

# Uudenlaisen geofysiikan äärellä:

## Osa 3 – Simulaatiot myonikuvauksessa

MARKO HOLMA, PASI KUUSINIEMI, JARMO KORTENIEMI, TIMO ENQVIST JA KAI LOO

*Tämä artikkeli on myonigrafiaa eli myonikuvausta käsittelevän kirjoitussarjamme kolmas osa. Sarjan tarkoitus on tehdä tätä uutta geofysikaalista menetelmää tutuksi suomen kielellä. Edellisissä osissa keskityimme menetelmän peruseräisiin, historiaan, myoni-ilmaisimiin sekä myonikuvauksen moniin käyttökohteisiin (Holma ym. 2022a, 2023). Tällä kertaa tutustumme erilaisiin tietokonesimulaatioihin sekä niissä käytettäviin menetelmiin. Simulaatiot liittyvät kiinteästi varsinaisten myonigrafisten mittausten toteuttamiseen ja tulosten tulkintaan.*

Aluksi on syytä kerrata lyhyesti myonigrafian perusteita. Taivaalta sataa koko ajan suur-energisii myoni-nimisiä hiukkasia. Nämä elektronien kaltaiset mutta paljon raskaammat alkeishiukkaset syntyvät yläilmakehässä kosmisten hiukkastörmäysten seurauksena. Maan pinnalle saavuttuaan ne tunkeutuvat hetkessä jopa kilometrin syvyydelle kallioon jättäen jälkeensä hitusen energiastaan. Juuri tämä ominaisuus tekee myoneista käyttökelpoisia tiheysmittauksissa, sillä energiajätö voidaan havaita ilmaisimilla, vaikka itse myoni kulkeekin laitteen läpi.

Myonit liikkuvat huimalla vauhdilla, joka voi olla 95–99 % valonnopeudesta. Kunkin myonin vauhti riippuu sen energiasta – hiukkanen kulkee sitä nopeammin, mitä enemmän energiaa sillä on. Ilmakehässä syntyvien myonien energiat ovat tyypillisesti luokkaa 0,1–1 gigaelektronivoltia (GeV). Pienienergisimmät myonit eivät kuitenkaan pääse edes maahan saakka, vaan luovuttavat energiansa pois jo ilmakehässä hajoten muiksi hiukkasiksi. Merenpinnan tasolla havaittujen – ja myonigrafias-

oikeasti käyttökelpoisten – myonien energia on suurempi, keskimäärin noin 4 GeV. Suuri-energisempiäkin myoneja havaitaan, mutta paljon harvemmin. Esimerkiksi energialtaan yli 1000 GeV:n myoneja havaitaan vain muutamia vuodessa tyypillisellä myonigrafiasa käytettävällä ilmaisimella. Niiden energiamäärä vastaa kutakuinkin tavallisen hyttysen liike-energiaa – joskin pakattuna erittäin paljon pienemmän hiukkasen äärimmäisen nopeaan liikkeeseen. Energiajakauman suhde myonivuohon on kuvattu artikkelisarjan edellisen osan kuvassa 1 (Holma ym. 2023).

Oleellista on, että nopeutensa vuoksi myonin liikkeen matemaattiseen käsittelyyn täytyy soveltaa suhteellisuusteoriaa. Käytännössä tuo tarkoittaa, että myonin ja ulkopuolisen havaitsijan kokemat ajat kulkevat eri tahtia – ilmiöstä voi lukea tarkemmin kirjoitussarjamme ensimmäisestä osasta (Holma ym. 2022a). Onneksi ainakin yleisimmät simulaatio-ohjelmistot kuten GEANT4 ja FLUKA on koodattu ottamaan huomioon tällaiset ilmiöt laskelmia tehdessään.

## Simulaatioiden merkitys

Simulaatioiden avulla voidaan arvioida erilaisten myoni-ilmaisimien tehokkuutta, herkkyyttä ja niissä erottuvaa kohinaa sekä optimoida laitteiden sijoittelua ja suuntausta. Simulaatiot myös auttavat testaamaan ja vertaamaan erilaisia ilmaisinmateriaaleja ja -rakenteita, mikä johtaa parempiin laitteistoihin ja tarkempiin tuloksiin. Tämä puolestaan edesauttaa tulkintaa.

Simulaatioita ei juurikaan käytetä myonien vuorovaikutusten ymmärtämiseen. Myonien (ja muidenkin hiukkasten) vuorovaikutuksia nimittäin tutkitaan kontrolloidussa ympäristössä suoritettujen kokeiden avulla, eli käytännössä hiukkaskiihdyttimillä. Näistä saadut tulokset lisätään simulaatio-ohjelmistojen koodeihin. Myonikuvauksiin käytettävissä simulaatioissa siis nimenomaan hyödynnetään kokeiden avulla määriteltyjä vuorovaikutusominaisuuksia. Myonigrafiasa simulaatiot ovat korvaamattomia lähinnä mittauskohteen optimoinnissa ja myonien käyttäytymisen selvittämisessä erilaisissa sovelluksissa.

Simulaatioita voidaan tehdä – ja usein tehdäänkin – ennen myonigrafista mittausta, sen aikana ja/tai mittauksen jälkeen. Yleisesti ottaen myonigrafiset simulaatiot auttavat ymmärtämään saatuja tuloksia entistä paremmin, tekemään uusia löytöjä ja parantamaan mittausmenetelmiä.

### Ennen mittausta tehtävät simulaatiot

Etukäteen tehdyt simulaatiot ovat hyödyllisiä myonimittauksen suunnittelussa ja optimoinnissa. Ne eivät ole välttämättömiä, mutta auttavat tutkijoita arvioimaan erilaisia mittausparametreja. Simulaatiot antavat esimerkiksi tietoa, miten sijoitella myoni-ilmaisimet ja miten herkkiä niiden tulee olla. Simulaatiot ovat erityisen hyödyllisiä, kun valmistaudutaan kuvaamaan jotain monimutkaista tai uudentyyppistä kohdetta. Simulointitulosten pe-

rusteella voidaan valita optimaaliset asetukset ja oikeanlaiset ilmaisimet, jotta kokeellisissa mittauksissa saavutetaan tarkat ja luotettavat tulokset.

Mittausta edeltävät simulaatiot vastaavat osaksi perinteisen geofysiikan parissa käytettäviä *forward modelling* -prosesseja. Niillä luodaan tunnettuihin parametreihin ja luonnonlakeihin perustuva teoreettinen malli tai simulaatio, jonka avulla voidaan ennustaa millaisia tuloksia mittauksista pitäisi saada. Jos simulaation ja tehdyn mittauksen tulokset eroavat, on se merkki lähtöoletusten virheellisyydestä. Tämä helpottaa suuresti mm. geologisten anomalioiden etsinnässä.

