

Skannaavat laserspektroskopiaalaitteet geologiseen analyysiin, malminetsintään ja kaivostoimintaan, jatkosuunnitelma

Ilkka Laine

29. marraskuuta 2023

Tutkimussuunnitelmapäivitys

Lyhyesti

Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksella rakentamamme täysin uudentyyppiset suuren alueen korkean resoluution skannaavat laser-indusoidun plasm-spektroskopian (laser induced breakdown spectroscopy, LIBS) mittalaitteistot mahdollistavat geologin työn mullistamisen tarjoamalla erittäin yksityiskohtaista geokemiallista ja mineralogista tietoa kaiken tyyppisistä näytteistä. LIBS-kuvantamisen teknologia pitäisi ehdottomasti esitellä sekä akateemisesti että suuremmalle yleisölle yleistajuisesti sen valtavan ympäristön säästöpotentiaaliksi vuoksi. Tutkimustyöhöni kuulu kolme pääosaa: 1. aiheen akateeminen raportointiin eli tieteellisten artikkelien kirjoitukseen, 2. LIBS-kuvantamisen teknologian mahdollisimman selkeään esitykseen väitöskirjani verkkosivumuodossa <http://www.libsimaging.net> (vaihtoehtoisesti <https://users.aalto.fi/~laineil/>), sekä 3. teknologian esitleminen muille tutkijoille kuten GTK:n geologian tutkijoille yhteistyöprojekteissamme, sekä eri tutkijatapahtumissa ja seminaareissa muille tutkijoille ja toimijoille.

Erot edelliseen suunnitelmaan

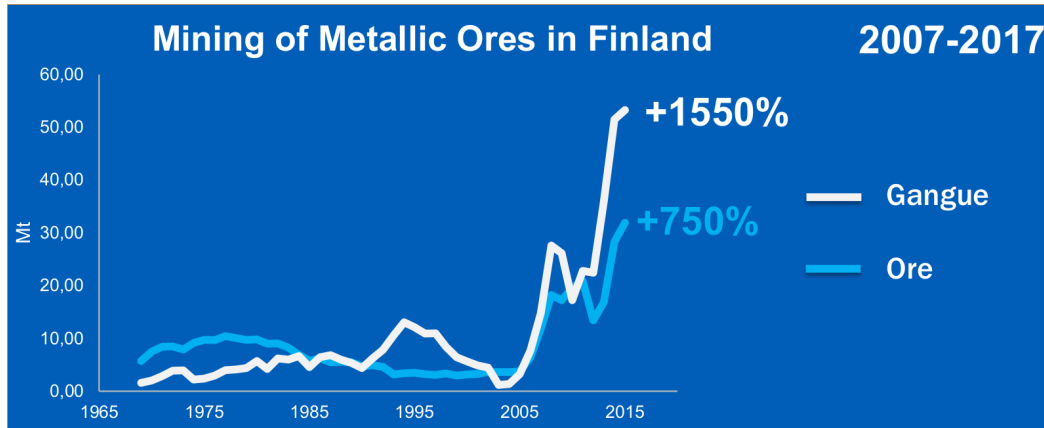
Suurin ero alkuperäiseen suunnitelmaan on julkaisulista. Olin alunperin liian optimistinen siitä miten nopeasti saan keräämämme tutkimusaineiston käännettyä valmiiksi tieteellisiksi artikkeleiksi ja miten meillä oli materiaali jo valmiina julkaisuja varten. Kirjoitusprosessissa tuli kuitenkin selväksi, että meillä ei ollut spektrianalyysin menetelmät niin hyvin hallussa että olisin osannut ne selkeästi esittää. Kirjoitustyö itsessään vaati myös enemmän opettelua kuin olin kuvitellut. Kirjoitustyön painopiste on tutkimustyön edetessä siirtynyt yleistajuisempaan esittelyyn LIBS-kuvantamisesta väitöskirjassani ”Technology of LIBS-imaging”, verkkosivuillani ja wikipedia-artikkeleissa. Tieteellisiä artikkeleita on tarkoitus saada tehtyä ja jatkamme niiden työstämistä, mutta pääosin vasta väitöskirjani jälkeen ja osan niiden materiaalista voin selostaa väitöskirjatekstissäni ja verkkosivullani paremmin kuin miten ne artikkelimuodossa toimitivat.

