

AZ MGGL LABORATÓRIUM SZEIZMIKUS ZAJFORRÁSAINAK VIZSGÁLATA

Seismological study of noise sources of MGGL

Debreceni Csongor Előd

MTA Wigner FK, RMI, 1121 Budapest Konkoly-Thege Miklós út 29-33., Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A., debreceni.elod@gmail.com.

Somlai László Ábel

MTA Wigner FK, RMI, 1121 Budapest Konkoly-Thege Miklós út 29-33., Pécsi Tudományegyetem, Természettudományi Kar, 7624 Pécs, Ifjúság útja 6., somlai.laszlo@wigner.mta.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A tervezés alatt álló európai harmadik generációs gravitációshullám-detektor észlelési érzékenységét szeretnék kiterjeszteni az 1-10 Hz-s frekvenciákra is. Ebben a tartományban a szeizmológiai zajok, elsősorban a humán és civilizációs zajok válnak a legfontosabbá. Ahhoz, hogy egy lehetséges helyszínt jól lehessen jellemezni, fontos megvizsgálni, hogy ezek mennyire befolyásolják a helyszínt jellemző mennyiségeket. Előre meghatározott napokon vizsgáltuk, hogy milyen típusú zaj terheli a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumot, és ez mennyire azonosítható be a bányában folyamatosan végzett rekultivációval.

Kulcsszavak: MGGL, Einstein Teleszkóp, Szeizmológia

keywords: MGGL, Einstein Telescope, Seismology

1 BEVEZETÉS

A gravitációs hullámok (GH) közelmúltbeli észleléseit követően megnőtt az érdeklődés az új és pontosabb detektorok létesítése iránt. A jelenlegi ún. második generációs detektorok nagyjából 20-1000 Hz (Abbott et al., 2017) között képesek GH-kat észlelni. Az újabb generációs berendezéseknél két lehetőségünk van: vagy a frekvenciatartományt nagyjából megtartva, tovább növeljük az érzékenységet; vagy kibővítjük ezt a tartományt. A második megoldást követné az európai Einstein Teleszkóp (ET), ami mellett szól, hogy így lehetőségünk nyílhat az ún. korai észlelésre, így az összeolvadó neutroncsillagokból érkező jeleket akár az összeolvadás előtt egy nappal is tudnánk detektálni (ET ST 2011). Ilyen alacsony frekvencián, 1-10 Hz között, a detektor érzékenységi görbéjét a szeizmikus és a newtoni zajok határozzák meg. Ezen források kiszűrése a legegyszerűbben úgy oldható meg, hogy a létesítményt a föld alá helyezzük. Emiatt kifejezetten fontossá válik a helyszín kiválasztása. Az első ET-vel kapcsolatos tanulmányban (ET Science Team, 2011) megvizsgáltak több európai helyszínt, többek között a Magyarországon, a Mátra hegységben, Gyöngyösoroszában lévő bányát is. A magyarországi helyszín környéke jó eséllyel alkalmas lehet az ET befogadására, ezért elengedhetlenné vált annak hosszútávú – több éves -- vizsgálata. Erre azért van szükség, hogy feltérképezzük az esetleges éves, évszakos, havi változásokat is. A mátrai helyszín esetén a méréseket a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium (MGGL) végzi (Barnaföldi et al. 2017), amely 2016 februárjától kezdte el az adatgyűjtést.

Az európai helyszínek esetén még nem végeztek ilyen hosszútávú méréseket, ezért még nincs teljesen tisztázott formája az adatszűrésnek és az átlagolási eljárásnak, amelyek erősen befolyásolhatják a helyszínek összehasonlíthatóságát, így azok validálását is. A civilizációs zajok – amelyek nagyjából 1 Hz felett jelennek meg (Beker et al. 2011) – vizsgálata elengedhetetlen. A problémát az jelenti, hogy egy-egy kiugró érték is drasztikusan tudja befolyásolni a számtani átlagból származtatott mennyiségeket, így torzítva azok összehasonlíthatóságát, miközben a tényleges GH mérést csak kis százalékban befolyásolja. A jelenlegi cikkben elsősorban erre kívánunk rávilágítani, megmutatva egyes napokon, hogy rövid tartományok mennyire tudják befolyásolni az ET-nál eddig használt fizikai paramétereket. Ehhez az MGGL két szeizmométerének adatait dolgoztuk fel, az ET1H nevű műszer a bánya bejáratától nagyjából 1 km-re, a felszín alatt 88 méterre, a GU02 nevű pedig beljebb, 400 méterre a felszín

alatt található, mindkettő Guralp CMG-3T típusú szeizmográf (Barnaföldi et al. 2016). A bányában ki-termelés már nem zajlik, de folyamatos a rekultiváció és az így fellépő humán zaj. Tovább nehezíti a vizsgálatot, hogy 2016 végétől három műszakban volt munkavégzés, így az éjszakai értékeknél se lehetett kizárni ezeket a zajforrásokat.

