

On the verge of a new kind of geophysics: Part 5 – Detecting a bauxite lens with muon imaging in Bosnia and Herzegovina

JARMO KORTENIEMI, MARKO HOLMA, LÁSZLÓ BALÁZS, GERGELY
SURÁNYI, SÁNDOR DEMŐK AND PASI KUUSINIEMI

Aluminium is a vital element for the modern economy and the green transition. As the most abundant metal in Earth's crust (~8.1 wt.%), the challenge of obtaining aluminium lies not in its scarcity, but in its energy-intensive and environmentally demanding extraction. Its primary and most economical source is bauxite, a sedimentary rock rich in aluminium hydroxides. In 2021, 89 % of the 21.4 million tonnes of bauxite used in the European Union were imported, mainly from Guinea and Brazil (European Commission 2023). Relying on imports poses economic and geopolitical risks; consequently, both aluminium and bauxite are classified as critical raw materials (CRMs). Currently, considerable research efforts focus on identifying sustainable bauxite deposits within Europe.

This article describes a pilot study in which muon imaging was used to detect and delineate a buried bauxite lens in the Jajce mining district in central Bosnia and Herzegovina. Muon imaging was chosen for its ability to passively resolve small density contrasts through substantial overburden, offering a means to map concealed and complex ore bodies challenging for conventional geophysical methods. This innovative approach supports the quantification of hidden CRM deposits, making mining more accurate and efficient, thereby reducing reliance on imports. The pilot study was conducted as part of the AGEMERA project that developed and tested non-invasive survey methods for CRM exploration across Europe (Joutsenvaara et al. 2025).

This article is the fifth instalment in our

series introducing muon imaging in geosciences (Holma et al. 2022, 2023a, 2023b; Korteniemi et al. 2024).

Geological background

The Jajce bauxite district lies within the External Dinaric Alps mountain range (Fig. 1). The region is dominated by the Adriatic Carbonate Platform, a thick sequence of Jurassic-Cretaceous marine deposits that has experienced alternating submarine and subaerial conditions (Vlahović et al. 2005; Pavičić et al. 2018). Its limestones are heavily karstified, with numerous sinkholes and cavities.

The Jajce bauxites formed from volcanic ash that accumulated irregularly in depressions and sinkholes within the karstified limestone during prolonged subaerial exposure under intense weathering episodes. The resulting bauxite deposits currently occur as isolated, discontinuous lenses, which at their largest exceed 100 m in length and reach tens of metres in thickness, and are buried under later limestones. The lenses are lateritic, rich in both aluminium (54–61 wt.% Al_2O_3) and iron (~30 wt.% Fe_2O_3), and have relatively low porosity (Bilić et al. 2025). The bauxites are only slightly denser than the surrounding limestones (2.9–3.0 g/cm³ and 2.6–2.7 g/cm³, respectively).

The study target was the bauxite lens L-34, a previously known, but poorly defined deposit ~50 m below the ground within the ac-

Figure 1. Geographic setting of the study area (a). Lithostratigraphic columns from nearby mining areas, with bauxites in red (b). Simplified from Dragičević et al. (2019).

Kuva 1. Tutkimusalueen sijainti (a). Paikallisten kaivosalueiden litostratigrafiset pylväät, bauksiittikerrokset punaisella (b). Yksinkertaistettu lähteestä Dragičević ym. (2019).

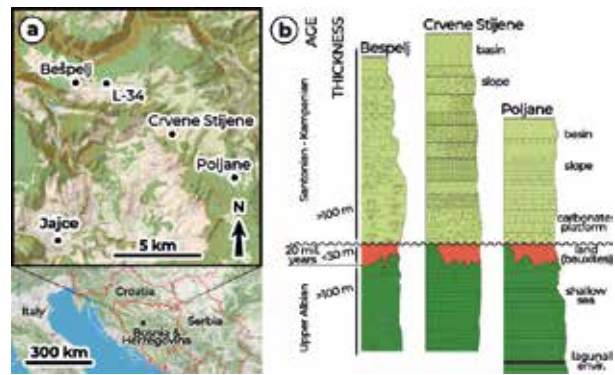


Figure 2. The muon telescope tilted towards the target at the Jajce mine. White arrows indicate incoming muon paths measured by the telescope.