Tutkimustyön tarkoitus ja merkitys (a)

Kestävän kehityksen vaativa teknologia, kuten akut, polttokennot, sähkömoottorit ja tuulivoiman generaattorit, tarvitsevat kasvavia määriä muunmuassa litiumin, koboltin ja grafiitin tuotantoa. Maailmalla elintason noustessa ja kaupungistumisen jatkuessa tulee metalli- ja mineraaliresurssien tarve vain kasvamaan tulevaisuudessa. Koska helposti hyödynnettävät malmiresurssit on suurimmilta osin jo hyödynnetty, tulevaisuuden malmiresurssit ovat myös jatkuvasti huonompilaatuisia ja entistä vaikeammin saavutettavissa paikoissa ja syvemmällä maan alla (Searching the.. 2010).

Kaivostoiminnan ympäristövaikutukset ovat merkittäviä kaivoksen elinkaaren jokaisessa vaiheessa. Kaivostoiminta tuhoaa ympäristöä sekä suoraan, kaivosten jätevesien ja happaman valuman, kaivetun sivukiven

ja kaivosalueen muokkauksen osalta, että välillisesti kaivostoiminnan valtavan energiankulutuksen muodossa. Pelkästään kiviaineksen hienonnisprosessien on arvioitu vievän 4% kaikesta sähkönkulutuksesta maailmassa (Jeswiet and Szekeres 2016). Pienilläkin parannuksilla murskaus- ja jauhatusprosessien säätöön sisäänlaitettavaa ainesta monitoroimalla ja valikoimalla voidaan saavuttaa valtavia säästöjä energian ja hienonnislaitteiden kuluvien osien kohdalla. Vieläkin suurempi merkitys olisi kaivosten louhinnan tarkemmalla kohdistamisella. Esimerkkinä Suomessa louhitun sivukiven määrä on viime vuosina kasvanut merkittävästi ja nopeammin kuin louhitun malmin määrä (kuva 1). Tämän käyrän kääntäminen toisinpäin olisi ehdottoman tärkeää.



Kuva 1: Suomessa louhitun metallimalmien ja sivukiven määrä, [Tukes](#)

Tutkimuksen tarkoituksena on kehittää LIBS analyysin menetelmiä toimivaksi työkalupaketiksi geologeille. Tutkimus tukee malminetsintä- ja kaivostoimintaa ja geologian tutkimusta Suomessa sekä pienimuotoisesti pilottiprojektien kohteiden kanssa että erityisesti tarjoamalla uusia työkaluja malminetsintä- ja kaivosyhtiöille, geologian tutkijoille ja GTK:n (Geologian tutkimuslaitos) kaltaisille toimijoille. Tutkimuskysymykset on esitetty seuraavassa kappaleessa ja julkaisusuunnitelman yhteydessä hypoteeseina LIBS-tekniikan hyödyllisyydestä.

Välittömästi tulokset tuottava skannaava LIBS laitteisto sopivin spektrianalyysimenetelmin on tehokas työkalu geologiseen analyysiin. Parempi geologinen tieto auttaa kaivoksen elinkaaren jokaisessa vaiheessa: tehostaa malminetsintää, auttaa kaivossuunnittelussa ja mahdollistaa kaivostoiminnan kehittymisen valikoivampaan suuntaan, säätämään hienonnisprosesseja ja ohjaamaan rikastusprosesseja sekä arvioimaan kaivosjätteiden ympäristövaikutusta. LIBS skanneri sopii erityisesti myös seuraaviin tarkoituksiin:

1. Geotekninen analyysi rakotäytteiden analyysin avulla.
2. Ympäristömineralogiaan kaivostoiminnan ympäristövaikutusten ja riskien määrittäminen etukäteen muunmuassa hapontuottopotentiaalia arvioimalla.
3. Rikastusprosessiin vaikuttavien haittatekijöiden, kuten grafiitin määrän määrittäminen.
4. Kiviaineksen kovuuden ja hienonnuksen vaativan energian arviointi ja siten murskaus ja jauhatuspiirien optimointi (patenttihakemuksemme liittyy tähän).
5. Loggaavan geologin työn tehostus ja osaamisen kehittäminen kun kairasydämiä logatessa näkee paljain silmin näkymättömiä rakenteita.