### Simulaatiot mittauksen aikana

Mittauksen kuluessa tehtäviä simulaatioita voidaan käyttää esimerkiksi reaaliaikaisen monitoroinnin ja laadunvalvonnan välineinä. Simulaatioiden avulla tarkkaillaan mittausprosessia ja varmistetaan, että ilmaisimet toimivat oikein ja keräävät luotettavaa dataa. Jos poikkeavuuksia tai ongelmia ilmenee, voidaan simulaatioiden avulla määrittää tarvittavia säätöjä tai korjauksia.

Mittauksen aikaiset simulaatiot voivat lisäksi auttaa optimoimaan mittausstrategiaa ja arvioimaan erilaisten ilmaisinasetusten vaikutusta kerättyyn dataan. Ne myös antavat tietoa, miten mittausta kannattaisi jatkaa, jotta tuloksista tulisi mahdollisimman tarkkoja ja luotettavia. Simulaatiot ovat oiva apu kokeellisten tulosten ja teoreettisten odotusten vertailussa sekä myonigrafisen mittausjärjestelmän toiminnan ymmärtämisessä.

### Mittauksen jälkeiset simulaatiot

Mittauksen päätyttyä tehdyillä simulaatioilla voidaan varmistaa kokeellisten tulosten olevan yhdenmukaisia teoreettisten odotusten ja aiempien tutkimusten kanssa. Jos mittaus-tulokset poikkeavat simuloinnin antamista odotuksista, voi vertailu auttaa tulosten taustalla olevien tekijöiden selvittämisessä. Par-

haassa tapauksessa poikkeamat voivat myös osoittaa, että kohteessa on jokin odottamaton ominaisuus, kuten vaikkapa tiheämpää tai harvempaa ainetta oleva vyöhyke.

Simulaatioita voidaan hyödyntää myös datan visualisoinnissa. Ne auttavat erilaisten kuvantamisalgoritmien toimivuuden, tarkkuuden ja luotettavuuden arvioinnissa sekä tehokkaampien algoritmien kehittämisessä. Simulaatiot auttavat lisäksi ymmärtämään datan epävarmuustekijöitä, kuten muista hiukkasista mahdollisesti aiheutuvaa taustakohinaa ja erilaisten väliainemateriaalien vaikutusta myonien kulkeutumiseen.

Simulaatioiden avulla voidaan myös arvioida, kuinka erilaiset parannukset vaikuttaisivat tuleviin mittauksiin. Näin suhteellisen pienellä vaivalla pystytään kehittämään ja testaamaan uusia menetelmiä ja algoritmeja datan analysoimisessa. Simulaatioiden perusteella voidaan myös suunnitella lisäkokeita, jotka voivat auttaa ratkaisemaan edellisen mittauksen jälkeen ilmenneitä kysymyksiä tai epävarmuuksia.

### Simulaatioiden toteuttaminen käytännössä

Vaikka simulaatioiden käyttö eri tilanteissa tarjoaa monia etuja, on tärkeää huomata niiden täydellisen ja systemaattisen toteuttamisen olevan resurssija vaativa ideaalitalanne. Tuollaisessa tapauksessa simulaatiot suoritettaisiin järjestelmällisesti ja erikseen kussakin vaiheessa, mutta käytännössä resurssien tuomat rajoitukset voivat tehdä tästä haastavaa tai jopa epäkäytännöllistä.

Erityisesti mittauksen jälkeen tehtävät si-

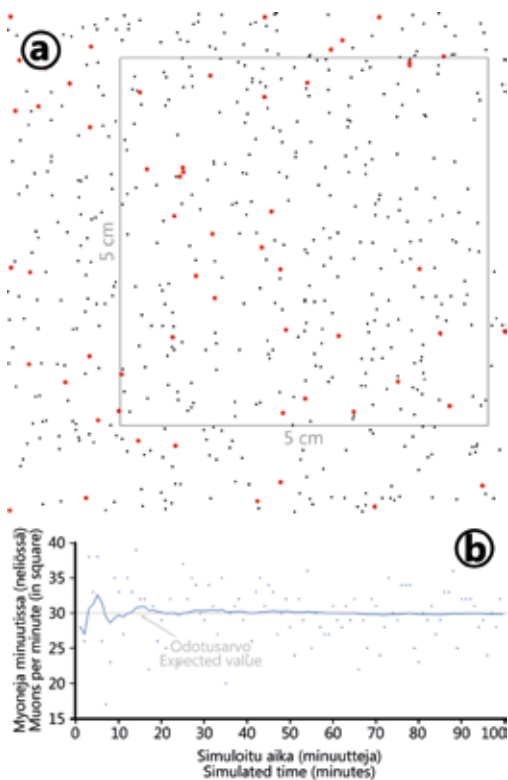
mulaatiot saattavat joutua kilpailemaan resurssista datan analysoinnin, tulosten raportoinnin ja muiden kiireellisten tehtävien kanssa. On myös mahdollista, että simulaatioiden ja todellisten mittausten välillä ilmenee eroavaisuuksia, joiden selvittämiseen kuluu turhaa aikaa. Noin voi käydä esimerkiksi resurssien (esim. laskenta- tai analysointiajan) puutteen vuoksi tai yksinkertaisesti vain siksi, etteivät simulaatiomallit ole riittävän tarkkoja.

### Simulaatio-ohjelmistot

Myonien ja muiden hiukkasten käyttäytymisen ja vuorovaikutuksen simulointiin on tehty monia erilaisia ohjelmistoja. Ne ottavat huomioon sekä hiukkasten että ympäristön ominaisuudet, valonnopeutta lähentelevien nopeuksien tuomat vaikutukset ja monet muut hiukkasfysiikan kommervenkit. Ohjelmistojen ominaisuudet ja käyttötarkoitukset ovat hie- man erilaisia, ja kullakin on omat rajoitteensa.

Useimmat myonikuvauksessa käytettävät simulaatio-ohjelmistot hyödyntävät ns. **Monte Carlo -menetelmää** hiukkasten kulkeutumisen ja vuorovaikutusten mallintamisessa (kuva 1). Menetelmä perustuu satunnaislukujen käyttöön ja tilastolliseen analyysiin. Se on erityisen hyödyllinen hiukkasfysiikan simulaatioissa, sillä Monte Carlo -menetelmä pystyy käsittelemään monimutkaisia tilastollisia (eli stokastisia\*) prosesseja. Tällaisten simulaatioiden avulla voidaan arvioida todennäköisyysjakaumia, energiahäviöitä, kulkeutumisreittejä ja muita myonien käyttäytymiseen olennaisesti liittyviä parametreja.

\*Stokastinen eli satunnainen prosessi viittaa sellaisiin tilastollisiin ilmiöihin tai fysikaalisiin prosesseihin, joiden tulevaa käyttäytymistä ei voida ennustaa tarkasti, mutta jotka kuitenkin noudattavat jollain tapaa sattumanvaraista tai tilastollista jakaumaa. Vaikka prosessissa voi olla sisäänrakennettu säännönmukaisuus, sen lopputulos on epävarma ja saattaa vaihdella eri suorituserroilla. Stokastista prosessia voidaan kuvata matemaattisesti satunnaismuuttujien joukkona, joka on indeksoitu ajan tai jonkin muun muuttujan mukaan.



