

# A magyar földrengés-katalógusok felülvizsgálata a Mecsek hegység környezetében kipattant szeizmikus események esetében

KISZELY M.<sup>a</sup>, MÓNUS P.<sup>b</sup>, KALOCSAI L.<sup>c</sup>, SÜLE B.<sup>d</sup>, GYÓRI E.<sup>e</sup>, TÓTH L.<sup>f</sup>

MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium  
1112 Budapest, Meredek u. 18.

<sup>a</sup>E-mail: kiszely.marta@csfk.mta.hu, <sup>b</sup>E-mail: monus.peter@csfk.mta.hu, <sup>c</sup>E-mail: lillakalocsai@gmail.com,

<sup>d</sup>E-mail: sule.balint@csfk.mta.hu, <sup>e</sup>E-mail: gyori.erzsebet@csfk.mta.hu, <sup>f</sup>E-mail: laszlo.toth@csfk.mta.hu

A szeizmológiai hálózat fejlődésének köszönhetően az utóbbi években egyre több szeizmikus eseményt regisztráltunk Magyarországon. Azonban ezeknek az eseményeknek nagy része az utóbbi években bányarobbantás volt. A katalógus felülvizsgálata, vagyis az, hogy elkülönítsük a természetes eredetű földrengéseket a robbantásoktól, fontos feladat lett. E célból megvizsgáltuk a Mecsek hegység környezetében bekövetkezett szeizmikus eseményeket. Kutatásunk célja az volt, hogy megtaláljuk a legmegfelelőbb módszert a földrengések és a bányarobbantások elkülönítésére, és felülvizsgáljuk a katalógus eseményeit. Felhasználtuk a bányakapitányok jelentéseit, valamint a szeizmogramok spektrális és hullámforma-jellemzőit. Ezeket együtt figyelembe véve nagy hatékonysággal megtisztítható a katalógus a rosszul minősített eseményektől. Egy speciális térkép segítségével szemléltetjük az eredményeinket. Az elemzéseink szerint a 2004–2016 közötti katalógusokban a földrengések 16%-a bizonyult robbantásnak.

## Kiszely, M., Mónus, P., Kalocsai, L., Süle, B., Győri, E., Tóth, L.: Revision of the Hungarian earthquake catalogs for seismic events occurred in the vicinity of the Mecsek Hill

Due to the development of seismological network, increasing number of seismic events has been detected in the last years in Hungary. However, most of those shocks were quarry blasts. Therefore, the revision of the catalogue to discriminate natural seismicity from explosions became an important task. For this purpose, we studied the seismic events occurring in the surroundings of Mecsek Hills. The goal of our research was to find the best method to separate earthquakes and quarry blasts, and revising the classifications of events in the catalogues. We used the reports of mining captains and the spectral and waveform properties of seismograms. We can state that taking these into account the catalogue can be cleaned from the misclassified events with great efficiency. We demonstrate our results on a special map. According to our analysis, approximately 16% of events classified as earthquakes proved to be blasts between 2004 and 2016.

*Beérkezett:* 2017. szeptember 8.; *elfogadva:* 2017. december 13.

## Bevezetés

A földrengések és robbantások elkülönítési módszereit elsősorban a nukleáris robbantások gyakorivá válása miatt, az atomcsendegyezmények betartásának ellenőrzésére fejlesztették ki. Mivel az atomrobbantások során a gerjesztett szeizmikus jeleket különböző módszerekkel csillapítják, ezért a megfigyelő hálózatoknak is egyre érzékenyebb

kellett válniuk, és a jelenlegi műszerek észlelési hatékonyságának már a háttérzaj – a tenger hullámozgása, szél által keltett talajmozgás, ipari tevékenység és a városi közlekedés zaja – szintje szab határt. A korszerű nemzeti állomáshálózatok kiépülésével a bányarobbantások és földrengések szétválasztása is időszerűvé vált, ugyanis a tévesen kategorizált szeizmikus események meghamisítják a terület térbeli és időbeli szeizmicitásáról alkotott képün-

ket, téves szeizmotektonikai értelmezésekre juttatnak, valamint módosítják a terület földrengés-veszélyeztetettségi paramétereit.

A szakirodalomban számtalan dolgozat található a kis-méretű bányarobbantások és földrengések elkülönítéséről. Ezek egy része a nappali és éjszakai események területi és időbeli eloszlását és a különböző fázisok amplitúdó arányát elemzi (Gitterman et al. 1998, Kekovaly et al. 2012, Yilmaz et al. 2013).

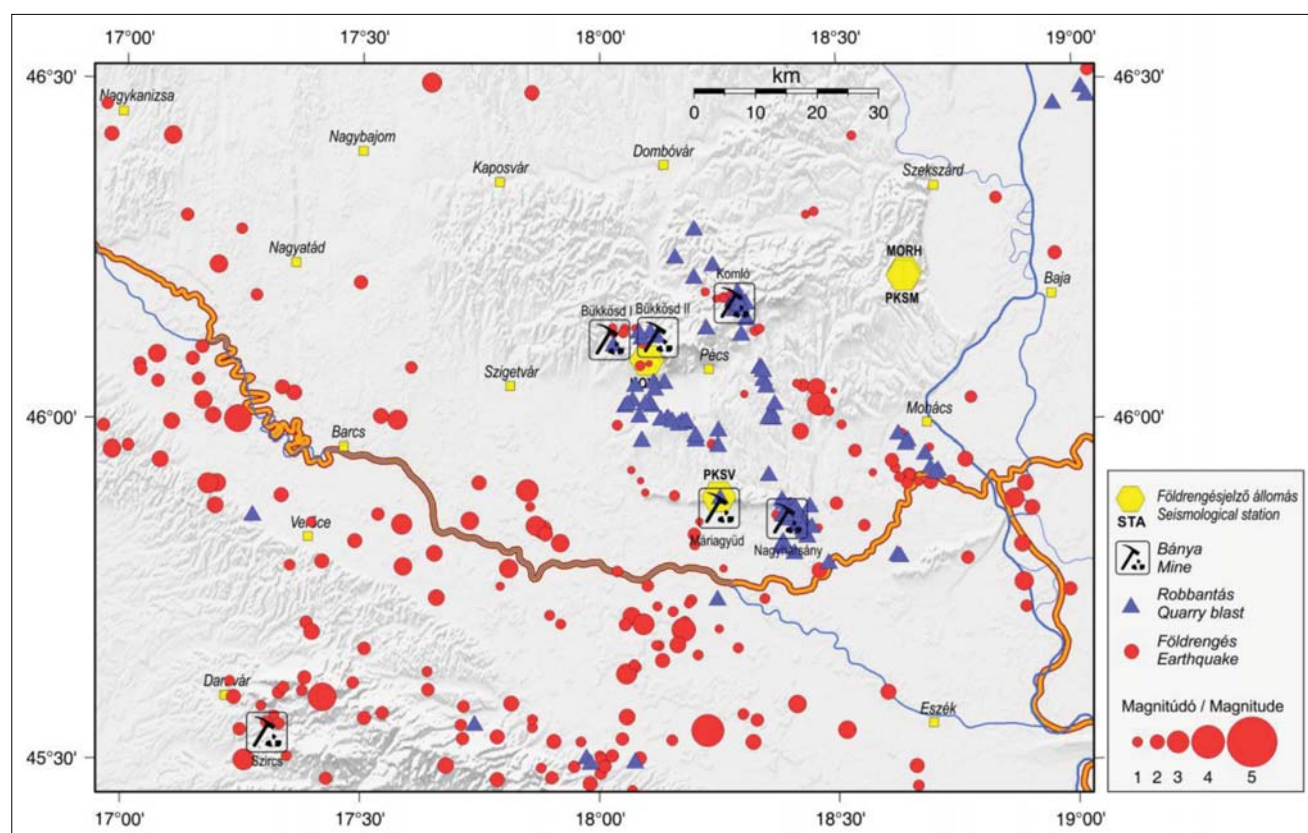
Wiemer és Baer bemutatott (Wiemer, Baer 2000) egy egyszerű módszert, amellyel a katalógusok robbantásokkal való szennyezettsége kimutatható. A nappali (a robbantásos órák) és az éjszakai események számának arányát kiszámítva és térképen ábrázolva kijelölhetők a gyanús területek. A bányarobbantásokat mindig azonos helyen és hasonló időpontban végzik (az epicentrumok a bányák közelébe esnek), a földrengések pedig különböző forrásokból erednek, és a nap bármely időpontjában kipattanhatnak. Európa területére Gulia (Gulia 2010) tesztelte e módszerrel a katalógusok időbeli homogenitását. Vizsgálata több, robbantásokkal szennyezett területre hívta fel a figyelmet. Az időpont alapján történő elkülönítés azonban csak másodrendű lehet egyes események elemzése során – hiszen földrengés bármikor kipattanhat –, de hasznos lehet egy-egy régió elemzésekor.

