



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

ROBI TOIVONEN

LOHKAREMYLLYN TÄYTTÖASTEEN JA HEITTOKAAREN MÄÄRITYS

ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN TUTKINTO-OH-
JELMA
2021

Tekijä Toivonen, Robi	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Joulukuu 2021
	Sivumäärä 32+11	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi Lohkaremyllyn täyttöasteen ja heittokaaren määrittäminen		
Tutkinto-ohjelma Energia- ja ympäristötekniikka		
TIIVISTELMÄ Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja määrittää Boliden Harjavalta Oy:n kuonarikastamon primäärijauhituksen eli lohkaremyllyn täyttöastetta ja heittokaarta sekä vuorausten kestävyysparantamiseksi että jauhituksen tehostamiseksi. Kuonarikastamon tarkoitus on parantaa kuparisulaton talteenottoa valmistamalla liekkisulatuksessa syntyvästä kuonasta rikastetta palautettavaksi sulatukseen. Myllyjen vuorauksella on merkittävä vaikutus kustannuksiin vuorausmateriaalien, työvoimakustannusten sekä tuotannonmenetysten takia. Tehokkaalla jauhatuksella taas voidaan parantaa kuonarikastamon kapasiteettia. Työn teoriaosuudessa on esitelty pääpiirteittäin sulaton ja kuonarikastamon prosessit sekä jauhituksen ja rikastuksen teoriaa. Kokeellisessa osuudessa perehdytään täyttöasteen mittaamiseen crash stop- menetelmällä sekä muihin prosessimittauksiin ja näytteenottoihin, joita tuli selvittää heittokaaren simulointia varten. Simuloinnin suoritettiin Metson mallinnusohjelmalla. Lohkaremyllyn täyttöasteiksi saatiin noin 29 % ja simuloinnin heittokaaren perusteella kumpikaan mylly ei vaikuta heittävän materiaalia vuoraukselle. Toisaalta jauhinkappaleiden nopeuden perusteella jauhatusta ei välttämättä ole tehokkaimmillaan. Tulokset eivät myöskään anna kattavaa kokonaiskuvausta myllyn toiminnasta, vaan perustuvat yhteen täyttöastemittaukseen ja sen aikaisiin prosessimuutuksiin. Tarkemman tuloksen saisi aikaan useammalla mittauksella pidemmältä ajalta. Silloin olisi kannattavampaa käyttää jatkuvatoimista täyttöasteen mittausta, joka ei vaadi tuotannon pysäyttämistä.		
<u>Asiasanat</u> Jauhatusta, kuonarikastamo, täyttöaste, heittokaari, vuoraus.		

Author Toivonen, Robi	Type of Publication Bachelor's thesis	Date Month Year December 2021
	Number of pages 32+11	Language of publication: Finnish
Title of publication Determination of Primary Grinding Mills Filling Degree and Trajectory		
Degree Program Energy- and Environmental Engineering		
ABSTRACT The goal of this thesis was to study and determine mill trajectory and filling degree of Boliden Harjavalta Oy:s slag concentration plants primary grinding mill to improve the duration of mill liners and to make milling more efficient. Purpose of the slag concentration plant is to improve smelters overall copper recovery by producing slag concentrate from flash smelting furnaces slag. This concentrate is returned to smelter. Mill lining has significant impact on expences by lining material, labor costs and production losses. Efficient slag grinding may improve capacity. In theoretical part of the thesis the processes of smelter and slag concentration plant are presented and dealt with theory of milling and concentrating. The experimental part of the thesis looks in to measuring filling degree with crash stop method and other process measurements and sampling which are needed in mill trajectory simulation. The simulation was done with simulation program by Metso. Filling degree proved to be approximately 29 % and based on trajectory simulation material does not seem to hit mill lining. However, looking at the speed of the grinding media it seems that grinding efficiency may not be optimal. Also the results do not give a precise ore comprehensive results for overall grinding and mill performance. For better accuracy and coverage more measurements are needed. For this it would be recommended to use an online filling degree measurement that does not require stopping the production.		
<u>Key words</u> Grinding, slag concentration, filling degree, mill trajectory, lining.		

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	6
2 BOLIDEN HARJAVALTA OY	7
3 KUPARINTUOTANTO	8
3.1 Raaka-aineet	8
3.2 Liekkisulatus	8
3.3 Konvertointi ja anodiuuni	9
3.4 Elektrolyyysi	10
3.5 Kaasujen käsittely	10
4 KUONARIKASTAMO.....	11
4.1 Kuonan jäähditys ja ylösajo	11
4.2 Murskaus ja jauhatus.....	12
4.2.1 Jauhatuspiirin ohjaus	12
4.3 Vaahdotus.....	12
4.4 Sakeutus ja kuivaus	14
5 JAUHATUKSEN TEORIAA	15
5.1 Raekoko.....	15
5.2 Puhtaaksijauhatustaste.....	16
5.3 Pyörimisnopeus	16
5.4 Myllyjen vuoraus	17
5.5 Jauhatuksen kustannukset	18
5.6 Myllytyypit.....	19
5.7 Luokitus.....	20
5.8 Kiertokuorma	21
6 TÄYTTÖASTE.....	22
6.1 Täyttöasteen mittaus.....	23
7 KOKEIDEN SUORITTAMINEN	24
7.1 Täyttöasteen mittaus.....	24
7.2 Syötön mittaus ja laskenta.....	26
8 TULOKSET	28
8.1 Täyttöaste	28
8.2 Heittokaari.....	30
9 JOHTOPÄÄTÖKSET	32
LÄHTEET	
LIITTEET	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

- AG	Autogeeninen
- SAG	Semi-autogeeninen
- sh.t.	Short ton, lyhyt tonni, 950 kg
- kW	Kilowatti, tehon yksikkö
- kWh	Kilowattitunti, energian yksikkö
- RPM	Kierrosta minuutissa (Revolutions Per Minute)
- D80	Raekoko, jonka 80 % läpäisee
- D50	Raekoko, jonka 50 % läpäisee
- LM1	Lohkaremylly 1.
- LM2	Lohkaremylly 2.

