

**SŰRŰSÉGANOMÁLIÁK HELYÉNEK MEGHATÁROZÁSA NAGY
ENERGIÁJÚ KOZMIKUS MŰONOK SEGÍTSÉGÉVEL**

**LOCATING OF DENSITY ANOMALIES USING HIGHLY-
PENETRATING COSMIC MUONS**

SURÁNYI GERGELY^{1,*} – MOLNÁR GÁBOR¹ –
BARNAFÖLDI GERGELY GÁBOR² – HAMAR GERGŐ^{2,3} –
MELEGH HUNOR GERGELY² – OLÁH LÁSZLÓ^{2,3} – VARGA DEZSŐ^{2,3}

¹MTA-ELTE Geológiai Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport

²MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont,

³MTA „Lendület” Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoport

*e-mail: surda007@gmail.com

Abstract: Locating an unknown underground cavern is still a big challenge despite the state-of-the-art developments of geophysical tools and techniques. One of the most recent innovations on this field is muon radiography or muon tomography, where highly penetrating cosmic muons are used to map the density distribution in the ground, similarly to the X-ray technology at larger-scale. Our portable, high-sensitivity and high-resolution muon detector – developed by the REGARD Group of Wigner Research Centre for Physics of the Hungarian Academy of Sciences – is an efficient device to locate unknown cavities. We present here a successful research project performed at the Királylakai-tunnel system, in Budapest, the capital of Hungary, where an unknown cavern have been discovered by the measurement of the cosmic ray.

Bevezetés

A kozmikus müonok geofizikai célú felhasználása az 1960-as évekig nyúlik vissza. Az első igazán komoly kísérlet a Nobel díjas Luis W. Alvarez és munkatársainak Piramis Programja volt (ALVAREZ *et al.* 1970). Itt a gízai Khefren piramis egy már ismert kamrájába helyezett müondetektorral próbáltak ismeretlen, de feltételezett üregeket találni. A több mint egy évig tartó mérésorozat kettős eredményt hozott: nem találtak két méternél nagyobb, ismeretlen üreg jelenlétére utaló nyomot, de bizonyították, hogy a módszer alkalmas nagyméretű objektumok belső sűrűségviszonyinak feltérképezésére.

A kozmikus müonok detektálásán alapuló geofizikai kutatások a múlt század végén kezdtek jobban elterjedni, amikor a kísérleti részecskefizika fejlődése lehetővé tette jó hatásfokú és felbontású, és nem utolsósorban megfizethető árú hordozható detektorok alkalmazását. Azóta több kü-

lönböző piramiskutató projekt is zajlott, illetve zajlik jelenleg is (ALFARO, GRABSKI 2008; <http://www.scanpyramids.org>), emellett alkalmazni kezdték a módszert nagyméretű geológiai struktúrák, elsősorban vulkánok tanulmányozására (LESPARRE *et al.* 2012, TANAKA 2013) Eközben megindultak a fejlesztések a jóval kisebb méretű objektumok pontos leképezésének irányába is elsősorban polgári védelmi alkalmazások céljára (SCHULTZ *et al.* 2004).

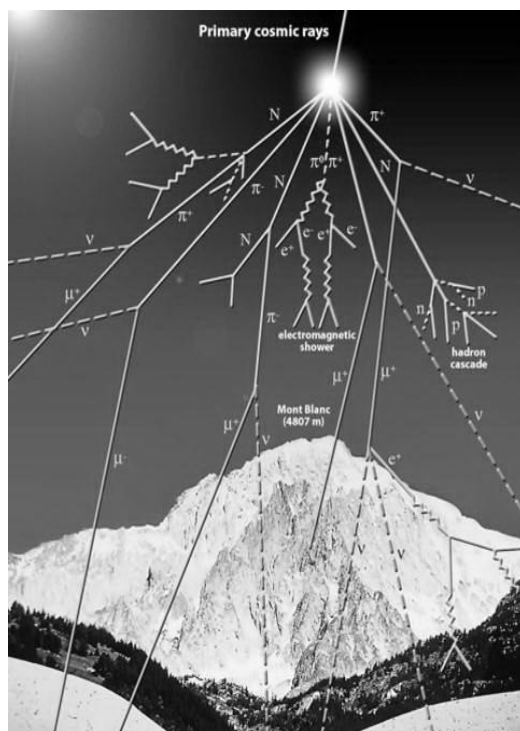
Bármilyen objektum legyen is a vizsgálat tárgya, a mérés alapja azonos: a müonok töltött részecskék, az anyagon való áthaladáskor ionizációs fékeződés miatt folyamatosan veszítenek energiájukból. Így a fluxus is folyamatosan csökken, a csökkenés arányos a sűrűség hosszal, amely a megtett út és a pálya menti sűrűség szorzata. A fluxus mérésével megadható, hogy a müonok mekkora sűrűség hossz után érkeztek a detektorba. Az elméletileg vártnál nagyobb fluxus sűrűség hossz csökkenésre, kisebb fluxus sűrűség hossz többet utal. Ezt a leképezési eljárást a szakirodalom müontomográfiának nevezi, amely alapvetően sűrűségkülönbségek kimutatására alkalmas és minél nagyobb a sűrűségkontraszt, annál hatékonyabban működik.