Más módszerek a szeizmogramok spektrumainak alacsonyfrekvenciás teljesítményét hasonlítják össze a nagy-

frekvenciás energiataralommal (Wüster 1993). Koch és Fäch Bohémia (Csehország) területén  $1 < M_L < 2,5$  közötti események gránitos kéregben terjedő longitudinális és transzverzális azaz Pg- és Lg-(Sg-)fázisait vizsgálta (Koch, Fäch 2002). Elemzésük szerint a földrengések impulzívabb Lg(Sg)-hullámokat okoztak, mint a bányarobbantások. Azt tapasztalták, hogy magasabb frekvenciákon (7–9 Hz) a robbantások jobban elváltak a földrengésektől, mint a széles sávú hullámformákban. Azonban az elkülönítés sikere állomásról állomásra változott.

A bányarobbantásokat legtöbbször a késleltetett robbantási technika (*ripple fired*) alkalmazásával hajtják végre, mert így a kőzetek töredezettségét növelik, ugyanakkor a környezet megrázottságát csökkenthetik. Mivel a késleltetett egyedi robbantások szuperpozíciója adja ki a teljes robbantás jelét, ezért azonos késleltetési idők esetén az egyes robbantások keltette hullámok közötti konstruktív interferencia révén a teljes robbantási spektrumban bizonyos frekvenciákon megnő, másokon pedig lecsökken az energia. Ezek a frekvenciák egymástól egyenlő távolságra vannak, és a robbantás spektruma „csipkézett” lesz. A spektrummoduláció matematikai hátterét Gitterman és Van Eck tanulmánya ismerteti (Gitterman, Van Eck 1993).

Wüster Németország és Csehország határán (Vogtland) kipattant  $1 < M_L < 3$  mikroregések és kémiai robbantások elkülönítésére alkalmazta a P és S hullámok spektrumainak az elemzését (Wüster 1993). Azt találta, hogy a földren-



I. ábra

A vizsgált terület szeizmicitása a bányák és az azonosított robbantások számított helyeivel (2004–2016)

Figure 1

Seismicity of the investigated region with the locations of mines and the computed locations of identified blasts (2004–2016)

gések esetében az S hullám spektrumának maximuma magasabb frekvenciákra terjedt ki, és az 1–10 Hz közötti tartományban a teljesítménye lassabban csökkent, mint a robbantásoké. Kim és munkatársai kutatása szerint a robbantások domináns frekvenciái magasabbak (10 Hz felettek), mint a földrengéseké. A P és S hullámok frekvencia-tartalmát azonban módosítják a geológiai sajátosságok is, így területenként változhatnak a domináns frekvenciák. A robbantásokra jellemző, hogy nagyfrekvenciás összetevőik a távolsággal gyorsan elnyelődnek (Kim et al. 1994).

Az általunk vizsgált terület az északi szélesség 45°30' – 46°30' és keleti hosszúság 17°00' – 19°00' között található, amely a Mecsek és Villányi-hegység környezetét és bányáit foglalja magában (1. ábra). A terület kiválasztását, szeizmotektonikájának pontosabb megismerését az indokolta, hogy az utóbbi években több bánya robbantásait is sikerült észlelni ezen a területen, és ezek elkülönítése a természetes eseményektől időszerűvé vált.

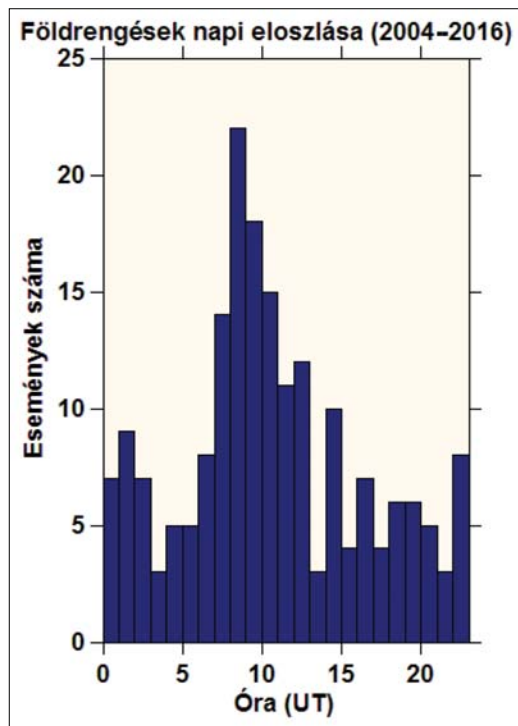
Elemzésünk szerint a bányarobbantások megfigyelt hullámformái éveken át nagyon hasonlóak maradtak. Sikerült a terület bányáira egy-egy szeizmogram-mintagyűjteményt összeállítani, amelynek alapján több, korábban földrengésnek tartott vagy vélt eseményt utólag kiszűrtünk.

A terület bányáiban alkalmazott késleltetett robbantási technika során kialakult spektrális jelek segítségével pedig további földrengésnek tekintett robbantásokat sikerült a katalógusokból kiszűrni. Vizsgálataink során a 2004 és 2016 közötti katalógusban a földrengésnek tekintett események kb. 16%-a bizonyult robbantásnak.

### Földrengés-katalógusok szennyezettsége robbantásokkal

A területen az első ismert földrengés 1528-ban Pécs városa közelében történt, azóta összesen 747 eseményt jegyeztek fel. Ebből 488-at az utóbbi 22 évben (1995 és 2016 között). A legnagyobb földrengés  $M_L = 5,5$  magnitúdójú volt, amely 1757. július 8-án pattant ki Verőce (Horvátország) térségében. A műszerek érzékenységének javulásával és a mérőállomás-hálózat bővülésével a kisebb földrengések (és feltehetően már robbantások) regisztrálásával 1995-től a legtöbb regisztrált esemény magnitúdója már 1 és 1,5 közötti.

Az 1. ábrán látható a terület földrengéseinek és robbantásainak epicentrumtérképe (az események újraosztályozása előtti állapot). Az elsődleges besorolás leginkább az esemény időpontja és a hullámformák alacsonyfrekvenciájú Rg-fázisának megjelenése alapján történt. Az ábrán feltüntettük azokat a bányákat is, amelyek robbantásai megjelennek az állomások szeizmogramjain. Az epicentrumok helyének és a mélységeknek a hibája akár több km-es is lehet. Mivel a hibák olykor összevethetők a vizsgált terület bányáinak egymástól vett távolságával, ezért az epicentrumkoordináták és mélységadatokat alapján a területen nem lehet egyértelműen elkülöníteni a különböző forrású (bánya) eseményeket, térképre eső helyük inkább



2. ábra A földrengésként azonosított események napi eloszlása revízió előtt

Figure 2 Diurnal distribution of events identified as 'earthquake' before revision

csak tájékoztató jellegű (1. ábra: háromszöggel jelölt események). A robbantásnak jelölt események a terület bányái körül 5–10 km-es távolságra is szétszóródtak, illetve a bányák közelében földrengések epicentrumai is láthatók.

Az osztályozás jóságát a természetes eredetűnek ítélt földrengések napi eloszlása alapján teszteltük (2. ábra). A robbantásokat a nappali – munkaidő alatti – órákban végzik, míg földrengések a nap bármely szakaszában történhetnek. A 2. ábra alapján azonban a földrengéseknek jelölt események eloszlása maximumot mutat 7–12 (UTC) óra között, éppen a bányaművelés időszakában. Ennek alapján tehát valószínűsíthető, hogy a szeizmikus események osztályozása hibával terhelt, mivel a természetes eredetű földrengések időbeli eloszlása nem függ a napszaktól. Elkerülhetetlen tehát a szeizmikus események osztályozásának korrekciója.

