



1949

INTERFEROMETRIKUS GRAVITÁCIÓSHULLÁM- DETEKTOROK INFRAHANGZAJHÁTTERÉNEK VIZSGÁLATA

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Fenyvesi Edit

Témavezetők:

Dr. Trócsányi Zoltán

Dr. Molnár József

DEBRECENI EGYETEM

Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács

Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2021

Készült
a Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Fizikai módszerek interdiszciplináris kutatásokban programja keretében
az Atommagkutató Intézetben (Debrecen)
és a Wigner Fizikai Kutatóközpontban (Budapest)

A disszertáció az alábbi projektek támogatásával készült el:
a Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Hivatal NKFIH K124366 projektje,
a GINOP-2.2.1-15-2016-00012 számú projekt, mely az Európai Unió
támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap és Magyarország
Kormánya társfinanszírozásával a Széchenyi 2020 program keretében
valósult meg.

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács Fizikai Tudományok Doktori Iskola Interdiszciplináris programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi (PhD) fokozatának elnyerése céljából. Nyilatkozom arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.
Debrecen, 2021.....

Fenyvesi Edit
jelölt

Tanúsítom, hogy Fenyvesi Edit doktorjelölt 2011 - 2021 között a fent megnevezett doktori iskola Interdiszciplináris programjának keretében irányítással végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét. Az értekezés elfogadását javaslom.
Debrecen, 2021.

Dr. Trócsányi Zoltán
témavezető

Tanúsítom, hogy Fenyvesi Edit doktorjelölt 2014 - 2021 között a fent megnevezett doktori iskola Interdiszciplináris programjának keretében irányítással végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét. Az értekezés elfogadását javaslom.
Debrecen, 2021.

Dr. Molnár József
témavezető

INTERFEROMETRIKUS GRAVITÁCIÓSHULLÁM- DETEKTOROK INFRAHANGZAJHÁTTÉRÉNEK VIZSGÁLATA

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében
a fizika tudományágban

Írta: Fenyvesi Edit okleveles fizikus

Készült a Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskola
Interdiszciplináris programja keretében.

Témavezetők: Dr. Trócsányi Zoltán
Dr. Molnár József

A doktori szigorlati bizottság:

elnök: Dr. Kun Ferenc
tagok: Dr. Gulácsi Zsolt
Dr. Ódor Géza

A doktori szigorlat időpontja: 2021. április 7.

Az értekezés bírálói:

Dr.
Dr.
Dr.

A bírálóbizottság:

elnök: Dr.
tagok: Dr.
Dr.
Dr.
Dr.

Az értekezés védésének időpontja: 20... ..

Tartalom

1.	Bevezetés.....	1
2.	Irodalmi áttekintés	4
2.1.	A gravitációs hullámok	4
2.2.	A gravitációs hullámok forrásai	6
2.3.	A gravitációs hullámok detektálása.....	7
2.4.	Zajhatások a gravitációshullám-detektorokban	10
2.5.	A newtoni zaj	13
2.6.	A gravitációshullám-detektorok infrahangzajhátterének mérése	16
2.6.1.	Már üzemelő földfelszíni detektorok infrahangkörnyezetének monito- rozása.....	16
2.6.2.	A tervezett földfelszín alatti telepítésű gravitációshullám-detektorok infrahang zajhátterének monitorozása	16
2.7.	Célkitűzések	17
3.	Alkalmazott eszközök és módszerek	21
3.1.	A környezeti zajok jelanalízise	21
3.1.1.	Statisztikus jelanalízis	22
3.1.2.	Tranziens jelszakaszok keresése.....	25
3.2.	Az infrahangok mérésére használt eszközök és módszerek.....	28
3.2.1.	A saját mérések és számítások során referenciaként használt földfel- színi infrahangzajhátter és a Bowman-modellek	29
3.2.2.	Infrahangot mérő eszközök	31
3.2.3.	Infrahangmikrofonok kalibrációja	32
3.3.	Az Atomki által kifejlesztett infrahangmérő rendszerek.....	34
3.3.1.	Az ISM1 mikrofont tartalmazó infrahang mérőrendszer integrálása az MGGL adatgyűjtő rendszerébe	37

3.3.2.	Az ISM1801 mikrofont tartalmazó mérőrendszer integrálása az adVirgo környezetmonitorozó rendszerébe	38
3.4.	Adatfeldolgozó szoftverek.....	39
3.5.	Newtoni zaj modell.....	43
4.	Eredmények.....	45
4.1.	Az ISM1 infrahangmikrofon kalibrációja	46
4.2.	Az infrahangzajhátter mérése a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumban.....	50
4.3.	Az adVirgo gravitációshullám-detektor infrahangzajhátterét meghatározó források vizsgálata.....	56
4.4.	Gravitációshullám-detektor helyszínek infrahangzajhátterének összehasonlítása.....	62
4.5.	A newtoni zaj becslése az Einstein Teleszkóp mátrai telepítésének esetére.....	65
4.6.	A 4. fejezet összefoglalása	71
	Összefoglalás	73
	Summary	77
	Köszönetnyilvánítás.....	83
	Irodalomjegyzék	85

1. Bevezetés

Napjainkban az Albert Einstein által megalkotott általános relativitáselmélet a legszélesebb körben elfogadott és használt elmélet a téridő és a gravitáció leírására. Az elmélet alapján Einstein megjósolta a téridőhullámok, más néven gravitációs hullámok létezését is [1] [2].

A gravitációs hullámok létezésére elsőként Russell Alan Hulse és Joseph Hooton Taylor, Jr. kapott közvetett kísérleti bizonyítékot 1974-ben [3] [4] [5]. Az általuk felfedezett új típusú pulzár periódusidejének változásait végül két egymás körül keringő neutroncsillag alkotta kettős rendszer gravitációs hullám kibocsátása útján történő energiavesztésével értelmezték.

2015 szeptember 14-én sikerült közvetlenül is detektálni gravitációs hullámot [6]. Az észlelés az USA-beli LIGO Scientific Collaboration (LSC) Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) két egymástól 3002 km távolságra üzemelő és koincidenciában mérő földfelszíni interferométerével történt [7]. A kiértékelés szerint a gravitációs hullámot két eredetileg egymás körül keringő fekete lyuk összeolvadása keltette. A sikeres detektálás után a 2017-es Fizikai Nobel-díjat megosztva Rainer Weiss, Barry C. Barish és Kip S. Thorne kapták a LIGO detektor megépítésében és a hullámok detektálásában való hozzájárulásuk elismeréseként.

Azóta a VIRGO kollaboráció Olaszországban üzemelő szintén földfelszíni interferométere is detektált gravitációs hullámokat. 2019. augusztusáig a LIGO és a VIRGO Kollaborációk közös adatbázisában már 50 igazoltan gravitációshullám-eseményt katalogizáltak [8] [9].

A gravitációshullám-detektorok érzékenységét számos körülmény befolyásolja. A környezeti változások okozta sűrűségingadozások newtoni zajt (angolul Newtonian noise (NN)) eredményeznek, és a gravitációs kölcsönhatás révén nemkívánatos elmozdulásokat okozhatnak a detektáló rendszerben csökkentve annak a gravitációs hullámokra vonatkozó érzékenységét [10] [11].

A newtoni zajokra való érzékenység csökkentésének egyik javasolt módja új generációs gravitációshullám-detektorok telepítése a földfelszín alá. A KAGRA Kollaboráció keretében Japánban már üzemel is egy föld alatti detektor, ami a LIGO-Virgo-KAGRA együttműködés keretei között vesz részt a gravitációs hullámok keresésében [12].

A 2000-es évek elején javasolt Einstein Teleszkóp [13][PhDJ05] szintén föld alatti telepítésű lenne, egyik potenciális helyszínéül a magyarországi Mátra-hegységet javasolták. A helyszín vizsgálata céljából a Nitrokémia ZRT. gyöngyösorszi bányájában, a Károly táróban lett kialakítva a Mátra Geofizikai és Gravitációs Laboratórium (MGGL). A laboratóriumban olyan hosszútávú mérések zajlottak [PhDJ01][PhDJ02][PhDJ03], amik túl azon, hogy a konkrét helyszínt jellemezték, eredményeikkel hozzájárultak az Einstein Teleszkóp helyszínekiválasztási folyamatának megtervezéséhez [PhDJ05]. 2020 elejére Magyarország ugyan hivatalosan is visszavonta az Einstein Teleszkóp Mátra-hegységbeli telepítési helyszínének jelölését, azonban az MGGL továbbra is üzemel. Egyrészt folytatódnak az Einstein Teleszkóphoz nem kapcsolódó szeizmológiai, geofizikai és egyéb mérések, másrészt a helyszín alkalmas különböző mérőeszközök és módszerek tesztelésére is.

A newtoni zaj egyik forrása a gravitációs hullám detektálására szolgáló rendszer infrahangkörnyezete, mely a 3 mHz-20 Hz frekvencia tartományban keletkező és a levegőben longitudinálisan terjedő rezgések (infrahangok) összességét jelenti [56]. Az infrahangkörnyezet monitorozása azért is fontos, mert az infrahangok kedvezőtlen esetben akár közvetlen módon is kelhetnek nemkívánatos elmozdulásokat a rendszer elemeiben.

A fentiek alapján célul tűztem ki a gravitációshullám-detektorok infrahang környezetének monitorozására alkalmas módszerek fejlesztését és alkalmazását. Részt vettem egy új típusú nagy érzékenyséű infrahangdetektor kifejlesztésében és bemérésében [PhDJ01] [PhDJ02] [PhDJ03][PhDS01]. A kifejlesztett detektor egy példányát telepítettem a Mátra Gravitációs Observatóriumban, egy másik példányát pedig az adVirgo detektor központi épületében. Mindkét helyszínen hosszútávú méréseket végeztem. A mérési sorozatok bebizonyították, hogy az új típusú detektor megfelel a gravitációs hullámok detektálására szolgáló rendszerek által támasztott követelményeknek. Szoftvert dolgoztam ki a detektált jelek feldolgozására, az infrahangspektrum meghatározására, elemzésére [PhDJ01][PhDJ02][PhDJ03][PhDS02], és a transziens jelek azonosítására [PhDJ04][PhDS02]. Megmértem a föld alatti laboratórium infrahang-háttérét jellemző spektrális mennyiségeket, és kiderítettem, hogy a zajhátteret a szellőztető rendszer dominálja. Rámutattam arra, hogy egy új szellőzőrendszer elemei és a légjáratok megtervezése és kialakítása során figyelembe kell venni az infrahangok csillapításának szempontját is [PhDJ04].

Lehetőségem nyílt becslést adni a majdani Einstein Teleszkóp infrahang eredetű newtoni zajára a Mátrában történő telepítés esetén. Ehhez az infrahangzaj hosszútávú viselkedésének megismerése érdekében a CSFK GGI piszkéstartói infrahangmérő állomásainak egy év alatt gyűjtött adatait használtam fel, majd az ezekből nyert medián nyomás ASD értékekből számoltam ki a newtoni zajt [PhDS03].

A mérési eredményeim hozzájárultak annak a kritériumrendszernek a specifikálásához, amely az Einstein-teleszkóp telepítési helyszínének kiválasztásához lesz szükséges [PhDJ05].

Az adVirgo gravitációshullám-detektor infrahanghátter-zaja vizsgálatához is kifejlesztett az Atomki egy infrahangmikrofont (ISM1801). Az új típusú mikrofon 30 Hz-ig kiterjesztett mérési tartománnyal rendelkezik igazodva az adVirgo detektor gravitációs hullám detektálási frekvencia-tartományához. 2019-ben telepítettem az ISM1801 mikrofont az adVirgo detektor központi épületében (Central Building, rövid.: CEB). A mikrofon folyamatosan és megbízhatóan szolgáltatja a mérési adatokat a 2019. március – 2020. április közötti időtartamban folyó harmadik megfigyelési időszakban mindvégig. Ezért be tudtam azonosítani az infrahanghátteret meghatározó zajforrásokat és megvizsgáltam azok hatását a háttérzajt jellemző ASD értékekre [PhDS04]. Kimutattam, hogy a központi épületében mért infrahangzajhátteret jellemző nyomás ASD értékeket 2 Hz alatt a szél határozza meg, 2 Hz fölött azonban a vákuumrendszer szivattyúit, valamint a szellőző- és légkondicionáló rendszereket magában foglaló HVAC rendszer [PhdS04].

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A gravitációs hullámok

Az ebben az alfejezetben leírtak a [14]-ben és a [15]-ben leírtakon alapulnak. Részletes ismertetés olvasható magyarul [16] [17]. Az általános relativitáselmélet szerint az anyag meggörbíti a téridőt, és a téridő görbülete meghatározza az anyag mozgását. Ezt a kapcsolatot Einstein téregyenletei fejezi ki:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1)$$

ahol $G_{\mu\nu}$ az Einstein-tenzor, amely a téridő geometriáját írja le:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} \quad (2)$$

A kifejezésben szereplő $g_{\mu\nu}$ a téridő metrika. $T_{\mu\nu}$ az energia-impulzus tenzor, amely az anyagmezőt jellemzi. $R_{\mu\nu}$ a Ricci-tenzor, R pedig a Ricci-skalár (a Ricci-tenzor átlós összege). Az Einstein-egyenletben szereplő tenzorok 4×4 -es, szimmetrikus mátrixokkal ábrázolhatók. A metrikus tenzort az Einstein-egyenlet numerikus megoldása útján kaphatjuk meg, ha egzakt megoldás nem létezik.

Az Univerzumban a nagy tömegektől távol a téridő görbületmentes tartományai a Minkovski metrikával ($\eta_{\mu\nu}$) jellemezhetőek. A téridőnek a görbületmentességtől való esetleges eltéréseit (angolul: strain) az ún. gyengetér közelítésben a $h_{\mu\nu}$ perturbációval vesszük figyelembe. Így a metrika: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ alakot ölti. Az Einstein-egyenlet alakja az anyag nélküli (vákuum) esetre:

$$0 = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} \quad (3)$$

A továbbiakban ennek az egyenletnek a megoldásait keressük. Az ún. spúrmegfordított metrika bevezetésével az Einstein-egyenletek egyszerűbb alakra hozhatók. Az új metrika: $\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \eta_{\mu\nu} h/2$, ahol h a $h_{\mu\nu}$ spúrja. Ha megköveteljük a Lorenz mértékfeltétel teljesülését, a harmonikus mértékben (Lorentz-mértékben) felírt Einstein-egyenletek linearizált alakjának vákuum megoldásait tekintjük gravitációs hullámoknak. A megoldandó egyenlet:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{h}_{\mu\nu} = 0 \quad (4)$$

Az egyenlet megoldására a következő alakú síkhullám megoldást tesszük fel:

$$\bar{h}_{\mu\nu} = A_{\mu\nu} e^{ik_\alpha x^\alpha} \quad (5)$$

ahol $A^{\mu\nu}$ az amplitúdó tenzor, k_α pedig a hullámszám vektor.

A Lorentz-mértékfeltételből következik, hogy $h_{,\alpha}^{\mu\nu} = A^{\mu\nu} k_\alpha$. Ez azt jelenti, hogy a hullám amplitúdója és a hullámszámvektor egymásra merőlegesek, azaz a gravitációs hullám transzverzális hullám. Továbbá megmutatható, hogy a hullámszámvektor fényszerű négyesvektor, azaz a hullám terjedési sebessége megegyezik a c fénysebességgel [16].

A TT- (transverse-traceless) vagy sugárzási mérték megkövetelésével közvetlenül megkapható az amplitúdótenzor, ami két független komponenst tartalmaz [14]. Bevezetve a szakirodalomban is használt ún. polarizációs állapot jelölést, a nyugalmi megfigyelőhöz rögzített koordinátarendszerben z-irányból érkező gravitációs hullám mátrix formában felírva:

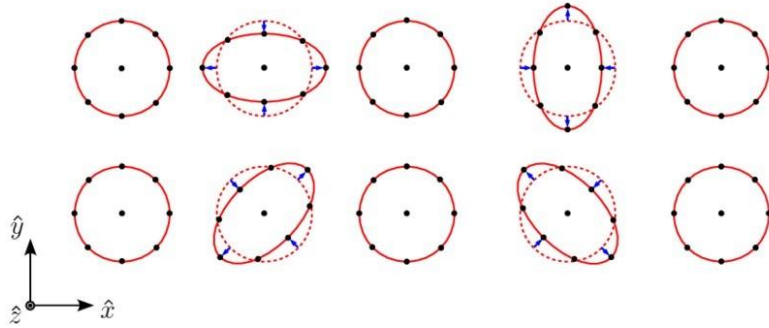
$$\bar{h}_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{h}_+ & \bar{h}_\times & 0 \\ 0 & \bar{h}_\times & -\bar{h}_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Ez azt jelenti, hogy a hullám két, egymástól független polarizációjú komponenssel rendelkezik.

Ahhoz, hogy megértsük, milyen hatással van egy áthaladó gravitációs hullám a sík téridő egy adott tartományára, először komponenseire bontjuk a korábban felírt, z tengely mentén haladó hullámot:

$$\bar{h}_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{h}_+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\bar{h}_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{h}_\times & 0 \\ 0 & \bar{h}_\times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Az összeg első tagja egy olyan hullámkomponenst képvisel, ami a téridőnek x-tengely irányú megnyúlásával (összenyomódásával) egyidőben y-tengely irányú összenyomódását (megnyúlását) okozza. A második tag esetében az összehúzódás két egymásra merőleges, az x és y tengely által kijelölt síkban levő, azokkal 45 fokos szöget bezáró egyenesek mentén történik (1. ábra).



1. ábra. Egy z tengely mentén terjedő gravitációs hullám hatása a sík téridőnek egy kör alakú tartományára.

(Forrás:

https://www.researchgate.net/publication/305322252_Theory_of_Gravitational_Waves)

A jelenleg működő interferometrikus gravitációshullám-detektorokra is ilyen hatást gyakorolnak az áthaladó hullámok, ezáltal válik lehetővé azok észlelése (ld. 2.3. alfejezet).

2.2. A gravitációs hullámok forrásai

A gravitációs hullámokat az anyag olyan gyorsuló mozgásai keltik, ahol se a gömbszimmetria, se a hengersizimmetria nem áll fenn a mozgásra [18]. Ha a forrásrendszer komponenseinek sebessége sokkal kisebb a fénysebességnél, a legnagyobb mértékben a rendszer kvadrupólmomentuma járul hozzá a hullám keltéséhez. Ebben az esetben az Einstein-egyenlet retardált potenciál megoldása írja le a folyamatot [18]:

$$h_{\mu\nu}(t) = \frac{2G}{rc^4} \ddot{I}_{\mu\nu} \quad (8)$$

ahol $\ddot{I}$ a forrás tömeg kvadrupól momentumának idő szerinti második deriváltja, r a forrás megfigyelőtől (Földtől) vett távolsága, G a Newton-féle gravitációs állandó, c pedig a fénysebesség. A legerősebb források nagy mértékben eltérnek a gömbszimmetriától. Ilyen források a kompakt, dinamikusan változó nagy tömegek, például az ütköző és összeolvadó kettősrendszerek, amelyek

fekete lyukakból és/vagy neutroncsillagokból állnak. Ezekben a rendszerekben a közös tömegközéppont körül kering a két kompakt égitest. A gravitációs hullám kibocsátása révén csökken a rendszer összes energiája, ezért az égitestek távolsága folyamatosan csökken, miközben a kibocsátott hullám frekvenciája nő. A jelenleg működő gravitációshullám-detektorok mérési tartománya 10 Hz - 5 kHz. Az eddig detektált jelek ilyen kettősrendszerektől származnak.

A várakozások szerint még az alábbi típusú jelek detektálására lehet a jövőben számítani [18]:

- Kitörés (burst) típusú jelek: ezek olyan rövid és intenzív folyamatoktól származnak, mint egy szupernova-robbanás, vagy egy gamma kitörés. A gravitációs hullámok ebben az esetben a detektorok észlelési idejének egybeesése, és a kísérő elektromágneses és neutrínójelek detektálása révén figyelhetők meg.
- Folyamatos jelek várhatóak olyan forgó, aszimmetrikus tömegeloszlású rendszerektől, ahol a forgás frekvenciája állandó és jól definiált. Ilyen rendszerek a pulzárok.
- A sztochasztikus háttér eredete egyrészt az ősrobbanást követő nagyszámú véletlenszerű esemény, másrészt az Univerzumban jelen levő kompakt kettősök sokasága. A sztochasztikus jelek észlelése a detektorok jelei keresztkorrelációjának számítása révén várhatóak.

Minden egyes jeltípus detektálása információt ad annak forrásáról. A gravitációshullám-detektálással kiterjesztettük az emberiség által megfigyelhető asztrofizikai jelenségek körét, és a már korábban alkalmazott megfigyelési módok (pl. rádiócsillagászat) révén megismert jelenségekről nyert tudásunk is bővült [19].

2.3. A gravitációs hullámok detektálása

Az interferometrikus gravitációshullám-detektorok őse a Michelson és Moorley által épített első interferométer, amit a Földnek az éterhez viszonyított sebessége meghatározása céljából építettek [20].

Egy modern interferométer egy lézerből, egy nyalábosztóból, két tükörből, valamint egy fotodetektorból áll. Ezek az optikai eszközök úgy vannak elhelyezve, hogy a lézer által kibocsátott fénysugarat a nyalábosztó két, egymásra merőleges nyalábra bonthassa szét, és a két nyaláb útjába helyezett tükrök úgy verjék vissza a fényt, hogy azok a nyalábosztón újraegyesüljenek. Az újraegyesüléskor a nyalábok interferálnak, a keletkező fény intenzitását egy fotodetektor méri. Ha az interferométer tükrei egymáshoz képest elmozdulnak, akkor megváltozik a fotodetektor által detektált fény intenzitása.

Rögzítsünk egy derékszögű koordinátarendszert az interferométerhez úgy, hogy az x és y tengelyek egybeessenek a kettéosztott fénynyalábokkal. Egy z irány mentén terjedő, és az interferométeren áthaladó gravitációs hullám h_+ komponense a karok relatív hosszváltozását, és ezáltal a kettéosztott nyalábok egymáshoz képesti fáziseltolódását okozzák [18].

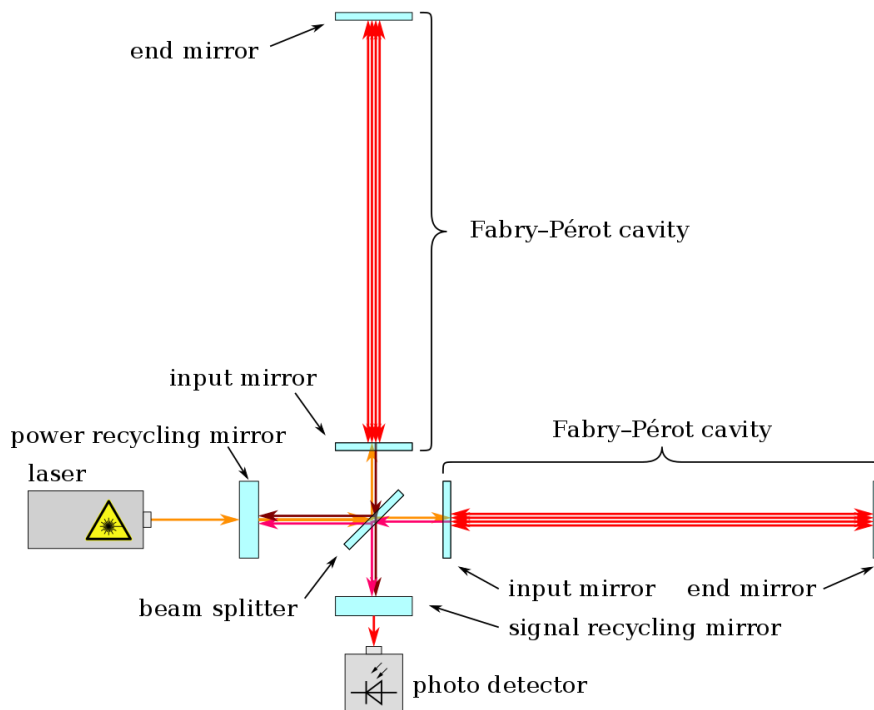
Ha az interferométer karjának hossza sokkal kisebb, mint a gravitációs hullám hullámhossza ($L \ll \lambda$), az eszköz által detektálható változás a kar hosszában arányos a hullám által okozott téridő perturbáció nagyságával:

$$\Delta L = h_+ L \quad (9)$$

A gravitációs hullám $\times$ komponense egyformán hat a két karra, így nem okoz változást az interferenciaképben.

Általános esetben a gravitációs hullám bármilyen irányból közelítheti az interferométert. Ekkor $\frac{\Delta L}{L} = F_+ h_+(t) + F_\times h_\times(t)$, ahol F_+ és $F_\times$ a forrás irányától és a detektor elhelyezkedésétől függ.

A téridő gravitációs hullámok hatására bekövetkező torzulásának megmérése érdekében a Michelson-interferométeren számos kisebb-nagyobb változtatást kellett végrehajtani. A fénykibocsátás és a detektálás közt eltelt idő alatt megtett utat meg kellett növelni [18]. Ehhez az interferométer karjainak hosszát kellett megnövelni néhány kilométeresre. Az interferométerek karjának hosszát növelve azonban nő a környezeti forrásoktól átvett rezgésük is. A gravitációshullám-detektorok esetén a karok hosszának röviden tartása és a fény bennük megtett útjának növelése érdekében úgynevezett Fabry-Pérot üregeket alkalmaznak az interferométerekben (2. ábra).



2. ábra A jelenleg üzemelő gravitációshullám-detektorok működési elve.
(Forrás: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LIGO_simplified.svg)

Az elrendezésben (2. ábra) két tükör van elhelyezve a nyalábosztó közelében olyan módon, hogy a karok végén található tükrökről visszaverődő lézersugarakat még háromszázszor verjék vissza. A lézer oda-vissza pattogására azért is szükség van, hogy az ún. power recycling mirrorok segítségével a lézer elnyerhesse azt az intenzitást, ami a sikeres gravitációs hullám detektáláshoz szükséges [18].

Jelenleg négy interferometrikus gravitációshullám-detektor található a Földön, melyek érzékenysége különböző. A két egyforma felépítésű, 4 km karhosszúságú interferométerből álló, egy obszervatóriumként működő advanced LIGO (aLigo) detektorai egymástól 3002 km-re találhatók, az USA területén [21]. Az egyik Washington államban, Hanfordban, a másik Livingstonban, Louisiana államban. A két-detektoros megfigyelés a koincidenciamérés révén teszi lehetővé a gravitációs hullámok észlelését. A forrás pontos helyének háromszögeléses módszerrel való meghatározásához legalább három detektor összehangolt működésére van szükség [18].

Az Olaszországban, Pisa mellett található Advanced Virgo (adVirgo) detektor 2017-ben kezdett el gravitációs hullámokat detektálni. 3 km-es karhosszal rendelkezik. Lényeges különbség az aLIGO-hoz képest a detektor tükreinek felfüggesztése [22].

A Japánban, a Kamioka bányában a földfelszín alatt megépült KAGRA detektor karhossza 3 km-es, egyedül ennek a tükreit hűtik kriogenikusan. Az érzékenysége még elmarad az aLigo és adVirgo detektorokétól. 2020 márciusában kezdődött meg a megfigyelő üzemmódú (observation run) működtetése. Bár gravitációs hullámok detektálásra még nem lehetett számítani a KAGRA esetében, a technológia továbbfejlesztése szempontjából mégis mérföldkő volt ez az esemény [23].

2.4. Zajhatások a gravitációshullám-detektorokban

A gravitációs hullámok detektálása során az interferométer kimeneti jelét, vagyis az interferenciakép megváltozása által okozott fényintenzitás megváltozását analizálják. Ennek minden olyan összetevőjét zajnak tekintik, amely nem gravitációs hullámtól ered. A zajmentes ideális detektor esetén az interferenciakép mindaddig állandó maradna, amíg egy gravitációs hullám meg nem változtatná azt. Részben elvi akadályok miatt nem valósítható meg az ideális detektor, másrészt a technikai lehetőségek korlátozottsága miatt is tartalmaz zajokat a jel [24] [25] [26].

Az idősorok statisztikai jellemzésekor stacionárius és nem-stacionárius kategóriákba szokás sorolni a zajokat. A stacionárius zajok statisztikai jellemzői függetlenek az időtől, míg a nem-stacionárius zajokra ez nem teljesül.

Eredetüket tekintve alapvető, műszaki és környezeti zajokat szokás elkülöníteni [18]. Az alapvető zajokat csak a detektorok gyökeres átalakításával lehet csökkenteni. A változtatások egyrészt a zajok amplitúdójának csökkentését, másrészt az interferométerbe való becsatlódásuk minimalizálását célozzák. Az alapvető zaj csökkenthető például a lézer teljesítményének növelésével és az optikai komponensek kriogén hűtésével.

A műszaki zajok a detektorok komponenseinek ideális beállításától és működésétől való eltérésektől erednek. Ilyen a lézer frekvenciájának és teljesítményének fluktuációja, a tükrök elfordulása, a különféle szenzorok és aktuátorok zajos működése stb. [27].

Az érzékenységi görbe kb. 15 Hz fölötti frekvenciatartományát egy alapvető zaj, az ún. kvantum zaj határozza meg [28] [29] [30]. Két, egymással a lézer intenzitásán keresztül kapcsolatban álló folyamat okozza. Az egyik az, hogy a fotonok lendületet adnak át a tesztömegnek, ezáltal annak elmozdulását okozzák. Ez okozza az ún. sugárzásnyomás-zajt. A másik folyamat a fény kvantum természetéből adódó bizonytalanság a detektáláskor. Ez az ún. sörétzaj. A lézer intenzitásának növelésével a sörétzaj csökken, ugyanakkor a sugárzási nyomás zaj nő. A standard quantum limit meghatározza az ellenük való védekezés lehetőségét. A sugárzási nyomás zajt a kb. 15-100 Hz- es intervallumon meghatározó, míg a sörétzaj 100-500 Hz között.

A környezeti zajok a detektor fizikai környezetében bekövetkező változásoktól származnak [31] [32]. Ilyenek a mágneses és elektromos eredetű zajok, a légkör változásai által okozott zajok, és a földkéreg, valamint a talaj változásai által okozott zajok. Ezek ellen egyrészt úgy lehet védekezni, hogy a detektort minél inkább elszigeteljük tőlük. Olyan helyre telepítjük, ahol az egyéb telepítési szempontokat is figyelembe véve minimális szintű a környezeti zaj [PhDJ05]. Ezen túl különféle, passzív és aktív zajscillapításra alkalmas eszközök detektorba építésével csökkentjük a zajok interferométerbe történő becsatolódásának mértékét [27].

A zajok detektorba való becsatolódásuk mechanizmusa alapján lehetnek érzékelési zajok, vagy elmozdulási zajok [24]. Az elmozdulási zajok a detektorok tesztömegeinek elmozdulását okozzák. Ilyenek a szeizmikus, akusztikus, a hőmérsékleti és az aktuátor zajok. Az érzékelési zajok a detektálás folyamatát befolyásolják. Ilyen például a lézer sörétzaja és frekvenciazaja. A lézer amplitúdójának zaja egyszerre érzékelési és elmozdulási is.

A földfelszíni detektorok érzékenységét meghatározó zajokat és az ellenük való védekezés módjait több munka [23] [24] [33] is tárgyalja az irodalomban. A földfelszíni detektorok érzékenységét a 15 Hz alatti tartományon a szeizmikus zaj és a helyi talajrezgések határozzák meg [34]. A rezgéseket átveszik a tükrök felfüggesztését tartó egységek, és azoktól a felfüggesztéseken keresztül maguk a tükrök is, ami végül az interferenciakép megváltozását okozza [18]. Stacionárius és tranziens rezgésekkel egyaránt számolni kell.