Kuva 2. Myoniteleskooppi suunnattu kohteeseen Jajcen kaivoksella. Valkoiset nuolet havainnollistavat teleskoopin mittaamien myonien tulo-
reittejä.



tive Jajce bauxite mine (Fig. 1a). The lens was originally identified and delineated from limited borehole data. Conventional surface geophysics failed to resolve it because the bauxite's geophysical response closely resembles that of the surrounding limestones, limiting contrast and detectability.

Muon imaging approach

Muon imaging is a passive technique that utilises muon particles. High-energy muons are continuously produced in the upper atmosphere by cosmic rays and travel downward at nearly the speed of light, entering and passing through Earth's surface without significant slowing. They can penetrate

several hundred metres of rock, with their flux gradually attenuating according to the material's density: dense rocks reduce the flux more, while less dense ones let more muons through. By measuring the muon flux from different angles after it has passed through the target – using detectors positioned beneath it – the density and spatial extent of the target can be inferred (Holma et al. 2022, 2023a; Kortenienmi et al. 2024). The principle resembles X-ray imaging but operates at the scale of mountains rather than humans.

We employed a portable 65×65×50 cm muon telescope developed by the HUN-REN Wigner Research Centre for Physics (Wigner RCP, Fig. 2). Designed for underground use and based on multi-wire proportional chamber technology, it tracks both the number

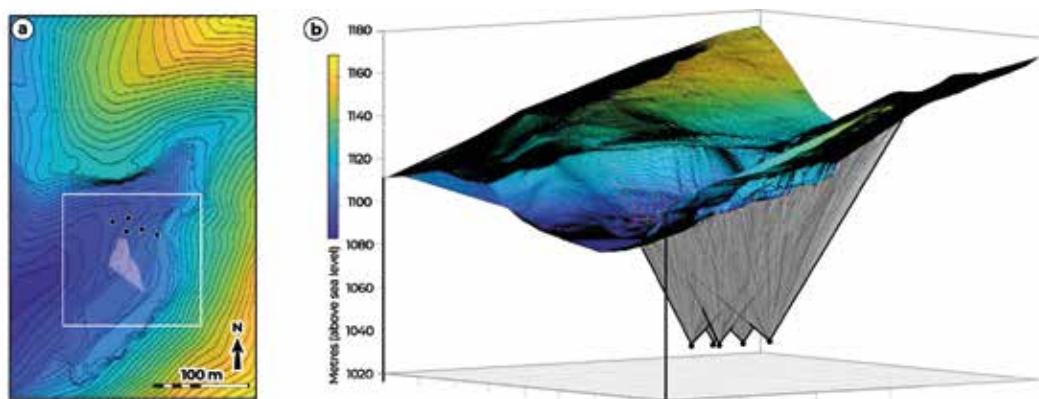


Figure 3. Topographic map showing the five measurement sites (dots), the projected surface location and previously estimated extent of the L-34 bauxite lens (white area) (a). The white box marks the area covered in Fig. 4. 3D view of the study area showing observation cones (grey) from each site (dots) (b).

Kuva 3. Topografinen kartta, jossa viisi mittauspaikkaa (pisteet) sekä L-34 -bauksiittilinssin karkeasti arvioitu maanpinnalle projisoitu sijainti ja laajuus (valkoinen alue) (a). Valkoinen neliö osoittaa kuvassa 4 näkyvän alueen. Kolmiulotteinen näkymä, jossa mittauspisteistä avautuvat havainnointikartiot (harmaa) (b).

of muons and their incoming angles with high precision over extended periods. The telescope has an innate angular resolution of $1\text{--}2^\circ$. During processing, the data are binned to discrete angular intervals, which in this case translates to a usable spatial resolution of $2.0\text{--}2.5$ m across most of the target volume.

The telescope was installed in a mine gallery at 1,036 m above sea level, tens of metres below and slightly north of the L-34 lens (Holma et al. 2025). Although mine constraints prevented full optimisation of the measurement geometry (i.e., the arrangement of observation points), the five selected locations provided overlapping coverage of the lens (Fig. 3). Each measurement lasted ~ 50 days, together yielding enough muons to image the lens and surrounding limestone, ensuring a statistically robust, reliable density model. (*Note: the duration of the campaign could have been reduced by using multiple and/or larger detectors.*)

The obtained data were binned, corrected for detector efficiency, normalised over exposure time, and compared to reference values expected for a uniform-density medium.

