

**GEOFYZIKÁLNY ÚSTAV  
SLOVENSKÁ AKADÉMIA VIED  
BRATISLAVA**

**RNDr. Peter Labák, PhD.**

**Analýza seizmického ohrozenia a  
makroseizmické účinky zemetrasení**

**Nepublikovaný učebný text pre študentov geofyziky**

**Bratislava, 2006**

# Obsah

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>2</b>
<b>2 ANALÝZA SEIZMICKÉHO OHROZENIA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Definícia základných pojmov .....	3
2.2 Charakteristiky seizmického ohrozenia .....	1
2.3 Metódy výpočtu seizmického ohrozenia .....	2
2.3.1 Deterministický výpočet seizmického ohrozenia .....	2
2.3.2 Pravdepodobnostný výpočet seizmického ohrozenia .....	4
<b>POUŽITÁ LITERATÚRA</b> .....	<b>13</b>
<b>3 MAKROSEIZMICKÉ ÚČINKY ZEMETRASENÍ</b> .....	<b>14</b>
3.1 Makroseizmické stupnice.....	14
3.2 Určovanie makroseizmickéj intenzity.....	15
3.3 Makroseizmické charakteristiky zemetrasení.....	15
3.4 Záverečná poznámka .....	17
<b>POUŽITÁ LITERATÚRA</b> .....	<b>17</b>
<b>4 MONITORING OF EARTHQUAKES ON THE TERRITORY OF SLOVAK REPUBLIC BY THE NATIONAL NETWORK OF THE SEISMIC STATIONS</b> .....	<b>18</b>
4.1 The National Network of Seismic Stations.....	18
4.2 Data transfer, collection, exchange and archiving.....	21
4.3 Data processing and analysis .....	23
<b>REFERENCIES</b> .....	<b>25</b>

# 1 Úvod

Tento učebný text je kompiláciou z úvodných kapitol dizertačnej práce

Labák, P., 2000. Pravdepodobnostný výpočet charakteristík seizmického ohrozenia pre lokalitu atómových elektrární Bohunice. Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava. 120 pp.

a nasledujúcich prác

Labák, P., 2004. Makroseizmické účinky zemetrasení. Československý časopis pre fyziku, 54, 185-187.

Labák, P., Cipciar, A., Kristeková, M., Moczo, P., in press. Monitoring of earthquakes on the territory of Slovak Republic by the National Network of the Seismic Stations in the period 2001-2005. Geologické práce. Bratislava.

Výsledný text nepredstavuje ani úvod ani úplný pohľad do príslušných problematík. Jeho cieľom je dať študentom k dispozícii niektoré základné informácie v problematike analýza seizmického ohrozenia, makroseizmológia a monitorovanie zemetrasení na Slovensku.

## 2 Analýza seizmického ohrozenia

Problematika určovania seizmického ohrozenia pre vybrané záujmové lokality patrí medzi spoločensky závažné problematiky nielen v krajinách s vysokou seizmickou aktivitou, ako sú napr. USA alebo Japonsko, ale aj v krajinách so strednou alebo miernou seizmickou aktivitou, ako je napr. Slovensko. Je to preto, že na Slovensku, podobne ako v iných krajinách v Európe, existujú národohospodársky významné stavby (jadrové elektrárne, veľké vodné diela), ktorých poškodenie alebo zničenie by spôsobilo významné priame a nepriame škody. Navyše už stredne silné zemetrasenia, aké boli v minulosti na území Slovenska pozorované, môžu napríklad v dôsledku lokálnych efektov spôsobiť na danom mieste účinky, ktoré zodpovedajú podstatne silnejším zemetraseniam. Treba zdôrazniť, že či už samotná existencia národohospodársky významných stavieb alebo stredná úroveň seizmickej aktivity sú dostatočným dôvodom na to, aby bola venovaná problematike seizmického ohrozenia v danej krajine dostatočná pozornosť.

### 2.1 Definícia základných pojmov

Problematike seizmického ohrozenia je venované veľké množstvo literatúry. Častokrát však dochádza k tomu, že jeden termín (napr. seizmické riziko) je rôznymi autormi používaný s rôznym významom. Na tieto problémy upozornil už Cornell (1968).

Nasledujúce definície základných pojmov - seizmické ohrozenie, seizmické riziko a seizmicita - sú prevzaté z práce Kárník (1987). Zodpovedajú definíciám, ktoré boli prijaté skupinou expertov UNDR0 v r. 1979.

**Seizmické ohrozenie (*seismic hazard*)** je definované ako pravdepodobnosť  $P_Z$  výskytu seizmických kmitov úrovne  $Z$  alebo  $Z > z$  počas daného časového intervalu  $t$  na zvolenej záujmovej lokalite  $L$ .

**Seizmické riziko (*seismic risk*)** je definované ako pravdepodobnosť  $R$  vzniku škody v dôsledku seizmického ohrozenia.

**Seizmicita (*seismicity*)** je definovaná ako pravdepodobnosť  $P_M$  vzniku zemetrasenia s magnitúdom  $M$  alebo  $M > m$  v časovom intervale  $t$  v určitej zdrojovej zóne  $S$ .

Z uvedených definícií je zrejmé, že zatiaľ čo pojmy seizmické ohrozenia a seizmické riziko sa vzťahujú k zvolenej záujmovej lokalite, pojem seizmicita je charakteristikou zdrojovej zóny. Často je používaný aj pojem **seizmická aktivita (*seismic activity*)**. Tento pojem všeobecne vyjadruje časové a priestorové rozloženie zemetrasení na danom území.

Z uvedených definícií vyplýva, že seizmické ohrozenie, seizmické riziko, seizmicita a seizmická aktivita sú presne definované pojmy vzťahujúce sa k záujmovej lokalite, zdrojovej zóne alebo k väčšiemu územiu, ktorých význam nie je možné navzájom zamieňať.

## 2.2 Charakteristiky seizmického ohrozenia

Seizmický pohyb pôdy  $z$  v definícii seizmického ohrozenia charakterizuje

- **makroseizmická intenzita** (*macroseismic intensity*),
- **časové histórie** (*time histories*), t.j. seizmogramy, velocigramy alebo akcelerogramy a charakteristiky, ktoré sú z nich odvodené, t.j.
  - **špičkové zrýchlenie** (*peak ground acceleration*),
  - **Ariasova intenzita** (*Arias intensity*),
  - **trvanie silných pohybov pôdy** (*strong motion duration*),
  - **stredné kvadratické zrýchlenie** (*root mean square acceleration*),
  - **špičkové diferenciálne zrýchlenie** (*peak differential acceleration*),
- **spektrá odozvy** (*response spectra*).

**Makroseizmická intenzita** je používaná na ocenenie makroseizmických účinkov zemetrasení (t.j. účinkov na ľudí, objekty, prírodu a stavby). Je základnou charakteristikou používanou pri oceňovaní účinkov historických zemetrasení. Na Slovensku a vo väčšine krajín Európy sú používané dvanásťstupňové stupnice diskretných hodnôt MSK-64 a EMS-98. Pre jednotlivé regióny sú určované empirické alebo poloempirické vzťahy intenzity k ďalším charakteristikám seizmického pohybu pôdy.

Výhodou použitia makroseizmickej intenzity je to, že pre väčšinu krajín existujú najúplnejšie údaje o zemetraseniach práve v hodnotách intenzity. Nevýhodou jej použitia je jednak pomerne široká definícia jednotlivých stupňov, jednak to, že je priamo korelovateľná len so škodami na budovách. Vzťah k ďalším charakteristikám, sprostredkovaný empirickými či poloempirickými vzťahmi, je spravidla zaťažený pomerne veľkou smerodajnou odchýlkou.

**Časové histórie** (seizmogramy, velocigramy, akcelerogramy) úplne charakterizujú seizmický pohyb pôdy na záujmovej lokalite. Avšak v porovnaní s ostatnými charakteristikami je určenie časovej histórie a jej použitie najťažšie. V závislosti od potreby sú preto používané tieto odvodené charakteristiky:

- **špičkové zrýchlenie**, ktoré je definované vzťahom

$$pga(x) = \text{Max}(a(x,t)),$$

kde  $a(x, t)$  je akcelerogram;

- **Ariasova intenzita**, ktorá je definovaná vzťahom

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a^2(x,t) dt,$$

- **trvanie silných pohybov pôdy**, ktoré je definované vzťahom

$$T(x) = t(x,0.95) - t(x,0.05),$$

kde  $t(x,0.95)$  je posledný a  $t(x,0.05)$  prvý čas, v ktorom je hodnota zrýchlenia väčšia alebo rovná 5% hodnoty špičkového zrýchlenia,

- **stredné kvadratické zrýchlenie**, ktoré je definované vzťahom

$$rms(x) = \sqrt{\frac{0.9}{T(x)} \int_0^{\infty} a^2(x,t) dt},$$

- **špičkové diferenciálne zrýchlenie**, ktoré je definované vzťahom

$$pda(x) = \underset{t}{Max} \left( \frac{\delta a(x,t)}{\delta x} \right).$$

Pre tie z charakteristík, pre ktoré existujú útlmové vzťahy, je možné vypočítať výsledné hodnoty seizmického ohrozenia aj bez určenia časovej histórie.

**Spektrum odozvy** je pre daný časový priebeh zrýchlenia definované ako závislosť maximálneho posunutia (rýchlosti, či zrýchlenia) systému lineárnych harmonických oscilátorov s jedným stupňom voľnosti od frekvencie, pričom jednotlivé frekvencie sú vlastnými frekvenciami oscilátorov. Z piatich druhov spektier odozvy - relatívne spektrum odozvy v posunutí, relatívne spektrum odozvy v rýchlosti, absolútne spektrum odozvy v zrýchlení, spektrum odozvy v zdanlivej rýchlosti a spektrum odozvy v zdanlivom zrýchlení - je v štúdiách seizmického ohrozenia najčastejšie používané posledné z vymenovaných druhov spektier odozvy.

Voľba charakteristiky seizmického pohybu pôdy  $z$  vo všeobecnosti závisí jednak od charakteru údajov o zemetraseniach, jednak od charakteru stavebnej štruktúry na záujmovej lokalite. Pre lokality atómových elektrární je podľa IAEA (1991) potrebné určiť spektrá odozvy (včítane špičkového zrýchlenia) a časové histórie. Spektrá odozvy a časové histórie je potrebné určiť preto, lebo tieto charakteristiky používajú seizmickí inžinieri pri návrhu seizmicky odolných atómových elektrární.

Voľba obdobia  $t$  v definícii seizmického ohrozenia závisí najmä od charakteru stavebnej štruktúry. Pre bežné stavby je v stavebných normách pre 90 % pravdepodobnosť neprekročenia používané obdobie 50 rokov. Pre atómové elektrárne je to v závislosti od zvolenej bezpečnostnej úrovne spravidla dlhšie obdobie, napr. 1000 rokov (viď napr. USNRC RG 1.165, 1997).

