektonické pohyby

Zemětřesení:

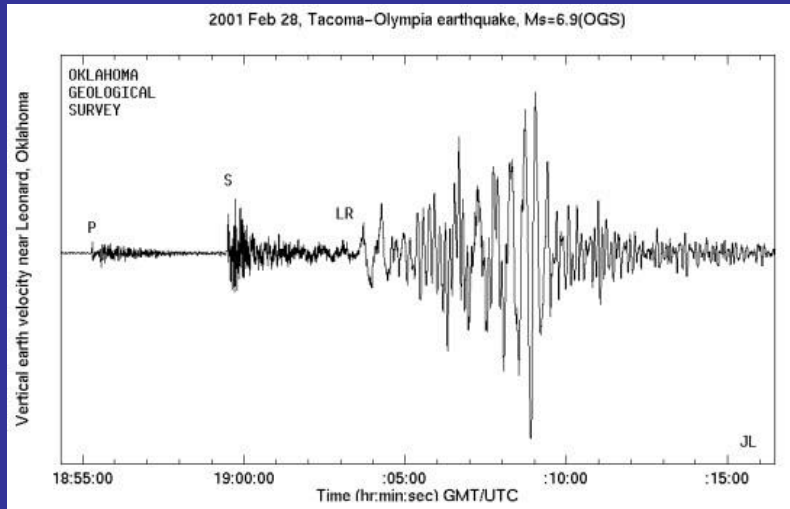
- napětí překročí mez pevnosti horniny, vznik trhliny nebo pohybu na již existující trhlíně
- uvolnění energie - zemětřesení (seismické vlny - elastické)
 - pohyb na zlomu (faulting) (porušení hornin + deformace)

Předtřesy (foreshocks) - nízká intenzita

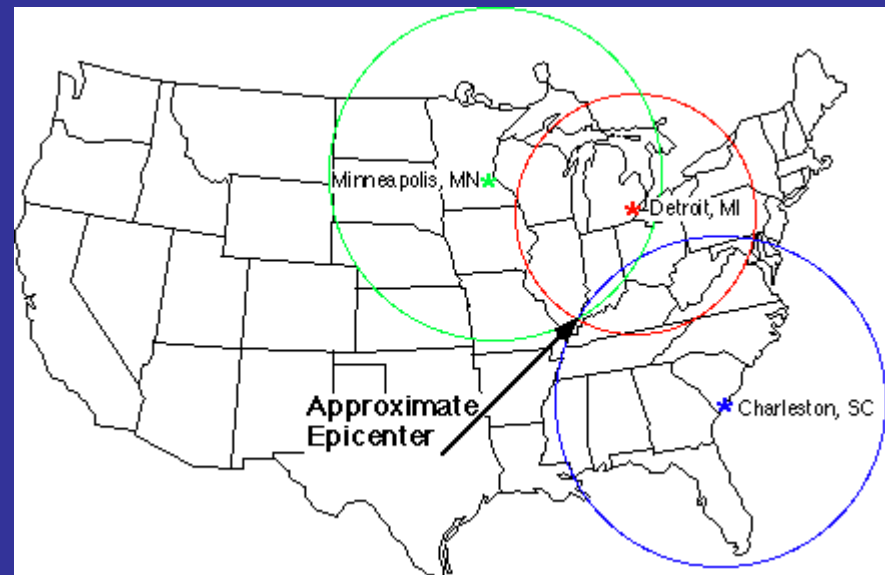
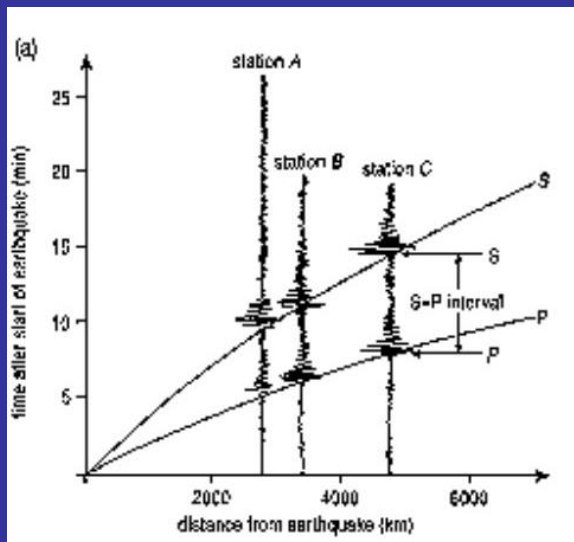
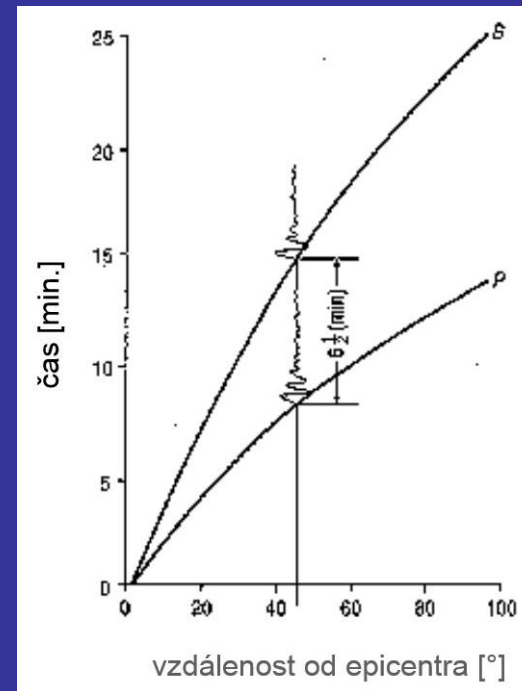
Hlavní otřes (main shock) - desítky sekund až minut s max. intenzitou

Dotřesy (aftershocks) - i několik měsíců se slábnoucími účinky

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,
- do tepla
- vyzářené seismické energie E_s .

Empirický vzorec - energie (MJ)