A barlangkutatásban, de bármilyen földalatti üreg esetében pontosan ez a helyzet, mert az üreg sűrűsége gyakorlatilag nullának tekinthető, míg a befoglaló kőzet sűrűsége például mészkő esetén $2,7\text{g/cm}^3$, de általában sem várható 2g/cm^3 alatt, hiszen számottevő méretű üreg csak állékony kőzetben tud kialakulni. Levegővel kitöltött üregben a fluxus gyakorlatilag nem csökken, tehát abban az esetben, ha üreg van a felszín és a detektor közötti kőzettestben, nagyobb fluxust mérünk, mint azt tömör kőzet esetén várhatnánk. Így a müonfluxus, a geometriai méretek (elvi kőzetvastagság), valamint a kőzet sűrűségének ismeretében jó eséllyel tudunk üregeket kimutatni a felszín és a detektor közötti térrészben. Ehhez természetesen olyan mérési helyszín kell, ahol a detektort a vizsgálandó kőzettest alá tudjuk elhelyezni.

A következőkben röviden ismertetjük a kozmikus müonok eredetét és detektálásuk módszereit, valamint bemutatunk egy hazai helyszínen lefolytatott méréssorozatot, ahol sikerült egyértelműen kimutatni legalább egy, ismeretlen, ember számára valószínűleg járható méretű üreget, egy természetes barlangtermet. Ez az eredmény rendkívül fontos mérföldköve a kutatási projektnek, és reményt ad arra, hogy a módszer hamarosan alkalmazható eljárás lesz a karszt- és barlangkutatók eszköztárában.

A kozmikus müonok eredete és detektálásuk

A Földet folyamatosan bombázzák a kozmikus részecskék, főleg nagy energiájú protonok és He atommagok valamint kis részben nehezebb atomok magjai. E részecskék a Naprendszeren, sőt, jelentős részben a galaxisunkon kívülről érkeznek, irányeloszlásuk izotrópnak tekinthető. Ezek az általában igen nagy energiájú primer részecskék kb. 10-40 km magasan a légkör összetevőinek atommagjaival ütközve azok szétesnek és részecskezápороkat hoznak létre. A keletkező igen rövid élettartamú pion és kaon részecskék még a légkörben nagy energiájú müonokká bomlanak. A müonok – a fénysebességhez közeli sebességükből adódó relativisztikus effektusok miatt – már elég hosszú élettartamúak ahhoz, hogy elérjék a földfelszínt, és abba akár néhány kilométeres mélységbe is behatoljanak. A müonok fluxusa igen kicsi: tengerszinten a felszín minden tenyérnyi darabkáján másodpercenként egy müon hatol át (1. ábra).

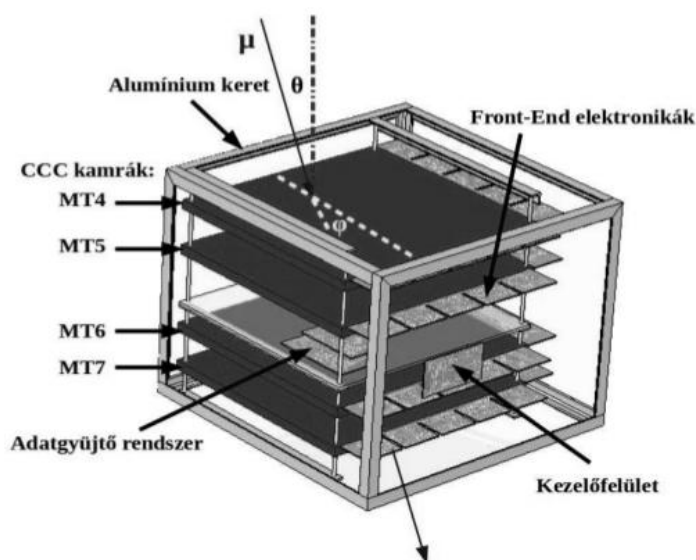


1. ábra: A nukleonokból (N) álló primer kozmikus részecskék, pionokat (π), majd bomlásukkal müonokat (μ) keltenek a légkörben.

Fig. 1: Muons (μ) generated by primary cosmic ray via decay of pions (π) in the atmosphere.

A müonok detektálására több, töltött részecskék kimutatására alkalmas módszer használatos. A müontomográfiában alkalmazott technológiák közül legelterjedtebb a szcintillációs (NAGAMINE 1995), az emulziós

(TANAKA 2007) és a sokszálas proporcionális kamrával történő detektálás. Az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban működő REGARD csoport ez utóbbi utat járja és az elmúlt évek alatt több különböző méretű és felbontású müondetektort fejlesztett ki (BARNAFÖLDI *et al.* 2012, OLÁH *et al.* 2012, OLÁH *et al.* 2013). A jelen kutatásban alkalmazott műszer rendkívül jó paraméterekkel rendelkezik: nagy hatásfokú (>95%), jó szögfelbontású (<1°), és alacsony fogyasztású (~5W), így akár akkumulátorokról is napokig üzemeltethető. A detektor 5db lapos, négyzetes alakú, sokszálas, gáztöltésű proporcionális kamrából áll, amelyekben az áthaladó töltött részecske a primer ionizáció és az azt követő gázerősítés hatására a szegmentált katódokban és a rá merőleges anódszálakban mérhető nagyságú elektromos jelet kelt. Ezt detektálva minden kamrán megadható az a pont, ahol a részecske áthaladt. Az egymás alatti kamrák ezen pontjaira illesztett egyenes adja meg a detektor rendszerében a részecske pályáját, amelyet a geodéziai adatok ismeretében a függőlegestől számított zenitszögre és a földrajzi irányt jelképező azimutra lehet átszámolni (2. ábra).