### A terület szeizmikus mérőállomásai és az érintett bányák

A Mecsek környezetében a 2004 és 2016 közötti robbantások és földrengések szeizmikus jeleinek elemzését a területen található kővágótövisi (KOVH), mórággyi (PKSM) és villányi (PKSV) szeizmikus állomások mérései alapján végeztük el. A mórággyi állomástól 300 m-re 2012 óta működik egy másik szeizmológiai állomás, a MORH is, amit a MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet üze-

1. táblázat | A vizsgálatokban felhasznált szeizmikus állomások paraméterei  
Table 1 | Parameters of seismic stations used in this study

Állomás kódja	Helység (Szerv.)	Szél. (° É)	Hossz. (° K)	Mag. (m)	Alapkőzet	Típus	Érzékelő
KOVH	Kővágótöttös GGI	46,088	18,099	270	Mészke	3C BB	STS-2
PKSM	Mórággy GR	46,212	18,643	135	Gránit	3C SP	CMG-40T
PKSV	Villány GR	45,888	18,252	420	Mészke	3C SP	CMG-40T

meltet, de ennek a regisztrátumait most nem használtuk fel. Az állomásokon háromkomponensű (3C), de egymástól különböző műsértípusok és érzékelők működnek: Kővágótöttösön jelenleg Streckeisen (STS-2) széles sávú (BB) szeizmóméter, Mórággyon és Villányban pedig rövid periódusú (SP) Güralp (CMG-40T) szeizmóméterek működnek (1. táblázat).

A kővágótöttösi szeizmóméter működésének kezdete 2015 márciusa. A PKSV állomás 2012.11.09 óta működik, pár hónapig (2013.04.23.) még Lennartz műszer detektált, majd azóta CMG-40T Güralp. A PKSM állomás működése 1997-ben indult, 2010-ig STS-2, 2011–2012 között Le-3D műszerrel, és 2013.04.10-től működik itt Güralp műszer.

A vizsgált területen több működő kőbánya található. A magyarországi kőbányákban nagyfúrólukas, ún. oszlopos sorozatrobantást (*ripple fired*) alkalmaznak. Az általában négyzethálósan elhelyezett tölteteket soronként robbantják, a sorok töltetei között meghatározott, 25–50 ms-os késleltetési időket alkalmazva. Területrobantást csak véletlenszerűen, egy-egy kisebb bányarész kialakításánál végeznek. A robbantólukasok átmérője 89 és 112 mm közötti, dőlésük 60° és 80°, hosszuk pedig 10 és 25 m között változik. Leggyakrabban alkalmazott robbanóanyagok az ANDO-prill (főtöltet) és az emulziós robbanóanyag (lábtöltet), az indítást DeM-S típusú villamos gyutacsokkal vagy a NONEL-rendszer elemeivel végzik (Bohus 2013). A Pécsi Bányakapitányságtól a 2015-ös és 2016-os évre megkaptuk a terület 12 bányájának robbantási időpontjait, amelyek alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy 5 bánya robbantásai érintik a katalógus eseményeit, a többi bánya robbantásait nem érzékelik az állomások. A Bükkösd I. és Bükkösd II. mészkebánya közötti távolság csak fél km, de más-más cég az üzemeltetőjük. A 2. táblázatban ennek az 5 bányának az adatai láthatók.

## A hullámformák hasonlósága

Az általunk vizsgált területen a Magyar földrengés-katalógusok alapján 2004 és 2016 között összesen 310 szeizmikus eseményt ismerünk, ebből 194 eseményt jelöltek földrengésnek (63%). A vizsgált szeizmikus események epicentrum adatai az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutató Intézet és a GeoRisk Kft. által kiadott bulletinéből származtak (Tóth et al. 2005–2017, Gráczter et al. 2012–2016).

A Mecsekben előfordult események felülvizsgálatát első lépésben a hullámformák hasonlóságának elemzésével végeztük. A *Magyar Geofizika* hasábjain (Kiszely, Győri 2013, Kiszely et al. 2016) már foglalkoztunk a hullámforma-elemzés módszerével, és bemutattuk annak eredményeit az Északi-középhegység és Szlovákia déli részén levő bányák robbantásainak és a terület földrengéseinek elkülönítése esetében, ezért a módszer leírását itt nem ismételjük meg.

A hullámforma-korrelációs elemzést az állomások horizontális csatornáinak 40 s hosszú, 1–20 Hz közötti Butterworth-sávszűrővel szűrt szeizmogramjain végeztük el. Mivel az idők során többféle műszer működött egy-egy helyen – eltérő átviteli karakterisztikával –, ezzel a szeizmogramoknak azt a frekvencia tartományát elemeztük, ahol az alkalmazott eszközök mindegyikében lineáris volt az átvitel.

Az S hullám nagyobb amplitúdóval jelentkezik a horizontális csatornákon, ezért jobban használhatók a szeizmogramok az analízise során. A hasonlóságot két  $x$  és  $y$  hullámforma között a  $c_{xy}$  korrelációs együtthatóval jellemezhetjük. Hasonlónak tekintettünk két eseményt, ha a korrelációs együttható értéke nagyobb, mint adódott egy határértéknél, amelyet esetünkben 0,5–0,55-nek vettünk, ami egy nem túl szigorú feltétel. A korrelációs együttható mint „távolság” alapján a hullámformák rokonsági ágakba,

2. táblázat | A térség bányáinak adatai  
Table 2 | The parameters of quarry in this region

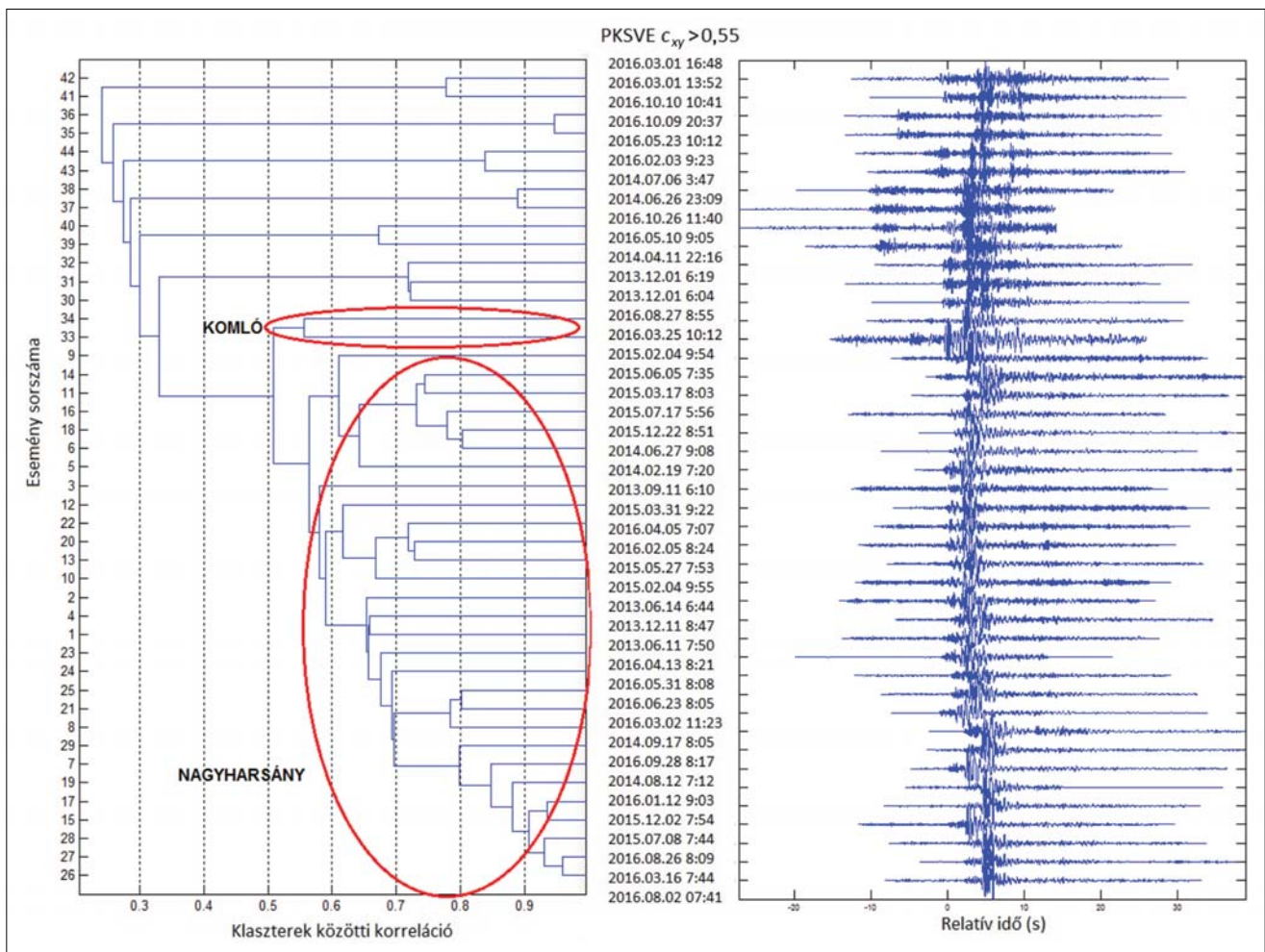
Bánya neve	Szél. (° É)	Hossz. (° K)	Távolság az állomásoktól (km)		
			KOVH	PKSM	PKSV
Bükkösd I. – mészke	46,120	18,023	6,80	49,3	31
Bükkösd II. – mészke	46,125	18,016	6,80	48,6	32
Komló II. – andezit	46,175	18,296	7,90	27,0	32
Nagyharsány I. – mészke	45,853	18,397	17,94	44,9	11,9
Máriagyűd I. – mészke	45,860	18,250	25,43	48,6	0,88

