# Kapitola 7

# SEIZMOLÓGIA

# (Bibiana Brixová)

Učebný text pre študentov geológie pre predmet "Základy aplikovanej geofyziky"

1. Úvod	1
2. Základné pojmy	3
3. Príčiny vzniku zemetrasení	5
4. Seizmické vlnenie	8
5. Registrácia zemetrasení	10
6. Lokalizácia zemetrasení	14
7. Seizmické stupnice, škály	15
8. Rozdelenie zemetrasení	22
9. Početnosť zemetrasení	27
10. Seizmické ohrozenie	29
11. Seizmicita Slovenska	31
Použitá a odporúčaná literatúra	
Prílohy	37

## 1. Úvod

Zemetrasenie je prírodný jav. Veľké zemetrasenia patria medzi najmohutnejšie prírodné javy na Zemi. Uvoľnená energia býva v niektorých prípadoch taká veľká, že dokáže zmeniť rozsiahle územia na nepoznanie. Zemetrasenie patrí podľa počtu obetí, škôd, veľkosti zasiahnutého územia i zložitosti ochrany proti nemu k najstrašnejším prírodným katastrofám. Prispieva k tomu i psychologický faktor pretože jeho zdroje pod povrchom zeme sú neviditeľné, zasiahne ako blesk a za niekoľko desiatok sekúnd zanechá za sebou materiálnu spúšť, vrátane mŕtvych a ranených (Žalman, 2004).

Medzi najsilnejšie zemetrasenia zaznamenané seizmografmi patrí zemetrasenie v Indickom oceáne (Sumatransko – Andamanské zemetrasenie) z roku 2004 s momentovou magnitúdou 9,1 – 9,3. Spôsobilo sériu ničivých cunami, ktoré zasiahli 11 krajín. Zahynulo viac ako 225 000 ľudí. Pri tomto zemetrasení došlo k horizontálnemu pohybu morského dna o 1 cm a vibrácie pocítila celá planéta. V tabuľke desiatich najväčších zemetrasení od roku 1900 podľa dosiahnutej magnitúdy, ktorú vypracovalo USGS (tab.1), je na treťom mieste. Počet obetí a hmotné škody vzniknuté pri zemetraseniach však nezávisia iba od veľkosti magnitúdy. Väčšie škody na životoch i majetku spôsobí zemetrasenie aj s nižšou magnitúdou, ak zasiahne husto osídlenú oblasť s vybudovanou infraštruktúrou. Čo sa týka počtu obetí, tak za absolútne najväčšie zemetrasenie sa považuje zemetrasenie v Číne v roku 1556 s magnitúdou cca 8, pri ktorom zahynulo alebo bolo zranených približne 830 000 ľudí. V roku 2011 zemetrasenie s magnitúdou 9 v blízkosti ostrova Honšú prinieslo veľké cunami, ktoré spôsobili poškodenie jadrovej elektrárne Fukušima. V roku 2010 postihlo zemetrasenie s magnitúdou 7 Haiti. Po hlavnom otrase nasledovalo v priebehu 12 dní cca 52 dotrasov s magnitúdou 4,5 a viac. Vyžiadalo si až 230 000 obetí. Dôvodom obrovských škôd boli okrem iných faktorov aj nedostatočné stavebné štandardy v postihnutej oblasti.

V porovnaní s uvedenými udalosťami, je Slovensko relatívne seizmicky kľudná oblasť. Naopak v porovnaní oblasťami ako Poľsko, Ukrajina, Ruská platforma alebo i susedné Čechy je Slovensko seizmicky aktívnejšie. Územie Slovenska môžeme charakterizovať ako oblasť s miernou seizmickou aktivitou (Moczo et al., 2002). Posledné silné zemetrasenie s magnitúdou nad 5 s epicentrom na našom území (Dobrá Voda a okolie) bolo v roku 1906 (Réthly, 1907) a v roku 1930 (Zátopek, 1940). Územie Západných Karpát však stále vykazuje znaky neotektonickej a recentnej aktivity. Náhle uvoľnenie akumulovaného napätia v zemskej kôre v podobe silnejšieho zemetrasenia môže prísť prakticky kedykoľvek a kdekoľvek (Madarás et al. 2012).

Zemetrasenia sú samozrejme geologickým hazardom pre tých, ktorí žijú v oblastiach postihovaných zemetraseniami, ale seizmické vlny, ktoré pri nich vznikajú sú neoceniteľné pre štúdium vnútra Zeme. *Skúmaním zemetrasení a stavbou vnútra Zeme sa zaoberá časť geofyziky – Seizmológia.* Seizmologický výskum môžeme teda rozdeliť na výskum fyziky zemetrasení a výskum štruktúry Zeme. *Výskum štruktúry Zeme* je zameraný na výskum jednak štruktúry celej Zeme pomocou už spomínanej analýzy šírenia seizmických vĺn generovaných zemetraseniami a jednak výskum zemskej kôry pomocou analýzy šírenia sa umelo generovaných seizmických vĺn (tomu je venovaná časť "Seizmický prieskum"). *Výskum fyziky zemetrasení* je zameraný na štúdium procesu prípravy a vzniku zemetrasení. Viac než len vedeckým cieľom výskumu fyziky zemetrasení je aj predpoveď zemetrasení a seizmického pohybu zeme na záujmovej lokalite, v regióne, či štáte (Moco a Labák, 2000).

Aj keď zemetrasenia nedokážeme priamo predpovedať, na základe doterajších pozorovaní, meraní a záznamov môžeme redukovať ich následky.

	lokalita	dátum	magnitúda
1.	Čile	22.5.1960	9,5
2.	Aljaška, ostrov princa Wiliama	28.3.1964	9,2
3.	neďaleko západného pobrežia severnej Sumatry	26.12.2004	9,1
4.	neďaleko východného pobrežia ostrova Honšú, Japonsko	11.3.2011	9,0
5.	Kamčatka	4.11.1952	9,0
6.	Maule, Čile	27.2.2010	8,8
7.	neďaleko pobrežia Ekvádoru, Tichý oceán	31.1.1906	8,8
8.	Rat Islands, Aljaška	4.2.1965	8,7
9.	severná Sumatra, Indonézia	28.3.2005	8,6
10.	Assam - Tibet	15.8.1950	8,6

**Tab.1:** Desať najväčších svetových zemetrasení podľa dosiahnutej magnitúdy od roku 1900(http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10\_largest\_world.php).

# 2. Základné pojmy

(Spracované podľa http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary a Viskup in Gajdoš a kol., 2001)

*Ohnisko zemetrasenia (fokus)*– oblasť pod zemským povrchom, kde došlo k náhlemu uvoľneniu veľkého množstva energie. Môže mať rozmery aj niekoľko stoviek kilometrov.

Hypocentrum – bodová aproximácia ohniska zemetrasenia (ťažisko zemetrasenia).

Epicentrum – kolmý priemet hypocentra na povrch Zeme.

Antiepicentrum – miesto oproti epicentru na protil'ahlej strane geoidu.

Hĺbka ohniska (fokálna hĺbka) – vzdialenosť medzi epicentrom a hypocentrom.

Hypocentrálny čas – čas vzniku zemetrasenie v ohnisku.

Epicentrálny čas – čas príchodu vlnenia do epicentra.

*Epicentrálna oblasť* – epicentrum s okolím, kde sa zemetrasenie prejavilo najväčšími účinkami.

Pleistosteisná oblasť – najviac otrasená časť epicentrálnej oblasti.

*Hypocentrálna vzdialenosť* – vzdialenosť medzi bodom pozorovania (zaznamenania) účinku zemetrasenia a hypocentrom.

*Epicentrálna vzdialenosť* – vzdialenosť medzi bodom pozorovania (zaznamenania) účinku zemetrasenia a epicentrom. Udáva sa v km, v prípade veľkých vzdialeností v °, pričom 1°  $\cong$  111,1 km (obvod Zeme /360°).



*Makroseizmický prejav zemetrasenia* – fyziologické vnemy ľudí pri zemetrasení (čo pozorujú na sebe), prejavy zemetrasenia na objektoch (na stavebných konštrukciách, komínoch, domoch,...) a na prírode (na povrchu terénu, vodnej hladine v riekach, nádržiach a na hladine spodnej vody, geomorfologické zmeny,...).

*Makroseizmické pole* – územie, kde bolo alebo mohlo byť zemetrasenie pozorované makroseizmicky.

*Intenzita zemetrasenia* – kvantitatívna veličina charakterizujúca veľkosť zemetrasenia. Udáva sa v stupňoch, pričom treba uviesť aj typ stupnice.

Izosteisa zemetrasenia – čiara spájajúca miesta s rovnakou intenzitou zemetrasenia.

Seizmická oblasť – územie s rovnakou hodnotou intenzity.

*Seizmicky pohyblivejšie pásmo* – územie so systematicky sa vyskytujúcimi zemetraseniami s vyššou intenzitou ako v okolí.

Seizmograf – prístroj na zaznamenanie seizmického vlnenia vzniknutého počas zemetrasenia.

Seizmogram (seizmický záznam) – záznam seizmického vlnenia zo seizmografu.

*Špičková hodnota* – maximálna hodnota výchylky na seizmograme.

*Špičková hodnota výchylky (PGD – peak ground displacement) –* špičková hodnota pri meraní výchylky kmitania častíc pôdy počas prechodu seizmickej vlny.

*Špičková hodnota rýchlosti (PGV – peak ground velocity) –* špičková hodnota pri meraní rýchlosti kmitania častíc pôdy počas prechodu seizmickej vlny.

*Špičková hodnota zrýchlenia (PGA – peak ground acceleration) –* špičková hodnota pri meraní zrýchlenia kmitania častíc pôdy počas prechodu seizmickej vlny.

Akcelerogram – seizmický záznam priebehu zrýchlenia.

Velocigram – seizmický záznam priebehu rýchlosti kmitania.

*Perióda opakovania (rekurenčná perióda – recurrence period) –* perióda opakovania zemetrasenia s danou magnitúdou alebo intenzitou.

*Graf Gutenberg- Richterovho rozdelenia* – vyjadruje počet zemetrasení o danej magnitúde alebo intenzite. Slúži na výpočet rekurenčnej periódy.

Izoakusy – čiary spájajúce miesta rovnakých zvukových intenzít počas zemetrasenia.

Izoblaby – čiary spájajúce miesta s rovnakými pomernými škodami.

*Hlavný otras (main shock)* – zemetrasenie s najväčšou intenzitou, v prípade, že samotné zemetrasenie nie je len jeden otras, ale niekoľko za sebou nasledujúcich otrasov trvajúcich dlhšie časové obdobie (aj viac dní). Na začiatku takéhoto zemetrasenia môže byť skupina slabších otrasov – predtras (foreshock) a na konci tiež – *dotras (aftershock)*.