A 3D density model was reconstructed via tomographic inversion, back-projecting muon paths and iteratively solving for the density distribution that best fits the observed flux. This approach is similar to CT scanning in medical diagnostics.

Results

The data from the five positions yielded a total of ~ 1.5 million muon trajectories, which were classified into $\sim 20,000$ angular bins. During processing, these were discretised into an equidistant three-dimensional grid ($57 \times 57 \times 48$ voxels), consisting of $\sim 50,000$ elements with density data (Fig. 4).

The measurements clearly resolved key features of the bauxite lens relative to the surrounding limestone, as described in detail by Holma et al. (2025). The lens's most prominent section lay $\sim 26\text{--}36$ m above the gallery (Fig. 4). Horizontally, it lay slightly closer to the gallery and had a smaller extent than borehole data had suggested. Its boundaries were ambiguous, reflecting both geological

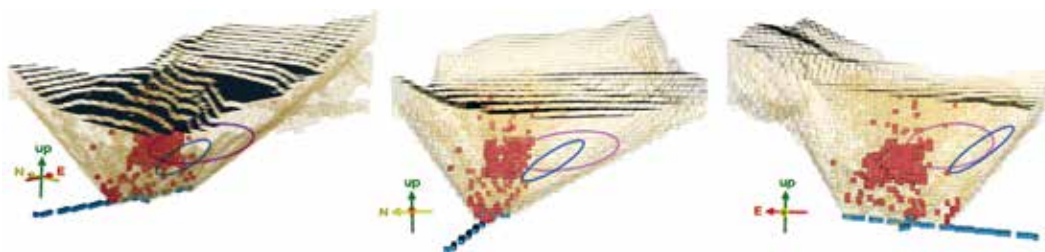


Figure 4. 3D density model produced by muon imaging, distinguishing the bauxite body (red) from the surrounding host rocks (yellow). The blue oval marks the karst cavity identified in the study. The purple oval shows the area where L-34 was first thought to be located (cf. Fig. 3a). Views toward the northeast (left), east (centre) and south (right).

Kuva 4. Myonikuvauksella tuotettu kolmiulotteinen tiheysmalli, jossa bauksiittilinssi (punainen) erottuu ympäröivästä kivistä (keltainen). Sininen soikio osoittaa tutkimuksessa löydetyn karstiontelon sijainnin, violetti soikio alueen, jossa L-34:n epäiltiin alun perin sijaitsevan (vrt. Kuva 3a). Näkymät koilliseen (vasen), itään (keskellä) ja etelään (oikea).

and instrumental factors. As a discontinuous orebody, the lens was inherently difficult to delineate, and the modest density contrast between bauxite and limestone placed the anomaly near the detection threshold. This was constrained by the number of detected muons, the telescope's angular resolution, and a sub-optimal measurement geometry. Combining multiple viewing angles improved resolution and reduced artefacts. The measurements also revealed a nearby low-density anomaly, likely a previously unknown karst cavity, demonstrating the method's capability to detect both high- and low-density zones.

method is particularly valuable where extensive drilling or high energy consumption are not feasible, and where conventional geophysical methods prove impractical or inconclusive.

In Europe – characterised by its complex geology and limited access to many prospective CRM deposits – muon imaging offers a versatile, non-invasive tool for mapping concealed resources and reducing exploration risks. More broadly, it contributes to sustainable mining by reducing environmental impact and gaining stakeholder trust (Puronaho 2024).

Implications and outlook

The Jajce pilot study provides a clear field demonstration of the potential of muon imaging for ore-body delineation – even where density contrasts are subtle and geological conditions are complex and poorly constrained. Looking ahead, the technique can be readily applied to guide drilling strategies and refine geological models, both in bauxite-bearing karst terrains and in other environments. This passive, non-destructive

Further information

This article contributes to the Horizon Europe-funded AGEMERA project (Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw Materials; grant agreement 101058178; Joutsenvaara et al. 2025). The pilot study was supported by the Vesztergombi Laboratory for High-Energy Physics (VLAB) group at Wigner RCP. The Rudnici boksita Jajce p.o.o. team gave vital support for underground access and geological context.

