

Timo Hietalahti

LITIUMSPODUMEENIMALMIN MURSKAUKSESSA SYNTYVÄN HIENOAINEEN MÄÄRÄN TUTKIMINEN

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Maaliskuu 2015**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Kokkola– Pietarsaari	Aika maaliskuu 2015	Tekijä Timo Hietalahti
Koulutusohjelma Kemiantekniikan koulutusohjelma		
Työn nimi Litiumspodumeenimalmin murskauksessa syntyvän hienoaineen määrän tutkiminen		
Työn ohjaaja Laura Rahikka		Sivumäärä 45+3
Työelämäohjaaja Olle Sirén		
<p>Opinnäytetyössä tarkoituksena oli tutkia Litiumspodumeenimalmin murskautuvuutta leukamurskaimella. Työssä suoritettiin murskauksia erisuuruisilla taajuuksilla, jonka jälkeen murskattu malmi seulottiin erisuuruisiin raekokoluokkiin. Seulonnasta saaduista tuloksista tuli tarkastella, kuinka murskattu materiaali jakautui neljään eri raekokoluokkaan: alle 0,6 mm, 0,6–3,35 mm, 3,35–5,6 mm ja yli 5,6 mm. Tulosten tarkastelussa pääpaino keskittyi alle 0,6 mm:n-kokoisen materiaalin määrään.</p> <p>Tutkimukseen liittyvät työt suoritettiin Centria-ammattikorkeakoulun murskaamossa ja prosessilaboratoriossa. Työn toimeksiantajana toimi Keliber Oy ja työ suoritettiin kokonaisuudessaan helmikuussa 2015.</p>		

Asiasanat

litium, litiumspodumeeni, murskaus, seulonta, raekoko

ABSTRACT

Unit Kokkola–Pietarsaari	Date March 2015	Author Timo Hietalahti
Degree programme Chemical Engineering		
Name of thesis Examining the Amount of Fines of Lithiumspodumene Ore Consisting In Crushing Process		
Instructor Laura Rahikka		Pages 45 + 3
Supervisor Olle Sirén		
<p>The idea of this thesis was to examine crushing of lithiumspodumene mineral. The crushing was performed with a jaw crusher and all the crushing was performed with different amount of frequency. After crushing the samples of the ores, they were sieved into the different grain sizes. From the results it was considered how much the crushed samples were divided to four different grain size categories. The grain size categories were under 0,6 mm, 0,6–3,35 mm, 3,35–5,6 mm and over 5,6 mm. Main focus on emphasizing the grain size category was under 0,6 mm.</p> <p>Made work tasks related to the research were performed in crushing plant and process laboratory of Centria University of Applied Sciences. The mandator of the research was Keliber Oy and work was made entirely in 2015.</p>		

<p>Key words lithium, lithiumspodumene, crushing, sieving, grain size</p>
--

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 TOIMEKSIANTAJA	2
3 LOUHITUN MALMIN HIENONTAMINEN	4
3.1 Murskaus	4
3.2 Murskaimet	5
3.2.1 Leukamurskain	5
3.2.2 Kita- ja kiertomurskain	7
3.2.3 Kara- ja kartiomurskain	8
3.2.4 Valssimurskain	9
3.2.5 Iskumurskain	10
3.3 Murskautuvuus	11
4 SEULONTA	13
4.1 Täry- ja rumpuseulat	15
4.2 Seula-analyysi	17
5 LITIUM	20
5.1 Litium luonnossa	21
5.2 Litiumspodumeeni	21
5.3 Litiumin käyttökohteet	22
6 KOKEELLINEN OSUUS	24
6.1 Työn tavoitteet ja lähtökohdat	24
6.2 Koejärjestelyt ja laitteet	25
6.3 Työn suoritus	26
6.3.1 Murskaus	27
6.3.2 Seulonta ja punnitus	28
6.3.3 Näytteiden talteenotto	30
7 TULOKSET	31
7.1 Koeajo 1	32
7.2 Koeajo 2	34
7.3 Yhdistetyt tulokset	36
7.4 Tulosten käsittely ja vertailu	38
8 LOPPUPÄÄTELMÄT	43

LÄHTEET

LIITTEET

Liite 1/1–1/6 Tulokset murskauksittain

Liite 2/1–2/4 Ensimmäisen ajon integraalikuvaajat

Liite 3/1–3/3 Seulalle jäänyt materiaalmäärä seulapinnoittain

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Molempien ajojen kaikkien murskausten alle 0,6 mm:n-kokoisen materiaalin määrät ja niiden erotukset

TAULUKKO 2. Molempien ajojen kaikkien murskausten 0,6–3,35 mm:n-kokoisen materiaalin määrät ja niiden erotukset

TAULUKKO 3. Molempien ajojen kaikkien murskausten 3,35–5,6 mm:n-kokoisen materiaalin määrät ja niiden erotukset

TAULOKKO 4. Molempien ajojen kaikkien murskausten yli 5,6 mm:n-kokoisen materiaalin määrät ja niiden erotukset

KUVIOT

KUVIO 1. Poikkileikkaus leukamurskaimesta

KUVIO 2. Kita- ja kiertomurskaimet

KUVIO 3. Kartio- ja karamurskaimet

KUVIO 4. Valssimurskain

KUVIO 5. Iskumurskain

KUVIO 6. Seulontavyöhykkeet

KUVIO 7. Märkäseulontaa täryseulalla

KUVIO 8. Poikkileikkauskuva rumpuseulasta

KUVIO 9. Kuva seulasarjasta

KUVIO 10. Integraali- ja differentiaalikuvaajat

KUVIO 11. Hapettunutta litiummetallia

KUVIO 12. Litiumin käyttökohteet USGS 2011 (SQM:n arvio)

KUVIO 13. Litiumspodumeenia esimurskattuna -20 mm raekokoon

KUVIO 14. 5,6 mm:n seulapohja ja seulapohjia

KUVIO 15. Kuva leukamurskaimen asennetusta taajuusmuuntajasta

KUVIO 16. Murskauksessa käytetty Retsch-merkkinen leukamurskain

KUVIO 17. Seulottava materiaali ensimmäisen ajon murskauksesta 35 hertsin taajuudella

KUVIO 18. Yli 5,6 mm ja 1,12 mm kokoista materiaalia seulapinnoilla

KUVIO 19. Materiaalin punnitusta

KUVIO 20. Seulonnasta talteen otettu materiaali

KUVIO 21. Ensimmäisen koeajon alle 0,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

KUVIO 22. Ensimmäisen ajon 0,6–3,35 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

KUVIO 23. Ensimmäisen ajon 3,35–5,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

KUVIO 24: Ensimmäisen koeajon yli 5,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

KUVIO 25. Toisen koeajon alle 0,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

KUVIO 26. Toisen Koeajon 0,6–3,35 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

KUVIO 27. Toisen koeajon 3,35–5,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

KUVIO 28. Toisen koeajon yli 5,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

KUVIO 29. Molempien koeajojen alle 0,6 mm-kokoisten partikkelien osuudet
KUVIO 30. Molempien koeajojen 0,6–3,35 mm-kokoisten partikkelien osuudet
KUVIO 31. Molempien koeajojen 3,35–5,6 mm-kokoisten partikkelien osuudet
KUVIO 32. Molempien koeajojen yli 5,6 mm-kokoisten partikkelien osuudet

1 JOHDANTO

Suomen maaperästä on löydetty aikojen saatossa monia erilaisia malmiesiintymiä. Näitten esiintymien takia Suomeen on syntynyt kaivosteollisuutta ja kaivosten määrä on noussut maassamme merkittävästi viime vuosikymmeninä. Koska metallien tarve kasvaa maailmanlaajuisesti, tarvitaan kaivosteollisuutta tyydyttämään tuota tarvetta. Yksi kysytyimmistä metalleista maailmanlaajuisesti on litium, jonka käyttö ja kysyntä ovat nousseet hurjasti akkuteollisuuden kasvun myötä. Suomesta on löydetty Keski-Pohjanmaan alueelta koko maailma mittakaavassa merkittäviä litiumspodumeeniesiintymiä, joita olisi tarkoitus päästä hyödyntämään lähivuosien aikana.

Tämän opinnäytetyön tekeminen aloitettiin tammikuussa 2015. Opinnäytetyöaihe saatiin Keliber Oy:ltä, joka on Kaustisella ja sen lähialueilla toimiva kaivosyhtiö. Yhtiö ei ole vielä päässyt aloittamaan varsinaista tuotantoprosessia, mutta tutkimuksia yhtiö on tehnyt jo pidemmän aikaa. Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia litiumspodumeenin murskautuvuutta leukamurskaimella. Työn tavoitteena on selvittää, kuinka erisuuruisilla taajuuksilla murskaaminen vaikuttaa murskauksessa syntyvän hienoaineksen määrään. Kokeiden tuloksista tulisi selvittää, millä taajuudella saadaan paras lopputulos. Saatuja tuloksia käytetään hyödyksi litiumspodumeenin rikastusprosessia suunniteltaessa.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa tullaan käsittelemään tutkimusosuudessa käytettyjä kaivosalan prosesseja – murskausta ja seulomista – ja niissä käytettäviä erilaisia laitteita. Lisäksi teoriaosuudessa tullaan kertomaan materiaalin murskautuvuudesta, spodumeenimineraalista ja litiummetallista.

2 TOIMEKSIANTAJA

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Keski-Pohjanmaalainen kaivosyhtiö Keliber Oy, jonka nimi tulee sanoista Keski-Pohjanmaan litium ja beryllium. Keliberin juuret ulottuvat aina 1960-luvulle saakka, jolloin Suomen Mineraali oy aloitti litiumtutkimukset. Ensimmäisenä löydettiin Ullavan Längän ja Emmesin litium-esiintymät. Myöhemmin Paraisten Kalkkivuori Oy hankki itselleen kaikki Suomen mineraali Oy:n tutkimustulokset ja jatkoi tutkimuksia siitä, mihin Suomen mineraali Oy oli jäänyt. (Sirén 2015, 22.)

Vuonna 1982 litiummarkkinat kehittyivät niin epäsuotuisaksi, että lupaavalta vaikuttanut litiumprojekti jouduttiin keskeyttämään. Projekti sai uuden sysäyksen 2000-luvun vaihteessa, kun Keliber-projektin esiselvityshankkeen seurauksena perustettiin Keliber Resources Ltd Oy. Vuonna 2002 ruvettiin suorittamaan lisäkairauksia ja samalla aloitettiin kaivostoiminnan aloittamisen valmistelut ja tuotantoprosessin kehittäminen. Vuonna 2008 yritys muuttui kaivosyhtiöksi ja yhtiön nimi muutettiin Keliber Oy:ksi. Samana vuonna norjalaisesta Nordic Mining Oy:stä tuli yhtiön suurin omistaja 68 prosentin osuudellaan. (Sirén 2015, 22.)

Tuotannon käynnistyttyä yhtiön tavoitteena on saada valmistettua 99,99-prosenttista litiumkarbonaattia, joka on yhtiön päätuote. Tämän tuotteen lisäksi yhtiöllä on mahdollisuuksia useisiin lisäarvoa antaviin sivutuotteisiin. Tuotantolaitos suunnitellaan n. 350 000 tonnin malmin syöttökapasiteetille ja malmia olisi tarkoitus saada louhittua vuodessa n. 250 000–300 000 tonnia. Päätuotetta olisi tarkoitus saada tuotettua vuodessa 6000 tonnia. (Sirén 2015, 45.)

Kokonaisinvestointien on arvioitu nousevan 80–100 miljoonaan euroon, ja yhtiön liikevaihdon arvioidaan olevan tuotannonkäynnistyttyä täydessä kapasiteetissa ollessaan n. 50–60 miljoonaa euroa vuodessa. Yhtiöstä tulisi merkittävä työllistäjä Kaustisen ja Ullavan alueella, ja sen on arvioitu antavan 80–90 vaki-

tuista työpaikkaa, joiden lisäksi syntyy välillisesti muiden alojen työpaikkoja. Uusimman tulevaisuusarvion mukaan tuotannon käynnistyminen on mahdollista aikaisintaan vuonna 2017. Tuotanto päästään aloittamaan, kun tutkimukset on saatu valmiiksi ja tarvittava rahoitus on saatu koottua kasaan. Näiden asioiden lisäksi kaikki tarvittavat luvat on saatava hankittua suunnitellun aikataulun mukaisesti. (Sirén 2015, 45.)

3 LOUHITUN MALMIN HIENONTAMINEN

Koska louhittua malmia voidaan rikastaa tai käyttää sellaisenaan erittäin harvoin, joudutaan louhitun malmin kokoa pienentämään. Malmin pienennetään murskaamalla. Jos malmi halutaan saada vielä pienempään raekokoon, käytetään murskauksen lisäksi jauhatusta. Tässä luvussa tullaan käsittelemään murskausta ja niissä käytettäviä yleisimpiä laitteita. (Hukki 1964, 104.)

3.1 Murskaus

Murskauksessa louhittu malmi tai muu kivilaji hienonnetaan yhdessä tai useammassa käsittelyvaiheessa tarpeeksi pieneen raekokoon jauhamista varten. Materiaalin hienontaminen murskaamalla perustuu puristukseen tai iskuun. Kun kappaleeseen vaikuttava jännitysenergia kasvaa suuremmaksi kuin aukeavan mikrorakon energia, Griffithin murtumisteorian mukaan kappale särkyä. (Mäkinen 2014.) Tämä teoria pätee myös erilaisia malmeja murskattaessa. Murskettava materiaali pyritään saamaan sopivaan raekokoon, jotta se voidaan syöttää jauhatuslaitteisiin. Jauhatukseen kelpuutetaan kaikki n. 10 mm ja sitä pienemmät partikkelit, jos jauhatuksessa käytetään tavanomaisilla jauhinkappaleilla varustettuja myllyjä. (Rahikka 2011, 11.)

Materiaalia murskattaessa saadaan kasvatettua sen pinta-alaa. Murskaus suoritetaan yleensä yhdessä, kahdessa tai kolmessa perättäisessä käsittelyvaiheessa. Murskausvaiheiden lukumäärä määräytyy syötteen koostumuksen, koon ja halutun raekoon perusteella. Mitä pienempään raekokoon materiaali halutaan, sitä enemmän välivaiheita murskauksessa tarvitaan. Murskaus voidaan luokitella karkeamurskaukseen, välimurskaukseen ja hienomurskaukseen. Esimerkiksi, kun halkaisijaltaan 1 metrin kokoinen kappale halutaan hienontaa n. 10 mm:n

kokoisiksi kappaleiksi, suoritetaan kaikki edellä mainitut välivaiheet. Karkeamurskauksessa partikkeli pienennetään n. 25 cm:n kokoisiksi kappaleiksi, jonka jälkeen tehtävässä välimurskauksessa saaduista kappaleista murskataan n. 5 cm:n kokoisia kappaleita. Lopuksi saadut partikkelit murskataan hienomurskauksessa 10 mm:n kokoisiksi. (Hukki 1964, 104–105.)

Eri tyyppisille murskaimille pystytään määrittämään ns. murskaussuhde. Leuka-, kartio-, ja karamurskaimilla murskaussuhde tarkoittaa kita-aukon ja avoimen asetusarvon välistä suhdetta. Valssimurskaimelle murskaussuhde on suurimman murskattavan raekoon suhde asetusarvoon ja iskumurskaimella syötteen suurimman raekoon suhdetta saadun tuotteen raekokoon. (Rahikka 2011, 12.)

3.2 Murskaimet

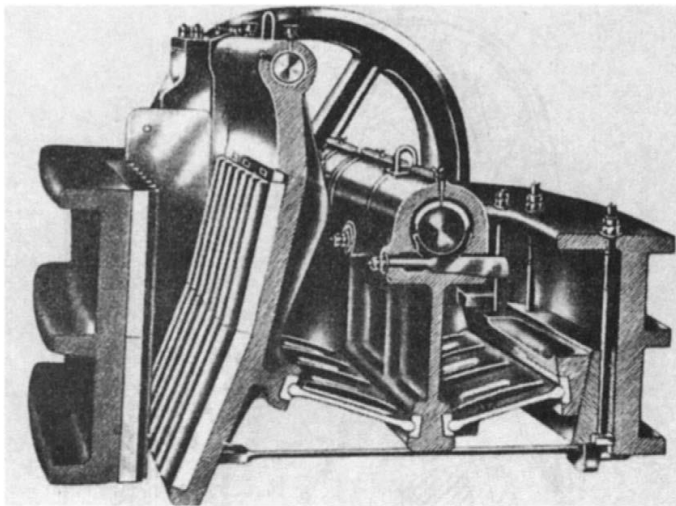
Murskaimet voidaan jaotella niiden rakenteen perusteella neljään pääluokkaan seuraavasti: leukamurskaimet, kara- ja kartiomurskaimet, Valssimurskaimet ja iskumurskaimet. Jotkut murskaimet soveltuvat paremmin karkeamurskaukseen ja toisia käytetään enemmän hienomurskauksessa, mutta joitakin murskaimia voidaan soveltaa käytettäväksi kumpaankin tarkoitukseen. (Hukki 1964, 105.)

