

Tektonická geomorfologie

RNDr. Petra Štěpančíková, Ph.D.

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

Oddělení inženýrské geologie

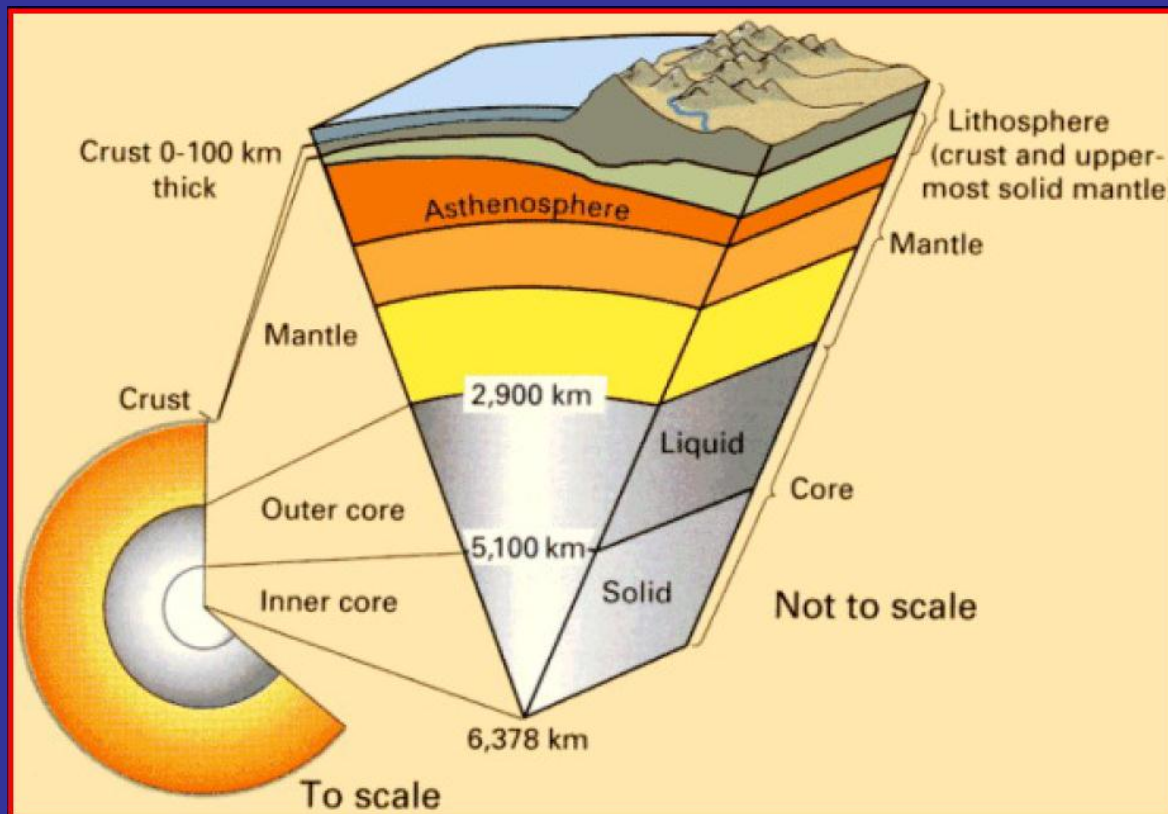
Obsah:

1. Definice aktivní tektoniky, tektonické procesy a jejich typy v návaznosti na odlišné tektonické režimy
2. Tektonické geomorfologie, role tektoniky ve vývoji reliéfu
3. Tvary reliéfu charakteristické pro různé typy tektonických pohybů (tvary vázané na horizontální či vertikální pohyby)
4. Odraz tektonických procesů v říčním systému, asymetrie povodí, následná zvýšená eroze a akumulace, analýza údolní sítě
5. Analýza fluvialních tvarů reliéfu porušených tektonickými pohyby - říční terasy, aluviální kužely, analýza podélných a příčných profilů vodních toků

6. Výzdvih pohoří a jeho vliv na změny v reliéfu, rychlosti geomorfologických procesů, analýza okrajových zlomových svahů pohoří
7. Zlomové svahy, jejich vývoj, degradace, možnosti jejich datování
8. 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
10. Studium paleoseismických parametrů aktivních zlomů, intenzita pohybu, průměrná rychlost pohybů, časoprostorové rozložení zemětřesení v rámci zlomu

1. Active tectonics, tectonic processes and their types resulting from different tectonic regimes

Tectonics – endogenous processes, structures and landforms associated with Earth's crust deformation (movements of lithospheric plates)



Lithosphere = solid shell of the Earth (up to 100 km)

Earth's crust + upper mantle

continental crust (30-80km), density 2.7 g/cm^3

Sedimentary, granitic, basaltic layer

oceanic crust (5-10km), density 2.9 g/cm^3

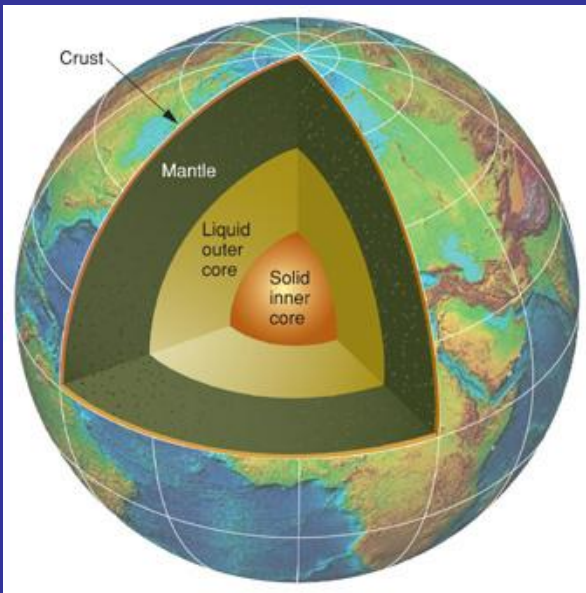
Sedimentary, basaltic layer

direct observations – drills, geologic information (xenolites)

Mohorovičić discontinuity –
crust/mantle – density change, higher
velocity P-waves

Lithosphere / asthenosphere
(semifluid) 3.6 g/cm^3 , lower viscosity
– below lithospheric plates

– velocity of seismic waves



Global scale tectonics: origin of continents and ocean basins

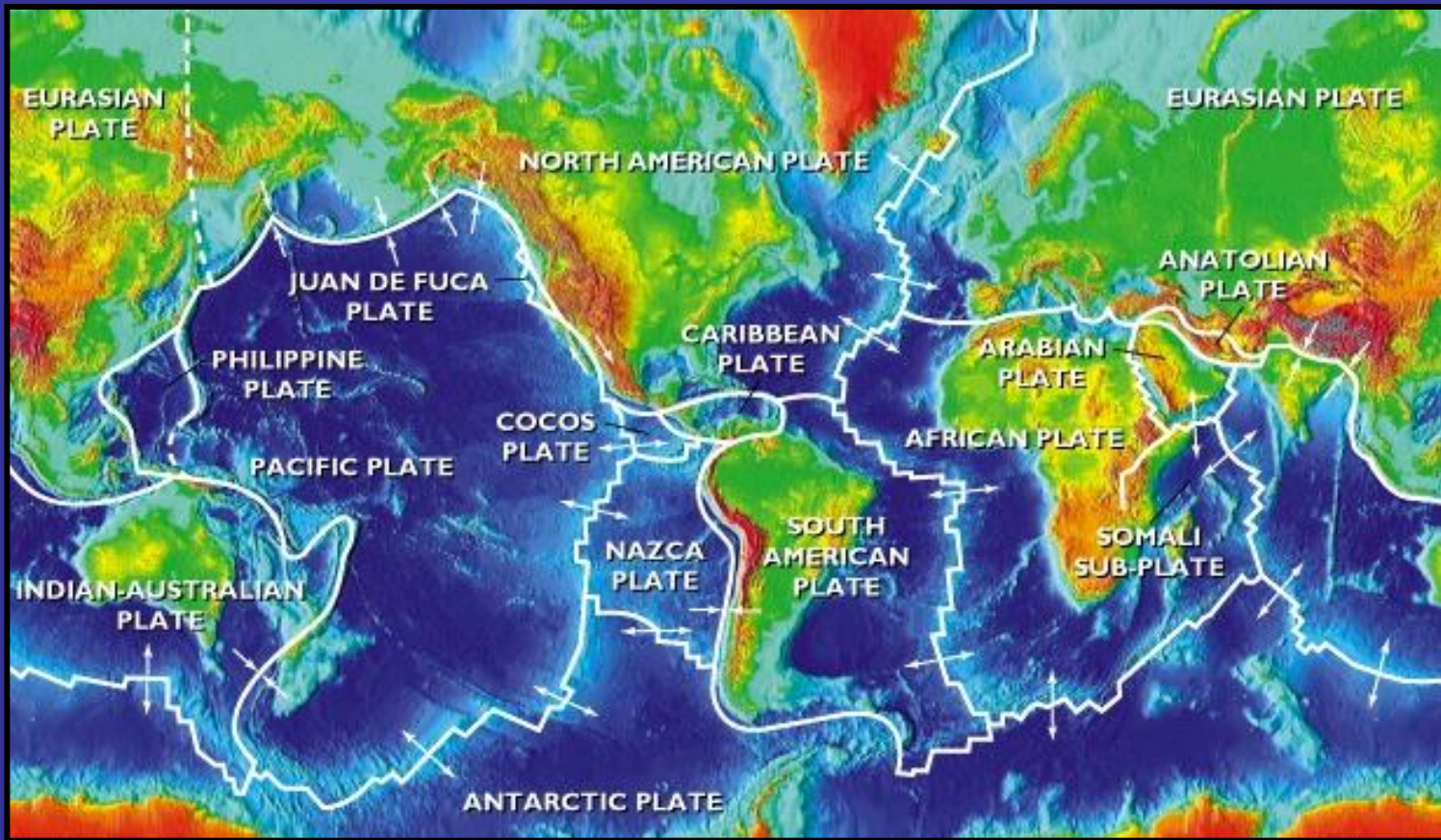
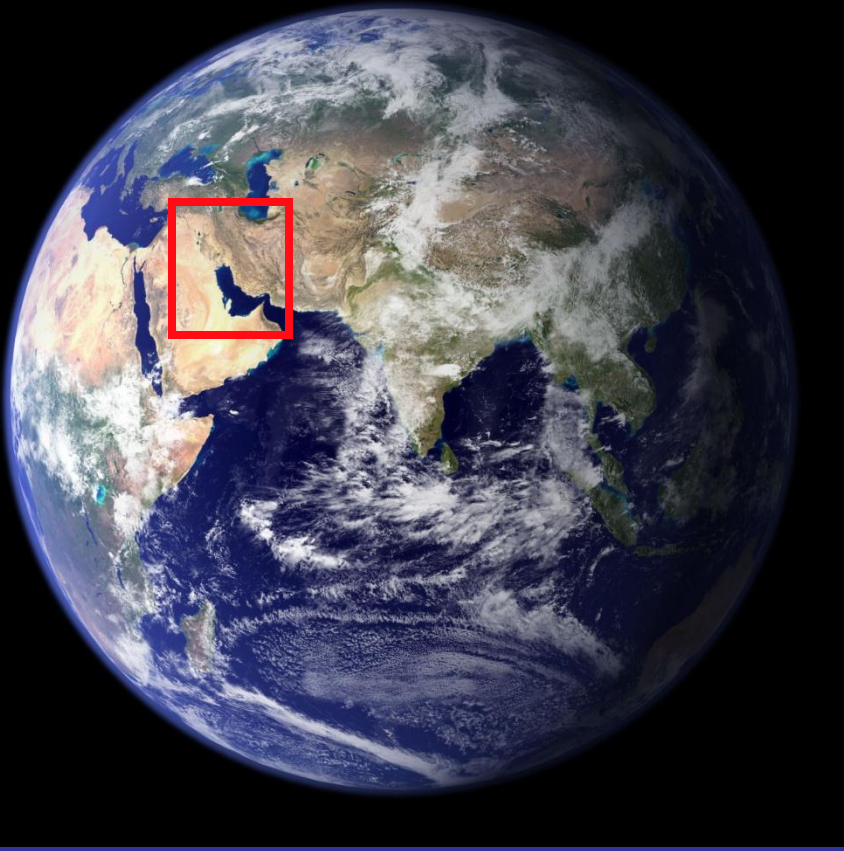