MSC JARMO KORTENIEMI

(jarmo.korteniemi@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

Arctic Planetary Science Institute

International Virtual Muography Institute

MSC MARKO HOLMA

(marko.holma@muon-solutions.com)

(marko.holma@oulu.fi)

Muon Solutions Oy

Kerttu Saalasti Institute, University of Oulu

Arctic Planetary Science Institute

International Virtual Muography Institute

PHD LÁSZLÓ BALÁZS

(laszlo.balazs@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

HUN-REN Wigner Research Centre for Physics

PHD GERGELY SURÁNYI

(gergely.suranyi@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

HUN-REN Wigner Research Centre for Physics

MSC SÁNDOR DEMÖK

(sandor.demok@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

HUN-REN Wigner Research Centre for Physics

DOC., PHD PASI KUUSINIEMI

(pasi.kuusiniemi@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

Arctic Planetary Science Institute

International Virtual Muography Institute

Jarmo Korteniemi is a planetologist and a science journalist and works as the Head of Communications at Muon Solutions. Marko Holma is a geologist and the CEO at Muon Solutions and a project geologist at the Kerttu Saalasti Institute at the University of Oulu. László Balázs and Gergely Surányi are geophysicists at Muon Solutions and Wigner RCP. Sándor Demök is a database specialist at Muon Solutions and Wigner RCP. Pasi Kuusiniemi is a docent of physics, working as the COO at Muon Solutions.

Tiivistelmä

**Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 5
– Bauksiittilinssin havaitseminen myoni-
kuvauksen avulla Bosnia-Herzegovinassa**

Alumiini ja sen tärkein raaka-aine bauksiitti kuuluvat Euroopan unionin kriittisten raaka-aineiden listalle, sillä vaikka EU:ssa käytetään paljon alumiinia, suurin osa bauksiitista tuodaan Guineasta ja Brasiliasta. Haasteena on erityisesti alumiinin energiantensiivinen ja ympäristöä kuormittava tuotanto. Euroopassa etsitäänkin aktiivisesti uusia, kestävästi hyödynnettäviä bauksiittiesiintymiä.

Tässä tutkimuksessa testattiin ensimmäistä kertaa myonikuvauksen soveltuvuutta bauksiittiesiintymän paikantamiseen. Tekniikalla voidaan kartoittaa malmioita passiivisesti ja kiveen kajoamatta, vaikka kohde olisi vaikeasti havaittava geofysiikan perinteisin keinoin. Tutkimuksen kohteena oli kahden kalkkikivimuodostuman (tiheys 2,6–2,7 g/cm³) välisessä rajapinnassa sijaitseva bauksiittilinssi L-34 (tiheys 2,9–3,0 g/cm³) noin 50 m syvyydellä Jajcen kaivosalueella, Bosnia-Hertsegovinassa (kuva 1). Kohde on aiemmin tunnistettu kairauksilla, mutta sitä ei ole pystytty rajaamaan tavanomaisilla geofysikaalisilla menetelmillä ympäröivän kalkkikiven ja bauksiitin samankaltaisten petrofysikaalisten ominaisuuksien vuoksi.

Tutkimuksessa käytettiin kenttäkäyttöön soveltuvaa modulaarista myoniteleskooppia, joka tallentaa saapuvien myonien tulosuunnat ja määrät (kuva 2). Tämä mahdollistaa kohteen tiheyserojen tarkan määrittämisen. Teleskooppia käytettiin kaivoskäytävässä viidessä eri paikassa L-34:n oletetun sijainnin alapuolella siten, että kohde saatiin kuvattua useasta eri suunnasta (kuva 3). Näin siitä pystyttiin rakentamaan tarkka kolmiulotteinen tiheysmalli tomografisella inversiolla. Mittaus kesti kussakin paikassa n. 50 vrk, joiden aikana havaittiin yhteensä n. 1,5 miljoonaa

myonia. Pitkä mittausaika varmisti korkeatasoisen ja tilastollisesti luotettavan tiheysmallin luomisen.

Myonikuvaus osoitti bauksiittilinssin sijaitsevan hieman odotettua lähempänä kaivoskäytävää (kuva 4). Selkeimmillään se on 26–36 m kaivoskäytävän yläpuolella (Holma ym. 2025). Linssi osoittautui pienemmäksi kuin kairausten perusteella odotettiin, ja sen rajat jäivät osin epäselviksi pienten tiheyserojen vuoksi. Se on todennäköisesti luontaisesti epäsuunnollinen ja vaikeasti rajattava, sillä bauksiitti syntyi muinaisesta vulkaanisesta tuhkaista, joka täytti epäsuunnollisesti karstittuneen kalkkikivimaaston kuoppia ja vaajoamia. Myonikuvauksessa löydettiin lisäksi aiemmin tuntematon matalan tiheyden anomalia, todennäköisesti karstionkalo.