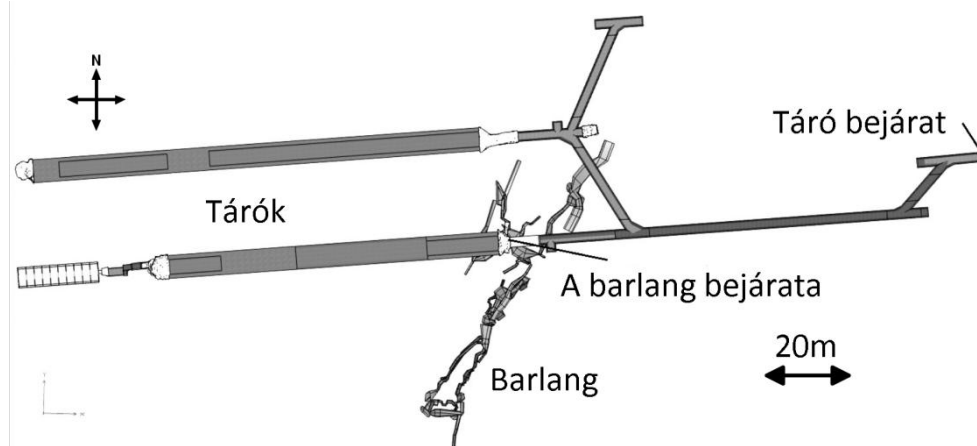
2. ábra: A detektor egyszerűsített szerkezete egy θ szögben beeső müonpályával (μ).
 Fig. 2: The simplified model of the detector with a muon track (μ) with zenith angle, θ .

Ezekből az adatokból, a detektor hatásfokának figyelembevételével adódik az irány szerinti fluxuseloszlás, amely egy mérési pozíció esetén egy kb. 90 fokos nyílású, a detektor síkjára merőleges tengelyű kúp belsejéből ad információt, több elforgatott és megdőntött detektorpozíció esetén pedig akár a teljes felső félteret befoglalhatja. Egy mérésből számítható egy adott ano-

mália iránya, valamint – a detektor feletti kőzetvastagság és sűrűség ismeretében – az anomália részecskepálya-irányú kiterjedése is. Kettő vagy több különböző pozícióból, de ugyanazon térrész felé irányított mérés esetén kedvező esetben akár egyszerű háromszögeléssel is meghatározható egy sűrűséganomália pontos helye és nagysága is. Több mérés esetén, bonyolultabb esetben az anomáliák helyét és kiterjedését inverzióval lehet meghatározni.

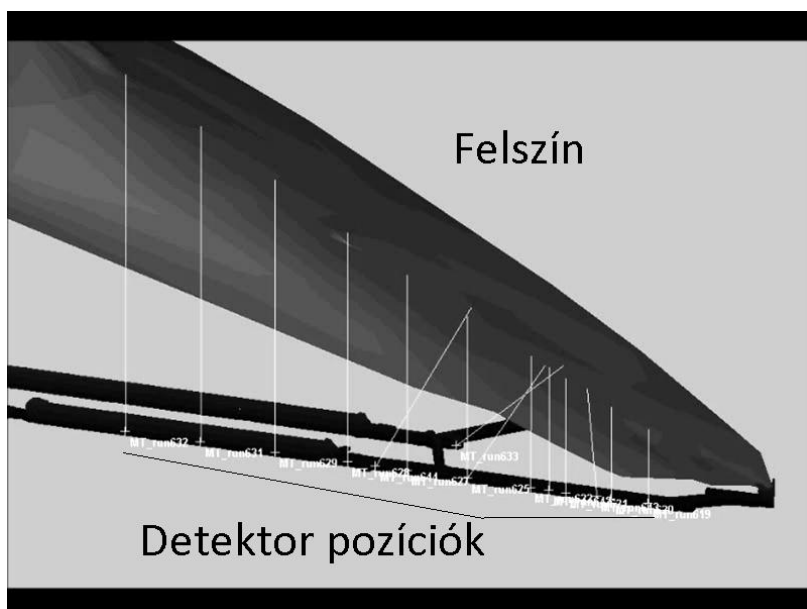
A mérési helyszín

A Hármashatár-hegy oldalában az ötvenes években hajtott tárórendszer régóta ismert volt a budapesti föld alatti világot kedvelők körében. Intenzív kutatása néhány évvel ezelőtt kezdődött, amikor az Ariadne Karszt- és Barlangkutató Egyesület tagjai felfedeztek egy, a tárókból nyíló természetes üreget. A sorozatos feltárásoknak köszönhetően a Királylakai-barlangnak keresztelt járatrendszer a Hármashatár-hegy leghosszabb barlangja lett (~300m), igazi kis gyöngyszem a hófehér cseppköveivel és gyönyörű kristálykiválásaival. A befoglaló kőzet triász tűzköves dolomit, amely nem igazán a jó karsztosodásáról híres, ennek ellenére a barlangban több helyen találhatóak nagyméretű, oldással kialakult termék, hasadékok is. A barlang a hegybe merőlegesen, kb. 200m hosszan bevezető táró felénél nyílik, a felszínhez legközelebbi ismert pontja kb. 50m. A tárórendszer legnagyobb része téglá- vagy betonfallal burkolt, további barlangjáratra utaló jel sehol nincs (3. ábra).



3. ábra: A Királylakai tárórendszer és a barlang felülnézetből.
Fig 3.: The layout of the Királylakai tunnel system and the Királylakai cave.

A barlang feltárása után valószínűsíthető volt, hogy további ismeretlen járatok is lehetnek még a közelben, és mivel a tárórendszer több szempontból is ideális volt a mérésre, az első komolyabb műontomográfias üregkeresési projektet itt indítottuk el. A tárókban a bejárat közeléből indulva, ahol a függőleges kőzetvastagság 20m, fokozatosan haladtunk a hegy belseje felé, egészen odáig, ahol már 100m a zenitirányú vastagság. A mérési helyek közötti távolság 15-20m volt, néhány helyen az adatok ismeretében besűritettük a mérést. Összesen 28 helyen végeztünk mérést, néhány esetben több elforgatott detektor állásnál (4. ábra). Egy-egy helyen a mérési idő 10-15 nap volt, a teljes mérési kampány közel egy évig tartott.