*Zemetrasný (seizmický) roj* – početná skupina zemetrasení, z ktorých žiaden otras svojou intenzitou výrazne neprevyšuje ostatné.

*Seizmicita oblasti* – charakteristika zemských otrasov vyskytujúcich sa v oblasti podľa ich intenzity, prípadne výskytu. *Prírodná* – charakteristika zemetrasení oblasti, *technická* – otrasy vyvolané umelým zdrojom (doprava, priemyselná činnosť, pulzácia vodného prúdu,...), *indukovaná* – otrasy vyvolané banskou činnosťou alebo iným dlhodobým porušením rovnováhy zemského prostredia a zmenami v zaťažení zemského povrchu (preťaženie vodou v priehrade, nadmerné čerpanie vody alebo plynu, zaťaženie veľkými násypmi,...), *priemyselná* – otrasy vyvolané činnosťou strojov.

### 3. Príčiny vzniku zemetrasení

Ako zemetrasenie sa označujú otrasy horninového prostredia, ktoré vznikajú v dôsledku náhleho uvoľnenia značného množstva energie v istej oblasti vo vnútri Zeme (v litosfére). Vyše 90 % zemetrasení je spôsobených tektonickými pohybmi v rámci litosféry, zvyšok pripadá na vulkanizmus, zrútenie veľkých podzemných dutín (napr. stropov jaskýň) alebo skalných masívov, ako aj na činnosť človeka (banská činnosť, explózie, atď.).

#### Vznik zemetrasení pozdĺž okrajov tektonických dosiek (tektonické zemetrasenia)

Najvrchnejšia časť zemského telesa je tvorená pevnou litosférou, ktorá je rozlámaná na viacero veľkých a niekoľko menších platní, ktoré sa voči ostatným pohybujú na plastickej časti astenosféry (teória platňovej tektoniky). Pohyb litosferických dosiek je cca 5 cm za rok. Pri tomto pohybe môže dochádzať k stretom platní. Platne do seba narážajú alebo sa jedna podsúva pod druhú (subdukcia). Takéto kontakty označujeme ako konvergentné okraje platní. Pri nárazoch platní vznikajú horské pásma (napr. Himaláje, Alpy, Karpaty...), pri subdukcii zasa podmorské priekopy s ostrovnými oblúkmi (napr. západný Pacifik a priľahlé ostrovy ako Japonsko, Filipíny...). Platne sa môžu od seba vzďaľovať, vtedy hovoríme o divergentných okrajoch. Ide o riftové zóny, ktoré sú na pevnine zárodkom oceánov (napr. Červené more, východoafrický prielom) alebo stredooceánske riftové chrbty, kde dochádza k rozširovaniu morského dna. Tektonické platne sa môžu pohybovať ešte aj popri sebe opačnými smermi - transformné okraje. Typy interakcií na okrajoch tektonických platní sú znázornené na obr.1 a 2.



Obr.1: Typy interakcií na okrajoch tektonických platní (https://sk.wikipedia.org).

Pohyby tektonických dosiek na astenosfére nie sú pravidelné a postupné. Miesto toho sa tlak pozdĺž okrajov dosiek hromadí, až kým napätie neprekročí pevnosť hornín. Nahromadená energia sa potom uvoľní v podobe zemetrasenia s rôznou mierou sily. Väčšina zemetrasení teda vzniká pozdĺž hraníc tektonických dosiek – pozdĺž oceánskych chrbtov, transformných zlomov a subdukčných zón – kde na seba dosky pôsobia najintenzívnejšie, preto tam vznikajú najväčšie deformácie a napätia. Štáty, ktoré sa nachádzajú blízko hraníc litosférických dosiek

sú teda často ohrozované rôzne silnými zemetraseniami (Japonsko, Irán, Turecko, Guatemala, Peru, Sicília, Grécko, Kaukazské republiky; najznámejšou seizmickou oblasťou severnej Ameriky je Kalifornia).



**Obr. 2:** Mapa s vyznačením tektonických platní a typom interakcií na ich kontaktoch (http://www.jochemnet.de/fiu/earth3.jpg).

### Tektonické zemetrasenia vo vnútri litosferických dosiek

Nie všetky zemetrasenia vznikajú pozdĺž hraníc medzi litosferickými doskami. Napríklad v Severnej Amerike neboli najničivejšie zemetrasenia v historicky známom čase v Kalifornii, cez ktorú sa tiahne transformný zlom (San Andreas), ale v Južnej Karolíne a Missouri, teda ďaleko od okrajov dosiek. Príčinou zemetrasení vo vnútri dosiek môžu byť hlboké, ešte stále aktívne zlomy, ktoré sú pozostatkom omnoho skoršieho obdobia tektoniky litosferických dosiek. Pozdĺž zlomov dochádza k posunom blokov. Tie u ktorých pokračuje pohyb doposiaľ sa označujú ako seizmoaktívne. Iným dôvodom zemetrasení v rámci litosferických platní môže byť aj vyklenutie platne po odľahčení (škandinávsky štít).

#### Iné ako tektonické zemetrasenia

V okolí sopiek pri prechode lávy z hĺbky na povrch vznikajú zemetrasenia vyvolané vulkanickou činnosťou (vulkanické, sopečné zemetrasenia).

Otrasy môžu byť spôsobené aj prepadnutím stropov podzemných dutín. Či už prirodzených ako sú krasové jaskyne, alebo umelých ako sú napríklad opustené bane. Takéto zemetrasenia označujeme ako rútivé.

Zemetrasenia môžu vznikať v rôznych hĺbkach. Špeciálnym prípadom sú tie s hlbokými ohniskami 300 – 800 km, ktorých mechanizmus nie je presne známy.

Vznik zemetrasení môže ovplyvňovať aj ľudská aktivita. Napríklad naplnenie veľkých (najmä hlbokých) vodných diel, injektáž väčšieho objemu kvapalín do vrtov, podpovrchová ťažba nerastných surovín, hlavne pri ťažbe pomocou pomocných pilierov alebo pri ťažbe ropy a plynu. V prípade, že otrasy boli spôsobené ľudskou činnosťou hovoríme o indukovanej seizmicite.

### Sprievodné javy zemetrasení

Následky zemetrasenia závisia na jeho sile, na hĺbke, v ktorej sa odohráva, a na povahe hornín na povrchu. Zem sa môže roztvoriť, vysunúť hore alebo sa prepadnúť. Vo vysočinách sa môžu vyskytnúť lavíny a zosuvy pôdy. Medzi ďalšie sekundárne prejavy zemetrasení patrí napríklad padanie skál, či bahenné a sutinové prúdy. V dôsledku zemetrasení dochádza aj k zmene hladiny spodnej vody, čo môže spôsobiť stekutenie vodou nasýtených pieskov. To vedie k následným zosuvom, alebo zrúteniu budov z dôsledku destabilizácie podložia.

Ak sa zemetrasenie odohráva v mori, môžu sa vytvoriť obrovské vlny nazývané cunami. Na otvorenom mori sú tieto vlny ťažko zistiteľné. Ženú sa po mori rýchlosťou až 790 km za hodinu. Ale ako sa blíži k pobrežiu, spomaľujú sa, zatiaľ čo ich veľkosť vzrastá. Keď sa cunami blíži k brehu, more najskôr ustúpi a potom sa priženie množstvo obrovských vĺn. Keď sa cunami koncentruje do malých úžin, môže sa zdvihnúť až 20 metrov nad zem a zmetie všetko čo je v ceste. Pri zemetrasení v roku 1755 zasiahla portugalský Lisabon 17 metrov vysoká vlna cunami. Ďalšie otrasy so sebou priniesli zosuvy pôdy a požiare.

Dôkladné mapovania a monitorovanie zemetrasnej aktivity vedcom umožňuje identifikovať pásma zemetrasenia a pozorovanie rôznych sprievodných signálov môže upozorniť na hroziace nebezpečenstvo. V pásmach zemetrasenia sa napríklad monitoruje voda v studniach. Tesne pred uvoľnením napätia môže totiž dochádzať k uvoľneniu radónu do podzemnej vody a tak zvýšenie radónu vo vode v studniach upozorňuje na možnosť hroziaceho zemetrasenia. Pred zemetrasením zaznamenali vedci aj 10x väčšie vzdúvanie vodíkového plynu nad zlomovou líniou ako je obvyklé. Taktiež môže dochádzať k uvoľňovaniu elektricky nabitých plynov, ktoré môžu slabo svietiť.

### 4. Seizmické vlnenie

Ako bolo už spomenuté, zemetrasenie je náhle uvoľnenie nahromadenej energie v litosfére. Časť tejto energie sa šíri v zemskom telese vo forme seizmických vĺn. Okrem zemetrasenia ich môžu generovať aj napríklad svahové zosuvy, fázové zmeny vo vnútri Zeme, vietor, morské vlny a príliv alebo ľudský činnosť (výbuchy, štart rakiet, vibračné zariadenia,...). Poznatky o šírení seizmických vĺn majú veľký význam pre poznanie mechanizmu a účinkov zemetrasenia a tiež poskytujú informácie o zemskom vnútre. Problematike šírenia sa seizmických vĺn bola venovaná časť textu "Seizmické metódy", preto táto kapitola sumarizuje iba základné poznatky.

Seizmické vlnenie sa zo zdroja zemetrasenia šíri všetkými smermi. Rozlišujeme dva základné typy seizmických vĺn - objemové vlny a povrchové vlny. Objemové vlny sa šíria celým objemom zemského telesa a delíme ich na *primárne* (pozdĺžne, P), ktoré prichádzajú do bodu pozorovania ako prvé a *sekundárne* (priečne, S), ktoré ich nasledujú. S vlny sa nešíria v kvapalinách, takže neprechádzajú ani tekutým vonkajším jadrom Zeme a preto vzniká na opačnej strane Zeme oproti ohnisku oblasť tieňa. Povrchové vlny sa šíria len v blízkosti zemského povrchu, pričom hĺbka dosahu závisí od ich periódy (dlhoperiodické s periódou cca 200 s zasahujú až do vrchného plášťa). Rozdeľujeme ich na *Rayleyghove* (R) a *Loveove* (L) vlny. Povrchové vlny majú oproti objemovým vyššiu periódu a aj amplitúdy a registrované sú až po príchode S vĺn. Šírenie sa seizmických vĺn zemským telesom je znázornené na obr. 3. Rýchlosť šírenia sa seizmických vĺn závisí od viacerých faktorov. Mení sa napríklad s hĺbkou. Preto nie sú seizmické lúče znázorňujúce šírenie sa vlnenia priamkové, ale zakrivené.



**Obr. 3:** Šírenie sa seizmických vĺn (upravené podľa <u>http://schools.matter.org.uk/Content/Seismology/shadow\_zone.html</u>, august 2010).

