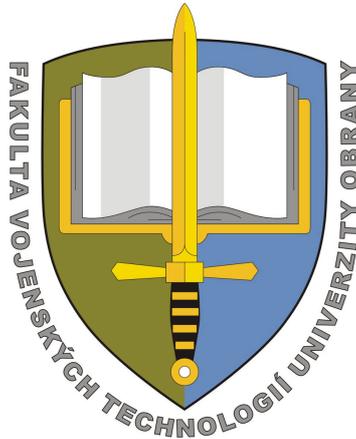


**UNIVERZITA OBRANY**  
**Fakulta vojenských technologií**  
**Katedra vojenské geografie a meteorologie**

---



**ZÁKLADY METEOROLOGIE**

(Přednáška)

**Téma 10: Příčiny zemětřesení, sesuvů a propadů  
zemských dutin**

Zpracoval: Ing. František HUDEC, CSc.

Brno 2006

## Úvod

Země jako planeta není stabilním neměnným tělesem, ale prodělala a prodělává složitý vývoj. Během tohoto vývoje docházelo na zemském povrchu k převratným událostem: rozsáhlé plochy pevnin byly zaplavovány mořem, zatímco jinde se mořské dno vynořilo nad hladinu, celé kontinenty se v důsledku pochodů probíhajících v zemské kůře a svrchní části pláště posouvaly a otáčely, vznikala nová moře a horstva a staré oceány mizely. Mezi síly, působící všechny tyto změny, patří konvekční proudy, izostatické síly, gravitace a jiné. Působení těchto sil je zdánlivě velmi pomalé. V současné době např. dochází k postupnému zvedání okolí Baltského moře o několik mm ročně, změny vzdáleností mezi kontinenty vyvolané posunem litosférických desek se pohybují v mezích několika cm. I u nás byly zjištěny poklesové pohyby (Polabí) a zvedání (střední Čechy). Tyto zdánlivě nepatrné hodnoty však představují z hlediska milionů let vývoje Země velmi rychlé procesy. Spojené účinky výše zmíněných sil vedou v zemské kůře a ve svrchní části pláště k vzniku dlouhotrvajících napět'ových stavů, které mohou vést k překonání meze pevnosti horninového materiálu (nejčastěji ve smyku). Pak dochází k náhlému uvolnění mechanické energie, které se projeví zemětřesením.

*Zemětřesení lze charakterizovat jako soubor krátkodobých pohybů, reprezentující proces při změně napět'ového stavu hornin. Zemětřesení jsou vázána na zemskou kůru a svrchní plášť, jen výjimečně jsou zaznamenávána i zemětřesení ze střední části pláště, maximálně z hloubky 700 km. [1]*

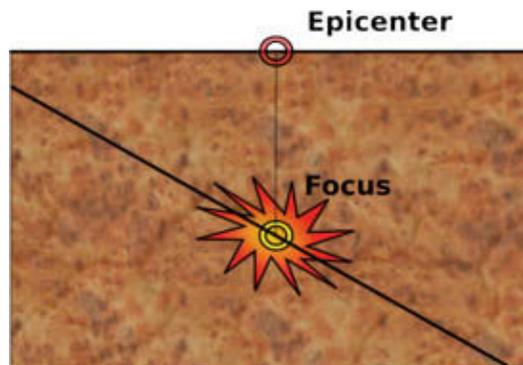
## 1. Základní pojmy

### *Ohnisko zemětřesení*

Je to prostor konečných rozměrů, ve kterém vzniká zemětřesení. Jeho délkové rozměry dosahují až několika set kilometrů.

### *Hypocentrum*

Tímto bodem nahrazujeme ohnisko a klademe jej do těžiště ohniska.



Obr.1: Hypocentrum a epicentrum

### *Epicentrum*

Je to kolmý průmět hypocentra na povrch Země.

### *Hloubka ohniska*

Takto nazýváme vzdálenost mezi hypocentrem a epicentrem.

### *Epicentrální vzdálenost*

Je vzdálenost epicentra od místa pozorování.

### *Epicentrální čas*

Tímto pojmem označujeme okamžik, v němž se zemětřesení projeví v epicentru.

### *Pleistoseistní oblast*

Okolí epicentra nejvíce postižené zemětřesením.

### *Intenzita zemětřesení*

Veličina charakterizující velikost zemětřesení na základě pozorování makroseismických účinků. Směrem od pleistoseistní oblasti klesá intenzita na všechny strany.

