

Earthquake hazard assessment of the Bábaapáti (Üveghuta) Site

VLADIMÍR SCHENK¹, ZOLTÁN BALLA², ZDEŇKA SCHENKOVÁ¹, PAVEL KOTTNAUER¹,
ANTONINA DUDKO², GYULA MAROS², RICHARD PICHL¹, ZUZANA JECHUMTÁLOVÁ¹ and MICHAL JECHUMTÁL¹

¹ Institute of Rock Structure and Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, V Holesovickách 41, 182 09, Prague 8, Czech Republic

² Geological Institute of Hungary, H-1143, Hungary, Budapest, Stefánia út 14.

Key words: earthquakes, epicenters, Hungary, Mórág Block, radioactive waste, seismic intensity, seismicity maps, seismic risk, seismic sources, South-eastern Transdanubia, waste disposal site

Abstract

This study deals with the problem of defining probabilistic earthquake hazard assessment for the Bábaapáti (Üveghuta) Site, corresponding to recent requirements of engineering practice for radioactive waste disposal. A catalogue of earthquakes up to distance of 400 km was compiled, and seismic source regions considered from geological and geophysical materials were delineated. For every source region seismic input data (*i.e.* activity rate, the maximum earthquake) and the regional attenuation law of seismic waves were evaluated, and then earthquake hazard values for a requested return period of 600 years were calculated. The applied approach extends the procedure of input data standardisation earlier published by V. SCHENK (1983, SCHENK et al. 1997, 2000). In the presentation four hazard outputs were calculated in order to estimate reliable hazard assessments for the surface level and for a depth of 250 metres. The results are presented and discussed from a viewpoint of recent safety regulations to confirm that the Bábaapáti (Üveghuta) Site is suitable for underground radioactive waste disposal.

Introduction

The probabilistic earthquake hazard assessment follows statistical conditions adopted in many national seismic building codes and international recommendations (*e.g.* Eurocode 8 1998, IAEA 1972). The reliability of earthquake hazard calculation depends on input data and, therefore, their evaluations both by statistical approximations and by expert estimates are necessary. Statistical methods frequently applied for the input data determination allow their mean values and standard deviations to be calculated. In the paper the standard deviations of the input data were taken as measures allowing for a 90% probability of hazard values to be taken into account.

The earthquake hazard is a conditional probability of the following input data and these are used for its calculation (CORNELL 1968):

- seismogenic rates of a source region expressed by their recurrence graphs,
- the maximum expected earthquakes determined for every source region, and

— an attenuation relationship of seismic waves given in macroseismic intensities and/or in particle ground accelerations.

The conditional probability $P_{\text{eq-haz}}$ is then expressed in the form

$$P_{\text{eq-haz}} = P_{\text{rate}} \times P_{\text{max-eq}} \times P_{\text{atten}}. \quad (1)$$

It is assumed that the input data introduced to the hazard calculations follow the normal distribution — *i.e.* for each of them the mean value and standard deviation (σ) can be determined. The standard deviation σ describes how tightly all approximated values are quantitatively clustered around the mean in a set of data. The interval “mean value $\pm \sigma$ ” involves 68.3% of occurrences of these events, the interval “mean value $\pm 2\sigma$ ” involves 95.7%, *etc.* If only one-side distribution levels are investigated — *e.g.* the side of the maximum values (called the safety-margin side) — then the interval “mean value $\pm \sigma$ ” will involve 84.1% of occurrences of these values; *i.e.* all values from the smallest one up to the level “mean value $+\sigma$ ”. Likewise, the interval “mean value $+2\sigma$ ” will involve 97.7%, *etc.* This standard deviation concept was

applied in order to determine the P_{rate} , $P_{\text{max-eq}}$ and P_{atten} of related input data quantities; this would guarantee the hazard calculation of their safety-margin approximations with respect to the required conditional probability $P_{\text{eq-haz}} = 0.9$. Under such conditions the individual estimates of the probabilities P_{rate} , $P_{\text{max-eq}}$ and P_{atten} could only lie in the interval 0.9–1.0. For example, if one of these input data probabilities is equal to 0.9, the other two probabilities already have to be equal to 1 only.

Earthquake hazard input data for the Bábaapáti (Üveghuta) Site

Seismic source regions

Usually a radius of around 200 km is applied for an earthquake hazard assessment. The Bábaapáti (Üveghuta) Site is the subject of a very long-term operation — *i.e.* a final underground radioactive waste repository is planned. Hence we decided to enlarge the radius up to 300–400 km to preclude omitting any pronounced seismoactive zone and to make to a better correlation with any dominant regional structures displayed on geological and geophysical maps with earthquake occurrences.

For earthquakes which have occurred up to a distance of 200 kilometres there are catalogues compiled by seismologists of related countries: Bosnia and Herzegovina (CVIJANOVIĆ 1981), Croatia (CVIJANOVIĆ 1981; HERÁK 1995), Hungary (ZSÍROS et al. 1988; MÓNUS et al. 2002), Romania (ONCESCU et al. 1999), Serbia (CVIJANOVIĆ 1981), Slovakia (LABÁK, BROUČEK 1995) and Slovenia (RIBARIĆ 1982, ŽIVČIĆ 1993). For a 300–400 kilometre distance selected parts of catalogues for Austria (DRIMMEL, FIEGWEL 1995), Czech Republic (SCHENKOVÁ et al. 2000), Italy (OGS 1987; POSTPISCHL 1985) and Poland (GUTERCH 1995) were referred to. In this way the earthquake catalogue for the Bábaapáti (Üveghuta) Site also comprises data from national and international/regional catalogues (SHEBALIN et al. 1974; SCHENKOVÁ, KÁRNÍK 1993).

Earthquake occurrences near country borders were clarified in accordance with the catalogues mentioned above. The compilation of the working seismicity file for the Bábaapáti (Üveghuta) Site included the careful merging of all catalogue data in order to exclude double (triple, *etc.*) events. The parameters were then checked with the international catalogues covering territories of more countries and all the details were finally homogenised.

Before starting the source region delineation, the physical grounds of the delineation were pointed out. It was evident that an optimal balance between “seismological” and “earthquake-engineering” strategies should also be defined.

A *seismological strategy* endeavours to find a consonance between a source region and a seismogenic zone. The term seismogenic zone usually refers to a structural tectonic element which produces practically the same type of earthquakes with very similar focal mechanisms. Yet in contrast

to this fact, nobody can be sure that seismogenic zones identified by this approach are really all possible zones of the area under study, even if all known data have undergone their identification process. Further, nobody can exclude a case in future in which another new zone could originate there, or that any contemporary weak seismic activity in a certain zone could increase. It is known that a preparatory process leading to a strong earthquake, especially in areas of moderate seismicity, lasts a long time (*i.e.* several hundreds or thousands years). Therefore, if a relatively large geological structure exists, and inside it many similar seismogenic zones are identified, it is advantageous to place all the zones into one source region. On the one hand this simplifies the hazard calculations and, on the other hand, it is a rather important factor which allows a new (and still unknown) earthquake-prone zone to be also included in the source region.

In the *earthquake-engineering strategy* the earthquakes are taken as sources of mechanical vibrations which affect buildings and other engineering structures. From this viewpoint, the main aspects for delineating the source region include a clustering of earthquakes and their epicentre density. In general, engineering structures are not significant for defining the type of earthquake but rather the intensity of vibrations.

It is evident that in both strategies the reliability of the source region delineation depends on the number of earthquake occurrences: the lower the amount of earthquake events located in one source region, the lower the credibility of the approximations obtained by the statistical processing of data which characterise the source region. It means that not only an optimal balance between the two strategies but also a statistical balance among the data is needed.

From the viewpoint of the earthquake hazard assessment, analyses and correlations between the earthquake epicentres and geological structures should be more detailed for distances near to the investigated site; as the distance increases not so much detail is required. The source regions close to the site have to be delineated more precisely (*i.e.* small regions and/or sub-regions have to be introduced). Consequently, maps of different scales are needed: from 1:50,000 (near to the site), to 1:100,000 (for distances of 70–200 km), and up to 1:200,000 or 1:500,000 (for distant regions 300–400 km away). If no such maps exist, other related materials have to be used.

Problems could appear if, within the area of the investigated radius, there are territories of other countries, and their geological and geophysical data have been processed and compiled in different ways. Expert estimations must then be introduced. Since such case represents a particular task, it must be solved individually with respect to the local and regional conditions of the area. In this investigation, from geological and geophysical materials and databases the following data were applied: geological, structural and tectonic maps and selected cross-sections; data on sedimentary covers and, if possible, their seismic P- and S-wave velocities and bulk densities; and maps of Bouguer anomalies, Moho discontinuity and recent crustal movements. Other geologi-

cal information that could contribute to understanding the seismicity and geodynamical pattern of the area up to 200 and 300-400 kilometres were also applied.