Rövid ideig tartó természetes eredetű rezgések a földrengések. Az emberi tevékenység is okoz rövid időtartamú talajrezgéseket a detektor szűkebb és tágabb környezetében. A rövid ideig tartó rezgések az interferométerek környezetébe telepített szeizmométerek és gyorsulásmérők jeleinek megfigyelésével azonosíthatóak és nyilvántarthatóak.

Az állandóan jelenlévő stacionárius szeizmikus zaj elleni védekezés azonban nehezebb. Az 1 Hz fölötti szeizmikus zaj részben az emberi tevékenységektől (közlekedés, ipar) származik. Stacionárius zajt okoznak a különféle légköri folyamatok (pl. szél), a tengerek és óceánok hullámozása, és a folyók vizének áramlása is [35] [36] [37].

A szeizmikus zajok alacsony szinten tartásának egyik módja a jó helyszínválasztás, ahol elegendően alacsony a természetes szeizmikus és az emberi eredetű zajok intenzitása is.

A szeizmikus zajok csillapításában a legfontosabb a tükrök felfüggesztésének többfokozatú, speciális kialakítása [18], [38]. Ezt az adVirgo és az aLigo interferométereinek esetében különböző módokon valósították meg. Az interferométereket aktív védelemmel is ellátták, ami csillapítja a rezgéseket, mielőtt azok elérnék a tükrök felfüggesztését [18]. Azokat a rezgéseket, amiket még így sem lehet kiszűrni, utólagos jelfeldolgozással távolítják el.

A földfelszín alatt a szeizmikus rezgések intenzitása csökken, így a detektorok földfelszín alá való telepítésével a gravitációshullám-detektor érzékenysége több, mint egy nagyságrendnyi javulását lehet elérni. A KAGRA-nál szerzett tapasztalatokat is figyelembe véve egy európai intézményekből álló nemzetközi együttműködés kezdeményezte a kriogenikus hűtéssel ellátott földfelszín alatti telepítésű harmadik generációs gravitációshullám-detektor, az Einstein Teleszkóp létrehozását [13][PhDJ05].

Az ún. hőmérsékleti zaj az alapvető zajok körében az elmozdulási zajokhoz tartozik. A tesztömeg hordozóanyagában, a bevonatának anyagában és a felfüggesztések anyagában a részecskék véletlenszerű hőmozgása okozza [18]. Nagysága a hőmérséklet négyzetgyökével arányos, ezért jelentős csökkentését csak az érintett komponensek kriogén hűtésével lehet elérni. A Japán KAGRA detektornál már alkalmazzák ezt a technikát [39], és a majdani Einstein Teleszkópnál is ezt tervezik. Mivel a tükrök vákuumban vannak, ezért magas hővezetési együtthatóval rendelkező anyagok használatával kell elvezetni a hőt egy, a tükrök köré helyezett kriogenikusan hűtött pajzshoz [13].

A környezeti zajok egyike az elektromágneses zaj [31] [32] [40]. A detektorok közvetlen környezetében elhelyezkedő elektronikai egységek zaja folyamatosan jelen van. A detektorok közelében a villámok tranziens zajt keltenek. A folyamatosan jelen lévő ún. Schumann rezonanciák a majdani Einstein Teleszkóp érzékenységét befolyásolni fogják [41][PhDJ05].

A korábban említett szeizmikus zaj mellett a légköri eredetű zajok is befolyásolják az interferométerek érzékenységét. A levegőben terjedő nyomáshullámok a 20 Hz alatti infrahang, valamint a 20 Hz fölötti hallható hang megrezgetik a detektor komponenseit.

A LIGO interferométerei érzékenységeit 40 és 60 Hz között a villámlásokkal együtt járó hangrezgések rontják [42]. A helikopterek, repülőik és viharok zajforrások az aLIGO és az adVirgo számára egyaránt [43]. Az adVirgo-nál a fűtőeszközökből, ventilátorokból és légkondicionálókból álló HVAC rendszer 1 Hz-től 100 Hz-ig okoz szeizmikus és hang eredetű zajt [31].

A detektornak otthont adó épületekben a ventilátorok 50 Hz fölött, a hűtőegységek 60 Hz alatt, a légkondicionálók 100 Hz alatt okoztak zajt. A közelben elhaladó járművek 100 Hz alatt, a szél pedig széles frekvenciatartományon hatnak a detektor érzékenységére [44].

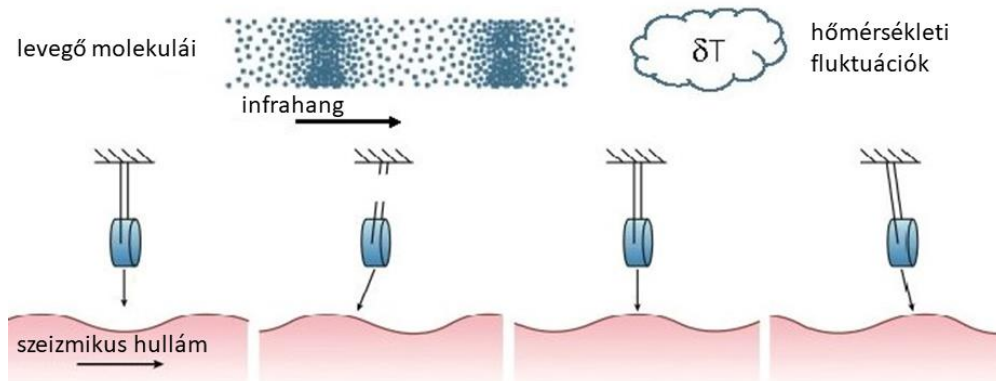
2.5. A newtoni zaj

A környezeti zajok másik kategóriája a detektor környezetében található anyagok sűrűségének változásából adódik. A sűrűségváltozások megváltoztatják a Newton-féle gravitációs törvénnyel leírható gravitációs teret a detektor közelében, ezek a változások pedig a tesztömegek elmozdulását okozzák. Ez az ún. gravitációs gradienszaj, más néven newtoni zaj [10] [11]. A newtoni zaj fő forrásai a szeizmikus rezgések és az atmoszféra különféle sűrűségváltozásai: a hangrezgések, a levegő hőmérsékletének megváltozására létrejövő sűrűségváltozások, valamint a levegő áramlása (3. ábra) [45].

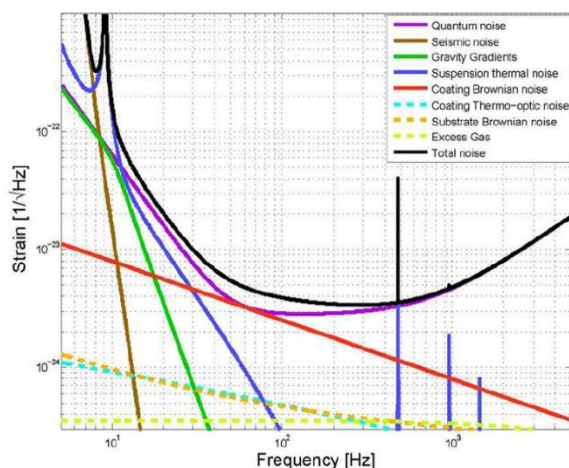
Ma még nem létezik megfelelő mérőeszköz a newtoni zaj közvetlen mérésére, ezért elméleti modellek alapján becsülhető meg a hozzájárulása a gravitációshullám-detektorok zajához [11][PhDJ05]. Ezek a modellek olyan átviteli függvényeket adnak meg, amelyek segítségével a szeizmikus és infrahang zajhátteret jellemző spektrális mennyiségekből számolható a newtoni zaj. Az elméleti modellek szerint a newtoni zaj semmilyen frekvencián sem ad akkora járulékot a működő földfelszíni gravitációshullám-detektorok zajához, ami meghatározná azok érzékenységét (4. ábra). Az Einstein Teleszkóp esetén azonban a newtoni zaj fogja meghatározni a detektor érzékenységét a 10 Hz alatti tartományon (5. ábra).

Az elméleti modellek szerint az Einstein Teleszkóp newtoni zaját a szeizmikus rezgésektől származó összetevő dominálja a teljes 10 Hz alatti tartományon [11], azonban körülbelül 6 Hz és 9 Hz között az infrahang eredetű newtoni zaj is elérheti a szeizmikus eredetű newtoni zaj nagyságát [45].

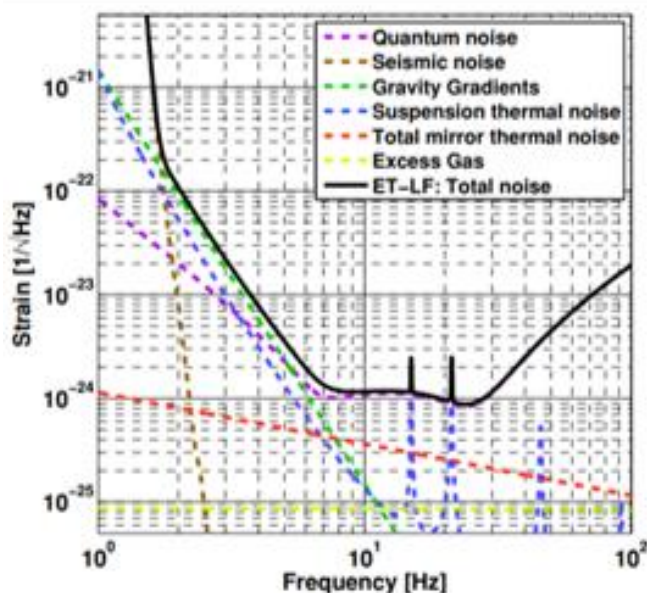
A newtoni zaj alacsony értéken tartásának egyik módja a detektorok olyan helyen történő telepítése, ahol a környezeti zajok intenzitása a lehető legkisebb. További lehetőség a környezeti zajok monitorozása és a mért adatok alapján a gravitációshullám-detektor kimeneti jeleinek szűrése zajszűrő algoritmusok alkalmazásával [11].



3. ábra A gravitációshullám-detektor környezetében található anyag sűrűségének változásai a newtoni gravitációs mező változásait okozzák, ami a teszt-tömeg elmozdulását eredményezi. Ábra forrása: <https://slidetodoc.com/wg-2-machine-learning-for-low-frequency-seismology/>



4. ábra Az aLIGO detektorok zajainak modell alapján számolt értékei. A newtoni zaj zöld folyamatos vonallal van jelölve. Forrás: https://www.researchgate.net/figure/Advanced-LIGO-modelled-noise-budget-Due-to-the-similarity-in-design-it-is-expected-that_fig3_40901511.



5. ábra Einstein Teleszkóp alacsony frekvenciartományon működő komponensének zajai. A newtoni zaj szaggatott zöld vonallal van jelölve. Forrás: http://opteron.gpu.wigner.mta.hu/hu/publications/lectures/ect_star_et_why_andwhy/SomlaiETWhereAndWhy_2017Trento.pdf

2.6. A gravitációshullám-detektorok infrahangzajhátterének mérése

2.6.1. Már üzemelő földfelszíni detektorok infrahangkörnyezetének monitorozása

A földfelszíni telepítésű gravitációshullám-detektorok esetében az infrahangok általában nem tudják felülmúlni az egyéb zajforrásoknak a detektor érzékenységeire kifejtett hatását, azonban előfordulhatnak olyan időszakok, amikor az infrahangok domináns zajforrássá tudnak válni: viharok során, például a villámokat kísérő mennydörgések formájában, vagy légi járművek áthaladásakor. Ezen kívül előfordulhat, hogy a detektor közelében működő gépek által keltett infrahang zaj válik meghatározóvá. Az interferométerek jelében időszakosan előforduló infrahang eredetű összetevőket az interferométer környezetében működő infrahang mikrofonok segítségével tudjuk beazonosítani.

Az adVirgo gravitációshullám-detektorok környezetébe korábban a kereskedelmi forgalomban kapható Brüel&Kjaer 4193 típusú mikrofonokat telepítettek [45]. A Brüel&Kjaer 4193 mérési tartományának alsó határa 0,1 Hz. Az aLIGO detektorok környezetében Brüel & Kjaer 4130 (10-900 Hz) és 4188 (8-12500 Hz) mikrofonokat használnak [46]. A KAGRA gravitációshullám-detektornál is vannak mikrofonok, de nem tették közzé azok típusát vagy paramétereit.

2.6.2. A tervezett földfelszín alatti telepítésű gravitációshullám-detektorok infrahang zajhátterének monitorozása

A jövőben megépítendő földfelszín alatti gravitációshullám-detektorok telepítési helyszínének kiválasztása során az infrahangzajhátter vizsgálata más szempontok szerint történik, mint a felszíni detektorok esetében, mivel a földfelszín alatti detektorok mérési tartományának alsó határát az elméleti jóslatok szerint a newtoni zaj fogja kijelölni, aminek egyik forrása az infrahang.

Az első sikeres földfelszín alatti infrahang méréseket én végeztem a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumban az ATOMKI által kifejlesztett ISM1 mikrofonnal. Az Einstein Teleszkóp Sos Ennatos (Szardínia, Olaszország) lehetséges telepítési helyszínén végzett infrahangmérések eredményeit eddig csak egy konferencián tartott prezentáció formájában publikálták [47]. A Sos Ennatos-beli mérésekhez egy Brüel & Kjaer 4193-L-004 mikrofont használtak, ami más karakterisztikájú, mint az ISM1. Elképzelhető, hogy a Sos Ennatos-ban mért nyomás ASD értékeket nagy mértékben meghatározta a mikrofon saját zaja. Ezért kifejezetten fontos többféle műszerrel is mérni egy adott helyszínen, lehetőség szerint egy időben. Elképzelhető, hogy olyan alacsony az infrahangzaj, hogy a jelenlegi mikrofonok saját zaja túl nagy a zajhátter pontos megméréséhez, és ezért további fejlesztésekre van szükség a mikrofonok saját zajának csökkentése terén.

2.7. Célkitűzések

Az Einstein Teleszkóp előkészítési tervezése során több lehetséges európai telepítési helyszín szeizmikus zaját is megmérték 2014-ben [48]. Az első három legalacsonyabb szeizmikus zajú helyszín egyikének a Mátra-hegységben levő Gyöngyösoroszi közelében levő egykori ércbánya (6. ábra) bizonyult.

A szeizmikus és más környezeti zajok alaposabb vizsgálata céljából a Wigner Fizikai Kutatóközpont földalatti laboratórium kialakítását kezdeményezte a bánya Károly-tározó részében, 88 m mélységben, 1280 m-re a bejáratától, közel a Károly-aknához. A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium (MGGL) (7. ábra) 2016-ra készült el. A laboratóriumban végzett vizsgálatok céljára létrejött egy együttműködés az alábbi intézmények részvételével: Wigner Fizikai Kutatóközpont (Elméleti Fizika Főosztály, Innovatív Detektorfejlesztési Lendület Csoport, DAQ laboratórium), Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Miskolci Egyetem, Varsói Műszaki Egyetem, Eszterházy Károly Egyetem, Atomki, BME, ELTE.

Két szeizmométer, egy magnetométer, és egy müontomográf lett telepítve a helyszín jellemzése érdekében. Az egyik szeizmométert a Wigner FK telepítette, a másikat a Varsói Egyetem. A szeizmikus zajhátteret Somlai László Ábel (Wigner FK) jellemezte lengyel kollégák segítségével. A magnetométert Dr. Lemperger István (CSFK GGI) üzemeltette, és a mérési adatokat is ő dolgozta

fel. A müontomográfot a Dr. Varga Dezső által vezetett Wigner FK-beli detektorfejlesztő csoport üzemelte be, és a jeleket is ők értékelték ki. A Mátra-hegység geofizikai vizsgálata, valamint a közettömegek anyagtulajdonságainak vizsgálata egészítette ki a zajméréseket.

Az Atomki Elektronikai Laboratóriuma célul tűzte ki egy olyan infrahang mérőrendszer kifejlesztését, amellyel hosszútávon lehet vizsgálni az infrahang zajhátteret az MGGL-ben. Az én feladatom volt megmutatni, hogy a zaj mennyivel alacsonyabb a föld alatt a földfelszínhez képest, és hogy hogy miért előnyös egy harmadik generációs gravitációshullám-detektor földfelszín alá történő telepítése. Ehhez szükséges volt új mérőeszközök és módszerek megalkotása is.

Az Elektronika Laboratórium munkatársaként a LIGO gravitációshullám-detektor infrahang zajhátterének tanulmányozása során szerzett tapasztalataim és a szakirodalomból szerzett ismereteim alapján javaslatokat tettem a kifejlesztendő mérőrendszerrel szemben támasztott követelményekre vonatkozóan.

Miután Dr. Czellar Sándor elkészítette a tervezett ISM1 infrahang mikrofont, az Elektronika Laboratórium célja egy hozzá tartozó, alacsony költségű adatgyűjtő rendszer kifejlesztése volt. Ennek során a feladatom a gyűjtött jelek időbélyeggel való ellátása lehetőségeinek tanulmányozása volt. Céлом volt a lehető legpontosabb időbélyeg biztosítása internet hozzáférés esetén és annak hiányában is. Ezen kívül megkerestem, hogy internet hozzáférés nélkül milyen adattároló eszköz (memóriakártya) alkalmas a földalatti környezetben történő alkalmazásra.

A mérőrendszer elkészülte után feladatom a megfelelő kalibrációs módszer megtervezése és végrehajtása volt, majd kalibrált mérőrendszer telepítése az MGGL-be. Miután ezeket elvégeztem, elkészítettem azokat a szoftvereket, amelyekkel elsődleges tudományos céljaim egyike, az MGGL infrahangzajhátterének jellemzése lehetővé vált. A zajhátter jellemzésekor feladatom volt az egyes zajforrások beazonosítása, és azok zajhátterhez való hozzájárulása mértékének meghatározása.

Végül célul tűztem ki az Einstein Teleszkóp infrahang eredetű newtoni zajának becslését is a mátrai telepítése esetére. Ehhez a CSFK GGI által üzemeltetett piszkástetői infrahang mérőállomások adatait választottam ki feldolgozásra, mivel a jelenlegi, infrahang eredetű newtoni zaj számolására szolgáló mód-

szerek felszíni mérési adatokat igényelnek, és a Mátrában ezek az infrahang-mérő állomások közel esnek az ET korábban javasolt telepítési helyszíné által kijelölt területhez.

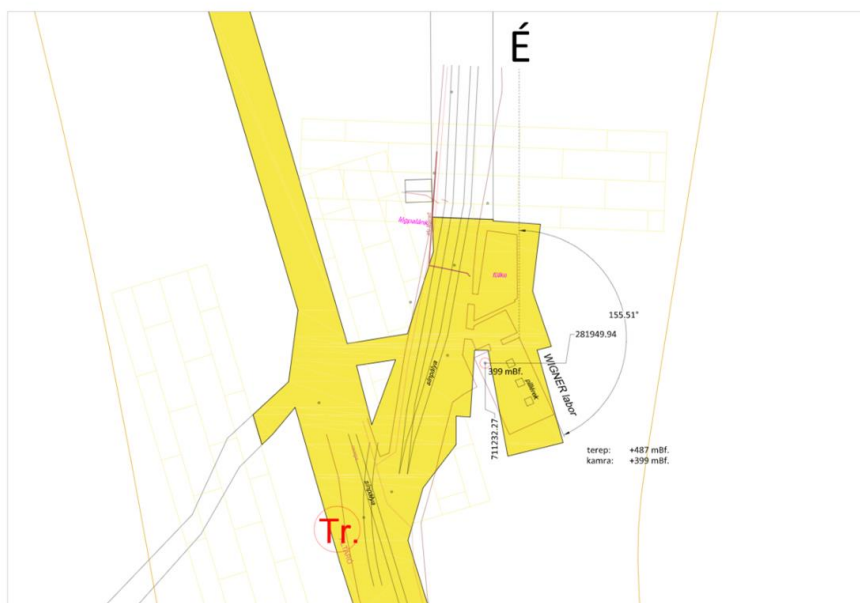
Az Atomki Elektronikai Laboratóriumának célja a már működő gravitációshullám-detektorok fizikai környezetét monitorozó rendszereknek infrahang-mikrofonokkal történő ellátása is. Az adVirgo környezetébe szánt ISM1801 infrahang mikrofon tervezésekor egyrészt azt a célt tűztem ki, hogy az új eszköz legyen képes a kereskedelmi forgalomban kapható, és az adVirgonál működő Brüel&Kjaer 4193 típusú mikrofon frekvenciatartományának alsó határát (0,1 Hz) alacsonyabb frekvenciaértékek irányában meghaladni. Elvárás volt az új mikrofon tervezésekor, hogy legyen képes az infrahangnak megfelelő, 20 Hz-ig kiterjedő frekvenciaintervallumon mérni. Ezen túlmenően szerettem volna, hogy legyen egy széles átfedési sáv a Brüel&Kjaer 4193 mikrofonnal a kifejlesztett rendszerünk megbízható működésének tesztelésére, valamint kalibrálására is.

Miután az általam javasolt specifikációk alapján Dr. Molnár József és Dr. Czellár Sándor elkészítették az új mérőrendszert Atomki Elektronikai Laboratóriumában, feladatom volt annak telepítése az adVirgo gravitációshullám-detektor központi épületébe. A detektor infrahang környezetét meghatározó források beazonosítása után célul tűztem ki a forrásoknak az infrahangzajhátterre kifejtett hatásának tanulmányozását is.

Az MGGL és az adVirgo infrahang zajhátterének jellemzése után kapott eredményeket összehasonlítottam az alábbi helyszíneken mért infrahangzajhátterekkel:

- az olaszországi Szardínia szigetén található Sos Ennatos bánya [47], vagyis a majdani Einstein Teleszkóp egyik lehetsége helyszínén
- valamint a felszíni LIGO [49] [50] gravitációshullám-obszervatórium hanfordi interferométerénél

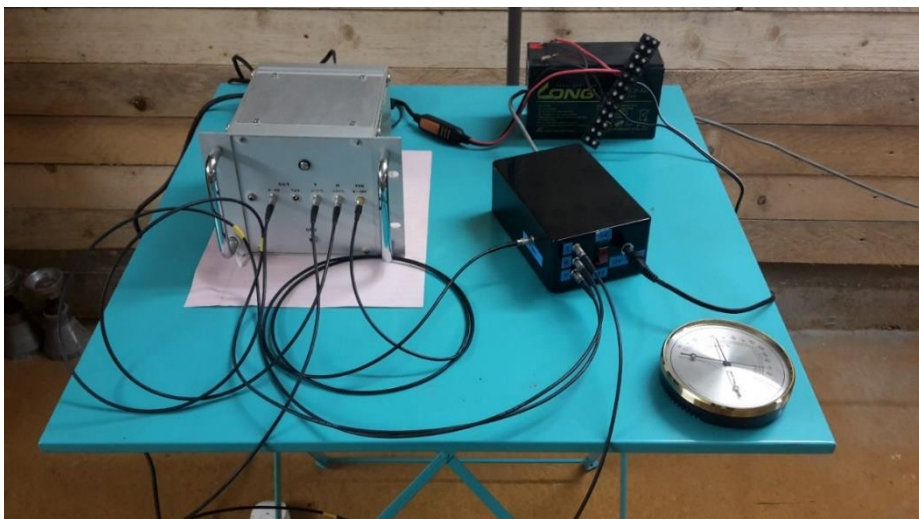
Végül összegeztem a kutatásaim során nyert tapasztalataimat, és javaslatokat tettem a gravitációshullám-detektorok infrahangzajhátterének vizsgálatára vonatkozóan módszer- és eszközfejlesztés terén. A hosszútávú méréseim célja volt az Einstein Teleszkóp potenciális helyszíneinek tanulmányozása során alkalmazandó mérési módszerek és fejlesztési irányaik tanulmányozása is.



6. ábra. A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium (a képen a WIGNER laborként jelezve) elhelyezkedése a gyöngyösorsoszi bányában.



7. ábra. Az MGGL. A kép bal oldalán látható betontömbök szeizmométerek elhelyezésére lettek kialakítva. Az Atomki által kifejlesztett és üzemeltetett infrahangmérő rendszer a türkizkék asztalon látható (a kép jobb oldalán).



8. ábra. Az ISM1 mikrofont és a Raspberry Pi3 alapú adatgyűjtőt tartalmazó adatgyűjtő rendszer mérési összeállítása az MGGL-ben.

3. Alkalmazott eszközök és módszerek

3.1. A környezeti zajok jelanalízise

A zajok időbeli viselkedésének jellemzése érdekében célszerű a zajok besorolása a statisztikus jelfeldolgozásban megkülönböztetett kategóriák egyikébe. A kategorizálás segít a zajok forrásának beazonosításában és a zajok elleni védekezésben is.

A természeti folyamatok eredményeként létrejövő zaj megfelelő hosszúságú időtávon stacionáriusnak tekinthető, azaz a statisztikai jellemzői időben állandóak. Ilyen statisztikai jellemzők például az amplitúdóeloszlás lineáris középpértéke és valamilyen, az eloszlás terjedelmét jellemző mennyiség, például a szórás.

A stacionárius háttérzaj mellett előfordulhatnak rövidebb időtartamra korlátozódó nem stacionárius zajok is. A nem stacionárius zajok alcsoportját képezik a kvázistacionárius jelek, amelyek azonban megfelelően rövid időintervallumon belül stacionáriusnak tekinthetők, statisztikusan úgy jellemezhetők, mint a stacionárius jelek. Hosszútávon azonban változnak ezek a statisztikai jellemzők.

A nem stacionárius zajok közé soroljuk a rövid időtartamú tranziens zajokat. Ha egy mérőeszköz környezetében olyan esemény zajlik le, amely az esemény forrására jellemző, a detektor által mért mennyiség kitörésszerű megváltozásával jár, akkor a mérőeszköz által szolgáltatott jelben egy rövid ideig tartó, nagy teljesítményű tranziens szakasz jelenik meg.

A következő két alfejezet ismerteti azokat az általam használt módszereket, amelyekkel megkerestük az infrahangzajhátterben fellépő tranziens zajokat, valamint kiszámítottuk a háttérzaj statisztikus jellemzőit. A módszerek más háttérzajokra is alkalmazhatóak az aktuálisan vizsgált zaj viselkedésének megfelelő módosítások bevezetésével.

3.1.1. Statisztikus jelanalízis

A zajhátter egyes, eltérő forrású összetevőinek megkeresésekor alkalmazott spektrális analízis létrejöttét a Fourier-tétel tette lehetővé: minden periodikus hullám adott alaphfrekvenciához tartozó szinusz hullámból és annak felharmonikusából tevődik össze. A Fourier-integrál bevezetésével a Fourier-tétel nem periodikus függvényekre is kiterjeszthetővé vált [51].

A jel összetevőinek meghatározására a Fourier-transzformációt alkalmazzuk. A transzformáció eredményeként kapott spektrum a jel frekvenciatérbeli ábrázolása. Megmutatja, hogy mekkora frekvenciájú összetevők mekkora amplitúdójú hozzájárulást adnak a jelhez.

Ha folytonos függvények helyett diszkrét értékű függvények Fourier-transzformáltját szeretnénk kiszámolni, az erre az esetre alkalmazandó diszkrét Fourier-transzformációt (DFT) kell alkalmaznunk. A diszkrét Fourier-transzformáció diszkrét frekvenciaértékekre van értelmezve. Ebben az esetben a Fourier-transzformált nem definiálható tetszőlegesen nagy frekvenciaértékekre. A maximális meghatározható f_{max} értéket az alábbi összefüggés adja meg:

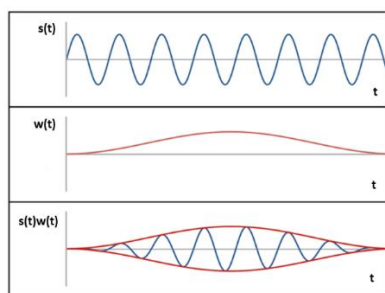
$$f_{max} < \frac{1}{2\Delta t_s} \quad (10)$$

ahol Δt_s két egymást követő mintavétel közt eltelt idő. Annak érdekében, hogy egy mintavételezett jelet a Fourier-transzformáció során kapott összetevőiből hibátlanul helyre tudjuk állítani, Shannon mintavételi tétele szerint az eredeti analóg jelet a benne előforduló legnagyobb frekvenciájú jelössze-

tevőhöz tartozó frekvencia kétszeresénél nagyobb frekvenciával kell mintavételezni. A DFT számítógépes meghatározására használt algoritmus a gyors Fourier-transzformáció (Fast Fourier Transformation, FFT) [52].

Ha analóg jelek véges szakaszának mintavételezett idősorára szeretnénk alkalmazni a DFT-t, az eljárás azt feltételezi, hogy a transzformálandó jelszakasznak megfelelő analóg jelszakasz periodikusan, szakadás nélkül ismétlődik abban az analóg jelben, amelynek egy véges szakaszát mintavételeztük. A gyakorlatban ez a feltétel általában nem teljesül. A diszkrét Fourier-transzformáció automatikus alkalmazása ilyen esetben a spektrális szivárgás jelenségéhez vezet, azaz a transzformáció olyan összetevőket is eredményez, amelyek az eredeti jelben - amelyből a véges szakaszt vettük - nincsenek jelen.

A spektrális szivárgás elkerülésének érdekében ún. ablakfüggvényeket alkalmazunk. Ezek olyan szimmetrikus függvények, amelyek az értelmezési tartományuk szélein érik el minimumukat, jellemzően a 0 értéket, és az értelmezési tartományuk közepén érik el maximális értéküket, 1-et. A vizsgált jel egy szegmensének megszorozása ugyanolyan hosszúságú ablakfüggvénnyel olyan jelet eredményez, amely az elején és a végén 0 értéket vesz fel, a közbenső tartományain pedig a 9. ábrán látható módon alakul a menete. Így tudjuk biztosítani a véges jelszakaszok Fourier-transzformációja során azt, hogy a jelszakasz hosszának megfelelő periodicitás kerüljön a jelbe. A jelszakasz elejének és végének 0 értéke biztosítja a szakadásmentességet.



9. ábra Ablakfüggvény alkalmazása egy véges jelszakaszra. Az első sorban a jelszakasz látható, a másodikban az ablakfüggvény, a harmadikban pedig kékekkel jelölve az ablakfüggvény és a jelszakasz szorzata.

A nem determinisztikus jelek analízisekor a jel összetevőinek statisztikusan ingadozó fázisát nem vizsgáljuk. A Fourier-transzformált helyett ezért a teljesítmény spektrális sűrűséget (Power Spectral Density, PSD) használjuk.

A PSD kiszámításához először kivonjuk a jelekből a teljes jelszakasz értékeinek átlagát [48] (10. ábra), majd eltávolítjuk a jelből a teljes szakaszra vett trendet. Azután Nuttall ablakfüggvény alkalmazásával „ablakozzuk” a jelet [53], azaz minden egyes értékét megszorozzuk az ablakfüggvény megfelelő értékével:

$$\tilde{s}_i = w_i(s_i - \langle s \rangle) \quad (11)$$

Az így kapott ablakozott jelet a gyors Fourier-transzformációnak vetjük alá, majd a kapott S_k spektrumból kiszámítjuk az egyoldali teljesítmény spektrális sűrűséget kapjuk:

$$PSD_k^{(s)} = \frac{2}{f_s N W} |S_k|^2 \quad (12)$$

ahol N a diszkrét jelszakasz hossza, f_s a mintavételezési frekvencia, és a $W = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_n^2$ összeggel az ablakfüggvény alkalmazásának hatását vesszük figyelembe.