### *Zemětřesné roje*

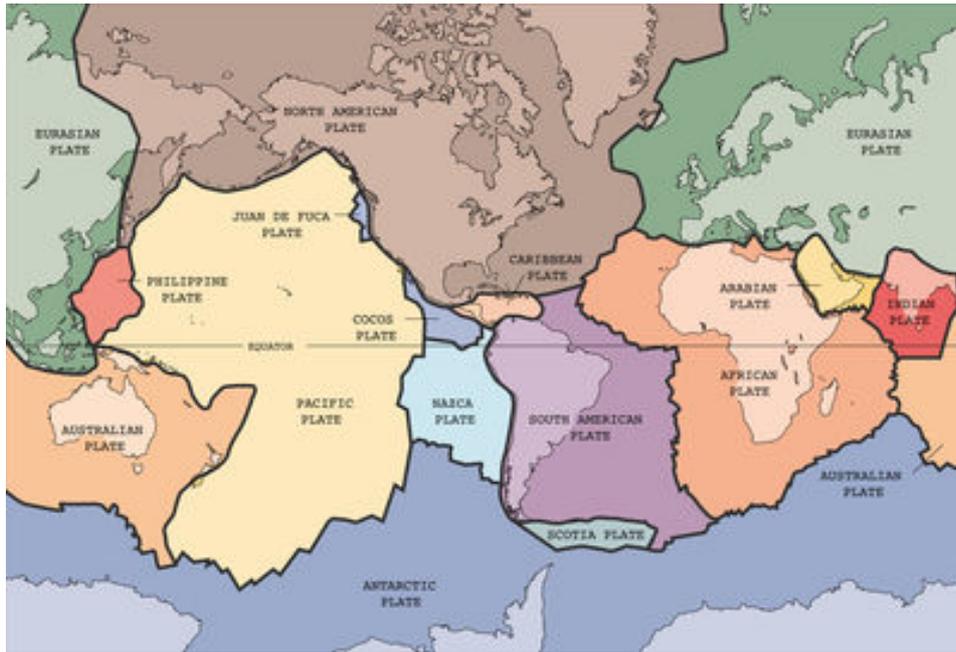
Pokud se objeví skupina po sobě následujících otřesů podobné intenzity - nejsme-li tedy schopni určit hlavní, nazýváme toto zemětřesné roje.

## 2. Druhy zemětřesení

Zemětřesení můžeme klasifikovat podle tří hlavních kritérií: původu, hloubky a intenzity.

Podle původu dělíme zemětřesení na:

- a) Řítivá;
  - b) Sopečná;
  - c) Tektonická.
- 
- a) **Řítivá zemětřesení** – tvoří asi 3% všech zemětřesení. Vznikají např. řícením stropů podzemních dutin v krasových oblastech nebo v poddolovaných místech. Hypocentrum bývá velmi mělké a zemětřesení má pouze lokální charakter. Rozsah škod, které při něm vznikají, však může být značný;
  - b) **Zemětřesení sopečná** – tvoří asi 7% všech zaregistrovaných zemětřesení. Bývají průvodním jevem sopečné činnosti. Jejich hypocentra jsou obvykle vázána na přírodní dráhy vulkanického materiálu a nacházejí se v hloubkách do 10 km. Jedná se o zemětřesení lokálního významu a malé intenzity, vyskytující se často ve skupinách (rojích);
  - c) **Zemětřesení tektonická (dislokační)** – nejčastější a nejzhoubnější typy zemětřesení. Vznikají náhlým uvolněním nahromaděné elastické energie v tektonicky aktivních oblastech., přičemž dochází ke smykovému pohybu ker podél zlomových spár. Zemětřesení se často projeví na celé soustavě zlomů, takže horizontální rozměr ohniska může být i stovky kilometrů. Maximální pohyby v horizontálním a vertikálním směru mohou dosáhnout i mnohametrových hodnot. Největší známý vertikální pohyb pochází ze zemětřesení v Assamu (Indie) z roku 1897 – činil 12 m. Největší horizontální posun je znám z altajského zemětřesení v Mongolsku z roku 1957, a to 8,8 m. Světoznámá jsou zemětřesení vázána na zlom San Andreas v Kalifornii (USA), podél něhož dochází jednak ke kontinuálním posunům 1-5 cm za rok, jednak k jednorázovým posunům spojeným se silnými zemětřeseními – v roce 1906 došlo k posunu o 4 metry.  
Mezi tektonická zemětřesení lze obecně zařadit i zemětřesení s hlubokými ohnisky, která se vyskytují v místech rozsáhlých zón subdukce litosférických desek.