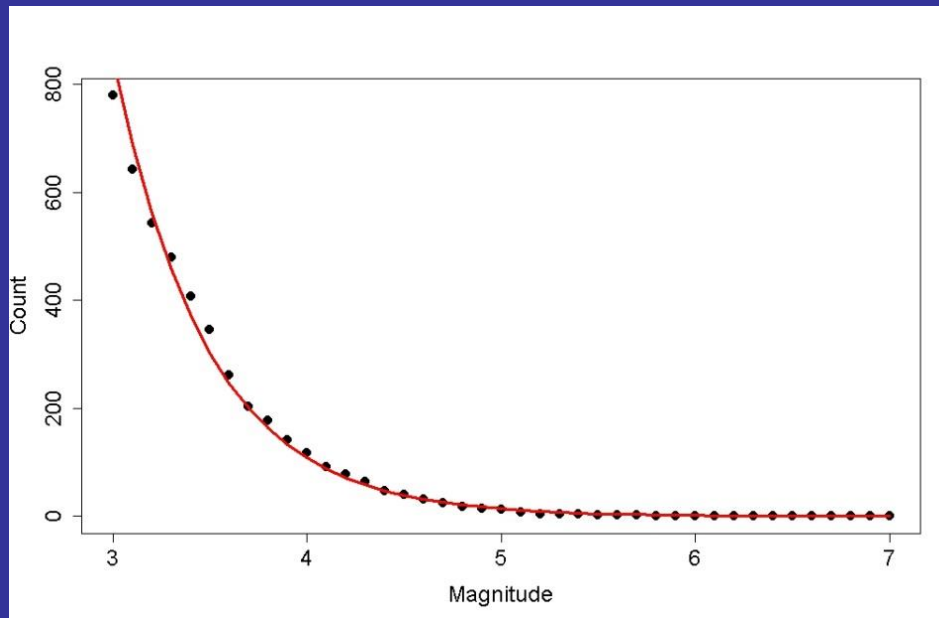
$$\log E = 11,8 + 1,5 M$$

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

Gutenberg-Richterovo pravidlo



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

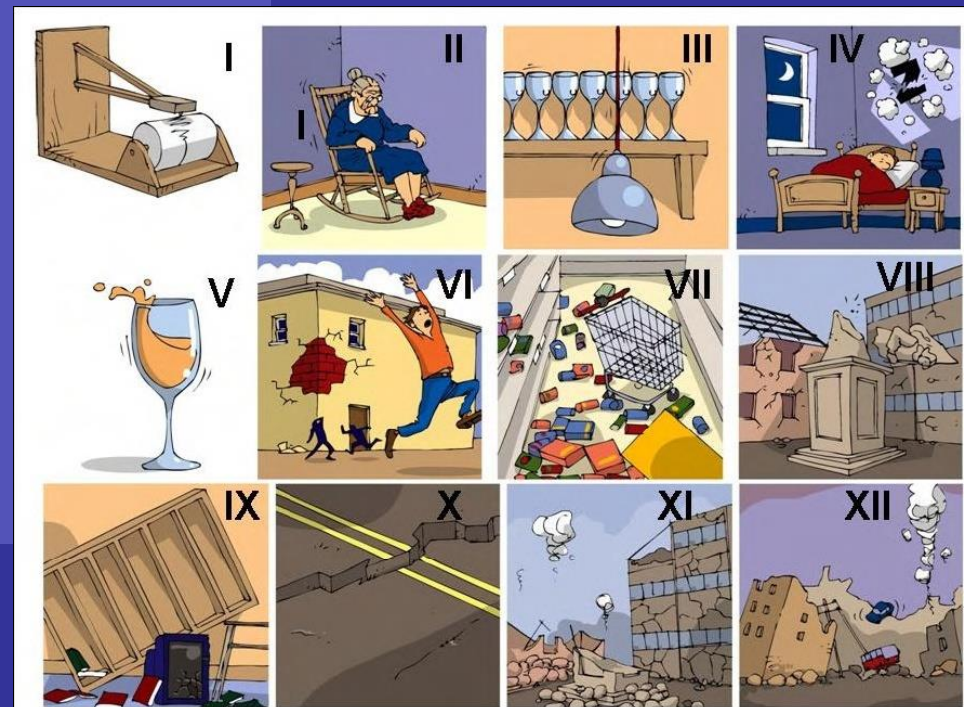
ostatní - **XII.** stupňové škály

MCS - Mercalli - Cancani - Sieberg (1902)

MSK -64 - Medveděv-Sponheuer-Kárník

MMI - Modified Mercalli (USA)

EMS-98 - European Macroseismic Scale

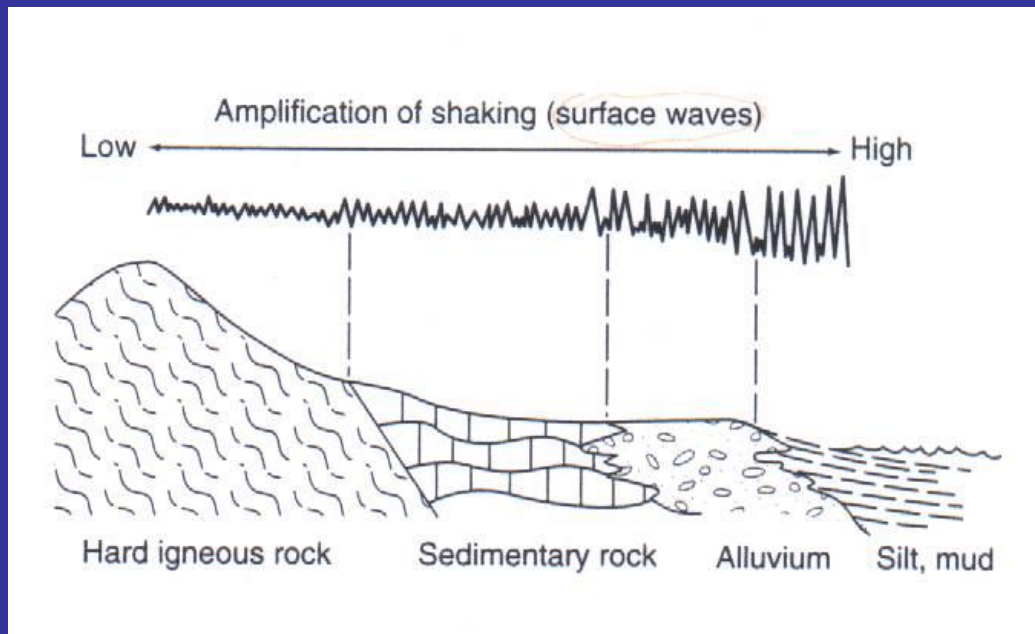


EMS-98 - European Macroseismic Scale

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)



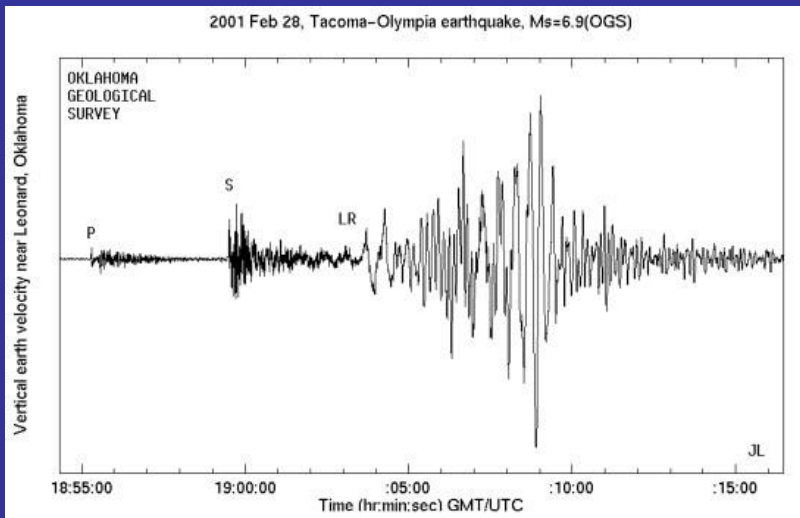
- **Nezpevněné sedimenty a půda při povrchu**
(otřesy amplifikovány v nezpevněných sedimentech)
- **Mocnost sedimentů nad pevným podložím**
(otřesy amplifikují, když jsou sedimenty mocnější)