## 2.3 Metódy výpočtu seizmického ohrozenia

Analýza seizmického ohrozenia, podobne ako analýza iných prírodných ohrození, pozostáva z dvoch základných častí (Reiter, 1990):

1. Identifikácia a charakterizácia zdrojov ohrozenia. V prípade seizmického ohrozenia je to identifikácia a charakterizácia zdrojových zón zemetrasení.
2. Charakterizácia účinkov týchto zdrojov na záujmovej lokalite. V prípade seizmického ohrozenia je to určenie seizmického pohybu pôdy na záujmovej lokalite.

Existujú dva základné spôsoby výpočtu seizmického ohrozenia - deterministický a pravdepodobnostný.

### 2.3.1 Deterministický výpočet seizmického ohrozenia

Pod deterministickým výpočtom seizmického ohrozenia rozumieme taký výpočet, v ktorého rozhodujúcej časti sú používané diskrétny, jednohodnotové javy alebo modely, ktoré vedú k scenáru podobnému popisu seizmického ohrozenia (Reiter, 1990). Jednoduchým príkladom

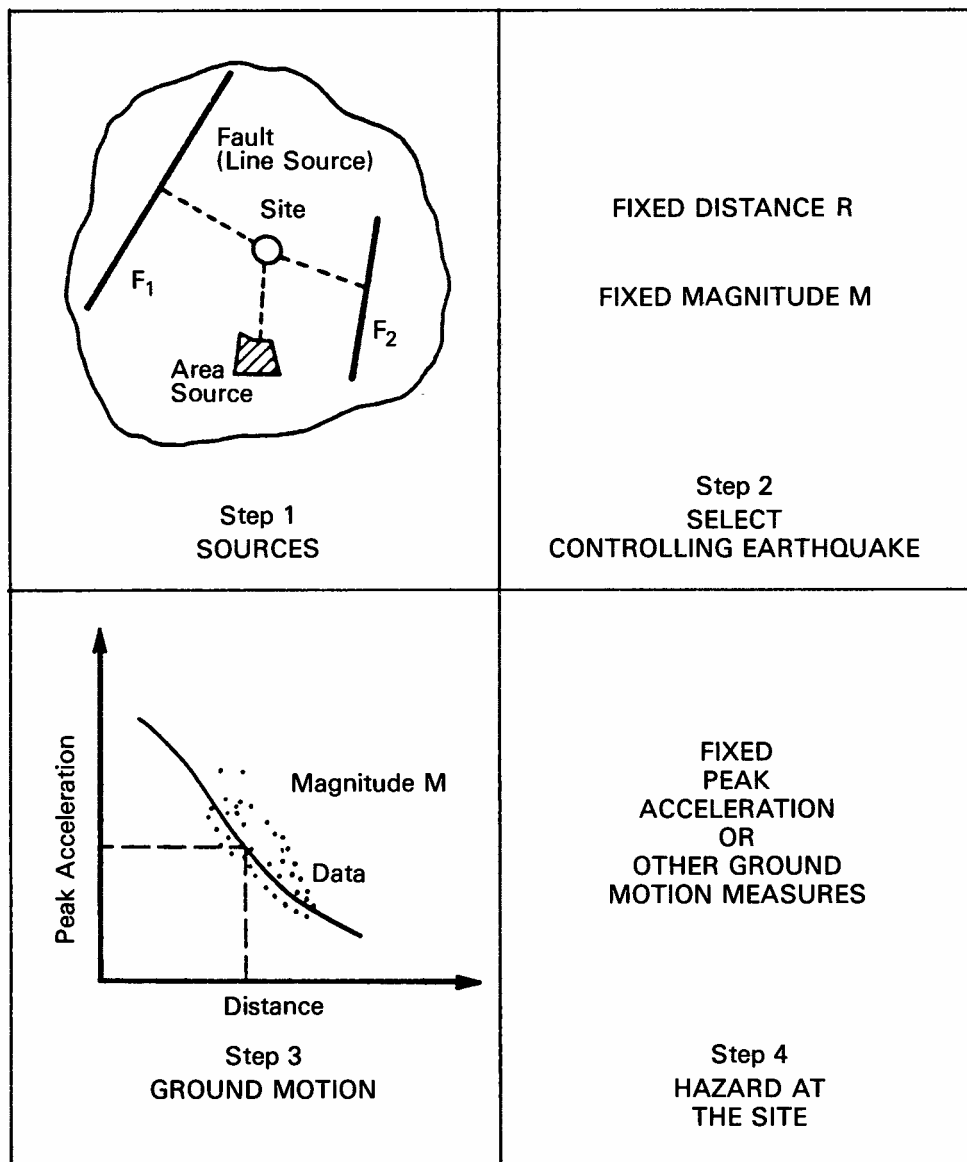
výsledku takéhoto výpočtu je veta „Seizmické ohrozenie na lokalite  $X$ , charakterizované hodnotou špičkového zrýchlenia  $pga$ , je dôsledkom výskytu zemetrasenia s magnitúdom  $m$  v zdrojovej zóne z.“

Deterministický výpočet seizmického ohrozenia pozostáva podľa Reitera (1990) z týchto základných častí (Obr. 2.1):

1. **Identifikácia zdrojových zón zemetrasení.** K tomu, aby bolo možné identifikovať zdrojové zóny zemetrasení (zlomy, lokalizované štruktúry alebo seizmogénne provincie), je potrebné zostaviť seizmologickú a geologickú databázu.
2. **Výber určujúceho zemetrasenia.** Pre každú zdrojovú zónu je určené maximálne (alebo iné charakteristické - napr. maximálne vierohodné) zemetrasenie. Každé maximálne zemetrasenie je charakterizované hodnotou magnitúda alebo epicentrálnej intenzity. Pre každú zdrojovú zónu je určená vzdialenosť od záujmovej lokality. Spravidla je to najbližšia vzdialenosť zdrojovej zóny od lokality. Určujúcim zemetrasením je potom to z maximálnych zemetrasení jednotlivých zdrojových zón, ktorého charakteristiky sú dominantné v porovnaní s charakteristikami maximálnych zemetrasení z ostatných zdrojových zón.
3. **Určenie útlmových vzťahov.** Účinky zemetrasení sú určované spravidla pomocou empirických útlmových vzťahov pre vybranú charakteristiku seizmického ohrozenia.
4. **Určenie seizmického ohrozenia na záujmovej lokalite.** Pre hodnoty magnitúda a vzdialenosti určujúceho zemetrasenia je z útlmového vzťahu určená hodnota charakteristiky seizmického ohrozenia.

Výhodou deterministického výpočtu je jeho relatívna jednoduchosť. Napríklad zmenou maximálneho magnitúda (vd'aka zisteniu nových poznatkov) je možné ľahko určiť vplyv na výsledné charakteristiky seizmického ohrozenia.

Nevýhodou deterministického výpočtu je, že v ňom nie je možné zahrnúť náhodné neurčitosti v seizmickom ohrození (napr. rozloženie neurčitostí v útlmových vzťahoch). Ďalšou nevýhodou deterministického výpočtu je, že v ňom nie je možné explicitne zahrnúť početnosť zemetrasení. Výsledné charakteristiky seizmického ohrozenia sú určené bez návratovej periódy, (pričom je zrejmé, že je značný rozdiel v tom, či zvolená úroveň pohybu pôdy môže byť presiahnutá raz za 100 alebo 10 000 rokov).



Obr. 2.1. Základné prvky deterministického výpočtu seizmického ohrozenia (podľa Reitera, 1990).

### 2.3.2 Pravdepodobnostný výpočet seizmického ohrozenia

Za počiatok klasických Poissonovských pravdepodobnostných výpočtov seizmického ohrozenia môžeme považovať rok 1968, kedy bola publikovaná práca Cornella (1968). 70-te a 80-te roky sú obdobím rozvoja metód analýzy seizmického ohrozenia a ich aplikácií na veľké množstvo lokalít a území. V tomto období boli publikované jednak práce, ktoré sa venujú metódam výpočtu jednotlivých charakteristík, ktoré vstupujú do výpočtu seizmického ohrozenia - pre početnostné vzťahy sú to napr. práce Herrmanna (1977) a Weicherta (1980), pre útlm napr. Campbella (1981), jednak práce, ktoré sa venujú rozvoju samotných metód výpočtu seizmického ohrozenia (najmä McGuire, 1976 a Bender & Perkins, 1987).

V Československu boli v tomto období publikované najmä práce Schenka a ďalších (napr. Schenk et al., 1987), ktoré boli zamerané na výpočet seizmického ohrozenia konkrétnych lokalít a celého územia. V 90-tych rokoch bola pozornosť venovaná najmä systematickému zahrnutiu modelovacích neurčitostí do pravdepodobnostných výpočtov (napr. EPRI, 1993) a deagregácii pravdepodobnostných výpočtov (napr. McGuire, 1995). V tomto období bol tiež v rámci projektu GSHAP (A Global Seismic Hazard Assessment Program) vykonaný pravdepodobnostný výpočet seizmického ohrozenia v hodnotách špičkového zrýchlenia pre celý povrch Zeme.

Pravdepodobnostný výpočet seizmického ohrozenia umožňuje na rozdiel od deterministického výpočtu používať mnohohodnotové alebo spojité javy alebo modely. Do pravdepodobnostného výpočtu je možné zahrnúť účinky všetkých zemetrasení, ktoré sú schopné ovplyvniť výsledné charakteristiky seizmického ohrozenia na záujmovej lokalite. Ak je to potrebné, je do výpočtu možné zahrnúť viacero alternatívnych modelov spolu s ich neurčitosťami. Výsledkom pravdepodobnostného výpočtu sú nielen hodnoty charakteristík seizmického ohrozenia, ale aj ich pravdepodobnosti. To umožňuje použiť výsledky pravdepodobnostných výpočtov seizmického ohrozenia vo výpočtoch seizmického rizika.

