

8. SEISMOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY ZEMĚ

- seismologie („seismos“ = otřes) – studium průchodu elastických (seismických) vln zemským tělesem
- užitá seismika

8.1 Základy teorie elastických vln

- způsob šíření – závisí na vlastnostech prostředí

8.1.1 Elastické vlastnosti prostředí

- vnější síla působící na určitou plochu na ni vytváří napětí → deformace horniny
- přímá úměrnost mezi napětím a deformací – **ideálně pružné těleso** (obnovuje svůj tvar hned po skončení působení vnější síly)
- **tělesa plastická** nebo **absolutně nepružná** – obnovují svůj tvar postupně nebo vůbec ne

8.1.2 Elastické vlny v homogenním prostředí

- elastické vlnění vzniklé při zemětřesení nebo odpalu nálože – **seismické vlny**
- fyzikálně neohraničené prostředí – **vlny objemové**:

a) **vlny podélné** (logitudinální, P-vlny)

b) **vlny příčné** (transverzální, S-vlny)

- příčné vertikální (SV)
- příčné horizontální (SH)

Obr. 7.1/124

- rychlost šíření vln závisí na elastických parametrech prostředí a jeho hustotě
- $V_S = 0,5-0,6 V_P$
- příčné vlny se šíří pouze pevnými látkami
- seismická vlna má tvar krátkodobého impulsu o trvání δt → v čase $t \gg \delta t$ budou kmitat jen body, jejichž vzdálenost od zdroje r vyhovuje podmínce

$$Vt \geq r \geq V(t - \delta t),$$

kde $r_f = Vt$ je čelo vlny a $r_t = V(t - \delta t)$ je týl vlny

- hodochrona – časová závislost příchodu seismické vlny na vzdálenosti od zdroje
- zápis vlny – první nasazení vlny t_0 , perioda T , převládající frekvence $f = 1/T$

Obr. 7.2a/125

- profil vlny – amplituda vlny, vlnová délka

Obr. 7.2b/125

- principy uplatňující se při šíření seismických vln prostředím:

a) Huyghensův – každý bod čela vlny lze považovat za nový zdroj vlnění

b) Fermatův – seismické vlny se šíří po dráze odpovídající minimálnímu času průchodu (tj. dráha nemusí být geometricky nejkratší)

c) superpozice – seismické vlny se šíří prostředím nezávisle na sobě (neovlivňují se)

8.1.3 Elastické vlny ve vrstevnatém prostředí

- dva poloprostory s homogenním a ideálně elastickým prostředím, oddělené rovinným rozhraním – **vlny hraniční**
 - pokud je jedno prostředí vzduch, vznikají **vlny povrchové**
- a) Rayleighova vlna
 - b) Loveho vlna

Obr. 7.4/126

- na rozhraní, oddělujícím dvě vrstvy lišící se rychlostmi a hustotami, nastává
- a) **odraz** seismické vlny – mají-li prostředí odlišné vlnové odpory (součin hustoty a rychlosti seismických vln v prostředí) – podle Snellova zákona
 - b) **přeměna** seismické vlny – P a SV; SH přeměnou nevznikají ani se nepřeměňují
 - c) **lom** seismické vlny – větší část seismické energie se neodráží, ale proniká do podloží
- pokud prostředí nemá vrstevnatou stavbu a rychlost šíření seismických vln roste spojitě, dochází ke spojitému zakřívování seismického paprsku – **vlna refragovaná**

Obr. 7.6/128

8.1.4 Rychlosti šíření seismických vln a jejich energie

- v reálném prostředí závisí na:
- a) mineralogickém složení hornin (teplota)
 - b) porozitě a výplni pórů, narušení hornin (nižší rychlost při větším narušení)
- s rostoucí vzdáleností od zdroje vlnění ubývá seismické energie:
- a) sférické rozšiřování čela vlny
 - b) odraz a přeměna vln na jednotlivých rozhraních
 - c) při nedokonalé pružnosti změna části energie seismické vlny na tepelnou (absorpce)

8.2 SEISMICKÝ MODEL VNITŘNÍ STAVBY ZEMĚ

- z hodochron P a S vln se stanoví rychlost, jakou se šíří v jednotlivých částech zemského tělesa

