

Uudenlaisen geofysiikan äärellä:

Osa 4 - Myonikuvauksen geotieteellisiä ja arkeologisia sovelluksia

JARMO KORTENIEMI, MARKO HOLMA JA PASI KUUSINIEMI

Myonikuvaus (myonigrafian eräs sovellus) on keino saada tietoa mielenkiinnon kohteen sisäisistä tiheysvaihteluista ilman siihen kajoamista. Tekniikassa havainnoidaan luonnollisen taustasäteilyn tiettyä osaa, myonihiuksasia. Myonikuvaus perustuu taivaalta ”satavien” myonien erinomaiseen kykyyn läpäistä kaikkea tunnettua ainetta sekä niiden vuorovaikutukseen väliaineen kanssa. Myonit menettävät energiaansa kulkiessaan aineen läpi ja hajoavat lopulta muiksi hiukkasiksi. Tämä vuorovaikutus riippuu kuljetusta väliaineesta: mitä tiheämpää väliaine on ja mitä paksumpi kerros sitä on läpäistävä, sitä enemmän myoneja matkan varrella menetetään. Tekniikka vertautuu röntgenkuvaukseen, mutta mahdollistaa paljon suurempien kohteiden läpivalaisun.

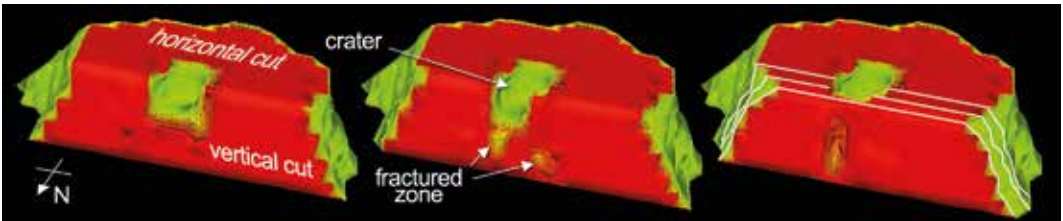
Useimmat myoni-ilmaisimet mittaavat niihin osuvien myonien määrät ja tulosuunnat. Havaintojen avulla kuvauskohteen sisäisestä rakenteesta rekonstruoidaan kaksi- tai kolmiulotteinen tiheyskuva tai aikasarja kohteen sisäosien tiheyden muutoksista. Myonikuvauksen etu on passiivisuus, sillä pitkälle automatisoidut taustasäteilyä seuraavat ilmaisimet toimivat kentällä varsin itsenäisesti. Kenttäolosuhteisiin soveltuvat ilmaisimet vievät vain vähän energiaa sekä kestävät kuumuutta, pakkasta ja veteen upotusta. Ihmisen tarvitsee vain odottaa aineiston kertymistä ja sitten analysoida data. Vaikka alustava tutkimus voikin hoitua jopa tunneissa, tyypilliset mittaussajat vaihtelevat päivistä kuukausiin – mitä useampia myoneja saadaan havaittua,

sitä tarkempia yksityiskohtia kohteesta erotetaan (Tanaka 2016; Lechmann ym. 2021). Modernin myoni-ilmaisimen kulmaresoluutio on tyypillisesti noin 10 mrad eli $\sim 0,57^\circ$ tai vieläkin parempi, eli laitteella voi erottaa 10 metrin levyisen kohteen kilometrin etäisyydeltä. Ilmaisimilla voidaan tunnistaa jopa 2 %:n tiheyseroja (Hivert ym. 2015, 2017). Myonikuvauksen onnistumiseksi kannattaa selvittää sekä alueen yleiset materiaalitiheydet että tunnettujen kerrosten (ml. maanpinnan, taustan ja mahdollisten tunnelien) kolmiulotteinen muoto mahdollisimman hyvin etukäteen (esim. Procureur 2018; Romero Mireles 2024).

Artikkelisarjamme edellisissä osissa esittelimme myonikuvauksen peruseriaatteita ja yleisiä käyttökohteita, alan terminologiaa ja historiaa, myoni-ilmaisimia sekä kuvauksen tukena tehtäviä simulaatioita (Holma ym. 2022a, 2023a, 2023b). Tämä artikkeli jatkaa sarjaa tarjoamalla katsauksen tieteellisissä lähteissä julkaistuihin myonikuvauksella tehtyihin geotieteellisiin ja arkeologisiin mittauksiin (ks. myös esim. Lechmann ym. 2021; IAEA 2022). Lukiessa kannattaa myös muistaa, että kyse on vain jäävuoren huipusta: monia kaupallisia tuloksia ei liikesalaisuuksien vuoksi julkisteta.

