

A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium első mérései és mérési programja

**BARNAFÖLDI G. G.¹, BULIK T.^{7,8}, CIESLAR M.⁷, DÁVID E.¹, DOBRÓKA M.⁴, FENYVESI E.³,
GONDEK-ROSINSKA D.⁹, GRÁCZER Z.², HAMAR G.¹, HUBA G.¹, KIS Á.², KOVÁCS R.^{1,5A},
LEMPERGER I.², LÉVAI P.¹, MOLNÁR J.³, NAGY D.³, NOVÁK A.², OLÁH L.¹, PÁZMÁNDI P.¹,
PIRI D.², STARECKI T.⁶, SUCHENEK M.⁶, SURÁNYI G.¹⁰, SZALAI S.², VARGA D.¹, VASÚTH M.¹,
VÁN P.^{1,5A}, VÁSÁRHELYI B.^{5B}, WESZTERGOM V.², WÉBER Z.²**

¹MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Rézecske és Magfizikai Intézet, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29–33.

²MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet,
H-9400, Sopron, Csatkai E. u. 6–8.

³MTA Atommagkutató Intézet, 4026 Debrecen, Bem tér 18/C

⁴Miskolci Egyetem, H-3515 Miskolc-Egyetemváros

^{5A}Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Budapest

^{5B}Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Mérnökgeológia és Geotechnika Tanszék, Budapest

⁶Institute of Electronic Systems, Warsaw University of Technology, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warsaw, Poland

⁷Astronomical Observatory, University of Warsaw, Aleje Ujazdowskie 4, 00478 Warsaw, Poland

⁸Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México,

Apartado Postal 877, Ensenada, Baja California, 22800 México

⁹Janusz Gil Institute of Astronomy, University of Zielona Góra, Licealna 9, 65-407 Zielona Góra, Poland

¹⁰MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport, Budapest

A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium (MGGL) a rekultiváció alatt álló gyöngyösoroszi mélyművelésű bányában épült 2015-ben. A 88 m-rel a földfelszín alatt található létesítményben a harmadik generációs gravitációshullám-detektorok föld alatti telepítésének és folyamatos működésének lehetőségét vizsgáljuk. Szeizmikus, infrahang- és elektromágneses érzékelőkkel alacsony frekvenciás zajt mérünk, illetve a kozmikus eredetű müonfluxust is detektáljuk. A 2016. március–augusztus folyamán végzett adatgyűjtéssel lezajlott a labor előkészítő időszaka (RUN-0), amellyel a következő mérési periódus (RUN-1) szisztematikusan és szinkronizált méréseit készítjük elő. Ebben az összefoglalóban ismertetjük a laboratórium mérési potenciálját és összegezzük az előkészítő periódus eredményeit. Ezenkívül röviden bemutatjuk a rugalmas zajcsillapításának egy új modelljét is.

**Barnaföldi, G. G., Bulik, T., Cieslar, M., Dávid, E., Dobróka, M., Fenyvesi, E.,
Gráczer, Z., Hamar, G., Huba, G., Kis, Á., Kovács, R., Lemperger, I., Lévai, P.,
Molnár, J., Nagy, D., Novák, A., Oláh, L., Pázmándi, P., Piri, D., Rosinska, D.,
Starecki, T., Suchenek, M., Surányi, G., Szalai, S., Varga, D., Vasúth, M., Ván, P.,
Vásárhelyi, B., Wesztergom, V., Wéber, Z.: First report of long-term measurements
of the MGGL Laboratory in the Mátra mountain range**

Matra Gravitational and Geophysical Laboratory (MGGL) has been established near Gyöngyösoroszi, Hungary in 2015, in the cavern system of an unused ore mine. The Laboratory is located at 88 m below the surface, with the aim to measure and analyse the advantages of the underground installation of third generation gravitational wave detectors. Specialized instruments have been installed to measure seismic, infrasound, electromagnetic noise, and the variation of the cosmic muon flux. In the preliminary (RUN-0) test period, March–August 2016, data collection has been accomplished. In this paper we describe the research potential of the MGGL, list the installed equipments and summarize the experimental results of RUN-0. A novel theoretical framework of noise damping in rock masses is also introduced. Here we report RUN-0 data, that prepares systematic and synchronized data collection of the next run period.

Beérkezett: 2016. december 27.; *elfogadva:* 2017. január 20.

1. Bevezetés

A gravitációs hullámok közelmúltban bejelentett felfedezését [1, 2] követően megélné a földrajzi érdeklődés rendszeres észlelésekre is alkalmas, újabb, megnövelt érzékenységgű gravitációshullám-detektorok lehetséges megvalósítása iránt. Földi telepítés esetén a legfontosabb kérdés, hogy a környezeti zajok csökkentésével hogyan növelhető meg az észlelési érvényesség a számunkra legérdekesebb, 0,1–10 Hz-es frekvenciatartományban. Ezzel a kérdéssel foglalkozik a harmadik generációs gravitációshullám-obszervatórium, az Einstein Teleszkóp (ET), előkészítő dokumentációja [3]. A föld alatti telepítés előnyeit először a japán Okihuda hegységben épített KAGRA berendezés fogja tesztelni, amely várhatóan hamarosan megkezdheti működését [4]. Az Einstein Teleszkóp előkészítő tervezésének kapcsán 2010-ben Európában számos lehetséges telepítési helyszínen végeztek szeizmikus zajmérést [5, 6]. Ennek részeként a Mátrában található gyöngyösoroszi mélyművelésű bányában végzett vizsgálatokban kiváló zajcsillapítási paramétereket mutattak ki. Célunk e mérések mélyebb megértése.

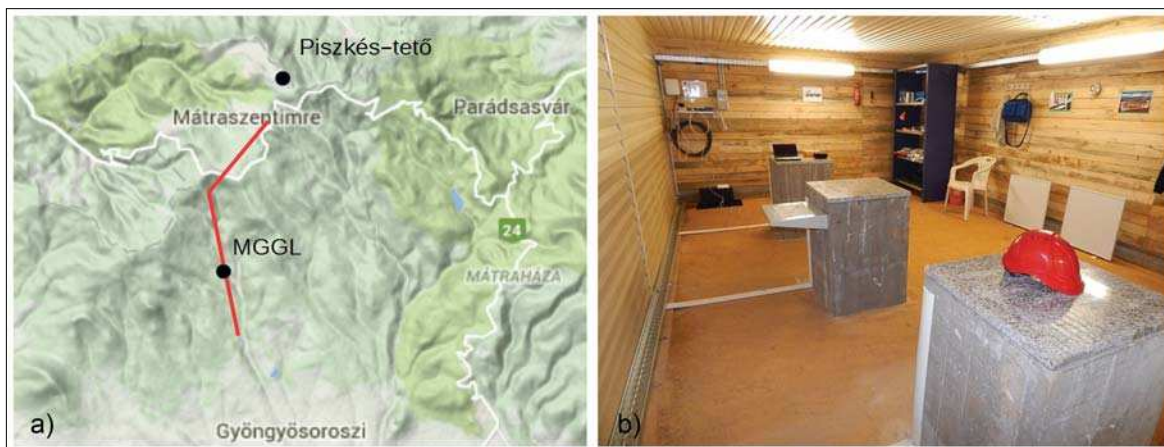
2012 óta nem folyik bányászat a gyöngyösoroszi bányában, mely jelenleg rekultiváció alatt áll. A bányában található Károly táróban, a Károly-akna közelében, a hajdani eligazítóhelyiségben a bejáratától 1280 m-re és 88 m mélységben hoztuk létre 2015-ben az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumát. A laboratórium pontos koordinátái 399 mBf; 711232,27; 281949,94 EOVS. A labor a fent említett rövid ET tesztmérések [3, 5, 6] egyik helyszínének közvetlen közelében van. Az MGGL-ben kialakítottuk a kőzettesthez csatlakozó betonpillérekre nyugvó szeizmológiai mérőhelyeket (1b. ábra). A laboratórium közvetlen optikai adatkapcsolatban van a felszínnel a gyors, megbízható és folyamatos távvezérelt mérések érdekében.

A laboratórium kialakítása 2016 februárjában fejeződött be. Az első adatgyűjtést 2016 márciusában kezdtük és 2016

augusztusában fejeztük be. Ezt a mérési periódust a továbbiakban „RUN-0”-nak nevezzük és a labor, illetve a telepített műszerek tesztidőszakának tekintjük, amelyeket elsőként a [7] műben foglaltunk össze.

Ebben a cikkben röviden áttekintjük a terület geológiai és kőzettani sajátosságait, összefoglaljuk a rugalmas anyagokban, ezen belül is a kőzetekben történő csillapított hullámterjedés néhány releváns eredményét és a tesztperiódus különféle méréseinek tanulságait. A laboratórium céljának megfelelően mindegyik mérésünk vagy kifejezetten a gravitációshullám-detektorok esetén kritikus alacsony frekvenciás zajokat mér, vagy más szempontból speciálisan fontos. Az MGGL méréseiben a következő műszereket használjuk:

- 1) Egy Guralp CMG-3T típusú szeizmometer a laboratóriumon belül, illetve a Magyar Nemzeti Szeizmológiai Hálózat piszkési széles sávú állomásának Streickeisen STS/2 típusú szeizmometere a felszínen, Piszkés-tetőn.
- 2) Az együttműködő lengyel gravitációs kutatócsoport speciális szeizmikus szenzora, amelyet kimondottan a gravitációshullám-detektorok számára fontos frekvenciatartomány (0,1–300 Hz) vizsgálatára fejlesztettek ki.
- 3) Az MTA Atommagkutató Intézet (Debrecen) infrahangdetektora, amelyet környezeti zajok mérésére használnak az aLIGO detektoroknál, a hamis gravitációshullám-jelek kiszűréséhez.
- 4) Lemi-120 típusú indukciós magnetométer, extrém alacsony zajú és széles frekvenciájú elektromágneses zajok vizsgálatára. A laboratóriumban és a piszkési állomáson is található ilyen műszer.
- 5) Az MTA Wigner FK hordozható müontomográfja, amely a kőzetkörnyezet inhomogenitásait nagyenergiás kozmikus részecskék segítségével méri. Ezt a műszert a nagyenergiájú kozmikus müonfluxus föld alatti méréséhez fejlesztették ki.



1. ábra a) A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium (MGGL) elhelyezkedése a Mátrában. Az ércbánya vízszintes táróját a vörös vonal jelzi, a fekete pont mutatja a Labor helyzetét. b) Szeizmológiai mérőhelyek a laboratóriumban

Figure 1 a) The location of Matra Gravitational and Geophysical Laboratory (MGGL) in the Mátra mountain range and inside the Gyöngyösoroszi mine. The ore mine in Gyöngyösoroszi is indicated by a red line, the black dot indicates the laboratory. b) Facilities of seismological measurement inside MGGL

A következő fejezetekben röviden ismertetjük ezeket a berendezéseket, működésüket és a RUN-0 mérési periódus adatainak legfontosabb tanulságait.

2. Geológiai háttér

A Mátra hegység több aktív vulkanikus időszak során alakult ki, mely folyamat több millió éven át tartott hosszú „csendes” időszakokkal. Az első fázis vulkáni tevékenysége a földtörténeti harmadkor (Eocén) kezdetéhez köthető, az ebbe az időszakba tartozó kőzetek a hegység északi peremén találhatóak. A Mátra fő tömegének kialakulása a Miocén időszakban történt. Ekkor a vulkán 25 km széles lehetett, magassága pedig 2000–2500 m. A harmadik fázis utó-vulkáni működésének nyomai a hegység Ny-i és ÉNy-i szélén figyelhetők meg. A Mátra a kialakulása óta majdnem folyamatosan erodálódik, de változó ütemben; most az átlagos magassága 700–800 m, helyenként 850–1000 m magas csúcsokkal [8].

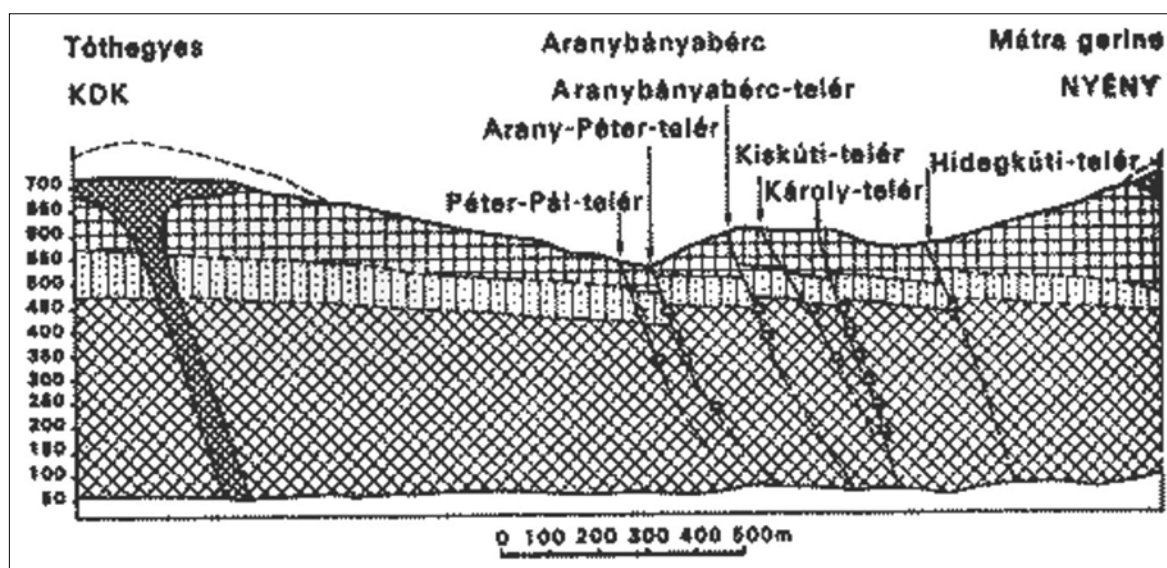
A Mátra fő kőzettípusai vulkanikus kőzetek, amelyek az andeziten kívül néhány előpilitizálódott andezitet („zöld-

követ”), illetve riolitot tartalmaznak. Helyenként bazalttufa és konglomerátumok is megtalálhatóak. A vizsgált területen főleg andezit kőzettípusok találhatóak (ld. 2. ábra, 1. táblázat).

