

Bauksiitit ilmastonmuutoksen indikaattoreina

MARKO HOLMA



Kuva 1. Näkymä bosniahertsegovinalaisesta Jajcen maanalaisesta bauksiittikaivoksesta läheiseen laaksoon. Punainen maalaji on bauksiittimalmeille tyypillisistä rapaumaa. Kuva: Marko Holma.

Figure 1. View from an underground Jajce bauxite mine to the nearby valley, in Bosnia-Herzegovina. The reddish soil is a typical weathering product related to bauxite ores. Photo: Marko Holma.

Trooppisissa ja subtrooppisissa ilmastolosuhteissa tapahtuva lateriittinen rapautuminen on prosessi, jossa kivien kemiallinen muuttuminen ja hajoaminen johtaa lateriitiksi kutsutun paksun punertavan ja rautapitoisen rapaumakerroksen (maaperän) syntymiseen (kuva 1). Klassisiin rautapitoisiin lateriitteihin (engl. *ferruginous laterites*) ei liity merkittävää alumiinipitoisuuden kasvua, päinvastoin kuin niiden alalajiin lateriittisiin bauksiitteihin (*lateritic bauxites*). Bauksiitit ovat raudasta ja alumiinista rikastuneita ns. residuaalisia malmeja. Toisin sanoen niiden mineraali- ja kemiallista koostumusta määrittelee se mitä rapaamaan on jäänyt jäljelle alkuperäisten mineraalien hajoamisen ja rapautumisessa vapautuneiden alkuaineiden poistumisen jälkeen. Bauksiitit ovat ainoa taloudellisesti käyttökelpoinen alumiinin lähde, jos kierrätysalumiini jätetään huomiotta. Tässä kirjoituksessa esitetyt konkreettiset esimerkit bauksiiteista ovat Bosnia ja Hertsegovinasta.

Bauksiittien mineralogia ja luokittelu

Mineralogisesti bauksiitteja luonnehtii vaihteleva sekoitus pääasiassa sekundaarisia mine-

raaleja, kuten erilaisia rautaoksiedeja ja alumiinihydroksiedeja. Tyypillisiä mineraaleja ovat mm. götiitti, hematitiitti, kaoliini ja alumiinihydroksidit kuten gibsiitti, böhmiitti ja diaspori. Kvartsia (piidioksidia) on bauksiittisä jäljellä hyvin vähän, mutta alumiinihydroksideja on residuaalisesti rikastuneena sitäkin enemmän. Äärimmillen vietyinä bauksiitin muodostuminen eli bauksiittiutuminen johtaa taloudellisesti käyttökelpoisen bauksiittimalmin muodostumiseen.

Bauksiitit voidaan jaotella kolmeen pääryhmään. Melkein 90 % bauksiiteista kuuluu lateriittisiin bauksiitteihin (Bardossy & Aleva 1990; Bardossy & Combes 1999). Tämän tyyppin bauksiitit muodostuvat rapautuvan alumiinisilikaattirikkaan kallioperän päälle.

Karstibauksiitit (*karst bauxites*) ovat toiseksi yleisin bauksiittiryhmä (Bardossy & Combes 1999). Karstibauksiitit ovat karbonaattikivi-alueilla sijaitsevia bauksiittimalmeja. Määritelmän mukaan kaikkia karbonaattikivien päällä sijaitsevia bauksiittiesiintymiä tulee kutsua karstibauksiittiesiintymiksi riippumatta siitä, onko karbonaattikiven pinta karstiutunut (*karstified*) vai ei. Suurin osa karstibauksiiteista on välimerellistä tyyppiä, joille on tyypil-



Kuva 2. Jajcen maanalaisen bauksiittikaivoksen alueella on myös avolouhoksena hyödynnettyjä bauksiittimalmioita. Kuvan keskellä näkyvä punainen kivilaji on bauksiittimalmia. Alueen bauksiitti sijaitsee kahden eri-ikäisen karbonaattikiviüksikön välissä. Jajcen alueen bauksiitit ovat karstibauksiitteja. Kuva: Marko Holma.

Figure 2. The area of the underground bauxite mine in Jajce also contains open pit excavated bauxite ore bodies. The reddish rock type in the center of the picture is bauxite ore. At this location, bauxite is situated between two different-aged carbonate rock units. The bauxites in the Jajce area are karst bauxites. Photo: Marko Holma.

listä, että karbonaattikivialusta on kohtalaisesti tai voimakkaasti karstiutunut. Bosnian ja Hertsegovinan Jajcen ja Pošusjen alueiden bauksiitit edustavat karstibauksiitteja (kuva 2). Euroopassa tällaisia bauksiitteja tavataan myös mm. Montenegrossa, Kreikassa (Bardossy & Combes 1999) ja Koillis-Espanjassa (Yuste ym. 2017).