3.2.1 Leukamurskain

Ensimmäisen leukamurskaimen keksi Eli Whitney Blake Yhdysvalloissa vuonna 1858. Nykyäänkin käytössä olevista leukamurskaimista ns. Blake-tyyppinen leukamurskain on edelleen yleisin. Vaikka murskaimen koko ja ulkonäkö ovatkin muuttuneet ajan myötä, on murskaimen toimintaperiaate pysynyt samana. Suurimmat erot alkuperäisen ja nykyaikaisen leukamurskaimen välillä ilmenevätkin

kone-elinten muotoilussa ja sijoituksessa, laakereissa ja rakennemateriaaleissa. (Hukki 1964, 105–106.)

Leukamurskain koostuu kahdesta leuasta, joista toinen on kiinteä. Leuat on asetettu terävään kulmaan toisiinsa nähden ja toinen leuoista on saranoitu, jotta se voi liikkua kohti kiinteää leukaa. Murskettava materiaali syötetään leukojen väliin niin sanottuun syöttökammioon. Murskaantuminen tapahtuu, kun saranoitu leuka liikkuu ja hakkaa murskattavaa materiaalia kiinteää leukaa vasten. Leukamurskaimen molemmat leuat on päällystetty leukalevyillä, jotka tavallisesti valmistetaan kovamagnaaniteräksestä. Nämä levyt on tavallisesti hammastetut pituussuunnassa. Murskaantunut tuote poistuu leukojen välissä olevasta kita-aukon alareunasta. (Wills & Napier-Munn 2006, 120; Rahikka 2011, 12.)



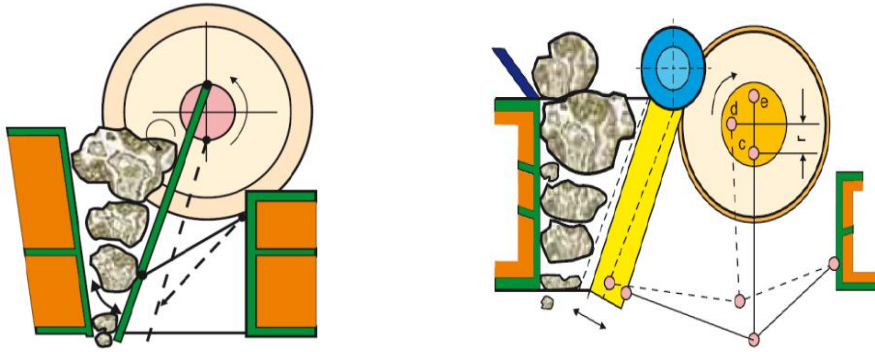
KUVIO 1. Poikkileikkaus leukamurskaimesta (mukaillen Wills & Napier-Munn 2006, 121.)

Leukamurskaimen tarkoituksena onkin saada aikaiseksi materiaalia, joka voidaan kuljettaa seuraavaan murskausvaiheeseen. Luotettavuutensa ja lujan rakenteensa takia leukamurskaimia käytetään yleensä erityisesti esimurskauksessa. (Metso Minerals 2008.)

Leukamurskaimen oleellisimpia tekijöitä ovat kita-aukko ja asetusarvo. Kita-aukon suuruus määrittää sen, kuinka suuria kappaleita leukamurskaimeen voidaan syöttää murskattavaksi. Kita-aukon ilmaisemiseksi voidaan käyttää tuloa $A \cdot B$, jossa A on akselin suuntainen kita-aukon pituus ja B on kiinteän leuan etäisyys liikkuvasta leuasta kita-aukon yläreunasta mitattuna. Asetusarvo ilmoittaa liikkuvan leuan ja kiinteän leuan pienimmän mahdollisen etäisyyden toisistaan kita-aukon alareunasta mitattuna. Asetusarvo määrää suurimman mahdollisen raekoon, jota leukamurskaimesta voidaan saada tuotteena ulos. (Rahikka 2011, 12.)

3.2.2 Kita- ja kiertomurskain

Leukamurskaimien perustyyppit ovat kitamurskain ja kiertomurskain. Kitamurskaimessa epäkeskoakseli on asennettu murskaimen yläpuolelle. Akselin pyöriminen aiheuttaa toisen leuan liikkumisen ja materiaalin puristumisen kiinteää leukaa vasten. Kiertomurskaimessa on tavallisesti kaksi akselia, joista toinen on epäkeskoakseli, ja liikkuvassa leuassa kaksi työnninlaattaa. Ensimmäinen akseli on kääntyvä, joka sijaitsee murskaimen yläpuolella. Epäkeskoakseli ohjaa molempia työnninlaattoja ja liikkuva leuka tekee puhdasta edestakaista liikettä kiinteää leukaa vasten. Samankokoisia kita- ja kiertomurskaimia toisiinsa verrattaessa voidaan todeta, että kitamurskaimessa on parempi kapasiteetti. Tämä johtuu liikkuvan leuan liikkeestä, joka vaikuttaa materiaalisyyttöön ja tuotteen ulostuloon. (Metso Minerals 2008.)



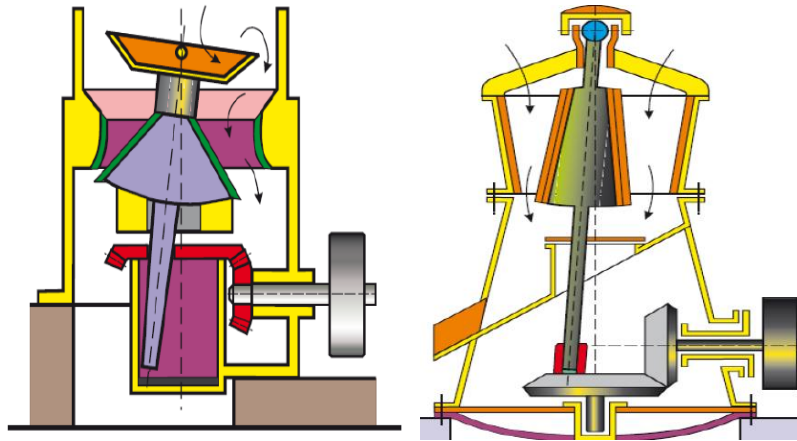
KUVIO 2. Kita- ja kiertomurskaimet (mukaillen Metso Minerals 2008.)

3.2.3 Kara- ja kartiomurskain

Kartiomurskaimessa toiminta perustuu puristukseen ja iskuun, ja sitä käytetään yleensä silloin, kun murskattavan materiaalin määrä on suuri. Kartiomurskainta käytetään usein leukamurskaimen jälkeen väli- ja hienomurskauksessa. (Rahikka 2011, 13.)

Kartiomurskain koostuu murskausmaljasta, murskauskartiosta ja koneistosta, joka pyörittää kartiota. Murskauskartio on kiinnitetty pystysuoraan akseliin ja se riippuu yläpäästään kannatuselimen varassa. Akselin alapää on kiinnitetty epäkeskeisesti murskaimen käyttömekanismiin. Murskattavan materiaalin syöttö tapahtuu kartion yläpäältä kartion ja murskausmaljan väliseen tilaan. Kun kartiota pyöritetään, hankautuu murskattava materiaali murskausmaljan ja -kartion välissä hienommaksi. (Rahikka 2011, 13.)

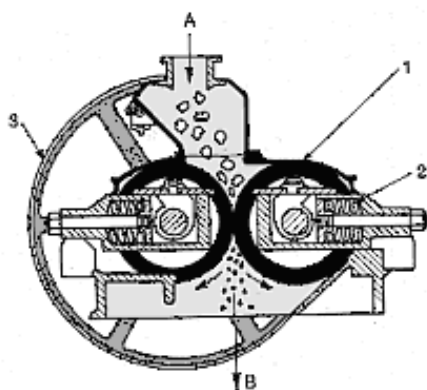
Karamurskaimen rakenne ja toimintaperiaate on lähes samanlainen kuin kartiomurskaimella. Ainoa ero niiden murskaimien välillä on niiden rakenteessa. Kun kartiomurskaimessa murskauskartio on laakeroitu vain sen alapäästä, on karamurskauksessa murskauskartio laakeroitu sekä ylhäältä että alhaalta. (Rahikka 2011, 13–14.)



KUVIO 3. Kartio- ja karamurskaimet (mukaillen Metso Minerals 2008.)

3.2.4 Valssimurskain

Valssimurskain koostuu kahdesta vaakasuorien akseleiden varassa olevasta sylinteristä, jotka on päällystetty tavallisesti mangaaniteräsvaipoilla. Murskattava materiaali syötetään sylinterien väliin ja murskaantuminen tapahtuu, kun sylinterit pyörivät vastakkaisiin suuntiin. Valssien välistä etäisyyttä eli niiden välisen raon suuruutta voidaan muuttaa halutunlaiseksi ja tuo raon suuruus määrää saadun tuotteen raekoon. (Rahikka 2011, 14.)

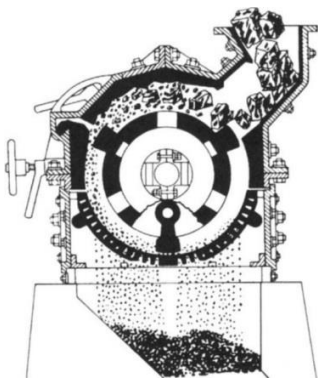


KUVIO 4. Valssimurskain A = syöte, B = murskattu materiaali, 1 = Valssit, 2 = Jousi, 3 = Vautipyörä ja käyttömekanismi (mukaillen Rahikka 2011, 14)

Valssimurskainta käytetään erityisesti silloin, kun murskauksessa syntyvän hienoaineksen määrän halutaan olevan mahdollisimman pieni. Syntyvän hienoaineksen määrä valssimurskaimella on pieni, koska murskattavat partikkelit eivät ole juurikaan kosketuksissa toistensa kanssa. Valssimurskaimen keskikohta kuluu erittäin nopeasti kovia partikkeleita murskattaessa, joten sitä käytetäänkin yleensä varsin pehmeiden materiaalien murskaamiseen. Rajallisen kapasiteetin takia valssimurskaimista voi tulla varsin kookkaita. (Mäkinen 2012, 39.)

3.2.5 Iskumurskain

Iskumurskaimessa murskaus perustuu nimensä mukaisesti iskuihin eikä puristukseen, kuten murskauksessa yleensä. Iskumurskaimet soveltuvat erinomaisesti pehmeiden tai mineraalipinnoiltaan helposti lohkeavien materiaalien hienontamiseen. Iskumurskain koostuu vasaroista ja roottorista, jossa vasarat ovat kiinni. Kun roottori pyörii, synnyttävät vasarat nopeita toisiaan seuraavia iskuja. Murskaimen yläpäästä syötetty materiaali murskaantuu vasaroiden iskusta seuralapohjaa vasten, josta tarpeeksi pienet partikkelit putoavat läpi. Iskumurskaimilla hienonnussuhde on erittäin suuri. Saadun tuotteen hienousaste on riippuvainen hienonnettavan materiaalin lisäksi vasaroiden pyörimisnopeudesta ja vasaroiden ja vuorauslevyjen välisestä asetuksesta. (Rahikka 2011, 15.)



KUVIO 5. Iskumurskain (mukaiillen Wills & Napier-Munn 2006, 142)

3.3 Murskautuvuus

Materiaalin murskaaminen perustuu puristukseen iskuihin, leikkaukseen, hankaukseen, sekä kappaleiden yhteentörmäyksiin. Materiaalin murskautuvuuteen vaikuttavat sen jäykkyys, kovuus, sitkeys, hauraus ja lujuus. Jäykkyydellä tarkoitetaan materiaalin muodonmuutosvastusta. Kovuudella puolestaan tarkoitetaan sitä, kuinka materiaalin pinta vastustaa muodonmuutosta ja sitkeydellä kuvataan materiaalin murtumisvastusta. Sitkeys kuvastaa materiaalin murtumisvastusta, ja hauraudella tarkoitetaan kappaleen sitkeyden ja kovuuden suhdetta. Lujuudella tarkoitetaan kappaleen kestäväää suurinta jännitystä ennen kuin se alkaa murtua. (Heiskanen 2011.)

Suurin osa mineraaleista on rakenteeltaan kiteisiä, joissa atomit ovat järjestyneet kolmiulotteeseen hilaan. Jotta hilassa olevien atomien väliset sidokset saataisiin särjettyä helposti, pitää materiaali saattaa vetojännityksen alaiseksi esimerkiksi puristamalla. Koska kiviaines sisältää erilaisia mineraaleja erikokoisina rakeina, jännitys ei ole jakautunut tasaisesti kiviaineksen sisällä. Jännityshuiput syntyvät hilavirheisiin ja halkeamiin. Kappaleessa olevaa halkeamaa saadaan kasvatettua, kun siihen kohdistettavaa jännitystä kasvatetaan tarpeeksi. Kun kappaletta kuormitetaan tarpeeksi, kasvaa kappaleessa oleva halkeama ja kappaleeseen kohdistuva jännitys. Halkeama etenee erittäin nopeasti koko kappaleen lävitse. (Mäkinen 2013.)

Kun epäsäännöllinen partikkeli murskataan puristamalla, saadaan aikaiseksi kahta eri kokoluokkaa olevia partikkeleita. Karkeammat partikkelit muodostuvat, kun puristuksesta aiheutuva vetojännitys halkaisee kappaleen. Hienommat partikkelit muodostuvat kuormituspisteiden lähellä tapahtuvan puristusjännityksen aikaansaannoksena. Jos hienoimpien partikkeleiden syntymistä halutaan vähentää, voidaan murskauksessa käytettävää kosketuspinta-alaa pienentää esimerkiksi poimutetuilla murskauslevyillä. (Mäkinen 2013.)

Iskemällä tapahtuvassa murskauksessa partikkelin keskimääräistä jännitystasoa saadaan kasvatettua nopean kuormituksen seurauksena suuremmaksi kuin partikkelin särkyminen tarvitsisi. Tässä tapauksessa vetojännitys särkee kappaleen hyvin nopeasti, jolloin saadaan muodostettua partikkeleita, jotka ovat lähes samanmuotoisia ja -kokoisia. (Mäkinen 2013.)

Kappaleiden kuluttaminen tuottaa runsaasti pieniä partikkeleita, mikä ei ole aina toivottavaa. Kulumista tapahtuu erityisesti partikkelien välisissä kontakteissa silloin, kun murskaimeen syötetään tavaraa liian nopeasti. Tällöin partikkelit jäävät kosketuksiin toistensa kanssa ja hioutuvat toisiaan vasten. (Mäkinen 2013.)

Kun kappaleita hienonnetaan mekaanisesti, tapahtuu aina vähintään kahden materiaalin välinen vuorovaikutus. Tämän vuorovaikutuksen seurauksena rakenteeltaan vahvempi kappale murskaa hiekomman. Materiaalien kovuuksista on tehty erilaisia taulukoita, joissa ne on laitettu järjestykseen sen mukaan, mitä materiaalia ne pystyvät hajottamaan (esimerkiksi Mohsin asteikko). (Mäkinen 2013.)