csoportokba rendezhetők, ezt az egymásra épülő megjelenítést dendrogramnak nevezik. A csoportokba rendezett események száma és a csoportok összetétele változik a kritikus korrelációs együttható értékének változtatásával.

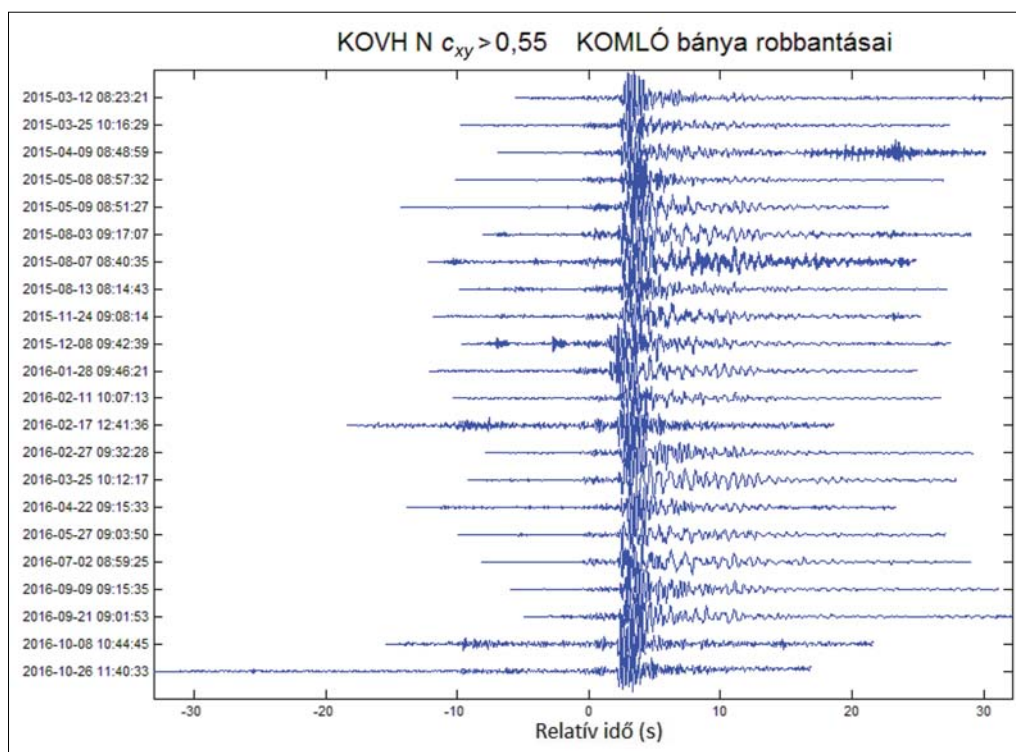
A 2015 és 2016 közötti időszak szeizmikus eseményeinek elemzése MSc-diplomamunka keretében történt (Kalogy 2017), és e dolgozat eredményeit terjesztettük ki a 2004–2015 közötti időszakra. A diplomamunka készítése kapcsán a Pécsi Bányakapitányságtól megkaptuk a terület bányáinak 2015 és 2016 közötti robbantási időpontjait (csak a dátumokat, pontos időpont nélkül). Ezek alapján sikerült a korábban robbantásnak jelölt szeizmikus eseményeket a megfelelő bányához kapcsolni, és 16 korábban tévesen földrengésnek vett robbantást kivenni a természetes események közül. A dolgozat során született másik fontos eredmény, hogy elő tudtuk állítani az egyes bányák robbantásaira jellemző hullámforma-adatbázist, amelynek a felhasználásával a megelőző időszakokban (2004–2015 között) keletkezett események azonosítása is lehetővé vált, és amelyet a jövőben is fel tudunk használni az elkülönítésre.

A 3. ábrán a PKSVE állomás hullámformáira kapott dendrogram látható a szeizmogramokkal, ami a hullámformák hasonlósági – „rokoni” – kapcsolatának egyfajta vizuális megjelenítése. A legnagyobb klasztert a nagyharsányi bányarobbantások alkotják, amely 2013 és 2016 között összesen 30 robbantást tartalmaz (az állomás 2012-ben kezdte meg működését). Bár ehhez az állomáshoz a máriagyüdi kőbánya működik a legközelebb ( $\approx 0,9$  km), de ennek robbantásait más állomások legtöbbször nem érzékelték, így csak 1 robbantásnak sikerült meghatározni az epicentrumát. Ezért a hullámforma korrelációba nem kerültek bele ezek a szeizmikus események.

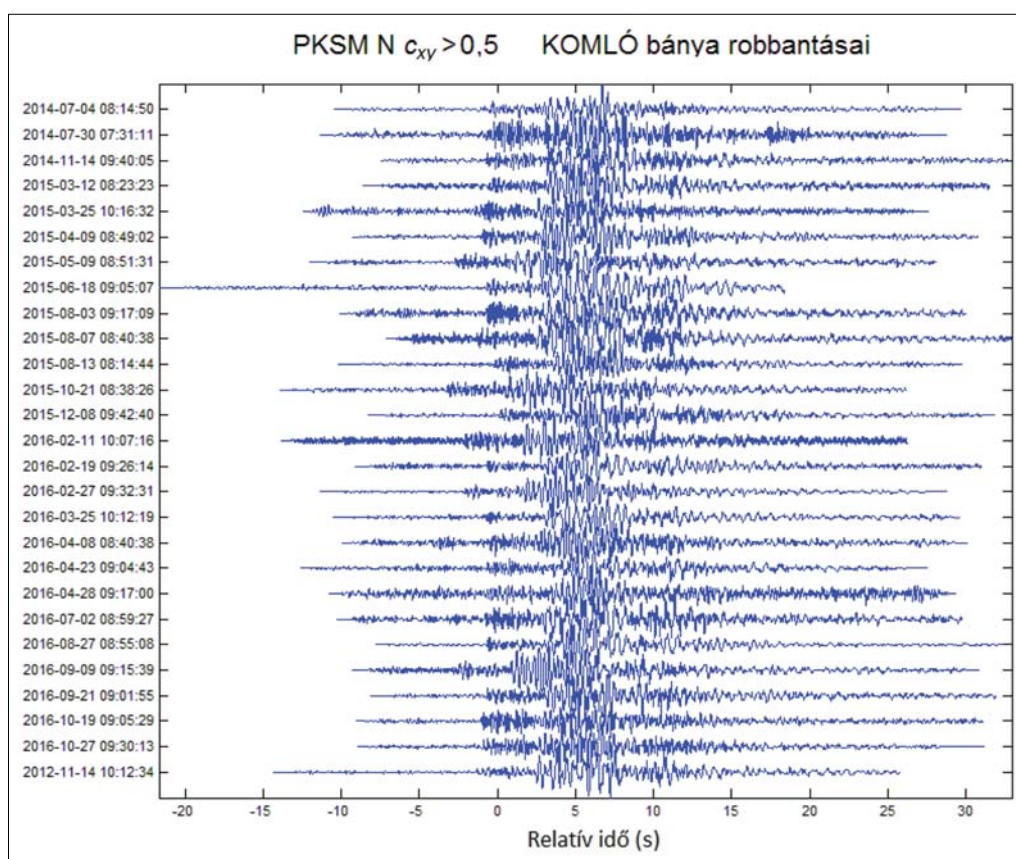
A 4. és 5. ábrán a komlói andezit kőbánya robbantásainak a KOVH és PKSM állomás felvételeiből készült klaszterei láthatók. Ez a bánya 7,9 km-re található a KOVH és 37 km-re a PKSM állomásoktól. Ezért a hullámformák a két állomáson eltérőek. Jellemző azonban a robbantások időpontja (7 és 10 óra között), valamint az alacsonyabb frekvenciataralom, azaz a talaj hosszú periódusú hullámzása az esemény végén (*coda*). Ez a sekély fészktű szeizmikus eseményekre jellemző Rg-fázis, amely a mélyebb fészktű földrengések szeizmogramjaiból hiányzik.