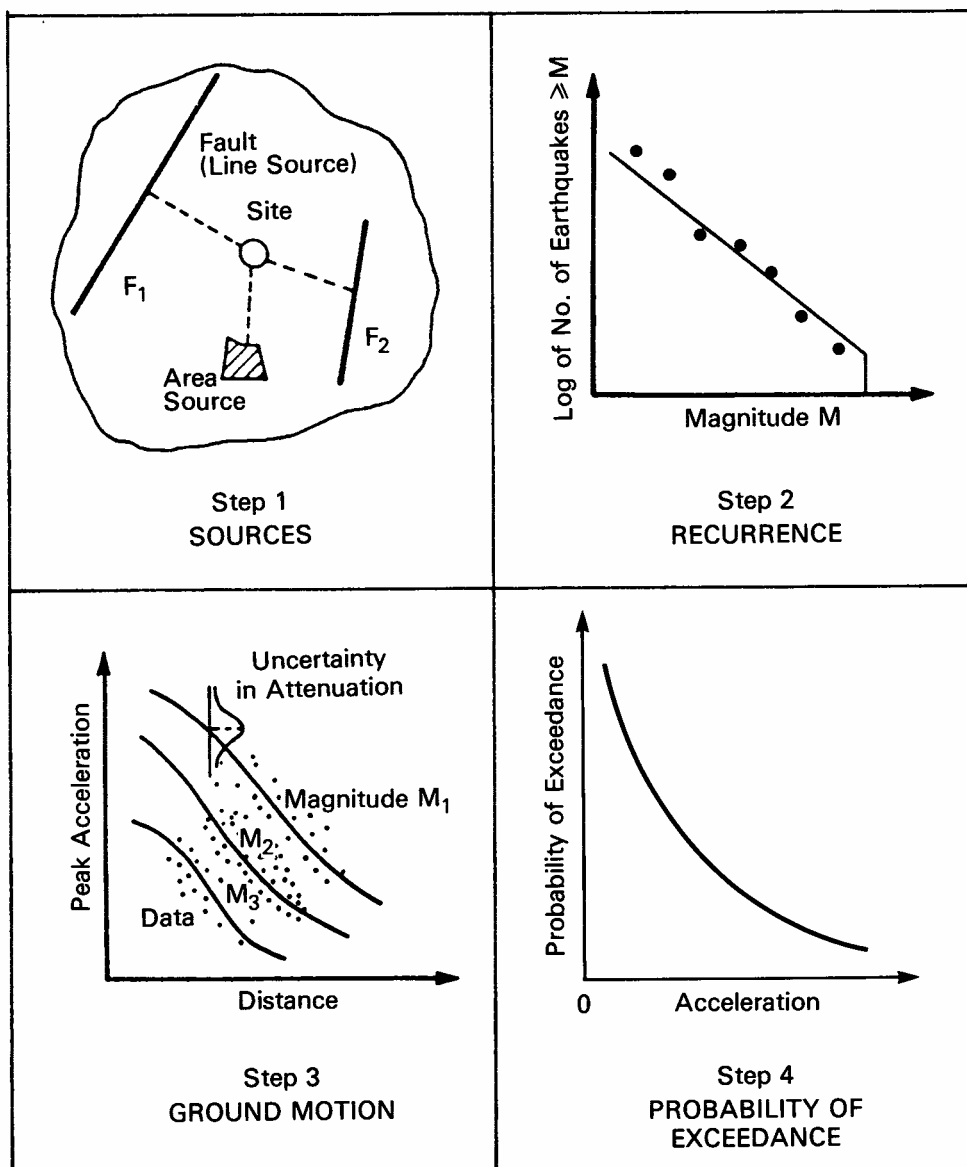
Celý postup môžeme rozdeliť do týchto štyroch častí (Obr. 2.2):

1. **Identifikácia zdrojových zón zemetrasení.** Táto časť je podobná 1. časti deterministického výpočtu. Tu sa však predpokladá, že seizmická aktivita v zdrojovej zóne je konštantná v priestore.
2. **Určenie početnostných vzťahov** pre každú zdrojovú zónu. Táto časť sa zásadne líši od 2. časti v deterministickom výpočte. Namiesto definovania jedinej hodnoty (maximálneho zemetrasenia) pre každú zdrojovú zónu, sú v pravdepodobnostnom výpočte pre každú zdrojovú zónu určené početnostné vzťahy. Typický tvar početnostných vzťahov je

$$\log N = a - b M, \quad (2.1)$$

kde  $N$  je počet zemetrasení s magnitúdom väčším alebo rovným ako  $M$ ;  $a$  a  $b$  sú konštanty početnostného vzťahu. Maximálne zemetrasenie je v tomto prípade to, ktoré je ako najväčšie brané do úvahy v početnostnom vzťahu.

3. **Určenie útlmových vzťahov.** Táto časť je na prvý pohľad podobná 3. časti deterministického výpočtu. Na rozdiel od deterministického výpočtu sú však útlmové vzťahy použité nielen pre jednu dvojicu hodnôt magnitúda a vzdialenosti, ale pre všetky hodnoty magnitúda medzi minimálnym a maximálnym magnitúdom a všetky vzdialenosti zdrojovej zóny od lokality - od minimálnej po maximálnu. Navyše, v pravdepodobnostnom výpočte je tiež možné priamo zahrnúť neurčitosti v určení empirických útlmových vzťahov.



Obr. 2.2. Základné časti pravdepodobnostného výpočtu seizmického ohrozenia (Reiter, 1990).

4. **Určenie seizmického ohrozenia na záujmovej lokalite.** Táto časť sa zásadne líši od 4. časti v deterministickom výpočte. Všetky zemetrasenia z identifikovaných ohniskových zón prispievajú do pravdepodobnosti presiahnutia jednotlivých úrovní seizmického pohybu  $z$  počas špecifikovaného obdobia  $t$ . Pravdepodobnosť  $P(Z > z)$ , že sa zemetrasenie z jedného zdroja prejaví na záujmovej lokalite hodnotou  $Z$ , ktorá prekročí úroveň seizmického pohybu  $z$ , môže byť vyjadrená v tvare

$$P(Z > z) = \int_{m_0}^{m_1} \int_{r_0}^{\infty} P(Z > z | m, r) f_M(M) f_R(R) dM dR, \quad (2.2)$$

kde  $m_0$  je minimálne magnitúdo a  $m_1$  je maximálne magnitúdo,  $f_M(M)$  je pravdepodobnostná hustotná funkcia rozloženia magnitúd,  $f_R(R)$  je pravdepodobnostná hustotná funkcia

rozloženia vzdialeností medzi ohniskovou zónou a záujmovou lokalitou a  $P(Z > z | m, r)$  je pravdepodobnosť, že dané zemetrasenie s magnítudom  $m$  vo vzdialenosti  $r$  od záujmovej lokality dosiahne na záujmovej lokalite úroveň seizmického pohybu  $z$  alebo väčšiu ako  $z$ .

Predpokladajme, že ročný počet zemetrasení zostáva konštantný počas celého záujmového intervalu  $t$  rokov. Z početnostného vzťahu (2.1) môžeme ročný počet zemetrasení  $N$  vyjadriť v tvare

$$N = e^{a \ln 10 - b M \ln 10}. \quad (2.3)$$

Pravdepodobnosť, že magnitúdo vzniknutého zemetrasenia  $M$  bude menšie než zvolená hodnota  $m$  možno s použitím vzťahu (2.3) vyjadriť v tvare

$$P(M \leq m) = \frac{\int_{m_0}^m N(M) dM}{\int_{m_0}^{m_1} N(M) dM} = \frac{1 - e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_1-m_0)}} = k(1 - e^{-\beta(m-m_0)}), \quad (2.4)$$

kde  $\beta = b \ln 10$  a  $k = 1 - e^{-\beta(m_1-m_0)}$ . Z toho môžeme kumulatívnu distribučnú funkciu rozdelenia pravdepodobnosti  $F_M(M)$  vyjadriť v tvare

$$F_M(M) = k(1 - e^{-\beta(M-m_0)}) \quad (2.5)$$

a doplnkovú kumulatívnu distribučnú funkciu  $\Phi_M(M)$  v tvare

$$\Phi_M(M) = 1 - F_M(M) = 1 - k + k\beta e^{-\beta(M-m_0)}. \quad (2.6)$$

Pravdepodobnostnú hustotnú funkciu  $f_M(M)$  môžeme vyjadriť v tvare

$$f_M(M) = \frac{dF_M(M)}{dM} = k\beta e^{-\beta(M-m_0)}. \quad (2.7)$$

Typický tvar útlmového vzťahu je

$$Z = c_1 + c_2 M + c_3 \log(r_0 + R) + \varepsilon,$$

kde  $c_1, c_2, c_3$  a  $r_0$  sú konštanty a  $\varepsilon$  je veličina s Gaussovým rozdelením so strednou hodnotou  $\mu_\varepsilon = 0$  a smerodajnou odchýlkou  $\sigma_\varepsilon = \sigma_Z$ . Pre pevne zvolené  $m$  a  $r$  nadobudne  $Z$  hodnotu  $Z_{m,r}$ . Hodnota  $Z$  však obsahuje vplyv náhodnosti definovaný veličinou  $\varepsilon$ . Pravdepodobnosť prekročenia hodnoty  $z$  pre pevne zvolené  $m$  a  $r$  možno potom vyjadriť v tvare

$$P(Z > z | m, r) = P(\varepsilon > (z - Z_{m,r}) | m, r).$$

Potom

$$P(\varepsilon > (z - Z_{m,r}) | m, r) = \int_{z - Z_{m,r}}^{\infty} \frac{e^{-\frac{(x-0)^2}{2\sigma_Z^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} dx.$$

Z toho po substitúcii  $y = (x - 0) / \sigma_Z$  dostaneme

$$P(\varepsilon > (z - Z_{m,r}) | m, r) = \int_{\frac{z - Z_{m,r}}{\sigma_Z}}^{\infty} \frac{e^{-\frac{(y)^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} dy = \Phi^* \left( \frac{z - Z_{m,r}}{\sigma_Z} \right)$$

alebo aj

$$P(\varepsilon > (z - Z_{m,r}) | m, r) = \Phi^* \left( \frac{z - (c_1 + c_2 M + c_3 \log(r_0 + r))}{\sigma_Z} \right), \quad (2.8)$$

kde  $\Phi^*$  je doplnková kumulatívna distribučná funkcia Gaussovho normalizovaného rozdelenia.

Dosadením (2.8) do vzťahu (2.2) môžeme pravdepodobnosť prekročenia hodnoty  $z$  vyjadriť ako

$$P(Z > z) = \int_{r_0}^{\infty} \int_{m_0}^{m_1} \Phi^* \left( \frac{z - (c_1 + c_2 m + c_3 \log(r_0 + r))}{\sigma_Z} \right) f_M(M) f_R(R) dM dR$$

alebo

$$P(Z > z) = \int_{r_0}^{\infty} \int_{m_0}^{m_1} P(\varepsilon > \frac{z - (c_1 + c_2 m + c_3 \log(r_0 + r))}{\sigma_Z} | m, r) f_M(M) f_R(R) dM dR$$

resp.

$$P(Z > z) = \int_{r_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(M > \frac{z - (c_1 + c_3 \log(r_0 + r) + \varepsilon)}{c_2} | \varepsilon, r) f_{\varepsilon}(\varepsilon) f_R(R) dM dR. \quad (2.9)$$

Pre zvolené  $z$  existujú dve dôležité hodnoty  $\varepsilon$  odvodené z hraničných hodnôt pre  $M$

$$i = z - c_1 - c_2 m_1 - c_3 \log(r_0 + r)$$

a

$$i' = z - c_1 - c_2 m_0 - c_3 \log(r_0 + r).$$

Potom výraz  $P(M > \frac{z - (c_1 + c_3 \log(r_0 + r) + \varepsilon)}{c_2} | \varepsilon, r)$  sa

pre  $-\infty < \varepsilon < i$  rovná  $P(M > m_1 | \varepsilon, r) = 0$ ,

pre  $i < \varepsilon < i'$  rovná  $P(m_1 > M > m_0 | \varepsilon, r) = |1 - F_M(m)|_{m_0}^{m_1}$ ,

pre  $i' < \varepsilon < \infty$  rovná  $P(M > m_0 | \varepsilon, r) = 1$ .