Kuva 1. Monte Carlo -menetelmällä luotu yksinkertainen simulaatio lehden paperiversion läpi kulkevista myonihukkasista (a). Myonivuoksi on arvioitu  $200 \text{ kpl/m}^2/\text{s}$ , mutta yksittäisten myonien läpäisykohta vaihtelee satunnaisesti. Punaisella on merkitty yhden minuutin ja mustalla kymmenen minuutin aikana sivun lävistäneet myonit. Saman simulaation antama arvio minuutin aikana  $5 \times 5 \text{ cm}$  neliön läpi kulkevien myonien määrästä (b). Kunkin minuutin satunnainen arvo (pisteet) vaihtelee 17 ja 39 välillä, mutta keskiarvotus (viiva) tasoittaa saadun luvun lopulta lähelle odotusarvoa 30. Kuva: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

Figure 1. A simple Monte Carlo simulation of muons passing through the paper version of this magazine (a). The flux is  $200 \text{ muons/m}^2/\text{s}$ , but the specific place of each individual muon is random. Red dots represent muons in one minute, and black dots represent muons after ten minutes. The number of muons passing through the  $5 \times 5 \text{ cm}$  square in one minute, generated by the same simulation (b). The random value for each minute (dots) varies between 17 and 39, but the average (line) evens out close to the expected value of 30. Figure: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

Myonien tapauksessa stokastisia prosesseja liittyy erityisesti niiden moninisiin fysikaalisiin vuorovaikutusprosesseihin muiden hiukkasten kanssa. Kun myonit esimerkiksi kulkevat jonkin väliaineen läpi, ne menettävät samalla energiaansa tuon aineen atomeille ja molekyyille. On kuitenkin mahdotonta sanoa, missä vaiheessa noin käy jollekin tietylle myonille. Tämä tekee energian menetyksestä stokastisen prosessin: vaikka tiedämme vuorovaikutusten yleiset säännöt, emme voi tarkasti ennustaa yksittäisen myonin hetkeä, jolloin se vuorovaikuttaa jonkin toisen hiukkasen kanssa. Myös myonien hajoaminen on stokastista: vaikka myonien keskimääräinen elinikä ( $2,2 \mu\text{s}$ ) tunnetaan, on yksittäisen myonin hajoamishetkeä mahdotonta ennustaa tarkasti. Hajoamisprosessi on sattumanvarainen, mutta noudattaa tunnettua tilastollista jakaumaa.

Esimerkkejä Monte Carlo -menetelmää käyttävistä myonigrafiaan soveltuvista simulaatio-ohjelmistoista ovat GEANT4 (Agostinelli ym. 2003; Allison ym. 2016), FLUKA (Ferrari ym. 2005; Böhlen ym. 2014), CORSIKA (Heck ym. 1998; Engel ym. 2018), MUSIC (Antonoli ym. 1997; Kudryavtsev 2009) ja MUSUN (Kudryavtsev 2009).

**GEANT4 (GEometry ANd Tracking 4)** on edistyneellinen avoimen lähdekoodin ohjelmisto, joka on kehitetty Cernin (Euroopan ydinfysiikan tutkimusjärjestö eli Euroopan hiukkastutkimuskeskus) sekä muiden tutkimuslaitosten yhteistyönä. GEANT4 on suunniteltu tarjoamaan laajan valikoiman työkaluja hiukkasten kulkeutumisen ja vuorovaikutusten mallintamiseen sekä analysointiin erilaisissa hiukkas- ja ydinfysiikan sovelluksissa. Se pohjautuu C++-ohjelmointikielen ja on erittäin hyödyllinen esimerkiksi tutkittaessa hiukkasten vuorovaikutusta aineen kanssa. GEANT4 auttaa simuloimaan myonien kulkeutumista kohteiden läpi ja kuvaamaan kuinka ne vuorovaikuttavat erilaisten materiaalien kanssa. GEANT4:ää käytetään ilmaisimien suunnittelussa, optimoinnissa ja testauksessa,

ja se soveltuu erinomaisesti eri mittausvaiheissa tehtäviin simulaatioihin, tarjoten laajan valikoiman työkaluja taustatietojen hankintaan ja tulosten analysointiin.

**FLUKA** (*FLUktuierende KAskade*) on hiukkasfysiikan simulaatio-ohjelma, joka on kehitetty Cernin, INFN:n (*Italian National Institute for Nuclear Physics*) ja usean muun tutkimuslaitoksen yhteistyöprojektina. Se perustuu FORTRAN-ohjelmointikieleen ja tarjoaa kattavan valikoiman työkaluja hiukkasten kulkeutumisen ja vuorovaikutusten mallintamiseen sekä analysointiin erilaisissa ympäristöissä. FLUKA sopii myös myonikuvaamisen simulaatioihin, sillä sen avulla voidaan ymmärtää myonien kulkeutumista ja vuorovaikutuksia erilaisten kohteiden kanssa. Näin se voi auttaa kehittämään tehokkaampia ja tarkempia myonikuvantamismenetelmiä.

FLUKA soveltuu erinomaisesti säteilyn kuljetuksen ja vuorovaikutusten mallintamiseen. Se sopii hyvin simulaatioiden tekemiseen ennen mittauksia, koska sen avulla voidaan rakentaa tarkkoja malleja myonien vuorovaikutuksista aineen kanssa.

Kuvauksista voi huomata, että FLUKA ja GEANT4 ovat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia monipuolisia ohjelmistoja, joilla kummallakin voidaan tehdä lähes samanlaisia simulaatioita. Käyttäjän kannalta tärkeimmät erot löytyvät lähinnä käyttöliittymistä sekä taustalla olevista ohjelmointikielistä. FLUKA ja GEANT-simulaatio-ohjelmistot sisältävät samoja keskeisiä ominaisuuksia:

- (1) Myonien lisäksi ohjelmilla voidaan simuloida monien muidenkin hiukkasten (esim. protonien, elektronien ja fotonien) kulkeutumista väliaineessa sekä niiden välisiä perusvuorovaikutuksia.
- (2) Kummallakin ohjelmistolla voidaan luoda monimutkaisia geometrioita, jotka kuvaavat esimerkiksi ilmaisimia, kohdeaineita ja ympäristöä. Geometrialla tarkoitetaan tässä tapauksessa koko simulaatioympäristön kuvausta.

- (3) Ne on suunniteltu mukautumiskykyisiksi ja helposti laajennettaviksi, jolloin ne voivat tukea erilaisten tutkimuskohteiden ja sovellusten tarpeita.