A teljesítmény spektrális sűrűség négyzetgyöke az amplitúdó spektrális sűrűség (ASD).

$$ASD_k^{(s)} = \sqrt{PSD_k^{(s)}}. \quad (13)$$

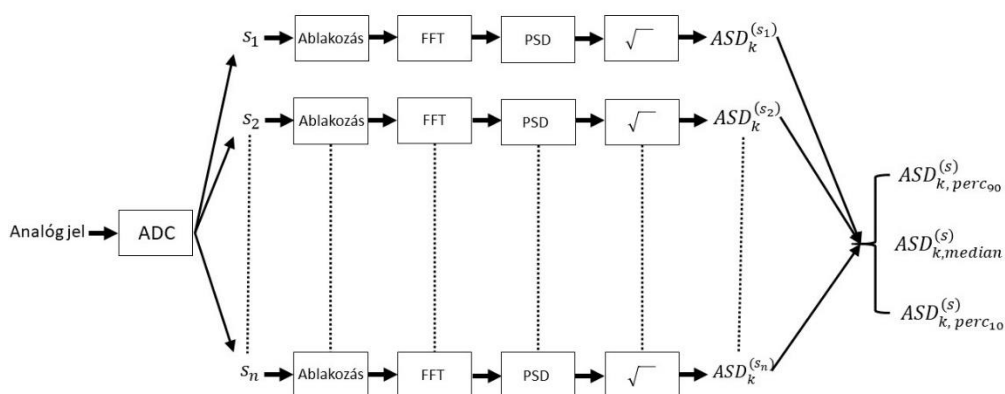


10. ábra. Egy analóg jelszakasz amplitúdó spektrális sűrűségének (ASD) kiszámítása.

A stacionárius háttérzaj hosszútávú viselkedését az alábbi módszerrel jellemezttem (11. ábra):

1. az s jelsorozatot néhány perces hosszúságú s_i szegmensekre osztottam,
2. kiszámítottam az egyes szegmensek $ASD_k^{(s_i)}$ értékeit,
3. kiszámítottam az egyes szegmensek adott k -hoz tartozó $ASD_k^{(s_i)}$ értékeiből alkotott minta mediánját, valamint a minta 10. és 90. percentiliseit.

A jel változásai az idő felében várhatóan a mediánnál kisebbek, míg az idő másik felében nagyobbak. Az idő kilencven százalékában a 90. percentilis alatt maradnak, az idő tíz százalékában pedig a 10. percentilis alatt.



11. ábra. A stacionárius háttérzaj jellemzéséhez használt mennyiségek kiszámításának folyamata.

3.1.2. Tranziens jelszakaszok keresése

Ha egy mérőeszköz környezetében olyan esemény zajlik le, amely a detektor által mért mennyiség kitörésszerű megváltozásával jár, akkor a mérőeszköz által szolgáltatott jelben rövid ideig tartó, nagy teljesítményű tranziens szakasz jelenik meg. A LIGO interferométerek jelében előforduló tranziensek megkeresésére használt algoritmusok egyike a wavelet-transzformáció segítségével keresi meg a kiugró jelszakaszokat [54]. Ennek az eljárásnak a mintájára a tranziens zajok időben és frekvenciatérben való lokalizációja céljából

saját módszert dolgoztam ki [PhDJ04]. Az eljárás során Haar-transzformációt [55] használtam.

A Haar-transzformáció első lépése approximációs koefficienseket és részletértékeket számít ki a digitalizált jelből.

Jelölje a digitalizált jelet $s_i^{(0)}$, ahol $i = 1, 2, \dots, N$. Ekkor az approximációs koefficiensek:

$$s_i^{(n+1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (s_{2i-1}^{(n)} + s_{2i}^{(n)}) \quad (14)$$

a részletértékek:

$$d_i^{(n+1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (s_{2i-1}^{(n)} - s_{2i}^{(n)}) \quad (15)$$

Az approximációs koefficiensek az eredeti jel trendjét, míg a részletértékek a jel fluktuációit mutatják meg a különböző alsávokban.

A tranziensek keresésekor meg kell határozni, hogy a transzformáció melyik i -edik szintjei felelnek meg a vizsgált jel frekvenciatartományának. A transzformáció egymás utáni lépéseiben kapott részletértékekhez társítható Δf_n frekvencia intervallumok hossza feleződik, míg a Δt_n időintervallumok hossza megkétszereződik. A részletértékek statisztikai tulajdonságai vizsgálata érdekében az eredeti jel olyan hosszú szakaszát kell alávetni a Haar-transzformációnak, amely a legutolsó releváns szinthez tartozó Δt_n időszaknak legalább néhányszor tízszerese. Ilyen hosszú jelszakaszon a tranziensekhez tartozó, adott szinten vett egyedi részletértékek az adott szint részletértékeinek sokaságában kiugró értéként jelennek meg.

A kiugró részletértékek megkeresésekor először is meg kell határozni az adott szinthez tartozó részletérték-vektor komponenseinek statisztikai értelemben vett terjedelmét. A terjedelem jellemzésére olyan mennyiséget kell választani, amelyeket a kiugró értékek csak kismértékben módosítanak. A szórás nem alkalmas a célra, mivel annak kiszámításához a mintaátlagot használjuk, amelyet a kiugró értékek nagy mértékben képesek módosítani. Ezért az ún. medián abszolút eltérést (median absolute deviation, MAD) mennyiséget használtam a terjedelem számszerű megadására:

$$MAD^{(k)} = \text{median} \left(\left| d_i^{(k)} - m^{(k)} \right| \right) \quad (16)$$

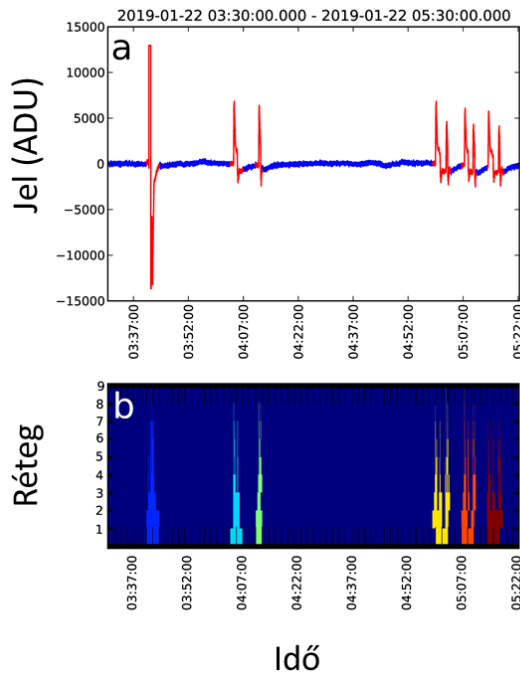
ahol $m^{(k)}$ a k -adik szinthez tartozó részletértékek mediánja [56].

Ha egy adott szinthez tartozó részletértékek normál eloszlásúak, akkor

$$\sigma^{(k)} = 1,4826 MAD^{(k)} \quad (17)$$

ahol $\sigma^{(k)}$ a részletértékek szórása. Azt feltételeztem, hogy a kiugró értékeket nem tartalmazó részletérték-sokaság megközelítően normál eloszlású egy adott k szinten. Ekkor egy adott $d_i^{(k)}$ részletértéket kiugrónak tekintünk, ha $|d_i^{(k)}| > 5 * 1,4826 MAD^{(k)}$.

Annak érdekében, hogy az eltérő szinteken jelen levő, de ugyanahhoz a tranziens jelhez tartozó kiugró részletértékeket meg tudjam keresni, egy csoportosulást kereső eljárást dolgoztam ki. Két részletértéket ugyanahhoz a csoportosuláshoz soroljuk, ha a hozzájuk társítható időintervallumok átfednek, vagy egy koincidencia intervallumon belül fordulnak elő, amit a legutolsó figyelembe vett szint részletértékeihez társítható időintervallum jelöl ki. A talált csoportosulásokat ezután megjelöltem egyrészt további analízis céljából, másrészt azért, hogy a stacionárius zajhátterőtől el lehessen különíteni a hozzájuk tartozó tranzienseket (12. ábra).



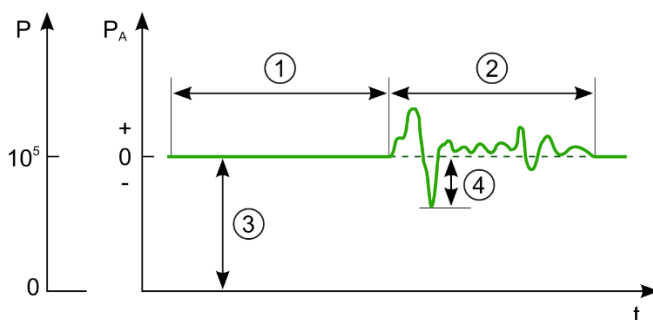
12. ábra. a) A tranziens jelszakaszok a digitalizált, az analóg-digitális átalakításkor kapott ADC egységekben (ADU) megadott infrahang jelben. b) A tranziens jelszakaszoknak megfelelő csoportosulások a Haar-transzformáció során kapott részletértékek halmazában.

3.2. Az infrahangok mérésére használt eszközök és módszerek

Hangnak nevezzük egy közvetítő közeg olyan rezgéseit, amelyek a nyomásnak a statikus környezeti nyomáshoz viszonyított megváltozását okozzák.

$$p_{total} = p_{stat} + p \quad (18)$$

ahol p_{stat} a környezeti nyomás, p a hangnyomás egy adott időpontban, és p_{total} ezek összege (13. ábra) [57] [58].



13. ábra. A nyomás időfüggése egy hang megjelenésekor. 1: a csend szakasza, 2: a hang szakasza, 3: a légnyomás, 4: a hangnyomás.
(Forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure)

Az infrahang megnevezés alatt a 20 Hz frekvencia alatti hangrezgéseket értjük. Az infrahangok frekvenciatartományának alsó határát, a ~3 mHz-es értéket a Föld légkörének vastagsága szabja meg [59]. A leggyakoribb környezeti infrahangzaj forrásokról a 1. táblázat ad áttekintést.

1. táblázat. A leggyakoribb környezeti infrahangzaj források.

Infrahang forrása	Infrahang amplitudója
Kitörésszerű jelek	
vulkánkitörés [60]	100 Pa (a kitörés helyszínén) ~10 Pa (a kitöréstől ~1000 km-re)
meteor felrobbanása [61]	0,01 Pa - 10 Pa általában >10 Pa extrém esetekben
vegyi- és bányászati robbanások [62] [63]	1 mPa - 5 Pa
szuperszonikus repülőgépek (hang-robbanás) [64]	0,01 pa - 10 Pa
villámlás [65]	0,01 Pa - 2 Pa
rakéták [66]	néhány Pa
aurora [67]	~1 Pa
Folytonos jelek	
mikrobarom [68]	0,01 Pa-tól 0,3 Pa-ig
földrengések [69]	0,01 Pa-tól néhány Pa-ig
repülőgépek [70]	2 Pa
turbulencia hegyek fölött [71]	<1 Pa
szélturbina [72]	0,5 Pa - 1 Pa

3.2.1. A saját mérések és számítások során referenciaként használt földfelszíni infrahangzajhátter és a Bowman-modellek

A Földön állandóan jelenlevő környezeti infrahanghátterzaj jellemzésére statisztikai mennyiségeket vezettek be: a Föld felszínén mérhető hátterzaj amplitudó spektrális sűrűsége (ASD) értékeiből számolt Bowman-féle modelleket [73]. A modellek alkalmas referenciának bizonyultak az infrahangdetektorok jellemzőinek megadása során is. A geofizikai célú kutatásokra kifejlesztett infrahangdetektorok saját zajánál alkalmazott decibel (dB) skála referenciaszintje a Bowman-féle alacsony zaj modell (low noise model) lett [73].

A referenciaértékek frekvenciafüggő ASD értékek, ezért a dB-ben kifejezett sajátzaj értékek is frekvenciafüggők.

Az infrahangkutatásoknak nagy lendületet adott az Átfogó Atomcsend Egyezmény ENSZ Közgyűlése általi 1996. szeptember 10-én történő elfogadása. A

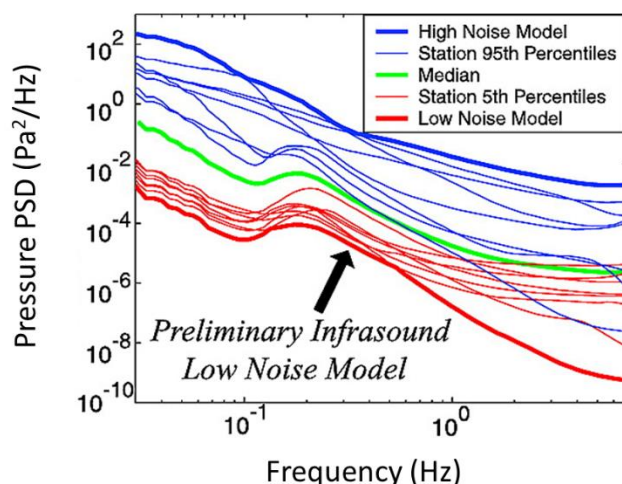
csatlakozó országok geofizikai és egyéb technológiákat felhasználó mérőszek-szerekkel ellenőrzik a szerződés betartását. A rendszerek összefog-laló neve: International Monitoring System (IMS) [74] [75] [76]. A rendszer része egy infrahangot monitorozó hálózat is.

Annak érdekében, hogy a környezeti infrahanghátteraj változásainak statisztikai jellemzőit, valamint a változások okait az illetékes szakemberek jobban megismerjék, és ezáltal a légköri nukleáris robbantásoktól származó jelek de-tekstálásában előre léphessenek, Bowman és társszerzői 21, a Föld különböző pontjain telepített infrahang mérőállomás egy év alatt gyűjtött adatait ele-mezték [73]. Az állomások mindegyike egy mikrobarométert, digitalizáló egy-séget, valamint a mérőeszközhöz csatolt, a szél által okozott zaj csillapítására szolgáló csőrendszert tartalmaz.

Minden mérőállomás esetén minden nap a négy napszaktól vettek adatsza-kaszokat, majd kiszámolták azok PSD értékeit a $0,03\text{ Hz} - 7\text{ Hz}$ frekvenciatar-tományra. Végül meghatározták a PSD értékek mediánját, valamint az 5. és 95. percentilisé minden egyes frekvenciára. Kiderült, hogy egy állomás 5. és 95. percentilise közt akár négy nagyságrendnyi eltérés is lehet akár minden frekvencián is (14. ábra).

Megállapították, hogy a környezeti infrahangzajhátteret a $0,1\text{ Hz}$ és $0,4\text{ Hz}$ közötti frekvenciatartományon a légkörnek az óceáni viharok által generált nagy távolságra kiterjedő fluktuációi dominálják. Ezek nagysága néhányszor 10 Pa , terjedésüket a sztratoszféra szelei befolyásolják. A $0,4\text{ Hz}$ -nél na-gyobb frekvenciákon a helyi turbulens áramlások és a szél a meghatározó ha-tás.

Egy adott állomáson mért infrahang-hátteret az alábbi körülmények is befo-lyásolják: a helyi klíma, az állomás elhelyezkedése az óceánhoz képest, a helyi topográfiai viszonyok, a növényzet, a mérőrendszer és a szélzaj elleni véde-lem kialakítása és egyéb helyi zajforrások.



14. ábra. A Bowman-modellek [73].

A Bowman-féle zajmodellek értékeit befolyásolja a meghatározásukra használt mérési adatokat szolgáltató infrahangdetektorok saját zajának jelszintje is. A modellek publikálása óta lényegesen alacsonyabb szintre sikerült leszorítani az újabb mérőeszközök saját zaját. Ezért ma már az új fejlesztésű eszközöket használják a Bowman modellek meghatározásához adatokat szolgáltató mérőállomásokban [77], és új zajmodellek megalkotására lenne lehetőség [78]. Ennek ellenére továbbra is a korábban publikált Bowman modelleket szokás referenciaként alkalmazni a kutatási- és műszerfejlesztési tevékenységek során.

3.2.2. Infrahangot mérő eszközök

Infrahangszenzorként μ bar érzékenységű kondenzátormikrofonokat vagy mikrobarométereket használnak leggyakrabban [79] [80] [81] [82]. A szenzor sávszélessége az a frekvenciaintervallum, amelyen belül képes detektálni a hangrezgéseket és az érzékenységétől függő amplitúdójú elektromos analóg feszültségjelet kiadni a hangnyomás hatására. Az infrahangszenzorok az 1. táblázatban megadott tartományokban alkalmasak a jelek torzításmentes mérésére.

A szenzorok által kiadott elektromos feszültség ingadozik. A mikrofon saját zaja alatt azokat a feszültségingadozásokat értjük, amelyek akkor is jelen vannak, amikor semmilyen hanghullám nem éri el a mikrofont. A fluktuációkat főleg a levegő és a szenzor atomjainak és molekuláinak hőmozgása (Johnson-Nyquist zaj) valamint a töltéshordozók kvantáltsága miatti sörétzaj (shot noise) okozza.

A szenzorok a saját zajuknál nagyobb nyomásamplitúdójú hangokat képesek detektálni [83] [84]. A saját zaj nagyságát Pa-ban vagy dB-ben szokás megadni. Az ideális infrahangszenzor sajátzaja alacsonyabb, mint a Bowman-féle alacsony zaj modell által meghatározott zajszint [73].

Az analóg jel digitalizálásának első lépése a Shannon-törvény szerinti mintavételezés. A kvantálást során a digitalizáló egység a bemeneti analóg jel tartományát egyenlő intervallumokra osztja fel annak megfelelően, hogy hány biten képes ábrázolni a kimenő digitális jelet, azaz milyen a felbontása. Ha az ADC n számú biten képes ábrázolni a digitális jelet, akkor 2^n referencia jel-szintet határoz meg. A mintavételezés során az ADC összehasonlítja az analóg jelből vett mintát a referencia szinttel és eldönti, hogy az adott minta melyik bemeneti tartományba esik, majd előállít egy az adott tartományhoz rendelt bináris számot.

Az ADC kivezérlési tartománya (full scale, FS) az az analóg feszültségtartomány, amelyen az ADC telítésmentesen tud működni. A legkisebb helyiértékű bit (Least Significant Bit, LSB) megváltoztatásához szükséges eltérés a bemeneti értékben:

$$LSB = \frac{FS}{2^n - 1} \quad (19)$$

3.2.3. Infrahangmikrofonok kalibrációja

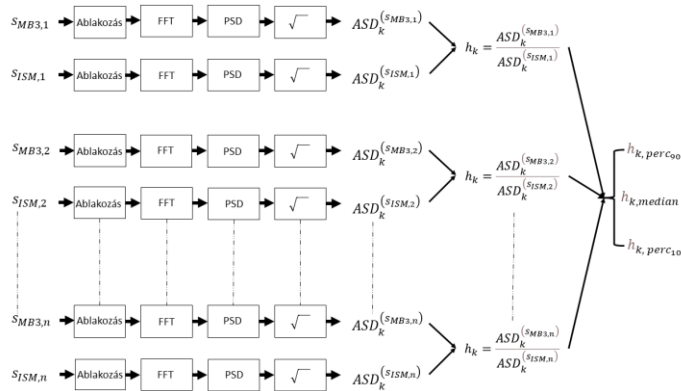
Az összehasonlító kalibráció során a referenciamikrofon egy korábban már kalibrált ismert érzékenységgű mikrofon. Az összehasonlító kalibráció lényege, hogy minden pillanatban ugyanakkora nyomásnak tesszük ki a referenciamikrofont és a kalibrálandó mikrofont. Ezt úgy lehet elérni, hogy a két mikrofont egymáshoz a lehető legközelebb helyezzük el. Ilyen módon végeztem el az ISM1 mikrofon kalibrációját az MB3 mikrobarométer segítségével (ld. 4.1 fejezet).

A kalibráció pontosságát a kimeneti feszültségek mérésének bizonytalansága, a referencia mikrofon érzékenységeinek bizonytalansága, valamint a környezeti feltételek ingadozása (pl. a hőmérséklet, a nyomás térbeli inhomogenitása) határozza meg. A nyomás térbeli inhomogenitása esetén nem ugyanakora nyomásnak van kitéve a két mikrofon ugyanabban az időpontban.

Ha az infrahangok amplitúdó spektrális sűrűségére vagyunk kíváncsiak, a kalibrációt úgy is végrehajthatjuk, hogy első lépésként a referencia mikrobarométer (MB3) adott i -edik időintervallumban gyűjtött mérési adataiból ($s_{MB3,i}$) kiszámoljuk az infrahang ASD-jét: $ASD_k^{(s_{MB3,i})}$. Azután a kalibrálandó ISM mikrofon ADC egységeiben megadott, ugyanahhoz az időintervallumhoz tartozó mérési adataiból ($s_{ISM,i}$) számított $ASD_k^{(s_{ISM,i})}$ értékeivel elosztjuk a referencia ASD értékeket. Így olyan h_k átviteli függvényhez jutunk, amellyel az ISM mikrofon ADC értékekben megadott ASD-jéből kiszámíthatjuk a valódi infrahang ASD-t:

$$h_k = \frac{ASD_k^{(s_{MB3,i})}}{ASD_k^{(s_{ISM,i})}}. \quad (20)$$

Erre az átviteli függvényre is hatnak a fenti hibaforrások, így több, ugyanolyan hosszúságú időintervallumra kell elvégezni a kiszámítását. A kapott egyedi átviteli függvények eltérnek, így a végleges átviteli függvény csak hibahatárokkal együtt adható meg. Az alsó(felső) hibahatár kijelölhető az egyedi átviteli függvényeknek adott frekvenciához tartozó értékeinek a 10.(95.) percentilisét vesszük. Az átviteli függvényt pedig a medián értékekkel jelölhetjük ki (15. ábra).



15. ábra. Az ISM infrahangmikrofonok ASD átviteli függvényei kiszámításának folyamata.

3.3. Az Atomki által kifejlesztett infrahangmérő rendszerek

A debreceni Atommagkutató Intézet a részvételemmel két infrahangmikrofon típust (ISM1 és ISM1801) fejlesztett ki az infrahangzajháttér vizsgálatára. Mindkét típus két fő részből áll: egy iparilag előállított kapacitív szenzorból és egy kapacitás-feszültség átalakítóból. A kapacitív szenzornak két bemenete van: az egyik a külvilág felé nyitott, a másik pedig egy referencia-térfogattal van összekötve. A két bemenet között egy membrán található. Ha a környezet és a referencia-térfogatbeli nyomás különbsége megváltozik, a membrán elmozdul. A szenzor az elmozdulás mértékétől függő elektromos jelet ad ki, amit egy elektronikai egység felerősít, az ISM1 esetén a -5 -től +5 V-os tartományra, az ISM1801 esetén a -10 -től +10 V-os tartományra. A referencia-térfogat egy 250 mikron átmérőjű lyukon keresztül egyenlítődik ki lassan a környezeti nyomással. A lyuk mérete határozza meg az infrahang mikrofon mérési tartománya alsó frekvenciáját.

A felépítés esetén a $\frac{dT}{dt} > 2 \frac{^{\circ}C}{h}$ hőmérsékletváltozási gyorsaságok artifaktumokat okoznak a mérőeszköz által szolgáltatott jelek 1 Hz -nél kisebb frekvenciájú összetevőiben, mivel a referenciatérfogat hőmérsékletváltozása miatti nyomásváltozások a mikrofon frekvenciabeli mérési tartományába esnek. Azért, hogy ezeket a hőmérsékletváltozásokat követni lehessen, és utána ezekkel korrigálni lehessen a mért jeleket, egy nagyfelbontású hőmérő is be lett építve az infrahangdetektorba.

2. táblázat. Az ATOMKI által fejlesztett infrahangmikrofonok paraméterei.

	ISM1	ISM1801
Bemeneti feszültség (V)	6-10	7,5-12
Kimeneti feszültség (V)	0 – 5	-10 – 10
Érzékenység (V/Pa)	0,2	1
Mérési tartomány (Pa)	-12,5 – 12,5	-10 – 10
Frekvenciatartomány (Hz)	0,01 – 10	0,01 -30
Saját zaj	1 mPa peak-to peak	1 mPa peak-to peak
Beépített hőmérő	van	nincs

A méréseim során használt ISM1 típusú mikrofont tartalmazó mérőrendszerben (16. és 17. ábrák) a jelek digitalizálását és a digitalizált jelek tárolását egy Raspberry Pi 3 Model B számítógép [85] és a hozzá könnyen csatlakoztatható

Adafruit ADS1115 analóg-digitál konverterrel oldottuk meg [86]. A Raspberry Pi 3 Model B processzora egy 64-bites négy magos, 1,2 GHz órajel frekvenciájú általános célú ARM Cortex-A53-as processzor. Költséghatékonysága, alacsony fogyasztásához viszonyított nagy teljesítménye, kis mérete és rugalmassága miatt választottuk ezt a kártyaszámítógépet.

Az Adafruit ADS1115 egy könnyen használható és olcsó analóg digitális konverter modul. A modul fő komponense a Texas Instruments által gyártott ADS1115 chip, amely egy kis méretű, 2-5.5V maximum referencia feszültségű, 16 bites, 860 minta/másodperc mintavételezési sebességű négy csatornás ADC chip. A modullal I²C interfészen lehet kommunikálni. A mintavételi sebessége és precizitása kellően jónak bizonyult az ISM1 által kiadott jelek feldolgozásához. Az eszköz maximális referenciafeszültsége 5.5 V, ezért az ISM1 mikrofon 0-5 V-os kimenetének jelei digitalizálhatóak vele. Az ADC modul LSB értéke kisebb, mint a mikrofon saját zaja, ezért megfelelő választás.

Az SD kártya a Raspberry PI konfiguráció kötelező eleme. Az operációs rendszer tárolása mellett háttértárként is szolgál. Ide vannak telepítve a különböző programok, illetve ide menti a rendszer a digitalizált mérési adatokat is. Ezért az SD kártya sebessége nagy mértékben befolyásolja a Raspberry PI működési sebességét. Nem megfelelő SD kártya használata esetén a rendszer lefagyhat. A Kingston INDUSTRIAL kártya megfelel az infrahangmérő rendszerrel szemben támasztott követelményeknek [87].

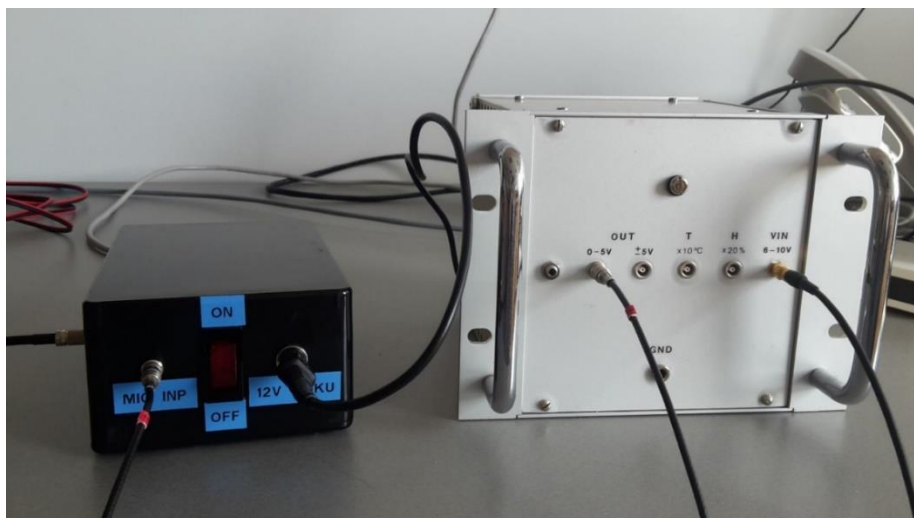
Az időbélyeg

Ha a Raspberry az Internetre van csatlakoztatva, akkor az ún, NTP időt használja [88]. Ha a Raspberry PI nincs hálózatra kötve, de szükséges a pontos időt használni az időbélyegeket kinyeréséhez, akkor egy ún. Real Time Clock (RTC) modullal lehet az időt mérni. Az RTC-t pontossága függ a környezeti paraméterektől is (hőmérséklettől, páratartalom). Az infrahang mérőrendszerhez egy DS3231 típusú, i2c interfészen csatlakoztatható precíziós, hőmérséklet kompenzált, biztonsági tartalék elemmel ellátott Real Time Clock (RTC) modult választottam [89]. Az eszköz 0°C és +40°C fok közötti hőmérsékleten ±2ppm pontossággal, -40°C és +85°C között pedig ±3.5ppm pontossággal működik. Ez azt jelenti, hogy egymillió másodperc (mintegy 11,57 nap) elteltével az időmérés pontatlansága min. 2-3,5 másodperc lesz attól függően, hogy milyen hőmérsékleti tartományon használjuk az eszközt.

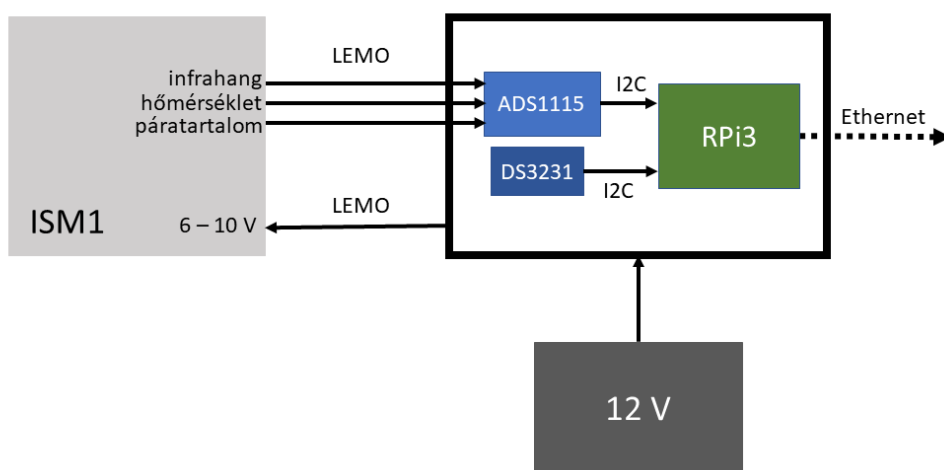
Az RTC első használatakor csatlakoztatni kell a Raspberry PI-t a hálózathoz, hogy az RTC onnan kapja meg a pontos időt, ami számára a kezdeti időpont

lesz (t_0). A t_0 időpont annál pontosabb, minél gyorsabb az internetkapcsolat és minél közelebbi NTP szerverről történik az idő lekérés.

Az infrahang-mérőrendszer adatgyűjtő szoftverét Varga Máté, az Atommagkutató Intézet Elektronika Laborjának munkatársa írta C++ nyelven.