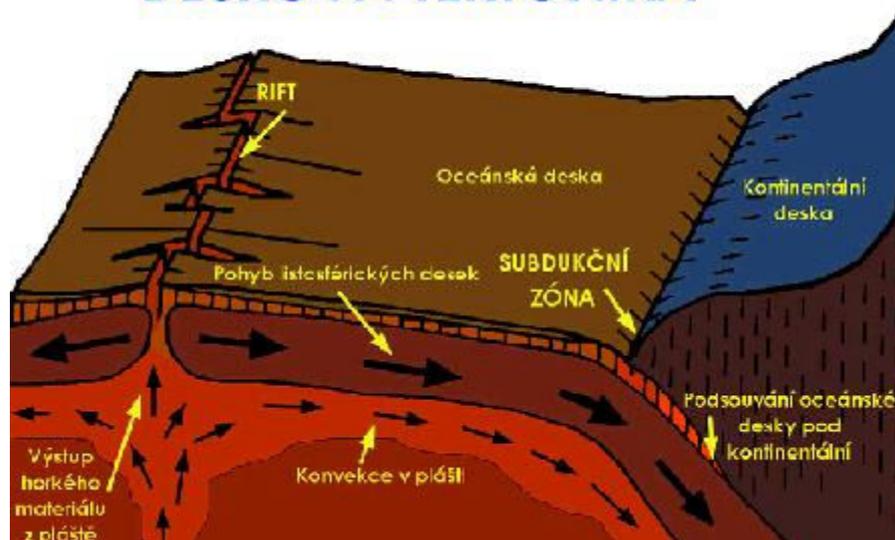


Obr.2: Tektonické (litosférické) desky

Podle hloubky ohniska rozdělujeme zemětřesení na:

- a) Mělká;
  - b) Středně hluboká;
  - c) Hluboká.
- a) **Mělká zemětřesení** – všechna zemětřesení řítivá a sopečná a ta tektonická zemětřesení, která mají hloubku ohniska do 60 km (tedy téměř všechna zemětřesení v zemské kůře a v nejsvrchnější části zemského pláště. Patří sem i zemětřesné efekty spojené s řícením skal či lavin, pádem meteoritů, průmyslovými a jadernými výbuchy apod.
  - b) **Středně hluboká zemětřesení** – z hloubek 60-300 km již náležejí plně do svrchního pláště, do zóny B. Jejich příčinou jsou zřejmě nejčastěji endogenní (vnitřní) pochody, probíhající v zónách subdukce (podsouvání litosférických desek) a kontaminace, hlavně tektonické deformace.
  - c) **Hluboká zemětřesení** – jsou vázána na významné subdukční zóny, zejména v pacifické oblasti. Ohniska hlubokých zemětřesení vytvářejí ukloněnou plochu, odpovídající ponořující se litosférické desce. Tato zemětřesení jsou vázána na zónu subdukce (oblast Tongajského hlubokomořského příkopu, Japonsko).

## DESKOVÁ TEKTONIKA



Obr.3: Subdukční zóna, vyvolávající středně hluboká a hluboká zemětřesení

Podle lokalizace:

- Kontinentální zemětřesení;
- Podmořská zemětřesení.

Při podmořském zemětřesení dochází k silným otřesům vodních mas, které mají za následek vytváření zvláštního typu vln zvaného **tsunami** (z japonského „dlouhá vlna“). Jejich délka je nejčastěji mezi 150-300 km, výška na volném moři od několika desítek cm do 1 m a maximální pozorovaná rychlost až  $1000 \text{ km.h}^{-1}$ . Při přechodu do šelfových oblastí se vlna zvyšuje a v příbojové oblasti dosahuje v závislosti na místních podmínkách často výšky až několika desítek metrů. Asi 80% případů tsunami připadá na Tichý oceán. Vedle podmořského zemětřesení může být příčinou tsunami i sopečná činnost, sesuvy na pobřeží, řízení břehů nebo skluzu čerstvě usazených sedimentů z pevninského svahu.

### 3. Účinky a intenzita zemětřesení

Účinky zemětřesení dělíme na **makroseismické** (lze je stanovit na základě makroskopického pozorování) a **mikroseismické**, které jsou registrovatelné pouze citlivými přístroji.

Účinky zemětřesení jsou závislé na intenzitě zemětřesení, v případě budov též na hloubce jejich založení a na charakteru hornin, resp. Zemin, na nichž je stavba vybudována.