A Mátra hegység a Darnó-törésvonal mentén található, amely a legfontosabb Neogén tektonikus képződmény, ÉÉK–DDNy irányban vágja ketté a hegység keleti részét.

Gyöngyösorszi a Mátra déli lejtőin helyezkedik el. A rézbányászat 1767–1769-ben kezdődött el a területen. Az 1980-as években a bányászattal egyidejűleg egy speciális vízelvezetési rendszert alakítottak ki a bányában a savas vízkifolyás miatt. 2012-ben a bányát véglegesen bezárták, és rekultivációs munkálatok kezdődtek a területen.

Az andezites kőzettömeg mérsékelten tömbösödött. A bánya környékén a kőzettömbök általában nem erodáltak, kivéve a töréseket, ahol több helyen mállás figyelhető meg. A bányatömedékelési munkálatok során Józsa és mtsai [10] meghatározták a jellemző kőzetmechanikai tulajdonságokat. A publikált kőzettömeg-jellemzők: belső súrlódási szög $\phi = 25^\circ$; kohéziós tényező $c = 1100$ kPa, alakváltozási modulus $E = 1$ GPa, Poisson-tényező $\nu = 0,37$ és a telített sűrűség $\gamma = 24$ kN/m³.



2. ábra A Mátra hegység KDK – NyÉNy irányú keresztmetszete a vizsgált területen [9]. A kis négyzetek mutatják a tárókat. Az MGGL a Károly-telérnél található, 399 mBf

Figure 2 East-south-east – west-north-west geological cross-section of the investigated area in the Mátra mountain. The small quadrilaterals show the mines. MGGL is located in the Károly-telér, 399 mBf

1. táblázat A Mátra jellemző andezittípusainak jelölése a 2. ábrán
Table 1 Characteristic andesit types of the Mátra for Figure 2

felső bazaltos andezit	pyroxén-andezit	agglomerációs andezit tufa	kevert pyroxén-andezit
upper basaltic andesite	pyroxene-andesite	agglomerated andesite tuff	mixed varied pyroxene-andesite

Beker vizsgálatai szerint a keményebb kőzetek kevésbé zajosak a puháknál [5, 6]. Azonban sem a fenti adatok, sem Beker adatai nem elegendőek a közettömeg zajcsillapítási tulajdonságainak jellemzésére. Ezért a következő fejezetben röviden bemutatunk egy elméleti modellt a zajcsillapítás tanulmányozásához.

3. Csillapított hullámterjedés kőzetekben

A kőzetkörnyezet zajcsillapításában a kőzet fizikai tulajdonságainak pontos szerepe ma még nem ismert. Az ET előzetes helyszíni zajmérési vizsgálatai kvantitatív elemzés nélkül annyit állapítanak meg, hogy minőségileg hasonló rugalmassági paraméterekkel rendelkező kőzetekben jellemzően hasonló zajszintek vannak, mivel keményebb kőben jobban csillapodik a zaj [6]. Ahhoz, hogy a különféle kőzet-típusok zajcsillapítási tulajdonságait a jellemző méretskálán megértsük, valódi anyagi csillapítási paramétereket érdemes használni.

A szeizmológiában és a szeizmikában általában egy exponenciális faktorialis veszik figyelembe a hullámterjedés csillapítását. Ez a módszer csak az amplitúdó- és fázisváltozásokat veszi figyelembe anyagmodellek és anyagi paraméterek nélkül [11]. A kővek és kőzetek időfüggő viselkedése – különösen a mechanikai és termikus disszipáció modellezése – az ideális rugalmasnál jobb anyagmodelleket igényel mind kis, mind pedig nagy méretskálákon [12, 13], és laboratóriumi méretekben is [14–16]. A heterogén szerkezetű kőzetek sajátos disszipációs mechanizmusainak komplexitását a heterogenitások kölcsönhatását figyelembe vevő részletes modellekkel leírni bonyolult feladat. Azonban általános termodinamikai elvekből univerzális, mechanizmusfüggetlen anyagtörvényeket kaphatunk. A nem-egyensúlyi termodinamika egyetlen tenzoriális belső változóval a rugalmas kontinuumok termodinamikailag konzisztens minimális disszipatív kiterjesztésére vezet [17]. Az elmélet időfüggő kőzetviselkedés leírására különösen alkalmas, ahogy azt az anelasztikus deformáció-visszaállási technológia (ASR – anelastic strain recovery), az *in situ* kőzetfeszültség-mérés legpontosabb módszere bizonyítja. Ennél a módszernél elméleti megfontolásoktól függetlenül jutottak a termodinamikailag alapvető anyagmodellhez [14, 15].

3.1. Termodinamikai reológia

A termodinamikai reológia hagyományosan a mikroszerkezeti hatásokkal magyarázza a rugalmas anyagok mechanikai tulajdonságainak kúszási és relaxációs jelenségeit [18, 19]. Az univerzális, szerkezetfüggetlen tárgyalás egy másodrendű szimmetrikus tenzormezővel, egy úgynevezett termodinamikai belső változóval – vagy más néven – dinamikai szabadsági fokkal jellemzi az anyagi heterogenitásokat. Mivel ez a mező másodrendű tenzor, a termodinamikai követelmények izotrop esetben is közvetlenül kapcsolják a mechanikai tulajdonságokhoz, és ezért mind a gömbi, mind a

deviatorikus komponensekben eltérést kapunk az ideális rugalmas mechanikai viselkedéstől. Az eltérés megadja a tehetetlenség, a kúszás és a feszültségrelaxáció második fő-tétel által megengedett lehetőségeit.

Ha az egyenleteket egyetlen térbeli dimenzióra redukáljuk, akkor az említett belső változó kiküszöbölése után a következő konstitutív összefüggést kapjuk a σ feszültség és az ϵ deformáció között:

$$\tau \dot{\sigma} + \sigma = E_2 \dot{\epsilon} + E_1 \epsilon + E \epsilon. \quad (1)$$

A termodinamikai reológiának ezt az alapvető modelljét Kluitenberg–Verhás-testnek nevezzük [17]. Az együtt-hatóknak világos fizikai jelentése van: τ a feszültségrelaxációs idő, E a rugalmassági modulus (pl. Young-modulus rudak húzása vagy összenyomása esetén), E_1 a viszkozitási (lineáris viszkoelaszticitási) együtt-ható, E_2 pedig anyagi eredetű tehetetlenségi jelenségeket reprezentál. Egyik együtt-ható sem lehet negatív, továbbá

$$E_1 - E\tau > 0, \quad (2)$$

amely az entrópiánövekedés feltétele, és a konkáv entrópia miatt adódik.

A speciális reológiai testek származtatásakor az eredeti, termodinamikai együtt-hatókat kell figyelembe vennünk, a fent megadott empirikus együtt-hatók nem függetlenek. Például a $\tau = 0$ követelményből $E_2 = 0$ következik, ezért a tiszta feszültségrelaxációs reológiai test termodinamikailag (is) tiltott.

A Kluitenberg–Verhás-anyagmodell alkalmazhatóságát a fent említettek szerint az ASR módszer igazolja. Ennek megfelelően a legpontosabb kísérleti egyezést a mért adatokkal a teljes, deviatorikus és gömbi részeket is magában foglaló izotrop anyagmodell használatával kaphatjuk [20, 14, 15].

3.2. A Kluitenberg–Verhás-közeg diszperziós relációi

A Kluitenberg–Verhás-testet legegyszerűbb egy időben hierarchikus, kétszintű Kelvin–Voigt-rendszernek felfogni, ahogy az a fenti (1) egyenlet alábbi átrendezéséből látszik:

$$\tau \frac{d}{dt} [\sigma - (I_2 + 1)I_1 \dot{\epsilon} - E\epsilon] + (\sigma - I_1 \dot{\epsilon} - E\epsilon) = 0. \quad (3)$$

Itt $I_1 = E_1 - \tau E$ a *csillapítási index* és $I_2 = E_2 - \tau I_1$ a *tehetetlenségi index* [17]. Ez az átrendezett forma jól mutatja, hogy a $\tau = 0$ nem szükséges feltétele a lineáris viszkoelasztikus anyagviselkedésnek. Ha $I_2 = 0$, akkor τ értékétől függetlenül lineáris viszkoelasztikus, azaz Kelvin–Voigt reológiai testként viselkedik az anyag. Más esetekben I_2 előjelétől függően az egyensúlyhoz tartás csillapított rezgésekkel vagy exponenciális relaxációval történik [17, 21–23].

Az alapvető mérlegek és a Kluitenberg–Verhás-anyagmodell segítségével egyszerűen kiszámolhatjuk az 1+1 dimenziós csatolt termo-reológiai rugalmas kontinuum diszperziós relációit. A fázissebesség négyzetére a következő formulát kapjuk:

$$c^2 = \frac{E_1 \omega + \mathbf{i}(\omega^2 E_2 - E)}{\rho(\tau \omega - \mathbf{i})} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{\rho} \frac{[E + \omega^2(\tau^2 E - I_2)] - \mathbf{i}\omega[I_1 + \omega^2\tau(\tau I_1 + I_2)]}{\omega^2\tau^2 + 1}$$

Ez a diszperziós reláció, illetve az eredeti konstitutív egyenlet, (3), is két jelterjedési sebességet jelez. Az alacsony frekvenciás terjedési sebesség $c_l = \sqrt{E/\rho}$, különbözik a $c_h = [(E\tau^2 - E_2)/\rho\tau^2]^{1/2}$ nagyfrekvenciás terjedési sebességtől. Az alacsony frekvenciás terjedési sebesség nem csillapított, nagy frekvenciákon egyre nagyobb a csillapítás. A diszperziós reláció mutatja, hogy közöttük egy meghatározott frekvencián lokálisan minimális a disszipáció, ez a frekvencia $\omega_{d_{min}} \approx \sqrt{I_1/\tau E_2}$. Ekkor a terjedési sebesség nagyon eltérhet a tisztán rugalmas, nulla frekvenciás határeset terjedési sebességétől. Ez a viselkedés hasonló az alacsony hőmérsékletű hővezetési jelenségek esetén ismert „ablak-feltételhez”, ahol az optimális kísérleti hőimpulzus hosszát célszerű a minimális disszipáció feltételéből számolnunk [24]. Ennek a diszperziós relációnak részletesebb elemzését a [25, 26] munkákban találjuk meg.

A bemutatott reológiai modell univerzális háttere természetes magyarázatot ad a statikus és dinamikus rugalmassági együtthatók közötti eltérésre.

3.3. Következmények

A fenti elméleti eredmény a termodinamikai levezetésből adódóan univerzális. A deformáció kialakulását a megadott formájú reológiai konstitutív egyenletek írják le, kiegészítve a kontinuummechanika alapléteit, függetlenül a mikroszerkezet sajátosságaitól. A kőzet inhomogenitásainak és heterogenitásának semmilyen tulajdonságát nem használtuk ki, ezért mindaddig, amíg a mikroszerkezet hatását a deformációra másodrendű szimmetrikus tenzormezőre vezethetjük vissza és a kőzet izotropnak tekinthető, a fenti elmélet érvényes. Ez az univerzalitási tulajdonság a nem-egyensúlyi termodinamika segítségével származtatott konstitutív relációkra vagy fejlődési egyenletekre mindaddig igaz, amíg csak általános elveket használunk a levezetésben [27, 28]. Ezért ilyen anyagmodellek különösen alkalmasak lehetnek az ET szempontjából releváns méretskálák és frekvenciatartomány esetén. Ezenfelül az anyagi tulajdonságok figyelembevételével az ET különböző lehetséges telephelyeinek jellemzése is javítható lehet, illetve a gravitációs gradiens zaj szűrése hatékonyabb a geológiai és kőzetmechanikai paraméterek segítségével.

4. Szeizmológiai mérések 1

A szeizmikus zajforrásokat gyakran aszerint kategorizáljuk, hogy a kibocsátott zaj spektruma milyen frekvenciasávba esik. Az Einstein Teleszkóp szempontjából a 0,1–10 Hz-es tartomány a legfontosabb. Ebben a frekvenciasávban a szeizmikus zajt elsősorban a mikroszeizmikus hatás és az

emberi aktivitás okozza. Az 1 Hz alatti zaj túlnyomórészt természetes eredetű, az óceánok mozgása és a nagy léptékű meteorológiai folyamatok hozzák létre. A lokális időjárási viszonyok és a szél az 1 Hz körüli zajra vannak nagy hatással, míg 1 Hz fölött már az emberi tevékenység okozta jelek dominálnak. Az ilyen szeizmikus zajt antropogén zajnak nevezzük.

Fontos tehát, hogy az Einstein Teleszkóp számára olyan telephelyet válasszunk, mely messze van az óceánoktól éppúgy, mint a jelenlegi és jövőbeli emberi aktivitástól.

Peterson a Föld különböző területein elhelyezett szeizmológiai állomások zajméréseinek teljesítménysűrűség-spektrumait katalogizálta [29]. Több év adatait feldolgozva mintegy 12000 spektrumot gyűjtött össze. A kiválasztott 75 állomás egyesített spektrumai alsó és felső burkolója alapján Peterson megalkotta az Új Magas/Alacsony Zaj Modellt, amelyre angol elnevezése (New High/Low Noise Model) után az NHNM/NLNM rövidítéssel hivatkozunk.