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

Vzdálenost od epicentra - typ vln

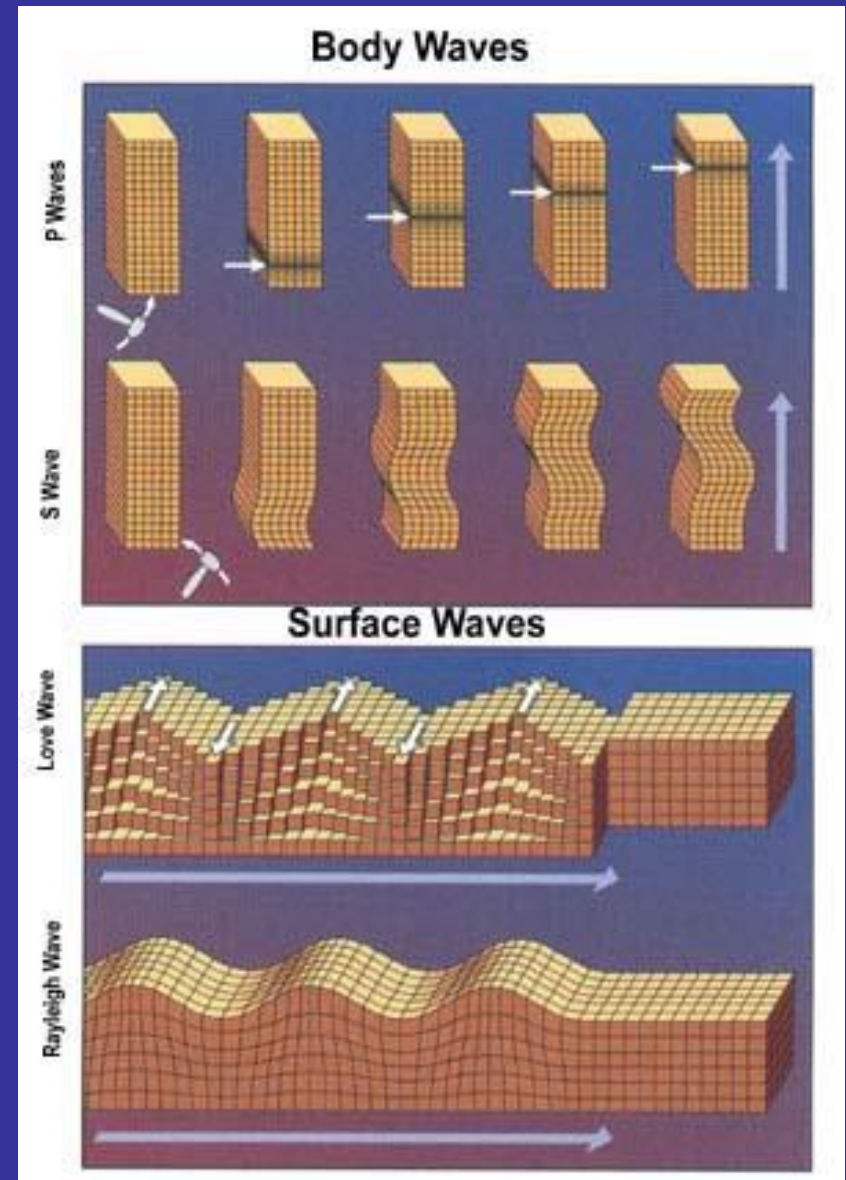
P, S vlny - vysoká frekvence

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

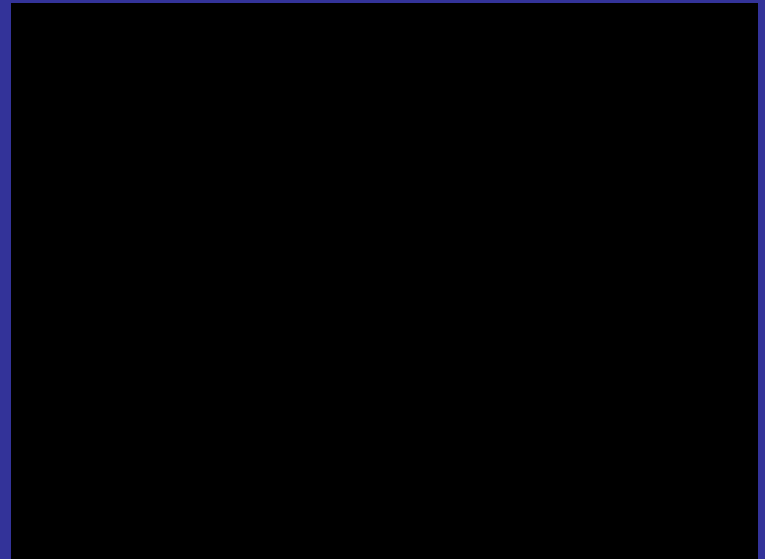
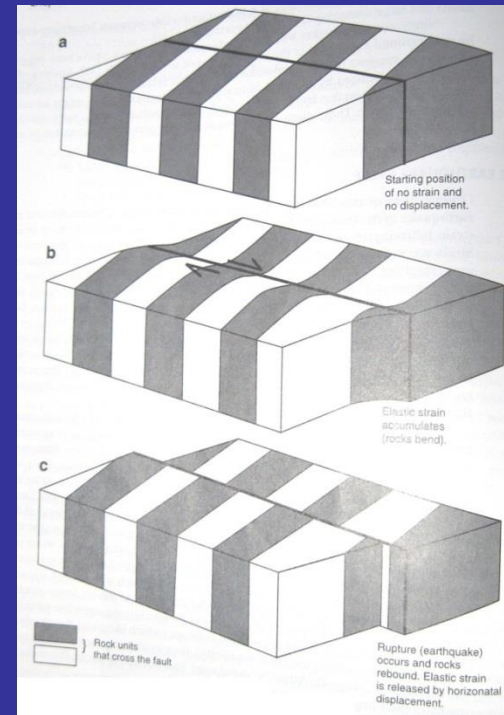
Magnitude	Area Felt Over (square kilometers)	Distance felt (kilometers)	Intensity (maximum expected Modified Mercalli)	Ground Motion: (Average peak horizontal acceleration g = gravity = 9.8 meters per second per second)
3.0–3.9	1,950	25	II–III	Less than 0.15 g
4.0–4.9	7,800	50	IV–V	0.15–0.04g
5.0–5.9	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)



video

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

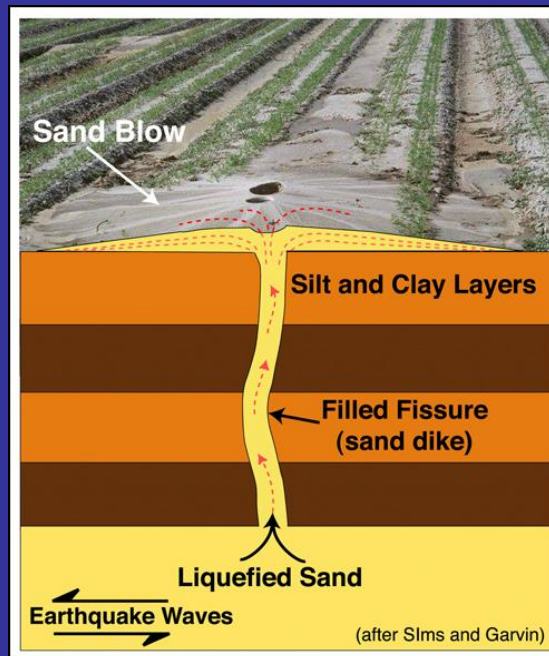
Likvefakce (ztekucení půdy) - vodou nasycený materiál se při třesení transformuje do tekutého stavu (nezpevněná půda v bláto), kompakce způsobí nárůst pórových tlaků = materiál ztrácí pevnost a teče. [Video!](#)

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



1964, Japonsko

Sand volcanoes, sand dykes



Ztekucení – tlak vrstev – trhliny – vytečení (erupce písku a vody)

Seismity (seismites)



Escape structures



Seismites - Mrtvé moře
Dead Sea



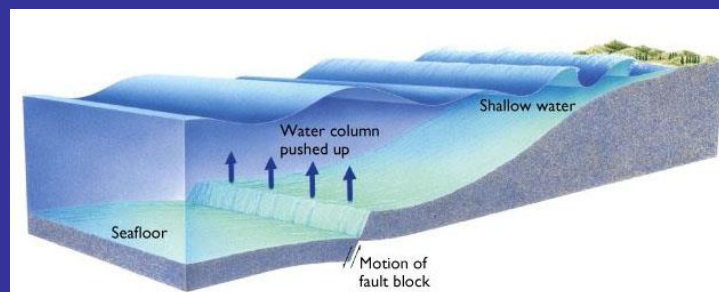
Sesuvy

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



Video - bez deště, pouze sesuv+ pórová 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



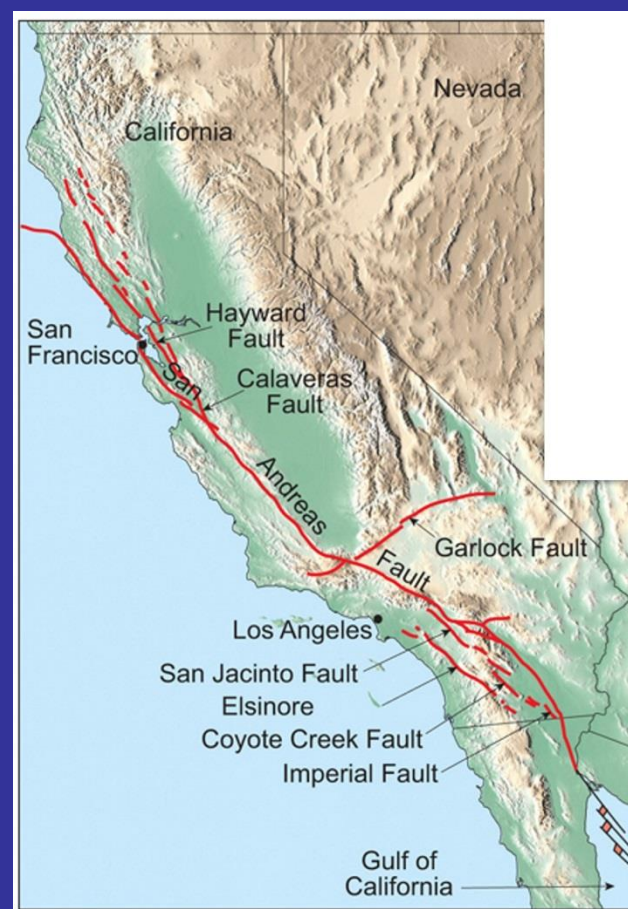
Tektonický kríp (creep) - aseismické pohyby