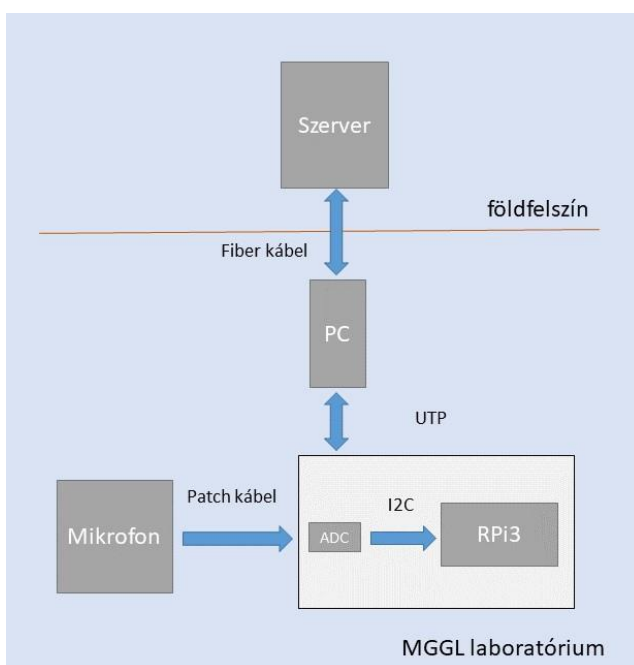
16. ábra. Az ISM1 infrahangmikrofon (jobbra) és az adatgyűjtő rendszer a fekete műszerdobozban (balra).



17. ábra. Az ISM1 mikrofonnal megépült infrahang mérőrendszer.

3.3.1. Az ISM1 mikrofont tartalmazó infrahang mérőrendszer integrálása az MGGL adatgyűjtő rendszerébe

Az ISM1 mikrofont tartalmazó rendszert a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumban telepítettem. Az infrahangmikrofon jeleit a Raspberry PI3 miniszámítógéppel megépített adatgyűjtő rendszer digitalizálta, majd továbbította a laboratóriumban elhelyezett közös adatgyűjtő PC-re. A fölfelszínre telepített szerver felé optikai kábelen keresztül továbbítottak az adatok. A szerver internetcsatlakozással rendelkezik, így az adatgyűjtő rendszer távoli elérésére is lehetséges (18. ábra).

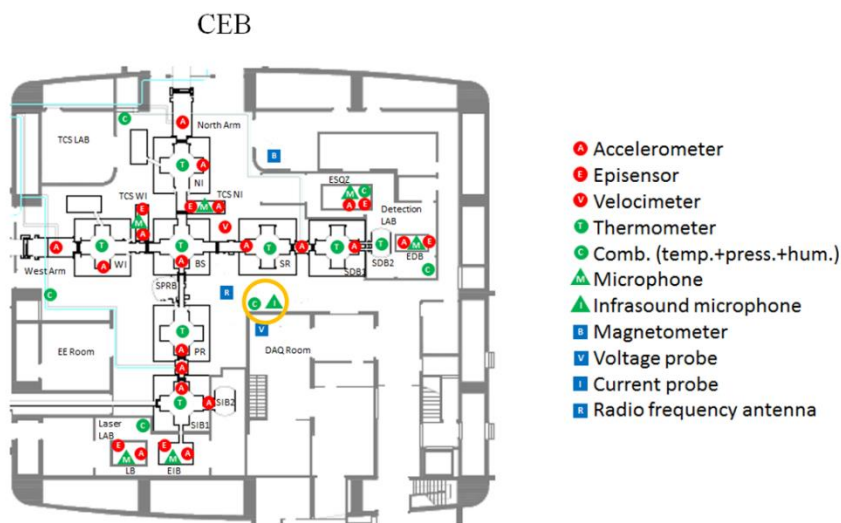


18. ábra. Az infrahang mérőrendszer integrálása az MGGL-beli adatgyűjtő rendszerbe.

3.3.2. Az ISM1801 mikrofont tartalmazó mérőrendszer integrálása az adVirgo környezetmonitorozó rendszerébe

Az adVirgo gravitációshullám-detektor környezetét monitorozó rendszerek számára kétféle mintavételezési frekvenciájú adatgyűjtő csatorna áll rendelkezésre. Az egyik 1 Hz-es mintavételezésű, a másik 20 kHz-es [90]. Az ISM1801 mikrofonnal összeállított infrahangmérő rendszer számára a második felel meg. A 20 kHz-es mintavételezés esetén kétféle bemeneti feszültségű ADC-hez lehet csatlakozni. Az ADC7674 jelű bemenete $\pm 20V$, míg a ADC2378 jelűé $\pm 10V$. A központi épület adatgyűjtő rendszereinek otthont adó helységében csak az ADC7674 jelű egység esetén volt szabad csatorna. Ezért az infrahangmérő rendszerünk tartalmaz egy átalakító egységet (Differential Line Driver, DLD) is, ami a bemenetén fogadja az ISM1801 $\pm 10V$ kimeneti feszültségű jelét és $\pm 20V$ -os differenciális kimeneti jelet állít elő az ADC7674 részére.

Az adVirgo központi épületében (CEB) található B&K [91] mikrofon közelében a 19. ábra által mutatott helyen telepítettem az ISM1801 mikrofonnal összeállított infrahang mérőrendszert (20. ábra).



19. ábra. Az ISM1801 infrahangmikrofon telepítési helye (sárga körrel jelölve) az adVirgo központi épületében (CEB).



20. ábra. Az adVirgo központi épületébe szállított ISM1801 infrahangmikrofon a Differential Line Driver (DLD) egységgel (középen).

A GPS időbélyeggel ellátott, digitalizált mérési adatok gyűjtésére és feldolgozására szoftverrendszer áll rendelkezésre az adVirgo esetén. Az adatok tárolása ún. keret (frame) formátumban történik. A keretek előállítására, tárolására és feldolgozására egy összetett szoftverrendszert fejlesztettek ki. A mérési adatok utólagos online elemzésére egy számítógép klaszter áll rendelkezésre Matlab, Python, és C++ fejlesztői környezetekkel. A keretekben tárolt adatok elérésére és feldolgozására az ezeken a nyelveken megírt szoftverek állnak rendelkezésre.

3.4. Adatfeldolgozó szoftverek

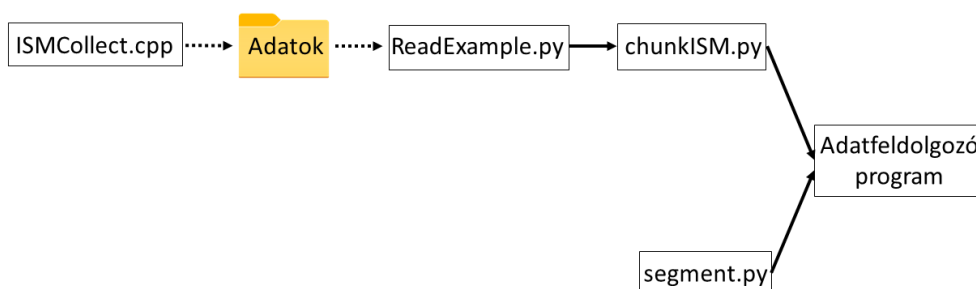
A Varga Máté (Atomki) által írt *ISMCollect.cpp* program által kiírt adatokat tartalmazó mappából a szintén Varga Máté által, Python nyelven írt program, a *ReadExample.py* olvassa ki az adatokat. Ezt a programot az általam készített *chunkISM* osztály importálja [PhDS02]. Ez az osztály olyan változókkal és függvényekkel rendelkezik, amelyek képesek egy általunk megadott időintervallumhoz tartozó adatszaksz kinyerésére az egyes adatfájlokból kiolvasott

adatszszakaszok egyesítése által. Ezen kívül az osztály egyik függvénye feldarabolja az egyesített adatszszakaszt több egyenlő, általunk megadott hosszúságú adatszszakaszra.

A szintén általam készített *segment* osztály elvégzi az egyes adatszszakaszok ADC egységben megadott adatainak *Pa* mértékegységben megadott nyomás-adatokká történő átváltását [PhDS02]. Ezen kívül olyan függvényekkel is rendelkezik, amelyek elvégzik a szakaszok ablakozása után a gyors Fourier-transzformációt, majd kiszámolják a teljesítmény spektrális sűrűséget, és végül az amplitúdó spektrális sűrűséget (ASD). Az osztály rendelkezik egy olyan változóval is, ami azt mutatja meg, hogy az adott szakasz tartalmaz-e tranzienszt.

A 21. ábra mutatja a különböző programok és osztályok kapcsolatait. Ezzel a rendszerrel valósítottam meg az adatfeldolgozási eljárásokat. A 21. ábra által mutatott *Adatfeldolgozó program* lehet

- a háttérzaj ASD értékeinek mediánját kiszámító program,
- a 10. és 90. percentiliseit kiszámító program,
- a tranzienskereső *transient.py* program.

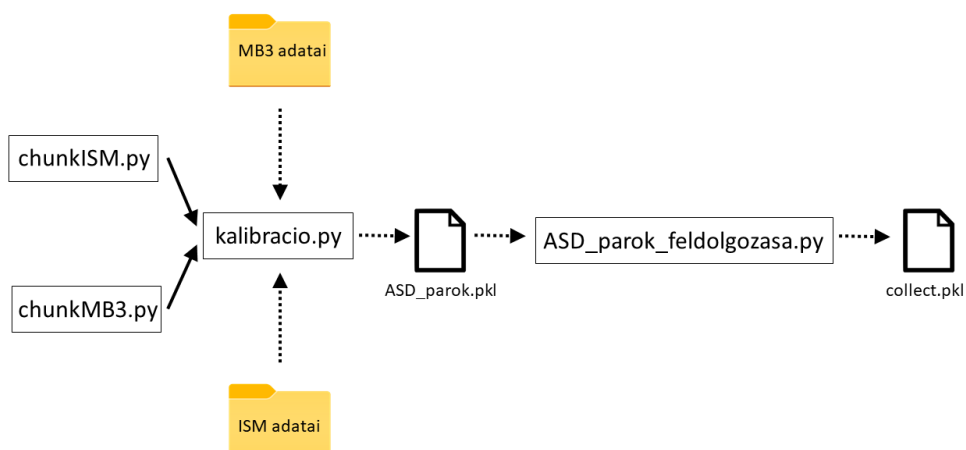


21. ábra. Az infrahang adatok digitalizálásától az adatok feldolgozásáig vezető lépéseket megvalósító szoftverrendszer.

Annak érdekében, hogy az ISM1 mikrofon ADC egységgel megadott digitalizált jeleinek amplitúdó spektrális sűrűségét *Pa*-ban tudjam kifejezni, és így az infrahangzajhátterre jellemző nyomás ASD-t tudjam megadni, elvégeztem a 21. ábra által mutatott folyamatot az ISM1 mikrofon és a piszkástetői MB3 mikrobarométer adataival is. Az MB3 kalibrált mikrobarométer referenciaként biztosította a valódi nyomásértékeket [92] [93].

Az MB3 és ISM1 eszközök adataiból számolt ASD értékek közti átviteli függvényt (a bizonytalansági intervallumával együtt) az általam elkészített szoftver pipeline segítségével számoltam ki, melynek blokkvázlatát a 22. ábra mutatja. A *kalibracio.py* program a *chunkISM* és a *chunkMB3* osztályok függvényeivel keresi meg a megfelelő időintervallumhoz tartozó adatszakaszokat az MB3 és az ISM1 adatait tartalmazó könyvtárakból. Ezután a program mindkét mérőeszköz adatszakaszát felosztja ugyanakkora időtartamú, egymást követő szegmensekre, majd a szegmensekből kiszámítja az ASD értékeket. Mivel a két mérőrendszer eltérő mintavételezési frekvenciával gyűjti az adatokat, az ASD függvényeket a program interpolálta, majd adott frekvenciaértékekhez tartozó ASD értékpárokat készített, és kiírta azokat az *ASD_parok.pkl* nevű fájlba.

A következő lépésként az *ASD_parok_feldolgozasa.py* program beolvasta az ASD párokat, majd kiszámolta azok hányadosát. Végül kiszámolta az egyes frekvenciákhoz tartozó hányadosok mediánját és 10. illetve 90. percentiliséit, és az eredményeket a *collect.pkl* fájlba írta.

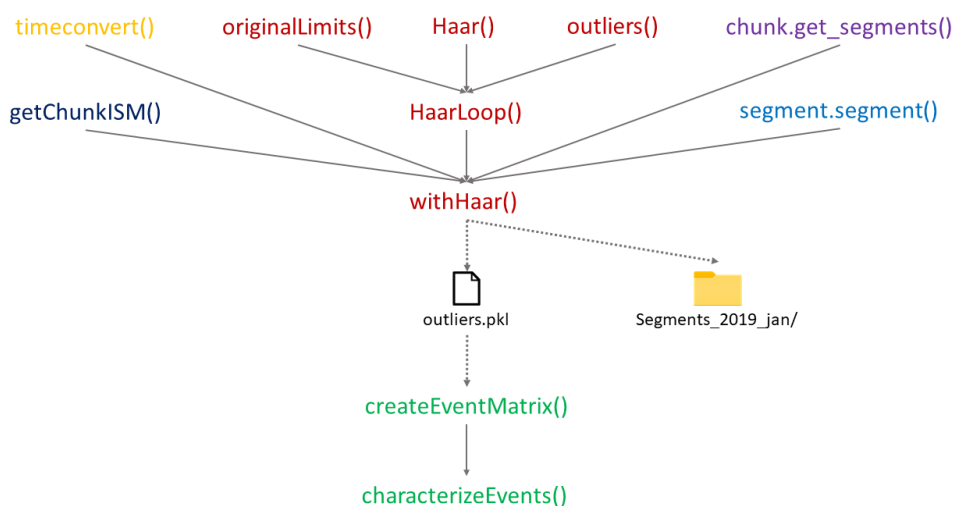


22. ábra. Az ISM1 ADC egységekkel kifejezett ASD értékei és az MB3 mikrobarométer nyomás ASD értékei (az infrahang ASD) közti átváltásra szolgáló függvény értékeinek kiszámolását megvalósító szoftverrendszer.

Az infrahang jelekben kiugró jelszakaszok megkeresésére szolgáló, a 3.1.2. részben ismertetett eljárás szoftveres megvalósítását [PhDS02] a 23. ábra mutatja. Az általam írt tranzienskereső program *timeconvert()*, a *getChunkISM()*, és a *chunk.get_segments()* függvényei valósítják meg a digitalizált mérési adatokat tartalmazó fájlokból az általunk megadott időintervallumhoz tartozó adatszaksz beolvasását.

A beolvasott jelben a tranziens jelszakaszok megkeresését az *originalLimits()*, a *Haar()*, és az *outliers()* függvények segítségével a *HaarLoop()* függvény, és a *withHaar()* függvény valósítja meg. A *Haar()* függvény kiszámítja a bemenetén kapott vektor approximációs koefficienseit és részletértékeit. Az *outliers()* szintén egy vektort kap bemenetként, kiszámítja a hozzá tartozó MAD értéket és az alapján megkeresi a kiugró értékeket. A *HaarLoop()* végigmegy a megadott szinteken, és mindegyiken elvégzi a Haar transzformációt. A *withHaar()* függvény hívja a segment osztály *segment()* függvényét, és annak segítségével hozza létre az adatszakszából a rövidebb szegmenseket. A szegmenseket címkével látja el annak megfelelően, hogy tartalmaznak-e tranzienseket, vagy sem. A szegmenseket a *Segments_2019_jan* nevű könyvtárba írja ki.

A tranziens jelszakaszoknak megfelelő, Haar transzformáció során kapott részletértékekből a klaszterkereső eljárással (3.1.2. fejezet) kapott ún. eventeket a *createEventMatrix()* függvény keresi meg, majd a *characterizeEvents()* függvény keresi meg a csoportosulások jellemzőit.



23. ábra. A tranzienseket megkereső program függvényeinek kapcsolatai.

3.5. Newtoni zaj modell

Egy infrahang hullám a légkör p_0 átlagos nyomásának $\delta p(\vec{r}, t)$ perturbációját okozza egy adott $\vec{r}$ helyen a t időpontban. Ez a ρ_0 átlagos sűrűség $\delta \rho(\vec{r}, t)$ perturbációjával jár együtt. A két mennyiség között az alábbi kifejezés teremt kapcsolatot:

$$\gamma \frac{\delta \rho(\vec{r}, t)}{\rho_0} = \frac{\delta p(\vec{r}, t)}{p_0} \quad (21)$$

ahol $\gamma \sim 1,4$ az adiabatikus index [11].

A továbbiakban az infrahang eredetű newtoni zaj kiszámítására használt modell feltételezi, hogy a földfelszín elérő infrahang hullámok teljes mértékben visszaverődnek. Ha az infrahang hullámokat síkhullámként modellezzük, a gravitációs potenciál perturbációja egy adott helyen hengerkoordinátákkal kifejezve:

$$\delta \phi(\vec{r}_0, t) = -\frac{G\rho_0}{\gamma p_0} e^{i(\vec{k}_\rho \vec{\rho}_0 - \omega t)} \delta p(\omega) \int_V dV \frac{(e^{ik_z z} - e^{-ik_z z}) e^{i\vec{k}_\rho \vec{\rho}}}{(q^2 + (z - z_0)^2)^{1/2}} \quad (22)$$

ahol z a függőleges, ρ a vízszintes koordinátákat jelöli. $k = \omega/c_s$, ahol

$c_s = 343 \frac{m}{s}$ a hangsebesség. V az a térfogat, amire az integrálást el kell végezni.

A modell szerint egy adott teszttömeg infrahang eredetű newtoni zaja két járulékból tevődik össze: az egyik az atmoszféra infrahang zajából adódik, a másik pedig a teszttömegnek otthont adó épületen belüli, vagy földfelszín alatti telepítés esetén az üregen belüli infrahang zajból adódik.

A modell a légkört félgömb alakú tartományként veszi figyelembe. Az integrálást numerikusan lehet elvégezni, ekkor a gyakorlatban a légkört képviselő grid méretét a még figyelembe vett legnagyobb hullámhossz négyszeresének szokás venni. A földfelszín görbülete és a topográfiai viszonyok nincsenek figyelembe véve. A földfelszíni detektorokra $z_0 = 0$, felszín alatti detektorokra $z_0 < 0$ értéket kell alkalmazni.

A (22) képlet izotróp átlagolásával kapható meg az infrahang eredetű newtoni zaj az un. strain spektrális sűrűségként kifejezve [PhDJ05] [45]:

$$S_{atm}^h(f) = \left(\frac{2c_s G \rho_0 \delta p(f)}{\gamma p_0 f} \right)^2 J_{iso}(4\pi f h / c_s) \frac{4}{L^2 (2\pi f)^4} \quad (23)$$

ahol $L = 10 \text{ km}$ a detektor karjának hossza, h a detektor helyének mélysége, ρ_0 pedig a levegő átlagos sűrűsége. $J_{iso}(x)$ az izotropikusan átlagolt csatolási együttható:

$$J_{iso}(x) = \frac{\pi}{4} \left(L_{-3}(x) - I_1(x) + \frac{I_2(x)}{x} + \frac{3L_{-2}(x)}{x} \right) \quad (24)$$

ahol $I_n(\cdot)$ módosított elsőfajú Bessel függvény $L_n(\cdot)$ pedig módosított Struve függvény.

Az infrahang eredetű newtoni zajhoz a földfelszín alatti detektor tesztömegeinek otthont adó üreg infrahang háttérzaja is hozzájárul. A modell ebben az esetben is izotróp hang mezőt feltételez. A (22) kifejezésben az integrálást ezúttal egy $R = 6 \text{ m}$ sugarú félgömbre kell numerikusan elvégezni. A félgömbben egy 1 m sugarú gömb alakú vákuumkamra található. A vákuumkamra középpontja az üreg aljától számítva $1,5 \text{ m}$ magasságban van. A tesztömegek a vákuumkamra közepén helyezkednek el.

A fentieket figyelembe véve egy adott tesztömegre az infrahang eredetű newtoni zaj az atmoszférától származó tag és az üregen belüli tag összegeként áll elő:

$$S_{total}^h(f) = S_{atm}^h(f) + S_{cav}^h(f)$$

Mindkét tag felírható egy átviteli függvény és az infrahang amplitúdó spektrális sűrűség adott frekvenciához tartozó értéke (most $\delta p(f)$ -el jelölve) szorzataként:

$$S_{total}^h(f) = H_{atm}^h(f) \delta p_{atm}(f) + H_{cav}^h(f) \delta p_{cav}(f) \quad (25)$$

Mivel nincs pontos információnk arról, milyen lenne az ET földalatti üregeinek infrahang háttérzaja, így egyelőre a földalatti infrahang ASD értékeket a földfelszíniekkel helyettesítjük, azaz a $\delta p_{atm}(f) = \delta p_{cav}(f)$ választással élünk. Ekkor

$$\begin{aligned} S_{total}^h(f) &= (H_{atm}^h(f) + H_{cav}^h(f)) \delta p_{atm}(f) = \\ &= H_{total}^h(f) \delta p_{atm}(f) \end{aligned} \quad (26)$$

A modell szerint egy teljes GW detektor teljes newtoni zajspektruma az egyes tesztömegek newtoni zajspektrumának inkohereus összegzésével adódik. n számú tesztömeg esetén:

$$\begin{aligned}
S_{detector}^h(f) &= \sum_{i=1}^n H_{total,i}^h(f) \delta p_{atm}(f) = \\
&= \delta p_{atm}(f) \sum_{i=1}^n H_{total,i}^h(f) = H_{detector}^h(f) \delta p_{atm}(f)
\end{aligned} \tag{27}$$

Azaz, ha a teljes gravitációshullám-detektor newtoni zajának spektrumát szeretnénk meghatározni, az infrahang zaj ASD értékeit egy, a teljes detektorra vonatkozó átviteli függvénnyel kell megszorozni.

A szakirodalomban az átviteli függvényt egy 100 m-rel a földfelszín alatt kialakítandó detektormodellre határozták meg [45]. Ezt az átviteli függvényt alkalmaztam én is a Mátra-hegységben az Einstein Teleszkóp lehetséges telepítési helyszínére [PhDS03]. Az infrahangzajhátter spektrális sűrűségének a Bowman medián helyett a piszkéstetői infrahang mérőállomások mediánjait választottam. A modell alkalmazásával meghatároztam az infrahang eredetű strain spektrális sűrűséget (ld. az Eredmények c. fejezetben).

4. Eredmények

Az interferometrikus gravitációshullám-detektorok infrahangzajhátterének tanulmányozása során kitűzött tudományos célkitűzéseim megvalósításához új infrahang mérőrendszerek, valamint adatgyűjtési- és adatfeldolgozási módszerek kifejlesztésére volt szükség. Ennek megfelelően a kutatómunkám során elért eredményeim feloszthatók műszaki és mérnöki fejlesztések terén elért eredményekre, valamint olyan új tudományos eredményekre, amelyek a gravitációshullám-detektorok infrahangzajhátteréről adnak új ismereteket. Ezek az új ismeretek hozzájárulnak a földfelszíni gravitációshullám-detektorok zajhátterének jellemzéséhez, valamint a tervezett földfelszín alatti detektorok telepítési helyszínének jellemzéséhez is.

A műszaki eredményeim egyike az ISM1 infrahangmikrofon kalibrációja volt. Ez tette lehetővé új tudományos eredmények elérését az MGGL infrahangzajhátterének vizsgálata területén. További tudományos eredményem az adVirgo gravitációshullám-detektor infrahangzajhátterét meghatározó források beazonosítása volt. Ezt követően összehasonlítottam a földfel-

színi detektorok infrahangzajhátterét jellemző nyomás ASD értékeket az Einstein Teleszkóp 2019-ig lehetségesnek tekintett mátrai telepítési helyszínét jellemző (MGGL-ben mért) nyomás ASD értékekkel. Mindezeket összevetettem az ET Olaszország által javasolt szardíniai lehetséges helyszínén mért ASD értékekkel. Ezek alapján következtetéseket vontam le az Einstein Teleszkóp földfelszín alá történő telepítésének előnyeiről. Rámutattam a mérési eszközök és módszerek továbbfejlesztésének szükségességére. Végül becslést adtam az Einstein Teleszkóp newtoni zajára mátrai telepítés esetén.

Az eredményeimet öt impakt faktoros közleményben jelentettem meg. Ezek közül három az MGGL-beli kutatások eredményeit ismertető sokszerzős cikk, melyek egy-egy fejezetében foglaltam össze a saját infrahangzajméréseim eredményeit:

- a [PhDJ01]-ben az „Infrahang monitorozása” című fejezetben,
- a [PhDJ02]-ben az „Infrasound monitoring” című fejezetben,
- a [PhDJ03]-ban az „Infrasound measurements” című fejezetben.

A három társzerzős [PhDJ04] cikkben első szerzőként mutattam be az ISM1 infrahang mikrofonnal összeállított mérőrendszert, valamint az MGGL-hez kapcsolódó, részletes vizsgálataim eredményeit. 2018-ban bekerültem az Einstein Teleszkópot előkészítő négy nemzetközi munkacsoport egyikébe, az Active Noise Mitigation munkacsoportba. 2020 szeptemberében a munkacsoport a társzerzőségemmel jelentette meg tudományos közlemény formájában az Einstein Teleszkóp helyszínének kiválasztásához összeállított javasolt kritériumrendszerét [PhDJ05]. Az eredményeimet három konferencián is bemutattam [PhDC01][PhDC02][PhDC03].

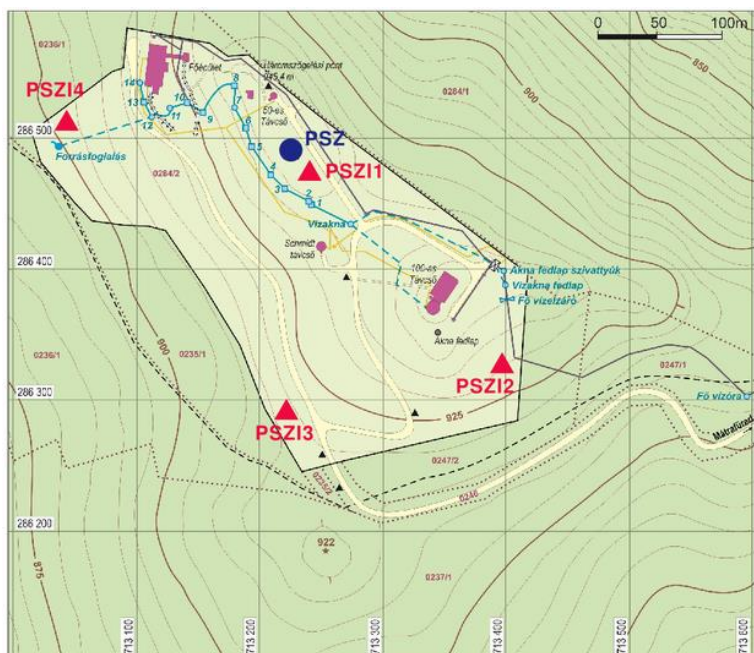
4.1. Az ISM1 infrahangmikrofon kalibrációja

Az ISM1 infrahangmikrofon kalibrációját a 3.2.3 alfejezetben ismertetett módszer szerint végeztem a 3.4 alfejezetben ismertetett *kalibracio.py* szoftver [PhDS01] használatával.

Az összehasonlító méréseket 2018.04.26.-án hajtottam végre a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet (CSFK GGI) Piskésetői Observatórium PSZ13 jelű infrahangmérő állomásán (24. ábra és 25. ábra) [94] [95]. A földbe süllyesztett (fekete) tartályban található MB3

mikrobarométer szélzaj elleni védelmére szolgáló (fekete) csövek le voltak választva a mérőeszköztől. Majd az MB3 mellé helyeztem a ISM1mikrofont és a hozzá tartozó Raspberry Pi3 alapú adatgyűjtő rendszert (26. ábra). A tartály zárása után a csövektől elválasztott MB3 és az ISM1 is a tartályban lévő nyomást mérte egy kb. háromórás (09:31 – 12:31) időintervallumban. A szélerősség kb. 6-8 km/h volt.

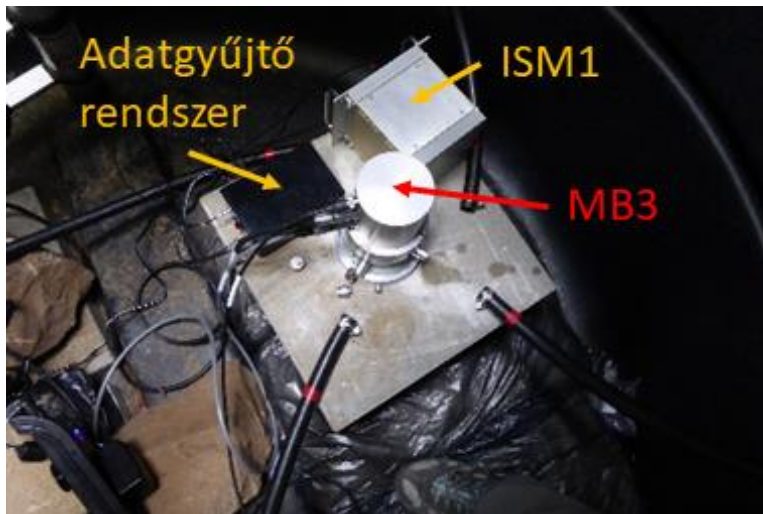
Az adatfeldolgozó szoftver [PhDS01] az ISM1 és MB3 digitalizált jeleit (27. ábra) egyenként 128 sec hosszúságú összetartozó jelszakasz párokra bontotta szét. Az MB3 jelét a mikrobarométer ismert kalibrációs adataival nyomás értékekre váltotta át, majd minden egyes jelpárra kiszámolta az ASD értékeket. Ezután az MB3 és az ISM1 adott frekvenciához tartozó ASD értékpárjainak hányadosaiból a 3.2.3. fejezetben ismertetett kalibrációs módszer szerint felépítette azt a függvényt, amely az ISM1 ADC egységekben kapott ASD értékeit Pa-ban kifejezett ASD értékekre váltja át. A függvény grafikonját a 28. ábra mutatja. Az ISM1 frekvencia tartományának felső határa 10 Hz, ezért csak addig számoltuk ki a függvény értékeit. A továbbiakban az ISM1 mikrofonnal végzett méréseink kiértékelése során ezt az átviteli függvényt használtam.



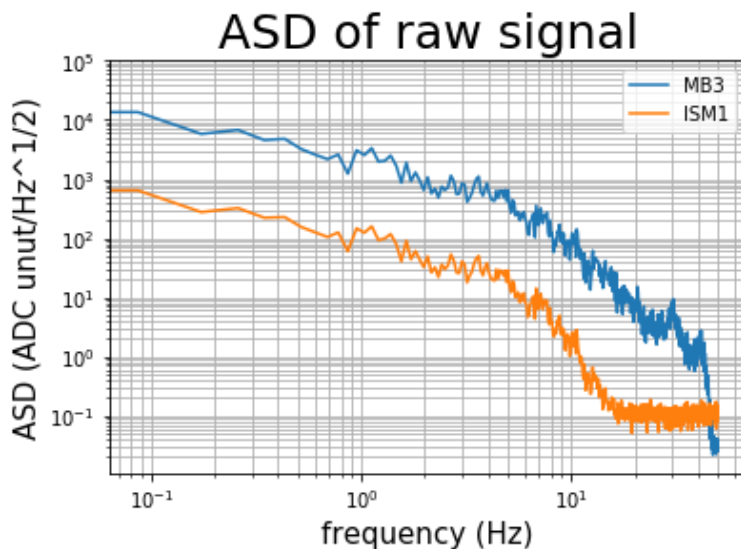
24. ábra. A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet Piskésetetői Observatórium infrahangmérő állomásainak (PSZI1 - 4) helyei.