Obr. 7.7/130

- **Bullenův model stavby země:**

- a) **zemská kůra (A)** – oddělena **Mohorovičičovou diskontinuitou** (vzestup rychlosti vln o $0,5-1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) od
- b) **zemský plášť (B-D)** – oddělen **Gutenbergovou diskontinuitou** (náhlé snížení rychlosti P vln, vymizení S vln) od
- c) **zemské jádro (E-G)**

Obr. 7.8/131

Tab. 7.2/130

8.3 ZEMĚTŘESENÍ

- účinkem různých faktorů v zemské kůře a ve svrchním plášti (konvekční proudy, izostatické síly, gravitace aj.) dochází ke vzniku dlouhotrvajících **napět'ových stavů**, které mohou vést k překonání mezí pevnosti horninového materiálu (nejčastěji ve smyku) → náhlé uvolnění mechanické energie → zemětřesení

- **zemětřesení** – soubor krátkodobých pohybů, reprezentující proces při změně napěťového stavu horniny

8.3.1 Základní pojmy

- **ohnisko** zemětřesení – prostor konečných rozměrů, kde vzniká zemětřesení
- **hypocentrum** – těžiště ohniska
- **epicentrum** – kolmý průmět hypocentra na zemský povrch
- **hloubka ohniska** – vzdálenost mezi hypocentrem a epicentrem
- **epicentrální vzdálenost** – vzdálenost epicentra od místa pozorování
- **hypocentrální čas, epicentrální čas, pleistoseistní oblast**
- **intenzita zemětřesení** – charakterizuje velikost zemětřesení podle makroseismických účinků
- **kontinentální a podmořská zemětřesení**
- **tsunami** (dlouhé či velké vlny v přístavu) – délka 150-300 km, výška na volném moři do 1 m, max. rychlost do 1000 km.h⁻¹: podmořské zemětřesení, sopečná činnost, sesuvy, řízení břehů, skluzu sedimentů
- **zemětřesné roje** – skupiny otřesů o stejné intenzitě

8.3.2 Druhy zemětřesení

- podle původu:

- řítivá** (3 %) – propadnutí stropů v místech podzemních prostor, mělké hypocentrum, lokální charakter (mohou být ale značné škody)
 - sopečná (vulkanická)** (7 %) – průvodní jev sopečné činnosti, hypocentra do 10 km v blízkosti přírodních drah vulkanického materiálu, malá intenzita, lokální význam, roje
 - tektonická (dislokační)** (90 %) – tektonicky aktivní oblasti (smykový pohyb ker), velké rozměry, výrazné vertikální (max. 12 m) a horizontální pohyby (max. 9 m), katastrofální zemětřesení
- podle hloubky ohniska:
- mělká** (řítivá, sopečná, tektonická do 60 km)
 - středně hluboká** (60-300 km) – endogenní pochody v zónách subdukce
 - s hlubokými ohnisky** (až do 700 km) – subdukční zóny (Wadati-Benioffova zóna)

Obr. 7.13/140

8.3.3 Účinky a intenzita zemětřesení

- **makroseismické účinky** – podle makroskopického pozorování souboru více či méně katastrofických projevů v přírodě a na člověka (praskliny, sesuvy, posuny bloků, změny řečišť, zvukové efekty aj.) – **zemětřesné stupnice** (MCS – Mercalli-Cancani-Sieberg, MSK-64 – Medveděv-Sponheuer-Kárník)

Stupnice na str. 141

mapy zemětřesné aktivity:

- mapy isoseist – místa stejné pozorované intenzity
- mapy izoblab – místa stejných škod
- mapy izakust – stejné intenzity zvukového doprovodu

- **mikroseismické účinky** – registrace pomocí **seismografů**, založených na principu setrvačné hmoty – záznam **seismogram** (horizontální pohyby S-J, V-Z, vertikální pohyb)

Obr. 7.15/143

- **magnitudo M** – dekadický logaritmus amplitudy zemětřesení (a) vyjádřené v mikrometrech, registrované standardním Woodovým-Andersonovým krátkoperiodovým seismografem v epicentrální vzdálenosti 100 km, tedy $M = \log a$
- vztah mezi velikostí magnituda a množstvím uvolněné energie E :
$$\log E = 11,8 + 1,5 M$$
- **Richterova stupnice** – pro hodnocení intenzity zemětřesení (podle hodnoty magnituda)

Tab. 7.4/143

8.3.4 Geografické rozložení zemětřesení

- rozhraní litosférických desek:
 - a) pás cirkumpacifický – 80 % zemětřesení
 - b) mediteránní pás
 - c) středoceánské hřbety, aktivní hlubinné zlomy

