

SEISMOLOGIE A SEISMOTEKTONIKA

Osnova předmětu

Osnova 2023:

1. Předmět studia a historické perspektivy

1.1. Hlavní cíle a zdroje dat

1.2. Vnímání zemětřesení v historické perspektivě

2. Fyzika zemětřesení

2.1. Napětí a křehké porušení

2.2. Dynamika zlomů a zemětřesení

2.3. Seismický cyklus

2.4. Problémy predikce zemětřesení

3. Seismická vlna

3.1. Seismický signál jako vlnová funkce

3.2. Vliv prostředí na seismickou vlnu

3.3. Rychlost seismických vln

4. Seismický paprsek

- 4.1. Geometrie seismického paprsku
- 4.2. Seismický paprsek ve vrstevnatém prostředí
- 4.3. Nomenklatura objemových seismických fází a jejich hodochrony

5. Seismické zdroje a jejich parametry

- 5.1. Klasifikace seismických zdrojů
- 5.2. Poloha hypocentra
- 5.3. Velikost zemětřesení
- 5.4. Zdrojové mechanismy

6. Registrace seismického záznamu

- 6.1. Princip setrvačného seismometru
- 6.2. Digitalizace a filtrace dat
- 6.3. Stručná historie seismického monitorování

7. Neinstrumentální data a doprovodné jevy

- 7.1. Makroseismická data
- 7.2. Doprovodné jevy (sesuvy, zkapalnění sedimentu, tsunami)
- 7.3. Historická zemětřesení
- 7.4. Paleoseismologie

8. Statistické a pravděpodobnostní zpracování dat

8.1. Magnitudo-četnostní vztahy

8.2. Distribuce zemětřesení v prostoru a čase

8.3. Seismické ohrožení

9. Seismicita deskových rozhraní

9.1. Recentní desková rozhraní

9.2. Kinematika a dynamika litosférických desek

9.3. Seismotektonika divergentních rozhraní

9.4. Seismotektonika transformních rozhraní

9.5. Seismotektonika konvergentních rozhraní

10. Vnitrodesková seismicita

10.1. Seismotektonika vnitrodeskových tektonických zón

10.2. Vulkanická zemětřesení

10.3. Indukovaná seismicita

11. Přirozená seismicita v regionu Evropy

11.1. Přirozená seismicita v regionu Středomoří

11.2. Přirozená seismicita alpinských jednotek střední Evropy

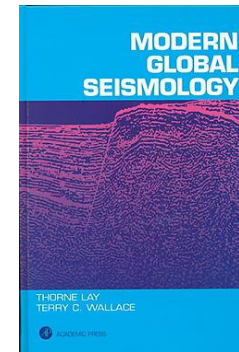
11.3. Přirozená seismicita alpického předpolí

11.4. Seismicita Skandinávie

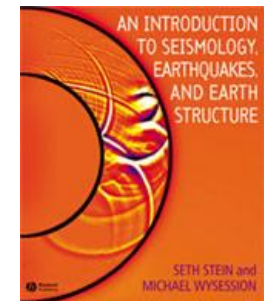
11.5. Monitorování přirozené seismické aktivity na území ČR

Doporučené publikace pro rozšíření studia:

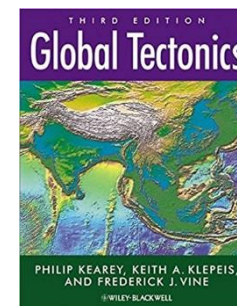
Lay, Wallace (1995): Modern Global Seismology



Stein, Wysession (2003): An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structures



Kearey, Klepeis, Vine (2009): Global Tectonics



Hodnocení – na základě závěrečného písemného testu:

20 otázek (jednoduché teoretické otázky - cílem je zjistit celkovou orientaci v problematice)

maximální počet bodů za otázku – 3 body

maximální počet bodů za test – 60 bodů

Hodnocení : 51-60 A
 46-50 B
 41-45 C
 36-40 D
 31-35 E
 0-30 F

SEISMOLOGIE A SEISMOTEKTONIKA

**část 1.: Předmět studia
a historické perspektivy**

1.1: Hlavní cíle a zdroje dat

Předmět studia seismologie:

problematika generování, šíření a záznamů elastických vln v Zemi a dalších přirozených kosmických tělesech.

Předmět studia seismotektoniky:

vztahy mezi seismickými jevy (zemětřeseními), aktivními tektonickými procesy a křehkými poruchami v určitém vymezeném regionu

Zemětřesení:

proces, při kterém jsou generovány krátkoperiodické elastické vlny

Témata seismologie:

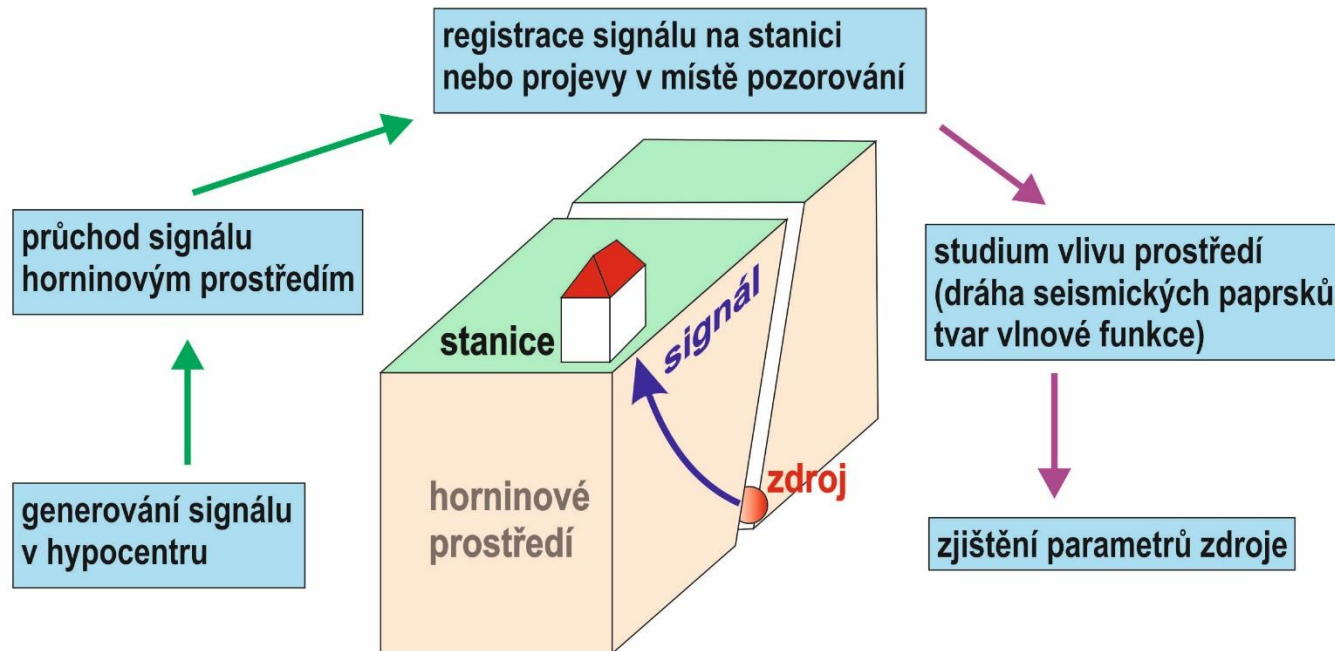
- generování elastických vln a vlastnosti zdroje elastických vln**
- šíření elastických vln horninovým prostředím**
- pozorování projevů elastických vln a jejich detekce**

Data:

- makroseismická
(makroseismická pozorování)
- instrumentální
(záznam seismometru)

Hlavní cíle vztažené ke zdroji:

- lokalizace jevu
- geometrie zdrojové oblasti
- velikost jevu
- kinematické parametry
- ...



Témata seismotektoniky:

- charakteristika seismické aktivity spjaté s jednotlivými přírodními (i jinými) procesy
- charakteristika seismické aktivity spjaté s jednotlivými regiony (např. výpočty seismického ohrožení v daném regionu)

Data:

statisticky reprezentativní soubor výsledků zpracování dat

- instrumentální seismologie
- historické seismologie
- paleoseismologie

plus data vztahující se k mechanice, strukturní geologii, geofyzice, geodézii atd.

1.2.: Vnímání zemětřesení v historické perspektivě

Zemětřesení je přírodní fenomén, který na mnoha místech světa významně zasahoval lidskou společnost.

Příklady:

Sparta 464 př. n. l. (zásadní oslabení Spartské moci)

Antiochie 13. 12. 115 n.l. (římský císař Traianus ohrožen na životě)

SPARTA

ANTIOCHIE

spartský zlom

Thúkydídés (460 - 399 př. n. l.)

Cassius Dio (155 - 235)

Marcus Ulpius Traianus (53 - 117)

Armijo et al. 1991
Papanikolaou et al. 2013 →

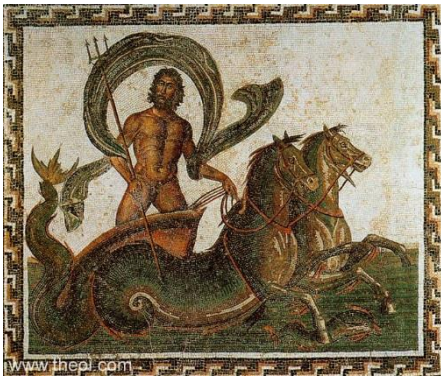
- Roman Italy at the death of Augustus
- Provinces at the death of Augustus & Trajan 14-98 A.D.
- Provinces added between Augustus & Trajan 98-116 A.D.
- Non-Roman Territory

Fenomén zemětřesení v chápání starověkého Řecka:

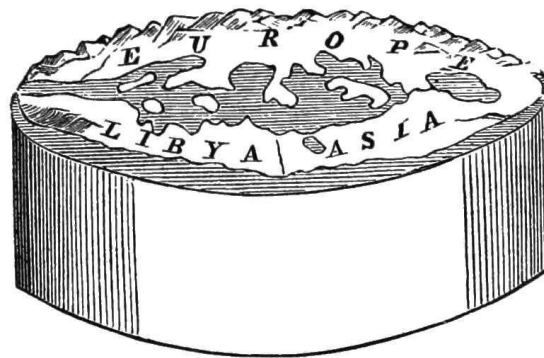
Ve starověkých textech se prolínají mytologické obrazy s racionálními popisy událostí.

Přelom 7/6. st. př.n.l. – začíná se formovat řecká filosofie (Milétská škola), z ní plyne snaha o racionální vysvětlení příčin pomocí filozofických úvah.

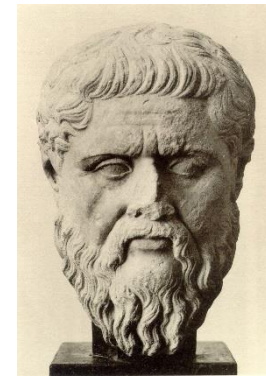
Thales z Milétu: první racionální „teorie“ zemětřesení (příčina je hledána v kolébání pevné země plovoucí na vodní mase světového oceánu).