1 JOHDANTO

Boliden Harjavalta Oy valmistaa Satakunnassa nikkelikiveä ja kuparia liekkisulatusmenetelmällä. Liekkisulatuksessa syntyvä kuona käsitellään kuonarikastamolla, jossa kupari otetaan talteen vaahdotusmenetelmällä, jota ennen kuona on jauhattava riittävän hienoksi. Jauhatuksessa käytetään lohwaremyllyjä. Myllyt on vuorattu kumipalkeilla, jotka ottavat vastaan kulutusta sekä tehostavat jauhatusta. Vuoraus on kuitenkin uusittava säännöllisesti, josta syntyy merkittäviä kustannuksia sekä tuotannon menetyksiä vuorausaikana.

Kuparisulaton tuottavuuden ja kestävyysden kannalta on tärkeää, että raaka-aineesta saadaan otettua mahdollisimman suuri osa arvometallista talteen, jonka vuoksi kuonarikastamon tehokas toiminta on tärkeää. Jotta kuparin erotus vaahdotuksessa onnistuisi, on kuona ensin jauhattava niin hienoksi, että kupari on vapaina partikkeleina. Jauhatusta koostuu kahdesta vaiheesta, primäärijauhatuksesta lohwaremyllyillä ja sekundäärijauhatuksesta palamylyillä. Lohwaremyllyjen käyttökustannuksiin vaikuttaa huomattavasti vuorauksen kulumisen, jota voitaisiin ehkäistä oikealla heittokaarella. Vuorauksen kulumisen aiheuttaa vuositason merkittäviä kustannuksia sekä vuorauuspalkkien, työn sekä asennukseen kuluva tuotannonmenetysten osalta. Heittokaaren ollessa optimaalinen, pyörimisliikkeessä oleva kuona putoaa kuonapatjalle, eikä vuoraukselle heiton ollessa liian suuri. Toisaalta jos heitto jää liian lyhyeksi seuraa liian pieni isku ja kuona ei jauhaudu kunnolla. Jauhatusmyllyn täyttöasteen sekä muiden työssä selvitettyjen mittaustulosten avulla voidaan simuloida myllyn heittokaari, josta voidaan arvioida jauhatuksen tehokkuutta ja kuormitusta vuoraukselle.

2 BOLIDEN HARJAVALTA OY

Boliden Harjavalta Oy on yksi maailman tehokkaimmista kuparin ja nikkelin tuottajista. Boliden Harjavaltaan kuuluu Harjavallassa sijaitsevat kupari- ja nikkelisulatto, kuonarikastamo, rikkihappotehtaat sekä kuparielektrolyysi porissa. Yritys valmistaa päätuotteinaan kuparia ja nikkeliä. Sivutuotteena valmistetaan kultaa, hopeaa, rikkihappoa ja nesteytettyä rikkidioksidia. Vuonna 2019 Boliden Harjavalta tuotti 146 000 tonnia kuparia, 25 000 tonnia nikkeliä, 62 000 kg hopeaa, 5 000 kg kultaa ja 769 000 tonnia rikkihappoa. (Boliden Harjavallan [www-sivut](#)) Yrityksen liikevaihto vuonna 2020 oli noin 307 miljoonaa euroa ja liikevoitto 104 miljoonaa euroa sekä henkilöstömäärä 585. (Asiakastieto [www-sivut](#))

Sulaton historia ulottuu pitkälle aina vuoteen 1910 saakka, jolloin Outokummun kaupungista löydettiin kuparimalmia. Sulaton toiminta alkoi Imatralla 1936, mutta tehdas siirrettiin Harjavaltaan 1944. Sulatto liittyi osaksi maailmanlaajuista Boliden-konsernia 2004, jonka liikevaihto on 50 miljardia Ruotsin kruunua ja työllistää noin 6000 henkilöä. Kuparisulaton lopputuote on noin 400 kg painava levymäinen kuparianodi, joka käsitellään Porissa yrityksen lopputuotteeksi, 99,998 % kuparia sisältäväksi kuparikatodiksi. Nikkelisulaton lopputuote on rakeistettu nikkelikivi, joka sisältää noin 50 % nikkeliä. (Boliden Harjavallan [yritysesite 2020](#)).

Boliden Harjavalta käyttää sekä kupari- että nikkelirikasteiden sulatukseen Harjavallassa kehitettyä liekkisulatusmenetelmää, joka otettiin käyttöön kuparirikasteille 1949 ja nikkelirikasteille 1959. (Boliden Harjavallan [yritysesite 2020](#)) Liekkisulatus on palkittu ASM Historical landmark -tunnuksella vuonna 2002. (ASM international [www-sivut](#))

3 KUPARINTUOTANTO

Tässä kappaleessa käsitellään pääpiirteittäin kuparintuotannon prosessivaiheet Boliden Harjavallassa. Kuparintuotanto eroaa nikkelintuotannosta siten, että nikkeliliekki-sulatusuunin kuona käsitellään sähköuunilla eikä nikkelipuolella käytetä konverttereita. Kuparintuotannon prosessikaavio on esitetty liitteessä 1.

3.1 Raaka-aineet

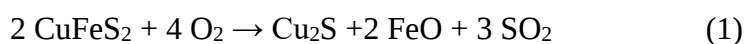
Sulaton raaka-aineet eli rikasteet tuodaan joko Porin satamaan laivalla ja sieltä junalla Harjavaltaan tai kuorma-autoilla suoraan harjavaltaan. Rikasteet puretaan purkuasemalla ja syöttöseos homogenisoidaan petausasemalla sekoittamalla eri rikasteet samaan kasaan eli petiin, josta purkulaite purkaa sen tasaisena seoksena. Syöttöseokseen sekoitetaan hiekkaa eli silikaatti (SiO_2) kuonanmuodostajaksi. Valmis syöttöseos kuivataan höyrykuivaimessa. Kuiva rikaste on erityisen tärkeää liekkisulatuksen toiminnan kannalta. Rikasteet sisältävät keskimäärin 20-30 prosenttia kuparia.

3.2 Liekkisulatus

Liekkisulatus perustuu rikasteen hapetusreaktioiden eli oman palamislämmön hyödyntämiseen sulatuksessa. Tämän vuoksi liekkisulatusmenetelmä vaatii vain vähän ulkoista energiaa öljyn muodossa ja happirikastettua ilmaa. Liekkisulatusuunin tuotteena on noin 64 % kuparia sisältävä kuparikivi.

