

A PAKSI TELEPHELY SZEIZMICITÁSA ÉS FÖLDRENGÉS-VESZÉLYEZTETETTSÉGE

SEISMICITY AND SEISMIC HAZARD AT THE PAKS NPP SITE

Tóth László¹, Győri Erzsébet², Mónus Péter³, Gribovszki Katalin⁴, Kiszely Márta⁵,
Trosits Dalma⁶, Grenczy Gyula⁷

¹egyetemi doktor, ügyvezető igazgató, GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda, Budapest
toth@georisk.hu

²PhD, tudományos főmunkatárs, Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet
Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, Budapest
gyori@seismology.hu

³geofizikus MSc, szeizmológus tanácsadó, GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda, Budapest
monus@georisk.hu

⁴PhD, tudományos főmunkatárs, Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet
Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, Budapest
gribovszki.katalin@csfk.mta.hu

⁵PhD, tudományos munkatárs, Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet
Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, Budapest
marta@seismology.hu

⁶geofizikus MSc, szeizmológus munkatárs, GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda, Budapest
trosits@georisk.hu

⁷PhD, ügyvezető igazgató, Geo-Sentinel Kft., Göd
grenczy.gyula@geo-sentinel.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A paksi telephelyen tervezett új atomerőműblokkok szükségessé tették a terület szeizmicitájának és földrengés-veszélyeztetettségének felülvizsgálatát, a húsz–huszonöt éve készült és az akkori elképzeléseket, tudást és adatokat tükröző földrengésveszély-elemzés megújítását. A földrengésveszély kvantitatív leírása a tervezési alapba tartozó mértékadó földrengések jellemzőinek meghatározását és a földrengés által kiváltott egyéb veszélyek, például a talajfolyósodás veszélyének meghatározását jelenti.

A Pannon-medence térségét a szeizmikusan közepesen aktív területek közé soroljuk, ahol a földrengés-aktivitás átmenetet képez a lemezperemi és a lemezen belüli területek között. A területen a rengések túlnyomó többsége 5 magnitúdónál kisebb, ennél erősebb szeizmikus események csak viszonylag ritkán fordulnak elő. A történelmi szeizmicitás és a legújabb mikro-szeizmikus monitorozás eredményének kombinációja lehetővé teszi egy megbízható földrengés-gyakorisági összefüggés meghatározását egészen széles magnitúdótartományban.

A historikus és műszeres források alapján egy átfogó, homogén földrengés-katalógust állítottunk össze a 44°–50° északi szélesség és 13°–28° keleti hosszúság által határolt földrajzi ab-

lakra, amely több mint húszezer $M_w \geq 2,3$ földrengést és azok hipocentrumadatait tartalmazza. A teljes területre meghatározott gyakorisági összefüggés szerint 6 M_w -nál erősebb földrengés 3,8 évenként fordul elő, 5 M_w -nál erősebb évente három, $M_w \geq 4$ magnitúdójú földrengés pedig évente átlagosan 36 keletkezik.

A paleoszeizmológiai következtetések jól korrelálnak a katalógus alapján meghatározott földrengés-gyakorisággal: a szeizmitákra végzett kormeghatározások 1500 év, 400 év és 200 év visszatérési időt eredményeztek az 5,5–6 magnitúdónál nagyobb földrengésekre. A korszerű űrgeodéziai vizsgálati módszerekkel kapott eredmények az utóbbi húsz–huszonöt évre vonatkozóan azt mutatják, hogy a 30 km sugarú területen belüli, lokális, relatív jelenkori horizontális kéregmozgás-sebességek 0,5 mm/év szint alatt vannak.

A komplex földtudományi vizsgálati eredmények alapján konstruált szeizmotektonikai modellek szerint valószínűségi módszerrel határoztuk meg a telephelyen várható földrengésveszélyt különböző frekvenciájú talajmozgásokra. A számítási módszer inherensen tartalmazza a bizonytalanságok meghatározását is. 10^{-4} és 10^{-5} éves gyakoriságokra a csúcsgyorsulás (PGA) várható értékére az alapkőzetén 0,24g, illetve 0,49g adódott.

A laza üledékek módosító hatásának számítása nemlineáris, időtartománybeli teljes és effektív feszültség módszerrel történt. Eszerint a 10^{-5} /év gyakorisági szintnek megfelelő biztonsági földrengés átlagos PGA értéke a felszínen 0,34g. A vertikális gyorsulás meghatározására egyszerűsített összefüggéseket alkalmaztunk, és a vertikális csúcsgyorsulás átlagos értéke 0,36g.

A talajfolyósodás elemzését effektív feszültség módszerrel végeztük. Megállapítottuk, hogy a telephelyen nem zárható ki a talajfolyósodás lokális bekövetkezése, több helyen is számolni kell nagyobb vastagságban történő megfolyósodással, elsősorban az öntéshomok rétegekben. A talajfolyósodás hatásait bevált geotechnikai módszerekkel, például talajstabilizálással és megfelelő alapozással kell elkerülni.

ABSTRACT

The new nuclear power plant units planned at the Paks site required a review of the seismicity and earthquake vulnerability of the area, a renewal of the earthquake hazard analysis prepared 20–25 years ago and reflecting the ideas, knowledge and data at the time. A quantitative description of an earthquake hazard means the determination of the characteristics of the major earthquakes in the design basis and the determination of other earthquake-induced hazards such as the risk of soil liquefaction.

The area of the Pannonian Basin is classified as a seismically moderately active area, where earthquake activity forms a transition between the plate boundary and intra-plate areas. The vast majority of earthquakes in the area occur in the $M < 5$ magnitude range, stronger seismic events are relatively rare. The combination of historical seismicity and the results of the latest microseismic monitoring makes it possible to determine a reliable earthquake recurrence relationship over a fairly wide magnitude range.

Based on historical and instrumental sources, we have compiled a comprehensive, homogeneous earthquake catalogue for the geographic window bounded by 44° – 50° northern latitude and 13° – 28° eastern longitude, which contains more than 20000 $M_w \geq 2.3$ earthquakes and their hypocentre data. According to the earthquake magnitude - frequency relationship determined for the whole area, earthquakes $M_w > 6$ occur every 3.8 years, $M_w > 5$ earthquakes three times per year, $M_w > 4$ earthquakes occur on average thirty-six a year.

Paleo-seismological conclusions correlate well with the earthquake frequency determined from the catalogue: age determinations for sedimentation structures caused by earthquakes (seismites) resulted in return times of 1,500 years, 400 years, and 200 years for earthquakes of magnitude $M > 5.5$ –6. The results obtained by modern space geodetic survey methods for the last 20–25 years show that there are no horizontal displacements in the 30 km radius area exceeding the speed of 0.5 mm/year.

Earthquake hazards for ground motions of different frequencies have been determined at the site using a probabilistic method (PSHA) according to the seismotectonic models constructed on the basis of the complex geological research program results. The calculation method also inherently includes the determination of uncertainties. For frequencies of 10^{-4} and 10^{-5} years, the expected value of PGA on the bedrock was 0.24g and 0.49g, respectively.

The modifying effect of loose sediments was calculated by the nonlinear, time-domain total and effective stress method. According to site effect calculation, the average PGA value of a safety earthquake corresponding to the frequency level of 10^{-5} /year is 0.34g on the surface. To determine the vertical acceleration, we used simplified V/H ratio relationships, according to which the average value of the vertical peak acceleration was 0.36g.