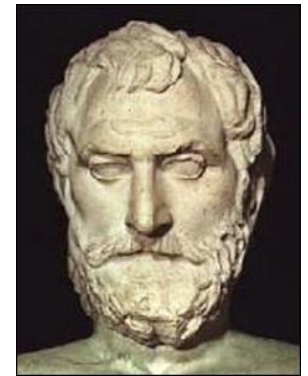
Poseidón
(mýtický původce zemětřesení)



Anaximandrův „válcovitý“
model Země



Anaximandros
z Milétu
(610 – 546 př. n. l.)



Thales z Milétu
(624 – 548 př. n. l.)

Aristotelův model vzniku zemětřesení:

Aristoteles rozebírá svou hypotézu o vzniku zemětřesení ve druhé knize díla „Meteorologicorum“.

Vznik zemětřesení má souviset s prouděním větru v dutinách země (Aristoteles rozoznává více druhů zemětřesení).

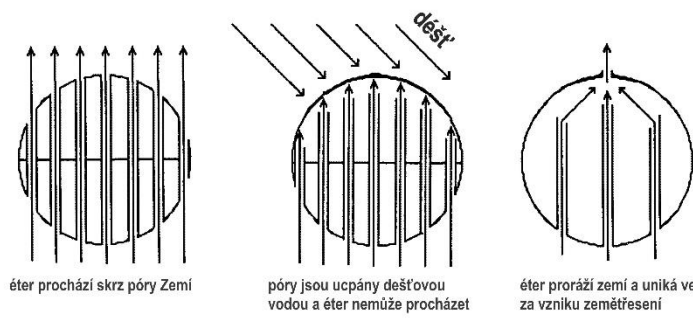
Vítr má vznikat v důsledku vypařování vlhka ze země.

ARISTOTLE

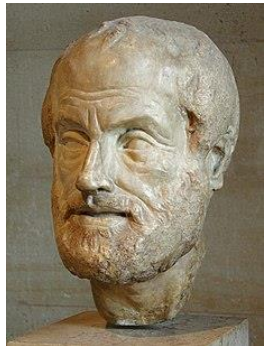
365^a ακολουθεί ως ἐπὶ τὸ πᾶσι τῆ ἀρχῆς, ὥστε ἢ ἔσω ἅμα ἢ ἔξω ἀρχαί πάντα. τὸ δ' ἐπίσης γίνεσθαι καὶ πνεύματος οὗτος οὐδὲν ἄλογον ὀρώ-
10 μεν γὰρ εἶναι ἅμα πλείους πνέοντες ἀνέμοι, ἂν ὦσαν εἰς τὴν γῆν ἀρχὴν αἰθέρος, ὅταν πνεύματος οὗτος ὁ αἰθέρος. ἔστιτος δ' οὗτος τὸ μέγεθος γίνονται διὰ τὸ διερχοῖσθαι τὴν ἀρχὴν καὶ τὴν αἰτίαν αὐτῶν. νεκρὸς δ' οἱ πλείους καὶ μέλλουσιν γίνονται τῶν σεισμῶν, οἱ δὲ τῆς ἡμέρας περὶ
15 μεσημβρίας νεμεσιάζονται γὰρ ὅταν ἂν ἐπὶ τὸ πᾶσι τῆς ἡμέρας ἢ μεσημβρίας (ὁ γὰρ ἥλιος ὅταν μέλλῃ κρητῆ καταλείπει τὴν ἀναθυμίασιν εἰς τὴν γῆν κρητῆ δὲ μέλλῃ περὶ τῆς μεσημβρίας), καὶ αἱ νότιες δὲ τῶν ἡμερῶν νεμεσιάζονται διὰ τὴν ἀποστασίαν τὴν τοῦ ἥλιου· ὅταν γίνονται πάλιν ἢ
20 βόριος, ὥστε ἀμνηστίας, εἰς ταυταντίους τῆς ἔξω πλημμυρίδος, καὶ πρὸς ὄρθρον μέλλῃσι τριμυαῖτα γὰρ καὶ τὰ πνεύματα πέφουκεν ἀρχεσθαι πνεῦ-
25 ἐν οὐ εἶναι τὴν μεταβάλλουσαν ἢ ἀρχὴ αὐτῶν ὥστερ Ἐβρώτος, διὰ τὸ πᾶσι τοῦ αἰθέρος ποιεῖ τῶν σεισμῶν.
Ἔτι δὲ περὶ τοῦτος τοιοῦτος οἱ ἰσχυρότατοι
30 γίνονται τῶν σεισμῶν, ὅταν διέλθῃ βοῖδης ἢ ἢ χώρα σιμῆ καὶ ἰσχυρῶς διὰ καὶ περὶ Ἐλλήσποντον καὶ περὶ Ἀχαΐαν καὶ Σικελίαν, καὶ τῆς Εὐρώδας περὶ τοῦτος τοῦτος δοκεῖ γὰρ διακυβάνειν ἀπὸ τὴν γῆν ἢ θάλατταν διὰ καὶ τὰ θωρατὶ καὶ περὶ Αἰθιοπίας ἀπὸ τοιαύτης αἰτίας γίνονται.
35 περὶ δὲ τοῦς εἰρημῶν τοῦτος οἱ σεισμοὶ γίνονται μέλλῃσι διὰ τὴν στενότητα· τὸ γὰρ πνεῦμα γινώμενον σφαιρόν καὶ διὰ τὸ πᾶσι τῆς θαλάττης πολλὴν προσηκόμενης ἀποθύνει πάλιν εἰς τὴν
368