Yhteenveto aikaisemmista samaa kysymystä koskevista tutkimuksista (b)

LIBS on emissiospektroskopiaa, jossa lyhyellä laserpulsilla irroitetaan kohteesta pieni määrä ainetta, joka kuumentuu plasmaksi (kipinä) ja jäähtyessään emittoi valoa plasman alkuaineille ja tietyille molekyyleille ominaisilla aallonpituuksilla. Tutkimus LIBS:n käytöstä geologiseen analyysiin on lisääntynyt voimakkaasti viime vuosikymmenen aikana, mihin yksi merkittävä tekijä tälle on ollut Mars mönkijän CHEMCAM (Maurice et al. 2012) LIBS-moduuliin liittyvä tutkimus (Fabre 2020). LIBS:n käyttöä kairasydämien analyysiin on tutkinut aiemmin muunmuassa (Bolger 2000), (Haavisto, Kauppinen, and Häkkänen 2013), (Khajehzadeh and Kauppinen 2015), (Kuhn et al. 2016) ja (Streubel et al. 2016).

LIBS:n etuja muihin tekniikoihin on muunmuassa sen sopivuus kaikille materiaaleille, sopivuus reealiaikaiseen mittaukseen, herkkyys keveille alkuaineille (mihin röntgenfluoresenssi ei sovi) (Body and Chadwick 2001), korkeantarkkuuden kuvantaminen (Cáceres et al. 2017), ja laitteiston miniatyrisoinnin mahdollisuus (Harmon et al. 2009).

Tutkimusryhmämme keskittyi 2019-2021 tekemään Business Finlandin rahoittamaa Tutkimuksesta Liiketoimintaan (TutL) projektia TUTL-LASOLIBS, jossa LASO-LIBS tulee sanoista Large Area Scanning Open-source Laser-Induced Breakdown Spectrometer. Projektin parissa kehitimme kairasydänskanneri prototyyppilaitteistoamme ja teimme pilottiprojekteja kaivos- ja malminetsintäyhtiöiden kanssa tekniikan toimivuuden osoittamiseksi. Projektin aikana on käynyt selväksi että skannaava LIBS on erittäin tehokas työkalu geologiseen analyysiin. Projektin rahoitus loppui alkuvuonna 2021 ja johti Lumo Analytics Oy yrityksen perustamiseen. Teknologian valtavan potentiaalın vuoksi olisi erittäin tärkeä jatkaa myös julkista tutkimusta ja siksi haen siihen lisärahoitusta.

Projektiin liittyen on tehty kaksi diplomityötä ja kolmas on tekeillä. Diplomityöt koskevat teknologian kaupallistamista (Xue 2020) (saatavilla Aalto-yliopiston kirjastolta tai minulta pyytämällä), referenssinäytteiden valmistusta (Millington 2020) (saatavilla pyytämällä) sekä neuroverkkojen käyttöä mineraalien luokitteluun LIBS signaalista (Henri Johansson, työ ei ole vielä valmis). Projektista syntyi yksi patentti (hakemusnumero 20205892) ja 8 Aalto-yliopiston keksintöilmoitusta. Uudempana luettavana on ohjaamani kandidaatintyö (Lappalainen 2023) LIBS-analyysistä nikkelin ja REE-metallien mittaukseen.

Itse olen työskennellyt aiheen parissa Aalto-yliopistolla vuodesta 2018 ensin diplomityöntekijänä, sitten tutkimusavustajana ja 2019 syksystä alkaen tohtorikoulutettavana ja 2021 eteenpäin olen ollut mukana myös tekniikkaa kaupallistavassa startup-yritys Lumo Analytics Oy:ssä. Omia valmiita julkaisujani aiheesta on vasta diplomityöni (Laine 2019) sekä yksi konferenssijulkaisu (Kiviluoma, Kuosmanen, Otto 2020).

Käytettävät tutkimusmenetelmät (c)

Tutkimuksen tekee mahdolliseksi kolme asiaa: prototyyppilaitteistot, referenssimineraalikirjasto ja yhteistyö kaivosyhtiöiden ja GTK:n geologien kanssa.

Olemme edellisten tutkimusprojektien aikana rakentaneet Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksen laserlaboratoriolla (LIBSLAB) uudentyyppisiä skannaavia LIBS prototyyppilaitteistoja, jotka kykenevät mittaamaan jotka kykenevät mittaamaan nopeasti suuria pinta-aloja erittäin yksityiskohtaisella resoluutiolla. Tärkeimpänä työkaluna on meidän LASO-LIBS skanneri, joka on suunniteltu kairasydämien skannaamiseen laatikko kerrallaan. Sama laite soveltuu kairasydämien lisäksi epäsymmetristen ja monimuotoisten näytteiden, kuten kivimurskan, porasoijan tai käsinäytteiden mittaamiseen. Olemme mitanneet laitteellamme satoja metrejä kairasydämiä ja satoja muita näytteitä.