Záznam príchodu seizmických vĺn do miesta registrácie je na obr. 4.



**Obr. 4:** Záznam príchodu seizmických vĺn do miesta registrácie (http://samjshah.files.wordpress.com/2008/07/seismogram-1.gif).

### 5. Registrácia zemetrasení

Seizmológia je do značnej miery vedou založenou na analýze seizmogramov, teda časových záznamov pohybu častíc horninového prostredia. Prístroj, ktorý tento pohyb vníma je seismometer. Názov pochádza z gréckeho *seismós* (otrasy, chvieť sa) a *métron* (merať). Ak má seismometer aj záznamové zariadenie označuje sa ako seizmograf.

Prvý prístroj, ktorý bol schopný indikovať pohyb pôdy (seismoskop), skonštruoval v Číne v roku 132 n. l. Čang Cheng. Išlo o veľkú bronzovú nádobu s priemerom cca 2 m, ktorá mala po obvode dračie hlavy držiace v papuli bronzovú guľôčku a pod nimi rozmiestnené nádobky v podobe ropúch s roztvorenými ústami (obr.5). Pri otrasoch guľôčka vypadla drakovi z papule do úst bronzovej ropuchy. To vydalo zvuk upozorňujúci na otrasy a umožnilo aj určiť odkiaľ zemetrasenie prichádza.



**Obr. 5:** Replika a schéma prvého seismoskopu (vo vnútri nádoby bolo kyvadlo, ktoré pravdepodobne otváralo tlamu draka).

Označenie seizmometer bolo prvý krát použité na pomenovanie prístroja, ktorý v roku 1841 navrhol škótsky fyzik J. D. Forbes. Po roku 1880 bola väčšina seizmometrov vyvinutá týmom J. Milne, J. A. Ewing a T. Gray pracujúcich v Japonsku. Na Slovensku bol prvý seizmograf umiestnený v observatóriu v Hurbanove v roku 1902.

Seizmometre sú založené na princípe zotrvačnosti a používajú kyvadlo ako senzor. Rám seizmometra je pevne pripojený k povrchu zeme (najlepšie k skale). Pri pohybe pôdy v dôsledku príchodu seizmických vĺn dochádza k relatívnemu pohybu voľne zaveseného kyvadla voči rámu. Aby relatívny pohyb kyvadla čo najpresnejšie zodpovedal okamžitému pohybu pôdy, musí byť súčasťou seizmometra tlmiaci mechanizmus. Pôvodne sa pohyb kyvadla zaznamenával na papier navinutý na otáčavom bubne. U niektorých prístrojov sa zápis realizoval tenkou ihlou na začadený papier. Prvé seizmometre mali horizontálne kyvadlo, neskôr sa začali používať aj vertikálne seizmometre. Schéma seizmografu je na obr. 6.



Obr.6: Schematický nákres seizmografu (http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/seismology).

Dnešné seizmografy sú samozrejme schopné prevádzať zaznamenaný pohyb na elektrický signál. Zotrvačnou hmotou býva magnet, ktorý sa na pružine pohybuje v cievke, prípadne zotrvačnú hmotu tvorí cievka pohybujúca sa v magnete spojenom s rámom seizmometra. V oboch prípadoch pohyb cievky v magnetickom poli indukuje elektrické napätie. To sa prevádza analógovo-digitálnym prevodníkom do digitálnej formy a následne sa spracúva na počítači. Súčasné prístroje sú schopné registrovať výchylky 10<sup>-7</sup> mm a menšie.

Bežne sa používajú trojzložkové seismografy, takže seizmogram má štandardne zaznamenané 3 zložky (obr.7 a 8) – vertikálnu a dve horizontálne orientované v smere východ-západ (EW) a sever-juh (NS). Podľa frekvencie registrovaného vlnenia (tá závisí od veľkosti zotrvačnej hmoty) máme seismografy krátkoperiodické (vysokofrekvenčné, na monitoring slabých a blízkych zemetrasení), strednoperiodické, širokopásmové a veľmi širokopásmové. Na zaznamenanie silných zemetrasení (napr. v blízkosti zlomu) sa používajú akcelerometre.



**Obr. 7.** Tri zložky seizmického pohybu pôdy zaznamenaného krátkoperiodickým seizmografom na seizmickej stanici Bratislava - Železná Studnička. Epicentrum zemetrasenia bolo v Perneckej ohniskovej zóne, jeho lokálna magnitúda bola 2.2 a epicentrálna vzdialenosť bola 17 km. PG - príchod P vlny, SG – príchod S vlny (Moczo a Labák, 2000).



**Obr. 8.** Tri zložky seizmického pohybu pôdy zaznamenaného širokopásmovým seizmografom na seizmickej stanici Bratislava - Železná Studnička. Epicentrum zemetrasenia bolo v Turecku na severoanatolskom zlome, jeho magnitúda z objemových vĺn bola 6.3 a epicentrálna vzdialenosť bola 1350 km. Vyznačené sú príchody P (PN) a S (SN) vĺn a skupina povrchových vĺn (Moczo a Labák, 2000).

Seismografy sú umiestnené v seizmických staniciach. V jednej stanici býva umiestnených viacero trojzložkových sústav s rôzne veľkou zotrvačnou hmotou. Seizmogram zaznamenaný na takejto stanici potom dáva v príslušnom frekvenčnom intervale úplnú informáciu o seizmickom pohybe pôdy na danom mieste. Informácia o ohnisku a šírení sa seizmických vĺn medzi ohniskom a seizmickou stanicou je však obmedzená. Na to je potrebná sústava seizmometrov – tzv. seizmická sieť.

Na monitorovanie seizmickej aktivity v Zemi, výskum štruktúry Zeme a globálnych tektonických procesov slúžia celosvetové (globálne) seizmické siete. Najznámejšou je Svetová sieť štandardných seizmografov (WWSSN – World-Wide Standard Seismographic Network). Tvorí ju viac ako 100 seizmických staníc vo viac ako 60 krajinách.

Väčšina krajín má národnú sieť stálych seizmických staníc. Údaje z takýchto národných sietí sú priebežne zasielané do niekoľkých svetových centier, kde sú spracované a definitívne sa tam určí poloha hypocentra, čas vzniku a magnitúda zemetrasenia. Najdôležitejším centrom je Medzinárodné seizmologické centrum (ISC – International Seismological Center) v Newbury vo Veľkej Británii, ktoré každoročne vydáva celosvetový bulletin zemetrasení.

Okrem národnej siete seizmických staníc existujú ešte regionálne siete, ktoré sú zamerané na seizmickú aktivitu určitého záujmového územia (spravidla ide o tektonicky aktívny región) a lokálne siete, ktoré sa zriaďujú v okolí aktívneho zlomu a významných lokalít (napr. lokality jadrových elektrární, vodných diel). Úlohou lokálnych sietí je aj monitorovanie mikrozemetrasení, ktoré umožňujú lokalizáciu seizmoaktívnych zlomov v období medzi silnými zemetraseniami.

Naša Národná sieť seizmických staníc (NSSS) je tvorená 12 stanicami (obr. 9): Bratislava – Železná studnička (ZST), Modra – Piesok (MODS), Šrobárová (SRO), Iža (SRO1), Moča (SRO2), Hurbanovo (HRB), Vyhne (VYHS), Liptovská Anna (LANS), Kečovo (KECS), Červenica (CRVS), Kolonické sedlo (KOLS) a Stebnícka Huta (STHS). Seizmické stanice kontinuálne zaznamenávajú rýchlosť pohybu pôdy v reálnom čase. Tieto záznamy sú k dispozícii aj online na http://www.seismology.sk. Dátovým a spracovateľským centrom NSSS je geofyzikálny odbor Ústavu vied o Zemi SAV (ÚVZ SAV). Toto centrum má

k dispozícií záznamy aj zo staníc z okolitých krajín a vykonáva automatické lokalizácie zemetrasení, ktoré sú k dispozícií 10 minút po zaznamenaní javu. Okrem NSSS sú na Slovensku v okolí atómových elektrární Mochovce a Jaslovské Bohunice lokálne seizmické siete prevádzkované firmou Proseis a lokálna sieť na východnom Slovensku prevádzkovaná FMFI UK.



Obr.9: Lokalizácia seizmických staníc na území Slovenska (Madarás et al., 2012).

### 6. Lokalizácia zemetrasení (www.earthsci.org)

Na určenie polohy epicentra zemetrasenia, je potrebný záznam aspoň z troch seizmografických staníc umiestnených v rôznych vzdialenostiach od epicentra zemetrasenia. Zo seizmogramu z každej stanice sa určí S-P interval, čo je rozdiel v čase príchodu prvej S a P vlny. Roky pozorovaní a zaznamenávaní zemetrasení priniesli informáciu o šírení sa P a S vĺn cez Zem a ich čase príchodu do seizmografickej stanice. Na základe týchto informácií boli vytvorené krivky závislosti času príchodu vĺn a vzdialenosti seizmickej stanice od epicentra (obr.10a) – tzv. "travel time curves". Z týchto kriviek vidieť, že S-P interval narastá zo zväčšujúcou vzdialenosťou od epicentra. Takže pomocou S–P intervalu sme schopný určiť vzdialenosť epicentra od seizmickej stanice, kde bolo zemetrasenie zaznamenané. Okolo každej takejto stanice sa potom na mape vykreslí kružnica s polomerom určenej vzdialenosti od epicentra a určené epicentrum zemetrasenia je v mieste prieniku týchto troch kružníc (obr.10b).



Obr.10: Princíp lokalizácie zemetrasení (www.earthsci.org).

### 7. Seizmické stupnice, škály

Každé zemetrasenie je potrebné charakterizovať geografickými súradnicami miesta, kde došlo k uvoľneniu energie, hĺbkou ohniska, časom vzniku a veľkosťou. Veľkosť zemetrasenia sa posudzuje dvoma spôsobmi. Na základe vypočítanej veličiny z nameraných seizmografov magnitúdy M (lat. magnitudo = veľkosť, sila) a seizmických momentov, alebo pomocou stupníc intenzity makroseizmických účinkov zemetrasenia.

#### Intenzitné (makroseizmické) stupnice

Intenzitné stupnice kvantifikujú zemetrasenie na základe makroseizmických účinkov – prejavy na prírode, stavbách, a využívajú taktiež fyziologické vnemy ľudí. Najviac sa účinky zemetrasenia prejavujú v epicentre zemetrasenia a so vzdialenosťou klesajú. Makroseizmická intenzita sa udáva v stupňoch, pričom každý stupeň je charakterizovaný súborom pozorovateľných príznakov. V priebehu histórie bolo vytvorených viacero intenzitných stupníc a príznaky sú k jednotlivým stupňom v rôznych stupniciach priradené rôzne (nie všetky stupnice majú rovnaký počet stupňov). Preto je dôležité vždy pri uvádzaní stupňa intenzity zemetrasenia uviesť aj typ stupnice.