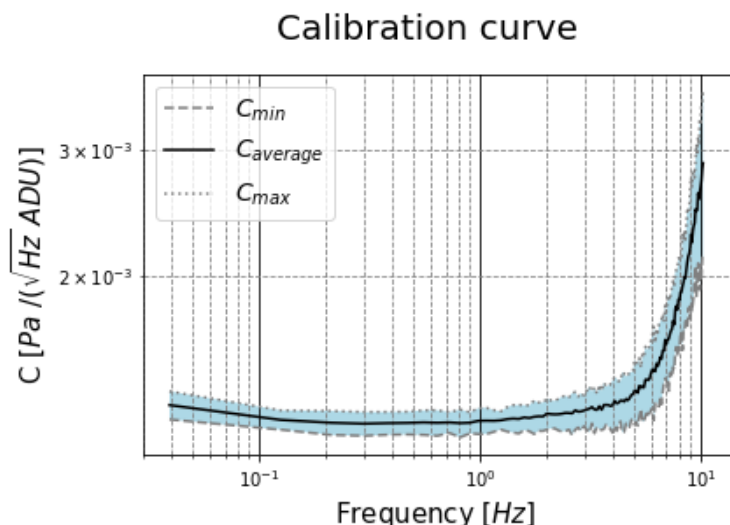
25. ábra. A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet Piskésetetői Observatórium PSZI3 jelű infrahangmérő állomása.



26. ábra. A piszkéstetői 3-as számú mérőállomás (PSZI3) tartályába helyezett ISM1 infrahangmikrofon és adatgyűjtő rendszere az MB3 mikrobarométer mellett elhelyezve. Az MB3 mikrobarométerről le voltak választva azok a csövek, amelyeken keresztül a külvilág infrahang rezgései eléri a műszert.



27. ábra. Az ISM1 és az MB3 által ugyanabban az időszakban mért nyomásváltozásokból számolt amplitúdó spektrális sűrűség (ASD) ADC egységekben megadva.



28. ábra. Az ISM1 mikrofon ADC egységekben megkapott jeléből számolt ASD értékek nyomás egységben megadott ASD-re való átváltására használt átviteli görbe a tizedik és kilencvenedik percentilisekkel megadott bizonytalansággal együtt.

Az ISM1 mikrofon kalibrációjával kapcsolatos eredményeimen alapul az 1. számú tézispontom:

4.2. Az infrahangzajhátter mérése a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumban

A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumban végzett infrahangméréseim fő célja hosszútávú mért adatsorok gyűjtése volt az Einstein Teleszkóp 2019-ig lehetségesnek tekintett telepítési helyszínéhez közel eső, a Gyöngyösorszi határában található már felhagyott ércbánya infrahangzajhátterére vonatkozóan.

A bányában időszakos rekultivációs munkálatok folynak, ezért még biztosítottak az emberi tevékenység feltételei. A vizet szivattyúkkal vezetik el, a levegőt pedig egy folyamatosan üzemelő légcserélő rendszerrel frissítik. A járatokat zsilipekkel nyitják-zárják. Mindezek azonban befolyásolják a helyszín környezeti zajhátterét, így a természetes infrahangzajhátteret is.

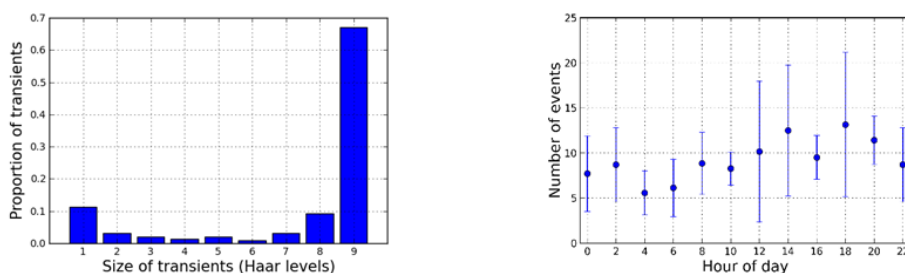
Egy kéthetes mérési időszak adatainak feldolgozása után megmutattam, hogy a bányában folyó tevékenységek olyan tranziens jelszakaszok megjelenéséhez vezetnek, amelyeket el kell távolítani az Einstein Teleszkóp lehetséges telepítési helyszíne infrahang zajhátterének jellemzésekor. A rekultivációs tevékenységek és a gépek zaja folyamatosan jelenlevő, adott időtartamon stacionáriusnak tekinthető zajokat is okoz. Kiderítettem, hogy az MGGL-ben az infrahang zajhátteréhez legnagyobb mértékben a szellőzőrendszer járul hozzá. Emiatt a szellőzőrendszer lekapcsolásakor kapott zajhátter közelíti meg leginkább azt az infrahang zajhátteret, ami az ET Mátrabeli telepítési helyszínén lenne.

A tranziens zajokat az „Eszközök és módszerek” című részben ismertetett tranzienskereső eljárásommal kerestem meg (3.1.2. alfejezet). A 2019. január 9-23-ig tartó időintervallum mérési adatait dolgoztam fel. Kétórás szegmensekre osztottam fel az adatsort, és azokra egyenként végeztem el a tranzienskeresést. Annak érdekében, hogy megtudjam, a tranziensek időtartam és sáv szélesség szerint milyen gyakorisággal fordulnak elő, megnéztem, hány Haar-szinten jelentek meg az adott tranzienshez tartozó kiugró részletértékek. A 29. ábrán látható, hogy az infrahangmikrofon frekvenciatérbeli mérési tartománya által meghatározott teljes Haar-szint tartományt lefedő sáv szélességgel rendelkező tranziensek a leggyakoribbak.

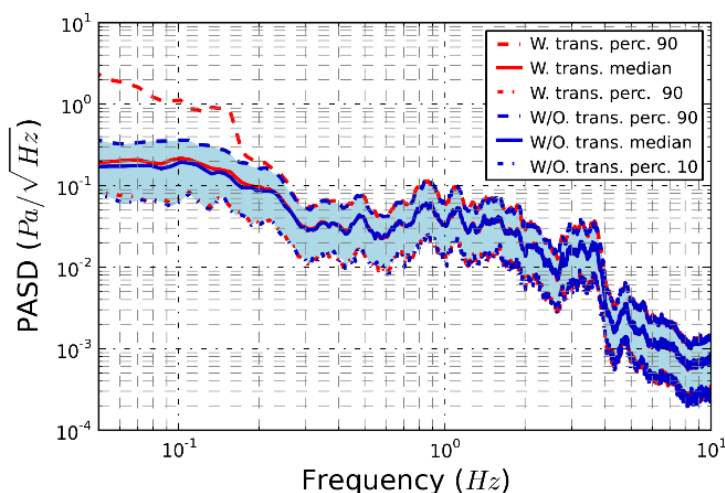
Ezek után igazoltam, hogy a tranziensek a bányában folyó helyi tevékenységtől erednek. Minden egyes nap az éjfél-től indulva egymást követő kétórás szegmensekre volt felosztva. Meghatároztam azt, hogy hány tranziens fordult elő a kéthetes mérési kampány kétórás intervallumaiban. Azt követően kiszámítottam az adott kezdőponthoz tartozó 12 kétórás időablakok tranziensei számának átlagát és standard deviációját. A 29. ábrán látható, hogy a nappali órákban a leggyakoribbak a tranziensek, a számuk követi a bányászok napi aktivitását. A bányászok három műszakban dolgoztak, de a nappali órákban végezték azokat a munkákat, amelyek a legtöbb embert és különféle gépeket igényeltek. Az éjjeli órákban csak a szükséges őrzőjáratokat, és néhány sürgős feladatot végeztek el. A pontos tevékenységük nyomon követésére nem volt lehetőségünk.

A bánya infrahangzajhátterének jellemzésekor a cél olyan reprezentatív zajspektrumok kiszámítása volt, amelyek megmutatják, hogy a nyomásváltozások értékei várhatóan milyen intervallumon belül mozognak (ld. Eszközök és módszerek fejezet). A medián nyomás amplitúdó spektrális sűrűség (ASD) mellé a 10. és 90. ASD percentiliseket választottam. Igazoltam, hogy az ASD értékek meghatározásakor indokolt a tranzienseket tartalmazó jelszakaszok

kizárása, mivel azok olyan gyakorisággal fordulnak elő, hogy befolyásolhatják a 90. ASD percentilis értékeket. Az ASD értékekkel viszont a bányászok tevékenységének hatásaitól mentes zajhatteret kell jellemezni. Korábban megmutattam, hogy a leggyakoribb tranziensek minden Haar-szinten megjelennek, így akár a teljes vizsgált frekvenciatartományon is befolyásolhatják az ASD értékeket.



29. ábra Bal oldali ábra: a tranziensek előfordulási gyakorisága a hozzájuk társított Haar-szintek számának függvényében, a teljes mérési periódusra. Jobb oldali ábra: a teljes mérési periódus során talált tranziensek napi megoszlása.



30. ábra A teljes mérési időszak adataiból számolt nyomás ASD (PASD) mediánja és percentilisei a frekvencia függvényében. A piros görbék adatainak kiszámolásakor a tranzienseket megtartottam. A kék görbék adatait a tranzienseket tartalmazó adatszegmensek eldobása esetén kaptam.

3. táblázat Kiugró értékek aránya az egyes Haar szinteken

Haar-tanszformáció szintje	Frekvencia intervallum	A kiugró értékek aránya (%)
5	4,8593-9,7187	2,9
6	2,4296-4,8593	5,6
7	1,2148-2,4296	1,2
8	0,6074-1,2148	2,6
9	0,3037-0,6074	3,7
10	0,1518-0,3037	5,2
11	0,0759-0,1518	8,0
12	0,0379-0,0759	11,5
13	0,0189-0,0379	14,32

A 30. ábrán látható, hogy a legnagyobb mértékben a 90. percentilis kb. 0,2 Hz alá eső tartományát változtatják meg. Hogy ennek az okát megértsük, megvizsgáltuk, hogy a Haar- transzformáció egyes szintjein mekkora a kiugró értékek aránya. A 3. táblázat megmutatja, hogy a szintek sorszámának növelésével a kiugró értékek aránya nő. Látható, hogy a 11., 12. és a 13. szinteknek

megfelelő frekvenciatartományokon a tranzienseket tartalmazó szegmensek meghagyásával kapott 90. percentilis görbe körülbelül egy nagyságrenddel meghaladja a tranzienseket tartalmazó szegmensek kihagyásával számolt 90. percentilis görbét. Ez azt jelenti, hogy ha a háttérzaj jellemzésére használt jelben elég gyakoriak a tranziensek, akkor azok módosítani tudják a háttérzaj ASD értékeinek terjedelmére általam használt 90. percentiliseket. Ezért a háttérzajt jellemző mennyiségek kiszámolása előtt ellenőrizni kell kiugró értékek előfordulási gyakoriságát. Ha olyan gyakorisággal fordulnak elő, ami már befolyásolja az ASD értékek terjedelmére kiválasztott percentilis értékek alakulását, akkor a tranzienseket tartalmazó jelszakaszokat ki kell hagyni a számolásból.

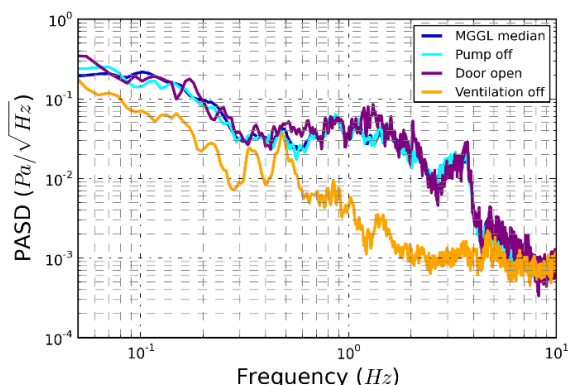
Miután tisztáztam, miként hatnak a tranziensek az infrahangzajhátteret jellemző görbékre, az MGGL köré szerveződő kutatócsoport kísérletet kezdeményezett annak érdekében, hogy meghatározhassuk a bányában üzemelő hangforrásokat és az általuk keltett zaj mértékét. A kísérlet 2018. december 28-án zajlott le. A bányászok felfüggesztettek minden rekultivációs tevékenységet, majd szisztematikusan egyenként lekapcsolták a gépészet egyes elemeit. Közben az MGGL -ben üzemelő mérőrendszerek, így az ISM1 infrahangmikrofon is, folyamatosan mérte az infrahangzajhátteret.

9:00 és 10:00 között a légcserélő rendszert állították le, majd 10:20 és 11:20 között a laboratóriumhoz közel eső szivattyút. 11:30 és 12:30 között kinyitottak egy ajtót, amely az MGGL -nek otthont adó járatot választja el a függőleges Károly-aknától. Az aknában az erős légáramlat folyamatosan rezegteti az ajtót, ezért feltételeztük, hogy ez is befolyásolja az infrahangzajhátteret a vizsgált frekvenciatartományban. A 31. ábra mutatja az egyes zajforrások leállításának hatását a nyomás ASD-re. Referenciául a 2019. január 9-23-hoz tartozó mediángörbét választottuk (az ábrán: MGGL medián). A világoskék görbe megmutatja, hogy a szivattyú alig okoz eltérést a referencia görbéhez képest. Az ajtó kinyitása megnövelte a zajt a 0,4 Hz-0,7 Hz-es és az 1 Hz – 2 Hz-es frekvenciatartományon. Feltehetően a levegő megváltozott áramlása okozta ezt. A légcserélő rendszer lekapcsolásakor a zajszint a teljes frekvenciatartományon jelentősen csökkent.

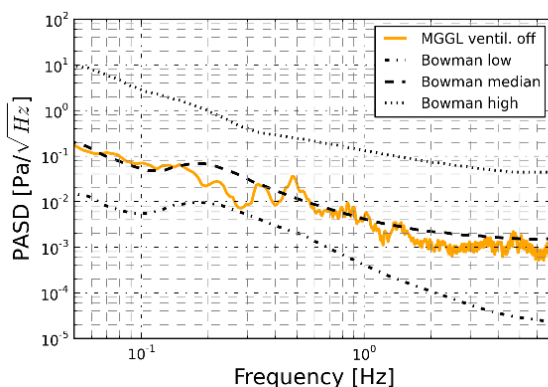
A kísérlet eredményeként bebizonyítottam, hogy az általában folyamatosan működő légcserélő rendszer befolyásolja a legnagyobb mértékben az infrahangzajhátteret.

A folyamatos légcseré azonban nélkülözhetetlen a bányászati tevékenységek számára. A kísérlet ezért bebizonyította azt is, hogy a Mátrai Gravitációs és

Geofizikai Laboratóriumban igen korlátozottak a lehetőségek a földfelszín alatt jelenlevő, csak a természetes hatások és a távoli emberi tevékenységek által befolyásolt infrahangzajhátter hosszútávú vizsgálatára. Az ezt megközelítő állapotot jellemző legalacsonyabb zajszintet is mindössze egy órán át sikerült elérni.



31. ábra A 2018. december 28-án végrehajtott kísérlet során a különféle zajforrások által keltett infrahangok háttérzajhoz való hozzájárulása. Az „MGGL median” a 2019. január 9-23-hoz tartozó mediángörbe. Az y tengelyen nyomás ASD (pressure ASD, PASD) szerepel.



32. ábra. A 2018. december 28-án végrehajtott kísérlet során mért, sárga görbével megjelenített legalacsonyabb zajszint a szellőzőrendszer lekapcsolásakor volt mérhető. A Bowman modellek görbéi referenciaként szerepelnek. Az y tengelyen nyomás ASD (pressure ASD, PASD) szerepel.

Az MGGL-beli infrahang vizsgálataim eredeti célkitűzései között szerepelt a földalatti zajhátter összehasonlítása a földfelszínen mért zajhátterrel is. Ilyen módon információ kapható arra vonatkozóan is, hogy a földfelszínen jelenlevő, infrahang méréseket befolyásoló hatások (pl. szél) hiányában a zajhátter milyen mértékű csökkenése várható. Az ISM1 mikrofon nincs ellátva szél elleni védelemmel, ezért nem végezhettem vele felszíni szabadtéri méréseket. Emiatt a földfelszíni zajokat jellemző Bowman-féle medián zajmodellhez (median noise model), alacsony zaj modellhez (low noise model) és magas zaj modellhez (high noise model) tartozó görbéket [73] választottam referenciának. A 32. ábrán látható, hogy az MGGL-ben mért nyomás ASD görbe trendje hasonló a Bowman medián görbéhez. A mért nyomás ASD görbe a mediánhoz esik legközelebb, 0,4 és 0,6 Hz között jelentős mértékben magasabb a Bowman-féle mediánnál és a 0,15 Hz -0,4 Hz tartományban pedig jelentősen alacsonyabb annál. Az MGGL-t jellemző görbe alakjának jellegzetességeit feltehetően a bánya járatrendszerének szerkezetéből adódó akusztikai tulajdonságok határozzák meg. Maga a laboratórium túl kicsi ahhoz, hogy ott az infrahang tartományába eső rezonanciafrekvenciák jelenjenek meg.

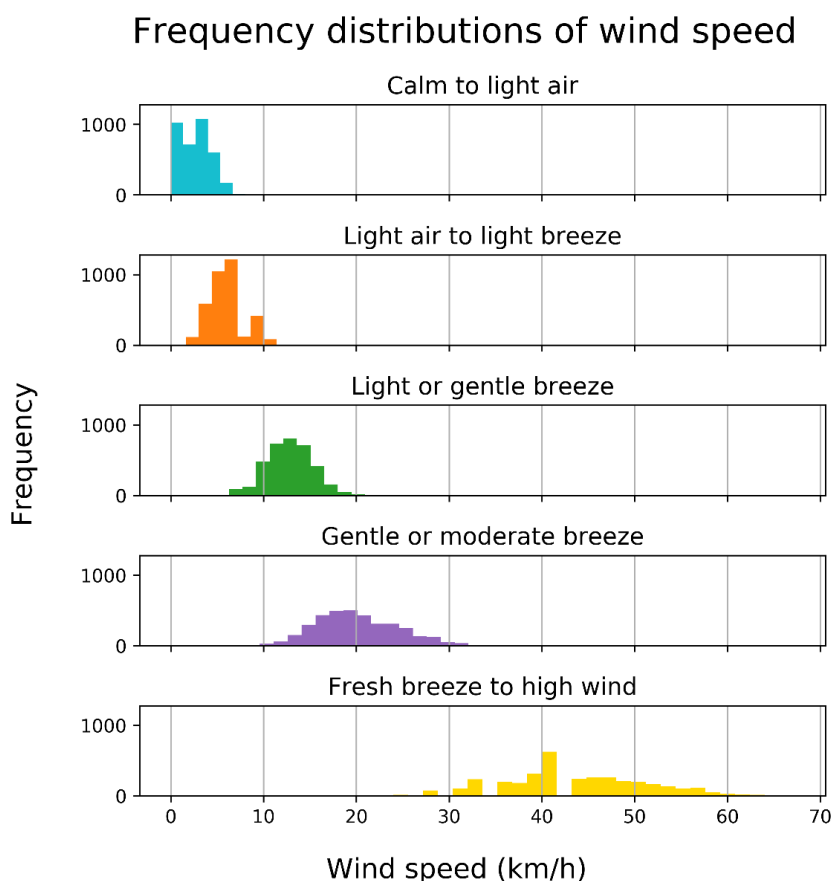
4.3. Az adVirgo gravitációshullám-detektor infrahangzajhátterét meghatározó források vizsgálata

Ellentétben a földfelszín alatti gravitációshullám-detektorokkal, a földfelszíni detektorok infrahangzajhátterét közvetlenül, jelentős mértékben befolyásolhatja a szél. Az adVirgo detektor központi épületébe (3.3.2. fejezet) telepített ISM1801 infrahangmikrofon által mért idősorok lehetőséget kínáltak a szél hatásainak vizsgálatára a 30 Hz-ig terjedő frekvenciatartomány esetén [PhDS04]. Megmutattam, hogy 2 Hz alatt a szél határozza meg a központi épületen belüli infrahangzajhátteret jellemző nyomás ASD értékek alakulását. 2 Hz fölött a vákuumrendszer szivattyúit és a szellőző- és klimatizáló rendszereket magában foglaló HVAC rendszer hatása a meghatározó.

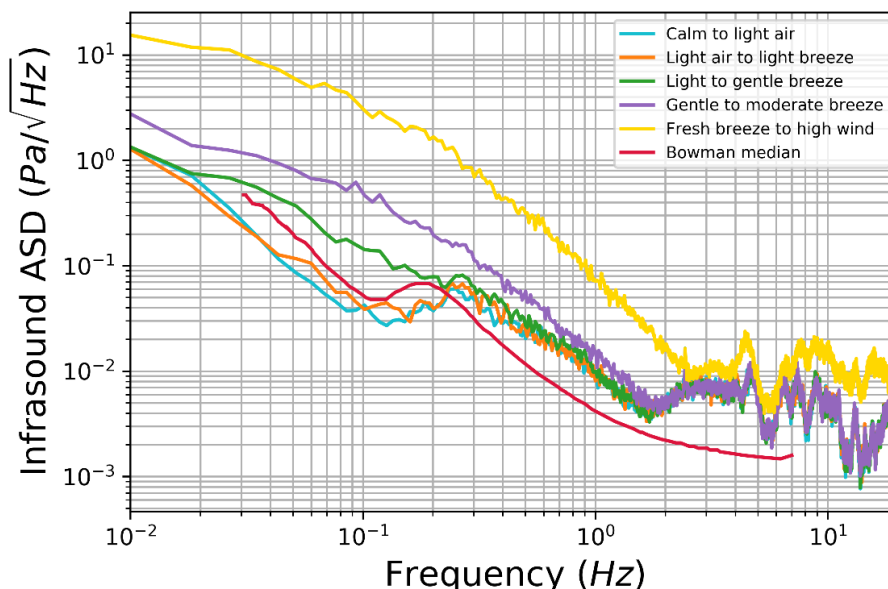
Különböző szélesebségek esetén vizsgáltam a szél hatását a beltéri infrahangzajhátteret jellemző nyomás ASD értékekre. Megmutattam, hogy a különböző frekvenciaintervallumokhoz tartozik egy-egy szélesebség-küszöbérték, ami alatt a szél nem tudja megnövelni az adott frekvenciaintervallumhoz tartozó ASD értékeket, fölötte viszont igen.

2019. november 17-én extrém módon viharos volt az időjárás az adVirgo környezetében. A detektornál mért szélesség adatok egy egynapos időintervallumban a 0 km/h-tól kb. 60 km/h-ig terjedtek, vagyis a gyenge szellőtől a viharos szélíg terjedő skálán változott a szélerősség. A 33. ábrán látható szélesség eloszlások mindegyikét egy-egy egyórás adatsorból számoltam.

Az épületben elhelyezett ISM1801 infrahang-mikrofon által a különféle vizsgált szélerősség tartományokhoz tartozó infrahang adatokból számolt átlagos nyomás ASD görbéket, valamint a Bowman-féle median referencia görbét a 34. ábra mutatja.



33. ábra. Az adVirgo gravitációshullám-detektor környezetében 2019. november 17-én mért szélesség eloszlások. Mind az öt részábra egy-egy adott szélerősségi kategóriához tartozó egyórányi időtartam alatt mért szélesség adatoknak az eloszlását mutatja.

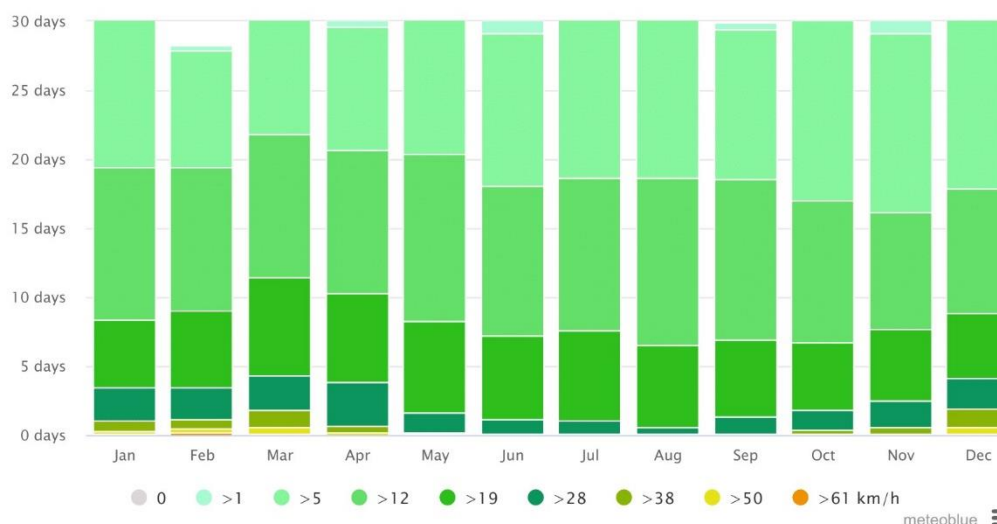


34. ábra. A különböző szélereősségek mellett mért infrahanghátterzaj az adVirgo központi épületében (CEB).

Csupán a szélcsendről az enyhe szél (kb. 11-12 km/h) terjedő tartományba eső szelek által keltett infrahangok esnek a Bowman median alá, és csak a 0,2 Hz-0,3 Hz -nél alacsonyabb frekvenciatartományon (34. ábra). Az annál magasabb frekvenciatartományokhoz tartozó ASD értékek jóval magasabbak a Bowman medián értékeknél. Az MGGL-beli, a szellőztetőrendszer kikapcsolásakor mért ASD értékek ezen a tartományon a Bowman medián görbe alá estek (32. ábra).

A 35. ábra az adVirgo gravitációshullám-detektor közelében fekvő Cascina településen mért, egy éves időintervallumhoz tartozó szélesebbesség-eloszlásokat mutatja havi felbontásban. Látható, hogy jóval gyakrabban fordulnak elő a 12 km/h feletti szélesebbességek, mint az az alattiak. Az ábrán a 12 km/h-nál nagyobb szélesebbességekhez tartozó ASD görbék mindegyike a Bowman medián fölé esik.

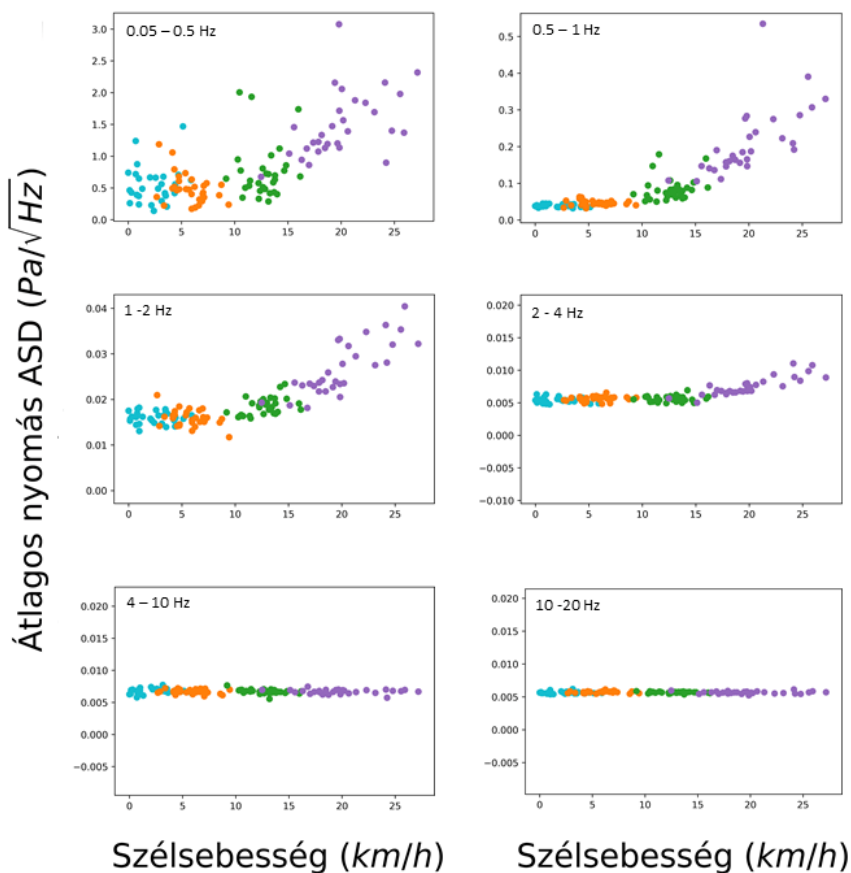
Megfigyelhető, hogy a különféle szélesebbesség-intervallumokhoz tartozó nyomás ASD értékek közti eltérés a frekvencia növelésével csökken. Körülbelül 2 Hz-től már alig tér el a kék, a narancssárga, a zöld és a lila görbe. A legerősebb szélhez tartozó sárga görbe minden frekvenciatartományon jelentősen eltér a többitől.



35. ábra Az adVirgo gravitációshullám-detektor közelében fekvő Cascina település éves szélesség-gyakorisági adatai. Forrás: https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/cascina_italy_3179977

A szél által keltett nyomásváltozásokat az International Monitoring System (IMS) mikrobarométerei is detektálják a Föld különböző pontjain. [96]-ban megvizsgálták, hogy a különböző szélességek esetén hogyan alakulnak a mikrobarométerek által detektált jelek amplitúdóinak RMS értékei több nem átfedő frekvenciaintervallumon. Én is a [96] -ben ismertetett módszert alkalmaztam az adVirgo központi épületében mért infrahang jelekre.

Azért, hogy jobban megértsük, miként változnak az egyes frekvenciatartományokon a nyomás ASD értékek a szélesség növekedésével, a teljes vizsgált frekvenciatartományt felosztottam az alábbi intervallumokra: 0,05–0,5 Hz, 0,5–1 Hz, 1–2 Hz, 2–4 Hz, 4–10 Hz, 10–20 Hz. Ezután az előzőekben vizsgált átlagos nyomás ASD görbék kiszámolásához használt három perc hosszúságú idősorokból nyert egyedi ASD görbék értékeit átlagoltam minden egyes frekvenciatartományon, és a kapott átlagokat ábrázoltam a hozzájuk tartozó három percnyi időtartamra átlagolt szélességek függvényében (36. ábra). A legmagasabb szélességhez tartozó adatokat kihagytam az elemzésből.

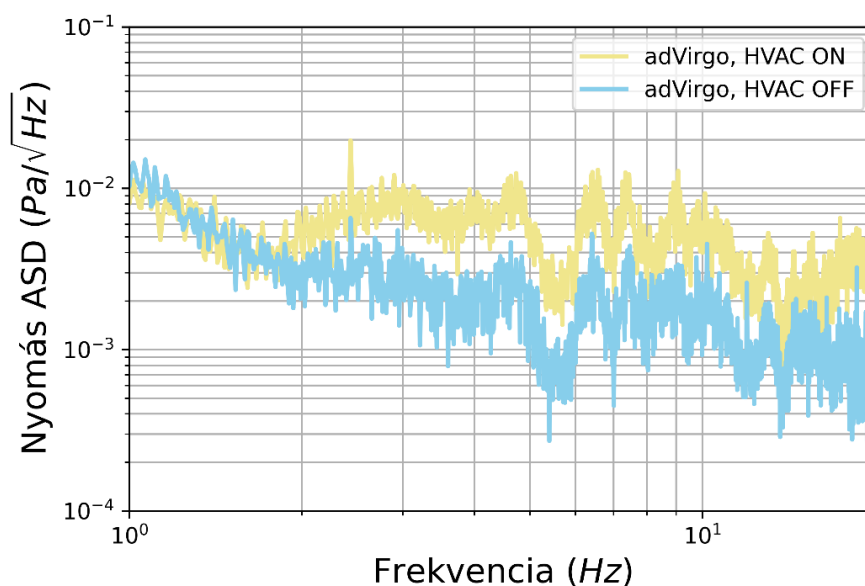


36. ábra. Az egyes infrahang adatszegmenseknek az ábrán jelölt frekvencia-intervallumra átlagolt ASD értékei a szélsebesség függvényében. Az egyes grafikonok adatai a 30 km/h-nál kisebb szélsebességekhez tartozó infrahang mérési adatokból számoltam. A színek a 33. ábrán látható szélsebességeknek felelnek meg.