The earthquake data file allowed *source regions* to be delineated in accordance with earthquake epicentre distribution and geological structures (Figure 1). The principal

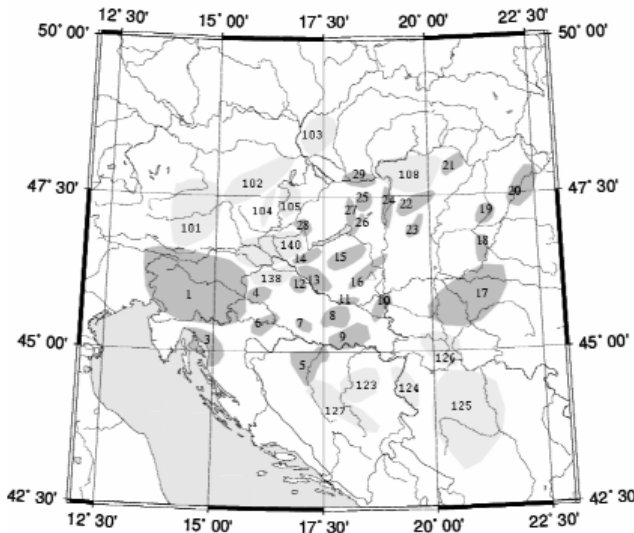


Figure 1. Source regions for the Bataapati (Üveghuta) Site
Dark grey = major source regions (listed in text), light grey = additional source regions (not listed in text)

1. ábra. A Bataapati (Üveghutai)-telephely forrásterületei
Sötétszürke = fő forrásterületek (a szövegben felsorolva), világosszürke = kiegészítő forrásterületek (a szövegben nem említve)

source regions were delineated carefully because of their direct influence on the earthquake hazard assessment of the Bataapati (Üveghuta) Site. A list of the source regions applied for the Bataapati (Üveghuta) Site is given below:

- | | | |
|-------------------------------|-------------------|---------------|
| 1. Slovenian | 12. Koprivnica | 23. Kecskemét |
| 2. Peri-Adriatic ¹ | 13. Dráva | 24. Duna |
| 3. Kvarner | 14. Buzsák | 25. Zámoly |
| 4. Medvednica | 15. Kapos-Tamási | 26. Polgárdi |
| 5. Banja Luka | 16. East Mecsek | 27. Berhida |
| 6. Sisak | 17. Banat | 28. Nagyörbő |
| 7. Pakra | 18. Békés | 29. Komárom |
| 8. Papuk | 19. Szeghalom | |
| 9. Slavonski Brod | 20. Érmellék | |
| 10. Osijek | 21. Southern Bükk | |
| 11. West Villány | 22. Bogyi | |

Earthquake activity rates and maximum earthquakes

The earthquake sub-catalogues for every region were created and normalised with respect to the time occurrence of individual events (SCHENK 1983). Then the cumulative annual recurrence graphs of all source regions were assessed. They characterise the earthquake activity rates in accordance with the following relations:

¹It is not indicated separately; runs along the northern rim of 1.

$$\log \sum N_y(I_0) = (a \pm \sigma_a) - (b \pm \sigma_b) \times I_0 \quad (2)$$

where N_y is the annual occurrence rate of earthquakes and the epicentre intensity is I_0 .

The regression coefficients a and b were determined together with their standard deviations σ_a and σ_b with the least square method being applied for all source regions. Individual approximations obtained for every source region and used in the hazard calculation distinctly display the safety-margin probability level with respect to the standard deviations of 1σ (0.68 or 68%). To introduce that level (SCHENK et al. 1997) into the earthquake hazard calculations, the mean values of coefficients a have to be enlarged for σ_a . On the other hand, the mean values of coefficients b must be decreased for σ_b . An example of this approximation for the source region No. 4 Medvednica can be seen in Figure 2.

The source region sub-catalogues were individually analysed to obtain estimates of the maximum possible epicentre intensity I_0 . The theory of extreme values — the Gumbel III statistic procedure (GUMBEL 1958) — allows asy-

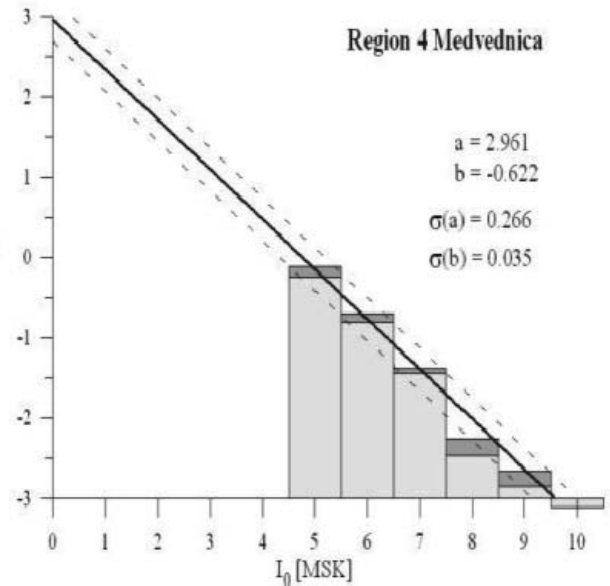


Figure 2. The cumulative annual recurrence graph for the source region No. 4 Medvednica

Light grey columns = standard distribution, dark grey columns = cumulative distribution, bold line = mean approximation of the cumulative distribution, dashed lines = standard deviation σ_a limits

2. ábra. A 4. sz., Medvednicai forrásterület kumulatív éves visszatérési diagramja

Világosszürke oszlop = standard eloszlás, sötétszürke oszlop = kumulatív eloszlás, vastag vonal = a kumulatív eloszlás középértékének közelítése, szaggatott vonal = a standard szórás σ_a határa

mptotic approximations of the maximum expected earthquakes to be found both for various time intervals (sequentially increasing from a one year up to a several years time interval) and for various intensity levels of sub-catalogue data (SCHENK, KOTTNAUER 1991).

The maximum earthquake probability $P_{\max\text{-eq}}$ was evaluated for every source region by the mean value of Gumbel III approximations calculated for the return period of 10,000

years (SCHENK et al. 1997). Standard deviation σ was obtained for each mean value, and finally the “mean value + 2” σ ” was adopted for the probability $P_{\text{max-eq}} = 0.99$ (as the maximum expected earthquake). If the Gumbel III statistics gave any indistinct solution, the maximum expected intensity was determined by an expert estimate which took into ac-

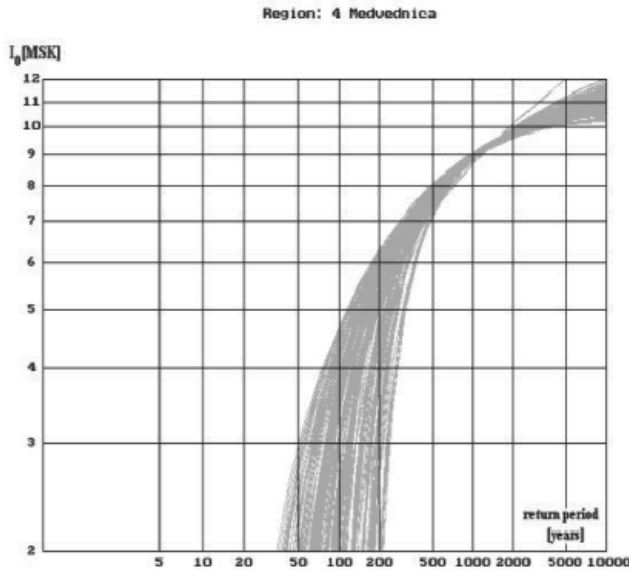


Figure 3. The Gumbel III extreme distributions for the source region No. 4 Medvednica

Gray lines = individual solutions of the Gumbel III distributions obtained for various combinations of interval durations and for a given period of observation

3. ábra. A 4. sz., Medvednicai forrásterület Gumbel III kiugró eloszlásai
Szürke vonalak = a Gumbel III eloszlás egyedi megoldásai adott megfigyelési időszakra és különböző intervallumokra

count the maximum observed intensity. An example of the Gumbel III distribution for the source region No. 4 Medvednica is shown in Figure 3.

Macroseismic intensity attenuation law

Attenuation relations greatly influence the earthquake hazard assessments. For the hazard calculations the intensity attenuation laws were compiled from all available isoseismal maps of Hungary and neighbouring countries up to a distance of 300 kilometres from the Bábaapáti (Üveghuta) Site (Table 1).