Jednu z prvých intenzitných stupníc vytvorili v 1883 Rossi a Forel – 10 stupňová Rossi-Forelová stupnica (RS). Tú neskôr upravil taliansky vulkanológ Mercalli (Mercalliho stupnica) a v roku 1902 ju taliansky geofyzik Cancani rozšíril na 12 stupňov avšak bez popisu jednotlivých stupňov. V roku 1912 ju nemecký geofyzik Sieberg kompletne prerobil a pridal k stupňom popis účinkov zemetrasenia. Neskôr bola publikovaná ako Mercali-Cancani-Siebergova stupnica (MCS). V roku 1931 Angličania Wood a Neumann MCS preložili do angličtiny. Dnes sa volá Modifikovaná Mercalliho stupnica (MM) a je používaná v USA. V roku 1964 naviazali na MCS Medvedev, Sponheuer a Karnik a publikovali stupnicu MSK-64 (príloha1). Bola najrozšírenejšou európskou makroseizmickou stupnicou a dodnes sa používa napríklad v Kazachstane, Rusku, a v Indii. Vo väčšine európskych štátov sa v súčasnosti používa EMS-98 (Europeam macrosesmic scale) prijatá Európskou seizmologickou komisiou v roku 1998.

Stupnica EMS-98 zahŕňa jednak klasifikáciu budov podľa zraniteľnosti, klasifikáciu škôd a kvantít jednak definície intenzitných stupňov. Budovy sú zaradené do šiestich tried zraniteľnosti A až F, pričom A sú najzraniteľnejšie a F najodolnejšie budovy s vysokou úrovňou antiseizmického dizajnu. Zaradenie budovy do príslušnej triedy závisí od kvality vyhotovenia a údržby, geometrickej pravidelnosti, duktility, polohy, spevnenia, úrovne antiseizmického dizajnu a dôležitosti budovy. Väčšina budov v historických jadrách miest na Slovensku patrí do triedy A alebo B, moderné budovy spravidla do triedy zraniteľnosti C (Moczo a Labák, 2000).

Krátka forma EMS-98 je uvedená v tabuľke 2. Táto forma je určená len na vzdelávacie účely a nie je vhodná na určenie intenzity. Celé znenie vo viacerých jazykoch je uvedené na stránke národného výskumného centra pre vedy o Zemi v Nemecku (GFZ German Research Centre for Geosciences) - <u>http://www.gfz-potsdam.de/en/section/seismic-hazard-and-stress-field/projects/previous-projects/seismic-vulnerability-risk-intensity-scales/ems-98/language-versions-of-ems-98</u>.

Intenzita	Definícia	Skrátený popis typických účinkov
1	nepocítené	Nepocítené.
2	zriedkavo pocítené	Pocítené len jednotlivcami na niektorých miestach v domoch.
3	slabé	Zemetrasenie vnútri cítia niekoľkí (0-20%). Ľudia nanajvýš cítia hojdanie alebo ľahké chvenie.
4	značne pozorované	Zemetrasenie vo vnútri cítia mnohí (10-60%), vonku len výnimočne. Niekoľkí sú prebudení. Okná, dvere a riad štrngajú.
5	silné	Zemetrasenie vo vnútri cíti väčšina (50-100%), vonku niekoľkí. Mnohí spiaci sa prebudia. Niekoľkí sú vystrašení. Budovy vibrujú. Visiace objekty sa značne hojdajú. Malé predmety sú posunuté. Dvere a okná sa otvárajú a zatvárajú.
6	mierne ničivé	Mnohí sú vystrašení a vybiehajú von. Niektoré predmety padnú. Mnohé budovy utrpia malé neštrukturálne škody ako napr. vlásočnicové trhliny alebo odpadnuté malé kúsky omietky.
7	ničivé	Väčšina ľudí je vystrašená a vybiehajú von. Nábytok je posunutý. Predmety padajú z políc vo veľkom množstve. Mnohé dobre postavené bežné budovy utrpia stredné škody: opadá omietka, padnú časti komínov; v stenách starších budov sú veľké trhliny a priečky sú zrútené.
8	ťažko ničivé	Mnohí majú problémy udržať rovnováhu. Mnohé domy majú veľké trhliny v stenách. Niekoľko dobre postavených bežných budov má vážne poškodené steny. Slabé staršie budovy sa môžu zrútiť.
9	deštruktívne	Všeobecná panika. Mnoho slabých budov sa zrúti. Aj dobre postavené bežné budovy utrpia veľmi ťažké škody: ťažké poškodenie stien a čiastočne aj štrukturálne škody.
10	veľmi deštruktívne	Mnohé dobre postavené bežné budovy sa zrútia.
11	devastujúce	Väčšina dobre postavených bežných budov sa zrúti. Aj niektoré budovy s dobrým antiseizmickým dizajnom sú zničené.
12	úplne devastujúce	Takmer všetky budovy sú zničené.

Tab. 2: Krátka forma makroseizmickej stupnice EMS-98 (Moczo a Labák, 2000).

V súčasnosti používané stupnice (MCS, MM, EMS -98, MSK-64) majú 12 stupňov, iba v Japonsku sa používa 7 stupňová stupnica JMA. Porovnanie makroseizmických stupníc je v tabuľke 3.

MSK-64	мм	RF	JMA
1	1	1	0
	н	1-11	1
ш	ш	ш	н
IV	IV	IV-V	11-111
v	v	V-VI	ш
VI	VI	VI-VII	IV
VII	VII	VIII-	IV-V
VII	VII	VII+-IX-	v
IX	IX	IX+	V-VI
x	x	x	VI
XI	XI	-	VII
XII	XII	-	-

Tab. 3: Porovnanie rôznych používaných makroseizmických stupníc.

Určenie makroseizmickej intenzity po zemetrasení pozostáva zo zberu a vyhodnotenia údajov. Zber údajov sa robí jednak pomocou makroseizmických dotazníkov a jednak pomocou prieskumu na mieste. Dotazníky sa používajú pri predpoklade, že účinky zemetrasenia neboli nikde väčšie ako 6 – 7° EMS-98. V prípade vyššieho stupňa sa vykonáva prieskum na mieste. Na Slovensku analyzuje makroseizmické účinky zemetrasení ÚVZ SAV (Moczo a Labák, 2000).

Makroseizmický dotazník a inštrukcie, čo robiť počas zemetrasenia a ak ste pocítili zemetrasenie, sú uvedené na internetovej stránke Ústavu vied o Zemi SAV (www. seismology.sk).

#### Magnitúdová škála ("Richterova")

Vzhľadom na to, že definovanie sily zemetrasenia pomocou intenzitných stupníc je dosť subjektívne, bola v roku 1935 CH. F. Richterom v kalifornskom technologickom inštitúte zostavená Richterova magnitúdová škála ako matematický prostriedok na porovnanie veľkosti zemetrasení. Veličinu magnitúda navrhol už v roku 1931 Japonec Wadati a Richter ju upravil a pomenoval. Richter magnitúdu definoval ako dekadický logaritmus najväčšieho rozkmitu vlny vo vzdialenosti 100 km od epicentra.

M = logA,

kde A je amplitúda výchylky v tisícinách mm.

*Magnitúda* sa teda zisťuje zo seizmogramov a používa sa na odhad energie uvoľnenej pri zemetrasení vo forme seizmických vĺn. Celkovo je definovaných 20 typov magnitúd, ale základné 4 typy sú: lokálna magnitúda ( $M_L$ ), magnitúda z objemových vĺn ( $m_b$ ), magnitúda z povrchových vĺn ( $M_s$ ) a momentová magnitúda ( $M_w$  alebo M) (Moczo a Labák, 2000).

Lokálna magnitúda  $M_L$  sa používa na určenie veľkosti lokálnych a regionálnych zemetrasení. Vypočítava sa z najväčšej amplitúdy, ktorá zvyčajne zodpovedá S vlne s periódou okolo 1s. Presný vzorec treba vždy určiť pre daný región.  $M_L$  má význam hlavne pre inžiniersku seizmológiu, pretože existuje závislosť medzi  $M_L$  a rozsahom škôd (mnoho stavebných štruktúr má prirodzenú periódu kmitania cca 1s). Pôvodne Richterom definovaná magnitúda patrí tiež medzi  $M_L$  a pôvodne slúžila na klasifikáciu blízkych kalifornských zemetrasení. Dnes sa v Kalifornii používa len veľmi zriedka. Treba si uvedomiť, že termín Richterova magnitúda či Richterova stupnica sú nesprávne termíny používané najmä médiami, na pomenovanie magnitúd, ktoré nie sú Richterovou magnitúdou (Moczo a Labák, 2000).

Na stanovenie ostatných troch základných typov magnitúd  $(m_b, M_S, M_W)$  sa používa všeobecný vzorec:

$$M = \log\left(\frac{A}{T}\right) + f(\Delta, h) + C_S + C_R,$$

kde A – amplitúda [µm]

T – perióda [s] danej fázy

f - korekcia na epicentrálnu vzdialenosť  $\Delta$  a hĺbku hypocentra h

Cs – korekcia na geologické podmienky pod seizmickou stanicou

C<sub>R</sub> – korekcia na regionálne podmienky a process v ohnisku (Moczo a Labák, 2000).

м	seizmické prejavy	počet/rok
M < 2,5	zaznamenané iba prístrojmi, obecne nepocítené	900 000
$2,5 \le M \le 5,4$	menšie poškodenia, často pocítené	30 000
$5,5 \le M \le 6,0$	slabé poškodenie budov	500
$6,1 \le M \le 6,9$	môže byť deštruktívne vo veľmi osídlenej oblasti	100
$7,0 \le M \le 7,9$	spôsobí vážne poškodenia, väčšie zemetrasenie	20
M ≥8	úplné zničenie takmer celej spoločnosti, veľké zemetrasenie	1 každých 5 až 10 rokov

Tab. 4: Makroseizmické prejavy zodpovedajúce určitej magnitúde a ich početnosť.

Magnitúdová stupnica nemá teoreticky ani dolnú ani hornú hranicu. Zemetrasenia s  $M \le 2$  sa označujú ako mikrozemetrasenia. Horná hranica magnitúdovej stupnice je prakticky daná súdržnosťou hornín. Makroseizmické prejavy zodpovedajúce určitej magnitúde sú uvedené v tabuľke 4.

### Energia zemetrasenia

Z celkovej energie uvoľnenej pri zemetrasení vieme určiť len tú časť, ktorá sa vyžiari vo forme seizmických vĺn a je zaznamenaná na seismograme (cca 30% celkovej uvoľnenej energie). Túto časť energie (E) môžeme odhadnúť pomocou empirického vzťahu:

$$\log E = 4.8 + 1.5M_S$$
,

kde E je v jouloch.