4. ábra: A tárók szerkezeti rajza a detektorpozíciókkal és zenitirányokkal (világos vonalak), valamint a felszínnel.
 Fig 4.: The scheme of the tunnel system with the zenith lines(white) of different detector positions(white crosses) and the surface.

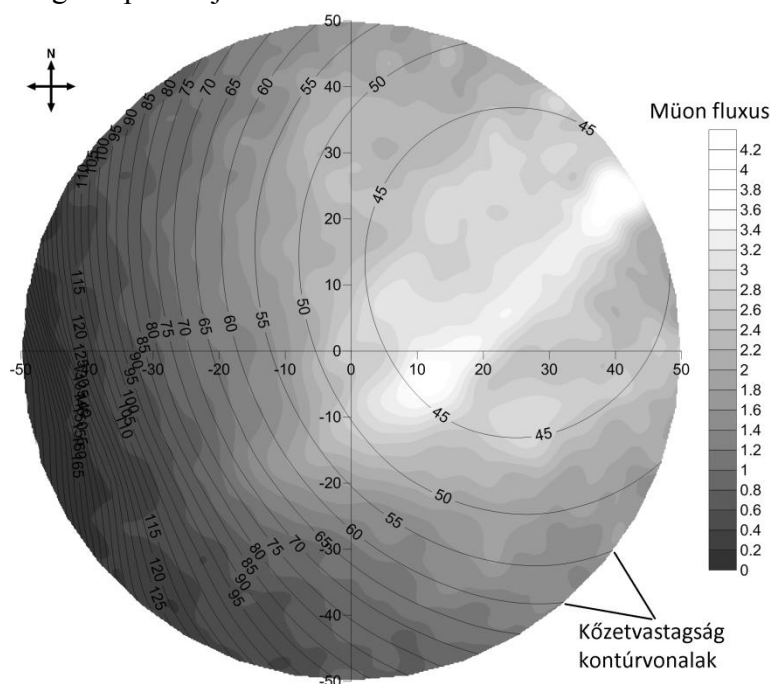
A fluxusméréseket megelőzően, illetve azokkal párhuzamosan zajlott a részletes geodéziai felmérés. A tárórendszert teljes egészében 3D lézerszkennelvel mértük végig, a felszínt 100-150 m²-enként felvett RTK GPS pontokkal térképeztük fel. A geodéziai adatokból számított kőzetvastagságok hibája egyik mérési pont és irány esetében sem haladja meg a fél métert.

Ezen kívül a felszínen öt vonalon egyenáramú geoelektromos szelvényezést is végeztünk, elsősorban a szálkő-lejtőtörmelék-talaj határok minél pontosabb ismerete érdekében. Ez egyrészt fontos adat az elvi sűrűség-

hosszak meghatározásához, másrészt segíti a müonfluxusokból számolt kőzetvastagságok megbízhatóságának ellenőrzését.

A mérési eredmények feldolgozása

A müontomográf segítségével rögzített nyers mérési adatokon először elvégeztük a detektor természetes, 161x161-es felbontású binelési rendszere szerinti csoportosítást, majd kiszámítottuk az egyes irányok mérésének hatásfokát. Ezekkel, a bin-területekkel, a detektor adott irányú geometriai hatásfokával (akceptancia) és a mérési idővel normálva kaptuk az irány szerinti fluxusokat. A fluxusok bizonytalanságát alapvetően az adott irányú binbe eső müonpályák (trackek) száma, kisebb mértékben a hatásfok bizonytalansága határozza meg. 50 méteres fedő kőzetvastagság és egy hét mérési idő esetén ez 5-10%-os érték a detektorsíkra merőleges irányban (zenitirány), és 15-20% 45 foknál, a kiértékelésben felhasznált tartomány határánál. A feldolgozás során a különböző simításokkal a bizonytalanság – természetesen a felbontás rovására – csökkenthető. Egy mérési pozíció tehát egy kb. 90 fokos nyílásszögű kúp belsejéből ad információt.



5. ábra: Müon fluxus [$1/(m^2*sr*s)$] (szürkeárnyalat) és a kőzetvastagságok [m] (folytonos kontúrvonalak) egy mérés polárkoordinátás térképén.

Fig 5.: Muon flux [$1/(m^2*sr*s)$] (grayscale) and rock thickness [m] (continuous contour lines) on polar coordinate map of a measurement.