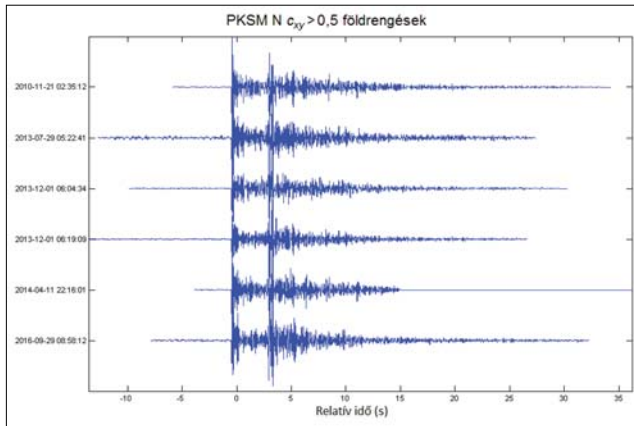
3. ábra | A PKSVE állomás szeizmogramjainak hullámforma-korrelációelemzése (dendrogram és szeizmogramok)  
 Figure 3 | The results of waveform correlation analysis (dendrogram and seismograms) in case of PKSVE station



4. ábra | A KOVH állomás É–D horizontális csatornáin a  $c_{xy} > 0,55$  feltétellel a hasonló komlói bányarobbantások hullámformái  
 Figure 4 | The similar waveforms ( $c_{xy} > 0.55$ ) originated from Komló quarry on KOVH N–S horizontal channels



5. ábra | A komlói bányarobbantások hasonló ( $c_{xy} > 0,5$ ) hullámformái a PKSM állomás É–D horizontális csatornákon  
 Figure 5 | The similar waveforms ( $c_{xy} > 0.5$ ) originated from Komló quarry on PKSM N–S horizontal channels



**6. ábra** Földrengések hasonló ( $c_{xy} > 0,5$ ) hullámformái a PKSM állomás É–D horizontális csatornáin  
**Figure 6** Similar waveforms ( $c_{xy} > 0,5$ ) originated from earthquakes on PKSM N–S horizontal channels

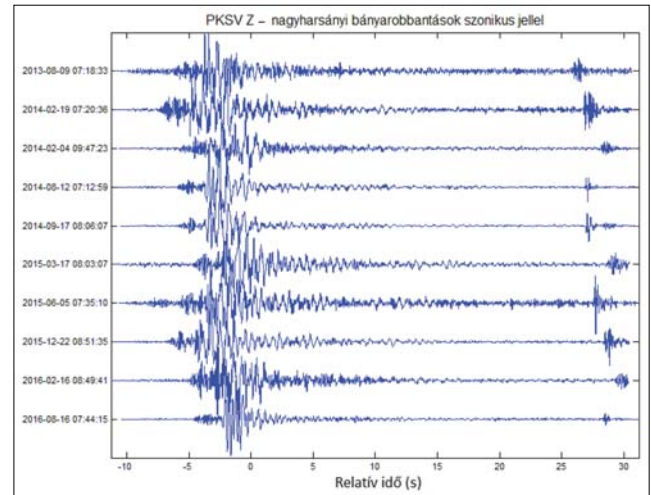
A három állomás hullámformáinak vizsgálata kiegészítette egymást, mivel voltak olyan robbantások, amelyek csak az egyik állomás klaszterébe kerültek bele. Több állomás elemzése több időt vesz igénybe, de az eredmény is teljesebb.

A robbantások rendszeres észlelése csak 2012-től kezdődött el, mivel ekkor indult el a PKSV állomás működése, javult a terület lefedettsége és már a kisebb méretű bányarobbantások is katalógusba kerülhettek.

A KOVH esetében (4. ábra) látható, hogy a 2015. és 2016. közötti évekből is a klaszterbe kerültek robbantások. Ezért akár évekre visszamenőleg is ki tudjuk szűrni a hullámformák hasonlósága segítségével a tévesen azonosított földrengéseket a bányarobbantások időpontjának vizsgálata nélkül. Jellemző még a robbantásokra, hogy méretük  $M_L = 0,2-2,1$ , a földrengéseké pedig  $M_L = -0,1-3,9$  között változott.

Általános tapasztalat, hogy a természetes eredetű rengéseket követő utórengések is rajokat, „klasztereket” alkotnak, és az abban levő rengések hullámformái egymáshoz nagyon hasonlóak (Massa et al. 2006, Aster, Scott 1993). A Mecsek környéki földrengések esetében is kaptunk két nagyobb (6 és 7 elemű) és több kisebb klasztert (6. ábra), valamint 2 elemű dubletteket.

A robbantásokat egy jellegzetes, szonikus eredetű hullámcsomag (hanghullám által keltett talajmozgás) is kísérheti, amelynek a regisztrálását más bányák robbantásainál is leírták (Gitterman et al. 2008, Rogers, Koper 2011). Előfordult, hogy az amplitúdójuk elérte a P hullámét, vagy akár többszörösen meg is haladta azt. Ezt a hangsebességgel terjedő szonikus hullámcsomagot figyeltük meg több nagyharsányi bányarobbantás esetében is a PKSV állomás vertikális csatornájának szeizmogramjain (7. ábra). Az állomás kb. 12 km-re helyezkedik el a bányától, ennek megfelelően 32–34 másodperces késéssel látható a szonikus jel. Az 1–2 s-os eltérés időjárás elemekkel és a bánya kiterjedésével magyarázható. 2017-ben indult el Piszkéstetőn az első magyar infrahangállomás az MTA GGI gondozásában, aminek egyik várható eredmé-



**7. ábra** A PKSV állomás vertikális csatornáján néhány nagyharsányi bányarobbantás szeizmogramja a szonikus (hangsebességgel terjedő) hullámcsomaggal

**Figure 7** Some seismograms originated from Nagyharsány quarry and registered on PKSV station vertical channel with the sonic wavepacket

nye lesz, hogy a bányarobbantásokat követő szonikus jelet nagy érzékenységgel regisztrálja, és segít elkülöníteni ezeket a természetes eredetű földrengésektől.