Liekkisulatusuuni koostuu rikastepolttimesta, reaktiokuilusta, nousukuilusta ja alauunista. Rikastepolttimen tehtävä on muodostaa tasainen suspensio prosessi-ilmasta ja syöttöseoksesta. Reaktiokuilussa tapahtuu suurin osa palamisreaktioista. Nousukuilua pitkin johdetaan palamiskaasut lämmön talteenottokattilaan.

Liekkisulatuksen kemialliset reaktiot etenevät seuraavien kaavojen mukaisesti:





Alauunissa kuona ja kivi erottuvat toisistaan tiheyserojen seurauksena niin, että ras-
kaampi kivi vajoaa pohjalle jättäen päälle kuonakerroksen. Kivi siirretään padoissa
konvertointiin ja kuona viedään jäähdyttäväksi ja käsiteltäväksi kuonarikastamalla.
(Pihkala 2018, 282)

3.3 Konvertointi ja anodiuuni

Konvertoinnin tarkoituksena on erottaa kuparikivestä rauta, rikki ja muut epäpuhtau-
det. Harjavallan sulatolla on käytössä Peirce-Smith-konvertointimenetelmä. Käytössä
on kolme pienempää ja yksi isompi konvertteri, joista yleensä yksi on huollettavana ja
kolme käytössä niin, että kaksi konvertteria puhaltaa, kun yhtä panostetaan. Konver-
tointi tapahtuu puhaltamalla happirikastettua ilmaa hormien kautta kahdessa eri vai-
heessa, joita kutsutaan kuonapuhallukseksi ja rikkaaksipuhallukseksi. Konvertoinnista
saatava tuote on noin 98 % raakakupari, jota kutsutaan myös blisterikupariksi.

Kuonapuhalluksessa rautasulfidi hapettuu rikkidioksidiksi ja rautaoksidiksi. Rautaok-
sidista ja hiekasta muodostuu fayaliittikuonaa (Fe_2SiO_4). Kevyempi kuona nousee pin-
nalle ja voidaan kaataa pois konvertterista. Konvertterikuona viedään jäähdytykseen
ja kuonarikastamolle käsiteltäväksi. Rikkaaksipuhalluksessa kuparisulfidi hapetetaan
rikkidioksidiksi ja jäljelle jää metallista kuparia eli raakakuparia. Molempien vaihei-
den reaktiot ovat eksotermisiä eli niissä syntyy lämpöä. Tämän vuoksi konvertteriin
lisätään jäähdykkeeksi käytettyjä kuparianodeja ja muuta kuparipitoista romua. Tämän
jälkeen sula kupari siirretään anodiuuneihin, joissa raakakuparista poistetaan loput
epäpuhtaudet. Konvertoinnista jäänyt rikki hapetetaan ja happi poistetaan propaani-
kaasulla. (Pihkala 2018, 284)

3.4 Elektrolyysi

Lähes puhdas anodikupari sisältää kuitenkin jonkin verran epäpuhtauksia, kuten nikkeliä, sinkkiä, kultaa ja hopeaa. Elektrolyysikennossa elektrodit eli anodi ja katodi on upotettu kuumaan rikkihappoa ja kuparisulfaattia sisältävään liuokseen. Sähkövirtaa johdetaan kennon läpi, jolloin sähköenergia muuttuu kemialliseksi energiaksi ja elektrodilla tapahtuu halutut hapettumis-pelkistymisreaktiot. Anodikupari hapettuu ja liukenee elektrolyyttiliuokseen, jonka jälkeen pelkistyy katodille puhtaana kuparina. Epäjalot metallit liukenevat, mutta eivät pelkisty vaan jäävät liuokseen. Kuparia ja lommatt metallit eivät liukene, vaan vajoavat altaan pohjalle liejuksi. (Hänninen et al. 2019 157-159)

Kuparin liukeneminen anodilta kestää noin 21 vrk ja pelkistyminen katodille noin 7 vrk. Katodit pestään, jonka jälkeen ne ovat valmiita toimitettavaksi asiakkaille. Käytetyt anodit viedään takaisin Harjavallan sulatolle käytettäväksi konverttereissa jäähdykkeenä. Elektrolyysistä saadaan sivutuotteena kultaharkkojen ja hopearakeiden lisäksi seleeniä, kuparitelluridia, kupari- ja nikkelisulfaattia, platinapalladium-rikastetta sekä jalometalleja sisältävää Dore-kuonaa. (Pihkala 2018, 286-287)

3.5 Kaasujen käsittely

Kuparin liekkisulatuksessa sekä konvertoinnissa syntyy paljon rikkidioksidipitoista kaasua, josta valmistetaan rikkihappoa. Liekkisulatusuunin ja konvertoinnin kaasut johdetaan ensin lämmöntalteenottokattilaan ja sen jälkeen sähkösuodattimeen kiinteiden epäpuhtauksien poistamiseksi. Seuraavaksi kaasut johdetaan rikkihappotehtaalle, jossa kaasusta poistetaan loput epäpuhtaudet ja puhtaasta rikkidioksidista valmistetaan rikkihappoa (H_2SO_4) ja nesteytettyä rikkidioksidia. Vähemmän rikkidioksidia sisältävät kaasut, kuten sulan laskusta ja konvertterihallin katosta poistetut kaasut neutraloidaan kalkilla ja suodatetaan pussisuodattimilla.

4 KUONARIKASTAMO

Kuparisulatoissa käytetään kuonan puhdistukseen yleisesti sähköuunia tai harvinaisemmin kuonarikastusta. Kuonarikastuksella saavutetaan parempi talteensaanti, kuin sähköuunilla. Sähköuunin etuna taas on kuonan hyötykäyttö esim. sepelinä. Korkea talteensaanti on taloudellisesti merkittävää, koska sulatto saa lisätuloa vapaista metalleista. Vapaat metallit tarkoittavat sopimuksessa määritellyn talteensaannin ylittävää määrää.

Kuonarikastamo käsittelee kuparisulatolla syntyvän liekkisulatusuunin kuonan sekä konvertterien kuonan, palauttaen kuonan kuparin sulatolle. Kuonarikastamon lopputuotteena syntyy kuparirikastetta ja jätteenä hienokuonaa, joka läjitetään Boliden Harjavallan läjitysalueelle Sievariin. Rikastamon prosessikaavio on esitetty liitteessä 2.