Az 36. ábra alapján látható, hogy a 4 Hz alatti intervallumokon az átlag ASD értékek a szélsebesség növelésével kb. 10-15 km/h küszöbérték alatt csak kissé változnak. Az ezt meghaladó sebességértékek esetén az átlag ASD értékek meredeken nőnek a szélsebességgel. A meredekség a magasabb frekvencia-intervallumok felé haladva csökken, míg a 4-10 Hz-es és 10-20 Hz-es intervallumokon el is tűnik. A 36. ábra grafikonjainak adatai a 30 km/h-nál kisebb szélsebességekhez tartozó infrahang mérési adatokból lettek kiszámolva.

A szélesség eloszlásokat mutató 35. ábrán látható, hogy 28 km/h óránál nagyobb szélességek viszonylag ritkán fordulnak elő. Így az idő legnagyobb hányadában az infrahang zajhátter csak kismértékben változik a 4 Hz fölötti tartományban. Ezen a tartományon a zajt az adVirgo központi épületének fűtő-, klimatizáló- és vákuumrendszere (HVAC) határozza meg.

Lehetőség adódott a HVAC által keltett zaj vizsgálatára is 2019. április 19-én, amikor körülbelül 40 percre kikapcsolták a rendszert [31][PhDS04]. A 37. ábra a kikapcsolás előtti félórás adatsorból kapott nyomás ASD görbét mutatja a kikapcsolás alatt gyűjtött adatokból származó ASD értékekkel együtt. Megfigyelhető, hogy a HVAC kikapcsolása a 2 Hz feletti frekvenciatartományon okozza a zaj jelentős csökkenését. Az adVirgo jelenlegi érzékenysége mellett a 10 Hz feletti zajok változásai rontják a detektor érzékenységét, ezért az infrahangzaj 10 Hz fölötti tartománya releváns ebből a szempontból [31]. Itt a zajscsökkentés csak a HVAC rendszer zajának nagymértékű csökkentésével valószínűsíthető meg, ahogy azt a szakirodalomban már régebb óta javasolják [45].



37. ábra. Az adVirgo gravitációshullám-detektor HVAC rendszerének ki- és bekapcsolt állapota mellett mért infrahangzajhátter amplitúdó spektrális sűrűség.

Az adVirgo GW detektor központi épületében végzett méréseim eredményei rámutattak arra is, hogy miért előnyös egy gravitációshullám-detektor pár száz méterrel a földfelszín alá történő telepítése. Az adVirgo infrahang zajhátterét 2 Hz alatt domináló szél a földalatti detektor környezetében nem tud infrahang zajt kelteni. Ezért lehetséges a földfelszín alatt az infrahang zajhátteret a Bowman-féle medián zajmodell értékei alá csökkenteni ebben a frekvenciatartományban [PhDJ04]. A szél hatásával azonban számolni kell a föld alá telepített GW detektorok esetében is, mert a szél hozzájárul a szeizmikus zajhoz és a newtoni zajhoz is [PhDJ05].

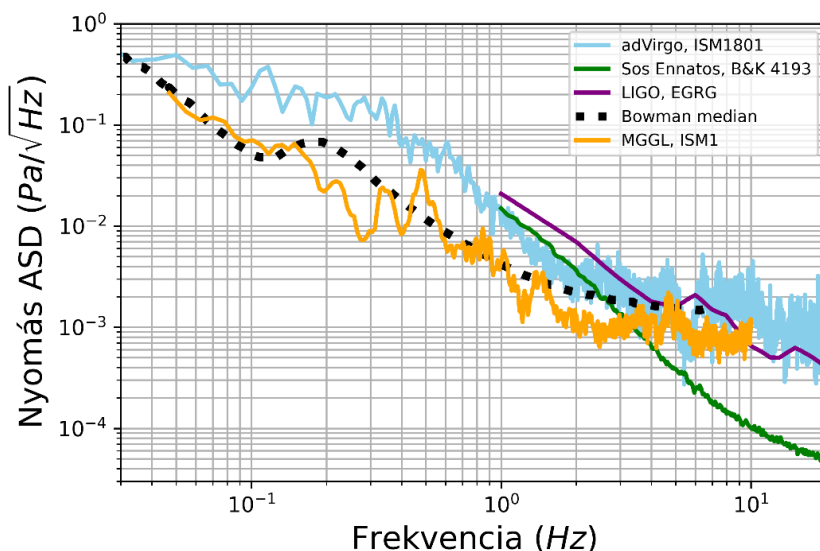
Az adVirgo HVAC rendszerének hozzájárulása az infrahang zajhátteréhez 2 Hz fölött sűrű, újabb, csendesebb klimatizáló és vákuumrendszerek kifejlesztését az adVirgo számára is, és a majdani Einstein Teleszkóp számára is.

4.4. Gravitációshullám-detektor helyszínek infrahang-zajhátterének összehasonlítása

Összehasonlítottam négy gravitációshullám-detektor helyszínen,

- a földfelszíni
 - LIGO -nál az Eötvös Gravity Research Group által [49] [50],
 - az adVirgonál az ISM1801 mikrofonnal általam,
- az Einstein Teleszkóp két földfelszín alatti lehetséges helyszínén
 - a Mátra Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumban (lekapcsolt szellőzőrendszer esetén) az Atomki ISM1 mikrofonjával általam,
 - a szardíniai Sos Ennatos bányában (Szardínia, Olaszország) egy több intézmény összefogásával létrejött olasz kutatócsoport által [47]

mért infrahangzajhátter ASD görbéket a Bowman medián ASD görbével (38. ábra).



38. ábra. A jelenleg működő gravitációshullám-detektorok helyszínein mért infrahangzajhátterek összehasonlítása az Einstein Teleszkóp két vizsgált lehetséges telepítési helyszínének infrahangzajhátterével.

Fontos megemlíteni, hogy az adatokat olyan mérőrendszerek szolgáltatták, amelyekben különbözött az infrahangdetektorok saját zaja és érzékenysége, eltérő volt a digitalizálók felbontása és eltérők voltak az adatgyűjtők is. Ezért kvantitatív helyett inkább kvalitatívnak tekinthetők az összehasonlítás eredményei a kutatások jelenlegi stádiumában. Ennek ellenére így tehetünk több olyan megállapítást is, ami új ismeretnek tekinthető, és új kutatási és eszközfejlesztési irányokat jelölhet ki a gravitációshullám-detektorok környezeti infrahangzajhátterének vizsgálata területén.

A Bowman féle vizsgálatok [73] rámutattak arra, hogy a földfelszínen az infrahangdetektorok nyomás ASD adatai esetén az 1 Hz alatti tartományban a szél hatása a meghatározó tényező.

Azt vártam, hogy az infrahanghátteret jellemző ASD értékek jóval alacsonyabban lesznek a földfelszín alatti MGGL laboratóriumban a Bowman mediánnál szélcsend idején. Azonban ez nem teljesül a 0,1 Hz alá eső tartományokban. A 0,1 Hz fölötti frekvenciatartományokban csökkenés látható, de a görbe trendje nagyjából követi a Bowman medián görbét. A görbe simasága azt sejteti, hogy a bányai járatrendszere rezonanciákat okozhat, amelyek miatt az MGGL zajgörbe értékei nagyobbak a Bowman medián értékeinél egyes tartományokban. Eddig rajtam kívül senki nem publikált frekvencia - nyomás ASD

függvényt az 1 Hz alatti frekvenciákra az Einstein Teleszkóp földfelszín alatti korábban javasolt telepítési helyszíneire vonatkozóan.

A 4.3 alfejezet tanulságai szerint az adVirgo CEB épületében szélcsend vagy alacsony szélességek esetén 0,2 Hz alatt minden frekvencián alacsonyabb a zaj, mint a Bowman medián, sőt az MGGL zajánál is alacsonyabb bizonyos frekvenciatartományokon. Ezek a kedvező körülmények azonban csak addig állnak fenn, amíg a szélesség kellően alacsony. Kb. 10 km/h szélesség fölött a zajgörbe a 0,2 Hz alatti frekvenciákon már meghaladja a Bowman mediánt.

A Bowman mediángörbét 7 Hz-ig határozták meg. A 0,2 – 7 Hz-es tartományon a rendelkezésre álló zajgörbék szerint a földfelszíni gravitációshullámdetektorok (LIGO, adVirgo) infrahang zajháttere csaknem minden frekvencián magasabb, mint a Bowman medián. Ez az adVirgo-ra akkor is igaz, ha a HVAC rendszere ki van kapcsolva. A HVAC rendszer bekapcsolása megsokszorozza a zaj ASD értékeit kb. 2 Hz fölött. 7 Hz fölött a földfelszíni detektorok zajgörbéi hasonlóan csökkenő trendet mutatnak, de a LIGO ASD értékei alacsonyabbak, mint az adVirgo-nál kikapcsolt HVAC rendszer mellett kapott ASD értékek.

Az Einstein Teleszkóp szardíniai lehetséges telepítési helyszínén mért eredményeket csak nemrég tették közzé [47]. A méréseket a Sos Ennatos bányában, a földfelszín alatt 111 méterrel egy B&K 4193 típusú mikrofonnal és a hozzá tartozó adatgyűjtő rendszerrel mérték. Az eredményt közzé tevő kutatók kihangsúlyozták, hogy az infrahangnyomás értékei feltehetően olyan alacsonyak voltak, hogy a mikrofon saját zaját nem mindig haladták meg. Emiatt a mért zajgörbe közel esik a mikrofon sajátzaj görbéjéhez. A Sos Ennatos bányában mért eredményekből csak az 1 Hz fölötti eredményeket tették közzé, ezért a földfelszín alatti mérési eredmények összehasonlítására csak 1 Hz fölött van lehetőség. Mégis, ha összevetjük ezt a görbét az MGGL infrahang zajgörbéjével, érdekes megállapításokat tehetünk.

A Sos Ennatos és az MGGL zajgörbe 3 és 4 Hz közt metszi egymást. 3 Hz alatt a Sos Ennatos bányában mért görbe jóval az MGGL-ben mért görbe fölött fut, sőt még az adVirgo kikapcsolt HVAC mellett mért zaját is meghaladja. Nincs tisztázva, hogy ez a műszer saját zaja-e, vagy pedig a tényleges infrahanghátterzaj. Ezért a következő óvatos kijelentést tehetjük: egy földfelszín alatti mérési helyszínen lehetséges olyan körülmények biztosítása, amelyek mellett az infrahanghátterzaj nem magasabb, mint az MGGL-ben mért nyomásértékekből számolt ASD értékek.

4 Hz fölött a Sos Ennatos-ban mért ASD értékek alacsonyabbak az MGGL-ben mérteknél, 10 Hz-nél pedig már körülbelül egy nagyságrenddel kisebbek, mint a LIGO-nál mért értékek. A különbség 20 Hz-ig folyamatosan nő. Ezért erre a tartományra megállapíthatjuk, hogy egy földfelszín alatti mérési helyszínen lehetséges olyan körülmények biztosítása, amelyek mellett az infrahanghátteraj nem haladja meg a Sos Ennatos bányában mért adatokból számolt ASD értékeket.

Az ismertett vizsgálatok tanulsága egy harmadik generációs, földfelszín alatti telepítésű GW detektor előkészítésének szempontjából az, hogy az infrahang zajhátter jelentős csökkenését lehet elérni detektor földfelszín alá telepítésével a szél közvetlen hatásai nélkül. A csökkenés mértéke a frekvencia-értékek növelésével egyre nagyobbá válik.

A detektorok földfelszín alá telepítésével járó előnyt csak akkor tudjuk kihasználni, ha a földalatti helyszínen található zajforrások (szellőzőrendszer, szivattyúk, stb.) által keltett infrahang zajokat alacsonyan tudjuk tartani. A feladatot az is nehezíti, hogy a felszín alatti üregrendszer akusztikus tulajdonságai által meghatározott rezonanciák is kialakulhatnak. A megfelelően alacsony infrahang zajhátter biztosítása a földfelszín alatt komoly kihívást jelent az Einstein Teleszkóp tervezése és előkészítése során.

4.5. A newtoni zaj becslése az Einstein Teleszkóp mátrai telepítésének esetére

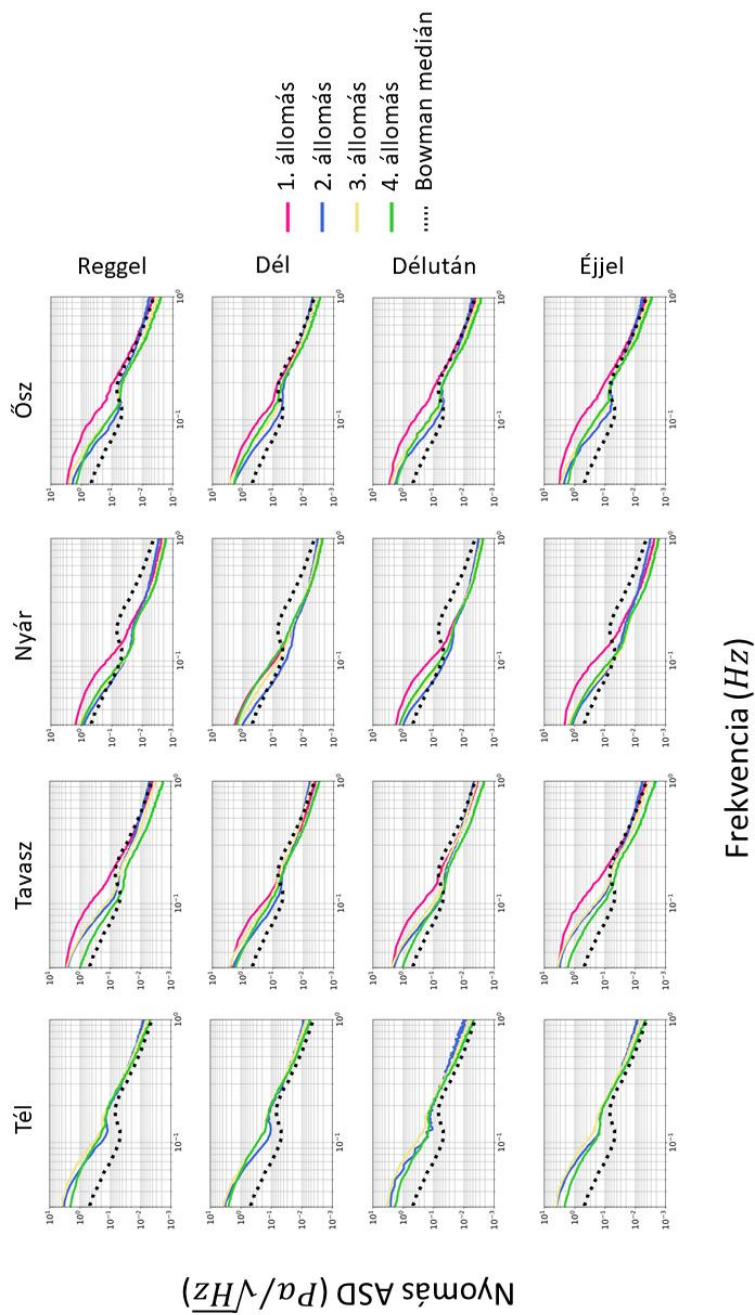
A CSFK GGI által üzemeltetett piszkéstetői obszervatórium négy infrahang mérőállomásának mérési adataiból számolt, 1 Hz és 7 Hz közé eső medián nyomás ASD értékekből kiszámoltam az Einstein Teleszkóp infrahang eredetű newtoni zaját mátrai telepítés esetén. Kiderítettem, hogy mekkora az eltérés az egyes mérőállomások között newtoni zaj szempontjából évszakonként napszakokra külön-külön. A newtoni zajgörbék értékei alacsonyabbnak adódtak az Einstein Teleszkóp érzékenységi görbéinek értékeitől, de 1 Hz-ről indulva a frekvencia növelésével egyre inkább megközelítették azokat. 7 Hz környékén a legkisebb az eltérés az infrahang eredetű newtoni zaj és az ET érzékenysége között.

Egy földfelszín alatti gravitációshullám-detektor tervezése során a kijelölt telepítési helyszínen infrahangok okozta newtoni zajának mérési adatokból történő meghatározása a 3.5. fejezetben és az irodalomban ([45], [PhDJ05]) ismertett modell alapján lehetséges.

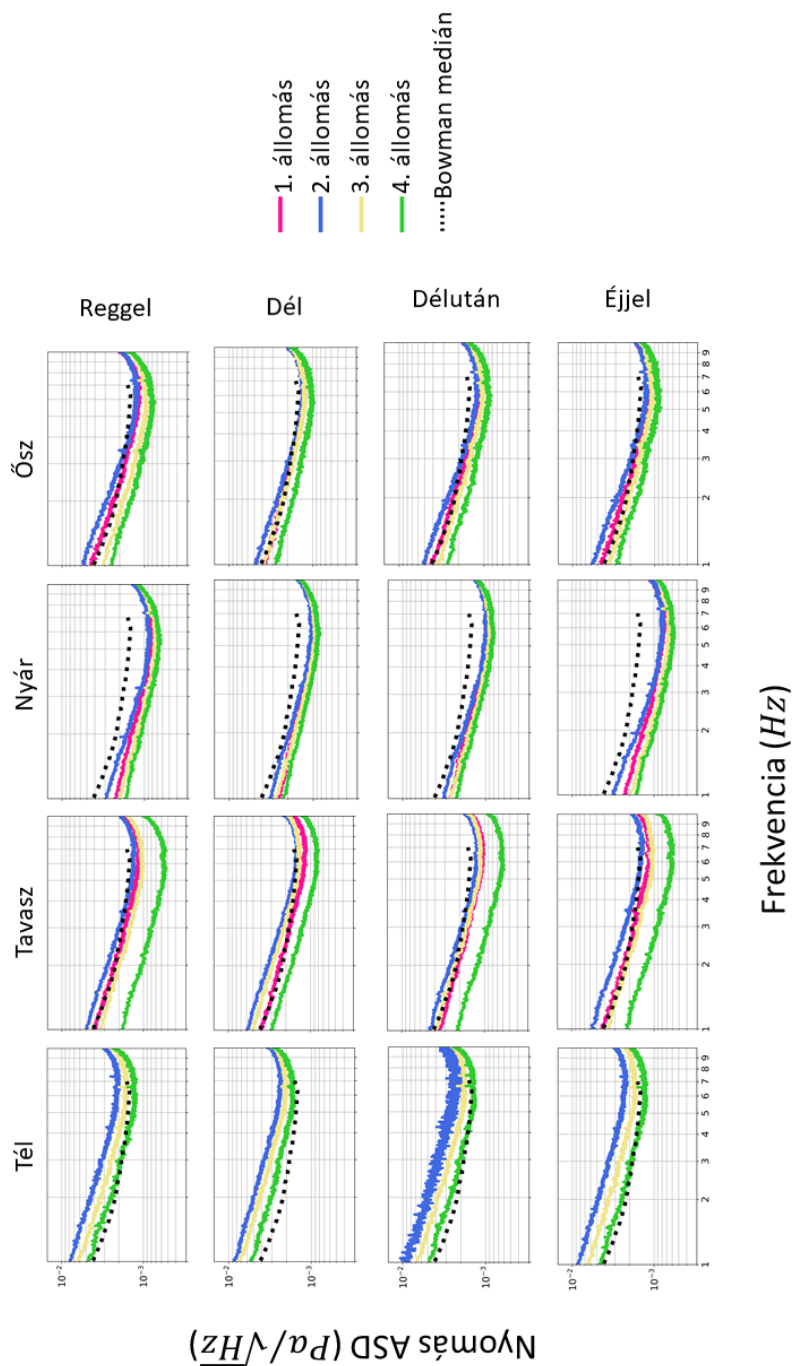
A modell a földfelszínen mért infrahanghátter mért ASD adatai felhasználásával becsüli meg a majdani detektorra ható newtoni zajt. A detektor elhelyezésére kialakított üregben létrejövő infrahangzaj becsült nyomás ASD adatait is beépítették a számításokba. A földalatti nyomás ASD adatok becslése akusztikus modellezéssel lenne lehetséges, amihez az üregek akusztikus jellemzőit kellene ismerni minél pontosabban. Még nem áll rendelkezésünkre ilyen részletes modell, ezért Fiorucci és munkatársai a munkájuk [45] során a Bowman-féle median modell ASD értékeit alkalmazták.

Megállapították, hogy az üregek hatását is figyelembe vevő modell eredményül kapott newtoni zajgörbe értékei alacsonyabbak, mint az Einstein Teleszkóp érzékenységi görbéjéhez tartozó értékek, de a 7-8 Hz frekvenciatartományon megközelítik azokat.

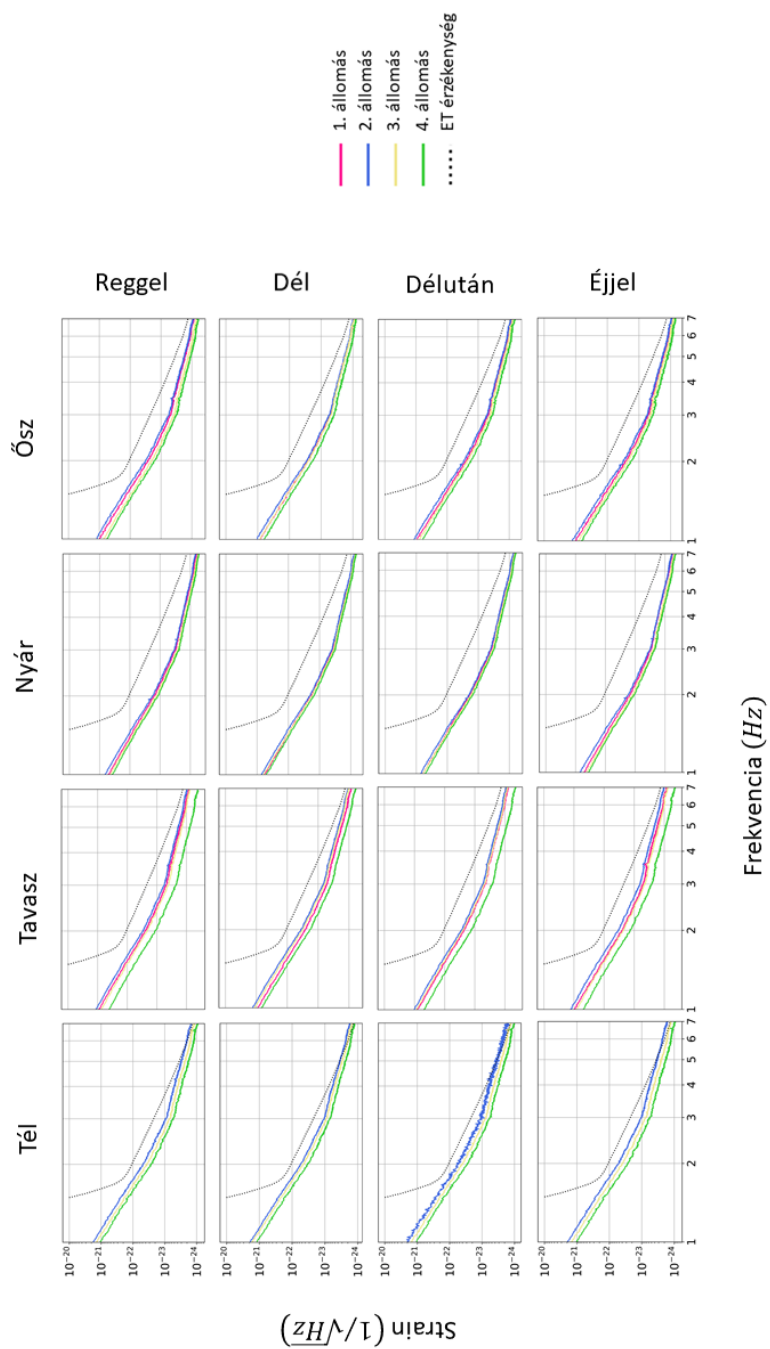
Én az ET mátrai telepítési helyszínére becsültem meg az infrahangzajok okozta newtoni zajt [PhDS03]. A Bowman medián nyomás ASD adatok mellett felhasználtam a Csillagászati és Földtudományi Központ Geodéziai és Földtudományi Intézet Pizskéstetői Obszrvatórium négy infrahangmérő (PSZ11 - 4) állomása MB3 típusú mikrobarométerei által mért nyomás ASD értékeket is a becslésekhez. Külön-külön használtam a Bowman medián nyomás ASD-t valamint az egyes állomások adatait. Mind a négy évszak esetén napszakonkénti medián nyomás ASD-ket számítottam ki a Bowman által alkalmazott módszer szerint [73] (3.2.2. fejezet. A 39. ábra és a 40. ábra mutatja be a kapott eredményeket. Azt követően mindegyik esetben megbecsültem a medián newtoni zajt is a modell segítségével (41. ábra).



39. ábra. A CSFKI GGI PO PSZI 1-4 állomásai által mért nyomás ASD medián görbék és a Bowman medián 1 Hz alatt.



40. ábra. A CSFKI GGI PO PSZI 1-4 állomásai által mért nyomás ASD medián görbék és a Bowman medián nyomás ASD 1 Hz és 7 Hz között.



41. ábra. A CSFKI GGI PO PSZI 1-4 állomásai által mért nyomás ASD medián görbékből számított newtoni zaj és az Einstein Teleszkóp érzékenysége.

A piszkéstetői medián ASD értékeket használva a 3.5. fejezetben, valamint az irodalomban ([45], [PhDJ05]) ismertetett modell alkalmazásával kiszámoltam azt is, hogy az Einstein Teleszkóp Mátrába való telepítése esetén mekkorák lennének az infrahanghátterzajtól származó newtoni zaj 1 Hz és 7 Hz közé eső értékei. A kapott eredményeket bemutató 41. ábra tartalmazza az Einstein Teleszkóp tervezett érzékenységi görbáját is referenciaként.

Az ábrákon jól látható, hogy a newtoni zaj is függ az évszaktól és a napszaktól. A téli ASD értékek jellemzően meghaladják a Bowman-féle nyomás ASD görbe értékeit. A tavaszi és az őszi görbék közül az 1. és a 2. állomások (PSZI1 és (PSZI2) értékei alacsonyabb frekvenciákon meghaladják a Bowman medián nyomás ASD görbét, de 4 Hz fölött jellemzően minden állomás értékei alacsonyabbak annál. Nyáron minden napszakban alacsonyabbak a piszkéstetői állomások nyomás ASD értékei a Bowman medián nyomás ASD görbe értékeinél.

Fontos megjegyezni, hogy a Bowman medián nyomás ASD görbe 0,2 Hz felé eső részét befolyásolta az akkor alkalmazott MB2000 mikrobarométerek [97] saját zaja. A saját zajnál alacsonyabb amplitúdójú jeleket nem tudták detektálni a mikrobarométerek, így a valódi zajhátter medián nyomás ASD értékeinél magasabb értékeket mutat a Bowman-féle görbe. Az MB3 mikrobarométerek saját zaja 0,2 Hz fölött már jóval alacsonyabb az MB2000-es verzióénál [98], így a piszkéstetői medián ASD adatok 0,2 Hz feletti része már közelebb esik a valódi háttérzajhoz tartozó medián nyomás ASD értékekhez.

A 41. ábra mutatja a piszkéstetői medián newtoni zaj görbéket. A tavaszi, nyári és őszi görbék az ET érzékenységi görbéje alá esnek, de 7 Hz felé tartva egyre inkább megközelítik azt. A téli görbék közül a kék (PSZI1) 6 Hz fölött meghaladja az érzékenységi görbét.

Ezek az eredmények megerősítették azt a szakirodalomban már többször közölt megállapítást, hogy indokolt az infrahangtól eredő newtoni zaj alaposabb vizsgálata az Einstein Teleszkóp tervezési és helyszínekiválasztási folyamata során. Ezt a célt egyrészt megfelelő érzékenységű, alacsony saját zajú, és a szélzajtól védett detektorok alkalmazásával, másrészt az ET tesztömegek helyt adó üregek kellően részletes modellezésével, és általánosan a mérési eljárások fejlesztésével és a számítási modellek pontosításával lehet elérni. Mindezek mellett törekedni kell arra, hogy az ET környezetébe telepített kiegészítő eszközök, különösen a HVAC rendszer minél alacsonyabb infrahang zajt generáljon.

A piszkéstetői állomásokon ugyanahhoz az időszakhoz tartozó nyomás ASD görbék eltérése megerősíti azt az állítást, hogy az infrahangzajhátter vizsgálatakor egy olyan nagyobb kiterjedésű helyszínen, mint az Einstein Teleszkóp telepítési helyszíne, nagyszámú mérőeszközből álló mérőhálózat használata szükséges. Az egyes eszközök helyének egyedi jellemzőiből adódó hatások a mérőhálózat jeleinek utólagos feldolgozása és elemzése során kiszűrhetőek. Például a szél hatását különféle, az állomások jelei közti korreláció meghatározásán alapuló módszerekkel lehet kiküszöbölni [PhDJ05].

4.6. A 4. fejezet összefoglalása

A 4. fejezetben ismertettem az általam elvégzett infrahang méréseket, az adatok feldolgozása után kapott eredményeket és az eredmények értelmezésével új megállapításokat tettem az interferometrikus gravitációshullám-detektorok infrahangzajháttere, és az azzal kapcsolatban álló infrahang eredetű newtoni zaj analízisére vonatkozóan.

Ismertettem a debreceni Atomkiban készített ISM1 mikrofon által szolgáltatott nyomás ASD értékek kalibrációját lehetővé tevő, az ISM1 mikrofonnal és az MB3 kalibrált mikrobarométerrel, mint referencia műszerrel általam végzett összehangolt mérés megvalósítását és eredményeit.

Bemutattam, hogy milyen célból és hogyan telepítettem az ISM1 mikrofonnal összeállított infrahang mérőrendszert a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumba (MGGL). Az általam kidolgozott adatfeldolgozási eljárások és szoftverek alkalmazásával elkülönítettem az infrahang jelnek azokat a jelszakaszait, amelyek tranziens típusú jeleket tartalmaztak. Jellemeztem a tranzienseket nagyságuk és időbeli előfordulásuk szerint. Beazonosítottam a bányászati tevékenységtől eredő zajokat (nem természetes folyamatok). Megmutattam, hogyan befolyásolja a tranzienseket tartalmazó jelszakaszok meghagyása/eldobása az infrahang zajhátteret jellemző nyomás ASD értékek mediánjának és percentilis görbéinek menetét. A tranziensek csak a 90. percentilisek görbét növelik meg jelentősen.

Részt vettem egy, az MGGL minden kutatása szempontjából releváns, a bánya egyes zajforrásainak bányászok általi leállítását majd újraindítását magában foglaló kísérletben, és megállapítottam, hogy az MGGL-beli infrahang zajhátteret legnagyobb mértékben, kiterjedt frekvenciatartományon a szellőzőrendszer befolyásolja. Az MGGL természetes eredetű infrahang zajhátterét

leginkább megközelítő referenciának jelöltem ki a szellőzőrendszer lekapcsolásakor mért adatokból számolt nyomás ASD görbét.