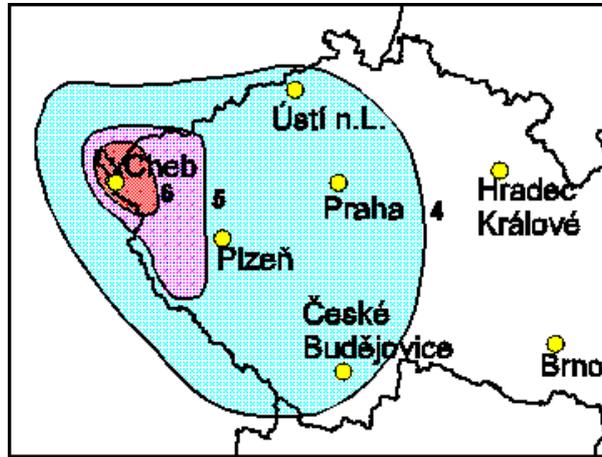
Makroseismické účinky v přírodě zahrnují soubor více či méně katastrofických jevů: tvoří se praskliny v půdě, půda na svazích a na březích řek se sesouvá, dochází k horizontálním posuvům nebo k vertikálním či šikmým poklesům podle systémů zlomů a prasklin, mizí stará a vytvářejí se nová jezera, řeky přemísťují svá řečiště. Často se při zemětřesení vyskytují i zvukové efekty – dunění, hřmění, někdy se objevují i další projevy porušení fyzikálního stavu prostředí – záře, záblesky, atd. V řadě případů byly zjištěny změny hodnot některých fyzikálních polí, zejména magnetického. Celá škála různých typů poškození, končící až úplnou destrukcí, byla pozorována na budovách.

Pro stanovení intenzity zemětřesení slouží zemětřesné stupnice, z nichž se jako mezinárodní používala dvanáctistupňová škála *MCS* nebo *MSK-64*. V současnosti se v Evropě používá *EMS-98*, plným názvem *Evropská makroseismická stupnice*. Je to dvanáctistupňová stupnice, užívaná Evropskou seismologickou komisí k vyjádření makroseismické intenzity zemětřesení. Tato stupnice se používá v zemích Evropské unie včetně České republiky (zároveň se starší stupnicí MSK-64). Stupnice byla vyvinuta roku 1988 jako náhrada starší stupnice MSK-64, prošla několika revizemi, poslední je z roku 1998 (proto je také ve zkratce uváděno datum 98).

<b>I. Nepocítěno</b>	Zemětřesení nebylo pocítěno.
<b>II. Stěží pocítěno</b>	Pocítěno jen velmi málo jednotlivci v klidu v domech.
<b>III. Slabé</b>	Pocítěno uvnitř budov některými osobami. Lidé v klidu pocítují jako houpání nebo lehké chvění.
<b>IV. Značně pozorované</b>	Zemětřesení uvnitř budov cítí mnozí, venku jen výjimečně. Někteří lidé jsou probuzeni. Okna, dveře a nádobí drnčí.
<b>V. Silné</b>	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.
<b>VI. Mírně ničivé</b>	Mnozí lidé sou vystrašeni a vyběhají ven. Některé předměty padají. Mnohé budovy utrpí malé nestrukturální škody jako např. vlásečnicové trhliny nebo odpadnuté malé kousky omítky.
<b>VII. Ničivé</b>	Většina lidí je vystrašena a vyběhává 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 přčky jsou zřícené.
<b>VIII. Těžce ničivé</b>	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.
<b>IX. Destruktivní</b>	Všeobecná panika. Mnoho slabých staveb se řítí. I dobře postavené běžné budovy utrpí velmi těžké škody: těžké poškození stěn a částečně i strukturální škody.
<b>X. Velmi destruktivní</b>	Mnohé dobře postavené běžné budovy se řítí.
<b>XI. Devastující</b>	Většina dobře postavených běžných budov se řítí. I některé seismicky odolné budovy jsou zničeny.
<b>XII. Úplně devastující</b>	Téměř všechny budovy jsou zničeny.

Obr.4: Evropská makroseismická stupnice

Z výsledků makroseismických pozorování jsou sestavovány mapy zemětřesné aktivity. Patří sem *mapy izoseist* – čar stejné pozorované intenzity zemětřesení, dále *mapy izoblab* – čar spojujících místa stejných škod, *mapy izakust* – čar spojujících místa stejných intenzit zvukového doprovodu zemětřesení.

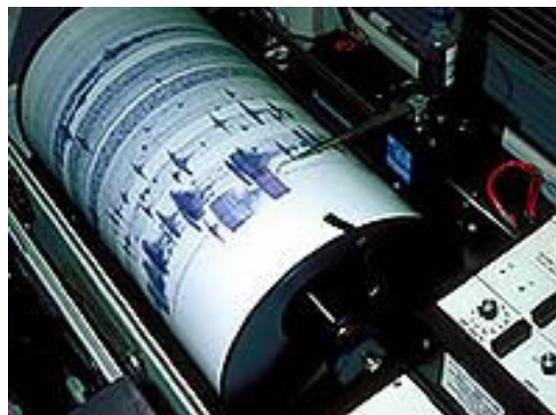


Obr.5: Mapa izoseist z 21.12.1985

Makroseismická pozorování jsou často jediným vodítkem pro lokální zemětřesení, mají však následkem své subjektivity pouze relativní cenu. Proto se používá mikroseismických měření, umožňujících zjistit i množství uvolněné energie.