**CORSIKA** (*COsmic Ray Simulations for KAscade*) on simulaatio-ohjelma erityisesti kosmisten säteiden vuorovaikutusten ja niiden johdannaisten, kuten myonien, mallintamiseen. CORSIKA on kehitetty KIT:n (*Karlsruher Institut für Technologie*) ja usean muun tutkimuslaitoksen yhteistyönä. Ohjelman koodi kehitettiin pääasiassa Karlsruhessa sijainneiden KASCADE-hiukkasilmäsimien keräämien tulosten pohjalta. CORSIKA perustuu FORTRAN- ja C++-ohjelmointikieliin. Se tarjoaa joukon työkaluja, joiden avulla voidaan analysoida kosmisten säteiden törmäyksiä ilmakehään ja tästä syntyvien johdannaishiukkasten (eli ns. ilmasuihkujen) käyttäytymistä. CORSIKA auttaa ymmärtämään myonien alkuperää, energiaspektriä ja kulkeutumista ilmakehässä. Tämän vuoksi se on erityisen hyödyllinen niissä myonikuvauksen sovelluksissa, joissa on tärkeää arvioida kohteen yläpuolella esiintyvien myonien määrää ja energioiden jakautumista. CORSIKA onkin erinomainen valinta taustatietojen hankkimiseen ja ymmärtämiseen ennen myonigrafisia mittauksia.

**MUSIC** (*MUon Simulation Code*) ja **MUSUN** (*MUon Simulations UNDERground*) ovat erityisesti myonien simulointiin tarkoitettuja ohjelmistoja. Ne keskittyvät mallintamaan myonien kulkeutumista etenkin maanalaisissa ja maa-aineksen peittämissä ympäristöissä. Niiden sovelluskohteet kuitenkin eroavat toisistaan (Antonioli ym. 1997; Kudryavtsev 2009). MUSIC simuloi myonien kulkua paksujen kallio- tai vesikerrosten läpi alaspäin, esimerkiksi kohti maan- tai vedenalaista tutkimuslaitetta. MUSUN puolestaan hyödyntää MUSIC:in tuottamia tuloksia ja yhdistää ne myonien energiaspektreihin ja kulmajakaumiin maan pinnalla simuloidak-

seen myoneja maanalaisessa ”laboratoriossa”. MUSIC siis simuloi myonien kulkua maan alla, MUSUN taas luo maanalaisia myoneja.

Edellä listatut ohjelmistot ovat vain muutamia esimerkkejä työkaluista, joita myonikuvauksessa voidaan hyödyntää. Niistä erityisesti kolme ensimmäistä – GEANT4, FLUKA ja CORSIKA – ovat käytetyimpiä. On kuitenkin tärkeää muistaa, että vaikka nämä ohjelmistot voivatkin tarjota arvokkaita työkaluja myonien kulkeutumisen ja vuorovaikutusten tutkimiseen, niiden soveltuvuus ja tehokkuus vaihtelevat sovellusten ja tutkimustarkoitusten mukaan. Kuva 2 havainnollistaa simulaation kulkua.

## Parametrisointi

Parametrisoinnissa monimutkaisia järjestelmiä, ilmiöitä tai malleja muokataan helpommin hallittavaan muotoon. Tämä tapahtuu lisäämällä tai rajoittamalla säädettäviä tekijöitä eli parametreja. Tavoite on yleensä tehdä järjestelmästä tai mallista tehokkaampi, tarkempi, ymmärrettävämpi tai soveltuvampi tiettyyn tarkoitukseen. Todellisen maailman monimutkaisuus tekee parametrisaatiosta ja yksinkertaistuksesta usein käytännössä pakollista – jopa nykyisten supertietokoneidenkin tehoilla.

**Geofysiikassa** parametrisointia käytetään, koska maapallon sisäisen rakenteen ja prosessien täydellinen mallintaminen on liian monimutkaista ja useimmiten täysin mahdotonta. Parametrisoinnilla luodaan ohjelmallinen laskennallinen malli, joka kuvaa luonnon toimintaa sovittujen sääntöjen (kaavojen) avulla. Parametrisoiduissa malleissa voidaan kuvata vaikkapa lämpötilan, paineen, nesteiden virtauksen ja kiviaineksen ominaisuuksien vaikutuksia maapallon sisällä. Esimerkkeinä voidaan mainita maapallon vaipan konvektion, maankuoren muodonmuutosten ja niihin liittyvän lämmönjohtavuuden sekä -kuljetuksen ja seismisen tomografian mallintaminen (Sambridge ym. 1995). Parametrisointi tekee geofysikaalisista simulaatioista nopeampia ja

laskennallisesti kevyempiä, mikä on tärkeää erityisesti suurten aineistojen ja monimutkaisten mallien käsittelyssä.

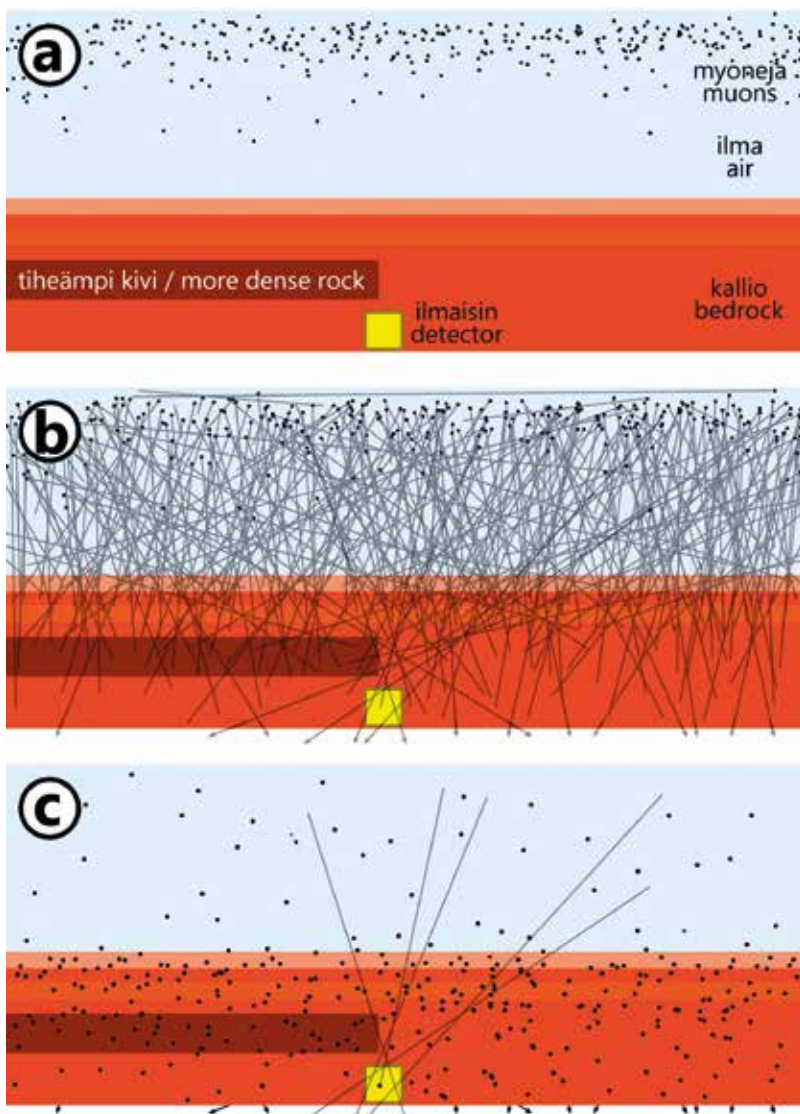
**Hiukkasfysiikassa parametrisointi** yksinkertaistaa hiukkasten vuorovaikutuksia tehostaen laskentaa ja sovittaen teoreettiset mallit kokeellisiin tuloksiin. Tämä edesauttaa mallien vertailua ja ymmärrystä.