Karstibauksiittien syntymiselle on useita teorioita, kenties osin yllä kerrotun väljän määritelmän vuoksi. Toisaalta alueiden erilaisen olosuhteiden vuoksi bauksiittien syntyminen on eri alueilla edennyt eri tavoin. Yuste ja muut (2017) esittävät tutkimiensä Koillis-Espanjan karstibauksiittien syntyneen, kun karstiutuneen karbonaattikivialueen päälle kerrostuneet alumiinirikkaat savikerrokset altistuivat voimakkaalle rapautumiselle ja lopulta myös bauksiittituumiselle. Karstibauksiittien muodostuminen vaatii alun perin veten

kerrostuneiden sedimenttien joutumisen kemialliselle rapautumiselle alttiiksi (ts. vedenpinnan yläpuolelle).

Toisinaan bauksiittinen paleorapauma hautautuu nuorempien sedimenttien alle; näin voi käydä esimerkiksi karstibauksiitille (Bardossy & Combes 1999). Osa tutkijoista on käyttänyt tällaisista hieman tavallista hankalammin löydettävistä bauksiiteista termiä sedimenttibauksiitti (*sedimentary bauxite*). Tällaisia bauksiitteja on kuvattu mm. Kiinasta (Xue ym. 2020).

Bauksiittien yhteys ilmastoon, maastonmuotoihin ja geologiaan

Bauksiittimalmin muodostumiselle on olennaista, että rapautumisprosessissa alumiinirikastuu. Hiljattain syntyneet tai vielä tälläkin hetkellä kehittyvät bauksiitit sijaitsevat maan-

pinnalla ja lateriittista rapautumista suosivilla pysyvästi lämpimillä sekä kosteilla ilmasto-
vyöhykkeillä. Käytännössä bauksiitteja siis
muodostuu molemmin puolin päiväntasaajaa,
missä ilmasto-olosuhteet suosivat tehokkaita
rapautumisreaktioita. Tavallista lateriittista
rapautumista suosivat ilmasto-olosuhteet saa-
vutetaan esimerkiksi monsuuni-ilmastossa.
Bauksiittien muodostumiselle otollisimmat
olosuhteet näyttäisivät kuitenkin olevan en-
nen kaikkea kytköksissä kosteaan ilmastoon,
eikä monsuuni-ilmastolle ominaiseen sade- ja
kuivien kausien vaihteluun (Heller ym. 2022).
Lisäksi sopivien ilmasto-olosuhteiden tulee
kestää vähintään tuhansia vuosia (Price ym.
1997), mutta usein rapautuminen on kestänyt
jopa kymmeniä miljoonia vuosia (Heller ym.
2022). Bauksiitin muodostumisalueen tulee
olla rapautumisen aikana myös tektonisesti
rauhallinen, jotta syntymässä olevat rapaumat
eivät pääse kulumään pois ennen aikojaan.

Bauksiittiutumisen kannalta on olennaista,
että rapautumassa olevalla kivilajilla on voima-
kas läpäisevyys, jolloin vesi pääsee sen sisälle
tehokkaasti. Tätä edesauttaa vaihteleva topo-
grafia, jossa vesi ohjautuu tehokkaasti painan-
teisiin. Lisäksi tällaisessa maastossa on usein
paljastuneena enemmän kuin yksi kivilaji,
mikä myös lisää mahdollisuutta, että vä-
hintään yhdellä alueen kivilajeista on hyvä
vedenläpäisevyys.

Maailman bauksiittivarannoista 90 % si-
jaitsee trooppisilla ja subtrooppisilla alueilla.
Merkittävimmät näistä ovat Guineassa (24 %),
Australiassa (20 %), Vietnamin (12 %), Bra-
siliassa (9 %) ja Jamaikalla (7 %). Eurooppa on
bauksiittituotannon lilliputti, sillä esimerkiksi
vuonna 2018 se tuotti vain 0,5 % koko maa-
ilman tuotannosta (Georgitzikis ym. 2021).