Aalto-yliopiston kokoelmissa on tuhansia mineraali-, malmi-, ja muita kiviainesnäytteitä. Tämän lisäksi olemme saaneet yhteistyökumppaneiltamme näytteitä sekä ostaneet puhtaita alkuainenäytteitä. Olemme koonneet laajan mineraali- ja alkuainekirjaston LIBS-analyysien referenssinäytteiksi. Lähestymistapamme

LIBS-analyysiin pohjautuu koneoppimismenetelmiin, jotka vaativat suuren määrän opetusdataa.

Kolmanneksi olemme viime vuosien projekteissa olleet läheisessä yhteistyössä kaivosyhtiöiden sekä GTK:n (Geologian tutkimuskeskus) kanssa. Tämä on mahdollistanut välittömän palautteen saamisen niiltä geologeilta, joiden käyttöön kehittämämme laitteet ja menetelmät on tarkoitettu.

Näiden lisäksi tutkimusmenetelmiin kuuluu dokumentointia, vertailukohtien keräilyä kirjallisuudesta, kerätyn datan analyysiä, menetelmien validointia ja vertailua vaihtoehtoisin menetelmiin.

Julkaisusuunnitelma ja aikataulu

Tässä on päivitetty suunnitelma julkaisuista.

2023: Jo tehty artikkeli LIBS kuvantamisen käytöstä kaivossuunnitteluun

1. Artikkelin ”*Improvements in rock mass description for slope design by geophysical and geochemical methods*”. Osana GAGS-tutkimusprojektia. Toimitettu julkaisijalle kesällä 2023 mutta ei vielä lopullisesti hyväksytty ja julkaistu. Artikkelin kertoo kaivossuunnittelun uusien menetelmien arvioinnista ja minun osuus artikkelissa kuvaa LIBS-kuvantamisella kerätystä mittaustiedosta ja sen soveltuvuudesta kaivossuunnitteluun.

Kirjoittajat: Mikael Rinne, Mateusz Janiszewski, Sebastian Pontow, Lauri Uotinen, Risto Kiuru, Lasse Kangas, Ilkka Laine, Jussi Leveinen

2023 ja eteenpäin jatkuvasti: LIBS-kuvantamisen yleistajuinen esittely wikipediassa ja verkkosivullani

2. Tutkimusverkkosivuni libs imaging.net

Yleistajuinen esitys LIBS-kuvantamisesta. Alustava versio on jo netissä 2023, mutta on vasta raaka vedos, josta puuttuu pääosa materiaalista. Tätä työstän niin että 2024 sivu olisi riittävän hyvä valmis verkkosivu luettavaksi ja jaettavaksi yhteistyökumppaneille esittelemään menetelmän. Tarkoituksena on tätä myös siitä eteenpäin päivittää jatkuvasti tutkimustyön edetessä. Linkki <http://libs imaging.net> tai <https://users.aalto.fi/~lainei1/>

Kirjoittajat: Ilkka Laine ja materiaalia myös ainakin Lasse Kangas, Jussi Leveinen, Luis Huaman, Janna Lappalainen, Nicolas Barban

3. Wikipedia artikkeleiden kirjoitus

Päivitan englanninkielistä wikipedia-artikkeliä Laser-Induced Breakdown Spectroscopy kertomaan LIBS:n nykyisestä käytöstä ja metalli- ja kaivosteollisuudessa ja tutkimuksessa, kirjoitan käytetyistä LIBS datan spektrianalyysin menetelmistä geologiseen analyysiin sekä esittelen LIBS-kuvantamisen menetelmän. Kirjoitan myös vastaavat suomenkieliset artikkelit laserplasma-spektroskopiasta.

Kirjoittajat: Ilkka Laine

2024: Artikkelin jo tehdystä LIBS mittaustuloksesta täysin uudentyyppisellä geologisella datalla Kittilän kultakaivoksesta. Geologista LIBS analyysiä tukevien spektri-tietokantojen ja kehittämämme LIBS-analyysi menetelmien julkaisu sekä väitöskirjani julkaisu.

4. Artikkelin LIBS-LIDAR tunneliskannerin laitteiston esittely ja mittaustulokset Kittilän kaivokselta, ”*Scanning LIBS-LIDAR for Underground Mining*”, Kohde: Applied Spectroscopy

Tämä on osin kirjoitettu. Laite on jo esitetty diplomityössäni mutta tämä on kompaktimpi esittely laitteesta ja testitulokset on oikeasta kaivosympäristöstä Kittilässä.

