

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA



188. KÖZGYŰLÉSE
2017. május 8–10.



A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA 188. KÖZGYŰLÉSE

A Paks II atomerőmű telephely-vizsgálatának tudományos eredményei

Szeizmológiai kutatások, a földrengésveszély jellemzése

Tóth László - Györi Erzsébet - Mónus Péter

MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet
GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda

2017. május 17.

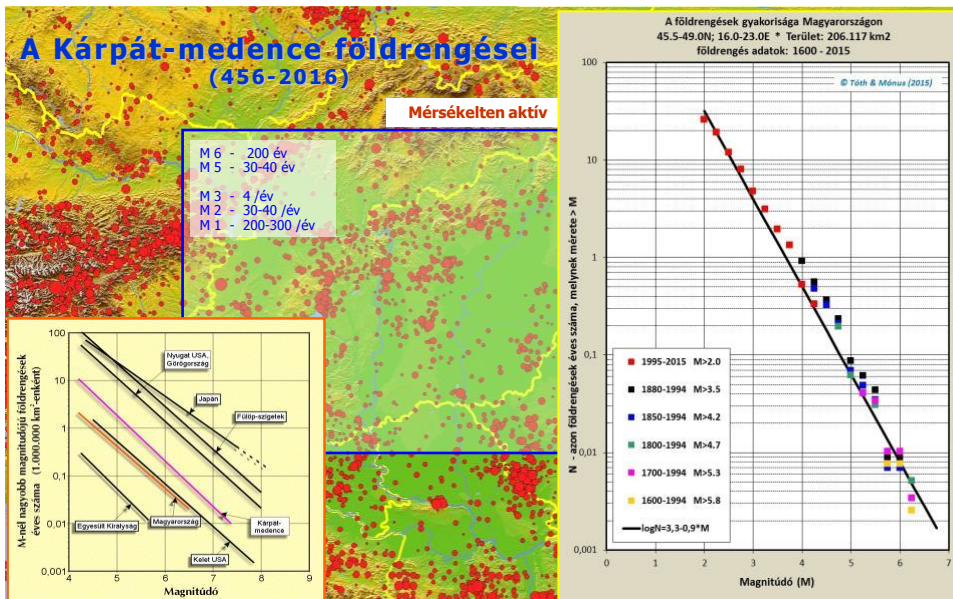


A szeizmológiai kutatások célja

a hazai és a mértékadó nemzetközi előírások szerint

A hatályos hazai szabályozást az NBSZ 7. kötetének 7.3. és 7.5. fejezetei tartalmazzák.

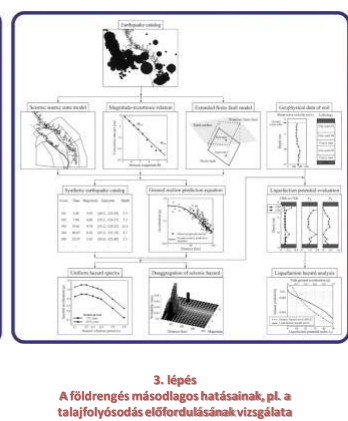
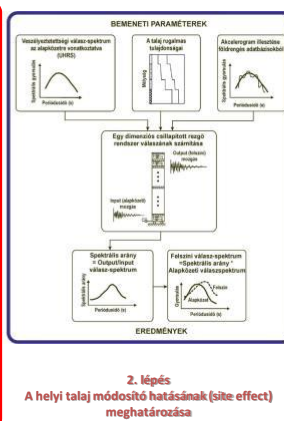
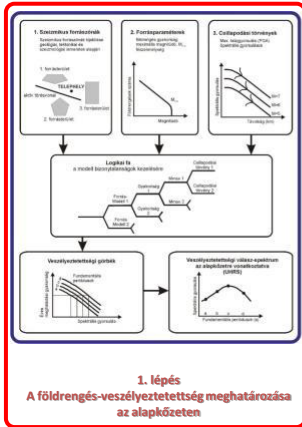
- ✓ a telephely jellemzők azonosítása
- ✓ a telephelyi veszélyek vizsgálata és értékelése
- ✓ a tervezési alapba tartozó (a telephelyre és a nukleáris létesítményre vonatkozó) adatok meghatározása, azaz a tervezési alapba tartozó mértékadó földrengések jellemzőinek meghatározása
- ✓ a földrengés által kiváltott egyéb veszélyek, mint például a talajfolyósodás veszélyének meghatározása
- ✓ a földrengésbiztonságot értékelő valószínűségi biztonsági elemzésekben (SPSA) a földrengés-veszély leírása



