

AZ ESZTRAMOS-HEGY BELSŐ SZERKEZETÉNEK FELTÉRKÉPEZÉSE MÜOGRÁFIAI MÓDSZEREKKEL

SZAKGOLDOZAT

Geofizikus MSc. II

Szerző:

Rábóczki Bence

Témavezető:

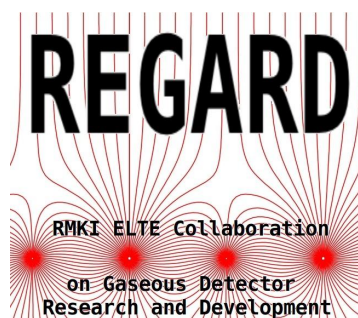
Dr. Hamar Gergő
HUN-REN Wigner Fizikai
Kutatóközpont
*Nagyenergiás Fizikai
Osztály*

Belső konzulens:

Dr. Balázs László
Eötvös Loránd
Tudományegyetem
*Geofizikai és Űrtudományi
Tanszék*

Témavezető:

Dr. Surányi Gergely
HUN-REN Wigner Fizikai
Kutatóközpont
*Nagyenergiás Fizikai
Osztály*



Eötvös Loránd Tudományegyetem
Budapest, 2024. 05. 20.

Kivonat

A müográfia egy dinamikusan fejlődő kutatási terület, melynek célja a nagyenergiás részecskefizika eszközeit felhasználni geofizikai területeken. A módszer a kozmikus müonsugárzás elméleti és gyakorlatban mért fluxusának különbségéből enged következtetni nagy kiterjedésű, müográf detektor előtt elhelyezkedő objektumok (például vulkánok, hegyek, piramisok, gátak) belső sűrűségeloszlására.

A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Nagyenergiás Fizikai osztályán két kutatócsoport, az Innovatív Detektorfejlesztő "Lendület" Kutatócsoport és az újonnan alakult Nagyenergiás Geofizika Kutatócsoport számos nemzetközi müográfiai projektben és együttműködésben vesz részt és közös erővel dolgozik azon, hogy a mérési módszert tökéletesítse mind szoftveres, mind hardveres területen. A munkám során lehetőségem nyílt bekapcsolódni a csoportokban folyó tevékenységbe és feldolgozni egy teljes mérési kampány nyers adatait. Az északkelet-magyarországi Esztramos-hegyben folyt több évszázados bányászati tevékenység eredményeképpen számos cseppkőbarlangot tártak fel, ez adta a motivációt arra, hogy müográfiai méréseket végezzünk további, egyelőre ismeretlen üregek felkutatására. A feldolgozott adatok alapján több sűrűség-anomáliát is azonosítottam, melyek alapján arra következtethetünk, hogy a hegyben található Rákóczi IV. számú barlang egy nagyobb rendszer része, melynek vannak egyelőre feltáratlan üregei is.

Az 1. részben ismertetem a mérési módszer fizikai alapjait és a vizsgált területet, a 2. részben bemutatom a kampány során végzett méréseket, végül a 3. részben tárgyalom a számításaim eredményeit és azok interpretációit.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. A müográfiai kutatás alapjai	3
1.1.1. A kozmikus háttérsugárzás	3
1.1.2. A müográfia fizikai alapjai, a müonsugárzás tulajdonságai . .	5
1.1.3. A müográfia fejlődése	7
1.1.4. Müografikus kutatási területek	9
1.2. A vizsgált terület bemutatása	12
1.2.1. A terület földtani háttere	13
1.2.2. Barlangkutatás az Esztramos-hegyben	15
2. A mérési kampány bemutatása	16
2.1. Az alkalmazott detektorrendszer	16
2.1.1. Működési elve	16
2.1.2. Felépítése	17
2.2. A mérések tervezése és megvalósítása	19
2.2.1. A célterületek kijelölése	19
2.2.2. A mérések adatai	23
2.3. A mért adatok feldolgozása	26
2.3.1. Müonpályák rekonstruálása	27
2.3.2. Fluxusszámítás	28
2.3.3. Sűrűséghossz számítás	29
2.3.4. Közethossz számítás és modellezés	31
3. Eredmények	32
3.1. Közethiány térképek	32
3.2. Anomáliák azonosítása	38
4. Összefoglalás és kitekintés	40

1. Bevezetés

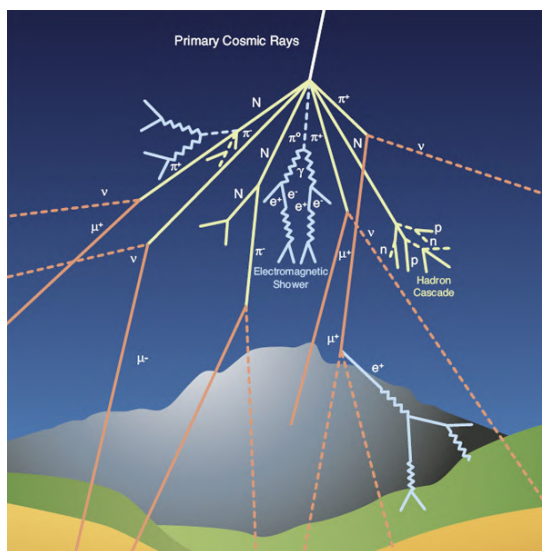
A geofizika eszköztára számos eszközt képes felvonultatni a felszín alatti kőzetek vizsgálatára, azonban a müográfia az egyetlen olyan módszer, mellyel képesek lehetünk nagy kiterjedésű testek belső sűrűségeloszlásának roncsolásmentes, passzív és nagy felbontású vizsgálatára. A mérések során használt detektorok nagyon kevés energia és munkaerő befektetéssel működtethetőek, így egyszerre számos vizsgálatot folytathatunk egy időben, amennyiben rendelkezésre áll a kellő nagyságú eszközpark. A mérés számos területen alkalmazható és mind ipari, mind földtudományi, mind régészeti kutatások alappillére lehet. Ebben a részben a módszer fizikai alapjait, fejlődéstörténetét és a célterületen való alkalmazhatóságát kívánom bemutatni.

1.1. A müográfiai kutatás alapjai

A tudománynak számos lépcsőfokot kellett meglépnie, amíg eljutott a kozmikus háttérsugárzás felfedezésétől a kozmikus müonokkal való képalkotásig. A kutatómunka alapjai a 20. század elején kezdődtek meg, de a fejlesztési folyamat mind a mai napig tart, hiszen a témával foglalkozó kutatások az elmúlt egy-két évtizedben kezdtek igazán felkelteni a tudományos közösség érdeklődését.

1.1.1. A kozmikus háttérsugárzás

A 19. század végén általánosan elterjedt nézet volt, hogy a felszínen mérhető háttérsugárzás forrása legnagyobb részt a Föld. A 20. század elején a kutatók ezt az elméletet vizsgálva állapították meg, hogy a korábbi elképzelések tévesek voltak. Theodor Wulf 1909-ben állapította meg elektroszkóp segítségével az Eiffel-torony tetején végzett méréseivel, hogy a vártnál kevésbé csökken a tengerszint feletti magassággal a háttérsugárzás mértéke [1]. Ezután 1912-ben Victor Franz Hess hőlégballonos repülések közben végzett mérésekkel kimutatta az ionizáló sugárzás növekedését tengerszint feletti magasság függvényében [2]. Ez egyértelmű bizonyíték volt a Földön kívüli eredetű, kozmikus



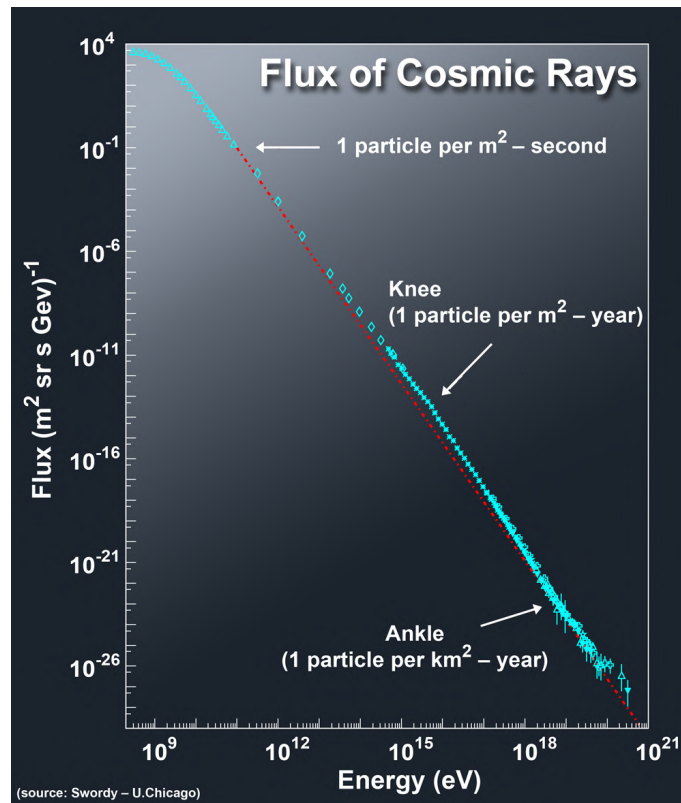
1. ábra. A kozmikus zápor vázlatos rajza [3]

sugárzás létezésére. A nagyenergiájú kozmikus sugárzás fő forrásai a naprendszeren kívülről érkező galaktikus és extragalaktikus protonok és α -részecskék. Ezek a felsőlégtérben ütköznek az ott található részecskékkel, így létrehozva a kozmikus záport, vagyis a másodlagos kozmikus sugárzást. A kozmikus záport szemléltető rajz a 1. ábrán, a teljes kozmikus sugárzás energiaspektruma pedig a 2. ábrán látható. Ennek a nagyenergiájú másodlagos kozmikus sugárzásnak a részei a müonok, melyeket Anderson és Neddermeyer fedezett fel 1937-ben [4] és az atmoszférában pionok, valamint töltött kaonok bomlásából keletkeznek az alábbi módokon [5]:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu(\bar{\nu}) \quad (\sim 100\%) \quad (1)$$

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu(\bar{\nu}) \quad (\sim 63.5\%) \quad (2)$$

Ezen részecskék spinje és töltése megegyezik az elektronokéval, tömegük azonban nagyjából 200-szor nagyobb azokénál. Felezési idejük $2.2\mu\text{s}$, így relativisztikus körülmények között (átlagosan 4 GeV energiával) elérik a földfelszínt és be is hatolnak alá [6].



2. ábra. A kozmikus sugárzás energiaspektruma [7]

1.1.2. A müográfia fizikai alapjai, a müonsugárzás tulajdonságai

A müográfia alapja, hogy az anyagon áthaladó müonok energiát vesztenek és elnyelődnek. A jelenséget a Bethe—Bloch-formula írja le [8]:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 Q_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} + \frac{1}{8} \frac{Q_{max}^2}{(\gamma M c^2)^2} \right] + \Delta \left| \frac{dE}{dx} \right| \quad (3)$$

ahol $K = 4\pi N_A r_e^2 m_e^2 c^2$ elektronsugártól és -tömegtől, valamint az Avogadro-számtól függő állandó, Z az anyagot alkotó atomok rendszáma és A a tömegszáma, c a fénysebesség, M az áthaladó részecske tömege és β a sebességének és a fénysebességnek a hányadosa, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ részecskesebességtől függő mennyiség, I az elektronok átlagos gerjesztési energiája, δ a sűrűségi korrekció az elektromos energiaveszteségre, Q_{max} pedig az elektron maximális visszalökődési energiája. Ezt a bonyolult összefüggést felfoghatjuk kétféle veszteségi tag együttes hatásaként:

$$\langle -dE/dx \rangle = a(E) + b(E) E \quad (4)$$

ahol E az összes energia, $a(E)$ az elektromos fékezési hatás, $b(E)$ pedig különböző sugárzási folyamatok összesített hatása. Makroszkópikus skálán ezek a jelenségek úgy értelmezhetők, hogy az energiaveszteség egyenesen arányos a részecske által a közegben megtett úttal (L) és a közeg átlagos sűrűségével (ρ) (például egységnyi sűrűségű anyagban átlagosan 2 MeV/cm az energiaveszteség [9]):

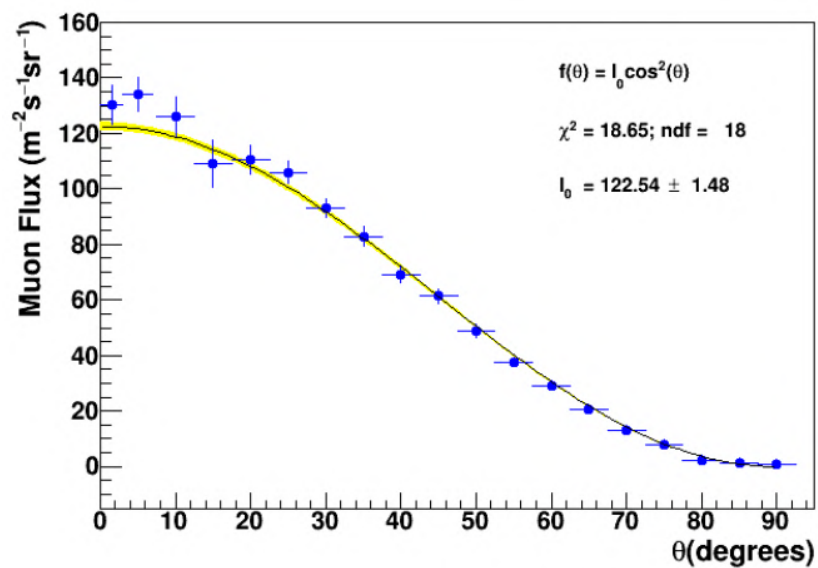
$$\langle -dE/dx \rangle \sim L \quad (5)$$

$$\langle -dE/dx \rangle \sim \rho \quad (6)$$

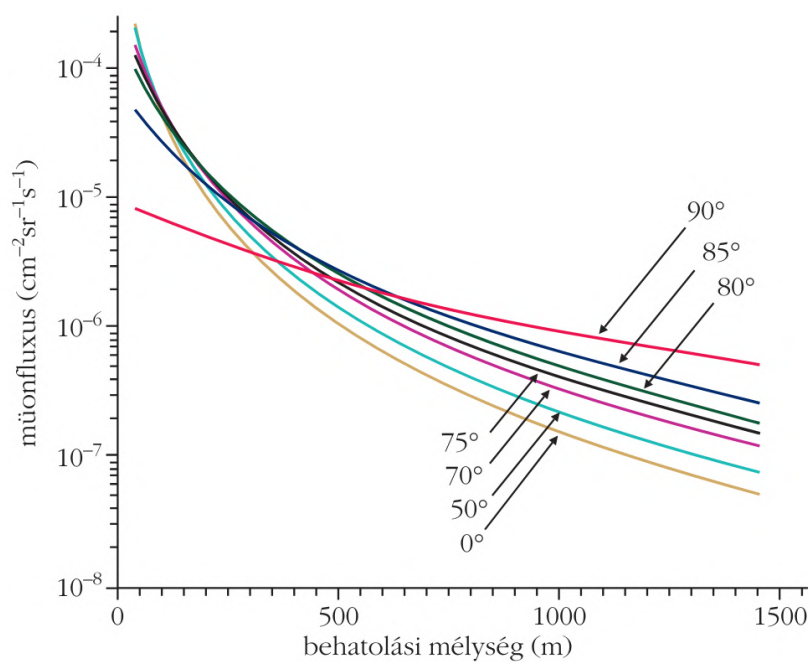
Ezek a müográfia alapvető összefüggései, ugyanis ez alapján, ha meg tudjuk mérni az energiaveszteséget (vagyis a müonfluxus csökkenését) és a közhosszt, úgy megkaphatjuk az egyes trajektóriák menti átlagsűrűséget. Sűrűséganomáliák keresésére az elméleti, modellezett fluxuskép és a gyakorlatban mért fluxuskép közötti különbséget tudjuk felhasználni. A modellezéshez azonban ismernünk kell a müonsugárzás tulajdonságait. Gyakorlati mérések alapján elmondható, hogy felszíni müonfluxus (f) értéke jó közelítéssel a zenitszög (θ) koszinusz négyzetével arányos [10], ezt a 3 ábra mutatja be.

$$f = f_0 \cdot \cos^2(\theta) \quad (7)$$

A részecskék elnyelődése is modellezhető, különböző zenitszögekből érkező müonfluxus $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű anyagban megtett út szerinti csökkenését a 4. ábra mutatja be:



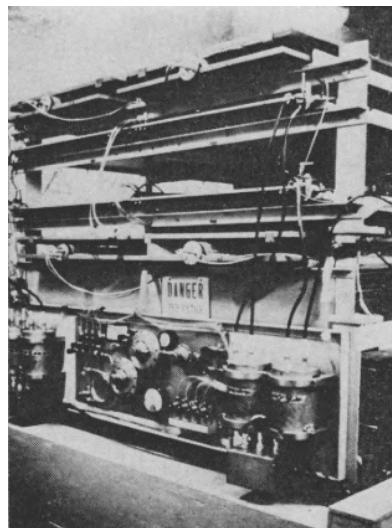
3. ábra. Müonfluxus a zenitszög függvényében: késsel a mérési pontok, feketével az illesztett függvény, sárgával az egy σ bizonytalanság [10]