Kirjoittajat: Lasse Kangas, Ilkka Laine, Jussi Leveinen.

5. Avoin datasetti: *LIBS spektrikirjasto mineraaleille*

Aallon mineraalikirjaston(satoja näytteitä) pohjalta luotu LIBS-spektriaineisto ja sen vahvistava data mukaanlукuen XRD ja XRF-analyysit. Spektriaineisto julkaistaan Zenodo.org palvelussa kaikille avoimena datana käytettäväksi.

Kirjoittajat: Ilkka Laine, Lasse Kangas, Luis Huaman, Jussi Leveinen.

6. Avoin datasetti: *LIBS spektrikirjasto alkuaineille*

Kuten edellinen, mutta alkuaineiden osalta. Mukana on muunmuassa puhtaita alkuaineita Aalto-yliopiston kokoelmista ja ostettuina sekä Edinburghin yliopistolta saatu REE-alkuainesetti mitattuna. Julkaistaan Zenodo.org palvelussa kaikille avoimena datana käytettäväksi.

Kirjoittajat: Ilkka Laine, Lasse Kangas, Luis Huaman, Jussi Leveinen.

7. LIBS-kuvantamisen spektrianalyysin ohjelmakoodikirjasto

Tutkimustyössä kehittämämme ohjelmistot LIBS-kuvantamisessa kerättävän spektriaineiston analyysiin Julia ja MATLAB-koodeina vapaan ohjelmiston lisensseillä. Kohde: Github ja Journal of Open Research Software.

Kirjoittajat: Ilkka Laine, Lasse Kangas, Jussi Leveinen

2025: Väitöskirjani julkaisu

8. Tohtorinväitöskirja ”*Technology of LIBS Imaging*”

Sisältö on pääosin samaa kuin verkkosivullani ja artikkeleissa mutta kirjamuotoon monografiaksi luku kerrallaan jaoteltuna ja tekstiasu nätisti laottuna. Selittää laserplasmaskopioakuvantamisen tekniikan yleistajuisesti kahden eri laitteen, LIBS-Lidar ja LASOLIBS kairasydänskanneri, esimerkein, LIBS spektrianalyysin matemaattiset menetelmät selkeästi esitettynä sekä LIBS-kuvantamisen sovellukset pääasiassa geologisen analyysin alalla.

Kirjoittajat: Ilkka Laine. Materiaalia monilta eri tekijöiltä.

2025-2026: Artikkeleita LIBS-kuvantamisen hyödyntämisestä tärkeisiin sovelluksiin sekä LASO-LIBS kairasydänskannerimme rakennusohjeet

9. *Kiviaineksen hapontuoton estimointi LIBSillä*

Spektrien sormenjälkiin perustuvan mineraaliluokittelijan kanssa LIBS analyysiä voidaan käyttää kaivosjätteiden hapontuoton estimointiin. Kaivosten happamat valumat ovat valtava ympäristöongelma. Jos kiviaineksen hapontuotto- ja neutralointipotentiaalit pystytyään arvioimaan ennakoita, happamuutta voidaan sekä säätää sopivaksi rikastusprosesseihin, että estää happamien valumien aiheuttamat ympäristötuhot. Esimerkkikohteena on todennäköisesti joko kaivos tai malminetsintäkohde Suomessa.

Kirjoittajat: Ilkka Laine, Luis Huaman, Jussi Leveinen.

10. LASO-LIBS 1: LASO-LIBS:n rakennusohjeet, ”*Open-Source LIBS Drill Core Scanner*”, kohde HardwareX

Kairasydänskannerimme rakennusohjeet Free and Open Source Hardware(FOSH) periaatteilla artikkelina, jonka avulla kuka tahansa pystyy rakentamaan laitteen. Artikkelia on jo työstetty pidempään yhdessä laitekehityksen kanssa mutta teksti vaatii paljon lisätyötä. Tavoitteena on mahdollistaa LIBS-skannereiden akateeminen käyttö kohtuuhintaan ja siten LIBS-menetelmien tutkimuksen edistäminen.

Kirjoittajat: Lasse Kangas, Ilkka Laine, Jussi Leveinen, Joshua Pearce.

11. LASO-LIBS 2 : *LASO-LIBS esittely ja esimerkkitulokset*, kohde HardwareX

Esimerkkitulokset mitä rakennusohjeilla kootulla laitteella pystyy tekemään.

Kirjoittajat: Lasse Kangas, Ilkka Laine, Jussi Leveinen, Joshua Pearce.