4.1 Kuonan jäähdytys ja ylösajo

Kuona koostuu pääasiassa kuparihohteesta eli kalkosiitista (Cu_2S), fayaliitista (Fe_2SiO_4), magnetiitista (Fe_3O_4) ja lasista (SiO_2). (Bolidenin sisäinen tietokanta) Kuona jäähdytetään suhteellisen pienellä vesimäärällä niin, että kuona jäähtyy hitaasti (n. 48h). Vaahdotuksen onnistumisen kannalta on tärkeää, että kuona jäähtyy hitaasti ja muodostaa metallisia ja sulfidisia partikkeleita. Kuonaan liuenneet ja toisaalta liian pienet partikkelit, joita ei jauhatuksessa saada eroteltua, menetetään vaahdotuksessa. (Jalkanen et al. 2010, 3)

Liekkisulatusuunin ja konvertterien kuona kuljetetaan jäähtymään patajäähdytyskennälle, jossa kuona jäähdytetään vesisuihkun alla. Jäähtymisen jälkeen kuona kaadetaan padasta, ja kuljetetaan kauhakuormaajalla rikotusritilälle, jossa isompia kappaleita voidaan tarvittaessa rikkoa kauhalla. Hihnakuljetin vie kuonan rikastamon ylimpään kerrokseen seulottavaksi. Seula on epäskeskollla toimiva kaksitasoseula, jolla materiaali erotetaan koon mukaisesti joko lohkar-, pala-, tai murskesiiloon. Kuonan ylösajolla tarkoitetaan rikastamon tapauksessa siilojen täyttämistä edellä mainitusti.

4.2 Murskaus ja jauhatus

Palakokoista kuonaa murskataan kartiomurskaimella noin 12-15 mm kokoon. Murskaa syötetään myllyihin jatkuvatoimisesti ja lohkaraita panosmaisesti myllyn tehon mukaan. Molemmat materiaalit syötetään lohkaremyllyihin tärysyöttinten ja hihnakuljettimien avulla.

Kuonarikastamon jauhatuspiiriin kuuluu kaksi lohkaremyllyä (n. 1500 kW ja 1200 kW), jotka ovat SAG-myllyjä ja kaksi palamyllyä, jotka ovat kuulamyllyjä. Palamyllyihin ei syötetä lainkaan kiinteää tavaraa, vaan pelkkää lietettä, jota saadaan primääri-vaahdotuksen alitteena. Lohkaremyllyt toimivat suljetussa piirissä niin, että molempien myllyjen tuote laskee pumppukaivoon, josta se pumpataan syklonille, joka taas erottaa vaahdotukseen menevän ylitteen ja takaisin myllyyn palaavan alitteen. Palamyllyt toimivat samanlaisessa suljetussa kierrossa. Jauhatuksen teoriaa käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.

4.2.1 Jauhatuspiirin ohjaus

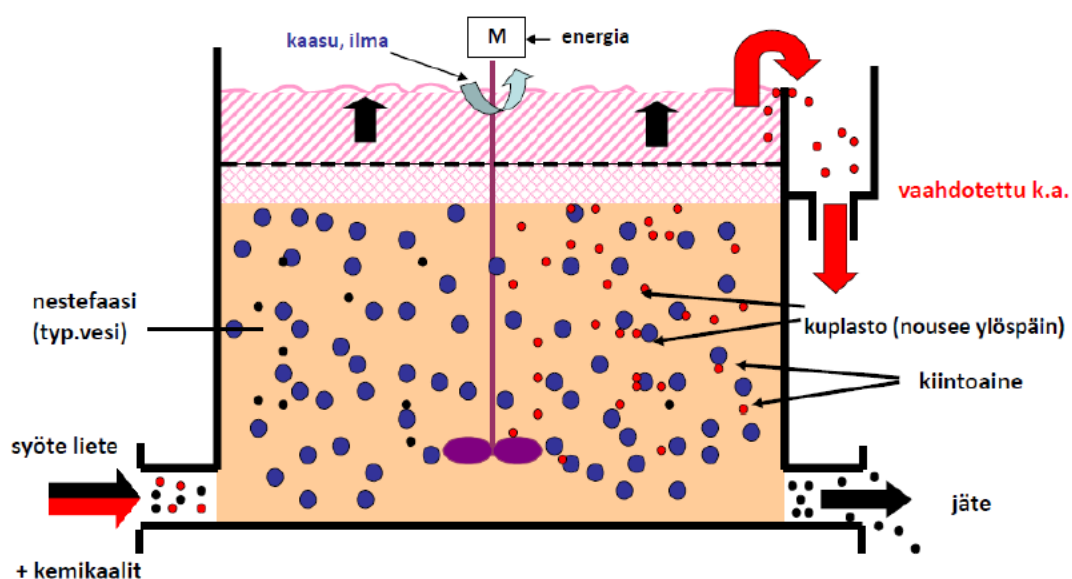
Jauhatukseen syötetään pääasiassa lohkarikokoista ja murskekokoista kuonaa. Murskeensyöttö on jatkuvaa ja tapahtuu siilosta hihnasyöttimen avulla. Lohkarsiiloista kuona puretaan tärysyöttimillä tarpeen mukaan. Molemmat syötteet kulkevat samoja hihnakuljettimia pitkin jakohihnakuljettimelle, joka vaihtaa suuntaa riippuen siitä kumpaan myllyyn halutaan syöttää. Primäärijauhatusta ohjataan automaattisesti niin, että myllyn tehon laskiessa alle määritetyn rajan, lohkarisyöttimet käynnistyvät ja säävutettuaan tarpeeksi korkean tehon, syöttimet sammuvat.

4.3 Vaahdotus

Kun raekoko on tarpeeksi hienoa, se voidaan rikastaa erottamalla arvomineraalit arvottomista käyttämällä esimerkiksi vaahdotusta, laskeutusta, liuotusta tai magneettista erotusta. Boliden Harjavallan kuonarikastamolla käytetään vaahdotusmenetelmää,

jossa kokoojakemikaalina käytetään natriumisobutyliksantaattia ja vaahdotusöljynä Dowfroth nimistä polypropyleeniglykoli-monometyylieetteriä.