ARISTOTLE

365^a γῆν, τὸ πνεύματος ἀποθύνει εἰς τῆς γῆς· αἱ τε γὰρ
365^b οὗτοι σεισμοὶ ἔχονται τοῦς κέραι τοῦτος, πάλιν δοκί-
μεται πνεῦμα οἰσίντα μέλλον.
Καὶ ἔσρος δὲ καὶ μεσημέριος μέλλῃσι καὶ ἐν ἑπομβρίας καὶ ἐν αὐχμοῖς γίνονται διὰ τὴν αἰτίαν αἰθέρος· αἱ τε γὰρ ἀρχαὶ αὐτῶν πνευματωδύνονται·
5 τὸ γὰρ ἔσρος καὶ ὁ χειμῶν, τὸ μὲν διὰ τὸν πτόνον, τὸ δὲ διὰ τὴν ἀλίαν ποιεῖ τὴν ἀκινύσιαν· τὸ μὲν γὰρ ἄγαν ὑγρόν, τὸ δ' ἄγαν ξηρόν ἔστι· καὶ ἐν μὲν τοῖς αὐχμοῖς πνευματωδύνει ὁ αἶψ· τοῦτος γὰρ αὐτὸ ἔστι ὁ αὐχμῶς, ὅταν πλείων ἢ ἀναθυμίασις ἢ ἔσρα γίνονται τῆς γῆρας· ἐν δὲ τοῖς ἑπομβρίας πλείω
10 τε ποιεῖ τὴν ἐπὶ ἀναθυμίασιν, καὶ τῶ ἀναπολυμ-
βάνουσι ἐν στενωτέροις τοῦτος καὶ ἀποθύνουσι εἰς ἐλάττω τοῦτος τὴν τοιαύτην ἀπόκρησιν, πληρου-
μένους τῶν κοιλῶν ἕσρασι, ὅταν ἀθήνη κρητῆν διὰ τὸ πᾶσι εἰς ἄλλοιον πλεθροῦσι τοῦτος, ἰσχυρῶς
15 κινεῖ βίωσι ὁ ἀνεμος καὶ προσπίπτων· δεῖ γὰρ νοεῖν ὅτι ὥστερ ἐν τῶ σώματι ἡμῶν καὶ τρέμων καὶ σφηνῶν αἰτίων ὅταν ἢ τοῦ πνεύματος διαπολυμ-
βανώμεν δύνασις, οὕτω καὶ ἐν τῆ γῆ τὸ πνεῦμα παραπλήσιον ποιεῖν, καὶ τὸν μὲν τῶν σεισμῶν αἰών τρέμων εἶναι τὸν δ' αἰών σφηνῶν, καὶ καθάπερ
20 συμβαίνει πολλοῖς μετὰ τὴν οὐρανῶν (διὰ τοῦ αἰσματος γὰρ γίνονται ὅσπερ τρέμων τις ἀνεπι-
στατόμενος τοῦ πνεύματος ἔξωθεν εἴσω ἀθύρου), τοιαῦτα [γὰρ] γίνονται καὶ περὶ τὴν γῆν. ὅσην δ' ἔχει τὸ πνεῦμα δύνασις, οὐ μόνον ἔκωτων ἐν τῶ αἵμα· δεῖ θεοῦσι γινώμενων ἀναστῆναι μὲν γὰρ διὰ τὸ μέγεθος ὑπολῆθαι τις ἐν τοιαύτη δύνασιν
25 ποιεῖν] ἀλλά καὶ ἐν τοῖς σῶμασι τοῦς τῶν ζώων· οἱ τε γὰρ τέτανοι καὶ οἱ στασιμῶν πνεύματος μὲν
308



Aristotelova interpretace Anaxagorova modelu (dle Oesera et al. 1992)



Aristoteles ze Stageiry (384 – 322 př. n. l.)

Senecovo pojednání o zemětřesení:

Problematicke zemětřesení se věnuje ve svém díle „Naturales quaestiones“ z roku 65 Seneca (v 6. knize „De Terra Motu“), kde popisuje silné zemětřesení v Pompejích (5. 2. 62 nebo 63) a rozebírá úvahy o příčinách.

Bez citace uvádí jako jednu z příčin zemětřesení expanzi podzemního ohně (a s ním souvisejících exhalací) do svého okolí (spojení zemětřesení a vulkanických procesů).



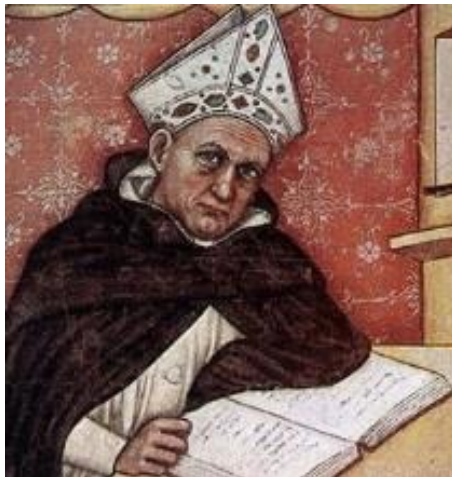
Lucius Annaeus
Seneca
(4 př. n. l. – 65 n. l.)

Pompeje – doklady oprav po zemětřesení z roku 62 n. l. (Pizzorusso 2012)

Rozvoj Aristotelových myšlenek o zemětřesení ve středověké scholastice a v renesanci:

Scholastičtí a renesanční učenci přebírají Aristotelovu představu o vzniku zemětřesení, zpočátku ji jen mírně doplňují.