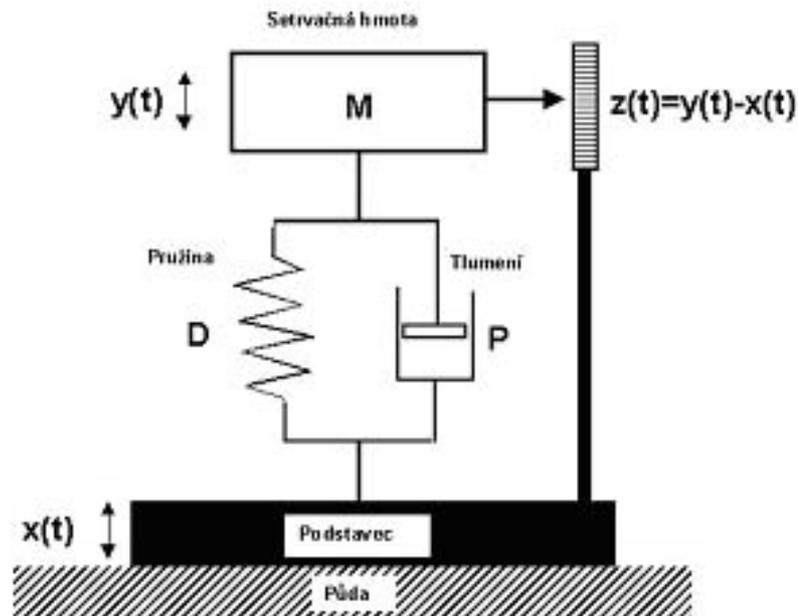
Mikroseismické účinky jsou registrovatelné na citlivých přístrojích – *seismografech*. Ze studia záznamu zemětřesení na seismické observatoři je možné určit polohu epicentra zemětřesení a jeho magnitudo (veličina analogická intenzitě).

Seismografy jsou v podstatě upravená horizontální a vertikální kyvadla, existují i typy využívající principu elektromagnetické indukce. Měření seismografy je založeno na principu setrvačné hmoty, která je zavěšena nebo umístěna tak, aby byla vzhledem k zemi snadno pohyblivá.



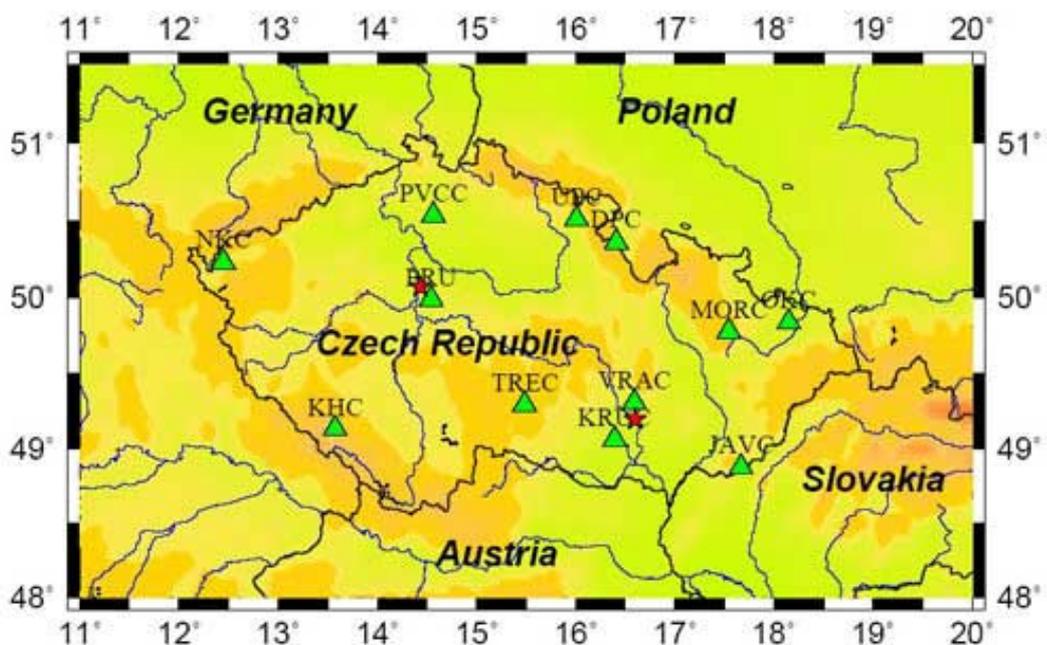
Obr.6: Seismograf

Při zemětřesení se snaží zůstat v klidové poloze a dostává se tak do relativního pohybu vzhledem k vlastnímu přístroji, který se kýve současně s okolím. Vzájemný posun mezi setrvačnou hmotou a pevnou částí seismografu se přenáší mechanicky nebo opticky na registrační papír, případně se používá magnetického zápisu.