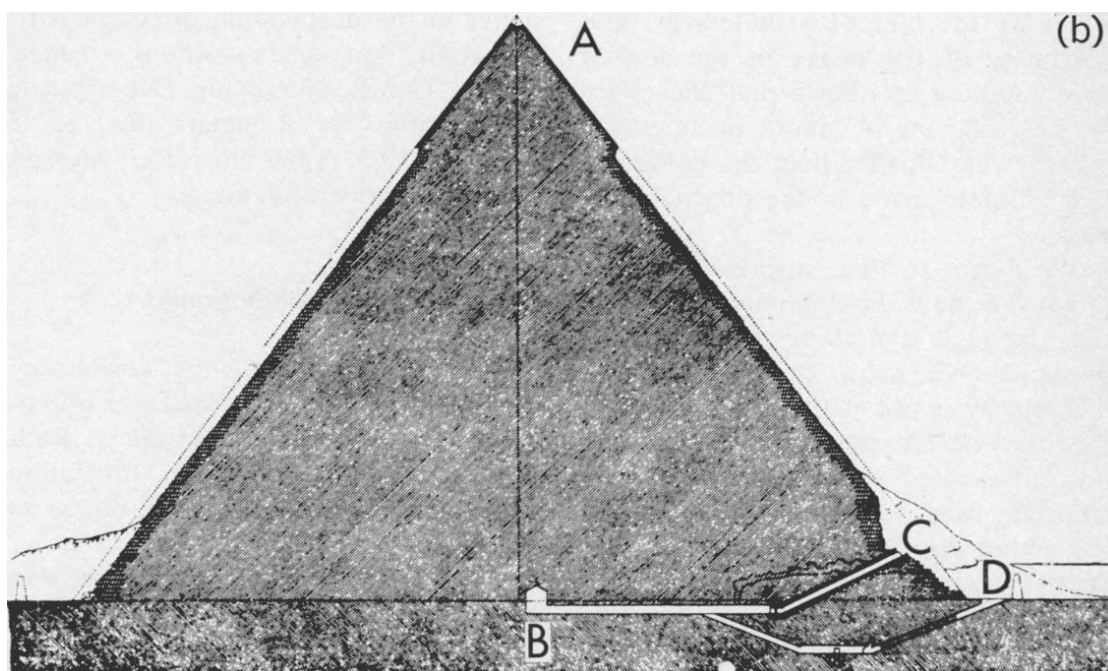
4. ábra. Müonfluxus 2.65 g/cm^3 sűrűségű kőzetben megtett út és zenitszög függvényében [9]

1.1.3. A müográfia fejlődése

A kozmikus sugárzás felfedezése után még néhány évtizedet kellett várni az első olyan kísérletre, amely a mai müográfiahoz hasonló elven működött. Az ausztrál E. P. George volt az első, aki Geiger-Müller számlálók alkalmazásával, a kozmikus sugárzás elnyelődéséből becsülte meg a detektorok feletti kőzetvastagságot 1955-ben [11]. Az első és talán máig leghíresebb müográfiai kísérletet Louis W. Alvarez és kutatócsoportja publikálta 1970-ben, a Science folyóiratban [12]. 1965-ben merült fel az ötlet, hogy részecskefizikai mérésekkel vizsgálják meg Egyiptomban a gízai piramisokat üregkutatás céljából. A gízai nagy piramisok jellegzetes elemei a magasan a piramisban elhelyezkedő kamrák, azonban Hafré fáraó piramisában addig még nem sikerült hasonló üregeket azonosítani, annak ellenére, hogy a 19. században robbantásokat is végeztek ezzel a céllal, így megrongálva a több, mint négyezer éves építményt. A régészek a destruktív módszerek



5. ábra. Mérőműszerek a Belzoni-kamrában [12]



6. ábra. Hafré fáraó piramisának metszete, B-vel jelölve a Belzoni-kamra [12]

alternatívájaként szerették volna alkalmazni a passzív és roncsolásmentes müografiát, ezért 1967-ben a kutatók a 6. ábrán B-vel jelölt Belzoni-kamrába telepítettek detektorokat (5. ábra) és több hónapig tartó mérésekkel sikeresen bebizonyították, hogy kamra méretű üregek nem találhatók a piramisban. Ezután néhány évtized stagnálás állt be a müográfiai fejlesztések területén. A kétezres évek elején újra lendületet kapott a kutatási terület, ekkoriban kezdte meg a közel horizontális zenitszögű müográfiai kutatásait a japán Hiroyuki K. M. Tanaka, aki számos műszerfejlesztési [13] és gyakorlati alkalmazhatósági [14] cikket publikált a témában. Ezzel a módszerrel vizsgálhatóvá váltak olyan célpontok is, melyek alá közvetlenül nem, csak melléjük lehetett detektorokat telepíteni, mint például a vulkánok. Magyarországon 2010 után kezdett el a témával foglalkozni a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Innovatív Detektorfejlesztő "Lendület" Kutatócsoportja (REGARD), kezdetben a detektorfejlesztés területén [15]. Néhány éven belül megkezdődtek a magyar barlangkutató projektek [16] és a csoport számos nemzetközi együttműködésbe is bekapcsolódott. Többek között ezek közé tartozik a világ jelenlegi egyik legnagyobb müográfiai obszervatórimuma, a magyar-japán kollaborációban megvalósult Szakuradzsim Müográfiai Obszervatórium, vagyis SMO (telepítése a 7. ábrán látható), amely a Sakurajima-vulkán sűrűségének vizsgálatával hivatott információt gyűjteni a benne zajló folyamatokról és hozzájárulni a kitörés-előrejelzéshez [17].



7. ábra. Az SMO detektorrendszer telepítése Japánban [18]

A magyar kutatások azóta is egyre bővülnek, 2024 elején megalakult a HUN-REN Wigner F. K. Nagyenergiás Geofizika Kutatócsoportja, mely a tervek szerint a REGARD csoporttal szoros együttműködésben, nemzetközi projektekben fogja vizsgálni az óceáni litoszférát az ománi ofiolitokon, az aktív vulkanizmust japán és európai vulkánokon, a légköri folyamatokat, valamint fejleszteni fogja a módszer ipari alkalmazhatóságát is.

1.1.4. Müográfikus kutatási területek

Napjainkban számos országban működnek müográfiával foglalkozó kutatócsoportok, a módszer pedig egyre jobban kezd bekerülni a szakmai köztudatba. A klasszikus mérési módszerek mellett folyamatosan jelennek meg kezdeményezések a müonsugárzás újszerű felhasználására, valamint a technológia fejlődésével egyre kifinomultabb vizsgálatok válnak lehetővé.

Felszín alatti müográfia

A történelem során először alkalmazott mérési mód a felszín alatti müográfia, melynek lényege, hogy a céltárgy alá helyezzük el a detektort és a közel vertikális, kisebb energiájú, de nagyobb fluxusú (4. ábra) részecskéket használjuk fel. Tipikusan ezt a mérési módszert szokás alkalmazni bányákban és barlangokban [16], de előfordulhat régészeti alkalmazás is [12]. Általánosságban elmondható, hogy a barlangi méréseknél a detektorrendszer kompaktsága és ellenállósága a két kulcsfontosságú tényező. Ezért a REGARD csoport célzottan olyan műszereket fejleszt, melyek könnyen mozgathatóak és ellenállnak az olyan környezeti hatásoknak, mint a magas páratartalom vagy alacsony hőmérséklet [15]. Egy ilyen detektor telepítése látható a 8. ábrán.

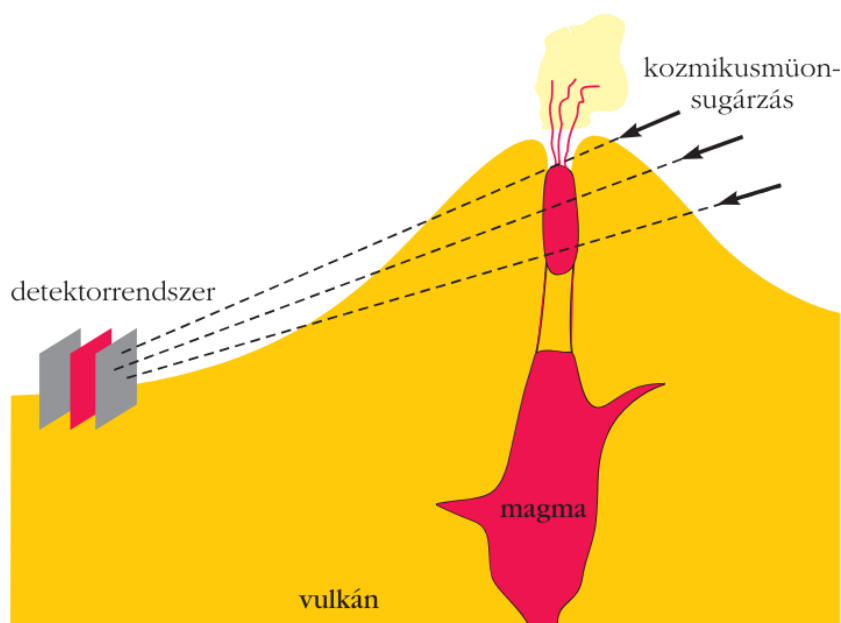
A jelenleg aktív magyar projektek közé tartozik az Esztramos feltérképezése, a Budai Vár alagútszisztemének vizsgálata, a Királylaki-táróban zajló mérések [20] valamint ipari célú nyersanyagkutatási mérések több európai bányában.



8. ábra. Müográf detektor telepítése barlangban [19]

Felszíni müográfia

A felszíni müográfia során a nagy zenitszögű müonok detektálása a cél. Ezek a részecskék, habár kisebb fluxussal rendelkeznek, de áthatolóképességük nagyobb, így a 9. ábrán látható elrendezést alkalmazva akár kilométeres nagyságrendű testek is vizsgálhatóak kellő detektorfelülettel és mérési idővel. A felszíni méréseket általában vulkánok vizsgálatához használják, ilyen például a korábban említett SMO [17], vagy az Etnát vizsgáló MEV (Muography of Etna Volcano, [21]) projekt, melyben a REGARD csoport is részt vesz. Ezen kívül továbbra is jelentősek a régészeti célú piramiskutatások, 2017-ben sikerült egy addig ismeretlen üreget azonosítani Hufu fáraó piramisában, a gízai nagy piramisban [22].

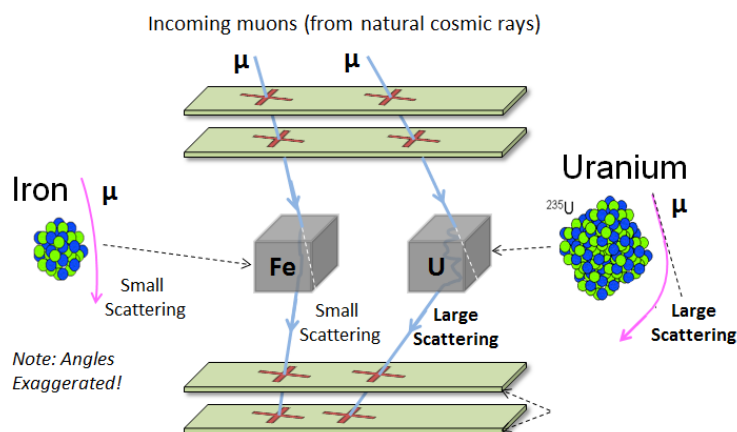


9. ábra. Vulkánkutatás felszíni müográfiával [9]

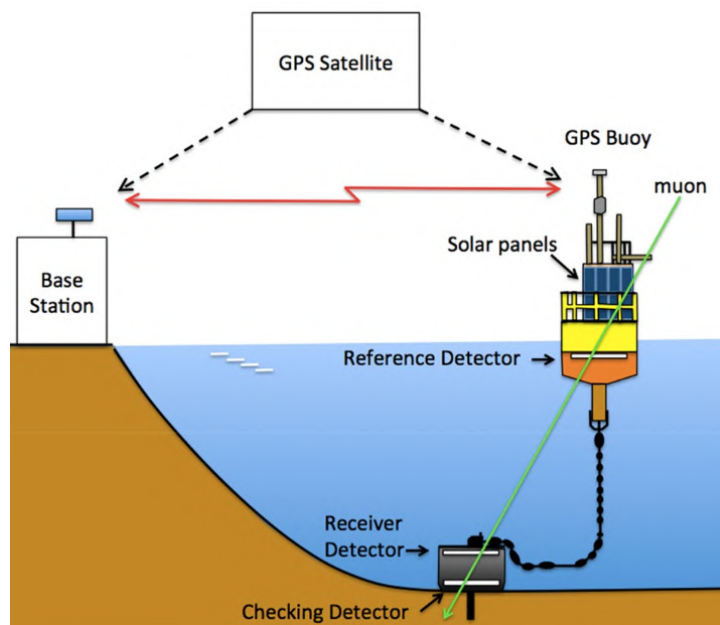
Alternatív müográfiai módszerek

A klasszikusnak mondható mérési módszerek mellett számos egyéb technológiát fejlesztenek világszerte, amelyek a kozmikus müonokra alapulnak. Az Újvidéki Egyetem és a HUN-REN Wigner F. K. közös fejlesztése a Muon Camera, mely a kis méretű céltárgyban müonok által keltett másodlagos részecskék alapján képes vizsgálni a céltárgy összetételét [23]. A nemzetbiztonság területén is alkalmazhatóak a kozmikus müonok, például passzívan átvilágítható velük egy teherautó rakománya. A konténer fölé és alá helyezett detektorokkal mérhető az egyes kisenergiás müonok rakományon való eltérése (10. ábra). A rendellenesen nagy eltérülési

szög nagy tömegszámú anyagot jelent, amely lehet egy nukleáris töltet magja [24]. Egy néhány éve felvetett ötlet szerint a kozmikus müonok egy navigációs rendszer (11. ábra) alapjait is képezhetik, melyben felszíni referencia detektorokkal kommunikáló felszín alatti detektorok pozícióját lehetne meghatározni. Ez segíthetné a helymeghatározást például tengeralattjárókon vagy földrengés után a romok alá temetett helységekből, ahol nem fogható GPS jel [25].



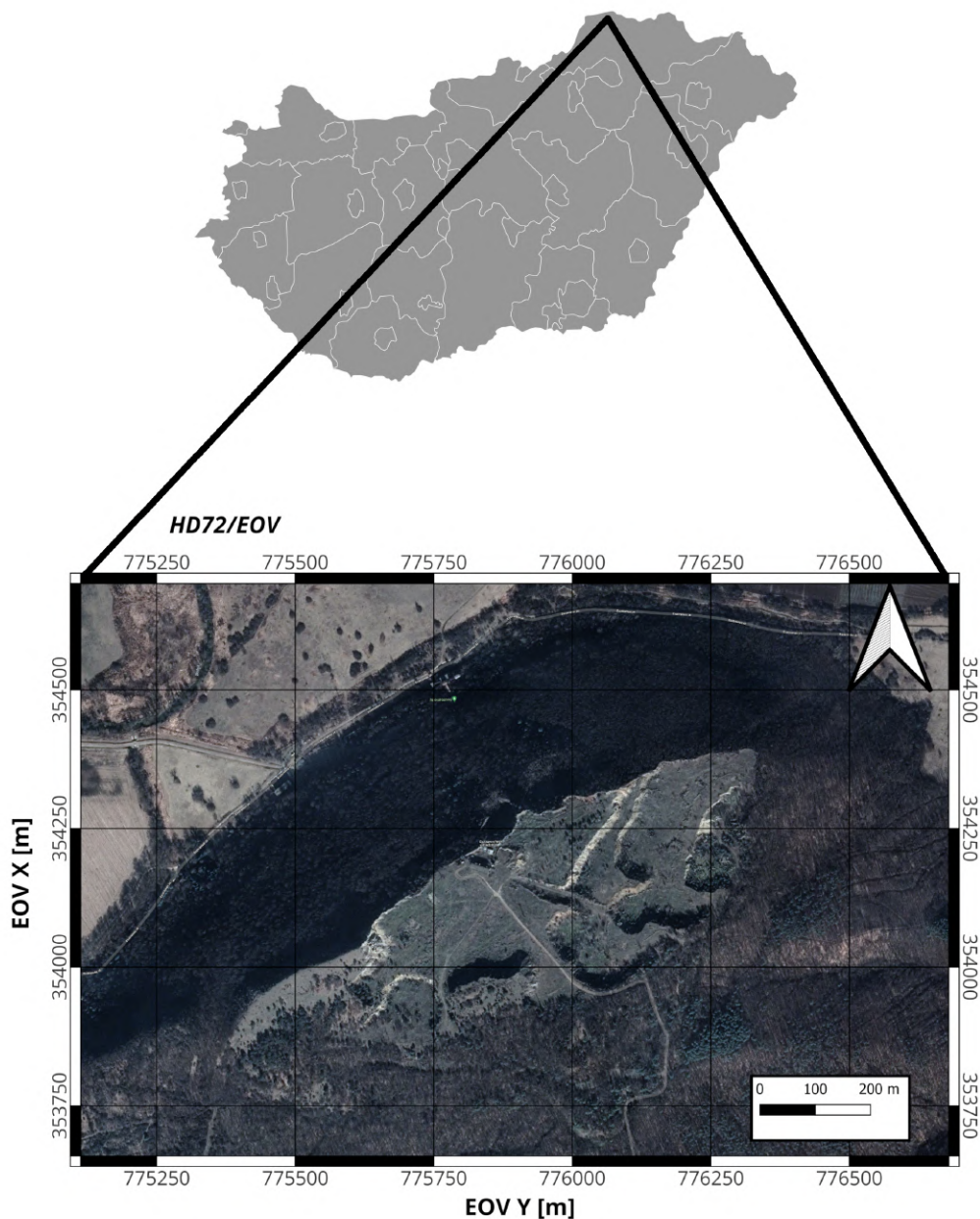
10. ábra. Müonok eltérése különböző tömegszámú atomokon [24]



11. ábra. Egy müográfiai helymeghatározó rendszer vázlata [25]