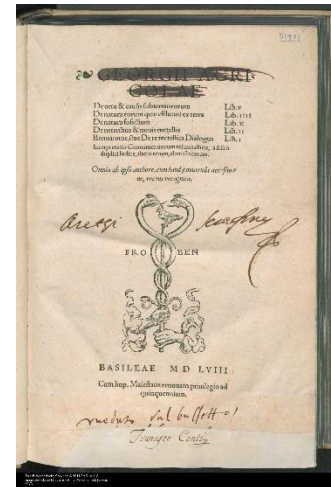
Je rozvíjena nauka o vnitřním teple (pod vlivem pseudoaristotelových spisů) - zemětřesení je jako přírodní jev spojováno s vulkanismem.



Albert Veliký
(1193-1206/1207)



„Meteororum“
Jammyho tisk z r. 1651



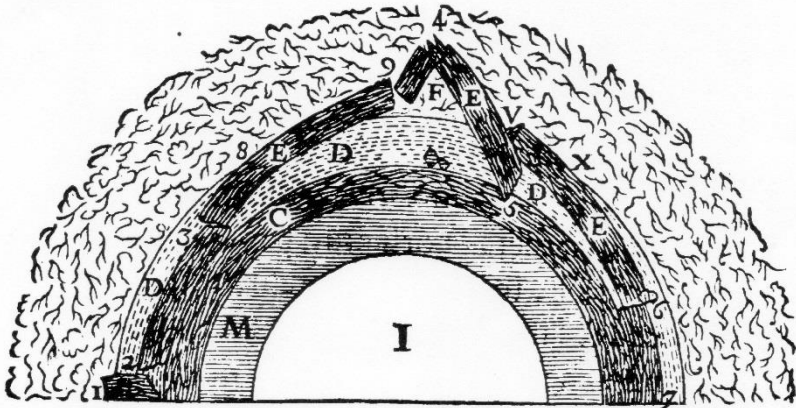
„De ortu et causis
subterraneorum“ (1544)



Georgius Agricola
(1494-1555)

Descartův a Kircherův model Země:

Aristotelovu a Agricolovu myšlenku vnitřního tepla rozvíjí v renesanci zejména Descartes a Kircher.



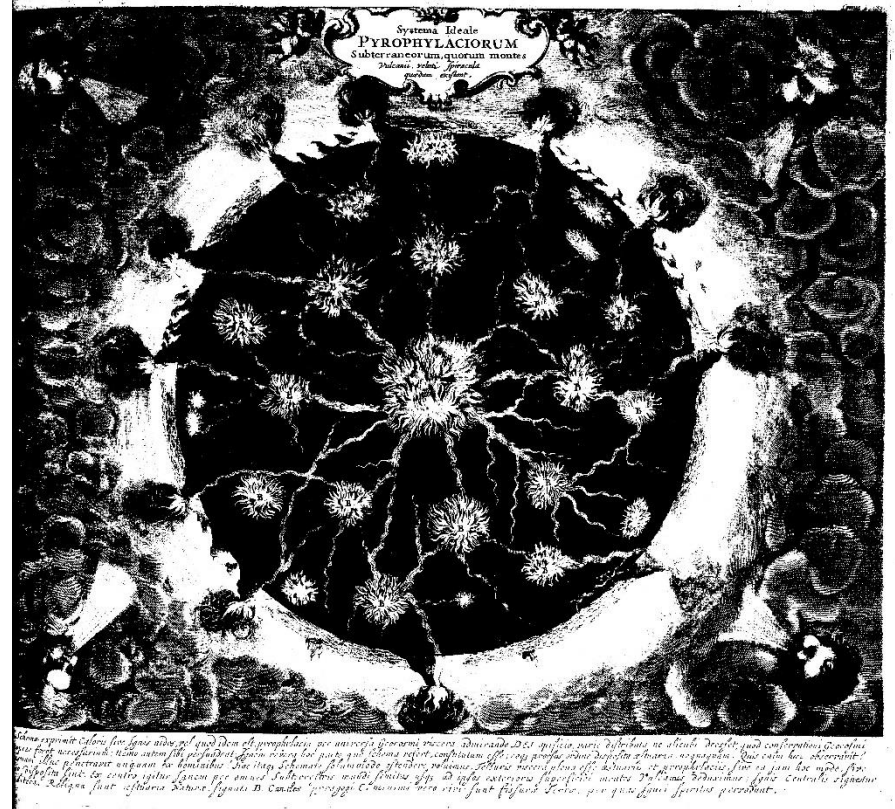
Descartův sférický model Země se žhavým jádrem („Principia Philosophiae“, 1644)



René Descartes (1596-1650)



Athanasius Kircher (1602-1680)



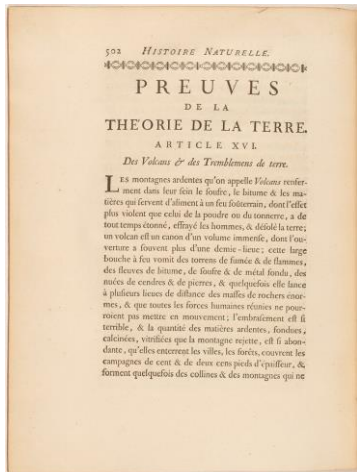
Kircherův model s propojenými „vulkanickými krby“ („Mundus subterraneus“, 1664)

Vulkány a zemětřesení:

Zemětřesení jsou pokládány za jevy spojené s plyny unikajícími skrz horninové prostředí v rámci vulkanických procesů, např. Leibniz (1694).

Modely vzniku zemětřesení jsou doplněny také o myšlenku chemické exploze - experimentálně ji demonstroval Lémery v roce 1700, více ji zpopularizoval Immanuel Kant (1756).