Obr. 7.16/144

- podle počtu otřesů se rozlišují oblasti:
 - a) seismické – velký počet zemětřesení
 - b) peneseismické – malý počet zemětřesení
 - c) aseismické – prakticky bez zemětřesení
- prognóza zemětřesení (seismické rajonování)
- metody užití seismiky

9. TÍHOVÉ POLE ZEMĚ

9.1 GRAVIMETRIE

- **gravimetrie** – zabývá se studiem tíhového pole Země
- **volný pád**: rychlost $v = gt$, dráha $s = 1/2 gt^2$, kde g je zemské tíhové zrychlení
- změny tíhového zrychlení s φ – pomocí kyvadlových hodin (na sever zrychlování pohybu – růst g)
- závislost g na rozdělení hmot pod zemským povrchem
- využití gravimetrie jako geofyzikální metody

9.2 TÍHOVÁ SÍLA, TÍHOVÉ ZRYCHLENÍ, TÍHOVÝ POTENCIÁL

- každé tělese má své **gravitační pole**, které působí na ostatní tělesa
- **intenzita gravitačního pole** $E = F/m$ (F – gravitační síla, m – hmotnost tělesa) protože $F = ma$, je $E = a$ (vektor intenzity gravitačního pole je totožný v daném místě s vektorem zrychlení), na povrchu Země je tedy $E_g = a_g$
- **odstředivá síla** $F_s = m \omega^2 r_Z \cos \varphi$, odstředivé zrychlení a_s
- **tíhová síla** G – výslednice gravitační a odstředivé síly, směr tížnice (olovnice)

- síla G uděluje tělesu o hmotnosti m zrychlení volného pádu – **zemské tíhové zrychlení** $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ (zemská tíže) (vektorový součet gravitačního a odstředivého zrychlení), $G = mg$
- rovník: $g = 9,781 \text{ m.s}^{-2}$, je zde nejmenší; pól: $g = 9,832 \text{ m.s}^{-2}$

Obr. 8.1/149

- **normální tíhové zrychlení** g_n ($\mu\text{m.s}^{-2}$):
 $g_n = 9\,780\,300 (1 + 0,005\,302 \sin^2\varphi - 0,000\,007 \sin^2 2\varphi)$
- **tíhový potenciál** – vyjádření pomocí skalární veličiny (ekvipotenciální plochy – geoid)

9.3 TÍHOVÉ OPRAVY A TÍHOVÉ ANOMÁLIE

- **tíhová anomálie** – rozdíl skutečné tíže a normální tíže (g_n)
- hodnoty měřeného tíhového zrychlení g ovlivněny hmotami mezi místem měření a nulovou hladinou → **redukce** měřených hodnot
 g – měřené tíhové zrychlení
 Δg_1 – přitažlivý účinek hmot nad výchozí hladinou (Bouguerova redukce)
 Δg_2 – nárůst tíhového zrychlení tím, že se měření přiblížilo ke středu Země o h (Fayeova redukce)
 Δg_3 – odstraněné hmoty se vrací na původní místo (Bouguerova redukce)
 $g_0 = g - \Delta g_1 + \Delta g_2 - \Delta g_3$
- a) $g_0 - g_n > 0$ - kladná – skutečná tíže větší než normální
- b) $g_0 - g_n < 0$ - záporná – skutečná tíže menší než normální
- tím je odstraněn vliv topografických nerovností na měření a tíhové anomálie jsou projevem hustotních nehomogenit v různých hloubkách

9.4 IZOSTÁZE A IZOSTATICKÉ ANOMÁLIE

- kontinenty – záporné tíhové anomálie, oceány – kladné → změny v rozložení hmoty pod zemským povrchem
- **izostáze** – stav blízký hydrostatické rovnováze
- princip teorie izostáze: hmotnost vertikálního sloupce daného průměru je všude stejná (nezávisle na reliéfu a nadmořské výšce) – **plocha kompenzace**
- **Prattova hypotéza** – nižší sloupec s vyšší hustotou – neodpovídá koloběhu hornin
- **Airyho hypotéza** – sloupce se skládají ze 2 typů hornin s odlišnými hustotami, jejich zastoupení v každém sloupci jiné

