

Földtudományi kutatások és geotechnikai alkalmazások kozmikus müonok mérésével

OLÁH L.^{1,2,*}, BALÁZS L.^{3,4}, BARNAFÖLDI G. G.⁴, GALGÓCZI G.^{2,3,4}, GERA Á. L.^{4,5},
HAMAR G.^{2,4}, NYITRAI G.^{2,4,5}, SURÁNYI G.⁴, TANAKA H. K. M.^{1,2}, VARGA D.^{2,4}

¹Földregészkutató Intézet, Tokiói Egyetem, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo-to, 113-0032, Japan

²Nemzetközi Virtuális Müográfia Intézet (VMI), Globális

³Eötvös Loránd Tudományegyetem, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

⁴Wigner Fizikai Kutatóközpont, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29–33.

⁵Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9.

*E-mail: olah.laszlo@wigner.hu

A kozmikus eredetű müon elemi részecskék a felső légkörből eljutnak a Föld felszínére, és akár több kilométeres mélységre is behatolnak a kéregbe. A müonok detektálásával feltérképezhető az általuk áthatolt szilárd, folyékony és légnemű közeg sűrűségeloszlása hasonlóan a röntgen-radiográfiához. A kozmikus müonok detektálásán alapuló, passzív és roncsolásmentes képalkotási eljárást müográfianak nevezzük. Ez az újszerű képalkotási technika hozzájárulhat geológiai szerkezet feltárásához, a geofizikai folyamatok jobb megértéséhez, a természeti veszélyek előrejelzéséhez és különböző geotechnikai alkalmazásokhoz.

Oláh, L., Balázs, L., Barnaföldi, G. G., Galgóczi, G., Gera, Á. L., Hamar, G., Nyitrai, G., Surányi, G., Tanaka, H. K. M., Varga, D.: Geoscientific investigations and geotechnical applications by the measurement of cosmic muon particles

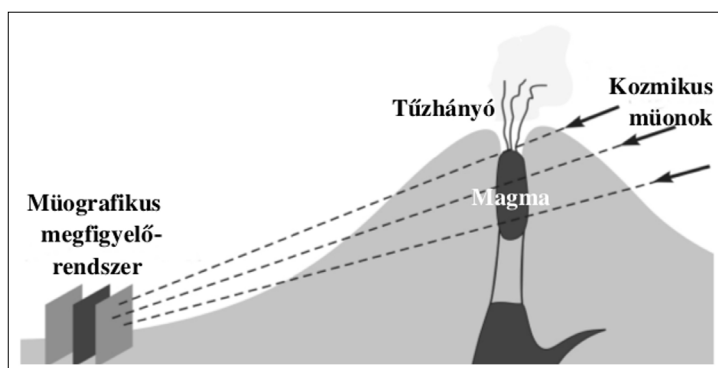
Naturally occurring cosmic ray particles, muons, reach the Earth's surface and penetrate up to several kilometers deep into the Earth's crust. By passively measuring the muons, the density distribution of the penetrated solid, liquid, and gaseous media can be mapped in a manner similar to an X-ray image. This passive and nondestructive imaging technique, based on the detection of muons from cosmic rays, is called muography. This novel imaging technique can contribute to a better understanding of geophysical processes, prediction of natural hazards, and various geotechnical applications.

Beérkezett: 2023. március 24.; *elfogadva:* 2023. március 27.

1. Bevezetés

A müográfia egy roncsolásmentes és passzív képalkotási eljárás, amellyel vizualizálhatók és monitorozhatók a nagyméretű geológiai és ember alkotta struktúrák tömegsűrűség-eloszlásai az ezeken keresztülhatoló kozmikus müonok irányfüggő hozamának mérésével [1–9]. Az 1. ábra egy tipikus müografikus mérési elrendezést mutat [4]. Egy müografikus megfigyelőrendszer, hasonlóan egy teleszkóphoz, méri a tűzhányón keresztülhatoló müonok irányfüggő hozamát a vízszinteshez közeli irányokban. A mért müonhozamból rekonstruálhatók és monitorozhatók a vulkanológiai folyamatok (pl. magmafeláramlás) által okozott sűrűség- vagy vastagságváltozások. Nagyobb anyagmennyiség kevesebb mérhető müont jelent.

Az első müografikus méréseket az 1950-es években végezték el. George és munkatársai az ausztráliai Havas-hegységben található alagútban mérte a müonok hozamának csökkenését az alagút feletti kőzetekben történő elnyelődés következtében [1]. Az 1960-as évek közepén Alvarez és munkatársai telepítettek müondetektorokat az egyiptomi Kefrén piramis belsejébe, hogy a mért és számított hozamokat összehasonlítva detektálják a detektor felett feltételezett rejtett üregeket [2]. A mért hozamok nem mutattak rejtett üregek jelenlétére utaló müontöbbletet a piramis geometriájából és anyagi összetételéből számított hozamhoz képest. Közel három évtized kutatás-fejlesztés lehetővé tette, hogy laboratórium méretű, összetett beltéri infrastruktúrák helyett terepen is használható berendezéseket alkalmazzanak müográfia céljából.



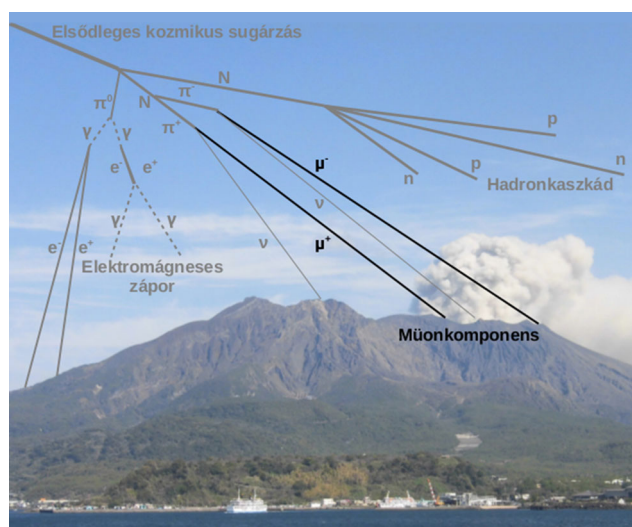
1. ábra | Egy tűzhányó müografikus mérésének vázlata [4]
 Figure 1 | Schematic drawing of a volcano muography [4]

Az 1990-es évek közepén végezték el az első demonstrációs méréseket föld alatti barlangi üregek [3] és egy hegy szerkezetének [4] rekonstrukciójának céljából: Caffau és munkatársai müonok mérésével rekonstruálták az olaszországi Grotta Gigante barlang feletti kőzetvastagságokat, és összehasonlították azokat gravimetriás mérésekkel. Nagamine és munkatársai megmérték a japán Tsukubahegy „árnyékát” müonokkal, és kidolgozták a vulkánok müografijának módszerét. Tanaka és munkatársai nukleáris emulziós filmek felhasználásával készült detektorokat használtak terepi mérésekre, és sikeresen rekonstruálták az első müografikus képet egy aktív vulkánról [5]. Müonmérésekkel feltárták az Aszama vulkán sűrűség-szerkezetét a 2004-es kitörés után. Ez az első úttörő eredmény, majd további mérési eredmények demonstrálták, hogy a természetben előforduló müonok lehetővé tehetik a tudományos szempontból érdekes geológiai struktúrák belsejének passzív, roncsolásmentes és biztonságos távolságból történő felmérését. A müografiai technológiák és a módszertan dinamikusan fejlődnek a 2000-es évek vége óta, ezáltal a müográfia új lehetőségeket biztosít a tudomány és az ipar számára [6–9].

A következő fejezetekben áttekintjük a fizikai alapokat, megfigyelési eszközöket, képalkotási technikákat, és bemutatunk vulkanológiai, mérnöki geofizikai alkalmazásokat a teljesség igénye nélkül. Az ezekhez kapcsolódó hazai vonatkozású munkák közül is kiemelünk néhányat. Végül rövid kitekintést nyújtunk a megvalósíthatónak várt jövőbeli fejlesztésekről, kutatásokról.

2. A müográfia kísérleti aspektusai

A müonok az elektronokéhoz hasonló fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek, azonban tömegük az elektronok tömegének kb. 207-szerese. A természetes háttérsugárzás részét képezik, és a Föld felszínén mindenhol megfigyelhetők [10]. Tipikusan 100 müon érkezik egymástól függetlenül egy négyzetméteres felületre másodpercenként. A nagyenergiás müonok hozama időben közel állandónak tekinthető. A müonkeletkezés forrásai részecskefizikai folyamatok, amelyeket az elsődleges kozmikus sugárzás (kisebbségi atommagok a protonoktól a vasig) és a légkör atomjainak ütközései keltenek. A 2. ábrán látható a légkörben



2. ábra | Másodlagos kozmikusrészecske-záporok vázlatos rajza
 Figure 2 | Schematic drawing of secondary cosmic ray showers

keletkező részecskezápórok egyszerűsített képe. A másodlagos kozmikus sugárzásnak három komponense van: a hadronkaszád, a müonkomponens, és az elektromágneses zápor.

A müonok mintegy 10–15 km-es magasságban keletkeznek elsősorban a töltött pion- és kaonrészecskék bomlástermékeként. A müonok viszonylag hosszú, 2,2 milliárd másodperces élettartammal rendelkeznek, és közel fénysebességgel, a relativisztikus kinematika szerint mozognak. Ez lehetővé teszi, hogy viszonylag nagyobb számban lejuthassanak a földfelszínre is mielőtt elbomlánának vagy elnyelődnének. A müonok földfelszínén mért hozama, $f(E, q)$ energia- és zenitszögfüggő, mivel a zenitszög határozza meg az áthatolt levegőréteg-vastagságot, amely hatással van a müonok kölcsönhatásaira és bomlására. A geomágneses, magassági és szezonális hatások elsősorban a kisenergiás (<1 GeV) müonok hozamát befolyásolják. A nagyenergiás müonok esetében, amelyek detektálásán a nagyobb kiterjedésű objektumok müo-gráfija alapul, ezek az effektusok elhanyagolhatók.

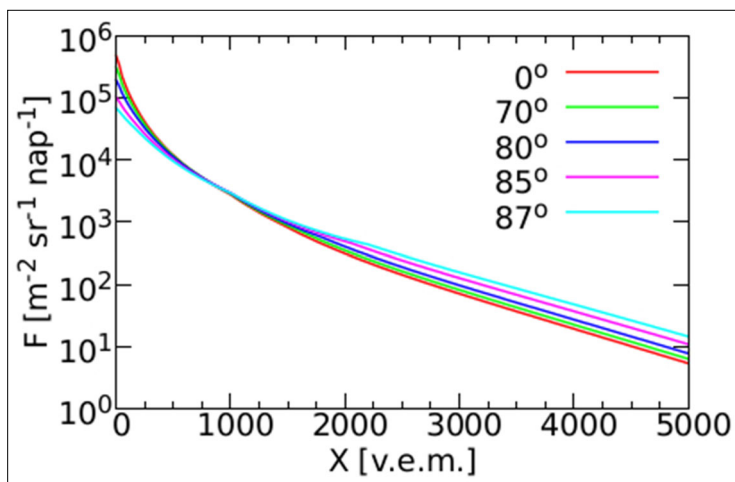
A müonok egy közegen áthatolva kölcsönhatásba lépnek a közeget alkotó atomokkal, melyek során energiát veszítenek folytonos (ionizáció), valamint sztochasztikus (fékezési sugárzás, párkeltés stb.) folyamatokban. A kölcsönhatások során leadott energia mennyisége az úgynevezett sűrűséghossztól (X) függ, amely a müon közegben megtett útja mentén integrált sűrűség. A leadott energia a következő differenciálegyenlettel adhatjuk meg: $-dE/dX = a(E) + b(E)E$, ahol a bal oldali tag az egységnyi sűrűséghosszon leadott energia mennyisége, a jobb oldali $a(E)$ és $b(E)$ tagok a folytonos és sztochasztikus energialeadást jellemző energiafüggő állandók. Kisebb és közepes energiákon az ionizáció dominál, nagyobb energiákon a sztochasztikus folyamatok. A müonok energiája és várható úthossza közti összefüggést, az ún. folyamatos lelassulási közelítés (Continuous Slowing Down Approximation, CSDA) írja le [11]. Ezzel megadható, hogy a müonok közelítőleg 0,2 GeV energiát veszítenek a vízben

méterenként. A nagyenergiás müonok akár több kilométernyi vízekvivalens mennyiségű anyagon is áthatolnak. A müonok várható hozama számszerűsíthető egy adott vastagságú közegre (X) az energia- (E) és irányfüggő (q) müonspektrumok integrálásával a müonok áthatolásához szükséges minimum energiától kezdve, $F(E(X), q) = \int_{E_{\min}(X)} f(E, q) dE$. A 3. ábrán a vízre számított müonhozamot ábrázoljuk a vastagság függvényében különböző zenitszögekre.