Plate tectonics

Global Neotectonics



10^7 m

10,000 km

Scale 1:100,000,000

Satellite images

microplates

Regional Neotectonics



10^6 m

1000 km

Scale 1:10,000,000

mountain chains

Active Tectonics Tectonic Geomorphology



10^5 m

100 km

Scale 1:1.000,000



10^4 m

10 km

Scale 1:100,000



10^3 m

1 km

Scale 1:10,000

Local scale: individual landforms such as folds,
fault scarps etc.

satellite images



10^1 m

10 m

Scale 1:100

offset channels



10^0 m

1 m

Scale 1:10

tectonic breccia

Structural Geology Petrology



10^{-1} m

10 cm

Scale 1:1

outcrop/ hand sample

Time scales of tectonics:

depend on *spatial scale* at which the processes act:

Development of continents - thousands of millions years

Large ocean basins - hundreds of millions years

Small mountain ranges - several millions years

Small folds to produce hills - several hundred thousands years

Fault scarps - suddenly
during earthquake



Neotectonics - crustal movements starting after the youngest orogenic phase or related to the youngest stress field occurring in the late Neogene and Quaternary

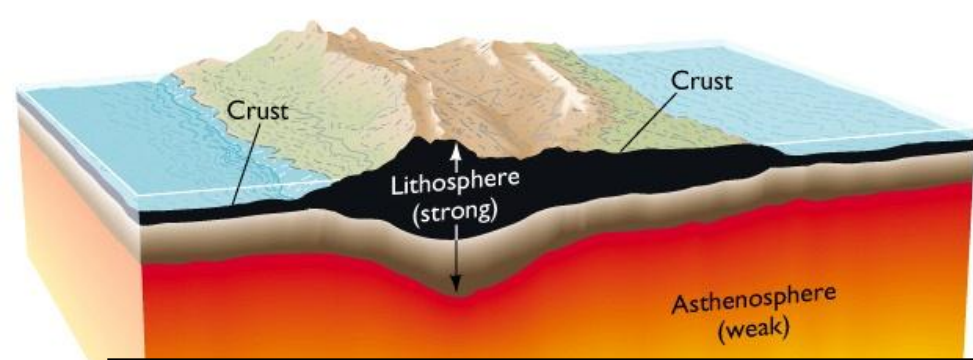
Active tectonics – tectonic processes that caused deformation of the Earth's crust of local scale and on a time scale significant for humans (EQs)

Active faults – moved during last 10.000 yrs – Holocene (paleoseismology)

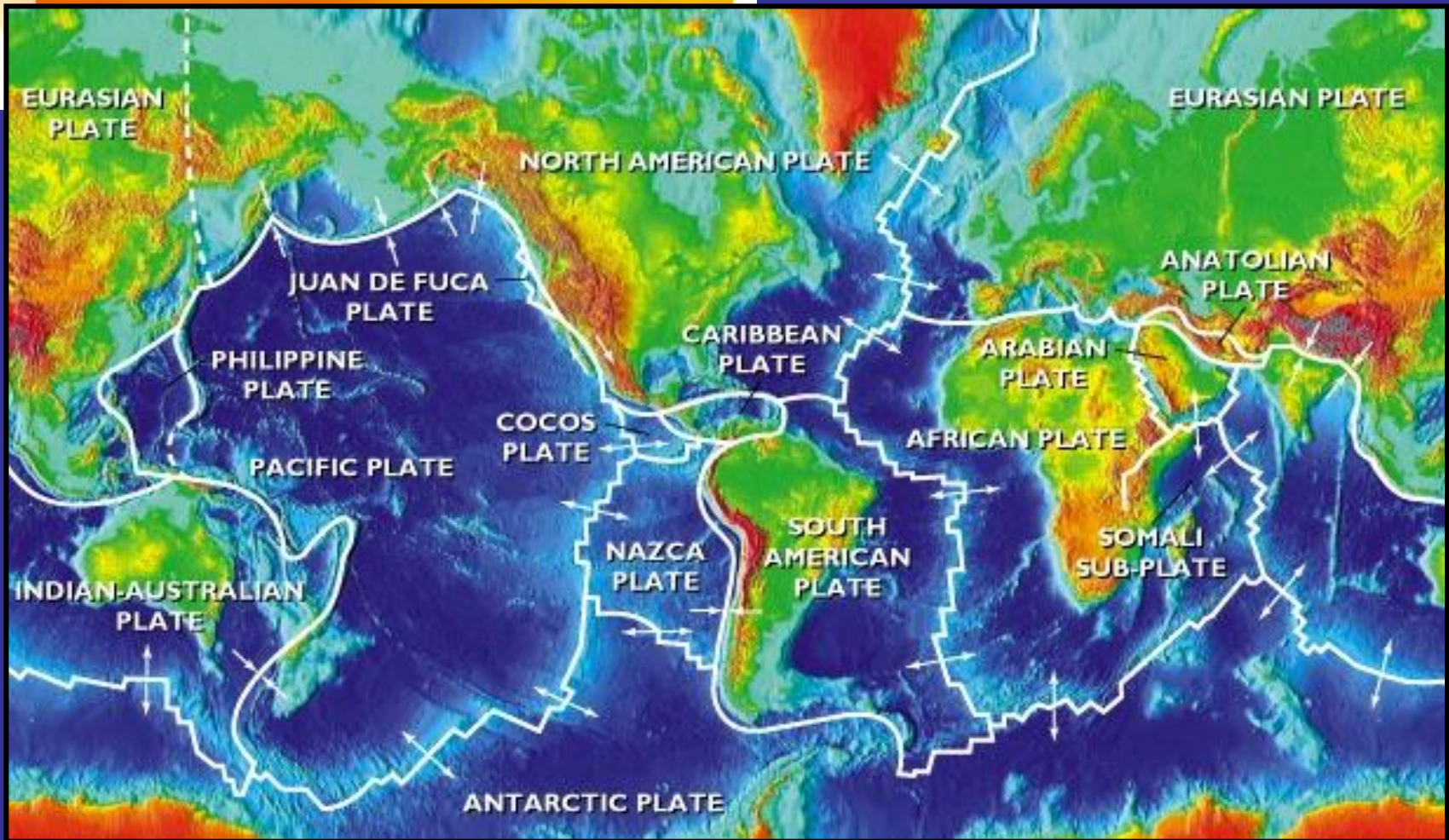
Potentially active faults (capable faults) – moved during Quaternary (2.6 million yrs)

Rates of tectonic processes:

Very variable – 0.00X-X mm/year for fault displacement
X cm/year for movement on plate boundaries



Tectonic processes - driven by forces in the depth that deform the crust => origin of ocean basins, continents, mountains