Analysis of soil liquefaction was performed by the effective stress method. We found that the local occurrence of soil liquefaction cannot be ruled out at the site; liquefaction to a larger thickness is to be expected in several places, which may occur mainly in sandy layers. The effects of soil liquefaction shall be avoided by proven geotechnical methods, like soil stabilization and/or by application of adequate foundation.

Kulcsszavak: Paks II., Földtani Kutatási Program (FKP), földrengés, földrengésveszély, talajfolyósodás

Keywords: Paks II, Geological Research Programme (FKP), earthquake, seismic hazard, liquefaction

BEVEZETÉS

Az atomerőmű telephelyét veszélyeztető külső tényezők közül kiemelkedő fontosságú a földrengés és az annak következtében kialakuló másodlagos hatások (például: szökőár, lejtőcsuszamlás, talajfolyósodás). A földrengés következtében előforduló talajrezgés azonban nem telephely-alkalmassági kritérium, hanem tervezési paraméter, amelyre az atomerőművet tervezni kell. Talajfolyósodásra nem lehet tervezni, ezért a talajfolyósodás a telephelyet alkalmatlanná teszi, hacsak nincsen olyan műszaki megoldás, amely magát a talajfolyósodást küszöböli ki.

Magyarország a Pannon-medence középső részén fekszik, a szeizmikusan igen aktív mediterrán térség és a szinte teljesen aszeizmikus Kelet-Európai-tábla között. Hazánk területe szeizmikus szempontból közepes-alacsony aktivitású. Kőzetlemezhatároktól távol esik, így földrengés-aktivitása a lemezen belüli területekre jellemző.

A historikus dokumentumok és a korszerű műszeres megfigyelések alapján összeállított földrengés-katalógus és epicentrumtérkép szerint a rengések eloszlása meglehetősen diffúz, a rengések – néhány kivételtől eltekintve – bizonytalanul köthetők ismert törésvonalakhoz.

Az atomerőmű-telephely szeizmológiai vizsgálatának és értékelésének célja a telephely jellemzőinek azonosítása, a telephelyi veszélyek vizsgálata és értékelése, a tervezési alapba tartozó, a telephelyre és a nukleáris létesítményre vonatkozó adatok meghatározása, azaz:

- a földrengésveszély kvantitatív leírása;
- a tervezési alapba tartozó mértékadó földrengések jellemzőinek meghatározása;
- a földrengés által kiváltott egyéb veszélyek, például a talajfolyósodás veszélyének meghatározása.

A paksi telephely sajátossága, hogy ott már üzemel egy négyblokkos atomerőmű, a telephelyről rendelkezésre állnak korábbi adatok. Ezek elsősorban az 1986–1994 között zajlott telephelyvizsgálat során mért adatok, illetve az azok alapján végzett kutatások eredményei. Az azóta eltelt idő alatt sokat fejlődtek, jelentősen változtak a tudományos ismeretek, elméletek, módszerek, többek között épp a paksi telephelyvizsgálat hazai szakmai fejlődést is inspiráló hatása következtében. A tervezett új blokkok telephely-engedélyezése kapcsán azonban szükség volt egy integrált felülvizsgálatra, a húsz–huszonöt éve készült és az akkori elképzeléseket, tudást és adatokat tükröző földrengésveszély-elemzés megújítására, amely a mai elvárások szerinti legteljesebb adatbázisra támaszkodik.

A nukleáris biztonsági szabályok (NBSZ) előírják, hogy a szeizmotektonikai jellemzők és a speciális telephelyi viszonyok figyelembevételével meg kell határozni a biztonsági földrengés (értsd: az atomerőmű biztonságát még nem veszélyeztető legerősebb földrengés) jellemzőit, így különösen a maximális talajgyorsulást, válaszspektrumot és az erős mozgások időtartamát. A biztonsági földrengés jellemzőinek meghatározására ajánlott a valószínűségi módszer, amelynek keretében az adatok és a módszer bizonytalanságát is figyelembe kell venni. A valószínűségi módszer (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA) előnye, hogy jól alkalmazható az olyan mérsékelt, diffúz szeizmicitású területekre, mint Magyarország, illetve a Pannon-medence, és a földrengésveszély értékelésében a bizonytalanságokat is kezeli.

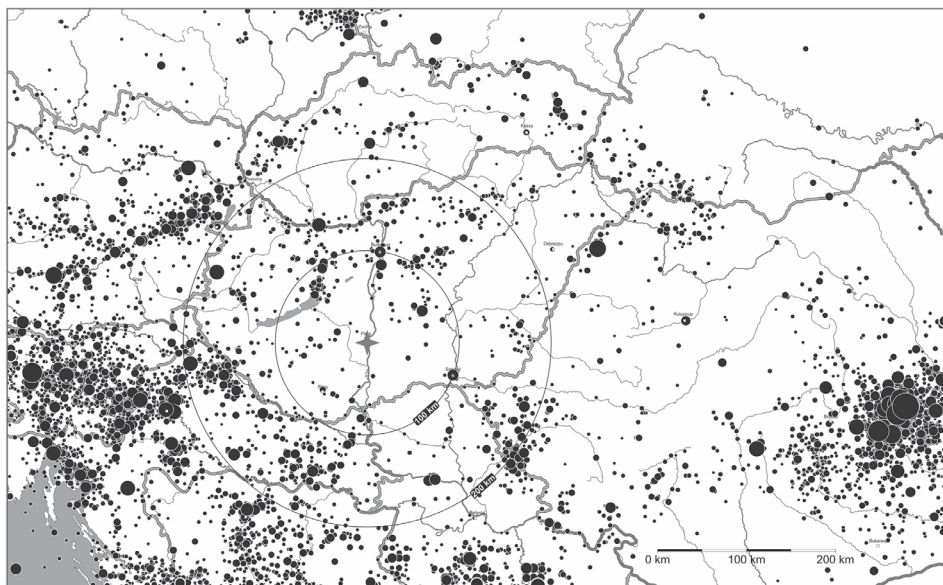
A PSHA végeredménye az alapközzeti veszélyeztetettségi görbe, amely azt mutatja meg, hogy az adott földrengéshatás (például spektrális gyorsulás) előfordulásának mekkora az éves gyakorisága. A veszélyeztetettségi görbe meghatározható a maximális vízszintes gyorsulásra és bármely spektrális amplitúdóra.

AZ INPUT ADATOK ÖSSZEGYŰJTÉSE

Regionális szeizmicitás

Hazánk nagytektonikai környezetében, a Pannon-medencében és a környező hegységekben napjainkban is aktív tektonikai folyamatok zajlanak, emiatt bizonyos tektonikai egységek egymáshoz képest törésvonalak mentén elcsúszhatnak. Ezeket a mozgásokat gyakran kíséri földrengés kipattanása. A területen a rengések túlnyomó többsége az $M < 5$ magnitúdótartományba sorolható, ennél erősebb szeizmikus események csak viszonylag ritkán és térben lokalizáltan fordulnak elő.