Ale již Buffon (1749) upozorňuje, že existují také zemětřesení jiného typu.



Georges Louis Leclerc de Buffon (1707-1788)



Nicolas Lémery (1645-1715)



Lémeryho „vulkán“ (1700)

Otřesy bez vulkánů:

Pozorování slabých lokálních zemětřesení v místech, kde nebyly žádné doklady aktivity související s vulkanismem (viz Londýn 1750; Comrie 1841-1844), obracely pozornost k „jiným“ možným příčinám otřesů.



Vystrašení obyvatelé opouští Londýn po otřesech (1750).



Síť stanic u skotského Comrie (1841) – první přístrojové monitorování lokální seismické aktivity.

Lisabonské zemětřesení 1755:

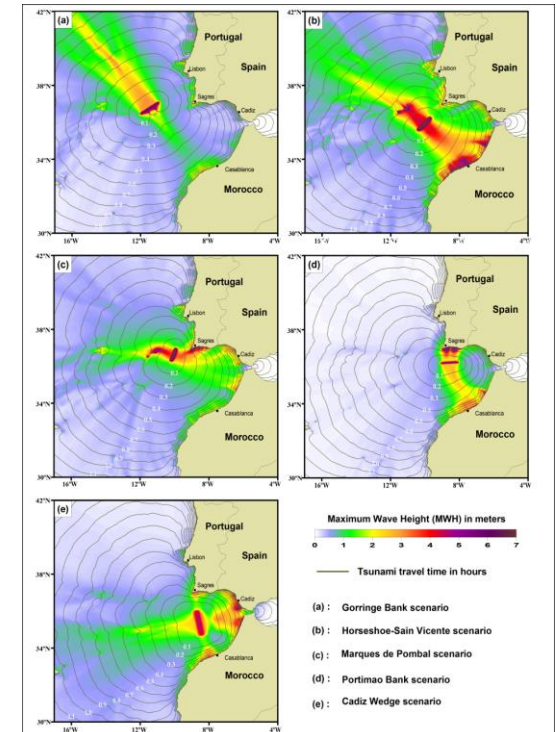
Zemětřesení o magnitudu 8.5 až 9.0 zničilo 1. 11. 1755 Lisabon (asi 50.000 obětí na životech). Zemětřesení bylo doprovázeno vlnou tsunami o výšce až 15 metrů.

Událost ovlivnila řadu oblastí (filosofii, stavitelství – a také zrod seismologie).



Zkáza Lisabonu v důsledku zemětřesení (1755).

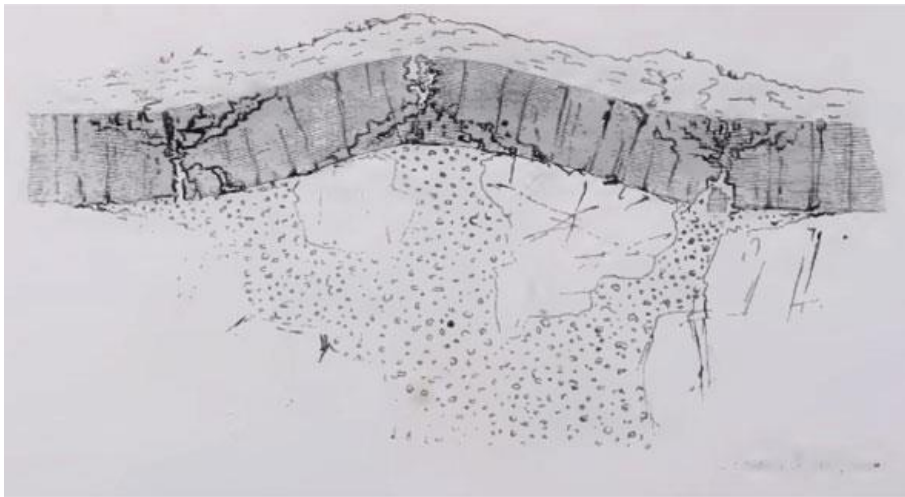
Modely šíření vlny tsunami (1755) podle Omira et al. 2012



Objev seismických vln:

V návaznosti na Lisabonské zemětřesení publikuje v roce 1761 reverend John Michell v *Philosophical Transactions* zásadní práci, ve které dokládá šíření projevů zemětřesení v podobě vln od zdroje na velkou vzdálenost.

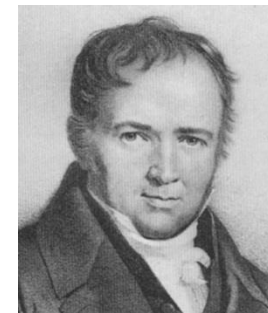
Poisson (1831) matematicky dokládá, že v neohraničeném elastickém prostředí se šíří pouze dva typy vln: rychlejší podélné a pomalejší příčné.



Malletova představa (Mallet 1848) křehkého porušení hornin v důsledku šíření seismické vlny.