Po dosadení do rovnice (2.9), zavedení substitúcie  $m^* = \frac{z - (c_1 + c_3 \log(r_0 + r) + \varepsilon)}{c_2}$  a prepísaní do formy integrálov z normálnych rozdelení dostaneme

$$P(Z > z) = \int_{r_0}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} (1-k) \Phi^* \left( \frac{i}{\sigma_Z} \right) + k \Phi^* \left( \frac{i'}{\sigma_Z} \right) + ke^{\left( -\frac{z\beta}{c_2} + \frac{\beta c_1}{c_2} + \beta m_0 + \frac{\beta^2 \sigma_Z^2}{2c_2^2} + \frac{\beta c_3}{c_2} \log(r_0 + R) \right)} \\ \left[ \Phi^* \left( \frac{i - \beta \sigma_Z^2 / c_2}{\sigma_Z} \right) - \Phi^* \left( \frac{i' - \beta \sigma_Z^2 / c_2}{\sigma_Z} \right) \right] \end{array} \right\} f_R(R) dR. \quad (2.10)$$

Integráciu cez R je možné vykonať numericky. V prípade, že v záujmovej oblasti sa nachádza viacero zdrojových zón, výsledná pravdepodobnosť je súčtom pravdepodobností, ktoré sú vypočítané osobitne pre jednotlivé zdrojové zóny.

Za predpokladu, že početnostný vzťah (2.1) je časovo nezávislý, vyjadruje vzťah (2.3) priemerný počet zemetrasení za rok s magnitúdom  $M = m$ . Počet zemetrasení s magnitúdom  $M > m$  potom bude

$$N_y(M > m) = \int_m^{m_1} e^{a \ln 10 - bM \ln 10} dM = \frac{e^{a \ln 10}}{\beta} (e^{-\beta m} - e^{-\beta m_1}). \quad (2.11)$$

Zo vzťahov (2.10) a (2.11) je možné počet zemetrasení s magnitúdom  $M > m$ , ktoré sa za jeden rok prejavia na lokalite hodnotou  $Z > z$ , vyjadriť v tvare

$$N_y(Z > z, M > m) = N_y(M > m) \cdot P(Z > z, M > m). \quad (2.12)$$

Priemerný počet zemetrasení  $R(z)$ , ktorý musí vzniknúť na to, aby sa jedno z nich prejavilo na lokalite hodnotou  $Z > z$ , je

$$R(z) = \frac{1}{P(Z > z, M > m)}. \quad (2.13)$$

Priemerný čas v rokoch  $R_y(z)$ , v priebehu ktorého sa vyskytne jedno zemetrasenie s  $M > m_0$ , ktoré sa na lokalite prejaví hodnotou  $Z > z$ , nazývaný aj návratová perióda, môžeme pri použití vzťahov (2.11) a (2.13) vyjadriť v tvare

$$R_y(z) = \frac{R(z)}{N_y(M > m_0)} = \frac{\beta}{\frac{e^{a \ln 10}}{\beta} (e^{-\beta m_0} - e^{-\beta m_1}) \cdot P(Z > z, M > m_0)} . \quad (2.14)$$

Mieru spoľahlivosti predpovede, že na záujmovej lokalite nebude prekročená hodnota pohybu pôdy  $z$  počas obdobia  $t$  rokov, vyjadruje maximálna pravdepodobnostná funkcia  $F_{\max, t}(z)$ . Môžeme ju odvodiť nasledovne.

Majme  $N$  zemetrasení, ktoré sa na záujmovej lokalite prejavili účinkami  $Z_1, \dots, Z_N$ . Pravdepodobnosť, že všetky hodnoty sú menšie než  $z$  označme  $F_{\max}(z)$ .  $F_{\max}(z)$  je teda

$$F_{\max}(z) = P(Z_1 \leq z, \dots, Z_N \leq z) .$$

Ak predpokladáme, že jednotlivé zemetrasenia sú vzájomne nezávislé javy, potom platí

$$F_{\max}(z) = \prod_{j=1}^N P_j(Z \leq z) .$$

Ak majú jednotlivé zemetrasenia aj rovnaké rozdelenie pravdepodobnosti, potom

$$F_{\max}(z) = P(Z \leq z)^N = F(z)^N .$$

To, že počet zemetrasení  $N$  je náhodná premenná môžeme vyjadriť ako

$$F_{\max}(z) = \sum_{j=0}^{\infty} F(z)^j \cdot P(N = j) .$$

Ak predpokladáme, že zemetrasenie je Poissonovský proces, t.j. že počet zemetrasení  $N$  má Poissonovo rozdelenie s parametrom  $\lambda$ , potom

$$F_{\max}(z) = \sum_{j=0}^{\infty} F(z)^j \cdot \frac{\lambda^j}{j!} e^{-\lambda}$$

a po úpravách

$$F_{\max}(z) = e^{-\lambda} \sum_{j=0}^{\infty} F(z)^j \cdot \frac{\lambda^j}{j!} = e^{-\lambda} e^{\lambda F(z)} = e^{-\lambda(1-F(z))} . \quad (2.15)$$

Parameter  $\lambda$  určuje počet zemetrasení, čo možno napísať aj ako  $N_y(M > m_0) \cdot t$ , kde  $N_y(M > m_0)$  je počet zemetrasení za rok s magnitúdom väčším alebo rovným ako  $m_0$  a  $t$  je záujmové obdobie v rokoch.

Zo vzťahov (2.13) a (2.15) vyplýva, že

$$F_{\max, t}(z) = e^{-\frac{t}{R_y(z)}} . \quad (2.16)$$

Keďže  $F_{max,t}(z)$  je doplnkovou pravdepodobnosťou k  $P(Z>z)$ , platí

$$F_{max,t}(z) = 1 - P(Z > z). \quad (2.17)$$

Zo vzťahu (2.16) a použitím (2.17) získame vzťah medzi návratovou periódou  $R_y(z)$  a pravdepodobnosťou  $P(Z>z)$  v tvare

$$R_y(z) = -t / \ln(1 - P(Z > z)). \quad (2.18)$$

Jedna hodnota návratovej periódy môže teda za predpokladu, že zemetrasenie je Poissonovský proces, reprezentovať rôzne dvojice hodnôt  $P(Z>z)$ ,  $t$ . Napríklad pre 10% pravdepodobnosť výskytu počas 50 rokov je návratová perióda príslušnej úrovne pohybu pôdy  $z$  na lokalite približne 475 rokov. Vzťah (2.18) však nehovorí nič o vzťahu medzi  $z$  a  $P(Z>z)$ . O tom hovorí vzťah (2.10).

Výhodou pravdepodobnostného výpočtu je to, že umožňuje zahrnúť oba základné typy neurčitostí - náhodné (aleatorické) i modelovacie (epistemické). Vzhľadom na to, že vlastnosti seizmického zdroja, dráhy šírenia vln a samotnej lokality je v dôsledku ich zložitosti možné popísať len limitovane, je nutné pri ich popise použiť náhodné premenné. Ich neurčitosti sa nazývajú náhodné neurčitosti. V pravdepodobnostnom výpočte predpokladáme, že rozdelenia náhodných neurčitostí môžeme vyjadriť a zahrnúť do výsledných hodnôt pravdepodobnosti presiahnutia. Typickým príkladom náhodnej neurčitosti je smerodajná odchýlka útlmového vzťahu. Neurčitosť, ktorá vedie k alternatívnym hodnotám vstupného parametra, sa nazýva modelovacia neurčitosť. Typickým príkladom modelovacej neurčitosti sú alternatívne hodnoty maximálneho magnitúda. Modelovacie neurčitosti je možné redukovať zväčšením množiny údajov alebo zlepšením modelu. Takýmto spôsobom však nie je možné redukovať náhodnosť javu.

Modelovacie neurčitosti je možné do pravdepodobnostného výpočtu zahrnúť pomocou logického stromu. Uzlom v logickom strome je parameter, ktorý vstupuje do výpočtu (napr. koeficient  $a$  v početnostnom vzťahu). Vetvami sú potom alternatívne hodnoty parametra. Je potrebné určiť pravdepodobnosť každej vetvy. Súčet pravdepodobností vetiev v jednom uzle musí byť rovný 1.0. Jedna úplná cesta v logickom strome tvorí jeden scenár. Súčet pravdepodobností všetkých scenárov musí byť tiež 1.0. Pravdepodobnostný výpočet je potom možné vykonať jednak postupne pre všetky scenáre v logickom strome, jednak pre súbor náhodne vybraných scenárov. Náhodný výber je možné vykonať metódou Monte Carlo. Tento spôsob výpočtu budeme ďalej skrátene nazývať Monte Carlo simulácie. Výhodou výpočtov pre logický strom je, že umožňujú dôležité analýzy citlivosti výsledkov na jednotlivých vetvách. Pri Monte Carlo simuláciách je možné do pravdepodobnostných výpočtov zahrnúť aj spojité rozdelenie hodnôt vstupného parametra. To môže byť v niektorých prípadoch lepší spôsob zahrnutia ako použitie diskretných vetiev. Pri Monte Carlo simuláciách však nie je možné vykonať citlivostnú analýzu. Monte Carlo simulácie sú tiež v porovnaní s výpočtami priamo pre logický strom náročnejšie na výpočtový čas. Oba spôsoby výpočtu by mali viesť k podobným alebo rovnakým výsledkom vtedy, ak použitie diskretných vetiev vo výpočtoch pre logický strom adekvátne simuluje spojité rozdelenie hodnôt v Monte Carlo simuláciách a počet Monte Carlo simulácií je dostatočne veľký na to, aby pokryl celý rozsah hodnôt v spojitom rozdelení.

Ako už bolo uvedené vyššie, k výslednej hodnote pravdepodobnosti presiahnutia určitej úrovne pohybu pôdy prispievajú všetky zemetrasenia zo všetkých ohniskových zón.

Túto zdanlivú stratu transparentnosti pravdepodobnostného výpočtu je možné odstrániť pomocou jeho deagregácie (Bernreuter et al., 1998), t.j. pomocou zistenia čiastkových relatívnych príspevkov z jednotlivých magnítudovo-vzdialenostných intervalov do celkovej výslednej pravdepodobnosti presiahnutia. Takto je možné zistiť, ktoré zemetrasenie (ako veľké a z akej vzdialenosti) prispieva najviac do tejto pravdepodobnosti presiahnutia.

Hoci prednosti pravdepodobnostného výpočtu seizmického ohrozenia sú z predchádzajúceho textu zrejmé, otázka, ktorý výpočet seizmického ohrozenia je vhodnejší - deterministický alebo pravdepodobnostný - bola v minulosti a je aj v súčasnosti veľmi často diskutovaná mnohými autormi. Akýkoľvek pokus odpovedať na túto otázku by mal byť spojený s odpoveďou aj na nasledujúce otázky:

1. Pre aký účel je vykonávaná analýza seizmického ohrozenia?
2. Aké vstupné údaje a s akými neurčitostami sú k dispozícii?
3. V akom tvare je potrebné prezentovať výsledky seizmického ohrozenia?