4 SEULONTA

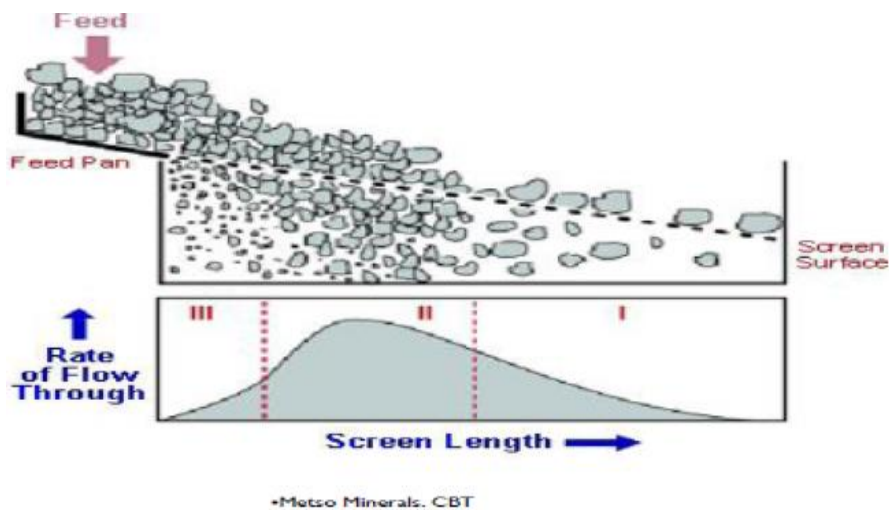
Seulonnassa on tarkoituksena erottaa murskatusta materiaalista haluttu tai halutut raekoot mekaanisesti, jolloin pystytään säännöstelemään tuotteen karkeutta. Seulontaolosuhteista riippuen seulonta voidaan suorittaa joko märkäseulontana tai kuivaseulontana. Kuivaseulontaa käytetään tavallisesti silloin, kun haluttu raekoko on noin 5 mm. Märkäseulonnan käyttö voidaan ulottaa 250–100 µm:n alueelle ja oikein suotuisissa olosuhteissa jopa 40 µm:iin asti. Kuivaseulonnassa seula ei saa olla ylikuormitettu. Tämä tarkoittaa sitä, ettei seulapinnalle saa syöttää materiaalia, josta alle puolet kykenee läpäisemään seulapinnan. Kuivaseulonnassa on erittäin tärkeää, ettei seulottavan materiaalin kosteuspitoisuus nouse liian suureksi. Kosteuspitoisuuden kasvaessa vaikeutuu materiaalin seulominen ja seulonnan terävyys heikkenee. (Mäkinen 2011, 61; Rahikka 2011, 39.)

Seulonnan terävyys määritetään saantia edustavana lukuna, joka osoittaa seulomalla erotetun kuivan hienoaineksen massan suhdetta verrattaessa seulottavaan näytteeseen sisältyvän kuivan hienoaineksen massa. (Hukki 1964, 127.)

Seulan pinnalle syötettävää materiaalia kutsutaan syötteeksi. Seulonnan aikana syöte jakaantuu ylitteeksi ja alitteeksi. Ylitteellä tarkoitetaan materiaalia, jonka raekoko on liian suurta seulapinnan läpäisemiseksi. Alitteella tarkoitetaan materiaalia, joka on kyennyt läpäisemään seulapinnan. Haluttu tuote voi olla joko ylite tai alite. Jos haluttu tuote on alite, kuljetetaan saatu ylite takaisin hienonnettavaksi, jotta se saataisiin haluttuun raekokoon. (Rahikka 2011, 39–40.)

Materiaalin seuloutuminen seulapinnalla voidaan jaotella kolmeen eri vyöhykkeeseen. Syöttöpisteen jälkeen olevalla kolmannella vyöhykkeellä eli järjestäy-

tymisvyöhykkeellä tapahtuu suurin osa materiaalin kerrostumisesta. Tällöin pienimmät partikkelit vajoavat alimmaisiksi hyvinkin nopeasti ja suurimmat jäävät pinnalle. Seulan läpäisevän materiaalin virtaus kasvaa syöttöpisteestä eteenpäin mentäessä. Toisella vyöhykkeellä eli kylläisen seulonnan vyöhykkeellä valitsee tasapaino, jolloin materiaalin yläkerroksista tulee seulan pinnalle saman verran materiaalia, kuin seula kykenee läpäisemään. Ensimmäiselle vyöhykkeelle eli todennäköisyysseulonnan vyöhykkeelle mentäessä seulapinnan läpäisevän materiaalin määrä vähentyy huomattavasti ja lopulta loppuu kokonaan. (Rahikka 2011, 39–40; Metso Minerals 2008.)



KUVIO 6. Seulontavyöhykkeet (mukaillen Metso Minerals 2008.)

Jotta seulominen onnistuisi mahdollisimman hyvin, on seulottavalle materiaalille oltava tarjolla mahdollisimman paljon seula-aukkoja aikayksikössä. Tämä tarkoittaa, että avoimen seulapinnan tulee olla suuri ja seulottavan materiaalin ja seulapinnan välisen nopeuden tulee myös olla suuri. Seulonnan onnistumisen kannalta on tärkeää, että jokainen hiukkanen saadaan suunnattua seula-aukkoja kohden oikein. Tällöin ehkäistään hiukkasen juuttuminen seula-aukkoon, jolloin seula-aukot pysyvät vapaina. Seulavoimia on voitava kasvattaa riittävästi, jotta hiukkaset läpäisisivät seulan nopeammin. Tällöin materiaalikerrokset pysyvät liikkeessä, eikä seulalle muodostu tukkeumia. Materiaalia seulottaessa on erittäin tärkeää, ettei materiaali vaurioidu seulonnan aikana. Lisäksi

seulonta-ajan tulisi olla mahdollisimman lyhyt, jolloin saadaan säästettyä prosessiin kuluvaan aikaan ja säästettyä energiakustannuksissa. (Rahikka 2011, 41.)

4.1 Täry- ja rumpuseulat

Seulat voidaan ryhmitellä kuiva- tai märkäseuloihin, jotka voidaan jaotella edelleen materiaalin kulun ja seulapinnan liikkeen mukaan. Materiaalin kulun mukaan yleisimpiä seulatyyppisiä ovat erilaiset täryseulat ja rumpuseulat.

Täryseulat ovat kaikista seulatyypeistä tärkeimpiä ja käyttöominaisuuksiltaan monipuolisimpia kaivosalan teollisuudessa. Täryseuloissa materiaali seuloutuu painovoiman ja värinän vaikutuksesta, ja myös seulapinnan rakenneosat ja niiden liike vaikuttavat seuloutumiseen. Täryseulojen menestys on aiheuttanut sen, että monet muut vanhemmat seulatyyppit ovat jääneet pois käytöstä kaivosteollisuudesta. Täryseuloissa on suorakulmanmuotoinen seulontapinta, jonka päälle seulottava materiaali syötetään. Täryseuloilla voidaan seuloa raekokoja 300 millimetristä aina 45 mikrometriin asti. Useimpia täryseulatyyppejä valmistetaan useammalla kuin yhdellä seulontapinnalla, jolloin materiaali saadaan seulottua karkeaan, keskikarkeaan ja hienoon raekokoluokkaan. (Wills & Napier-Munn 2006, 197.)

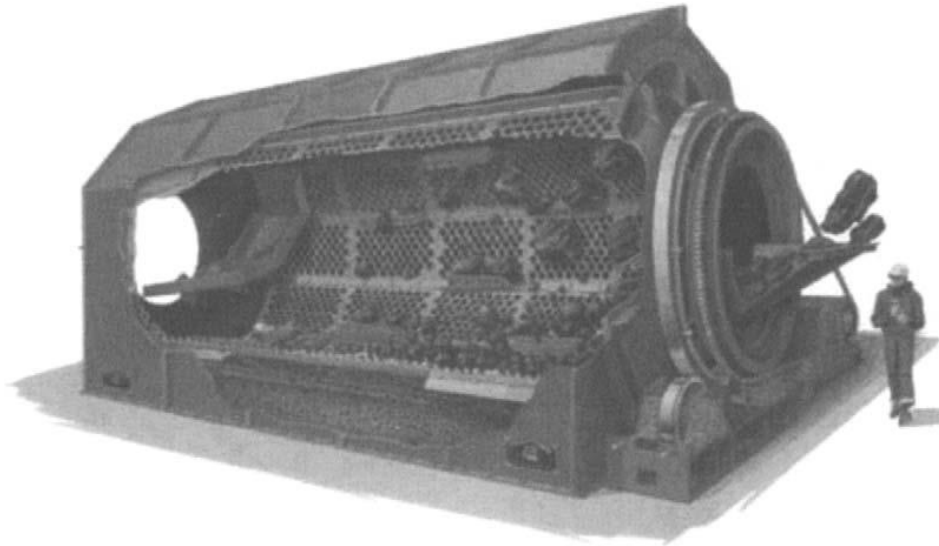


KUVIO 7. Märkäseulontaa täryseulalla (mukaillen Mäkinen 2012, 61)

Epäkeskotäryseuloissa on nimensä mukaisesti epäkeskomekanismi ja ne soveltuvat ominaisuuksiltaan parhaiten keskikarheaan kuivaseulontaan. Nämä seulat voivat värähdellä välillä 900–1500 kertaa minuutissa. Täryseulat ovat lievästi kaltevia, jolloin materiaali liikkuu eteenpäin seulapinnalla, eikä pompi paikoiltaan. Tärinän vaikutusta voidaan tehostaa seulapinnan alle laitettavilla kumipalloilla, jotka kimpoilevat seulapinnan ja pohjan välillä. (Mäkinen 2012, 84.)

Vapaavärähteisissä täryseuloissa seulakori on asennettu runkoon jousien tai kumikiinnittimien avulla. Tämä mahdollistaa sen, että seulakori voi liikkua tiettyyn rajaan asti vapaasti kannattimien varassa. Muuten vapaavärähteiset täryseulat ovat lähes samanlaisia rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan kuin epäkeskotäryseulat. Seulapinnan alle voi olla asennettuna ohuempi verkko, jonka päälle on laitettu kumipalloja. Kumipallot auttavat pomppiessaan pitämään seulapintaa puhtaana. (Mäkinen 2012, 91.)

Rumpuseulat ovat yksi vanhimmista seulatyypeistä. Rumpuseula asennetaan yleensä hieman vinoon kulmaan vaakasuoraan nähden tai sen sisälle on asennettu hämmentäjiä, jotta materiaali kulkisi sylinteriä pitkin eteenpäin. Rumpuseulaan voidaan asentaa erikokoisia seuloja sarjaan pienimmästä suurimpaan, jolloin hienoimmat raekoot seuloontuvat rummun ulkoreunalle ja karheimmat jäävät sisemmälle rumpua. Rumpuseuloilla pystytään seulomaan materiaalia aina 55 mm:stä aina 6 mm:n saakka, ja märissä olosuhteissa voidaan saada seulottua pienempiäkin raekokoja. Rumpuseulat ovat täryseuloihin verrattuna halvempia ja tukevampia rakenteeltaan eikä niissä ole tärinäliikettä. Niissä on kuitenkin pienempi kapasiteetti täryseuloihin verrattuna. (Wills & Napier-Munn 2006.)



KUVIO 8. Poikkileikkauskuva rumpuseulasta (mukaillen Wills & Napier-Munn 2006, 203.)

4.2 Seula-analyysi

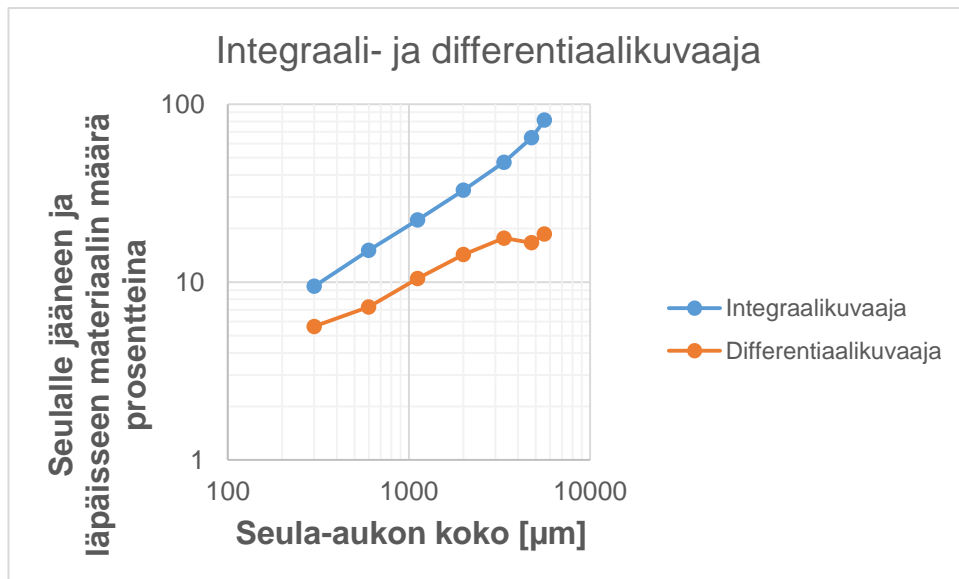
Seula-analyysin tarkoituksena on saada määritettyä materiaalin raekokoja-kauma seulasarjaa apuna käyttäen. Seulasarja koostuu useasta seulontaverkosta, jotka on asetettu päällekkäin. Seulat asetellaan päällekkäin suuruusjärjestyksessä siten, että suurimman seula-aukon omaava seula asetetaan päällimmäiseksi. Seulottava näyte asetetaan päällimmäiselle seulalle. Seula-analyysissä käytettävä näytteen määrä riippuu seulottavan materiaalin karkeudesta. Jos ei ole varmuutta, kuinka paljon materiaalia seula-analyysissä tulisi käyttää, kannattaa noudattaa seuraavaa nyrkkisääntöä. Tämän nyrkkisäännön mukaan seulottavan materiaalin määrä on seulottavan materiaalin suurimaan rakeen koko kerrottuna sadalla. Esimerkiksi, jos suurimman rakeen koko on 4 mm, tulisi seula-analyysissä käytettävän materiaalin massa olla 400 g. (Mäkinen 2012, 77.)



KUVIO 9. Kuva seulasarjasta (Kuva: Timo Hietalahti 2015.)

Seula-analyysi on tärkeä menetelmä, kun halutaan ohjata tai tutkia materiaalin murskausta tai jauhatusta. Seula-analyysin avulla voidaan tutkia, kuinka mineraalit ja metallit jakaantuvat eri raekokoluokkien kesken jauhetussa malmissa. Tämän lisäksi seula-analyysin avulla pystytään tutkimaan eri mineraalien keskinäistä murskautuvuutta ja jauhautuvuutta. (Rahikka 2011, 45.)

Seula-analyysistä saatuja tuloksia tarkastellaan joko integraali- tai differentiaali-kuvaajan avulla. Kuvaajissa käytetään logaritmista asteikkoa, koska kokoerot suurimpien ja pienimpien seulojen välillä voivat olla erittäin suuret. Saatujen kuvaajien avulla voidaan tutkia eri murskaus- ja jauhatuslaitteilla saatujen tuotteiden laatua ja koneiden hienonnus suhteita. Kuvaajia voidaan käyttää apuna myös seulasarjaa kalibroitaessa ja murskeiden ja jauheiden pinta-aloja arvioitaessa. Kuvaajia voidaan käyttää apuna kaikkein pienimmän seulan läpäisseen materiaalin raekoon jakaumaa. (Mäkinen 2012, 77.)



KUVIO 10. Integraali- ja differentiaalkuvaajat (Kuva: Timo Hietalahti 2015)

5 LITIUM

Litium on jaksollisen järjestelmän kolmas alkuaine ja samalla ensimmäinen metalli. Sen kemiallinen merkki on Li ja englanninkielinen nimi lithium. Litium on väriltään hopeisen vaalean harmaa, mutta hapen ja kosteuden vaikutuksesta se muuttuu keltaiseksi. Litium on niin pehmeää metallia, että sitä pystytään leikkaamaan veitsellä (Wordpress 2014). Veden tai kostean ilman kanssa reagoiessa litium muodostaa vetyä ja litiumhydroksidia (Keliber 2013). Litium sulaa varsin alhaisessa lämpötilassa, $180,5\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa, ja kiehuminen tapahtuu $1347\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sen massa on 6,941 atomimassayksikköä ja tiheys $0,543\text{ g/cm}^3$ eli se kelluu veden pinnalla. Litium kuuluu alkalimetalleihin, jotka ovat erittäin reaktio- ja paloherkkiä metalleja. Tämän takia puhdasta litiumia tulee säilyttää erillään voimakkaista hapettimista ja hapoista esimerkiksi mineraaliöljyssä. (Kemikaalikortit 1999.)



KUVIO 11. Hapettunutta litiummetallia (mukaillen Wordpress 2014)

Litiummetallin ja tarkemmin litiumoksidin löysi ensimmäisen kerran ruotsalainen kemisti Johan August Arfwedson vuonna 1817. Ensimmäisen kerran puhdasta alkuainelitiumia saatiin eristettyä vasta vuonna 1855. Kaupallisen merkityksen litium sai vuonna 1920, jolloin sen teollinen valmistaminen alkoi. Metallisen litiumin valmistaminen tapahtuu elektrolyytisesti, mutta sillä ei ole juurikaan merkittäviä käyttökohteita, joten kauppaa käydään tavallisesti litiumkarbonaatilla (Li_2CO_3). (Keliber 2013.)