2 ADATOK FELDOLGOZÁSA

A szeizmológiában az általánosan használt mennyiség – amivel a mérőműszer mozgásának nagyságát tudjuk mérni – az ún. teljesítménysűrűség spektrum (PSD). A szokásos eljárást követve, a műszerből származó nyers adatsoron először is: egy detrend-levonást alkalmazunk, ami nem más, mint az adatsorra illesztett lineáris egyenes levonása; illetve egy felüláteresztő szűrő (amely levágási frekvenciája esetünkben 0,02Hz) használata. Ez numerikusan jobban kezelhetővé teszi az adatsort, így megkönnyítve a műszer kalibrációs görbéjével való számolását. Második lépésként, a frekvenciaspektrum meghatározása előtt, egy ablakfüggvényt is alkalmazunk, ez (Beker et al. 2015) alapján az ún. Nuttall-ablakfüggvény, amely:

$$w[n] = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{N-1}\right), \quad (1)$$

ahol $a_0 = 0.355768, a_1 = 0.487396, a_2 = 0.144232, a_3 = 0.012604$, és ezt alkalmazzuk a $v[n]$ adatsorra:

$$\tilde{v} = w[n](v[n] - \langle v \rangle). \quad (2)$$

Itt $\langle v \rangle$ a v -k átlaga. Az így megkapott \tilde{v} adatsor Fourier-spektrumának abszolútérték-négyzete felel meg a PSD-nek:

$$P_k^{(v)} = \frac{2}{f_s \cdot N \cdot W} |V_k|^2, \quad (3)$$

ahol N a teljes minta szám, k az adott frekvencia $f = kf_s/N$ sorszáma, V a \tilde{v} Fourier transzformáltjának k -ik tagja, W az ablakfüggvény négyzetes normája, azaz

$$W = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w[n]^2. \quad (4)$$

Az így meghatározott PSD-t a szeizmológiában szokásos sebesség dimenziójú. Ennek segítségével könnyen megadható más dimenziójú PSD értékek is, például az elmozdulás és a gyorsulás PSD:

$$P_k^{(a)} = P_k^{(v)} \cdot \omega^2, \quad P_k^{(d)} = P_k^{(v)} / \omega^2, \quad (5)$$

ahol a könnyebb átláthatóságért bevezettük az elmozdulás (d), sebesség (v), gyorsulás (a) jelölést is. Továbbá szokásos kiszámolni az ún. amplitúdó-spektrálsűrűséget is (ASD), amely az előzőek négyzetgyöke (például $A^{(v)} = \sqrt{P^{(v)}}$), hiszen ez fizikailag jóval könnyebben értelmezhető mennyiséghez vezet.

Az ASD-n kívül továbbá, adott időtartalmak – 50 másodperces szakaszok, napi átlagok – jellemzésére bevezetett mennyiség az ún. négyzetes közép (RMS), mely a hozzá tartozó PSD-k két adott frekvenciaérték közötti integráljának négyzetgyöke. Ha mást nem mondunk, akkor a frekvenciaintervallum vége mindig a mintavételezési frekvencia fele, így például a 2 Hz-s elmozdulás RMS:

$$rms^{(x)} = \sqrt{\frac{l}{T} \sum_{k=1}^{N/2+1} P_k^{(x)}}, \quad (6)$$

amelyet tekinthetünk úgy, mint a detektor adott frekvenciától mért elmozdulásainak négyzetösszegének gyöke, így a zajok összegét hivatott jellemezni.