12. LASO-LIBS 3: *LASO-LIBS korkean resoluution esimerkkitulokset: mikrometrin tarkkuus ja megapikselien kuvantaminen*

Laitteemme soveltuu laajojen alueiden lisäksi myös hyvin yksityiskohtaiseen, 25mikrometrin mittaustarkkuuteen, jolloin tuloksena on megapikseliluokan dataa neliösenttimetrin alueelta. Näin tuotetut kuvat ovat paitsi hyvin näyttäviä, niillä voi erottaa kiviäytteistä yksittäisiä mineraalitekiteitä. Artikkelissa esitellään tämä tekniikka ja millaiseen analyysiin se soveltuu. Tämä artikkeli hyvin mahdollisesti siirtyy aikaisemmaksi koska tämä artikkeli toimii myös itsenäisenä ennen kuin kirjoitustyön hankalin osa eli laitteen rakennusohjeet on valmiina julkaistavaksi.

Kirjoittajat: Ilkka Laine, Lasse Kangas, Jussi Leveinen.

13. *LIBS pistepilvidatan käyttö geotekniseen analyysiin*

Olemme kehittäneet menetelmän automaattiseen RQD(*Rock quality designation*) määrittämiseen LIBS pistepilvidatasta. LIBS soveltuu myös katkojen laadun ja rakotäytteidien tyyppin määrittämiseen. Nämä menetelmät yhdistettynä LIBS-mittalaitteella voidaan automatisoida ja tehostaa geoteknistä analyysiä. Esimerkkikohteena on todennäköisesti yhteistyökumppanin kaivos Suomessa.

Kirjoittajat: Ilkka Laine, Lasse Kangas, Jussi Leveinen.

Sidonnaisuudet ja muu mainittava

Olen osakkeenomistaja ja olen tehnyt osa-aikaisia ja keikkatöitä ja minulla on läheiset suhteet LIBS-tekniologian startup-yritykseen Lumo Analytics Oy. Olen osakeksijänä LIBS tekniikkaan liittyvässä patentissamme ja keksintöilmoituksissa. LIBS tekniikan jatkotutkimus auttaa myös keksintöjemme hyödyntämistä.

Tutkimustani on rahallisesti tukenut osana suurempia projekteja Suomen Akatemia ja Business Finland sekä minua henkilökohtaisesti K.H. Renlundin säätiö ja KAUTE-säätiö

Ei muita sidonnaisuuksia.

Viitteet

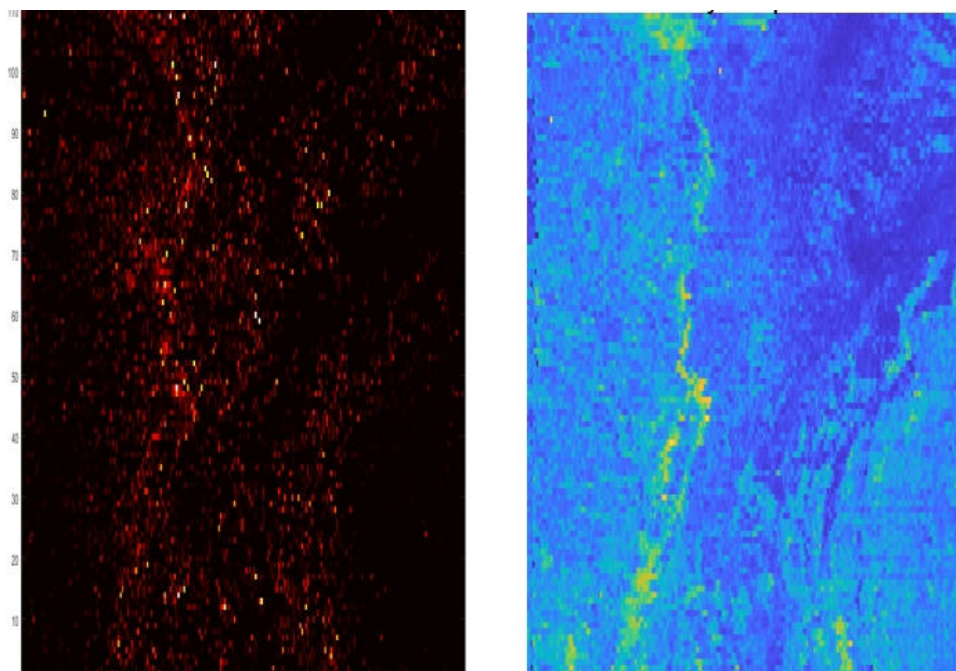
Tank, Theo Murphy High Flyers Think. 2010. *Searching the Deep Earth : the Future of Australian Resource Discovery and Utilisation..* Edited by Australian Academy of Science, Theo Murphy(Australia) Fund,, and High Flyers Think Tank. Theo Murphy High Flyers Think Tank 2010 Proceedings. Canberra: Australian Academy of Science.