Empirický vzorec medzi energiou *E* a magnitúdou  $M_S$  možno dobre využiť na porovnanie energií uvoľnených pri zemetrasení s magnitúdou  $M_S$  a pri zemetrasení s magnitúdou  $M_S + 1$ . Energia uvoľnená pri zemetrasení s magnitúdou o 1 väčšou je 31.6krát väčšia! (Moczo a Labák, 2000).

Energia katastrofálnych zemetrasení sa často porovnáva energiou uvoľnenou pri výbuchu určitého množstva trinitrotoluénu (TNT). Porovnanie je uvedené v tabuľke 5 a závislosti magnitúdy a uvoľnenej energie je znázornená na obrázku 11.

М	odpovedajúca energia výbuch TNT	príklad zemetrasenia	
-1,5	1 g	porušenie hornín na lab. stole	
1	200 g	malá nálož pri stavebných prácach	
3,5	450 kg	výbuch v kameňolome/bani	
4,5	32 t	priemerné tornádo	
5,5	500 t	Little Skull Mtn., NV, 1992	
6,0	2670 t	Double Spring Flat, NV, 1994	
6,5	31 550 t	Northridge, CA 1994	
7,0	199 000 t	Hyogo-Ken Nanbu, Jap, 1995	
7,5	1 000 <u>000</u> t	Landers, CA, 1992	
8,0	6 270 000 t	San Francisco, CA, 1906; Indonézia – Sumatra 2007	
8,5	8,5 31 550 000 t Anchorage, AK, 1964		
9,0	199 999 000 t	Chile, 1960	
10,0	6,3 bilión t	zlom typu <u>San-Andreas</u> okolo celej Zeme	
12,0	1 trilión t	prelomenie zeme cez celý stred	

Tab. 5: Porovnanie energie uvoľnenej pri zemetrasení a pri výbuchu TNT.



Obr. 11: Závislosť magnitúdy a množstva uvoľnenej energie.

Pri žiadnom inom krátkodobom fyzikálnom procese na Zemi sa jednorázovo neuvoľní toľko energie ako pri veľkom zemetrasení. Pri zemetrasení v Chile v r. 1960 sa uvoľnilo 1 000 000 krát viac energie ako pri výbuchu atómovej bomby v Hirošime (Moczo a Labák, 2000).

#### Vzťah magnitúda – intenzita (Viskup in Gajdoš a kol., 2001)

Magnitúda a intenzita merajú rôzne charakteristiky zemetrasenia. Obe hodnoty sú závislé od viacerých premenných a problematika ich vzťahu je veľmi komplikovaná. Vzťah medzi magnitúdou a epicentrálnou intenzitou  $I_0$  sa zvyčajne stanovuje pre jednotlivé seizmické oblasti, pričom

v niektorých vzťahoch sa berie do úvahy i hĺbka ohniska. Na Slovensku je táto závislosť vyjadrená vzťahom (prebraté z Viskup in Gajdoš a kol., 2001)):

$$M = 0.55I_0 + 0.95.$$

V minulosti sa makroseizmická intenzita používala na stanovenie seizmického ohrozenia na určitom území, či záujmovej lokalite – určovala sa maximálna očakávaná intenzita pre danú oblasť. Pre projektantov na stanovenie seizmického zaťaženia stavebných konštrukcií je však dôležitá hodnota zrýchlenia pohybu pôdy na voľnom povrchu. Vzhľadom na to, že hodnotu zrýchlenia nemožno priamo odvádzať z intenzity, stanovenie seizmického ohrozenia spočíva v určení maximálne očakávaných hodnôt zrýchlenia.

Poznámka

Stanovenie hodnoty zrýchlenia pre projektantov na základe makroseizmickej intenzity pomocou tabuliek nie je korektné.

#### Zrýchlenie

Zrýchlenie *a*, sa určuje z akcelerogramu (seizmický záznam priebehu zrýchlenia, meraný akcelerografom, obr. 12) alebo zo seizmogramu zaznamenavajúceho veľkosť výchylky častíc z rovnovážnej polohy spôsobenú prechodom seizmickej vlny. Tento pohyb častíc, v prípade harmonickej vlny, môžeme vyjadriť ako:

#### $d = A_0 sin\omega t$ ,

kde A [µm, mm, cm,...] je amplitúda a vyjadruje veľkosť vychýlenia častíc z rovnovážnej polohy pri prechode vlny,  $A_0$  je maximálna amplitúda vlny,  $\omega$  je kruhová frekvencia ( $\omega = 2\pi f$ ), f je frekvencia kmitania častíc prostredia a t je čas.



**Obr. 12:** Akcelerogram zaznamenaný pri zemetrasení v El Centro v r. 1940. Išlo o najsilnejšie zaznamenané zemetrasenie, spôsobené pohybom na zlome Imperial v S Amerike, ktoré zasiahlo Imperial Valey. Hlavný otras mal magnitúdu 7,1 (X° Richterovej stupnice) a po 1,5 hodine nasledoval dotras s magnitúdou 5,5 (IX° Richterovej stupnice) (http://www.sfsepehr.com/Sohail/elcentro.htm).

To ako rýchlo dochádza k zmene z rovnovážnej polohy vyjadruje rýchlosť kmitania častíc prostredia – v [m/s]. Rýchlosť je z matematického hľadiska derivácia dráhy podľa času, takže vzťah pre rýchlosť je:

 $v = \omega A_0 cos \omega t.$ 

#### Poznámka

Treba si uvedomiť rozdiel medzi rýchlosťou šírenia sa seizmickej vlny ( $v_P = 200 - 8000 \text{ m/s}$ ) a rýchlosťou kmitania častíc prostredia (až do 1 m/s).

Keďže zrýchlenie je derivácia rýchlosti v čase (prípadne druhá derivácia výchylky častíc prostredia zaznamenanej seizmografom), dostávame pre zrýchlenie vzťah:

$$a = -\omega^2 A_0 sin\omega t$$
.  
Zrýchlenie sa vyjadruje v cm/s<sup>2</sup>, m/s<sup>2</sup> alebo g, kde g je gravitačné zrýchlenie.

# 8.Rozdelenie zemetrasení

Zemetrasenia môžeme rozdeliť podľa viacerých kritérií. Podľa pôvodu, veľkosti, epicentrálnej vzdialenosti, hĺbky ohniska, veľkosti magnitúdy, geografického rozloženia alebo tektoniky litosferických dosiek.

### Rozdelenie zemetrasení podľa pôvodu

zemetrasenie	výskyt	popis
Rútivé	3 %	Vznik - prepadnutie stropov podzemných dutín, výskyt v krasových oblastiach, malá energia, makroseizmické pole max. niekoľko desiatok km, značné škody nad plytkými ohniskami
Sopečné (vulkanické)	7 %	Malé, slabé, vyskytujú sa v seizmických rojoch, makroseizmický dosah 30 – 50 km, mikroseizmický dosah 150 – 200 km, napr. pri výbuchu sopky
Tektonické (dislokačné)	90 %	Prejav horotvorných síl v zem. kôre; výskyt v oblasti stredooceánskych chrbtov, treťohorných pásmových pohorí, mladých zlomov
S hlbokými ohniskami		Predtým tektonické

### Rozdelenie zemetrasení podľa veľkosti dosahu

zemetrasenie	makroseizmický dosah km	mikroseizmický dosah km
miestne	200	500
malé	300	5 000
stredné	500	10 000
veľké	1 000	18 000
svetové	> 1 000	> 18 000

### Rozdelenie zemetrasení podľa epicentrálnej vzdialenosti

zemetrasenie	epicentrálna vzdialenosť
blízke	0°- 20°
strednej vzdialenosti	20°- 45°
vzdialené	45°- 90°
veľmi vzdialené	90°- 180°

Epicentrálna vzdialenosť vid. kapitola "Základné pojmy".

### Rozdelenie zemetrasení podľa hĺbky ohniska

zemetrasenie	hĺbka ohniska km	poznámka
povrchové	< 4	ohnisko vo vrchnom sedimentárnom obale
plytké	< 60	ohnisko v zemskej kôre
stredné	60 - 300	ohnisko v najvrchnejšej časti zemského plášťa
hlboké	300 - 800	ohnisko vo vonkajšej časti zemského plášťa

Rozdelenie	zemetrasení	podľa	veľ kosti	magnitúdy

zemetrasenie	rozsah magnitúdy	anglické označenie
veľké	M > 8	great
väčšie	7 < M < 7,9	major
silné	6 < M < 6,9	strong
mierne	5 < M < 5,9	moderate
ľahké	4 < M < 4,9	light
menšie	3 < M < 3,9	minor

### Rozdelenie zemetrasení podľa geografického rozloženia

Väčšina zemetrasení je koncentrovaná do relatívne úzkych dlhých zón (obr. 13). K silným zemetraseniam dochádza hlavne v páse obopínajúcom Tichý oceán (Japonsko, Indonézia, Chile, Mexiko, Kalifornia). V rámci Európy hlavne v Stredomorí (Grécko, Taliansko, Macedónsko, Čierna Hora, Chorvátsko). V strednej Európe sú zemetrasenia viazané najmä na posuny na zlomoch, tie sú však väčšinou malé a tak sa tu katastrofické zemetrasenia vyskytujú iba výnimočne.

Existuje viacero rozdelení zemetrasení podľa geografického rozloženia. Uvedené sú dve.

1) geografická oblasť	poznámka
cirkumpacifické pásmo	80% zemetrasení Kurily, Japonské ostrovy, Filipíny, Nový Zéland, západné pobrežie Ameriky
mediteránne pásmo	Azory, východný okraj Stredozemného mora s Alpami a Karpatmi, malá Ázia, Irán, India, južná Čína, Sundské ostrovy, Stredná Amerika, Antily
severná Európa	
okolie priekopových prepadlín	Tichý oceán

2) geografická oblasť	poznámka
Tichooceánsky pás	veľké ostrovné oblúky: Aleuty, Kurily, Japonské o., Filipíny, Indonézia, Tonga a Kermadec, Fidži, Nové Hebridy, Šalamúnové a Mariánske o., západné pobrežie Ameriky, Karibské more, Sandwichove o. 71 % celkovej seizmickej energie
Alpsko-Himalájsky pás	Indonézia – Himaláje – Stredozemné more (+ Alpy a Karpaty) – Pyrenejský polostrov 17 % uvoľnenej energie Zeme
stredooceánske chrbty	7 % celkovej seizmickej energie
kontinentálne riftové oblasti	napr. východoafrické rifty 1 % celkovej seizmickej energie



Obr. 13: Globálne rozloženie zemetrasení (https://maxwatsongeography.files.wordpress.com).