Az energialeadás mellett a müonok kis szögekkel sok egyedi szóródást szenvednek anyagon történő áthatolásuk során, elsősorban a müonok és az atommagok közötti elektrosztatikus erők hatása miatt. Ez az úgynevezett többszörös szóródás kis mértékben ronthatja a müografikus képek kontrasztját. Ennek nagysága közelítőleg 4 mrad és 20 mrad 1000 m és 50 m standard közet után. Az előbbi szögfelbontás már elegendő lehet, hogy egy tűzhányót több kilométeres távolságról mintegy 10 méteres helyfelbontással vizsgálhassunk.

A müografikus mérések esetén nemcsak a vizsgált szerkezeten áthatolt müonok, hanem olyan töltött részecskék (pl. kisenergiás müonok, elektronok, töltött hadronok) is detektálhatók, amelyek az vizsgált struktúra (pl. vulkán) felületén vagy a légkörben változtattak irányt. Ezeknek a részecskének az azonosítása és szűrése elsősorban nagyméretű objektumok müo-gráfija esetén kritikus, ugyanis esetükben az áthatoló müonok hozama (jel) és nem áthatoló részecskék (zaj) már nagyságrendileg megegyeznek, vagy az utóbbi nagyobb. Ez megfelelő mérőhely választását és a megfigyelőberendezés szerkezetének szimulációs optimalizációját igényli esetenként. Kisebb méretű struktúrák vagy földfelszín alatt végzett mérések esetén az itt tárgyalt zaj elhanyagolható.

A fentiek ismeretében összehasonlítható a müo-gráfia a hagyományos geofizikai mérési módszerek lehetőségeivel. A müo-gráfia fő hátrányai a következők: i) A vizsgált struktúra alá (ha szükséges azzal egy szinten) kell elhelyezni a detektort. ii) A müonok hozama nem növelhető,



3. ábra | A müonhozam csökkenése ábrázolva az anyagvastagság függvényében (vízekvivalens méter egységekben)
 Figure 3 | The attenuation of muon flux as a function of density-length (in meter-water-equivalent units)

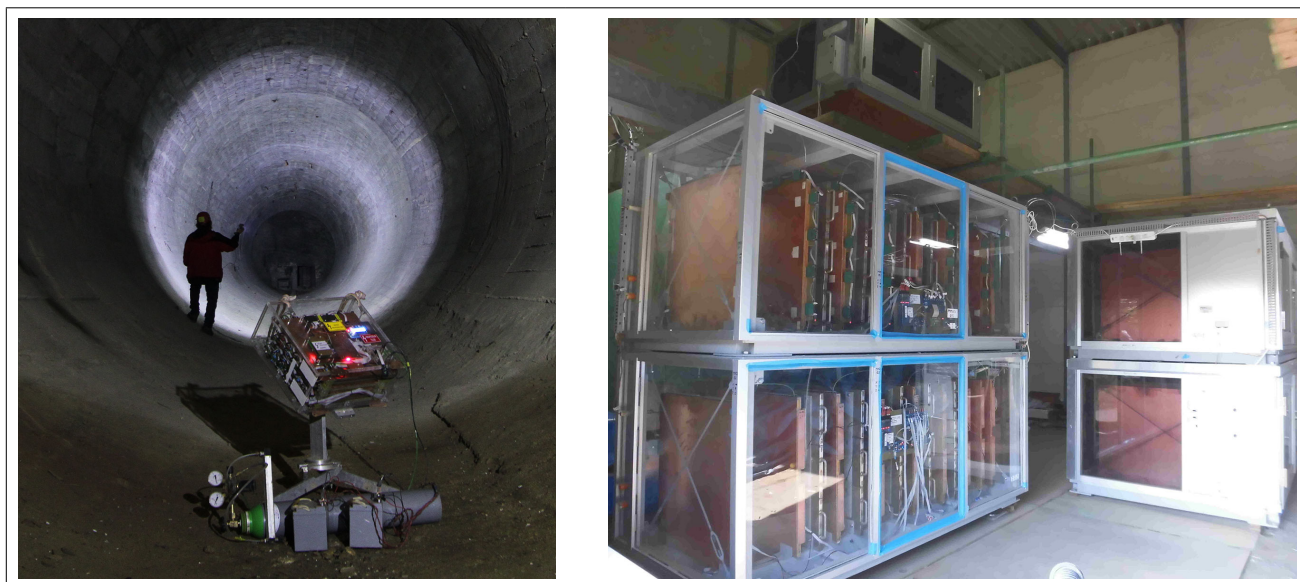
és csökken a zenitszög növekedésével. iii) Gondos mérőhelyválasztás és alkalmazásorientált berendezésfejlesztés szükséges a mérésekhez. A müográfia a hagyományos mérési módszerek néhány hátrányát kompenzálhatja és kiegészítheti új információkkal: i) Nagy térfogatú objektumok feltárhatók kozmikus müonokkal. ii) A müonhozam változása elsősorban a közeg vastagságától és sűrűségétől függ, néhány %-os pontossággal mérhető. iii) A müonok eltérése elhanyagolható a pályájuk mentén, így akár méteres méretű inhomogenitások (pl. üregek, ércek stb.) is feltárhatók. Kellően biztonságos (akár több kilométeres) távolságból is vizsgálhatók a nem hozzáférhető struktúrák. iv) A müonok áthatolása nincs hatással a közegre, ami lehetőséget ad a passzív mérésre. v) A müográfia integrálható más sűrűsége érzékeny mérési módszerekkel, a szeizmikával és a gravimetriával.

3. Müografikus megfigyelőrendszerek tervezése és működtetése

A müonok hozama véges a földfelszínen, és több nagyságrenddel kisebb értékre csökken a kilométeres vastagságú struktúrák után. A müográfias mérések tervezésénél figyelembe kell venni, hogy egy adott sűrűségváltozás megfigyeléséhez szükséges idő nem haladhatja meg a sűrűségváltozást okozó geofizikai jelenségek (pl. vulkáni folyamatok) bekövetkezésének időtartamát. Másrészt a detektor akceptanciának (ez a detektor érzékeny felülete, amely a lefedett térszög és a detektálási hatások együttese) kellően nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy olyan szögfelbontást érjen el, amellyel megfelelő felbontású leképezést készíthetünk a vizsgált struktúráról az észlelhető jelenség

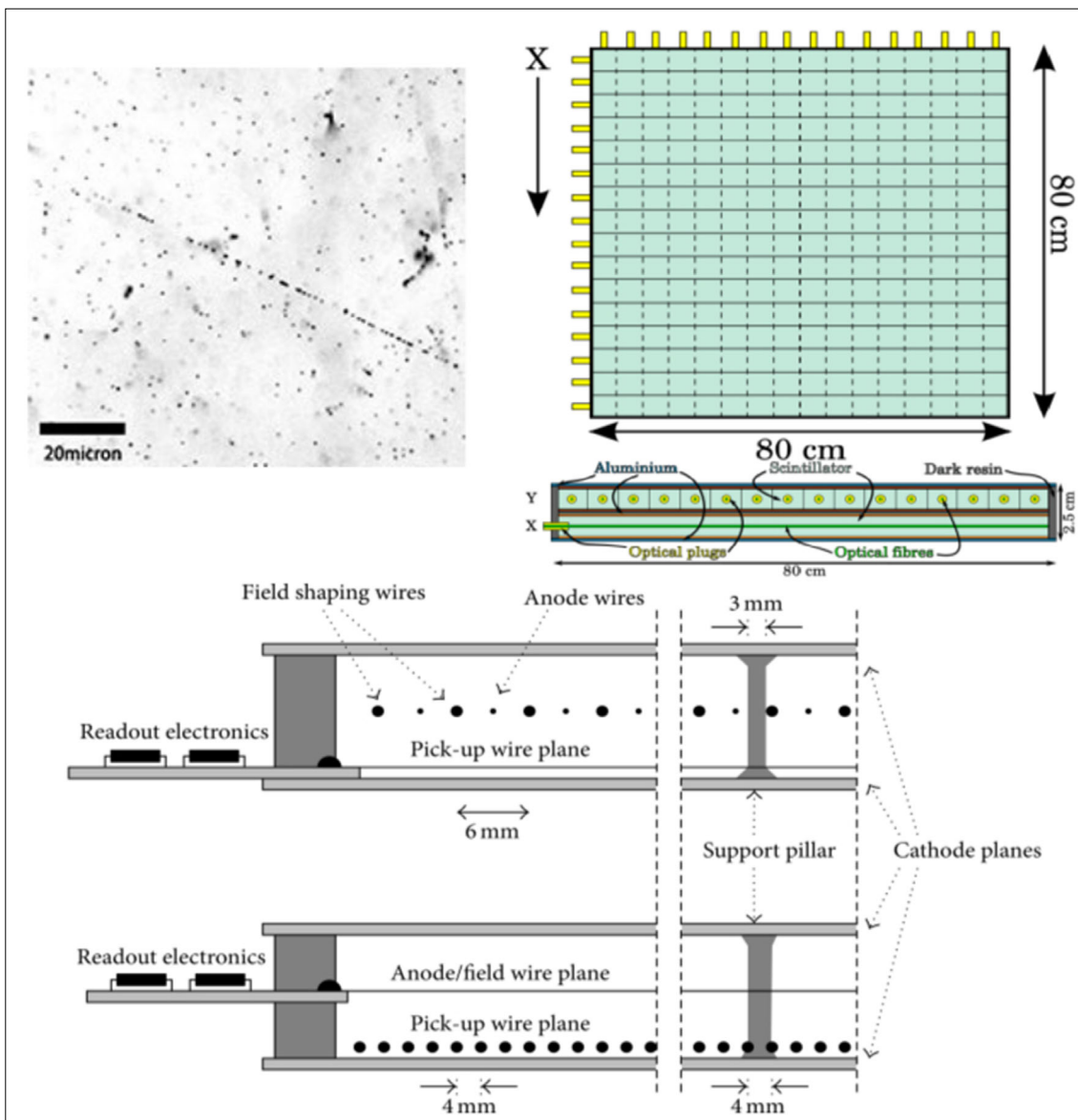
monitorozásához szükséges idő alatt. A [12] közleményben mutatunk egy módszert és példákat a mérési idő meghatározására.

A részecskedetektorok olyan kameráknak vagy teleszkópoknak tekinthetők, amelyek az érzékeny térfogatukon keresztülhaladó töltött részecskék pályáját határozzák meg. A müográfira alkalmazott részecskedetektorokat terepi működésre kell tervezni és optimalizálni [13–15]. A detektorokat úgy kell megtervezni, hogy stabilan, nagy detektálási hatásokkal és minimális szisztematikus effektusok mellett működhessenek szélsőséges időjárási körülmények (pl. hurrikánok, szélsőséges páratartalom- és hőmérséklet-változások stb.) vagy vulkáni tevékenység (pl. hamuhullás) mellett is. A terepi működés egyik kritikus követelménye az alacsony karbantartási igény. Hordozható kompakt modulokat (detektorrétegek, elektronika, tartószerkezetek, tápegységek, gázpalackok stb.) érdemes alkalmazni, amelyek szállíthatók a nehezen hozzáférhető helyekre (pl. föld alatti barlangrendszerekben vagy vulkánok kráteréhez) és cserélhetők az egyes elemek meghibásodása esetén a mérés minimális megszakítása mellett. A másik kritikus követelmény a berendezés energiafogyasztásának minimalizálása, amely lehetővé teszi a hosszú távú (esetenként több hónapos) méréseket. Nap-elemekkel és akkumulátorokkal működtethetők a detektorok olyan helyszíneken, ahol az elektromos hálózat nem érhető el. A korszerű berendezések teljesítménye tipikusan 5–50 W. Az ekkora fogyasztású rendszerek a gyakorlatban akár több hétig is üzemeltethetők autóakkumulátorokkal. A földfelszínen végzett mérések esetén abszorber vagy szóró rétegek (tipikusan vas- vagy ólomlemezek) alkalmazása is szükséges a zaj elnyomására. A 4. ábrán a Wigner Fizikai Kutatóközpontban (Wigner FK) fejlesztett



4. ábra | Egy föld alatti mérésekre tervezett kompakt, hordozható detektor (balra) és egy moduláris, megfigyelőrendszerekből felépülő müográfiai obszervatórium (jobbra) fényképe

Figure 4 | Photographs of a compact, portable tracking detector applied for underground muography (left panel) and a modular muography observatory (right panel)



5. ábra Három müográfiában alkalmazott detektortechnológia. Egy nukleáris emulziós detektor mikroszkópos képe, amely egy müon nyomát mutatja [13] (bal felső ábra). Egy kétdimenzióban szegmentált scintillációs detektor vázlatos rajza [14] (jobb felső ábra). Egy sokszálas proporcionális kamra keresztmetszetei két irányból [15] (alsó ábra)

Figure 5 Three muographic detector technologies. A microscopic image of a nuclear emulsion detector that shows a muon trajectory [13] (upper left panel). Schematic drawing of a scintillator detector is shown from upper and side views [14] (upper right panel). Two cross-sections of a multi-wire-proportional chamber are shown [15] (lower panel)

és épített müografikus megfigyelőrendszerek fényképeit mutatjuk [14, 16]. A bal oldali panelen egy a földfelszín alatt (pl. alagutakban, bányákban, barlangrendszerekben) alkalmazható kompakt és hordozható berendezés látható. A jobb oldali panelen a Tokiói Egyetem és a Wigner FK által a Szakuradzima vulkán monitorozására alkalmazott obszervatóriumban telepített moduláris, nagyméretű müografikus megfigyelőrendszerek fényképe látható. Egy-egy modul tipikusan hat-nyolc négyzetméter felületű detektorrétgeből és öt réteg 2 cm vastagságú ólomlemez-ből épül fel. Jelenleg 12 modul szolgáltat adatokat. A mérések és adatok kezelése mikroszámítógép-vezérelt rendszerekkel oldhatók meg a különböző típusú detektorok esetén.