Bauksiittien yhteys ilmastonmuutokseen

Price ja muut (1997) hyödynsivät bauksiitti-
esiintymien maailmanlaajuisia sijaintitieto-

ja validoidakseen muinaisia ilmastomalleja
simulaatioiden avulla. Samalla he pyrkivät
luomaan ennakoivia malleja vielä löytymättö-
mien bauksiittien sijainneista hyödyntämällä
arvioinneissa muinaisia ilmasto-olosuhteita
käsitteleviä malleja. Tutkimuksessa päädyttiin
siihen, että ilmasto on bauksiittiutumista eni-
ten kontrolloiva tekijä, ja bauksiittiesiintymiä
voidaan käyttää paleoilmastomallien arvioi-
miseen. Tutkimuksessa myös todetaan, että
bauksiittien muodostuminen loppui lähes
kaikkialla viime jääkauden glasiaalimaksimin
aikana.

Heller ja muut (2022) toteavat bauksiitti-
tien olevan geologinen arkisto, joka antaa
tietoa muinaisista ilmasto-olosuhteista ja ra-
pautumisen aikaisesta maisemasta. Bardossy ja
Combes (1999) korostavat bauksiittien olevan
geodynaamisia indikaattoreita, joiden ole-
massaolo voidaan linkittää paitsi muinaiseen
ilmastoon, myös merenpinnan tason korkeu-
den muutoksiin ja tektonisiin olosuhteisiin.
Weng ja muut (2019) puolestaan kuvaavat
Kiinan poikkeuksellisen paksuja syklisesti
savikivikerrosten kanssa vuorottelevia bauk-
siittimalmeja, joiden syntymekanismi saat-
taa liittyä pohjavedenpinnan tason sykliseen
vaihteluun ja myöhäispaleotsooisen jääkauden
aikaiseen ilmastomuutokseen (Montañez &
Poulsen 2013; Li ym. 2023). Mindszentyn
(2016) mukaan bauksiitteja pidetään yleisesti
parhaimpina kuivalla maalla olevina geologi-
sina ilmastoindikaattoreina.

Lateriittinen rapautuminen ja bauksiitti-
tuminen etenevät aina ilmanalaisesti maan-
pinnalta alaspäin. Silti bauksiittiesiintymiä
löytyy myös ilmastovyöhykkeiltä, jotka eivät
tällä hetkellä ole otollisia bauksiittien muo-
dostumiselle. Tällaisissa tapauksissa ilmasto
on muuttunut bauksiittiutumisen jälkeen.
Paikalliset ilmasto-olosuhteet voivat muuttua
esimerkiksi mannerlaattojen liikkeen seurauk-
sena eli rapautumisen huomattava hidastumi-
nen ei aina linkity ilmastomuutokseen ilman
tektonista tekijää.

Bauksiitit ja taistelu ihmisen aiheuttamaa ilmastonmuutosta vastaan

Bauksiiteilla ja ilmastonmuutoksella on vielä yksi mielenkiintoinen yhtymäkohta, jota ei tule heti ajatelleeksi. Keveytensä vuoksi alumiinin käyttö on voimakkaassa kasvussa osana vihreän siirtymän vaatimia toimenpiteitä. Bauksiitit ovat siten oleellinen osa vihreää siirtymää ja ilmastonmuutoksen hillitsemiseen pyrkiviä toimenpiteitä. Bauksiitin muuttaminen hyödyntämiskelpoiseksi alumiiniksi kuluttaa kuitenkin paljon energiaa ja tuottaa runsaasti hiilidioksidia, mikäli rikastusprosessissa käytetään uusiutumattomalla energianlähteellä tuotettua energiaa. Euroopan ympäristövirasto on esittänyt arvion, että vuonna 2018 alumiinisektori kattoi 1,1 %:a EU:n teollisuuspäästöistä (Georgitzikis ym. 2021). Tässä valossa onkin mielenkiintoista, että esimerkiksi Norjassa ja Islannissa on saatavilla niin paljon vesivoimaa ja geotermistä energiaa, että siellä tuotettu alumiini vähentää globaaleja päästöjä huolimatta siitä, että bauksiitti täytyy rahdata näihin maihin kauempaa (Saevarsdottir ym. 2020).