# Rozdelenie zemetrasení podľa tektoniky litosferických dosiek

zóna	poznámka
subdukčné zóny	Aleuty, Kamčatka, Japonsko, Filipíny, stredná a južná Amerika, okolie Stredozemného mora
riftové zóny	Vznik podmorských chrbtov tvoriacich súvislý pás prechádzajúci všetkými oceánmi, na niektorých miestach sa vynárajú nad hladinu (Island, východoafrický prielom)
mladé pásmové pohoria	Pyreneje, Apeniny, Alpys, Dinaridy, Taurus, Pontus, Zagros, Himaláje, Kordilery, Andy, Novozélandské Alpy, zlomy na ohyboch týchto pohorí – Vrancea Rumunsko
zóny pozdĺž veľkých transformných zlomov	San Andreas (San Francisco, Los Angeles), alpský zlom na NZ, levantský zlom (Arabský záliv a Mŕtve more), severoanatólsky zlom (od Grécka – Egejské more - Turecko – po Irán)

### 9. Početnosť zemetrasení

Každoročne je na Zemi zaznamenaných mnoho zemetrasení rôznej veľkosti. Vo všeobecnosti môžeme povedať, že kým menších zemetrasení je viac a častejšie sa opakujú, väčších je menej a opakujú sa zriedkavejšie. Vzťah medzi veľkosťou zemetrasenia (M) a počtom zemetrasení (N) prvý krát publikovali Richter a Gutenberg v roku 1956. Nazýva sa Gutenberg-Richterov vzťah (GR):

$$\log N = a - bM$$
 alebo  $N = N^{a-bM}$ ,

kde N je počet zemetrasení s magnitúdou väčšou alebo rovnou M a *a* a *b* sú konštanty, ktoré sa určujú experimentálne pre konkrétnu oblasť a časové obdobie. Konštanta *a* meria stupeň seizmicity oblasti – čím väčšia hodnota *a*, tým je oblasť seizmicky aktívnejšia. Hodnota *b* sa v seizmicky aktívnych regiónoch pohybuje okolo 1 a vyjadruje gradient GR vzťahu. Môže sa pohybovať v intervale od 0,5 do 2 v závislosti od podmienok danej oblasti. Vyššie hodnoty *b* indikujú výskyt väčšieho množstva malých zemetrasení na jedno veľké, nižšie hodnoty *b* vyjadrujú menší počet malých zemetrasení (obr. 14).



**Obr. 14:** Graf závislosti počtu zemetrasení a veľkosti magnitúda (Gutenberg-Richterov vzťah) pre rôzne hodnoty parametra *b*.

Na určenie koeficientov sa robia grafy početnosti zemetrasení pre konkrétnu oblasť a dané časové obdobie. Používajú sa dva typy grafov. Buď sa magnitúda registruje v intervale  $\pm$  M, alebo sa robia grafy kumulatívne, kedy sa k danej magnitúde M zaraďujú všetky zemetrasenia s magnitúdou rovnou alebo väčšou ako M (k zemetraseniam s M = 6,0 - 6,4 sa zaradia všetky zemetrasenia s M  $\geq$  6). Príklad takéhoto grafu je na obr. 15. Treba si uvedomiť, že y-os na grafoch početnosti býva logaritmická.



**Obr.15:** Rozloženie zemetrasení v grafe závislosti veľkosti zemetrasenia a počtu výskytu, zaznamenaných vo Švajčiarsku v období 1975 – 1999 (červené štvorce). Zemetrasenia s magnitúdou menšou ako Mc nie sú švajčiarskou seizmologickou sieťou detekované. Sklon zelenej priamky zodpovedá hodnote *b* a jej priesečník s  $M_0$  hodnote *a*. Extrapoláciou tejto priamky sa dá určiť pravdepodobnosť výskytu zemetrasenia s ľubovoľnou magnitúdou (napr. pre M6+ je 0,8 % ročne). (https://www1.ethz.ch/earthquake/education/NDK/NDK)

Koeficienty *a* a *b* sa používajú na výpočet periódy opakovania zemetrasení a sú dôležité pri určovaní seizmického hazardu. U nás sa zisťovaním týchto koeficientov zaoberá ÚVZ SAV Bratislava. Koeficienty sa stanovujú pre jednotlivé seizmogénne zóny, alebo pre záujmové lokality pre zemetrasenia v určitej vzdialenosti od nej (napr. pre atómovú elektráreň pre zemetrasenia v polomere 150 km od elektrárne).

### 10. Seizmické ohrozenie

(spracované podľa Moczo a Labák, 2000)

Je zrejmé, že seizmický pohyb pôdy na danom mieste zemského povrchu počas zemetrasenia závisí od troch faktorov - seizmického ohniska, prostredia medzi ohniskom a lokálnou geologickou štruktúrou a samotnej lokálnej geologickej či topografickej štruktúry. Značný vplyv lokálnych geologických podmienok na výsledný seizmický pohyb dramaticky potvrdzuje aj zemetrasenie v Mexiku z roku 1985 (M = 8,1), pri ktorom boli najväčšie škody zaznamenané v hlavnom meste vzdialenom od epicentra až 360 km, hoci v bližších oblastiach zemetrasenie nespôsobilo závažnejšie škody. Dôvodom poškodení boli rezonančné javy vo vrstvách nekonsolidovaných jazerných sedimentov a navážok pod hlavným mestom, ktoré boli príčinou anomálneho seizmického pohybu.

Analýza lokálnych geologických podmienok a uváženie možných lokálnych efektov zemetrasenia je nutnou súčasťou každého *seizmického rajónovania* (vyčlenenie rajónov rôznej miery seizmickej mobility na záujmovom území) a určenia *seizmického ohrozenia* záujmovej lokality či oblasti.

Seizmické ohrozenie je pravdepodobnosť Pi výskytu seizmického pohybu úrovne *i* (alebo I > i) počas daného časového intervalu *t* na zvolenej záujmovej lokalite *L. Seizmické riziko* je pravdepodobnosť *R* vzniku škody v dôsledku seizmického ohrozenia. Seizmicita je pravdepodobnosť Pm vzniku zemetrasenia s magnitúdou *m* (alebo M > m) v časovom intervale *t* v určitej ohniskovej zóne *S.* Seizmické ohrozenie a seizmické riziko sa vzťahujú k zvolenej záujmovej lokalite, seizmicita je charakteristikou ohniskovej zóny.

Na výpočet seizmického ohrozenia sa používajú rôzne charakteristiky seizmického pohybu (makroseizmická intenzita, akcelerogram, špičkové zrýchlenie odvodené zo seizmogramu,...) v závislosti od charakteru dostupných údajov a účelu analyzovaného ohrozenia. Pre účely stavebnej normy pre bežné stavebné konštrukcie sa používajú hodnoty špičkového zrýchlenia. Pre niektoré výpočty seizmického rizika môže byť seizmické ohrozenie charakterizované makroseizmickou intenzitou (ale určite nie pre stavebné konštrukcie).

Dĺžka obdobia, pre ktorú sa robí odhad seizmického ohrozenia (*t*) závisí od životnosti stavebných štruktúr. Pre bežné stavby je to obdobie 50 rokov, pre lokality jadrových elektrární 1000 rokov.

Analýza seizmického ohrozenia má dva kroky:

- 1. identifikovanie a charakteristika zdrojových zón zemetrasení (napr. zlomy),
- 2. určenie seizmického pohybu pôdy na záujmovej lokalite.

Analýzu možno vykonávať deterministickou alebo pravdepodobnostnou metódou.

Deterministická metóda

Najskôr sa identifikujú ohniskové zóny (napr. zlomy) a každej sa priradí maximálne zemetrasenie s určitou hodnotou M alebo epicentrálnej intenzity (I<sub>0</sub>). Pre každú takúto zónu je určená najbližšia vzdialenosť od záujmovej lokality. Určí sa tzv. určujúce zemetrasenie – to, ktorého M (I<sub>0</sub>) sú dominantné v porovnaní s maximálnymi zemetraseniami z ostatných ohniskových zón. Hodnota seizmického ohrozenia je potom vypočítaná z hodnoty M a vzdialenosti určujúceho zemetrasenia pomocou empirického útlmového vzťahu. Výsledkom je teda napr. hodnota špičkového zrýchlenia spôsobená určujúcim zemetrasením. Chýba však údaj, či k presiahnutiu určitej hodnoty zrýchlenia dôjde raz za 50 alebo 1000 rokov (návratová perióda).

Výhodou je relatívna jednoduchosť výpočtu seizmického ohrozenia (zmenou maximálnej magnitúdy je možné ľahko určiť vplyv na výsledné charakteristiky seizmického ohrozenia.

Nevýhodou je, že nie je možné zahrnúť náhodné neurčitosti v seizmickom ohrození ani početnosť zemetrasení.

### Pravdepodobnostná metóda

Identifikujú sa ohniskové zóny a každá je charakterizovaná kumulatívnou početnosť ou zemetrasení. Určuje sa pravdepodobnosť ( $P_{Z>z|M, r}$ ), že dané zemetrasenie s magnitúdou M vo vzdialenosti *r* od záujmovej lokality presiahne určitú úroveň pohybu pôdy *z* a definuje sa tiež tzv. návratová perióda

z pravdepodobnosti presiahnutia  $P_{Z>z}$  počas určitého obdobia (napr. pre 10 % pravdepodobnosť (P = 10%) presiahnutia počas 50 rokov je návratová perióda príslušnej úrovne pohybu pôdy *z* približne 475 rokov). Pri tejto metóde sa testujú viaceré modely vytvorené použitím alternatívnych parametrov *a* a *b* vstupujúcich do výpočtu početnosti.

K hodnote pravdepodobnosti P prispievajú zemetrasenia zo všetkých ohniskových zón a pomocou výpočtu čiastkových príspevkov z jednotlivých magnitúdovo-vzdialenostných intervalov sa určí, ktoré zemetrasenie prispieva najviac.

V súčasnosti prevláda vo svete používanie pravdepodobnostných výpočtov. To, ktorý prístup je vhodnejší však závisí: 1) od účelu analýzy seizmického ohrozenia; 2) od vstupných údajov, ktoré sú k dispozícií a 3) od tvaru, v akom treba prezentovať výsledky ohrozenia. Postup základných krokov pre obe metódy je uvedený v tabuľke 5.

Deterministický výpočet	Pravdepodobnostný výpočet
1) Identifikácia zdrojových zón zemetrasení	1) Identifikácia zdrojových zón zemetrasení
2) Výber určujúceho zemetrasenie	2) Určenie početnostných vzťahov
3) Určenie útlmových vzťahov	3) Určenie útlmových vzťahov
4) Určenie seizmického ohrozenia na	4) Určenie seizmického ohrozenia
záujmovej lokalite	v záujmovej lokalite

Tab. 5: Prehľad základných častí deterministického a pravdepodobnostného výpočtu seizmického ohrozenia (Labák, 2006).