Napjainkban három különböző technológiát alkalmaznak a müografiai megfigyelő eszközökben. Mindegyik típusnak megvannak az előnyei és hátrányai, az optimális technológia a mérési kampány célja és terepi viszonyok alapján választható ki.

A nukleáris emulziók [13] műanyag alpból és 200–300 µm vastagságú emulziós zseléből állnak, utóbbiak ezüst-bromid mikrokristályokból és zselatinból készülnek. A beeső töltött részecskék ionizációs folyamatokat indukálnak a detektorban. Az ezüstkristályok kémiai reakciója láthatóvá teszi a töltött részecskék pályáját. Az emulziós filmek 3 dimenziós részecskékövetést biztosítanak. Az 5. ábra bal felső paneljén egy nukleáris emulziós film mikroszkópos képe látható, amely egy müonpályáját mutat.

A nukleáris emulziók mikrométer nagyságrendű pozíciófelbontással mérhetik a rajtuk keresztülhaladó müonokat, ami néhány mrad szögfelbontást biztosít a müográfiai mérésekhez. A nukleáris emulziós detektorok elektromos áram, karbantartás nélkül működnek, felépítésük moduláris, így nehezen hozzáférhető helyeken is alkalmazhatók. Ez a technológia toleráns a mechanikai igénybevétellel és nedvességgel szemben. Szobahőmérséklet felett azonban nem működnek megfelelően, mert a magasabb hőmérséklet megnöveli a fakadási (fading) effektus sebességét, amelyben a szemcsék számának csökkenését okozza a pályák mentén. A nukleáris emulziók a gyártásuktól kezdve folyamatosan detektálnak. A tengerszint magasságban telepített detektor közel fél évig mérheti a kozmikus sugárzást. Nem biztosítanak adatokat valós időben, ugyanis a részecskenyomokat automatizált pásztázó mikroszkópokkal rekonstruálják a mérések után. Ezek tipikus kiolvasási sebessége néhány száz vagy ezer négyzetcentiméter óránként. Bár a nukleáris emulzió nem alkalmazható valós idejű müográfiai képalkotásra, ezt a technológiát sikeresen alkalmazták különböző struktúrák (vulkánok, atomreaktorok, piramisok) szerkezetének egyszerű felmérésére is.

A szcintillátordetektorokon [14] áthaladó töltött részecskék fotonokat keltenek szcintilláció révén. Tipikusan 100 eV leadott energia leadása által keletkezik 1 foton. A műanyag szcintillátorokat árnyékolják, hogy kizárják a külső fényt és visszaverjék a belül keletkező fotonokat. Ezeket a fotonokat fotoelektron-sokszorozó csövekkel (photoelectron multiplier tubes, PMT) vagy újabban félvezető fotondetektorokkal (SiPM-ekkel) detektálják. A szcintillátorok viszonylag gyors (nanomásodperces) jeleket produkálnak, és a több detektorréteg koincidenciája (közel egyidejű detektálása) lehetővé teszi a töltött részecskék hatékony detektálását. A gyors jelek lehetővé teszik a részecskék repülési idejének (Time-of-Flight, TOF) mérését is, amely segíthet azonosítani, hogy a részecskék a megfigyelési vagy azzal ellentétes irányból érkeztek-e a detektorba. Ez értékes információ a vízszinteshez közeli irányokban elhelyezkedő struktúrák, pl. vulkánok megfigyeléséhez. A PMT-k széles hőmérséklet-tartományban képesek működni, ami lehetővé teszi, hogy ez a technológia a forró és nedves éghajlatú területektől kezdve a hóval borított hegyekig alkalmazható legyen. A szcintillátorrétegeket jellemzően 1–10 cm széles csíkok szegmentálják. A helyfelbontásuk optimalizálásához növelni kell a PMT-k számát, ami drasztikusan növeli a detektorrendszer energiafogyasztását és költségeit. Az 5. ábra jobb felső panelja egy kétrétegű szegmentált szcintillátoros detektort mutat. Szcintillátornyomkövető rendszerek alkalmazhatók valós idejű mérésekre. Egyszerűségük miatt ezek a leginkább elterjedt detektorok napjainkban.

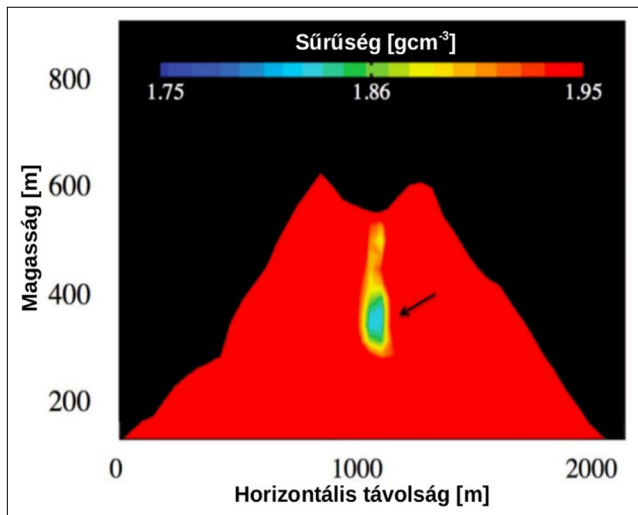
A gáztöltésű detektorokon [15] átrepülő töltött részecskék a gázatomok (pl. Ar vagy más nemesgázok) atomjainak ionizációja során tipikusan 100 elektront hoznak létre centiméterenként. Szálak, mikrostruktúrák, el-

lenálláslemezek között keltett elektromos mezők elektronlavinákat indukálnak, amelyek mérhető jeleket (1 000–10 000-szeres elektronsokszorozás) eredményeznek a detektorokban. A gáztöltésű detektorok néhány mm-es pozíciófelbontást és néhány mrad szögfelbontást, alacsony anyagköltséget biztosítanak. A környezeti paraméterek változása befolyásolja a gázerősítést és következésképpen a gáznemű detektorok követési hatékonyságát, ezért e hatás korrekciója szükséges ahhoz, hogy az adatfelvétel során megbízható információt szolgáltatassanak. A nem mérgező és nem gyúlékony gázok alkalmazása környezetbarát működést biztosít. Bár a műszerek működéséhez gázrendszerre van szükség, ezek az alacsony gázfogyasztás (kb. 1 liter/óra) miatt akár néhány hónapig is működhetnek karbantartás nélkül. A gázdetektorok koncepciója robusztus, moduláris és könnyen szállítható, ami különböző környezetekben teszi alkalmazhatóvá. A mikrostruktúrákon, a sokszálas proporcionális kamrákon és az ellenálláslemez-kamrákon (RPC-k) alapuló müonkövető rendszereket alkalmazzák müográfiaira [9].

4. Müografikus képalkotási technikák

4.1. Kétdimenziós müonleképezés

Az egy irányból (lásd pl. az 1. ábra vázlatos rajzán) végzett mérésekkel projekciós müografikus képek állíthatók elő, akárcsak egy röntgenképen, amelyekben az egyes pixelek az adott pixelhez tartozó müonpályák mentén mért müonhozamot vagy átlagos rekonstruált sűrűség-hosszat reprezentálják. Ez a technika a vizsgált struktúrán keresztül mért müonhozam vagy annak és a struktúra nélkül mért hozam arányának felhasználásán alapszik. A mért hozam és számított hozamok különbségének minimalizálásával megadható pixelenként a struktúrán keresztül mért átlagos sűrűség-hossz. A müonhozamok a müonspektrumok minimális energiától történő numerikus integrálással vagy részecskefizikai eseménygenerátorok és detektor szimulációk együttesének (pl. GEANT4 [17]) alkalmazásával számíthatók ki. A projektív müografikus képek helyfelbontása (Δx) közelítőleg meghatározható a megfigyelőberendezés szögfelbontása (Δa) és a detektor és a vizsgált struktúra távolságának (L) felhasználásával: $\Delta x \approx \Delta a \cdot L$. Például egy tűzhányóról 1 km távolságról készített 10 mrad felbontású müografikus kép kb. 10 méteres helyfelbontással határozhatja meg annak sűrűség-eloszlását. A 6. ábra mutat példát a 2 dimenziós müografikus sűrűségképre, amelyet Tanaka és munkatársai készítettek a japán Szatszuma–Iwodzsima vulkánon keresztül. Ez a müografikus kép egy kis sűrűségű régiót tárt fel a vulkán csúcsán keresztül. Ennek a vulkanológiai értelmezését az 5. fejezetben tárgyaljuk majd. A projektív képalkotás jól használható sűrűségváltozások feltárására és időbeli változásának monitorozására. A technika fő korlátja, hogy a müonok pályája mentén csak átlagolt mennyiséget ad meg, így ezzel nem rekonstruálható



6. ábra | A japán Szatszuma-Iwodzsima vulkán müografikus képe [6]
 Figure 6 | The muographic image of Satsuma-Iwojima volcano, Japan [6]

pontosan az esetlegesen megfigyelt sűrűséganomália pontos helye és alakja.

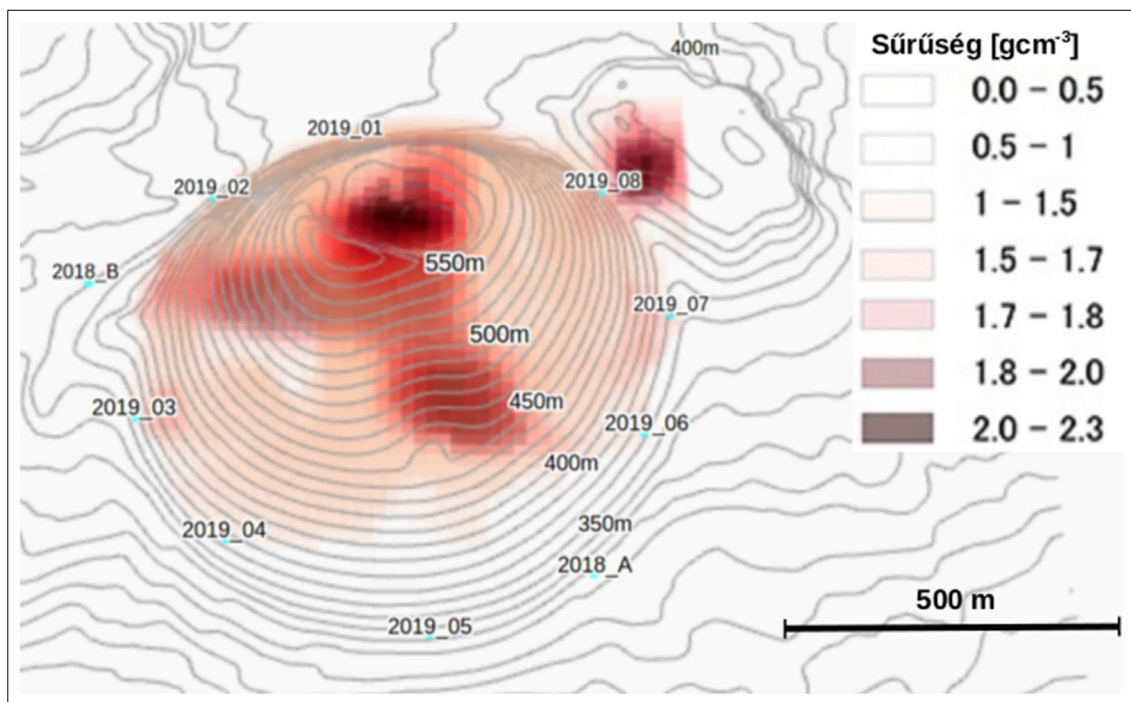
4.2. Tomografikus képalkotás müonokkal

A több irányból végrehajtott müografikus mérések áthidalhatják a projekciós technika fentebb említett korlátait, és eltávolíthatják az esetlegesen különböző belső struktúrák átfedése által okozott effektusokat is. A vizsgált objektu-

matok térelemrészekre (voxel) osztják fel a 3 dimenziós kép rekonstrukciója előtt, és minden voxelhez egy-egy kezdeti sűrűségértéket (ρ_j , ahol $j = 1, 2, \dots, n$) adnak meg. A müográfiával mért sűrűség-hosszak (X) és voxelsűrűségek között lineáris összefüggések adhatók meg: $X = \mathbb{L}\rho$, ahol \mathbb{L} a Jacobi-mátrix, amely a vizsgált struktúrán keresztülhaladó, voxelekre meghatározható müon úthosszakkal adható meg. A sűrűségeloszlásra vonatkozó inverziót általában iteratív minimalizációs eljárással oldják meg. Müontomográfia esetén általában szükséges valamilyen regularizációt és Bayes-feltételt alkalmazni. A 7. ábra az Omuroyama vulkán körül tíz különböző helyről (világoskék négyzetek) végzett mérések adataiból rekonstruált müontomográfiai képet mutatja, amely a három a közepen elhelyezkedő kürtőből kiinduló magma testet (dike) tárt fel [18]. A voxelek élhossza 20 m volt. Az eljárás pontossága a mérések számának növelésével és a távolság csökkentésével (pl. drónról végzett mérésekkel) növelhető [9].