5.1 Litium luonnossa

Litium on vain muutamissa paikoissa maailmassa rikastunut niin, että se on taloudellisesti hyödynnettävissä. Litium esiintyy luonnossa ainoastaan yhdisteinä esimerkiksi kivimineraaleissa, joista merkittävimmät litiummineraalit ovat spodumeeni, lepidoliitti ja petaliitti. Spodumeenimineraalia esiintyy Kanadassa Suomessa, Venäjällä, Kiinassa ja Australiassa. Lepidoliittia löytyy Portugalista ja petaliittia Zimbabwesta. Litiumia esiintyy myös Yhdysvalloissa, Chilessä ja Argentiinassa sijaitsevilla suolajärvissä. Suomessa Kaustisen, Ullavan ja Kruunupyyn alueella sijaitseva esiintymä on erittäin merkittävä maailman laajuisesti. (Sirén 2012, 5.)

5.2 Litiumspodumeeni

Spodumeeni on pyrokseeniryhmään kuuluva mineraali. Sen kemiallinen kaava on $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, josta voidaan lukea, että spodumeenimineraali koostuu litiumista, alumiinista, piistä ja hapestä. Spodumeeni esiintyy litteinä prismoina ja se on pystysuunnassa usein viirukkeinen. Spodumeenimineraali voi olla väritykseltään harmaanvalkea, kellertävä, vihertävä tai punertava. Spodumeenia käytetään keramiikka- ja lasiteollisuuden raaka-aineina ja litiumsuolojen valmistuksessa. Vihreän tai violetin värisiä läpinäkyviä muunnoksia voidaan käyttää jalokivinä esimerkiksi koruissa. (Grönholm, Alviola, Kinnunen, Kojonen, Kärkkäinen & Mäkitie 2006, 30.)

Spodumeenin kovuus vaihtelee moshin asteikolla mitattuna välillä 6,5 ja 7,5, ja sillä on yhteensä kolme lohkosuuntaa, joista yksi on täydellinen ja kaksi muuta ovat heikkoja. Täydellisessä lohkosuunnassa mineraali särkyy muodostaen jopa täysin sileitä pintoja. Mineraalin haljetessa heikkoja lohkosuuntia pitkin muodostuvat pinnat ovat rosoisempia. Spodumeenilla on lasinen kiilto, joka tarkoittaa sitä, että se heijastaa valoa lasin tavoin. Spodumeenia esiintyy graniittipegmatii-

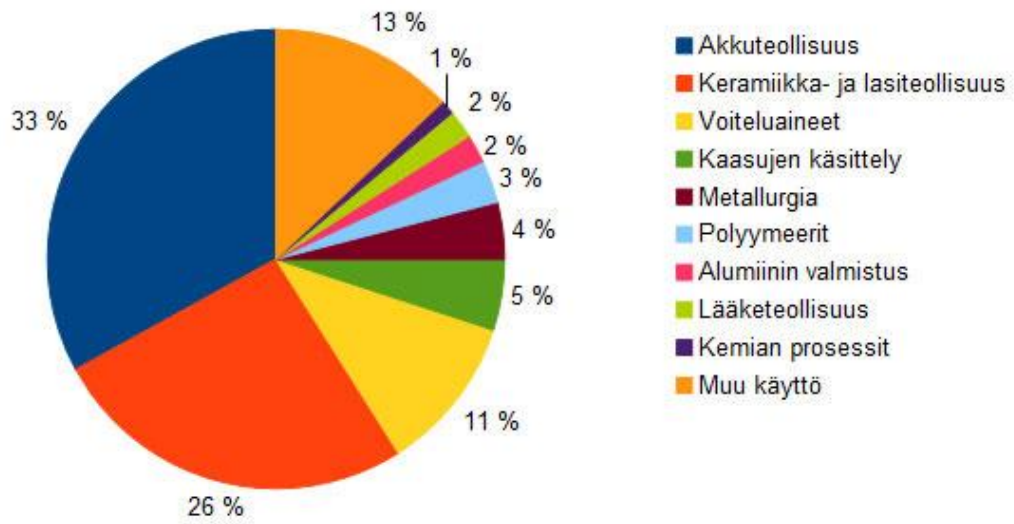
teissa kiteinä, joiden pituus voi vaihdella senttimetreistä metreihin. Spodumeenipitoisia graniittipegmatiitteja on löydetty Suomesta jo yli 30 juonta, joista tärkeimmät löytyvät Kruunupyyn, Ullavan ja Kaustisen alueilta. (Grönholm ym. 2006, 30.)

5.3 Litiumin käyttökohteet

Litiummetallien ja kemikaalien suurimmat käyttökohteet ovat akkuteollisuudessa ja keramiikka- ja lasiteollisuudessa. Muita merkittäviä litiuminkäyttökohteita ovat voiteluaineet ja lääketeollisuus. Muita pienempiä käyttökohteita ovat polymeerien ja alumiinin valmistus sekä kemialliset prosessit. Litiumkarbonaattia tarvitaan erityisesti akkujen ja paristojen sekä erikoislasien valmistuksessa. (Keliber 2013.)

Koska litium on erittäin kevyt metalli, sitä käytetään kevyissä ja kovissa metalliseoksissa. Varsinkin lentokoneiden valmistuksessa litiumia käytetään, jotta koneen massaa saadaan pienennettyä. Tämän seurauksena polttoaineenkulutusta saadaan pienennettyä. Metalliseosten lisäksi metallista litiumia käytetään lämmönsiirtimissä hyvän lämpökapasiteettinsa takia, joka on kaikista kiinteistä alkuaineista korkein. (Wordpress 2014.)

Litiumin kulutus on kasvanut tasaisesti n. 5,6 % vuodessa vuosien 2000–2011 välisenä aikana ja USGS:n arvion mukaan sen käyttö tulee kasvamaan vuosina 2011–2020 n. 9,5 % vuosittain. Suurin osa litiumin kulutuksen kasvusta johtuu tulevaisuudessa litiumakkuteollisuuden kehittymisestä. Vuosien 2000 ja 2011 välisenä aikana litiumin käyttö akkuteollisuudessa kasvoi keskimäärin 19 % vuosittain. On arvioitu, että litiumakkujen maailmanmarkkinat saattavat kasvaa jopa yli 50 miljardiin dollariin (US). Yksi merkittävimmistä tekijöistä litiumakkuteollisuuden kasvuille on sähköautojen kehittyminen ja yleistymisen. (Keliber 2013.)



KUVIO 12. Litiumin käyttökohteet USGS 2011 (SQM:n arvio) (mukaillen Keliber 2013)

6 KOKEELLINEN OSUUS

Opinnäytetyön kokeellisessa osuudessa tehtiin Keliber Oy:n tilaamia murskauskokeita leukamurskaimella. Kokeellinen osuus koostui Keliber Oy:n toimittamasta spodumeenikiven murskauksesta ja saadun murskeen seulomisesta ja punnituksesta. Laboratoriotyöt suoritettiin Centria-ammattikorkeakoulun tiloissa Kokkolassa. Murskaukset suoritettiin ammattikorkeakoulun murskaamossa ja seulonnat ja punnitukset prosessilaboratoriossa. Kokeellisessa osuudessa keskityttiin murskatun materiaalin raekokojen jakautumiseen.

6.1 Työn tavoitteet ja lähtökohdat

Laboratoriotyön tarkoituksena oli tutkia Keliber Oy:n litiumspodumeenin murskautuvuutta leukamurskaimella. Murskaukset tuli suorittaa erisuuruisilla taa-juuksilla ja saatuja tuloksia tuli verrata toisiinsa. Tarkoituksena oli suorittaa kaksi koeajoa. Työstä saaduista tuloksista tuli selvittää, vaikuttaako murskaustaaajuuden muuttaminen syntyvän hienoaineksen määrään. Tutkittavat raekokoalueet ovat alle 0,6 mm, 0,6–6 mm ja yli 6 mm, joista pääpaino tulosten tarkastelussa ja analysoinnissa on alle 0,6 mm:n kokoisessa materiaalissa. Alle 0,6 mm:n raekokoa haluttaisiin syntyvän mahdollisimman vähän ja 0,6–6 mm raekokoa mahdollisimman paljon.



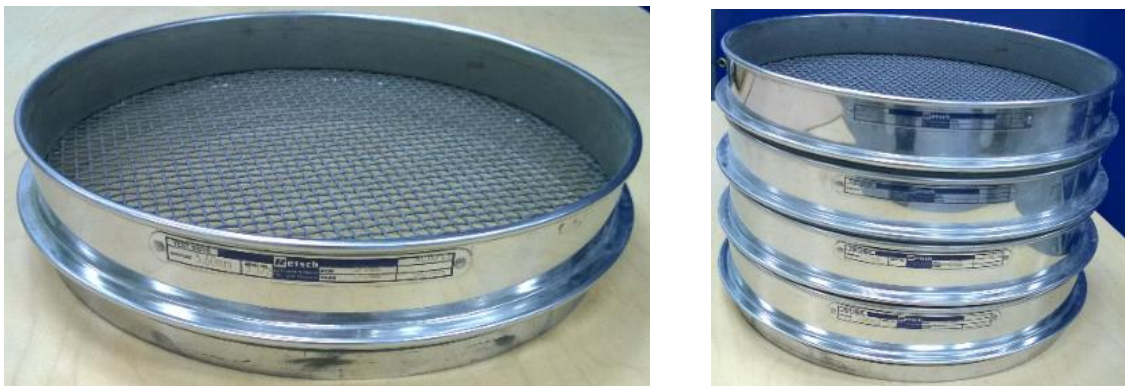
KUVIO 13. Litiumspodumeenia esimurskattuna -20 mm raekokoon (Kuva: Timo Hietalahti 2015)

6.2 Koejärjestelyt ja laitteet

Laboratoriotyö suoritettiin Centria-ammattikorkeakoulun Tekniikan ja liiketalouden yksikössä Kokkolassa prosessilaboratoriossa ja murskaamossa. Murskattava materiaali oli peräisin Ullavan Längän spodumeeniesiintymästä. Keliber Oy toimitti murskauskokeita varten n. 100–150 kiloa esimurskattua kiveä. Kivet oli murskattu asetusarvolla -20 mm ja niiden koot vaihtelivat jonkin verran. Saadusta materiaalista oli tarkoituksena seuloa kaikki -6 mm materiaali pois, mutta sen vähäisyyden takia seulontaa ei tarvinnut suorittaa.

Leukamurskaimena käytettiin ammattikorkeakoulun omaa Retsch-merkkistä leukamurskainta. Leukamurskaimen leukojen väli asetettiin kuuteen millimetriin ja sen suuruus tarkistettiin 6 mm leveällä pahvin palalla, koska leukamurskaimen säätölevy ei ole kovinkaan tarkka. Murskaimeen asennettiin muuntaja, jonka avulla leukamurskaimen taajuutta pystyttiin säätämään halutun suuruiseksi nollan ja 50 hertsin välillä.

Seulomisessa käytettiin ammattikorkeakoulun prosessilaboratorion Retsch-merkkistä seulasarjaa. Seulomista varten valittiin yhteensä seitsemän erikokoista seulapintaa, joiden koot olivat: 5,6 mm, 4,75 mm, 3,35 mm, 2,00 mm, 1,12 mm, 0,6 mm ja 0,3 mm. Näiden seula-pintojen alle asetettiin vielä pohja, johon kaikki alle 0,3 mm kokoinen materiaali varastoitui. Tarkoituksena oli alun perin käyttää vielä 6,0 mm:n kokoista seulaa, mutta kyseistä seulaa ei ole saatavilla tälle seulasarjalle.



KUVIO 14. 5,6 mm seulapohja ja seulapohjia (Kuva: Timo Hietalahti 2015)

6.3 Työn suoritus

Laboratoriotöiden suunnittelu aloitettiin ennen vuoden vaihdetta ja niiden suorittaminen aloitettiin helmikuun ensimmäisellä viikolla. Samalla viikolla työt saatiin tehtyä valmiiksi. Työn suorittaminen aloitettiin punnitsemalla esimurskattua kiveä kahdeksan kolmen kilogramman suuruista määrää omiin astioihin murskauksia varten. Materiaali oli esimurskattu -20 mm:n asetuksella, ja siitä oli tarkoitus seuloa kaikki alle -6mm:n materiaali pois. Koska kyseistä raekokoa oli varsin vähän, oli materiaalista helppo jättää punnituksessa liian pienet partikkelit pois.

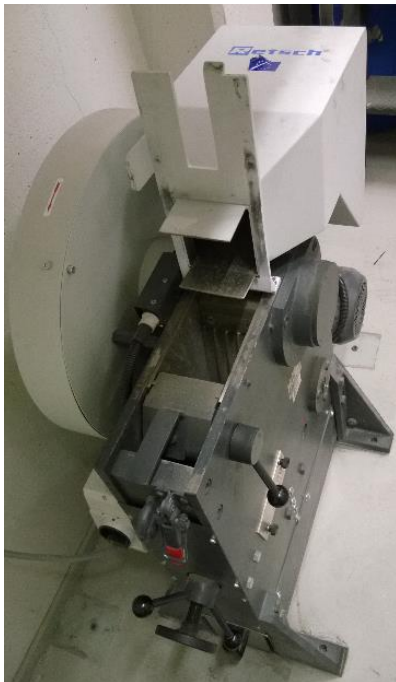
6.3.1 Murskaus

Ennen murskausten aloittamista leukamurskain puhdistettiin paineilmalla kaikesta vanhasta materiaalista. Ensimmäistä ajoa suoritettaessa ei ollut varmuutta, kuinka matalalla taajuudella murskauksia pystyttäisiin suorittamaan, joten suoritettavien murskausten määrä ei ollut aluksi tiedossa. Murskaaminen suoritettiin ammattikorkeakoulun leukamurskaimella, jossa ominaistajuus on 50 hertsiä, mutta taajuutta pystyttiin muuttamaan siihen asennetulla muuntajalla. Murskaimen leukaväli asetettiin 6 millimetriin ja murskaus aloitettiin 50 hertsin taajuudella ja edettiin niin kauan taajuuksissa alaspäin viiden hertsin välein, kuin näytti tarpeelliselta. Jokaisesta murskauksesta otettiin sekuntikellolla aika, jolla ei lähtökohtaisesti ole lopputulostenkannalta merkitystä. Ensimmäisessä murskauksessa murskattava materiaali syötettiin pienissä erissä murskaimen kita-aukkoon. Tämän jälkeen kaikki murskaukset suoritettiin syöttämällä murskattava materiaalimäärä kokonaan murskaimeen, jolloin saatavat tulokset olisivat keskenään paremmin vertailukelpoisia.



KUVIO 15. Kuva leukamurskaimeen asennetusta taajuusmuuntajasta (Kuva: Timo Hietalahti 2015)

Murskain kykeni toimimaan oletettua pienemmillä taajuuksilla, joten murskauksia tuli yhteensä kahdeksan kappaletta ajoa kohti suunnitellun neljän sijaan. Murskauksessa suoritettiin kaksi erillistä ajoa, joten murskauksia suoritettiin yhteensä 16 kappaletta. Jokaisella taajuudella suoritettiin siten kaksi murskausta, joista saatuja tuloksia voidaan verrata toisiinsa. Jos saadut tulokset vastaavat toisiaan, voidaan saatuja tuloksia pitää luotettavina.



KUVIO 16. Murskauksessa käytetty Retsch-merkkinen leukamurskain (Kuva: Timo Hietalahti 2015)

6.3.2 Seulonta ja punnitus

Seulominen suoritettiin ajo ja murskaus kerrallaan. Jotta seulonta onnistuisi paremmin, jaettiin jokainen murskauserä kahteen n. 1,5 kilogramman suuruiseen erään. Pienemmillä määrillä seulottaessa seulat eivät tukkeudu niin helposti ja seulomisaikakin on lyhempi ja raekokojakaumat ovat luotettavampia. Samalla seulottavia erien määrä kaksinkertaistui, eli tässä tapauksessa seulontoja suori-

tettiin yhteensä 32 kappaletta. Seulottaessa seulan taajuudella tai amplitudilla ei ollut merkitystä. Seulonta-aikakin sai olla haluttu, kunhan materiaali seuloutui tarpeeksi hyvin.



KUVIO 17. Seulottava materiaali ensimmäisen ajon murskauksesta 35 hertsin taajuudella (Kuva: Timo Hietalahti 2015)

Seulonta-ajaksi määräytyi parin ensimmäisen seulonnan jälkeen 15 minuuttia. Tässä ajassa pienimmätkin raekoot ennättivät seuloutumaan tarpeeksi hyvin. Ajan säästämiseksi suurimmat seulat voitiin ottaa kesken seulonnan ja punnita saadut raekoot ennen varsinaisen seulonta-ajan loppumista, koska ne seuloutuvat pienimpiä raekokoja nopeammin.