**Myonigrafisissa simulaatioissa parametrisointia** käytetään kuvaamaan myonien vuorovaikutusta kohteen kanssa. Tämä mahdollistaa monimutkaisten vuorovaikutusten käsittelyn yksinkertaistamisen kautta, jolloin simulaatio tehostuu. Parametrisointi ja simulaatiot voidaan joissain tapauksissa suorittaa yhdellä ohjelmistolla, mutta tyypillisesti ne tehdään useilla eri tarkoituksiin kehitetyillä ja keskenään yhteydessä olevilla ohjelmilla. Parametrit saadaan joko edeltävistä simulaatioista tai suorista mittauksista, ja ne auttavat rakentamaan sekä kalibroimaan simulaatioita.

Myonigrafiasa tehdään usein ensimmäiseksi ”myonipaketti” simulaatio-ohjelmalla, minkä jälkeen tuotettua synteettistä dataa analysoidaan. Tämän tarkoitus on ymmärtää tutkittavaa kohdetta valitulla skenaariolla. Kun tutkittava kohde eroaa aiemmista kohteista, parametrisointi suoritetaan uudelleen. Parametrisaatio voidaan tehdä myös toisin päin: ensin valitaan parametrit ja vasta sitten tehdään simulaatiot.

Myonigrafisten simulaatioiden keskeiset muuttujat ovat:

- Myonien kulmajakauma: kulma, jolla myonit saapuvat ilmaiseimeen suhteessa pystysuoraan akseliin. Kulmajakauma kuvaa myonien esiintymistiheyttä eri suunnissa ja vaikuttaa myonivuon määrään sekä sen havaitsemiseen.
- Myonivuo: myonien määrä, joka saapuu ilmaiseimeen pinta-ala- ja aikayksikköä kohti. Luku riippuu esimerkiksi ilmaiseimen paikasta suhteessa merenpinnan korkeuteen sekä myonien kulmajakau-



Kuva 2. Piirrossarja kaksiluotteisen myonisimulaation kulusta. Huomaa, että kyse on vain havainnollisuksesta, joka ei perustu oikeaan simulaatioon. Kuvassa (a) on malli yksinkertaisen 2D-ympäristön lähtötilanteesta. Kallion sisällä on tiheämmästä kiviaineksesta koostuva laatta sekä myoni-ilmaisain, ja ilmassa on parvi myonihiukskasia (pisteet). Kuvassa (b) simulaatio liikuttaa myonit materiakerrosten läpi (viivat kuvaavat myonien kulkureittejä). Suurin osa myoneista tuhoutuu matkalla, mutta suurienergisisimmät kulkevat koko mallin lävitse. Kuvaa (c) on merkitty ainoastaan ilmaisimen läpi kulkevien myonien kulkureitit. Kuva: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

Figure 2. A cartoon of a two-dimensional muon simulation process. Note that the image is for illustrative purposes only and is not based on a real simulation. Figure (a) shows a model of the initial state of a simple 2D environment. A slab of denser material and a muon detector are inside the bedrock, and a swarm of muon particles (dots) are up in the air. In Figure (b), the simulation transfers the muons through the matter layers (the lines depict the paths of the muons). Most muons are destroyed en route, but the most energetic ones pass through the entire model. Figure (c) shows only the trajectories of the muons passing through the detector. Figure: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

masta. Tämä johtuu siitä, että mitä lähempää vaakatasoa myoni saapuu ja mitä syvemmälle se joutuu, sitä pidemmän matkan se kulkee ilmassa, vedessä ja/tai geologisissa muodostelmissa. Pitkä kulkumatka lisää vuorovaikutusmahdollisuuksia väliaineen kanssa sekä pysähtymisen todennäköisyyttä ennen havaitsemista. Ilmiö korostuu sitä enemmän, mitä syvemmällä myoni-ilmaisain sijaitsee.

- Myonien energiaspektri eli myonien energioiden jakautuminen. Se vaikuttaa hiukasten tunkeutumissyvyyteen ja sirontaominaisuuksiin.
- Myonien absorptio: myonin energian menettämisen tai aineen absorptioon todennäköisyys myonin kulkiessa simuloidun väliaineen läpi. Absorption määrä riippuu materiaalin tiheydestä ja paksuudesta.
- Myonien sironta: myonien kulkusuunnan kääntyminen niiden kulkiessa kohteen läpi. Tämän parametrin vaikutus on geologisessa myonigrafiasa yleensä hyvin vähäinen, sillä se riippuu voimakkaasti materiaalin tiheydestä. Poikkeuksellisen tiheiden aineiden (esim. rikastetun uraanin) tapauksessa myonit voivat vuorovaikuttaa materiaalin atomiytimien kanssa ja tämän vuoksi muuttaa suuntaansa.

Mittauksiin vaikuttavat myös monet muut niin simuloidun laitteen kuin ympäristönkin fysikaaliset ominaisuudet. Ilmaisimien herkkyys, erotuskyky ja aikaresoluutio vaikuttavat merkittävästi mittauksen onnistumiseen. Esimerkiksi myonien saapumisaikojen mittaus-tarkkuus auttaa myonisignaalin ja muun taustasäteilyn erottamisessa toisistaan. Kaikki parametrit auttavat muodostamaan matemaattisen mallin myonien vuorovaikutuksesta kuvattavan kohteen kanssa. Mallia verrataan mittatietoihin kohteen rakenteen selvittämiseksi ja piilossa olevien piirteiden tunnistamiseksi.