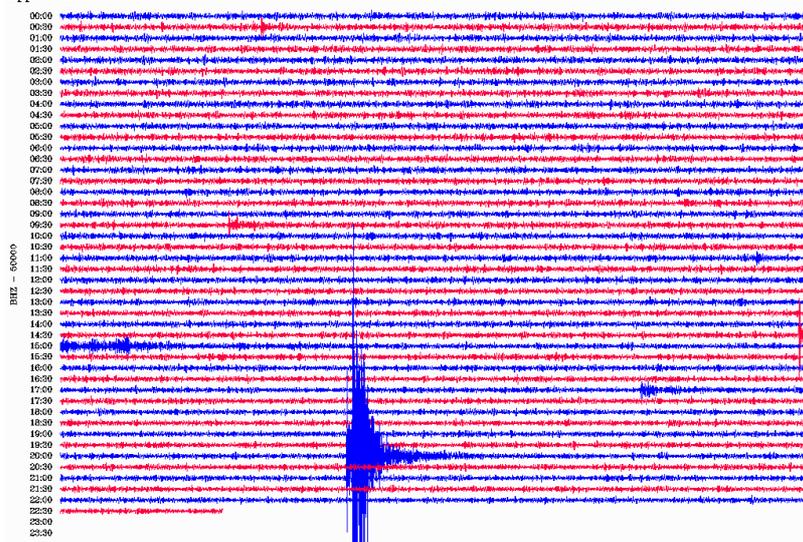
Obr.7: princip setrvačného seismografu

Výsledný zápis se nazývá *seismogram*. Na seismogramu lze určit časy příchodu jednotlivých typů seismických vln.



Obr.8: Mapa seismických stanic ČR

Applied filter: WSSN-SP



Obr.9: Seismogram ze stanice Polom dne 9.12.2006

Pro stanovení intenzity resp. energie zemětřesení vycházíme z magnituda  $M$ , které je definováno jako dekadický logaritmus amplitudy zemětřesení:

$$M = \log \frac{a}{T} + f(\Delta, h) + C$$

kde:  $a$  - maximální amplituda povrchových vln v  $10^{-6}$  m;

$T$  - perioda povrchových vln v sekundách;

$f(\Delta, h)$  - empiricky určená kalibrační funkce vzhledem k jednotkové epicentrální vzdálenosti;

$C$  - konstanta, dána korekčními konstantami pro danou observatoř a oblast.

Veličiny magnituda  $M$  využívá tzv. **Richterova stupnice**, která se v seismologii využívá pro popis velikosti zemětřesení (tj. pro hodnocení intenzity zemětřesení podle hodnoty magnituda). Stupnici vytvořil v roce 1935 americký seismolog **Charles Francis RICHTER** (26. 4. 1900 - 30. 9. 1985). *Richterova stupnice* je založena na množství energie v hypocentru zemětřesení (ohnisko zemětřesení, které leží v hloubkách do 700 km pod zemským povrchem).

Richterova stupnice udává intenzitu pohybu země měřenou ve vzdálenosti 100 km od epicentra zemětřesení. Hodnoty jsou udávány od 1-9 (s každým stupněm se síla zemětřesení zvětšuje 10x, stupnice je tedy logaritmická a nemá dolní ani horní hranici).

Popisek	Richterova magnituda	Účinky zemětřesení	Počet za rok
Mikro	méně než 2,0	Mikrozemětřesení, nepocititelné.	okolo 8000 denně
Velmi malé	2,0 až 2,9	Většinou nepocititelné, ale zaznamenatelné.	okolo 1000 denně
Malé	3,0 až 3,9	Často pocititelné, nezpůsobující škody.	49000 (odhad)
Slabé	4,0 až 4,9	Citelné třesení věcí uvnitř domů, drčivé zvuky. Významné škody nepravěpodobné	6200 (odhad)
Střední	5,0 až 5,9	Může způsobit velké škody špatně postaveným budovám v malé oblasti. Pouze drobné poničení dobře postaveným budovám.	800
Silné	6,0 až 6,9	Může ničit až do vzdálenosti 100 km.	120
Velké	7,0 až 7,9	Může způsobit vážné škody na velkých oblastech.	18
Velmi velké	8,0 nebo větší	Může způsobit vážné škody i ve vzdálenosti stovek kilometrů.	1