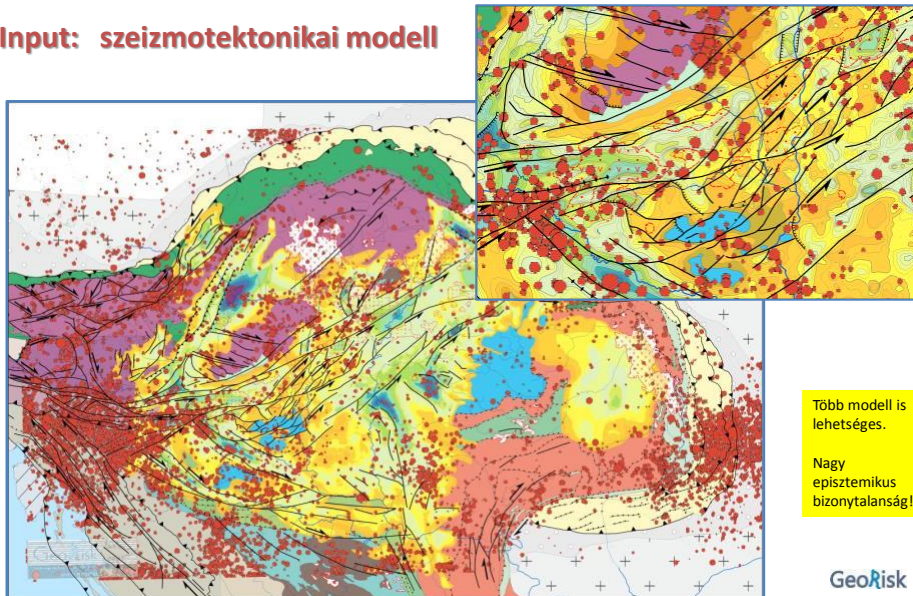
A FÖLDRENGÉSVESZÉLY MEGHATÁROZÁSA

1. lépés

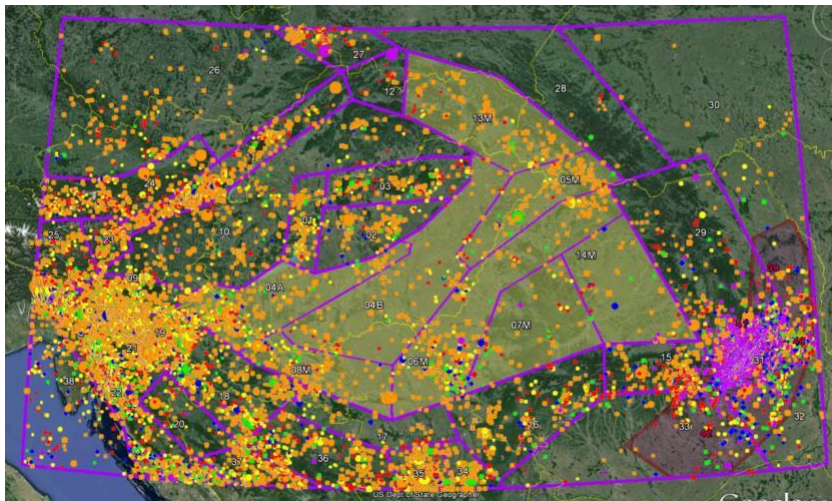
Olyan vizsgálati módszer, melynek során azt határozzuk meg, hogy egy adott mértékű, földrengésből származó hatás (pl. intenzitás, talajgyorsulás, sebesség, elmozdulás) egy adott időszak alatt milyen valószínűséggel fordul elő



Input: szeizmotektonikai modell



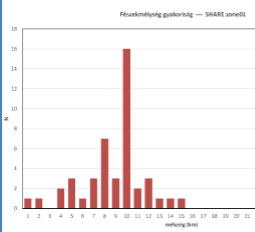
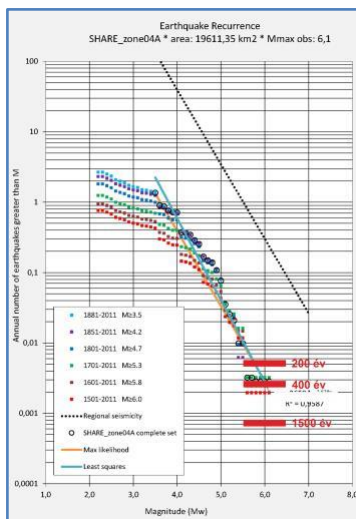
Input: a földrengés források geometriája – Model SHARE-Rev



Több modell is lehetséges.
Nagy episztemikus bizonytalanság!

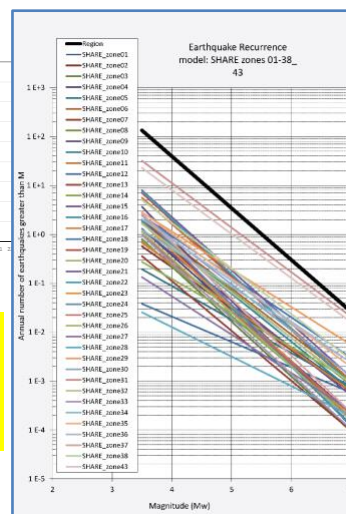
GeoRisk

Input: földrengés gyakoriság



Bizonytalanság:
Max likelihood becslés
Least square fit
Regionális „b”
Zónánként változó „b”

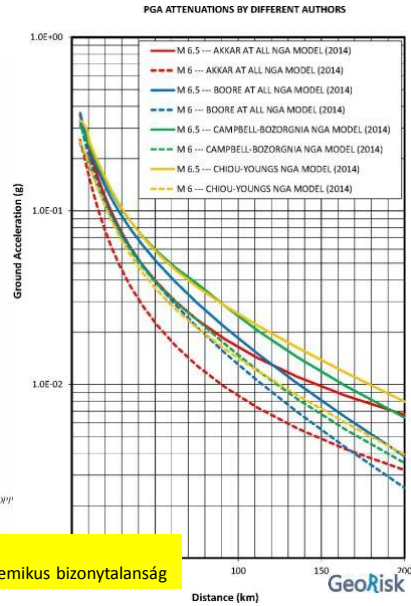
GeoRisk



Input: csillapodás

$$\ln(Y_{ref}) = c_1 + \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1b}}{\cosh(2 \cdot \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{RVI} + \left\{ c_{1c} + \frac{c_{1d}}{\cosh(2 \cdot \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{NMa} + c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2 \cdot \max(M_i - 4.5, 0))} \Delta Z_{TDR} + \left\{ c_{11} + \frac{c_{11b}}{\cosh(2 \cdot \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} (\cos \delta)^2 + c_2 (M_i - 6) + \frac{c_2 - c_1}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M_i)}) + c_4 \ln(R_{RUPy}) + c_5 \cosh(c_6 \cdot \max(M_i - c_{M1}, 0)) + (c_{4a} - c_4) \ln(\sqrt{R_{RUPy}^2 + c_{n1}^2}) + \left\{ c_{11} + \frac{c_{12}}{\cosh(\max(M_i - c_{13}, 0))} \right\} R_{RUPy} + c_8 \max\left(1 - \frac{\max(R_{RUPy} - 40, 0)}{30}, 0\right) \min\left(\frac{\max(M_i - 5.5, 0)}{0.8}, 1\right) e^{-c_{14}(M_i - c_{1b})^2 \Delta_{RUPy}} + c_9 R_{TDRy} \cos \delta \left\{ c_{9a} + (1 - c_{9a}) \tanh\left(\frac{R_{M2y}}{c_{9b}}\right) \right\} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R_{M2y}^2 + Z_{TDR}^2}}{R_{RUPy} + 1} \right\}$$