KUVIO 18. Yli 5,6 mm:n ja 1,12 mm:n kokoista materiaalia seulapinnoilla (Kuva: Timo Hietalahti 2015)

Jokaisen seulan pinnalla jäänyt materiaali punnittiin erikseen ja tulokset taulukoitiin. Ensimmäisen ja toisen seulonnan punnitusten tulokset laskettiin yhteen, jolloin saatiin murskauskohtaiset raekokojakaumat grammoina. Punnituksessa käytettiin digitaalivaakaa, ja materiaali punnittiin kaatamalla materiaali seulapinnalta suppilon läpi dekanterilasiin. Vaaka taarattiin, jottei dekanterilasin massaa tarvitse vähentää erikseen.



KUVIO 19. Materiaalin punnitusta (Kuva: Timo Hietalahti 2015)

6.3.3 Näytteiden talteenotto

Kaikki yli 5,6 mm:n kokoiset ja alle 1,12 mm:n kokoiset rakeet laitettiin murskauksittain omiin muovipusseihin. Kaikki 1,12:n ja 5,6:n mm välillä olevat rakeet laitettiin omaan astiaansa tulevia kokeita varten.



KUVIO 20. Seulonnasta talteen otettu materiaali (Kuva: Timo Hietalahti 2015)

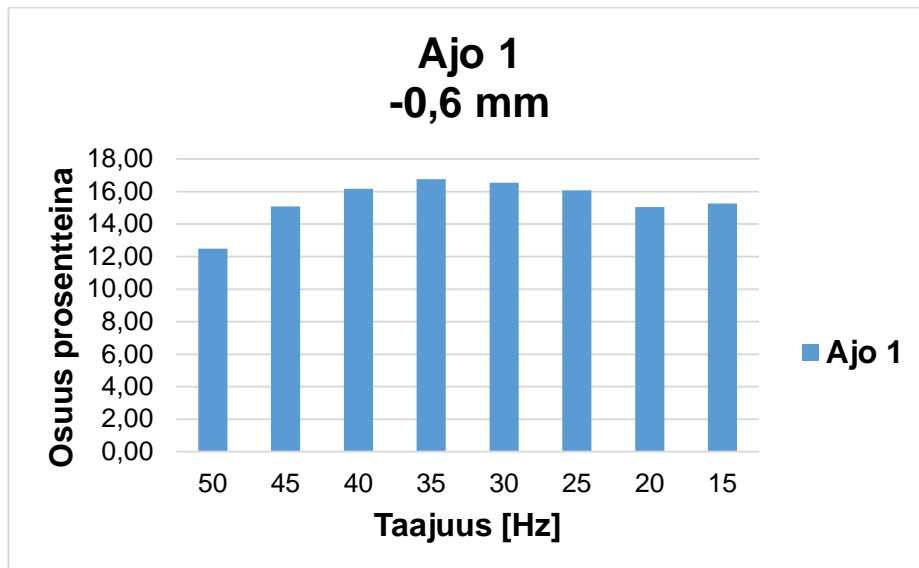
7 TULOKSET

Jokaisesta koeajosta saaduista tuloksista tehtiin omat taulukot. Näistä taulukoista voidaan lukea kullekin seulapinnalle jäänyt materiaalmäärä grammoina, kuinka monta prosenttia syötetystä materiaalista jäi kunkin seulan pinnalle ja kuinka monta prosenttia syötetystä materiaalista on mennyt jokaisen seulapinnan läpi. Näiden taulukoista luettavien tulosten avulla on saatu piirrettyä kaikki integraalikuvaajat ja pylväsdiagrammit. Koeajojen tuloksissa näytetään vain tulosten tarkastelun kannalta tärkeimmät pylväsdiagrammit ja taulukot. Integraalikuvaajat ja loput pylväsdiagrammeista ja taulukoista on nähtävissä liitteistä.

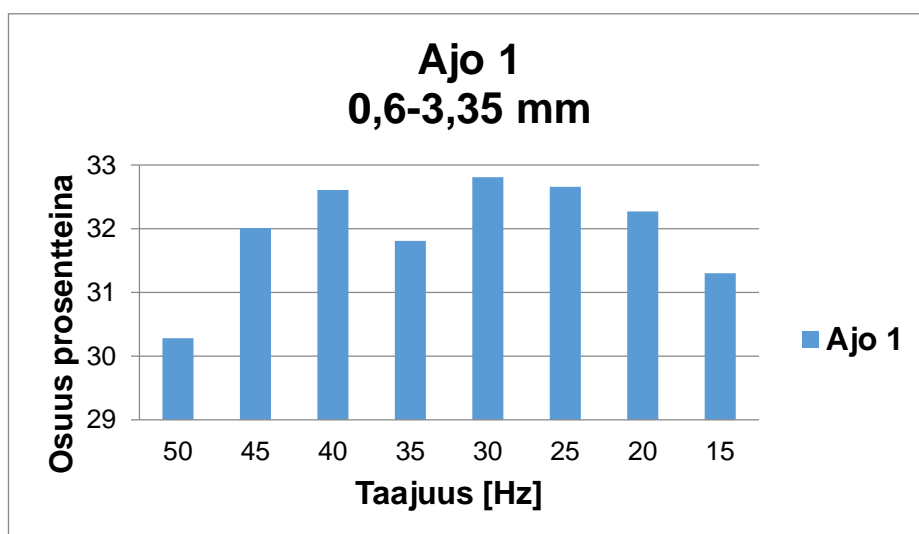
Tulosten tarkastelussa keskitytään kahteen raekokoalueeseen: alle 0,6 mm ja 0,6–5,6 mm. Jälkimmäinen raekokoalue on jaettu 0,6–3,35 mm:n ja 3,35–5,6 mm:n alueisiin. Koska pienintä raekokoaluetta halutaan syntyvän murskauksissa mahdollisimman vähän, tulosten tarkastelu painottuu erityisesti tuohon raekokoluokkaan.

7.1 Koeajot 1 ja 2

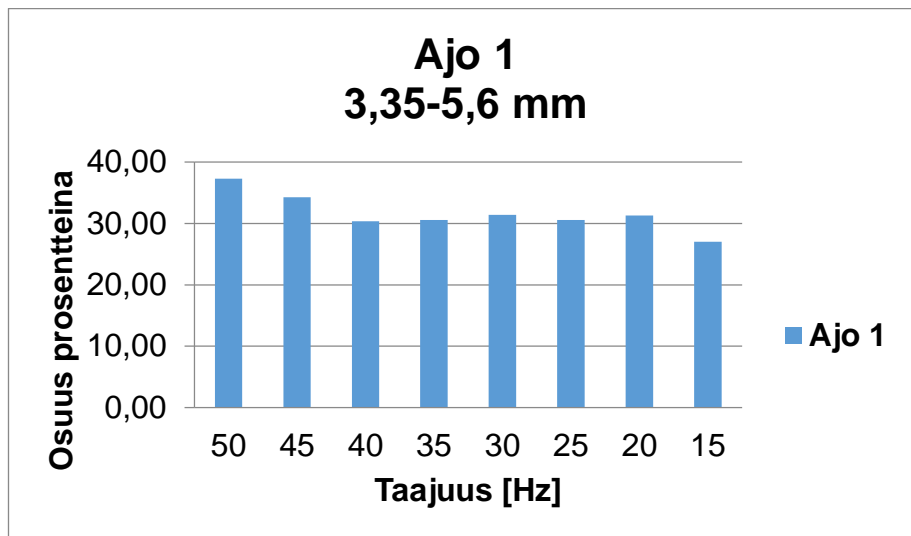
Kuvioista 21–24 nähdään ensimmäisen ajon materiaalmäärät prosentteina rae-
kokoalueittain kaikilla taajuuksilla murskattaessa.



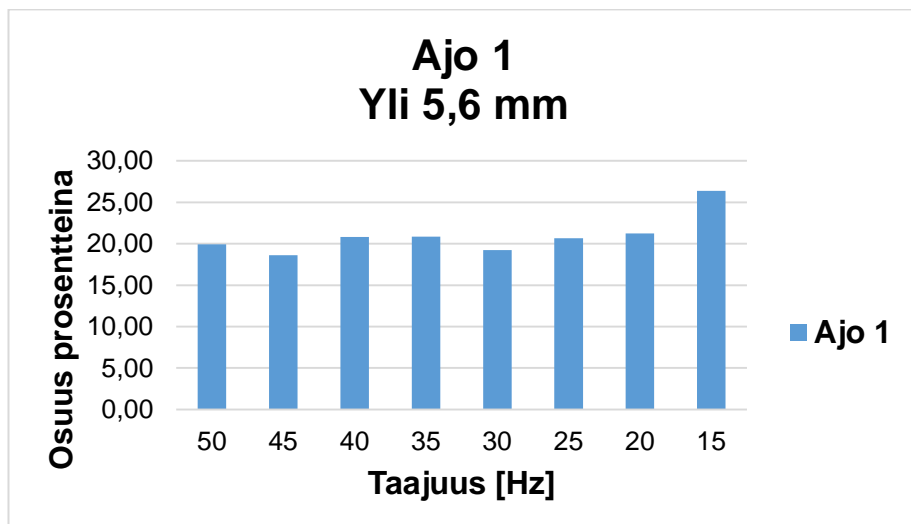
KUVIO 21. Ensimmäisen koeajon alle 0,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa



KUVIO 22. Ensimmäisen ajon 0,6–3,35 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa



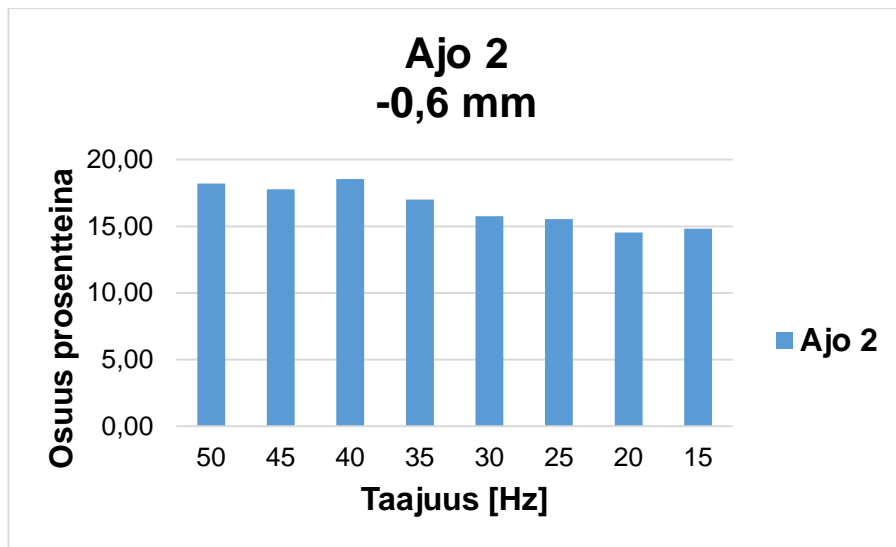
KUVIO 23. Ensimmäisen ajon 3,35–5,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa



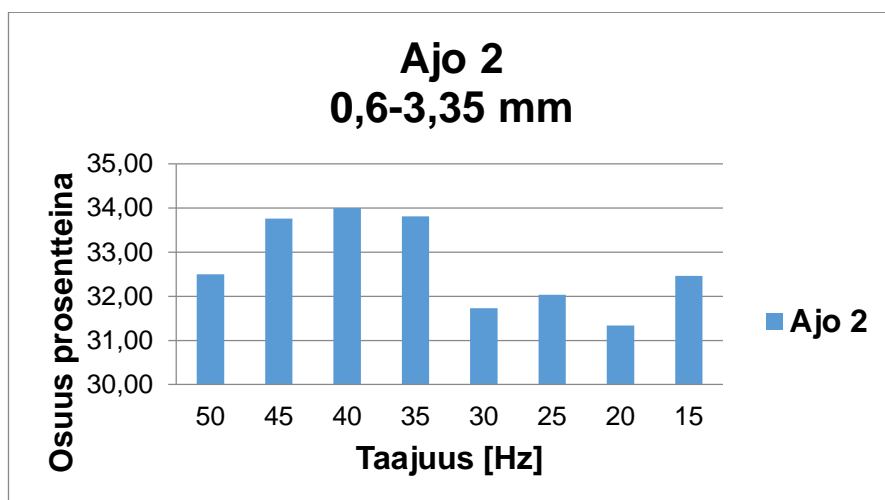
KUVIO 24: Ensimmäisen koeajon yli 5,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

7.2 Koeajo 2

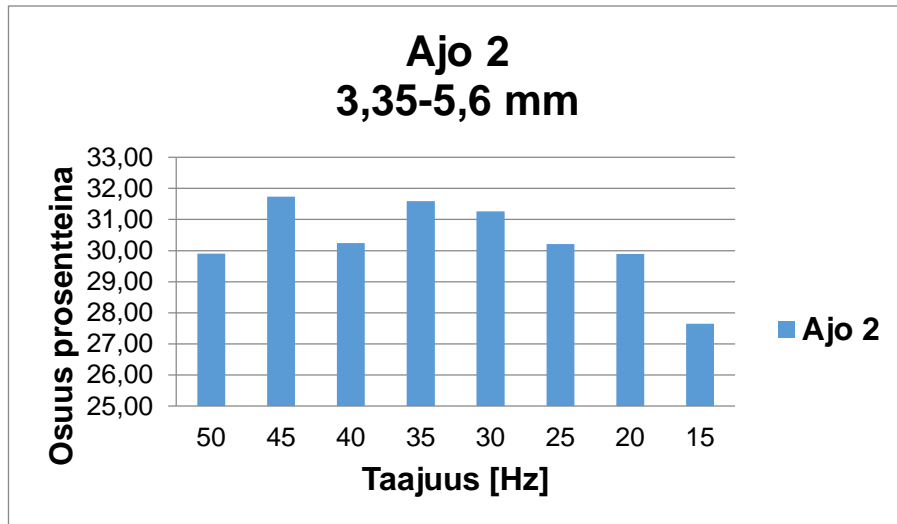
Kuvioista 25–28 nähdään toisen ajon materiaalimäärät prosentteina raekoko-alueittain kaikilla taajuuksilla murskattaessa.