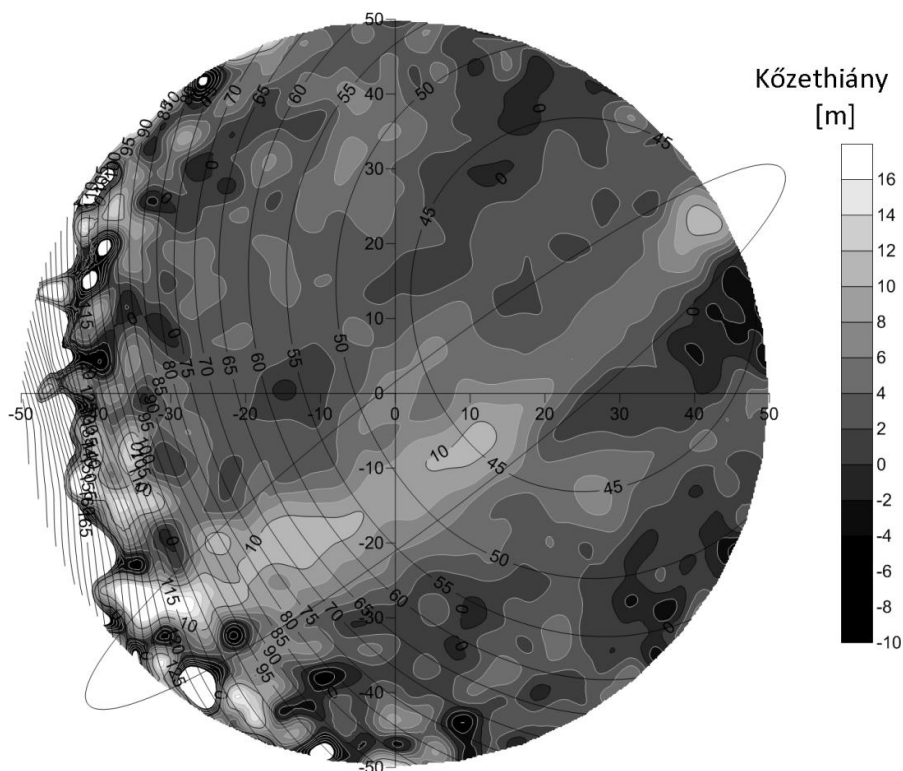
Az 5. ábrán látható egy mérés polárkoordinátás fluxustérképe. A tengelyek metszete a detektor zenitiránya, a tengelyeken lévő értékek az adott irányú zenitszöget jelentik. A szürkeárnyalatos müonfluxus mellett szintvonalasan feltüntettük a geodéziából származó kőzetvastagságokat is. Ahogy várható, általánosan kisebb vastagságnál jelennek meg a nagyobb fluxusok, de az is jól látszik, hogy ez a mérés nem homogén sűrűségeloszlású kőzet alatt történt.

A következő lépés, hogy az adatokat a detektor rendszeréből lokális koordinátarendszerbe transzformáljuk. Geodéziai mérések segítségével kiszámítjuk az adott irányokban a felszín távolságát, így levonva a müonok táróban megtett útját, és megbecsülve az adott irányú kőzetoszlop átlagos sűrűségét megkapjuk az elvi sűrűség-hosszakat. Ez utóbbi lépés, azaz a sűrűségek becslése az egyik legnehezebb feladat, amelyek a modell legnagyobb bizonytalanságú paraméterei. Tömör, felszínig tartó, hézagmentes kőzet esetén ez kevésbé problematikus, de karsztosodásra hajlamos kőzetben, így jelen esetben is, a jó sűrűségbecslés nehéz feladat. További probléma, hogy a szálkő nem a felszínig tart, azt a legtöbb helyen változó vastagságú, alacsony és bizonytalan sűrűségű talajos lejtőtörmelék fedi. Ezért a geoelektromos mérések rendkívül hasznos segítséget adtak a szálkő-talaj határ megállapításában, de még ebben az esetben is nagy a bizonytalanság, mert az elektromos ellenállásszelvény nem transzformálható át egyértelműen sűrűségi-szelvényre. A mérések elemzése során több illesztés eredményeként a területen az egységes $2,5\text{g/cm}^3$ átlagsűrűség használata bizonyult a legjobb választásnak.

Tekintve, hogy a müonok felszíni fluxusa állandónak tekinthető, és csak a zenitszögtől függ, így adott kőzetest alatt mért fluxusok csak a müonok kőzetben megtett pályája mentén integrált sűrűség-hosszaktól függenek. A mért fluxusokat egy sűrűség-hossz-fluxus-zenitszög összefüggés ismeretében már át lehet váltani sűrűség-hosszakra, amely az átlagos sűrűség ismeretében átszámolható kőzetvastagsággá. Ilyen függvényt lehet saját mérésekből is konstruálni, ha elég sok olyan hely és irány van, ahol a sűrűség kis bizonytalansággal becsülhető. Jelen mérésnél azonban célszerűbbnek látszott a fellelhető néhány irodalmi adat egyikének átvétele (*LESPARRE et al.* 2012). A fluxus-sűrűség-hossz átváltás és az átlagos sűrűség becslése után a müon térkép már közvetlenül kőzetvastagság dimenziójú. Utolsó lépésként ezeket az értékeket ki kell vonni a geodézia által meghatározott kőzetvastagságból.

Eredményként azt kapjuk, hogy a különböző irányokban hány méternyi kőzet hiányzik ($2,5\text{g/cm}^3$ -es sűrűséget feltételezve), azaz a müon teljes, felszín és a detektor között megtett útjából mennyi az, ami levegővel

kitöltött üregben halad (6. ábra). Ezt természetesen nem úgy kell értelmezni, hogy minden méternyi különbség ténylegesen járható barlangüreget takar, hiszen egy nagyobb, laza üledékkal vagy törmelékkel kitöltött hasadék vagy terem hatása ugyanolyan lehet, mint egy kisebb levegős üregé, de 6-8m-nél nagyobb közethiány ~50m-es elvi közetvastagság esetén barlangméretű üreg jelenlétére utal.