1.2. A vizsgált terület bemutatása

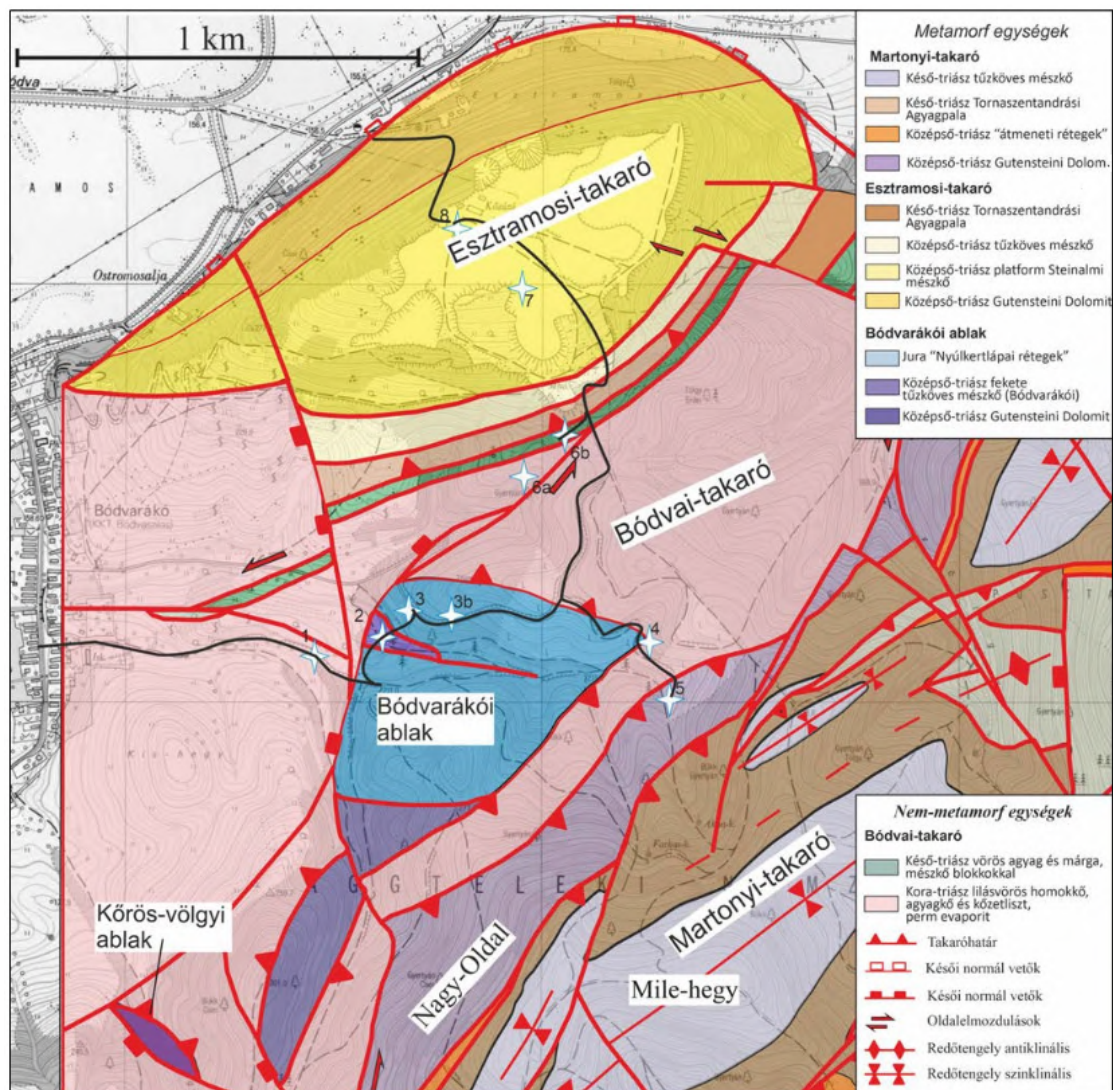
A mérési kampány során vizsgált terület az észak-kelet-magyarországi Esztramos-hegy. A hegyet délnyugatról Bódvarákó, keletről Tornaszentandrás települések határolják, elhelyezkedését és műholdas képét a 12. ábra mutatja be.



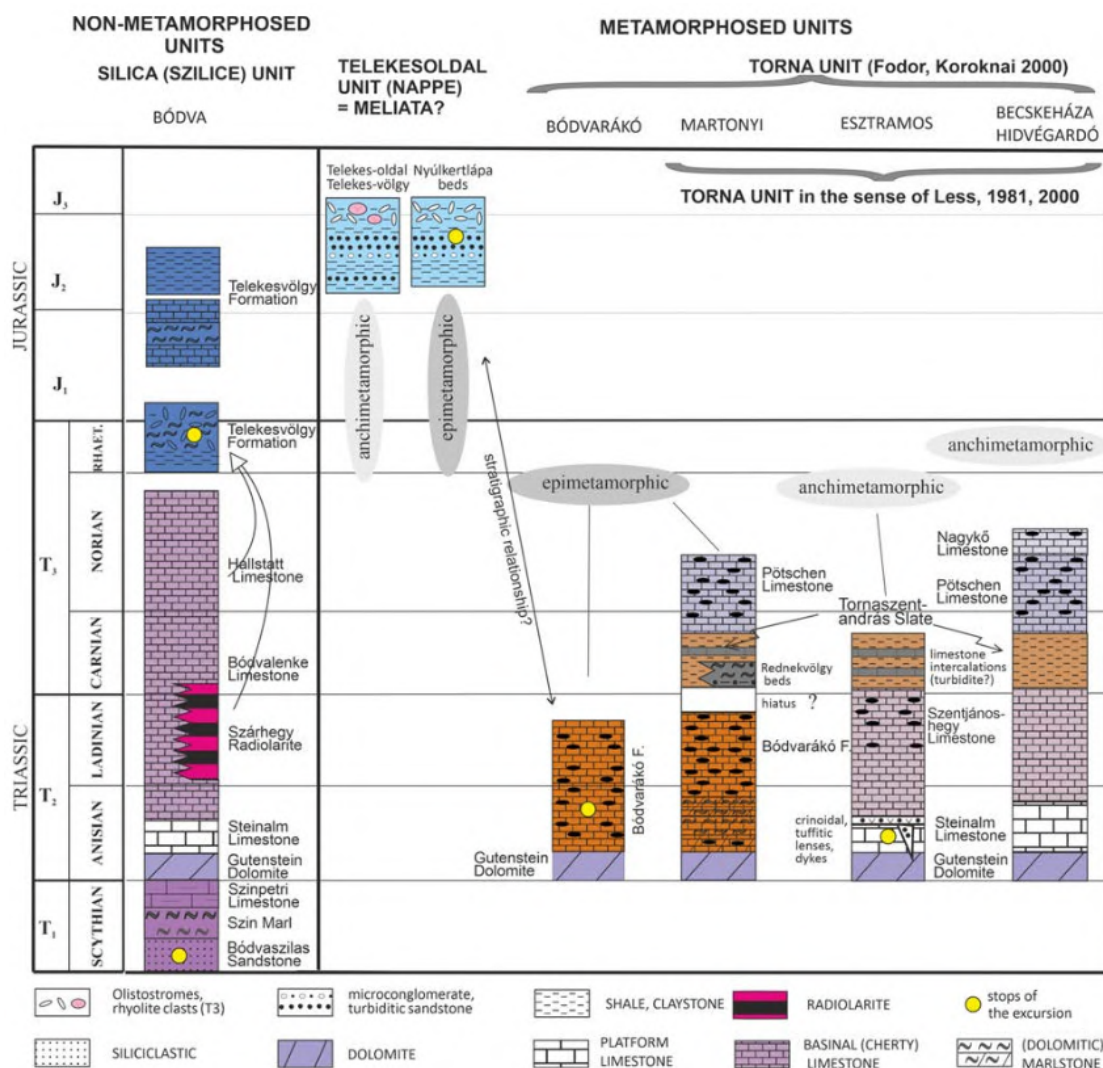
12. ábra. Az Esztramos-hegy műholdképe és elhelyezkedése

1.2.1. A terület földtani háttere

Mivel a mérési módszer a sűrűsége érzékeny, ezért érdemes megvizsgálni, hogy milyen kőzetek találhatóak a vizsgált területen. Az Esztramos-hegy a Rudabányai-hegység része, a környék földtani térképe a 13. ábrán látható. A Rudabányai- és Aggteleki-hegység területeit Tornai-, Bódvai-, és Szilicei-rétegsorokba soroják, az Esztramosi-takaró a kistoki metamorf Tornai-takaróegység eleme [26]. A rétegsorokat részletesen a 14. ábra mutatja be.



13. ábra. Bódvarákó környékének fedetlen földtani térképe [26]

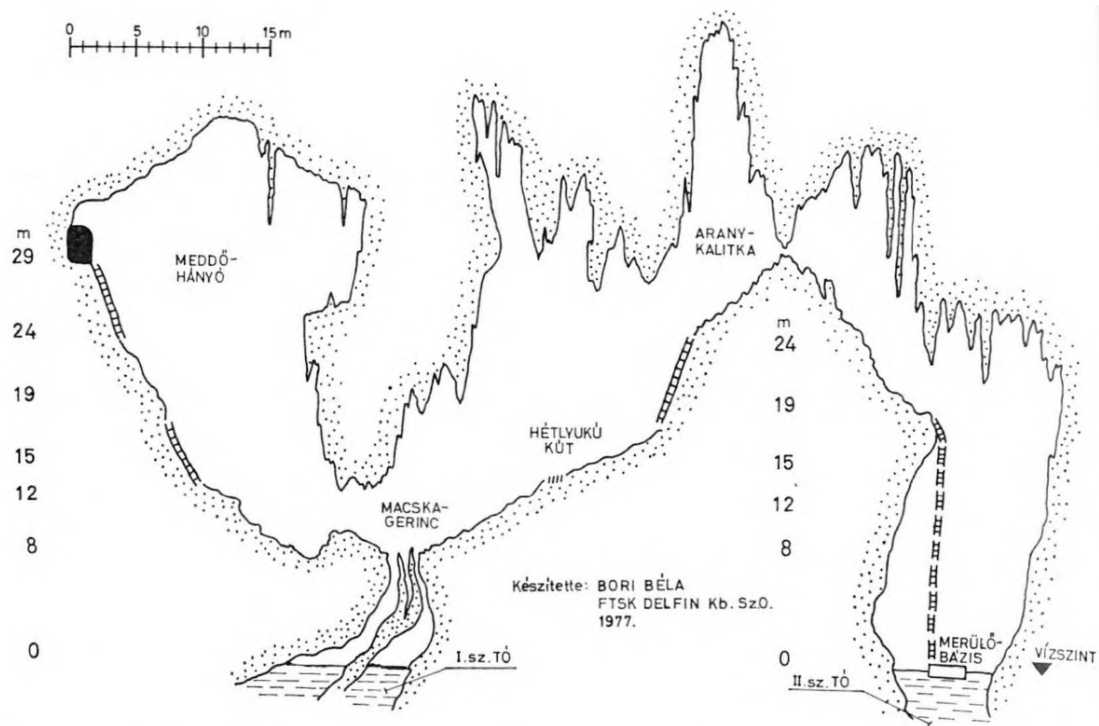


14. ábra. A Tornai-, Bódvai-, és Szilicei-rétegsorok [26]

Az Esztramos-hegy tetejét a 20. század második felében lefejtették, így egy sík felület látható a 12. ábra középső részén. Ebben a kőfejtőben középső-triász meta morf mészkövet fejtettek, melynek fekvése a Gutensteini Dolomit, fedőjében a lejtő környezetben lerakódott Szentjánoshegyi Mészkő, majd karni agyagpala következik [26]. A Steinalmi Mészkő karsztosodásra, barlangképződésre kiválóan alkalmas, a benne található karbonátos vasércet pedig már a középkor óta bányászták [26]. A műonok elnyelődése során a detektor feletti összes közetréteg együttes hatása jelentkezik, így azokat egy darab vastag, határozott átlagsűrűségű, homogén réteggel modellezzük, hogy majd kereshessük az ettől a modelltől eltérő anomáliákat. A helyettesítő réteg ezek alapján jó közelítéssel teljesen mészkő.

1.2.2. Barlangkutatás az Esztramos-hegyben

Az esztramosi barlangok Magyarország barlangkatasztere alapján az Aggteleki-karszt részei [27] [28], a hegy üregei évtizedek óta foglalkoztatják a hazai barlangkutatókat. A Rákóczi I. számú barlangot 1920-ban fedezték fel bányászok, miközben a bánya legalsó, hetes számú tárójának egy ágát hajtották [29]. Ez a legnagyobb és legismertebb barlang a hegyben, az alján két tó is található, a metszete a 15. ábrán látható.



15. ábra. A Rákóczi I. sz. barlang metszeti rajza [29]

A kisebb, másik táró ágba elhelyezkedő Rákóczi II. számú barlang (másik nevén Surrantós) alján is található egy tó. Ezen tavak átfogó vízalatti kutatás tárgyai voltak az 1970-es években, ugyanis a kutatók úgy vélték, hogy a két barlang között közvetlen kapcsolatot tárhatnak fel, azonban végül nem jártak sikerrel [29]. Mindazonáltal a bányaművelés során még több, mint egy tucat kisebb barlangot tártak fel [30] [31], ami egyértelműen mutatja a rendszer kiterjedtségét. A Rákóczi-barlangok kialakulása nem egyértelmű, annyi bizonyos hogy egy nagy méretű, függőleges hasadék mentén történt a kioldódás. A felső szint kisebb barlangjainak létrejötté valószínűleg hideg karsztvízszint alatti oldással magyarázható, mely bizonyítottan felső pliocénben ment végbe. [32].

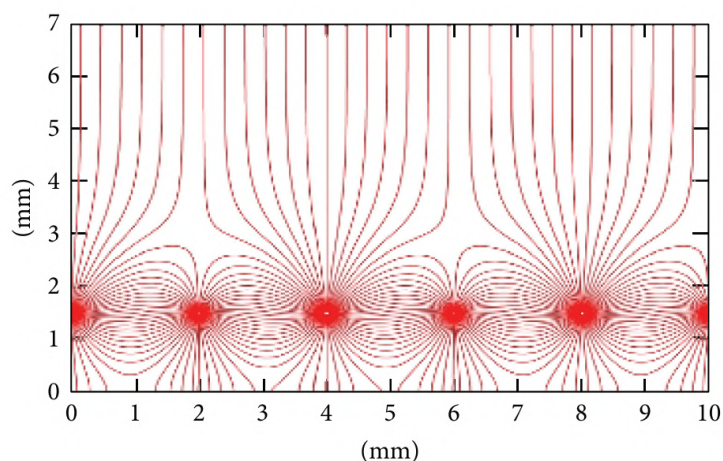
2. A mérési kampány bemutatása

A mérési kampányt 2019-ben kezdte meg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont "REGARD" kutatócsoportja egy detektorrendszerrel, amely a mai napig is méréseket végez a helyszínen. A munkám során én a 2019-2022 között mért adatokat dolgoztam fel és értelmeztem.

2.1. Az alkalmazott detektorrendszer

2.1.1. Működési elve

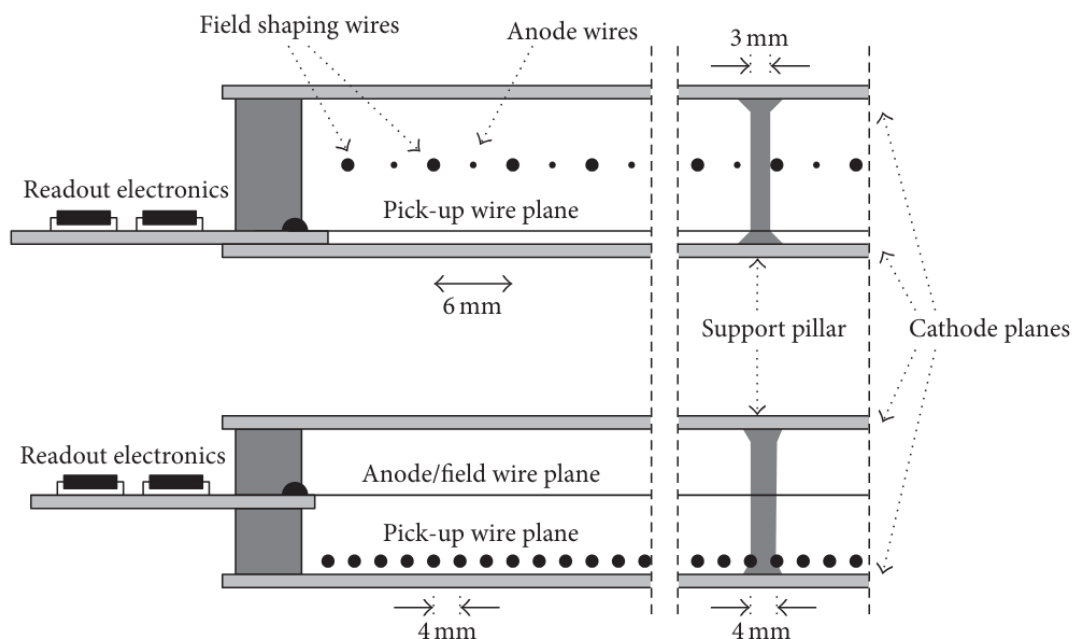
A helyszínen telepített detektor az Mtl1 névre keresztelt, multi wire proportional chamber (MWPC) technológiájú műszer. A müonok detektálása azon alapszik, hogy töltött részecskék, ezért ionizálják a közeget, melyen áthaladnak. Az MWPC kamrák működési elve azon alapszik, hogy a kamrában magasfeszültségű anódvezetékeket húznak keresztül, míg a kamrák falát leföldelik, hogy katódként funkcionáljanak. Ezután a kamrát feltöltik egy könnyen ionizálható gázkeverékkel, melyen áthaladva a töltött részecskék gerjesztik a gázrészecskéket, a magasfeszültségű vezetékek környezetében pedig elektronlavinát hoznak létre [33]. Ezen folyamat során a gázatomokról leszakadó elektronokat a lokális elektromos tér kellően felgyorsítja ahhoz, hogy ők maguk is további elektronokat szakítsanak le a környezetükben lévő többi gázatomról. Ez a lavina már elegendő elektromos jelet ad le ahhoz, hogy egy kiolvasó elektronika digitálisan rögzítse. A nagyfeszültségű vezetékek közelében olyan elektromos tér alakul ki, amely az elektronlavinák kialakulását a vezetékek környezetébe koncentrálja. A szálak környezetében kialakuló elektromos teret a 16. ábra mutatja be.