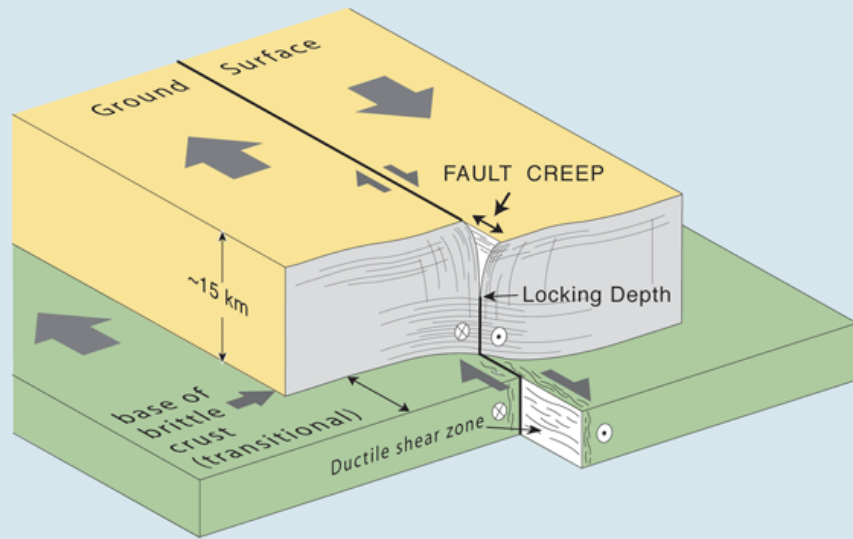
Pohyb na zlomu doprovázen minimem zemětřesení, více méně kontinuální, omezen na úzkou zónu

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

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

Nepříliš prozkoumán - nepředstavuje seismické ohrožení

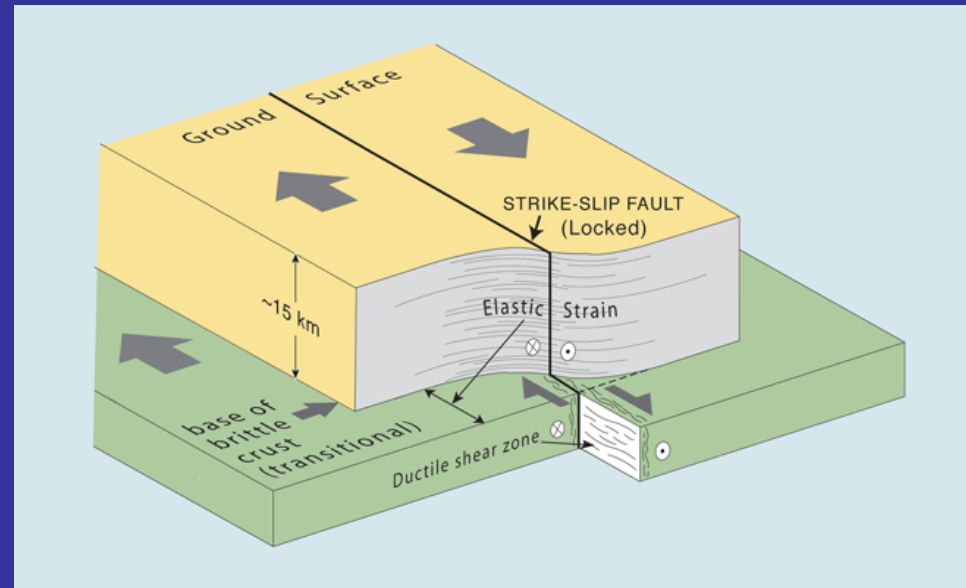
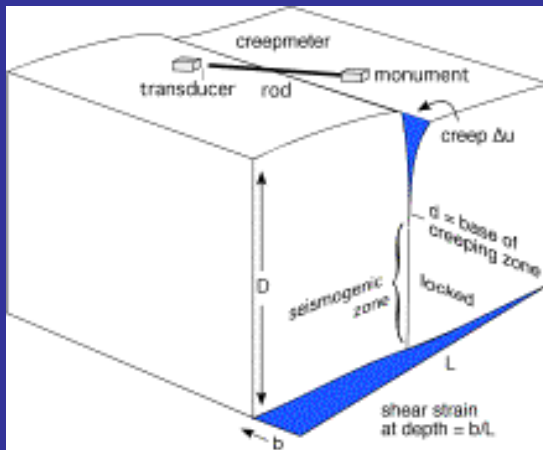


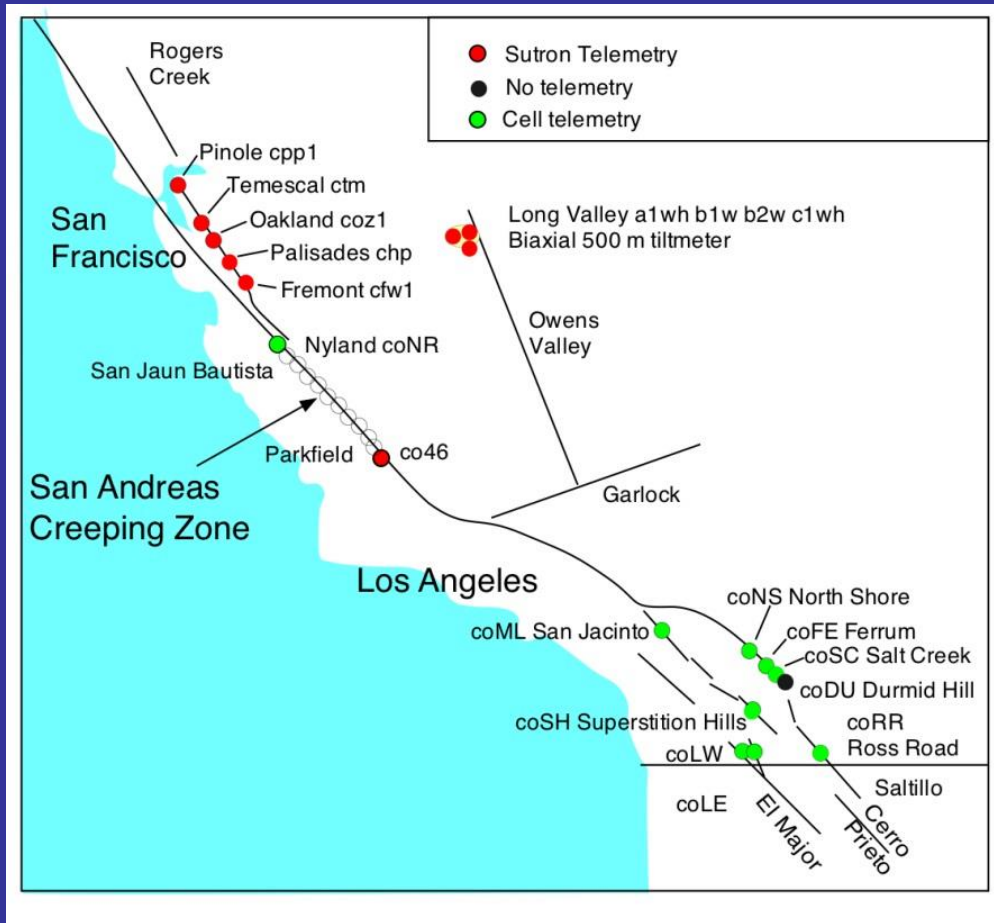


V hloubce mezi 5 a 12 km - pohyb uskutečněn zcela pouze při zemětřeseních - povrch a nejhlušší část však také creepuje

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

Vysoká rychlost: postupná deformace vozovky, budov





Creepmeters

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

Hayward fault – SAF zone, San Francisco Bay area



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 Hollister 6,6 mm/yr a 12 mm/yr (2,3km NW)



Hollister, twisted house

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



Calaveras fault - vinařství



krípující strom



2. Tektonická geomorfologie, role tektoniky ve vývoji reliéfu

Tvary reliéfu (landforms) - 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