4.3. Háromdimenziós képalkotás müográfiával és gravimetriás adatokkal

A müográfia elméletileg más sűrűségérzékeny méréssel (szeizmikával, gravimetria, fúrásos mintavétellel stb.) összevethető, illetve együttes inverzió is végezhető a helyfelbontás javítása érdekében. Gyakorlatban elsősorban a gravitációs mérések adataival történt egyesített inverzió.



7. ábra | Az Omuroyama vulkán müontomográfiai sűrűségeloszlása (Forrás: <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER/data/omuro3ds/>) [18]
 Figure 7 | Muon tomographic reconstruction of the density distribution in the Omuroyama scoria cone (Source: <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER/data/omuro3ds/>) [18]

Az ehhez tartozó direkt probléma: $(X, \Delta g) = (L, G)\rho$, ahol X a mért sűrűség-hossz, Δg a mért gravitációs gyorsulásvektor, L müonúthosszak mátrixa, G a gravitációs direkt problémához tartozó Green-függvényből képzett mátrix és ρ a sűrűségvektor. A módszert sikeresen alkalmazták kisebb lávadómok háromdimenziós sűrűségképének meghatározására (lásd 5. fejezet). Ezt a módszert Nishiyama mutatja be részletesen a [9] könyv 3. fejezetében.

5. Vulkanológia és vulkanikus veszélyek felmérése müográfiával

Az aktív vulkanizmust a magma kémiai (pl. olvadáktartalom) és fizikai tulajdonságainak (pl. viszkozitás, sűrűség) változása, valamint a dinamikája irányítja [20]. A sűrűségváltozás monitorozása közvetve alkalmazható a magma változásának és mozgásának a megfigyelésére. A müográfia elsősorban a tűzhányók sekélyebb részeinek (felszínén, a kráterek alatt, a kürtők felső részében található térrészek) feltárására és monitorozására alkalmazható. A vulkánok vastagabb (tipikusan >2 km) és földfelszín alatt elhelyezkedő részei már nem monitorozhatók a müonok véges hozama és az érzékesi irányuk miatt. A müográfia hasznos kiegészítő eszköze lehet a hagyományos geofizikai monitorozó technikáknak, különösen a szeizmikus és gravitációs eljárásoknak, ugyanis a müográfia biztonságos – akár több kilométeres – távolságról is elvégezhető, és megfelelő akceptanciájú müondetektorral akár néhány méteres helyfelbontás is elérhető, így a lokális tulajdonságok is feltárhatók, és a kisebb térrészben bekövetkező vulkáni jelenségek is megfigyelhetők.

Az alkalmazott vulkanológia fő, egyelőre távlati célja a vulkánkitörések előrejelzése [21]. A főbb kérdései a következők: Mikor kezdődik? Hol következik be? Mekkora a várható nagysága vagy meddig fog tartani? Milyen a környező területek veszélyeztetettsége? E kérdések megválaszolásához szükséges a tűzhányó működésének történetének ismerete, a működését irányító folyamatok megértése és a belsejében bekövetkező fizikai és kémiai változások folyamatos monitorozása. Összetett monitorozó rendszerekben különféle technikákkal mérik a tűzhányó felszínének deformációját, földrengéseket, hanghullámokat, hőmérsékletet, valamint a kilövellt vulkáni gázok, hamu és por mennyiségét, összetételét, sebességét, irányát és további paramétereit. Bizonyos esetekben még ezek sem elégségesek, amennyiben a kitörést indukáló vulkáni folyamatok időskálája a monitorozó eljárások mintavételezési idejénél kisebb. A monitorozó rendszerek összeállítását a vulkán korábbi tevékenysége és az elérhető eszközök határozzák meg.

Hírhedt eset volt a japán Ontake vulkán a 2014. szeptember 27-én bekövetkezett, 63 ember halálát okozó freatikus kitörése. E katasztrófális kitörés előtt csak három aktív periódusa volt (1979–1980, 1991 és 2007) észlelhető az elmúlt évtizedben, így azt nem monitorozták

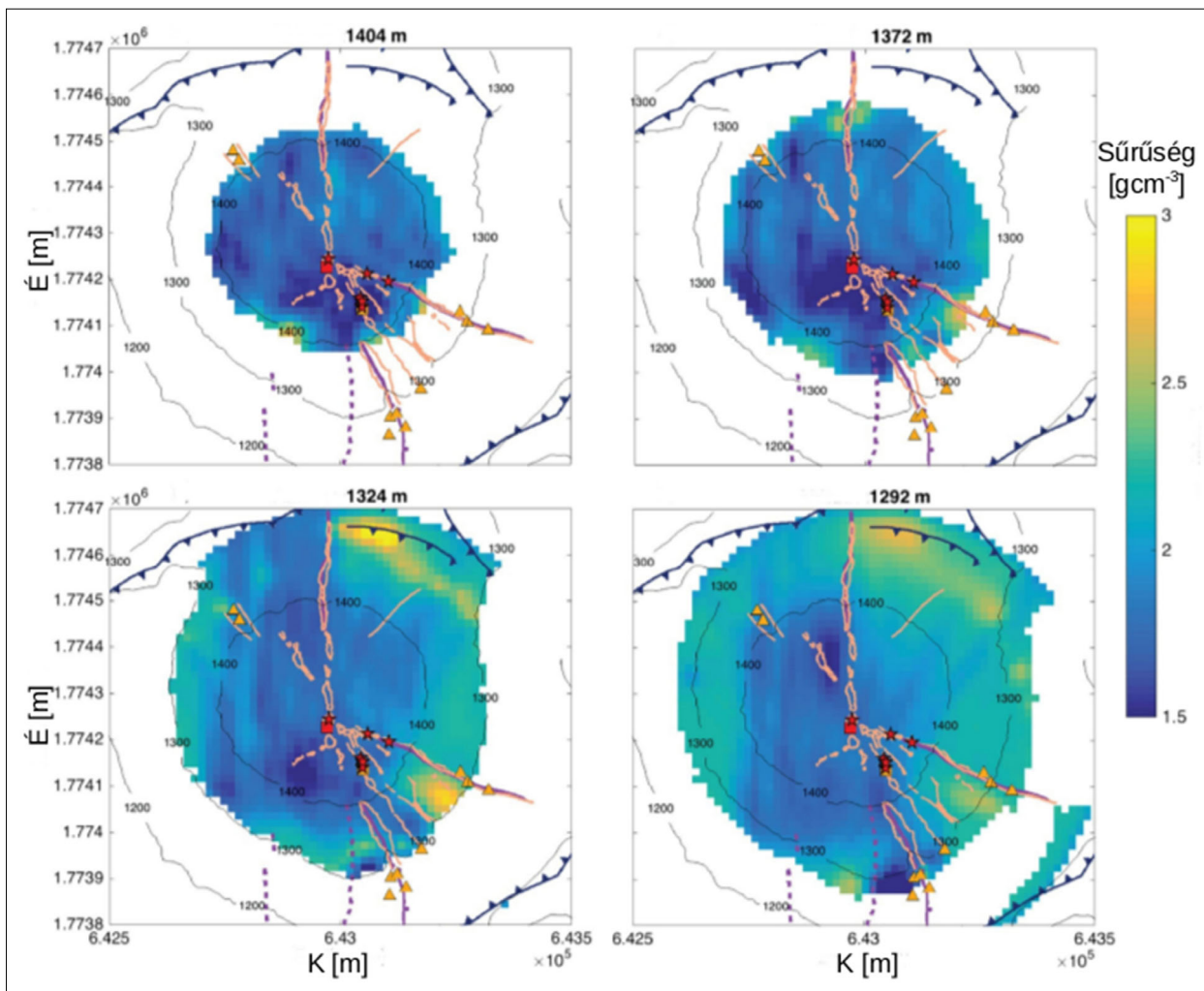
aktívan. A feláramló magma a talajvizet gőzzé alakította, a megnövekedett nyomás hidrotermális robbanáshoz és piroklaszt-tolóárhoz vezetett. A kitörést nem előzte meg jelentősebb földrengés, amely vulkáni veszélyre utalhatott volna. A hirtelen bekövetkező vulkáni folyamatokat a müográfia sem képes előrejelezni, azonban a kitörések vagy sérülékeny részek esetleges helyét feltárhatja, és középtávú (tipikusan több hét) időbeli változásokról hasznos információt szolgáltathat egy összetett monitoring-rendszer egyik elemeként. A következő alfejezetekben néhány példát mutatunk arra, hogy miről nyújthat információt a müográfia a vulkánok vizsgálatához és a veszélyek felméréséhez.

5.1. Lávadómok stabilitásának vizsgálata

A lávadómok viszonylag egyszerűen felmérhető struktúrák a müográfia számára a kisebb méretük miatt [19, 22]. Emellett könnyen hozzáférhetőek, így különböző módszerek együttes alkalmazásával részletesebben feltárhatók, és a mérések megerősíthetők [23].

A dáцитos (Si-ben gazdag) összetételű magmával működő vulkánok esetén gyakoriak a lávadómformáló kitörések. A lávadómok belső sűrűségi szerkezetének vizsgálatát a lávadóm-összeomlások folyamatának jobb megértése és esetleges előrejelzése motiválja. A lávadómok összeomlását nagyobb mennyiségű csapadék, szeizmikus események, túlnyomás okozhatják. A viszonylag kis sűrűségű kéreg vastagságának mérése kritikus, és fontos hozzájárulás lehet a lávadóm stabilitásának vizsgálatához. A kéreg eróziója felszínre engedheti a lávadóm forró belső részét, amely robbanásokat eredményezhet. Tanaka és Yokoyama az Usu vulkán 1944-es kitörése során keletkező lávadóm sűrűségi szerkezetét mérték meg müográfiával [22]. Nishiyama és munkatársai a Showa-Shinzan lávadóm belsejében tártak fel müográfiával és gravimetriával egy 300 méter átmérőjű, henger alakú lávatestet, valamint kimutatták, hogy a lávadóm lábánál nincs magma-intrúzió [19].

A Kis-Antillák szigetcsoporton található La Soufrière de Guadeloupe vulkán a világ egyik legveszélyesebb hidrotermális rendszere. A pórusfolyadék esetleges túlnyomása a vulkán csúcsán található lávadóm oldalának instabilitását és a gyenge részek leomlását okozhatja. Rosas-Carbajal és munkatársai három irányból mérték meg a lávadómon áthaladó müonokat szcintillációs detektorokkal [24, 25]. A müográfiás és gravimetriás adatok közös inverziójával rekonstruálták a La Soufrière de Guadeloupe lávadóm háromdimenziós sűrűségi szerkezetét [25]. A 8. ábra négy különböző magasságon vett vízszintes szeletét mutatja a lávadóm sűrűségeloszlásának. Ez a lávadóm délkeleti részén mutatott nagyobb kiterjedésű kis sűrűségű részeket (lásd a sötétkék régiókat a felső ábrákon), ahol fumarolajelenségeket is megfigyeltek. A felső részen feltárt kis sűrűségű régiót az elektromos ellenállás-tomográfiával (Electrical Resistivity Tomography, ERT) végzett mérések is megerősítették. A mérési eredményeket úgy



8. ábra A La Soufrière de Guadeloupe lávadóm müográfiával és gravimetriával rekonstruált háromdimenziós sűrűségeloszlásának 1404 m (bal felső ábra), 1372 m (jobb felső ábra), 1324 m (jobb alsó ábra) és 1292 m tengerszint feletti magasságokon vett vízszintes szeletei [25]

Figure 8 The density distribution of La Soufrière de Guadeloupe lava dome measured by muography and gravimetry is shown in four slices extracted at the altitudes of 1404 m (upper left panel), 1372 m (upper right panel), 1324 m (lower left panel) and 1292 m (lower right panel) above sea level [25]

értelmezték, hogy a feltárt részen egy alacsony porozitású folyadékkal töltött térfogat található, amely leomolhat az esetleges jövőbeli vulkáni aktivitás következtében.