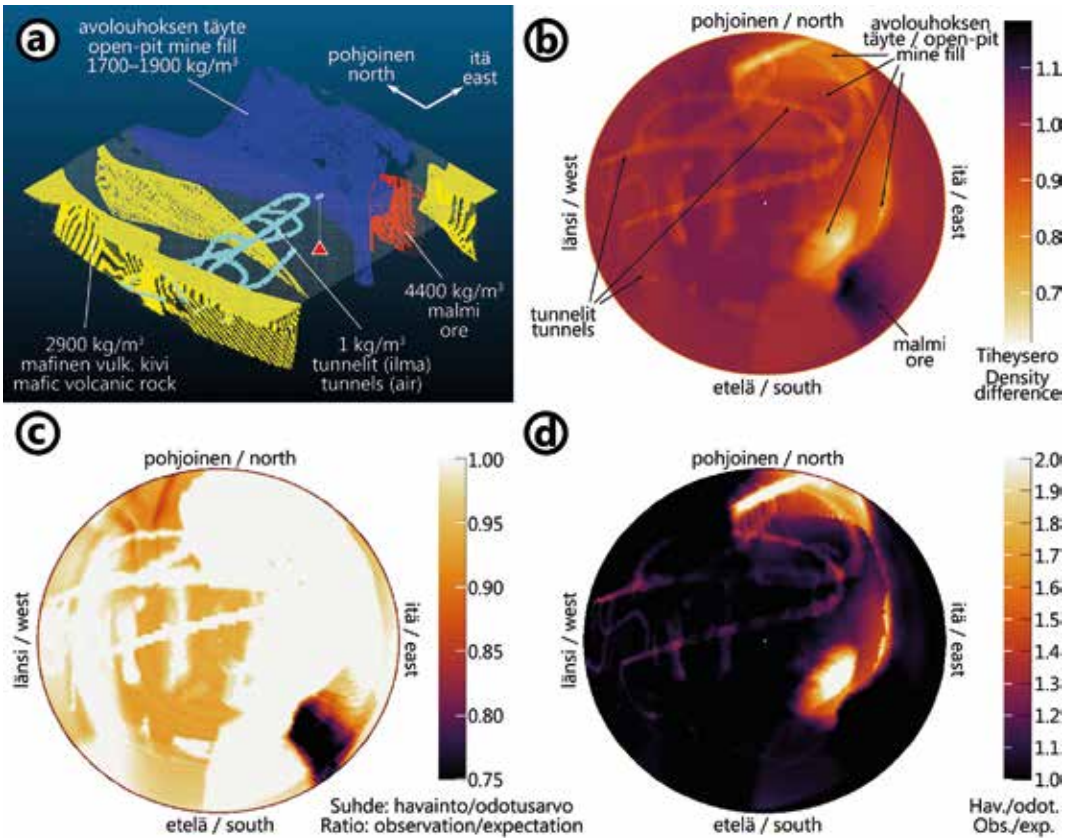
## Standardikivi

Myonigrafisessa ja hiukkasfysiikan kirjallisuudessa törmää usein käsitteeseen **standardikivi** (*standard rock*) – erityisesti, jos kirjoittajina on fyysikoita (esim. Hivert ym. 2014; Oláh ym. 2019). Kyse on kivistä, jonka tiheys on 2 650 kg/m<sup>3</sup> ja koostumus CaCO<sub>3</sub>. Standardikivi-käsitteen juuret ulottuvat hyvin merkittävään kosmisten säteiden mittauksia käsittelevään julkaisuun (Barrett ym. 1952): New Yorkin osavaltion Cayugan suolakaivoksessa sijaitsevan mittausalueen kiven tiheys laskettiin, ja sen ”keskimääräiseksi aineeksi” määritettiin radioaktiivinen natrium-22. Hiukkastutkijoi-ta nimittäin kiinnosti ainoastaan kiven keskimääräinen tiheys, eikä niinkään sen todellinen koostumus. Jälkikäteen on arvioitu, että tämä kivi olisikin ollut kalsiumkarbonaattia, jota löytyy kaivoksen lähes vaaka-asentoisesta kalkkikivikerroksesta (Groom ym. 2001). Standardikiven käsite jäi elämään kirjallisuuteen, ja voidaan olettaa, ettei moni käsitteen käyttäjistä tunne sen alkuperää.

Myonigrafiasimulaatioissa standardikiven tietoja käytetään referenssinä. Toinen yleisesti käytetty standardi on vesi. Standardien käyttö auttaa ymmärtämään, kuinka myonit vuorovaikuttavat erilaisten kivilajien kanssa. Kaikissa simulaatioissa ei käytetä pelkästään standardikiveä, vaan tuloksia verrataan laajempaan valikoimaan erilaisia todellisten kivilajien tiheyksiä ja koostumuksia.

Kuusiniemi ja muut (2022) käyttivät GEANT4- ja CORSIKA-simulaatio-ohjelmistoja tutkiessaan myonien vuorovaikutusta kuvitteellista standardikiveä realistisemmilla kivilajeilla, jotka vastaavat paremmin heterogeenisiä luonnon kiviä. Tutkimustuloksia voidaan hyödyntää arvioitaessa, millaisia myonimääriä voidaan mitata eri ympäristöissä ja eri syvyyksillä. Kuva 3 esittää, kuinka Pyhäsalmen kaivoksen tiheyserot erottuisivat myonien avulla 100 m syvyydellä olevassa mittapisteessä.





Kuva 3. Pyhäsalmen kaivoksen tiheysvaihtelut 3D-laskentamallin (nk. blokkimallin) ja myonisimulaatioiden avulla nähtynä. Kolmiulotteinen näkymä kaivoksen ylimpien 150 metrin lävitse (a). Värit vastaavat vuonna 2004 Surpacilla tehdyn mallin sisältämiä eri tiheyskisiä materiaaleja. Malmi on tyypiltään vulkanoogeenistä massiivista sulfidia (VMS). Kuvat (b), (c) ja (d) esittävät tiheyseroja verrattuna "standardikiven" odotteeseen ja katsottuna ylöspäin 100 m syvyydellä olevasta kuvaan (a) merkitystä punaisesta kolmiosta. Valkoinen piste ympyrän keskellä osoittaa suuntaa ylöspäin ja mitä lähemmäs ympyrän reunaan mennään, sitä vaaka-suorempi suunta on. Kuva (b) ei ole simulaatio, vaan esittää suoraan blokkimallin tiheyksiä. Alimmissa kuvissa näytetään simuloitu myonigrafinen tiheyskuva painottaen väreillä tiheimpiä alueita (c) ja pienimmän tiheyden alueita (d). Tihein aines (malmi) vähentää myonien määrää 25 % odotteeseen nähden, kun taas avolouhoksen alueelta saapuu myoneja yli kaksi kertaa odotetta enemmän. Myonikuvan kulmaerotuskyky on hieman blokkimallia heikompi, mutta tiheyserot toisaalta korostuvat. Kuva: Muon Solutions Oy / Kai Loo & Jarmo Korteniemi. Kuvat julkaistu Pyhäsalmi Mine Oyn luvalla.