Annak érdekében, hogy megállapíthassuk, milyen előnyei vannak egy harmadik generációs gravitációshullám-detektor földfelszín alá való telepítésének, megvizsgáltam a földfelszín felé telepített adVirgo gravitációshullám-detektor infrahangzajhátterét 1 Hz alatt leginkább befolyásoló szél hatását. A szél miatt az infrahang zajhátter az idő nagy részében meghaladja az MGGL zajhátterét. Rámutattam, hogy 2 Hz fölött a szellőzőrendszer dominálja a zajt. Ezt és az MGGL-beli tapasztalataimat figyelembe véve megállapítottam, hogy az Einstein Teleszkóp földfelszín alatti helyszínén kritikus fontosságú a megfelelő szellőzőrendszer kiválasztása, vagy egy egyedi rendszer elkészítése.

Annak érdekében, hogy megvizsgáljam a szakirodalomban fellelhető legújabb newtoni zaj modellnek [PhDJ05] az Einstein Teleszkóp Mátrabeli helyszínére való alkalmazhatóságát, elvégeztem a piskéztetői infrahang mérőállomások által mért háttérzaj évszakonként, napszakonként és állomásonként vett változásait a Bowman által alkalmazott módszer [73] végrehajtásával. Megmutattam, hogy különösen 1 Hz alatt jelentős mértékű eltérések tapasztalhatók a detektorok közt. 1 Hz fölött az eltérések kisebb mértékűek. Mégis, az eltérések rávilágítanak arra, hogy egy olyan kiterjedt helyszínen, mint ami a majdani ET, az infrahang eredetű newtoni zaját befolyásolja, egy reprezentatív infrahangzajhátter görbe meghatározása több detektorral számos, még nem tisztázott kérdést vet föl.

Végül alkalmaztam a 3.5. fejezetben, a [45] valamint a [PhDJ05] cikkekben ismertetett modellt az egyes detektorok évszakonként és napszakonként vett nyomás ASD medián értékeire. Az eredmények jóslata szerint az idő felében a newtoni zaj nem haladná meg az ET érzékenységet. A kapott eredményeim megerősítették Fiorucci és munkatársai megállapítását [45], mely szerint a newtoni zaj pontosabb megjósolásának érdekében pontosítani kell a modellezési eljárást, például a földalatti üregek hatásának jobb modellezésével.

Vizsgálni kell a földfelszíni zajmérés körülményeit is. Meg kell határozni, hogy milyenek legyenek a megfelelő mérőrendszerek és az azokból összeállított mérőhálózat, milyen elrendezésben legyenek kihelyezve a terepre az infrahangmérő eszközök. Továbbá új jelfeldolgozó módszereket kell kifejleszteni a mérőhálózat eredményeinek kiértékelésére.

Összefoglalás

Az interferometrikus gravitációshullám-detektorok érzékenyek minden olyan környezeti hatásra, amely a detektorok tesztömegeinek és a detektorok bizonyos komponenseinek relatív elmozdulását eredményezhetik. Nemkívánatos relatív elmozdulásokat eredményezhet a detektor infrahangháttere is. Az infrahangok egyrészt közvetlen módon mechanikai rezgéseket keltenek a detektor részeiben, másrészt az infrahangok okozta sűrűségváltozások fluktuációkat keltenek a tesztömegekre ható newtoni gravitációs mezőben.

Ezért szükséges olyan infrahang-érzékelőket is üzemeltetni a már működő és a jövőben megépítendő gravitációshullám-detektorok telepítési helyszínein, melyekkel monitorozható az infrahangteljesítmény frekvencia szerinti eloszlása. A mért adatok elemzése információt adhat az infrahangzaj forrásaira vonatkozóan is.

2014-ben kapcsolódtam be a debreceni Atommagkutató Intézetben (Atomki) folyó azon projektbe, amely a LIGO gravitációshullám-detektornál használt infrahangdetektorok továbbfejlesztésén dolgozott. A részvételemmel egy új mérőrendszer kifejlesztésére is sor került, amelynek érzékelője egy új típusú infrahangmikrofon (ISM1), a hozzá tartozó adatgyűjtő rendszer pedig egy Raspberry Pi 3 kártyaszámítógépen alapul [PhDJ03].

Először a kutatómunkám során elért műszaki és mérnöki eredményeket foglalom össze.

Elvégeztem az ISM1 mikrofonnal elkészített mérőrendszer kalibrációját. Referenciaműszerként a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet Piszkestetői Observatórium 3. számú infrahang-mérőállomásán üzemelő MB3 mikrobarométert használtam [PhDJ03].

Az ISM1 mérőrendszert telepítettem a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumba (MGGL). Az MGGL-t az első európai, földfelszín alá telepítendő gravitációshullám-detektor (Einstein Teleszkóp) egyik, 2019-ig lehetségesnek tekintett telepítési helyszínének közelében, a Mátra-hegységben alakították ki azért, hogy hosszútávú méréseket lehessen végezni a földfelszín alatti szeizmikus, infrahang- és elektromágneses zajokra vonatkozóan, valamint tanulmányozni lehessen a földfelszín alatti telepítés előnyeit [PhDJ01][PhDJ02].

Elkészítettem egy szoftvert, amellyel meghatároztam a stacionárius infrahangzaj jellemző mennyiségeit: az amplitúdó spektrális sűrűség (ASD) külön-

bőző frekvenciaértékekhez tartozó mediánját és percentiliseit. Ezután a bányája üzemeltetőjének hozzájárulásával megvizsgáltam a bányában üzemelő gépek és egyéb zajforrások hozzájárulásának mértékét az infrahang zajhátteréhez. A gépek szisztematikus lekapcsolásakor gyűjtött jelek kiértékelése során bebizonyítottam, hogy a legnagyobb mértékben a szellőzőrendszer működésekor fellépő nyomásváltozások járulnak hozzá az infrahang zajhátteréhez. A szellőzőrendszer lekapcsolását követően megmértem Einstein Teleszkóp helyszínválasztása szempontjából már relevánsnak tekinthető, a bányászati tevékenységek hatásától leginkább mentesített infrahang zajhátteret [PhDJ04].

Az Atomki a részvételemmel kifejlesztett egy újabb mérőrendszert is, amelynek infrahangmikrofonja (ISM1801) 30 Hz-ig képes mérni a levegőben terjedő infrahanghullámok hangnyomását. 2018 májusában az új mikrofont az olaszországi adVirgo gravitációshullám-detektor központi épületben kijelölt dedikált mérőhelyen telepítettem. Ez által lehetővé vált a földfelszíni adVirgo -nál mért, és a földfelszín alatti MGGL-ben mért adatsorok összehasonlítása.

A műszaki és mérnöki eredményeim tették lehetővé a következőkben olvasható tudományos eredmények elérését.

Kifejlesztettem egy új eljárást az MGGL-ben gyűjtött infrahang mérési adatok feldolgozására. Az eljárás lehetővé teszi a tranziens zajok elkülönítését a stationárius zajtól. Az eljárás szoftveres implementációját Python nyelven készítettem el. Ezután feldolgoztam egy hosszútávú mérés idősorát. Meghatároztam a talált tranziensek időbeli előfordulási gyakoriságát, és megmutattam, hogy a tranziensek az MGGL közelében folyó bányászati tevékenységektől származnak [PhDJ04].

Megvizsgáltam azt, hogy miként befolyásolja a szél sebessége az adVirgo infrahanghátterének 2 Hz frekvencia alatti tartományát. Az adódott, hogy egy küszöbérték fölött a szél sebességének növekedése az infrahang zajszint növekedését eredményezi, de a növekedés mértéke a frekvencia növelésével csökken. A kapott eredményeim is jól mutatják azt, hogy miért előnyös a gravitációshullám-detektorok földfelszín alá telepítése. Megmutattam azt is, hogy 2 Hz fölött a fűtő-, szellőző- és vákuumrendszert magába foglaló ún. HVAC rendszer dominálja az infrahang zajhátteret az adVirgo központi épületében.

Összehasonlítottam azokat az ASD görbéket is, amelyeket

- az MGGL -ben [PhDJ04],
- az olaszországi Szardínia szigetén található Sos Ennatos bánya [47], vagyis a majdani Einstein Teleszkóp potenciális helyszínén
- valamint a felszíni LIGO [49] [50] és az adVirgo gravitációshullám-detektorok helyszínein (4.3. fejezet)

mérték és publikáltak az infrahangzajra vonatkozóan.

Referenciaként a földfelszíni infrahangzajhátter jellemzésére szolgáló Bowman-féle medián zaj modellt választottam [73]. Az 1 Hz alatti tartományban a legalacsonyabb zajszint az MGGL-ben a szellőztetőrendszer lekapcsolásakor volt mérhető. 1 Hz fölött a Sos Ennatos -ban volt a legalacsonyabb az infrahangzaj. Rámutattam arra is, hogy a mért ASD görbék már közel vannak az infrahangmikrofonok saját zajának görbéihez. Ez azt jelenti, hogy nagyságrendekkel szükséges csökkenteni a földfelszín alatti telepítési helyszínekre szánt infrahangmikrofonok saját zaját.

Összességében kijelenthető az, hogy a földfelszín alá telepítendő gravitációshullám-detektorok potenciális helyszínein az infrahang háttérzaj jelentősen alacsonyabbra csökkenthető a földfelszíni zajszinthez képest. Rámutattam arra is, hogy bizonyos frekvenciatartományokban akár egy nagyságrendes csökkenés is elérhető, de az előny csak megfelelően tervezett és üzemeltetett elegendően csendes szellőző- és vákuumrendszer alkalmazása esetén használható ki [PhDJ05].

Az Einstein Teleszkóp telepítésére korábban kiválasztott mátrai helyszín közelében a CSFK GGI Piszkéztetői Observatórium területén négy felszíni infrahangmérő-állomás folyamatosan monitorozza a földfelszíni infrahanghátteret. Az állomások mért adatainak elemzése során meghatároztam az infrahangzajháttereket jellemző medián ASD értékeket mérőállomásokra, évszakokra és napszakokra lebontva. Kimutattam azt, hogy 1 Hz alatt a legnagyobb mértékű az eltérés a mérőállomások zajszintjei között. Az eltérések okai feltehetően a helyi domborzati adottságok, a széljárás vagy a növényzetrel való borítottság eltérései között keresendők.

Kimutattam azt is, hogy 1 Hz fölött az egyes állomások infrahangzaj szintjei eltéréseinek mértéke csökken a frekvencia növekedésével. Ezért az ehhez a tartományhoz tartozó infrahanghátterzaj medián ASD értékeiből egy, a szakirodalomban ismertetett módszer [45] szerint becsültem meg az Einstein Te-

leszkóp mátrai telepítésének esetére a detektor tesztömegeit elmozdító gravitációs gradiens zaj nagyságát az egyes infrahang mérőállomások esetére külön-külön.

A kapott eredményeket összehasonlítottam az Einstein Teleszkóp érzékenységi görbéjével. Az adódott, hogy a Mátrában történő telepítés esetén a medián Newtoni-zaj a frekvencia növelésével egyre inkább megközelítené az Einstein Teleszkóp várható érzékenységet, sőt 7 Hz-nél már el is érne azt.

Az eredményeim alátámasztják azt, hogy az infrahangzaj csökkentése érdekében is előnyös a gravitációshullám-detektorok földfelszín alá történő telepítése.

Fontos azonban kiemelni azt is, hogy mind a kísérleti, mind az elméleti módszerek jelentős javítása szükséges még ahhoz, hogy kvantitatív értelemben pontosabb eredményeket adhassanak a jövőbeli vizsgálatok. A földfelszíni infrahangmérések esetében indokolt hálózatba szervezni az infrahangot mérő eszközöket. Másrészt minden esetben tisztázni kell az egyes műszerek helyén uralkodó egyedi területi adottságok és a szél szerepét is ahhoz, hogy védekezni lehessen a méréseket zavaró nemkívánatos helyi zavaró hatások ellen. A további földfelszín alatti mérésekhez szükséges jelentősen csökkenteni az infrahangmikrofonok saját zaját is. A jövőbeli elméleti számolások során nagy figyelmet szükséges fordítani az ET-nek otthont adó majdani üregrendszer geometriai és akusztikai modellezésére, különösen a visszaverődési jelenségekre és hatásaikra (pl. reverbációs idők) [45][PhDJ05].

Az értekezésben ismertetett új eredményeimet három tézispontban foglaltam össze.

1. tézispont

Az Atommagkutató Intézetben kifejlesztett új típusú ISM1 infrahangmikrofon ASD – hangnyomás ASD átviteli függvényének meghatározása

A tézispontot alátámasztó közlemények: [PhDJ01], [PhDJ02], [PhDJ03]
Szoftver: [PhDS01]

2. tézispont

Szoftveres eljárás kifejlesztése az MGGL-ben végzett hosszú távú infrahangzaj-mérések adatainak feldolgozására

A tézispontot alátámasztó közlemény: [PhDJ04]

Szoftver: [PhDS02]

3. tézispont

A természetes eredetű infrahangzajhátter amplitudó spektrális sűrűsége frekvencia függésének kimérése az Einstein Teleszkóp korábban javasolt magyarországi földfelszín alatti helyszínére vonatkozóan.

A tézispontot alátámasztó közlemények: [PhDJ04], [PhDJ05]

Szoftver: [PhDS03] [PhDS04]

Summary

Interferometric gravitational-wave (GW) detectors are sensitive to any environmental impact that can induce alteration of the relative distance of their test masses and movement of other components of the detector. The infrasound noise background around a gravitational-wave detector is such a kind of factors. Infrasound waves can vibrate certain components of the detector and, furthermore, can lead to fluctuations of the mass density distribution and the strength of the local gravitational field around the test masses.

Therefore, it is important to operate suitable infrasound sensors at the sites of the present and future gravitational-wave detectors and monitor the frequency distribution of the infrasound power. The results of the evaluation of the measured data can give information on the sources of the infrasound, too. Measurements should be performed during the site selection period of the GW detectors and during their operating period, too.

In 2014, I joined the Institute for Nuclear Research (Atomki, Debrecen, Hungary) and participated in a project that aimed at upgrading and operate infrasound microphones that were developed by the Eötvös Gravity Research Group (Budapest, Hungary). The microphones were used for monitoring the infrasound background at the LIGO interferometers. At Atomki I also participated in the development of a new measurement system designed for underground measurements and is based on a new type of infrasound microphone (ISM1). The data acquisition unit of the system is based on a Raspberry Pi3 single-board computer [PhDJ03].

In the following, I summarize my results of technical developments that were necessary to achieve my scientific goals.

I planned and carried out the procedure for the field calibration of ISM1 [PhDJ03]. As reference instrument, I used an MB3 microbarometer operated at Piskéstető Observatory of the Geodetic and Geophysical Institute of Research Centre for Astronomy and Earth Sciences (Hungary).

I installed ISM1 and the data acquisition system in the Mátra Gravitational and Geophysical Laboratory (MGGL) that is at 88 m below the surface. The Laboratory was established in the Mátra Mountain range in Hungary with the aim to investigate the seismic, electromagnetic and infrasound noise background at a proposed site for the future Einstein Telescope. The other aim of MGGL is investigation of the advantages of installing ET at underground sites deep below the surface [PhDJ01][PhDJ02].

I developed a software that computes the amplitude spectral density (ASD) as a function of the sound frequency for the selected data segment. To characterize the infrasound background noise observed in a longer period, the software collects ASDs of consecutive data segments of same length. Then it determines the median or the average, and the percentiles of the ASD values for a given sound frequency. Then, with the permission and help of the chief manager of the mine site, I performed an experiment when the water pumps and then the ventilation system of the mine courses were turned off one by one. Based on the measurements done during the experiment, I showed that the lowest average ASD values corresponded to the period (i. e. the most silent period) when the ventilation system was turned off. This proved that the ventilation system was the main contributor to the infrasound background noise at MGGL. For characterization of the infrasound noise background that is relevant to the characterization of the proposed site of ET, I chose the average ASD values that corresponded to the most silent period.

Also, I participated in the development of another measurement system based on a new type of infrasound microphone (ISM1801) designed by Atomki. The system was developed for infrasound measurements in the 0.01 Hz to 30 Hz frequency range. In May 2018 I installed the ISM1801 microphone and its data acquisition system in the CEntral Building (CEB) of the advanced Virgo (adVirgo) terrestrial GW detector near Pisa (Italy). The data of the infrasound background measured in the CEB of adVirgo enabled comparisons with results obtained for the infrasound noise in the subterranean site of MGGL.

My scientific results are summarized in the following. I developed a new method for processing and evaluation of the infrasound data collected at MGGL. The procedure identifies the data segments that contain transients. Then these segments are removed from segments that contain only stationary noise. I implemented the algorithm in a Python software pipeline. Then I processed the data measured and collected at MGGL during a two-weeks long measurement period. Then I determined and characterized the frequency of occurrence of the transients in different times of day. I have showed that the transients were caused by different human activities during periods when recultivation of the mine site was done [PhDJ04].

For frequencies below 2 Hz, I studied the effects of the wind on the infrasound background of adVirgo. I have showed that wind had no observable effect on the infrasound background of the dedicated infrasound measurement site in CEB of adVirgo below a threshold wind speed. Winds with speed above the threshold caused frequency dependent increase of the intensity of the infrasound noise and higher was the frequency lower was the increase of the intensity. The results clearly demonstrated one of the advantages of the subterranean installation of gravitation-wave detectors. Also, I have showed that the noise of the HVAC system dominates the infrasound background below 2 Hz at the dedicated infrasound measurement site in CEB of adVirgo. The HVAC system consists of the vacuum system and the ventilation system of adVirgo.

I have compared the representative infrasound background ASD curves measured at and published for different operating and planned GW detectors:

- two proposed subterranean sites for the Einstein Telescope: MGGL [PhDJ04] and the Sos Ennatos mine in Sardinia, Italy [47]
- at the LIGO detectors [49] [50] and in CEB of the Virgo detector (Chapter 4.3.).

As reference, I used the Bowman's median noise model developed for the terrestrial infrasound background [73]. Below 1 Hz, the lowest noise was measured at MGGL when the ventilation system was turned off. Above 1 Hz the lowest noise level was measured at Sos Ennatos mine. I have showed that these noise levels are close to the self-noise levels of the microphones. I have highlighted that the self-noise of the microphones must be decreased by a few orders of magnitude for making them suitable for precise monitoring of the infrasound background of the future subterranean sites of GW detectors.

It can be concluded that the intensity of the infrasound background noise at the potential underground sites of the future ET is significantly lower than at the surface sites of the present operating GW detectors. Additionally, in certain infrasound frequency ranges, further decrease of an order of magnitude could be achieved at the underground sites. However, this advantage of the underground sites could be exploited only by using a sufficiently quiet ventilation and vacuum system [PhDJ05].

The fluctuations of the air density caused by the terrestrial infrasound background affect the local Newtonian gravitational field. The magnitude of this infrasound induced Newtonian noise decreases exponentially with increasing depth below surface. I have made estimations for the infrasound induced Newtonian noise expected at the proposed site of ET in Mátra Mountains in Hungary. I used the data series measured for the terrestrial infrasound noise background by four infrasound monitoring stations. They are operating at the site of Piskéstető Observatory (Piskéstető, Hungary) of the Research Centre for Astronomy and Earth Sciences Geodetic and Geophysical Institute. In order to characterize the infrasound noise at the surface, I computed the median ASD values for each station, each season, and for the four times of day (morning, noon, afternoon, night). I have showed that the differences between the stations are the largest below 1 Hz. This may be caused by the differences in the geography and the plantation and the wind around the locations of the four stations. Also, I have showed that the differences between the ASD levels of the stations are decreasing with increasing frequency. I used the ASD values calculated for frequencies above 1 Hz to estimate the infrasound induced Newtonian noise expected at the proposed site of the Einstein Telescope in Mátra mountains. I used a model published in [45]. I calculated the infrasound frequency dependence of the Newtonian noise. The data measured by a specific monitor station was used as input only in one calculation. Then the results of the four calculations were compared. I compared the obtained four Newtonian noise curves with the frequency dependence of the sensitivity curve of the Einstein Telescope. I have concluded that the obtained four NN curves approached the sensitivity curve of ET as the frequency increased and they reached it at 7 Hz.

My results support the idea that the underground installation of the future third generation GW detectors is advantageous in terms of the mitigation of the infrasound noise background and the infrasound induced Newtonian noise as well.

It is important to emphasize that the current experimental and theoretical methods used for estimation of the infrasound noise and the relevant Newtonian noise levels at subterranean sites should be improved in order to obtain more accurate quantitative results. A sensor network used for measuring the terrestrial infrasound noise background of Einstein Telescope should be developed. By correlating the signals of the sensors, one would be able to exclude the wind noise and other local disturbances that affect a given sensor. The self-noise of the infrasound microphones should be decreased by a few orders of magnitude for enabling more sensitive subterranean infrasound noise measurements. The improved theoretical methods should be capable of using improved underground cavity models. The cavity models should be better representations of the geometry and the acoustic characteristics of the cavities (for example reverberation time and resonances) [45], [PhDJ05].

I have summarized my new results presented in the Thesis in the form of 3 Thesis points:

Thesis Point 1

Determination of the ASD – sound pressure ASD transformation function for the ISM1 type infrasound microphone developed in the Institute for Nuclear Research (Atomki, Debrecen, Hungary)

Papers published in referred scientific journals and support the thesis point: [PhDJ01], [PhDJ02], [PhDJ03]

Software: [PhDS01]

Thesis Point 2

A procedure and software developed for processing and evaluation of the data of long term infrasound background measurements performed at MGGL

Paper published in referred scientific journal and supports the thesis point: [PhDJ04]

Software: [PhDS02]

Thesis Point 3

First measurement of the sound pressure Amplitude Spectral Density as a function of the frequency for the natural infrasound noise background for the proposed underground installation site of the Einstein Telescope in Hungary

Papers published in referred scientific journals and support the thesis point:
[PhDJ04], [PhDJ05]

Software: [PhDS03], [PhDS03]

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt köszönöm DR. MOLNÁR JÓZSEFNEK és DR. TRÓCSÁNYI ZOLTÁNNAK a témavezetői feladatok vállalását és a doktori kutatómunkámhoz nyújtott útmutatásaikat.

DR. MOLNÁR JÓZSEFNEK külön megköszönöm a kutatómunkámhoz nyújtott technikai útmutatásait, valamint a szakmai vezetése mellett folyó GINOP-2.2.1-15-2016-00012 azonosítójú projekt keretében folyamatosan nyújtott támogatását.

Köszönöm DR. FREI ZSOLTNAK, hogy részt vehettem az Atommagkutató Intézzel közösen folytatott munkákban és közben ráirányította a figyelmemet az infrahangok detektálásának fontosságára a gravitációs hullámok detektálására szolgáló berendezések környezetében.

Köszönettel tartozom DR. CZELLÁR SÁNDORNAK azért, hogy a rendelkezésemre bocsátotta az általa kifejlesztett új típusú nagy érzékenységű infrahang szenzor több példányát is.

Köszönöm NAGY DÁVID, NAGY ÁLMOS TAS, DÓSA CSABA és VARGA MÁTÉ kollégáimnak a mérésekhez szükséges számítógépek és adatgyűjtő hardverek integrálásában és az operációs rendszerek, valamint a távoli elérést lehetővé tevő szoftverek telepítésében és konfigurálásában nyújtott segítségét.

Köszönöm DR. KIRÁLY BEÁTÁNAK a munkám és a disszertáció megírása során adott hasznos tanácsait.

Köszönettel tartozom DR. VÁN PÉTERNEK az NKFIH K124366 pályázat vezetőjének, továbbá DR. BARNAFÖLDI GERGELYNEK és DR. VASÚTH MÁTYÁSNAK azért, hogy bekapcsolódhattam a téma keretében a Mátra Geofizikai és Gravitációs Laboratóriumban folyó kutatásokba, és azért, hogy folyamatosan támogatták a munkámat.

Köszönöm DR. VASÚTH MÁTYÁSNAK azt is, hogy segített bekapcsolódni a Virgo kollaborációba és ily módon telepíthettem egy infrahang detektáló rendszert az olaszországi Pisa mellett üzemelő adVIRGO detektor mellett is. Köszönöm DR. IRENE FIORI-nak a telepítésben és a rendszer felügyelete során nyújtott segítségét.

Köszönettel tartozom DR. LÉVAI PÉTERNEK azért, hogy bevont az Einstein Teleszkóp megvalósításával kapcsolatos kutatásokba és nemzetközi együttműködésbe.

Köszönet illeti CZANIK CSENGÉT és CZIFRA TIBORT az ISM1 infrahang mikrofon kalibrációja során nyújtott technikai segítségükért, valamint a CSFK GGI-t, hogy lehetővé tette a kalibrációs mérések végrehajtását a PISZKÉSTETŐ SZEIZMOLÓGIAI ÉS INFRAHANG ÁLLOMÁSON.

Köszönöm HUBA GÉZÁNAK, az MGGL kollaboráció tagjainak és a WIGNER Fizikai Kutatóközpont GRAVITÁCIÓFIZIKAI KUTATÓCSOPORTJÁNAK a szakmai tanácsokat és a kutatásaim elvégzéséhez nyújtott segítséget.

Köszönöm a NITROKÉMIA ZRT.-nek valamint a munkatársainak, különösen VÁRADI ÁRPÁDNAK és ROFRITS VILMOSNAK az MGGL-ben folytatott helyszíni tevékenységünk során nyújtott támogatását.

A munkát a Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Hivatal NKFIH K124366 pályázata támogatta.

Ez a disszertáció a GINOP-2.2.1-15-2016-00012 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap és Magyarország Kormánya társfinanszírozásával a Széchenyi 2020 program keretében valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] A. Einstein, „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.,” *Sitzungber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin, part 1*, p. 688, 1916.
- [2] A. Einstein, „Über Gravitationswellen.,” *Sitzungber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin, part 1*, p. 154, 1918.
- [3] J. H. Taylor és R. A. Hulse, „A High-Sensitivity Pulsar Survey,” *Astrophys. J.* 191, p. L59, 1974.
- [4] R. A. Hulse és J. H. Taylor, „Discovery of a pulsar in a binary system,” *Astrophys. J.* 195, pp. L51-L53, 1975.
- [5] J. H. Taylor, L. A. Fowler és J. M. Weisberg, „Measurements of general relativistic effects in the binary pulsar PSR1913+16,” *Nature* 277, pp. 437-440, 1979.
- [6] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and VIRGO Collaboration), „Observation of gravitational waves from a binary black hole merger,” *Phys. Rev. Lett.* 116, p. 061102, 2016.
- [7] J. Aasi et al. (LIGO Scientific Collaboration), „Advanced LIGO,” *Class. Quantum Grav.* 32, p. 074001, 2015.
- [8] B. P. Abbott et al., „GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs,” *Physical Review X*, 2019.
- [9] B.P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and VIRGO Collaboration), „Population Properties of Compact Objects from the Second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog,” *arXiv 2010.14533*, 2020.
- [10] P. R. Saulson, „Terrestrial gravitational noise on a gravitational wave antenna,” *Phys. Rev. D* 30, pp. 732–736, 1984.
- [11] J. Harms, „Terrestrial gravity fluctuations,” *Living Rev. Relativity* 22, p. 6, 2019.

- [12] T. Akutsu, „KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector,” *Nat. Astron.* 3, p. 35–40, 2019.
- [13] Abernathy, M.; et al. (ET Science Team), „Einstein Gravitational Wave Telescope Conceptual Design Study,” Available online: <http://www.et-gw.eu/index.php/etdsdocument> (accessed on 29 December 2019)..
- [14] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, John Wiley and Sons, Inc, 1972.
- [15] P. R. Saulson, *Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors*, Cambridge University Press, 2010.
- [16] P. Raffai, *Az interferometrikus gravitációshullám-detektorok alkalmazása az asztrofizikában és a gravitációkutatásban*, Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2011.
- [17] B. Mikóczi, *Kompakt kettős rendszerek poszt-newtoni fejlődése*, Szeged: Szegedi Tudományegyetem TTIK, 2010.
- [18] P. R. Saulson, *Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors*, WORLD SCIENTIFIC, 2016.
- [19] P. Mészáros, D. B. Fox, C. Hanna és K. Murase, „Multi-messenger astrophysics,” *Nature Reviews Physics*, pp. 585-599, 2019.
- [20] A. A. Michelson és E. W. Morley, „On the Relative Motion of the Earth and of the Luminiferous Ether,” *Sidereal Messenger* 6., pp. 306-310, 1887.
- [21] J. Aasi et al. (LIGO Scientific Collaboration), „Advanced LIGO,” *Classical and Quantum Gravity* 32, p. 074001, 2015.
- [22] F. Acernese et al., „Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector,” *Classical and Quantum Gravity* , p. 024001, 2014.
- [23] T. Akatsu et al. (KAGRA collaboration), „KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector,” *Nature Astronomy* 3., p. 35, 2019.

- [24] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration), „A guide to LIGO–Virgo detector noise and extraction of transient gravitational-wave signals,” *Classical and Quantum Gravity* 37, p. 055002, 2020.
- [25] D. V. Martynov, „Sensitivity of the Advanced LIGO detectors at the beginning of gravitational wave astronomy,” *Physical Review D* 93, p. 112004, 2016.
- [26] P. B. Covas et al. (LSC Instrument Authors), „Identification and mitigation of narrow spectral artifacts that degrade searches for persistent gravitational waves in the first two observing runs of Advanced LIGO,” *Physical Review D* 97, p. 082002, 2018.
- [27] D. V. Martynov, „Lock Acquisition and Sensitivity Analysis of Advanced LIGO Interferometers. Dissertation (Ph.D.),” California Institute of Technology, 2015.
- [28] Y. Zhao et al., „Frequency-Dependent Squeezed Vacuum Source for Broadband Quantum Noise Reduction in Advanced Gravitational-Wave Detectors,” *Physical Review Letters* 124, p. 171101, 2020.
- [29] L. McCuller et al., „Frequency-Dependent Squeezing for Advanced LIGO,” *Physical Review Letters* 124, p. 171102, 2020.
- [30] F. Acernese et al. (The Virgo Collaboration), „Quantum Backaction on kg-Scale Mirrors: Observation of Radiation Pressure Noise in the Advanced Virgo Detector,” *Physical Review Letters* 125, p. 131101, 2020.
- [31] I. Fiori et al., „The Hunt for Environmental Noise in Virgo during the Third Observing Run,” *Galaxies* 8, 2020.
- [32] B. K. Berger, „Identification and mitigation of Advanced LIGO noise sources,” *Journal of Physics: Conference Series* 957, p. 012004, 2018.
- [33] A. Buikema et al., „Sensitivity and performance of the Advanced LIGO detectors in the third observing run,” *Physical Review D* 102, p. 062003, 2020.
- [34] J. Harms et al., „Observation of a potential future sensitivity limitation from ground motion at LIGO Hanford,” *Phys. Rev. D* 101, p. 102002, 2020.