16. ábra. Elektromos térerősségvonalak egy MWPC kamrában [34]

2.1.2. Felépítése

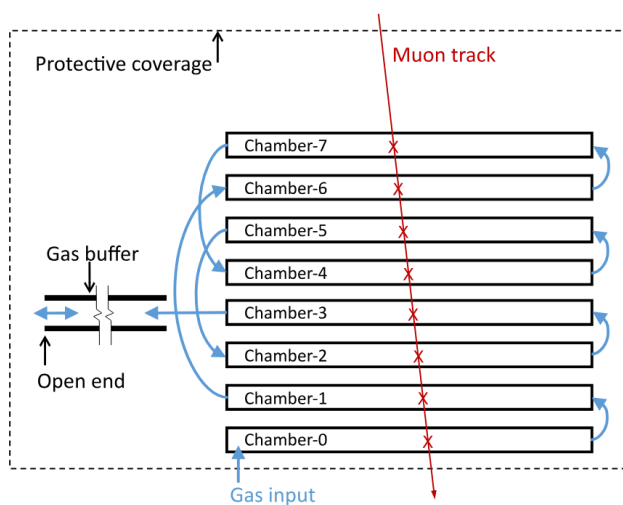
A REGARD kutatócsoport több, mint egy évtizede foglalkozik MWPC kamrák fejlesztésével [15]. A csoport által épített detektorok követik a klasszikus sokszálas kamra elvét, azonban fontos módosításokkal egészülnek ki. Egy tipikus kamra felépítése látható oldalnézetből a 17. ábrán.



17. ábra. Egy MWPC kamra belső felépítése [35]

Megfigyelhető, hogy a kamrán belül két szálsík helyezkedik el. Ez annak köszönhető, hogy a müográfiai mérések során a rögzíteni kívánt legfontosabb adat a müonok pontos térbeli trajektóriája. A két szálsík alkalmazása lehetővé teszi, hogy az egyes részecskék X és Y koordinátája is egyszerre kerüljön kiolvasásra. A pályák Z koordinátájának rögzítéséhez arra van szükség, hogy több ilyen sokszálas kamrát egymás tetejére helyezzenek, így létrehozva a teljes detektorrendszert. Ezen kívül látható, hogy a kamrákat ellátták támasztó oszlopokkal is, melyek nagymértékben megnövelik a műszer stabilitását és ellenállóképességét, melyre nagy szükség van a terepi alkalmazás során, azonban a közel 100%-os detektálási hatásfokot alig néhány százalékkal csökkentik közvetlen közelükben [35]. A kamráknak ellen kell állni a sokszor viszontagságos körülményeknek, melyek a barlangokban várják őket. Sérülésmentesen kell kibírniuk a nagy páratartalmat, az alacsony hőmérsékletet és a fizikai terhelést, esetleges ütdéseket [36]. A REGARD csoport detektora- it úgy fejlesztették ki, hogy ellenálljanak ezen környezeti hatásoknak és hosszú hetekig, hónapokig tudjanak üzemelni a megfelelő áramforrással és gázellátással.

Mindezeknek hála a végeredmény egy olcsón előállítható, strapabíró és megbízható technológia, amely hatásosan alkalmazható laboratóriumi környezeten kívül is. Az Mtl1-es detektorrendszer egy nyolc kamrából álló műszer, melyben a kiolvasó szálak (másnéven padek) közötti távolság 12 mm, a kamrák felülete $80 \cdot 80 \text{ cm}^2$, a közöttük lévő függőleges távolság 8 cm, töltőgázuk pedig 82-18% keverési arányú argon és szén-dioxid. A felszín alatti nyolckamrás rendszerek általános felépítése a 18., az Mtl1 rendszer fényképe pedig a 19. ábrán látható.



18. ábra. Egy detektorrendszer felépítése [37]



19. ábra. Az Mtl1 detektorrendszer az esztramosi bányában

A képkalkotás háttéreffektusai

A detektorrendszer ionizációs kamráit nem csak müonok, hanem egyéb töltött részecskék is aktiválhatják, ezzel potenciálisan hamis jelet generálhatnak. A felszín alatti méréseknél, mint amilyen az esztramosi kampány is, a kozmikus háttérsugárzás kisenergiás ionozáló részecskéi nem jelentenek zavart, ugyanis nem képesek áthatolni a több tíz vagy száz méter közeten, amely a detektorok felett helyezkedik el. Egy másik fontos tényező azonban a radioaktív izotópokat tartalmazó kőzetekből származó sugárzás. Ezt a fő típusai alapján bonthatjuk fel:

- α -sugárzás: habár képesek lennének gerjeszteni a gázzészecskéket, de a kis áthatolókéességük miatt a ${}^4\text{He}$ atommagok nem tudnak behatolni a detektor falán, így nem jelentkezik a mért adatrendszerben.

- β -sugárzás: a belőle származó elektronok kellő áthatolóképességgel rendelkeznek ahhoz, hogy egy kamrába behatoljanak és néhány szálát aktiválják. Ennek akkor van jelentősége, ha egy időben történik meg egy müon áthaladásával. Az ilyen zajjal terhelt eseményeket a feldolgozó algoritmus automatikusan kiszűri.
- γ -sugárzás: a belőle származó fotonok képesek áthatolni több kamrán is, melyekben fotoeffektussal vagy Compton-effektussal elektront szabadíthatnak fel, amely képes aktiválni az egyes szálakat. Radioaktív kőzetekben gazdag mérési helyszínen problémát jelenthetne, ugyanis a kevés kamrájú rendszerekben több ilyen esemény együttes bekövetkezése gyakran eredményezhet hamis részecskepályát, ami valójában nem egy áthaladó müon. Hatása több kamra alkalmazásával egyre csökkenthető, az itt alkalmazott nyolckamrás elrendezésben már teljesen elhanyagolható [38].

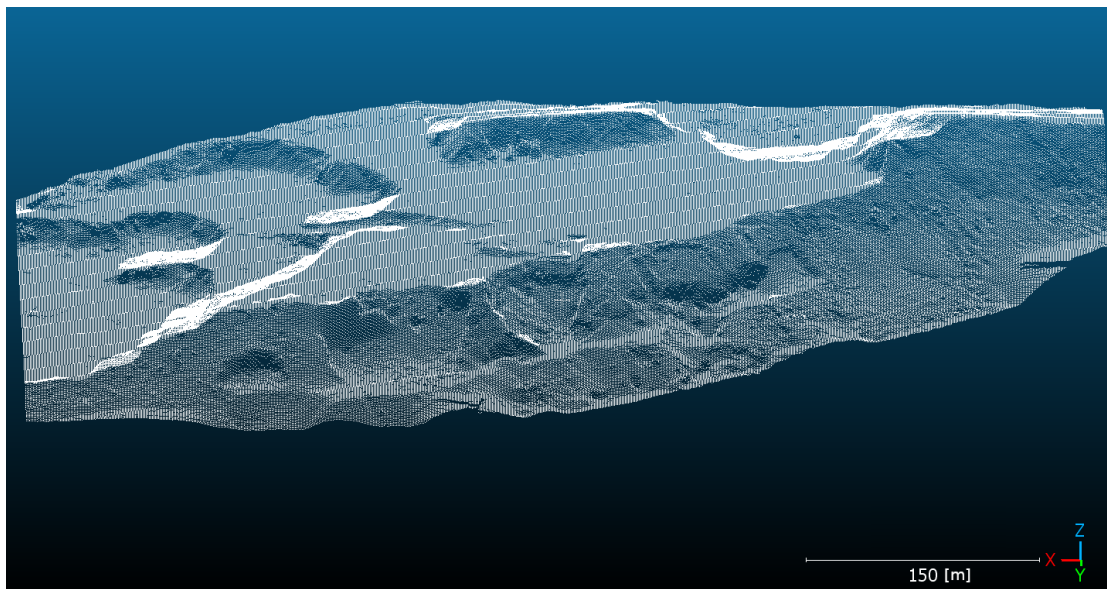
2.2. A mérések tervezése és megvalósítása

A müográfias méréstervezés egyik kulcsa, hogy figyelembe vegyük a mérések általános időtartamát. Ez a detektorok felett elhelyezkedő kőzetmennységtől függően több héttől több hónapig is tarthat. Gyakran a kevesebb ideig zajló mérésekből is vonhatunk le előzetes következtetéseket, de a pontosabb végeredmény érdekében érdemes növelni a mérési időt. Szerencsére a müográf detektorok minimális karbantartással képesek teljesíteni egy teljes kampányt, általában elégséges az egyes mérések végeztével, nagyjából egy-két havonta ellátogatni a helyszínre áthelyezni a detektorrendszert, lecserélni a gázpalackot és letölteni az új adatokat. Ezek alapján egy mérési kampány általában több évig is tarthat, amennyiben egy műszerrel dolgozunk, de ez az idő drasztikusan csökkenthető több detektorrendszer alkalmazásával. Általánosan elmondható, hogy új terület vizsgálatakor először rövidebb mérési időkkel érdemes pásztázó méréseket végezni, hogy pontosítsuk, hova érdemes fókuszálni a detektorokat. Ezután következhetnek a részletesebb, hosszabb ideig tartó mérések, melyek pontosíthatják az eredményeket.

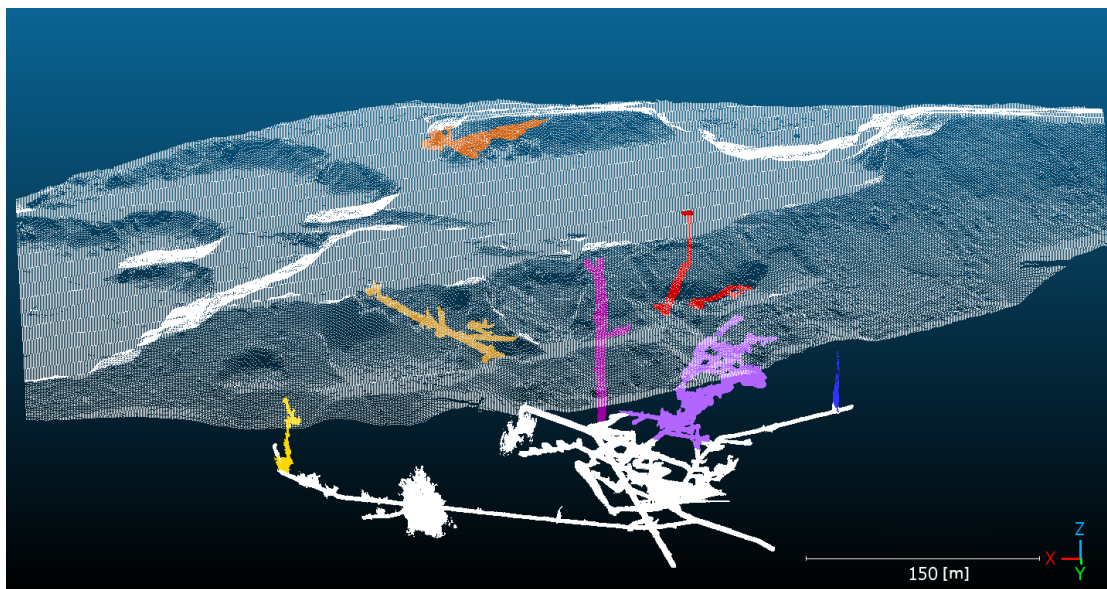
2.2.1. A célterületek kijelölése

Az Esztramos-hegy belsejében számos olyan terület van, melyet érdemes vizsgálni müográfiai módszerekkel. A korábbiakban bemutatottak szerint a hegyben számos természetes és mesterséges üreg található, melyek egyes helyeken megválaszolandó kérdéseket vetnek fel, miközben lehetőséget biztosítanak olyan detektorpozíciók megválasztására, melyek a hegy belsejének nagyrészt képesek átvizsgálni. Helyszíni mérésekkel sikerült felállítani a hegy felszínének és ismert járatainak modelljét, ezeken a pontfelhőkön mutatom be a mérési kampányt a következőkben.

Az Esztramos felszínmodelle északi nézőpontból megjelenítve a 20. ábrán, a felszínmodell és az ismert üregek együttesen szintén északi nézőpontból a 21. ábrán láthatóak. A megjelenítéshez használt CloudCompare programban az Y koordináta észak, az X koordináta pedig kelet felé mutat.

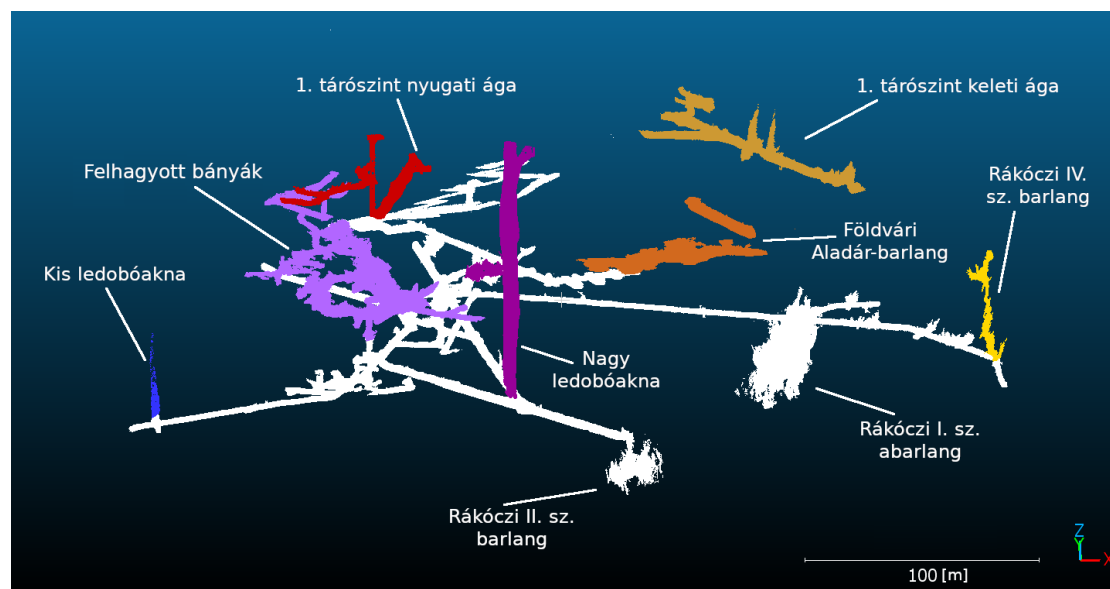


20. ábra. Az Esztramos-hegy felszínmodelle északi nézetből

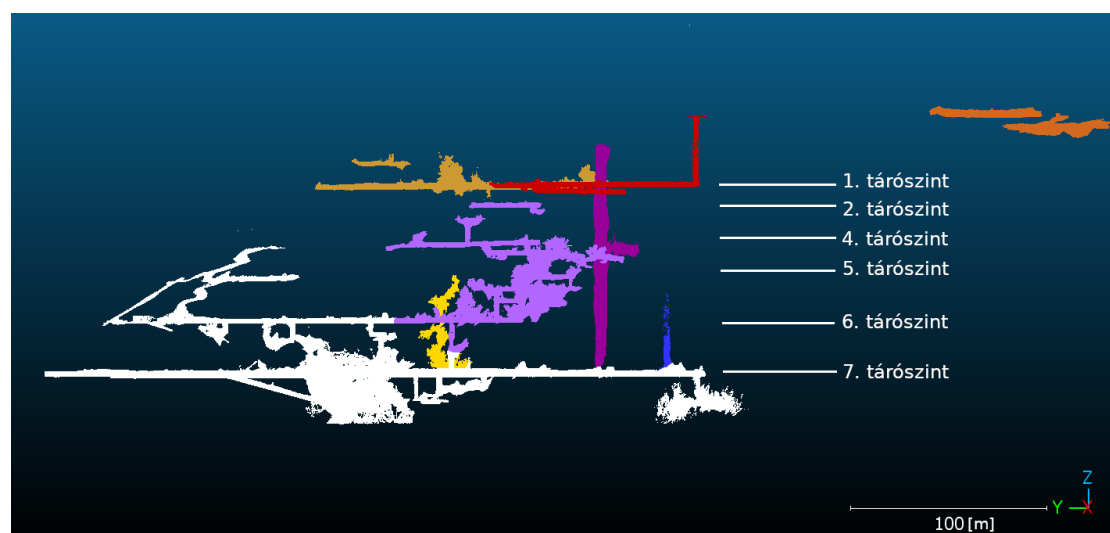


21. ábra. A felszínmodell és az ismert üregek északi nézetből

A hegy ismert üregeit, kiemelve a kampány szempontjából legfontosabbakat, déli nézőpontból megjelenítve a 22. ábra, az üregeket és a bányarendszer tárószintjeit nyugati nézőpontból megjelenítve a 23. ábra mutatja be.