Tulivuoritutkimukset

Eräs myonikuvauksen merkittävimmistä geotieteellisistä tutkimuskohteista on jo pitkään



Kuva 1. Kolmiulotteinen myonidatasta tehty tulkinta Japanin Asama-tulivuoren sisäosista. Kraatterin (*crater*) alta erottuu selvästi pohjoiseen ulottuva halkeillut alue (oranssi, *fractured zone*). Valkoiset viivat osoittavat kolmen itä-länsi-suuntaisen siivun paikat. Muokattu lähteen Tanaka ym. 2010 kuvan 11 mukaan.

Figure 1. Three-dimensional muon scan interpretation of the internal structure of Japan's Asama volcano. A clear fractured zone (orange) extends northwards from beneath the crater. The white lines represent the locations of the three east-west slices. Modified from Tanaka et al. 2010, Fig. 11.

ollut vulkanologia ja aktiivisten tulivuorten seuranta (Nagamine ym. 1995; Leone ym. 2021). Tekniikka on osoittautunut tehokkaaksi esimerkiksi magmasäiliöiden ja romahdusrakenteiden kartoituksessa, magman ja kaasujen liikkeiden seurannassa sekä hydrotermisten systeemien ulottuvuuksien tunnistamisessa (Tanaka ym. 2005, 2007, 2009; Rosas-Carbaljal ym. 2017; Tioukov ym. 2019). Aikasarjakuvauksella on seurattu käynnissä olevien purkausten etenemistä ja huomattu laavatulpan synty purkauksen loppuvaiheessa (Tanaka ym. 2014; Oláh ym. 2019; Lo Presti ym. 2020).

Japanin Asama-tulivuori on hyvä esimerkki myonikuvauksen hyödyistä (kuva 1). Vuoren kraatterin alta löytyi tekniikan avulla noin 300 x 150 metrin kokoinen pohjoiseen suuntautuva halkeillut vyöhyke, joka liittyyneen vuonna 1783 juuri tuolla paikalla tapahtuneeseen suureen purkaukseen (Tanaka ym. 2010).

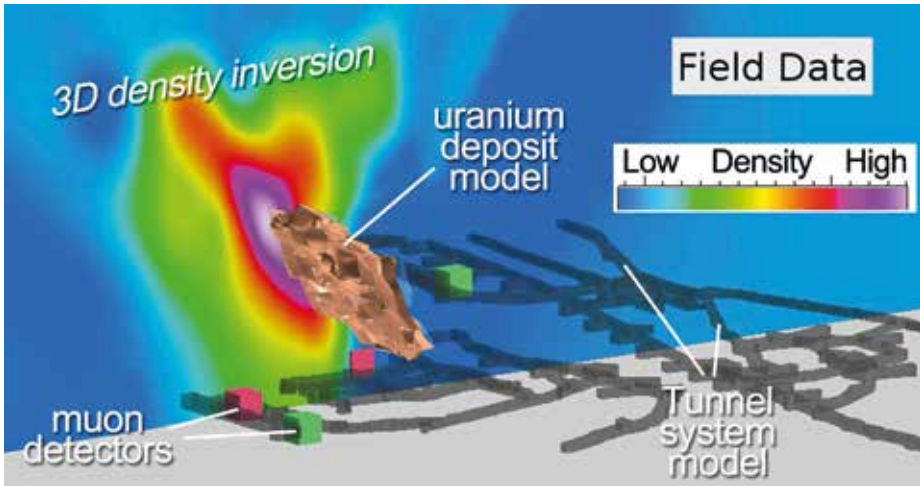
Syvät kalliokartoitukset

Suurienergiset myonit pystyvät läpäisemään kallioperää jopa useita kilometrejä ennen hajoamistaan. Tämä tarkoittaa, että niiden avulla voidaan kuvata myös varsin syvällä sijaitsevia rakenteita. Tällöin ilmaisimeen toki saapuu myoneja paljon harvempaa tahtia kuin pinnan lähellä, mikä pidentää mittausaikaa.

Lisähaasteen tuo myös ilmaisinten sijoittelu: tutkimuskohde täytyy aina saada edes viistosti ilmaisimen ja taivaan väliin.

Kaupallisessa kallioperän tutkimuksessa etsitään usein hyödynnettäviä mineraaleja, eikä löytöjen yksityiskohdista haluta juuri hiiskua kilpailijoille ennen kaivostoiminnan aloittamista. Näissä tapauksissa myoniskannuksista julkaistaan yleensä ainoastaan pilotitutkimuksia, joilla varmistetaan, että tällä monille vielä tuntemattomalla tekniikalla todella havaitaan jo tunnetut esiintymät ja toisaalta tuodaan etsinnälle lisäarvoa, esimerkiksi tarkentamalla tunnettujen malmioiden rajoja.