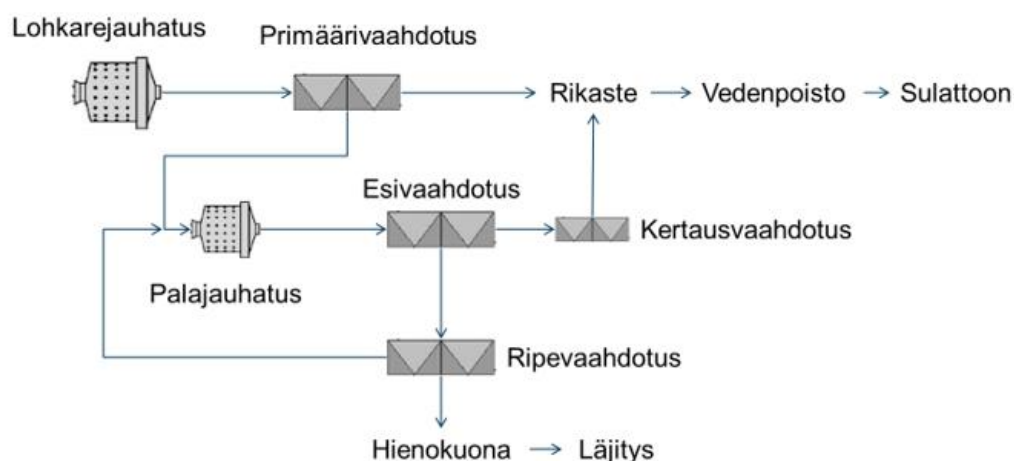
Vaahdotusta käyttämällä melkein mikä vain hienojakoinen mineraali voidaan erottaa muista, kunhan halutun mineraalin pinta on hydrofobinen (vettä hylkivä) ja ei-toivotun mineraalin hydrofiilinen (vesihakuinen). Hydrofobiset mineraalit tarttuvat ilmakuplan pintaan sähköisten varausten vaikutuksesta. Mineraaleista voidaan tehdä selektiivisesti hydrofobisia kokoojakemikaaleilla. Ilmakuplat saadaan aikaan puhaltamalla ilmaa vaahdotuskennon pohjalta. Ilmakuplat eivät kuitenkaan pysty kantamaan mineraalirakeita veden korkeasta pintajännityksestä johtuen, joten pintajännitystä on alennettava vaahdotteella. Vaahdotte myös muodostaa vaahdon, joka on tarpeeksi vahvaa kuljettaakseen arvomineraalit rikasteränniin.



Kuva 1. Vaahdotuksen periaate. (Kaiva.fi)

Kuonarikastamolla vaahdotus alkaa primäärisiltä vaahdotuskennoilta, joihin lohkaremyllyjen tuote eli syklonien ylite ajetaan. Primäärivaahdotuksen rikaste ajetaan rikastekaivoon ja jäte välijätekaivon kautta palamyllyille. Palamyllyjen tuote käsitellään

kahdella esivaahdotuskennolla ja ripevaahdotuskennolla, jonka lopullisena jätteenä saadaan hienokuonaa. Ensimmäisen esivaahdotuskennon rikaste ajetaan kertausvaahdotukseen ja toisen esivaahdotuskennon rikaste primäärivaahdotukseen. Kertausvaahdotus koostuu kahdesta kennosta, joiden rikaste ajetaan rikastekaivoon ja jäte välijätekaivoon.



Kuva 2. Kuonarikastamon jauhatus- ja vaahdotuspiiri.

4.4 Sakeutus ja suodatus

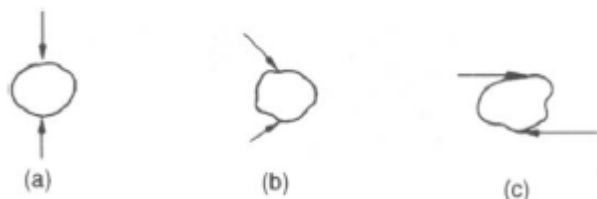
Normaalitilanteessa valmis rikasteliete pumpataan sulaton sakeuttimeen ja siitä suodatetaan vesi Larox-suodattimella. Tämän jälkeen valmis kuonarikaste syötetään muun syötteen mukana höyrykuivaimeen ja sitä kautta takaisin kiertoön. Jos jostain syystä kuivaamo ei pysty käsittelemään kuonarikastetta esimerkiksi syötön ollessa pois päältä, liete käsitellään rikastamon omalla sakeuttimella ja Larox-suodattimella.

Koska kuonarikaste on jo kerran käynyt sulatusprosessin läpi, se sisältää vähemmän rikkiä ja siksi omaa pienemmän lämpöarvon. Tämän ominaisuuden vuoksi se toimii syöttöseoksessa jäähdykkeenä eli alentaa rikasteen lämpöarvoa.

5 JAUHATUKSEN TEORIAA

Mineraalien hienontamisen tavoite on tarpeeksi hieno materiaali, jotta arvomineraalit erottuvat arvottomista. Vasta tämän jälkeen voidaan lopullinen erotus eli rikastus suorittaa. Kiteisen kappaleen rikkomien tapahtuu, kun voitetaan sen sisäiset sidosvoimat. Kiteinen kappale murtuu helpoiten epäjatkuvuus- ja epähomogeenisuuskohdista. Kun syöte hienontuu, myös hienontaminen vaikeutuu näiden kohtien vähentyessä. (Lukkarinen 1985, 71)

Jauhatuksella tarkoitetaan mineraalitekniikassa suhteellisen karkean, yleensä murskan jauhamista hienommaksi saavuttaen tavoitteesta riippuen tietty puhtaaksijauhatusaste, hienousaste tai muu teknillinen tai taloudellinen tavoite. Sulfidimalmien vaahdotus vaatii yleensä jauhamista vähintään 0,2-0,3 mm karkeuteen.