The dashed lines on Figure 4 were approximated by the relation applied for the earthquake hazard assessment in the various forms with respect to standard deviation σ

$$I - I_0 = (2.79 \pm 1.76) - 1.69 \log R \text{ (km) ,}$$

i.e. for the mean values

$$I - I_0 = 2.79 - 1.69 \log R \text{ (km) (P = 50%),}$$

for the mean values plus σ

$$I - I_0 = 4.55 - 1.69 \log R \text{ (km) (P = 84%),}$$

for the mean values plus 1.5 σ

$$I - I_0 = 5.43 - 1.69 \log R \text{ (km) (P = 90%), etc.}$$

Table 1. List of the isoseismal maps analysed

Date	I_0	Date	I_0
28 June 1763	9.5	3 July 1925	5.0
14 Jan 1810	8.0	28 Sept 1926	6.5
1 July 1829	7.0	8 Oct 1927	7.9
15 Oct 1834	8.0	18 Mar 1928	7.0
15 Oct 1834	8.5	25 Aug 1928	7.5
1 July 1851	7.5	6 Mar 1930	6.0
10 Oct 1879	8.0	11 Apr 1930	5.0
11 Oct 1879	8.0	20 July 1930	5.0
22 June 1892	7.0	22 Aug 1930	6.0
11 Mar 1893	7.0	31 Aug 1934	6.5
14 Apr 1895	8.5	4 Mar 1936	5.0
29 Jan 1900	6.5	6 Sept 1936	7.0
16 Feb 1901	5.5	10 June 1937	6.0
17 Dec 1901	7.0	27 Mar 1938	8.0
26 June 1903	8.0	23 Mar 1939	5.5
23 May 1905	7.0	14 May 1942	6.0
17 Dec 1905	7.5	30 Sept 1942	6.0
22 Mar 1907	6.0	21 Nov 1942	5.0
19 Feb 1908	6.5	14 Mar 1949	6.0
28 May 1908	7.5	31 Aug 1950	8.0
29 May 1909	6.0	19 Feb 1951	7.0
8 Oct 1909	8.5	13 Sept 1953	6.5
11 May 1910	6.0	27 May 1959	7.5
8 July 1911	9.0	22 Oct 1960	6.0
1 May 1916	7.0	13 Apr 1964	8.0
29 Jan 1917	8.0	31 Dec 1969	7.0
24 Nov 1922	7.0	15 Aug 1985	6.5
31 Jan 1925	8.5		

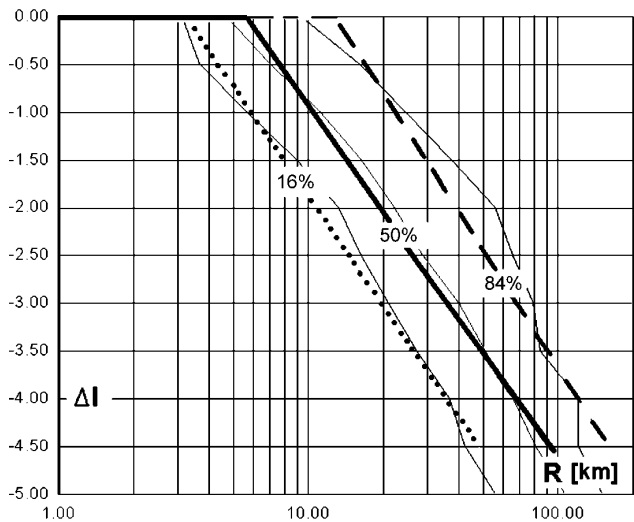


Figure 4. Macroseismic intensity attenuations determined for the broad Bábaapáti (Üveghuta) Site

Bold line = mean values (P = 50%), dotted line = mean values minus standard deviation σ (P = 16%), dashed line = mean values plus standard deviation σ (P = 84%)

4. ábra. A Bábaapáti (Üveghutai)-telephely széles körzetére meghatározott makroszeizmikus intenzitás-csillapodások

Vastag vonal = középértékek (P = 50%), pontozott vonal = középértékek mínusz σ standard szórás (P = 16%), szaggatott vonal = középértékek plusz σ standard szórás (P = 84%)

Only relations with “plus σ ’s” are mentioned because they were applied in the hazard calculations to obtain resulting values for “safety-margin” sides.

Probabilistic earthquake hazard calculations

The earthquake hazard calculations were performed with respect to the Decree 62/1997 (XI. 26.) IKIM of the Ministry of Industry, Trade and Tourism. This states: “the seismic stability of the site must be studied in a geological scale and predicted for 600 years”. Therefore, the hazard calculations had to involve input data probabilities (see above) satisfying a return period of 600 years. Since the constructions in the Bataapati (Üveghuta) Site are assumed to be more durable, their life-time was increased to 150 years. Under such conditions the earthquake hazard assessment for the return period 600 years, and which determine the seismic stability of the Bataapati (Üveghuta) Site, was calculated for the non-exceedance probability $P_{eq-haz} = 78\%$. To illustrate trends of hazard output dependence up to the resulting probability $P_{eq-haz} = 78\%$, four solutions for the earthquake hazard assessments are given in Table 2.

The earthquake hazard calculations for the Bataapati (Üveghuta) Site were accomplished by the program SERIAL (SCHENK 1979), based on Cornell’s algorithm (CORNELL 1968). The hazard curves were expressed in macroseismic intensities and calculated for conditional probabilities P_{eq-haz} of 25, 58, 70 and 78% to obtain a set of hazard solutions related to the non-exceedance probability 78% in 150 years and corresponding to the return period of 600 years.

Figure 5 demonstrates the resulting hazard values for the Bataapati (Üveghuta) Site: one can see that the maximum earthquake hazard value which can be expected at the Bataapati (Üveghuta) Site on its ground surface reaches principally a macroseismic intensity around 6 °MSK. When P_{eq-haz} increases, the maximum hazard values shift towards higher values, since the macroseismic intensity decrease ΔI is less intensive as the distance increases. Most of the source regions have at some time affected the Bataapati (Üveghuta) Site up to a principal value of 6 °MSK. Only source region No. 4 Medvednica for $P_{eq-haz} \leq 70\%$ shifted the hazard value to $6^{3/4}$ °MSK. In the case of $P_{eq-haz} \approx 78\%$, the Medvednica

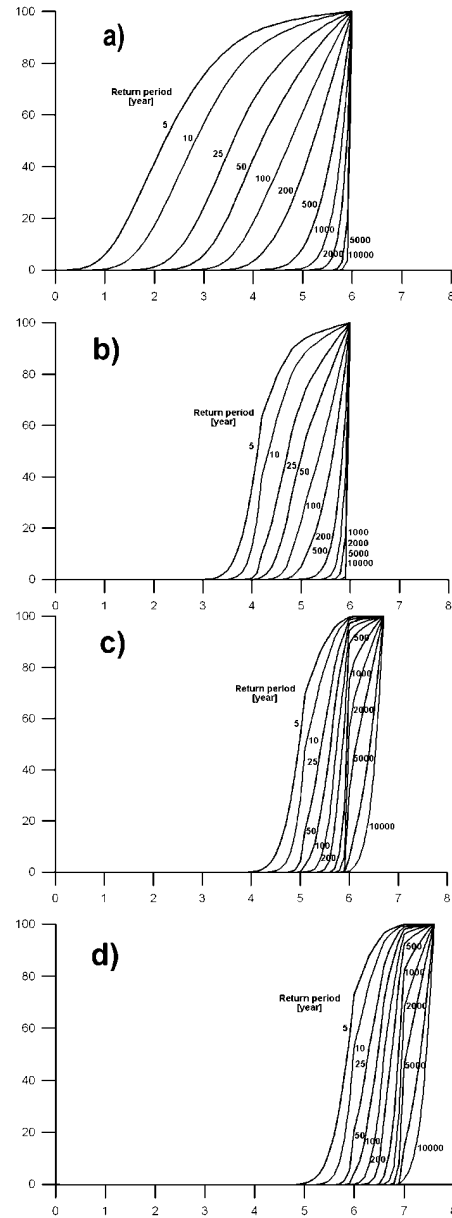


Figure 5. Earthquake hazard assessment for the Bataapati (Üveghuta) Site

- a) $P_{eq-haz} = 25\%$, b) $P_{eq-haz} = 58\%$, c) $P_{eq-haz} = 70\%$ and d) $P_{eq-haz} = 78\%$
5. ábra. A Bataapati (Üveghutai)-telephely földrengéskockázatának értékelése
- a) $P_{frkoc} = 25\%$, b) $P_{frkoc} = 58\%$, c) $P_{frkoc} = 70\%$, d) $P_{frkoc} = 78\%$

Table 2. Earthquake hazard calculations

Input data		Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
Coefficients of the recurrence graphs	a	mean (P = 50%)	mean + 1 σ (P = 84.1%)	mean + 1 σ (P = 84.1%)	mean + 1 σ (P = 84.1%)
	b	mean (P = 50%)	mean - 1 σ (P = 84.1%)	mean - 1 σ (P = 84.1%)	mean - 1 σ (P = 84.1%)
Maximum earthquake	E_{max}	mean + 2.5 σ (P = 99.4%)	mean + 2.5 σ (P = 99.4%)	mean + 2.5 σ (P = 99.4%)	mean + 2.5 σ (P = 99.4%)
Attenuation	ΔI	mean (P = 50%)	mean + 0.5 σ (P = 69.2%)	mean + 1 σ (P = 84.1%)	mean + 1.5 σ (P = 93.3%)
Probability	P_{eq-haz}	24.85%	57.84%	70.30%	78.00%

source region together with some other regions (Nos. 12+13, 15, 25+26+27, 104+105, 126, 138 and 140) contribute to an increase in the hazard value towards 7° MSK.