22. ábra. Az ismert üregek déli nézetből



23. ábra. Az ismert üregek nyugati nézetből

Az általam külön színekkel kiemelt üregeket az 1. táblázatban gyűjtöttem össze:

Név	Szín	Jelentőség
Kis ledobóakna	kék	nem tudni mivel állt összeköttetésben
Felhagyott bányák	világos lila	valószínűleg a kis ledobóaknához vezethettek
1. társzint nyugati ága	vörös	megjelenhet a méréseken
Nagy ledobóakna	sötét lila	megjelenhet a méréseken
Földvári Aladár-barlang	narancssárga	megjelenhet a méréseken
1. társzint keleti ága	okkersárga	megjelenhet a méréseken
Rákóczi IV. sz. barlang	citromsárga	feltételezhetően egy nagyobb, felderítetlen rendszer része

1. táblázat. A színekkel kiemelt üregek táblázata

Megfigyelhető, hogy a legalsó, hetes társzint három ágával is mélyen benyúlik a hegy belsejébe. Ez a három ág képezi a mérési kampány alapját, ugyanis tökéletes helyszínt biztosítanak a detektorrendszer elhelyezésére. Hála annak, hogy hosszú ágak, így képesek vagyunk olyan területek vizsgálatára, amelyekbe csak kissé nyúlnak be a magasabb szinteken elhelyezkedő ismert üregek, valamint hozzáférést biztosítanak a Rákóczi-barlangok környékének feltérképezéséhez. Ezek alapján a három ágban három különböző céllal történtek mérések:

- *Dél-nyugati ág:* Itt elsősorban nem barlang felfedezését vártuk, hanem felhagyott bányajáratok kereséséért végeztünk méréseket. A régi bányajáratok ebbe az irányba vezető ága beomlott, azonban a kis ledobóakna létezése arra enged következtetni, hogy egykor ezek a bányák mélyebbre nyúlhattak. Szerettük volna megvizsgálni, hogy a kis ledobóakna összeköttetésben állt-e a bányarendszerrel és, hogy az valóban kiterjedtebb-e a ma ismertnél.
- *Csillás-táró utolsó szakasza (középső ág):* A nagy ledobóakna egy egyszerű validációs pont a méréseinknek. A róla készült müogramon markáns anomáliát várunk, mellyel jól validálhatók a mérések. Ezen felül ez az ág vezet a Rákóczi II. számú barlanghoz, ezért szerettük volna megvizsgálni a környezetét, hogy találunk-e egy nagyobb rendszerre utaló sűrűséganomáliákat.
- *Rákóczi-táró (keleti ág):* Ez a táróág több Rákóczi-barlangot is érint, ezért azt gyanítottuk, hogy eddig felfedezetlen üregekre utaló nyomokat találhatunk, ha ide tervezünk méréseket, főleg a repedésrendszer szerkezetű, szűk, de vertikálisan nagy kiterjedésű Rákóczi IV. számú barlang környezetében.

2.2.2. A mérések adatai

A mérési kampány során három év nyers adatait értékeltem ki. Az egyes mérések részleteit a 2. táblázatban mutatom be. A sorszámok között vannak összevont mérések, melyeknek minden adata megegyezik, így az adataikat is együtt dolgoztam fel, valamint kimaradtak sorszámok is, ugyanis nem mindegyik mérés tudott megfelelő minőségű végeredményt produkálni, melyben közrejátszott a gázellátás többszöri meghibásodása is. A 3. táblázat tartalmazza, hogy az egyes mérések a hetes tárószint melyik ágában helyezkedtek el.

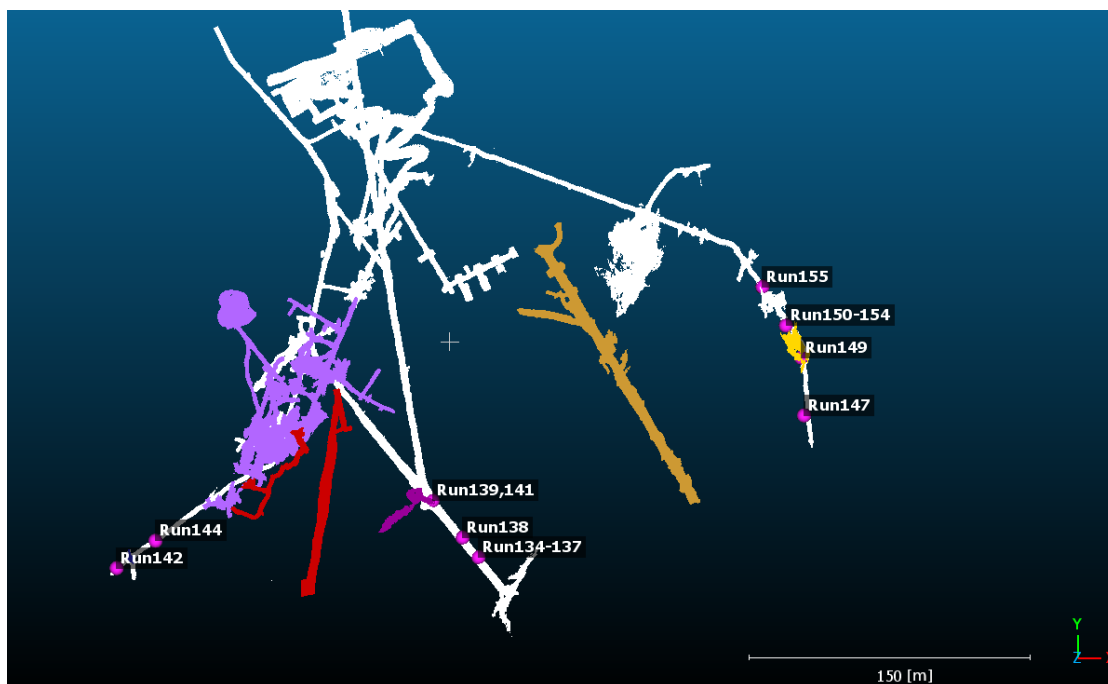
Név	Pozíció			Írány		Idő [nap]
	EOV X	EOV Y	EOV Z	Azimut	Döntés	
Run133	354129.7	775874.7	180.65	5.9°	0°	16.9
Run134-137	354146.8	775861.2	180.60	50.9°	0°	99.9
Run138	354157.2	775852.7	180.57	50.9°	0°	37.2
Run139	354176.9	775836.7	180.55	50.9°	0°	46.9
Run141	354176.9	775836.7	180.55	50.9°	40°	26.9
Run142	354141.0	775668.6	180.30	144.7°	0°	47.0
Run144	354155.5	775689.3	181.20	324.5°	0°	79.6
Run147	354222.2	776034.5	182.00	356.9°	0°	57.0
Run149	354252.9	776033.1	181.80	356.9°	0°	98.0
Run150-154	354270.0	776024.9	181.60	236.7°	0°	151.9
Run155	776012.4	354290.6	181.20	235.0°	0°	99.0

2. táblázat. A munkámban bemutatott mérések adatai

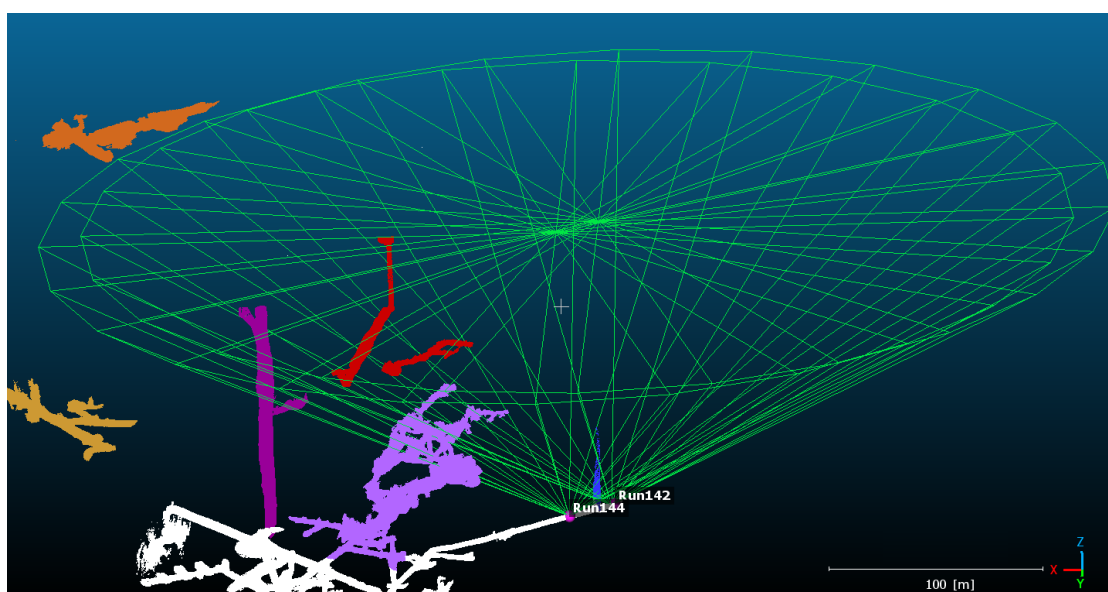
Dél-nyugati ág	Csillás-táró	Rákóczi-táró
Run142	Run134-137	Run147
Run144	Run138	Run149
	Run139	Run150-154
	Run141	Run155

3. táblázat. A mérések elhelyezkedése a hetes tárószint ágaiban

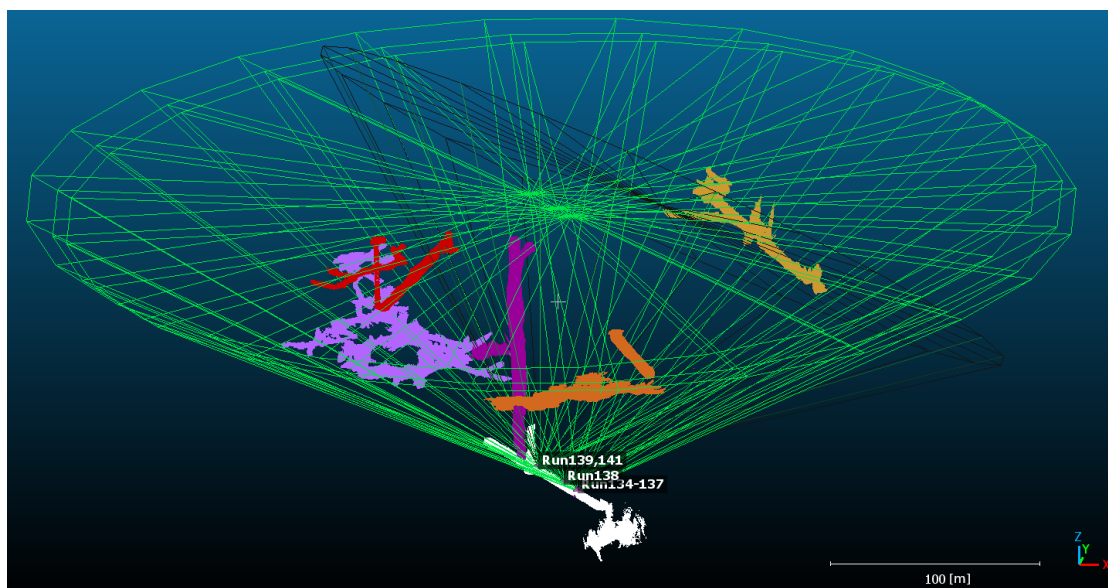
Megfigyelhető, hogy az egyetlen döntött mérés a Run141-es. Ezt a mérési módszert akkor szokás alkalmazni, amikor szeretnénk a lehető legjobban fókuszálni egy bizonyos területre, azonban nem tudjuk közvetlenül alá helyezni a berendezéseket. Ilyenkor különösen fontos az ésszakkal bezárt szög, az álló méréseknél azonban a látószöget nem befolyásolja. Az egyes detektorpozíciók a pontfelhőn ábrázolva a 24. ábrán láthatóak. A 25., 26. és a 27. ábrákon láthatóak a detektorok várható látóterébe eső térfogatok, a 60° félnyílásszögű kúpok.



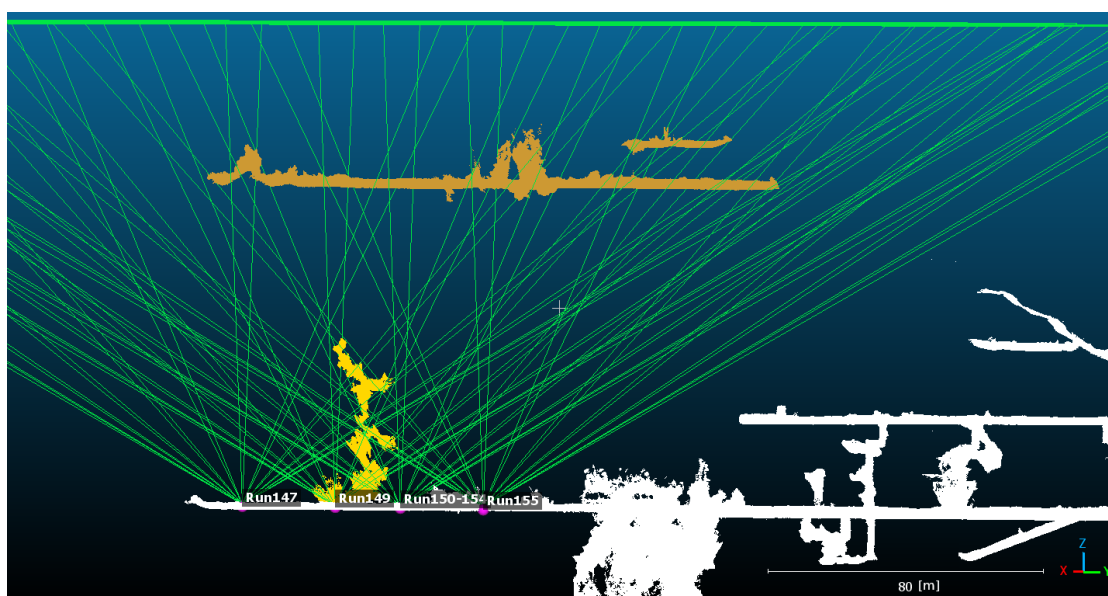
24. ábra. A mérési pontok felülnézetből



25. ábra. A nyugati ágban vizsgált térfogatok északi irányból



26. ábra. A középső ágba vizsgált térfogatok déli irányból



27. ábra. A nyugati ágba vizsgált térfogatok északkeleti irányból

A detektorpozíciók megfelelő megválasztásával csoportunknak sikerült a hegy belső szerkezetének jelentős részét megvizsgálni, a három táróág megfelelő hossza ugyanakkor lehetővé tette, hogy elkerüljük a bányászat által leginkább érintett területeket, melyek kezelése bonyolult és jelenleg is fejlesztés alatt áll.

2.3. A mért adatok feldolgozása

A teljes esztramosi kampány során összesen harminchét hónapon keresztül rögzített adatokat a műszer, ezalatt nagyjából 13,5 millió műonpályát (vagyis eseményt) azonosított, átlagosan közel öt másodpercenként egyet. Ez hatalmas adatmennyiség, amelyet ezért minél hatékonyabban szükséges rögzíteni. A detektorrendszeren található egy Raspberry Pi mikroszámítógép, amely képes elvégezni az adatkiolvasást és tárolást, valamint Wifi jeladója révén azok letöltését és programok indításának lehetőségét is vezeték nélkül biztosítja. A műszer számos környezeti adatot is rögzít (például nyomás, páratartalom, hőmérséklet), amelyek segíthetnek az esetleges meghibásodások okának felderítésében. A műonpályák nyers adatstruktúráját a 28. ábra mutatja be. Ez az effektív tárolási mód teszi lehetővé, hogy a három év alatt rögzített adatok kevesebb, mint három gigabyte tárhelyet foglaljanak el.

adott kamrában ennyi pad rögzített x koordinátát

adott kamrában rögzített x koordináták

adott kamrában ennyi pad rögzített y koordinátát

adott kamrában rögzített y koordináták

első kamra

4

35 36 37 38

4

37 38 39 40

második kamra

3 39 40 41 4 31 32 33 34

4 84 85 86 87 4 15 16 17 18 3 86 87 88 4 21 22 23 24

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

3 50 51 52 3 15 16 17 6 39 40 41 53 54 55

0 0 0 0 2 66 67 3 13 14 15 2 79 80 4 40 41 42 43

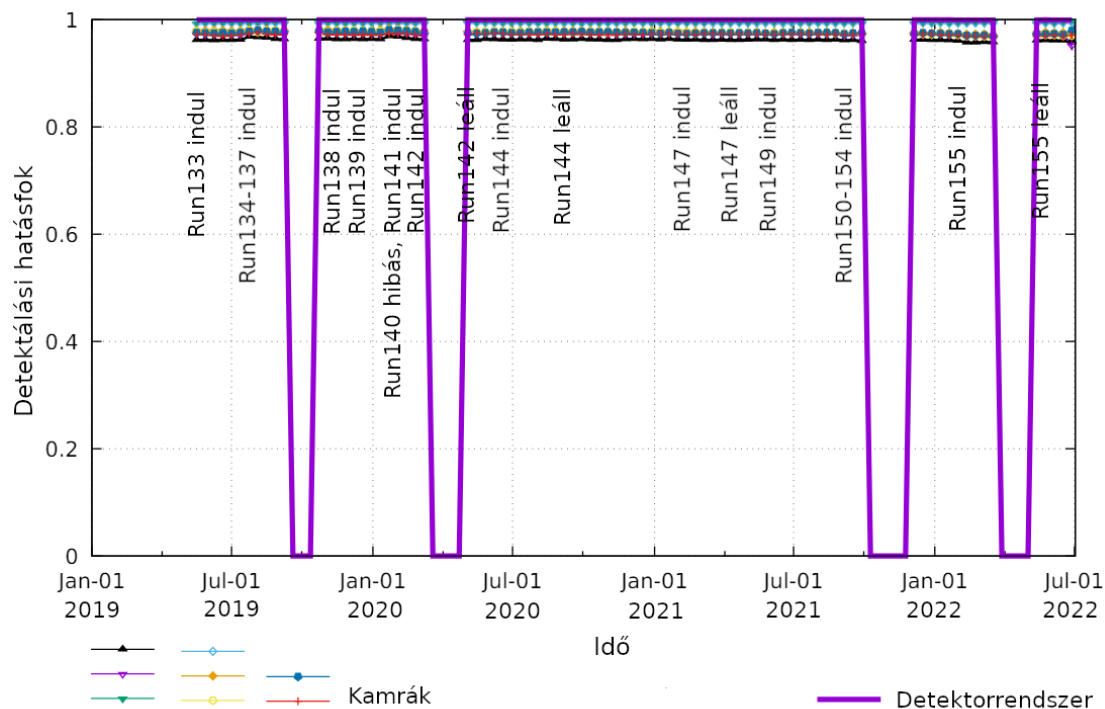
0 0 0 0 0 0 0 1 0 3 84 85 86 4 5 6 7 8 4 79 80 81 82

első esemény

második esemény

28. ábra. A rögzített mérési fájlok adatstruktúrája [38]

Mielőtt megkezdhettem volna a műonpályák vizsgálatát először is meg kellett vizsgálnom a műszer működését a mérések időtartama alatt. Néhány kamra detektálási hatásfoka drasztikusan lecsökkent a Run137, Run142, Run154 és Run155 mérések alatt. Ezért ezeknek a méréseknek a hibás intervallumokban rögzített adatait figyelmen kívül kellett hagynom a további munkám során. A 29. ábrán látható az egyes mérések kezdete és vége időben, valamint, hogy mely időtartamok kerültek eltávolításra (ahol a detektálási hatásfok nullára csökkent). Ezeket a meghibásodásokat legtöbbször a gázellátás vagy valamelyik elektronikai komponens hibás működése okozta. Összességében elmondható, hogy a hibás adatokat eltávolítva is kellően nagy adatrendszerrel tudtam dolgozni.