Kanadan Saskatchewanin Arthur River -kaivoksen uraani esiintymä sijaitsee metasedimenttien ja hiekkakiven välisellä epäjatkuvuuspinnalla noin 600 metrin syvyydellä (kuva 2). Ympäröivän kallion tiheys on 2,50–2,65 g/cm³, mutta noin 15 % uraanioksidia (U₃O₈) sisältävä malmi on huomattavasti tiheämpää. Malmio erottuu hyvin selvästi kolmiulotteisessa mallissa, joka on tehty usean eri suunnasta kohdetta mittaavan myoni-ilmaisimen aineistosta (Schouten & Ledru 2018). Bryman ja muut (2014) esittelevät tutkimuksissaan hieman vastaavanlaista korkean tiheyskontrastin kohdetta Vancouverinsaarelta: Nyrstar Myra Falls -kaivoksessa sijaitsee alle 66 metrin syvyydessä 15 metriä paksu ja 500 metriä pitkä VMS-malmi (vulkanogeeninen



Kuva 2. 3D-kuva McArthur River -kaivoksesta. Taustan värikartta esittää ohuen siivun koko alueen kattavasta myonikuvauksella tuotetusta tiheyskartasta. Mukana myös kaivoksesta saadut mallit tunneliverkostosta (*tunnel system model*) ja uraani-siintymästä (*uranium deposit model*). Muokattu lähteen Schouten & Ledru 2018 kuvan 18 mukaan.

Figure 2. 3D image of the McArthur River Mine. The color map represents a thin slice of the comprehensive density map generated through muon imaging. The models for the tunnel system and the deposit, provided by the mining company, are also shown. Modified from Schouten & Ledru 2018, Fig. 18.

massiivinen sulfidiesiintymä). Malmikivi (tiheys maksimissaan $3,0 \text{ g/cm}^3$) erottuu myonikuvissa erittäin hyvin ympäröivistä $2,7 \text{ g/cm}^3$ tiheyden kivistä (Bryman ym. 2014).

Toscanassa sekä Budapestin ja Napolin ympäristöissä on onnistuneesti testattu myonikuvauksen mahdollisuuksia luonnon muovaamien luolien, suljettujen kaivostunneleiden ja arkeologisten onkaloiden kartoittamisessa (Oláh ym. 2012; Baccani ym. 2019, Saracino ym. 2022). Beni ja muut (2023) löysivät toscanalaisen Temperinon turistikaivoksen alueelta samalla skannauksella sekä pitkäläisen muuttaman metrin paksuisen malmion että aiemmin tuntemattomia, luultavasti muinaisessa kaivostoiminnassa syntyneitä luolastoja.

Käytännön malminetsinnässä myonikuvaus soveltuu esiintymien kartoitukseen aina tutkimuksen alkuvaiheesta (nk. *grassroots*- ja *greenfield*-vaiheet) aina tunnettujen malmioiden ominaisuuksien tarkkaan määrittämiseen (nk. *brownfield*-vaihe) asti (Holma ym. 2022b; Beni ym. 2023). Yksittäinen myoni-ilmais-

kertoo kallion tiheysvaihtelut ilmaisimen yläpuolelta kärjellään seisovan leveän kartion muotoiselta alueelta. Jos ilmaisinta hyödynnetään heti ensimmäisistä kairatuista kairareista alkaen, voidaan suunta mielenkiintoiseen esiintymään selvittää helposti jo etsinnän alussa. Tämä vähentää turhia kairauksia, säästäten niin ympäristöä, aikaa kuin riihikuivaa rahaakin.

Malminetsintä- ja kaivosalalla on monia hyödyllisiä sovelluksia myonikuvaukselle, mukaan lukien uusien mineraaliesiintymien etsiminen, kivimassojen arviointi ja luokittelu, heikkousvyöhykkeiden havaitseminen sekä halkeamien ja muodonmuutosten ajallinen seuranta (Zhang ym. 2020; Holma ym. 2021a, 2022b, 2022c, 2023c; Kuusiniemi ym. 2021; Juutinen ym. 2022; Holma 2023). Useita näistä sovelluksista ollaan paraikaa pilotoimassa erilaisissa hankkeissa (esim. Holma ym. 2022d; Joutsenvaara ym. 2023; AGEMERA 2024; Mine.io 2024; XTRACT 2024).

Muut geotieteelliset tutkimukset

Myonikuvaus soveltuu myös jäätiköiden sekä niiden alaisen kallioperän kartoittamiseen. Sveitsissä sen avulla selvitettiin jyrkissä rinneissä virtaavien laaksojäätiköiden paksuuksia (<50 m), pohjalla olevien kivien tiheyksiä ($2,68 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$) sekä kalliopintojen kaltevuuksia (Nishiyama ym. 2017, 2019). Mitauksia varten myoni-ilmaisimet asennettiin vuoren sisään rautatietunneliin.