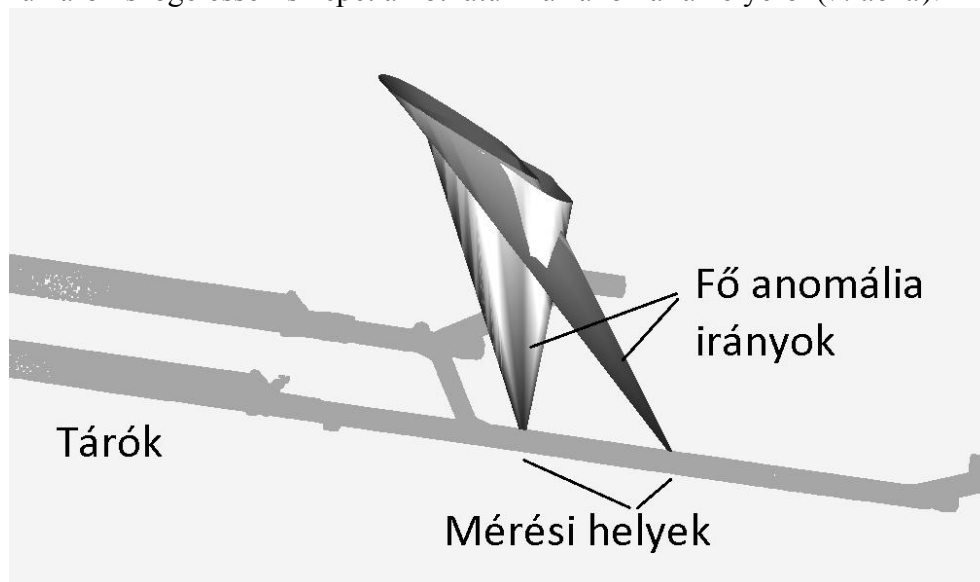


6. ábra: A „hiányzó” közet vastagsága [m] (szürkeárnyalat, pozitív értéke közethiányra utalnak) és a geodéziával mért elméleti közetvastagságok [m] (folytonos kontúrok). Az ellipszissel jelölt részen egy nagyobb hasadék hatása látható.

Fig 6.: The „missing” rock thickness [m] (grayscale, positive values indicates the voids) and the theoretical rock thickness measured by geodesy [m] (continuous contour lines). The ellipse indicates a significant anomaly caused by a larger fissure.

Annak eldöntése, hogy mi az, ami ténylegesen barlang, és mi az, ami csak csökkent sűrűségű zóna vagy zónák együttes hatása nem egyszerű feladat, és egy mérésből rendszerint nem is lehet egyértelműen megoldani. Figyelembe kell venni a terület földtani/barlangtani adottságait, a reálisan elképzelhető sűrűségviszonyokat, a felszín közeli részek hatását, és a mérés bizonytalanságát is. Mindenképpen segíti az értelmezést, ha van másik mérés is, amely a kérdéses közettestet más szögből látja. A polárkoordinátás térképek sűrűséganomáliái a térben kúpokként jeleníthetők meg, melyek

csúcsa a detektor, hiszen egy anomáliáról egy mérésből csak az irány határozható meg, a detektortól mért távolság nem. Két mérés esetén már egyszerű háromszögeléssel is képet alkothatunk az anomália helyéről (7. ábra).

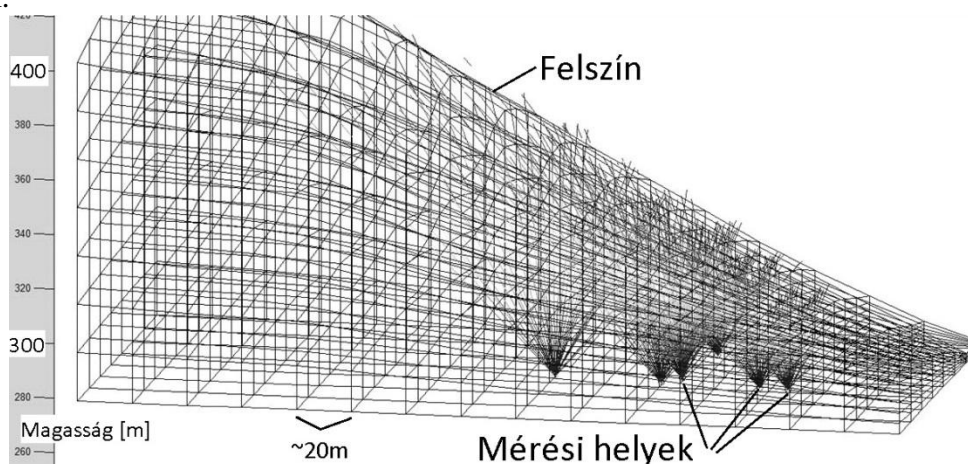


7. ábra: Felszín közeli anomália láthatósága két különböző mérési pontból.
Fig 7.: Simplified view of a near surface anomaly from two different measurement points.

Ekkor lényegesen egyértelműbben lehet értelmezni a kőzetvastagság-anomália térképeket. Egy markáns üreg leképezéséhez elméletileg akár két mérés is elegendő lenne, de karsztos környezetben a helyzet általában bonyolultabb, és az összes rendelkezésre álló mérési adat együttes feldolgozásával lehet csak célt érni. Az erre szolgáló módszer a geofizikai inverzió. Az inverzió során a vizsgált kőzettestet cellákra osztjuk, és minden cellára megadunk egy kezdő sűrűség értéket. Ez lesz a kezdeti sűrűség modell. Ezután minden mérési hely minden mérési irányára kiszámítjuk a direkt feladatot, vagyis azt, hogy az adott irány mely cellákat milyen hosszúságban metsz, majd ezeket a hosszokat az adott cellákra vonatkozó kezdő sűrűség értékekkel megszorozva és ezeket összegezve megkapjuk az elvi sűrűség-hosszakat. A celláknak konstans átlagos sűrűséget kezdőértéknek megadva az eljárás eddig megegyezik a grafikus kiértékeléssel mivel az adott irány cellákat metsző hosszainak összege megegyezik az adott iránynak a felszínig tartó hosszával. Amennyiben ismernénk valamennyi cella sűrűségét és a méréseinket nem terhelnék hibák, ezek a számolt sűrűség-hosszak jó egyezést mutatnának a mért sűrűség-hosszakkal. Ez matematikailag úgy is kifejezhető, hogy a számolt és mért sűrűség-hossz különbségek négyzeteinek összege minimális, amely a Gauss-féle legkisebb négyzetek módszerének

alapfeltevése. A módszernek az adott problémára való alkalmazása során a szélsőérték keresés egy algebrai egyenletrendszer megoldására egyszerűsödik, ami egyetlen lépésben az egyes cellák sűrűség korrekció értékeit szolgáltatja. Ezeket a sűrűség korrekció értékeket az eredeti modellhez hozzáadjuk, és az így létrejött modellt fogadjuk el végeredménynek. A modell értelmezésénél ugyanúgy figyelembe kell venni az összes lehetséges ismerttet, például hogy van-e a kiszámított sűrűségértékeknek földtani realitása, illetve hogy az adott felbontásnál mekkora anomáliát lehet ténylegesen barlangként értelmezni, és hogy a modell összhangban van-e a többi mérési adattal, (jelen esetben például a felszínen mért geoelektromos adatokkal).