Struktury – 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

Model : Process-response

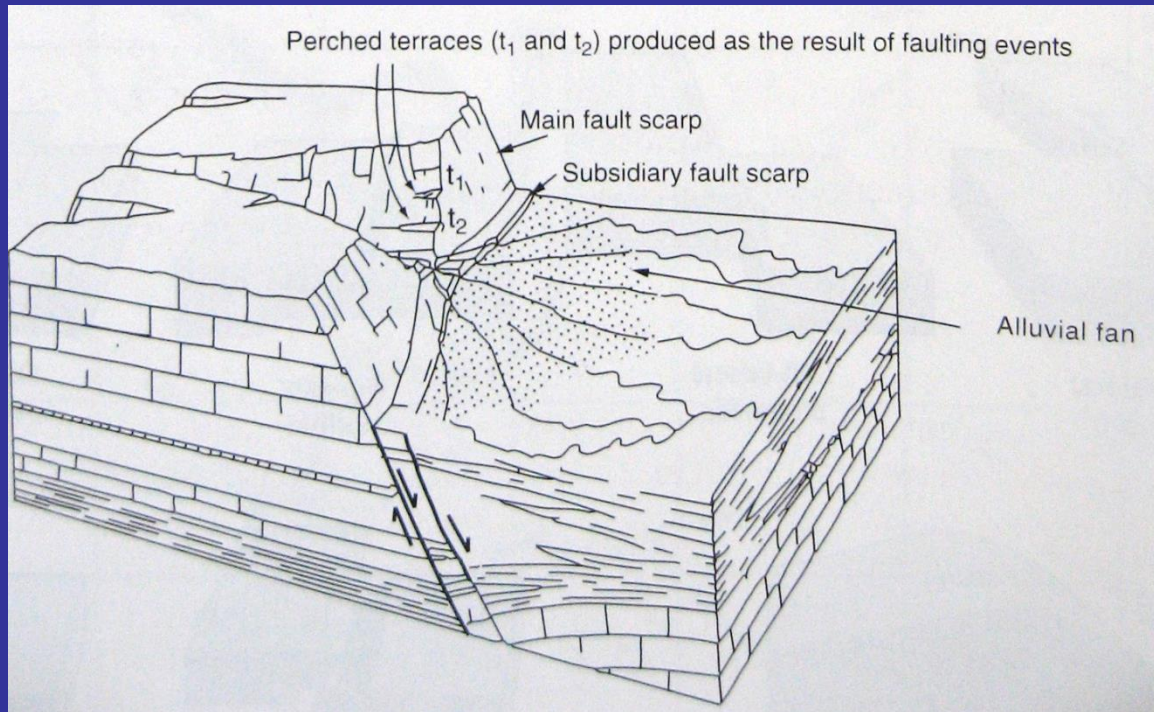
- kvalitativně i kvantitativně reprezentují, jak procesy ovlivňují vývoj reliéfu

- např. aluviální kužely – výsledek tektonických procesů, fluviálních procesů a/nebo změn v klimatických podmínkách (různé příčiny)

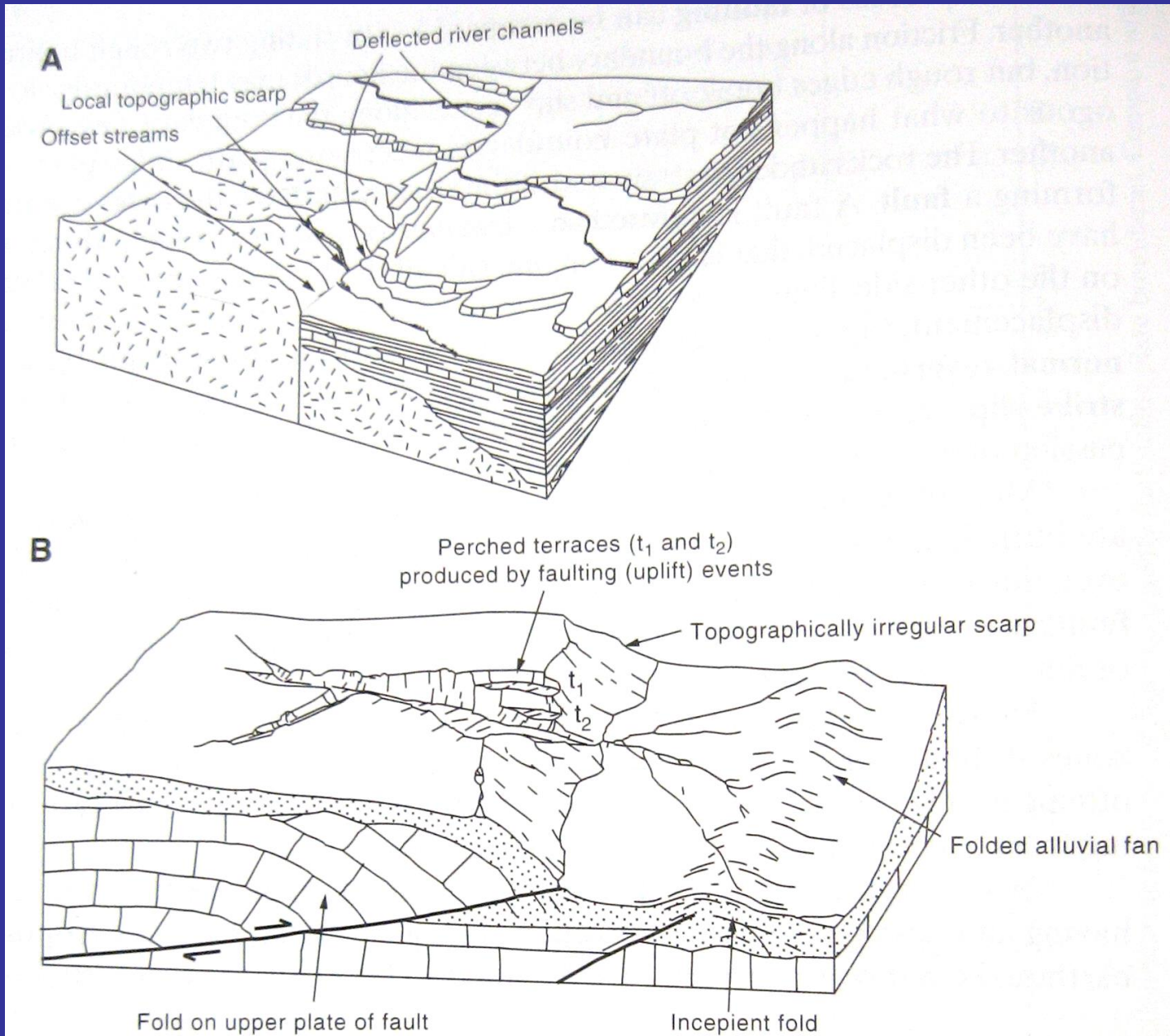
Potřeba rozumět všem procesům – rozlišovat mezi nimi (Španělsko vs Český masív – terasy, kužely)

Tektonická geomorfologie

- reliéf vytvořený tektonickými procesy:
ovlivnění eroze, ukládání, tvary;



- morfologie - odráží kinematiku – typ pohybu zlomů



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

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

Výzdvih (uplift)

Různé teorie o interakci mezi tektonikou a vývojem reliéfu

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

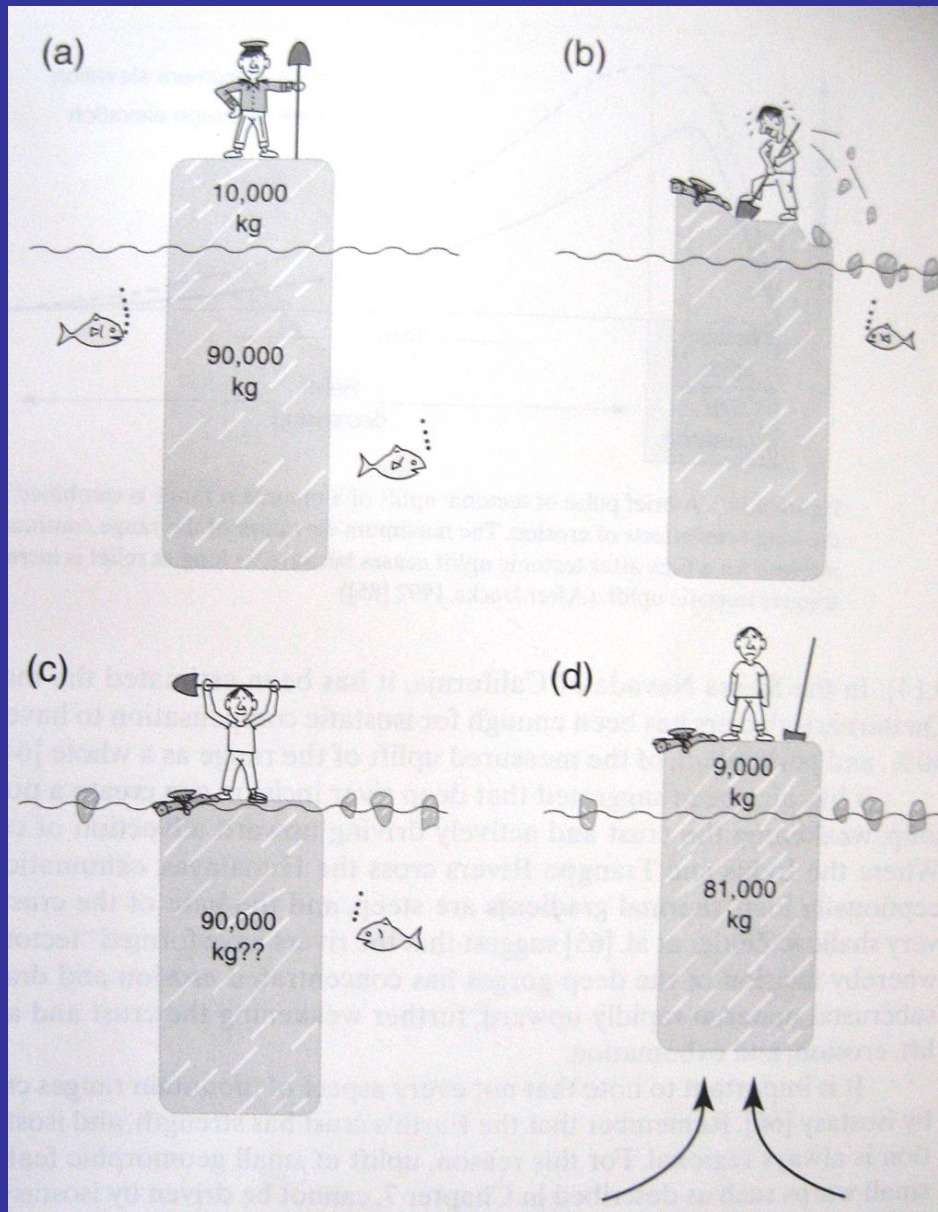
Vertikální pohyby způsobují vznik velkých forem reliéfu na zemském povrchu