Myoneilla voidaan tutkia myös vesi- ja ilmakehää. Tokionlahden alle sijoitetulla myoni-ilmaisinjärjestelmällä on esimerkiksi tunnistettu vuorovesiä, 15 senttimetriä korkea oskilloiva meteotsunami sekä lähes 8000 kilometrin päässä tapahtuneen Hunga Tonga–Hunga Ha'apai -tulivuoren merenalaisen purkauksen synnyttämä 20 senttimetriä korkea tsunami (Tanaka ym. 2021, 2022a, 2022b; Tanaka 2022; University of Oulu 2022). Samalla järjestelmällä kuvattiin myös trooppisen syklonin sisärakennetta ensimmäistä kertaa maailmassa (Tanaka ym. 2022b). Myonien määrän on myös havaittu muuttuvan erittäin sähköisten ukkospilvien kohdalla (Chilingarian ym. 2021).

Pyramidien läpivalaisu

Myonit nousivat suuren yleisön tietoisuuteen Egyptin pyramidien skannausten myötä. Kheopsin pyramidin myonikuvaus paljasti paitsi jo perinteisin menetelmin tutkitut salit, myös yli 30 metriä pitkän aiemmin tuntemattoman ja rakenteeltaan muista poikkeavan ontelon sekä myöhemmin vielä pienemmän 9 metrin pituisen käytävän (Morishima ym. 2017; Procureur ym. 2023).

Egyptin toiseksi suurinta pyramidia, Khefrenin pyramidia, luodattiin myoneilla jo 1960-luvun lopulla (Alvarez ym. 1970). Vaikka kuvaustekniikka oli tuolloin vasta lapsenkengissä, pyramidista tunnistettiin jo

selvästi sen muoto sekä kaikki tunnetut huoneet. Uusia saleja ei havaittu – eikä sellaisia ole tuosta rakennuksesta löydetty vielä tänäkään päivänä.

Pyramidien myonikuvauksille on lähiaikoina tulossa jatkoa. Tekniikkaa tullaan tällä kertaa käyttämään Meksikon Chichen Itzassa sijaitsevan, noin tuhat vuotta vanhan Kukulcanin porraspyramidin sisärakenteiden selvittämiseen (O'Keefe 2021; Romero Mireles 2024).

Myonikuvauksella on paljon potentiaalia

Myonikuvaus tukee ja täydentää perinteisiä geotieteellisiä tutkimusmenetelmiä. Se tarjoaa merkittäviä ja ainutlaatuisia parannuksia kuvattujen kohteiden ymmärtämiseen sekä tutkimusten kustannustehokkuuteen (esim. Lesparre ym. 2012; Nishiyama ym. 2014). Tekniikalla voidaan selvittää minkä tahansa kohteen sisäisiä tiheysvaihteluita aina kilometrien mittakaavaan saakka. Menetelmää on ehdotettu käytettäväksi hiilen sidonnan seurannassa ja ydinjätteen loppusijoituksen toimivuuden varmistamisessa. Myonikuvaus sopii sedimenttikerrosten analysointiin, maanpeitteiden pakkaantumisen seurantaan, jäävirtojen dynamiikan tarkkailuun sekä tiettyjen geotermisten kohteiden tai seismisesti alttiiden vyöhykkeiden tunnistamiseen (esim. Tanaka & Muraoka 2013; Holma ym. 2021b; Holma & Kuusiniemi 2021). Tekniikkaa on sovellettu jopa eläinten tekemien onkaloiden kuvantamiseen eroosioaltilta joentörmällä (Baccani ym. 2021). Myonikuvaus on myös oiva keino helpottaa monia geotieteissä aiemmin työläitä tai kalliita tehtäviä.

Muuta taustatietoa

Artikkeli on kontribuutio Horisontti Eurooppa -ohjelman rahoittamaan AGEMERA-projektiin (*Agile Exploration and Geo-model-*

ling for European Critical Raw materials, nro 101058178, 2022–2025, ks. Holma ym. 2022d). Palaamme sarjan myöhemmissä osissa projektin myöngrafiaan liittyviin tuloksiin.