- Nagy szórás
- Nagy episztemikus bizonytalanság

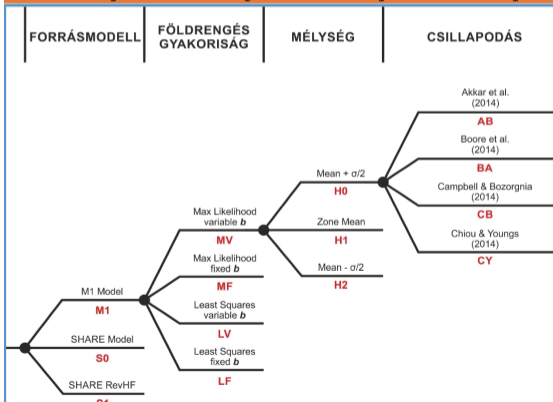
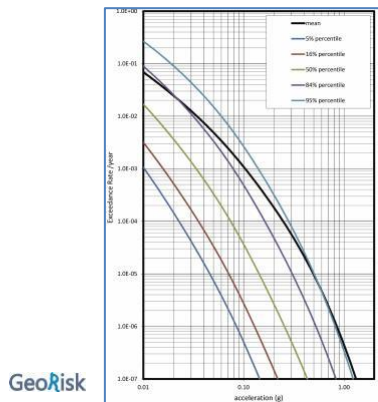


Földrengésveszély számítása

Bizonytalanságok kezelése:

- szórás
- episztemikus (logikai fa)

FORRÁSMODELL		GYAKORISÁG		MÉLYSÉG		CSILLAPODÁS	
M1	0.45	MV	0.40	H0	0.15	AB	0.40
S0	0.50	MF	0.10	H1	0.75	BA	0.05
S1	0.05	LV	0.40	H2	0.10	CB	0.45
		LF	0.10			CY	0.10



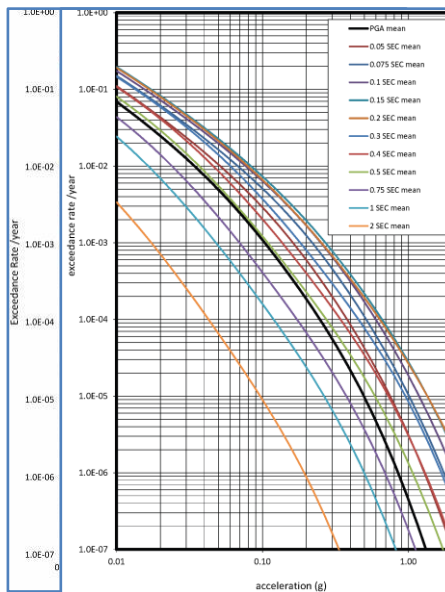
GeoRisk

Földrengésveszély eredmények

Hazard görbék az alapközeten

- A veszélyeztetettségi görbét a 0,01 – 2 g gyorsulás tartományban 30 gyorsulás értékre számítottuk, mely közelítőleg megfelel a 10^{-1} - 10^{-7} /év gyakoriság tartománynak a periódustól függően.
- A számítási módszer inherensen tartalmazza a bizonytalanságok meghatározását is. Az eredményeket a „mean” értéke mellett az 5%, 16%, 50% (medián), 84%, és 95% konfidencia szinten jelenítjük meg.
- A logikai fa összes ágán, illetve a véletlenszerűségekből fakadó bizonytalanságok integrálásával kapott PGA és különböző periódusra vonatkozó veszélyeztetettségi görbék várható értékét (Mean Hazard Curves) az ábra mutatja. E görbesereg megadja a talajgyorsulás várható értékét az alapközeten a 10^{-1} - 10^{-7} /év gyakoriság tartományban.

GeoRisk

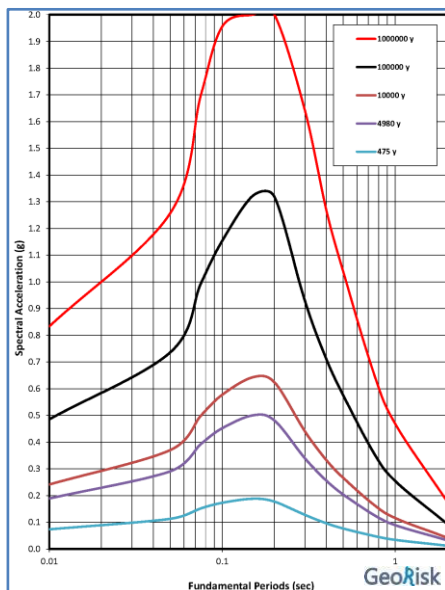


Földrengésveszély eredmények

UHRS az alapközeten

- Az azonos éves gyakoriság mellett számított különböző periódusú gyorsulások adják az alapközeti UHRS-t (Uniform Hazard Response Spectrum), melyet 1/475, 1/4980, 10^{-4} , 10^{-5} és 10^{-6} éves gyakoriságokra határoztunk meg. Ezek „mean” értékeit mutatja az ábra. 10^{-4} és 10^{-5} éves gyakoriságok mellett a PGA várható értéke az alapközeten 0,24 g illetve 0,49 g.

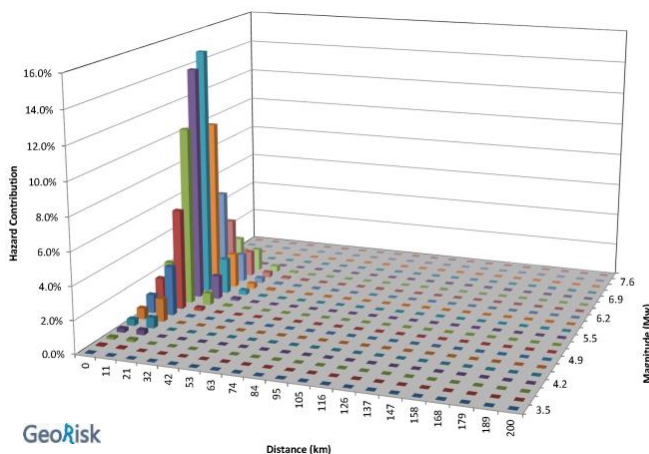
Fundamental Periods (sec)	Spectral Acceleration (g)				
	@ Fixed Return Periods (year)				
	1 000 000 y	100 000 y	10 000 y	4 980 y	475 y
PGA	0,83	0,49	0,24	0,19	0,07
0,05	1,26	0,74	0,37	0,29	0,11
0,075	1,70	0,99	0,50	0,39	0,15
0,1	1,96	1,15	0,58	0,45	0,17
0,15	2,00	1,32	0,64	0,50	0,19
0,2	2,00	1,32	0,62	0,48	0,18
0,3	1,63	0,93	0,44	0,34	0,13
0,4	1,27	0,71	0,33	0,26	0,10
0,5	1,04	0,58	0,27	0,20	0,08
0,75	0,66	0,36	0,17	0,13	0,05
1	0,47	0,25	0,12	0,09	0,03
2	0,18	0,09	0,04	0,03	0,01



Földrengésveszély eredmények

M-R deaggregáció

- A valószínűségi földrengésveszély meghatározás lehetővé teszi annak megállapítását is, hogy a különböző magnitúdójú rengések milyen hozzájárulást adnak a veszély végeredményéhez. A deaggregáció az egyes magnitúdó intervallumok és távolság intervallumok teljes veszélyzettséghez való relatív hozzájárulásának meghatározását jelenti.