The shifting of the hazard values for the Bábaapáti (Üveghuta) Site to greater values of macroseismic intensity 7–7° MSK is connected with an increase of P_{eq-haz} to 78%. This is due to the source region of Medvednica with its maximum observed intensity of 10° MSK and maximum expected intensity of 10.9° MSK; the latter was applied in the hazard calculations. Similar situations were observed for other source regions: their maximum observed intensities were often 1° MSK lower than their statistically expected ones.

At the beginning of the probabilistic earthquake hazard assessment for the Bábaapáti (Üveghuta) Site, it was decided to keep strictly to the conservative approach — *i.e.* to realise the earthquake hazard evaluation for the “safety-margin side” of $P_{eq-haz} \approx 78\%$. Therefore, in accordance with the hazard calculations (Figure 5) the two following statements can be made:

— for 95–98% earthquake events, the earthquake hazard for the ground surface at the Bábaapáti (Üveghuta) Site will not reach of 7° MSK and

— only in exceptional cases (2–5%), could the earthquake hazard for the Bábaapáti (Üveghuta) Site surface reach 7 to 7° MSK.

Earthquake hazard assessment for a depth of 250 metres

In 1980s the problem of how to transfer earthquake hazard values determined for the ground surface to a given level was solved for a radioactive waste disposal site near Basel, Switzerland (Nagra 1985a, 1985b). The site was monitored by a local seismic network and the earthquake hazard was assessed for the peak ground accelerations (PGA). Two criteria were found:

A) during the Friuli earthquake in 1976 the Central Alps were shaken by a macroseismic intensity of approximately 8° MSK and the horizontal PGA on the ground surface reached values between 1 to 2 m/s². It was found that for depths of around 1200 metres the PGA values were — at a maximum — half the value of the surface one — *i.e.* the PGA only reached 7° to 1 m/s² and

B) investigations in underground tunnels showed that

1. for macroseismic intensities of around 8° MSK no breakage in underground constructions occurred while
2. for intensities greater than 8° MSK small breakages appeared.

These criteria were applied to the Bábaapáti (Üveghuta) Site and allowed quantitative dynamic seismic effects for a depth of 250 metres (below the pre-Cenozoic basement level at the Site) to be assessed. The considerations mentioned below were taken into account.

One can see in Figure 4 that seismic vibrations and dynamic effects are attenuated in accordance with an exponential law. To apply criterion A) for a depth different to 1200 m

(in our case, for a depth of 250 m), the 50% attenuation value found for seismic effects at 1200 m must be corrected by the ratio of $\log 1200/\log 250 \approx 1.3$. It means that instead of the 50% attenuation of seismic effects observed at a depth of 1200 m only a 35% attenuation can be applied for the depth 250 m. This solution corresponds to the Mesozoic rocks (limestones, dolomites, *etc.*) of the Central Alps.

To introduce an analogous approach for the Bábaapáti (Üveghuta) Site, the changes of PGA values had to be converted into macroseismic data. Two general facts were considered: (i) the earthquake hazard values expressed as a macroseismic intensity are based on data observed on the ground surface and (ii) the basement hard rocks in Hungary, Croatia and Serbia are covered by Cenozoic sediments softer than Alpine limestones and dolomites. Some studies of the seismic effect amplifications caused by soft sediments (SCHENK et al. 1994; SHAPIRA, FELDMANN 1995; TODD, HARRIS 1995) demonstrated that the PGA effects can be amplified even more than 100% for what corresponds to a macroseismic intensity enlargement of 1° MSK. Under such conditions the correction ratio found for the Basel Site can be lowered to 1.1–1.2 for the Bábaapáti (Üveghuta) Site. Besides, since the earthquake hazard for the Bábaapáti (Üveghuta) Site was calculated as “safety-margin side values” a worse correction ratio of 1.2 was introduced. This means that the 40% attenuation would convert the hazard values given in the macroseismic intensity for the surface level of the Bábaapáti (Üveghuta) Site to the 250 m depth level of the repository. This means that the resulting earthquake hazard would have to be lowered by approximately 1° MSK, and the converted hazard values to a depth of 250 m at this site can be assessed consecutively:

— for more than 95–98% earthquake events the earthquake hazard of the Bábaapáti (Üveghuta) Site at a depth of 250 metres will reach a maximum of 6 to 6° MSK and

— only in a few cases (2–5%) would the earthquake hazard at this depth reach 6° to 7° MSK.

The PGA values related to the macroseismic intensities can be assessed according to materials given in IAEA (1972) and in the Report (1981) where conversion relations between both these quantities were published. The previous discussion showed that the earthquake hazard at a depth of 250 m could never exceed 7° MSK. It means, in accordance with the second criterion (B), that no breakage and damage of the waste disposal facility can be expected.

It was also taken into account that possible attenuation changes, caused by a propagation of seismic vibrations through fracture zones in the basement of the Bábaapáti (Üveghuta) Site, could occur. In a case in which seismic vibrations spread along the zone, these would be less attenuated and their dynamic effects could be more intensive at the Site. This indicates that the expected differences could reach a half of the macroseismic intensity degree. Since the hazard calculations for the Bábaapáti (Üveghuta) Site were performed for “safety-margin” conditions, it can be assumed that these differences are already involved in the hazard evaluations.

Conclusion

The earthquake hazard assessments for the Bábaapáti (Üveghuta) Site show that the hazard determined for the 250 metres depth level can hardly exceed 7 °MSK. The value 7 °MSK — in accordance with IAEA (1972) and Report (1981) — relates to a PGA of 0.05–0.1 g. The IAEA regulations and

many national codes in Europe and other countries all over the world stipulate 0.1 g (which closely corresponds to 7 °MSK) as the obligatory minimal earthquake hazard level for constructions of nuclear facilities. In other words, the Bábaapáti (Üveghuta) Site fully corresponds to recent safety regulations and can be confirmed as a suitable site for the construction of an underground radioactive waste disposal repository.