- [35] M. M. Withers, R. C. Aster, C. J. Young és E. P. Chael, „High-frequency analysis of seismic background noise as a function of wind speed and shallow depth.,” *Bulletin of the Seismological Society of America* 86, p. 1507–1515, 1996.
- [36] V. Naderyan, C. J. Hickey és R. Raspet, „Wind-induced ground motion,” *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121, p. 917– 930, 2016.
- [37] J. R. Peterson, „Observations and modeling of seismic background noise,” *Open-File Report*, 1993.
- [38] F. Acernese et al., „Measurements of Superattenuator seismic isolation by Virgo interferometer,” *Astroparticle Physics* 33, pp. 182-189, 2010.
- [39] T. Akatsu et al., „First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA,” *Classical and Quantum Gravity* 36, p. 165008, 2019.
- [40] Y. Himemoto és A. Taruya, „Impact of correlated magnetic noise on the detection of stochastic gravitational waves: Estimation based on a simple analytical model,” *Phys. Rev. D* 96, p. 022004, 2017.
- [41] M. Coughlin et al., „Measurement and subtraction of Schumann resonances at gravitational-wave interferometers,” *Phys. Rev. D* 97, p. 102007, 2018.
- [42] L. K. Nuttall et al (LIGO Scientific Collaboration), „Characterizing transient noise in the LIGO detectors,” *Philosophical transactions. Series A* 376, p. 20170286, 2018.
- [43] M. W. Coughlin et al. (for the LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration), „Identification of long-duration noise transients in LIGO and Virgo,” *Classical and Quantum Gravity* 28, p. 235008, 2011.
- [44] A. Effler et al., „Environmental influences on the LIGO gravitational wave detectors during the 6th science run,” *Classical and Quantum Gravity* 32, p. 035017, 2015.
- [45] D. Fiorucci, J. Harms, M. Barsuglia, I. Fiori és F. Paoletti, „Impact of infrasound atmospheric noise on gravity detectors used for astrophysical and geophysical applications,” *Physical Review D* 97, p. 062003, 2018.

- [46] P. Nguyen et al., *Environmental Noise in Advanced LIGO Detectors*, arXiv:2101.09935, 2021.
- [47] R. D. Rosa, *Environmental noise measurements at Sos Enattos*, 11th Einstein Telescope Symposium, 1 December 2020.
- [48] M. G. Beker, . J. F. J. van den Brand és D. S. Rabeling, „Subterranean ground motion studies for the Einstein Telescope,” *Classical and Quantum Gravity*, p. 025002, 2014.
- [49] G. Szeifert, P. Bojtos, P. Raffai és G. Gelencsér, *Preparations for monitoring infrasound at the aLIGO and homestake-DUGL sites*, Hannover, Germany: LIGO Scientific Collaboration - VIRGO September 2013 Meeting, 23-27 Sept. 2013..
- [50] D. Fiorucci, J. Harms és M. Barsuglia, *Atmospheric Newtonian Noise (NN)*, La Biodola, Isola d'Elba: Gravitational-Wave Advanced Detector Workshop 2016 (GWADW2016), 26 May 2016.
- [51] N. Hesselmann, *Digitális jelfeldolgozás*, Műszaki Könyvkiadó, 1985.
- [52] J. W. Cooley és J. W. Tukey, „An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series,” *Mathematics of Computation* 19 , pp. 297-301, 1965.
- [53] A. H. Nuttall, „Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior,” *IEEE® Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Vol. ASSP-29*, p. 84–91, 1981.
- [54] S. Klimenko és G. Mitselmakher, „A wavelet method for detection of gravitational wave bursts,” *Classical and Quantum Gravity*, pp. 1819-1830, 2004.
- [55] A. Haar, „Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme,” *Mathematische Annalen* 69, p. 331–371, 1910.
- [56] „Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median,” *Journal of Experimental Social Psychology* 49, pp. 764-766, 2013.
- [57] I. E. Commission, *Letter symbols to be used in electrical technology. Part 4: Symbols for quantities to be used for rotating electrical machines. IEC60027-3-4..*

- [58] I. E. Commission, *IEC 801: Acoustics and electroacoustics. 801-21-19 instantaneous sound pressure..*
- [59] A. Le Pichon, E. Blanc és A. Hauchecorne, *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, Springer Netherlands, 2009.
- [60] R. Matoza, D. Fee, D. Green és P. Mialle, „Volcano Infrasound and the International Monitoring System,” in *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, Springer, 2019.
- [61] W. N. Edwards, „Meteor Generated Infrasound: Theory and Observation,” in *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, Springer, 2009.
- [62] B. W. Stump, M. A. H. Hedlin, D. C. Pearson és V. Hsu, „CHARACTERIZATION OF MINING EXPLOSIONS AT REGIONAL DISTANCES: IMPLICATIONS WITH THE INTERNATIONAL MONITORING SYSTEM,” *Reviews of Geophysics* 40, pp. 1-21, 2002.
- [63] D. N. Green és D. Bowers, „Estimating the detection capability of the International Monitoring System infrasound network,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115, 2010.
- [64] A. Nippres és D. N. Green, „Sensitivity of the International Monitoring System infrasound network to elevated sources: a western Eurasia case study,” *Geophysical Journal International* 211, pp. 920-935, 2017.
- [65] T. Farges és E. Blanc, „Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 115, 2010.
- [66] L. G. Evers, J. D. Assink és P. S. Smets, „Infrasound from the 2009 and 2017 DPRK rocket launches,” *Geophysical Journal International* 113, p. 1785–1791, 2018.
- [67] C. R. Wilson, „Infrasonic wave generation by aurora,” *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 37, pp. 973-988, 1975.
- [68] D. C. Bowman és J. M. Lees, „A comparison of the ocean microbarom recorded on the ground and in the stratosphere,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122, p. 9773– 9782, 2017.

- [69] J. P. Mutschlecner és R. W. Whitaker, „Infrasound from earthquakes,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110, 2005.
- [70] W. L. Rubin, „The Generation and Detection of Sound Emitted by Aircraft Wake Vortices in Ground Effect,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22, p. 543–554, 2005.
- [71] R. T. Nishiyama, A. J. Bedard és A. L. Kirschner, „Strong winds over mountains and infrasound: possible applications for detecting regions related to aircraft turbulence reports,” *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 879-881, 2002.
- [72] J. Jakobsen, „Infrasound Emission from Wind Turbines,” *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, pp. 145-155, 2005.
- [73] J. R. Bowman, G. E. Baker és M. Bahavar, „Ambient infrasound noise,” *Geophysical Research Letters* 32, 2005.
- [74] M. Matthews, „CTBT international monitoring system,” *Radiation Protection News and Notes* 40, 1997.
- [75] „<https://2009-2017.state.gov/t/avc/rls/212176.htm>,” [Online].
- [76] J. Altmann, I. Niemeyer, M. Dreicer és G. Stein, *Advances in Seismic and Acoustic Monitoring*, Springer International Publishing, 2020.
- [77] J. Marty, „The IMS Infrasound Network: Current Status and Technological Developments.,” in *In: Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (eds) Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, Springer, 2019.
- [78] K. A. Asmar, *Modernizing Infrasound Systems: Characterization and Analytics Approaches for Next-Generation Sensors*, University of Hawai'i at Manoa, 2019.
- [79] R. W. Whitaker, „Infrasonic monitoring,” Los Alamos National Lab NM, 1995.
- [80] D. Ponceau és L. Bosca, *Low-Noise Broadband Microbarometers. Infrasound Monitoring for atmospheric studies*, Springer, 2010.
- [81] A. J. Zuckerwar, „Principles of operation of condenser microphones,” *The Journal of the Acoustical Society of America* 100, pp. 2670-2671, 1996.

- [82] „<https://www.bksv.com/media/doc/be1447.pdf>,” [Online].
- [83] I. E. Commission, *Sound system equipment - Part 4: Microphones. 60268-4:2018 RLV*.
- [84] I. O. f. Standardization, *Acoustics — Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements. ISO 7196:1995*.
- [85] „<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>,” [Online].
- [86] „<https://www.adafruit.com/product/1085>,” [Online].
- [87] „<https://www.kingston.com/en/memory-cards/industrial-temperature-microsd-uhs-i>,” [Online].
- [88] D. L. Mills, *Computer Network Time Synchronization: the Network Time Protocol on Earth and in Space*, Second Edition, CRC Press, 2011.
- [89] „<https://datasheet.octopart.com/DS3231-Dallas-Semiconductor-datasheet-34183142.pdf>,” [Online].
- [90] F. Acernese et al., „Data Acquisition System of the Virgo Gravitational Waves Interferometric Detector,” *IEEE Transactions on Nuclear Science* 55, pp. 225-232, 2008.
- [91] „<https://www.bksv.com/media/doc/be1373.pdf>,” [Online].
- [92] S. Denis et al., *Details tests and specifications of the new microbarometer MB3*, Vienna: EGU 2014, 2014.
- [93] „<https://issuu.com/baillonlionel/docs/userguidemb3av20>,” [Online].
- [94] Kövesligethy Radó Seismological Observatory (Geodetic And Geophysical Institute, Research Centre For Astronomy And Earth Sciences, Hungarian Academy Of Sciences (MTA CSFK GGI KRSZO)), *Hungarian National Infrasound Network*, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2017.
- [95] C. Czanik és I. Bondar, *THE FIRST INFRASOUND ARRAY IN HUNGARY*, Vienna, Austria: CTBT SCIENCE AND TECHNOLOGY 2017 CONFERENCE, 2017.

- [96] R. Woodward, H. Israelsson, I. Bondár, K. McLaughlin, J. R. Bowman és H. Bass, „Understanding wind-generated infrasound noise,” *Proceedings of the 27th Seismic Research Review: Nuclear Explosion Monitoring*, p. 866–875, 2005.
- [97] „http://www-dase cea.fr/public/dossiers_thematiques/microbarometres/description_en.html,” [Online].
- [98] K. Asmar, G. Milton, D. Hart és B. Williams, „Digital acoustic sensor performance across the infrasound range in non-isolated conditions,” *The Journal of the Acoustical Society of America* 144, pp. 3036-3045, 2018.

Az értekezéshez kapcsolódó saját publikációk listája

Az értekezés témájához kapcsolódó impakt faktoros közlemények

- [PhDJ01] G. G. Barnaföldi, E. Fenyvesi et al., „A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium első mérései és mérési programja,” *MAGYAR GEOFIZIKA* 57, pp. 152-169, 2016.
Impakt faktor: 0.11
- [PhDJ02] G. G. Barnaföldi, T. Bulik, M. Cieslar, E. David, M. Dobroka, E. Fenyvesi, D. Gondek-Rosinska, Z. Graczer, G. Hamar, G. Huba, Á. Kis, R. Kovács, I. Lemperger, P. Lévai, J. Monár, D. Nagy, A. Novák, L. Oláh, P. Pázmándi, D. Piri, L. Somlai, T. Starecki, et al. „First report of long term measurements of the MGGL laboratory in the Matra mountain range,” *CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY* 34, p. 114001, 2017.
Impakt faktor: 3.283
- [PhDJ03] Ván, G. G. Barnaföldi, T. Bulik, T. Biró, S. Czellár, M. Cieslar, C. Czanik, E. Dávid, E. Debreceni, M. Denys, M. Dobroka, E. Fenyvesi, D. Gondek-Rosinska, Z. Gráczer, G. Hamar, G. Huba, B. Kacskovics, Á. Kis, I. Kovács, R. Kovács, I. Lemperger, et al.

„Long term measurements from the Mátra Gravitational and Geophysical Laboratory,” *EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL-SPECIAL TOPICS* 228, pp. 1693-1743, 2019.

Impakt faktor: 1.668

- [PhDJ04] E. Fenyvesi, S. Czellár és J. Molnár, „Investigation of Infrasound Background Noise at Matra Gravitational and Geophysical Laboratory (MGGL),” *UNIVERSE* 6, 2020.

Impakt faktor: 1.752

- [PhDJ05] F. Ammann, F. Bonsignorio, T. Bulik, H. J. Bulten, S. Cuccur, A. Dassargues, R. DeSalvo, E. Fenyvesi, F. Fidicaro, I. Fiori, C. Giunchi, A. Grado, J. Harms, S. Koley, L. Kovács, G. Losurdo, V. Mandic, P. Meyers, L. Naticchioni, F. Nguyen, G. Oggiano et al. „Site-selection criteria for the Einstein Telescope,” *Review of Scientific Instruments* 91, p. 094504, 2020.

Impakt faktor: 1.48

A doktori értekezéshez kapcsolódó konferencia előadások

- [PhDC01] Fenyvesi Edit, Czellár Sándor, Molnár József, Infrahang háttérzaj mérése az MGGL laboratóriumban. Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Konferencia. 2018. Április 19., Budapest
- [PhDC02] Edit Fenyvesi, Investigation of infrasound noise background at Mátra Gravitational and Geophysical Laboratory (MGGL). ZIMÁNYI SCHOOL 2018. 7 Dec 2018, Budapest
- [PhDC03] Edit Fenyvesi, Results of the long-term measurements from the Mátra Gravitational and Geophysical Laboratory. GRAvitational - wave Science&technology Symposium (GRASS 2019). 18 Oct 2019, Padova, Italy

Egyéb közlemények

A Virgo Együttműködés és a LIGO Tudományos Együttműködés publikációi

- [J01] Abbott, R. ; Abbott, T.D. ; Abraham, S. ; Acernese, F. ; Ackley, K. ; Adams, C. ; Adhikari, R.X. ; Adya, V.B. ; Affeldt, C. ; Agathos, M. et al.
- Open data from the first and second observing runs of Advanced LIGO and Advanced Virgo
- SoftwareX 13 Paper: 100658 , 20 p. (2021)
- [J02] Abbott, R ; Abbott, TD ; Abraham, S ; Acernese, F ; Ackley, K ; Adams, C ; Adhikari, RX ; Adya, VB ; Affeldt, C et al.
- GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 Solar Mass Black Hole with a 2.6 Solar Mass Compact Object
- ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS 896 : 2 Paper: L44 , 20 p. (2020)
- [J03] Abbott, R ; Abbott, TD ; Abraham, S ; Acernese, F ; Ackley, K ; Adams, C ; Adhikari, RX ; Adya, VB ; Affeldt, C et al.
- GW190412: Observation of a binary-black-hole coalescence with asymmetric masses
- PHYSICAL REVIEW D 102 : 4 Paper: 043015 , 29 p. (2020)
- [J04] Abbott, R. ; Abbott, T. D. ; Abraham, S. ; Acernese, F. ; Ackley, K. ; Adams, C. ; Adhikari, R. X. ; Adya, V. B. ; Affeldt, C. et al.
- Properties and Astrophysical Implications of the 150 M $\odot$ Binary Black Hole Merger GW190521
- ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS 900 : 1 Paper: L13 , 27 p. (2020)
- [J05] Abbott, R ; Abbott, TD ; Abraham, S ; Acernese, F ; Ackley, K ; Adams, A ; Adams, C ; Adhikari, RX ; Adya, VB ; Affeldt, C et al.
- Gravitational-wave Constraints on the Equatorial Ellipticity of Millisecond Pulsars

ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS 902 : 1 Paper: L21 , 17 p.
(2020)

- [J06] Acernese, F ; Agathos, M ; Aiello, L ; Ain, A ; Allocca, A ; Amato, A ; Ansoldi, S ; Antier, S ; Arene, M ; Arnaud, N et al.

Quantum Backaction on Kg-Scale Mirrors: Observation of Radiation Pressure Noise in the Advanced Virgo Detector

PHYSICAL REVIEW LETTERS 125 : 13 Paper: 131101 , 9 p. (2020)

- [J07] Abbott, R. ; Abbott, T. D. ; Abraham, S. ; Acernese, F. ; Ackley, K. ; Adams, C. ; Adhikari, R. X. ; Adya, V. B. ; Affeldt, C. et al.

GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of $150 M_{\odot}$

PHYSICAL REVIEW LETTERS 125 : 10 Paper: 101102 , 17 p.
(2020)

- [J08] Acernese, F ; Agathos, M ; Aiello, L ; Allocca, A ; Amato, A ; Ansoldi, S ; Antier, S ; Arene, M ; Arnaud, N ; Ascenzi, S et al.

Increasing the Astrophysical Reach of the Advanced Virgo Detector via the Application of Squeezed Vacuum States of Light

PHYSICAL REVIEW LETTERS 123 : 23 Paper: 231108 , 10 p.
(2019)

- [J09] Abbott, BP ; Abbott, R ; Abbott, TD ; Abernathy, MR ; Acernese, F ; Ackley, K ; Adams, C ; Adams, T ; Addesso, P et al.

Effects of data quality vetoes on a search for compact binary coalescences in Advanced LIGO's first observing run

CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY 35 : 6 Paper: 065010 , 26 p. (2018)

- [J10] Abbott, B P ; Abbott, R ; Abbott, T D ; Abernathy, M R ; Ackley, K ; Adams, C ; Addesso, P ; Adhikari, R X ; Adya, V B et al.

Exploring the sensitivity of next generation gravitational wave detectors

CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY 34 : 4 Paper: 044001 , 11 p. (2017)

- [J11] Abbott, BP ; Abbott, R ; Abbott, TD ; Abernathy, MR ; Acernese, F ; Ackley, K ; Adams, C ; Adams, T ; Addesso, P et al.

Search for continuous gravitational waves from neutron stars in globular cluster NGC 6544

PHYSICAL REVIEW D 95 : 8 Paper: 082005 , 15 p. (2017)

- [J12] 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.

Upper limits on the rates of binary neutron star and neutron-star--black-hole mergers from Advanced LIGO's first observing run

ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS 832 : 2 Paper: L21 , 17 p. (2016)

- [J13] Abbott, BP ; Abbott, R ; Abbott, TD ; Abernathy, MR ; Acernese, F ; Ackley, K ; Adams, C ; Adams, T ; Addesso, P et al.

Results of the deepest all-sky survey for continuous gravitational waves on LIGO S6 data running on the Einstein@Home volunteer distributed computing project

PHYSICAL REVIEW D 94 : 10 Paper: 102002 , 34 p. (2016)

- [J14] Abbott, BP ; Abbott, R ; Abbott, TD ; Abernathy, MR ; Acernese, F ; Ackley, K ; Adams, C ; Adams, T ; Addesso, P et al.

Improved Analysis of GW150914 Using a Fully Spin-Precessing Waveform Model

PHYSICAL REVIEW X 6 : 4 Paper: 041014 , 19 p. (2016)

- [J15] Abbott, BP ; Abbott, R ; Abbott, TD ; Abernathy, MR ; Acernese, F ; Ackley, K ; Adams, C ; Adams, T ; Addesso, P et al.

Binary Black Hole Mergers in the First Advanced LIGO Observing Run

PHYSICAL REVIEW X 6 : 4 Paper: 041015 , 36 p. (2016)

- [J16] 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.
The basic physics of the binary black hole merger GW150914
ANNALEN DER PHYSIK 529 : 1-2 Paper: 1600209 , 17 p. (2016)
- [J17] Abbott, BP ; Abbott, R ; Abbott, TD ; Abernathy, MR ; Acernese,
F ; Ackley, K ; Adams, C ; Adams, T ; Addesso, P et al.
Directly comparing GW150914 with numerical solutions of
Einstein's equations for binary black hole coalescence
PHYSICAL REVIEW D 94 : 6 Paper: 064035 , 30 p. (2016)
- [J18] 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.
Comprehensive all-sky search for periodic gravitational waves
in the sixth science run LIGO data
PHYSICAL REVIEW D 94 : 4 Paper: 042002 , 14 p. (2016)
- [J19] Abbott, BP ; Abbott, R ; Abbott, TD ; Abernathy, MR ; Acernese,
F ; Ackley, K ; Adams, C ; Adams, T ; Addesso, P et al.
GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-
Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence
PHYSICAL REVIEW LETTERS 116 : 24 Paper: 241103 , 14 p.
(2016)

Publikációk az Eötvös-kísérlet cikkek újraméréséhez kapcsolódóan

- [J20] Völgyesi, L. ; Szondy, Gy. ; Tóth, Gy. ; Péter, G. ; Kiss, B. ; Deák,
L. ; Égető, Cs. ; Fenyvesi, E. ; Gróf, Gy. ; Ván, P.
Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére
MAGYAR GEOFIZIKA 59 : 4 pp. 165-179. , 15 p. (2018)

- [J21] Völgyesi, L. ; Szondy, G. ; Tóth, G. ; Péter, G. ; Kiss, B. ; Barnaföldi, G. ; Deák, L. ; Égető, C. ; Fenyvesi, E. ; Gróf, G. et al.
Preparations for the remeasurement of the Eötvös-experiment
POS - PROCEEDINGS OF SCIENCE FFK2019 Paper: 041 , 13 p.
(2019)
- [J22] Tóth, G. ; Völgyesi, L. ; Szondy, G. ; Péter, G. ; Kiss, B. ; Barnaföldi, G. ; Deák, L. ; Égető, C. ; Fenyvesi, E. ; Gróf, G. et al.
Remeasurement of the Eötvös-experiment, status and first results
POS - PROCEEDINGS OF SCIENCE FFK2019 Paper: 042 , 10 p.
(2019)
- [J23] VÖLGYESI, Lajos ; SZONDY, György ; TÓTH, Gyula ; BARNAFÖLDI, Gergely ; DEÁK, László ; ÉGETŐ, Csaba ; FENYVESI, Edit ; HARANGOZÓ, Péter ; GRÓF, Gyula ; KISS, Bálint et al.
Az Eötvös-kísérlet újramérése
In: Budai, Tamás; Palotás, Klára; Piros, Olga (szerk.)
Földtani és Geofizikai Vándorgyűlés az évfordulók fényében, Balatonfüred, 2019. október 3-5. : A Magyar Királyi Földtani Intézet jubileuma és az Eötvös Loránd Emlékév tiszteletére
Budapest, Magyarország : Magyarhoni Földtani Társulat, Magyar Geofizikusok Egyesülete (2019) 129 p. pp. 60-63. , 4 p.

Publikációk hálózatkutatás témakörben

- [J24] E. Fenyvesi
Examination of an Edge Weighted Network Created from Data of Couchsurfing
Acta Physica Debrecina XLVII (2013) 57-65.
- [J25] E. Fenyvesi, G. Palla

Modelling gene regulation with boolean networks

Acta Physica Debrecina XLVI (2012) 47-55.

Egyéb konferencia előadások

- [C01] Fenyvesi, E.
Switching between attractors in large-scale Boolean networks
DOFFI Fizikus Doktoranduszok Konferenciája, Balatonfenyves,
2014. június 12-15.
- [C02] Fenyvesi, E.
Examining gene regulatory network
International Winter School on Complexity from Quantum
Systems to Emergent
Behaviour, December 10-14, 2012, Debrecen, Hungary.
- [C03] Fenyvesi, E.
Examining gene regulatory networks
DOFFI Fizikus Doktorandusz Hallgatók Konferenciája,
Balatonfenyves, 2012. június 15-17.

A Doktori értekezéshez kapcsolódó szoftverek

- [PhDS01] https://github.com/EditFenyvesi/ISM1_calibration
- [PhDS02] https://github.com/EditFenyvesi/MGGL_infrasound
- [PhDS03] https://github.com/EditFenyvesi/ET_Matra_NN_from_infrasound
- [PhDS04] https://github.com/EditFenyvesi/Virgo_infrasound



Nyilvántartási szám: DEENK/209/2021.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Fenyvesi Edit
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10058368

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

1. Barnaföldi, G. G., Bulik, T., Cieslar, M., Dávid, E., Dobróka, M. M., **Fenyvesi, E.**, Gondek-Rosinska, D., Grácz, Z., Hamar, G., Huba, G., Kis, Á., Kovács, R., Lempenger, 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., Wessztergom, V., Weber, Z.: A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium első mérései és mérési programja.
Magyar Geofizika. 57 (4), 152-169, 2016. ISSN: 0025-0120.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

2. **Fenyvesi, E.**, Molnár, J., Czellár, S.: Investigation of Infrasound Background Noise at Mátra Gravitational and Geophysical Laboratory (MGGL).
Universe. 6 (1), 1-13, 2020. EISSN: 2218-1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/universe6010010>
IF: 1.752 (2019)
3. Amann, F., Bonsignorio, F., Bulik, T., Bulten, H. J., Cuccuru, S., Dassargues, A., DeSalvo, R., **Fenyvesi, E.**, Fidecaro, F., Fiori, I., Giunchi, C., Grado, A., Harms, J., Koley, S., Kovács, L., Losurdo, G., Mandic, V., Meyers, P., Naticchioni, L., Nguyen, F., Oggiano, G., Olivieri, M., Paoletti, F., Paoli, A., Plastino, W., Razzano, M., Ruggi, P., Saccorotti, G., Sintés, A. M., Somlai, L., Ván, P., Vasúth, M.: Site-selection criteria for the Einstein Telescope.
Rev. Sci. Instrum. 91 (9), 1-20, 2020. ISSN: 0034-6748.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0018414>
IF: 1.48 (2019)





4. Ván, P., Barnaföldi, G. G., Bulik, T., Biró, T., Czellar, S., Cieslar, M., Czanik, C., Dávid, E., Debreceni, E., Denys, M., Dobróka, M. M., **Fenyvesi, E.**, Gondek-Rosinska, D., Grácz, Z., Hamar, G., Huba, G., Kacsócs, B., Kis, Á., Kovács, I., Kovács, R., Lempenger, I., Lévai, P., Lőkös, S., Mlynarczyk, J., Molnár, J., Singh, N., Novák, A., Oláh, L., Starecki, T., Suchenek, M., Surányi, G., Szalai, S., Tringali, M. C., Varga, D., Vasúth, M., Vásárhelyi, B., Wesztergom, V., Wéber, Z., Zimborás, Z., Somlai, L.: Long term measurements from the Mátra Gravitational and Geophysical Laboratory.
Eur. Phys. J. Spec. Top. 228 (8), 1693-1743, 2019. ISSN: 1951-6355.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epjst/e2019-900153-1>
IF: 1.668
5. Barnaföldi, G. G., Bulik, T., Cieslar, M., Dávid, E., Dobróka, M. M., **Fenyvesi, E.**, Gondek-Rosinska, D., Grácz, Z., Hamar, G., Huba, G., Kis, Á., Kovács, R., Lempenger, L., Lévai, P., Molnár, J., Nagy, D., Novák, A., Oláh, L., Pázmándi, P., Piri, D., Somlai, L., 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.
Class. Quantum Gravity. 34 (11), 1-23, 2017. ISSN: 0264-9381.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6382/aa69e3>
IF: 3.283

További közlemények

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

6. Völgyesi, L., Szondy, G., Tóth, G., Péter, G., Kiss, B., Deák, L., Égető, C., **Fenyvesi, E.**, Gróf, G., Ván, P.: Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére.
Magyar Geofizika. 59 (4), 165-179, 2018. ISSN: 0025-0120.

Idgen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

7. **Fenyvesi, E.**: Examination of an edge weighted network created from data of couchsurfing.
Acta Phys. Debr. 47, 57-65, 2013. ISSN: 1789-6088.
8. **Fenyvesi, E.**, Palla, G.: Modelling gene regulation with boolean networks.
Acta Phys. Debr. 46, 47-55, 2012. ISSN: 1789-6088.

Idgen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (18)

9. Abbott, R., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: Open data from the first and second observing runs of Advanced LIGO and Advanced Virgo.
SoftwareX. 13, 1-22, 2021. ISSN: 2352-7110.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.softx.2021.100658>





10. Abbott, R., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**:
Gravitational-wave Constraints on the Equatorial Ellipticity of Millisecond Pulsars.
Astrophys. J. Lett. 902 (1), 1-17, 2020. EISSN: 2041-8213.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/abb655>
11. Abbott, R., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**:
GW190412: Observation of a binary-black-hole coalescence with asymmetric masses.
Phys. Rev. D. 102 (4), 1-29, 2020. ISSN: 2470-0010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.102.043015>
12. Abbott, R., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**:
GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of 150 M.
Phys. Rev. Lett. 125 (10), 1-17, 2020. ISSN: 0031-9007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.101102>
13. Abbott, R., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**:
GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 Solar Mass Black Hole with a
2.6 Solar Mass Compact Object.
Astrophys. J. Lett. 896 (2), 1-20, 2020. EISSN: 2041-8213.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ab960f>
14. Abbott, R., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: Properties
and Astrophysical Implications of the 150 M Binary Black Hole Merger GW190521.
Astrophys. J. Lett. 900 (1), 1-27, 2020. EISSN: 2041-8213.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/aba493>
15. Acernese, F., **Fenyvesi, E.**, **The Virgo Collaboration**: Quantum Backaction on Kg-Scale Mirrors:
Observation of Radiation Pressure Noise in the Advanced Virgo Detector.
Phys. Rev. Lett. 125 (13), 1-9, 2020. ISSN: 0031-9007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.131101>
16. Acernese, F., **Fenyvesi, E.**, **The Virgo Collaboration**: Increasing the Astrophysical Reach of the
Advanced Virgo Detector via the Application of Squeezed Vacuum States of Light.
Phys. Rev. Lett. 123 (23), 1-10, 2019. ISSN: 0031-9007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.231108>
17. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration: Effects of
data quality vetoes on a search for compact binary coalescences in Advanced LIGO's first
observing run.
Class. Quantum Gravity. 5 (6), 1-27, 2018. ISSN: 0264-9381.
IF: 3.487
18. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, **The LIGO Scientific Collaboration**: Exploring the sensitivity of next
generation gravitational wave detectors.
Class. Quantum Gravity. 34 (4), 1-18, 2017. ISSN: 0264-9381.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6382/aa51f4>





19. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: Search for continuous gravitational waves from neutron stars in globular cluster NGC 6544.
Phys. Rev. D. 95 (8), 1-15, 2017. ISSN: 2470-0010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.95.082005>
20. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: Binary Black Hole Mergers in the First Advanced LIGO Observing Run.
Phys. Rev. X. 6 (4), 1-36, 2016. EISSN: 2160-3308.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevX.6.041015>
21. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: Comprehensive all-sky search for periodic gravitational waves in the sixth science run LIGO data.
Phys. Rev. D. 94 (4), 1-14, 2016. ISSN: 2470-0010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.042002>
22. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: Directly comparing GW150914 with numerical solutions of Einstein's equations for binary black hole coalescence.
Phys. Rev. D. 94 (6), 1-30, 2016. ISSN: 2470-0010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.064035>
23. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence.
Phys. Rev. Lett. 116 (24), 1-14, 2016. ISSN: 0031-9007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.241103>
24. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: Improved Analysis of GW150914 Using a Fully Spin-Precessing Waveform Model.
Phys. Rev. X. 6 (4), 1-19, 2016. EISSN: 2160-3308.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevX.6.041014>
25. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: Results of the deepest all-sky survey for continuous gravitational waves on LIGO S6 data running on the Einstein@Home volunteer distributed computing project.
Phys. Rev. D. 94 (10), 1-38, 2016. ISSN: 2470-0010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.102002>
26. Abbott, B. P., **Fenyvesi, E.**, The LIGO Scientific Collaboration, **The Virgo Collaboration**: Upper limits on the rates of binary neutron star and neutron star-black hole mergers from advanced ligo's first observing run.
Astrophys. J. Lett. 832 (2), 1-15, 2016. ISSN: 2041-8205.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/2041-8205/832/2/L21>





Idegen nyelvű konferencia közlemények (2)

27. Völgyesi, L., Szondy, G., Tóth, G., Péter, G., Kiss, B., Barnaföldi, G. G., Deák, L., Égető, C.,

Fenyvesi, E., Gróf, G., Somlai, L., Harangozó, P., Lévai, P., Ván, P.: Preparations for the remeasurement of the Eötvös-experiment.

Proc. Sci. 353, 1-13, 2020. EISSN: 1824-8039.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22323/1.353.0041>

28. Tóth, G., Völgyesi, L., Szondy, G., Péter, G., Kiss, B., Barnaföldi, G. G., Deák, L., Égető, C.,

Fenyvesi, E., Gróf, G., Somlai, L., Harangozó, P., Lévai, P., Ván, P.: Remeasurement of the Eötvös experiment - status and first results.

Proc. Sci. 353, 1-10, 2020. EISSN: 1824-8039.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22323/1.353.0042>

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 11,67

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
8,183**

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2021.04.20.