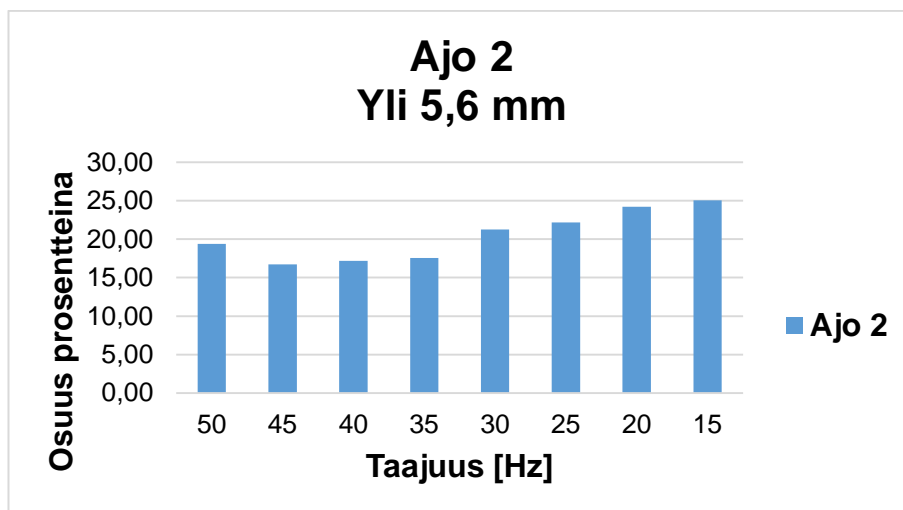
KUVIO 25. Toisen koeajon alle 0,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa



KUVIO 26. Toisen Koeajon 0,6–3,35 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa



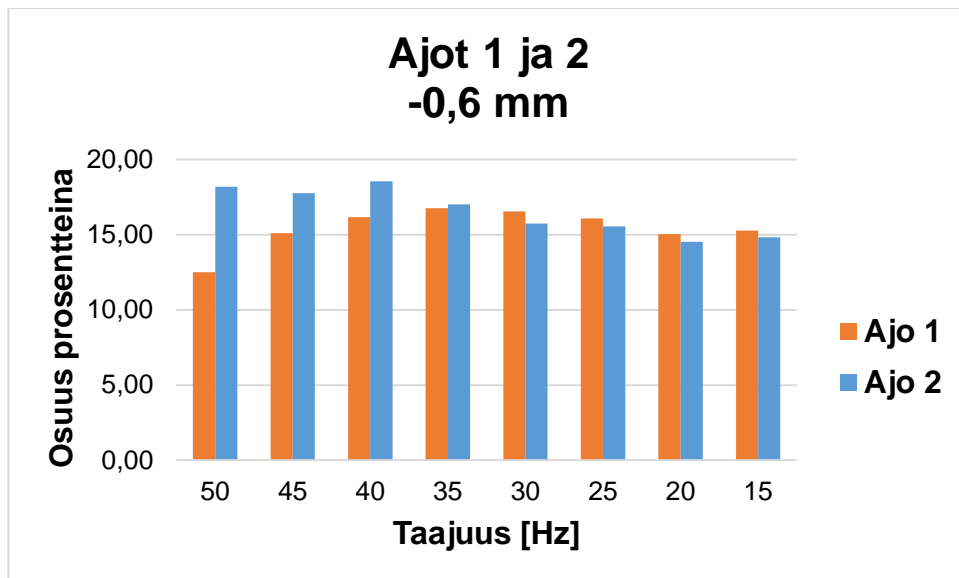
KUVIO 27. Toisen koeajon 3,35–5,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa



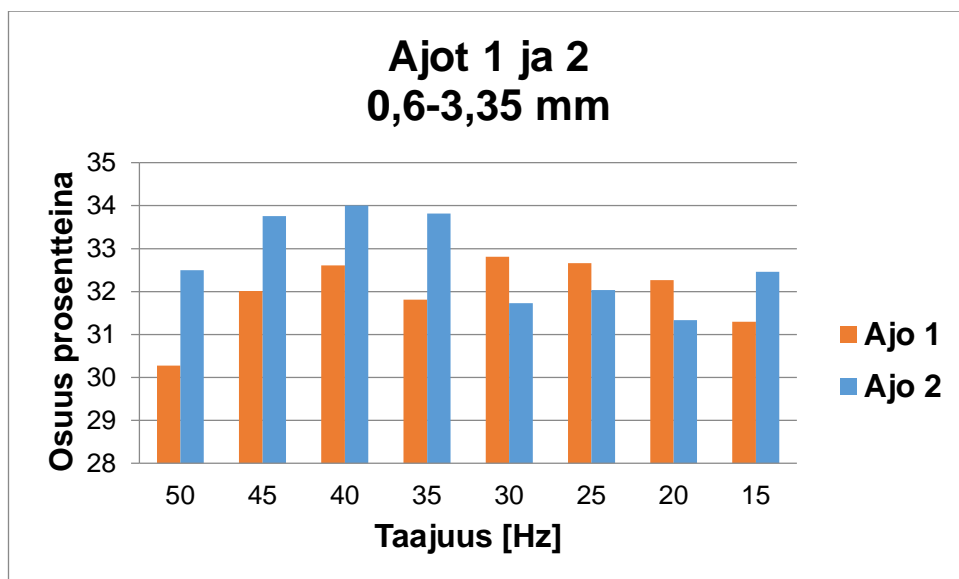
KUVIO 28. Toisen koeajon yli 5,6 mm-kokoisten partikkelien osuus prosentteina jokaisessa murskauksessa

7.2 Yhdistetyt tulokset

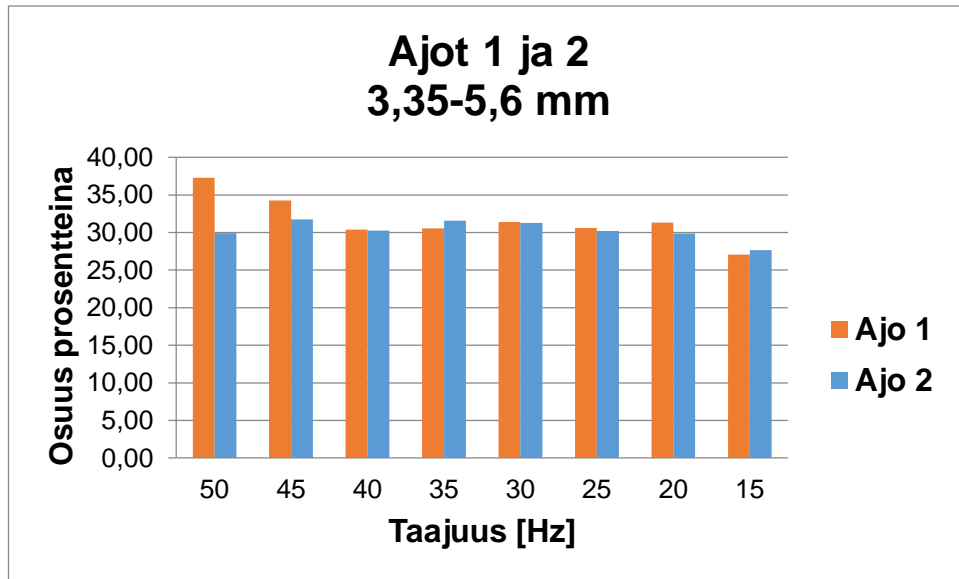
Kuvioista 29–32 nähdään ensimmäisen ja toisen ajon materiaalmäärät prosentteina raekokoalueittain kaikilla taajuuksilla murskattaessa.



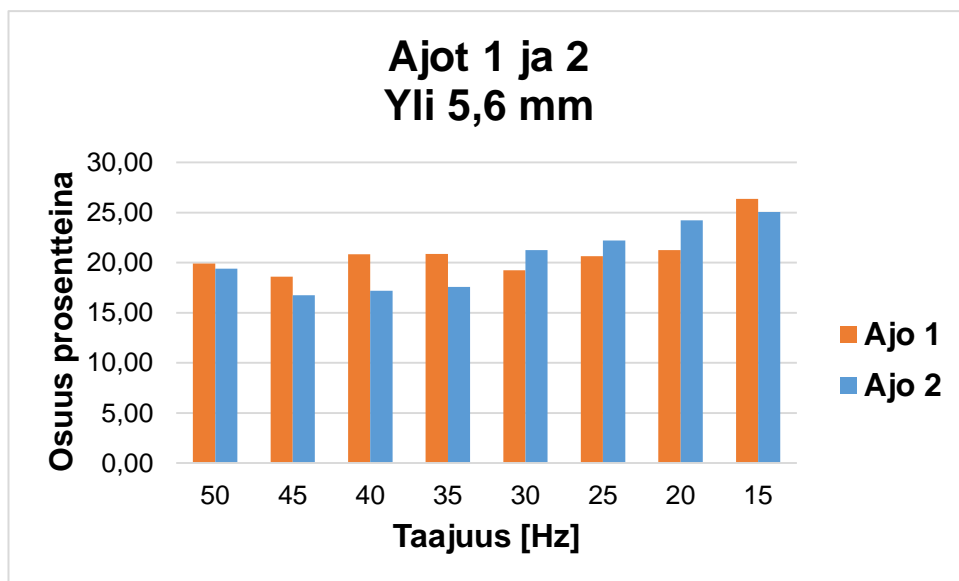
KUVIO 29. Molempien koeajojen alle 0,6 mm-kokoisten partikkelien osuudet



KUVIO 30. Molempien koeajojen 0,6–3,35 mm-kokoisten partikkelien osuudet



KUVIO 31. Molempien koeajojen 3,35–5,6 mm-kokoisten partikkelien osuudet



KUVIO 32. Molempien koeajojen yli 5,6 mm-kokoisten partikkelien osuudet

7.3 Tulosten käsittely ja vertailu

Kun ensimmäisen ja toisen ajon samoilla taajuuksilla tehtyjä murskauksia verrattiin toisiinsa, niiden havaittiin olevan suurimmalta osin erittäin lähellä toisiaan. Tästä syystä saatuja tuloksia voidaan pitää luotettavina. Parhaiten murskausten välisten erojen suuruudet on luettavissa taulukoista. Erotus on saatu laskettua, kun ensimmäisen ajon tuloksista on vähennetty toisen ajon tulokset.

TAULUKKO 1. Molempien ajojen kaikkien murskausten alle 0,6 mm kokoisen materiaalin määrät ja niiden erotukset

Alle 0,6 mm määrä [%]			
Taajuus	Ajo1	Ajo2	Erotus
50	12,50	18,20	-5,70
45	15,10	17,77	-2,66
40	16,18	18,55	-2,37
35	16,77	17,02	-0,24
30	16,55	15,75	0,80
25	16,08	15,55	0,54
20	15,05	14,53	0,53
15	15,27	14,83	0,45

Taulukosta 1 nähdään, että 35 hertsillä ja sitä pienemmillä taajuuksilla murskattaessa ei ole suurtakaan eroa hienoaineksen määrän syntymisessä ensimmäisen ja toisen ajon välillä. Näillä taajuuksilla murskattaessa ajojen välinen ero on alle prosentin. 45 ja 40 hertsin taajuudella syntyneen hienoaineksen ero on jo yli 2 prosenttia, mutta ero ei ole kovinkaan merkittävä ja se on selitettävissä osittain punnitus virheillä ja materiaalin hukkumisella. Voidaan kuitenkin todeta, että hienoainesta syntyy hieman enemmän näillä taajuuksilla murskattaessa.

Suurin poikkeavuus hienoaineksen määrän syntymisessä tapahtui 50 hertsin taajuudella murskattaessa. Ensimmäisen ja toisen ajon välisten murskausten ero on peräti 5,7 prosenttia. Aluksi tämän luultiin johtuvan pahasta punnitus virheestä tai huolimattomuudesta. Pohdinnan jälkeen tultiin siihen tulokseen, että

materiaalin syöttötavalla on ollut vaikutusta materiaalin murskautumiseen. Kun toisen ajon 50 hertsin taajuudella murskattaessa murskattava materiaalierä syötettiin kokonaan leukamurskaimeen, ensimmäisessä ajossa materiaalmäärä syötettiin kaikista muista murskauksista poiketen pienemmissä erissä. Tästä syystä ensimmäisen ajon murskaukseen kulunut aika on ollut toisen ajon murskaukseen verrattuna pidempi. Kun toisen ajon murskaukseen kului 53 sekuntia, kesti ensimmäisen ajan murskaus 22 sekuntia kauemmin eli 75 sekuntia. Aikaero ei ole kovin merkittävä, kun ottaa huomioon syntyvän hienoaineksen määrän erotuksen.

Hienoaineksen syntymiseen on vaikuttanut murskattavan materiaalin määrä leukamurskaimen kita-aukossa, kuten teoriaosuuden luvussa 3.3 on kerrottu. Ensimmäisessä ajossa materiaali on murskaantunut enimmäkseen liikkuvan leuan aiheuttamista iskuista. Toisessa ajossa kita-aukon ollessa täydempi murskattavat partikkelit ovat hioutuneet toisiaan vasten murskauksen aikana. Teollisuusmittakaavassa murskausta suoritettaessa olisi löydettävä optimaalinen syöttönopeus ja murskaustaajuus, joiden avulla hienoaineksen syntyminen saataisiin minimoitua, eikä murskaus aika kasvaisi liian suureksi.

Tuloksista voidaan havaita, että pienemmillä taajuuksilla murskattaessa syntyvän hienoaineksen määrä laskee hieman. Kuviosta 22 nähdään, että hienoainesta on syntynyt lähes saman verran 50, 45 ja 40 hertsin murskauksilla. 40 hertsin murskauksesta alaspäin mentäessä hienoaineksen määrä laskee tasaisesti aina 20 hertsin taajuudella tehtyyn murskaukseen asti ja viimeisessä murskauksessa määrä on lähes sama kuin sitä edeltävässä murskauksessa. Erot murskausten välillä ovat kuitenkin melko pieniä, sillä suurimman ja pienimmän ero on n. 3 %.

TAULUKKO 2. Molempien ajojen kaikkien murskausten 0,6–3,35 mm-kokoisen materiaalin määrät ja niiden erotukset

0,6–3,35 mm määrä [%]			
Taajuus	Ajo1	Ajo2	Erotus
50	30,28	32,50	-2,22
45	32,01	33,76	-1,75
40	32,61	34,00	-1,39
35	31,81	33,82	-2,01
30	32,81	31,73	1,08
25	32,66	32,03	0,63
20	32,27	31,34	0,93
15	31,30	32,46	-1,16

Ensimmäisessä ja toisessa ajossa tulokset 0,6–3,35 mm raekokoalueella ovat lähes samanlaiset, kuten taulukosta 2 voidaan nähdä. 30 hertsillä ja sitä pienempien taajuuksien murskausten erotukset ovat n. prosentoin luokkaa ja 45, 40 ja 35 hertsin murskauksilla ero on 2 prosenttia tai pienempi. 50 hertsin taajuuden ero on kaikista suurin eli 2,2 prosenttia (TAULUKKO 2). Tämä voidaan selittää pienimmän raekokoluokan tavoin materiaalin syöttönopeudella.

Taajuuden muuttamisella ei ole ollut suurtakaan vaikutusta kyseisen raekoon määrän syntyymiseen. Vähiten tätä raekokoa saatiin ensimmäisen ajon 50 hertsin taajuudella murskattaessa ja eniten ensimmäisen ajon 30 hertsin murskauksessa. Kyseisten murskausten välinen ero on n. 2,5 %, joten voidaan sanoa, ettei murskaustaajuuden muuttamisella ole juurikaan vaikutusta tämän raekokoluokan määrän muodostumiseen.

TAULUKKO 3. Molempien ajojen kaikkien murskausten 3,35–5,6 mm kokoisen materiaalin määrät ja niiden erotukset

3,35–5,6 mm määrä [%]			
Taajuus	Ajo1	Ajo2	Erotus
50	37,29	29,91	7,38
45	34,28	31,73	2,54
40	30,38	30,24	0,14
35	30,55	31,59	-1,04
30	31,39	31,26	0,13
25	30,59	30,22	0,38
20	31,32	29,89	1,42
15	27,04	27,64	-0,60

Taulukosta 3 nähdään, että ensimmäisen ja toisen ajon murskausten tulokset ovat todella lähellä toisiaan aina 40 hertsin murskauksesta 15 hertsin murskaukseen saakka. 45 hertsin taajuudella tehtyjen murskausten välinen ero on hieman suurempi, ja 50 hertsin taajuudella tehtyjen murskausten välinen ero on peräti 7,4 %. Tämä on selitettävissä pienimmän raekokoluokan tavoin ensimmäisen ja toisen ajon murskausten materiaalin syöttönopeuden muutoksella.

Toisen ajon murskausten tuloksia verrattaessa toisiinsa nähdään, että suurin ero tämän raekokoalueen määrän syntymisessä on ollut 45 ja 15 hertsin taajuuksilla tehtyjen murskausten välillä, jolloin ero on n. 4 %. Jos 15 hertsin taajuudella tehdyn murskauksen jättää huomioimatta, on toisen ajon murskausten välinen suurin ero vain n. 1,8 %. Taajuuden muuttamisella ei ole ollut kovinkaan suurta vaikutusta tämän raekokoluokan materiaalimäärän syntymiseen.

TAULOKKO 4. Molempien ajojen kaikkien murskausten yli 5,6 mm kokoisen materiaalin määrät ja niiden erotukset

Yli 5,6 mm määrä [%]			
Taajuus	Ajo1	Ajo2	Erotus
50	19,93	19,40	0,53
45	18,61	16,74	1,87
40	20,84	17,21	3,63
35	20,86	17,57	3,29
30	19,24	21,25	-2,01
25	20,66	22,20	-1,54
20	21,26	24,24	-2,98
15	26,38	25,07	1,31

Taulukosta 4 nähdään, että ensimmäisen ja toisen ajon murskausten välillä on hieman eroavaisuuksia yli 5,6 mm kokoisen materiaalin muodostumisessa. Erot saattavat johtua mm. materiaalihäviöstä. Partikkelit ovat jo sen verran kookkaita, että jo muutaman partikkelin hukkaaminen aiheuttaa lisää eroa ajojen välille.

Kaikista muista raekokoalueista poiketen, syöttötavalla ja nopeudella ei näyttäisi olevan vaikutusta leukamurskaimen asetusarvon kokoisen materiaalin syntymiseen. 50 hertsin taajuudella tehtyjen murskausten välinen ero on oikeastaan kaikista pienin tässä raekokoluokassa.