2.1 ET követelmények

Az eddig vizsgált ET helyszínek felmérésénél (Beker et al. 2015) egy alapvető zajszintet határoztak meg, amelyet, mint követelmény támasztottak a többi helyszín felé. Ennek értéke például ASD gyorsulás esetén:

$$A^{(x)} = 2 \cdot 10^{-8} (m/s^2) / \sqrt{Hz}, 1 < f < 10 \text{ Hz}, \quad (7)$$

továbbá az ehhez tartozó RMS értéknél szokásosan a 2 Hz-s értéket kiszámolni, amely:

$$rms^{(d)} = \sqrt{\int_{2Hz}^{f_s/2} P^{(a)} \frac{1}{(2\pi)^4} \frac{1}{f^4} df} = \frac{A^{(a)}}{(2\pi)^2} \sqrt{\int_{2Hz}^{f_s/2} \frac{1}{f^4} df} \approx \frac{A^{(a)}}{(2\pi)^2} \sqrt{[-4f^{-5}]_{2Hz}^{\infty}} \approx 0.1 nm, \quad (8)$$

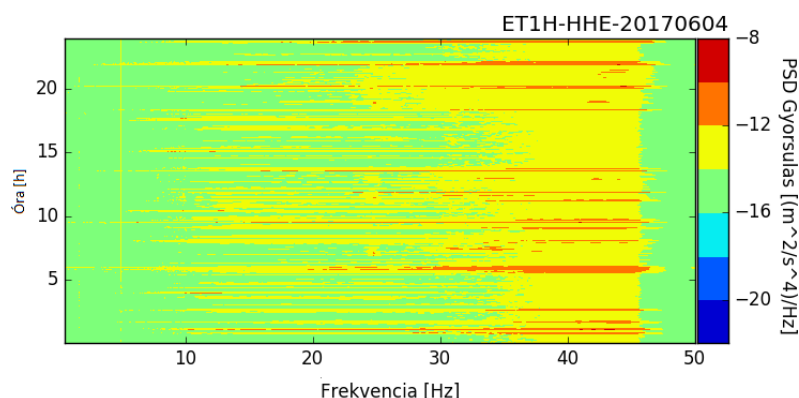
így a továbbiakban elsősorban ezen értékeket fogjuk kiszámolni.

3 SZŰRÉSI ELJÁRÁS

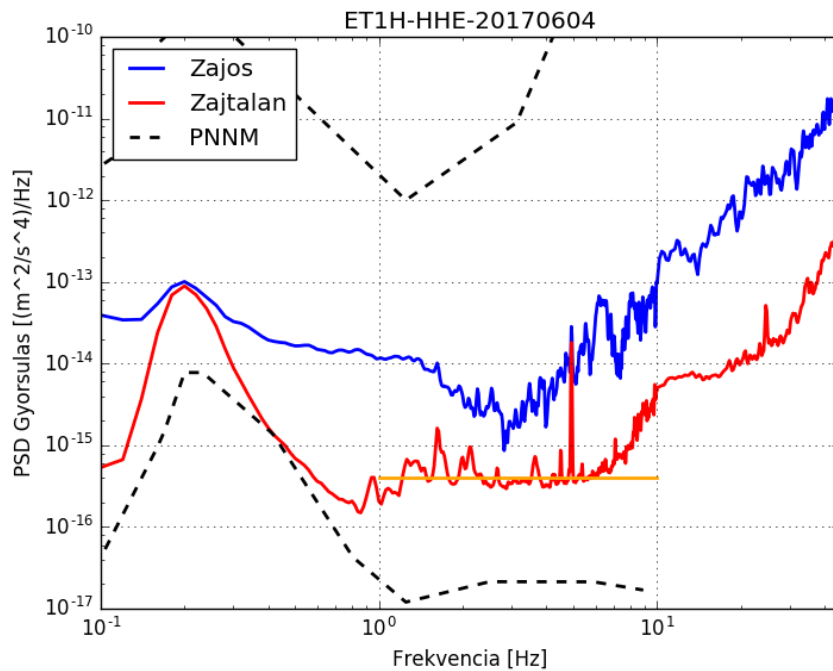
Ahhoz, hogy egyszerűen tudjunk napi értékeket származtatni, 50 másodperces szakaszokra számoltuk ki a PSD sebesség értékeket, így a 100 Hz-s mintavételezésű szeizmográf esetén a spektrumot 50 Hz-ig határozzuk meg, 0,02 Hz-s felbontással. Ahogy már említettük, az ET esetén az 1-10 Hz-s frekvenciatartomány a legfontosabb, ezért 10-50 Hz között a felbontást lecsökkentettük 0,2 Hz-re, így redukálva a felesleges adatokat. A napi átlagos PSD és RMS számításánál ezekből az 50 másodperces egységekből indultunk ki, és ezeknek számoltuk ki a számtani átlagát. Ekkor a kiugró értékek nagyban torzítják a kapott spektrumot. Ennek kezelésére a továbbiakban megvizsgáljuk, hogy kisebb szakaszok leválasztása esetén mennyire módosul a napi átlag PSD és RMS értéke, továbbá hogy az így elkülönített „zajok” karakterizálhatóak-e, továbbá azonosíthatóak-e a humán forrásból érkező zajok. Azért választottuk ki a következő napokat, mert ezek esetén volt információnk a pontos bányamunkálatokról.