John Michell
(1724-1793)

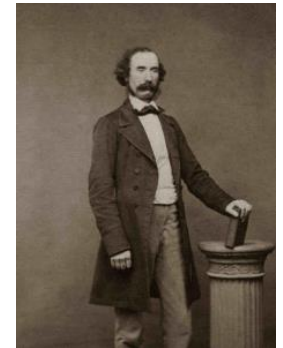
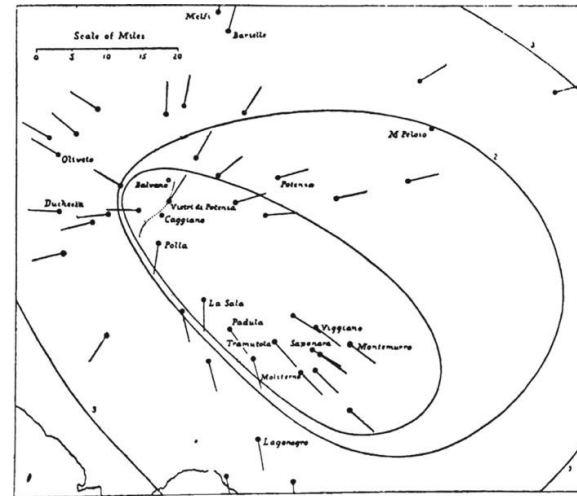
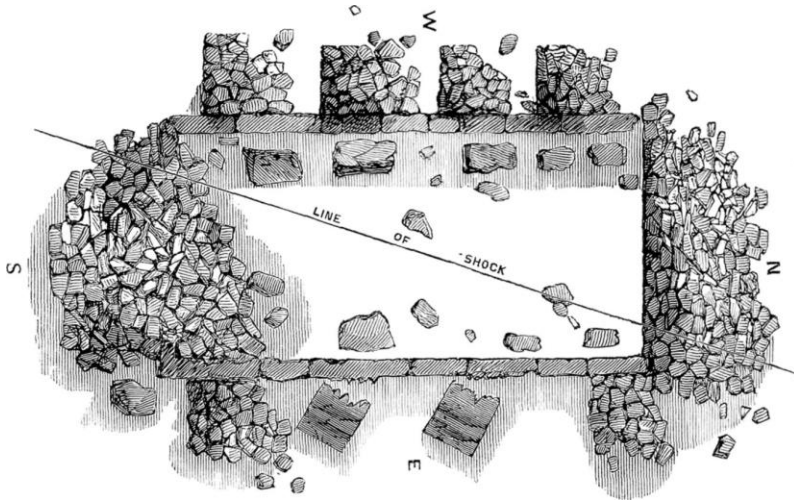


Siméon Denis Poisson
(1781-1840)

Od směru ke zdroji:

První přístrojová měření (Milne, síť u skotského Comrie) i makroseismická pozorování (Mallet, sledování směru řízení staveb) ukazují směr šíření vln.

Směr lze popsat seismickým paprskem – paprsky směřují k bodovému zdroji (**epicentrum** – poprvé tento pojem použil Schmidt 1874)



Robert Mallet
(1810-1881)

Malletovo schéma (Mallet 1846) určení směru šíření seismické vlny podle směru pádu staveb.

Detail Malletovy mapy intenzity a směru šíření vln pro jihoitalské zemětřesení 1857.

Vztah mezi řícením částí staveb a směrem šíření signálu může být mnohem komplikovanější – přesto Malletovy studie ukázaly dobrou využitelnost tohoto fenoménu pro určení směru šíření signálu.



Sloupy zřícené po zemětřesení v roce 749 (Hippos, Izrael).



Test účinku zemětřesení ($a = 1.9 \text{ g}$) na sloupořadí (Nikolić et al. 2019).

Posuny na zlomech jako příčina zemětřesení:

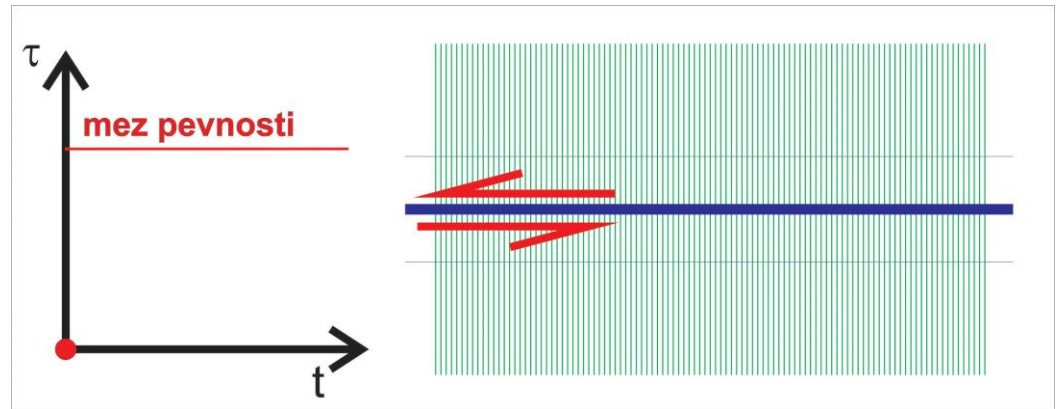
O důležitosti zlomů porušujících horniny se sice už vědělo (Nicolas Steno „Prodromus“ 1699), ale předpokládalo se, že zlomy jsou vytvářeny zemětřesením.

Teprve v roce 1884 ukazuje Grove Karl Gilbert, že vztah je opačný (zemětřesení vznikají v důsledku náhlého pohybu na zlomu).

A teprve po zemětřesení v San Franciscu (18. 4. 1906) tuto myšlenku nově dokázal a prosadil Harry Fielding Reid (1911).



Posunutý plot po zemětřesení (1906).