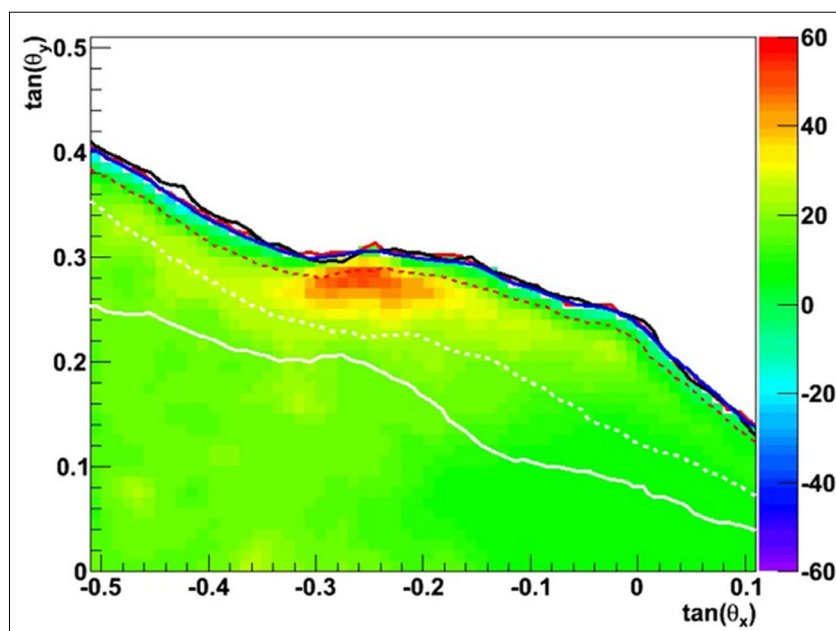
5.2. A kürtő és a kráter szerkezetének feltérképezése

A vulkáni kürtő felső részének mérete, formája, valamint a kráter alatt keletkező dugó sűrűsége és mérete befolyásolja a magma mozgását, a gáz nyomását és ezáltal a bekövetkező kitörések dinamikáját [22]. A müográfia hasznos információval szolgálhat az esetleges jövőben bekövetkező kitörések modellezéséhez a felső kürtő és a kráter részletes feltérképezésével. A Szakuradzsimá vulkánnál [26], a Sztrombolin [27], az Etnán [28] és a Vezúvnál [29] végeznek különböző kutatócsoportok ilyen célú méréseket. A 9. ábrán a Sztromboli észak-keleti kráterének (Sciara del Fuoco) nukleáris emulziókkal készített müografikus képét látjuk [27]. A piros folt egy alacsony sűrűségű régióra utal, amely összhangban van más geofizikai mérésekkel.

Ezen a részen a kráter korábban összeomlott. A különböző mérések alapján arra lehet következtetni, hogy itt egy kis sűrűségű, nagy porozitású piroklastlerakódás található, amely egy hidrotermális rendszert takar.

5.3. Magmás folyamatok megfigyelése

Folyamatos gáztalanítás, illó komponensek kibocsátása jellemzi a bazaltos vulkánokat. Andezit vulkánok esetén ez inkább a nyugalmi időszakok során jellemző. A 6. ábrán bemutatott Szatszuma–Iwodzsima vulkán müografikus képe egy keskeny (kb. 100 méter szélességű) kis sűrűségű régiót tárt fel a kráter alatt [6]. Folyadékkinamikai számítások korábban kimutatták, hogy ekkora átmérőjű kráter is gáztalaníthat, azonban eddig erre nem volt kísérleti bizonyíték. Ez a müografikus kép megmutatta, hogy kis sűrűségű, buborékokban gazdag magma is gáztalaníthat folyamatosan [22]. A mérési adatokból arra következtettek, hogy a vulkán magmavezetékkel rendelkezik és

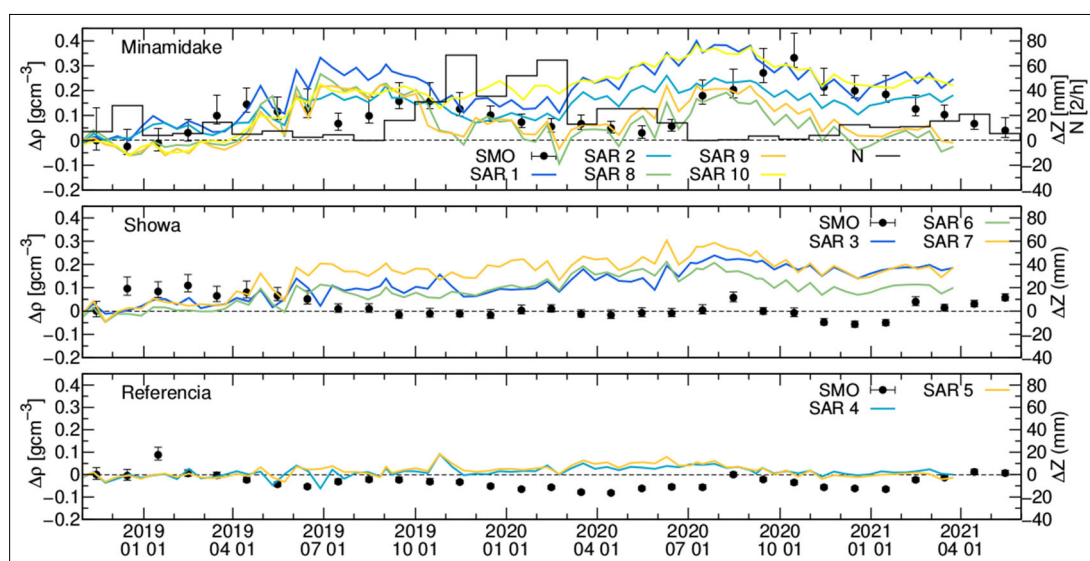


9. ábra | Egy kis sűrűségű régiót (piros folt) tárt fel a Sztromboli vulkán krátere alatt a mért és szimulált müonhozamok különbsége [27]
 Figure 9 | Comparison of measured and simulated muon counts revealed a low-density region (red patch) underneath the crater of Stromboli volcano [27]

áramlási folyamatok is végbe mehetnek a riolitos magmában.

A vulkáni gázok és a magma nyomásának változása talajdeformációt is okozhat. A korszerű vulkánmonitorozó rendszerek egyik pillére a talajdeformáció távoli, pl. műholdakról történő mérése. Ezek közvetett jelek és értelmezésük nem egyszerű, mert sok tényező alakítja a magmát és a kitorések kialakulását. A világ különböző részein 198 vulkánon mérték meg a talajdeformációt szintetikus apertúra radarral (Synthetic Aperture Radar, SAR).

Ezek az adatok megmutatták, hogy az esetek 46%-ában követte kitorés a talaj inflációját (pl. a tektonikus változások is talajdeformációt okoznak) és az esetek 6%-ában tört ki a vulkán a talajszint előzetes emelkedése nélkül [30]. A müografikus sűrűségmérés segíthet a talajdeformáció fizikai okainak értelmezésében, ami a talajszintváltozással járó jelek értékelését javíthatja [31]. A 10. ábra mutatja a Szakuradzima vulkán aktív Minamidake kráterén (felső panel), a csendes Showa kráterén (középső panel) és egy referenciaregión (alsó panel) keresztül a Szakuradzima



10. ábra | A Szakuradzima vulkán aktív Minamidake krátere, az inaktív Showa krátere és egy felszíni referenciaregiónján keresztül müografikusan mért sűrűségek (fekete pontok és szórásuk) és a talajszint függőleges irányú változásának (színes vonalak) összehasonlítása [31]
 Figure 10 | Comparison of muoraphically measured densities (black dots with 1σ errors) and vertical ground uplifts (coloured lines) for the active Minamidake crater, the dormant Showa crater and for a reference region [31]

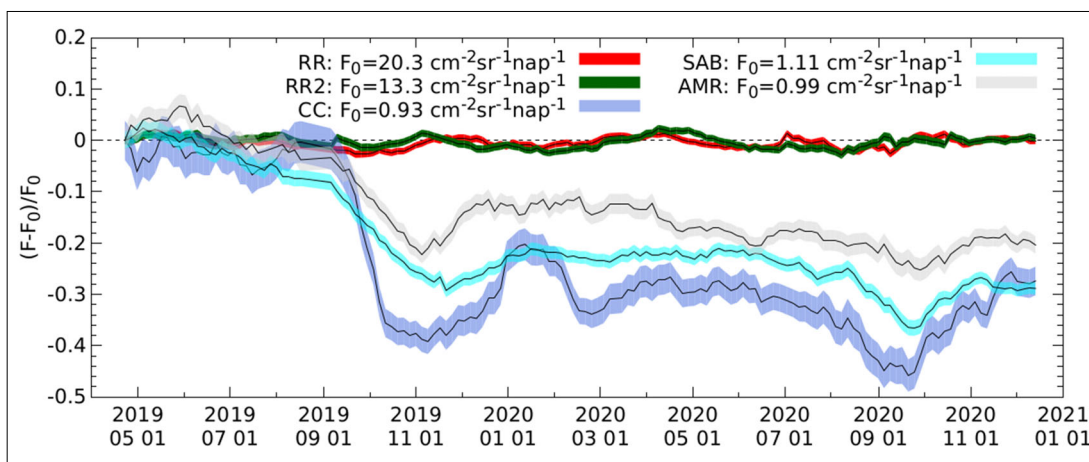
Müográfiai Observatóriummal (SMO) mért sűrűség-változásokat ($\Delta\rho$, fekete pontok 1σ hibákkal) az első méréshez képest. Az egyes mérések időtartama 5 hónap volt. A színes vonalak mutatják a SAR-ral mért függőleges talaj-emelkedést (ΔZ) a különböző régiókban. A fekete hisztogram mutatja a Minamidake kráter kitéréseinek skálázott havi számát (N) a felső panelen. A Minamidake kráter alatt a sűrűség növekedett a nyugalmi időszakokban, amikor a vulkán talajfelszíne magasabban volt, és a tömegsűrűség csökkent a gyakori kitérések időszakaiban, amikor a talajfelszín alacsonyabban volt. Ezt a következőképpen magyaráztuk: a vulkán a nyugalmi időszakokban sűrű magmával tömődött el (lásd szintén a [32] cikkben), ami a kürtőben a vulkáni gázok és a magma nyomásának növekedését, ezzel a vulkán felszínének emelkedését eredményezte. A kitérés időszakokban a dugó megsemmisült, helyébe kisebb sűrűségű magma emelkedett, ami felszabadította a nyomást, és a vulkán felszínének lefelé mozgását eredményezte. Az inaktív Showa kráterben is emelkedett a talaj szintje (középső panel). A talajdeformáció forrásának helyét szintén a Minamidake kráter alatt feltételezzük, azonban ennek modellezésén még dolgozunk. A várakozásoknak megfelelően a referencia régióban (alsó panel) nem következett be szignifikáns sűrűségváltozás.

A valós időben rögzített müografikus képek sorozatának gépi tanulással feldolgozása egy lehetséges jövőbeli megközelítése lehet a müografikus megfigyeléseken alapuló vulkánkitérés előrejelzésnek. Nomura és munkatársai [33] valamint Oláh és Tanaka [34] a Showa és Minamidake krátereken keresztül rögzített napi müonhozam képek (7 kép) sorozatát dolgozták fel konvolúciós neurális hálózatokkal (Convolutional Neural Network, CNN) és előrejelezték, hogy bekövetkezik-e kitérés az utolsó képet követő napon. A CNN a bekövetkezett kitérések legalább 72%-át előrejelezte mindkét kráter esetén, azonban az téves előrejelzések aránya meghaladta a 20%-ot. Tehát a módszer önmagában jelenleg nem nyújt megbíz-

ható információt. Az eljárás javítható lesz további idő-soradatok (szeizmikus epicentrum magasságai, kiáramló gáz hozamai stb.) felhasználásával és haladőbb módszerek (pl. értelmező gépi tanulás) alkalmazásával.