3.1 Példa kivágásokra

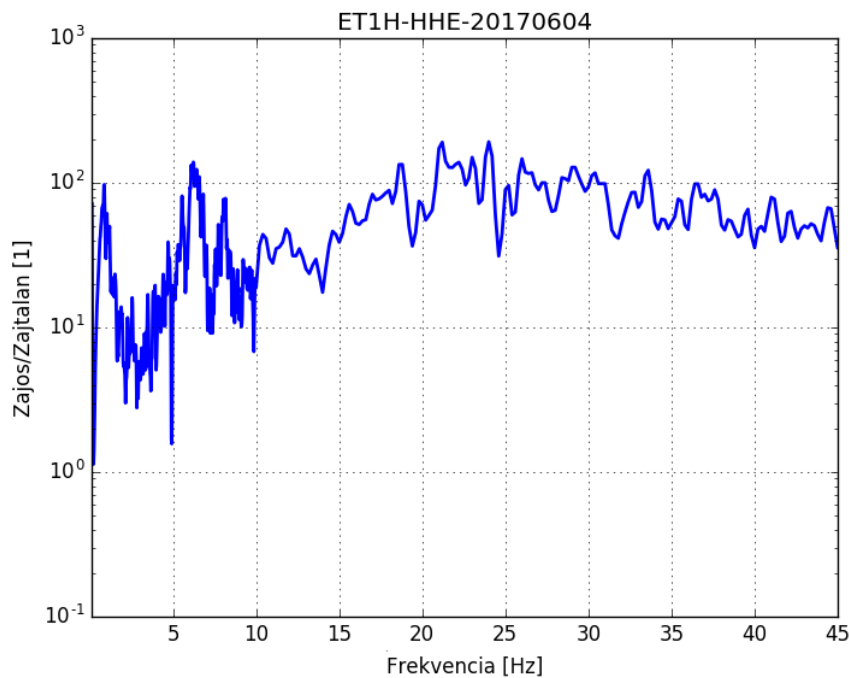
Az általunk vizsgált napokon előállítottuk a napi PSD gyorsulás ábrákat (1. ábra), amelyek alapján meg tudtuk határozni a zajosabb szakaszokat. Ezután összevetettük ezeket az értékeket az 50 másodperces szakaszokra számolt RMS 2 Hz-s értékeivel, így határoztunk meg olyan szakaszokat, amelyeket humán zajként azonosítottunk. Ezután kiszámoltuk a „zajos”, illetve a „zajtalan” részre vett átlagos PSD-t (2. ábra) – a „zajtalan” úgy kaptunk, hogy az adott napi összes 50 másodperces szakaszból kivettük a „zajos” egységeket. Az így kapott spektrumoknál meghatároztuk a zajos és zajtalan átlagok esetén az RMS-eket, illetve a két görbe hányadosát (3. ábra), illetve kiszámoltuk a szeparáció nélküli, egész napra vonatkozó RMS 2 Hz értékeket. Az így megkapott RMS értékeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.



1. ábra. A 2017.06.04. nap PSD gyorsulás spektruma.



2. ábra. A 2017.06.04. nap esetén a szétválasztott „zajos” és „zajtalan” PSD gyorsulások. A narancssárga konstans vonal felel meg a (8) függvénynek. A fekete vonalak pedig az ún. Peterson féle új zajmodellek (Peterson 1993).