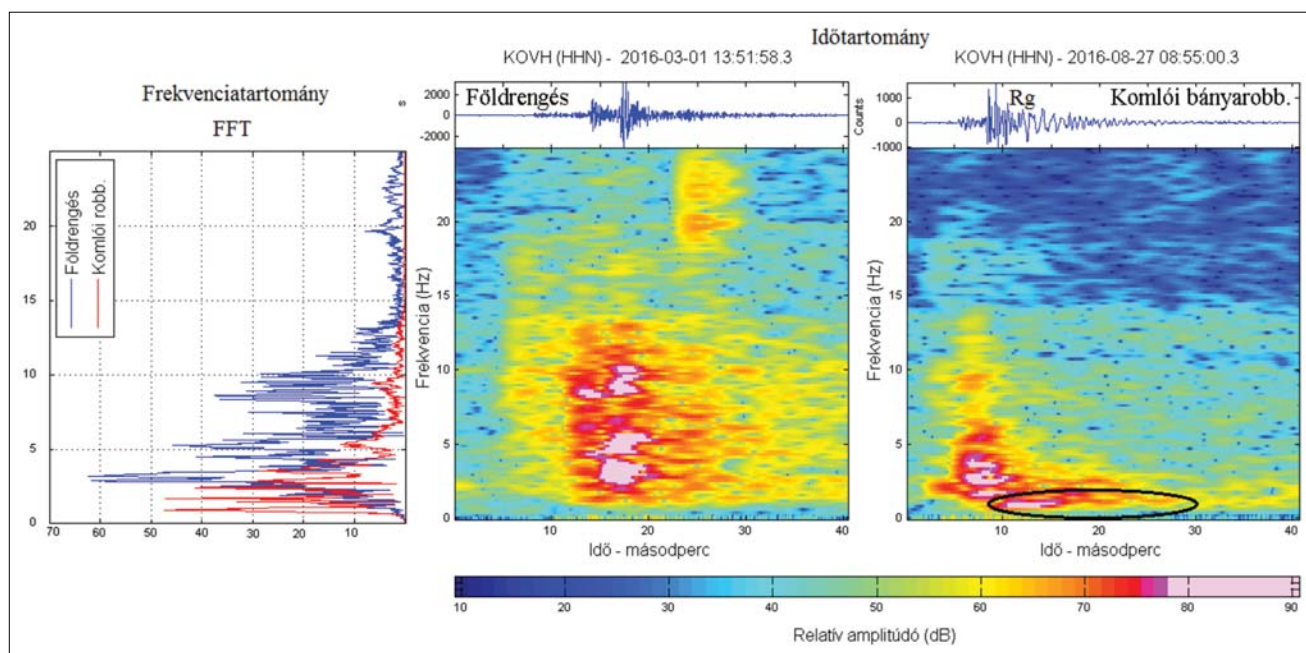
Sajnos nem minden robbantás került bele valamelyik klaszterbe, és a spektrumelemzésre a zajosabb felvételek nem voltak használhatóak. Ezért az elemzést elvégeztük a spektrumjellelmezők felhasználásával is.

## A spektrumok elemzése

A spektrumok elemzésével a késleltetett robbantási technika ujjenyomatát kerestük azokon az eseményeken, amelyek nem kerültek be a bányák klasztereibe. A vizsgált területen a bányák környezetében még nagyon sok földrengést tartalmaznak a katalógusok, ezek spektrumait elemezzük a továbbiakban.

A legtöbb robbantás spektrumán megfigyelhető volt a késleltetett robbantási technika miatt fellépő csipkézettesség. A teljesítményspektrum az 1–5 Hz közötti sávban jelentősen megnőtt, és a csipkézettesség is az 1–5 Hz közötti spektrumtartományra volt leginkább jellemző. Az egyes frekvenciák teljesítményének megemelkedése a nagyobb frekvenciák felé haladva újra jelentkezett, de egyre kisebb amplitúdóval (8. ábra). Néhány földrengés esetén is mutatkozott egyes frekvenciák megemelkedett teljesítménye, de a spektrum magasabb frekvenciáig terjedt ki, mint a robbantások esetében. A magasabb frekvenciák felé haladva gyorsabban csökkent a robbantások teljesítményspektruma, mint a földrengéseké. A robbantásokra jellemző alacsonyfrekvencia-tartalmú Rg-fázis is megfigyelhető a 8. ábrán.

Az egymáshoz közeli forrásból származó földrengések spektrumaira is jellemző a nagyfokú hasonlóság, ezért a bányák közelébe meghatározott eseményeknél – ha azok

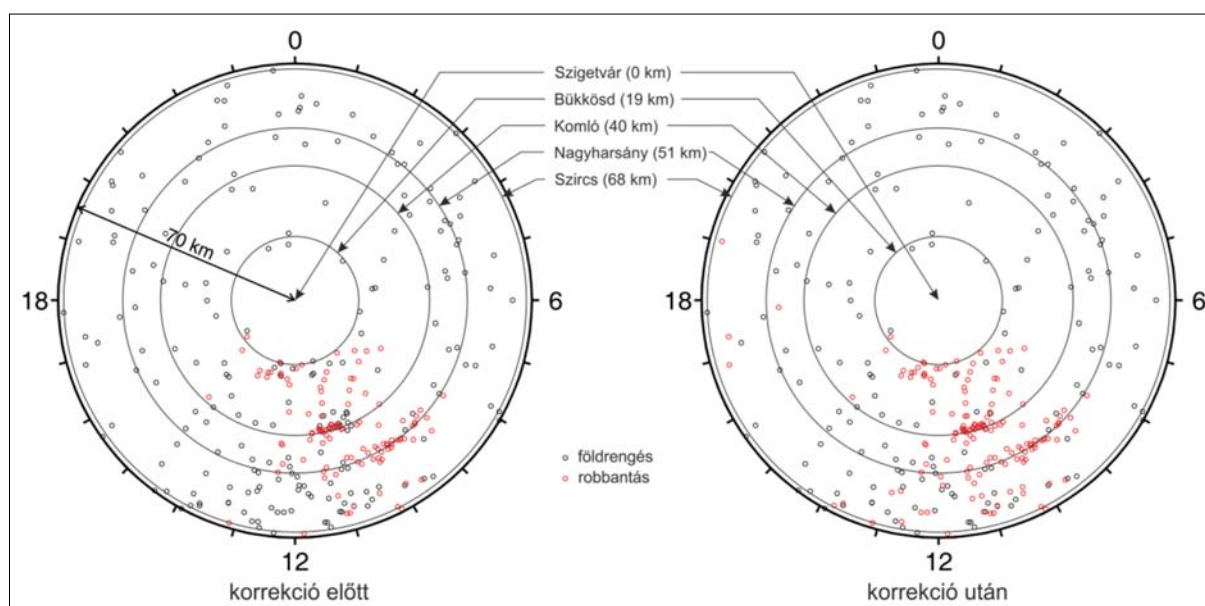


**8. ábra** | A KOVH állomás horizontális csatornáján egy földrengés és egy kömlői bányarobbantás szeizmogramjai idő-frekvencia tartományban  
**Figure 8** | The horizontal components of the KOVH seismograms in time–frequency domain in case of an earthquake and a quarry blast of quarry Kömlő

**3. táblázat** | A különböző elemzésekben részt vett események száma

**Table 3** | The number of events used in the different pluralis

Állomás kódja	Használható szeizmogramok száma	Hasonló hullámformák száma	A spektrumokhoz felhasznált hullámformák
KOVH	108	53 (49%)	80
PKSM	254	109 (45%)	236
PKSV	100	45 (45%)	72



**9. ábra** | A terület szeizmikus eseményeinek eloszlása a helyi idő és távolság szerint az osztályozás korrekciójának elvégzése előtt és után  
**Figure 9** | Distance–time diagram of the seismic events before and after the correction of classification



hullámformái nem kerültek egyetlen bányához tartozó klaszterbe sem – a spektrumelemzés segít eredetük eldöntésére.

### Eredmények

A hullámforma és spektrumelemzésben részt vett szeizmikus események számát foglaltuk össze a 3. táblázatban. A jelentősen eltérő számokat az indokolja, hogy az egyes állomások különböző időpontban léptek működésbe.

Az osztályozás helyességének ellenőrzése érdekében elkészítettük a terület szeizmikus eseményeinek idő–távolság diagramját a korrekció elvégzése előtt és után (9. ábra). Az idő–távolság diagramon az egyes események helyét a kipattanási idő (helyi idő) és az epicentrumnak egy adott referenciaponttól mért távolsága adja meg. A kör alakú diagramon a középponttól mért távolság felel meg a választott referencia ponttól mért epicentrális távolságnak, a függőleges iránnyal bezárt szög pedig a kipattanási időnek (24 órás beosztás).

A földrengés-katalógusokban az események keletkezési időpontját mindig világidőben (UTC) adják meg. E vizsgálatnál azonban nem célszerű a világidő használata, mivel a bányaművelés során végrehajtott robbantások időpontját a napi munkarend szabja meg, vagyis a vizsgálatnál a helyi időt kell figyelembe venni. Esetünkben a helyi idő télen egy órával, a nyári időszámítás folyamán pedig két órával jár a világidő előtt. Ezt az időkorrekciót a diagram készítése előtt elvégeztük.