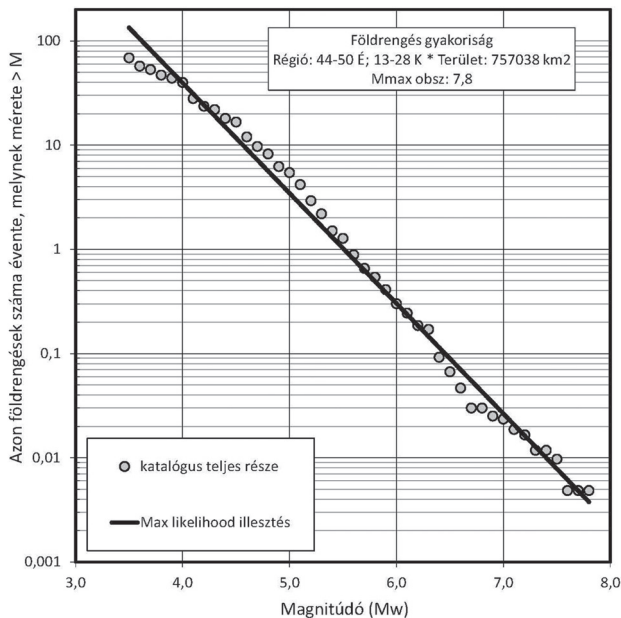
A Pannon-medence és környéke szeizmicitását ábrázoló térképen (1. ábra) jól látható, hogy a legintenzívebben az Adriai-tenger peremvidékei deformálódnak. A Déli-Alpok területén az északi irányú térrövidülés az uralkodó. A Dinári-hegységben jobbos eltolódásokat észleltek transzpressziós (összenyomódásos) jelleggel, az aktív kompresszió itt is szembetűnő. Ezek alapján egyetértés mutatkozik abban, hogy a megfigyelt deformációs képért elsősorban az Adriai-mikrolemeknek az óramutató járásával ellentétes forgása és az Európához képest északias mozgása tehető felelőssé. Ez az észak felé sodródó, viszonylag merev, kontinentális kérgű blokk folyamatos nyomást fejt ki mind az Alpok, mind pedig a Dinári-dák láncolatára (Tóth et al., 2002).



1. ábra. A Pannon-medence térségének szeizmicitása. A fekete körök a földrengések epicentrumát mutatják, a körök nagysága a magnitúdóval arányos.

A csillag a telephelyet mutatja, a 100 és 200 km sugarú kör a tájékozódást segíti (mindegyik ábra a szerzők saját szerkesztése)

A Déli-Alpokhoz és a Délkeleti-Kárpátokhoz viszonyítva a Pannon-medence belső (hazai) területein gyengébb a tektonikai aktivitás. A szeizmicitás viszont egyértelműen mutatja, hogy a Pannon-medencében a Kárpátok orogén ívéhez hasonlóan, az aszeizmikusnak tekinthető Kelet-Európai-táblához viszonyítva nagyságrendekkel nagyobb energiák szabadulnak fel a földrengések során. Ez alapján a Pannon-medencét feltétlenül a tektonikusan aktív területek közé kell sorolnunk. A mérsékelt aktivitás miatt sokkal nehezebb precíz szeizmotektonikai modelleket kidolgozni – így például aktív vetőket kijelölni –, mint a medence déli peremvidékein. A nehézségek ellenére lehetséges néhány szeizmoaktív zóna behatárolása, amelyek a nyírási övek korábbi, főképp neogén szerkezeti elemeinek feleltethetők meg. Ezek reaktiválódásához köthető a magyarországi földrengések zöme. Vannak kivételek is, ahol rendkívül fiatal törésvonalakhoz kapcsolódó szeizmoaktív zónák körvonalazhatók (Bus et al., 2009). Jó példa erre a Komárom–Móri-árok zónájában tapasztalható földrengés-tevékenység. A Pannon-medence térségében található néhány merevebb blokk egymáshoz képest szeizmoaktív vetők mentén csúszik el. Ezen törések többsége már a Pannon-medence korábbi története során is aktív volt (2. ábra). Példa erre a Keleti-Alpokból induló, a Bécsi-medencét déli oldalról határoló és nagyjából Zsolnánál végződő Mur–Mürz–Žilina szeizmikus zóna. Délen szintén aktívnak mutatkozik a Periadriai- és Zág-ráb-vonal, amelynek folytatása valószínűleg a Kapos-vonalban keresendő. Ez a törés tovább vizsgálható Paks környékétől egészen Kecskemétiig.



2. ábra. Földrengés-gyakoriság a teljes Pannon-régióban

A magyarországi szeizmológiai hálózat detektálási és helymeghatározási képessége az ország nagy részén 1995-ig nem ment az érezhető földrengések szintje alá. Ezért a Pannon-medence térségének szeizmicitásáról alkotott kép nagyrészt a történelmi rengések epicentrumának eloszlásán alapszik. A régi rengésekről csak makroszeizmikus adatok állnak rendelkezésre, amelyek minősége térben és időben nagyon heterogén. Mivel mindig településekhez kötött adatokról van szó, amelyekben tükröződik az adott kor településszerkezete és településsűrűsége is, a makroszeizmikus epicentrumok meghatározása igen bizonytalan. Ez az értelmezésben könnyen oda vezethet, hogy az ismert szeizmicitást nem lehetséges ismert tektonikai vonalakkal kapcsolatba hozni. Másfelől pedig minél távolabbi múltba tekintünk vissza, annál hiányosabb a történelmi rengések adatbázisa.

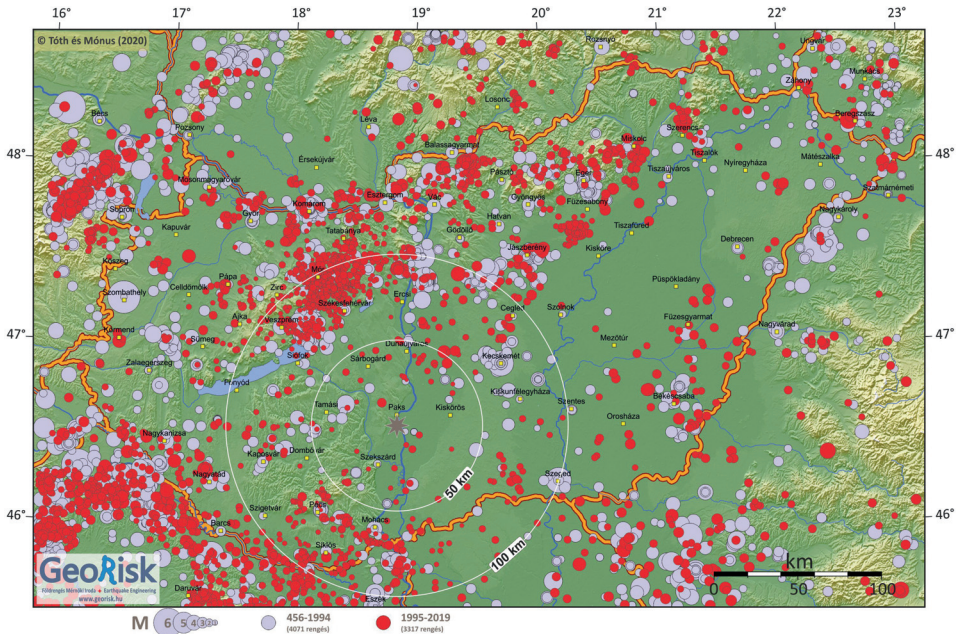
A rendelkezésünkre álló feljegyzések alapján a legkorábbi földrengés 456-ból ismert, amikor egy erős rengés rázta meg Savariát, a mai Szombathely környékét, a római birodalom egyik központját. A Magyarország mai területén keletkezett legnagyobb földrengés az 1763-as komáromi, amelynek epicentrális intenzitása elérte a 9-es fokozatot az európai makroszeizmikus skála (EMS, a Mercalli-skála továbbfejlesztett változata) szerint, M_w magnitúdója (a Richter-skálán a földrengés által okozott törés fizikai méretéből meghatározott magnitúdó, momentum magnitúdó) pedig kb. 6,5 volt.