References — Irodalom

- CORNELL, C. A. 1968: Engineering seismic risk analysis. — *Bulletin of the Seismological Society of America* 58 (5), pp. 1583–1606.
- CVIJANOVIĆ, D. 1981: Seizmičnost područja SR Hrvatske. Disertacija. — *Manuscript*, Sveučilište u Zagrebu, Physical and Mathematical Faculty, Zagreb University, Zagreb.
- DRIMMEL, J., FIEGWEL, E. 1995, Earthquake catalogue of Austria. — *Unpublished computer file* of the Austrian Geophysical Service, Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna.
- Eurocode 8 1998: *EN (European Nations) Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures*. — www.setra.fr/euronormes/anglais_francais/EN/EurocodesEnGbFr_98.htm
- GUMBEL, E. J. 1958: *Statistics of Extremes*. — Columbia University Press, New York (<http://www.xycoon.com/Gumbel.htm>).
- GUTERCH, B. 1995: Earthquake catalogue of Poland. — *Unpublished computer file*, Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warszawa.
- HERÁK, M., 1995: Earthquake catalogue of Croatia and adjacent regions. — *Archives of the Andrija Mohorovičić Geophysical Institute*, Zagreb.
- IAEA 1972: Earthquake guidelines for reactor siting. — *Technical reports series No. 139*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 26 p.
- LABÁK, P., BROUČEK, I. 1995: Catalogue of macroseismically observed earthquakes on the territory of Slovakia started from the year 1034. — *Unpublished file*, Geophysical Institute, Slovakian Academy of Sciences, Bratislava.
- MÓNUS, P., ZSÍROS, T., TÓTH, L. 2002: Hungarian earthquake catalogue, 1995–2002. — *Web-sites of the Geo-Risk Ltd.*, Budapest.
- Nagra 1985a: *Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) NGB 85-05 Projekt Gewähr. Endlager für Hochaktiveabfälle. Sicherheitsbericht*. — Nagra, Baden, Switzerland.
- Nagra 1985b: *Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) NGB 85-06 Projekt Gewähr. Endlager für Schwach- und Mitteaktiveabfälle. Bautechnik und Betriebsphase*. — Nagra, Baden, Switzerland.
- OGS 1987: Alpor: Catalogo delle Alpi Orientali. — *Computer printout*, Osservatorio Geofisico Sperimentale (OGS), Trieste.
- ONCESCU, M. C., MARZA, V. I., RIZESCU, M., POPA, M. 1999: The Romanian earthquake catalogue between 984–1997, catalogue under continuous update. — In: WENZEL, F., LUNGU, D., NOVAK, O. (eds): Vrancea earthquakes: tectonics, hazard and risk mitigation. Contributions from the first international workshop on Vrancea earthquakes. *Advances in Natural and Technological Hazards Research* 11. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Boston, London, pp. 43–47.
- POSTPISCHL, D. (ed.) 1985: *Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980*. — Consiglio Nazionale della Ricerche, Bologna, 239 p.
- Report 1981: Report on the ad-hoc panel meeting of experts on updating of the MSK-64 Seismic Intensity Scale, Jena, 10–14 March 1980. — *Gerlands Beiträge zur Geophysik* 90 (3), pp. 261–268.
- RIBARIĆ, V. 1982: *Seizmicnost Slovenije, I. Katalog postupov (792 n. e. – 1981)* [in Slovenian: Seismicity of Slovenia, Catalogue of Earthquakes (792 A. D. – 1981)]. — Publikacije Seizmološkega Zavoda [Seismological Survey of the] SR Slovenije, Serija A, Ljubljana, 649 p.
- SCHENK, V. 1979: Computer program SERIAL for evaluation of the earthquake hazard at chosen site. — *Manuscript*, Geophysical Institute of the Czechoslovakian Academy of Sciences, Prague.
- SCHENK, V. 1983: On the problem of time-normalization of the magnitude-frequency relation. — *Annales Geophysicae* 1 (6), pp. 439–442.
- SCHENK, V., KOTTNAUER, P. 1991: Probabilistic methods in maximum earthquake assessment. — In: *Soil dynamics and earthquake engineering 5*. Computational Mechanics Publications and Elsevier, Southampton, Boston, London, New York, pp. 15–21.
- SCHENK, V., SCHENKOVÁ, Z., KOTTNAUER, P. 1994: Earthquake Hazard Map Corrections of Effects of Near-Surface Sediments: an Example of the Bílina District, Czech Republic. — *Abstracts, 24th ESC (European Seismological Commission) General Assembly, Athens, September 19–23, 1994*, University of Athens, p. 109.
- SCHENK, V., SCHENKOVÁ, Z., KOTTNAUER, P. 1997: Categorisation and harmonisation of probabilistic earthquake hazard assessments with respect to statistic representation of input data. — In: *New phenomena in ground motion, earthquake hazard and risk evaluation*, *Natural Hazards* 15 (2–3), pp. 121–137.
- SCHENK, V., SCHENKOVÁ, Z., KOTTNAUER, P., GUTERCH, B., LABÁK, P. 2000: Earthquake hazard for the Czech Republic, Poland and Slovakia. Contribution to the ILC/IASPEI (International Law Commission / International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) Global Seismic Hazard Assessment Program. — In: *Natural hazards; state-of-the-art at the end of the second millennium*, *Natural Hazards* 21 (2–3), pp. 331–345.
- SCHENKOVÁ, Z., KÁRNÍK, V. (eds) 1993: Catalogue of earthquake for Central and Eastern Europe. — *Unpublished computer file*, Geophysical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague.

- SCHENKOVÁ, Z., SCHENK, V., GUTERCH, B., LABÁK, P., KOTTNAUER, P. 2000: Earthquake catalogue of the Czech Republic. — *Unpublished computer file*, Institute of Rock Structure and Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague.
- SHAPIRA, A., FELDMANN, L. 1995: Macroseismic Zonation in Israel. — *Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation, Nice (France), October 17–19, 1995*, volume 1, pp. 484–492.
- SHEBALIN, N. V., KARNÍK, V., HADZIEVSKI, D. 1974: *Catalogue of Earthquakes. Balkan Region, Part II: prior to 1900*. — UNDP/UNESCO (United Nations Development Programme / United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation) Survey of the Seismicity of the Balkan Region. Skopje, 600 p.
- TODD, D., HARRIS, J. R. 1995: De facto microzonation through the use of soils factors in design triggers. — *Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation, Nice (France), October 17–19, 1995*, volume 1., pp. 510–517.
- ŽIVČIČ, M. 1993: *Seismicity of Slovenia, Catalogue of earthquakes (1981–1993)*. — Seismological Survey of the SR of Slovenia, Geophysical Survey of Slovenia, Ljubljana.
- ZSÍROS, T., MÓNUS, P., TÓTH, L. 1988: *Hungarian earthquake catalogue, 456–1986*. — Geodetical and Geophysical Research Institute, Budapest, 182 p.

A Bábaapáti (Üveghutai)-telephely földrengéskockázatának értékelése

SCHENK, VLADIMÍR¹, BALLA ZOLTÁN², SCHENKOVÁ, ZDEŇKA¹, KOTTNAUER, PAVEL¹, DUDKO ANTONYINA², MAROS GYULA², PICHL, RICHARD¹, JECHUMTÁLOVÁ, ZUZANA¹, JECHUMTÁL, MICHAL¹

¹Ústav struktury a mechaniky hornin Akademie Věd České Republiky, V Holesovickach 41, 182 09, Prague 8, Česká Republika.

²Magyar Állami Földtani Intézet, 1143 Budapest, Stefánia út 14.

Tárgyszavak: Délkelet-Dunántúl, epicentrumok, földrengések, földrengéstérképek, hulladék-elhelyezési telephely, Magyarország, Mórágymög, radioaktív hulladék, szeizmikus források, szeizmikus intenzitás, szeizmikus kockázat

Összefoglalás

A tanulmány a Bábaapáti (Üveghutai)-telephely földrengéskockázatának a radioaktív hulladék elhelyezés jelenlegi mérnöki gyakorlatával kapcsolatos valószínűségi értékelési problémáját érinti. 400 km távolságig terjedő földrengés-katalógust készítettünk, s a földtani és geofizikai anyagok alapján szeizmikus forrásterületeket jelöltünk ki. Minden forrásterületre értékeltük a szeizmikus bemeneti adatokat (aktivitás, maximális földrengés) és a szeizmikus hullámok regionális csillapodási törvényszerűségeit, majd földrengés-kockázati értékeket számítottunk a megkövetelt 600 éves visszatérési időre. Alkalmazott módszerünk kiterjeszti a SCHENK (1983; SCHENK et al. 1997, 2000) által korábban kidolgozott műveleteket és a bemeneti adatok szabványosítását. A tanulmányban négyféle kockázati modellt számítottunk, hogy reális földrengéskockázatot kapjunk a felszínre és 250 m-es mélységre. Az eredményeket az érvényes biztonsági előírások szemszögéből mutatjuk be és tárgyaljuk, s ezzel igazoljuk, hogy a Bábaapáti (Üveghutai)-telephely alkalmas radioaktív hulladékok felszín alatti elhelyezésére.

Bevezetés

A valószínűségi földrengés-kockázati értékelés statisztikus feltételeket követ, amelyeket számos nemzeti építkezési előírásban és nemzetközi ajánlásban (pl. Eurocode-8, IAEA 1972) fogadtak el. A földrengés-kockázati számítás realitása a bemeneti adatoktól függ, így szükség van az utóbbiak értékelésére mind statisztikai megközelítéssel, mind szakértői becslésekkel. A bemeneti adatok meghatározására gyakran használt statisztikai módszerek lehetővé teszik, hogy meghatározzuk az adatok középértékét és standard szórását. Cikkünkben a bemeneti adatok standard szórását olyannak vettük, hogy azok mértékül szolgáljanak a kockázati értékek 90%-os valószínűségének megítéléséhez.

A földrengéskockázat meghatározásához fölhasznált alábbi bemeneti adatok szükségesek (CORNELL 1968):

1. egy forrásterület szeizmikus hatása visszatérési grafikonok formájában kifejezve,

2. a minden egyes forrásterületre meghatározott maximális várható földrengés és

3. a szeizmikus hullámok makroszeizmikus intenzitásokban megadott csillapodási viszonyai, illetve talajgyorsulásai.

Ezután a P_{frkoc} feltételezett valószínűségét az alábbi formában fejeztük ki:

$$P_{frkoc} = P_{hatas} \times P_{max-fr} \times P_{csill} \quad (1)$$

Feltételezzük, hogy a kockázati számítás bemeneti adatai normális eloszlásúak, vagyis mindegyikre meghatározható a középérték és a standard szórás (σ). A σ standard szórás az értékek csoportosulását adja az adathalmaz középértéke körül. A „középérték $\pm \sigma$ ” intervallum az értékek 68,3%-át foglalja magában, a „középérték $\pm 2\sigma$ ” intervallum 95,7%-ukat stb. Ha csak egyoldali eloszlási szinteket tanulmányozunk, pl. a maximumok oldalát (amelynek neve biztonságiküszöb-oldal), a „középérték $\pm \sigma$ ” intervallum már az események 84,1%-át foglalja magában, ami valamennyi értéket jelenti a legkisebbtől a „középérték $\pm \sigma$ ” értékig. Hasonlóképpen a „középérték $\pm 2\sigma$ ” intervallum 97,7%-ot jelent stb. A P_{hatas} , P_{max-fr} és P_{csill} meghatározásában a standard eltérés eme koncepcióját alkalmaztuk annak ér-

dekében, hogy garantáljuk a kockázati számítás biztonságkiszög-öldali megközelítéséhez szükséges $P_{\text{frkoc}} = 0,9$ szintű feltételezett valószínűséget. Ilyen feltételek mellett a $P_{\text{hatás}}$, $P_{\text{max-fr}}$ és P_{csill} valószínűségek egyedi becslései csak a 0,9–1,0 intervallumba eshetnek. Ha például a bemeneti adatok egyik valószínűsége 0,9, a másik kettőé már csak 1,0 lehet.