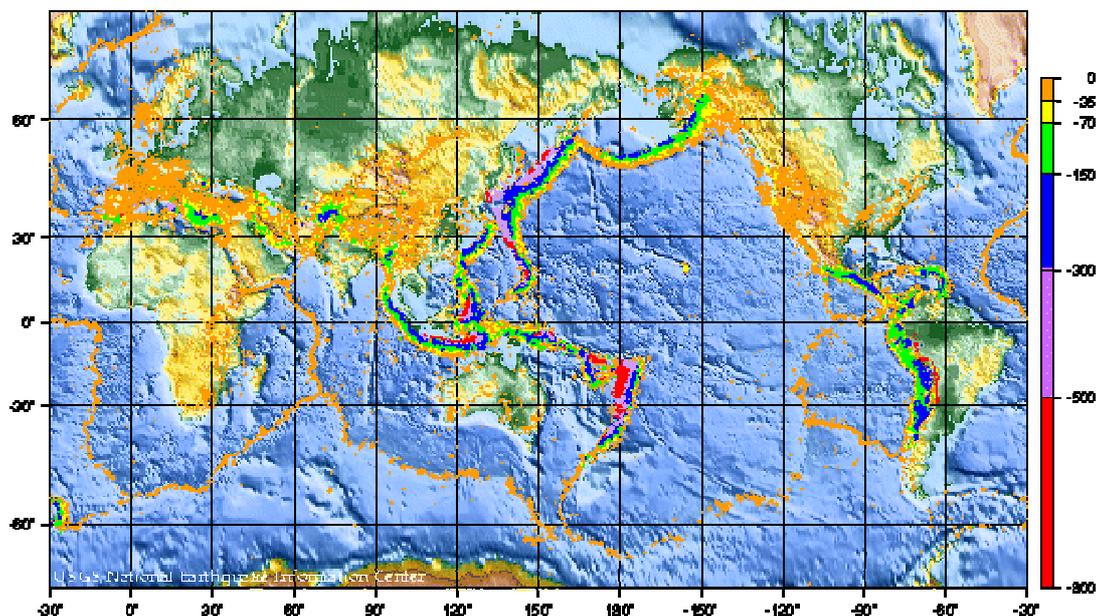
stupeň	popis
1-2	energii vydanou zemětřesením člověk nepocítuje, měřitelná pouze přístroji
3	mírné zemětřesení bez poškození, člověk už rozpozná
4	slabé zemětřesení
5	dochází k mírnému poškození budov okolo epicentra
6	dochází k vážnějším škodám budov obzvláště nekvalitně postavených
7	značné poničení budov
8	budovy téměř úplně zničeny
9	dosud nejsilnější změřené zemětřesení

Obr.10: Richterova stupnice

#### 4. Geografické rozložení zemětřesení

Z geografického hlediska je rozmístění ohnisek zemětřesení na zemském povrchu značně nerovnoměrné. Ohniska zemětřesení se koncentrují do řady úzkých pásů, které převážně odpovídají rozhraním litosférických desek. Nejvýznamnější z nich je *pás cirkumpacifický*, probíhající od Kamčatky přes Japonské souostroví a Filipíny k Novému Zélandu a dále na jih k Antarktidě, odkud se stáčí k severu podél pobřeží Jižní a Severní Ameriky. Asi 80% zemětřesení pochází z tohoto pásu.

### World Seismicity: 1990 - 2000



Obr.11: Oblasti zemětřesné aktivity v letech 1990-2000

Podle počtu zemětřesení můžeme na zemském povrchu vyčlenit oblasti s velkým počtem zemětřesení (*seismické*), s malým počtem zemětřesení (*peneseismické*) a oblasti prakticky bez zemětřesení (*aseismické*). Mezi seismické patří např. cirkumpacifický pás, mezi aseismické převážná většina ploch kontinentálních štítů (ruská tabule, australský štít).

Každoročně se na zemském povrchu vyskytuje asi 60 000 až 90 000 otřesů, které však v převážné většině lidé vůbec nepocítují. Velmi silných otřesů bývá ročně 18 až 20.

V Evropě bývá zaznamenáno ročně kolem 10 větších otřesů. V ČR jsou zemětřesení vázána hlavně na mladé, dosud živé tektonické zóny (severozápadní Čechy – mariánskolázeňský zlom a krušnohorský zlom, hronovsko - poříčská porucha v severozápadních Čechách, sudetský zlom na Opavsku).