Výzdvih podloží = izostatický výzdvih + tektonický výzdvih
(bedrock uplift)

ovlivněn jak tektonikou, tak geomorfologickými procesy

- eroze, denudace, akumulace, zvětrávání

Izostatický výzdvih

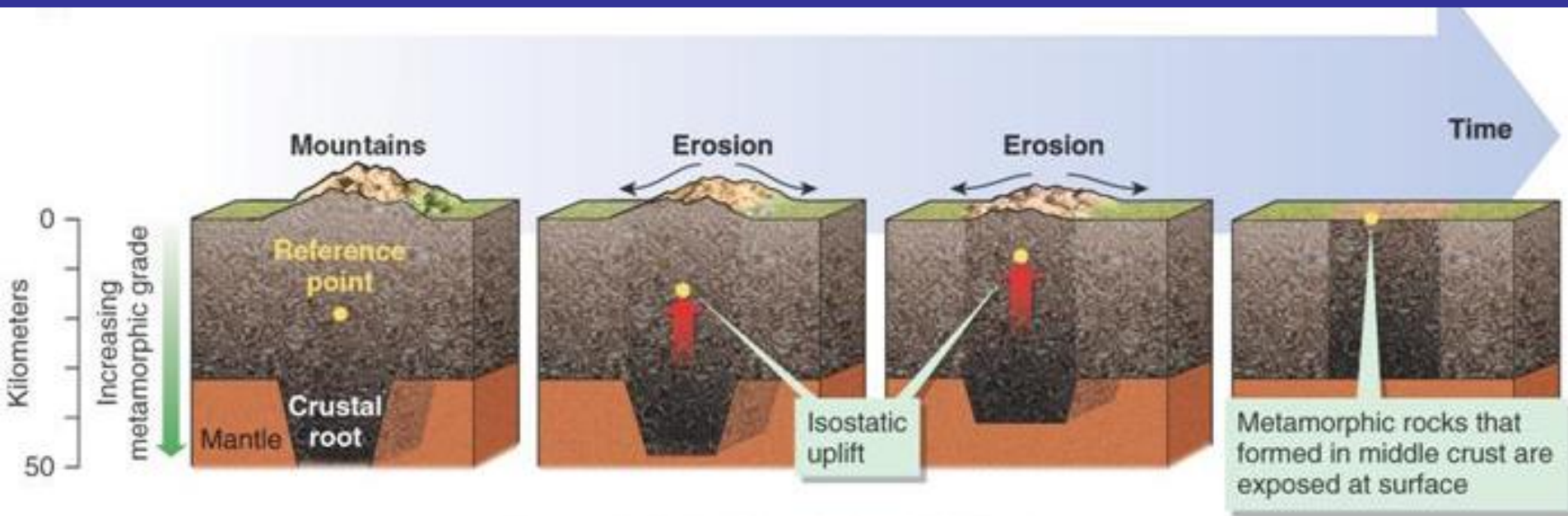


Srážky nikdy nejsou dostatečné na to, aby snížily efektivně povrch icebergu k hladině vody. Led odtavený nad hladinou je nahrazen výzdvihem ponořeného ledu.

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 kg/m^3) „plave“ na plášti s hustotou 3300 kg/m^3 – hustotní rozdíl 82% (90% pro oceánskou kůru s hustotou 3000 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

Tektonický výzdvih

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

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

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

Bedrock uplift = Tektonický výzdvih + izostatický výzdvih

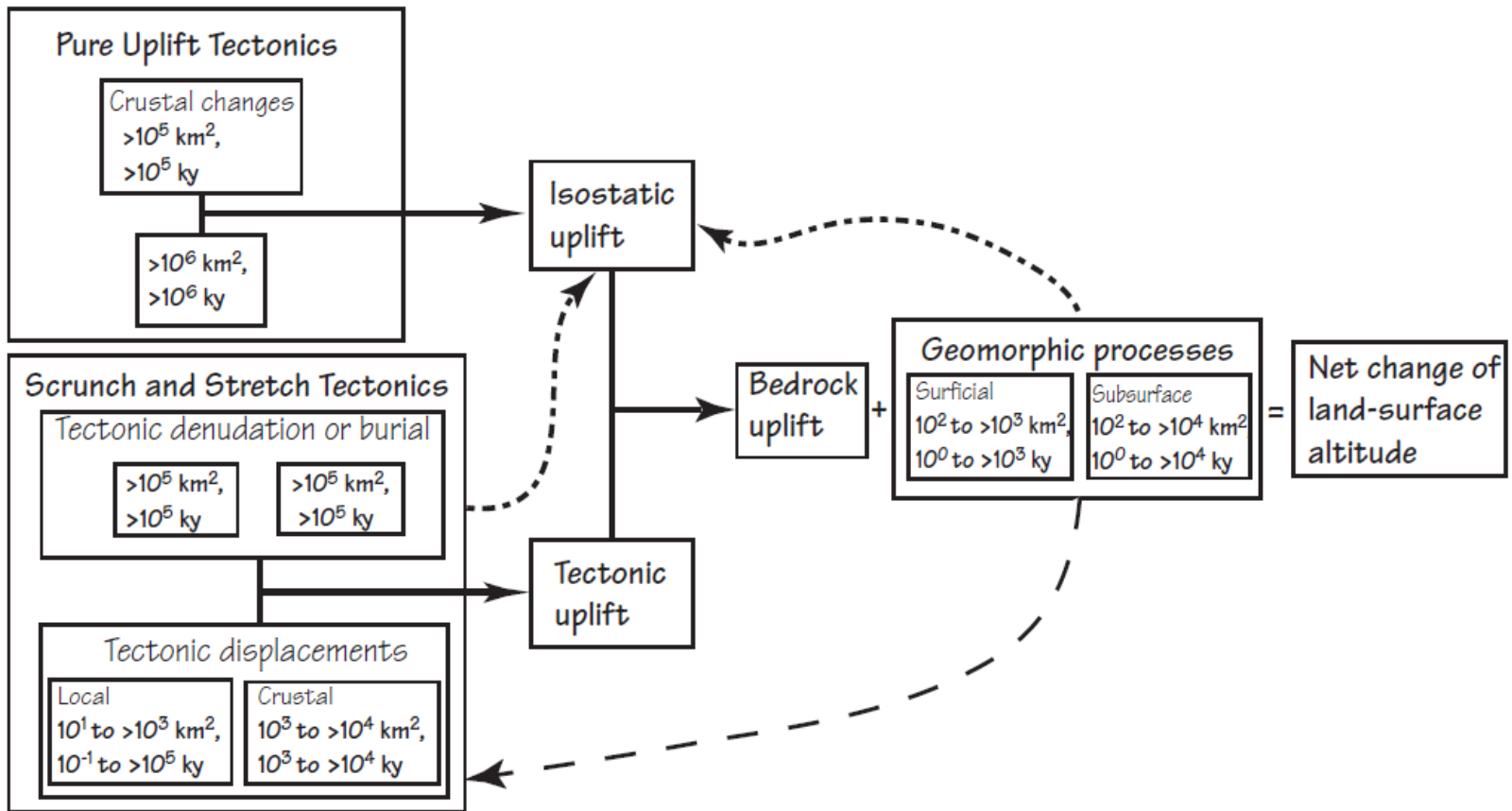
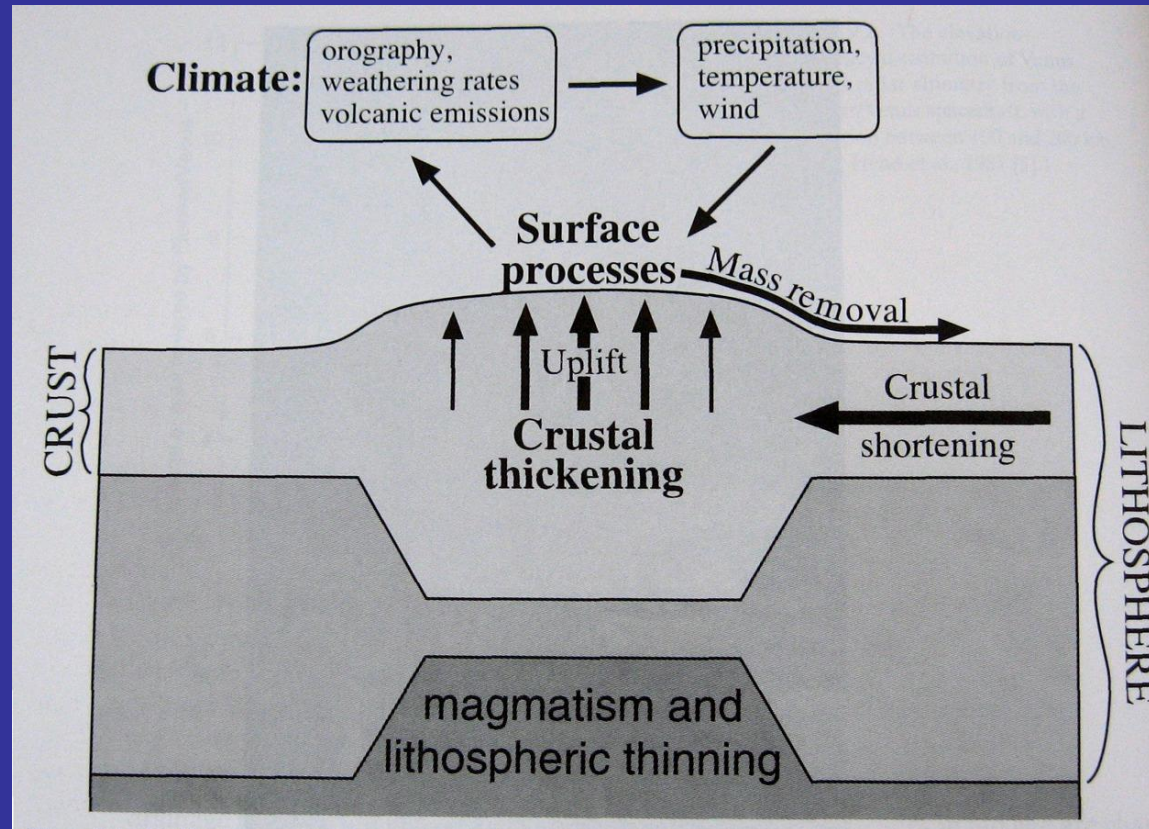