FM JARMO KORTENIEMI

(jarmo.korteniemi@muon-solutions.com)
Muon Solutions Oy
Arktinen planeettatutkimusinstituutti (APSI)
Lisätietoa Arktisesta
planeettatutkimusinstituutista
(Arctic Planetary Science Institute, APSI):
<http://planetaryscience.fi/>

FM MARKO HOLMA

(marko.holma@muon-solutions.com)
(marko.holma@oulu.fi)
Muon Solutions Oy
Kerttu Saalasti Instituutti, Oulun yliopisto
Arktinen planeettatutkimusinstituutti (APSI)
International Virtual Muography Institute (VMI)

DOS., FT PASI KUUSINIEMI

(pasi.kuusiniemi@muon-solutions.com)
Muon Solutions Oy
Arktinen planeettatutkimusinstituutti (APSI)
International Virtual Muography Institute (VMI)

Jarmo Korteniemi on planetologi ja vapaa tiedetoimittaja sekä toimii Muon Solutions Oy:n viestintäjohtajana. Marko Holma on geologi ja Muon Solutions Oy:n toimitusjohtaja sekä työskentelee lisäksi Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutissa projektigeologina. Fysiikan dosentti Pasi Kuusiniemi toimii Muon Solutions Oy:n operatiivisena johtajana.

Summary

**On the verge of a new kind of geophysics:
Part 4 – Geoscientific and archaeological
applications of muon imaging**

This article is an overview of geoscientific and archaeological findings made using muon imaging and reported in scientific literature (although most commercial studies will not be

published due to trade secrets). Muon imaging is a non-invasive, passive technique used to detect density differences within any target of interest. Read more about the method in our article series (Holma et al. 2022a, 2023a, 2023b).

Muon imaging gained attention through its use on the Egyptian pyramids, mapping them and identifying hidden voids within them (Alvarez et al. 1970; Morishima et al. 2017; Procureur et al. 2023). Ongoing projects include scanning the Temple of Kukulcan in Mexico (O’Keefe 2021; Romero Mireles 2024).

In volcanology, muon imaging has proven to be a powerful tool to study magma reservoirs, track gas movements, identify voids, and monitor eruptions (Tanaka et al. 2005, 2007, 2009, 2010, 2014; Rosas-Carbajal et al. 2017; Oláh et al. 2019; Tioukov et al. 2019; Lo Presti et al. 2020). In hydrospheric and atmospheric research, it has been used to detect meteotsunamis, ocean waves, and even the internal structure of a tropical cyclone (Tanaka et al. 2021, 2022a, 2022b; Tanaka 2022; University of Oulu 2022).

In mineral exploration and mining, muon scanning is a cost-effective technique usable from grassroots to brownfields, reducing unnecessary drilling and providing savings (Holma et al. 2022b). It has been shown to be usable for mapping deep and shallow ore bodies, characterising general bedrock features, and revealing voids within the bedrock (Oláh et al. 2012; Bryman et al. 2014; Nishiyama et al. 2017, 2019; Schouten & Ledru 2018; Baccani et al. 2019; Beni et al. 2024). It can be used to locate deposits, characterise rock masses, detect zones of weakness, and monitor temporal changes (Zhang et al. 2020; Holma et al. 2021a, 2022b, 2022c, 2023c; Kuusiniemi et al. 2021; Juutinen et al. 2022; Holma 2023). Many of these applications are being piloted (e.g., AGEMERA 2024; Mineio 2024; XTRACT 2024).

In addition, muon imaging has been proposed to be used in monitoring carbon sequestration and nuclear waste disposal, studying sediments and soil compaction, and identifying seismically active zones. The method complements traditional geophysical techniques, providing unique insight about the density of any target of interest (Zhang et al. 2020; Holma et al. 2021a, 2022b, 2022c, 2023c; Kuusiniemi et al. 2021; Juutinen et al. 2022). The diverse applications demonstrate its growing value in geoscientific research.

This article is a contribution to the 2022–2025 AGEMERA project (Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw materials; see Holma et al. 2022d and Joutsenvaara et al. 2023 for details).