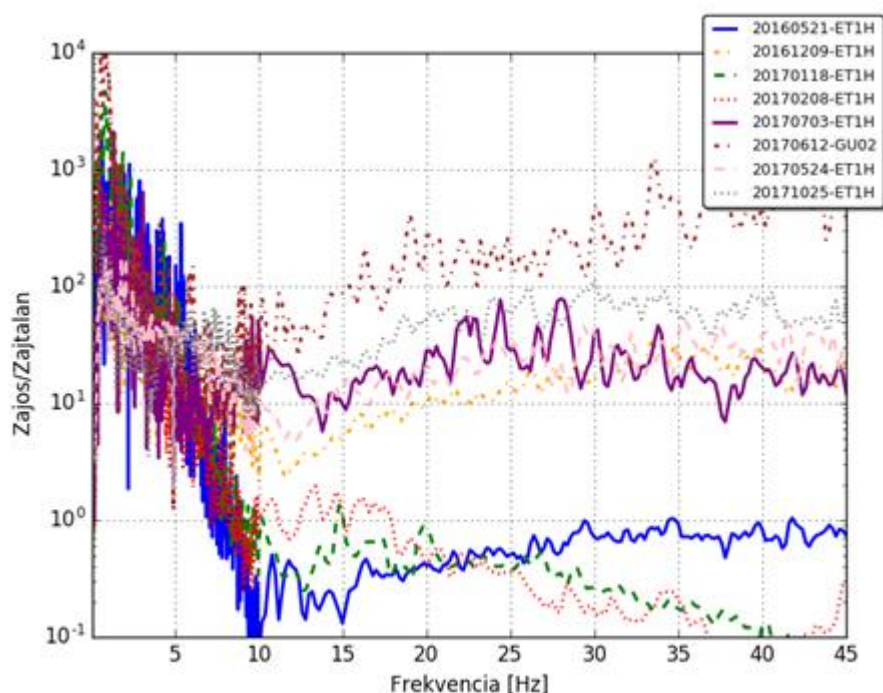
3. ábra. A zajos és zajtalan PSD gyorsulások aránya.

3.2 A vizsgált napok RMS értékeinek változása

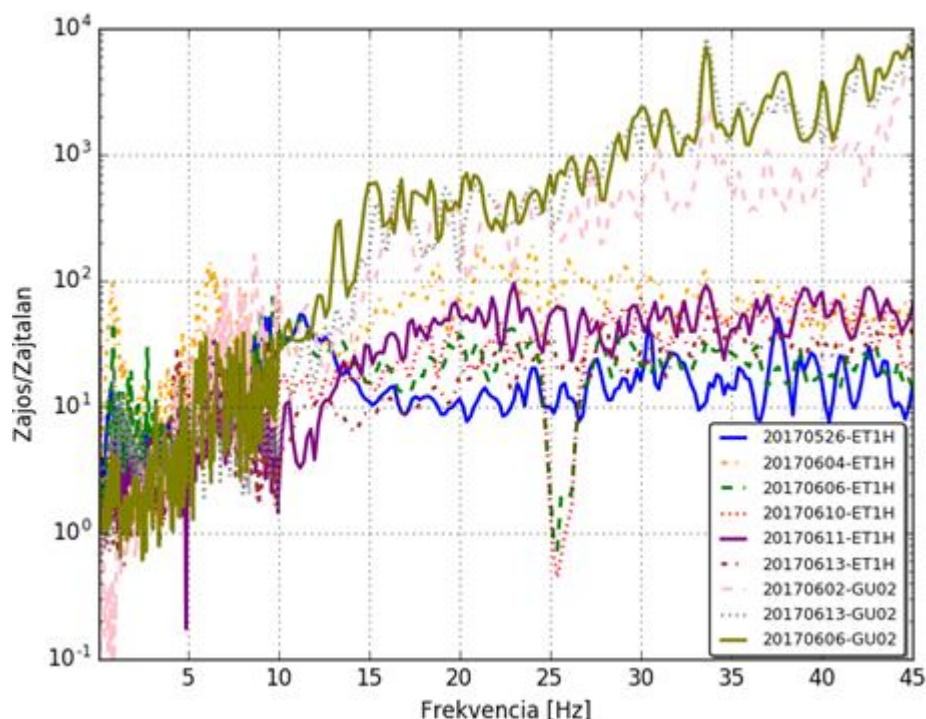
A vizsgált 20 nap adatánál alapvetően két féle zajhatást tudunk elkülöníteni:

- az első típusba azokat a napokat soroltuk, ahol a PSD-k aránya 1-10 Hz között volt számottevő, a szűrt zajaink 10 Hz-től alig tértek el a zajtalan értéktől (1. táblázat „1-10 Hz”-s része)
- a második csoportba azokat vettük bele, amelyeknél a PSD-k aránya szinte a teljes spektrumon nagyobb volt a zajtalan értéknél (1. táblázat „10 Hz<” része)