Földrengés-kockázati bemeneti adatok a Bátaapáti (Üveghutai)-telephelyre

Szeizmikus forrásterületek

A földrengéskockázat értékeléséhez általában 200 km-es sugarat szoktak felvenni. A Bátaapáti (Üveghutai)-telephelyen egy igen hosszú működési idejű objektumot, radioaktív hulladékok felszín alatti tárolóját tervezik. Ezért úgy döntöttünk, hogy ezt a szokásos sugarat 300-400 km-re növeljük annak érdekében, hogy figyelembe vegyünk minden kifejezetten szeizmoaktív övet és jobban korreláljuk a földtani és geofizikai térképeken látható szerkezeteket a földrengésekkel.

A 200 km távolságig előforduló földrengésekre az illető országok szeizmológusai által készített katalógusokat használtuk fel: Boszniára és Hercegovinára CVIJANOVIĆ (1981), Horvátországra CVIJANOVIĆ (1981) és HERÁK (1995), Magyarországra ZSÍROS et al. (1988) és MÓNUS et al. (2002), Romániára ONCESCU et al. (1999), Szerbiára CVIJANOVIĆ (1981), Szlovákiára LABÁK, BROUČEK (1995), valamint Szlovéniára RIBARIĆ (1982) és ŽIVČIĆ (1993) munkáját. 300-400 km távolságig az Ausztriára DRIMMEL, FIEGWEL (1995), Csehországra SCHENKOVÁ et al. (2000), Olaszországra az OGS (1987) és POSTPISCHL (1985), továbbá Lengyelországra GUTERCH (1995) katalógusának megfelelő részét használtuk fel. Ily módon a Bátaapáti (Üveghutai)-telephely földrengés-katalógusa tartalmazza a nemzetközi és regionális katalógusok (SHEBALIN et al. 1974 és SCHENKOVÁ, KÁRNÍK 1993) adatait is.

Az országhatárokhöz közeli földrengések adatait a fenti katalógusok alapján tisztáztuk. Miután összeállítottuk a Bátaapáti (Üveghutai)-telephely földrengés-katalógusának munkaállományát, amely valamennyi katalógus összeolvasztásával és az ismétlődő események kiszűrésével készült, paramétereit a több ország területét lefedő nemzetközi katalógusok alapján ellenőriztük, majd végül homogenizáltuk.

Mielőtt kijelöltük volna a forrásterületeket, a kijelölés fizikai alapját elemeztük. Nyilvánvaló volt, hogy az ún. „szeizmológiai” és „földrengés-mérnöki” stratégiák között optimális egyensúlyt kell teremtenünk.

A *szeizmológiai stratégia* arra irányul törekvés, hogy kapcsolatot találjunk forrásterület és szeizmogén öv között. Szeizmogén öv alatt általában egy olyan szerkezeti elemet értenek, amely gyakorlatilag azonos típusú földrengéseket vált ki igen hasonló fészekmechanizmusokkal. Azonban senki nem lehet biztos abban, hogy az ily módon kijelölt szeizmogén övek valóban képviselik a vizsgált terület vala-

mennyi lehetséges övét, még akkor sem, ha azonosításukhoz valamennyi rendelkezésre álló adatot felhasznált. Továbbá senki sem zárhatja ki azt az esetet, hogy a jövőben egy másik, új öv keletkezik, vagy hogy valamelyik öv ma gyenge szeizmicitása a jövőben megerősödik. Ismeretes, hogy egy erős földrengést előkészítő folyamat, különösen a mérsékelt szeizmicitású területeken, hosszú ideig, évszázadokig vagy évezredekig tart. Ezért ha egy nagyobb földtani szerkezeten belül több hasonló szeizmogén övet azonosítunk, célszerű mindezen öveket egyazon forrásterületbe összevonni. Ez a lépés egyrészt egyszerűsíti a kockázati számításokat, másrészt viszont ez egy eléggé fontos tényező, amely lehetővé teszi, hogy új, még ismeretlen, kisebb méretű földrengés-öveket is bevonjunk a forrásterületekbe.

A *földrengés-mérnöki stratégiában* a földrengéseket épületekre vagy más mérnöki létesítményekre ható mechanikai vibráció forrásának tekintik. Ebből a szempontból a forrásterületek kijelölésének legfontosabb aspektusa a földrengések csoportosulása és epicentrumaik sűrűsége. Egyszerűen szólva, a mérnöki létesítményeket nem érdekli a földrengések típusa, de érdekli a vibrációk intenzitása.

Nyilvánvaló, hogy mindkét stratégiában a forrásterületek kijelölésének realitása a földrengések számától függ. Minél kisebb az egy forrásban előforduló földrengések száma, annál kisebb az ezt a forrásterületet jellemző adatok statisztikai feldolgozásával kapott közelítések megbízhatósága. Ez azt jelenti, hogy nemcsak a két stratégia közötti optimális egyensúlyra, hanem az adatok közti statisztikai egyensúlyra is kell törekednünk.

A földrengés-kockázati értékelés szempontjából a földrengés-epicentrumok és a földtani szerkezetek elemzése és korrelálása részletesebb kell, hogy legyen a vizsgált telephely közelében, s általánosabbá válhat a távolság növelésével. A telephelyhez közeli forrásterületeket pontosabban kell kijelölnünk (kisebb egységeket, illetve alegységeket kell bevezetnünk). Ezzel összhangban különböző térképekre van szükségünk: 1:50 000 léptékűekre a telephely közelében, 1:100 000 léptékűekre 70–200 km távolságig, és 1:200 000 vagy 1:500 000 léptékűekre 300-400 km távolságig. Ha nincsenek ilyen térképek, más idevonatkozó anyagokat kell használnunk.

Problémák léphetnek föl, ha a vizsgált távolságig más országok területeit is érintjük, ahol a földtani és geofizikai adatokat eltérő módon dolgozták föl és összesítették. Ekkor szakértői becslésekre kell hagyatkoznunk. Mivel ez az eset különleges feladatokat támaszt, a megoldás minden esetben egyedi lesz, az illető terület helyi vagy regionális jellegeinek figyelembevételével. A földtani és geofizikai anyagok és adatbázisok közül az alábbiakat használtuk fel: földtani, szerkezeti és tektonikai térképek, valamint kiválasztott szelvények, adatok az üledékösszeletről, ha lehetséges, szeizmikus P és S hullám sebességekkel, Bouguer-anomália térképek, Moho-térképek és jelenkori felszínmozgási térképek. Egyéb földtani információt is használtunk, amely elősegítette a 200 és 300-400 km távolságig terjedő területek szeizmicitásának és geodinamikai jellegeinek megértését.

A földrengések adatállománya lehetővé tette, hogy *forrásterületeket* jelöljünk ki a földrengés-epicentrumok és a földtani szerkezetek eloszlásával összhangban (1. ábra). A fő forrásterületeket igen alapos munkával jelöltük ki, mivel ezek közvetlen hatással vannak a Bábaapáti (Üveghutai)-telephely földrengéskockázatára. A Bábaapáti (Üveghutai)-telephely értékeléséhez felhasznált forrásterületek jegyzéke a következő:

- | | | |
|----------------------------|---------------------|----------------|
| 1. Szlovéniai | 11. Nyugat-villányi | 21. Dél-bükki |
| 2. Periadriai ¹ | 12. Koprivnicai | 22. Bugyi |
| 3. Kvarneri | 13. Drávai | 23. Kecskeméti |
| 4. Medvednicai | 14. Buzsáki | 24. Dunai |
| 5. Banja lukai | 15. Kaposi-tamási | 25. Zámolyi |
| 6. Sisaki | 16. Kelet-mecseki | 26. Polgárdi |
| 7. Pakrai | 17. Bácsági | 27. Berhidai |
| 8. Papuki | 18. Békési | 28. Nagycsórói |
| 9. Slavonski brodi | 19. Szeghalmi | 29. Komáromi |
| 10. Eszéki | 20. Érmelléki | |

A szeizmikus aktivitás és a maximális földrengések

A lokális földrengés-katalógusokat minden egyes területre az egyedi események időpontjának figyelembevételével hoztuk létre és normáltuk (SCHENK 1983). Ezután kumulatív éves visszatérési görbéket szerkesztettünk minden forrásterületre. Ezek a szeizmikus aktivitást az alábbi függvénnyel jellemzik:

$$\log \Sigma N_y(I_0) = (a \pm \sigma_a) - (b \pm \sigma_b) \cdot I_0, \quad (2)$$

ahol N_y az I_0 epicentrális intenzitású földrengések éves gyakorisága.