Lähdeluettelo

- AGEMERA, 2024. Building a resilient Europe through responsible mineral exploration. <https://agemera.eu> [17.9.2024]
- Alvarez, L. W., Anderson, J. A., El Bedwei, F., Burkhard, J., Fakhry, A., ym., 1970. Search for hidden chambers in the pyramids: The structure of the Second Pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption. *Science* 167, 832–839. <https://doi.org/10.1126/science.167.3919.832>
- Baccani, G., Bonechi, L., Bonghi, M., Brocchini, D., Casagli, N., ym., 2019. Muon radiography of ancient mines: The San Silvestro archaeo-mining park (Campiglia Marittima, Tuscany). *Universe* 5, 34. <https://doi.org/10.3390/universe5010034>
- Baccani, G., Bonechi, L., Bonghi, M., Casagli, N., Ciaranfi, R., ym., 2021. The reliability of muography applied in the detection of the animal burrows within River Levees validated by means of geophysical techniques. *Journal of Applied Geophysics* 191, 104376. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104376>
- Beni, T., Borselli, D., Bonechi, L., Bonghi, M., Brocchini, D., ym., 2023. Muon imaging for Cu-Fe ore shoot identification: Results and next challenges. *Journal of Advanced Instrumentation in Science* 2024, JAIS-468. <https://doi.org/10.31526/jais.2024.468>
- Bryman, D., Bueno, J., Davis, K., Kaminski, V., Liu, Z., ym., 2014. Muon Geotomography – Bringing new physics to orebody imaging. Teoksessa: Kelley, K. D. & Golden, H. C. (toim.), Building exploration capability for the 21st century. Special Publications of the Society of Economic Geologists 18, 235–241. <https://doi.org/10.5382/SP.18.11>
- Chilingarian, A., Hovsepyan, G. & Zazyan, M., 2021. Muon tomography of charged structures in the atmospheric electric field. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL094594. <https://doi.org/10.1029/2021GL094594>
- Hivert, F., Lázaro Roche, I., Decitre, J. B., Brunner, J., Busto, J., ym., 2017. Muography sensitivity to hydrogeological rock density perturbation: Roles of the absorption and scattering on the muon flux measurement reliability. *Near Surface Geophysics* 15, 121–129. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016053>
- Hivert, F., Lazaro Roche, I., Decitre, J. B., Gaffet, S., Busto, J., ym., 2015. Temporal tomography of rock density using muon measurements with TPC-MicroMegas. 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, 10.–13.5.2015, Montreal, Kanada. abstrakti ISRM-13CONGRESS-2015-212, 183–191.
- Holma, M., 2023. Beyond Traditional Methods: Muography's Integration into Applied Geophysics for Enhanced Mineral Discovery. Teoksessa: Laakso, V. (toim.), Sovelletun geofysiikan XXIV neuvottelupäivät, 22.11.2023, Oulu, Abstraktikokoelma. Vuorimiesyhdistys, 24–27.
- Holma, M., Arancibia, M. & Kuusiniemi, P., 2021a. Characterisation of Skarn Lithologies with Secondary Cosmic-Ray Muons. Proceedings of the Geological Society of Finland, Volume 2, Abstracts of the 6th Finnish National Colloquium of Geosciences 27th–29th October 2021, Oulu Finland, 24.
- Holma, M., Arola, T. & Kuusiniemi, P., 2021b. Finnish crustal-scale faults as a possible source of deep low-enthalpy geothermal resources. Teoksessa: Kukkonen, I., Veikkolainen, T., Heinonen, S., Karell, E., Kozlovskaya, E., ym. (toim.), Lithosphere 2021 – Eleventh symposium on structure, composition and evolution of the lithosphere. Programme and Extended Abstracts, Virtual meeting, January 19–20, 2021. Institute of Seismology, University of Helsinki, Report S-71, 31–34.
- Holma, M., Hall, A. M., Kuusiniemi, P., Arancibia, M., Sarala, P., ym., 2022c. Exploration and resource delineation of bauxite deposits using cosmic-ray muons. 16th Biennial Meeting SGA 2022, Rotorua, New Zealand, 141–144.
- Holma, M., Korteniemi, J., Casini, G., Saura, E., Šumanovac, F., ym., 2022d. Agile exploration and geo-modelling for European critical raw materials – Introduction to the AGEMERA project. Institute of