Példaként az ábra a 10^{-5} /év gyakoriságú PGA hazard magnitúdó és távolság szerinti deaggregációját mutatja.

A veszélyzettség kialakításában legjelentősebb szerepet a közeli (5-20 km) és 5.5 – 6.0 magnitúdójú rengések játsszák.

GeoRisk

Földrengésveszély eredmények összehasonlítása korábbi projektek eredményeivel

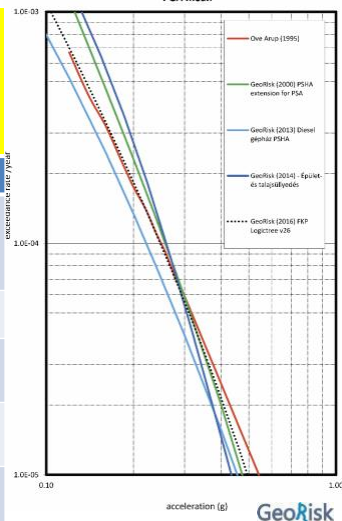
Az eltérések okai:

- Új földrengés adatok (Mw alapú homogén katalógus)
- Új szeizmotektonikai modellek
- Új csillapodási egyenletek (NGA, 2014)
- Új szoftver (SISMIC, SEISRISK-III, CRISIS2007)

Minden elem új, nagyon jó az egyezés --- ROBOSZTUS!

PROJEKT #	SZEIZMOTEKTONIKAI MODELL	FÖLDRENGÉS KATALÓGUS SZEIZMICITÁS JELLEMZŐK	CSILLAPODÁS	PSHA SZOFTVER
Ove Arup (1995)	Area Source Model A Area Source Model B Area Source Model C Area Source Model D Fault Source Models A, B, C, D	Ove Arup (1995)	Ambraseys,95 Sadigh,93 Boore,93	SISMIC
GeoRisk (2000) PSHA extension for PSA	M1 model M2 model M3 model	GeoRisk (2000)	Ambraseys,95 Sadigh,93 Boore,93	SEISRISK-III mod1
GeoRisk (2013) Diesel gépház PSHA	M1 model M2 model M3 model	GeoRisk (2000) frissítve	Ambraseys,05 Boore,08 Campbell,08 Chiou,08	SEISRISK-III mod2
GeoRisk (2014) Épület és talajszüllyedés	M1 model SHARE model	GeoRisk (2014) részlegesen megújítva	Ambraseys,05 Boore,08 Campbell,08 Chiou,08	CRISIS2007
GeoRisk (2016) Paks2 FKP	M1 model SHARE model SHARE model REV	GeoRisk (2016) teljesen megújítva	Akkar,14 Boore,14 Campbell,14 Chiou,14	CRISIS2007

HAZARD CURVES - COMPARISON OF DIFFERENT PROJECTS
Paks_NPP, HUNGARY - 46.574 N; 18.853 E
PGA mean

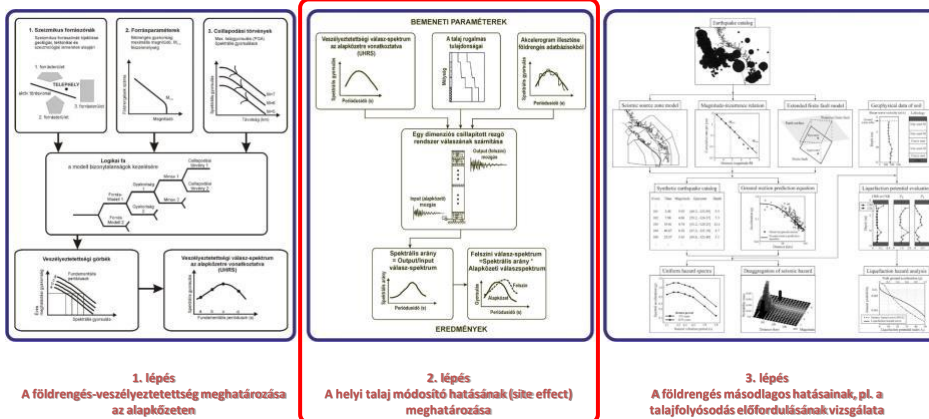


GeoRisk

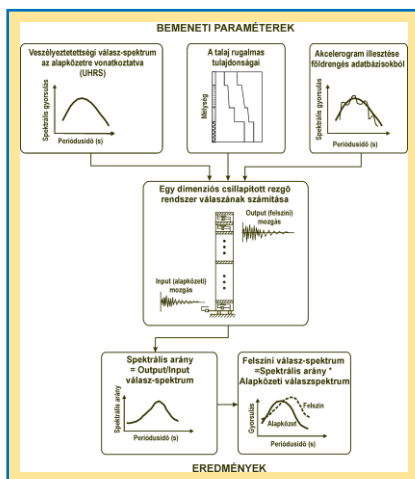
A FÖLDRENGÉSVESZÉLY MEGHATÁROZÁSA

2. lépés

Olyan vizsgálati módszer, melynek során azt határozzuk meg, hogy egy adott mértékű, földrengésből származó hatás (pl. intenzitás, talajgyorsulás, sebesség, elmozdulás) egy adott időszak alatt milyen valószínűséggel fordul elő