A Királylaki-táró modellezése a legfrekvenciáltabb részen 2x2m-es horizontális felbontással történt, a cellák magassága a táró feletti lejtőt követve 2-től 5 méterig változik (8. ábra). Ezzel a felbontással már jól kimutathatóak akkora üregek, amiket a környék geológiájának ismeretében várhatunk.

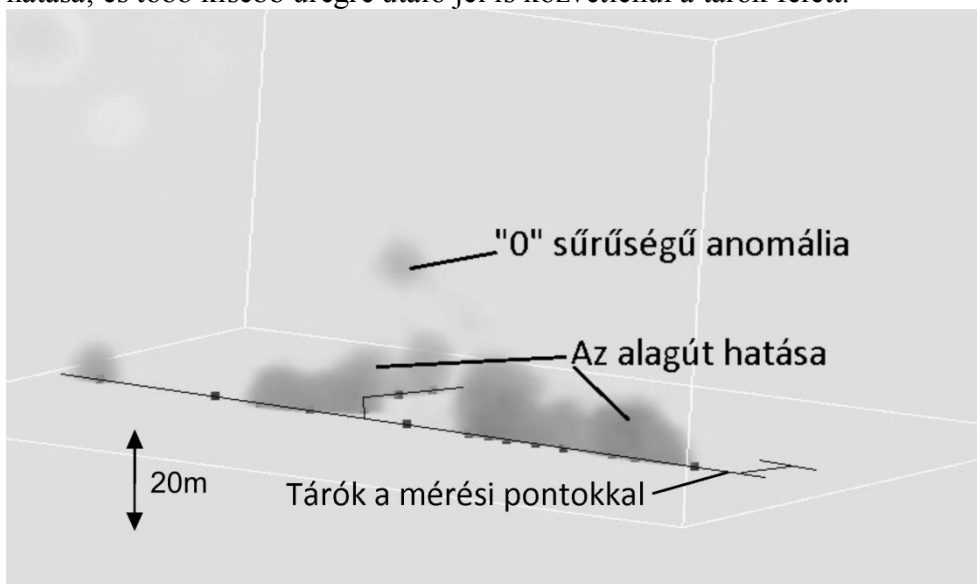


8. ábra: Az inverzió cellafelosztásának egyszerűsített képe néhány mérés néhány müonpályájával.
Fig 8.: Simplified grid of the inversion with some of the muon tracks of some measurements.

A Királylaki-táróban lezajlott méréssorozat eredményeinek értelmezése

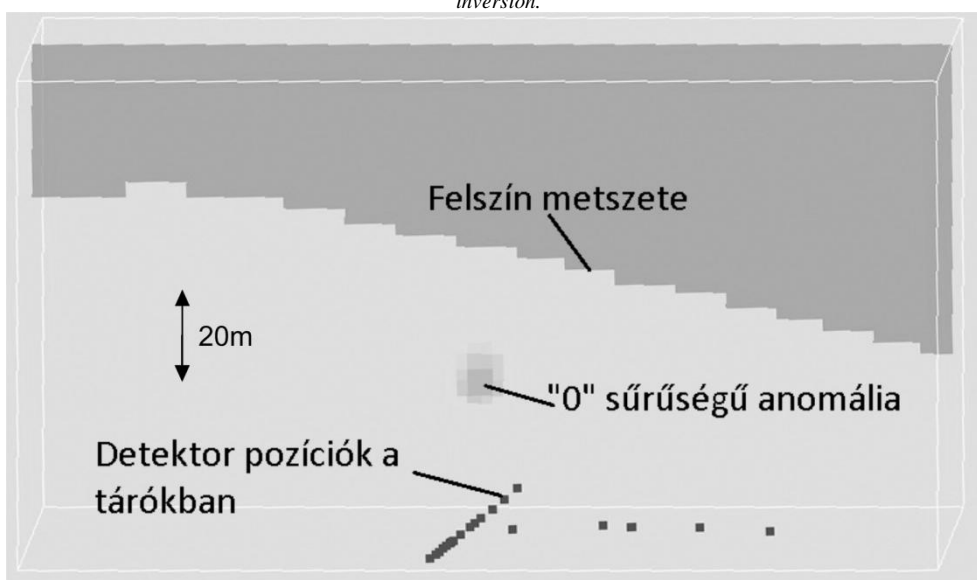
A méréssorozat egy éve alatt 28 helyen közel tízmillió müon pálya irányát mértük meg. Az ezekből számolt fluxus adatokat felhasználva elkészítettük a tárórendszer feletti közettest inverziós sűrűségmodelljét. Az eredmények megjelenítése még számítógépen is nehéz feladat, ezért itt csak a leegyszerűsített anomáliaképet közöljük. Az ábrákon a sötétebb árnyalatok jelzik azokat a zónákat, ahol a sűrűség annyira lecsökkent, hogy az a gyakorlatban csak üreg jelenlétével magyarázható. A 9. és 10. ábrákon látható, hogy egy nagyobb, „0” sűrűségű anomália jelenik meg a tárók elágazási pontja felett,

körülbelül félúton a tárók és a felszín között. Ezen kívül jól látszik az alagút hatása, és több kisebb üregre utaló jel is közvetlenül a tárók felett.