Az óceánok által generált mikroszeizmikus zaj 0,07 Hz és 0,2 Hz frekvenciaértékek környezetében a legjelentősebb. A 0,07 Hz-nél található spektrális csúcs a parti hullámok frekvenciájával korrelál, ahol a vízhullámok energiája – akár a vertikális nyomás változásain keresztül, akár a hullámoknak a parthoz csapódása révén – szeizmikus energiává alakul. A 0,2 Hz-nél található magasabb csúcs az óceánokban kialakult állóhullámok és a kontinentális self kölcsönhatásával magyarázható. Ezek az állóhullámok az egymással szemben haladó, azonos periódusú hullámok szuperpozíciójával jönnek létre.

A GEO600, LIGO és Virgo nagy interferometrikus detektorok a földfelszínen működnek, ezért érzékenyek a szeizmikus hullámok okozta talajmozgásokra. A műszeres megfigyelések azonban egyértelműen igazolják, hogy felszín alatti környezetben a szeizmikus zajszint általában jóval alacsonyabb, mint a felszínen. Az Einstein Teleszkóptól elvárt érzékenységet csak megfelelően alacsony szeizmikus zajszint mellett érhetjük el. A detektor számára tehát egy olyan felszín alatti telephelyet kell választani, amelyet alacsony szeizmikus aktivitás és homogén geológiai környezet jellemez.

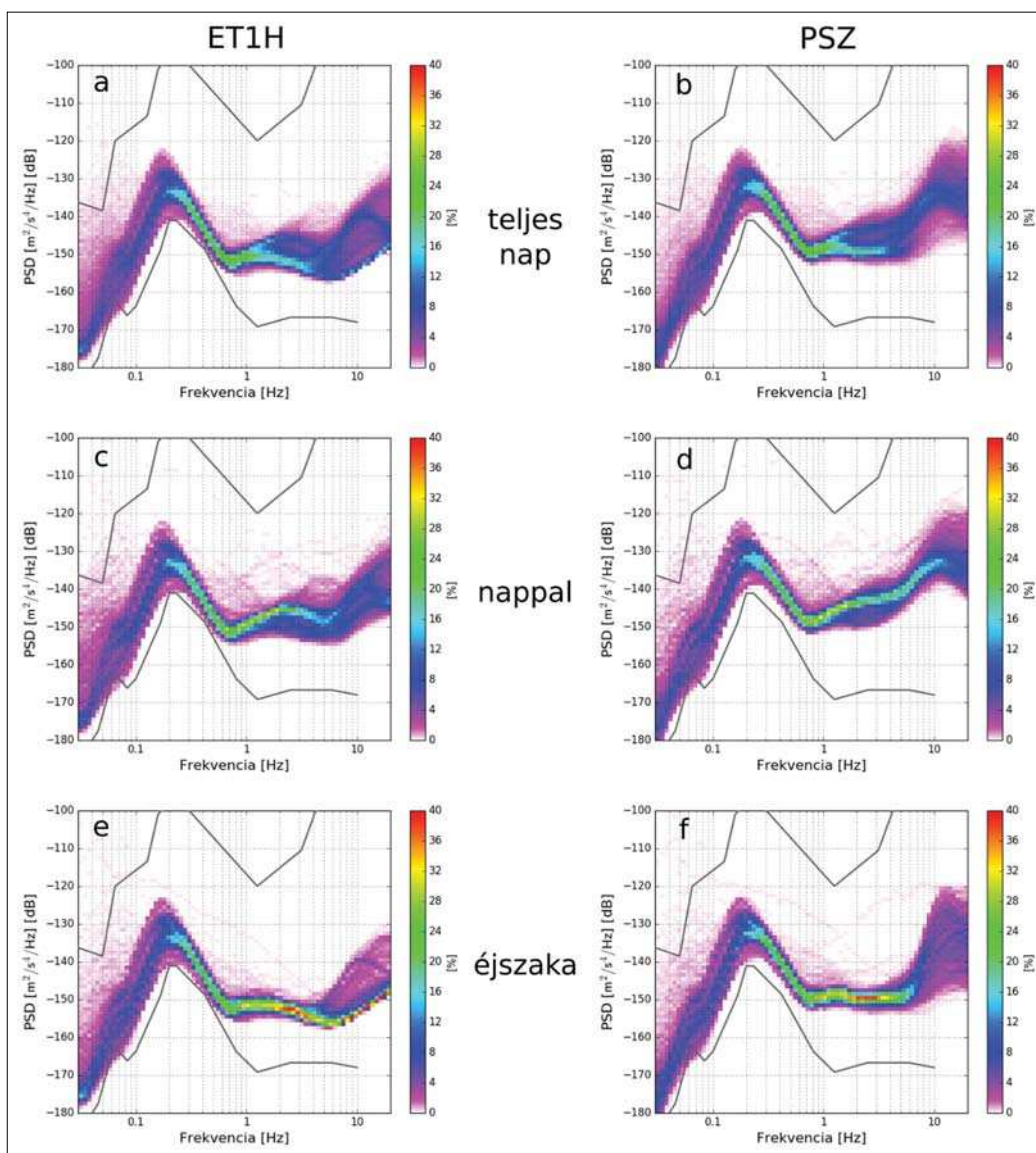
A fentiek értelmében az MGGL-ben végzett szeizmológiai méréseink célja a bányában észlelhető szeizmikus zaj jellemzőinek megállapítása, valamint a zaj mélység szerinti csillapodásának tanulmányozása. Annak érdekében, hogy ezeket a vizsgálatokat elvégezhessük, szeizmikus zajméréseket végzünk mind a felszínen, mind a bányában, majd az így szerzett adatokat összehasonlítjuk egymással.

A bánya fő vágata mentén elhelyezkedő MGGL-ben felállított szeizmológiai állomást (ET1H) egy alacsony zajszintű, széles sávú Guralp CMG-3T szeizmométerrel szereltük fel. A Magyar Nemzeti Szeizmológiai Hálózat permanens állomásai közé tartozó piszkési széles sávú állomás (PSZ) a felszínen helyezkedik el, csupán néhány kilométerre a bányabeli szeizmométertől. A PSZ állomáson egy kiváló minőségű Streckeisen STS-2 szeizmométert működtetünk. Mind a Guralp, mind a Streckeisen szeizmométer a talajmozgás sebességét méri, és egyenle-

tes átviteli függvényvel rendelkezik a 0,008–50 Hz-es tartományban.

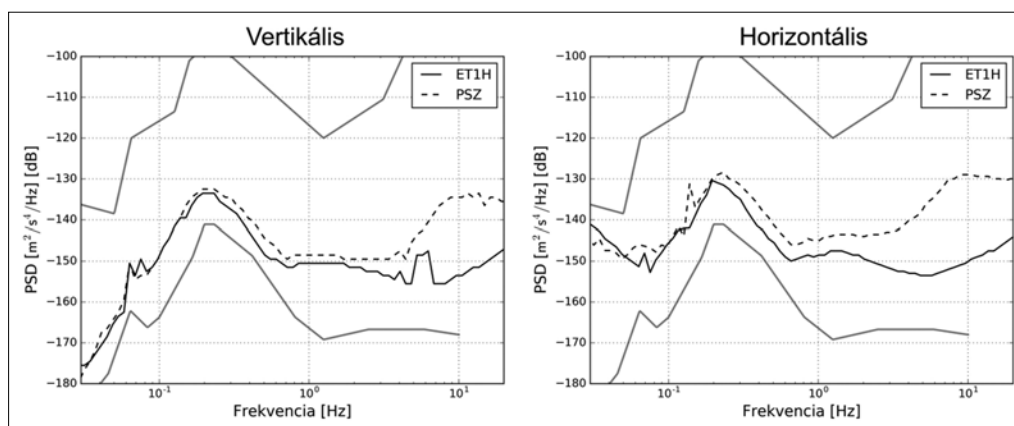
Jelen tanulmányban a 2016. március 1. és május 31. közötti három hónap mérési adatait dolgoztuk fel. Eredményeink prezentálásához minden esetben gyors Fourier-transzformációval (FFT) számítottuk ki a teljesítménysűrűség-spektrumokat (PSD) $m^2/s^4/Hz$ egységekben. Az összehasonlíthatóság érdekében a Peterson-féle alacsony és magas zaj modelljeit is felrajzoltuk a 3–5. ábrán. A 3. ábrán bemutatott PSD hisztogramok nemcsak azt mutatják meg, hogy mekkora a zaj amplitúdója a frekvencia függvényében, hanem azt is, hogy az egyes amplitúdószinteket milyen gyakorisággal veszi fel. Ezt a gyakoriságot az ábrákon százalékban adjuk meg és színekkel jelöljük.

A felszíni PSZ és a bányabeli ET1H állomásokon mért szeizmikus zaj vertikális komponensének PSD hisztogramjait a 3. ábra szemlélteti. A felső sorban bemutatott ábrapár a teljes napi zajspektrum változásait hasonlítja össze a két állomásnál, a középső sor a nappali (helyi idő szerint 8 és 16 óra között) spektrumokat szemlélteti, míg az alsó sor az éjszakai időszakokra (22 és 6 óra között) vonatkozik. Az ábrák egyértelműen mutatják, hogy a zajszt általában alacsonyabb a bányabeli állomásnál mint a felszínen, különösen 0,7 Hz felett. Ebben a frekvenciatartományban a zaj hatása hangsúlyosabb a felszínen, mint a felszín alatt. Az 1 Hz feletti tartományban, ahol a szeizmikus zajt elsősorban az emberi tevékenység okozza, a zajszt és annak szórása, változékonysága nagyobb a nappali órákban, mint éjszaka.



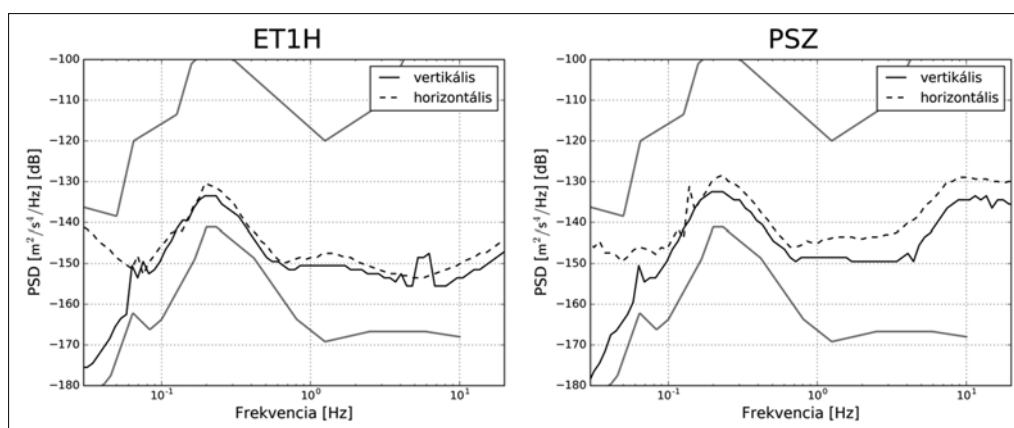
3. ábra A vertikális zajkomponens RUN-0 adatok alapján számított PSD hisztogramja a bányabeli ET1H (bal oszlop) és a felszíni PSZ (jobb oszlop) állomásokról. A teljes napi (első sor), a nappali (második sor) és az éjszakai (harmadik sor) PSD hisztogramokat külön-külön szemléltetjük. A vastag szürke vonalak a Peterson-féle alacsony/magas zaj modelleket reprezentálják [29]. A színek a hisztogramszintek gyakoriságát jelölik

Figure 3 Vertical component power spectral density (PSD) histograms for the underground site ET1H (left column) and the surface station PSZ (right column) of the RUN-0 seismometer data. The overall PSDs (first row), the daytime PSDs (second row), and the night PSDs (third row) are illustrated separately. Thick grey lines represent the low/high noise models of Ref. [29]. Colors indicate histogram level frequency



4. ábra A RUN-0 adatok alapján számított vertikális (baloldalt) és a horizontális (jobbaldalt) PSD görbék összehasonlítása a bányabeli ET1H (folytonos vonal) és a felszíni PSZ (szaggatott vonal) állomásoknál. A görbék a megfelelő PSD hisztogramok móduszait reprezentálják 3 pontos mozgó átlagolás után

Figure 4 Comparison of the vertical (left) and horizontal (right) PSDs at the underground site ET1H (solid line) and surface station PSZ (dashed line) RUN-0 data. Lines represent the mode of the corresponding PSD histograms after three-point moving average smoothing



5. ábra A RUN-0 adatok alapján számított vertikális (folytonos vonal) és a horizontális (szaggatott vonal) PSD görbék összehasonlítása a bányabeli ET1H (baloldalt) és a felszíni PSZ (jobbaldalt) állomásoknál. A görbék a megfelelő PSD hisztogramok móduszait reprezentálják 3 pontos mozgó átlagolás után

Figure 5 Comparison of the vertical (solid line) and horizontal (dashed line) PSDs at the underground site ET1H (left) and the surface station PSZ (right) of RUN-0 data. Lines represent the mode of the corresponding PSD histograms after three-point moving average smoothing

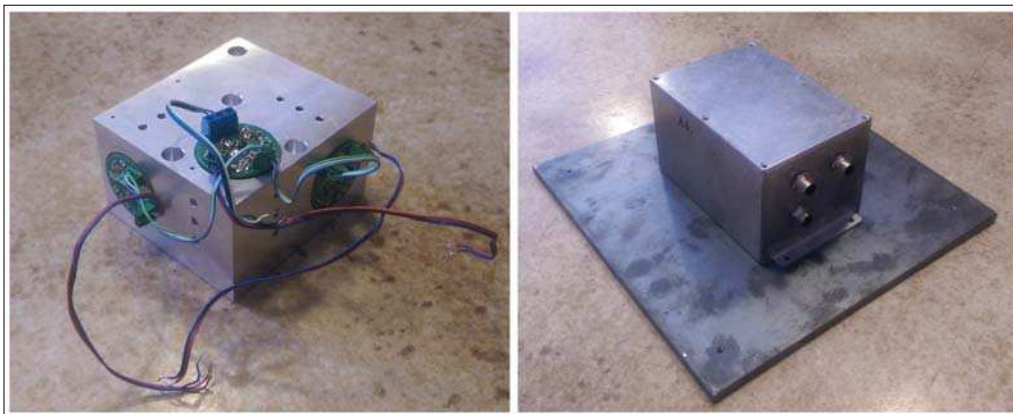
Annak érdekében, hogy még jobban kiemeljük a felszíni és a bányabeli helyszínek közötti különbséget, a 4. ábrán bemutatjuk a két állomásnál számított PSD hisztogramok móduszait mind a vertikális, mind a horizontális komponensekre. A 0,2 Hz-es mikroszeizmikus csúcs alatt a két állomás közötti különbség elhanyagolható. A 0,2–5 Hz-es tartományban azonban a vertikális komponens zajszintje ET1H-nél mintegy 2–5 dB-lel alacsonyabb, mint Piskésen, míg nagyobb frekvenciákon ez a különbség eléri a 20 dB-t is. A horizontális komponenst tekintve a két állomás közötti különbség még hangsúlyosabb: 0,2 és 2 Hz között a különbség mintegy 5 dB, a 2–4 Hz-es tartományban eléri a 10 dB-t, míg nagyobb frekvenciákon a 20 dB-t is meghaladja. Tehát az emberi tevékenység okozta kulturális zaj elsősorban horizontális komponensű összetevőket tartalmaz.