Je zrejmé, že inak bude vykonávaná analýza seizmického ohrozenia pre účely stavebnej normy a inak pre lokality jadrových elektrární. Pre účely stavebnej normy je potrebné poznať hodnotu jedinej charakteristiky seizmického pohybu pôdy (spravidla PGA) pre návratovú periódu 475 rokov. Pre lokality jadrových elektrární je potrebné poznať pre zvolenú návratovú periódu (napr. 10 000 rokov) hodnoty viacerých charakteristík seizmického ohrozenia (spravidla hodnoty pre vybrané periódy spektra odozvy) a tiež je potrebné poznať aj charakteristiky určujúceho zemetrasenia. Pre účely stavebnej normy bude teda použitý štandardný pravdepodobnostný výpočet. Pre lokalitu atómovej elektrárne bude potrebné vykonať aj jeho deagregáciu.

V súvislosti s neurčitostou vstupných údajov všeobecne platí, že čím väčšia je ich neurčitosť, tým viac je potrebné zahrnúť do výpočtu seizmického ohrozenia modelovacie i náhodné neurčitosti, to zn., tým viac je potrebné použiť pravdepodobnostný prístup.

Ak má na analýzu seizmického ohrozenia nadväzovať analýza seizmického rizika, ktorá má byť vykonaná pravdepodobnostne, potom aj analýza seizmického ohrozenia by mala byť vykonaná pravdepodobnostne. Na záver poznamenajme, že v súčasnosti prevláda vo svete používanie pravdepodobnostných výpočtov.

Podmienka časovej nezávislosti početnostného vzťahu počas záujmového intervalu  $t$  rokov a predpoklad, že zemetrasenie je Poissonovský proces, t.j., že zemetrasenia sú vzájomne nezávislé javy, predstavujú základné podmienky, ktoré sme v tejto podkapitole použili. Viaceré, najmä paleoseizmologické štúdie (napr. McCalpin 1996) však ukazujú, že v niektorých oblastiach - na niektorých zlomových systémoch - došlo v minulosti k zhlukovaniu zemetrasení v čase, ktoré sa prejavilo striedaním období zvýšeného počtu zemetrasení s obdobiami so zníženým počtom, alebo výskytom dvoch alebo viacerých silných zemetrasení relatívne krátko za sebou. Tieto štúdie však neukazujú nevhodnosť pravdepodobnostného výpočtu seizmického ohrozenia. Ukazujú 'len', že v niektorých oblastiach je potrebné modelovať rozloženie počtu zemetrasení ako časovo závislé a v dôsledku toho je nutné predpokladať, že zemetrasenia nie sú vzájomne nezávislé javy. Pre Západné Karpaty však takéto štúdie dosiaľ neboli vykonané. Preto aj naďalej budeme predpokladať, že početnostný vzťah je počas záujmového intervalu  $t$  rokov časovo nezávislý a zemetrasenie je Poissonovský proces.

## Použitá literatúra

Bender, B., Perkins, D. M., 1987. Seisrisk III: a computer program for seismic hazard estimation. U. S. Geological Survey Bulletin 1772. 48p.

Bernreuter, D. L., Boissonnade, A. C., Short, C. M., 1998. Investigation of techniques for the development of seismic design basis using the probabilistic seismic hazard analysis. Lawrence Livermore National Laboratory. Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington.

Campbell, K. W., 1981. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America, 71, 2039-2070.

Cornell, C.A.: 1968, Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 58, 1583-1606.

EPRI, 1993. Method and guidelines for estimating earthquake ground motion in Eastern North America. In: Guidelines for determining design basis ground motions, Vol. 1, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, Report No. EPRI TR-102293.

Herrmann, R.B., 1977. Recurrence relations. Earthquake notes, 48, 47-49.

IAEA, 1991. Earthquakes and associated topics in relation to nuclear power plant siting. A safety guide. Safety series No. 50-SG-S1 (Rev.1). International Atomic Energy Agency, Vienna.

McGuire, R., 1976. Fortran computer program for seismic risk analysis. U.S. Geological Survey Open-File Report 76-67, 89 p.

McGuire, R., 1995. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 1275-1284.

Reiter, L., 1990. Earthquake hazard analysis. Issues and insights. Columbia University Press. New York.

Schenk, V., Brouček, I., Schenková, Z., Kárník, V., Mantlík, F., Kottnauer, P., Vojtíšek, D., 1987. Seizmoštatistický výpočet seizmického ohrozenia atómovej elektrárne Jaslovské Bohunice. Geofyzikálny ústav ČSAV, Praha, Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava.

USNRC RG 1.165, (1997). Identification and characterization of seismic sources and determination of Safe Shutdown Earthquake ground motion. Regulatory Guide 1.165. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington.

### 3 Makroseizmické účinky zemetrasení

Až do začiatku seizmometrických meraní, t.j. takmer do konca 19. storočia, boli účinky zemetrasení na ľudí, predmety, budovy a prírodu na danej lokalite, t.j. **makroseizmické účinky**, jedinými údajmi o zemetraseniach. Makroseizmické účinky je možné pozorovať vtedy, ak je lokálne magnitúdo zemetrasenia  $M_l > 2.5$  a sú kvantifikované pomocou **makroseizmickej intenzity (I)**. Makroseizmická intenzita je určovaná v stupňoch **makroseizmickej stupnice**. Každý stupeň makroseizmickej stupnice je charakterizovaný **súborom príznakov**. Makroseizmická intenzita má teda charakter klasifikácie pozorovaných účinkov a škôd. Hodnoty makroseizmickej intenzity sú vyjadrené pomocou celých čísel<sup>1</sup>.

#### 3.1 Makroseizmické stupnice

Jednoduchú kvantifikáciu škôd po zemetrasení vykonal ako jeden z prvých Schiantarelli v roku 1783 [1]. Je však pravdepodobné, že existujú aj skoršie pokusy kvantifikácie škôd po zemetrasení. Prvý raz použil makroseizmickú intenzitu Egen [2] v roku 1828. Davison [3, 4, 5] zdokumentoval počiatky použitia makroseizmických stupníc. Prvou medzinárodne rozšírenou stupnicou bola 10-stupňová **Rossi-Forelova stupnica** z roku 1883. **Siebergova stupnica** [6, 7] je základom všetkých moderných 12-stupňových stupníc. Neskoršia verzia tejto stupnice sa stala známou ako **Mercalli-Cancani-Siebergova stupnica** (MCS) [8]. Wood a Neuman [9] preložili stupnicu MCS do angličtiny a Richter ju prepracoval a doplnil [10]. Tak v r. 1956 vznikla **Modifikovaná Mercalliho stupnica** (MM56). Kvantitatívne aspekty určovania makroseizmickej intenzity boli významným spôsobom rozvinuté v **Medvedevovej-Sponheuerovej-Kárníkovej stupnici** (MSK-64) [11].

V súčasnosti sú vo svete používané najmä 12-stupňové stupnice - MCS napr. v Taliansku, MM56 a jej modifikácie napr. v USA, Austrálii, Novom Zélande alebo v Grécku. MSK-64 bola do r. 1998 používaná najmä v európskych štátoch (vrátane Českej republiky a Slovenska). Od roku 1998 je v Európe používaná **Európska makroseizmická stupnica** (EMS-98) [12]. V Japonsku je používaná 7 stupňová **Japonská intenzitná stupnica** (JMA). V bývalom Sovietskom zväze bola používaná 12-stupňová stupnica [13].

Jednotlivé 12-stupňové stupnice sa od seba líšia najmä podrobnosťou klasifikácie zraniteľnosti a poškodenia budov, v popise účinkov na ľudí a predmety a v samotnej štruktúre stupníc.

Najnovšia stupnica, EMS-98, bola navrhnutá tak, aby znížila mieru subjektivity v určovaní stupňa intenzity. Stupnica EMS-98 zahŕňa jednak **klasifikáciu budov** podľa zraniteľnosti, **škôd** a **kvantít**, jednak **definície intenzitných stupňov**.

Budovy sú zaradené do šiestich tried zraniteľnosti A až F, pričom v triede A sú najzraniteľnejšie a v triede F najodolnejšie budovy s vysokou úrovňou antiseizmického dizajnu. Väčšina budov v historických jadrách miest v Českej republike a na Slovensku patrí do triedy zraniteľnosti A alebo B, moderné budovy spravidla do triedy zraniteľnosti C alebo D. Zaradenie budovy do príslušnej triedy zraniteľnosti závisí od kvality vyhotovenia budovy,

---

<sup>1</sup> V médiách sa často nesprávne vyskytuje pojem Richterova stupnica. Spravidla tým majú novinári na mysli niektoré z magnitúd (lokálne, z objemových vln, z povrchových vln, momentové a pod.), ktoré slúžia na odhad veľkosti zemetrasenia ako prírodného javu. Občas však dochádza aj k zámene s makroseizmickou intenzitou, ktorá je však mierou účinkov zemetrasenia na príslušnej lokalite bez ohľadu na veľkosť zemetrasenia ako prírodného javu, alebo s epicentrálnou intenzitou, ktorá je mierou účinkov zemetrasenia v epicentre.

jej údržby, geometrickej pravidelnosti, duktility, polohy, spevnenia, úrovne antiseizmického dizajnu a dôležitosti. Škody, popísané osobitne pre murované a železobetónové budovy, sú rozdelené do piatich stupňov. Prvý stupeň zodpovedá najmenším škodám, piaty stupeň zodpovedá úplnému zničeniu budovy.

Účinky uvedené v popise pre jednotlivé intenzitné stupne majú charakter prahových účinkov, z čoho vyplýva, že každý intenzitný stupeň môže obsahovať účinky nižších intenzitných stupňov. Tzv. krátka forma stupnice EMS-98 je v tab. 1. Krátka forma ilustruje typické účinky pre jednotlivé intenzitné stupne. Nie je však vhodná pre určovanie makroseizmickej intenzity.

### 3.2 Určovanie makroseizmickej intenzity

Určenie makroseizmickej intenzity po zemetrasení pozostáva zo **zberu a vyhodnotenia údajov**. Makroseizmické dotazníky sú používané vtedy, ak sa predpokladá, že účinky zemetrasenia neboli na žiadnej lokalite väčšie ako 6 až 7<sup>0</sup> EMS-98. V prípade väčších účinkov sa vykonáva prieskum na mieste. V Českej republike analyzuje makroseizmické účinky zemetrasení Geofyzikální ústav AV ČR v Prahe, na Slovensku je to Geofyzikálny ústav SAV v Bratislave. Makroseizmické dotazníky boli dlhú dobu distribuované najmä poštou. V niektorých krajinách boli zverejňované po zemetrasení ako platený inzerát v novinách. V súčasnosti narastá distribuovanie dotazníkov v elektronickej podobe. Makroseizmické dotazníky je možné nájsť na internetových stránkach [www.ig.cas.cz](http://www.ig.cas.cz) a [www.seismology.sk](http://www.seismology.sk).