Lithosphere broken into plates - relatively move; triple junction

Plate Boundaries

A. Divergent boundaries

B. Convergent boundaries

C. Transform boundaries

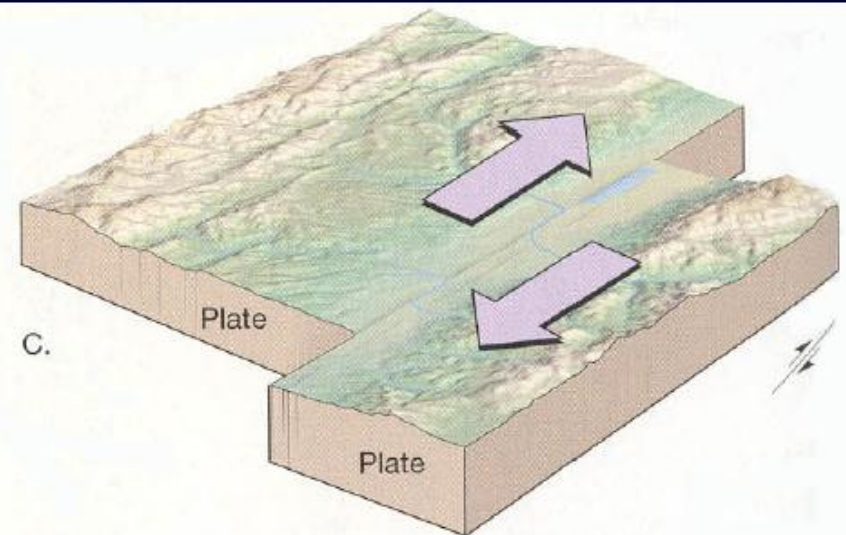
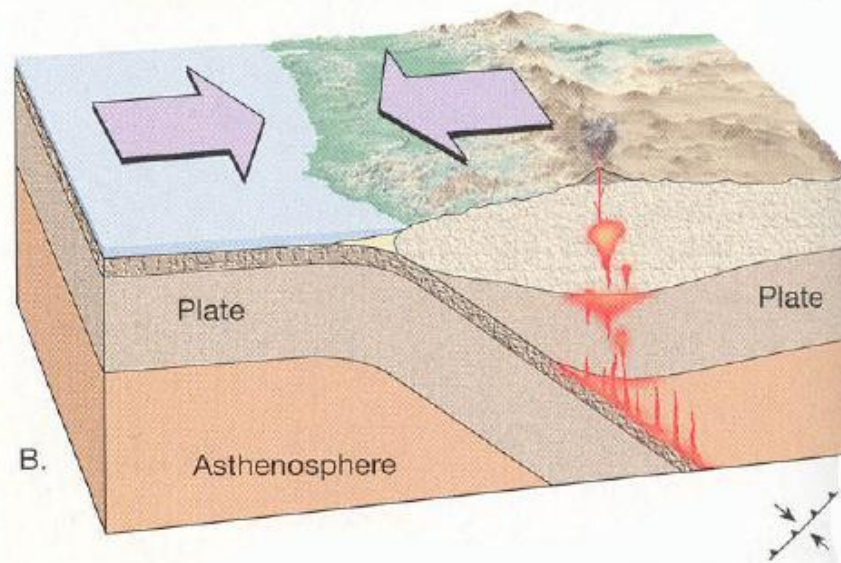
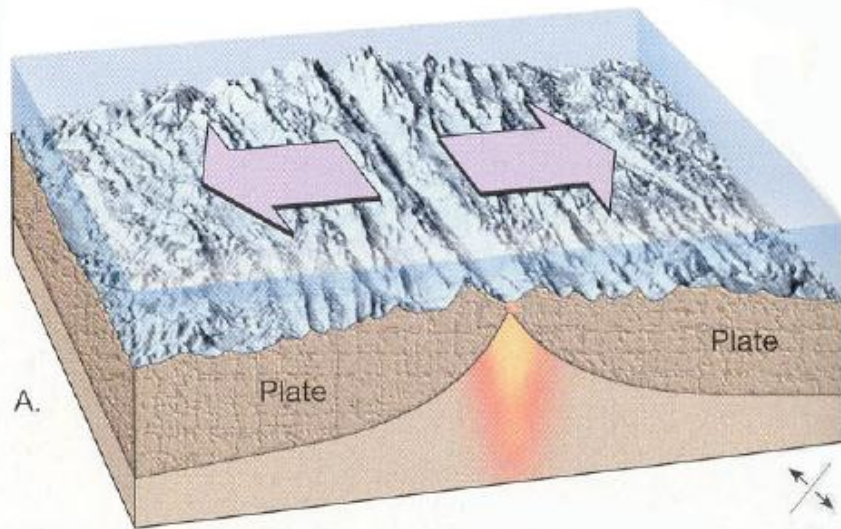
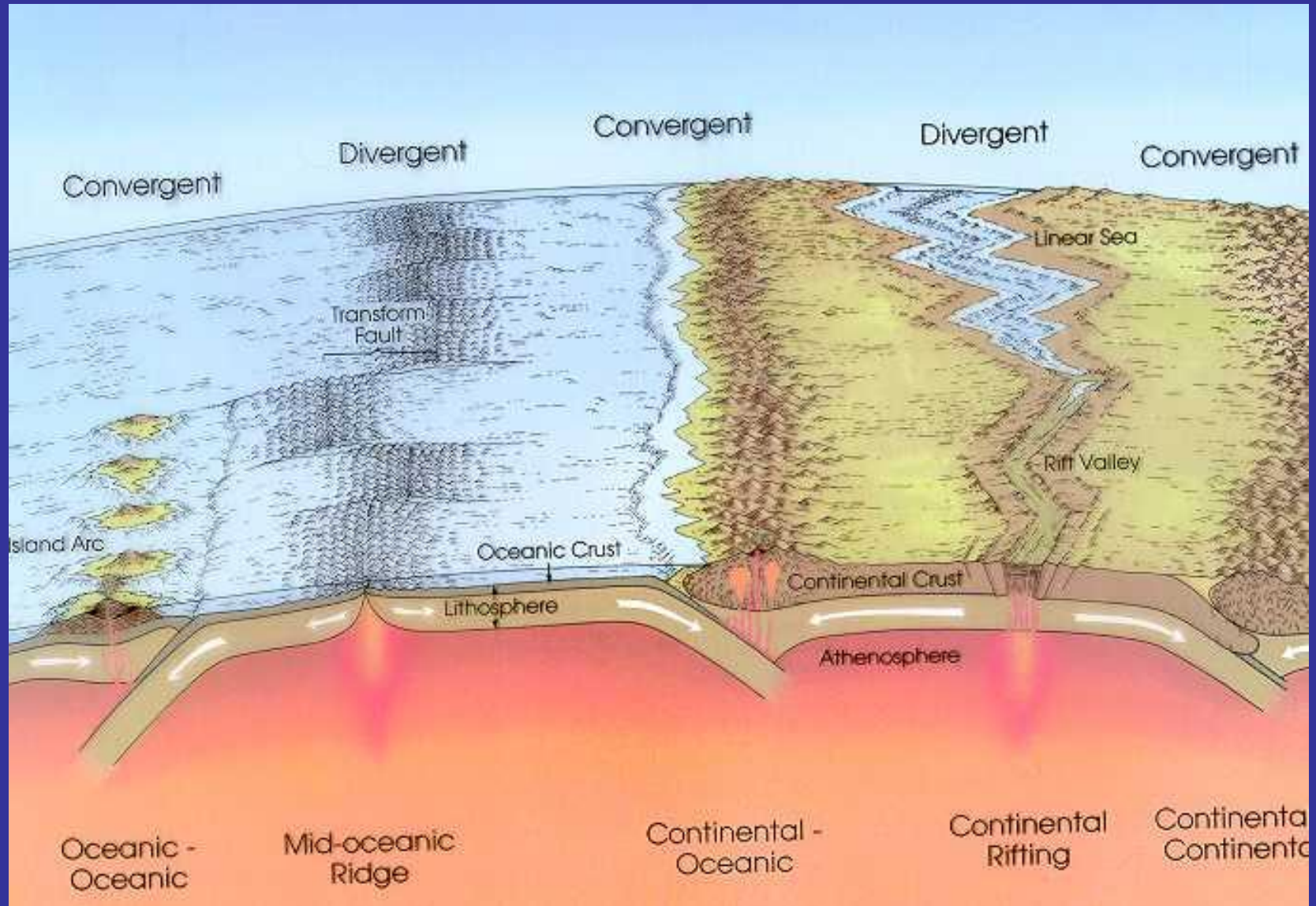


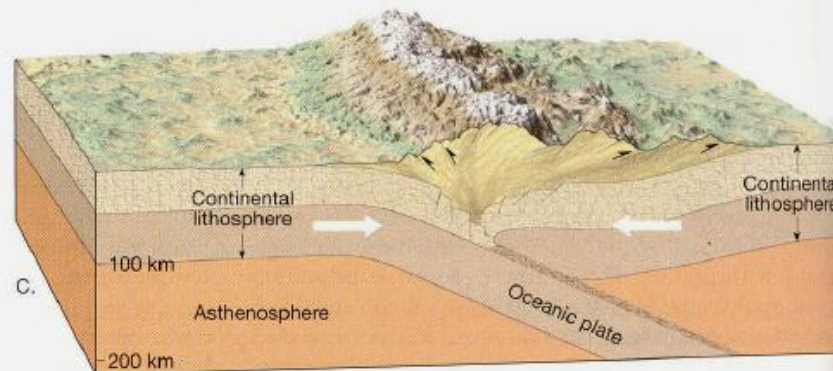
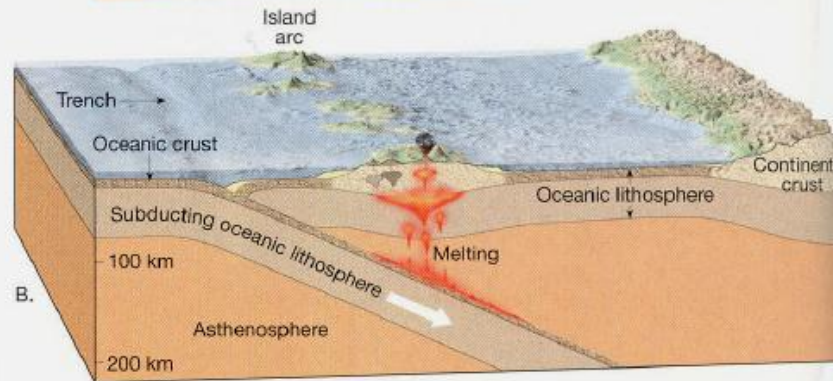
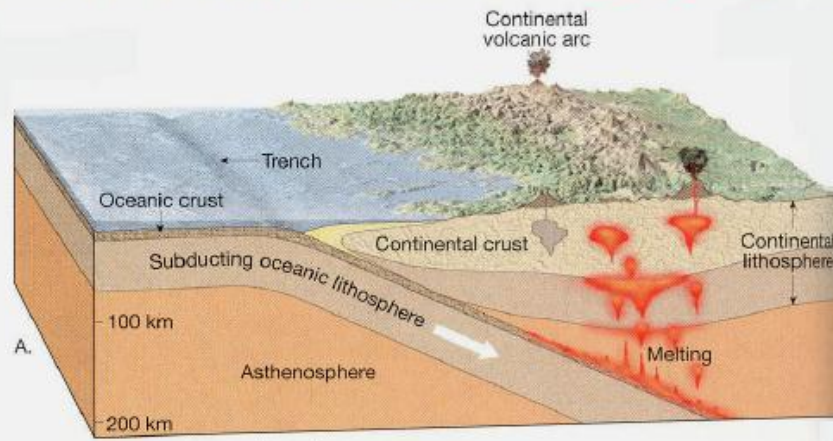
Figure 7.9 The three types of plate boundaries. **A.** Divergent boundary. **B.** Convergent boundary. **C.** Transform fault boundary.

divergent – extension (spreading), convergent – shortening (subduction) [video!](#)

Tectonic cycle



[Video!](#)



Three types of convergent Plate boundaries :