A felszínközeli rétegek módosító hatásának számítása



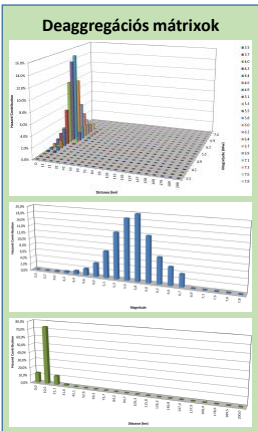
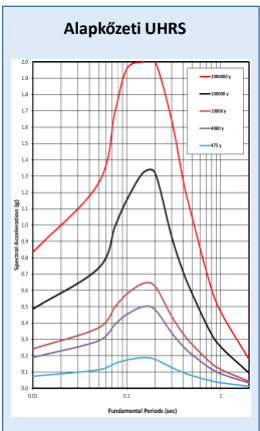
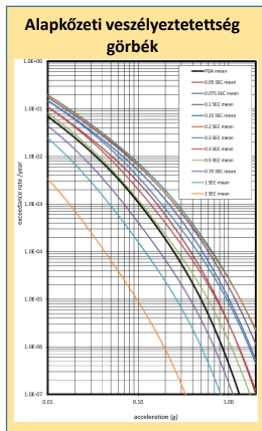
Egy konkrét rétegsor válasza egy konkrét rengésre

- Nemlineáris időtartománybeli számítás, a pórusvíznyomás növekedés figyelembe vétele
- A PSHA és az átvitel számítása során definiált alapközet sebességének meg kell egyeznie.
- vízszintes rétegzettség
- vertikálisan terjedő térhullámok

- Alapközeti gyorsulásszint bizonytalanságai
- Gyorsulás időfüggvények változékonysága
- Rétegsor laterális változékonysága
- Mérési hibák

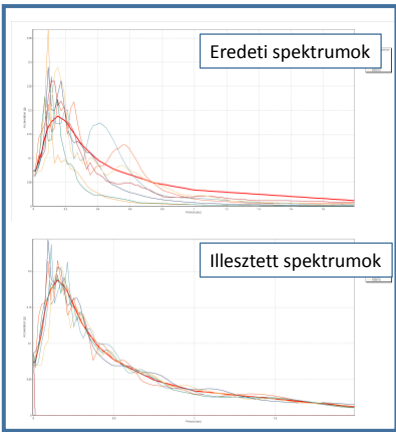
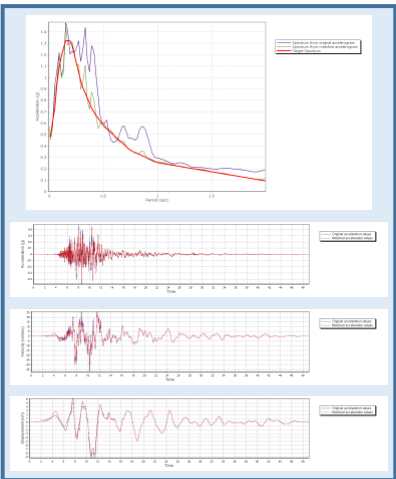
Monte Carlo modellezés
a különböző geotechnikai paraméterek közötti korrelációk figyelembe vételével

Inputok I. Gerjesztési oldal – PSHA eredményei



GeoRisk

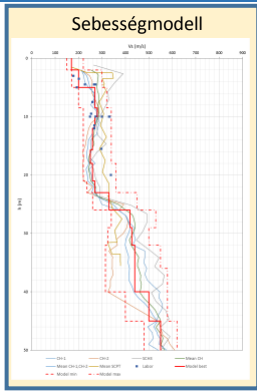
Inputok II. Gerjesztési oldal – Akcelerogramok válogatása és illesztése



Illesztés:
wavelet algoritmussal (Abrahamson, 1992; Hancock et al. 2006)

GeoRisk

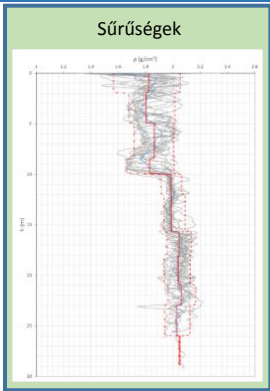
Inputok III. 1D talajmodell előállítás



Előállítás:

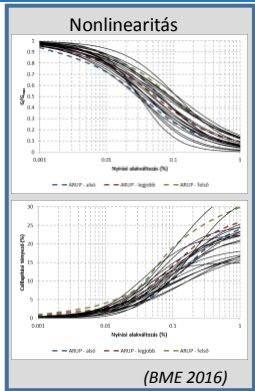
- Crosshole (archív és FKP)
- Szeizmikus CPT
- Sekélyszeizmikus mérések felhasználásával

Alapkőzet felszíne: 45 m ($V_s = 550$ m/s)



Meghatározások:

- GCPT szondázások γ - γ sűrűség
- karotázs γ - γ sűrűség
- geotechnikai labor mérések felhasználásával

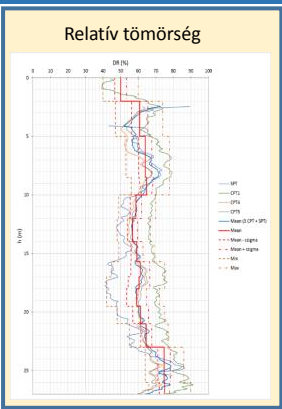


Meghatározások:

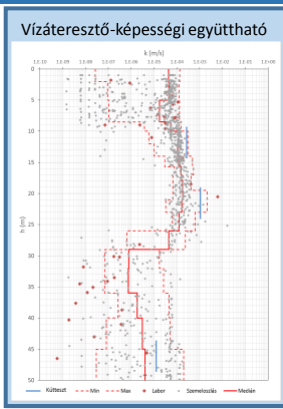
- Rezonancia oszlop
- ciklikus triaxiális mérések segítségével



Inputok IV. További paraméterek az effektív feszültség számításához



CPT és SPT mérésekből, empirikus formulákkal



Előállítás:

- Szemeloszlások
- Kútteszték
- Geotechnikai laborvizsgálatokból

Talajvízszint

Meghatározása:
Talajvíz monitoring kutak KV, LNV, LKV térképeiből, adataiból

Közepes talajvízszint:
88,5 mBf
Min: 86,25 mBf
Max: 92 mBf



Eredmények: A szabadfelszíni gyorsulások veszélyeztetettségi görbéi

Számítás: valószínűségi alapú konvolúciós eljárással
(Bazzurro és Cornell, 2004)