V závislosti od cieľovej skupiny respondentov, existujú štyri základné typy dotazníkov – 1. dotazník pre nešpecifikovanú skupinu ľudí, t.j. pre skupinu ľudí, ktorá aktívne reaguje na výzvu popísať účinky zemetrasenia, 2. dotazník pre skupinu náhodne vybraných ľudí (podobne ako v prieskumoch verejnej mienky existujú metódy výberu takejto skupiny aj v seizmológii), 3. dotazník pre úradníkov v miestnej alebo regionálnej samospráve a štátnej správe, 4. dotazník pre dobrovoľníkov (ak si príslušná inštitúcia takúto sieť dobrovoľníkov udržiava). V závislosti od formy dotazníka existujú jednak dotazníky vo voľnej forme, jednak dotazníky s preddefinovanými odpoveďami, z ktorých je možné vybrať si tie odpovede, ktoré najlepšie zodpovedajú pozorovaniam.

V Českej republike a na Slovensku sú používané dotazníky prvého typu s preddefinovanými odpoveďami. Takéto dotazníky zabezpečujú jednak pomerne širokú odozvu, jednak umožňujú semiautomatické vyhodnotenie dotazníkov a určenie makroseizmickej intenzity pre jednotlivé lokality [14]. Na semiautomatické určovanie makroseizmickej intenzity sa využíva grafická forma EMS-98 [15].

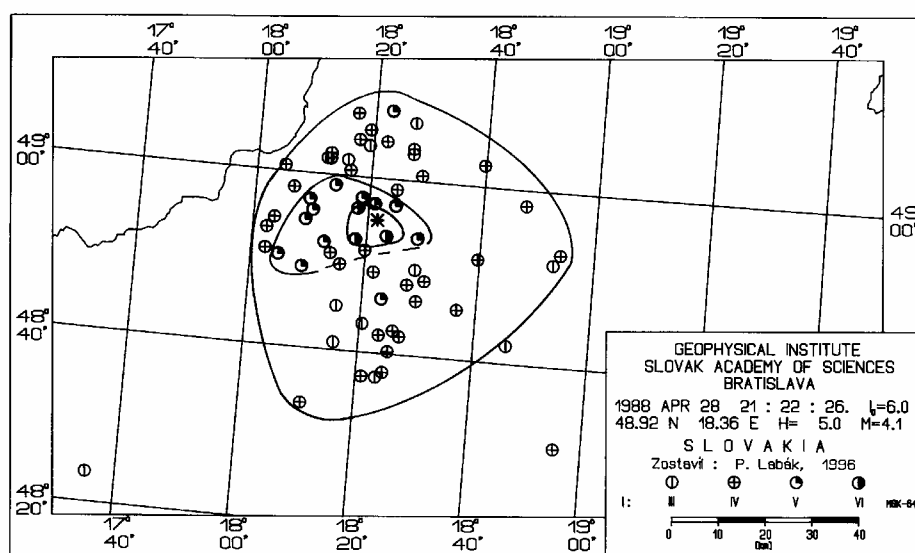
### 3.3 Makroseizmické charakteristiky zemetrasení

Každá lokalita s určenou intenzitou je na mape zobrazená ako jeden **intenzitný bod**. Hodnoty makroseizmickej intenzity pre analyzovanú oblasť sú pre každé zemetrasenie prezentované vo forme **máp izoseist** (ukážka je na obr. 1). **Izoseisty** sú čiary oddeľujúce oblasti s rôznou intenzitou. Jedným z najznámejších atlasov máp izoseist v Európe je Atlas máp izoseist pre strednú a východnú Európu [16].

Z rozloženia intenzitných bodov alebo izoseist sa určujú makroseizmické parametre zemetrasenia – **makroseizmické epicentrum zemetrasenia, epicentrálna intenzita  $I_0$ , makroseizmické magnitúdo, makroseizmická hĺbka ohniska zemetrasenia – a empirické útlmové vzťahy pre makroseizmickú intenzitu**. Prehľad metód určenia jednotlivých parametrov zemetrasenia z makroseizmických údajov je napr. v [17].

Intenzita	Definícia	Skrátený popis typických účinkov
1	nepocítané	Nepocítané.
2	zriedkavo pocítané	Pocítané len jednotlivcami na niektorých miestach v domoch.
3	slabé	Zemetrasenie vnútri cítia niekoľkí (0-20%). Ľudia nanajvýš cítia hojkanie 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 cítia 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 polic 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 zrúti.
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. 3.1. Krátka forma stupnice EMS-98.



Obr. 3.1. Mapa izoseist zemetrasenia 28.4.1988 na strednom Slovensku. Pre jednotlivé hodnoty intenzity sú použité rôzne symboly. Čiary predstavujú izoseisty. Hviezdička označuje polohu epicentra zemetrasenia. V tabuľke je dátum a čas vzniku zemetrasenia, súradnice makroseizmického epicentra, makroseizmická hĺbka ohniska, makroseizmická magnitúdo a epicentrálna intenzita.

### 3.4 Závěrečná poznámka

S rozvojom prístrojových pozorovaní došlo v polovici 20. storočia k určitému poklesu záujmu o makroseizmický výskum zemetrasení. K obratu dochádza v polovici 70-tych rokov a v súčasnosti je kľúčovým pre analýzu historických zemetrasení a neodmysliteľným pri určovaní seizmického ohrozenia.

### Použitá literatúra

- [1] M. Sarconi: *Istoria dei fenomeni del tremoto avvenuto nelle Calabrie, e nel Valdemone nell'anno 1783*, Luce dalla Reale Accademia della Scienze, e delle Belle Lettere di Napoli, Naples 1784.
- [2] P.N.C. Egen: Über das Erdbeben in den Rhein- und Niederlanden von 23 Feb. 1828, *Ann. Phys. Chem.*, **13**, 153-163 (1828).
- [3] C. Davison: *Philosophical Magazine*, 5th Series, **50**, 44-53 (1900).
- [4] C. Davison: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **11**, 2, 95-129 (1921).
- [5] C. Davison: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **23**, 158-166 (1933).
- [6] A. Sieberg: *Gerl. Beitr. Geophys.*, **11**, 227-239 (1912).
- [7] A. Sieberg: *Geologische, physikalische und angewandte Erdbebenkunde*. Verlag von Gustav Fischer, Jena 1923.
- [8] A. Sieberg: *Geologie der Erdbeben. Handbuch der Geophysik*. Gebr. Bornträger, Berlin 1932, Vol 2 pt 4, 550-555.
- [9] H. O Wood, F. Neumann: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **21**, 277-283 (1931).
- [10] C.F. Richter: *Elementary Seismology*. Freeman, San Francisco, Calif. 1958.
- [11] W.Sponheuer, V. Kárník. *Neue seismische Skala*, Proc. 7th Symposium of the ESC, Jena, 24-30 Sept. 1962, Veröff. Inst. f. Bodendyn. u. Erdbebenforsch. d. Deutschen Akad. d. Wiss., No 77, Jena 1964, ss. 69-76.
- [12] G. Grünthal (Editor): *European Macroseismic Scale 1998*. Conseil de L' Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15, Luxembourg 1998.
- [13] *Seismicheskaya shkala i metody izmereniya seismicheskoy intensivnosti*, Izdatelstvo Nauka, Moskva 1975.
- [14] P. Labák, M. Kováčová: *Semiautomatic intensity estimation for the macroseismic data acquired using the new Slovak macroseismic questionnaire*. Abstracts of the 28th General Assembly of the European Seismological Commission, Genoa 2002, s. 280.
- [15] P. Labák, Ch., Hammerl: 2000. *Graphic form of the EMS-98 scale – examples of application to historical earthquakes*. Proceedings of the 1st workshop of the ESC working group Historical Seismology Sep. 1-5, 1999, Macerata 2000, ss. 40-43.
- [16] D. Procházková, V. Kárník, (Editors): *Atlas of isoseismal maps, Central and Eastern Europe*. Geophysical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague 1978.
- [17] R. Musson: *Intensity and intensity scales. New manual of seismological observatory practice*. Global Seismological Services, Golden, Colorado 2002.

## **4 Monitoring of earthquakes on the territory of Slovak Republic by the National Network of the Seismic Stations**

Although the territory of Slovakia looks to be not very seismically active at the moment (only few stronger earthquakes occurred here in last decades), its seismic history is quite eventful. There were earthquakes here that caused severe material damages and injuries even losses on human lives. Earthquakes with macroseismic observations (effects on people, objects and nature, and damage to buildings) on the territory of Slovakia are listed in a catalogue of macroseismically felt earthquakes. The macroseismic earthquakes catalogue for Slovakia consists of more than 650 earthquakes for recent 500 years. Because of incompleteness of historical documentation it is more than reasonable to suppose that in reality even more earthquakes were macroseismically felt on the territory of Slovakia. According to analysis of historical earthquakes seven main seismic source zones were distinguished in the Slovak republic - Eastern Slovakia, Spiš, Central Slovakia, Žilina, Komárno, Dobrá Voda and Pernek-Modra source zones. Due to the fact that tectonic evolution of our region is not finished yet it is logical to expect occurrence of similar big earthquakes here also in future. Therefore it is very important to pay high attention to monitoring of seismic activity on the territory of Slovakia.

Over several decades, the Geophysical Institute of Slovak Academy of Sciences (GPI SAS) has operated the National Network of Seismic Stations (NNSS), and analyzed instrumental and macroseismic data for recent earthquakes from the territory of Slovakia. The institute also participates in analysis of data from two local seismic networks deployed around the Bohunice and Mochovce Nuclear Power Plants in Slovakia. In cooperation with several Slovak and foreign geological and geophysical institutions, the institute performed the probabilistic seismic hazard assessment for the Bohunice and Mochovce Nuclear Power Plants.

### **4.1 The National Network of Seismic Stations**

Tab. 4.1 shows basic parameters of seismic stations of the National Network of Seismic Stations - status in the year 2005. This status was achieved by successful accomplishing of the project of Modernization and Extension of NNSS that was realized in the years 2001-2004. In the scope of this project seven new seismic stations (CRVS, KECS, KOLS, LIKS, SRO1, SRO2 and STHS) were built, four existing seismic stations (MODS, SRO, VYHS and ZST) were modernized. Real-time connection between data center in Bratislava and all seismic stations was established. A comparison of the main characteristics of NNSS in years 2000 and 2005 shows great improvement achieved in the scope of project (Tab. 4.2). Four stations are equipped with broadband seismometers. Two stations are equipped with SKD seismometers (ZST, MODS), two stations are equipped with STS-2 seismometers (VYHS, CRVS), respectively. While three stations (ZST, MODS and SRO) use Lennartz PCM 5800 data acquisition systems, remaining stations use the SEMS data acquisition system. All seismic stations are registered in the International Seismological Centre, ISC, in the Great Britain.