Lokális szeizmicitás

A földrengésveszély meghatározása és a szeizmotektonikai modellek pontosítása szempontjából az utóbbi évtizedek legnagyobb fejlődését a mikroszeizmikus megfigyelőhálózatok kiépítése jelentette. A lokális hálózatok működésének eredménye összesen több mint háromezer recens rengés, illetve ezek hipocentrumának pontos adatai (3. ábra). Megállapítható, hogy a mai rengések nagy része eddig is ismert zónákhoz, aktív törési övekhez, azaz tektonikai zónákhoz köthető (például Mur–Mürz–Žilina-vonal, Berhida–Komárom szeizmikus zóna, Kapos-vonal, Dunaharaszti és Kecskemét környéke). A szeizmogén kéreg vastagsága legfeljebb 20 km, a rengések több mint fele a 10–15 km-es mélységtartományhoz kötődik.

A történelmi szeizmicitás ismerete és a mikroszeizmikus monitorozás eredményének kombinációja lehetővé teszi egy megbízható földrengés-gyakorisági összefüggés meghatározását egészen széles magnitúdótartományban.

Paks környezetének szeizmikus aktivitása határozottan alacsonyabb, mint a magyarországi átlag. A közel nyolcezer magyarországi eseményt tartalmazó földrengés-adatbázisban mindössze ötven olyan rengés található, amelynek epicentruma nem esett 50 km-nél távolabb a telephelytől. Ezek közül négy rengés magnitúdója volt nagyobb, mint 3,5, ezek már kisebb-nagyobb épületkárokat is okozhattak az epicentrum környékén.



3. ábra. Historikus és recens szeizmitás Magyarországon. Az 1995–2019 közötti időszakban 3317 földrengést regisztráltunk. A csillag a telephelyet mutatja, az 50 és 100 km sugarú kör a tájékozódást segíti

Földrengés-katalógus

A történelmi idők és a közelmúlt eseményeiből összeállított földrengés-katalógus a szeizmikus veszélyeztetettség becslésének legfontosabb, meghatározó jelentőségű bemenő adata. Ennek alapján történik az egyes forrásházakon belüli gyakoriság és a várható legnagyobb magnitúdó meghatározása.

A katalógus négy, időben egymást követő, néha átfedő időszak rengéssparamétereinek listájából tehető össze:

- történelmi földrengések,
- korai műszeres megfigyelések,
- lokális mikroszeizmikus monitoring és
- paleoszeizmológiai információk.

A historikus és műszeres részkatalógusok és források alapján egy átfogó kompozit földrengés-katalógust állítottunk össze a 44°–50° északi szélesség és 13°–28° keleti hosszúság által határolt földrajzi ablakra. A katalógus 1500 és 2012 között a teljes területre, 2014-ig pedig a Magyarországot magába foglaló kisebb földrajzi ablakra (45,5°–49° E; 16°–23° K) tartalmazza az $M_w \geq 2,3$

($M_L \geq 2,0$ lokális magnitúdójú) összes ismert földrengést (M_W a momentummagnitúdó, M_L lokális, Richter-féle magnitúdó, a kettő közötti átszámításra használt képlet: $M_W = 0,73 M_L + 0,86$).

A küszöbmagnitúdónál kisebb rengések nem szerepelnek a katalógusban. Így a katalógus 21 044 földrengést és azok minden ismert hipocentrumadatát tartalmazza.

Az 1500–1994 közötti időszakra lényegében a historikus források, illetve makroszeizmikus adatok képezik a katalógus alapját. A rengések nagyságát elsősorban az epicentrális intenzitás írja le, a településekhez kötött epicentrum bizonytalansága jellemzően nagy, esetenként 5–50 km. 1995–2014 között a Magyarországot magába foglaló földrajzi ablakra az adatok elsődleges forrása a *Magyarországi földrengések évkönyve* (Tóth et al., 1996–2016). Ezen adatok (555 földrengés) esetében az epicentrum pontossága már sokkal jobb, jellemzően 1–5 km, a rengések nagysága pedig Richter-féle lokális magnitúdóban (M_L) van megadva.

A Pannon-régió Magyarországon kívüli területére 1996–2000 között az *International Seismological Centre* a legteljesebb forrás (URL1), 1853 $M_W \geq 2,3$ földrengést tartalmaz. A 2001–2003 időszakra a NEIC (*National Earthquake Information Center*, USGS) katalógusa a legteljesebb (URL2), 669 olyan földrengést tartalmaz, amelyre $M_W \geq 2,3$. 2004–2012 közöttre az EMSC (*European-Mediterranean Seismological Centre*) katalógus (URL3) tartalmazza a legtöbb, 3227 $M_W \geq 2,3$ földrengést. Az ISC *Global Earthquake Model Foundation* (GEM) katalógus (URL4), illetve az abban szereplő rengéssparaméterek prioritást kaptak minden olyan esetben, amikor valamely rengés abban fellelhető volt.

A különböző forrásokból összefésült katalógust homogenizáltuk, minden eseményére meghatároztuk az M_W magnitúdót. A 20 760 földrengést tartalmazó teljes katalógusban 1325 klaszter (összesen 5106 elő- és utórengés) volt azonosítható.

A teljes Pannon-régió 757 038 km² területére (44°–50° É, 13°–28° K) vonatkoztatott földrengés-gyakoriságra a $\log N = 5,84 - 1,07 M_W$ összefüggés adódott, ahol N az M_W -nél erősebb földrengések éves száma.

Ez azt jelenti, hogy a teljes területen $M_W > 6$ földrengés 3,8 évenként fordul elő; $M_W > 5$ földrengés évente három; $M_W > 4$ földrengés pedig évente 36 keletkezik átlagosan.

Paleoszeizmológiai vizsgálatok Paks tágabb környezetében

Sértetlen, álló cseppkövek vizsgálata, ezen cseppkövek időben folyamatos sértetlensége bizonyítja az olyan nagy erejű földrengések hiányát, amelyek már elég erősek lettek volna ahhoz, hogy eltörjék ezeket a cseppköveket. Hat cseppkőbarlangban végzett vizsgálatok azt mutatják, hogy minden esetben alacsonyabb kritikus horizontális talajgyorsulás-értékeket sikerült megállapítani a sérülékeny

álló cseppkövek vizsgálatával, mint a földrengésveszély-modellezés eredményei (Gribovski et al., 2017).