Az 5. ábra a vertikális és horizontális zajszinteket hasonlítja össze a két vizsgált helyszínen. A 0,07 Hz-es mikro-szeizmikus csúcs felett a bányabeli ET1H állomásnál ta-

pasztalt vertikális és horizontális zajspektrumok gyakorlatilag megegyeznek. A felszíni PSZ állomáson azonban az 1 Hz feletti frekvencia tartományban a vertikális zajszint mintegy 5–10 dB-lel alacsonyabb a horizontális zajszintnél. Ez a megfigyelés is alátámasztja azt a korábbi megállapításunkat, hogy a felszínen az emberi tevékenység elsősorban horizontális zajt generál. Az Einstein Teleszkóp tervezésénél azonban mindkét zajkomponenst figyelembe kell venni.

5. Szeizmológiai mérések 2

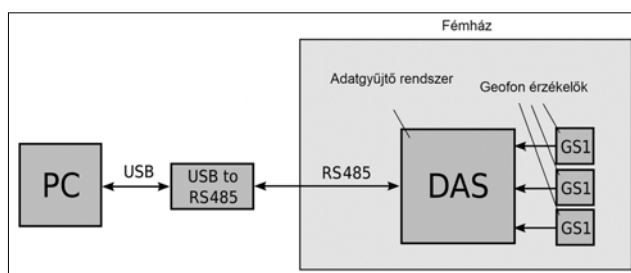
Egy második, független szeizmikus zajmérést a Varsói Egyetemen kifejlesztett mérőberendezéssel végeztünk. A mérőrendszer egy háromtengelyű szeizmométert használ, egyet a vertikális és kettőt a horizontális mérésekhez. LGT-2.5 és LGT-2.5H geofonokat használunk, amelyeknek a rezonanciafrekvenciája 2,5 Hz. A három érzékelőt a 6. ábrán



6. ábra A bal oldali ábra a három geofont mutatja fémházban, a jobb oldalon a teljes detektor látható fémlemezzre szerelve
Figure 6 The left panel shows the three geophones in the metal housing, while the right panel presents the entire detector mounted on a metal plate

látható módon szereltük. A geofonok analóg jele a fémházba szerelt adatgyűjtő rendszerhez kapcsolódik és a teljes berendezés látható a 6. ábra jobb oldalán.

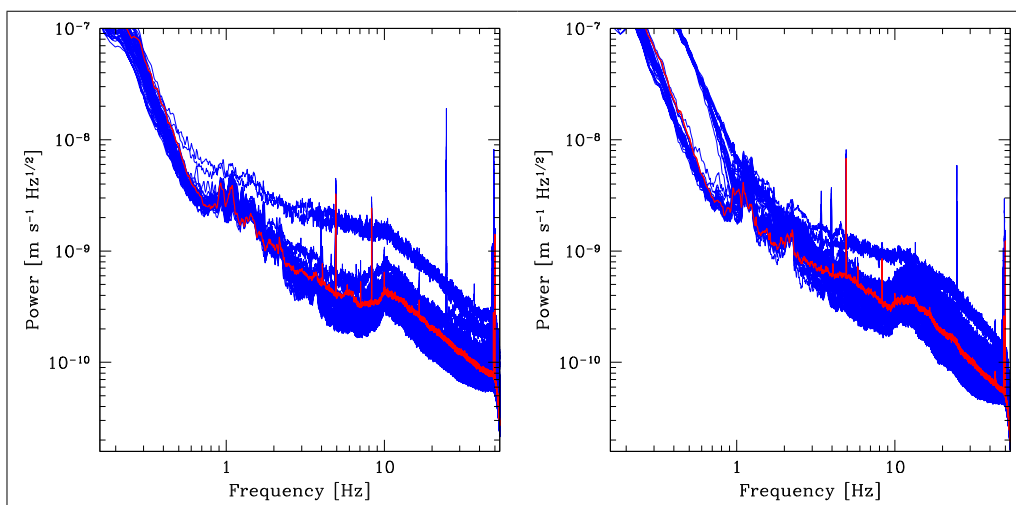
Az adatgyűjtő rendszer mintavételezési frekvenciája 125 Hz-től 1 kHz-ig állítható. A beépített AD átalakító a jelet $\pm 2,5$ V érzékenységgel méri 32 bites felbontással. Az adatgyűjtő rendszer az összegyűjtött adatokat egy RS485 interfészen keresztül blokkosítva küldi a számítógépre. A 28 másodpercenként küldött adatsomagokat bármilyen egyszerű személyi számítógép képes venni egy USB–RS485 átalakító segítségével, USB porton keresztül. A biztonsági adattárolás a szeizmométerben levő, maximum 32 Mb méretű SD kártyára történik. Ez a tárolási kapacitás körülbelül 8 hónapnyi mérést tesz lehetővé külső adatkapcsolat nélkül. A szeizmikus mérőrendszer blokkdiagramját a 7. ábra mutatja. Az adatgyűjtő rendszer kiterjeszhető, és a mért szeizmikus jel szinkronizálható több szeizmométer között az RS485-ös interfészen keresztül. Ilyen konfiguráció esetén egy további szinkron csatoló kerül minden egyes szeizmométerbe.



7. ábra A Varsói Egyetem eszközeihez tartozó adatgyűjtő rendszer blokkdiagramja
Figure 7 The block diagram of the data acquisition system

A készüléket egy széles sávú Trillium szeizmométerrel kalibráltuk, és az érzékenységet egy szeizmikusan izolált vákuumkamrában mért zajjal határoztuk meg. Az érzékenység 1 Hz-en $\approx 2 \times 10^{-10} \text{ms}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$.

Az adatgyűjtést a műszerrel 2016. május 24-én kezdtük el. Ebben a cikkben az első 77 nap adatainak előzetes elemzését adjuk meg, 2016. május 25-től augusztus 8-ig. A mű-



8. ábra A Varsói Egyetem szeizmikus szenzorának RUN-0 napi sebességspektrumai. A bal oldalon a horizontális, a jobb oldalon a vertikális mérés adatait mutatja. A július 16-i csendes napot pirossal jeleztük
Figure 8 The daily power spectra of velocities of the RUN-0 data of seismic sensor of the Warsaw University. The left panel shows the velocity amplitude spectra in the horizontal direction while the right panel present the vertical ones. The data of the quiet day – 16th July – is shown in red

szer hibátlanul működött ebben az időszakban. Az adat-elemzés céljából minden napot 685 részre osztottunk, egyenként 16384 mintával. A sebességamplitúdó-spektrumot minden rövidebb szakaszra meghatároztuk, és a napi átlagot láthatjuk a 8. ábrán. A szeizmikus zajszint közelítőleg $2-3 \times 10^{-9} \text{ms}^{-1} \text{Hz}^{-1/2}$. A vizsgált időszakban két napon magasabb zajszintet mértünk az 1–10 Hz-es tartományban. Ettől eltekintve a szeizmikus zajszint stabil, és a napi változása legfeljebb kétszeres.

A kiemelkedő spektrumvonalak közül felismerhetjük az elektromos hálózati frekvencia 50 Hz-es vonalát a 25 Hz-es alharmonikusával. A 4 és 5 Hz közötti tartományon is láthatunk néhány keskeny spektrumvonalat, amelyeket feltehetően antropomorf zaj okoz. Eredetükre a július 16-i csendes nap adatai utalnak. Ezen a napon a bánya minden, nem létfontosságú gépét kikapcsolták, a napi átlagspektrumot vörös vonal jelzi a 8. ábrán, láthatóan kevesebb keskeny vonallal az említett tartományban. Ez arra utal, hogy a bányában működő gépek okozhatják ezt a zajt. Említésre méltó az is, hogy a csendes nap átlagos zajszintje nem különbözik nagyon más napok spektrumaitól. Ez azt jelenti, hogy a mesterséges eredetű szeizmikus zaj egy szűk frekvenciaintervallumra koncentrálódik.

6. Infrahang monitorozása

A szeizmikus mozgáson kívül a levegőben terjedő nyomáshullámok (azaz a hanghullámok) is rezgésbe tudják hozni az interferometrikus gravitációshullám-detektorok részeit. Leginkább a vákuumbeli rendszerek külső felfüggesztési pontjai, és a detektorok más, vákuum által nem védett részei vannak kitéve ennek a hatásnak [30]. Amellett, hogy a hanghullámok növelik az interferométerek háttérzaját, „hamis” gravitációshullám-jeleket is tudnak generálni. Ezeket a mérési adatok feldolgozása során el kell különíteni a tényleges gravitációs hullámok által okozott jelektől [31].

A jelenleg üzemelő gravitációshullám-detektorok (aLIGO, AdVirgo, KAGRA) mérési tartománya 10 Hz – 90 kHz [32]. Az aLIGO detektorainál a környezeti hanghullám eredetű zajok monitorozása céljából üzemeltetett mikrofonok képesek detektálni az olyan alacsony frekvenciájú (10–30 Hz) hanghullámokat, amelyek hamis pozitív gravitációshullám-jeleket generálhatnak az interferométer kimenetében. A hamis jelek detektálását követően speciális algoritmusokat használva válik lehetővé az interferométer kimeneti jelének feldolgozása során a hamis jelek elvetése. Mivel az Einstein Teleszkópot (ET) az 1–30 Hz közötti frekvenciaintervallumba eső jelek detektálására tervezik, ki kell terjeszteni a hanghullámok detektálását a 10 Hz alatti tartományokra is. Ez már a hallható hangok frekvenciaintervallumának alsó határánál (20 Hz) is kisebb frekvenciájú, úgynevezett infrahangok frekvenciatartománya, megfelelő pontosságú mérésük a speciális körülményekhez kifejlesztett infrahang mikrofonokkal válik lehetővé.

Az említett zajhatásokon túl az infrahangok is hozzájárulhatnak a gravitációshullám detektorok ún. gravitációs gradi-

ens zajához, ugyanis az interferométer közelében mozgó anyagok fluktuációkat keltenek a newtoni gravitációs térben, ami módosíthatja az interferométer tükreinek pozícióját. Habár ezt a hatást elméleti módszerekkel intenzíven vizsgálták [33, 34], megfelelő detektorokkal végzendő új mérések szükségesek az infrahangok gravitációshullám-detektorokra gyakorolt hatásainak vizsgálatához.

6.1. Infrahang-monitorozó rendszer

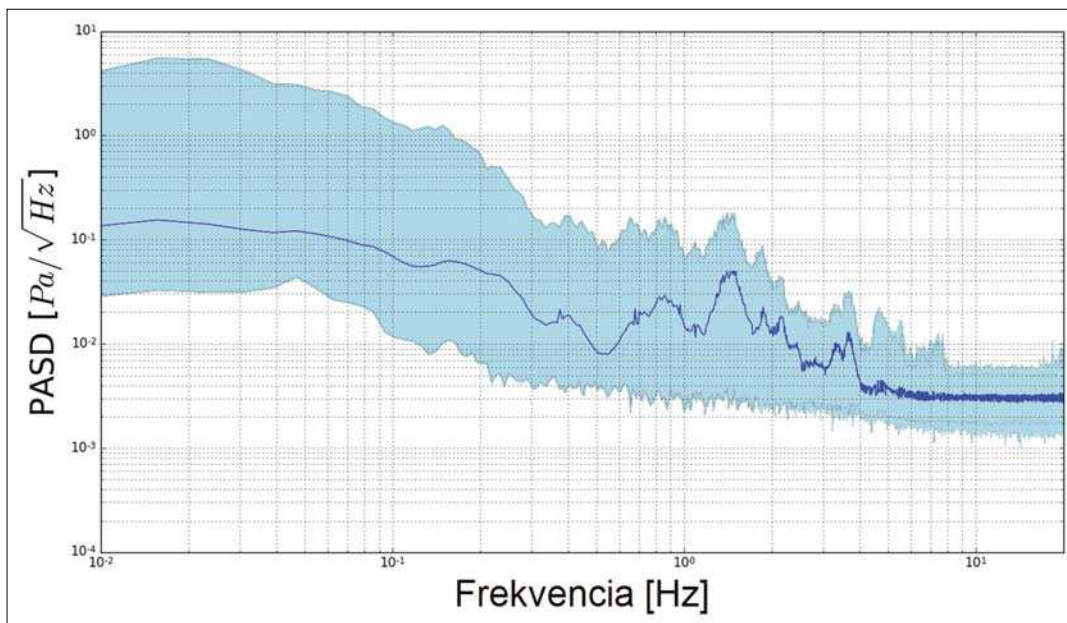
Az MTA ATOMKI (Debrecen) munkatársai kifejlesztettek egy új infrahang-monitorozó rendszert annak érdekében, hogy a gravitációshullám-detektorok környezetében megfelelő pontossággal lehessen mérni az infrahang háttérét. A rendszer egy kondenzátormikrofonból, valamint az ehhez tartozó adatgyűjtőrendszerből áll. Az eszköz akár 1 mPa nagyságrendű nyomásváltozást is tud detektálni a 10 mHz – 10 Hz-es frekvenciatartományban.