Na zistenie vplyvov lokálnych geologických pomerov na parametre seizmického pohybu sa zostavujú rôzne geologické modely, na ktorých sa potom testujú seizmické odozvy. Robí sa napríklad výpočet akcelerogramov pre 1-D, 2-D alebo 3-D modely. Konkrétny akcelerogram, vypočítaný na základe modelu lokálnych geologických pomerov, na prehodnotenie seizmického ohrozenia diaľnice D3 je na obr. 16. Takto získané parametre očakávaného seizmického pohybu predstavujú vstup pre výpočet očakávaného seizmického zaťaženia stavebných konštrukcií. Pre bežné stavby na území Slovenska sa seizmické zaťaženie stavebných konštrukcií určuje podľa normy EN 1998- 1/NA/Z1. V Európe je to norma EUROCODE 8.



Obr.16: Akcelerogram pre povrch prostredia na úseku diaľnice D3 (Janotka, 2010).

#### Poznámka

V zmysle normy EN 1998-1/NA/Z1 (Eurokód 8) je seizmické riziko definované jedným parametrom **efektívnym špičkovým** zrýchlením na povrchu voľného terénu skalného podložia a zodpovedá zemetraseniu s periódou výskytu 450 rokov. Vzťahuje sa stavebné na objekty s priemernou životnosťou 50 – 100 rokov.

### 11. Seizmicita Slovenska

Seizmická aktivita na Slovensku je zaznamenávaná už od roku 1034. Katalóg makroseizmicky pozorovaných zemetrasení od tohto obdobia má viac ako 650 záznamov o makroseizmicky zaznamenaných zemetraseniach na našom území. Zriadenie seizmickej stanice v Hurbanove (1902) a postupná modernizácie siete seizmických staníc od 20. storočia umožňovali čoraz presnejšiu lokalizáciu zemetrasení. Mapa dokumentovaných zemetrasení na území Slovenska za obdobie 1258 – 2006 je na obr. 17. Najsilnejšie dokumentované zemetrasenia na území Slovenska sú:

- stredoslovenské zemetrasenie 5.6.1443,  $I_0 > 8^\circ$  EMS-98 – zničilo Banskú Štiavnicu, poškodilo Kremnicu a pocítené bolo vo Viedni, Krakove aj Brne.

- komárňanské zemetrasenia 28.6.1763,  $I_0 = 7 - 8^{\circ}$  EMS-98 - v epicentálnej oblasti vznikli trhliny v pôde, v Komárne bolo zničených 7 kostolov a 279 domov, zahynulo 63 osôb a 102 bolo zranených. Makroseizmicky zasiahnutá oblasť dosahovala na J až po Belehrad, na JV po Temešvár a na SZ po Lipsko (87 000 km<sup>2</sup>). Zemetrasenie malo veľa dotrasov.

- dobrovodské zemetrasenie 9.1.1906,  $I_0 = 8 - 9^\circ$  EMS-98 - najsilnejšie zemetrasenie 20. storočia s epicentrom na našom území a prvé, ktoré bolo seizmometricky zaznamenané. V epicentrálnej oblasti sa tvorili v pôde trhliny hlboké až 200 cm, objavili sa nové vodné zdroje, makroseizmicky otrasená oblasť zasahovala do Rakúska, Maďarska a Čiech (30 000 km<sup>2</sup>).

V uplynulých desaťročiach bola seizmická aktivita na Slovensku nízka. Pravdepodobne ide o obdobie prípravy budúceho silného zemetrasenia, pretože tektonický vývoj sa na území Slovenska ešte nezastavil.

Na základe seizmologických a geologických údajov boli na Slovensku vyčlenené seizmoaktívne oblasti, resp. ohniskové zóny. Prvý krát boli definované Fusánom et. al (1979, 1981, 1987) a neskôr Šefarom et al. (1998). V priebehu nasledujúcich rokov boli viackrát prepracované a predefinované. Madarás et al. (2012) navrhol nasledovnú modifikáciu seizmicky aktívnych oblastí vyčlenených predchádzajúcimi autormi (Harašna et al. 2011; Madarás a Fojtíková, 2009) – obr.17:

A) oblasť Južné Slovensko s podoblasťami - Komárno

- Štúrovo

B) oblasť Západné Slovensko s podoblasťami – Záhorie

- Pernek-Modra

- Dobrá Voda

C) oblasť Stredné Považie s podoblasťami - Trenčín

- Žilina

D) oblasť Severné Slovensko s podoblasťami - Orava

- Tatry

- Spiš

E) oblasť Východné Slovensko s podoblasťami – Zemplín

- Šariš

- Slanské vrchy

F) oblasť Stredné Slovensko s podoblasťami – Banská Bystrica

- Krupina

G) seizmicky aktívne a potenciálne aktívne zlomové zóny.

V súčasnosti platí, že najaktívnejšou zónou je hlavne oblasť okolia Dobrej Vody, Malých Karpát a Záhoria. V ostatných ohniskových zónach je trend uvoľňovania energie viac-menej stabilizovaný. Epicentrá silnejších zemetrasení sa v poslednom období vyskytli v okolí Krupiny (1999), Vihorlatu (2003) a Vrbového (2003) (Madarás et al., 2012).



**Obr. 17:** Redefinované seizmicky aktívne oblasti na Slovensku. Epicentrá makro- a mikrozemetrasení od roku 1258 do 2006 sú z katalógu zemetrasení GFÚ SAV. A – F – seizmicky aktívne oblasti, 1 – 17 – zlomové zóny (1. Rába-Hurbanovo-Diósjeno, 2. malokarpatský, 3. Dobrovodský, 4. jastrabiansky, 5. strečniansky prielom, 6. chočský, 7. ružbašský, 8. okraj bradlového pásma na V Slovensku, 9. a 10. hornádske , 11. vikartovský, 12. muránsko-divínsky, 13. zdychavská línia, 14. rapavsko-lysecký, 15. čertovická línia, 16. stredoslovenské pásmo, 17. šindliarsky) (Madarás et al., 2012).

Informácie o súčasných zemetraseniach pocítených na Slovensku sú na slovenských seizmologických stránkach (<u>http://www.seismology.sk/Earthquake\_activity/</u>). Napríklad nedávne silnejšie zemetrasenie pocítené na Slovensku s epicentrom mimo územia Slovenska bolo 25.4.2016 v Rakúsku ( $M_L = 4$ ).

#### Seizmické ohrozenie územia Slovenska

Výsledné hodnoty charakteristík seizmického ohrozenia pre územie Slovenska ovplyvňujú údaje o zemetraseniach z ohniskových zón nielen na našom území, ale i v okolitých štátoch. Preto do pravdepodobnostného výpočtu seizmického ohrozenia Slovenska treba zahrnúť všetky ohniskové zóny, ktorých najbližšie vzdialenosti k záujmovej lokalite sú menej ako 150 km. Mapa seizmického ohrozenia Slovenska v hodnotách makroseizmickej intenzity je uvedená na obr. 18 a na obr. 19 je mapa seizmického ohrozenia pre Českú republiku, Poľsko a Slovensko v hodnotách špičkového zrýchlenie. Nová aktuálna mapa seizmického ohrozenia územia Slovenska v hodnotách špičkového zrýchlenia vypracovaná Geofyzikálnym ústavom SAV v r. 2012 je na obr. 20.

<u>Poznámka:</u> Hodnoty špičkového zrýchlenia sú najväčšie v oblasti Dobrej Vody a Komárna, hoci v oblasti stredného Slovenska sa v minulosti vyskytlo podobne silné zemetrasenie ako pri Komárne alebo Dobrej Vode. Dôvodom je návratová perióda, ktorá je v prípade najsilnejšieho stredoslovenského zemetrasenia väčšia ako 475 rokov.



**Obr. 18:** Mapa seizmického ohrozenia územia Slovenska v hodnotách makroseizmickej intenzity pre 475-ročnú návratovú periódu (<u>http://www.seismology.sk/Maps/)</u>.



**Obr. 19:** Mapa seizmického ohrozenia pre Českú republiku, Poľsko a Slovensko v hodnotách špičkového zrýchlenia pre návratovú periódu 475 rokov, t.j. 10% pravdepodobnosť presiahnutia počas 50 rokov (Moczo a Labák, 2000).



**Obr. 20:** Nová aktuálna mapa seizmického ohrozenia územia Slovenska v hodnotách špičkového zrýchlenia na skalnom podloží pre 475-ročnú návratovú periódu vypracovaná GFÚ SAV 2012. Na stavebné účely a projektovanie je potrebné použiť mapu vypracovanú pre potreby slovenskej technickej normy STN EN 1998-1/NA/Z2 (Eurokód 8), ktorú možno získať v Slovenskom ústave technickej normalizácie www. sutn.sk (http://www.seismology.sk/Maps/).

# Použitá a odporúčaná literatúra

Cieľom tohto učebného materiálu je poskytnúť študentom základné informácie o danej problematike. Text sú spracované informácie hlavne z prác:

Madarás, J., Pažák, P., Kristeková, M., Fojtíková, L., Labák, P., Cipciar, A., 2008: Zemetrasenia na Slovensku. Enviromagazín, roč. 13, č. 5, MŽPSR a SAZP, Banská Bystrica, str. 4 – 6.

Madarás, J., Fojtíková, L., Hrašna, M., Petro, Ľ., Ferianc, D., Briestenský, M., 2012: Vymedzenie seizmicky aktívnych oblastí na Slovensku na základe záznamov historických zemetrasení a súčasného monitorovania tektonickej a seizmickej aktivity. Mineralia Slovaca, Bratislava, 44/4, 351 – 364.

Moczo, P., Labák, P., 2000: Zemetrasenie a seizmické ohrozenie. Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava, 24 s.

Labák, P., 2006: Analýza seizmického ohrozenia a makroseizmické účinky zemetrasení. Nepublikovaný učebný text pre študentov geofyziky. GFÚ SAV Bratislava.

Žalman, P., 2004: Seizmicita. STU BA, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb,<br/>semestrálna práca, Bratislava (internetový zdroj:<br/>http://members.chello.sk/zalman/english/seismicity.html)

www.earthsci.org

### Ďalej boli použité informácie a zdroje:

Bolt, B. A., 1993: Earthquakes and Geological Discovery. Scientific American Library.

**Crampin, S., Gao, Y., 2015:** The Physics Underlying Gutenberg-Richter in the Earth and in the Moon. Journal of Earth Science, 26, 1, China, p. 134 – 139.

**Fusán, O., Ibrmajer, J., Plančár, J., 1979:** Neotectonics blocks of the West Carpathians. In: Babuška,V. &Plančár, J. (eds.): Geodynamic investigation in Czechoslovakia. Final Report. Veda, Bratislava, 187 – 192.