Figure 1.4 Links between tectonic, isostatic, and nontectonic variables affecting landscape altitudes and bedrock uplift. Feedback mechanisms to isostatic and tectonic uplift are shown with dashed lines.

Tectonic geomorphology of mountains, Bull 2007

Výzdvih povrchu - změny nadmořské výšky ovlivňují geomorfologické procesy (coupled system), tektonický výzdvih – vyvolává vyšší erozi

Vyšší nadmořská výška – odlišné klima, odlišné procesy – ovlivňuje izostatický výzdvih



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

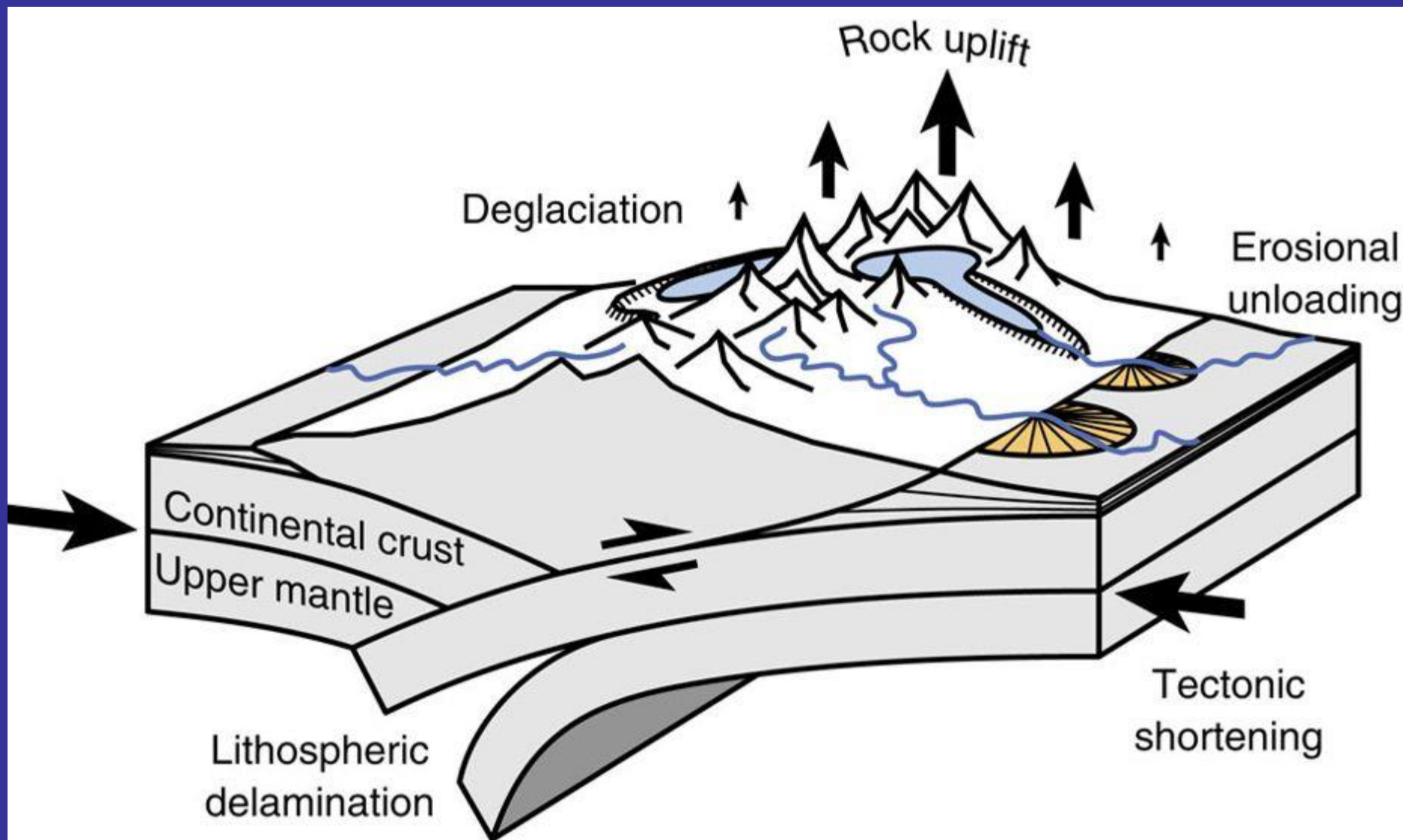
X výzdvih na lokální úrovni – na zlomech – nárůst reliéfu postupuje proti směru toku relativně pomalu