- Seismology, Lithosphere 2022: Twelfth symposium on the structure, composition and evolution of the lithosphere. Programme and Extended Abstracts, Åbo Akademi University, Turku, Finland, November 15–17, 2022. University of Helsinki, Report S-72, 51–54.
- Holma, M., Korteniemi, J., Kuusiniemi, P. & Zhang, Z.-X., 2023c. Using a new geophysical tool for improving underground safety in mining and civil engineering: time-sequential muography. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-3567. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3567>
- Holma, M. & Kuusiniemi, P., 2021. Cosmic-ray based geothermal exploration – A short introduction to muography. Teoksessa: Kukkonen, I., Veikkolainen, T., Heinonen, S., Karell, F., Kozlovskaya, E., ym. (toim.), *Lithosphere 2021 – Eleventh symposium on structure, composition and evolution of the lithosphere*. Programme and Extended Abstracts, Virtual meeting, January 19–20, 2021. Institute of Seismology, University of Helsinki, Report S-71, 35–38.
- Holma, M., Kuusiniemi, P. & Korteniemi, J., 2023a. Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 2 – Myonien havaitseminen ja myonikuvauksen peruseriaatteet. *Geologi* 75 (1), 26–43.
- Holma, M., Kuusiniemi, P., Korteniemi, J., Enqvist, T. & Loo, K., 2023b. Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 3 – Simulaatiot myonikuvauksessa. *Geologi* 75 (6), 183–195.
- Holma, M., Kuusiniemi, P., Sarala, P. & Korteniemi, J., 2022a. Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 1 – Myonit ja myonigrafian yleisimmät sovellukset. *Geologi* 74 (6), 219–228.
- Holma, M., Zhang, Z.-X., Kuusiniemi, P., Loo, K. & Enqvist, T., 2022b. Future prospects of muography for geological research and geotechnical and mining engineering. Teoksessa: Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Varga, D. (toim.), *Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles*. Wiley, Hoboken, 199–219. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch15>
- IAEA, 2022. Muon Imaging: Present Status and Emerging Applications. International Atomic Energy Agency, Vienna, 144 s.
- Joutsenvaara, J., Holma, M., Meissner, G., Matselyukh, T., Gutierrez, F. & Suopajarvi, L., 2023. Horizon Europe Project AGEMERA. Teoksessa: Nykänen, V., Cook, N. & Kaija, J., (toim.), *EU SuperCluster Lapland Geoconference*, October 30–31, 2023, Hotel Santa Claus, Rovaniemi, Finland. Geological Survey of Finland, GTK Open File Research Report 55/2023, 164–168.
- Juutinen, M., Holma, M. & Sarala, P., 2022. Seeing through old mining wastes with secondary cosmic rays. EGU General Assembly 2022, EGU22-10983. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10983>
- Kuusiniemi, P., Holma, M. & Zhang, Z.-X., 2021. Cosmic-ray muography applications in underground tunnelling. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-9667. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9667>
- Lechmann, A., Mair, D., Ariga, A., Ariga, T., Ereditato, A., ym., 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>
- Leone, G., Tanaka, H. K. M., Holma, M., Kuusiniemi, P., Varga, D., ym., 2021. Muography as a new complementary tool in monitoring volcanic hazard: implications for early warning systems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 447, 20210320. <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0320>
- Lesparre, N., Gibert, D., Marteau, J., Komorowski, J.-C., Nicollin, F. & Coutant, O., 2012. Density muon radiography of La Soufrière of Guadeloupe volcano: comparison with geological, electrical resistivity and gravity data. *Geophysical Journal International* 190, 1008–1019. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05546.x>
- Lo Presti, D., Riggi, F., Ferlito, C., Bonanno, D. L., Bonanno, G., ym., 2020. Muographic monitoring of the volcano-tectonic evolution of Mount Etna. *Scientific Reports* 10, 11351. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68435-y>
- Mine.io, 2024. A Holistic Digital Mine 4.0 Ecosystem. <https://mineio-horizon.eu> [17.9.2024]
- Morishima, K., Kuno, M., Nishio, A., Kitagawa, N., Manabe, Y., ym., 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>
- 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: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 356, 585–595. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01169-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01169-9)
- Nishiyama, R., Ariga, A., Ariga, T., Käser, S., Lechmann, A., ym., 2017. First measurement of ice-bedrock interface of alpine glaciers by cosmic muon radiography. *Geophysical Research Letters* 44, 6244–6251. <https://doi.org/10.1002/2017GL073599>
- Nishiyama, R., Ariga, A., Ariga, T., Lechmann, A., Mair, D., ym., 2019. Bedrock sculpting under an