Fig. 4.1 shows map of NNSS. The seismic stations were deployed with intension to determine seismic source zones on the territory of Slovakia more precisely and to allow us to record and

localize any earthquake with possible macroseismic observations regardless in which part of Slovakia it will occur.

Name	ISC Code	Lat. [°N]	Lon. [°E]	Alt. [m]	Seismometers	DAS	Sampling freq. [sps]	Data transfer	Data format
Bratislava - Železná Studnička	ZST	48.196	17.102	250	3x SM-3 3x SKD	PCM	100 20	Continuous, real time	mSEED
Modra-Piesok	MODS	48.373	17.277	520	LE3D 3x SKD	PCM	100 20	Continuous, real time	mSEED
Smolenice	SMOL	48.514	17.429	400	LE3D	SEMS	100	Continuous, real time	mSEED
Vyhne	VYHS	48.493	18.836	450	STS-2	SEMS	100 20	Continuous, real time	mSEED
Šrobárová	SRO	47.813	18.313	150	3x SKM3	PCM	20	Continuous, real time	mSEED
Iža	SRO1	47.762	18.233	111	LE3D	PCM	20	Continuous, real time	mSEED
Moča	SRO2	47.763	18.394	109	LE3D	PCM	20	Continuous, real time	mSEED
Likavka	LIKS	49.050	19.106	341	LE3D	SEMS	100	Continuous, real time	mSEED
Kečovo	KECS	48.483	20.486	345	LE3D	SEMS	100	Continuous, real time	mSEED
Kolonické sedlo	KOLS	48.933	22.273	460	LE3D	SEMS	100	Continuous, real time	mSEED
Stebnícka Huta	STHS	49,417	21.244	534	LE3D	SEMS	100	Continuous, real time	mSEED
Červenica	CRVS	48.902	21.461	476	STS-2	SEMS	100 20	Continuous, real time	mSEED
Hurbanovo	HRB	47.873	18.192	115	2x Mainka	-	-	-	-

Tab. 4.1. Basic parameters of seismic stations of NNSS.

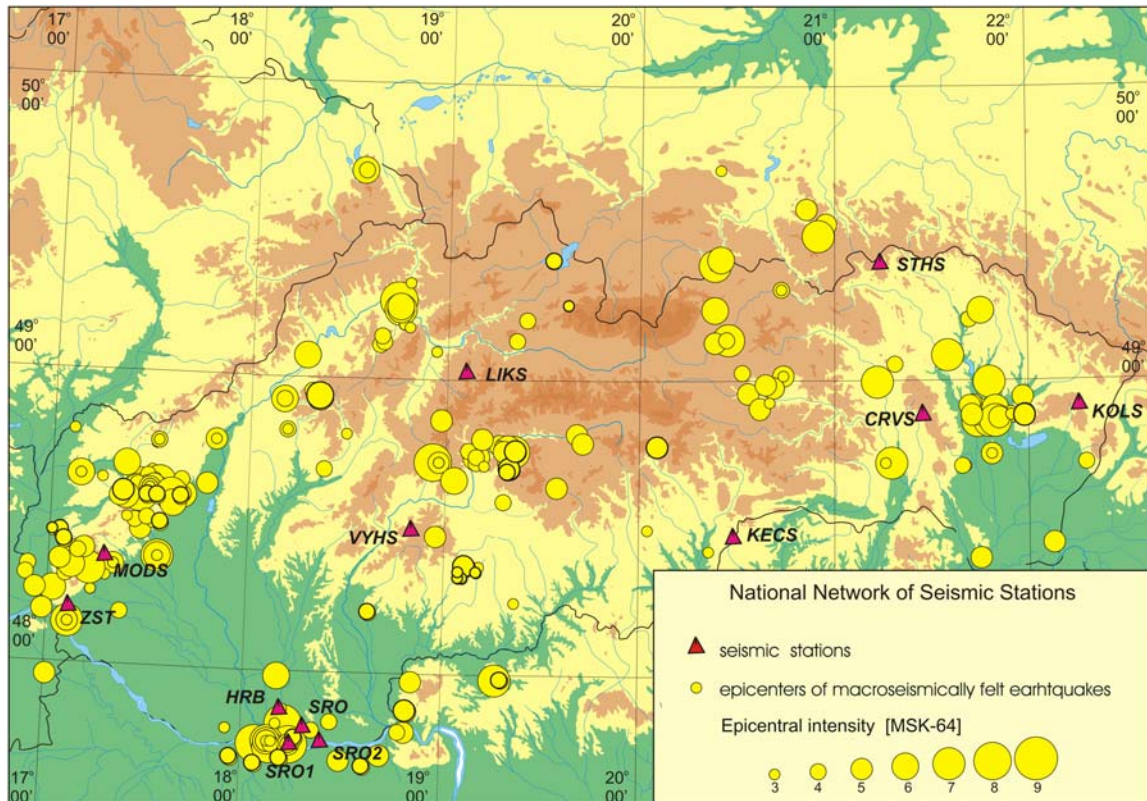


Fig 4.1. National Network of Seismic Stations.

Item	Status in 2000	Status in 2005
Total number of stations in the national network	6	12
Number of BB stations	1	4
Number of SP stations	5	8
Number of stations with real-time data transmission in the national network	1	12
Total number of stations received in real-time (including foreign stations)	1	60
Automatic localization of earthquakes	no	yes
Automatic e-mail messages with earthquake parameters	no	yes
Automatic generation of web pages with localizations	no	yes
Live seismograms on web page	no	yes
Archiving facilities	magnetic tapes	HDD DVD
Archived streams	event oriented	continuous streams
Approx. capacity of archiving facilities	10 GB	4 400 GB

Tab. 4 2. Comparison of main characteristics of NNSS in the years 2000 and 2005.

## **4.2 Data transfer, collection, exchange and archiving**

A data center of the national network is located in the Geophysical Institute, Slovak Academy of Sciences in Bratislava. It collects waveforms from all stations of NNSS and from selected seismic stations of some other institution from Central and Southeastern European countries. Data are collected in near-real time using the SeisComp/SeedLink (Hanka et al., 2000, Van Eck et al., 2004, Hanka & Saul, 2006) or SEMS SeedLink software, respectively. The miniSeed format is used for both data collection and data exchange. In total, data from 60 seismic stations are collected (11 stations from the national network and 49 stations from co-operating institutions). These stations create Regional Virtual Seismic Network of the GPI SAS (Fig. 4.2). Live seismograms from the national network are available at the <http://ww.seismology.sk> web page. Live seismograms are archived for last 30 days.

Seismic waveforms are exchanged with all institutions which supply data to the data center in Bratislava. In addition, the seismic waveforms are sent also to the Orfeus Data Center, De Bilt, Netherlands. Data flow between the data center in Bratislava, the seismic stations of NNSS and other institutions is shown in Fig. 4.3.

The archiving of the waveforms was changed as well. Since July 2002 a two step procedure has been used for archiving of continuous waveforms. First, the waveforms are stored in the 1.8 TB Raid field. Then, data are copied also to the 2.4 TB Jukebox NSM 3000. Records of local, regional and teleseismic events are archived. All waveform data are available on request. During 2004, a new AutoDRM system was installed (web page interface is available at [www.seismology.sk](http://www.seismology.sk)).

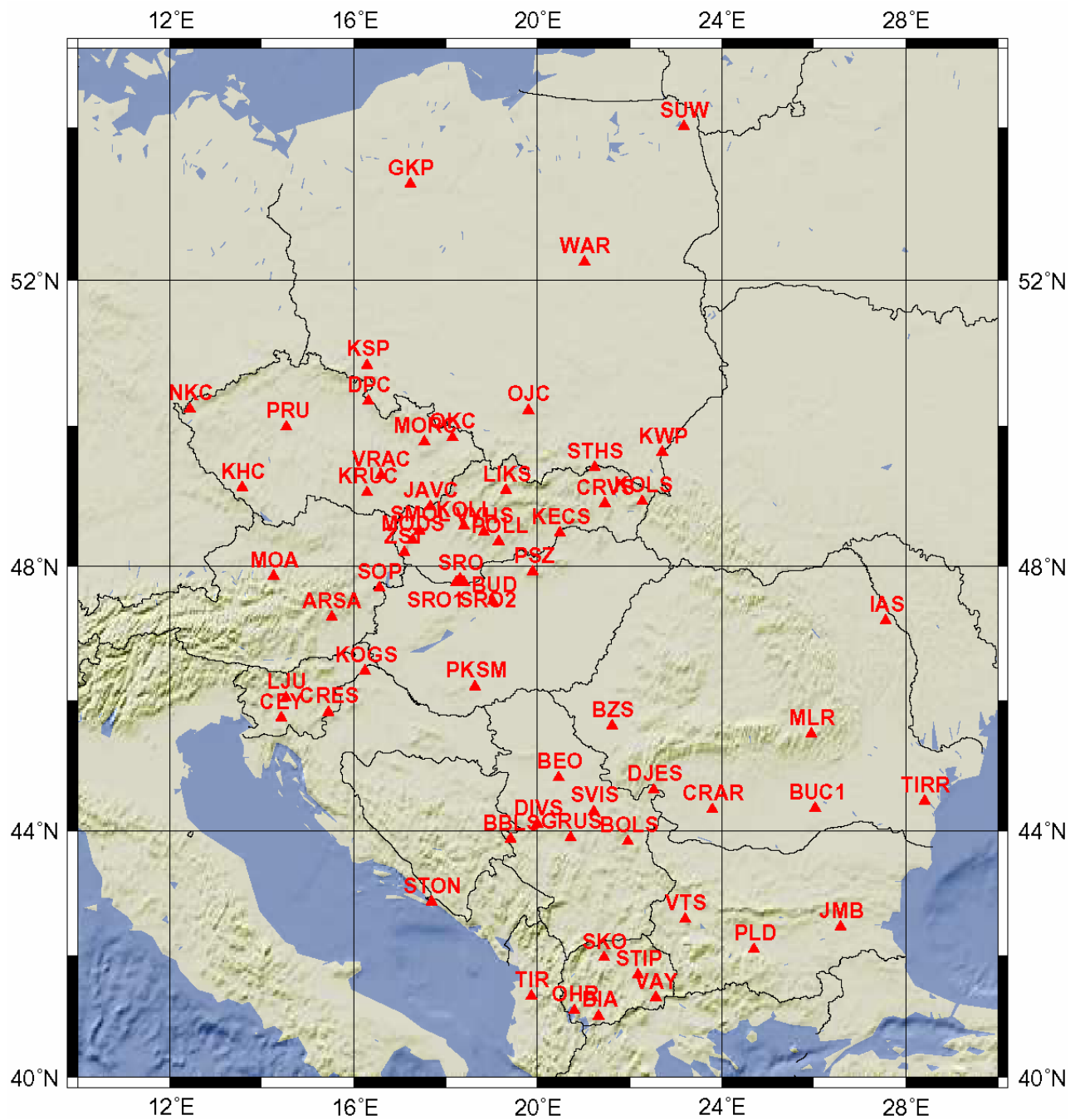


Fig. 4.2. Virtual Regional Seismic Network at the Geophysical Institute, Slovak Academy of Sciences, Bratislava. Status in 2005.