A diagram elkészítéséhez referencia pontként Szigetvár koordinátáit választottuk, egyrészt mivel ez közel van a vizsgált terület középpontjához, másrészt pedig a területre

eső bányáktól különböző távolságra esik, így a diagramon az egyes bányák eseményei várhatóan elkülönülnek. A diagram könnyebb értelmezése érdekében a diagramon feltüntettük az egyes bányák távolságait (koncentrikus körök).

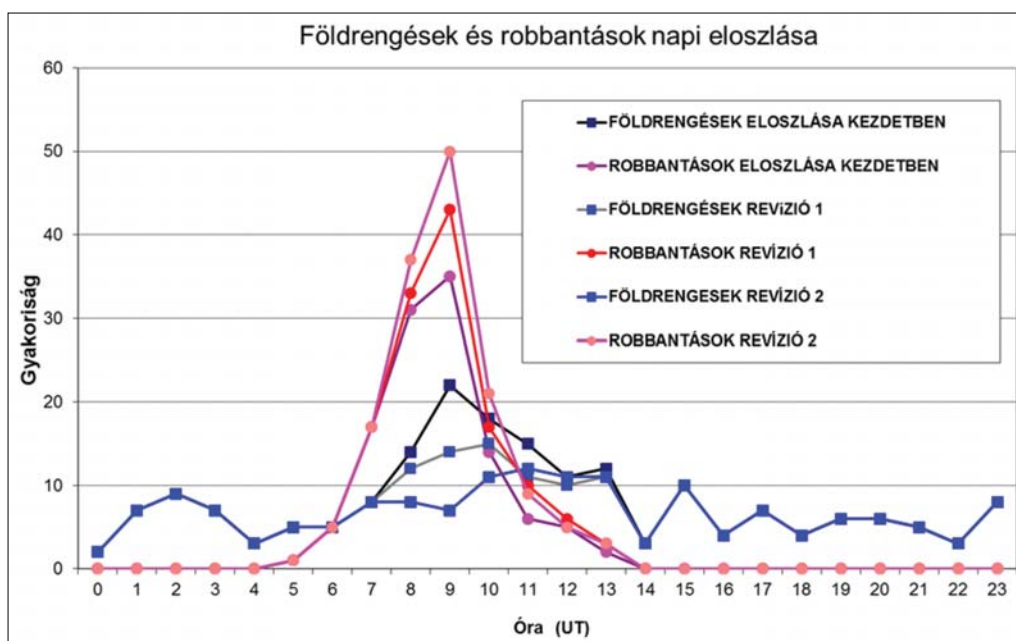
A diagramon a korrekciót megelőző állapotot vizsgálva megállapítható, hogy az események kategorizálásában durva hiba nem fedezhető fel (pl. nincsenek éjszakai robbantások), de a munkaórák időszakában feltűnő a földrengésnek minősített események dúsulása. Vagyis joggal feltételezhető, hogy ezeknek egy része valójában bányarobbantás volt.

A hullámformák és a spektrumok elemzése után ismét elkészítettük a rengések és robbantások napi eloszlását bemutató diagramot (4. táblázat, 10. ábra). A nappali, 7–10 óra közötti maximum a földrengések esetében fokozatosan csökkent.

4. táblázat | A földrengések és robbantások számának a változása  
Table 4 | The variation of number of earthquakes and quarry blasts

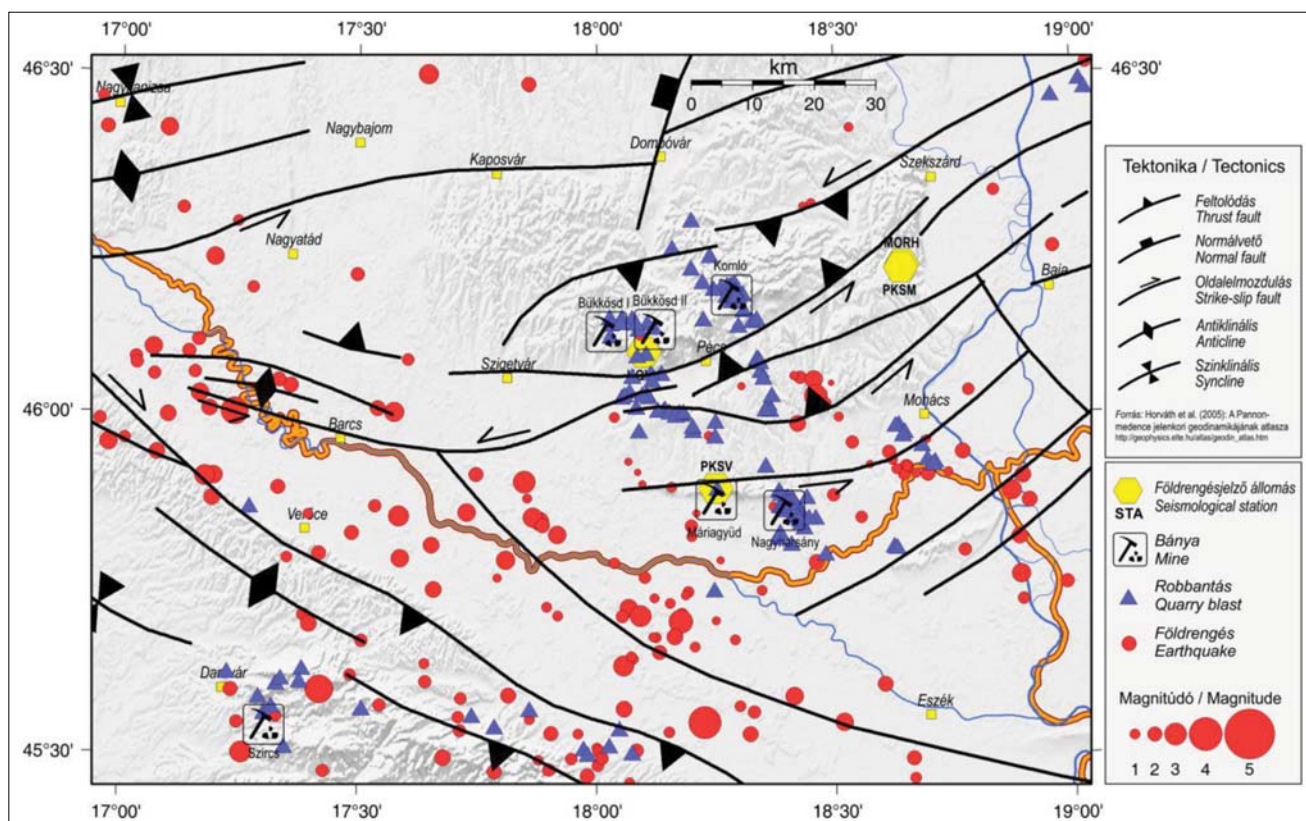
Lépések	Rengés	Robbantás
Kiindulás	194 (63%)	116 (37%)
Első lépés (hullámformák hasonlósága)	175 (56%)	135 (44%)
Második lépés (+ spektrumelemzés)	153 (49%)	157 (51%)

A 11. ábra a katalógus felülvizsgálata utáni szeizmicitás-térképet mutatja a neotektonikus (aktív) szerkezeti elemekkel (Horváth et al. 2005). Több  $M < 2$  rengés látható még a magyarországi bányák környezetében, és legalább



10. ábra | A földrengések és robbantások napi eloszlásának alakulása a hullámforma hasonlósága (Revízió 1) és spektrumelemzés (Revízió 2) után

Figure 10 | The modification of diurnal distributions of earthquakes and quarry blasts after the waveform similarity (Revision 1) and spectral analyses (Revision 2)



**11. ábra** A terület szeizmikus eseményei a hullámformák és spektrumok elemzését követő javított osztályozás szerint a neotektonikus (aktív) szerkezetekkel (Horváth et al. 2005)

**Figure 11** Seismic events of the region after the waveform correlation and spectral analysis based classification and the neotectonic (active) structures (Horváth et al. 2005)

egy horvátországi bánya robbantásait (vagy azok zömét) sikerült kiszűrni. Hasznos lenne a határon túli bányák robbantásairól is listához jutni. Bár Magyarország szeizmicitását szórtnak szoktuk minősíteni, a határ mentén, ill. attól délre jelölt neotektonikus aktív szerkezeteket a 2004–2016 közötti időszak mikroregései is kijelölik, ugyanez azonban hiányzik a Mecsektől É-ra húzódó, jelölt szerkezetek esetében.