Jajcen pilottitutkimus havainnollistaa hyvin myonikuvauksen kyvyn erotella sekä tiheimmät malmilinssit että matalatiheyksiset rakenteet ympäröivästä kivistä. Menetelmä osoittautui toimivaksi myös monimutkaisilla karstialueilla, joissa perinteisestä geofysiikasta ei aina ole tavoiteltavaa hyötyä. Tätä passiivista ja energiatehokasta menetelmää voidaan hyödyntää kohdentamaan kairauksia paremmin ja tarkentamaan geologisia malleja ilman ympäristöä tuhoavia toimenpiteitä. Euroopan monimuotoisen geologian ja rajallisten esiintymien valossa myonikuvaus tarjoaa hyvän keinon vähentää etsintäriskiä ja löytää piilossa olevia malmiesiintymiä. Samalla se tukee kestävän kaivostoiminnan tavoitteita ja vahvistaa sidosryhmien hyväksyntää.

Tämä artikkeli on viides osa sarjassa, jossa esittelemme myonikuvauksen käyttöä geotieteissä (Holma ym. 2022, 2023a, 2023b, Kortenieniemi ym. 2024). Tutkimus oli osa AGEMERA-projektia (*Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw Materials*; nro 101058178; Joutsenvaara ym. 2025), jossa kehiteltiin ja testattiin uusia, kohteeseen kajoamattomia menetelmiä kriittisten raaka-aineiden etsimiseen.

Bibliography

- Bilić, Š., Peytcheva, I., Georgiev, S., Holma, M., Hikov, A., et al., 2025. Mineralogy, petrology, geochemistry and U-Pb zircon age of Upper Cretaceous bauxites from Jajce, Bosnia and Herzegovina. *Ore Geology Reviews* 184, 106736. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106736>
- Dragičević, I., Papeš, J. & Pavičić, I., 2019. Geological settings of the Jajce bauxite bearing-area (Bosnia and Herzegovina). *Journal of Maps* 15, 744–750. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1664652>
- European Commission, 2023. Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report. Publications Office of the European Union, 151 p.
- Holma, M., Kuusiniemi, P., Sarala, P. & Kortenieniemi, J., 2022. Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 1 – Myonit ja myonigrafian yleisimmät sovellukset. *Geologi* 74 (6), 219–228.
- Holma, M., Kuusiniemi, P. & Kortenieniemi, J., 2023a. Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 2 – Myonien havaitseminen ja myonikuvauksen perusperiaatteet. *Geologi* 75 (1), 26–43.
- Holma, M., Kuusiniemi, P., Kortenieniemi, J., Enqvist, T. & Loo, K., 2023b. Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 3 – Simulaatiot myonikuvauksessa. *Geologi* 75 (6), 183–195.
- Holma, M., Balázs, L., Surányi, G., Demök, S. & Kuusiniemi, P., 2025. Application of Muon Tomography in Bauxite Exploration. *Journal of Applied Physics* 138, 024903. <https://doi.org/10.1063/5.0273513>
- Joutsenvaara, J., Holma, M., Kuusiniemi, P., Kortenieniemi, J., Seivane, H., et al., 2025. The Horizon Europe AGEMERA Project: Innovative Non-Invasive Geophysical Methodologies for Mineral Exploration. *Advances in Geosciences* 65, 171–180. <https://doi.org/10.5194/adgeo-65-171-2025>
- Kortenieniemi, J., Holma, M. & Kuusiniemi, P., 2024. Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 4 – Myonikuvauksen geotieteellisiä ja arkeologisia sovelluksia. *Geologi* 76 (4–5), 142–150.
- Pavičić, I., Dragičević, I. & Ivkić, I., 2018. High-resolution 3D geological model of the bauxite-bearing area Crvene Stijene (Jajce, Bosnia and Herzegovina) and its application in ongoing research and mining. *Geological Quarterly* 62, 100–119. <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1396>
- Puronaho, L., 2024. Strategic integration of a new technology for advancing sustainable mining. Unpublished Master's thesis. School of Business and Economics, University of Jyväskylä, Jyväskylä, 82 p.
- Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I. & Matić, D., 2005. Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 220, 333–360. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.01.011>