Obr. 8.4/153

- hmotnost sloupce A (na 1 m^2): $\rho_C (H_1 + h_1)$
- hmotnost sloupce B: $\rho_C H_2 + \rho_m (H_1 - H_2)$
- hmotnost sloupce C: $\rho_0 h_0 + \rho_C H_3 + \rho_m (H_1 - H_3 - h_0)$
- podle Airyho hypotézy tedy platí
 $\rho_C (H_1 + h_1) = \rho_C H_2 + \rho_m (H_1 - H_2) = \rho_0 h_0 + \rho_C H_3 + \rho_m (H_1 - H_3 - h_0)$
- globálně existuje na Zemi izostatická rovnováha

9.5 TÍHOVÁ MĚŘENÍ

- absolutní měření – kyvadla
- relativní měření – gravimetry

10. MAGNETICKÉ A ELEKTRICKÉ POLE ZEMĚ

- **magnetometrie** – studium magnetického pole Země
- **magnetické pole** – prostor, ve kterém působí magnetické síly
- látka vložená do magnetického pole se zmagnetizuje – stupeň zmagnetování popisuje **magnetizace (indukovaná, remanentní)**

10.1 PRVKY GEOMAGNETICKÉHO POLE

- **magnetický dipól**
- **prvky geomagnetického pole:**
 - a) magnetická deklinace
 - b) magnetická inklinace

Obr. 9.2/172

- **struktura magnetického pole Země**

Obr. 9.3/173

sluneční vítr - rázová vlna – turbulentní přechodová oblast – magnetopauza

ohon magnetosféry – neutrální body

radiační pásy Země – Lorentzova síla – cyklotronní pohyb, postupný pohyb

aurorální radiace – uchvácená radiace

10.2 ČASOVÉ VARIACE GEOMAGNETICKÉHO POLE ZEMĚ

- rozmanitý charakter
- denní variace
- magnetické bouře
- sekulární variace

10.3 PALEOMAGNETISMUS

- primární remanentní magnetizace, kterou hornina získala již při svém vzniku – informace o směru a vzácně i o velikosti geomagnetického pole v době vzniku
- rekonstrukce paleomagnetických pólů

Obr. 15.6a/332

10.4 PŮVOD GEOMAGNETICKÉHO POLE

- vzniká **magnetohydrodynamickým mechanismem** – rotace Země, konvekční pohyby ve vnějším jádru, indukci elektrické proudy a jim odpovídající magnetická pole, zesilující slabé pole vzniklé rotací

10.5 MAGNETICKÉ ANOMÁLIE

- anomálie kontinentální, regionální a lokální

10.6 ELEKTRICKÉ POLE ZEMĚ

- **elektrostatické pole** – doplňováno novými náboji přinášenými z meziplanetárního prostoru nebo ionizací atmosféry
- **elektrodynamické pole** – procesy v magnetosféře
- **povrch Země** – vysoká vodivost, záporný náboj
- **spodní vrstvy atmosféry** – vysoký elektrický odpor, kladný náboj – stálý pohyb nábojů z atmosféry k zemi – vyrovnání potenciálů brání bouřková činnost
- **bouřková oblaka** – sekundární tvorba nábojů (elektrizace oblačných elementů) - rozdíl potenciálů mezi částmi oblaku a mezi oblakem a zemí – elektrické výboje odvádí záporné náboje k zemi, kladné náboje do svrchních vrstev atmosféry
- **svrchní vrstvy atmosféry** – **ionizace** atomů a molekul plynu (ionosféra) – vrstvy zvýšené vodivosti D (50-90 km), E (kolem 110 km), F₁ (175-250 km) a F₂ (250-400 km) – odraz radiových vln
- systém elektrických proudů v ionosféře

Obr. 9.11/191

- **telurické proudy** – přirozené elektrické proudy v zemském tělese, které jsou indukovány elektrickými proudy v ionosféře