## Összefoglalás

Megvizsgáltuk a Mecsek hegység környezetében 2004 és 2016 között meghatározott 310 szeizmikus eseményt, amelyek eredetileg a 63%-át minősítették földregésnek (194 földregés, 116 robbantás). Azonban a természetes eredetűnek minősített rengések napi eloszlása egy délelőtti maximumot mutatott, ami a hibás osztályozásra utalt.

A Pécsi Bányakapitányság közreműködésével megkaptuk a 2015 és 2016 közötti robbantási időpontokat. Ennek segítségével sikerült a vizsgált területen 5 bányát azonosítani, amelyek robbantásai rendszeresen belekerültek a katalógusokba.

Tapasztalataink szerint a robbantások hullámformái éveken át nagyon hasonlóak maradnak, erre alapozva hullámforma korrelációs vizsgálattal tanulmányoztuk a 2004 utáni eseményeket, és 19 tévesen földregésnek vett rob-

bantást szűrtünk ki. A PKSM, PKSVM és KOVH állomásokon regisztrált különböző bányákból származó robbantások szeizmogramjai segítségével előállítottunk egy-egy tipikus hullámforma-gyűjteményt a bányákhoz, amelyeknek a segítségével a jövőbeli robbantások kiszűrése várhatóan egyre sikeresebb.

A kísérletetett robbantási technikának a spektrumokon megjelenő bélyege alapján további 13 eseményt kellett átcsoportosítani. Az elemzés után 52%-ra csökkent a földregések aránya.

Több állomás adatait használva és a hullámforma- és spektrumelemzéseket együtt alkalmazva egyre több robbantást sikerült kiszűrni. Vizsgálataink szerint a 2004 és 2016 közötti katalógusok összes eseményének 10%-a (32 esemény) volt tévesen földregésnek jelölt robbantás (162 földregés, 148 robbantás).

## Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni a GeoRisk Földregés Mérnöki Irodának, hogy a PKSM és PKSVM állomások hullámformáit a korrelációs vizsgálatokban felhasználhattuk.

## A tanulmány szerzői

Kiszely Márta, Mónus Péter, Kalocsai Lilla, Süle Bálint, Győri Erzsébet, Tóth László

## Hivatkozások

- Aster R. C., Scott J. (1993): Comprehensive characterization of waveform similarity in microearthquakes data set. *BSSA*, 83, 1307–1314
- Bohus G. (2013): Robbantástechnika. A Magyar Robbantástechnikai Egyesület tájékoztatója, 2013, 33. szám
- Gitterman Y., Van Eck T. (1993): High-freq-spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions. *BSSA*, 83/4, 1799–1812
- Gitterman Y., Pinsky V., Shapira A. (1998): Spectral classification methods in monitoring small events by the Israel seismic network. *Journal of Seismology*, 2/3, 237–256
- Gráczer Z., Czifra T., Kiszely M., Mónus P., Zsíros T. (2012): Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2011, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, MTA CSFK GGI, Budapest, 357.
- Gráczer Z. (szerk.), Czanik Cs., Czifra T., Győri E., Kiszely M., Mónus P., Süle B., Szanyi Gy., Tóth L., Varga P., Wesztergom V., Wéber Z., Zsíros T. (2013): Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2012, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, MTA CSFK GGI, Budapest, 260.
- Gráczer Z. (szerk.), Czanik Cs., Czifra T., Győri E., Kiszely M., Mónus P., Süle B., Szanyi Gy., Tóth L., Varga P., Wesztergom V., Wéber Z., Zsíros T. (2014): Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2013, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, MTA CSFK GGI Budapest, 466.
- Gráczer Z. (szerk.), Bondár I., Czanik Cs., Czifra T., Győri E., Kiszely M., Mónus P., Süle B., Szanyi Gy., Tóth L., Varga P., Wesztergom V., Wéber Z., Zsíros T. (2015): Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2014, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, MTA CSFK GGI Budapest, 563.
- Gulia L. (2010): Detection of quarry and mine blasts contamination in European regional catalogue. *Nat. Hazards*, 53, 229–249. DOI: 10.1007/s11069-009-9426-8
- Horváth F., Bada G., Windhoffer G., Csontos L., Dövényi P., Fodor L., Grenczy Gy., Síkhegyi F., Szafián P., Székely B., Timár G., Tóth L., Tóth T. (2005): A Pannon-medence jelenkori geodinamikájának atlasza: Euro-konform térképsorozat és magyarázó. OTKA T034928 sz. projekt, zárójelentés. ELTE FFI Geofizikai Tsz., Budapest, 38 o. (<http://geophysics.elte.hu/atlas/10.htm>)
- Kalocsai L. (2017): A földrengések és robbantások elemzése a KOVH és MORH szeizmológiai állomások adatainak felhasználásával (MSc-szakdolgozat, ELTE)
- Kekovalı K., Kalafat D., Deniz P. (2012): Spectral discrimination between mining blasts and natural earthquakes: Application to vicinity of Tunbılek mining area, western Turkey. *International Journal of Physical Sciences*, 7/35, 5339–5352
- Kim S. G., Simpson D. W., Richard P. G. (1994): High-frequency spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions. *BSSA*, 84, 1365–1386
- Kiszely M., Győri E. (2013): Az Észak-középhegységben és Szlovákia déli területein kipattant földrengések és robbantások összehasonlító elemzése, *Magyar Geofizika*, 54/4, 185–203
- Kiszely M., Mónus P., Tóth L., Győri E. (2016): Érsekvadkert, Iliny és Heves területén 2013 és 2015 között kipattant földrengések klaszterelemzése. *Magyar Geofizika*, 57/1, 45–46
- Koch K., Fáh D. (2002): Identification of earthquakes and explosions using amplitude ratios: The Voghtland area revisited. *Pure Appl. Geophys.*, 159, 735–757
- Massa M., Eva E., Spallarossa D., Eva C. (2006): Detection of earthquake clusters on the basis of waveform similarity: An application in the Monferrato region (Piedmont, Italy). *Journal of Seismology*, 10/1, 1–22
- Rogers J. D., Koper K. D. (2011): Some Practical Applications of Forensic Seismology. (PDF letöltve: 2016.06.25)
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T. (2005): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2004, GeoRisk – MTA GGKI, Budapest, 94 o.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T. (2006): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2005, GeoRisk – MTA GGKI, Budapest, 80 o.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Bus Z., Kiszely M., Czifra T. (2007): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2006, GeoRisk – MTA GGKI, Budapest, 80 o.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Bus Z., Kiszely M., Czifra T. (2008): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2007, GeoRisk – MTA GGKI, Budapest, 76 o.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Bus Z., Kiszely M., Czifra T. (2009): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2008, GeoRisk – MTA GGKI, Budapest, 98 o.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Bus Z., Kiszely M., Czifra T. (2010): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2009, GeoRisk – MTA GGKI, Budapest, 92 o.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Bus Z., Kiszely M., Czifra T. (2011): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2010, GeoRisk – MTA GGKI, Budapest, 140 o.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T. (2012): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2011, GeoRisk, Budapest, 158 o.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T. (2013): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2012, GeoRisk, Budapest, 88 o.
- Tóth L., Mónus P., Kiszely M. (2014): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2013, GeoRisk, Budapest, 136 o.
- Tóth L., Mónus P., Kiszely M. (2015): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2014, GeoRisk, Budapest, 140 o.
- Tóth L., Mónus P., Kiszely M. (2016): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2015, GeoRisk, Budapest, 132 o.
- Tóth L., Mónus P., Kiszely M. (2017): Magyarországi Földrengések Évkönyve – 2016, GeoRisk, Budapest, 126 o.
- Wiemer S., Baer M. (2000): Mapping and removing quarry blasts events from seismicity catalogs. *BSSA*, 90/2, 525–530
- Wüster J. (1993): Discrimination of chemical explosions and earthquakes in Central Europe – a case study. *BSSA*, 83/4, 1182–1212
- Yilmaz S., Bayrak Y., Cinar H. (2013): Discrimination of earthquakes and quarry blasts in the eastern Black Sea region of Turkey. *J. Seismology* 17/2, 721–734