Figure 3. The density variations in the Pyhäsalmi mine seen using the 3D-computation model (i.e., block model) and muon simulations. A three-dimensional view of the uppermost 150 meters of the mine (a). The colours correspond to different density materials contained in the block model made in 2004 with Surpac. The ore type is volcanogenic massive sulfide (VMS). Images (b), (c), and (d) show density differences compared to the expected "standard rock" when viewed upwards from the red triangle in image (a), located at a depth of 100 m. The white dot in the centre of each circle points directly upwards, and the closer you get to the circle edge, the more horizontal the direction becomes. Image (b) depicts the densities of the block model and is not a simulation. The lower images show a simulated muographic density image, with the colour scheme emphasizing the densest areas (c) and the least dense areas (d). The densest material (the ore) reduces the number of muons by ca. 25% compared to the expectation, while more than twice the expected number of muons are allowed through the open pit. The angular resolution of the muographic image is slightly lower than the block model, but the density differences are better highlighted. Figure: Muon Solutions Oy / Kai Loo & Jarmo Korteniemi. Images published with the permission of Pyhäsalmi Mine Oy.

## Myonimittausten tarkkuus

Kuinka pieniä tiheysvaihteluja myonikuvauksella voidaan havaita? Se voidaan selvittää helposti simulaatioiden avulla. Tulos riippuu kohteen koosta, etäisyydestä ja muodosta. Mittauksen luotettavuutta arvioidaan yleensä käyttämällä ns. kolmen sigman sääntöä ( $3\sigma$ ), jossa mittausdatan täytyy olla kolmen standardipoikkeaman sisällä keskiarvosta. Se kuvaa mittauksen epätarkkuutta tai virheellisyyttä, joka voi johtua esimerkiksi mittauslaitteiden ominaisuuksista tai ympäristön olosuhteista.

Jos mittaus suoritetaan 150 metrin syvyydessä ja käytetään  $3\sigma$  luottamustasoa, ovat pienimmät simulaatioissa havaittavat erot tiheyksissä noin 2 %:n luokkaa (Hivert ym. 2015, 2017). 300 metrin syvyydellä tiheysero on 4 % ja 700 metrissä 10 %. Portal ja muut (2013) toteavat, että myonitomografialla voidaan todennäköisesti erotella kohteet, joilla on muutaman prosentin tiheysero.

Jo 1 %:n ero kahden kivilajin keskitiheydessä vastaa noin 3 %:n eroa myonimäärissä (Malmqvist ym. 1979). Sama suhdeluku säilyy suuremmissakin tiheyseroissa eli esimerkiksi 30 %:n ero mitatuissa myonimäärissä tarkoittaa noin 10 %:n tiheyseroa kahden eri aineen välillä. Tällainen myonimäärien ero on useimmiten erittäin helposti mitattavissa.

Kuten kirjoitussarjassamme jo aiemmin korostimme, myonikuvauksen mittaus asettaa tekijänsä valinnan eteen: priorisoidaanko mittauksen luotettavuutta ja kuvan tarkkuutta vai tehdäänkö mittaus nopeammin ja käytetään säästetty aika muuhun. Kodama ja muut (2022) toteavat, että universaaleja myonigrafisia menetelmiä tiheyspoikkeamien havaitsemiseksi ei ole. Siksi on kriittistä tunnistaa mittausympäristö, valita sopivin myonikuvauslaite ja suunnitella mittaus siten, että tehdyt kompromissit ovat perusteltuja.

Myonikuvauksen tarkkuuteen vaikuttavat:

- Mittauspisteiden sijainti: lähempänä kohdetta olevat mittauspisteet tuottavat usein tarkempia tuloksia ja kattavat kohteen eri osat paremmin.
- Mittausalueen syvyys: mitä pidemmän matkan myonit joutuvat kulkemaan väliaineessa, sitä vähemmän niitä saapuu ilmaisimeen.
- Mittausolosuhteet: lämpötila, kosteus ja ilmanpaine voivat vaikuttaa laitteiden toimintaan ja mittauksen tarkkuuteen.
- Kohteen ominaisuudet: kohteen sisäiset tiheysjakaumat voivat vaikuttaa myonien kulkemiseen ja mittauksen tarkkuuteen.
- Mittausaika: pidempi mittausaika tuottaa tiettyyn pisteeseen asti enemmän dataa, parantaen kuvan tarkkuutta.
- Käytetty tekniikka: eri myonikuvantamistekniikat tarjoavat erilaisia tarkkuuksia. Sirontamyonigrafia on usein tarkempaa kuin attenuaatiomyonigrafia, etenkin erityisen tiheille kohteille, mutta soveltuu käytettäväksi lähinnä vain tietyissä maanpintasovelluksissa. Attenuaatiomyonigrafia taas kykenee tarjoamaan paremman tarkkuuden vähemmän tiheille kohteille.
- Laitteet ja resurssit: laitteiden herkkyyys ja muut ominaisuudet sekä käytössä olevat resurssit määrittävät mittauksen tarkkuuden. Kaikissa sovelluksissa paras mahdollinen tarkkuus ei kuitenkaan ole aina tarkoituksenmukaista.
- Signaalin kohina: laitteiston kohina heikentää signaalin tarkkuutta, mutta sitä voidaan optimoida datan käsittelyllä. Kohinaan voidaan vaikuttaa myös laitesuunnittelulla ja -valinnoilla.
- Mittausdatan käsittely: datan käsittelyprosessit voivat vaikuttaa tulosten tarkkuuteen.

**Aikaresoluutio** viittaa laitteen kykyyn mitata tarkasti se hetki, jolloin yksittäinen myoni kulkee sen läpi. Se kertoo myös, kuinka tarkasti

laitteisto voi määrittää kahden tapahtuman välisen ajanjakson. Mitä pienempi aikaresoluutio on, sitä tarkemmin voidaan hiukkasten liikkeitä ja kulkuajat mitata. Nopeissa tuikeilmaisimissa resoluutio voi olla nano- tai pikosekuntiluokkaa, mutta tavallisemmissa kaasun ionisointiin perustuvissa ilmaisimissa päästään ehkä mikro- tai millisekuntien mittaustarkkuuteen. Aikaresoluutioon voivat vaikuttaa monet tekijät, kuten signaali–kohinasuhde ja elektroninen kohina. Näitä tekijöitä on tärkeä hallita optimaalisen suorituskyvyn saavuttamiseksi.

Aikaresoluutiolla on merkitystä kuitenkin vain niissä tapauksissa, kun yksittäisen myonin kulku useamman samanaikaisesti käytössä olevan ilmaisimen lävitse täytyy määrittää. Esi-merkkinä tällaisesta ovat vaikkapa laitteiden paikannustarpeet maan alla.

## Muuta taustatietoa

Artikkeli on kontribuutio Horisontti Eurooppa -ohjelman rahoittamaan AGEMERA-projektiin (*Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw materials*, nro 101058178, 2022–2025, ks. Holma ym. 2022b). Kerromme sarjamme myöhemmissä osissa projektin myonigrafiaan liittyvistä tuloksista.