5.4. Tefralerakódás és az erózió monitorozása

A kibocsátott vulkáni anyagok lerakódása megzavarhatja a vulkáni lejtők, völgyek és patakok vízgyűjtő medencéit, és közvetett veszélyt jelentenek a környező tájra, gazdaságra és lakosságra egyaránt a vulkán kb. 30 km-es környezetében (lásd a [35, 36] cikkekben és azok hivatkozásaiban). A lerakódott anyagok ülepedése, eróziója és további transzportja a lerakódott anyagok tömegsűrűségétől és vastagságától, a terep meredekségétől, a geomorfológiai környezettől és a növényzettől függ. A szél és a víz által vezérelt eróziós folyamatok destabilizálhatják és mobilizálhatják a lerakódott anyagokat, mielőtt azok teljesen beépülnének a talajba. A kitérések után akár több évvel is keletkezhetnek iszapárak (laharok) a heves (tipikusan néhány 10 mm/óra) esőzések, a vulkáni tavak kiöntése, az eróziós folyamatok és földrengések következtében. A 11. ábra a relatív müonhozamok $((F - F_0)/F_0)$ változását mutatja az első negyven napra mért hozamokhoz (F_0) képest a Szakuradzima vulkán felszínének három régióján (lila, világoskék és szürke sávok) és két a vulkán felett kijelölt referenciaregióján (piros és zöld sávok) keresztül. A referenciaregiókon keresztül a hozam relatív változása kisebb, mint 2%. A felszínen keresztül mért hozamok jelentősen csökkentek a tefra lerakódás következtében. Az idő változásával bekövetkező hozamnövekedéseket a tefra tömegének csökkenése okozta. Ezek idejét összevetve a laharok bekövetkezésével arra következtettünk, hogy a müonhozam növekedések (tefratömeg csökkenések) okai a laharok és a tefra eróziója. Ezek a mérések demonstrálták, hogy a müográfia egy lehetséges eszköze lehet a tefralerakódás és erózió monitorozásnak, továbbá hasz-



11. ábra | A relatív müonhozam változásának időfüggése a vulkán három felszíni régióján (lila, világoskék és szürke sávok) és két, a vulkán felett kijelölt referenciaregióján (piros és zöld sávok) keresztül [36]

Figure 11 | The variation of relative muon flux through three regions of volcano surface and two references regions selected above the volcanic edifice [36]

nos adatokat szolgáltathat a hidromeomorfológiai folyamatok modellezéséhez és a kapcsolódó veszélyek értékeléséhez. A témát részletesen tárgyaljuk a [36] cikkben.

A fentebb tárgyalt eredmények azt mutatják, hogy a müoográfia hasznos eszköz lehet a vulkánok megfigyelésében. Az eljárás megbízhatóságának fejlesztését segítheti több vulkán egyidejű vizsgálata és a kitorések előtt megfigyelt müoográfikus adatok globális adatbázisának létrehozása.

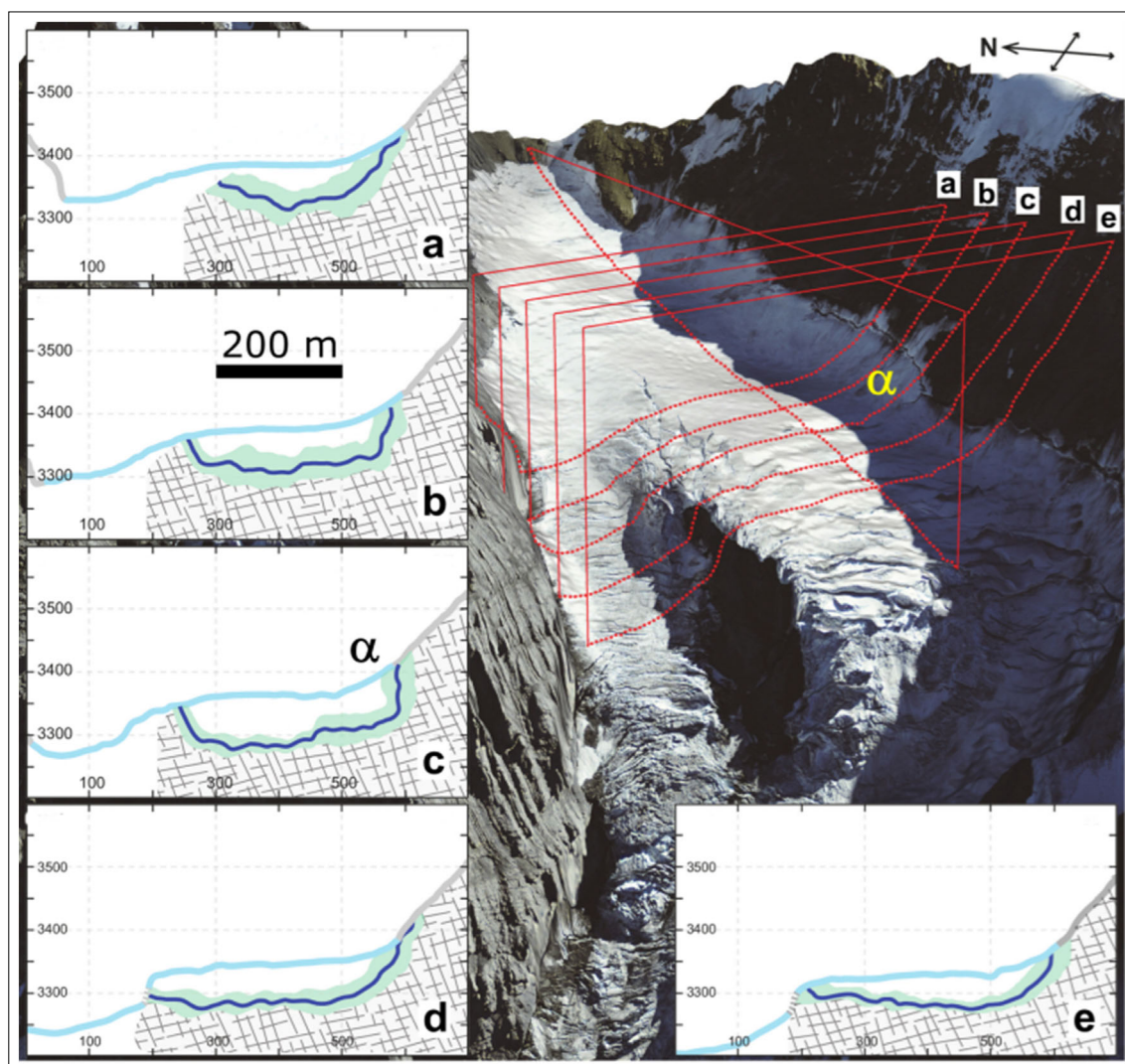
6. Geofizikai vizsgálatok és geotechnikai mérések

Az aktív vulkanizmus mellett további geofizikai és geológiai jelenségek is feltárhatók müoográfiával ha azok sűrűséginhomogenitást hoznak létre a talajban. Mesterséges (pl. alagutak) és természetes (pl. barlangok) földfelszín alatti járatokból vagy fúrólukakból elvégzett müoográfias mérések feltárhatják a földfelszín alatt található anomális

sűrűségű térfogatokat is [37]. Az ilyen típusú mérésekhez hordozható berendezések fejlesztése szükséges (lásd pl. a 4. ábra bal oldali fényképén), amelyek méretét és alakját a terepi viszonyokhoz kell tervezni. A jelenlegi technológiai fejlesztések az emberek által megközelíthető járatokban végzett mérések tette lehetővé [1, 2, 3, 37–46]. Kutatás-fejlesztések vannak folyamatban a fúrólukas mérések megvalósítására is [47–51]. A müoográfias mérések különféle célokat szolgálhatnak, pl. ércek, ismeretlen üregek, talajvizek vizsgálata, gáztartalmú rétegek monitorozása. A következő alfejezetekben néhány tudományos és ipari alkalmazást önkényesen kiemelünk az utóbbi években végzett számos müoográfikus mérés közül. További alkalmazásokat a [7–9] hivatkozásokban tárgyalnak.

6.1. Gleccserek vizsgálata

Az Alpok magasabb területein a gleccserek alakítják az alapkőzet (bedrock) topográfiáját. Az alapkőzet topográ-



12. ábra | Az Eiger-gleccser müoográfikus képei az a–e szeletek mentén láthatók [43]

Figure 12 | Muographic images of the Eiger glacier along the a–e slices are shown [43]

fiájának feltérképezése hasznos információval szolgálhat a gleccserek által rájuk kifejtett hatásáról. Ezek a felületek sokszor meredek, nem megközelíthető lejtők alatt található, ahol nem alkalmazhatók a hagyományos módszerek. Nishiyama és munkatársai az Aletsch-gleccser alatt lévő kőzet topográfiáját mérte fel nukleáris emulziós detektorokkal a hegy belsejében futó alagútból [42]. Ezek a müografikus mérések a jég alatt 50 méteres mélységben $45^\circ \pm 5^\circ$ meredekséggel, 225° É-i irányban rekonstruálták az alapkőzetet. További méréseket végeztek az Eiger-gleccser alatt (12. ábra), amelyek alapján megállapították, hogy a gleccser erózió útján miként formálta át az alapkőzetet [43].

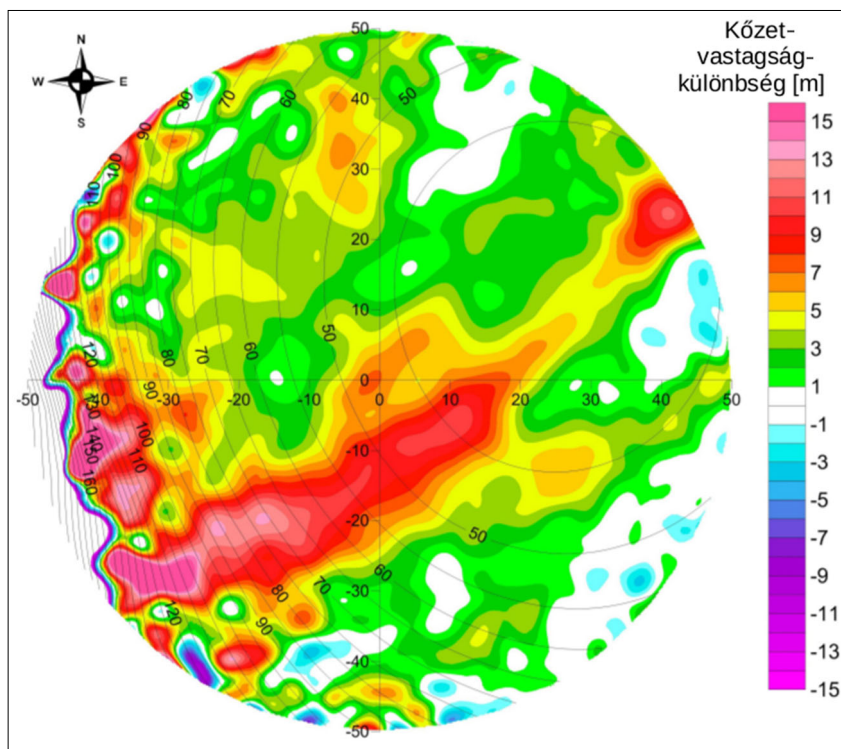
6.2. Földfelszín alatti üregek, törési zónák feltárása

A természetes folyamatok (pl. talajerózió, karsztfejlődés, vulkanizmus stb.) és az emberi tevékenységek (pl. bányászat, infrastruktúra építés, tájrendezés stb.) a talaj szerkezetének lokális változásait okozzák, amelyek sűrűséginhomogenitásokat (pl. üregeket, törési zónákat stb.) hozhatnak létre. Ezek feltárása hozzájárulhat az indukáló természetes folyamatokra szakosodott tudományokhoz és kapcsolódó alkalmazásokhoz, pl. infrastruktúrák karbantartásához, fenntartható városfejlesztéshez, barlangászat-hoz stb. A különböző kőzet- és talajinhomogenitások alatt elhelyezett müondetektorok alkalmazhatók ezek feltárására és vizsgálatára [37–51].

A 13. ábra egy hazai müografikus mérés eredményét mutatja kb. 1 fokos szögfelbontással. Surányi és munkatársai a Wigner FK hordozható detektoraival végeztek méréseket a Budai-hegységben található Királylakai-táró belsejében [39, 40]. A mért müonhozamból rekonstruált közethosszak és a geodéziai módszerrel mért közethosszak különbsége 7–10 méteres anyaghiányt (piros folt) mutatott. A táró feletti kőzetet megfúrták, és egy karsztos törészónát találtak, amely kis sűrűségű törmelékkel volt feltöltve. A Wigner FK munkatársai hazai barlangrendszerekben (pl. Esztramos, Sátorkőpusztai-barlang) is végeztek feltáró célú méréseket. Ezek elemzése folyamatban van.