9. ábra: Az inverzió eredményének 3-dimenzióban. A sötétebb foltok jelzik az alacsony sűrűségű helyeket. Folytonos vonallal a tárók, pontokkal az egyes mérési helyek vannak ábrázolva. Világos vonalak az inverziós tartományt befoglaló téglatest élei.

Fig 9.: The result of the inversion in 3-dimension. Dark spots indicate the low density areas. The continuous line shows the tunnel, the dots are the measurement points. White lines indicates the bounding box of the volume of the inversion.



10. ábra: Az anomália képe egy a fő táróra merőleges metszeten.

Fig 10.: The main density anomaly on a vertical section perpendicular to the main tunnel. Dots are the measurement points in the tunnel, the staged line is the surface.

A modell alapján egyértelműen ki lehet jelenteni, hogy sikerült legalább egy, eddig ismeretlen, ember számára minden bizonnyal járható üreget kimutatnunk. A sűrűség-anomália helyzete, mérete és az inverziós eredmények jó összhangja az egyes mérések anomáliaképével feljogosít minket arra, hogy kijelenthessük: a kozmikus sugárzás szögeloszlásának mérésével sikerült kimutatni egy ez idáig ismeretlen barlangjárat helyét a Királylaki-táró felett.

Összefoglalás

A kozmikus sugárzás müon komponensének mérésén alapuló üregekutatási módszerrel – ha a geometriai feltételek adottak – lehetséges ismeretlen, más technikával nem kimutatható barlangjáratokat találni. A detektor technika fejlődésével lehető vált a müonok pályájának folyamatos, terepi körülmények között történő egyszerű, hatékony és pontos mérése. A bemutatott eljárást nem csak barlangkutatók hasznosíthatják, de érdeklődésre tarthat számot geológiai alap- és alkalmazott kutatásoknál, régészeti objektumok belső szerkezetének feltérképezésénél, vagy bányászati rekultivációnál is.

Köszönetnyilvánítás:

Kutatásunkat az Magyar Tudományos Akadémia Lendület Programja (LP2013-60) és az OTKA NK-106119 számú pályázata támogatta. Barnaföldi G.G. szerzőt az MTA Bolyai János Tudományos Ösztöndíj támogatta.

IRODALOM

ALVAREZ, L.W. – ANDERSON, J.A. – BEDWEI, F.EL – BURKHARD, J. – FAKHRY, A. – GIRGIS, A. – GONEID, A. – HASSAN, F. – IVERSON, D. – LYNCH, G. – MILIGY, Z. – MOUSSA, A.H. – SHARKAWI, M. – YAZOLINO, L. (1970) Search for hidden chambers in the Pyramides. – Science 167 pp. 832-839. (DOI: 10.1126/science.167.3919.832)

ALFARO, R. – GRABSKI V. (2008) Searching for possible hidden chambers at the Pyramide of the Sun. – Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference 5 pp. 1265-1268

BARNAFÖLDI G. G. – HAMAR G. – MELEGH H. – OLÁH L. – SURÁNYI G. – VARGA D. (2012) Portable cosmic muon telescope for environmental applications – Nuclear Instruments & Methods in Physics 689 pp. 60-69 (DOI: 10.1016/j.nima.2012.06.015)

<http://www.scanpyramids.org/>

- LESPARRE, N. – GIBERT, D. – MARTEAU, J. – KOMOROWSKI, J.-C. – NICOLLIN, F. – COUTANT, O.* (2012) Density muon radiography of La Soufriere Guadeloupe volcano: comparison with geological, electrical resistivity and gravity data. – *Geophysics Journal Int.* 190(2) pp. 1008-1019. (DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05546.x)
- NAGAMINE, K., – IWASAKI, M. – SHIMOMURA, K. – ISHIDA, K.* (1995) Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction – *Nuclear Instruments & Methods A* 356(2) pp. 585-595. (DOI:10.1016/0168-9002(94)01169-9)
- OLÁH L. – BARNAFÖLDI G. G. – HAMAR G. – MELEGH H. – SURÁNYI G. – VARGA D.* (2012) CCC-based muon telescope for examination of natural caves. – *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 1(2) pp. 229-234. (2012) (DOI:10.5194/gi-1-229-2012)
- OLÁH L. – BARNAFÖLDI G. G. – HAMAR G. – MELEGH H. – SURÁNYI G. – VARGA D.* (2013) Cosmic Muon Detection for Geophysical Applications. – *Advances in High-Energy Physics* 7 p. (<http://dx.doi.org/10.1155/2013/560192>)
- SCHULTZ, L.J., – BOROZDIN K. N. – GOMEZ, J.J. – HOGAN, G.E. – MCGILL, J.A. – MORRIS, C.L. – PRIEDHORSKY, W.C. – SAUNDERS, A. – TEASDAK, M.E.* (2004) Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography – *Nucl. Instrum. Method A* 519(3) pp. 687-694.
- TANAKA, H. K. M. – NAKANO, T. – TAKAHASHI, S. – YOSHIDA, J. – OHSHIMA, H. – MAEKAWA, T. – WATANABE, H. – NIWA, K.* (2007) Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan, – *Geophysical Research Letters*, 34(22) (doi:10.1029/2007GL031389)
- TANAKA, H. K. M.* (2013) Subsurface density mapping of the earth with cosmic ray muons. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* pp. 243-244 239-248. (DOI:10.1016/j.nuclphysbps.2013.09.020)