A mikrofon működési elvét tekintve egy kondenzátormikrofon, amelynek a referenciaterfogatót egy flexibilis diafragma (a kondenzátor egyik fegyverzete) választja el a külső környezettől [35]. A referenciaterfogató egy vékony kapillárison keresztül közvetlenül is össze van kötve a külső környezettel. Ha változik a külső nyomás és a referenciaterfogató közötti különbség, akkor a diafragma elmozdul. Ezeket a rezgéseket a mikrofonban egy szenzor analóg elektromos jellé alakítja. Az analóg jelet 1024 Hz-es mintavételezési frekvenciával digitális jellé alakítva a nyomáshullámok amplitúdójával egyenesen arányos amplitúdójú jelsorozatot kapunk.

Az analóg jeleket egy 16 bites analóg–digitális átalakító (ADC) és egy mikrokontroller alakítja át digitális jellé, melyből egy univerzális aszinkron adó/vevő (UART) egység az RS485 szabványnak megfelelő digitális jelet állít elő és küld tovább egy digitális–analóg átalakítóknak. A digitális jelből a digitális–analóg átalakító egyrészt visszaállítja az analóg jelet, másrészt továbbítja az eredeti digitális jelet is az RS485 szabvány szerint egy átalakítóknak, amely az RS485 szabványos jelet USB jellé alakítja át. Az USB jelet egy Raspberry Pi számítógépen futó szoftver egy SD kártyára gyűjti [36]. A szoftver időbélyeggel is ellátja a jelet. Az időbélyegeket egy, a Raspberry Pi-n futó hálózati időprotokoll (angolul Network Time Protocol, NTP) kliens szoftver szolgáltatja. Az adatok bináris formátumú fájlban tárolódnak, egy fájl egy napi adatmennyiséget foglal magában. A fájlok interneten keresztül tölthetők le az SD kártyáról.

6.2. Adatfeldolgozás és eredmények

Az infrahang-monitorozó rendszer telepítése a Mátra Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumba (MGGL) egyrészt lehetővé tette a rendszer képességeinek vizsgálatát, másrészt az általa gyűjtött adatokkal lehetővé vált az Einstein Teleszkóp egyik potenciális helyszínén az infrahangháttér vizsgálata is. A 2016. június 16-tól augusztus 21-ig tartó mérési időszak adatai feldolgozásának kezdőlépéseként az



9. ábra Az MGGL RUN-0 adatgyűjtési szakaszában mért, az infrahang háttérrel jellemző reprezentatív nyomásamplitúdó spektrálsűrűség. A színezett régiót a 10. és a 90. percentilisek határolják, a móduszt (az adott frekvenciának megfelelő leggyakoribb értéket) folyamatos vonal jelöli

Figure 9 Representative pressure amplitude spectral density (PASD) of low-frequency pressure waves registered by the infrasound monitoring system in RUN-0 data collection of MGGL. The transparent color region are bounded by the 90 and 10 percentiles, whereas the solid curve represent the mode, or most common PASD value corresponding to a given frequency

SD kártyáról interneten keresztül letöltött adatokat CSV formátumú fájlra konvertáltuk. A konvertálás során az adatok mintavételezési frekvenciáját 256 Hz-re csökkentettük. Az infrahangháttérrel jellemző egyik mennyiség a nyomásamplitúdó-spektrálsűrűség (Pressure Amplitude Spectral Density, PASD), amely megadja az infrahangnak egy adott frekvenciához tartozó erősségét. A mérési időszak alatt reaktív munkák zajlottak a bányában, emiatt minden napnak csak az első hét órájában gyűjtött adatokat használtuk fel az időszakot jellemző reprezentatív nyomásamplitúdó-spektrálsűrűség (PASD) kiszámítására.

A Beker és mtsai [6] cikkében ismertetett módszert alkalmaztuk a számítás során MatLab és Python szoftverekben implementálva. A teljes mérési intervallumot egymástól elkülönülő 1792 s hosszúságú szegmensekre osztottuk, és minden egyes szegmensre kiszámítottuk az ahhoz tartozó átlagos PASD-t, majd a frekvencia-PASD értékpárokat CSV fájlokban tároltuk el. Ezután az összes szegmens PASD-adatából minden egyes frekvenciaértékhez gyűjtöttük az adott frekvenciához tartozó PASD-értéket, majd kiszámítottuk az adatok móduszt, valamint a 10. és 90. percentiliseket is (9. ábra). Az infrahangforrások azonosítása még folyamatban van. Az ábrán látható kiugró értékek feltehetően a bánya járatszerkezetéből adódó rezonanciáknak tulajdoníthatóak, ennek a feltételezésnek az igazolására további mérések előkészítését kezdtük meg. A járatok több szakaszán tervezünk elhelyezni több mikrofonból álló, továbbfejlesztett infrahang-monitorozó rendszereket. Az Einstein Teleszkóp járatai geometriájának megfelelő megválasztásával a megfigyelt rezonanciák feltehetően kiküszöbölhetőek.

7. Elektromágneses mérések

Az MGGL környezetének átfogó geofizikai vizsgálata magában foglalja a helyszínen jellemző elektromágneses háttérzaj vizsgálatát is. Ez egyfelől audiofrekvenciás magnetotellurikus mérések kivitelezését és feldolgozását jelenti az elektromos vezetőképesség helyi, felszín alatti, térbeli eloszlásának megismerése és modellezése céljából, másrészt egy hosszú távú, indukciós alapú elektromágneses háttérzaj-monitorozást foglal magában az ULF – alsó ELF periódustartományban. Az elektromágneses mérések során felhasznált hardver és szoftver eszközöket a következő szakaszban mutatjuk be.

7.1. Elektromágneses háttérzajvizsgálat

A tervezett gravitációshullám-detektor tekintetében az elektromágneses környezeti zaj a spektrum alsó ELF tartománya, azon belül is az 1–20 Hz tartomány vizsgálata kiemelt fontosságú. A természetes, illetve mesterséges forrásokból eredő elektromágneses jelek felszín alatti terjedési tulajdonságainak pontos modellezése ugyancsak elengedhetetlen a tervezett gravitációshullám-detektor érzékenységének maradéktalan biztosítása szempontjából.

A szóban forgó frekvenciatartományban a természetes elektromágneses háttér alapvetően meteorológiai jelenségekre vezethető vissza. A Föld különböző területein időben váltakozva kialakuló aktív zivatarzónák a szilárd Föld és az ionoszféra által meghatározott elektromágneses rezonátor folytonos gerjesztése során – diszkrét periódusokon – az ún. Schumann-frekvenciákon észlelhető háttérjellet eredményez.

nyez. A rezonátor sajátfrekvenciáinak időbeli és térbeli átlagértékei 7,83, 14,1, 20,3 Hz stb. A magasabb frekvenciájú Schumann-komponensek észlelése mesterséges elektromágneses zajok esetében csak rendkívül csendes körülmények között detektálhatók.

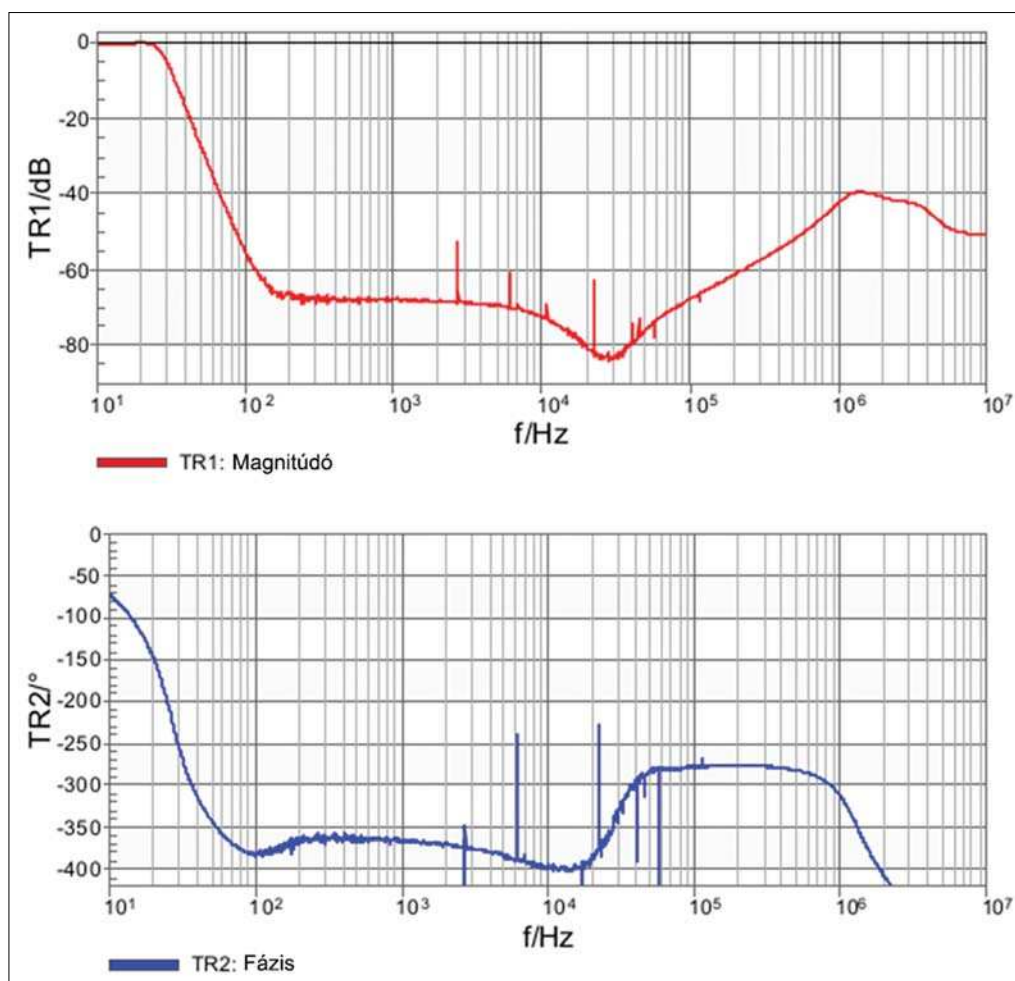
A globális zivatartevékenység következtében a felszínen mindenütt, diszkrét frekvenciákon folytonosan jelen lévő elektromágneses háttér mellett a detektálás helyszínének környezetében bekövetkező egyedi villámkisülések néhány ms hosszúságú, széles sávú transziensei is detektálhatóak. Ez utóbbiakat azonban a szűkebb környezet pillanatnyi meteorológiai viszonyai határozzák meg.

A gravitációshullám-detektor tervezett jövőbeli, mélybeli helyszíne, valamint a felszín közötti összlet elektromágneses átvitelének meghatározására legalább három állomásból álló megfigyelőrendszer telepítése szükséges. A felszíni és a mélybeli állomások egymással és egy távoli referenciaállomással szinkronban legalább 500 Hz mintavételi frekvencia mellett rögzítik a horizontális irányítottágú indukciós szondák kimeneti jelét. A távoli állomás lehetővé teszi, hogy a lokális eredetű, mesterséges forrásból származó összetevőket kiszűrjük az átvitel meghatározása során, amennyiben a természetes és a lokális eredetű jelkomponensek aránya ezt

lehetővé teszi. A csillapítási függvény pontosabb meghatározása érdekében a felszíni állomást a Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézete piszkés-tetői megfigyelőállomása területén került telepítésre. Az állomás és a Laboratórium közötti távolság légvonalban kb. 15 km. A ULF–alsó ELF tartományba eső természetes geomágneses variációk ezen a térbeli térbeli skálán homogénnek tekinthetők hasonló indukált járulék feltételezése mellett. A spektrális összehasonlító vizsgálat alacsony környezeti zajterhelés mellett célravezető módszernek bizonyulhat.