A kutatási program során a kvarter üledékekben megfigyelhető paleoszeizmológiai jelenségeket is vizsgáltuk. Vetőaktivásra utaló, üledékben megfigyelhető szerkezetek lehetnek a szeizmiték – földrengés hatására létrejött üledékszerkezetek –, valamint a törések. A terepi észlelések során több felszíni feltárásban figyeltek meg szeizmitként értelmezhető üledékszerkezeteket. A projekt során mélyült fúrásokban szeizmikus eredetűnek értelmezett deformációt egy helyen dokumentáltak, a Pa-21-B sekélyfúrásban 29,8 m mélységben. A telephely közelében mélyített kutatóárok 1,9–3 m mélységben tárt fel szeizmotektonikus szerkezeteket, plasztikus rétegdeformációkat.

A paleoszeizmológiai jelenségek kormeghatározása alapján a földrengésekre 1500 év, 400 év és 200 év visszatérési időt határoztak meg. Figyelembe véve, hogy a jelenségeket okozó rengések legalább 5,5–6 magnitúdójú események lehetnek, a paleoszeizmológiai következtetések jól korrelálnak a katalógus alapján meghatározott földrengés-gyakorisággal, megerősítik azt.

Űrgeodéziai vizsgálatok

Az űrgeodézia GNSS (Global Navigation Satellite System) vizsgálati módszerével kapott eredményei az utóbbi húsz–huszonöt évre vonatkozóan a paksi telephely környezetében azt mutatják, hogy a 30 km sugarú űrgeodéziai vizsgálati területen belüli, lokális, relatív jelenkori horizontális kéregmozgás-sebességek 0,5 mm/év szint alatt vannak. A nagyobb arányú űrgeodéziai kéregmozgás-vizsgálataink pedig egyenletes, diffúz deformációeloszlást feltételezve ugyanerre a telephely-vizsgálati területre 0,2–0,4 mm/év sebességű É–D és K–Ny-i kompressziót jeleznek. A vizsgálati terület vertikális felszínmozgásai 1 mm/év hibahatár alattiak, jelenleg csak egy-két kivétel van, ahol az észlelt mozgás tranzienst, kompakciós, technogén eredetű.

A FÖLDRENGÉSVESZÉLY MEGHATÁROZÁSA

A komplex földrengésveszély-elemzés három lépésből áll:

1. A földrengésveszély meghatározása az alapközetten (PSHA).
2. Helyi módosító hatás meghatározása; a földrengésveszély meghatározása a felszínen.
3. A földrengések következtében kialakuló másodlagos hatások, esetünkben a talajfolyósodás veszélyének meghatározása.

A földrengésveszély meghatározása az alapkőzeten

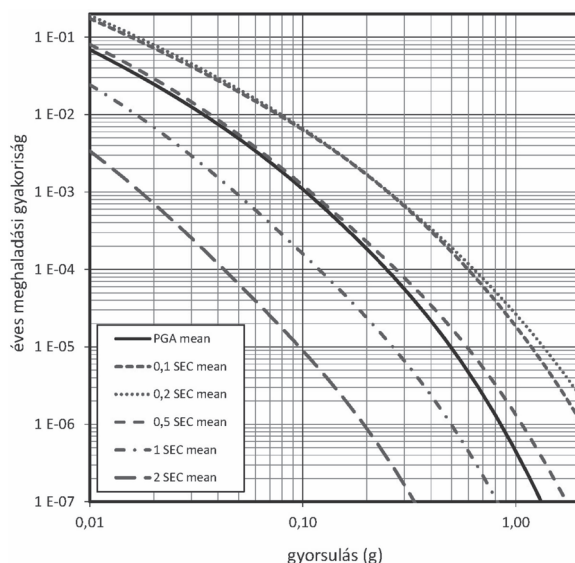
A paksi telephelyre vonatkozó valószínűségi földrengésveszély-számítás teljes megújítására került sor az FKP (Földtudományi Kutatási Program) keretében.

A földrengésveszély meghatározásának legfontosabb eredménye a veszélyeztetettségi görbe, amely a különböző mértékű talajmozgás éves meghaladási gyakoriságát adja meg. A veszélyeztetettségi görbét különböző frekvenciájú talajmozgásokra (PGA 0,05, 0,075, 0,1, 0,15, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,75, 1 és 2 másodperces periódusokon) határoztuk meg, a frekvenciatartományt logaritmikusan közelítően egyenközűen mintavételezve.

A veszélyeztetettségi görbéket a 0,01g–2g gyorsulástartományban 30 gyorsulásiértékre számítottuk, ez közelítőleg megfelel a 10^{-1} – 10^{-7} /év gyakoriságtartománynak a periódustól függően.

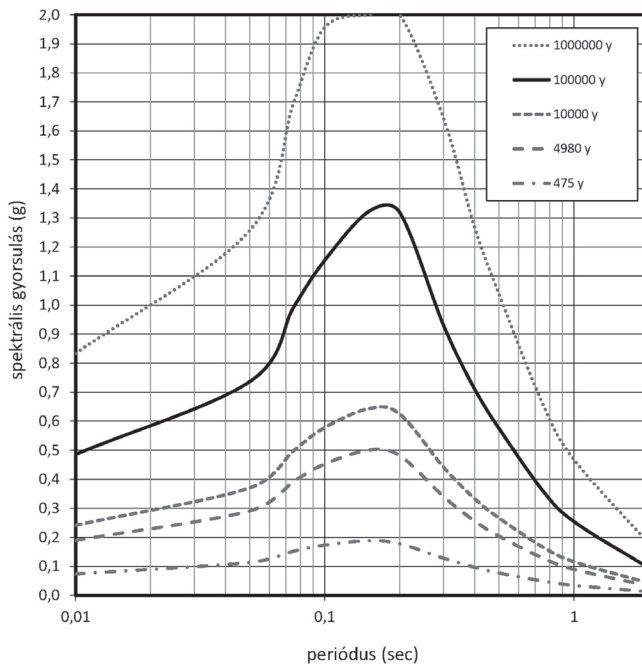
A számítási módszer inherensen tartalmazza a bizonytalanságok meghatározását is. Az eredményeket a súlyozott átlag (mean) értéke mellett az 5%, 16%, 50% (medián), 84% és 95% konfidenciaszinten is megjelenítettük.

A logikai fa összes ágán, illetve a véletlenszerűségből fakadó bizonytalanságok integrálásával kapott PGA és különböző periódusra vonatkozó veszélyeztetettségi görbék várható értékét (Mean Hazard Curves) a 4. ábra mutatja. E görbesereg megadja a talajgyorsulás várható értékét az alapkőzeten a 10^{-1} – 10^{-7} /év gyakoriságtartományban.