29. ábra. Az egyes mérések időtartama és a megvágott adatrendszer

2.3.1. Müonpályák rekonstruálása

A megtisztított adatrendszerből a következő lépésként rekonstruálni kell a müonpályákat. Ez a 28. ábrán bemutatott struktúrára könnyen elvégezhető. Azonban figyelembe kell venni egyes tényezőket, melyek a müogram torzulását okozhatják, ha nem szűrjük ki őket. Az egyik szűrési módszer a klaszterezés. Ezen folyamat során azt követeljük meg a rögzített részecskepályáktól, hogy azok egy kamrában legfeljebb hány padet szólaltathattak meg, valamint ezen megszólalt padeknek is kikötjük, hogy egymás mellett helyezkedjenek el. Így képesek vagyunk eltávolítani a véletlen zajból származó beütéseket. Egy másik szűrési módszer szerint kiköthető, hogy legalább hány kamrát kell metszenie a pályának ahhoz, hogy megtartsuk az adatrendszerben. Ezt az értéket hat kamrában határoztam meg, hogy így szűrjem ki a jelentős részben háttéreffektusokból származó látszólagos részecskepályákat. Egy harmadik szűrő pedig az illesztett pályák minőségének vizsgálata, melyet a χ^2 módszerrel tehetünk meg, ami N pontos illesztés esetén:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(E_i - O_i)^2}{\sigma^2} \quad (8)$$

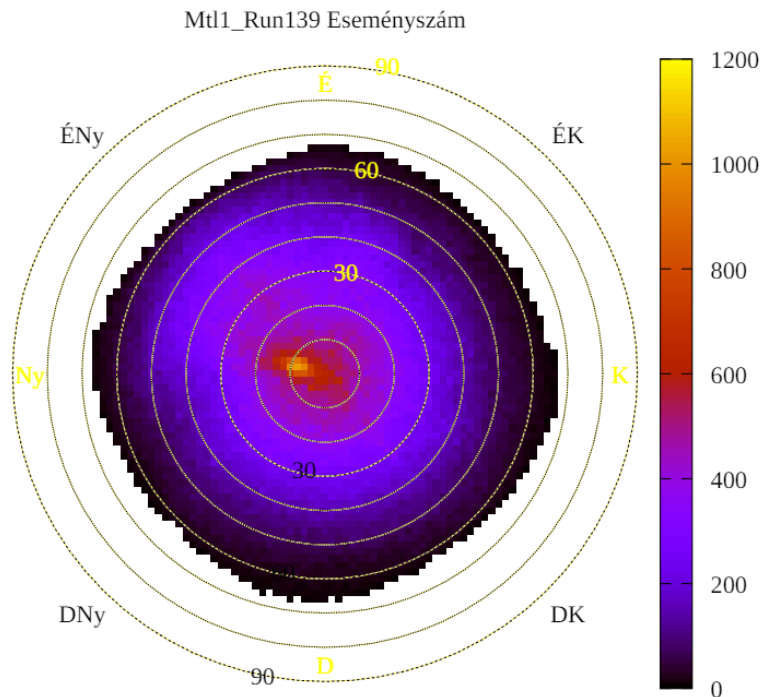
ahol E_i az illesztett egyenesből származó várt érték, a O_i a detektor által rögzített koordináták átlaga, σ^2 pedig a detektorkonfigurációhoz tartozó szórásnégyzet. Az így kapott érték jellemzi az illesztett egyenes jóságát és megköveteljük, hogy ez egy küszöbértéket ne haladjon meg.

2.3.2. Fluxusszámítás

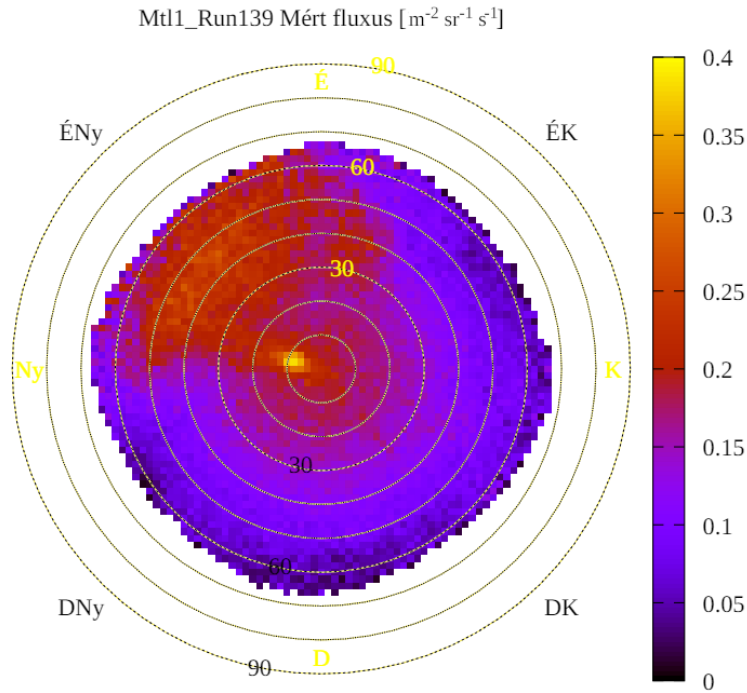
Miután elvégeztük a háttérszűréseket és a pályarekonstrukciót megkezdhetjük a fluxusszámítást. A müonfluxust a következő egyenlet definiálja:

$$\varphi = \frac{N}{A \cdot \theta \cdot \epsilon \cdot t} \quad (9)$$

ahol φ a fluxus, N a beérkezett müonok száma, A a felület, θ a zenitszög, ϵ a detektor hatásfoka, t pedig az eltelt idő. A müogram elkészítése során az egyes számítások elvégzése érdekében a teret binekre osztjuk fel és ezekre az egyes binekre külön végezzük a számításokat. Példaként a Run139-es mérésen bemutatom a binekre eső eseményszámokat (30. ábra) és az ebből számított fluxustérképet (31. ábra). A térképeken a körvonalak tízes osztásban haladnak tíztől kilencven fokig és a korábban bemutatott látószög kúpok félnyílásszögeit jelentik.



30. ábra. A Run139 mérés során rögzített eseményszámok binenként



31. ábra. A Run139 mérés során mért fluxustérkép

2.3.3. Sűrűséghossz számítás

A fluxusszámítás után a következő lépés a feldolgozásban a sűrűséghossz, vagy másnéven opacitás (ϱ), meghatározása. A sűrűséghossz definíció szerint a közetben megtett úthossz (L) és a közet átlagsűrűségének (ρ_{avg}) szorzata, mértékegysége kg/m^2 .

$$\varrho = \rho_{avg} \cdot L \quad (10)$$

Meghatározása a mért fluxusból azonban korántsem triviális. A módszer alapja, hogy összehasonlítjuk a közetben megtett út után mért müonfluxust egy elméleti, felszíni körülményeket feltételező modellel. Mivel a müonok energiavesztesége közeten való áthaladás közben ismert, ezért meghatározható E_{min} minimum kezdeti energia, mellyel rendelkeznie kell a részecskének a detektor eléréséhez [39]:

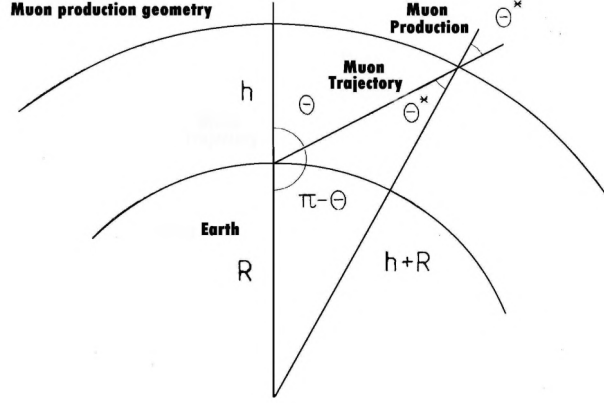
$$E_{min} = E_{\mu} + \int_0^{\varrho} \frac{dE}{d\varrho} d\varrho \quad (11)$$

ahol E_{μ} a müonok nyulgami energiája. Az integrált müonfluxus megadja az időegység alatt a vizsgált közeten áthaladni képes müonok számát a sűrűséghossz függvényében [39]:

$$\Phi(\varrho, \theta) = \int_{E_{min}(\varrho)}^{\infty} \varphi(E_0, \theta) dE_0 \quad (12)$$

ahol E_0 a müonok kezdeti energiája. Amennyiben rendelkezésünkre áll egy modell a kozmikus müonok energiaeloszlására, akkor annak segítségével kiszámítható a detektorban mért fluxus alapján a sűrűséghossz [40]. 1990-ben Gaisser vezette be azt a fluxusmodellt, amely az alapját képezte ennek a konverciónak.

A formula azonban csak két feltétel teljesülése alapján igaz: ha elhanyagoljuk a Föld görbületét és a müonok bomlását. Mivel a müonok a felsőléggörben keletkeznek, ezért a felszínen megfigyelt zenitszög (θ^*) nem egyezik meg a müonok valódi zenitszögével (θ). A kapcsolatot R sugarú Földön h magasságban a 32. ábra mutatja be. Végző soron a két megkötés a spektrum alkal-



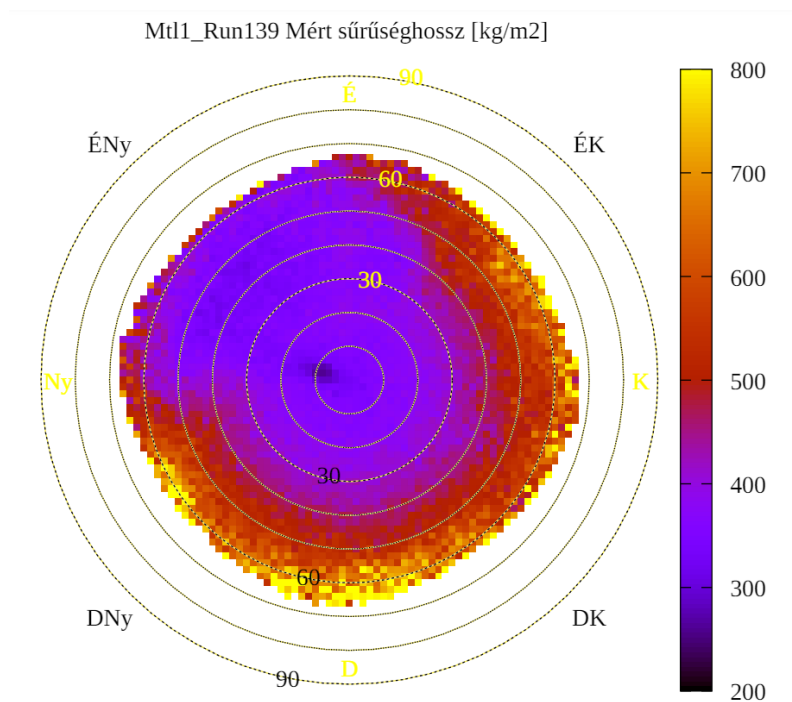
mazását sajnos nem tette lehetővé nagy zenitszögű és kisenergiás müonokat detektáló mérések esetén. Ezen megkötések kiküszöbölésére több módosított formula is megszületett, az általunk alkalmazott a Guan és társai [41] által 2015-ben bevezetett módosított fluxusmodell, amely mindkét megkötést feloldja, így széles körben is pontosan alkalmazható:

$$\frac{d\Phi}{dE_\mu} = 0.14 \left[\frac{E_\mu}{\text{GeV}} \left(1 + \frac{3.64 \text{ GeV}}{E_\mu (\cos\theta^*)^{1.29}} \right) \right]^{-2.7} \times \left[\frac{1}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos\theta^*}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos\theta^*}{850 \text{ GeV}}} \right] \quad (13)$$

ahol a Föld görbületére korrigáló megfigyelt zenitszög:

$$\theta^* = \sqrt{\frac{(\cos\theta)^2 + P_1^2 + P_2(\cos\theta)^{P_3} + P_4 \cos(\theta)^{P_5}}{1 + P_1^2 + P_2 + P_4}} \quad (14)$$

ahol $P_1 = 0.102573$, $P_2 = -0.068287$, $P_3 = 0.958633$, $P_4 = 0.0407253$ és $P_5 = 0.817285$ állandók. A számítások végeredménye egy referencia táblázat, mely megadja a mért fluxushoz tartozó sűrűséghossz értéket. A példaként vett Run139 mérés sűrűséghossz térképe a 33. ábrán látható.



33. ábra. A Run139 mérés során mért sűrűség hossz térkép

2.3.4. Közethossz számítás és modellezés

A sűrűség hossz kiszámítása után már csak egy lépés választ el a detektor felett elhelyezkedő közet mennyiség meghatározásától. Ezt úgy tehetjük meg, hogy a mért sűrűség hosszakat elosztjuk egy átlagsűrűséggel, amelyet a vizsgált célpontot alkotó közet alapján jól becsülhetünk. Ezek alapján a bevezetett közethossz:

$$Rl = \frac{\varrho}{\rho_{avg}} \quad (15)$$

Az így kapott mennyiség mértékegysége méter. A számításaim során $\rho_{avg} = 2650 \text{ kg/m}^3$ átlagsűrűséget alkalmaztam. Az így számított közethosszt ezután össze kell vetni a mért célpont geometriája alapján várt közethosszal, így megkapva a közethiányokat vagy esetleges közettöbbleteket, melyek a referencia átlagsűrűségtől való relatív eltérést adják meg az egyes irányokban. A közethossz modellezéséhez nincs másra szükség, mint a detektor pontos pozíciójára és egy felszínmodellre. Így egy program segítségével minden egyes binben húzhatunk egy vonalat a felszínig, melyet a mért pontfelhőkből interpolálhatunk. Ennek eredménye az a referencia közethossz, amelyet akkor mérnénk, ha nem lenne semmilyen sűrűséganomália a vizsgált területen. A 3. részben bemutatom az egyes mérések közethiány térképeit, vagyis a mért és modellezett közethosszak különbségeit.

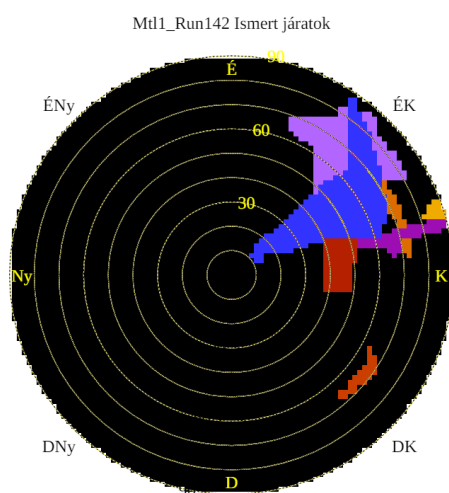
3. Eredmények

A korábban tárgyaltak szerint a müográfias mérések során kulcsfontosságú a mérési idő. A 2.2.2 bekezdésben bemutatottak alapján sajnos nem mindegyik mérés ért el kellő időtartamot ahhoz, hogy kis szórású müogramot eredményezzen, azonban így is sikerült látványos eredményeket produkálni mind a három fő mérési területen.

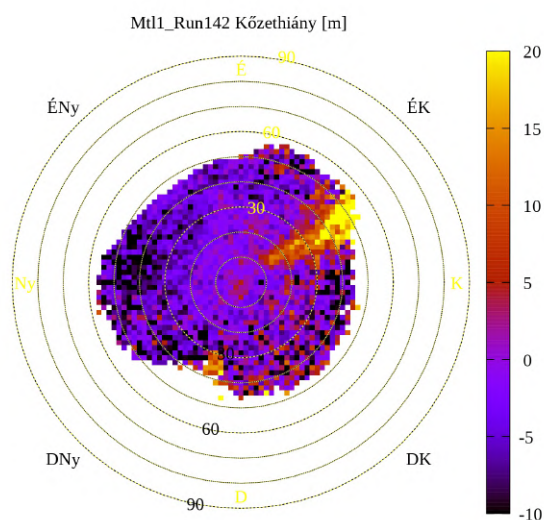
3.1. Közethiány térképek

A következőkben bemutatom az egyes mérések közethiány térképeit, valamint ábrákat arról, hogy a korábban színekkel elkülönített üregek hol jelentkeznének rajtuk anomáliaként. A bemutatott mérések táróágakra bontva, délről észak felé haladva követik egymást.