Taajuuden muuttamisella on ollut vaikutusta suurempien partikkelien muodostumisessa. Kuten kuviosta 28 voidaan nähdä, yli 5,6 mm kokoisten partikkelien määrä kasvaa tasaisesti, kun mennään 45 hertsistä alaspäin. 45 ja 15 hertsin taajuuksilla tehtyjen murskausten välinen ero on n. 8,3 %.

8 LOPPUPÄÄTELMÄT

Suoritettujen murskausten ja seulontojen tuloksia voidaan käyttää hyödyksi litiumspodumeenimalmin rikastusprosessia kehitettäessä. Saatujen tulosten avulla saatiin selville, kuinka murskaustaajuuden muuttaminen vaikuttaa syntyneen hienoaineen määrään ja saatuja tuloksia voidaan käyttää hyödyksi prosessissa käytettäviä murskausmenetelmiä määritettäessä.

Tuloksista nähdään, ettei murskaustaajuuden muuttamisella ollut kovinkaan suurta vaikutusta ei-halutun alle 0,6 mm-kokoisen materiaalin muodostumiseen. Vaikka vähiten hienoainesta syntyikin 20 hertsin taajuudella murskattaessa, on murskaukseen kulunut aika samalla paljon pidempi verrattaessa suuremmilla taajuuksilla tehtyihin murskauksiin.

Materiaalin syöttönopeus osoittautui murskaustaajuutta paljon merkittävämmäksi tekijäksi hienoaineuksen muodostumisessa. Saadut hienoainepitoisuudet olisivat paljon pienempiä, jos jokainen murskaus olisi suoritettu pienemmällä syöttönopeudella. Jos hitaampi syöttönopeus alensi 50 hertsin taajuudella murskattaessa syntyneen hienoaineuksen määrää 5,7 %, jolloin syntyneen hienoaineuksen määrä oli 12,5 %. Jos oletetaan, että syöttönopeus vaikuttaisi yhtä paljon kaikilla taajuuksilla, kaikista pienin hienoainepitoisuus saataisiin 20 hertsillä murskattaessa. Tällöin muodostuneen hienoaineuksen määrä olisi jopa alle 9 %, mutta murskaukseen kulunut aika kasvaisi melko suureksi.

Litiumspodumeenin rikastusprosessia teollisuusmittakaavassa suunniteltaessa tulisi määrittää sopivan suuruinen murskaustaajuus ja materiaalin syöttönopeus. Näitten lisäksi tulee ottaa huomioon, onko prosessin kannalta tärkeämpää ja/tai taloudellisempaa saada materiaali murskattua nopeasti, jolloin muodostuvan

hienoaineksen määrä on suurempi, vai voidaanko murskaukseen kuluva ajasta hieman joustaa, jolloin saadaan enemmän haluttua raekokoa.

Laboratoriomittakaavassa suoritetuista koeajoista saadut tulokset ovat vain suuntaa-antavia. Pienillä materiaalimäärillä ja laitteilla murskattaessa saadut tulokset voivat olla hyvinkin erilaisia kuin isoilla materiaalimäärillä ja laitteilla murskattaessa. Optimaalinen murskaustaajuus teollisuusmittakaavassa saattaa olla hyvinkin suurempi tai pienempi kuin laboratoriomittakaavassa. Saadut tulokset antavat kuitenkin hyvät lähtöarvot, joilla murskausta kannattaa ensin kokeilla teollisuusmittakaavassa.

LÄHTEET

Grönholm, S., Alviola, R., Kinnunen, K., Kojonen, K., Kärkkäinen, N & Mäkitie, H. 2009. Retkeilijän Kiviopas. Geologian tutkimuskeskus. 2.painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

Heiskanen, K. 2011. Jauhatus 1. Luentomateriaali

Hukki, R.T. 1964. Mineraalien hienonnus ja rikastus. Keuruu: Otavan kirjapaino.

Keliber. Lopputuotteet. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://keliber.fi/lopputuotteet>. Luettu 11.2.2015.

Kemikaalikortit. 1991. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0710.htm>. Luettu 12.2.2015.

Metso Minerals. 2008. Crushing and Screening Handbook. 3. painos. Tampere: Kirjapaino Hermes.

Mäkinen, T. 2013. Jauhatus. Luentomateriaali.

Mäkinen, T. 2012. Murskaus ja seulonta. Luentomateriaali.

Rahikka, L. 2011. Mekaaniset prosessit. Luentomateriaali.

Sirén, O. 2015. Kokkola Kieppi. Seminaarimateriaali. Pdf-dokumentti. Luettu 16.2.2015.

Sirén, O. 2012. Oulu. Seminaarimateriaali. Pdf-dokumentti. Luettu: 16.2.2015.

Wills, B.A. & Napier-Munn, T.J. 2006. Wills Mineral Processing Technology, An introduction to the practical aspects of ore and mineral recovery. 7. painos. Iso-Britannia. Butterworth-Heinemann publications.

Wordpress. Litium. Www-dokumentti, Saatavissa: <https://data113kemia.wordpress.com/2014/litium/>. Luettu: 12.2.2015.

TAULUKKO 5. Ajo 1 50 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	1	50	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	591,5	19,93	80,07
4,75	466,6	15,72	64,36
3,35	640,3	21,57	42,79
2	429	14,45	28,33
1,12	286,9	9,66	18,67
0,6	183,1	6,17	12,50
0,3	134,8	4,54	7,96
-0,3	236,3	7,96	0,00

TAULUKKO 6. Ajo 1 45 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	1	45	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	547,7	18,61	81,39
4,75	489,4	16,63	64,77
3,35	519,6	17,65	47,11
2	420	14,27	32,85
1,12	308,8	10,49	22,35
0,6	213,5	7,25	15,10
0,3	165,8	5,63	9,47
-0,3	278,7	9,47	0,00

TAULUKKO 7. Ajo 1 40 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	1	40	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	617,5	20,84	79,16
4,75	428,2	14,45	64,72
3,35	472,2	15,93	48,78
2	421,6	14,23	34,56
1,12	312,5	10,54	24,01
0,6	232,3	7,84	16,18
0,3	177,3	5,98	10,19
-0,3	302,1	10,19	0,00

TAULUKKO 8. Ajo 1 35 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	1	35	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	624,4	20,86	79,14
4,75	430,8	14,39	64,74
3,35	483,6	16,16	48,58
2	403,6	13,49	35,10
1,12	320,1	10,70	24,40
0,6	228,4	7,63	16,77
0,3	179,3	5,99	10,78
-0,3	322,7	10,78	0,00

TAULUKKO 9. Ajo 1 30 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	1	30	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	573	19,24	80,76
4,75	422,7	14,19	66,57
3,35	512,3	17,20	49,37
2	421,4	14,15	35,22
1,12	328,2	11,02	24,20
0,6	227,7	7,65	16,55
0,3	177,8	5,97	10,58
-0,3	315,2	10,58	0,00

TAULUKKO 10. Ajo 1 25 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	1	25	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	617,3	20,66	79,34
4,75	424,4	14,21	65,13
3,35	489,6	16,39	48,74
2	413,3	13,83	34,91
1,12	332,3	11,12	23,79
0,6	230,2	7,71	16,08
0,3	173,9	5,82	10,26
-0,3	306,6	10,26	0,00

TAULUKKO 11. Ajo 1 20 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	1	20	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	634,2	21,26	78,74
4,75	424	14,21	64,53
3,35	510,2	17,10	47,42
2	423,9	14,21	33,21
1,12	320	10,73	22,49
0,6	221,7	7,43	15,05
0,3	164,6	5,52	9,54
-0,3	284,5	9,54	0,00

TAULUKKO 12. Ajo 1 15 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	1	15	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	783	26,38	73,62
4,75	355,6	11,98	61,63
3,35	447	15,06	46,57
2	397,6	13,40	33,17
1,12	309,2	10,42	22,75
0,6	222	7,48	15,27
0,3	169,5	5,71	9,56
-0,3	283,8	9,56	0,00

TAULUKKO 13. Ajo 2 50 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	2	50	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	578,7	19,40	80,60
4,75	404,1	13,55	67,06
3,35	488,1	16,36	50,69
2	403,1	13,51	37,18
1,12	319,1	10,70	26,48
0,6	247,3	8,29	18,20
0,3	196,6	6,59	11,60
-0,3	346,2	11,60	0,00

TAULUKKO 14. Ajo 2 45 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	2	45	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	499,6	16,74	83,26
4,75	433,1	14,51	68,75
3,35	514	17,22	51,53
2	426,8	14,30	37,23
1,12	338,1	11,33	25,90
0,6	242,7	8,13	17,77
0,3	194,6	6,52	11,24
-0,3	335,6	11,24	0,00

TAULUKKO 15. Ajo 2 40 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	2	40	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	513,5	17,21	82,79
4,75	433,9	14,54	68,25
3,35	468,7	15,70	52,55
2	421,7	14,13	38,42
1,12	345	11,56	26,86
0,6	248	8,31	18,55
0,3	196,1	6,57	11,98
-0,3	357,5	11,98	0,00

TAULUKKO 16. Ajo 2 35 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	2	35	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	523,2	17,57	82,43
4,75	413,2	13,88	68,55
3,35	527,3	17,71	50,83
2	433,8	14,57	36,26
1,12	333,9	11,22	25,05
0,6	239	8,03	17,02
0,3	183,2	6,15	10,86
-0,3	323,4	10,86	0,00

TAULUKKO 17. Ajo 2 30 Hz tulokset

	Ajo	Taajuus [Hz]	
	2	30	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	630,4	21,25	78,75
4,75	440,8	14,86	63,89
3,35	486,5	16,40	47,49
2	412,5	13,91	33,58
1,12	298,5	10,06	23,52
0,6	230,3	7,76	15,75
0,3	184,5	6,22	9,53
-0,3	282,8	9,53	0,00

TAULUKKO 18. Ajo 2 25 Hz tulokset

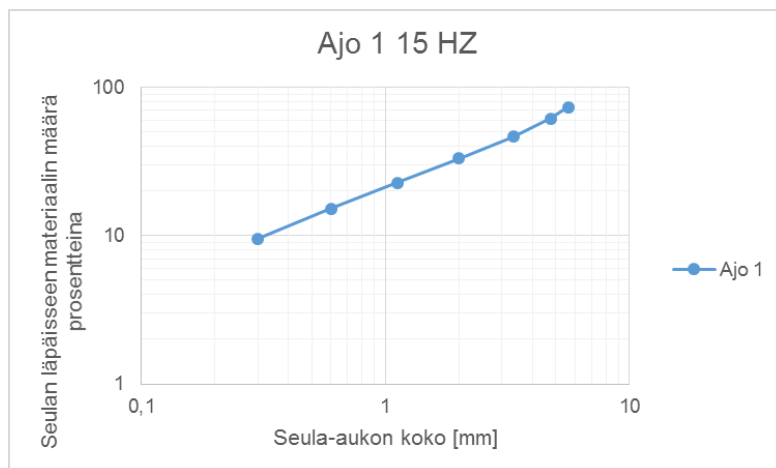
	Ajo	Taajuus [Hz]	
	2	25	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	661,6	22,20	77,80
4,75	410,5	13,78	64,02
3,35	489,8	16,44	47,58
2	422,9	14,19	33,39
1,12	304,9	10,23	23,15
0,6	226,7	7,61	15,55
0,3	174,4	5,85	9,69
-0,3	288,8	9,69	0,00

TAULUKKO 19. Ajo 2 20 Hz tulokset

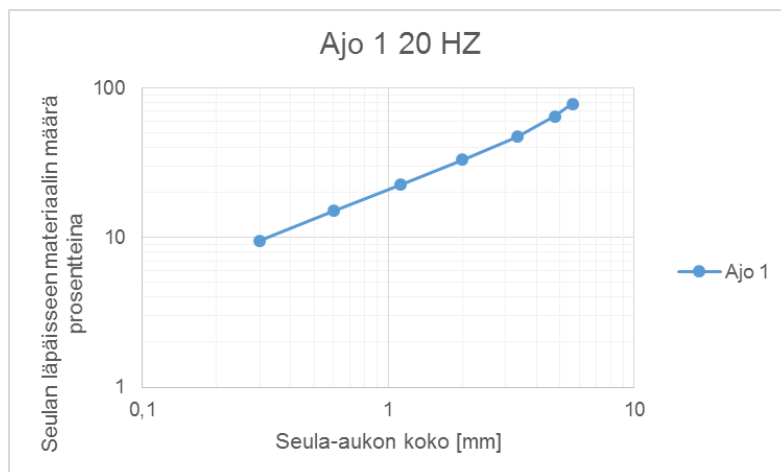
	Ajo	Taajuus [Hz]	
	2	20	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	721,4	24,24	75,76
4,75	424,6	14,27	61,49
3,35	465	15,63	45,87
2	409,8	13,77	32,09
1,12	299,2	10,05	22,04
0,6	223,6	7,51	14,53
0,3	179,4	6,03	8,50
-0,3	252,9	8,50	0,00

TAULUKKO 20. Ajo 2 15 Hz tulokset

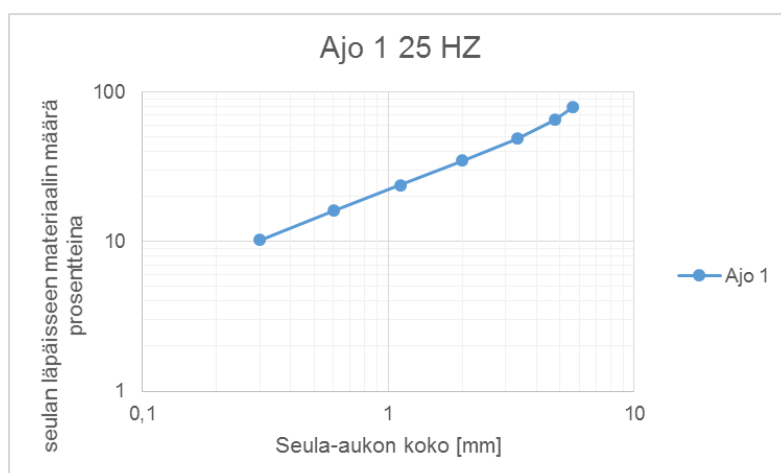
	Ajo	Taajuus [Hz]	
	2	15	
Seula [mm]	Seulalle jäänyt[g]	Seulalle jäänyt osuus %	Seulan läpäissyt osuus %
5,6	765,7	25,07	74,93
4,75	403,9	13,23	61,70
3,35	440,3	14,42	47,29
2	392,2	12,84	34,44
1,12	296,7	9,72	24,73
0,6	302,4	9,90	14,83
0,3	170,3	5,58	9,25
-0,3	282,5	9,25	0,00