- Jeswiet, Jack, and Alex Szekeres. 2016. “Energy Consumption in Mining Comminution”. *Procedia CIRP* 48: 140–45. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>.
- Maurice, S., R. C. Wiens, M. Saccoccio, B. Barraclough, O. Gasnault, O. Forni, N. Mangold, et al. 2012. “The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Science Objectives and Mast Unit Description”. *Space Science Reviews* 170 (1-4): 95–166. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9912-2>.
- Fabre, Cécile. 2020. “Advances in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Analysis for Geology: A Critical Review”. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 166 (April): 105799. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2020.105799>.
- Bolger, J. A. 2000. “Semi-Quantitative Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for Analysis of Mineral Drill Core”. *Applied Spectroscopy* 54 (2): 181–89.
- Haavisto, Olli, Tommi Kauppinen, and Heikki Häkkänen. 2013. “Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for Rapid Elemental Analysis of Drillcore”. *IFAC Proceedings Volumes* 46 (16): 87–91. <https://doi.org/10.3182/20130825-4-US-2038.00047>.
- Khajehzadeh, Navid, and Tommi K. Kauppinen. 2015. “Fast Mineral Identification Using Elemental LIBS Technique”. *IFAC-PapersOnLine* 48 (17): 119–24. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.089>.
- Kuhn, Kerstin, Jeannet A. Meima, Dieter Rammlmair, and Christian Ohlendorf. 2016. “Chemical Mapping of Mine Waste Drill Cores with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) for Mineral Resource Exploration”. *Journal of Geochemical Exploration* 161: 72–84.
- Streubel, Lukas, Lars Jacobsen, Sven Merk, Michael Thees, Dieter Rammlmair, Jeannet Meima, and David Mory. 2016. “Rapid Analysis of Geological Drill-Cores with LIBS”. *Optik & Photonik* 11 (5): 23–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/opph.201600035>.
- Body, D., and B. L. Chadwick. 2001. “Optimization of the Spectral Data Processing in a LIBS Simultaneous Elemental Analysis System”. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 56 (6): 725–36.
- Cáceres, J. O., F. Pelascini, V. Motto-Ros, S. Moncayo, F. Trichard, G. Panczer, A. Marín-Roldán, J. A. Cruz, I. Coronado, and J. Martín-Chivelet. 2017. “Megapixel Multi-Elemental Imaging by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy a Technology with Considerable Potential for Paleoclimate Studies”. *Scientific Reports* 7 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05437-3>.
- Harmon, Russell S., Jeremiah Remus, Nancy J. McMillan, Catherine McManus, Leslie Collins, Jennifer L. Gottfried, Frank C. DeLucia, and Andrzej W. Miziolek. 2009. “LIBS Analysis of Geomaterials: Geochemical Fingerprinting for the Rapid Analysis and Discrimination of Minerals”. *Applied Geochemistry* 24 (6): 1125–41. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.02.009>.
- Xue, Emilia. 2020. “A Service Vision for a Laser-Based Scanning Method”. G2 pro gradu, diplomityö, Aalto University. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202005173158>.
- Millington, Joseph. 2020. “Site Specific Calibration of Laser Induced Breakdown Spectroscopy for Rapid Elemental Analysis of Gold Ore Drill Core Samples”. Master’s thesis, Aalto University.
- Lappalainen, Janna. 2023. “Laser-Induced Breakdown Spectroscopy to Detect Critical Raw-Materials in Rocks and Minerals”. Kandidaatintyö, Aalto University
- Laine, Ilkka. 2019. “Scanning Laser-Induced Breakdown Spectrometer for Mine Walls”. Master’s thesis, Aalto university. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2620002>.
- Kiviluoma Panu, Kuosmanen, Petri, and Otto, Tauno. 2020. “Newtonian Telescope Design for Stand-off Laser Induced Breakdown Spectroscopy”. In *Proceedings of the 5th Baltic Mechatronics Symposium*, 58. Espoo, Finland. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-9603-0>.