Az így azonosított csoportokat a 4. és 5. ábrák szemléltetik. Továbbá, meghatároztuk az így kapott zajos és zajtalan esetekre is az RMS értékeket, amelyet a 1. táblázatban foglaltunk össze. Az 2 Hz-s RMS az első csoport esetén fog jobban lecsökkenni, hiszen a legnagyobb járulékokat alacsony frekvenciáknál kapja meg, hiszen az elmozdulás-spektrum esetén a körfrekvenciával való osztás van. Ez jól látható a táblázatnál is, hiszen az első csoport esetén a zajos és zajtalan RMS-ek hányadosának átlaga 10,5, míg a második csoport esetén ez csak 3,4.



4. ábra. Az első csoport (1-10Hz) között azonosított napok PSD-arányai.



5. ábra. A második csoport (10 < Hz) között azonosított napok PSD-arányai.

1-10Hz					
Ál- lomás	Dátum	Zajos (db)	Zajtalan (db)	RMS2	Zaj források
ET1H	20160521	5.070 (4)	0.335 (1722)	0.414	Nincs munka
ET1H	20170524	1.303 (45)	0.183 (1681)	0.277	Esőtakaró beépítése, préseles, szállítás, fűró áttelepítése, szerelőtorony darabolása, mélyakna mélyítése, fűrása
ET1H	20161209	1.459 (70)	0.186 (1656)	0.345	Karbantartás, ácsolat beépítése, szállítás
ET1H	20170118	2.817 (26)	0.1824 (1700)	0.39	Szállítás, pályajavítás, villamos-szekrény elbontás (1km-re)
ET1H	20170208	1.586 (12)	0.180 (1714)	0.222	Szállítógép üzemzavar, szállítás
ET1H	20170703	1.876 (52)	0.199 (1674)	0.38	Rakodás, szállítás
ET1H	20171025	1.211 (150)	0.209 (1576)	0.409	Vágatáthajtás, fűrés, ácsolat bontása, támfalazás, vasalatok előtűzése, betonozás
GU02	20170612	1.836 (18)	0.128 (1708)	0.226	Szerelése, szállítás, olajtároló rögzítése
10Hz<					
Ál- lomás	Dátum	Zajos (db)	Zajtalan (db)	RMS2	Zaj források
ET1H	20170526	0.434 (25)	0.182 (1701)	0.188	Szállítása, padozat építés/megerősítés
ET1H	20170604	0.493 (25)	0.126 (1701)	0.139	Betonozás, rakodás, szállítás
ET1H	20170606	0.492 (39)	0.177 (1687)	0.19	Csővezeték bontás, szállítás, betonvasak behelyezése
ET1H	20170610	0.327 (31)	0.150 (1695)	0.155	Térnagyobbítás, szállítás, betonozás, fűrés
ET1H	20170611	0.325 (48)	0.121 (1678)	0.131	Sima munka, nem volt gépi munkavégzés
ET1H	20170613	0.419 (58)	0.217 (1668)	0.227	Szállítás, omladék rakodás, dübelezés
GU02	20170602	0.567 (15)	0.132 (1711)	0.142	Robbantólyukak fűrása
GU02	20170613	0.700 (34)	0.146 (1692)	0.175	Szállítás, omladék rakodás, dübelezés
GU02	20170606	0.711 (17)	0.127 (1709)	0.145	Csővezeték bontás, talpfák be és kivétele, betonvasak behelyezése

1. táblázat. Az általunk vizsgált napok A táblázat harmadik és negyedik oszlopában a zajos és zajtalan értékekre számolt RMS értékek vannak nm-ben, a zárójelben pedig a felhasznált 50 másodperces PSD-k darabszáma. Az ötödikben az egész napra számolt RMS érték szintén nm-ben, a hatodikban pedig a fő zajforrások.

3.3 Zajok azonosíthatósága

Elsődleges kérdésünk az volt, hogy mennyire adható meg a zajok forrásai. A feladatot nehezítette, hogy nem volt pontos információk arról, hogy mikor voltak a munkavégzések. Az általunk megadott két zajtípus esetén azt feltételezzük, hogy az első csoportba tartozók elsősorban a tisztán emberi tevékenység forrásai (erre utalhatnak a rövidebb időszakok, amelyeket vizsgáltunk), míg a második csoportba a munkagépek által keltett zajok tartoznak.