Yhteenveto

Kun geologisista muodostumista löytyy bauksiitteja, se on merkki siitä, että alueella on vallinnut trooppinen tai subtrooppinen ilmasto. Euroopassa bauksiittien tuotanto on vähäistä, koska ilmastomme ei ole pitkään aikaan ollut ihanteellinen bauksiitin muodostumiselle. Bauksiittiutumisen loppuminen kertoo olosuhteiden muuttuneen ilmaston kuivumisen, keskilämpötilojen laskun tai molempien tekijöiden vuoksi. Tämä kuitenkin pätee vain, jos alue ei ole joutunut veden alle tai hautautunut äkillisesti uusien sedimenttien alle. Bauksiitteja muodostavan voimakkaan kemiallisen rapautumisen alkaminen ja loppuminen voi tapah-

tua geologisesti nopeasti. Ilmastonmuutokseen linkittyvänä geologisena indikaattorina bauksiittiutuminen on kuitenkin inhimillisellä aikataululla hidaskäytävä tapahtuma. Bauksiittien ja ilmastonmuutoksen välinen yhteys on siis geologinen, ei niinkään ihmistoiminnan aiheuttamaan ilmastonmuutokseen liittyvä. Bauksiittien tutkiminen tarjoaakin ikkunan muinaisten ilmasto-olosuhteiden tutkimukselle (Bardossy & Combes 1999).

Bauksiittien ja ilmastonmuutoksen välisen yhteyden tutkiminen on toisinaan haasteellista, sillä ilmasto voi muuttua monesta syystä. Yksi mahdollisuus ilmastonmuutokselle on, että geologinen ympäristö yksinkertaisesti siirtyy pois trooppiselta tai subtrooppiselta vyöhykkeeltä. Toinen vaihtoehto on, että globaali ilmasto muuttuu esimerkiksi jääkausien seurauksena. Ilmasto-olosuhteet voivat muuttua kuitenkin myös paikallisempien syitten takia, kuten esimerkiksi tektonisten voimien kohottamien vuorien vaikuttaessa alueelliseen sadantaan ja ylipäättään ilmastoon (Rodríguez Tribaldos ym. 2017). Bauksiittien käyttäminen ilmastonmuutoksen indikaattorina vaatii monialaisia ja monimenetelmällisiä tutkimuksia.

Muuta taustatietoa

Julkaisu on lyhyt kontribuutio meneillään olevaan (2022–2025) Horisontti Eurooppa -ohjelman rahoittamaan AGEMERA-projektiin (*Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw materials*, nro 101058178) (Holma ym. 2022).

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)

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

Kirjoittaja on geologi, Muon Solutions Oy:n toimitusjohtaja sekä työskentelee lisäksi Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutissa projektigeologina. Hän tutkii Bosnia ja Hertsegovinan bauksiittiesiintymiä AGEMERA-nimisessä Horisontti Eurooppa -projektissa.

Summary

Bauxites as indicators of climate change

The formation of bauxites requires a tropical or subtropical climate, making their occurrence in geological formations evidence of such climate conditions. The cessation of bauxite formation indicates the interruption of essential conditions for bauxite weathering due to drying climate, declining temperatures, or both. However, this applies only if the area has not been submerged or suddenly buried under new sediments. The onset and cessation of intense chemical weathering responsible for bauxite formation can occur rapidly in geological terms, but as a geological indicator of climate change, the bauxite weathering process operates on a slow timescale from a human perspective. The connection between bauxites and climate change is thus geological rather than directly linked to human-induced climate change.

The study of bauxites provides a window into paleoclimate. However, investigating the relationship between bauxites and climate change can be challenging, as climate can change for various reasons. Possibilities include geological environments shifting away from tropical and subtropical zones or global climate changes resulting from ice ages. Local climate conditions can also be affected by factors such as tectonic forces influencing regional precipitation and overall climate. Using bauxites as

indicators of climate change necessitates interdisciplinary and multi-method studies.