Kuva 3. Kappaleen hienonnustapoja: a) isku tai puristus b) leikkaus c) hiertyminen (Wills & Napier-Munn 2006, 147)

5.1 Raekoko

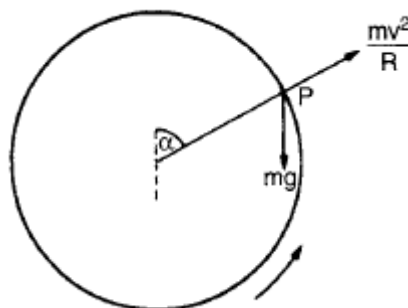
Mineraalirakeet ovat yleensä epäsäännöllisiä, jonka vuoksi absoluutista raekokoa ei ole olemassa. Raekoon ilmaisuun käytetään useita eri tapoja, joista yleisin on rakeen läpäisemän neliömäisen seula-aukon pituus. Raekoko voidaan määrittää monella tavalla, kuten seulomalla, mikroskoopin avulla, Coulter-Counter-tekniikalla tai säteilyn sirontaan perustuvalla menetelmällä. (Lukkarinen 1985, 13)

5.2 Puhtaaksijauhatusaste

Puhtaiksi rakeiksi kutsutaan vain yhtä mineraalia sisältävää raetta ja sekarakeiksi useampaa mineraalia sisältäviä rakeita. Puhtaaksijauhatusaste ilmaisee puhtaiden rakeiden määrää prosentteina suhteessa kokonaismäärään. Karkeiden rakeiden puhtaaksijauhatusastetta voidaan arvioida paljain silmin tai suurennuslasilla, mutta hienompien rakeiden kohdalla tarvitaan mikroskooppia. Käytännössä puhtaiden rakeiden määrä on yleensä laskettua pienempi ja sekarakeiden suurempi, sillä puhdas rae ei esiinny tutkittavassa pintahieessä sekarakeena, mutta sekarae voi esiintyä puhtaana. (Hukki, R.T. 1964, 97)

5.3 Pyörimisnopeus

Yleensä myllyjä ajetaan tasaisella pyörimisnopeudella. Myllyn nopeus ilmoitetaan yleisesti osuutena kriittisestä kierrosnopeudesta. Kriittinen nopeus tarkoittaa sitä kierrosnopeutta, joka saa aikaan riittävän suuren keskipakovoiman pitämään jauhinkappaleet myllyn kehällä (kuva 4.). Nopeutta kutsutaan alikriittiseksi, jos nopeus on alle kriittisen nopeuden ja ylikriittiseksi, jos nopeus on suurempi kuin kriittinen nopeus. Käytännössä kaikkia myllyjä käytetään alikriittisellä nopeudella, sillä ylikriittinen nopeus aiheuttaa mm. vuorauksen liiallisen kulumisen. (Lukkarinen 1985, 178-180)



Kuva 4. Jauhinkappaleeseen vaikuttavat voimat (Wills & Napier-Munn 2006, 148)

Tällöin kriittinen nopeus voidaan laskea kaavan 4 mukaisesti.

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} \quad (4)$$

missä n_c on kriittinen nopeus rpm, D on myllyn sisähalkaisija ja d on jauhinkappaleiden halkaisija (m).

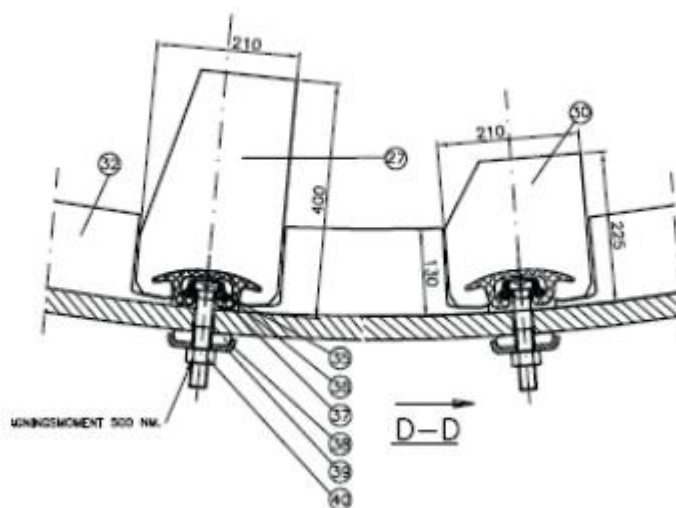
Bolidenin kuonarikastamon lohkaemyllyt ovat halkaisijaltaan 4,288 m ja 3,788 m vuoraukset mukaan lukien. Näin ollen kriittiset nopeudet ovat noin 20,4 rpm ja 21,7 rpm, kun ei oteta huomioon jauhinkappaleiden halkaisijaa, jota olisi vaikea arvioida epätasaisen kokojakauman vuoksi. Todelliset kierrosnopeudet lohkaemyllyissä ovat 14,8 rpm ja 14,2 rpm eli 73% ja 66% kriittisestä.

5.4 Myllyjen vuoraus

Boliden Harjavallan kuonarikastamolla on käytössä vuorausmateriaalina kumipalkit. Lohkaemyllyjen vuorausväli on noin 13 viikkoa. Vuorausväli on sama sekä sivu että päätypalkeilla, mutta yleensä niitä ei vuorata samanaikaisesti. Kuonarikastamolla käytetään Hi-Lo-vuorautta, jossa vaihdetaan joka toinen palkki, jolloin uudet palkit ovat korkeammalla.

Jauhatusmyllyjen sisäpuolinen vuoraus estää myllyn vaipan kulumista sekä edistää energian siirtoa jauhinkappaleisiin eli siis. Materiaali ja muoto vaihtelevat paljon riippuen jauhatuksen karkeudesta, tavoitteesta, malmin kovuudesta sekä myllyn tyypistä, koosta, rakenteesta ja nopeudesta. Kumipalkkien etuna teräkseen nähden on pienempi tiheys, mikä johtaa kevyempään vuoraukseen ja näin energian kulutukseen. Kumivuoraus vaimentaa myös ääntä noin 20 dB. Heikkouksina taas on huono pyyhkäisykestävyys sekä lämmön kesto, jonka vuoksia kumisia vuorauksia ei voida käyttää yli 80 °C

lämpötiloissa. Märkäjauhatuksessa lämpötila tosin ei yleensä nouse niin korkealle. (Lukkarinen 1985, 230)



Kuva 5. Hi-Lo- vuoraus. (Dandotiya et al. 2011, 3)