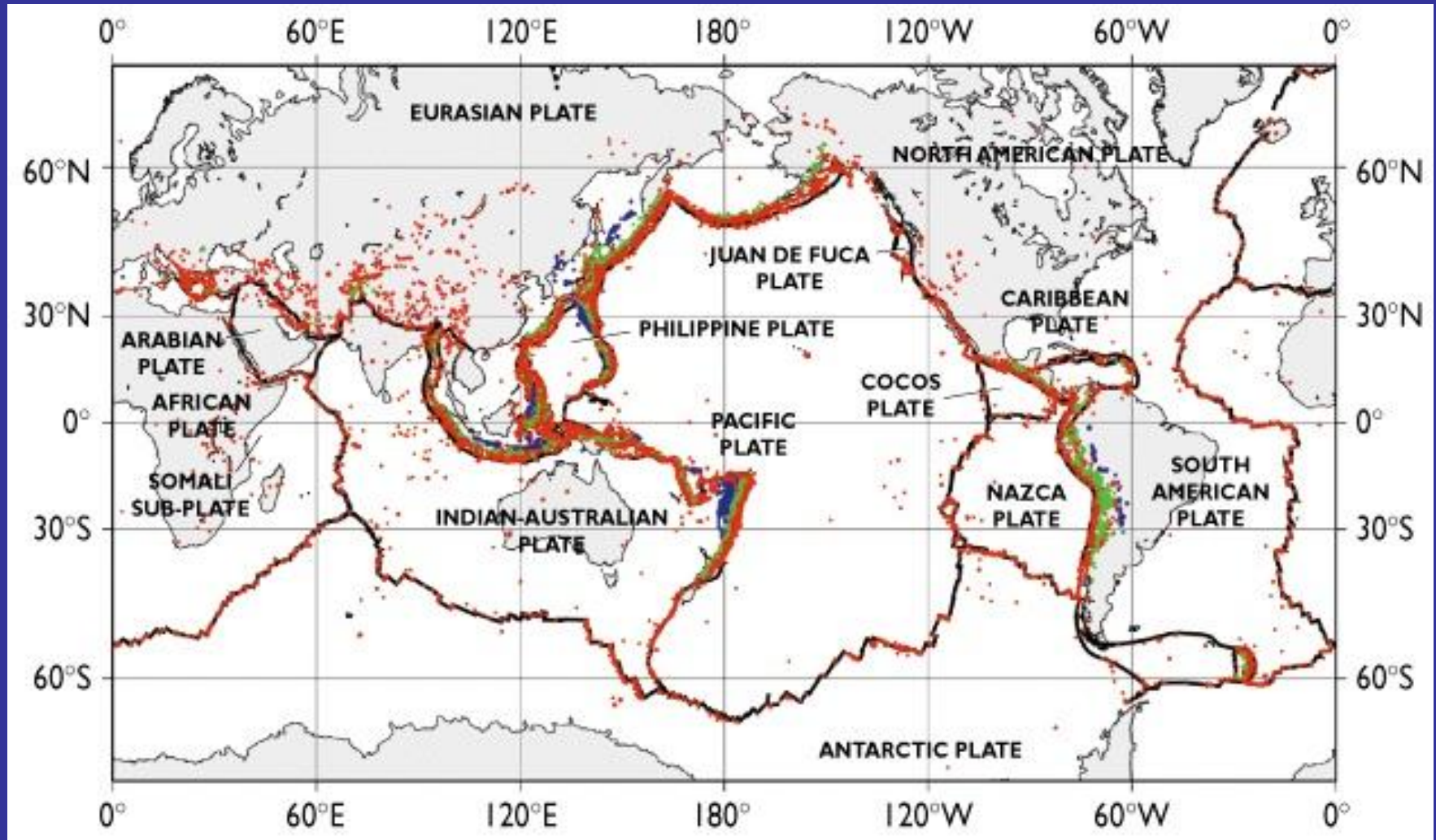
A. Oceanic-continental

B. Oceanic-oceanic

C. Continental-continental

[Video!](#)

Active Tectonics: confirmation of plate tectonics...



- Earthquakes
- Volcanoes
- Faults
- Topography
- Surface deformation

World Seismicity, 1963–2000
[Video!](#)

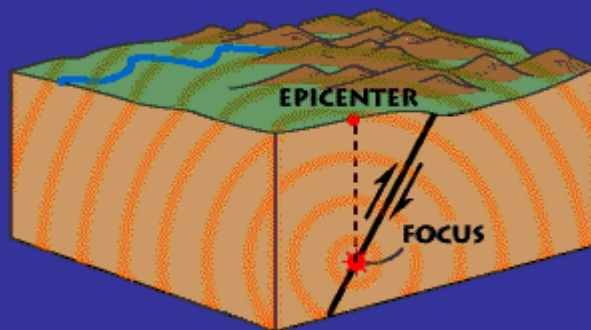
Tektonické pohyby

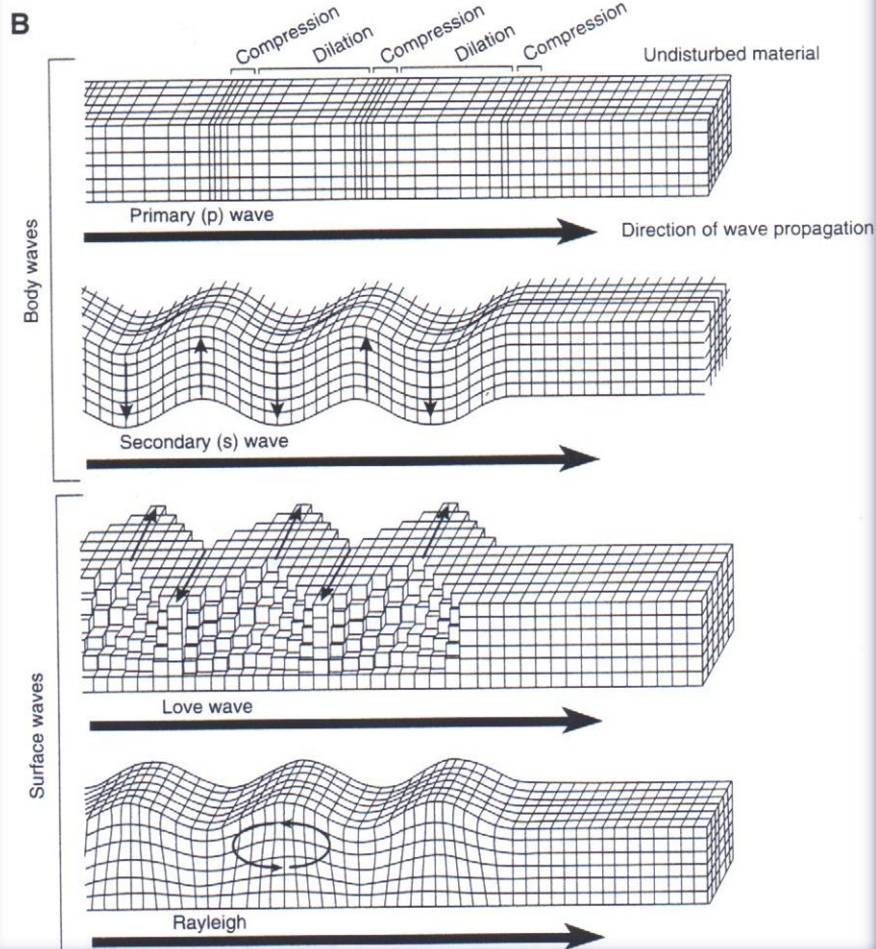
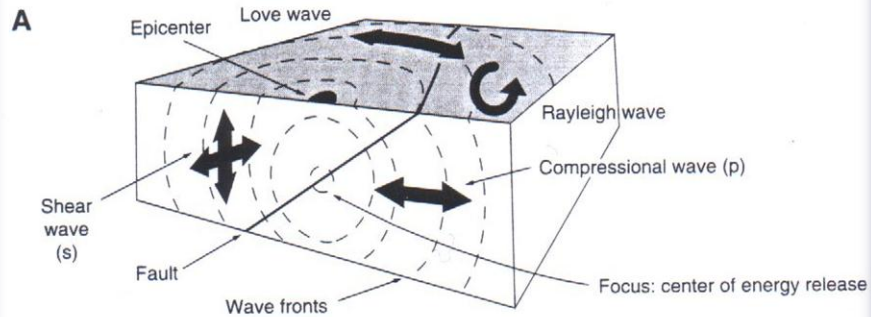
- seismické pohyby
 - doprovázené zemětřeseními
- aseismické pohyby (tektonický creep)
 - více či méně kontinuální pohyby s minimální seismicitou, omezené na úzkou zónu

Producing new lithosphere in ocean ridges, subduction of old one and plates sliding along each other – produce **stress** (force per unit area) and **strain** (deformation – change in length, volume).

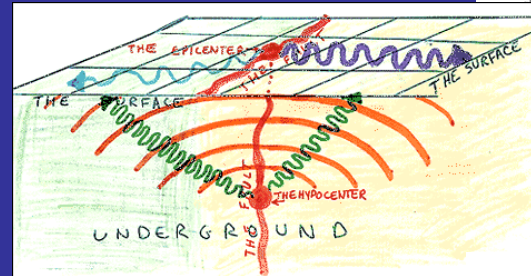
Seismic tectonic movements

When the stress **exceeds the strength** of rocks, then rocks fail (rupture), energy is released in a form of an **earthquake** (seismic waves) and **faulting** (breaking the rocks, rock deformation).