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

Lähdeluettelo

- Bardossy, G. & Aleva, G. J. J., 1990. Lateritic bauxites. *Developments in Economic Geology* 27, Amsterdam, New York, 624 s.
- Bardossy, G. & Combes, P.-J., 1999. Karst Bauxites: Interfingering of deposition and Palaeoweathering. Palaeoweathering, Palaeosurfaces and related continental deposits, International Association of Sedimentologists, Special Publications 27, 189–206. <https://doi.org/10.1002/9781444304190.ch7>
- Georgitzikis, K., Mancini, L., d'Elia E. & Vidal-Legaz, B., 2021. Sustainability aspects of bauxite and aluminium – Climate change, environmental, socio-economic and circular economy considerations. Publications Office of the European Union, JRC Technical Report, Luxembourg, 111 s.
- Heller, B. M., Riffel, S. B., Allard, T., Morin, G., Roig, J.-Y., ym., 2022. Reading the climate signals hidden in bauxite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 323, 40–73. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.02.017>
- Holma, M., Korteniemi, J., Casini, G., Saura, E., Šumanovac, F., ym., 2022. 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.
- Li, Y., Shao, L., Fielding, C. R., Frank, T. D., Wang, D., ym., 2023. The chemical index of alteration in Permo-Carboniferous strata in North China as an indicator of environmental and climate change throughout the late Paleozoic Ice Age. *Global and Planetary Change* 221, 104035. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104035>
- Mindszenty, A., 2016. Bauxites: Feedbacks of System Earth at Greenhouse times. *Geologia Croatica* 69, 79–87. <https://doi.org/10.4154/gc.2016.07>
- Montañez, I. P. & Poulsen, C. J., 2013. The Late Paleozoic Ice Age: An evolving paradigm. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41, 629–656. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100118>
- Price, G. D., Valdes, P. J. & Sellwood, B.W., 1997. Prediction of modern bauxite occurrence: implications for climate reconstruction. *Palaeogeography, Palaeo-*

climatology, *Palaeoecology* 131, 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(96\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(96)00145-9)

Rodríguez Tribaldos, V., White, N. J., Roberts, G. G. & Hoggard, M. J., 2017. Spatial and temporal uplift history of South America from calibrated drainage analysis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 18, 2321–2153. <https://doi.org/10.1002/2017GC006909>

Saevarsdóttir, G., Kvande, H. & Welch, B. J., 2020. Aluminum production in the times of Climate Change: The global challenge to reduce the carbon footprint and prevent carbon leakage. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* 72, 296–308. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03918-6>

Weng, S., Yu, W., Algeo, T. J., Du, Y., Li, P., ym.,

2019. Giant bauxite deposits of South China: Multistage formation linked to Late Paleozoic Ice Age (LPIA) eustatic fluctuations. *Ore Geology Reviews* 104, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.10.014>

Xue, G., Li, Z., Guo, W. & Fan, J., 2020. The exploration of sedimentary bauxite deposits using the reflection seismic method: A case study from the Henan Province, China. *Ore Geology Reviews* 127, 103832. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103832>

Yuste, A., Bauluz, B. & Mayayo, M. J., 2017. Origin and geochemical evolution from ferrallitized clays to karst bauxite: An example from the Lower Cretaceous of NE Spain. *Ore Geology Reviews* 84, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.025>



Frogs have proven both resilient and adaptive as well as sensitive to changing global environments since the advent of terrestrial forest ecosystems. At left, *Rana pueyoi*, from the Miocene of Spain became extinct without human intervention. At right, this Northern Corroboree Frog (*Pseudophryne pengelleyi*), resting on Sphagnum moss burnt during bushfires that devastated Alpine ecosystems in the mountains of southeastern Australia, is threatened by the impacts of climate change, disease and habitat loss. However, humans are also allocating substantial funding its survival – currently about 10,000 € per frog! Photos: Peter Sorjonen-Ward (left) and Ben Scheele, Australian National University (right).

Hiilikaudesta asti sammakkoeläimet ovat edustaneet selviytyjiä, jotka viestivät maapallon tilasta ja muutoksista. Mioseenina Espanjassa elänyt *Rana pueyoi* (vas.) kuoli sukupuuttoon ilman ihmisen vaikutusta. *Pseudophryne pengelleyi* (oik.) elää vain kaakkois-Australian vuoristoissa ja on uhanalainen chytrid-taudin sekä ilmaston lämpenemisen takia. Tämä yksilö lepää hiiltyneen sammaleen päällä selviyttyään vuoden 2020 metsäpaloista. Ihminen osallistuu lajin suojelemiseen – jopa 10 000 eurolla sammakkoa kohti! Kuvat: Peter Sorjonen-Ward (vas.) ja Ben Scheele (oik.).

Changing climate and responses – A Gaian Earth systems perspective

PETER SORJONEN-WARD

Planet Earth and our human species are now living in a relationship that is turbulent and potentially destructive, rather than benign, respectful, and sustainable. Humanity is increasingly confronted with multiple crises and issues of concern, from the atmospheric to the nanoscale and over equitable and sustainable access to ecological,

mineral and energy resources. The legacy and role of scientific inquiry and analysis, along with the exponentially expanding acquisition of data monitoring the state of the planet and its resources, should continue to be seen as a source of encouragement, especially in an environment where anxiety and despair, or deliberate disinformation prevail.