Az a és b regressziós együtthatót ezek σ_a és σ_b standard szórásával együtt határoztuk meg minden egyes forrásterületre a legkisebb négyzetek módszerével. A kockázati számításba bevont minden egyes forrásterületre kapott egyedi közelítés külön-külön mutatja az 1σ standard eltérésre vonatkozó biztonságoldali valószínűségi szintet (0,68 vagy 68%). Annak érdekében, hogy ezt a szintet (SCHENK et al. 1997) bevezessük a földrengés-kockázati számításba, az a együttható középértékét a σ_a értékkel meg kellett növelnünk. Ezzel ellentétben, a b együttható középértékét a σ_b értékkel csökkentenünk kellett. Az ilyen közelítést a 4. sz., Medvednica forrásterület példájával a 2. ábrán mutatjuk be.

Az egyes területek lokális földrengés-katalógusait egyenként elemeztük annak érdekében, hogy meghatározzuk a maximálisan lehetséges I_0 epicentrális intenzitást. A kiugró értékek elmélete, a Gumbel III statisztikai művelet (GUMBEL 1958) lehetővé teszi, hogy a maximális várható földrengést aszimptotikusan közelítsük mind különböző időtartamokra (azokat fokozatosan egyévesről többévesre növelve), mind a lokális katalógusok adatainak különböző intenzitásaira (SCHENK, KOTTNAUER 1991).

¹ Nincs külön föltüntetve, az 1 É-i szegélyén húzódik.

A $P_{\max-fr}$ maximális földrengés-valószínűséget minden egyes forrásterületre a 10 000 éves visszatérési időre számított Gumbel III közelítések középértékével határoztuk meg (SCHENK et al. 1997). Minden egyes középértékhez meghatároztuk a σ standard szórást, végül pedig a $P_{\max-fr} = \leq 0,99$ valószínűséghez a „középérték + 2” σ ” értéket fogadtuk el mint maximális várható földrengést. Ha a Gumbel III statisztika határozatlan eredményt adott, a maximális várható intenzitást szakértői becsléssel határoztuk meg, amely a maximális észlelt intenzitást veszi figyelembe. A Gumbel III eloszlást a 4. sz., Medvednica forrásterület példájával a 3. ábrán mutatjuk be.

Makroszeizmikus intenzitás-csillapodási törvényszerűségek

A csillapodási viszonyok jelentősen befolyásolják a földrengés-kockázati értékelést. A kockázati számításokhoz az intenzitáscsillapodási törvényszerűségeket valamennyi, a Magyarország és a szomszédos országok területére elérhető izoszeszta-térképek alapján határoztuk meg a Bábaapáti (Üveghutai)-telephelytől számított 300 km-es távolságig (1. táblázat).

1. táblázat. Az elemzett izoszeizmatérképek jegyzéke

Dátum	I_0
1763. június 28.	9,5
1810. január 14.	8,0
1829. július 1.	7,0
1834. október 15.	8,0
1834. október 15.	8,5
1851. július 1.	7,5
1879. október 10.	8,0
1879. október 11.	8,0
1892. június 22.	7,0
1893. március 11.	7,0
1895. április 14.	8,5
1900. január 29.	6,5
1901. február 16.	5,5
1901. december 17.	7,0
1903. június 26.	8,0
1905. május 23.	7,0
1905. december 17.	7,5
1907. március 22.	6,0
1908. február 19.	6,5
1908. május 28.	7,5
1909. május 29.	6,0
1909. október 8.	8,5
1910. május 11.	6,0
1911. július 8.	9,0
1916. május 1.	7,0
1917. január 29.	8,0
1922. november 24.	7,0
1925. január 31.	8,5

Dátum	I_0
1925. július 3.	5,0
1926. szeptember 28.	6,5
1927. október 8.	7,9
1928. március 18.	7,0
1928. augusztus 25.	7,5
1930. március 6.	6,0
1930. április 11.	5,0
1930. július 20.	5,0
1930. augusztus 22.	6,0
1934. augusztus 31.	6,5
1936. március 4.	5,0
1936. szeptember 6.	7,0
1937. június 10.	6,0
1938. március 27.	8,0
1939. március 23.	5,5
1942. május 14.	6,0
1942. szeptember 30.	6,0
1942. november 21.	5,0
1949. március 14.	6,0
1950. augusztus 31.	8,0
1951. február 19.	7,0
1953. szeptember 13.	6,5
1959. május 27.	7,5
1960. október 22.	6,0
1964. április 13.	8,0
1969. december 31.	7,0
1985. augusztus 15.	6,5

A 4. ábrán látható szaggatott vonalat a földrengés-kockázati értékelésre vonatkoztatott alábbi összefüggés segítségével, a σ standard eltérés figyelembevételével határoztuk meg:

$$I - I_0 = (2,79 \pm 1,76) - 1,69 \log R \text{ (km)},$$

azaz a középértékekre

$$I - I_0 = 2,79 - 1,69 \log R \text{ (km)} \dots (P = 50\%),$$

a középérték plusz σ értékekre

$$I - I_0 = 4,55 - 1,69 \log R \text{ (km)} \dots (P = 84\%),$$

a középérték plusz $1,5\sigma$ értékekre

$$I - I_0 = 5,43 - 1,69 \log R \text{ (km)} \dots (P = 90\%) \text{ stb.}$$

Csak a „plusz σ -át” tartalmazó értékeket említjük, mivel ezeket használtuk a földrengés-kockázati értékelésben a „biztonságiküszöb-oldali” eredményértékek meghatározásához.

Valószínűségi földrengés-kockázati számítás

A földrengés-kockázati számítást a 62/1997 (XI. 26.) IKIM rendeletnek megfelelően végeztük, amely szerint „a telephely [...] szeizmikus [...] stabilitása földtörténeti léptékben, [...] hatszáz éves időtávlatban vizsgálendő és bizonyítandó”. Ezért a kockázati számításba a 600 éves visszatérési időt kielégítő valószínűségű bemeneti adatokat (1. följebb) használtunk. Mivel a Bábaapáti (Üveghutai)-telephelyen tervezett építmények ennél jóval hosszabb életűek, élettartamukat 150 évre növeljük. Ilyen körülmények között a Bábaapáti (Üveghutai)-telephely szeizmikus stabilitását jellemző, 600 éves visszatérési időszakra vonatkozó földrengés-kockázati számítást $P_{\text{frkoc}} = 78\%$ -os meg nem haladási valószínűsége folytattuk le. Annak érdekében, hogy illusztráljuk a kimeneti összefüggések trendjét a $P_{\text{frkoc}} = 78\%$ -os valószínűségig, a 2. táblázatban a földrengés-kockázati értékelésre négy megoldást vázolunk.

A Bábaapáti (Üveghutai)-telephelyre vonatkozó földrengés-kockázati számítást a Cornell-algoritmusra (CORNELL 1968) épülő SERIAL programmal (SCHENK 1979) végeztük. A kockázati görbéket makroszeizmikus intenzitásban fejeztük ki, és 25, 58, 70 és 78%-os P_{frkoc} feltételes valószínűsége számítottunk annak érdekében, hogy a 600 éves visszatérési időnek megfelelő 150 évet jellemző 78%-os meg nem haladási valószínűségű kockázati megoldásokat kapjunk.

Az 5. ábrán mutatjuk be a Bábaapáti (Üveghutai)-telephelyre kapott kockázati értékek görbéit: láthatjuk, hogy a

maximális földrengés-kockázat a telephely felszínén elvileg eléri a 6 °MSK makroszeizmikus intenzitást. Ha a P_{frkoc} megnő, a maximális kockázati érték nagyobbá válik, mert a makroszeizmikus intenzitás ΔI csökkenése kisebb lesz a távolsággal. A forrásterületek többsége a Bábaapáti (Üveghutai)-telephelyre 6 °MSK-ig terjedő hatást gyakorol. Csak a 4. sz., Medvednicai forrásterület emelte meg $P_{\text{frkoc}} = 70\%$ esetén a földrengés-kockázatot 6l °MSK értékre. $P_{\text{frkoc}} \approx 78\%$ esetén a Medvednicai forrásterület egyes más forrásterületekkel (12+13., 15., 25+26+27., 104+105., 126., 138. és 140.) együtt a földrengés-kockázatot 7" °MSK-ra növeli.