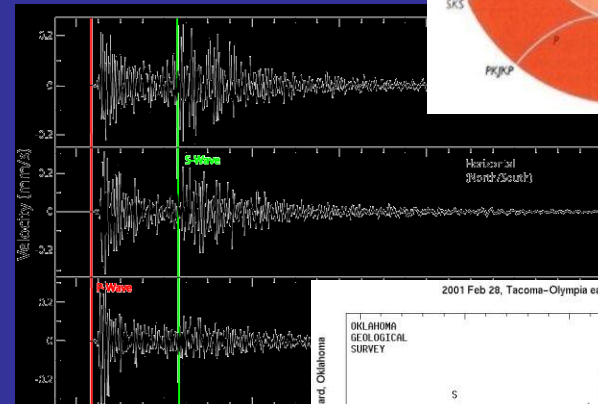
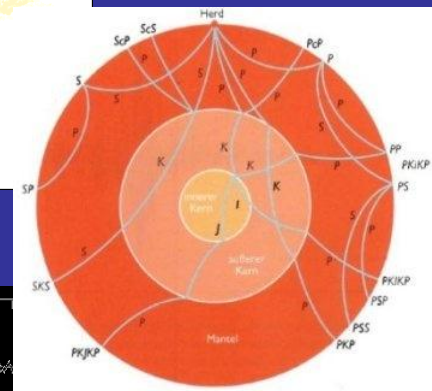




P-waves followed by S-waves

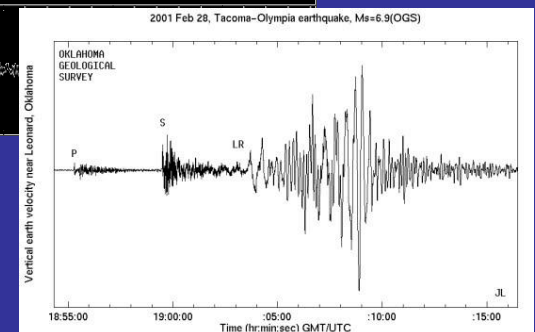


- Primary or Pressure (p) waves
 - Secondary or Shear (s) waves
 - Rayleigh waves
 - Love waves
- body waves
- surface waves



[Video!](#)

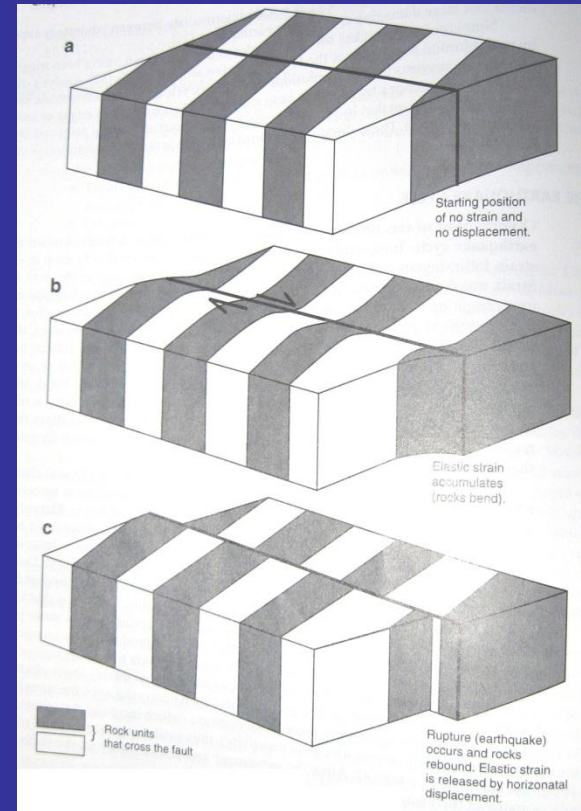
location



After the EQ, stress is accumulated again.

Earthquake cycle (seismic cycle):

1. accumulation of stress = produces elastic strain (not permanent)
2. during earthquake stress is released when rocks break and permanent displacement occurs, then strain also drops = **elastic rebound** (deformed material in original shape)



[Video!](#)

Magnitude

versus

Intensity

Richter's magnitude

logarithmic scale obtained by calculating the logarithm of the amplitude of waves

$$M = \log a$$

Moment magnitude M_w

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

energy is transformed in

- cracks and deformation in rocks
- heat,
- radiated seismic energy E_s .

The seismic moment M_0 is a measure of the total amount of energy that is transformed during an earthquake.

Rossi – Forei – X stupňová (1883) nejstarší stupnice

Ostatní - XII stupňové škály

MCS – Mercalli – Cancani - Sieberg (1902)

MSK -64 – Medvedev-Sponheuer-Kárník

MMI – Modified Mercalli (in USA)

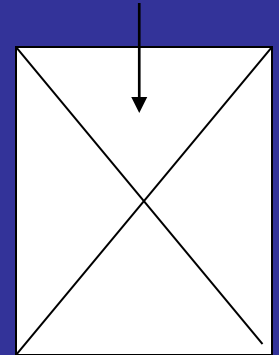
EMS-98 - European Macroseismic Scale

EMS-98 - European Macroseismic Scale

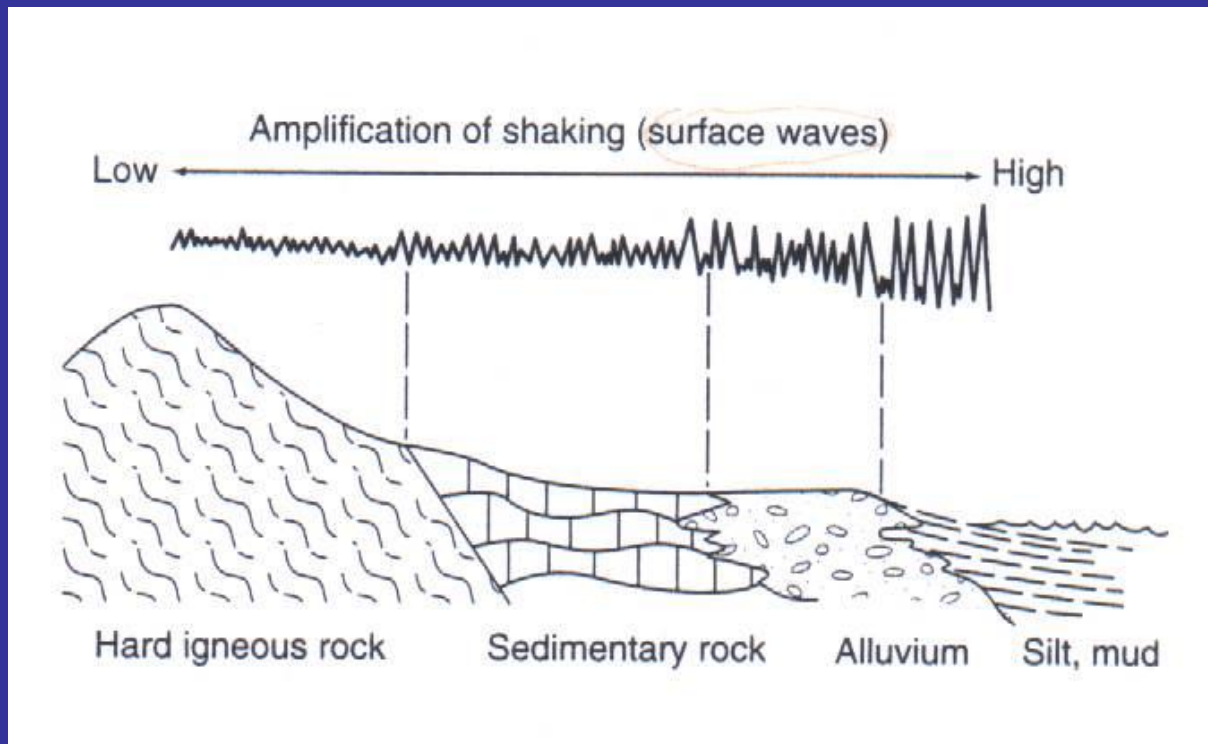
I. Nepocítěno	Zemětřesení nebylo pocítěno.
II. Stěží pocítěno	Pocítěno jen velmi málo jednotlivci v klidu v domech.
III. Slabé	Pocítěno uvnitř budov některými osobami. Lidé v klidu pociťují jako houpání nebo lehké chvění.
IV. Značně pozorované	Zemětřesení uvnitř budov cítí mnozí, venku jen výjimečně. 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. vlásenčnicové 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 strukturní 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
- bezprostřední blízkost zlomů, orientace zlomů v ohniskové oblasti
- lokálně -složení a fyzický stav hornin, hloubka hladiny podzemní vody, geologická stavba