**Fusán, O., Ibrmajer, J., Kvitovič, J., Plančár, J., 1981:** Block dynamic of the West Carpathians. In: Zátopek, A. (ed.): Geophys. syntheses in Czechoslovakia. Final Report. Veda, Bratislava, 153 - 157.

**Fusán, O., Plančár, J., Ibrmajer, J., 1987:** Tektonická mapa podložia terciéru vnútorných Západných Karpát. In: Fusán, O. (ed.): Podložie terciéru vnútorných Západných karpát. ŠGÚDŠ, Bratislava, 123 s.

Gajdoš V., Janotka V., Pašteka R., Rozimant K., Viskup J., Mojzeš A., 2001: Základy aplikovanej geofyziky. Interné skriptá pre poslucháčov 2.roč. štud. odboru Geológia, Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky Prif UK Bratislava, elektronický formát.

**Hrašna, M., Ferianc, D., Petro, Ľ., 2011:** Čiastkový monitorovací system geologických faktorov životného prostredia Slovenskej republiky. Tektonická a seizmická aktivita územia. subsystem 02. Správa za obdobie: rok 2010. Manuskript, Archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 9 s.

**Janotka, V., 2010:** D3 úsek Čadca, Bukov-Svrčinovec, DSP (seizmický prieskum). Správa zhodnotenia seizmického rizika.

Labák, P., Brouček, I., 1996: Katalóg makroseizmicky pozorovaných zemetrasení na území Slovenska od roku 1034. (Verzia 1996). Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava.

**Madarás, J., Fojtíková, L., 2009:** seizmická aktivita na Slovensku vo vzťahu ku tektonike. In: Zbor. abstraktov Spoločného geologického kongresu Slovenskej a Českej geologickej spoločnosti. ŠGÚDŠ, Bratislava, 120 – 121.

Moczo, P., Labák, P., Cipciar, A., kristek, J., Kristeková, M., Bielik, M., Šajgalíková, J., Režuchová, D., 2002: 100 rokov seizmológie na Slovensku/100 Years of Seismology in Slovakia. geofyzikálny ústav SAV a Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, Bratislava, 106 s.

**Réthly, A., 1907:** Az 1906 évi Magyarországi földerengések. Die Erbeben in Ungarn im jahre 1906. M. Kir. Orsy. Meteorológiai és Földmágnességi Intézet, Budapest.

Šefara, J., Kováč, M., Plašienka, D., Šujan, M., 1998: seismogenic zones in the Eastern Alpine-Western Carphatian-Pannonian junction area. Geol. Carpath., 49, 4, 247 – 260.

**Zátopek, A., 1940:** Zemětřesná pozorování na Slovensku a bývalé Podkarpatské Rusi 1923 – 1938. Erdbebenbeobachtungen in der Slowakei und in ehem. karpaterussland 1923 – 1938. Spec. Práce, 2m, Publikace Geofysikálního ústavu v Praze. Specialarbeit Nr. 2, Prag, Inst. f. Geophysik. 79 s.

a rôzne internetové zdroje uvedené priamo v texte.

### Odporúčané internetové stránky

http://www.seismology.sk

http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/

# Prílohy

Príloha č. 1. Makroseizmická stupnica MSK-64 (Viskup in Gajdoš a kol., 2001).

1. Ľudia zemetrasenie nepociťujú, je zaznamenané iba seismografmi.

2. Zemetrasenie pociťujú niektoré vnímavé osoby, pokiaľ sú v pokoji najmä vo vyšších poschodiach budov.

3. Zemetrasenie pociťujú niektorí ľudia vo vnútri budov, mimo budov len výnimočne. Otrasy sa podobajú otrasom spôsobeným prechodom ľahkého nákladného auta. Môže byť spozorované slabé kývanie zavesených predmetov.

4. Zemetrasenie je pocítené väčším množstvom obyvateľov, niekto sa môže prebudiť zo spánku, ale nenastáva ľaknutie. Otrasy pripomínajú prechod ťažkých nákladných vozidiel. Okná, dvere a nádoby drnčia, ozýva sa praskot dlážok a stien. Nábytok sa otriasa, zavesené predmety sa kývajú.

5. Zemetrasenie je pozorované vo vnútri budov všetkými obyvateľmi, mnohý ho pociťujú i vonku, veľa spiacich sa prebudí, niektorí vybiehajú z domov. Zvieratá sú nekľudné. Budovy sa otriasajú, Zavesené predmety sa silne kývajú. Obrazy na stenách sa posúvajú a padajú, kyvadlové hodiny zastanú, nestabilné predmety sa prevracajú a posúvajú. otvorené okná a dvere sa zatvárajú, kvapaliny vyšpliechavajú z otvorených nádob. Otras pripomína pád ťažkého predmetu do vnútra budovy. Na chatrných budovách sa prejavujú ľahké poškodenia – trhliny v omietke, opadávanie omietky. Môžu nastať zmeny vo výdatnosti prameňov.

6. Zemetrasenie pociťuje väčšina ľudí vonku i vo vnútri budov. Mnohí so zľaknutím vybiehajú z budov, niektorí strácajú rovnováhu. Domáce zvieratá vybiehajú zo stajní. Môže dôjsť k rozbitiu nádob a skla. Vypadávajú knihy z políc, posúvajú sa i ťažké kusy nábytku, malé zvony niekedy zvonia. Poškodenie omietky môže nastať i u solídne postavených budov (bez antiseizmických opatrení). U chatrných budov sa môžu objaviť ťažšie poškodenia – trhliny v múroch, opadávanie veľkých kusov omietok, poškodenie komínov, kĺzanie strešnej krytiny. Môžu byť pozorované trhliny vo vlhkej pôde (vzácne) maximálne o šírke 1 cm. V horách môže dôjsť k zosuvom pôdy. Môžu nastať zmeny vo výdatnosti prameňov a v hladine vody v studniach.

7. Väčšina ľudí vybieha s úľakom z budov, mnohí strácajú rovnováhu. Otrasy pociťujú aj ľudia idúci v motorových vozidlách. Zvonia i veľké zvony. K poškodeniu omietky dochádza aj u najkvalitnejšie postavených domoch. Chatrné budovy sú ťažko poškodené – padajú komíny,, v múroch sa objavujú trhliny. Ojedinele dochádza k posunom ciest na strmých svahoch, vznikajú trhliny v povrchu ciest a v kamenných múroch, dochádza k poškodeniu potrubí. vodné hladiny sa vlnia, voda býva zakalená. mení sa úroveň vody v studniach a výdatnosť prameňov. V niektorých prípadoch sa obnovujú vyschnuté pramene a naopak aktívne pramene vysychajú. Môže dôjsť k zosúvaniu piesočných alebo štrkových násypov.

8. Zemetrasenie vyvoláva zdesenie a paniku. Miestami sa lámu vetvy stromov. Ťažké kusy nábytkov sa posúvajú a kývajú. Zavesené tienidlá môžu byť poškodené. Všetky druhy budov sú poškodené, chatrné stavby ťažko – rozostupujú sa steny, časti budov sa zosúvajú, výplne stien vypadávajú. Môžu byť prerušené potrubia. Sochy a pomníky sa pohybujú a otáčajú, náhrobky sa prevrhujú. Kamenné múry sa rútia. Na príkrych svahoch dochádza k zosuvom, v pôde vznikajú trhliny široké niekoľko cm. Voda v jazerách je zvírená, objavujú sa nové vodné nádrže. Studne strácajú vodu, vyschnuté sa znovu napĺňajú. Mení sa výdatnosť prameňov a hladina vody v studniach.

9. Zemetrasenie vyvoláva všeobecnú paniku. Vnútorné zariadenie domov je podstatne poškodené. Zvieratá zmätene pobehujú a revú. Aj u najkvalitnejšie postavených budov vznikajú trhliny v múroch a padajú komíny. Ostatné stavby sú ťažko poškodené, mnoho chatrných budov sa zrúti. Pomníky

a stĺpy padajú. Vodné nádrže sú značne poškodené, podzemné potrubie sa láme. Môžu byť ohnuté železničné koľajnice, cesty sú poškodené. Na rovinách sa často pozoruje vylievanie vody, piesku a usadením z vodných nádrží. Trhliny v pôde dosahujú až 10 cm, na svahoch a na brehoch riek aj viac. Padajú skaly, dochádza k zosuvom, vodné hladiny sa silne vlnia.

10. Zemetrasenie spôsobí vážne škody aj u budov so špeciálnymi konštrukciami. Väčšina iných stavieb sa zrúti. Hrádze, zavodňovacie kanály a taktiež mosty sú ťažko poškodené. Koľajnice sa ohýbajú, podzemné potrubie sa láme alebo ohýba. Na dlažbe a asfalte sa objavuje zvlnenie.

11. Zemetrasenie spôsobuje všeobecnú katastrofu. Všetky druhy budov sú ťažko poškodené, rovnako aj mosty hrádze a koľajnice. Cesty sú nepoužiteľné, podzemné potrubie je zničené, dochádza k zosuvom pôdy a rúcaniu skál.

12. Zemetrasenie mení tvárnosť krajiny. Prakticky všetky stavby nad i pod zemou sú ťažko poškodené alebo zničené. Povrch zeme sa podstatne mení, pozorujú sa horizontálne i vertikálne posuvy pozdĺž veľkých trhlín. Rútia sa skaly a tiež brehy riek na veľkých plochách. Jazerá sú zasypané, vznikajú vodopády a rieky menia smer toku.

### Otázky:

- 1a. Definujte a vysvetlite pojmy seizmológia, zemetrasenie, ohnisko, epicentrum, makroseizmický prejav.
- 1b. Definujte a vysvetlite pojmy seizmograf, seizmogram, akcelerogram, velocigram, intenzita zemetrasenia.
- 2. Popíšte príčiny vzniku zemetrasení.
- 3. Aké prístroje sa používajú na registráciu zemetrasení, popíšte princíp.
- 4. Ako sa posudzuje veľkosť zemetrasenia stručne charakterizuj oba druhy seizmických stupníc. Ktorá stupnica sa používa u nás?
- 5. Podľa čoho rozdeľujeme zemetrasenia? Uveď te príklady rozdelení aspoň podľa troch kritérií.
- 6. Čo je magnitúda, početnosť zemetrasení, rekurenčná perióda a čo vyjadruje Gutenberg-Richterov vzťah.
- 7. Objasnite pojmy seizmické ohrozenie, seizmické riziko a seizmicita. Uveď te základné kroky a metódy analýzy seizmického ohrozenia.
- 8. Čo viete o seizmicite Slovenska?
- 9. Ako sa určuje poloha epicentra zemetrasenia?