4. ábra. A PGA és különböző periódusra vonatkozó veszélyeztetettségi görbék várható értéke (Mean Hazard Curves) a területen

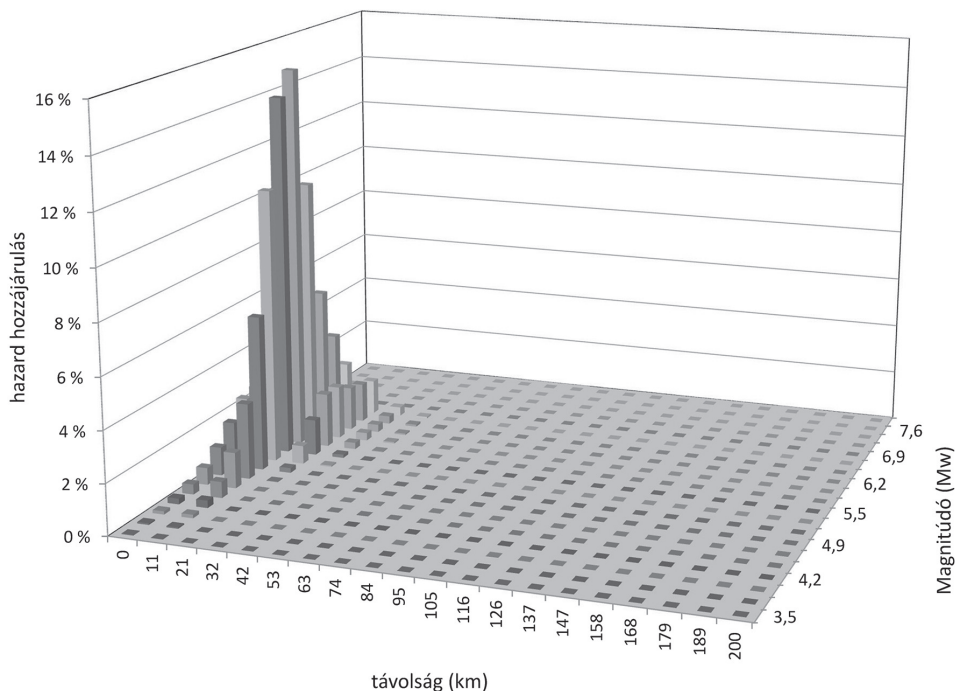
Az azonos éves gyakoriság mellett számított különböző periódusú gyorsulások adják az alapközei UHRS-t (Uniform Hazard Response Spectrum, egyenlő veszélyeztetettségre vonatkozó, telephely-specifikus válaszspektrum), amelyet $1/475$, $1/4980$, 10^{-4} , 10^{-5} és 10^{-6} éves gyakoriságokra határoztunk meg (5. ábra). 10^{-4} és 10^{-5} éves gyakoriságokra a PGA várható értéke az alapközei 0,24g, illetve 0,49g.



5. ábra. $10^{-6}/\text{év}$, $10^{-5}/\text{év}$, $10^{-4}/\text{év}$, $1/4980/\text{év}$ és $1/475/\text{év}$ gyakoriságú spektrális gyorsulások várható értéke (UHRS mean) a területen

A vizsgálat keretében elvégeztük a veszélyeztetettségi eredmények deaggregációját is, azaz annak meghatározását, hogy a végeredmény kialakításában milyen hatása van a különböző magnitúdójú és távolságú rengéseknek. Az M–R (M magnitúdó és R távolság) deaggregációt 20 magnitúdó- és 20 távolságintervallumra számítottuk a veszélyeztetettségi görbe 30 gyorsulásértékére, mind a 12 periódus esetében. A deaggregáció eredményét minden periódusra egy $20 \times 20 \times 30$ elemű háromdimenziós mátrix jeleníti meg.

Példaként a 6. ábra a $10^{-5}/\text{év}$ gyakoriságú PGA M–R szerinti deaggregációját mutatja. Látható, hogy a veszélyeztetettség kialakításában legjelentősebb szerepet a közeli (5–20 km) és 5,5–6,0 magnitúdójú rengések játsszák.



6. ábra. A 10^{-5} /év gyakoriságú veszélyeztetettség távolság és magnitúdó szerinti deaggregációja a telephelyen

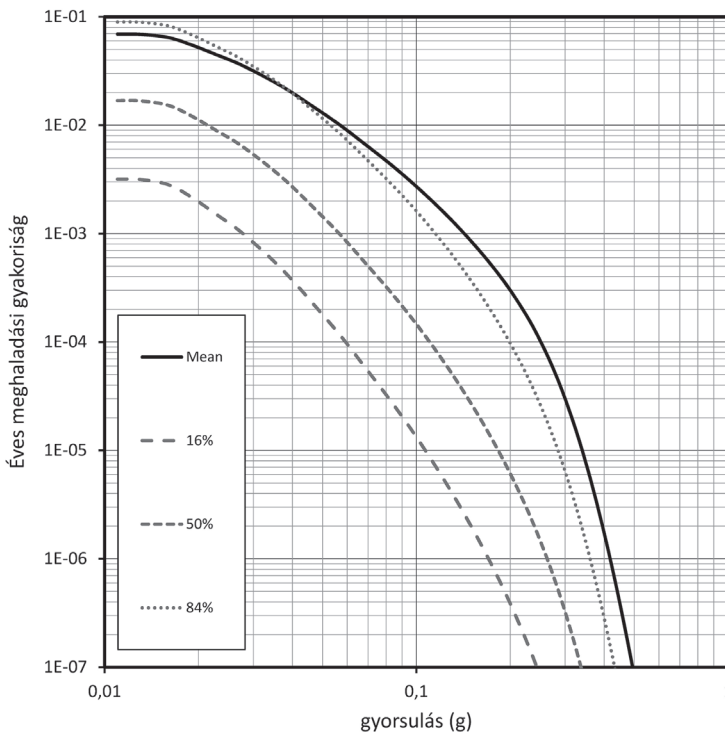
A felszín közelében található lazább üledékek az alapkőzethez képest jelentősen módosíthatják a földrengések által okozott rezgéseket. Általában a felszínen a gyorsulások növekedése figyelhető meg, azonban a kis valószínűséggel bekövetkező nagy deformációknál az üledékek merevsége lecsökken, csillapítása megnő. Ekkor a felszínen tapasztalható gyorsulás kisebb lesz, mint amekkora a merevebb alapkőzeten tapasztalható.

A Paks II. telephely a működő 1–4. blokkoktól északra, a Duna pleisztocén folyóvízi teraszán helyezkedik el. Anyaga nagyjából folyóvízi homok és kavics, amelynek felszínét futóhomok lepel borítja. Jelenlegi felszíne közelítőleg sík, a felső néhány méteren található feltöltés hatására. A negyedkori, nyugodt holocén és pleisztocén rétegek eróziós diszkordanciával települnek a pannon rétegekre, amelynek felszíne a terepszint alatt 21–28 m mélységben található. A telephelyen elvégzett vizsgálatok szerint az alluviális terasz anyagában földrengés hatására megfolyósodásra hajlamos, homokos üledékek találhatók.

A telephelyen a teljes negyedidőszaki rétegsort és a felső pannon üledékek lazább felső részét magában foglaló, felső 45 m-ben található képződmények módosító hatását vizsgáltuk. Mivel a negyedidőszaki homokos üledékek egy

része talajfolyósodásra is hajlamos, ezért a számításokat nemlineáris effektív feszültség módszerrel végeztük, amely a pórusvíznyomás növekedésének hatását is figyelembe veszi (Győri et al., 2011). A rétegsor és a gerjesztés változékonyságát Monte-Carlo-modellezéssel, a szeizmitásbeli véletlenszerűségeket Paolo Bazzurro és C. Allin Cornell (2004) valószínűségi módszerével vettük figyelembe.