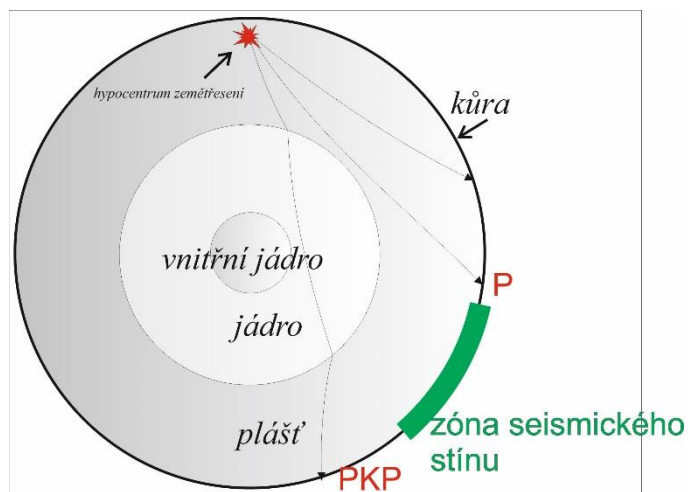
Reidův princip vzniku zemětřesení.

Seismické vlny jako okno do nitra Země:

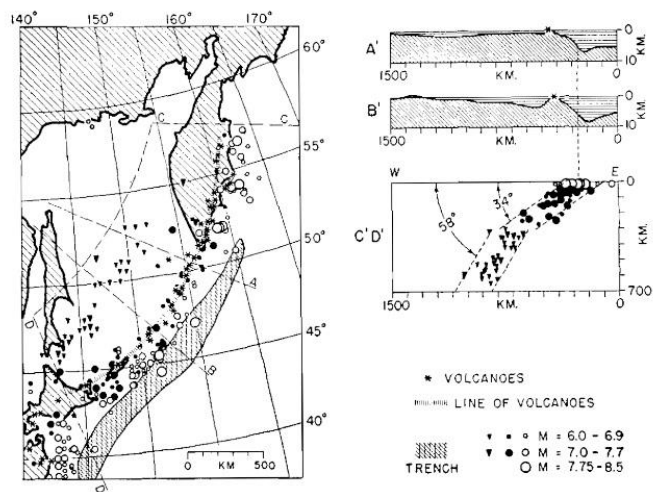
Na přelomu 19. a 20. století jsou budováni první celosvětové (globální) sítě seismických stanic. Z jejich dat jsou zjišťovány křivky závislosti mezi vzdáleností epicentra a dobou šíření seismické vlny (tzv. hodochrony).

Na základě hodochron je pak zjišťována vnitřní stavba Země (1909-1932).

Rozložení hypocenter pomáhá poznat charakter okrajů litosférických desek.



Radiální model Země odvozený z hodochron seismických vln.

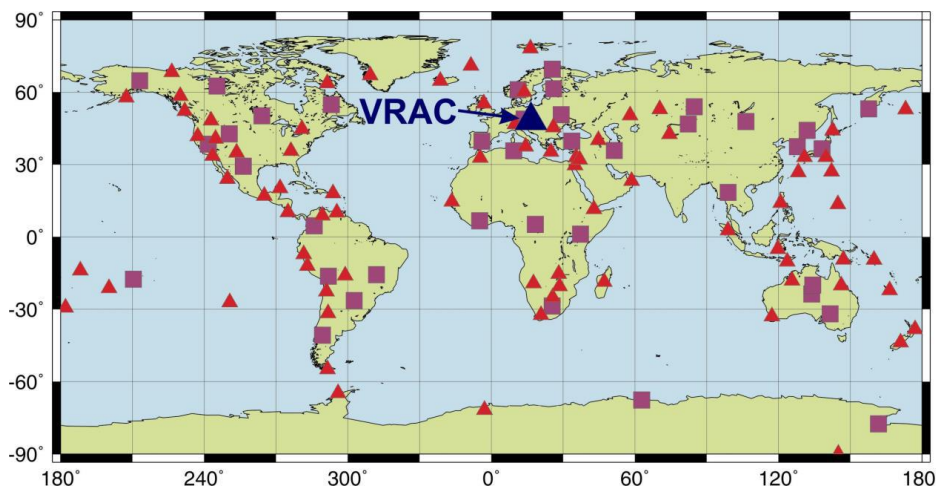


Rozložení hypocenter na subdukční zóně (podle Benioffa 1954).

Seismologie a politika:

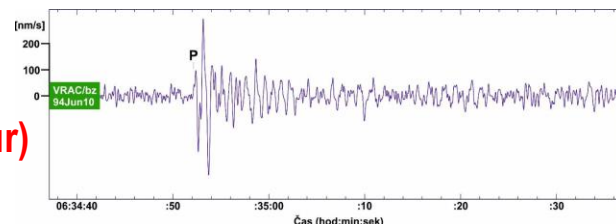
10. 9. 1996 byla v OSN předložena Smlouva o úplném zákazu jaderných zkoušek (CTBT – Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty). Jako klíčová metoda kontroly dodržování Smlouvy bylo vybráno seismické monitorování.

Globální politický zájem umožnil vybudování a dlouhodobý provoz rozsáhlé celosvětové seismické sítě – vývoj nových technologií, unikátní data o celosvětové seismicitě, možnost dalšího využití (varovné systémy apod.).

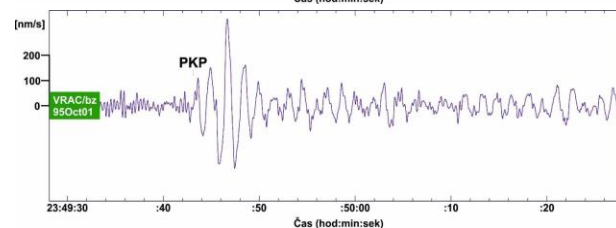


Globální seismická síť CTBTO.

Čína (Lop Nur)
10. 6. 1994



Tuamotu
1. 10. 1995



Záznamy jaderných explozí pořízené stanicí VRAC u Brna.