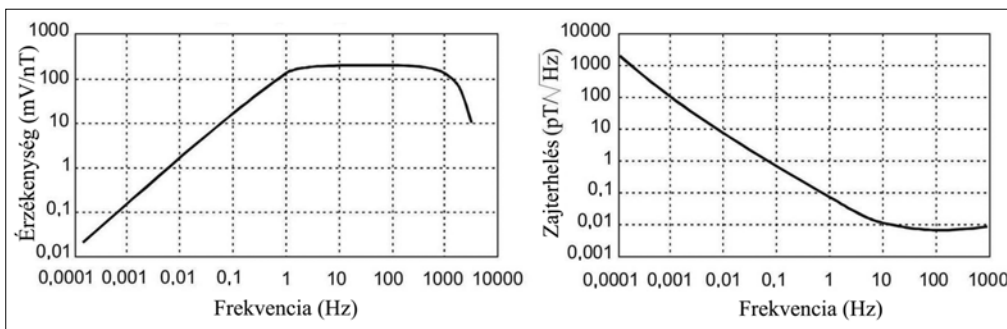
7.1.1. Szenzorok és az adatgyűjtőrendszer

Az adatgyűjtőrendszer alapját egy Raspberry Pi mikroszámítógép és az ehhez kapcsolódó két darab AD-konverter képezi, melyek analóg szűrőáramkörök illesztésével kapcsolódnak a Lemi-120 típusú indukciós tekercsekhez. A tekercsek egymásra merőlegesen, a horizontális síkban helyezkednek el. A közvetlen összehasonlíthatóság végett a felszíni szenzorok orientációja igazodik a Laboratórium geometriája által szabott feltételekhez, s a mélybeli szondákkal megegyező irányú.



10. ábra Az aluláteresztő szűrő átviteli karakterisztikája (kalibrációs mérés eredménye)

Figure 10 Transfer function of the lowpass-filter circuit (calibration measurement results)



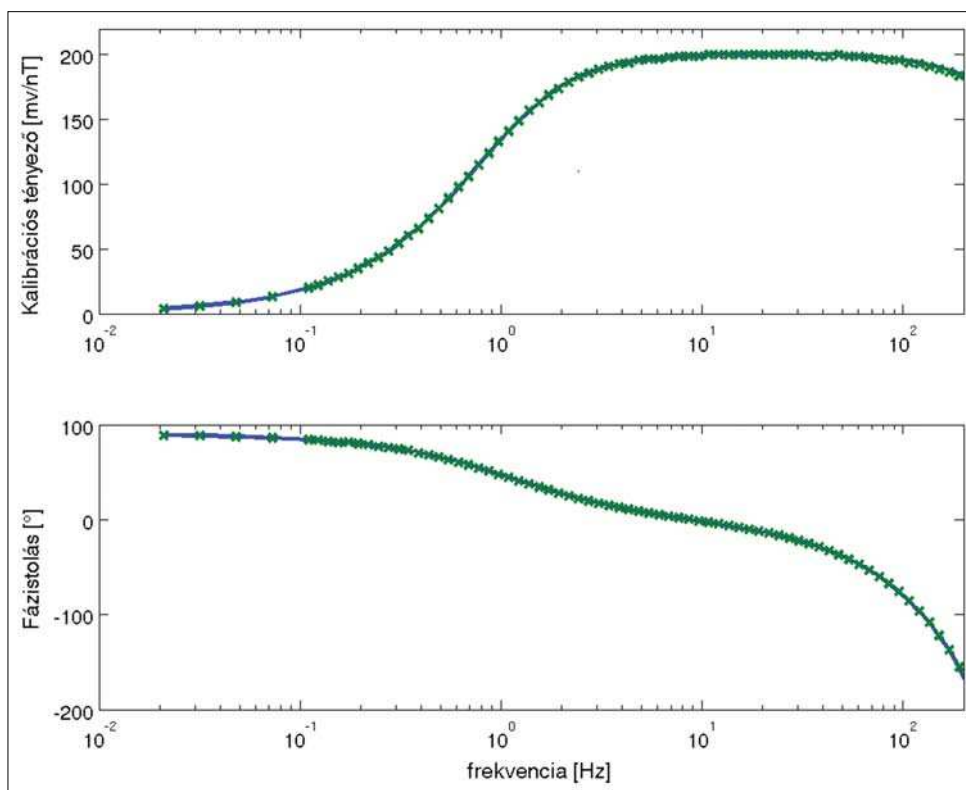
11. ábra | A Lemi-120 indukciós szondák érzékenysége és zajkarakterisztikája (gyári adat)
Figure 11 | Sensitivity and noise characteristics of Lemi-120 induction magnetometer (factory datasheet)

A komponensek rövid ismertetése:

1) *Adatgyűjtő hardver/szoftver*: Egy Raspberry Pi számítógép valós idejű Linux kernellel (RTOS), amelyen egy C nyelven írt program fut valós idejű feladatütemező kezelésében (real-time process scheduler). Ez a program egy soros interfészen (I2C) keresztül kommunikál a külső AD-konverterekkel, indítja a mintavételt, beolvassa a konverzió eredményét, szükség esetén állítja az AD-konverterben lévő erősítő (programmable gain amplifier – PGA) erősítési tényezőjét és utólagos skálázást végez a nyers adatok fizikai mennyiséggé történő konverziójához. Az adatok archiválása hatékony bináris fájlformátumban (NETCDF) történik. Az

időbélyeg pontosságát és ezáltal mért adatok globális felhasználásának lehetőségét az NTP (Network Time Protocol) garantálja.

2) *Az AD-konverter*: Az analóg adatok digitalizálására egy 16 bites SAR típusú AD-konvertert építettünk be, ennek típusa ADS1115, amely differenciális bemenettel rendelkezik és széles bemeneti tartományával jellemezhető. Az indukciós tekercsek jele az AD-konverterbe lépés előtt több szűrőn halad keresztül, az egyik ilyen szűrőpár egy ún. Anti Aliasing Filter (AAF), azaz egy aluláteresztő szűrő a Nyquist-frekvenciára hangolva, a tükrörfrekvenciákat eltávolítása céljából. Ezen felül az AD-konverterbe épített digi-



12. ábra | A Laboratóriumban telepített Lemi-120 mágneses szondák amplitúdó- és fázisátvitele. A zöld markerek az N650 sorozatszámú szonda karakterisztikájának diszkrét pontjait jelölik (KÉK irányú), míg a kék görbe az N649-es szondára vonatkozik (ÉÉNY irányú)
Figure 12 | Transfer function of the Lemi-120 serial number N649 and N650 induction coils installed in the MGGL. Green dots represents the transformation factor of the N650 sensor, while the blue curve is linear interpolation of the characteristic markers of N649 sensor

tális szűrő is segíti elnyomni a nem kívánatos magas frekvenciákat, amely egy ún. periodikus lyukszűrő (periodic notch filter).

3) *Szűrők.* A laboratóriumi környezet, valamint az elhelyezett mérőműszerek tápellátása révén jelentős, hálózati frekvencián és annak páratlan felharmonikusain megjelenő háttérzajhoz szabott szűrő alkalmazása vált szükségessé. E célból egy egy ötödrendű -100 dB/dekád meredekségű, 28 Hz-re hangolt törési frekvenciával rendelkező szűrőt fejlesztettünk ki. Az említett határfrekvencia a Schumann-hullámok 4. felharmonikusával esik egybe. Az alkalmazott „switched capacitor” elvű szűrést az LTC1062 modul valósítja meg, LTC1799 oszcillátorral párosítva. A szűrő és az AD-konverter közötti impedanciaillesztést egy alacsony ofszetfeszültségű LT2051 műveleti erősítő biztosítja. A szűrők átviteli karakterisztikáját széles sávban a 10. ábra mutatja. A 30 kHz után emelkedő átvitel nem releváns, az AD-konverter itt már erősen csillapít. Ez a differenciális szűrőfokozat az 50 Hz-es csúcsot 30 dB-lel csillapítja a 28 Hz-es frekvencia amplitúdójához képest.

4) *A szenzorok.* Az elektromágneses háttérzaj vizsgálatához szükséges megfigyelés során az ULF–ELF tartománybeli geomágneses variációk detektálására Lemi-120, nagyon alacsony saját zajszinttel és nagy dinamikatarománnyal rendelkező indukciós tekercseket telepítettünk. A szondák érzékenysége és zajkarakterisztikája a 11. ábrán látható. A szenzor zajszintje a szélesebb fókusz tartományban is $0,1$ pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ alatt marad.

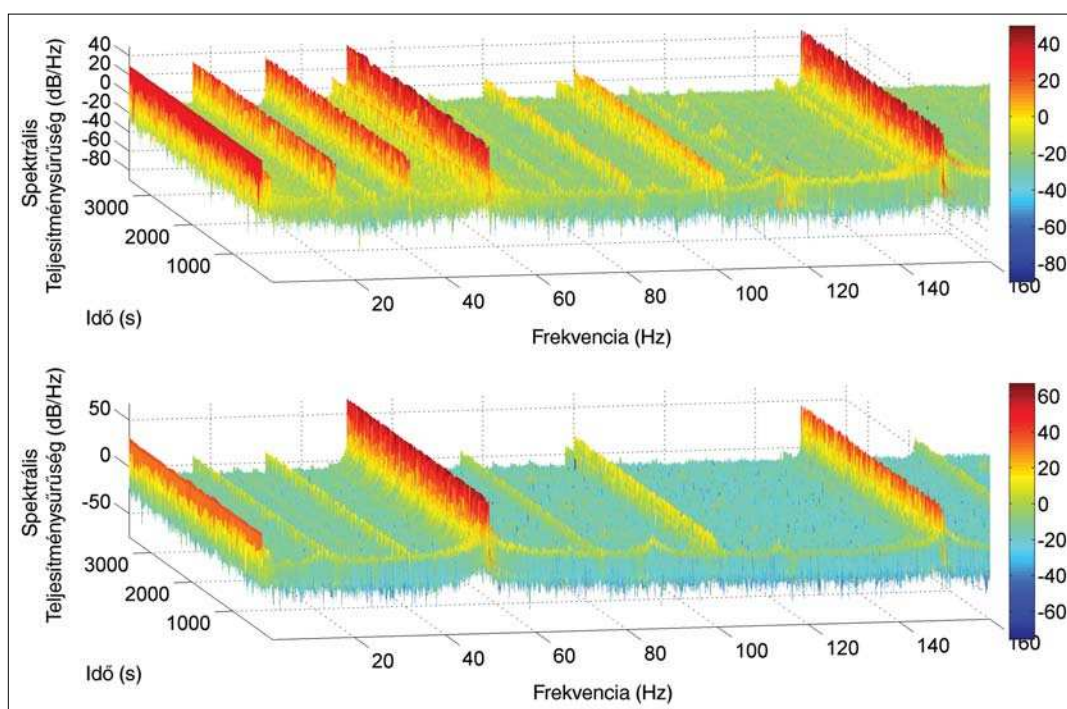
A Laboratóriumban telepített Lemi-120 mágneses szondák amplitúdó- és fázisátvitele a 12. ábrán látható. A zöld markerek az N650 sorozatszámú szonda karakterisztikáját jelölik, melyek 1% hibán belül illeszkednek az N649 sorozatszámú szonda jelleggörbéjére (kék színű).

A Laboratóriumban 30 cm-es homokágyakra helyeztük az indukciós tekercseket a mikroszeizmikus zajok csatolásának elkerülése/csökkentése céljából. A felszínen elhelyezett indukciós szenzorokat 50 cm mélységben telepítettük ki a szél által keltett mikroszeizmikus zavarok csillapítása érdekében. A közvetlen összehasonlíthatóság érdekében a felszíni szondák pozícionálása szempontjából a laboratóriumi koordináta-rendszert tekintettük meghatározónak. A két állomáson üzembe helyezett megfigyelőállomás hardver- és szoftverösszetevői is teljesen megegyeznek.

7.1.2. Eredmények

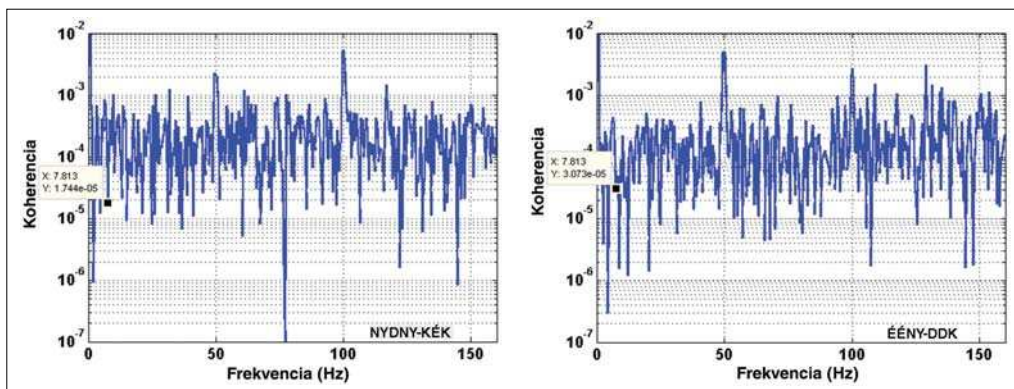
A Laboratóriumban rögzített elektromágneses háttérzaj spektrális vizsgálata az előre számítottnál is jelentősen nagyobb teljesítményű hálózati frekvenciához köthető spektrális komponensek jelenlétét igazolta, lásd 13. ábra. A dinamikus spektrum alapján kijelenthető, hogy a helyszínen jelentős 50 , 100 és 150 Hz-es frekvenciájú, a hálózati villamosenergia-ellátáshoz köthető háttérzaj folytonosan jelen van. 16 és 32 Hz-en szintén folytonos, de alacsonyabb szórt teljesítmény detektálható. Ez utóbbiak elektromágneses zajforrása a bányában folyamatosan működtetett vízvivattyú.