A szabadfelszíni gyorsulások veszélyeztetettségi görbéit a 10^{-2} – 10^{-7} /év gyakorisági tartományban határoztuk meg, különböző konfidenciaszinteken (16%, 50%, 84%, súlyozott átlag). A PGA veszélyeztetettségi görbét a 7. ábra mutatja. A PGA mellett a veszélyeztetettséget 0,05 s és 2 s között még további 11 periódus-időre is meghatároztuk.



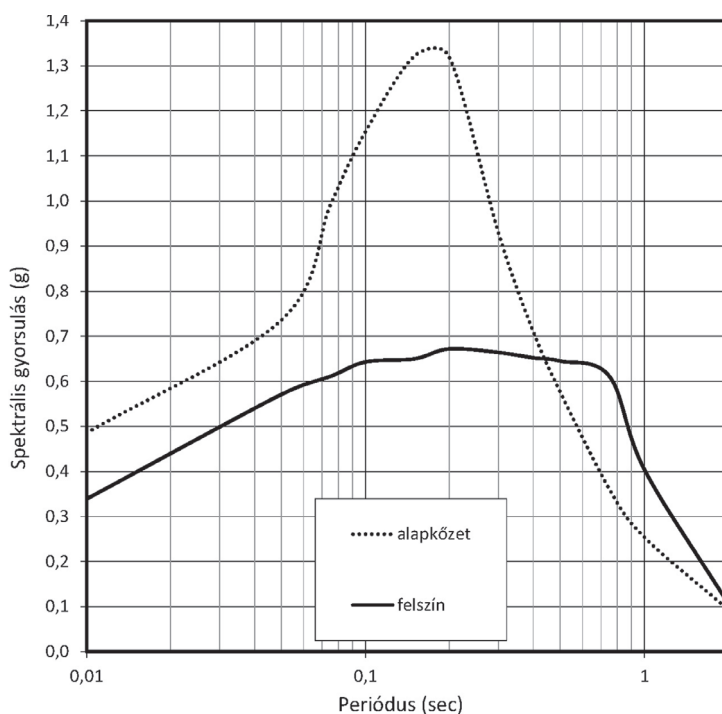
7. ábra. Különböző konfidenciaszinteken számított PGA veszélyeztetettségi görbék a felszínre vonatkozóan

Az $1/475$, $1/4980$, 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} és 10^{-7} /év meghaladási valószínűségekre a PGA átlagos (mean) értékei az 1. táblázatban találhatók. A 10^{-5} /év gyakorisági szintnek megfelelő biztonsági földrengés átlagos PGA értéke a felszínen 0,34g.

1. táblázat. A Paks II. területen különböző éves meghaladási gyakoriságra számított PGA átlagos értéke a felszínen

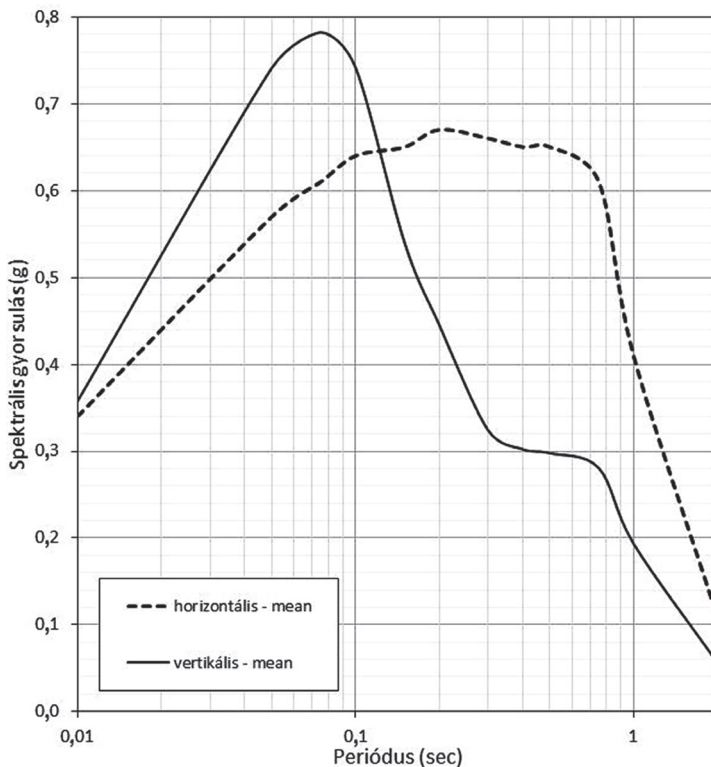
Éves meghaladási gyakoriság	1/475	1/4980	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
PGA (mean)	0,11g	0,22g	0,25g	0,34g	0,42g	0,49g

A felszíni, különböző frekvenciájú mozgásokra vonatkozó veszélyeztetettség görbe (UHRs) közelítőleg 0,43 s-ig az alapközi UHRs-görbe alatt, hosszabb periódusoknál felette halad, vagyis a magasabb frekvenciákat a rétegsor már csilapítja, nagyítás csak az ennél hosszabb periódusoknál figyelhető meg (8. ábra).

**8. ábra.** A 10^{-5} /év meghaladási valószínűsége számított alapközi és felszíni UHRs-átlaggörbéi

A biztonsági földrengésnek megfelelő, 10^{-5} /év meghaladási valószínűségnél a vertikális UHRs meghatározása a vízszintes UHRs-ból kiindulva, az utóbbi években kifejlesztett, frekvenciafüggő V/H-arány (vertikális és horizontális gyorsulások aránya) összefüggések felhasználásával történt. A V/H-arányok számí-

tásához a 6. ábra deaggregációs mátrixából következő, a telephelyet leginkább veszélyeztető földrengések legkonzervatívabb kombinációját, vagyis egy 5 km távolságban kipattanó, 6-os magnitúdójú földrengést tételeztünk fel. Az így kapott átlag vertikális válaszspektrumot tanulmányozva (9. ábra) látható, hogy kis periódusidőknél, vagyis nagy frekvenciáknál a függőleges gyorsulás nagyobb a vízszintesnél, majd értéke gyorsan lecsökken, és hosszabb periódusoknál közelítőleg fele a vízszintes gyorsulásoknak. A vertikális csúsgyorsulás átlagos értéke 0,36g, ami 5%-kal nagyobb, mint a vízszintes PGA-érték.



9. ábra. A 10^{-5} /év meghaladási valószínűségekre számított felszíni horizontális és vertikális UHRS (mean)

Az elemzés során vizsgáltuk azt is, hogyan változik meg az erős rezgések időtartama a felszínközeli rétegeken való áthaladás során. Megállapítottuk, hogy bár a maximális gyorsulás (PGA) a felszínen a hiszterézises csillapítás és pórusnyomás növekedés miatt lecsökkent, a nagyobb periódusok erősítése miatt a rezgések szignifikáns időtartama közel 40%-kal megnőtt.

A talajfolyósodás veszélyének meghatározása

A talajfolyósodás veszélyének értékelése során arra kellett választ adni, hogy a biztonsági földrengés 10^{-5} /év valószínűségi szintjénél bekövetkezhet-e globális, a teljes telephelyet érintő, vagy lokális, egyes korlátozott rétegeket érintő talajfolyósodás. Az elemzés a már előzőleg kiszámított, alapközeti és felszíni veszélyeztetettség eredmények, valamint a terület geotechnikai modelljén alapult, és többféle, valószínűségi és determinisztikus módszert egyaránt alkalmaztunk.