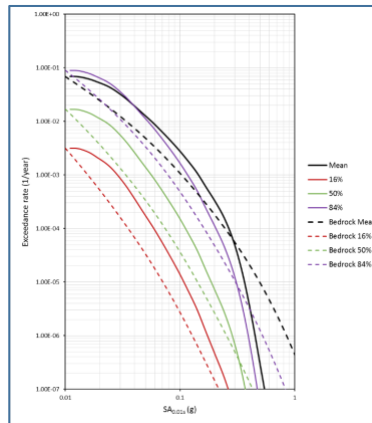
$$\lambda_s(z) = \sum_{x_j} P \left[AF > \frac{z}{x_j} \mid x_j \right] \cdot p_{s_{a_j}}(x_j)$$

Annak a valószínűsége, hogy $AF > \frac{z}{x_j}$ adott x_j alapközeteti gyorsulás előfordulási valószínűsége mellett

Adott, x_j alapközeteti gyorsulás éves előfordulási valószínűsége

Az eljárás figyelembe veszi, hogy egy felszíni gyorsulásértékhez különböző alapközeteti gyorsulások feltételezésével is kaphatunk járulékat

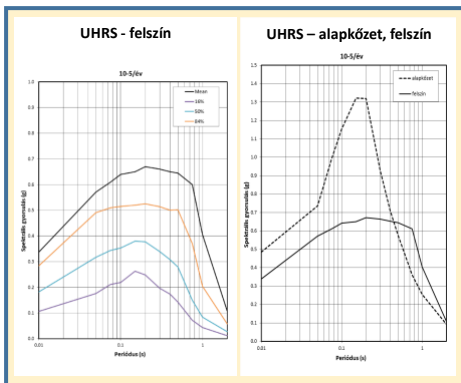
PGA	Megaladási valószínűség (1/év)					
	1/475	1/4980	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷
Mean	0,11 g	0,22 g	0,25 g	0,34 g	0,42 g	0,49 g
16% percentilis	0,02 g	0,05 g	0,06 g	0,11 g	0,17 g	0,24 g
50% percentilis	0,04 g	0,09 g	0,11 g	0,18 g	0,26 g	0,34 g
84% percentilis	0,09 g	0,17 g	0,20 g	0,28 g	0,36 g	0,43 g



A felszíni és az alapközeteti maximális gyorsulások (PGA) veszélyeztetettségi görbéi

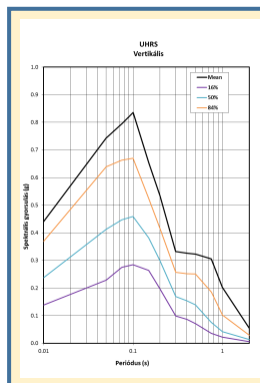
GeoRisk

Eredmények: A szabadfelszíni talajmozgás jellemzése a biztonsági földrengésnek megfelelő (10⁻⁵/év) valószínűségi szinten



Maximális vízszintes felszíni gyorsulás

	Mean	16%	50%	84%
Mean	0.34 g	0.11 g	0.18 g	0.28 g



Maximális függőleges felszíni gyorsulás

	Mean	16%	50%	84%
Mean	0.44 g	0.14 g	0.24 g	0.37 g

SZIGNIFIKÁNS IDŐTARTAM (5%-95%)

Becslése: a biztonsági földrengés alapközeteti UHRS-éhez válogatott 7 akcelerogramnak a felszínközeli rétegeken való áthaladás miatti, módosított alakjából

Átlagos szignifikáns időtartam: 12 s

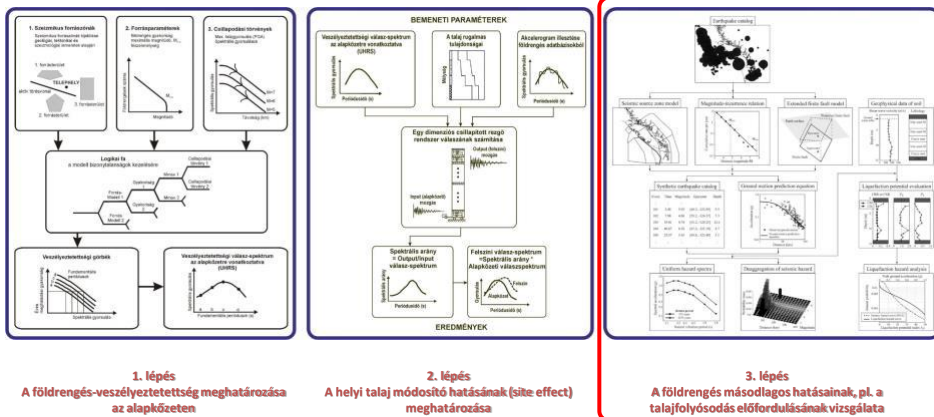
Az időtartam az alapközetéhez (8,7 s) képest megnőtt.

GeoRisk

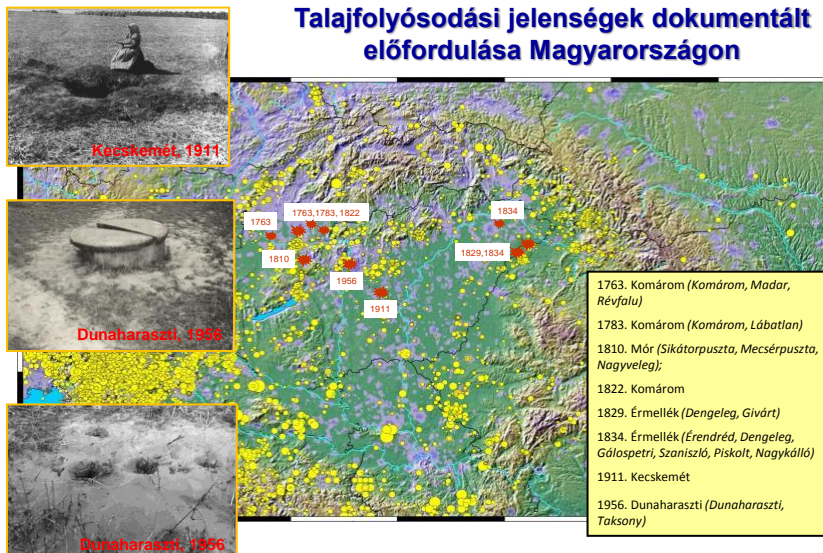
A FÖLDRENGÉSVESZÉLY MEGHATÁROZÁSA

3. lépés

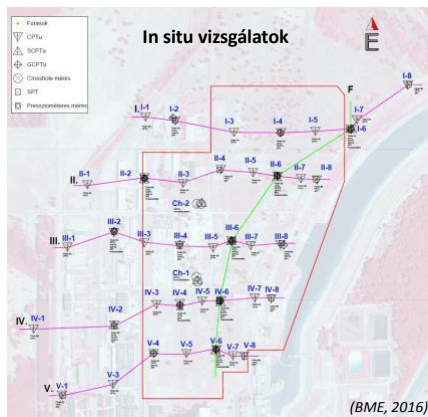
Olyan vizsgálati módszer, melynek során azt határozzuk meg, hogy egy adott mértékű, földrengésből származó hatás (pl. intenzitás, talajgyorsulás, sebesség, elmozdulás) egy adott időszak alatt milyen valószínűséggel fordul elő