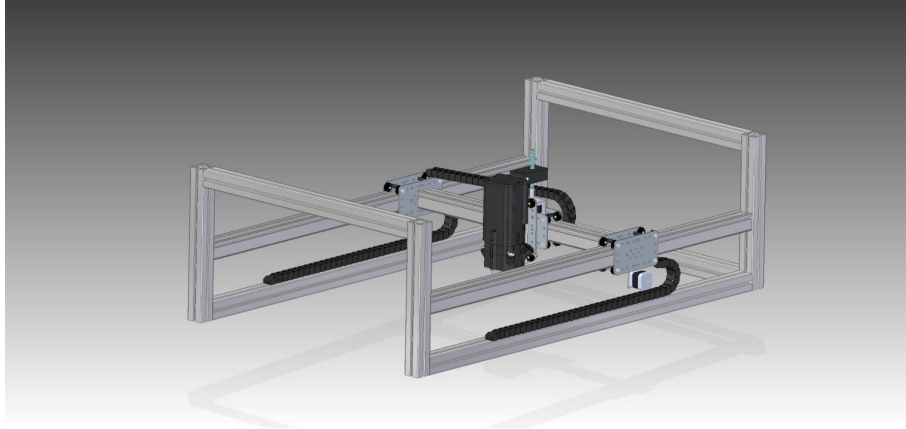
Liite 1: Suunniteltujen julkaisujen esimerkkikuvia



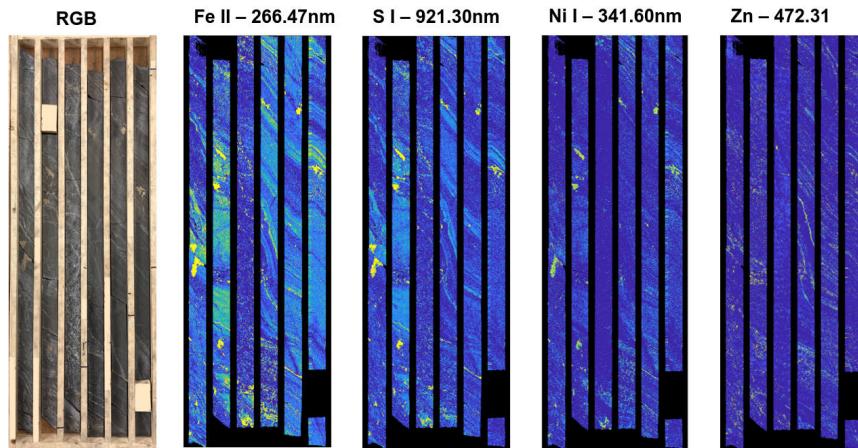
Kuva 1: Julkaisut 1 ja 4: LIBS tunneliskanneri Kittilän kaivoksella



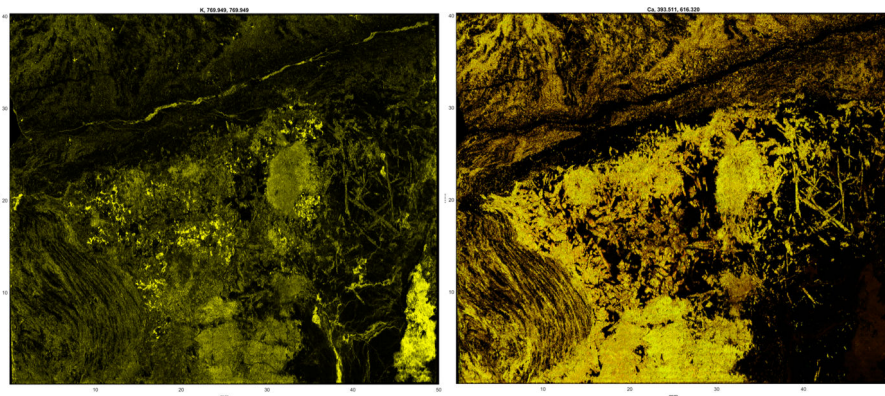
Kuva 2: Julkaisut 1 ja 4: Tunneliskannaustulosesimerkki, Kittilän kultakaivoksen tunnelin vasemman seinän arseeni ja kokonaisintensiiteetti



Kuva 3: Julkaisut 2, 8 ja 10: LASO-LIBS kairasydänskannerin 3D-malli



Kuva 4: Julkaisu 11: LASO-LIBS kairalaatikon skannaus. Rauta, Rikki, Nikkeli ja Sinkki



Kuva 5: Julkaisut 2, 8 ja 12: Korkean tarkkuuden LASO-LIBS-skannaus, 4x5cm pinta. Kalium ja Kalsium