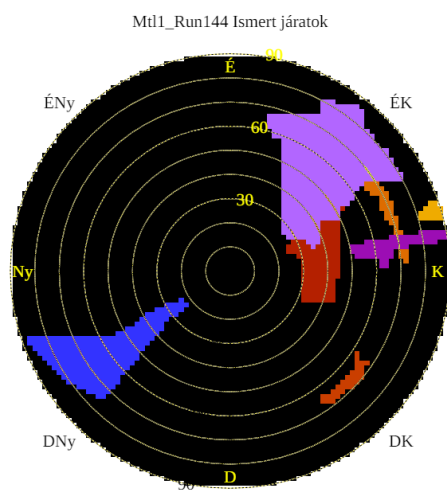
Dél-nyugati táróág



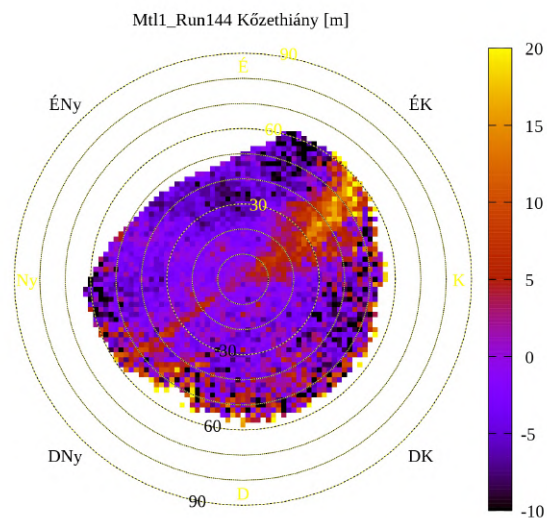
34. ábra. A Run142 mérés által látott ismert üregek, kékkel a müogramon megjelenő kis ledobóakna



35. ábra. A Run142 mérés müogramja, északkeleti irányban markánsan jelentkeznek a várt üregek

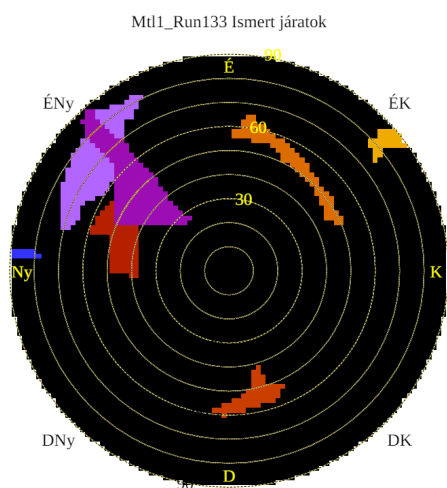


36. ábra. A Run144 mérés által látott ismert üregek, kékkel a kis ledobóakna, világos lilával a bányajáratok

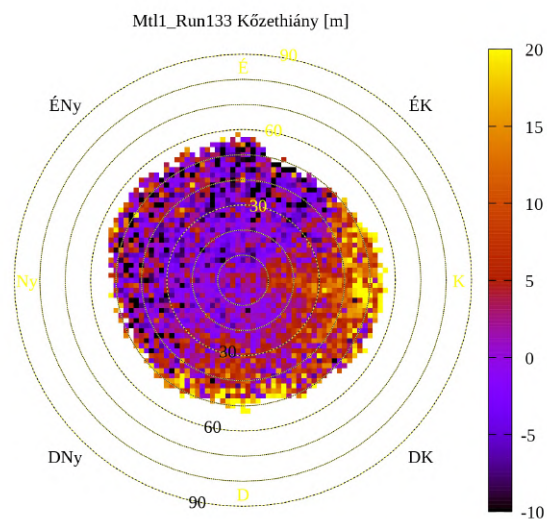


37. ábra. A Run144 mérés müogramja, középen anomáliaként a kis ledobóakna és a részben beomlott bányajárat kapcsolata

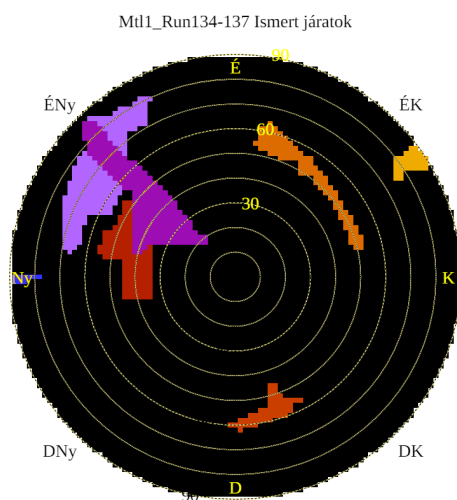
Csillás-táró



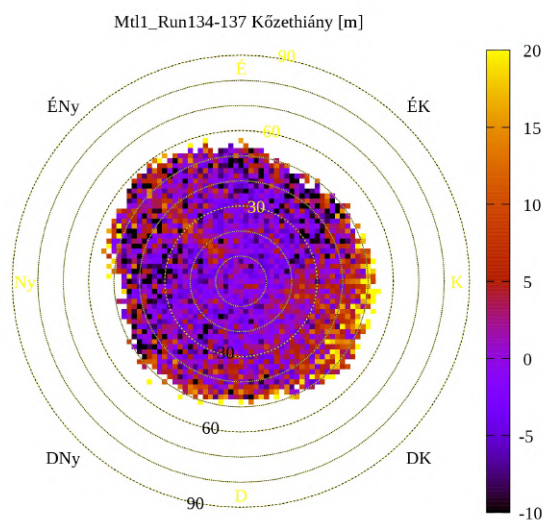
38. ábra. A Run133 mérés által látott ismert üregek



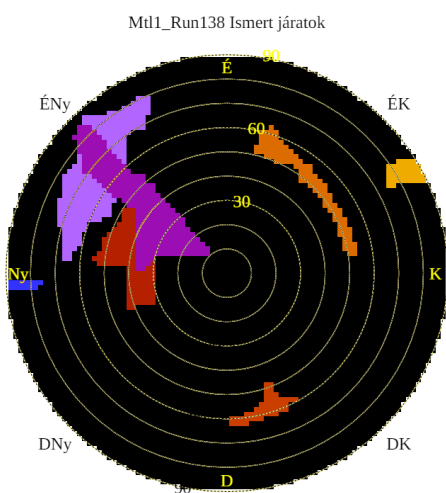
39. ábra. A Run133 mérés müogramja, keleti irányban egy, a feltehetően a rövid mérési időből fakadóan hamis anomália



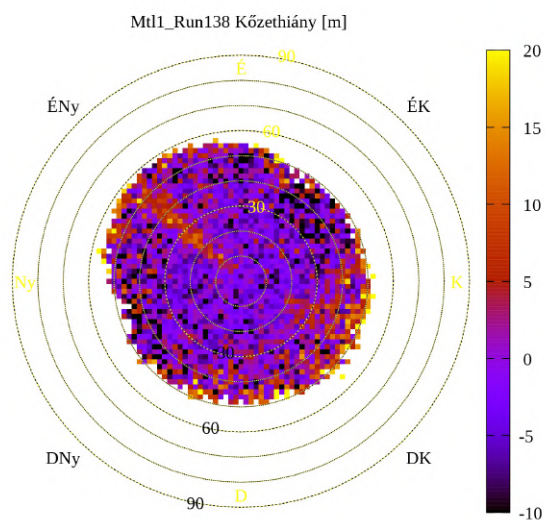
40. ábra. A Run134-137 mérés által látott ismert üregek, sötét lilával a müogrammon megjelenő nagy ledobóakna



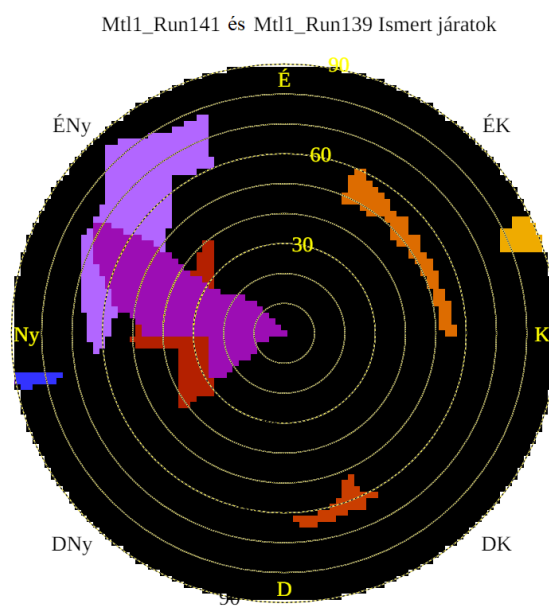
41. ábra. A Run134-137 mérés müogramja, északnyugati irányban a nagy ledobóakna látható



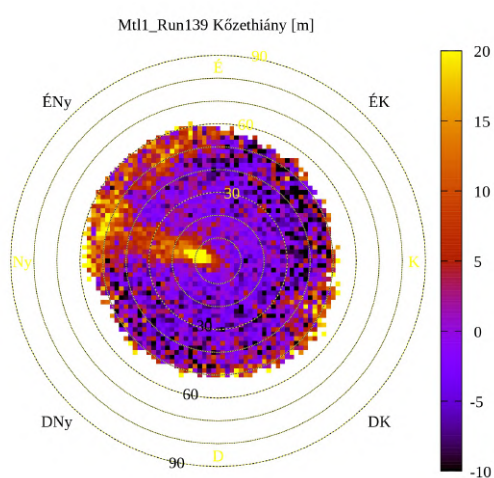
42. ábra. A Run138 mérés által látott ismert üregek, sötét lilával a müogrammon megjelenő nagy ledobóakna



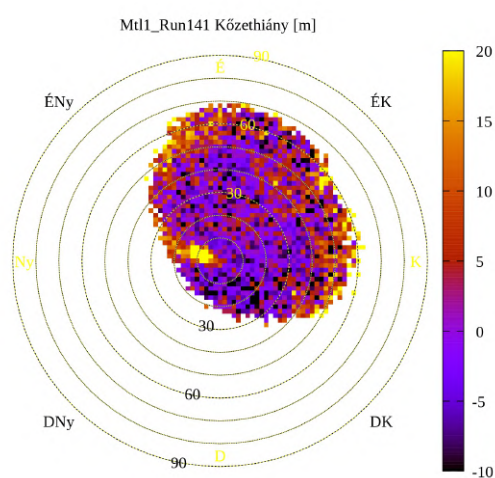
43. ábra. A Run138 mérés müogramja, északnyugati irányban a nagy ledobóaknával



44. ábra. A Run139 és Run141 mérések által látott ismert üregek, sötét lilával a nagy ledobóakna, világos lilával a felhagyott bányajáratok

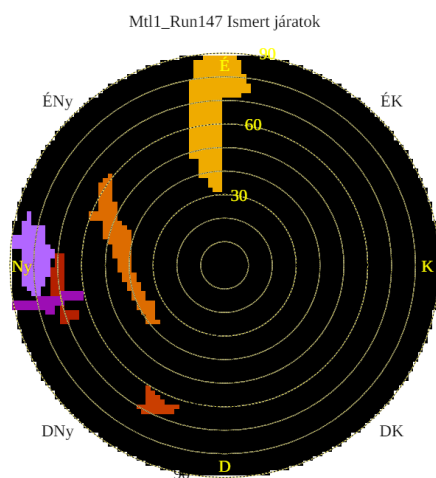


45. ábra. A Run139 mérés müogramja, középről nyugat felé megjelenik a nagy ledobóakna, nyugat-északnyugati irányban pedig az ismert bányajáratok

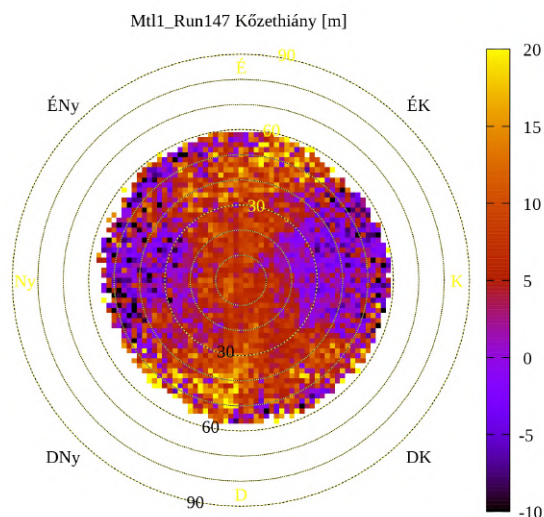


46. ábra. A Run141 döntött mérés müogramja, középen a nagy ledobóakna, északi irányban az ismert bányajáratok

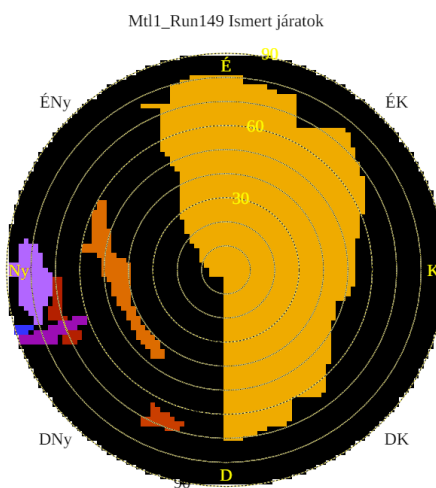
Csillás-táró



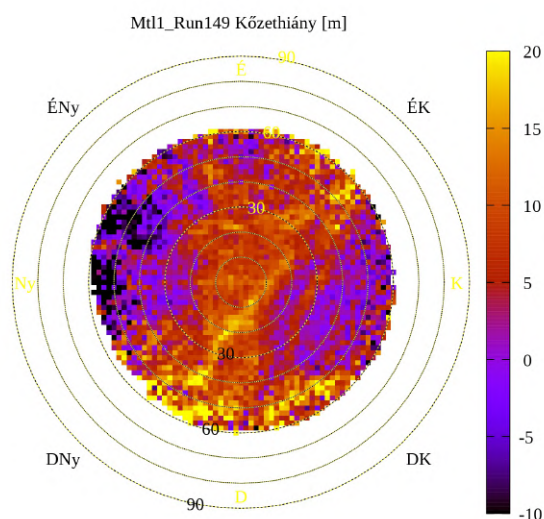
47. ábra. A Run147 mérés által látott ismert üregek, citromsárgával a müogramon megjelenő Rákóczi IV. sz. barlang



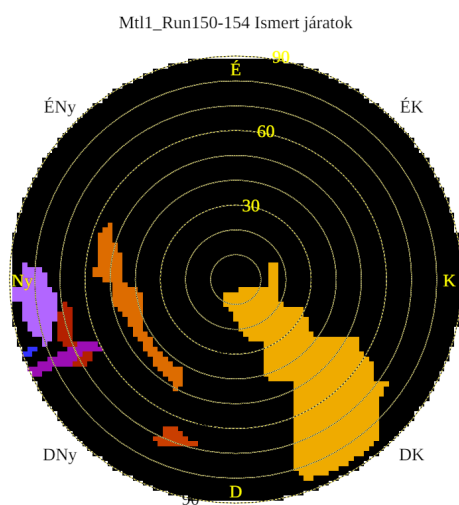
48. ábra. A Run147 mérés müogramja, a sűrűséganomáliák a Rákóczi IV. sz. barlangtól délre is folytatódnak



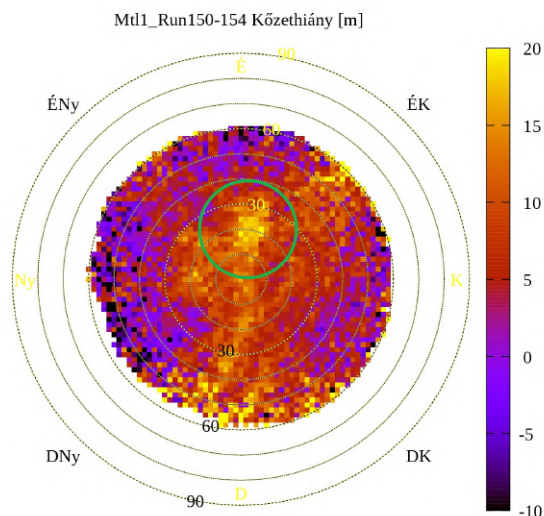
49. ábra. A Run149 mérés által látott ismert üregek, citromsárgával a müogramon megjelenő Rákóczi IV. sz. barlang



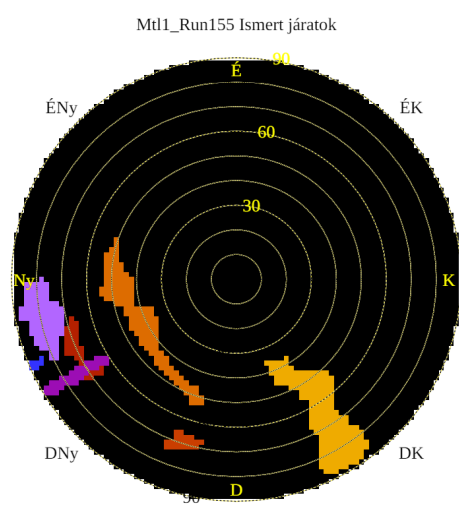
50. ábra. A Run149 mérés müogramja, rajta a Rákóczi IV. sz. barlang által okozott közethiány



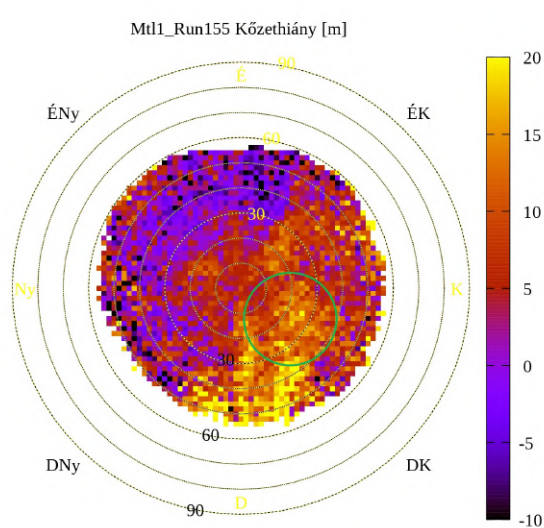
51. ábra. A Run150-154 mérés által látott ismert üregek, citromsárgával a müogramon megjelenő Rákóczi IV. sz. barlang



52. ábra. A Run150-154 mérés müogramja, a Rákóczi IV. sz. barlang folytatódni látszik északi irányú anomáliákban (zölddel karikázva az 55. ábrán látható térfogat)