Talajfolyósodási jelenségek dokumentált előfordulása Magyarországon



Inputok – In situ geotechnikai vizsgálatok

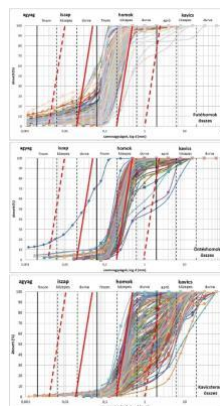


Geotechnikai laborvizsgálatok:

Szemelosztás és feszültségvezérelt ciklikus triaxiális vizsgálatok alapján leginkább a finomhomokok és a laza állapotú öntéshomokok hajlamosak a folyósodásra.

A kvarter rétegsorban négy fő réteg:

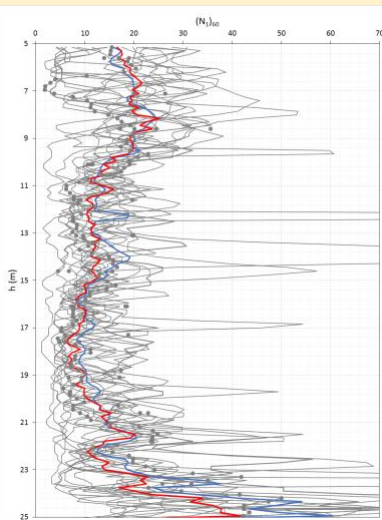
1. feltöltés
2. pleisztocén finomhomok (futóhomok)
3. öntéshomok
4. kavicsos homok - homokos kavics



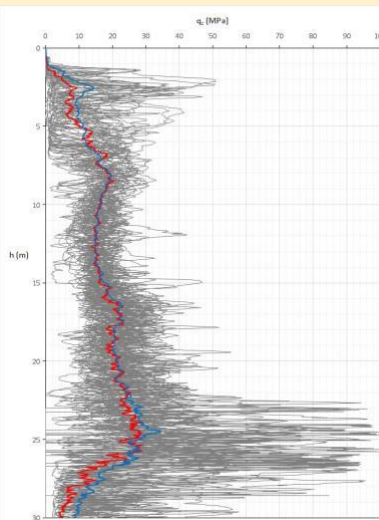
GeoRisk

Inputok – SPT mérések, CPT mérések

SPT mérések (4 standard és 14 SPTC)

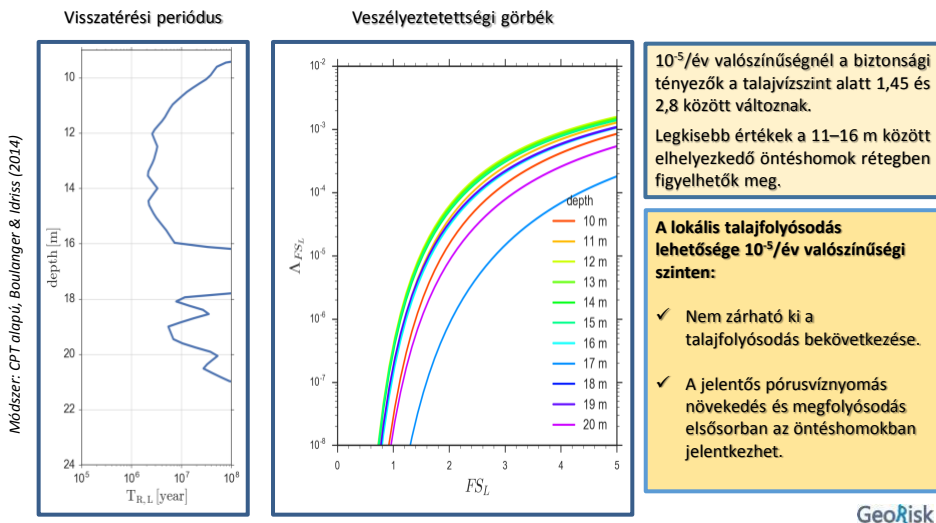


CPT mérések (41 CPTu és 7 SCPTu)



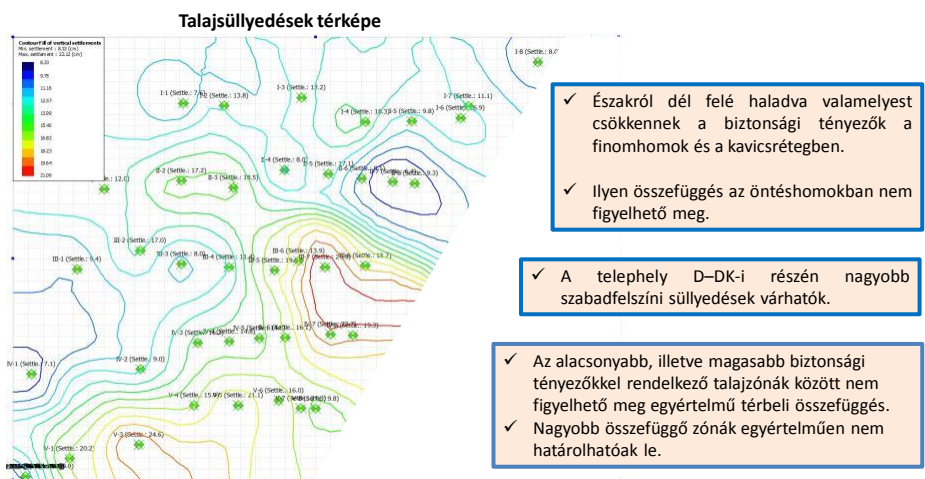
Eredmények:

A talajfolyósodás visszatérési periódusa, veszélyzetettségi görbéi (Kramer & Mayfield, 2007)



Eredmények:

A lokális talajfolyósodás lehetőségének elemzése a biztonsági földrengésnek megfelelő (10⁻⁵/év) valószínűségi szinten



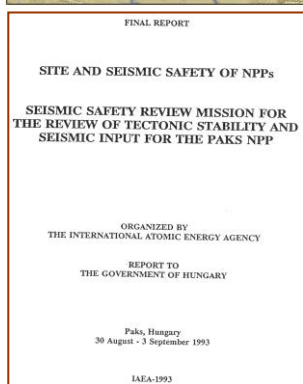
Földrengés monitorozás

- ✓ a telephely környezetében a kisebb mikrorengések megismerése
- ✓ adatgyűjtés a földrengésveszély minél pontosabb meghatározásához

A jelenleg érvényes hazai szabályozás (NBSZ 7. kötet) az alábbi közvetlen előírásokat tartalmazza a nukleáris telephelyek mikroszeizmikus monitorozásával kapcsolatban:

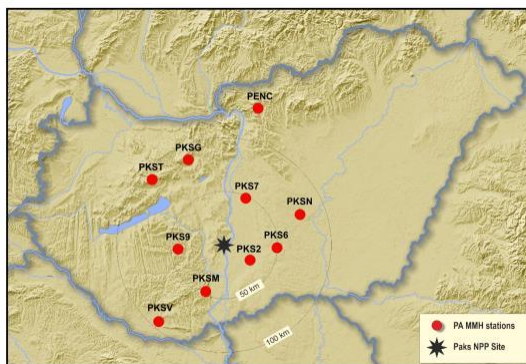
7.3.1.0500. A telephely környezetében a mikroszeizmikus aktivitást megfelelően telepített és érzékeny rendszerrel monitorozni kell. A megfigyelésnek olyan időtartamot kell felölelni, amely a mikroszeizmikus aktivitást reprezentálja, és össze kell gyűjteni más megfigyelésekből minden releváns adatot.

7.5.2.0100. A telephely környezetének mikroszeizmikus monitorozását a telephely-értékelés előtt legalább három évig kell végezni az adatok reprezentativitásának érdekében, és az atomerőmű teljes üzemideje alatt folytatni kell.



Szeizmológiai megfigyelő állomások

Paks Mikroszeizmikus Monitoring Hálózat 1995 óta

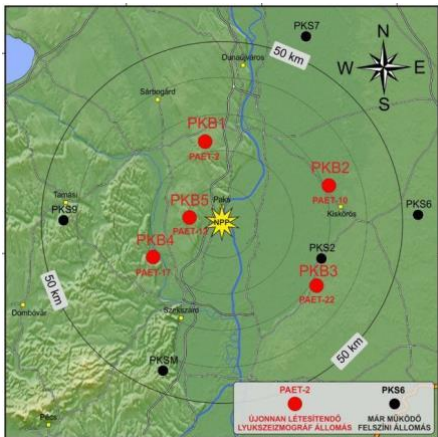


Recorded earthquakes should be routinely located, analysed and interpreted to evolve a confident tectonic model in the Paks plant region.

Digital seismographs should be installed ...

... capable of locating earthquakes as small as magnitude 2.0 within about 100 km of the Paks NPP site

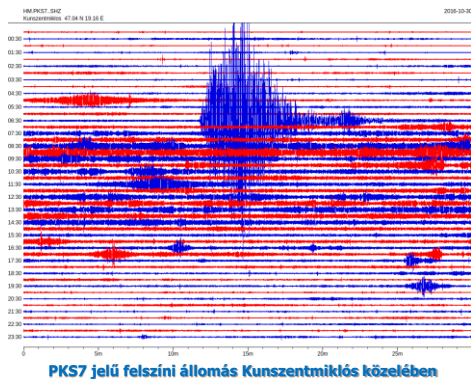
PAKS2 Mikroszeizmikus Monitoring Hálózat további 5 lyukseizmográf állomás @ 150 m



Észlelési küszöb < 1 ML



GeoRisk

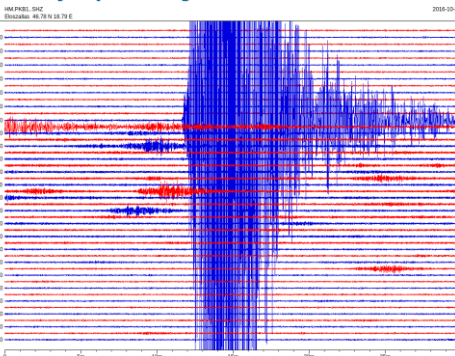


2016-10-30 06:40:18 UTC Mw 6.6 h=7 km
Olaszország (Norcia)

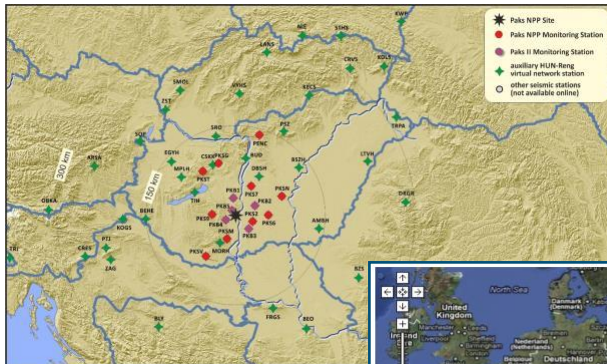
Napi (2016.10.30.) szeizmogram a PKS7 felszíni és a PKB1 lyukseizmográf állomáson.

A 150 m mély lyukban történő méréssel a felszíni zajok jelentős része kiszűrhető, míg a földrengés okozta rezgés amplitúdója a lyukban nem csökken.

PKB1 jelű lyukseizmográf állomás Előszállás közelében



GeoRisk



- Azonnali, élő szeizmogramok az összes állomásról
- Magyarországi földrengések listája (Havi földrengés tájékoztató)
- Magyarországon érezhető földrengések intenzitás eloszlása (Földrengés Hírlevél)

GeoRisk

HUN-Reng

virtuális szeizmológiai hálózat

www.foldrenges.hu