A legalacsonyabb frekvenciájú Schumann-komponenst $7,83$ Hz-en detektálható alacsony mesterséges forrásból



13. ábra A Laboratóriumban jellemző elektromágneses dinamikus spektrum az ÉÉNY (felső ábra) és a KÉK irányban (alsó ábra)

Figure 13 Characteristic dynamic spectra of the north north-west oriented sensor (upper panel) and the east east-north oriented sensor (lower panel) installed in the MGGL



14. ábra Reprezentatív felszín – MGGL koherenciafüggvény két iránynak megfelelően (bal és jobb oldali ábra)
Figure 14 Magnitude – square coherence of the time series recorded at the MGGL and surface stations in the east-north-east (left panel) and the north-north-west (right panel) directed sensors

származó elektromágneses háttér teljesülése mellett találunk. A frekvencia kismértékű periodikus ingadozásait a rezonátor geometriájának hasonló periódusokhoz köthető módosulásai okozzák. A felszíni és a mélybeli adatok koherenciavizsgálata révén megállapítható volt, hogy az adott helyszín, mérési geometria, illetve a lokális villamos energiaelosztó hálózati topológia mellett, valamint a 16 bites AD-konverzió által biztosított felbontás alkalmazása nem teszi lehetővé, hogy a természetes eredetű spektrális komponenseket azonosítsuk a horizontális síkban, lásd *14. ábra*. A szondák áthelyezése a villamos tápkábelek közvetlen környezetéből, valamint 24 bites AD konverzió alkalmazása várhatólag jelentős javulást eredményez a természetes elektromágneses komponenseken alapuló elektromágneses átviteli függvényének méréssel történő megbecslésében.

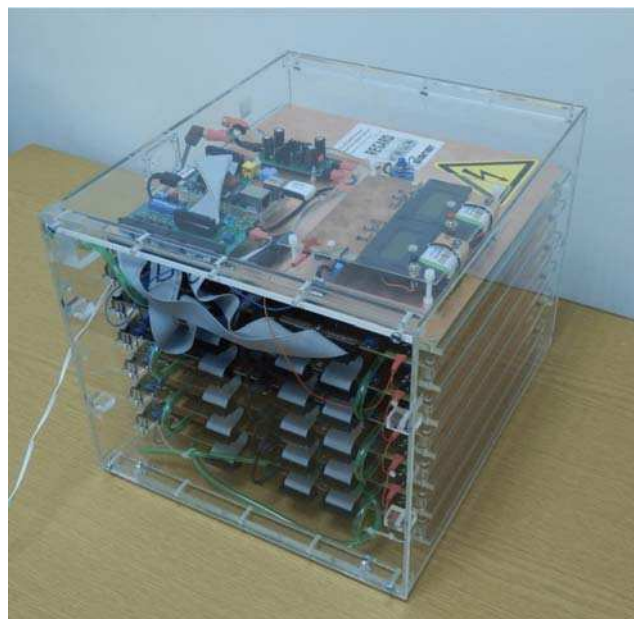
8. Nagyskálás közetsűrűség-inhomogenitások mérése a kozmikus müonok nyomkövetésével

A kozmikus eredetű müonok eljutnak a Föld felszínére is. Egy föld alatt elhelyezett detektorral megmérhetjük ezeknek a részecskének a fluxusát, és feltárhatjuk a detektor feletti kőzet nagyskálás inhomogenitásait. Ezt az eljárást föld alatti barlangi üregek kutatására és fizikai kísérletek kozmikus részecskék keltette háttér mérésére alkalmaztuk korábban [38–42]. Jelen cikkben demonstráljuk a módszer alkalmazhatóságát az MGGL feletti Mátra hegység nagyskálás közetsűrűség-inhomogenitásainak feltárására is.

A kozmikus müonok energiavesztésének (elnyelődésnek) figyelembevételével kiszámolható a fluxus, ha nem túl vastag (≤ 100 m) a kőzetréteg felette. A mért fluxus információt hordoz a detektor feletti kőzet sűrűség-hosszáról (átlagos sűrűség \times hosszúság), hasonlóan ahogy a röntgenberendezés információt nyújt a kis méretű (< 1 m) testek belső szerkezetéről. A kőzetvastagság geodéziai mérésekkel határozható meg, ezután a kozmikus müonok fluxusának mérésével kiszámíthatjuk a nagyskálás sűrűséginhomogenitásokat. Méréseink célja a fluxus és ezáltal a közetsűrűség-inhomogenitások meghatározása volt az MGGL feletti 2π térszögben.

8.1. Hordozható müondetektor környezeti alkalmazásai

Az MTA Lendület Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoport (MTA Wigner FK) kifejlesztett egy hordozható, terepi mérésekre optimalizált müondetektort, a REGARD Müonotomográfot [38–40]. A detektorrendszer a sokszálas gáztöltésű részecskedetektorok egyik új fajtáján, az ún. közeli katódos kamrán (Close Cathode Chamber, CCC) alapul [43, 44]. A detektorrendszer a kozmikus müonok nyomát hat, párhuzamosan egymás alatt 3,5 centiméterenként elhelyezett, 25 cm \times 25 cm méretű CCC segítségével méri. A kamrák egy 37 \times 33 \times 27 cm³ méretű plexidobozban vannak elhelyezve, ami mechanikai stabilitást nyújt és védi a detektorrendszert a külső, változó hőmérsékletű és páratartalmú környezettől. A kamrák 1,5 mm pontossággal mérik meg a



15. ábra A hat közeli katódos kamrából (CCC) felépülő hordozható müondetektor fényképe [41]

Figure 15 The portable muon telescope consisting of six Close Cathode Chamber tracking layers [41]

rajtuk áthaladó részecskék pályájának helyét, ezáltal kb. 1° precizitással adható meg a kozmikus müonok iránya.

A detektorrendszeren Ar-CO₂ gázok (82:18 arányú) környezetbarát, nem gyúlékony keverékét áramoltatjuk át folyamatosan. Az kamrák felett elhelyezett adatgyűjtő (Data Acquisition, DAQ) rendszert Raspberry Pi miniszámítógép [36] vezérli (lásd 15. ábra) [41]. Az integrált DAQ rendszer látja el az elektronikákat és a CCC kamrákat kis- ill. nagyfeszültséggel, triggereli az adatfelvételt és az adattovábbítást, illetve a tárolását is maga végzi. Az egyes kamrákon mért részecskepálya-koordinátákat, az események idejét és a triggerinformációkat egy 16 GB-os SD kártyán tárolja el a DAQ rendszer. A detektorrendszer teljes fogyasztása 6 W.

A gáz fogyasztása is csekély, egy 10 literes, 150 bar nyomású palackról kb. 2 hónapig megfelelően üzemel a berendezés.

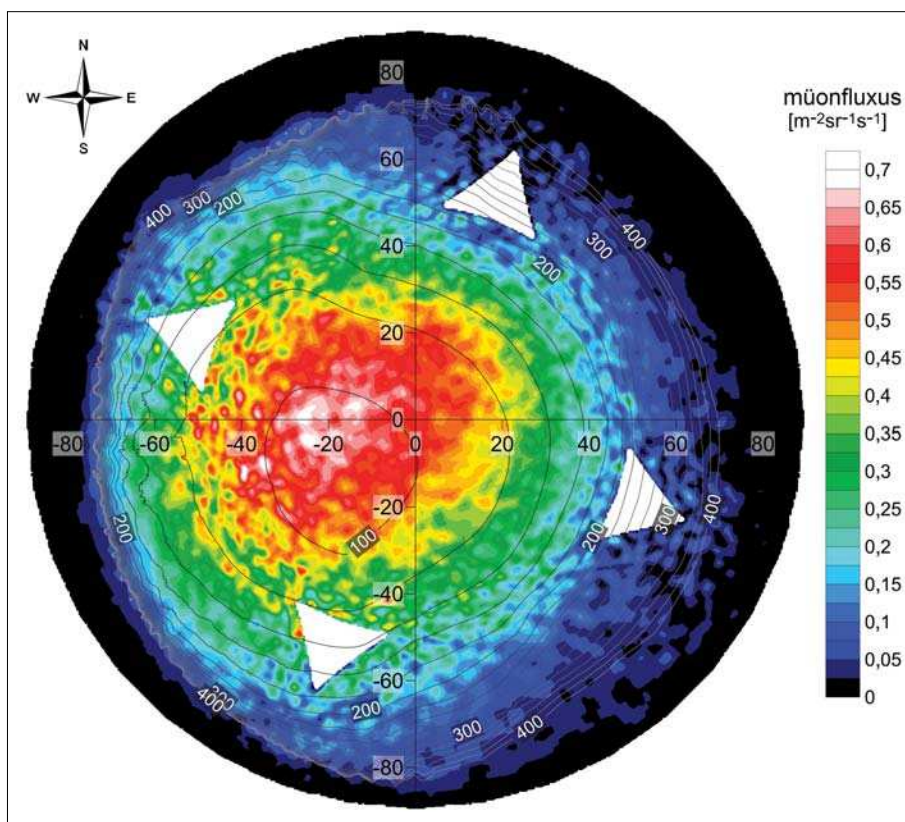
8.2. A kozmikus müonok fluxusának mérése az MGGL-ben

A detektort az MGGL ÉNy-i sarkában helyeztük el, és három különböző irányú méréssel (lásd 2. táblázat) lefedtük a teljes térszög felső felét. Az első, 48,3 nap időtartamú mérés során a detektor a függőleges 0° és vízszintes $\text{ÉK } 66,5^\circ$ irányba volt pozicionálva. A második, 41,9 nap időtartamú

2. táblázat Az első, gyöngyösoroszi bányában a Müontomográfal végzett mérési periódus összefoglaló adatai: a detektor vízszintes iránya É-hoz képest, a detektor döntésének szöge a függőleges iránytól, mérések időtartama, felvett események száma, rekonstruált részecskepályák száma

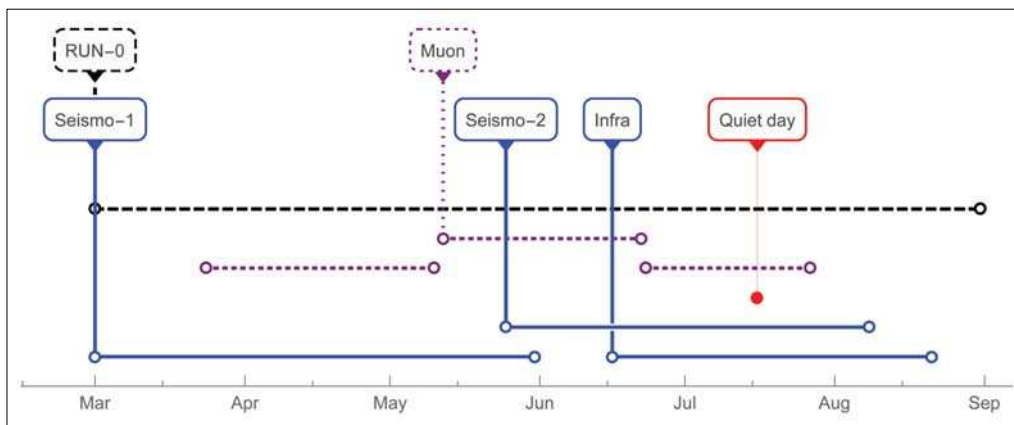
Table 2 The summary table of the RUN-0 data collection by the muon tomograph of MGGL in Gyöngyösoroszi mine: the detector principal direction to the magnetic north and in zenith, the duration of the measurements, number of events, and the number of measured muon tracks

Mérés száma	Irány ($^\circ$)	Döntés ($^\circ$)	Időtartam (nap)	Események száma	Részecskepályák száma
Run-0-M2	zenit	0	48,3	4,7 M	111,700
Run-0-M3	ENE (65,5)	90	41,9	2,4 M	18,124
Run-0-M4	NNW (335.5)	90	34,5	3,1 M	12,356



16. ábra A kozmikus müonok fluxustérképe a vízszintes és függőleges irányok függvényében ábrázolva. Színskálás kontúrok mutatják a fluxust, fekete kontúrvonalak jelölik a detektor feletti közet vastagságát

Figure 16 The cosmic muon flux map measured in MGGL is plotted as a function of azimuth and zenith angles from the detector position. Color-scale contours show the muon flux, dark contour lines show the detector-to-surface distance in meters



17. ábra | Az MGGL különféle berendezéseinek kiértékelt időszakai RUN-0 adatgyűjtés során

Figure 17 | The timeline of the different instruments of MGGL during RUN-0 data collection

mérés során a detektor vízszintes iránya azonos volt az elsővel, azonban 90 fokkal volt megdőntve a függőleges irányhoz képest. A harmadik, 34,5 időtartamú mérés során a detektor szintén 90 fokkal volt megdőntve a függőleges irányhoz képest, és DNY 335 fokban a vízszintes irány felé volt pozicionálva. Minden mérés ± 50 fokos szögterületet fedett le a függőleges és vízszintes irányban is, tehát a három különböző orientációjú mérés átfedésben volt egymással. A mérési adatokat Ethernet-kapcsolaton keresztül töltöttük le a detektorról a mérési periódus alatt a detektor működésének ellenőrzése céljából. A mérések során az időzítést a hálózati időprotokoll (NTP) biztosította.

8.3. A kőzetinhomogenitás-mérések eredménye

A mérési adatok elemzését nagyenergiás fizikában alkalmazott módszerekkel végeztük. A rekonstruált részecskepályák irányfüggésének, statisztikájának, a detektor geometriájának és határfokának figyelembevételével kiszámoltuk az egyes mérésekre a kozmikus müonok fluxusát. Ezután a különböző orientációjú méréseket összefésülve és az átfedő részeket a statisztikus hibákkal súlyozva kombináltuk. A fluxustérkép a 16. ábrán látható, ahol a kozmikus müonok fluxusát színskálás kontúrok jelölik. A három különböző mérés során a müonok tipikusan 0,005–0,02 Hz gyakorisággal érkeztek, ez 5–50%, a függőleges iránytól függő statisztikus hibát eredményezett. A mért fluxus maximuma nyugati vízszintes és 20° függőleges irányban $0,7 \text{ m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}$ volt. A detektor feletti kőzet vastagságát a fekete kontúrvonalak jelölik, az értékek tipikus hibája 5% (5 m függőleges irányban). A 16. ábrán fehér nyilak jelölik a detektor irányítottságát a mérések során.