5.5 Jauhatuksen kustannukset

Jauhatuksen kustannukset muodostuvat pääasiassa energian eli sähkön kulutuksesta, vuorauksista ja jauhinkappaleista. Kustannusten osuudet vaihtelevat riippuen myllytyypistä. Autogeenimyllyissä kustannukset koostuvat n. 63 % energiasta ja 37 % vuorauksista. Semi-Autogeenimyllyissä n. 21 % kuulista, 21 % vuorauksista ja 58 % energiasta. Kuulamyllyissä taas kuulien osuus on n. 37 %, vuorausten 13 % ja energian 50 %. (Metso:Outotec, 58) Voidaan siis todeta, että mitä pienempi kuulapanos, sitä suurempi on vuorausten kulumisen osuus kustannuksista. Viimeisin ja käytännön kannalta keskeisin teoria liittyen energian ja hienonnuskoon suhteeseen on Fred Bondin 1952 esittämä Work Index. Bond teki paljon laboratoriomäärittäyksiä eri malmien ja kivien

energian kulutuksen määrittämiseksi. Energiaa kuluu jauhatuksessa halutun työn lisäksi moniin häviöihin, kuten myllyn mekaaniset häviöt, lietteen lämpötilan nousu ja melu. Tutkimuksissa on osoitettu, että n. 85 % pyöriksen nettoenergiasta muuttuu lämmöksi. Märkäjauhatusta kuluttaa n. 20 % vähemmän energiaa. (Lukkarinen 1985, 185. 192-193)

Energian kulutusta voidaan arvioida Bondin yhtälöllä (5):

$$W = 10 \times W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (5)$$

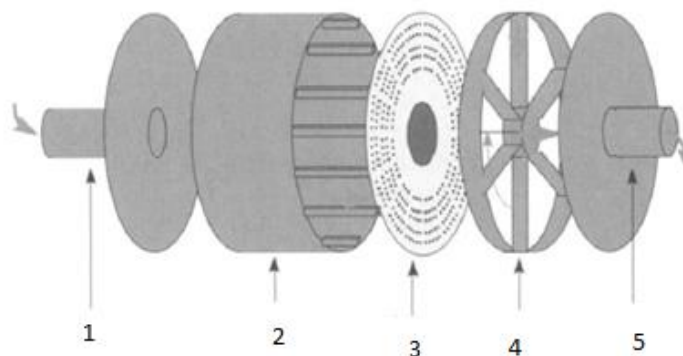
missä W on jauhatuksen kuluttama energia (kWh/sh.t.)
 W_i on materiaalille ominainen määritetty arvo (kWh/sh.t.)
 P on partikkelikoko (μm), jonka 80 % tuotteesta läpäisee
 F on partikkelikoko (μm), jonka 80 % syötteestä läpäisee

Work Index arvo esim. kuparimalmille on 12,72 kWh/sh.t, magnetiitille 9,97 kWh/sh.t., ja kuonalle (yleisesti) 10,24 kWh/sh.t. (Metso:Outotec handbook)

5.6 Myllytyypit

Jauhatusmyllyt ovat yleensä joko tanko-, kuula-, tai autogeenimyllyjä. Tankomyllyssä jauhinkappaleena toimivat terästangot, kuulamyllyssä teräskuulat ja autogeenimyllyssä jauhettava materiaali. Semi-Autogeeni eli SAG-myllyssä käytetään pientä kuulapanosta tehostamaan jauhatusta. Tuote voi poistua myllystä joko arinan läpi, jolloin kyseessä on arinamylly tai ylitteenä, mikä tarkoittaa ylitemyllyä. AG/SAG jauhatuksen etuna on alhaisempi investointikustannus ja kuulien vähäinen kulutus, jos kuulapanosta edes käytetään, sekä kyky käsitellä erityyppistä malmia, mukaan lukien tahmeat ja saviset syötteet. (Wills & Napier-Munn 2006, 149, 157, 162)

Harjavallan kuonarikastamolla käytössä olevat lohkaremyllyt eli primäärijauhatusmyllyt ovat semi-autogeenisiä arinamyyllyjä. Palamylyiksi kutsutut pienemmät sekundäärimyllyt ovat myös arinamyyllyjä. Lohkaremylly 1. on pituudeltaan 4,46 m ja sisähalkaisijaltaan 4,288 m, kun taas lohkaremylly 2. on pituudeltaan 5,24 m ja sisähalkaisijaltaan 3,788 m.



Kuva 6. Arinamyyllyn osat: 1) Syöttöholkki, 2) Myllyn vaippa, 3) Arina, 4) Lietteennostaja, 5) Purkuholkki (Wills & Napier-Munn 2006, 162)

5.7 Luokitus

Luokituksen tavoitteena on lajitella hienojakoinen materiaali kahteen tai useampaan osaan. Luokittimet jaetaan väliaineen perusteella pneumaattisiin ja hydraulisiin. Kuonarikastamolla käytössä on sykloni ja koska luokiteltava hienojakoinen materiaali on lietteessä, tarkempi nimitys on hydrosykloni. Hydrosyklonin toiminta perustuu keskipakovoimaan, joka syntyy lietteen joutuessa nopeaan kiertoliikkeeseen kartiomaaisessa kammiossa. Lieite muodostaa kaksi spiraalia kartioon, jonka sisempää osaa pitkin kevyemmät hiukkaset eli hieno materiaali purkautuu ylitteenä. Raskaammat hiukkaset eli karkeampi materiaali purkautuu syklonin alapuolelta aliteputkesta. (Pihkala 2018, 47-48)

5.8 Kiertokuorma

Suljetussa jauhatuspiirissä yksi oleellisimpia tietoja on kiertokuorma, joka tarkoittaa luokittimelta palaavan materiaalmäärän suhdetta syötteen määrään ($\frac{A_{lite}}{S_{yöte}} * 100\%$).