**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)

**FM JARMO KORTENIEMI**

(jarmo.korteniemi@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

Arktinen planeettatutkimusinstituutti (APSI)

International Virtual Muography Institute (VMI)

**DOS., FT TIMO ENQVIST**

(timo.enqvist@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

**FT KAI LOO**

(kai.loo@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

*Lisätietoa Arktisesta planeettatutkimusinstituutista (Arctic Planetary Science Institute, APSI):*  
<http://planetaryscience.fi/>.

*Marko Holma on geologi, 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. Jarmo Korteniemi on planetologi ja vapaa tiedetoimittaja sekä toimii Muon Solutions Oy:n viestintäpäällikkönä. Timo Enqvist on fysiikan dosentti Jyväskylän yliopistossa ja toimii Muon Solutions Oy:ssä pääfysiikkona ja simulaatioasiantuntijana. Myös Kai Loo toimii yrityksen simulaatioasiantuntijana ja data-analytikkona.*

## Summary

**On the Verge of a New Kind of Geophysics: Part 3 – Simulations in muon imaging**

This article is the third instalment in a series covering muography, also known as muon imaging.

Simulations in muography aid in understanding the dynamics of muon interactions and propagation. They evaluate the performance and precision of muon detectors, optimising their configuration and material selection. Muon imaging simulations utilise the Monte Carlo method for modelling the stochastic processes of particle propagation and

interactions. Examples of muography-applicable simulation software include GEANT4, FLUKA, CORSIKA, MUSIC, and MUSUN. While simulations are not obligatory in every project, they are useful and employed for various reasons, including real-time monitoring, quality control, data analysis, results validation, and optimisation. In brief, simulations are often essential in planning and optimising measurements, interpreting results, validating experimental findings, and enhancing imaging methodologies.

This article contributes to the 2022–2025 AGEMERA project (Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw materials; see Holma et al. 2022b).

## Lähdeluettelo

- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., *ym.*, 2003. Geant4 - A simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506, 250–303. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)01368-8)
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Arce, P., Asai, M., *ym.*, 2016. Recent Developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 835, 186–225. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
- Antonoli, P., Ghetti, C., Korolkova, E. V., Kudryavtsev, V. A. & Sartorelli, G., 1997. A three-dimensional code for muon propagation through the rock: MUSIC. *Astroparticle Physics* 7, 357–368. [https://doi.org/10.1016/s0927-6505\(97\)00035-2](https://doi.org/10.1016/s0927-6505(97)00035-2)
- Barrett, P. H., Bollinger, L. M., Coccont, G., Eisenberg, Y. & Greisen, K., 1952. Interpretation of Cosmic-Ray Measurements far Underground. *Reviews of Modern Physics* 24, 133–178. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.24.133>
- Böhlen, T. T., Cerutti, F., Chin, M. P. W., Fassò, A., Ferrari, A., *ym.*, 2014. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications. *Nuclear Data Sheets* 120, 211–214. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.049>
- Engel, R., Heck, D., Huege, T., Pierog, T., Reininghaus, M., *ym.*, 2018. Towards A Next Generation of CORSIKA: A Framework for the Simulation of Particle Cascades in Astroparticle Physics Computing and Software for Big Science 3(1). <https://doi.org/10.1007/s41781-018-0013-0>
- Ferrari, A., Sala, P. R., Fassò, A. & Ranft, J., 2005. FLUKA: a multi-particle transport code. CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2005-010, INFN TC\_05/11, SLAC-R-773, 405 s.
- Groom, D. E., Mikhov, N. V. & Striganov, S. I., 2001. Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV–100 TeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 76 (2), 1–37.
- Heck, D., Knapp, J., Capdevielle, J. N., Schatz, G. & Thouw, T., 1998. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. *Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Wissenschaftliche Berichte, Report FZKA 6019*, 90 s.
- Hivert, F., Lázaro, I., Busto, J., Ernenwein, J.-P., Brunner, J., *ym.*, 2014. Simulations of the muon flux sensitivity to rock perturbation associated to hydrogeological processes. *E3S Web of Conferences* 4, 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20140401003>
- Hivert, F., Lázaro Roche, I., Decitre, J. B., Brunner, J., Busto, J. & Gaffet, S., 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., Lázaro 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., Korteniemi, J., Casini, G., Saura, E., Šumanovac, F., *ym.*, 2022b. Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw Materials – Introduction to the AGEMERA project. *Institute of Seismology, University of Helsinki, Report S-72*, 51–54.
- 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., Kuusiniemi, P. & Korteniemi, J., 2023. Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 2 – Myonien havaitseminen ja myonikuvauksen peruseräatteen. *Geologi* 75 (1), 26–43.
- Kodama, M., Yokota, T., Matsushima, J., Tanaka, H. K. M., Kin, T., *ym.*, 2022. Anomaly detectability in multidimensional muon tomography under a trade-off relationship between anomaly size, density contrast, and exposure time. *Journal of Applied*

- Geophysics, 104920. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104920>
- Kudryavtsev, V. A., 2009. Muon simulation codes MUSIC and MUSUN for underground physics. *Computer Physics Communications* 180, 339–346. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2008.10.013>
- Kuusiniemi, P., Holma, M., Loo, K. & Enqvist T., 2022. Muography and Geology: Does It Matter Which Continent You Stand on? *Journal of Advanced Instrumentation in Science* 2022. <https://doi.org/10.31526/jais.2022.257>
- Malmqvist, L., Jönsson, G., Kristiansson, K. & Jacobsson, L., 1979. Theoretical studies of in-situ rock density determination using cosmic-ray muon intensity measurements with application in mining geophysics. *Geophysics* 44, 1549–1569. <https://doi.org/10.1190/1.1441026>
- Oláh, L., Tanaka, H. K. M., Hamar, G. & Varga, D., 2019. Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt Sakurajima. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 377, 20180135. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0135>
- Portal, A., Labazuy, P., Lénat, J.-F., Béné, S., Boivin, P., ym., 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>
- Sambridge, M., Braun, J. & McQueen, H., 1995. Geophysical parametrization and interpolation of irregular data using natural neighbours. *Geophysical Journal International* 122, 837–857. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06841.x>

## TOIMITUS TIEDOTTAA

### Geologin teemanumero tulee taas!

Vuosien 2022 ja 2023 teemanumerot olivat menestys. Vuonna 2022 aiheena oli Geokemian analytiikka ja 2023 Ilmastonmuutos & geologia. Geologi 4–5/2024 tulee jälleen olemaan teemanumero, jonka aihepiiriin lukijoiden on mahdollisuus vaikuttaa.

Vaikuta ja äänestä mielekkäin aihepiiri Geologille 4–5/2024:  
<https://link.webropol.com/s/geologin-teemanumero-aanestys>



Äänestysaika helmikuun 2024 loppuun saakka, ja julkistamme aihepiirin Geologiassa 2/2024!