A Bábaapáti (Üveghutai)-telephelyre kapott földrengés-kockázat eltolódása a nagyobb, 7-7" °MSK értékek felé a $P_{\text{frkoc}} = 78\%$ -ra növelésével kapcsolatos. Ez annak következménye, hogy a kockázati számításba a Medvednicai forrásterületet 10 °MSK maximális megfigyelt intenzitással és 10,9 °MSK maximális várható intenzitással vontuk be. Hasonló volt a helyzet más forrásterületeken is: maximális megfigyelt intenzitásuk gyakran 1 °MSK-kal voltak alacsonyabbak, mint amit statisztikailag várhatunk.

A Bábaapáti (Üveghutai)-telephely valószínűségi földrengés-kockázati értékelésének kezdetétől fogva a megközelítésünk szigorúan konzervatív volt, vagyis a földrengés-kockázatot a $P_{\text{frkoc}} \approx 78\%$ „biztonsági küszöb oldalára” számítottuk. Így a kockázati számításunk (5. ábra) alapján a következő megállapításokat tehetjük:

— a földrengések 95-98%-ában a Bábaapáti (Üveghutai)-telephely felszínén a földrengés-kockázat nem fogja elérni a 7 °MSK-ot, és

— a Bábaapáti (Üveghutai)-telephely felszínén a földrengés-kockázat csak kivételes esetekben (2-5%) érheti el a 7-7" °MSK-ot.

Földrengés-kockázati értékelés 250 m-es mélységre

A nyolcvanas években azt a kérdést, hogy a felszínre meghatározott földrengés-kockázatot hogyan lehet megadott mélységre vonatkoztatni, egy Bazel (Svájc) közelében lévő radioaktív hulladék-tárolóra megoldották (Nagra 1985a, 1985b). A telephelyet lokális szeizmikus hálózattal monitorozták, s a földrengés-kockázatot talajgyorsulási

2. táblázat. Földrengés-kockázati számítások

Bemeneti adatok		1. megoldás	2. megoldás	3. megoldás	4. megoldás
A visszatérési görbék együttthatói	a	középérték (P = 50%)	középérték + 1σ (P = 84,1%)	középérték + 1σ (P = 84,1%)	középérték + 1σ (P = 84,1%)
	b	középérték (P = 50%)	középérték - 1σ (P = 84,1%)	középérték - 1σ (P = 84,1%)	középérték - 1σ (P = 84,1%)
Legnagyobb földrengés	F_{max}	középérték + 2,5σ (P = 99,4%)	középérték + 2,5σ (P = 99,4%)	középérték + 2,5σ (P = 99,4%)	középérték + 2,5σ (P = 99,4%)
Csillapodás	ΔI	középérték (P = 50%)	középérték + 0,5σ (P = 69,2%)	középérték + 1σ (P = 84,1%)	középérték + 1,5σ (P = 93,3%)
Kockázati valószínűség	P_{frkoc}	24,85%	57,84%	70,30%	78,00%

csúcsértékekben (TGYCS) vizsgálták. Az alábbi két kritériumot ismerték föl:

A) Az 1976-os friuli földrengés során a Központi-Alpokokat kb. 7 °MSK makroszeizmikus intenzitású földrengés rázta meg, s a felszínen a vízszintes TGYCS 1 és 2 m/s² közé esett. Kimutatták, hogy 1200 m körüli mélységben a TGYCS a felszínének legfeljebb a fele volt, vagyis 1 és 0,5 m/s² között volt.

B) Felszín alatti vágatokban végzett vizsgálatok során tisztázódott, hogy

1. 8 °MSK körüli makroszeizmikus intenzitásnál nem lépett fel törés a felszín alatti építményekben, míg

2. 8 °MSK-t meghaladó makroszeizmikus intenzitásnál már kis törések jelentek meg.

A Bataapáti (Üveghutai)-telephelyre alkalmazva ezek a kritériumok lehetővé tették, hogy minőségileg értékeljük a szeizmikus hatást 250 m mélységben (a telephelyi alaphegység felszíne alatt). Emellett az alábbi megfontolásokkal éltünk.

A 4. ábrán láthatjuk, hogy a szeizmikus rezgések és a dinamikus hatások exponenciálisan csillapodnak. Ahhoz, hogy az A) kritériumot 1200 m-estől eltérő (esetünkben 250 m-es) mélységre alkalmazzuk, az 1200 m-es mélységre vonatkozó 50%-os csillapodást a $\log 1200 / \log 250 \sim 1,3$ értékkel kell korrigálnunk. Ez azt jelenti, hogy az 1200 m-es mélységre érvényes 50% helyett 250 m-es mélységre csak 35%-ot alkalmazhatunk. Ez a megoldás a Központi-Alpokban mezozoos kőzetekre (mészkö, dolomit stb.) vonatkozik.

Ahhoz, hogy hasonló értékelést folytassunk le a Bataapáti (Üveghutai)-telephelyre, a TGYCS-t makroszeizmikus adatokká kell alakítanunk. Két fő ténytet vettünk figyelembe: (1) a földrengéskockázatot a Föld felszínén észlelt makroszeizmikus intenzitásban fejeztük ki és (2) Magyarországon, Horvátországban és Szerbiában a kemény alaphegységi kőzeteket kainozoos üledékek fedik, amelyek lazábbak, mint az alpi mészkövek vagy dolomitok. A szeizmikus hatás laza üledékek által történő megsokszorozódását tanulmányozva SCHENK et al. (1994), SHAPIRA, FELDMANN (1995), valamint TODD, HARRIS (1995) kimutatta, hogy a TGYCS akár több mint 100%-kal is megnövekedhet, ami a makroszeizmikus intenzitás 1 °MSK-os növekedésének felel meg. Ezért a bázei telephelyről kapott korrekciós tényezőt a Bataapáti (Üveghutai)-telephely esetében 1,1-1,2 körülire kell csökkentenünk. Emellett, mivel a Bataapáti (Üveghutai)-telephely földrengéskockázatát „biztonságiküszöb-oldali” értékekre számítottuk, a rosszabb — 1,2-es — korrekciós tényezőt vettük fel. Ez azt jelenti, hogy 40%-os csillapodás konvertálná a Bataapáti

(Üveghutai)-telephely felszínére kapott, makroszeizmikus intenzitásba kifejezett földrengéskockázatát a létesítmény 250 m-es mélységére. A földrengéskockázatot tehát kb. 1 °MSK-kal csökkentenünk kell, s az így kapott, konvertált földrengéskockázatot kell használnunk a 250 m-es mélységszint értékeléséhez, ami az alábbiakat jelenti:

— a földrengések 95-98%-ában a Bataapáti (Üveghutai)-telephely 250 m-es mélységében a földrengéskockázat legfeljebb 6-6 °MSK-ot fog elérni, és

— a Bataapáti (Üveghutai)-telephely felszínén a földrengéskockázat csak kivételes esetekben (2-5%) érheti el a 6-7 °MSK-ot.

A makroszeizmikus intenzitással kapcsolatos TGYCS-t az IAEA (1972) és a Report (1981) alapján értékelhetjük, amely az e két mennyiség közötti konverziós kapcsolatot közölte. A fenti elemzéssel kimutattuk, hogy 250 m-es mélységben a földrengéskockázat soha nem lépheti túl a 7 °MSK-ot. Ez azt jelenti, hogy a B) kritériummal összhangban a hulladéktároló létesítményben nem várható törés vagy sérülés.

Azt is figyelembe vettük, hogy a Bataapáti (Üveghutai)-telephely töréses öveiben terjedő szeizmikus rezgések hatására előfordulhat a csillapodás esetleges változása. A szeizmikus rezgések, ha ilyen öv mentén terjednek, kevésbé csillapodnak, és dinamikus hatásuk intenzívebbé válhat a telephelyen. Ez azt jelenti, hogy a várt eltérés elérheti makroszeizmikus intenzitás egy fokának a felét. Mivel azonban a Bataapáti (Üveghutai)-telephelyre a földrengéskockázatot „biztonságiküszöb-oldalra” számítottuk, ezeket az eltéréseket a kockázati számítás már magában foglalja.

Következtetések

A Bataapáti (Üveghutai)-telephely a földrengéskockázati értékelése során arra a következtetésre jutottunk, hogy a 250 m-es mélységre számított kockázat aligha fogja meghaladni a 7 °MSK-ot. Ez az utóbbi érték az IAEA (1972) és a Report (1981) szerint 0,05-0,1 g TGYCS-nek felel meg. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ — IAEA) szabályozása, továbbá számos európai és más ország nemzeti építési előírásai a nukleáris létesítményekre 0,1 g-t jelölnek meg (ami közel van a 7 °MSK-hoz) mint kötelező minimumot. Ez azt jelenti, hogy a Bataapáti (Üveghutai)-telephelyre teljes mértékben teljesülnek a biztonsági szabályozás követelményei, és a telephely alkalmasnak minősíthető radioaktív hulladékok felszín alatti tárolójának létesítésére.