53. ábra. A Run155 mérés által látott ismert üregek, citromsárgával a müogramon megjelenő Rákóczi IV. sz. barlang



54. ábra. A Run155 mérés müogramja, a Rákóczi IV. sz. barlang számos irányban anomáliákban folytatódik (zölddel karikázva az 55. ábrán látható térfogat)

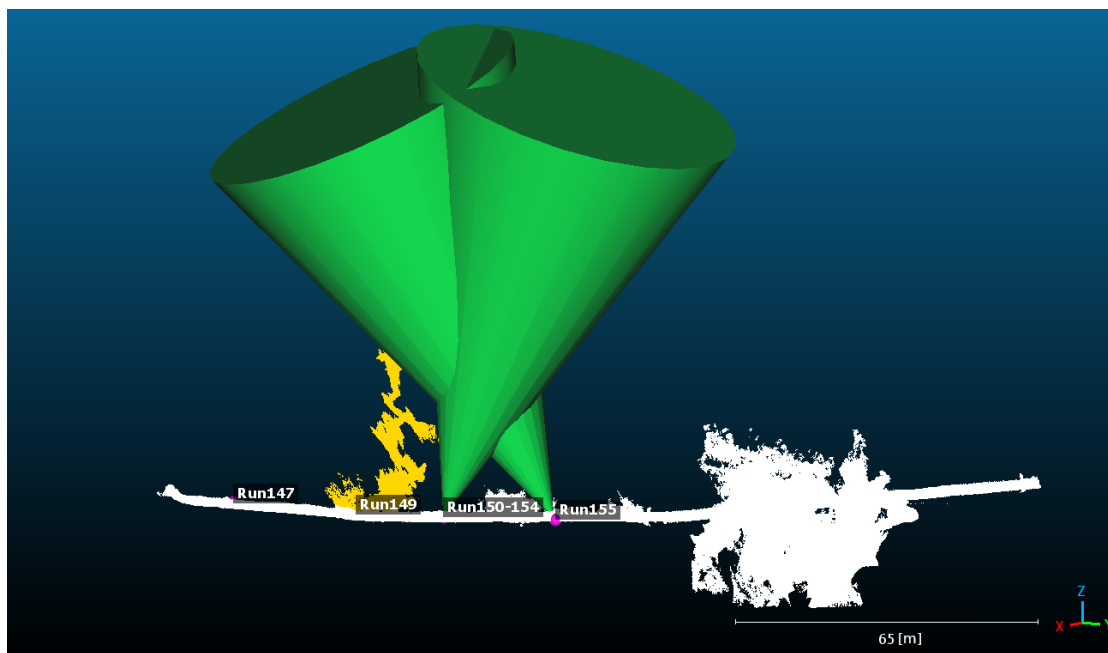
3.2. Anomáliák azonosítása

A dél-nyugati ágon található két mérés célja az esetleges kapcsolat megállapítása volt a késsel jelölt kis ledobóakna és a világos lilával jelölt bányarendszer között. A 34. ábrán látott várakozásokat jól tükrözi a 35. ábrán látható Run142-es anomáliakép, az üregek együttes hatása markánsan jelentkezik északkeleti irányban. A Run144-et bemutató 36. ábrán látszik, hogy a detektorrendszer pozíciója átkerült a kis ledobóakna északkeleti oldalára. Itt megfigyelhető, hogy a sűrűséganomáliák, habár halványan, de létező összeköttetést mutatnak a két objektum között. Itt előzetesen sem számítottunk nagy közethiányra, tekintve, hogy a bányák részben beomlottak. Így azonban sikerült kimutatnunk, hogy az egykori járat létezett, a törmelék pedig nem tudta teljesen kitölteni az omláskor. Ezen kívül sikerült megállapítanunk, hogy egyéb irányokba nem folytatódik a bányarendszer és jelentős barlang sem észlelhető a hegy nyugati felében.

A Csillás-táró mérésein jól látszik, hogy miért érdemes hosszabb mérési idővel dolgozni. A 38. és 39. ábrákon látható Run133-as mérés nem volt képes kimutatni a nagy ledobóaknát anomáliaként, azonban keleti irányban egy olyan közethiányt jelez, amely valószínűleg nem létezik. Ezen a ponton a felszínen egy lejtőt alakítottak ki a kőfejtés során, amely hirtelen ugrást okoz a geometriában. A 40. és 41. ábrákon bemutatott Run134-137, valamint a 42. és 43. ábrákon látható Run138 mérések mind többször annyi ideig mértek, mint a Run133-as (lásd 2. táblázat) és a feltehetően bonyolult felszín által okozott keleti irányú sűrűséghiány szinte teljesen hiányzik róluk. Ellenben a nagy ledobóakna felé közelítve az egyre jobban kiemelkedik északnyugati irányban. Ez az anomália a legjobban a Run139 és Run141 (44., 45. és 46. ábrák) müogramjain jelenik meg, hiszen ezek a mérések szinte közvetlenül az akna alatt helyezkedtek el. Rajtuk ezen kívül megfigyelhetők a benyúló felhagyott bányák, valamint a hatodik tárorszint egy kiterjedt, észak-északnyugati irányú anomáliaként. Általánosan kijelenthető, hogy a Csillás-táróban nem sikerült eddig ismeretlen sűrűséghiányt kimutatni egyik méréssel sem, a várt üregek viszont láthatóak a müogramokon.

A Rakóczi-táróban rögzített müogramok mindegyike azt sugallja, hogy a Rakóczi IV. sz. barlang egy kiterjedtebb, eddig még nem teljesen feltérképezett, észak-déli irányítottságú rendszer részét képezheti. A Run147-es mérés (47. és 48. ábrák) déli irányú, nem túl nagy anomáliái arra engednek következtetni, hogy repedésrendszerként folytatódhat déli irányba a barlang. A 49. és 50. ábrán látható Run149-es mérés közvetlenül a barlang alatt helyezkedik el és a teljes müogramot lefedő anomáliák nagyságán szintén jól látható az észak-déli irányítottság. A 51. és 52. ábrákon bemutatott Run150-154-es, valamint a 53. és 54. ábrákon látható Run155-ös mérések eredményei pedig arra engednek következtetni, hogy a rendszer

északi irányban is a jelenleg ismertnél nagyobb kiterjedéssel bír. A Run150-154-es mérés müogramján látható egy igen jelentős, nagyjából 20 méteres közethiány északi irányban, 20° zenitszögnél. Azt gyanítottam, hogy ez ugyanaz az anomália lehet, mint ami megjelenik a Run155-ös mérés eredményén is, azonban ott délkeleti irányban 25° zenitszögnél. Ezért ábrázoltam két 20° félnyílásszögű kúpot ezekben az irányokban. Az 55. ábrán látható, hogy a két térfogat jelentős metszettel rendelkezik. A megállapításom az, hogy nagy valószínűséggel ezen térfogatban a Rákóczi-barlangrendszer további járatai húzódhatnak.



55. ábra. A Run150-154 és Run155 méréseken azonosított anomália térbeli elhelyezkedését bemutató kúpok északkeleti nézetből

Számos mérésen megfigyelhetőek a müogramok szélénél található közzetöbbletek, vagy éppen hiányok. A müonfluxus irányfüggéséből fakadóan (4. ábra) ezekről a területekről jóval kevesebb eseményt tudunk rögzíteni (30. ábra). A müonok véletlen eseményként regisztrálódnak és Poisson-eloszlást követnek, ezért a beütésszám szórása az események számának gyökével egyezik meg [40]. Ez okozza a széleffektust, vagyis ezen bizonytalanságokat. Ezért is különösen fontos, hogy megfelelő időtartamot és detektorpozíciót válasszunk meg a méréstervezés során. Ezen kívül egyes járatok, mint például a vörössel és okkersárgával jelölt 1. tároszint járatai egyáltalán nem, vagy csak nagyon halványan jelennek meg a müogramokon. Ennek a műszer felbontása az oka, mely a detektor kiolvasó száalai közötti távolság és az anomália detektorrendszerrel való messzi elhelyezkedése miatt nem, vagy csak hosszabb mérési idő mellett lenne képes kimutatni ezeket a közethiányokat.

4. Összefoglalás és kitekintés

A müográfiai mérési módszerek elterjedése számos új lehetőséget tárt a geofizika elé. Hála az egyre fejlődő technológiának képesek vagyunk hegy méretű testek belső sűrűségeloszlásának részletes vizsgálatára. A kutatásom során a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont REGARD és Nagyenergiás Geofizikai Kutatócsoportjának munkájába bekapcsolódva lehetőségem nyílt segédkezni az Esztramos-hegyet vizsgáló müográfiai kampány megvalósításában, valamint kiértékelni több évnyi nyers mért adatot.

A munkám során részt vettem az Mtl1 detektorrendszer helyszíni karbantartásában, valamint a kutatócsoportjaink által használt kiértékelő szoftverek fejlesztésében is. A feldolgozás során először eltávolítottam a detektor meghibásodásai során rögzített adatokat, majd több szűrőt is alkalmazva megtisztítottam az adatrendszert a háttéreffektusoktól és véletlen zajoktól, majd rekonstruáltam a müonpályákat. Ezek után a szoftvereink segítségével elvégeztem a fluxus és közethossz számításokat, valamint meghatároztam a mért értékek eltérését az elméleti modelltől, ezzel elkészítve a közethiány térképeket, vagy másnéven müogramokat. Ezeket megvizsgáltam, azonosítottam rajtuk az ismert üregeket, majd az értelmezés során kijelöltem az ismeretlen eredetű anomáliákat. Az esztramosi bánya hetes tárószintjének dél-nyugati ága felett sikeresen kapcsolatot találtam egy beomlott bánya és egy ledobóakna között. A Csillás-táróban nem sikerült ismeretlen üregre utaló nyomokat találnom, azonban a Rákóczi-táróban számos bizonyítékot találtam arra, hogy a Rákóczi IV. számú barlang egy nagy kiterjedésű, észak-déli irányítottágú repedésrendszer része, valamint beazonosítottam egy térfogatot, melyben eddig felderítetlen barlangjáratok létezésére utaló jeleket találtam.

A jövőben szeretném folytatni a munkám a HUN-REN Wigner FK. Nagyenergiás Geofizika Kutatócsoportjánál, mint kutatási asszisztens és később, mint fiatal kutató, amennyiben sikeresen felvételt nyerek a Földtudományi Doktori Iskolába. Az esztramosi mérési kampányt is folytatni szeretném, új méréseket terveznék a hetes tárószit keleti ágába, valamint szeretném elvégezni a jelenleg fejlesztés alatt álló szoftverekkel az ismert közethiányok számszerű levonását az adatrendszerből, hogy pontosabb képet kaphassunk a Rákóczi-barlangok környezetéről. Végezetül hosszú távon szeretném, ha a feldolgozott adatokon geofizikai inverziót végezhetnénk, hogy reményeim szerint pontosan beazonosíthassuk a felderítetlen, de feltételezett járatok kiterjedését és pozícióját.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek és konzulensemnek, Hamar Gergőnek, Surányi Gergelynek és Balázs Lászlónak a munkám során nyújtott támogatásukért és segítségükért. Szintén szeretnék köszönetet mondani Varga Dezsőnek, a HUN-REN Wigner FK. Nagyenergiás Fizikai Osztály osztályvezetőjének és Oláh Lászlónak, a Nagyenergiás Geofizika Kutatócsoport csoportvezetőjének, hogy lehetőséget adtak, hogy egy ilyen nagyszerű és modern kutatáson dolgozhassak. Valamint természetesen köszönet illeti a két kutatócsoport összes dolgozóját a szakmai felkészültségükért és a kellemes munkahelyi légkörért.

A kutatást a következő pályázatok és projektek támogatták: OTKA-FK-135349, ELKH-KT-SA-88/2021, TKP2021-NKTA-10, KSZF-144/2023 és a Vesztergombi Laboratórium (VLAB).

Hivatkozások

- [1] T. Wulf: Über die in der Atmosphäre vorhandene Strahlung von hoher Durchdringungsfähigkeit
Physikalische Zeitschrift, Volume 10 (1909), 152. o.
- [2] V. F. Hess: Measurements of the Penetrating Radiation During Seven Balloon Flights (1912)
- [3] <https://cds.cern.ch/images/CMS-PHO-GEN-2017-008-1/file?size=large>
- [4] S. H. Neddermeyer, C. D. Anderson: Note on the Nature of Cosmic Ray Particles
Phys. Rev. 51 (1937) 884–886. o.
- [5] T. K. Gaisser - Cosmic Rays and Particle Physics 2nd Edition,
Cambridge University Press (2016) 126-127. o.
- [6] K. Nakamura et al. (Particle Data Group),
J. Phys. G 37, 075021 (2010)
- [7] <https://www.hap-astroparticle.org/184.php>
- [8] D. E. Groom, N. V. Mokhov, S. Striganov: Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV-100 TeV
Atomic Data and Nuclear Data Tables, Volume 76, No. 2
- [9] L. Oláh, et al.: Képkotás kozmikus részecskékkel
Fizikai Szemle 2017/3, 74-78. o.
- [10] C. Borja, C. Ávila, G. Roque, M. Sánchez: Atmospheric Muon Flux Measurement near Earth's Equatorial Line
Instruments 2022, 6, 78.
- [11] E.P. George: Cosmic rays measure of overburden of tunnel
Commonwealth Engineer 455 (1955)
- [12] L. W. Alvarez, et al.: Search for Hidden Chambers in the Pyramids
Science 167 (1970), 832-839. o.
- [13] H. K. M. Tanaka et al.: Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 507. (2003) 657-669. o.

- [14] H.K.M. Tanaka, K. Nagamine, S.N. Nakamura, K. Ishida: Radiographic measurements of the internal structure of Mt. West Iwate with near-horizontal cosmic-ray muons and future developments
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 555. (2005) 164-172. o.
- [15] D. Varga, G. Hamar, G. Kiss: Asymmetric Multi-Wire Proportional Chamber with reduced requirements to mechanical precision
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 648. (2011) 163-167. o.
- [16] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, D. Varga: CCC-based muon telescope for examination of natural caves
Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 1, 229–234. o.
- [17] L. Oláh, H. K. M. Tanaka, H. Gergő, V. Dezső: Muographic Observation of Density Variations in the Vicinity of Minami-Dake Crater of Sakurajima Volcano
Journal of Disaster Research, Volume 14 (2019), 701-712. o.
- [18] <https://news.muographix.u-tokyo.ac.jp/wp-content/uploads/2018/12/3-1024x699.jpg>
- [19] László Oláh, Hiroyuki K. M. Tanaka, Dezső Varga: Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles
American Geophysical Union (2022), 159. o.
- [20] L. Balázs et al.: 3-D muographic inversion in the exploration of cavities and low-density fractured zones.
Geophysical Journal International. 236. (2023) 700-710. o.
- [21] G. Gallo, et al.: Three years of muography at Mount Etna: results and perspectives
Journal of Instrumentation Volume 17, No. 02 (2022)
- [22] K. Morishima, M. Kuno, A. Nishio, et al.: Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons
Nature 552 (2017), 386–390. o.
- [23] I. Bikit et al.: Novel approach to imaging by cosmic-ray muons
EPL 113 (2016)
- [24] <https://cms.cern/content/homeland-security>

- [25] H. K. M. Tanaka: Muometric positioning system (μ PS) with cosmic muons as a new underwater and underground positioning technique
Scientific Reports 10. (2020)
- [26] L. Fodor, Sz. Kövér: Kirándulásvezető Bódvarákó és az Esztramos-hegy közötti területen
Calce et malleo – Mésszel és kalapáccsal: 12. Közettani és Geokémiai Vándorgyűlés (2022)
- [27] <https://termeszetvedelem.hu/magyarorszag-barlangkataszter-szerinti-felosztasa/>
- [28] L. Kordos: Magyarország Barlangkataszteri felosztása
Karszt és Barlang, 1-2. félév (1972), 25-32. o.
- [29] A. Kollár: Az esztramosi Rákóczi-barlangok vízalatti részeinek kutatása
Karszt és Barlang, 1-2. félév (1979), 17-20. o.
- [30] L. Kordos: Magyarország barlangjai
Gondolat kiadó, Budapest (1984), 253-255. o.
- [31] L. Kordos: Az Esztramos barlangjainak ismeretéhez
Karszt és Barlang, 1-2. félév (1973), 7-12. o.
- [32] L. Kordos: Az Esztramos barlanggenetikai, hegységszerkezeti és üledékföldtani vizsgálata
Karszt és Barlang, 1. félév (1974), 21-26. o.
- [33] G. Charpak, F. Sauli: Multiwire Proportional Chambers and Drift Chambers
Nuclear Instruments and Methods 162 (1979), 405-428. o.
- [34] L. Oláh et al.: Cosmic Muon Detection for Geophysical Applications
Advances in High Energy Physics (2013). 10.1155/2013/560192.
- [35] D. Varga, G. Nyitrai, G. Hamar, L. Oláh: High Efficiency Gaseous Tracking Detector for Cosmic Muon Radiography
Advances in High Energy Physics Volume 2016, 1962317
- [36] Á. Gera et al.: Gaseous Detectors for Field Applications: Quality Control, Thermal and Mechanical Stability
Instruments. 6. 74. 10.3390
- [37] G. Nyitrai, G. Hamar, D. Varga: Towards low gas consumption of muographic tracking detectors in field applications
J. Appl. Phys. 129, 244901 (2021)

- [38] B. Rábóczki: Müográfiai képalkotás hátterének vizsgálata
BSc diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem (2022), 19-21. o.
- [39] N. Lesparre et al.: Geophysical muon imaging: Feasibility and limits
Geophysical Journal International 183. (2010), 1348 - 1361. o.
- [40] G. Nyitrai: Particle physics detector development and application for muography
PhD disszertáció, Budapesti Műszaki Egyetem (2024), 67-76. o.
- [41] M. Guan et al.: A parametrization of the cosmic-ray muon flux at sea-level
(2015)