Ezek alátámasztását a jövőben tervezzük elvégezni, amelyre két lehetséges megoldást tudunk javasolni. Az első esetben jól koordinált és naplózott munkavégzést szeretnénk elvégezni a bányában, így segítve az egyes kiválasztott zajforrások azonosítását. Ilyen nap már volt, ekkor viszont csak a bányában működő berendezések (vasút, légkeverés) hatásait tudtuk vizsgálni, az általános munkavégzést nem. A második, és sokkal tovább mutató lehetőségünk az lenne, ha az elhelyezett két szeizmográf adatsorát tudnánk összevetni, így megvizsgálva a zajforrások lehetséges helyeit. Erre akkor lesz lehetőségünk, ha a kellő pontossággal meg tudjuk adni a kőzetben való hullámterjedést és csillapítást, amelyhez pontos kőzetmechanikai modellt kell használnunk, amely jól leírja a terjedést ilyen frekvenciákon is (Asszonyi et al 2015).

4 ÖSSZEFOGLALÁS

A szűrési eljárás, illetve a rendelkezésünkre álló bánya naplózás alapján, a két elkülönített csoport különböző eredetű zajforrásokból származhat. Az első csoport – ennél a PSD-k aránya 1-10 Hz között volt számottevő – esetén a lehetséges források rövid időintervallumban jelentek meg. A második csoportba azokat vettük bele, amelyeknél a PSD-k aránya szinte a teljes spektrumon nagyobb volt a zajtalan értéknél. Ezeknél hosszabb időtartam volt megfigyelhető, de a 10 Hz feletti részek is jelentősen növelték a napi RMS szintet. Azt feltételezzük, hogy a második csoportba tartozó zajok a bányában végzett folyamatos gépi munka következményei lehetnek. Az 1-10 Hz közötti zajok pedig, valamilyen erőteljesebb, rövid időtartalmú forrás okozhatta, amely az emberi munkálatok mintegy melléktermékeként jelenik meg. Ahhoz, hogy jobban meg lehessen becsülni a bánya tényleges zajterheltségét, és így megítélni, hogy a mátrai bánya mennyire alkalmas az ET befogadásához, a humán zajok szűrése elengedhetetlen. Az általunk azonosított két zajtípus további vizsgálata reményeink szerint tovább fogja javítani a zajok és forrásaik pontosabb azonosítását, valamint lesz lehetőségünk a további vizsgálatokra, így javítani a szeizmikus mérések értelmezését.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők szeretnék megköszönni az MGGL részéről Ván Péternek, Vasúth Mátyásnak és Lévai Péternek és Huba Gézának a sok segítséget, továbbá a Nitrokémia Zrt. részéről Váradi Ádámnak és Rofrits Vilmosnak, valamint a GEO-FABER Zrt. részéről Weisz Róbertnek az adatok megosztásában és feldolgozásában nyújtott segítségüket illetve a folyamatos támogatásukért, amely elengedhetetlen volt a cikk megszületéséhez. Ez a tanulmány nem jöhetett volna létre az NKFIH 124366 és az NKFIH 124508 támogatások nélkül.

Irodalom:

- B. P. Abbott és tsi. (2017): GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence. *Physical Review Letters* 119,141101.
- Asszonyi Cs., Fülöp T. and Ván P. (2015): Distinguished rheological models for solids in the framework of a thermodynamical internal variable theory. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 27:971.986, (arXiv:1407.0882)
- Barnaföldi G.G. és tsi. (2017), First report of long term measurements of the MGGL laboratory in the Mátra mountain range. *Classical and Quantum Gravity*, 34:114001(22), (arXiv: 1610.07630).
- Barnaföldi G.G. és tsi. (2016): A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium első mérései és mérési programja. *Magyar Geofizika*, 57(4):152.169.
- M. G. Beker et al. (2011): Improving the sensitivity of future GW observatories in the 1–10 Hz band: Newtonian and seismic noise. *Gen. Relativ. Gravit.* 43:623-656.
- M. G. Beker, J. F. J. van den Brand és D. S. Rabeling (2015): Subterranean ground motion studies for the Einstein Telescope. *Class. Quantum Grav.* 32, 025002.
- ET Science Team (2011): Einstein gravitational wave telescope, conceptual design study Technical Report ET-0106C-10 (www.et-gw.eu/etdsdocument)
- J. Peterson (1993): Observations and modeling of seismic background noise. Open-File Report 93-322, USGS