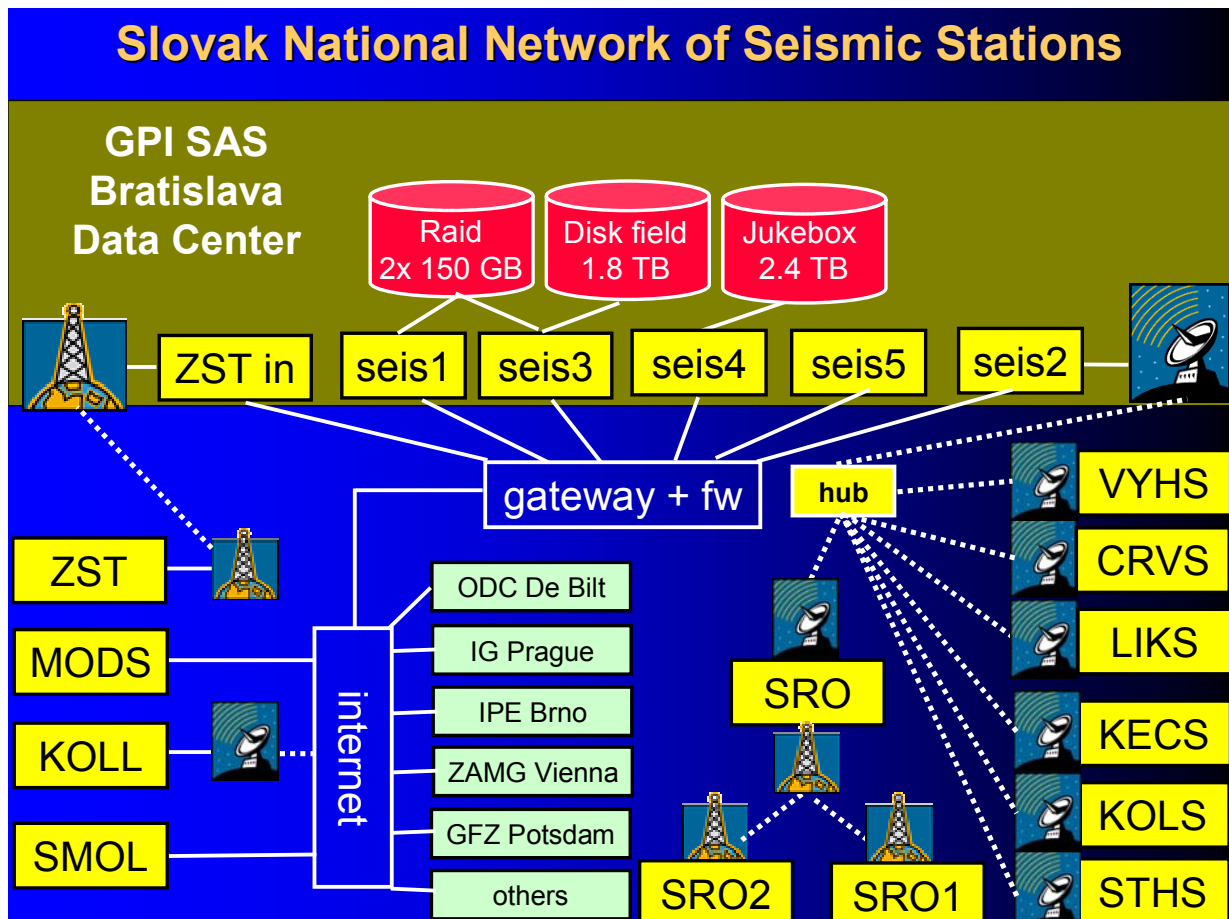


Fig. 3. Data flow between the data center in Bratislava, seismic stations of the Slovak National Network of Seismic Stations and other institutions.

### 4.3 Data processing and analysis

A two-step analysis of seismic waveforms is performed:

1. Automatic analysis and localization of earthquakes,
2. Manual analysis and localization.

The automatic analysis is performed by AutoLoc package of GFZ Potsdam (Hanka & Saul, 2006). The package was installed in February 2003. First automatic localization is available till 10 minutes after an event occurrence. After fulfillment of alerting criteria, information is sent to the Civil Protection and other relevant authorities. Results of automatic localization of events are available also at the <http://www.seismology.sk> web page (see example in Fig. 4.4).

The manual analysis is performed using the Seismic Handler package of K. Stammler since October 2003 (Stammler, 1993). The results of waveform interpretation and earthquake localization are stored in a database that is in operation since 1996. Fig. 4.5 shows an example of event interpretation for the May 20, 2003,  $M_L = 3.7$  earthquake in Eastern Slovakia.

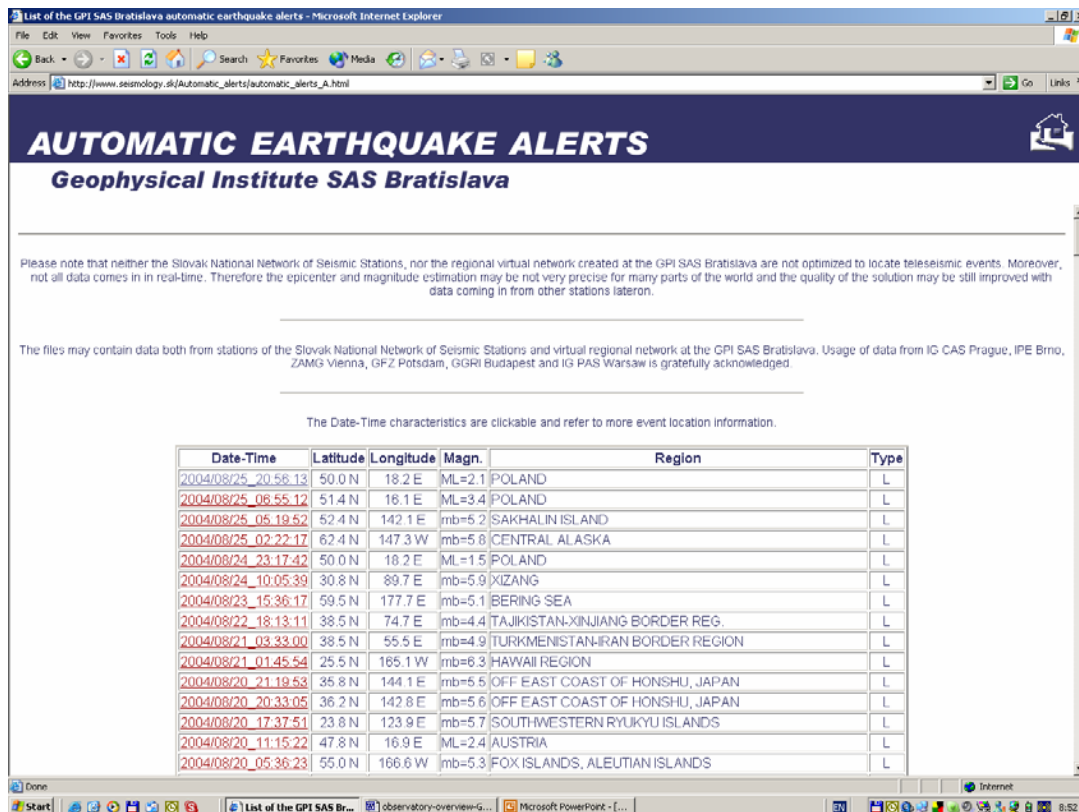


Fig. 4.4. Results of automatic localization of events using the AutoLoc 1.0 package of GFZ Potsdam. All localizations are available at the <http://www.seismology.sk> web page.

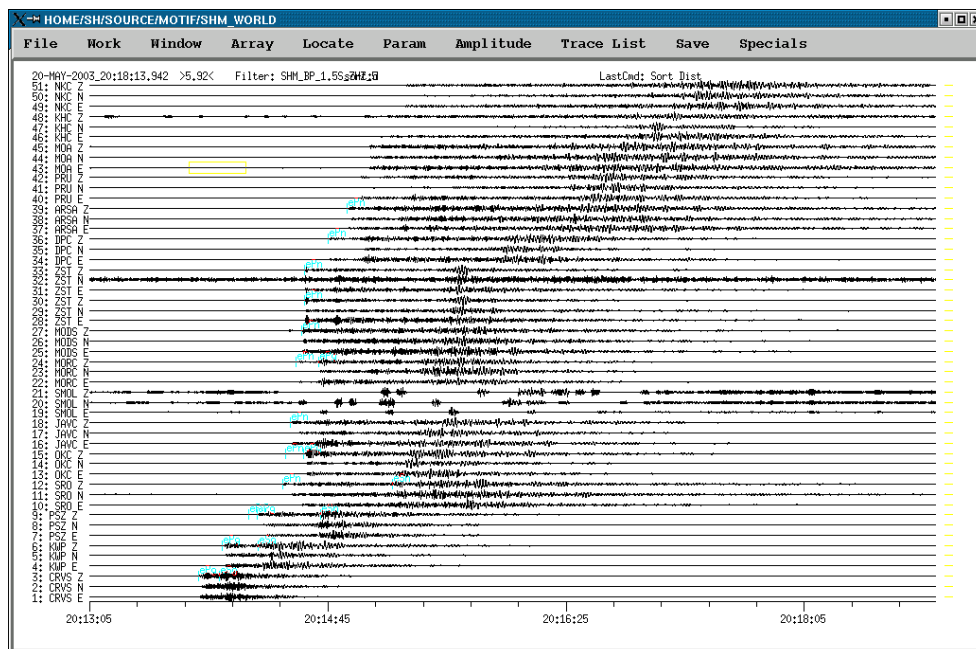


Fig. 4.5. Example of manual event interpretation using the Seismic Handler package. Shown traces are from the Virtual Regional Seismic Network at the GPI SAS Bratislava for the May

## Referencies

- Hanka, W., Heinloo, A. & Jäckel, K.-H., 2000: Networked Seismographs: GEOFON Real-Time Data Distribution, *ORFEUS Electronic Newsletter*, Vol. 2, No 3. (<http://orfeus.knmi.nl/>)
- Hanka, W. & Saul, J., 2006: GEOFON and its Role in Earthquake Monitoring and Tsunami Warning. *Proceedings of the NATO Workshop on Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries*, Borovetz, Bulgaria, September 11-17, 2005, in press.
- Stammler K., 1993: Seismic-Handler - Programmable multichannel data handler for interactive and automatic processing of seismological analyses, *Computers & Geosciences*, Vol. 19, No. 2, 135-140.
- Van Eck, T., Trabant, C., Dost, B., Hanka, W., & Giardini, D., 2004: Setting up a virtual Broadband Seismograph Network Across Europe. *EOS, Transactions, AGU*, Vol. 85, No. 13, p.