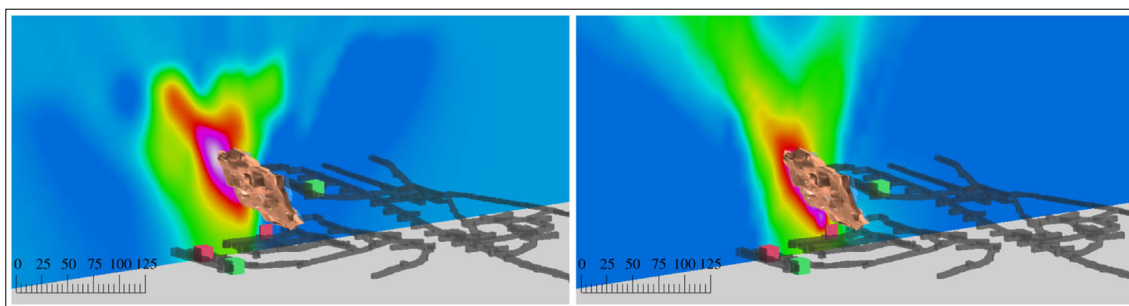
6.3. Bányászati kutatások és bányabiztonság

Jelenlegi társadalmunk fenntartható, környezetvédelmi-eg elfogadható fejlődéséhez fontosak bizonyos, az EU által is kritikusnak elismert nyersanyagok (pl. bauxit, lítium stb.). A nyersanyagforrások feltárása szükséges a gazdaságok zöld és digitális transzformációinak megvalósításához. A háromdimenziós geofizikai modellezés segíti a geológiai értelmezést és bányászati infrastruktúrák tervezését. A föld alatti kőzetek távoli, roncsolásmentes és passzív módszerrel való kutatása hozzájárulhat a pontosabb geológiai modellezéshez. A müográfia kimutathatja a nagyobb érctesteket, a kitermelés után megmaradt kisebb készleteket, a bányainfrastruktúrák (fúrólukak,



13. ábra | Királylakai-táró felett detektált sűrűség-hossz-anómália müografikus képe [39, 40]. A színskála a müonszámból meghatározott, illetve a geometriai adatokból kapott közethossz különbsége, a kontúrvonalak a felszíntől való tényleges távolságot jelzik

Figure 13 | Density anomaly detected by muography above the Királylakai tunnel is shown [39, 40]. Colours indicate the difference between the rock thickness calculated from the measured muon flux, and the actual rock thickness. Contour lines show the distance to the surface



14. ábra | A McArthur River bányában található urániumérc sűrűségeloszlásának szeletei a mért és szimulált adatok rekonstrukciójával [44]
Figure 14 | The slices of the measured and simulated density distribution of Uranium deposit in McArthur River mine [44]

alagutak) kialakítását veszélyeztető törések és üregek felderítését és a bányainfrastruktúrák (pl. meddőhányó vagy iszaptároló tó gátja) szerkezetének vizsgálatát segítheti [37].

Az alkalmazott mérési berendezések tervezésénél fontos szempont, hogy a műondetektorok a bányában előforduló veszélyes anyagoktól, melléktermékektől elzárva működhessenek, és a földkéregből eredő természetes háttérsugárzás és lokális radioaktivitás által keltett ionizáló részecskék detektálását minimalizálják. Bányászati vizsgálatokra elsősorban hordozható (4. ábra bal panel) berendezések alkalmazhatók a helyi környezeti adottságokra történő optimalizálást követően.

A müográfia bányászati alkalmazhatóságának kidolgozásán jelenleg néhány vállalkozás dolgozik világszerte. Az eddig közzétett eredmények elsősorban nagyobb ércetek müográfiai detektálhatóságát demonstrálták [44]. A 14. ábra az ausztráliai McArthur River bányában felmért uránérckészlet müontomográfiai képének egy szeletét mutatja a müográfiával mért (bal) és szimulált (jobb) adatokkal [44]. Schouten és munkatársai rekonstruálták az 500 m és 640 m mélységek között elhelyezkedő uránérc (barna színű) pontos helyét és alakját. A müontomográfiahoz felhasznált méréseket szcintillációs detektorokkal végezték el a bányaalagutak négy különböző helyén (színes kockák). A mérések és szimulációk közötti különbségeket a szimulációhoz használt homogén sűrűségeloszlás használata okozta.

A Wigner FK Innovatív Detektorfejlesztő Lendület Kutatócsoportja hordozható berendezésekkel járul hozzá különböző európai projektek keretében végzett bányászati célú müográfiai mérésekhez. A további, müográfiai adatok elemzésére koncentráció, tudományos hozzájárulások elősegíthetik ennek a müográfiai alkalmazásnak a jövőbeli hazai hasznosításait is.

6.4. Régészeti kutatások és kulturális örökségek védelme

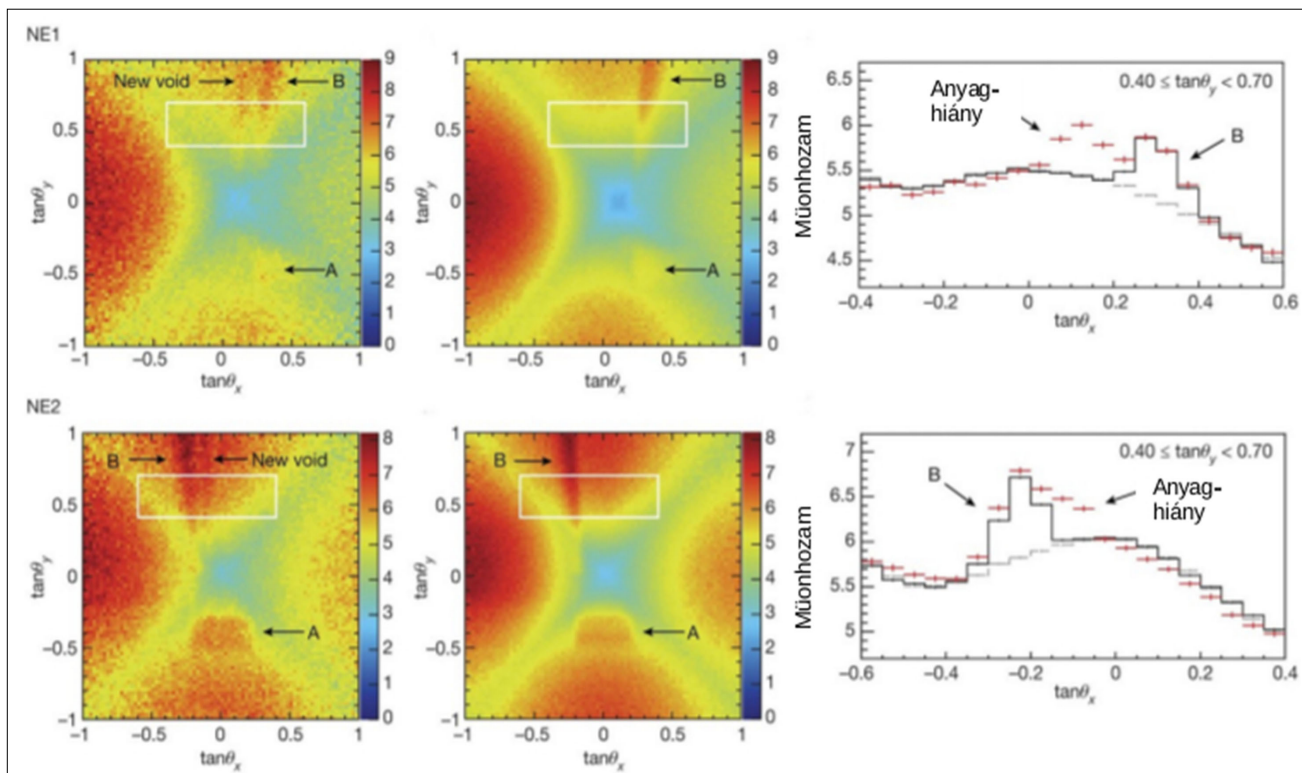
Alvarez és munkatársai úttörő mérése számos kutatást inspirálnak világszerte. A roncsolásmentes és passzív mérések segíthetik a nem hozzáférhető régészeti struktúrák feltárását is. A jelentős társadalmi érdeklődés és viszonylag nagy tudományos impakt miatt a régészet a müográfia

egyik legismertebb alkalmazási iránya. Az eddigi mérések célja elsősorban rejtett kamrák, sírok és járatok feltárását célozzák piramisokban [52–54] és további építmények belsejében vagy alatt (lásd pl. [55] és [56]).

A 15. ábrán látható a ScanPyramid interdiszciplináris projekt által a Hufu piramis (gízai nagy piramis) hozzáférhető járataiban végzett müográfiai mérések első eredménye [53]. A felső és alsó sor paneljai két különböző helyről végzett méréseket (bal), szimulációkat (közép) és ezek fehér négyzetekből kivágott szeleteit (jobb) mutatják. A müografikus képeken jól látható a piramis gúla alakú felépítése és az ismert struktúrák (A: Nagy Galéria, B: Királyok Kamrája) is észrevehetőek. A mérések (piros pontok) és a szimulációk (fekete hisztogramok) összehasonlítása szignifikáns müonhozam-többletet mutatnak, amelyek egy nagy üreg vagy több kisebb üreg jelenlétére utalnak. Ezt további müográfiai mérések is megerősítették. Ennek pontos értelmezését eddig nem közölték a szakértők. A későbbi müográfiai mérésekkel sikerült kimutatni és méretét meghatározni egy, a piramis bejáratánál elhelyezkedő folyosónak [54]. Ezt a felfedezést fúrással és kameraképekkel validálták. A régészek szerint ezt a folyosót a piramis megfelelő súlyeloszlásának biztosítása miatt építették.

Egy olasz kutatócsoport a nápolyi Echia-domb tetején található kastély alatt talált eddig feltáratlan üregeket [55]. A Wigner FK kutatócsoportja jelenleg a Budai Vár és a szicíliai Mussomeli kastély alatt végez üregkutatási céllal méréseket együttműködésben hazai és külföldi partnerekkel.

További alkalmazási lehetőség a kulturális örökségek védelme, azok szerkezetének vizsgálatával és monitorozásával. A Los Alamos Nemzeti Laboratórium és a Firenzi Egyetem munkatársai a firenzei Liliomos Szűz Mária-székesegyház tetőszerkezetének elmozdulását vizsgálták a müonhozam monitorizálásával [56]. Tanaka és munkatársai a Wigner FK-ban fejlesztett technológián alapuló berendezéseket alkalmazva két irányból végzett müográfiai mérésekkel tártak fel a japán Imashirozuka sírdomb (kofun) belsejében egy függőleges repedést [57]. Ezt az 1596-os Fushimi földrengés által keltett forgási földcsuszamlás hozott létre. A mérési eredményekből arra következtettek, hogy már a földrengést megelőzően szerkezeti problémák merülhettek fel lehettek a sírdombnál. Liu és munkatársai a Xi'an védelmi fal egyik bástyájának



15. ábra A Hufu piramis két helyről elvégzett müografikus feltárásának eredményei: mért (bal ábra) és szimulált (középső ábra) müonhozamok és azok egy szeletének (fehér négyzet) összehasonlítása (jobb ábra). A mért (piros pontok) és szimulált (fekete hisztogrammok) müonhozamszeletek különbsége ismeretlen üreg jelenlétét mutatta ki [53]

Figure 15 The results of the muographic surveys of Khufu pyramid from two location: measured (left panel) and simulated (middle panel) muon fluxes and comparison of slices (right panel) extracted from the region designated by the white rectangle. Comparison of the slices of measured (red) and simulated muon fluxes revealed the presence of a new void [53]

szerkezetét vizsgálták hat irányból végzett mérésekkel [58]. A tomográfiai képek egy gyenge régiót tártak fel a bástyában.

7. Összefoglalás

A bemutatott eredmények demonstrálják, hogy a roncsolásmentes és passzív müografikus mérések sokoldalúan alkalmazhatók a természet és az ember alkotta szerkezetek tömegsűrűség-eloszlásának feltárásához és monitorozásához. A szilárd testek feltárása mellett a müográfia ígéretes módszernek ígérkezik a vizek [59] és a légkör [60] jelenségeinek monitorozására is. A helymeghatározáshoz [61] és időméréshez [62] kapcsolódó, müon-detektáláson alapuló alkalmazások is kidolgozásra várnak az elkövetkező években.

A Wigner Fizikai Kutatóközpont müografiai műszerfejlesztések hozzájárultak különböző kutatásokhoz és alkalmazásokhoz nemzetközi együttműködésekben végzett munkák révén. A hazai geofizikai kutatásokhoz és ipari alkalmazásokhoz is hozzájárulhat a nagyenergiás fizika és geofizika határterületén található müográfia: egy tudomány, amely a részecskefizikai alap kutatásból nőtt ki és vált a társadalom számára hasznossá.