## 5. Předpověď zemětřesení a prevence před ním

Již po léta se snaží vědci z nejrůznějších oborů zjistit spolehlivé příznaky, které by umožnily předpovědět blízkost zemětřesení. Tato problematika je těsně spjata s otázkou příčin vzniku zemětřesení; v dnešní době se přitom vychází z koncepce nové globální tektoniky zejména pro nejnebezpečnější zemětřesení tektonická. Při studiu otázky úspěšné prognózy zemětřesení se v dnešní době obrací pozornost k řadě fyzikálních a geologických jevů, které

mohou mít souvislost s nastávajícím otřesem. Patří sem studium některých fyzikálních polí, zejména elektrického, magnetického a tíhového, sledování mikroseismicity, tj. časového a plošného rozložení slabých otřesů a jejich amplitud, ale i změny hladiny a chemismu podzemních vod, výškové změny zemského povrchu, apod. Na některé z těchto jevů zřejmě reagují zvířata, která již několik hodin před zemětřesením jeví neklid a chovají se neobvykle. Přes občas hlášené lokální úspěchy však dosud ještě nebyl vypracován jednoznačný a jasně zdůvodněný systém predikce zemětřesení.

V oblasti zlomu San Andreas probíhali první pokusy o přímé ovlivnění průběhu zemětřesení: v jeho zóně je vháněna do země voda pomocí vrtů. Tím se má dosáhnout zmenšení odporu hornin při vzájemném pohybu bloků a rozdrobit tak velký otřes na několik menších.

Při současném stavu našich znalostí o mechanismu zemětřesení a jeho predikci mají velký význam preventivní opatření proti jeho katastrofickým důsledkům. Patří sem v první řadě otázka seismického rajónování, při němž je určována pravděpodobná intenzita zemětřesení pro určitá časová období (obvykle 100 let až 10 000 let). Pro konkrétní oblasti jsou rovněž důležité fyzikální vlastnosti hornin, pokryvných útvarů a hloubka hladiny spodní vody, které mohou ovlivnit makroseismické účinky jednotlivých zemětřesení (oblasti jaderných elektráren, velká města).

Důležitou součástí prevence je též výchova obyvatelstva, a to jak ve smyslu chování se při prvních příznacích zemětřesení, tak pokud jde o pokus při likvidaci následků zemětřesení. Neméně významná je připravenost orgánů státní správy pro případný zásah.

## 6. Sesuvy půdy

Svahovými pohyby se rozumí přemísťování horninových hmot na svazích účinkem zemské tíže. Tyto pohyby přirozeného původu i vyvolané lidskou činností patří k velmi rozšířeným geodynamickým jevům, které způsobují vážné přímé i nepřímé škody na budovách, komunikacích, liniových vedeních, důlních a vodohospodářských stavbách. Nejběžnějším druhem svahových pohybů jsou **sesuvy**. Mezi země silně postižené svahovými pohyby patří i Česká republika, a to zejména její východní část, která je součástí geologické jednotky Západní Karpaty, s mladým horským reliéfem, živými endogenními i exogenními procesy.

Svahovými deformacemi jsou zde postiženy v průměru 3 % území, přičemž například ve flyšových horninách ve Vsetínských vrších dosahuje procento postižení území kolem 10 %. V převážné části republiky, patřící ke geologicky staršímu Českému masivu, je svahovými pohyby postiženo asi 1 % území.



Obr.12: Sesuv v oblasti potoka Malá Brodská (Vsetínská Bečva)

Proti sesuvům skal a půdy se lze bránit výstavbou speciálních ochranných bariér. Bariérové ochranné systémy slouží k ochraně proti skalnímu řízení a podle typu jsou díky použití vyspělých komponentů schopny absorbovat energii **500 – 3 000kJ**. Mezi výhody patří rychlá montáž a nízké náklady na opravu a údržbu.



Obr.13: Bariérový systém ochrany proti sesuvům

Příkré svahy, na kterých dochází k sesuvům skal a půd lze chránit sítěmi z ocelových drátů, která se předpíná stanovenou silou většinou pomocí zemních nebo skalních kotev a roznášecích desek. Síť pak kopíruje morfologii terénu a zabraňuje tak nejen sesuvům a deformacím, ale i opadu sutí.



Obr.14: Ochrana proti sesuvům skal pomocí sítí

Další aplikací ochrany osob, průmyslových a technických objektů je užití bariéry sloužící jako ochrana např. mostních objektů proti plovoucím dřevům, ochrana území proti zemním sesuvům, lavinám, padajícím stromům. Tento systém využívá obdobné prvky jako systém ochrany proti skalnímu řícení.



Obr.15: Ochrana proti sesuvům a naplavenému dřevu

Literatura:

- [1] BRÁZDIL, R.: Úvod do studia planety Země. SPN Praha, 1988.
- [2] MATISKA, C., ZAHRADNÍK, J., HANYK, L.: Dynamika Země, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 2000/ 47, 221-229
- [3] BURJÁNEK, J., GALLOVIČ, J., ZAHRADNÍK, J.: Seismologické předpovědi: skutečnost a sen. MFF UK Praha.