- active alpine glacier revealed from cosmic-ray muon radiography. *Scientific Reports* 9, 6970. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43527-6>
- Nishiyama, R., Tanaka, Y., Okubo, S., Oshima, H., Tanaka, H. K. M. & Maekawa, T., 2014. Integrated processing of muon radiography and gravity anomaly data toward the realization of high-resolution 3-D density structural analysis of volcanoes: Case study of Showa-Shinzan lava dome, Usu, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119, 699–710. <https://doi.org/10.1002/2013JB010234>
- O’Keefe, M., 2021. Seeing through walls and breaking down barriers. <https://www.symmetrymagazine.org/article/seeing-through-walls-and-breaking-down-barriers> [15.9.2024]
- Oláh, L., Barnafoldi, G. G., Hamar, G., Melegh, H. G., Suranyi, G. & Varga, D., 2012. CCC-based muon telescope for examination of natural caves Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems 1, 229–234. <https://doi.org/10.5194/gi-1-229-2012>
- 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. *Geophysical Research Letters* 46, 10417–10424. <https://doi.org/10.1029/2019GL084784>
- Procureur, S., 2018. Muon imaging: Principles, technologies and applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 878, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.08.004>
- Procureur, S., Morishima, K., Kuno, M., Manabe, Y., Kitagawa, N., ym., 2023. Precise characterization of a corridor-shaped structure in Khufu’s Pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature Communications* 14, 1144. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36351-0>
- Romero Mireles, L. L., 2024. Explorarán las entrañas de la pirámide de Kukulkán en Chichén Itzá. *Universidad Nacional Autónoma de México*. <https://www.gaceta.unam.mx/exploraran-las-entranas-de-la-piramide-de-kukulcan-en-chichen-itza/> [15.9.2024]
- 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. *Geophysical Research Letters* 44, 6743–6751. <https://doi.org/10.1002/2017GL074285>
- Saracino, G., Ambrosino, F., Baccani, G., Bonechi, L., Cimmino, L., ym., 2022. Detection and 3D reconstruction of cavities inside Mount Echia, Naples, Italy. *Teoksessa: Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Varga, D. (toim.), Muography: Exploring Earth’s Subsurface with Elementary Particles*. Wiley, Hoboken, 165–174. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch12>
- Schouten, D. & Ledru, P., 2018. Muon tomography applied to a dense uranium deposit at the McArthur River mine. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123, 8637–8652. <https://doi.org/10.1029/2018JB015626>
- Tanaka, H. K. M., 2016. Instant snapshot of the internal structure of Unzen lava dome, Japan with airborne muography. *Scientific Reports* 6, 39741. <https://doi.org/10.1038/srep39741>
- Tanaka, H. K. M., 2022. 噴火に関する津波 [Tsunami caused by eruption]. *Tokyo University, notices*, 1/18/2022. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/news/15712/> [15.9.2024]
- Tanaka, H. K. M., Aichi, M., Bozza, C., Coniglione, R., Gluyas, J., ym., 2021. First results of undersea muography with the Tokyo-Bay Seafloor Hyper-Kilometric Submarine Deep Detector. *Scientific Reports* 11, 19485. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98559-8>
- Tanaka, H. K. M., Aichi, M., Balogh, S. J., Bozza, C., Coniglione, R., ym., 2022a. Periodic sea-level oscillation in Tokyo Bay detected with the Tokyo-Bay seafloor hyper-kilometric submarine deep detector (TS-HKMSDD). *Scientific Reports* 12, 6097. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10078-2>
- Tanaka, H., Kusagaya, T. & Shinohara, H., 2014. Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano. *Nature Communications* 5, 3381. <https://doi.org/10.1038/ncomms4381>
- Tanaka, H. K. M. & Muraoka, H., 2013. Interpreting muon radiographic data in a fault zone: possible application to geothermal reservoir detection and monitoring. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems* 2, 145–150. <https://doi.org/10.5194/gi-2-145-2013>
- Tanaka, H. K. M., Nagamine, K., Nakamura, S. N. & Ishida, K., 2005. Radiographic measurements of the internal structure of Mt. West Iwate with near-horizontal cosmic-ray muons and future developments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 555, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.08.099>
- Tanaka, H. K. M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Takeo, M., ym., 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>

Tanaka, H. K. M., Taira, H., Uchida, T., Tanaka, M., Takeo, M., ym., 2010. Three-dimensional computational axial tomography scan of a volcano with cosmic ray muon radiography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 115, B12332. <https://doi.org/10.1029/2010JB007677>

Tanaka, H. K. M., Uchida, T., Tanaka, M., Shinohara, H., & Taira, H., 2009. Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan. *Geophysical Research Letters* 36, L01304. <https://doi.org/10.1029/2008GL036451>

Tanaka, H. K. M., Gluyas, J., Holma, M. Joutsenvaara, J., Kuusiniemi, P., ym., 2022b. Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones. *Scientific Reports* 12, 16710. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20039-4>

Tioukov, V., Alexandrov, A., Bozza, C., Consiglio, L.,

D'Ambrosio, N., ym., 2019. First muography of Stromboli volcano. *Scientific Reports* 9, 6695. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43131-8>

University of Oulu, 2022. Tonga's massive undersea volcanic eruption was also detected using cosmic particle radiation — University of Oulu spinoff company involved in developing the method. <https://www.oulu.fi/en/news/tongas-massive-undersea-volcanic-eruption-was-also-detected-using-cosmic-particle-radiation> [15.9.2024]

XTRACT, 2024. A Sustainable Ecosystem for the Innovative Resource Recovery and Complex Ore Extraction. <https://xtract-project.eu> [17.9.2024]

Zhang, Z.-X., Enqvist, T., Holma, M. & Kuusiniemi, P., 2020. Muography and its potential applications to mining and rock engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53, 4893–4907. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02199-9>

LUMO ANALYTICS



Stop looking. Start finding.

With Lumo Analytics' LIBS based drill core scanner You will get:

- Instant results on-site
- Elemental and mineralogical analysis
- Information for selective core drilling and mining



info@lumoanalytics.com

www.lumoanalytics.com