geologická stavba



Větší amplituda - ničivější účinky

Mexico city 1985, $M = 8$, epicentre 350km far away, 10,000 casualties

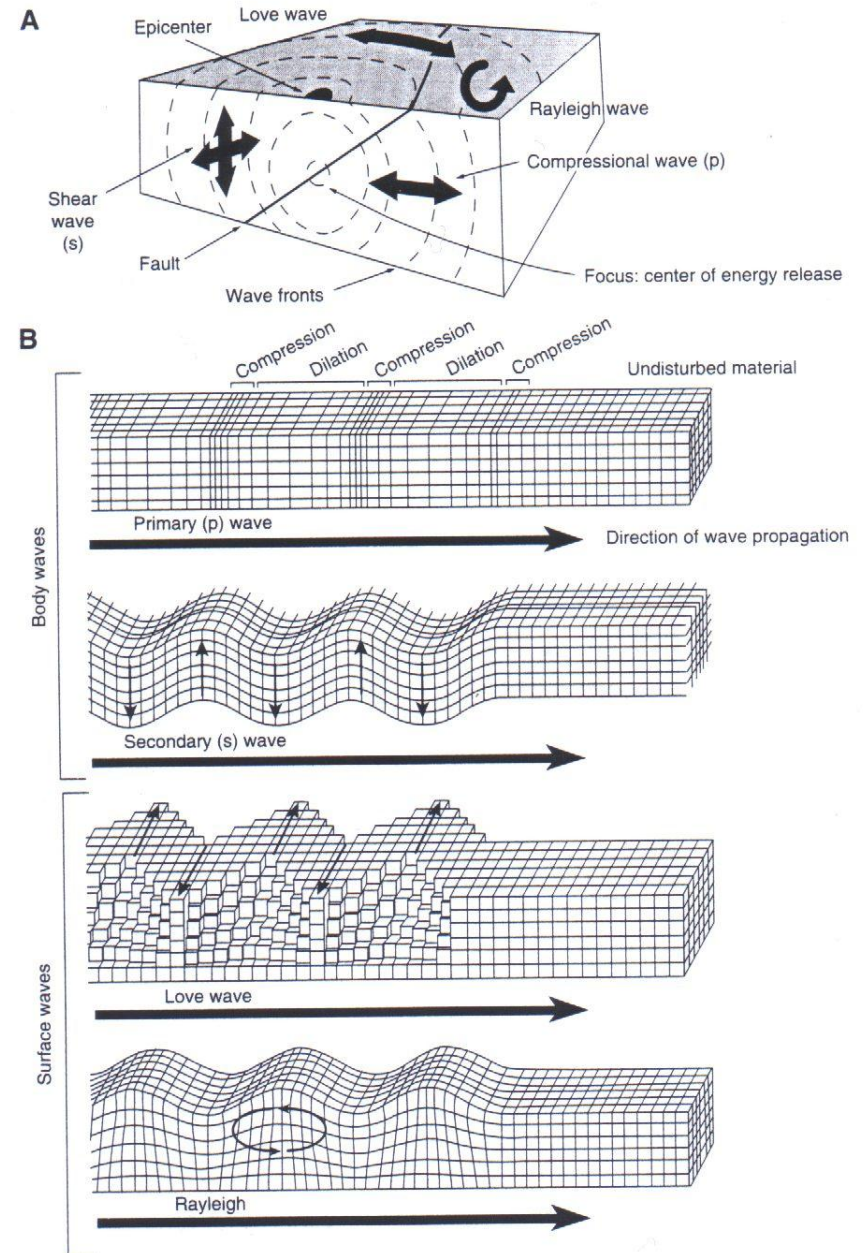
Vzdálenost od epicentra
- typ vln

P, S vlny – vysoká frekvence

Povrchové vlny – nízká
frekvence

Nízké budovy – vysoká vlastní
frekvence

Výškové budovy – nízká
vlastní frekvence



Zrychlení pohybu podloží

horizontální složka

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

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

Effects of earthquakes

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 $M=7.6$



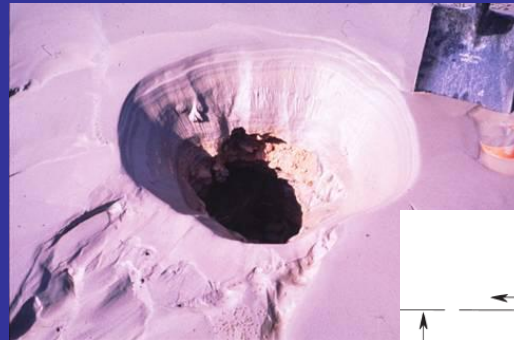
Landers EQ, Emerson fault, CA 1992, $M=7.3$

Sekundární efekty:

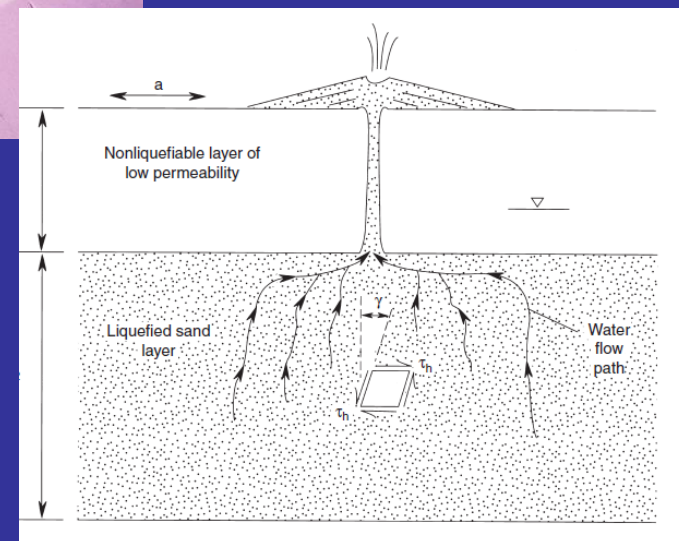
Krátkodobé

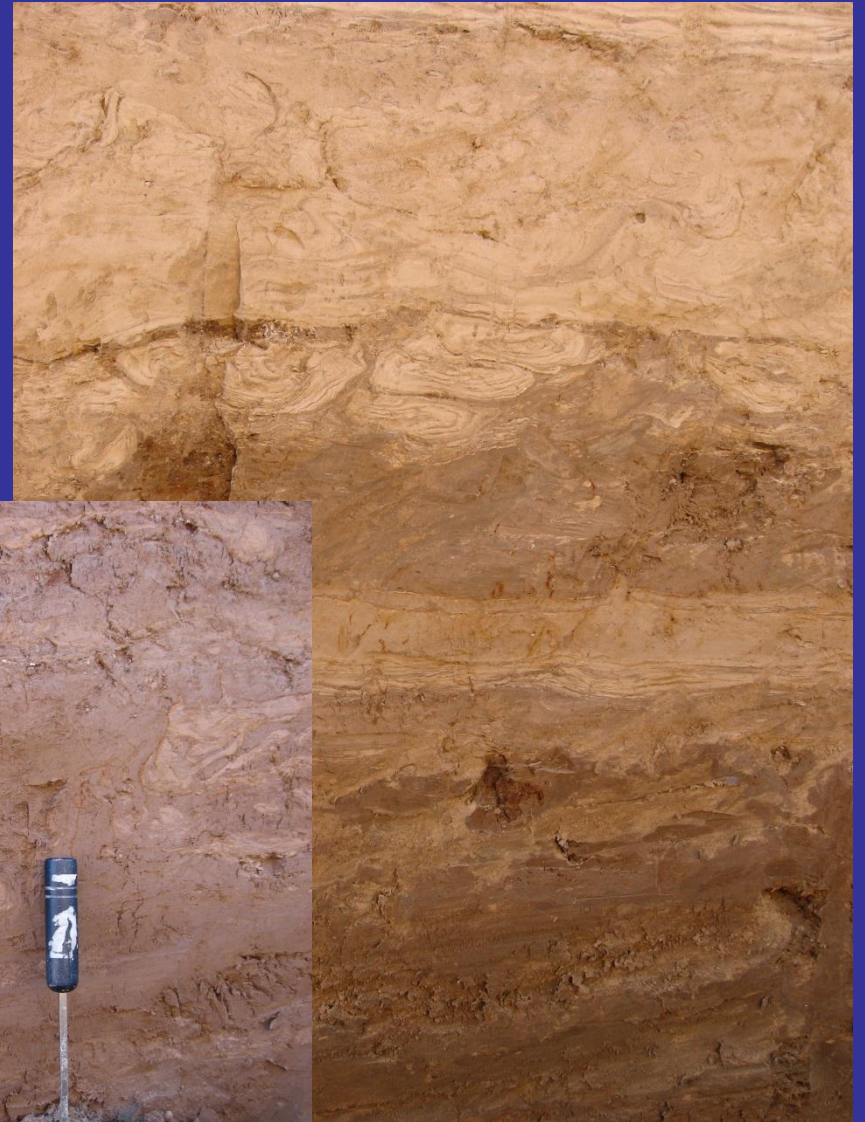
Likvefakce (ztekucení půdy) - vodou nasycený materiál se při třesení transformuje do tekutého stavu (nezpevněná půda v bláto), kompakce způsobí nárůst pórových tlaků = materiál ztrácí pevnost a teče.

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



Buildings tilted due to soil liquefaction, 1964 earthquake, Japan.





Sesuvy

Tsunami

Fires

Floods – following collapse of dams



Costarica, 2009, Mw=6.2,
180 landslides

Long-term

Regional subsidence

Change in groundwater level

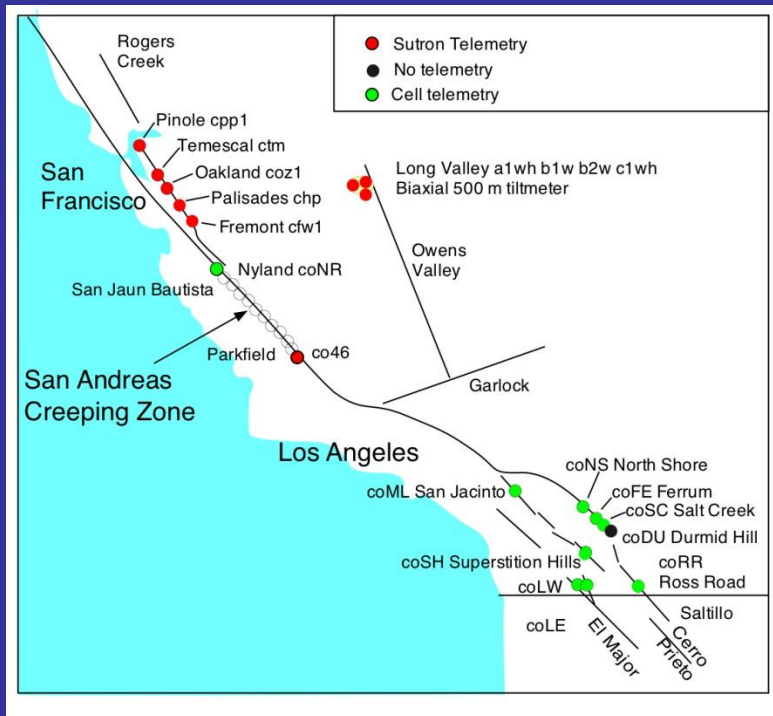


Tectonic creep – aseismic movements

Displacement along a fault zone **accompanied by minimal earthquakes, more or less continuous, narrow zone**

Geodetically detectable (GPS, SLR, etc....)

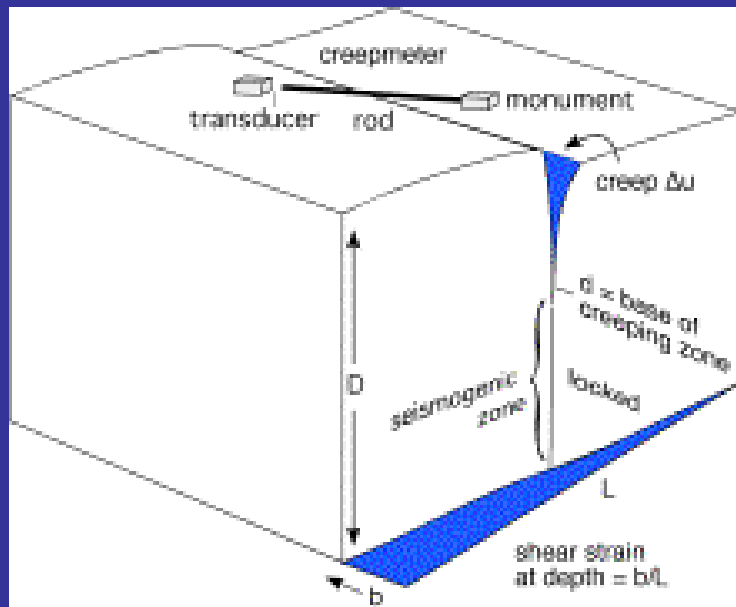
Less damage from creep – generally along narrow fault zones subject to slow, not much studied in – no seismic hazard



Hayward fault – SAF zone, San Francisco Bay area



Creep rate measured by creepmeter installed across the fault – typically 5 mm/year, max in Fremont 7.8-8.5 mm/year



Between 5 and 12 km in depth is believed to slip entirely in earthquakes, but the surface and deepest part of the fault also slips by a process of aseismic creep.