11. TEPELNÉ POLE ZEMĚ

- **geotermika** – zabývá se studiem tepelného pole Země

11.1 ZÁKLADNÍ POJMY

- **hustota tepelného toku** q ($W \cdot m^{-2}$) udává množství tepla protékajícího na zemském povrchu jednotkovou plochou za jednotku času:
 $q =$ měrná tepelná vodivost krát geotermický gradient
- **geotermický gradient** – přírůstek teploty na jednotku hloubky ($10-40 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)
- průměrná hodnota q je $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, tj. Země ztrácí za sekundu $30,5 \cdot 10^{12} \text{ J}$ energie
- tepelné ztráty kompenzují:
 - a) **vnější zdroje** (energie slunečního záření - $140 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ – část z toho přispívá k tepelné energii Země)
 - b) **vnitřní zdroje** (např. radiogenní teplo, gravitační teplo – stlačení spodních vrstev silou nadloží, energie seismických vln)
- nejvýznamnější je **radiogenní teplo** – teplo uvolněné samovolným rozkladem izotopů uranu (^{235}U , ^{238}U), thoria (^{232}Th) a draslíku (^{40}K)
- **přenos tepla** mezi dvěma místy s různou teplotou se děje vedením (zemská kůra, svrchní plášť), zářením a excitonovým přenosem (spodní plášť a jádro), a konvekcí (pohybující se hmoty – vývěry vod a výrony lávy, hlavně ve svrchním plášti a ve vnějším jádru)
- **měrná tepelná vodivost** – fyzikální parametr hornin (zastoupení minerálů, pórovitost, přítomnost vody, teplota)

11.2 ZMĚNA TEPLoty S HLOUBKOU A TEPELNÁ HISTORIE ZEMĚ

- denní a roční cyklus teplotních změn (ve 20-30 m vrstva stálé roční teploty)
- teplotní měření ve vrtech do hloubky několika km – geotermický gradient $10-40 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$

- pro hloubky pod 10 km – model Země, v němž je definována pravděpodobná závislost měrné tepelné vodivosti na hloubce a pravděpodobné rozložení zdrojů radiogenního tepla

Obr. 10.2-10.3/201

- **tepelná historie Země** – vznik Země koncentrací hmoty z mezihvězdného prachu → růst teploty uvnitř Země přeměnou kinetické energie dopadlých částic, adiabatickým stlačením hmoty a teplem uvolněným při rozpadu radioaktivních prvků → měknutí až roztavení hmot a gravitační diferenciace (jádro, plášť, kůra) → vynesení radioaktivních prvků k povrchu

11.3 POLE TEPELNÉHO TOKU A VÝZNAM TEPELNÉ ENERGIE PRO FORMOVÁNÍ ZEMSKÉHO POVRCHU

- geografické rozložení hustoty tepelného toku – vliv stáří tektonických celků a mocnosti zemské kůry
- oblasti s kontinentální kůrou – největší hodnoty q v oblastech tercierního a mladšího vulkanismu, riftových zónách a mladších pánvích s malou mocností kůry, nejnižší v oblasti pevninských štítů
- oblasti s oceánskou kůrou – největší na riftech podmořských hřbetů a nejnižší v oblasti hlubokomořských příkopů
- tepelná energie Země je patrně nejvýznamnější endogenní silou při formování zemského povrchu

Obr. 10.5/206

- mapy hustot tepelného toku – vyhledávání geotermální energie

11.4 PODÍL VULKANICKÉ ČINNOSTI NA TEPELNÉM HOSPODÁŘSTVÍ ZEMĚ

- vulkanická činnost – procesy související s pohybem magmatu uvnitř i na povrchu zemské kůry – uvolnění řádově 10^{18} J energie ročně
- magma – suspenze pevných částic v roztaveném kapalném prostředí o velmi vysokých teplotách (kolem $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- průvodní jevy vulkanické činnosti:
 - a) **termální prameny** – ochlazování horkých par při výstupu puklinami popř. míšení s podzemní vodou (přerušované výrony – gejzíry)
 - b) **fumaroly** – exhalace plynů a par, unikajících pod tlakem se sykotem z trhlin
 - c) **solfatary** – výrony vodní páry, sirovodíku, oxidu uhličitého a siřičitého po skončení vulkanické činnosti

11.5 VYUŽITÍ GEOTERMÁLNÍ ENERGIE

- přirozené přenašeče tepla (např. termální prameny) nebo zavedení umělých přenosových médií z povrchu
- výroba elektrické energie – vytápění objektů – lázeňské a rekreační účely (termální koupaliště)
- rozdělení geotermálních zdrojů:
 - a) oblasti rezervoárů přírodní páry
 - b) oblasti vysokotermálních zdrojů ($100\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 - c) oblasti nízkotermálních zdrojů ($40\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 - d) oblasti „dry hot rock“ – vysoký tepelný tok, chybí hydrotermální projevy
 - e) normální oblasti