Valószínűségi módszerrel megállapítottuk, hogy a biztonsági földrengéshez tartozó 0,34g felszíni gyorsulásnál a közeli, közelítőleg 5–20 km-es epicentrális távolságban kipattanó, 5,8–6 magnitúdójú földrengések járulnak hozzá legnagyobb arányban a talajfolyósodás kialakulásához. Ennek alapján a biztonsági földrengésnek megfelelő valószínűségi szinten a talajfolyósodás-elemzés a konzervatívabb, 6-os magnitúdójú földrengés feltételezésével történt.

A talajfolyósodás globális értékelését penetrációs szondázásokat (Standard Penetrometer Test, SPT és Core Penetrometer Test, CPT) felhasználó, viselkedésalapú (performance based) módszerrel, valamint numerikus, nemlineáris effektív feszültség módszerrel is elvégeztük.

A numerikus számításokhoz meghatároztuk a telephelyet reprezentáló átlagos rétegsort, a laterális változékonyságot és a talajvízszint változásait pedig Monte-Carlo-modellezéssel vettük számításba. Ennek során figyelembe vettük az egyes talajjellemzők egymással való korrelációját, és eredményként minden paraméterre egy eloszlásfüggvényt kaptunk.

A számítások alapján néhány esetben igen jelentős nyírási deformációkat figyeltünk meg a 10–20 m közötti mélységtartományban. Ezeknek a mélysége egybeesett azzal a tartománnyal, ahol nagy túlnyomások alakultak ki a pórusvízben, és elérték az effektív vertikális nyomás értékét, vagyis a talaj megfolyósodott. Talajfolyósodás csak néhány kedvezőtlen realizációnál következett be, a realizációk többségénél nem volt jellemző. Ugyanakkor a medián, illetve átlaggörbékről is jelentős, 100 kPa pórusvíz-túlnyomást olvastunk le, ami a szilárdság csökkenését eredményezi. Amely realizációknál bekövetkezett a folyósodás, ott ez főként a 10–16 méteres mélységben jelentkezett, de időnként előfordult kisebb és nagyobb mélységekben is.

A talajfolyósodás lokális értékelése szintén a biztonsági földrengésnek megfelelő valószínűségi szinten, 0,34g felszíni gyorsulás feltételezése mellett, átlagos talajvízszintre, CPT-szondázáson alapuló módszerrel történt. A vizsgálathoz felhasználtuk a telephelyen elvégzett összes (47) CPT-szondázás eredményét. A magnitúdóra 6-os értéket, a talajvízszintre átlagos, 8,5 m-es mélységet feltételeztünk. A vizsgálat 25 m mélységig, a pleisztocén réteg aljáig történt, mivel a pannon rétegek nagy mélységük, összetételük, nagy tömörségük és némely esetben cementáltságuk miatt kizárhatók a megfolyósodásveszélyes rétegek sorából.

Az amerikai nukleáris szabvány alapján a megfolyósodás bekövetkezésével ott kell számolni, ahol a biztonsági tényező (a folyósodással szembeni ellenállás és a gerjesztés aránya) értéke nem éri el az 1,1-et. 1,1-es és 1,4-es biztonsági tényező között jelentősen emelkedhet a pórusvíznyomás, ami a szilárdság csökkenését vonhatja maga után. A biztonsági tényező 1,4 feletti értékénél elhanyagolható a pórusvíznyomás-emelkedés.

A számítások alapján a biztonsági tényező nagyobb vastagságban szinte az összes CPT-szondázásnál 1,4 alá csökkent. 8,5–11 m-es mélység között valamelyest nagyobb ellenállás mutatkozott a megfolyósodással szemben, itt több CPT esetén is nagyobb volt a biztonsági tényező 1,4-nél. Az ezt követő 5–6 m-es zónát, ahol az öntéshomok az uralkodó réteg, főleg alacsony értékek jellemezték, amelyek sok esetben több m vastagságban 1,1 alá csökkentek. A kavicsterasznak megfelelő mélységben igen változatos volt a kép. Egyes CPT-k esetén a biztonsági tényező jóval 1,4 felett volt, míg más CPT-kenél nagyobb vastagságú szakaszon is 1,1 alá csökkent.

Az alacsonyabb, illetve magasabb biztonsági tényezőjű talajzónák között nem volt megfigyelhető egyértelmű térbeli összefüggés, nagyobb összefüggő zónák nem voltak egyértelműen lehatárolhatók. Ugyanakkor megállapítottuk, hogy északról dél felé haladva valamelyest csökkentek a biztonsági tényezők a finomhomok és a kavicsrétegben. Ilyen összefüggés az öntéshomokban nem volt megfigyelhető.

Összességében megállapítottuk, hogy a CPT-szondázások eredményei alapján nem zárható ki a talajfolyósodás lokális bekövetkezése. A jelentős pórusvíznyomás-növekedésen túl több helyen is számolni kell nagyobb vastagságban történő megfolyósodással, hatása azonban bevált geotechnikai módszerekkel, például megfelelő alapozással vagy talajstabilizációval kiküszöbölhető.

IRODALOM

- Bazzurro, P. – Cornell, C. A. (2004): Nonlinear Soil-site Effects in Probabilistic Seismic-hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 6, 2110–2123. DOI: 10.1785/0120030216, <http://www.ce.memphis.edu/7137/PDFs/References/Nonlinear%20Soil%20site%20effects%20on%20PSHA.pdf>
- Bus Z. – Grenerczy Gy. – Tóth L. et al. (2009): Active Crustal Deformation In Two Seismogenic Zones of the Pannonian Region – GPS Versus Seismological Observations. *Tectonophysics*, 474, 1–2, 343–352. <https://bit.ly/3xX0GLL>
- Gribovszki K. – K. Kovács P. – Mónus G. et al. (2017): Estimating the Upper Limit of Prehistoric Peak Ground Acceleration Using an in Situ, Intact and Vulnerable Stalagmite from Plavecká Priepast Cave (Detrekői-zsomboly), Little Carpathians, Slovakia—First results. *Journal of Seismology*, 21, 5, 1111–1130. DOI: 10.1007/s10950-017-9655-3, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5563345/>

- Győri E. – Tóth L. – Grácz Z. – et al. (2011): Liquefaction and Post-liquefaction Settlement Assessment–A Probabilistic Approach. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 46, 3, 347–369. DOI: 10.1556/AGeod.46.2011.3.6, https://www.researchgate.net/publication/233780555_Liquefaction_and_post-liquefaction_settlement_assessment_-_A_probabilistic_approach
- Tóth L. – Mónus P. – Kiszely M. (1996–2016): *Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin*. [1995–2015]. Budapest: GeoRisk. DOI:10.7914/SN/HM, <http://www.georisk.hu/Bulletin/bulletinh.html>
- Tóth L. – Mónus P. – Zsiros T. et al. (2002): A Pannon-medence szeizmicitása. *Földtani Közlöny*, 132, 327–337. http://epa.oszk.hu/01600/01635/00302/pdf/EPA01635_foldtani_kozlony_2002_132_ksz_327-337.pdf

URL1: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>

URL2: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

URL3: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes>

URL4: <http://www.isc.ac.uk/iscgem/>