Creep since 1896 large EQ, the creep partially releases the strain energy on the fault

High rate: slow damage of roads, sidewalks, building etc.

Berkeley – Memorial stadium



3.2 cm in 11 years,
periodic repairs needed





Berkeley, offset sidewalk



Contra Costa, deformed road



Hayward, offset fence

Higher creep rate:

Calaveras fault (SAF zone)

Creep rate – varies

1910-1929 no creep, based on offset in two sidewalks constructed in 1910 and 1929, and pipeline laid in 1929

1929- creep commenced, with 8 mm/yr (average)

1961 - 1967, slip rate about 15 mm/yr

1979....2 sites monitored in Hollister with 6.6 mm/yr and 12 mm/yr (2.3km NW)



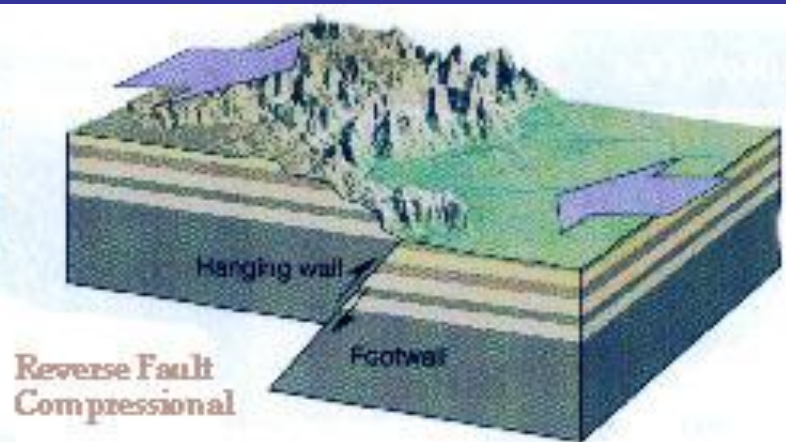
Hollister, twisted house

20,000 earthquakes a year - **small**, strain not accumulated and released by slow creep – not able to produce a large EQ



Zlomy

3 typy zlomů v různém napět'ovém režimu: poklesy, přesmyky (násuny), horizontální posuny; vznik reliéfu kumulovanými zemětřeseními nebo creepem



[video!](#)



normal fault



strike-slip



thrust fault



reverse fault

2. Tectonic geomorphology, role of tectonics in relief formation

Landforms – surficial features which make up the landscape

All scales – mountains, alluvial fans, hills, canyons, slopes etc.

Geomorphology – study of nature, origin, and evolution of landscape

A) **Geological factors** – important, landform development is related to underlying structure of the Earth

Structure – includes rock and soil type, nature and abundance of fractures, faults, folds

B) **Geomorphic processes** - weathering (physical, chemical), fluvial erosion/deposition, glacial, eolian (wind), mass wasting (slope failure), tectonic, and volcanic

C) **Natural variables** - geology, climate, vegetation, base-level, human interference - influence the type and rate of the processes

Process-response models

- qualitative and quantitative representations how processes influence landform development

- e.g. alluvial fans – result from tectonic, fluvial processes or/and changes in climate conditions (various causes)

We should understand all the processes to be able to distinguish between them (Spain vs Bohemian massif – fluvial terraces, alluvial fans)

Tectonic geomorphology – study of landforms produced by tectonic processes; study how tectonics controls erosion, deposition, landforms; from morphology we can infer fault kinematics

Geomorphology – valuable tool in active tectonic studies because the young tectonic processes are reflected in morphology and Quaternary deposits present on a site

e.g. study of stream channels and related deposits offset by faulting – may reveal amount of displacement, timing of the last few earthquakes at the site – critical for seismic hazard evaluation

Uplift

Different theories on interaction between tectonics and landscape developed

Not only pure uplift - combination of vertical + horizontal movements so there are not black-and-white definitions

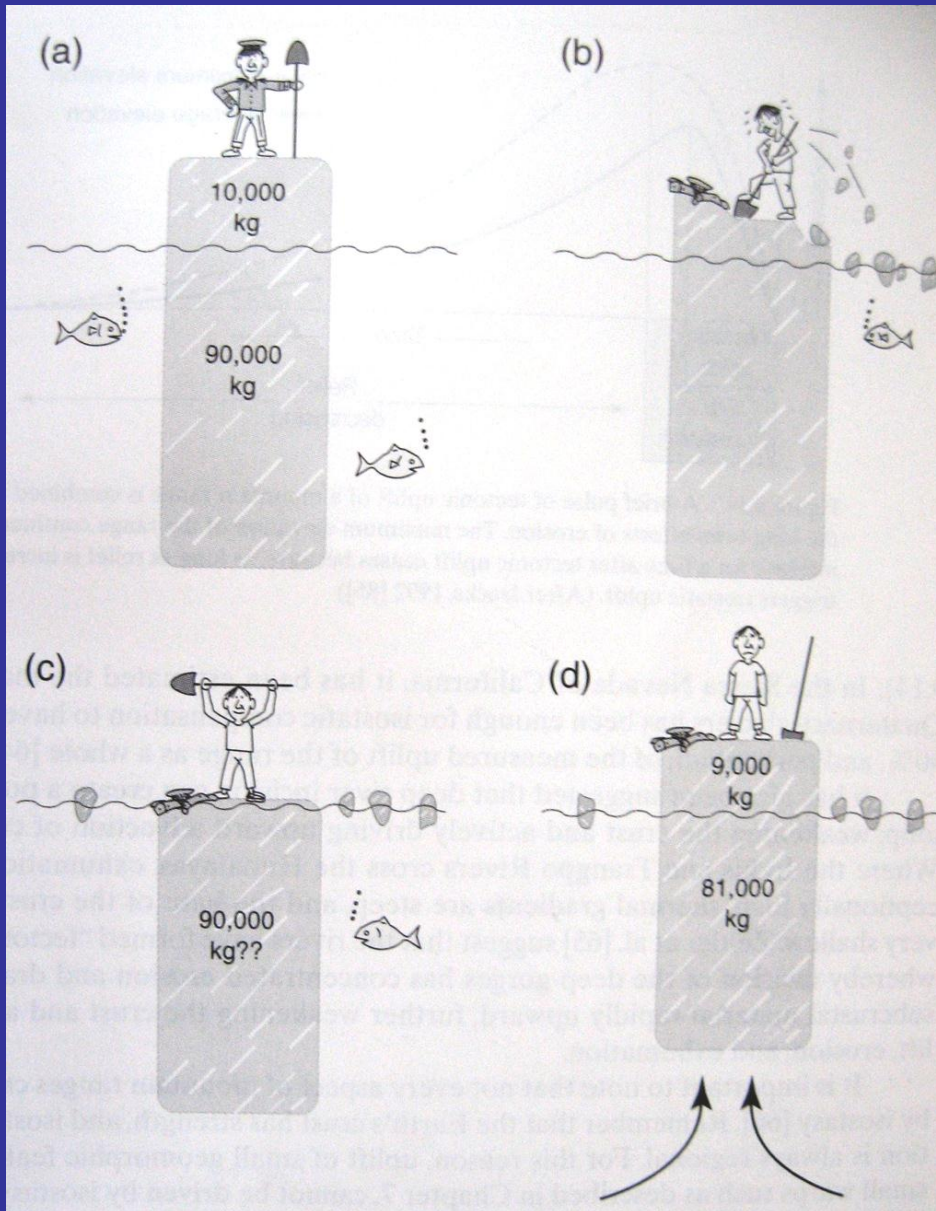
Vertical movements produce the large landforms on the Earth surface – uplift

Bedrock uplift – influenced by both tectonic and geomorphic processes

- geomorphic processes: erosion, denudation, deposition, weathering

Uplift – isostatic uplift + tectonic uplift = bedrock uplift

Isostatic uplift



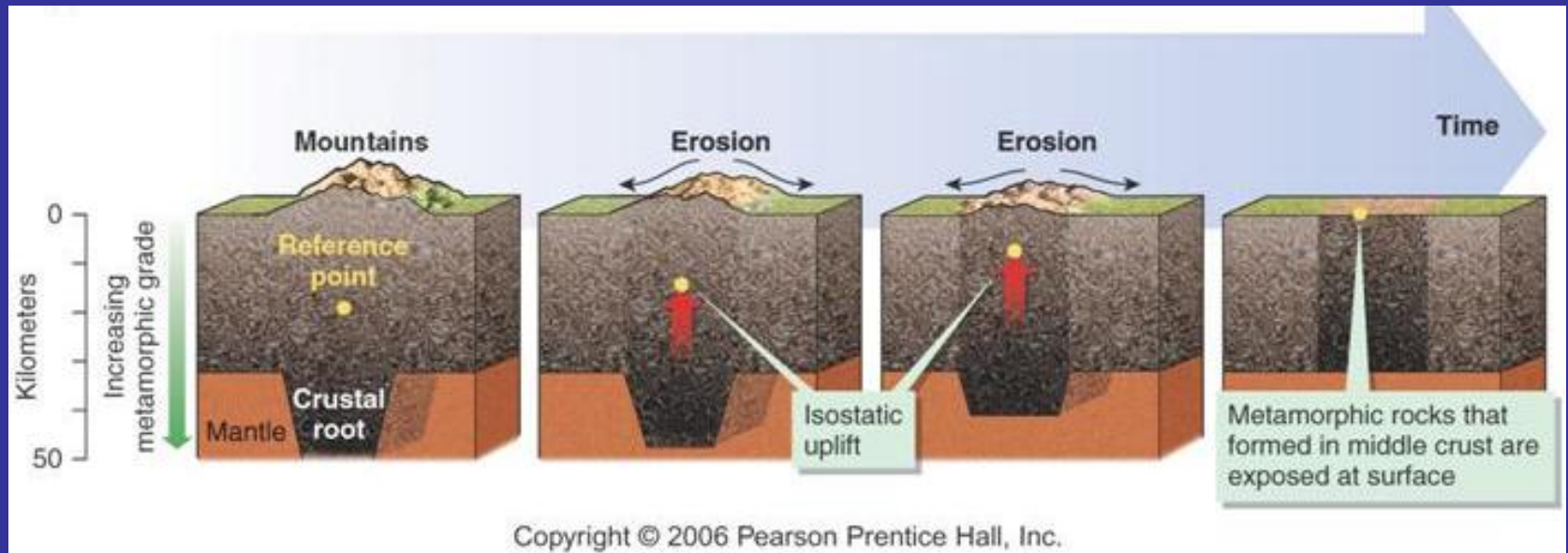
Rainfall can never melt enough ice to lower the surface of an iceberg to the water line. This is because ice melted above the waterline is largely replaced by “uplift” of submerged ice.