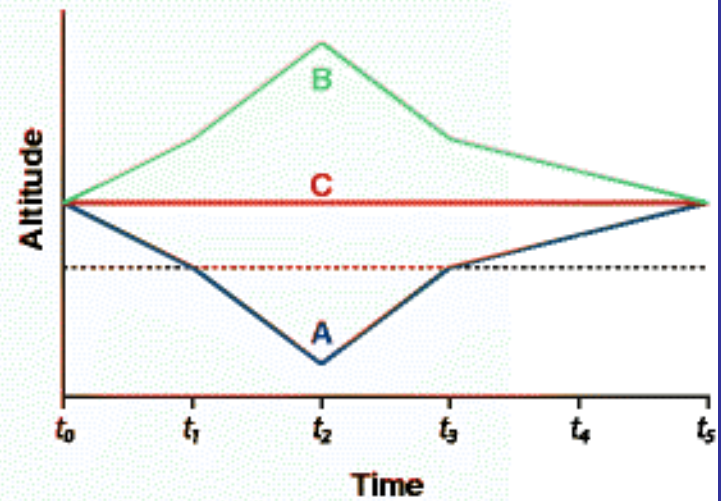
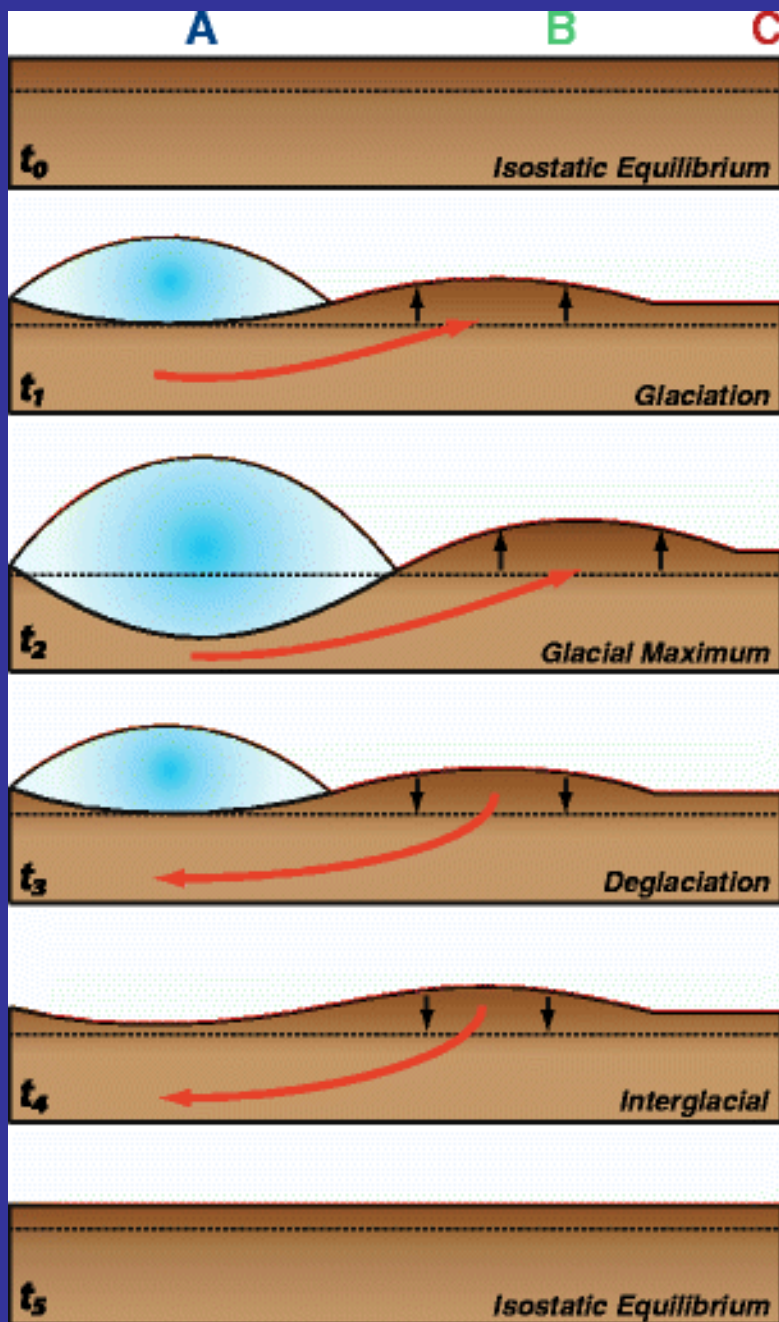
Tektonický výzdvih vyvolává erozi



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

Glaciální izostatický rebound





A = near field (e.g. Canada)

B = intermediate field (e.g. Mid Atlantic, USA)

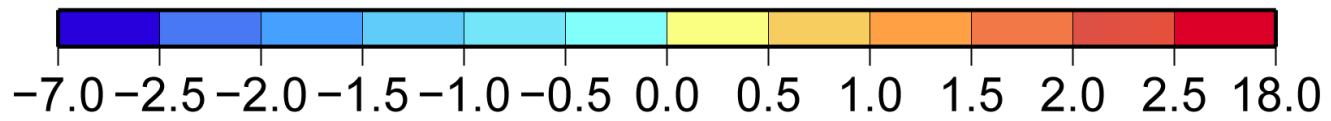
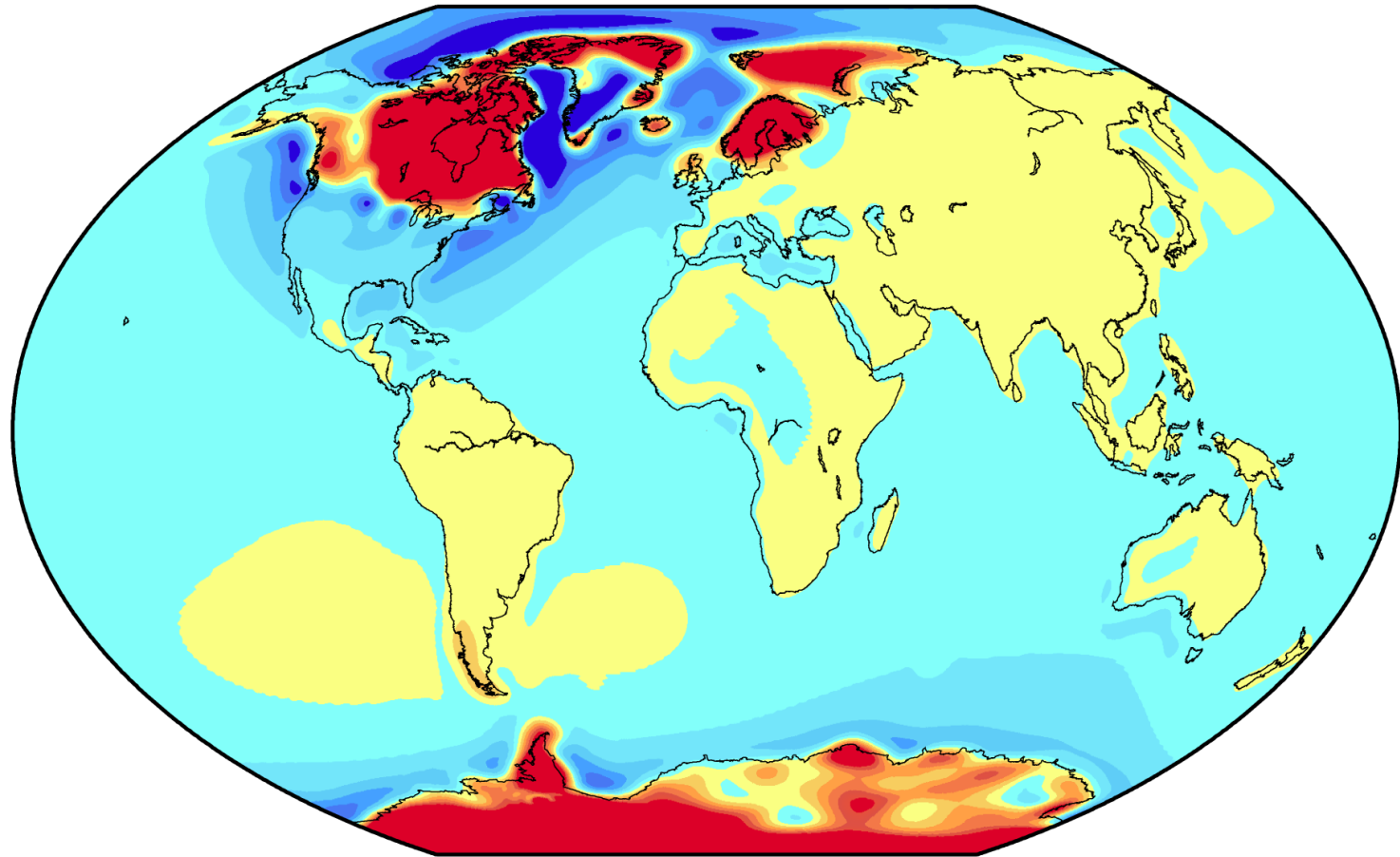
C = far field (e.g. Brazil)



→ Flow of mantle material

..... Fixed point of reference

↓ ↑ Subsidence and uplift



Glacial rebound