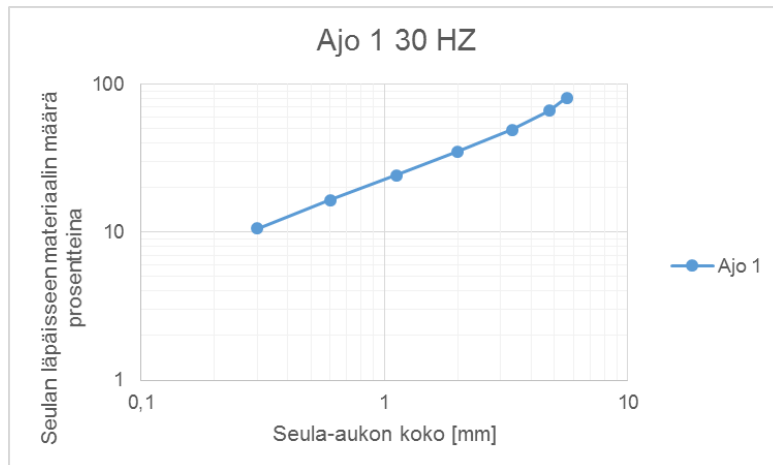
KUVIO 33. Integraalikuvaaja ajo 1 15 Hz



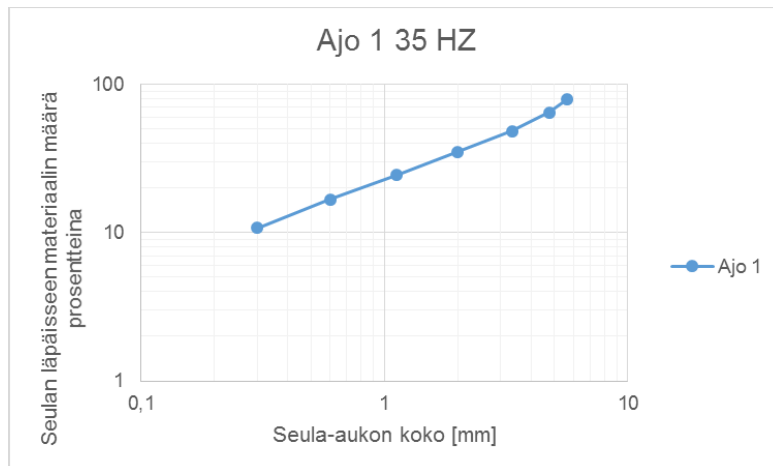
KUVIO 34. Integraalikuvaaja ajo 1 20 Hz



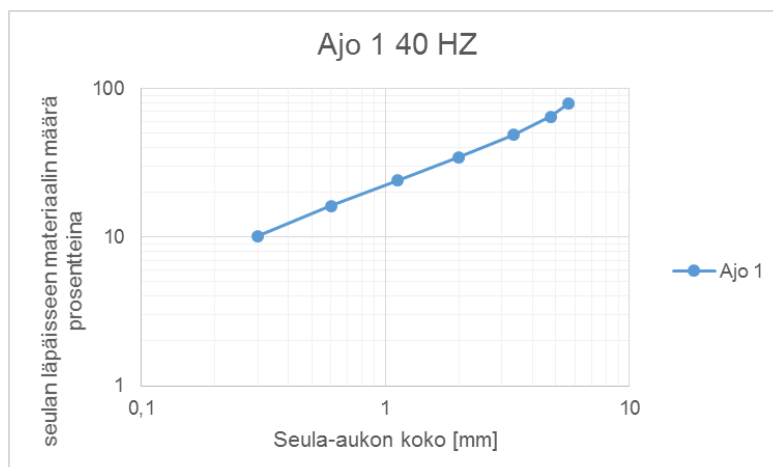
KUVIO 35. Integraalikuvaaja ajo 1 25 Hz



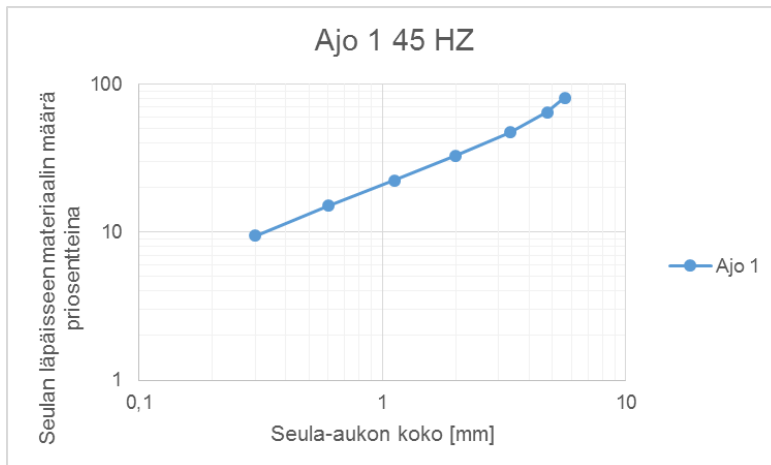
KUVIO 36. Integraalikuvaaja ajo 1 30 Hz



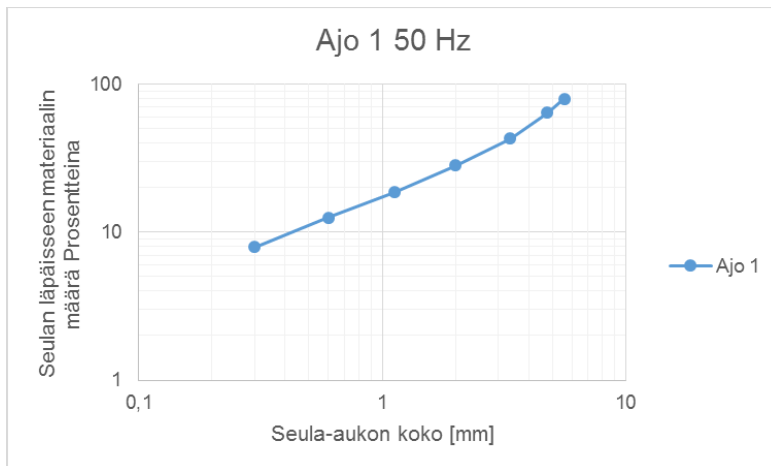
KUVIO 37. Integraalikuvaaja ajo 1 35 Hz



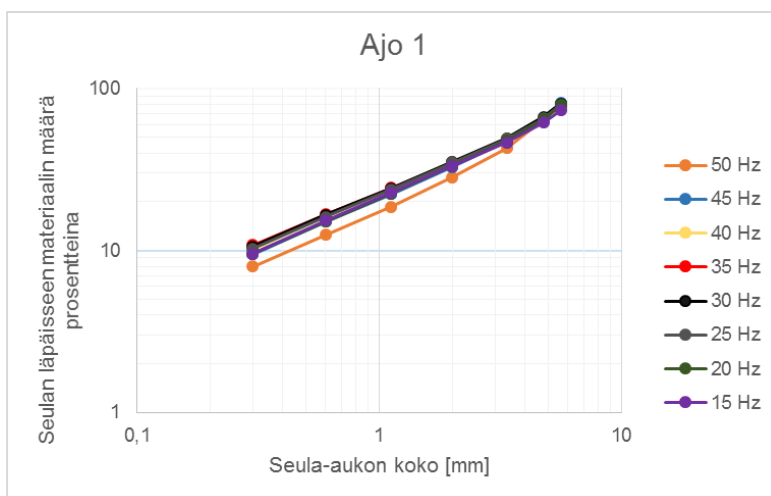
KUVIO 38. Integraalikuvaaja ajo 1 40 Hz



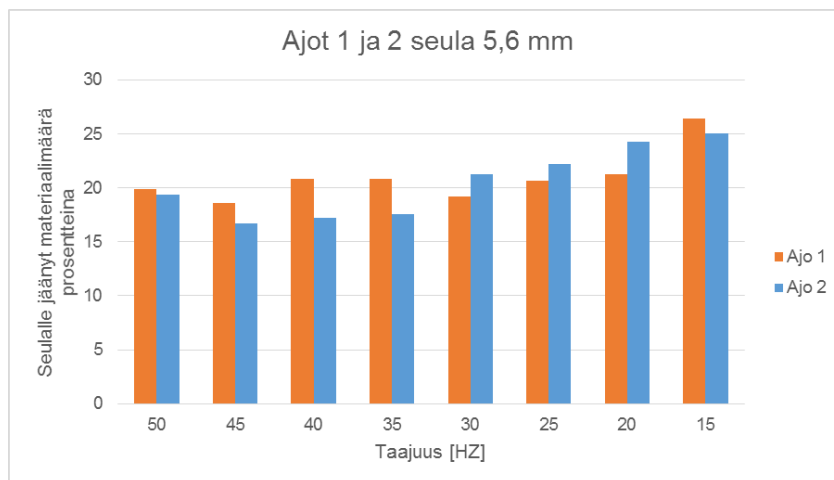
KUVIO 39. Integraalikuvaaja ajo 1 45 Hz



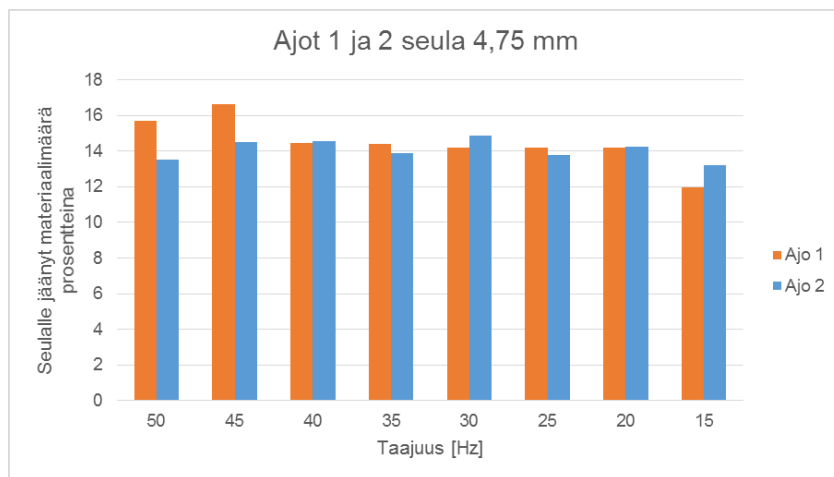
KUVIO 40. Integraalikuvaaja ajo 1 50 Hz



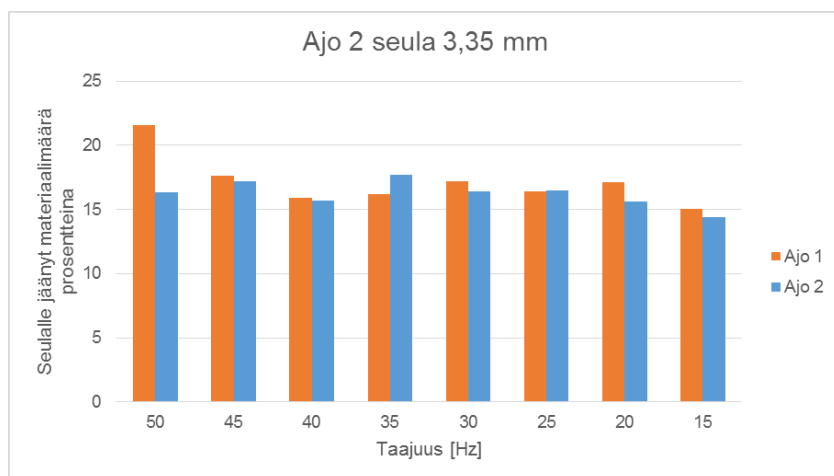
KUVIO 41. Ensimmäisen ajon kaikki integraalikuvaajat



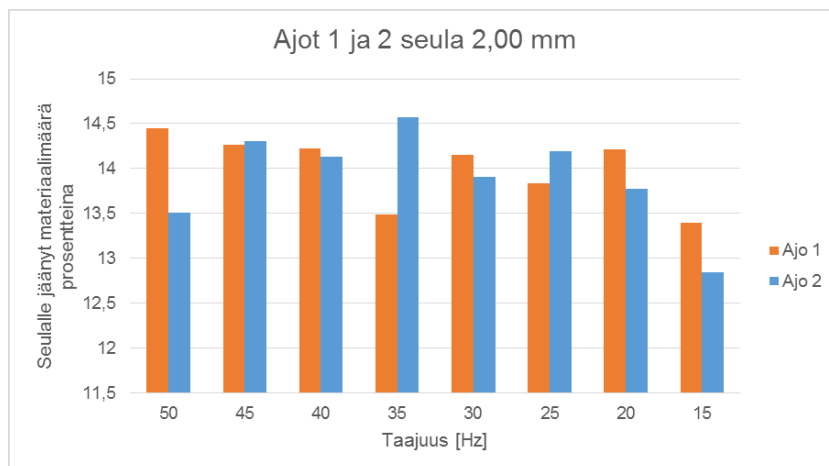
KUVIO 42. 5,6 mm seulan pinnalle jäänyt materiaalmäärä prosentteina



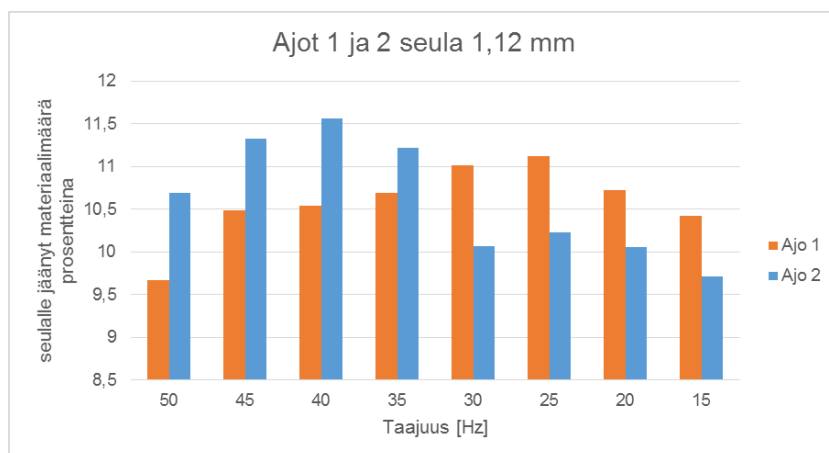
KUVIO 43. 4,75 mm seulan pinnalle jäänyt materiaalmäärä prosentteina



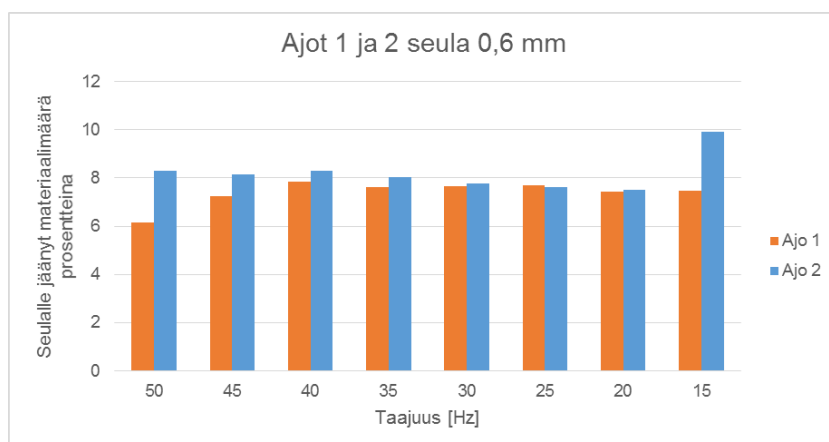
KUVIO 44. 3,35 mm seulan pinnalle jäänyt materiaalmäärä prosentteina



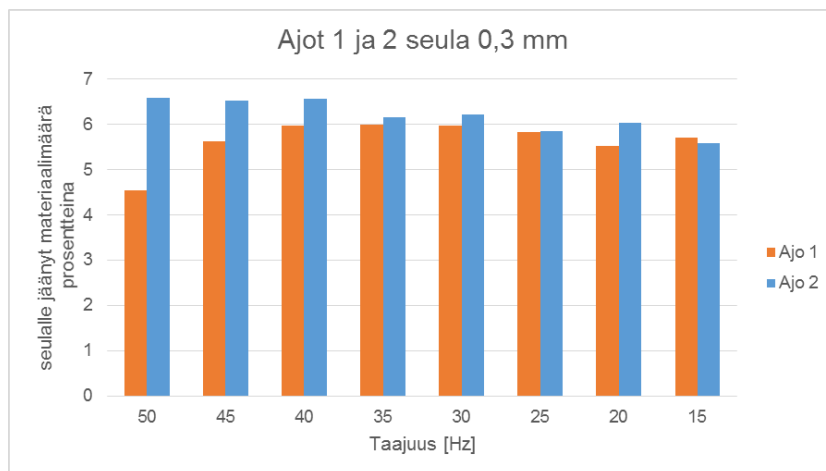
KUVIO 45. 2,00 mm seulan pinnalle jäänyt materiaalmäärä prosentteina



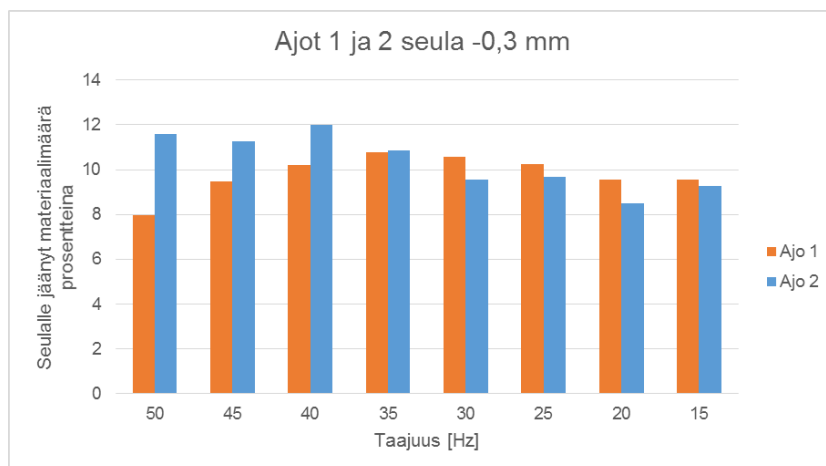
KUVIO 46. 1,12 mm seulan pinnalle jäänyt materiaalmäärä prosentteina



KUVIO 47. 0,6 mm seulan pinnalle jäänyt materiaalmäärä prosentteina



KUVIO 48. 0,3 mm seulan pinnalle jäänyt materiaalmäärä prosentteina



KUVIO 49. Kaikki seulapinnat läpäisseen materiaalin määrä prosentteina