Köszönetnyilvánítás

Oláh Lászlót a Japán Oktatási, Kulturális, Sport, Tudományos és Technológiai Minisztérium (MEXT) Következő Generációs Vulkánkutatás Integrált Programja támogatja. Varga Dezsőt és Hamar Gergőt az OTKA-FK-135349, a TKP2021-NKTA-10, és az ELKH KT SA-88/2021, valamint az ERI JURP 2020-H-05 és „INTENSE” H2020 MSCA RISE, GA No. 822185 pályázati programok támogatják. Hamar Gergőt a Bolyai-pályázat támogatja. A szerzők köszönik a Tokiói Egyetemnek és a Wigner Fizikai Kutatóközpontnak kutatásaik támogatását.

A tanulmány szerzői

Oláh László, Balázs László, Barnaföldi Gergely Gábor, Galgóczi Gábor, Gera Ádám László, Hamar Gergő, Nyitrai Gábor, Surányi Gergely, Tanaka Hiroyuki K. M., Varga Dezső

Szerzői hozzájárulások

A kéziratot Oláh László írta. A kéziratot Balázs László, Gera Ádám László, Nyitrai Gábor, Surányi Gergely és Varga Dezső javította. A kéziratot a többi társszerző megtekintette és jóváhagyta.

Hivatkozások

- [1] George E. P. (1955): Cosmic rays measure overburden of tunnel. *Commonwealth Engineer*, p. 455
- [2] Alvarez L. W., et al. (1970): Search for hidden chambers in the pyramids. *Science*, 167, 832–839. <https://doi.org/10.1126/science.167.3919.832>
- [3] Caffau E., Coren F., Giannini G. (1997): Underground cosmic-ray reconstruction of the “Grotta Gigante” natural cave. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, 385, 480–488. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)01041-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01041-8)
- [4] 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 and Methods in Physics Research Section A*, 356, 585. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01169-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01169-9)
- [5] Tanaka H. K. M., et al. (2007): High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 263, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.09.001>
- [6] Tanaka H. K. M. (2014): Particle Geophysics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 535–549. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054632>
- [7] Bonechi L., D’Alessandro R., Giammanco A. (2020): Atmospheric muons as an imaging tool. *Reviews in Physics*, 5, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100038>
- [8] Lechmann A., et al. (2021): Muon tomography in geoscientific research – A guide to best practice. *Earth-Science Reviews*, 222, 103842. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103842>
- [9] Oláh L., Tanaka H. K. M., Varga D. (2022): Exploring Earth’s Subsurface with Elementary Particles. *Geophysical Monograph*, 270, American Geophysical Union, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9781119722748>
- [10] Cecchini S., Spurio M. (2012): Atmospheric muons: experimental aspects. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 1, 185–196. <https://doi.org/10.5194/gi-1-185-2012>
- [11] Groom D. E., Mokhov N. V., Striganov S. I. (2002): Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 76, 183–356. <https://doi.org/10.1006/adnd.2001.0861>
- [12] Leone G., et al. (2021): Muography as a new complementary tool in monitoring volcanic hazard: implications for early warning systems. *Proc. R. Soc., A* 477, 20210320. <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0320>
- [13] Morishima K., Kitagawa N., Nishio A. (2022): Development of Nuclear Emulsions for Muography. *Geophysical Monograph*, 270, 289–299. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch21>
- [14] Marteau J., et al. (2022): Development of scintillator-based muon detectors for muography. *Geophysical Monograph*, 270, 237–252. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch17>
- [15] Varga D., Hamar G., Oláh L. (2022): Development of multi-wire proportional chamber-based trackers for muography. *Geophysical Monograph Series*, 270, 267–278. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch19>
- [16] Varga D., et al. (2022): Construction and Readout Systems for Gaseous Muography Detectors. *Journal of Advanced Instrumentation in Science*, 2022, JAIS-307. <https://doi.org/10.31526/jais.2022.307>
- [17] Agostinelli S., et al. (2003): GEANT4 – a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, 506, 250–303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [18] Nagahara S., Miyamoto S., Morishima K., Nakano T., Koyama M., Suzuki Y. (2022): Three-dimensional density tomography determined from multidirectional muography of the Omuroyama scoria cone, Higashi-Izu monogenetic volcano field, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 84, 94. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01596-y>
- [19] Nishiyama R. (2022): Joint Inversion of Muography and Gravity Data for 3D Density Imaging of Volcanoes. *Geophysical Monograph*, 270, 33–42. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch3>
- [20] Caricchi L., et al. (2021): The build-up and triggers of volcanic eruptions. *Nat Rev Earth Environ*, 2, 458–476. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00174-8>
- [21] Poland M. P., Anderson K. R. (2020): Partly cloudy with a chance of lava flows: Forecasting volcanic eruptions in the twenty-first century. *JGR Solid Earth*, 125(1), e2018JB016974. <https://doi.org/10.1029/2018jb016974>
- [22] Tanaka H. K. M. (2019): Japanese volcanoes visualized with muography. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 377, 20180142. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0142>
- [23] Portal A., et al. (2013): Inner structure of the Puy de Dôme volcano: cross-comparison of geophysical models (ERT, gravimetry, muon imaging). *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2, 47–54. <https://doi.org/10.5194/gi-2-47-2013>
- [24] Gibert D., et al. (2022): Observation of the dynamics of hydrothermal activity in La Soufrière de Guadeloupe Volcano with joint muography, gravimetry, electrical resistivity tomography, seismic and temperature monitoring. *Geophysical Monograph*, 270, 55–73. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch5>
- [25] Rosas-Carbajal M., Jourde K., Marteau J., Deroussi S., Komorowski J.-C., Gibert D. (2017): Three-dimensional density structure of La Soufrière de Guadeloupe lava dome from simultaneous muon radiographies and gravity data. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 6743–6751. <https://doi.org/10.1002/2017GL074285>
- [26] Oláh L., Tanaka H. K. M., Ohminato T., Varga D. (2018): High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors. *Sci. Rep.*, 8, 3207. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21423-9>
- [27] Tioukov V., et al. (2022): Structure of the Shallow Supply System at Stromboli Volcano, Italy, through integration of muography, digital elevation models, seismicity, and ground deformation data. *Geophysical Monograph* 270, 75–91. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch6>
- [28] Lo Presti D., et al. (2020): Muographic monitoring of the volcano-tectonic evolution of Mount Etna. *Sci. Rep.*, 10, 11351. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68435-y>
- [29] D’Errico M., et al. (2022): The MURAVES experiment: A study of the Vesuvius great cone with muon radiography. *Journal of Advanced Instrumentation in Science*, 2022, JAIS-273. <https://doi.org/10.31526/JAIS.2022.273>
- [30] Biggs J., et al. (2014): Global link between deformation and volcanic eruption quantified by satellite imagery. *Nat. Commun.*, 5, 3471. <https://doi.org/10.1038/ncomms4471>
- [31] Oláh L., et al. (2023): Muon imaging of volcanic conduit explains link between eruption frequency and ground deformation. *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2022GL101170 <https://doi.org/10.1029/2022GL101170>
- [32] Oláh L., Tanaka H. K. M., Ohminato T., Hamar G., Varga D. (2019): Plug formation imaged beneath the active craters of Sakurajima volcano with muography. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 10417–10424. <https://doi.org/10.1029/2019GL084784>
- [33] Nomura Y., et al. (2020): Pilot study of eruption forecasting with muography using convolutional neural network.

- Sci. Rep., 10, 5272. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62342-y>
- [34] Oláh L., Tanaka H. K. M. (2022): Machine learning with muographic images as input: An application to volcano eruption forecasting. *Geophysical Monograph*, 270, 43–54. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch4>
- [35] Tanaka H. K. M. (2020): Development of the muographic tephra deposit monitoring system. *Sci. Rep.*, 10, 14820. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71902-1>
- [36] Oláh L., Hamar G., Tanaka H. K. M. (2021): Muographic monitoring of hydrogeomorphic changes induced by post-eruptive lahars and erosion of Sakurajima volcano. *Sci. Rep.*, 11, 17729. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96947-8>
- [37] Holma M., et al. (2022): Future prospects of muography for geological research and geotechnical and mining engineering. *Geophysical Monograph*, 270, 199–219. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch15>
- [38] Oláh L., et al. (2012): CCC-based muon telescope for examination of natural caves. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 1, 229–234. <https://doi.org/10.5194/gi-1-229-2012>
- [39] Surányi G., et al. (2016): Sűrűséganomáliák helyének meghatározása nagy energiájú kozmikus müonok segítségével. In: *Karsztfelődés XXI*. Szombathely, 2016, 203–216.
- [40] Hamar G., Surányi G., Oláh L., Varga D. (2022): Exploration of underground cave systems with muography. *Geophysical Monograph*, 270, 153–163. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch11>
- [41] Tanaka, H. (2015): Muographic mapping of the subsurface density structures in Miura, Boso and Izu peninsulas, Japan. *Sci. Rep.*, 5, 8305. <https://doi.org/10.1038/srep08305>
- [42] Nishiyama R., et al. (2015): First measurement of ice-bedrock interface of alpine glaciers by cosmic muon radiography. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 6244–6251. <https://doi.org/10.1002/2017GL073599>
- [43] Nishiyama R., et al. (2019): Bedrock sculpting under an active alpine glacier revealed from cosmic-ray muon radiography. *Sci. Rep.*, 9, 6970 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43527-6>
- [44] Schouten D. (2019): Muon geotomography: selected case studies. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 377, 20180061. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0061>
- [45] Borselli D., et al. (2022): Three-dimensional muon imaging of cavities inside the Temperino mine (Italy). *Sci. Rep.*, 12, 22329. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26393-7>
- [46] Lázaro Roche I., et al. (2022): Water resource management: The multi-technique approach of the low background noise underground research laboratory and its muon detection projects. *Geophysical Monograph*, 270, 137–152. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch10>
- [47] Basset M., et al. (2006): MGR: An innovative, low-cost and compact cosmic-ray detector. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, 567, 298–301. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.05.099>
- [48] Oláh L., et al. (2018): The first prototype of an MWPC-based borehole-detector and its application for muography of an underground pillar. *Butsuri Tansa*, 71, 161–168. <https://doi.org/10.3124/segj.71.161>
- [49] Cimmino L., et al. (2021) A new cylindrical borehole detector for radiographic imaging with muons. *Sci. Rep.*, 11, 17425. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96247-1>
- [50] Yamazaki K., Taketa A., Ikeda D., Omura K. (2022): Development of detector and method for density structure measurement of fault zones using cosmic ray muons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1031, 166518. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166518>
- [51] Thompson L. F., et al. (2022): Muography, a key technology for monitoring carbon geostorage. *Geophysical Monograph*, 270, 185–197. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch14>
- [52] Aguilar S., et al. (2011): Searching for cavities in the Teotihuacan Pyramid of the Sun using cosmic muons. In: 32th ICRC conference, Beijing <https://articles.adsabs.harvard.edu/full/2011ICRC....4..325M>
- [53] Morishima K., et al. (2017): Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, 552, 386–390. <https://doi.org/10.1038/nature24647>
- [54] Procureur S., et al. (2023): Precise characterization of a corridor-shaped structure in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nat. Commun.*, 14, 1144. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36351-0>
- [55] Saracino G., et al. (2017): Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples). *Sci. Rep.*, 7, 1181. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01277-3>
- [56] Guardincerri E., et al. (2019): Imaging the dome of Santa Maria del Fiore using cosmic rays. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 377, 20180136. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0136>
- [57] Tanaka H. K. M., Sumiya K., Oláh L. (2020): Muography as a new tool to study the historic earthquakes recorded in ancient burial mounds, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 9, 357–364. <https://doi.org/10.5194/gi-9-357-2020>
- [58] Liu G., et al. (2023): High-precision muography in archaeogeophysics: A case study on Xi'an defensive walls. *Journal of Applied Physics*, 133, 014901. <https://doi.org/10.1063/5.0123337>
- [59] Tanaka H. K. M., et al. (2022): Periodic sea-level oscillation in Tokyo Bay detected with the Tokyo-Bay seafloor hyper-kilometric submarine deep detector (TS-HKMSDD). *Sci. Rep.*, 12, 6097 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10078-2>
- [60] Tanaka H. K. M., et al. (2022): Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones. *Sci. Rep.*, 12, 16710. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20039-4>
- [61] Tanaka H. K. M. (2020): Muometric positioning system (μ PS) with cosmic muons as a new underwater and underground positioning technique. *Sci. Rep.*, 10, 18896. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75843-7>
- [62] Tanaka H. K. M. (2022): Cosmic time synchronizer (CTS) for wireless and precise time synchronization using extended air showers. *Sci. Rep.*, 12, 7078. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11104-z>