Isostatic uplift – ice has 90% of density of seawater

If 10 tons is melted from the exposed surface of an iceberg, it is compensated by 9 tons of ice raised by isostatic uplift – **isostatic rebound**

= pure uplift (no shear, no tensional failure of ice)

Isostasy in mountains



Continental crust (density of about $2,700 \text{ kg/m}^3$) „floats“ on mantle with a density of about $3,300 \text{ kg/m}^3$ – a density contrast of roughly 82% (90% contrast for oceanic crust with a density of $3,000 \text{ kg/m}^3$) – analogy with ice

Fluvial and glacial denudation of 1,000 m only seems to significantly lower a mountain range because it is largely compensated by 820 m of concurrent isostatic rebound.

[Video!](#)

Fluvial and glacial erosion – isostatic uplift caused mainly in valley floors (video)

Mass removal (denudation) – pure isostatic uplift in all parts of the landscape

Larger **space and** longer **time** - for pure uplift, tectonic denudation, or burial

Smaller forms and shorter time - for tectonic displacements and geomorphic processes

Tectonic uplift

- driven by tectonic processes, mountain-building processes – convergent plate boundaries

Tectonic mountain-building forces may stop but the resulting isostatic adjustments will continue as long as streams transfer mass from mountains to sea.

Bedrock uplift = Tectonic uplift + Isostatic uplift

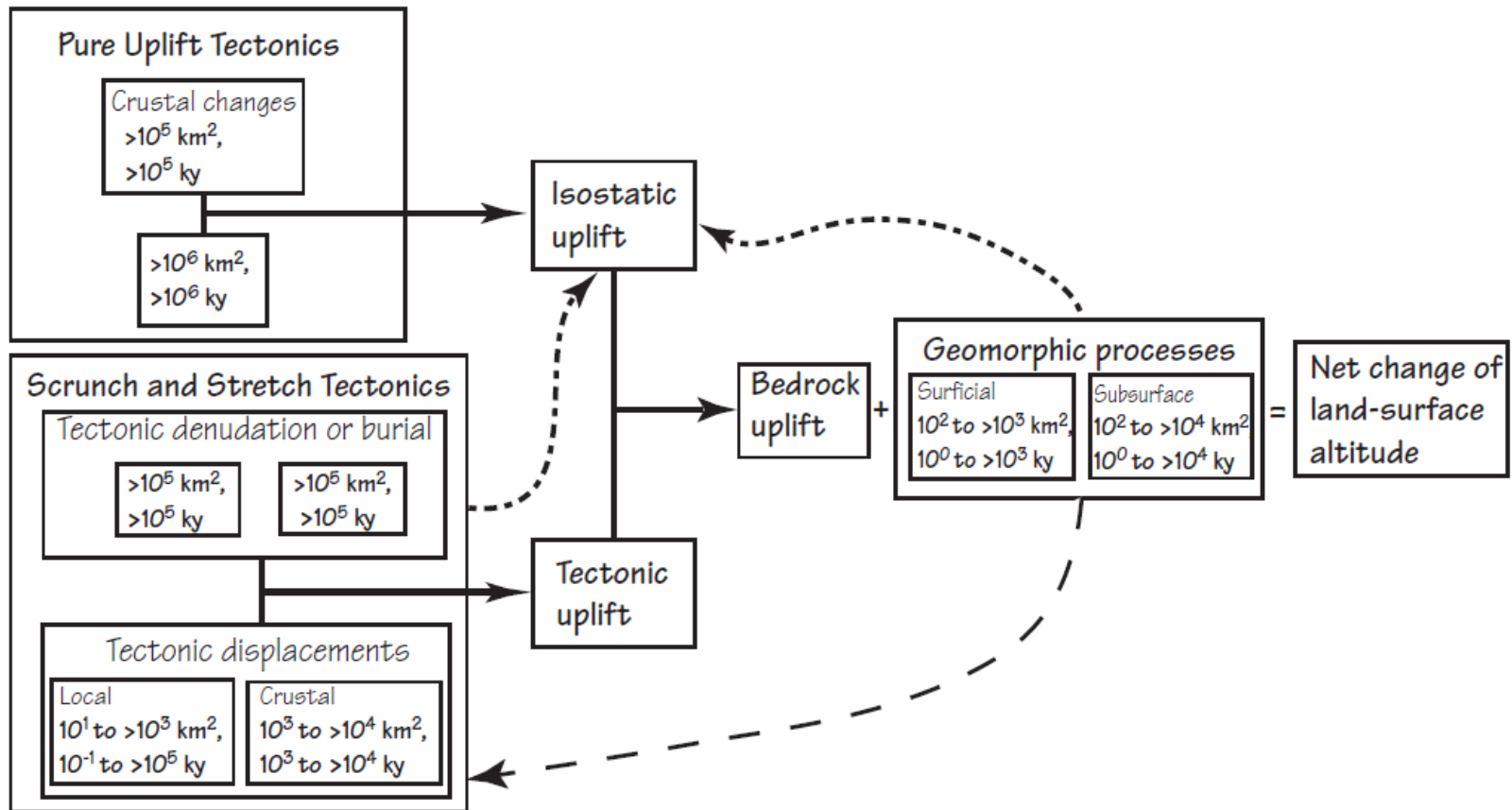


Figure 1.4 Links between tectonic, isostatic, and nontectonic variables affecting landscape altitudes and bedrock uplift. Feedback mechanisms to isostatic and tectonic uplift are shown with dashed lines.

Tectonic geomorphology of mountains, Bull 2007

Tectonic uplift – induces higher erosion,
Higher altitude – different processes, different climate - influence isostatical uplift

Surface uplift = change of altitude influence geomorphological processes

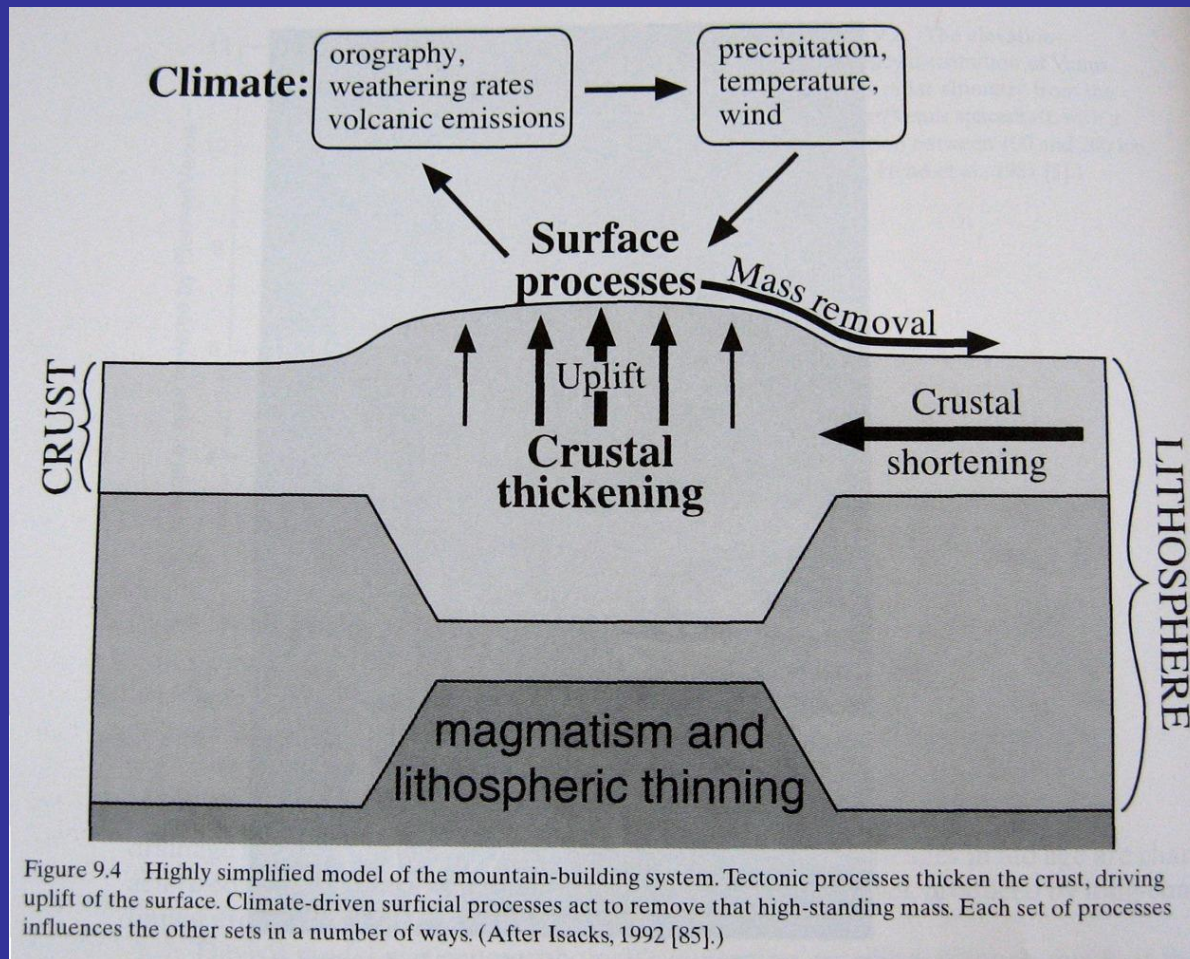


Figure 9.4 Highly simplified model of the mountain-building system. Tectonic processes thicken the crust, driving uplift of the surface. Climate-driven surficial processes act to remove that high-standing mass. Each set of processes influences the other sets in a number of ways. (After Isacks, 1992 [85].)

Climatic changes are dominant because they quickly affect geomorphic processes throughout a drainage basin – precipitation, discharge

X uplift on a fault zone is local and the resulting increase in relief progresses upstream relatively slowly

Tectonic uplift induced incision



The surface rupture of the 1999 Ch-Chi formed a waterfall (8 m high). River erosion tries to erase this step (several m retreat)