A 16. ábrán jól látható, hogy a mért fluxust jelölő kontúrok követik a kőzetvastagságot mutató kontúrvonalakat, azaz korrelálnak egymással. A jelenlegi statisztika a kőzetvastagság 10–15 m pontosságú meghatározására alkalmas. E széles tartományban nem láthatók nagy léptékű sűrűséginhomogenitások vagy üregek az MGGL felett. A sűrűség pontosabb meghatározásának céljából azonban további méréseket tervezünk.

9. Összefoglalás és következtetések

A berendezéseink tesztidőszak alatt mért adatainak komplex és korrelált összevetését korlátozza az, hogy az adatgyűjtés a különböző műszereken még nem volt szinkronizálva és a műszerek ritkán mértek egyszerre. A 2017-re tervezett következő (RUN-1) adatgyűjtési időszakban folyamatos párhuzamos adatgyűjtést tervezünk az összes telepített berendezésünkről. Ennek segítségével részletesebben azonosíthatjuk az alacsony frekvenciás zajforrásokat, illetve a földalatti telepítés hatását.

Az MGGL-ben mért zaj spektrumát a közeli Piskés-tetőn található szeizmológiai állomás adataival összehasonlítva megmutattuk, hogy az MGGL környezete a vizsgált frekvenciatartományban sokkal csendesebb a felszínnél (4., 5. ábra). Ahogy a bevezetőben említettük, az Einstein Teleszkóp előzetes helyszínelválasztási mérései a gyöngyöSOROSZI mélyművelésű bányát a vizsgált helyszínek közül az egyik legcsendesebbnek találták [3, 5]. Ezek a vizsgálatok a bányában két mérőhelyen zajlottak és 3,5 napig tartottak. A kettő közül a felszínhez közelebbi mérőhely 1435 m-re van a bejáratától, 150 m-re a laboratóriumunktól. Ennek a mérésnek az eredményei – a mi Guralp berendezésünkkel regisztrált mérésekkel összevetve – kisebb zajszintet mutatnak a kritikus frekvenciatartományban. A lengyel kutatócsoport szenzorával mért hasonló adatok kisebb különbségre utalnak. 2016. július 16-án egy speciálisan szervezett csendes napot tartottunk, amikor a vízszivattyúzás és a rekultivációs munkák szüneteltek. Ennek a napnak a zajszintje meglepő módon közel van a többi „normális” nap zajszintjéhez, ahogy az a 8. ábrán látható.

Az említett előkészítő mérésben az elmozdulásspektrum időre és a 2 Hz feletti frekvenciákra integrált zajának négyzetes átlagszintjét használták a különböző helyszínek összehasonlítására [6]. Az MGGL RUN-0 adatgyűjtése alatt a Guralp szeizmométer adatai a csendes időszakokban hasonló értékeket mutattak, mint az előkészítő mérés felszínhez közelebbi mérőhelye. További vizsgálataink legfontosabb célja a különböző természetes és emberi eredetű zaj-

források azonosítása, Naticchioni és mtsai munkájában [45] leírtakhoz hasonlóan.

A szeizmikus zajszintnél relatíve magasabb infrahangszint (lásd 9. ábra) arra utalhat, hogy a bányában zajló emberi tevékenység a gravitációs hullámok szempontjából érdekes frekvenciatarományban nem zavar be és/vagy nem terjed a közetkörnyezetben.

A laboratórium méréseihez tartozik még a környezet elektromágneses zajainak vizsgálata is. Az eddigi méréseink magas elektromágneses zajszintet mutatnak, ami nem teszi lehetővé a természetes zajok megbízható meghatározását a szűrés hatékonyságának növelése nélkül. Ennek műszeres megvalósítása, illetve a szintén tervezett magnetotellurikus vizsgálatok műszerezettségének kiépítése folyamatban van.

A jelenlegi adataink alapján az MGGL müonfluxus-mérései homogén tömegeloszlású közetkörnyezetet jeleznek a laboratórium felett 10–15 m-es felbontásban, a zenithez mért szögtől függően.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük a Nitrokémia Zrt. támogatását és hozzájárulását, különösen Várad Árpád és Rofrits Vilmos részéről. Szintén köszönjük a Geofaber Zrt. munkáját és Noa Mitsui észrevételeit.

Ezt a kutatást az MTA EUHUNKP pályázata támogatta. VP és KR munkáját a következő OTKA és NKFIA pályázatok segítették: K104260, K116197, K120660, NK106119 és K116375. TB, MC, MS, DR és TS tevékenységében a NCN Grant UMO-2013/01/ASPERA/ST9/00001 pályázat segített. A müonfluxus-méréseket az MTA LP2013-60 számú Lendület pályázata tette lehetővé. BGG és VM köszönik az MTA Bolyai kutatási pályázatának hozzájárulását, valamint a NewCompStar Cost action 1304 támogatását.

A tanulmány szerzői

Barnaföldi Gergely Gábor, Tomasz Bulik, Marek Cieslar, Dávid Ernő, Dobróka Mihály, Fenyvesi Edit, Dorota Gondek-Rosinska, Grácz Zoltán, Hamar Gergő, Huba Géza, Kis Árpád, Kovács Róbert, Lemperger István, Lévai Péter, Molnár József, Nagy Dávid, Novák Attila, Oláh László, Pázmándi Péter, Piri Dániel, Tomasz Starecki, Mariusz Suchenek, Surányi Gergely, Szalai Sándor, Varga Dezső, Vásúth Mátyás, Ván Péter, Vásárhelyi Balázs, Weszttergom Viktor, Wéber Zoltán

Hivatkozások

- [1] Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., Abernathy M. R., Acernese F., Ackley K., Adams C., Adams T., Addesso P., Adhikari R. X., et al. (2016): Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters* 116(6), 061102
- [2] Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., Abernathy M. R., Acernese F., Ackley K., Adams C., Adams T., Addesso P., Adhikari R. X., et al. (2016): Gw151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence. *Physical Review Letters* 116(24), 241103
- [3] ET Science Team. Einstein gravitational wave Telescope. Conceptual Design Study. Technical Report ET-0106C-10, June 2011. <http://www.et-gw.eu/etdsdocument>
- [4] Technical report. <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>
- [5] Beker M. G. (2013): Low-frequency sensitivity of next generation gravitational wave detectors. PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam
- [6] Beker M. G., van den Brand J. F. J., Rabeling D. S. (2015): Subterranean ground motion studies for the Einstein Telescope. *Classical and Quantum Gravity* 32(2), 025002
- [7] Barnaföldi G. G. et al. (2016): First report of long term measurements of the MGGL laboratory in the Mátra mountain range. arXiv:1610.07630
- [8] Földváry G.Z. (1988): *Geology of the Carpathian region*. Word Scientific Publ.
- [9] Hartai É. (2011): *Geológia – A magyarországi értelepek genetikai csoportosításában*. Miskolci Egyetem, Földtudományi Kar, tankönyv, TÁMOP.
- [10] Józsa V., Czap Z., Vásárhelyi B. (2015): Geotechnical design of an underground mine dam in Gyöngyösoroszi, Hungary. In G. Lollino et al. (eds), *Engineering Geology for Society and Territory*, Vol. 6, pp. 443–447. Springer Int. Publ.
- [11] Aki K., Richards P. G. (2002): *Quantitative Seismology*. University Science Books, Sausalito, California, 2nd ed.
- [12] Anderson D. L. (1989): *Theory of the Earth*. Blackwell
- [13] Scholz C. H. (2002): *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press, Cambridge, 2nd, 4th printing edn.
- [14] Matsuki K. (2008): Anelastic strain recovery compliance of rocks and its application to in situ stress measurement. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 45, 952–965
- [15] Lin W., Kuwahara Y., Satoh T., Shigematsu N., Kitagawa Y., Kiguchi T., Koizumi N. (2010): A case study of 3D stress orientation determination in Shikoku Island and Kii Peninsula, Japan. In: Ivan Vrkljan (ed.), *Rock Engineering in Difficult Ground Conditions (Soft Rock and Karst)*, pp 277–282, London, Balkema. *Proceedings of Eurock'09 Cavtat, Croatia, 2009*. X. 28–29.
- [16] Kovács L., Mészáros E., Deák F., Somodi G., Máté K., Jakab A., Vásárhelyi B., Geiger J., Dankó Gy., Korpai F., Mező Gy., Darvas K., Ván P., Fülöp T., Asszonyi Cs. (2012): *Geotechnikai értelmező jelentés (GÉJ) felülvizsgálata és kiterjesztése. Kézirat Irattár, Paks, RHK-K-032/12, RHK – Kőmérő Kft., Pécs*
- [17] Asszonyi Cs., Fülöp T., 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
- [18] Biot M. A. (1954): Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena. *Journal of Applied Physics* 25(11), 1385–1391
- [19] Kluitenberg G. A. (1962): Thermodynamical theory of elasticity and plasticity. *Physica* 28, 217–232
- [20] Matsuki K., Takeuchi K. (1993): Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 30, 1019–1022
- [21] Ván P., Szarka Z., Horváth R., Asszonyi Cs., Fülöp T. (2008): Reológiai alapmodellek és összekapcsolásuk. In: *Izotrop kontinuumok anyagtulajdonságai*, Asszonyi Cs. (szerk.), Mérnök-

- geológia-Közetmechanika Kiskönyvtár, 6. kötet, 2. fejezet, 51–92 o. Műegyetemi Kiadó, Budapest
- [22] Fülöp T. (2008): Reológiai elemkapcsolások. In: Izotrop kontinuumok anyagtulajdonságai, Asszonyi Cs. (szerk.), Műnökgeológia-Közetmechanika Kiskönyvtár, 6. kötet, 3. fejezet, 93–120 o. Műegyetemi Kiadó, Budapest
- [23] Fülöp T. (2009): Rugalmas és reológiai lineáris feladatok. In: Kontinuummechanika feladatok megoldásáról, Asszonyi Cs. (szerk.), Műnökgeológia-Közetmechanika Kiskönyvtár, 9. kötet, 1. fejezet, 11–51 o. Műegyetemi Kiadó, Budapest
- [24] Müller I., Ruggeri T. (1998): Rational Extended Thermodynamics. Springer Verlag, New York etc., 2nd edn.
- [25] Verhás J. (1985): Termodinamika és reológia. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [26] Verhás J. (1997): Thermodynamics and Rheology. Akadémiai Kiadó and Kluwer Academic Publisher, Budapest
- [27] Ván P., Fülöp T. (2012): Universality in heat conduction theory: weakly nonlocal thermodynamics. *Annalen der Physik* 524(8), 470–478, arXiv:1108.5589
- [28] Ván P. (2013): Thermodynamics of continua: The challenge of universality. In: Pilotelli M., Beretta G. P. (eds.), Proceedings of the 12th Joint European Thermodynamics Conference, pp. 228–233, Brescia. Cartolibreria SNOOPY. ISBN 978-88-89252-22-2, arXiv:1305.3582
- [29] Peterson J. (1993): Observations and modeling of seismic background noise. Open-File Report 93-322, USGS
- [30] Effler A., Schofield R. M. S., Frolov V. V., Gonzalez G., Kawabe K., Smith J. R., Birch J., McCarthy R. (2014): Environmental influences on the LIGO gravitational wave detectors during the 6th science run. arXiv:1409.5160v1
- [31] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration (2016): Characterization of transient noise in advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914. *Classical and Quantum Gravity*, 33(13), 134001
- [32] Martynov D. V., et al. (2016): The sensitivity of the advanced LIGO detectors at the beginning of gravitational wave astronomy. *Phys. Rev. D* 93, 112004, arXiv:1604.00439v2
- [33] Creighton T. (2008): Tumbleweeds and airborne gravitational noise sources for LIGO. *Class. Quant. Grav.* 25, 125011
- [34] Driggers J. C., Harms J., Adhikari R. X. (2012): Subtraction of Newtonian noise using optimized sensor arrays. *Physical Review D* 86, 102001
- [35] Whitaker R. W. (1995): Infrasonic monitoring. Los Alamos National Lab NM
- [36] <https://www.raspberrypi.org/> (last view 23/09/2016)
- [37] <https://agenda.infn.it/getFile.py/access?contribId=142&sessionId=5&res-Id=0&materialId=slides&confId=10512>
- [38] Barnaföldi G. G., et al. (2012): Portable cosmic muon telescope for environmental applications. *Nucl. Instrum. Meth.* A689, 60–69
- [39] Oláh L., et al. (2012): CCC-based muon telescope for examination of natural caves *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 1, 229–234
- [40] Oláh L., et al. (2013): Cosmic muon detection for geophysical applications. *Adv. High Energy Physics* V2013, 560192(7)
- [41] Oláh L., et al. (2015): Close Cathode Chamber technology for cosmic particle tracking. *Journal of Physics: Conference Series* 632, 012020
- [42] Oláh L., et al. (2016): Cosmic background measurements at a proposed underground laboratory by the REGARD muon tomograph. *Journal of Physics: Conference Series* 665, 012032
- [43] Varga D., et al. (2011): Asymmetric multi-wire proportional chamber with reduced requirements to mechanical precision. *Nucl. Instrum. Meth.* A648, 163–167
- [44] Varga D., et al. (2013): Close cathode chamber: Low material budget MWPC. *Nucl. Instrum. Meth.* A698, 11–18
- [45] Naticchioni L., Perciballi M., Ricci F., Coccia E., Malvezzi V., Acernese F., Barone F., Giordano G., Romano R., Punturo M., et al. (2014): Microseismic studies of an underground site for a new interferometric gravitational wave detector. *Classical and Quantum Gravity* 31(10), 105016