Jos kiertokuorma on esim. 200%, myllyn todellinen syöttö on kolminkertainen uuden materiaalin syöttöön nähden. Tutkimuksissa on todettu, että suurempi kiertokuorma johtaa suurempaan kapasiteettiin ja että useimmiten luokitin määrää jauhatuskapasiteetin myllyn sijaan. (Lukkarinen 1985, 277-280)

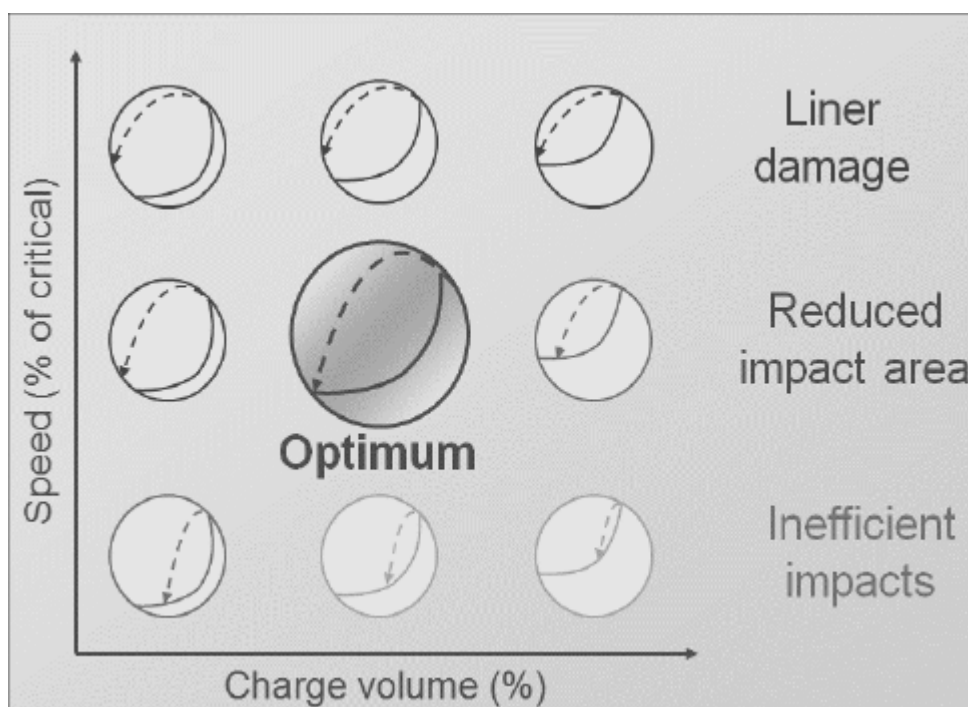
6 TÄYTTÖASTE

Täyttöasteella tarkoitetaan jauhinkappaleiden tilavuutta osuutena myllyn tilavuudesta. Täyttöaste voidaan laskea Bondin kaavalla (Bond 1961, 544) seuraavasti:

$$V = 113 - 126 \frac{H}{D} \quad (6)$$

missä V on täyttöaste %
 H on kuonapatjan korkeus myllyn katosta
 D on myllyn sisähalkaisija

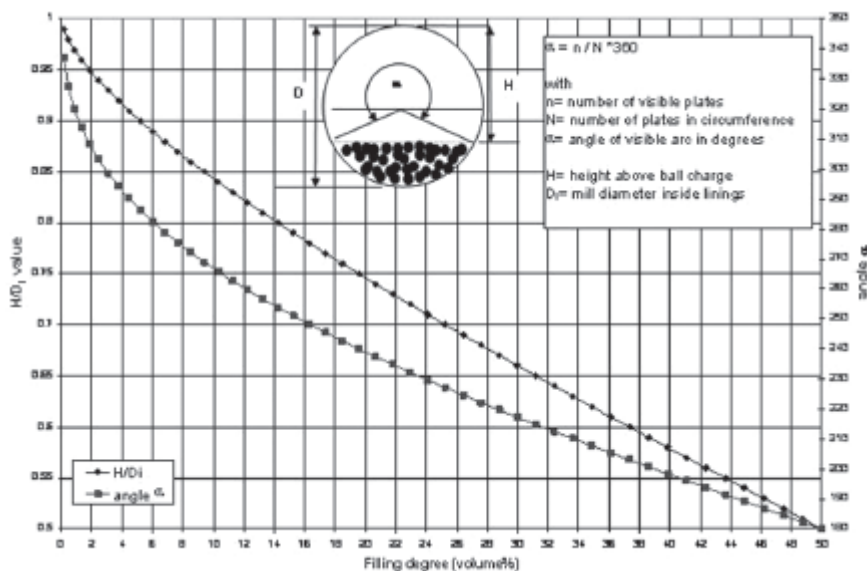
Oikealla täyttöasteella jauhaminen on tehokkaampaa ja vähentää turhia törmäyksiä kuulien ja vuorauksen välillä, jotka ovat suurin syy vuorausten kulumiseen ja myllyn värinä. Liian alhainen täyttöaste voi aiheuttaa kuulien ja vuorauksen kulumista, kun taas liian korkea täyttöaste vähentää jauhamisen tehokkuutta. (Xie, C et al, 2020, 2, 10)



Kuva 7. Täyttöasteen ja nopeuden vaikutus jauhatukseen. (Outotecin Millsense esitys. 2016)

6.1 Täyttöasteen mittaus

Yleisin käytössä oleva täyttöasteen mittaustapa on ns. crash stop eli täydestä kuormasta pysäyttäminen. Täyttöaste saadaan mittaamalla kuonapatjan korkeus vähintään kolmesta pisteestä myllyn pituussuunnassa. Vastaavasti voidaan myös laskea näkyvien palkkien määrä ja määrittää kulma (α), mutta tällä tavoin syntyy paljon suurempi epätarkkuus. Kuulamyllyjen tapauksessa suoritetaan ns. grind-out eli tyhjäksi jauhaminen, jossa myllyä ajetaan ilman syöttöä n. 10-20 min ajan. (Clermont B. 2010, 1) Korkeuden ja myllyn sisähalkaisijan perusteella voidaan määrittää täyttöaste joko kaavalla 6. tai kuvasta 8.



Kuva 8. Täyttöaste H/D arvon ja α perusteella. (Clermont B. 2010, 2)

Täyttöasteen mittaukseen on olemassa myös useita laitesovelluksia, jotka mittaavat täyttöastetta jatkuvatoimisesti. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi Sensomag ja Millsense. Täyttöaste on viimeisiä kriittisiä mittauksia, jotka vaativat edelleen toiminnan pysäyttämistä. Jatkuvatoimisella mittauksella täyttöasteen optimointi on taloudellisempaa ja tehokkaampaa. Laitteen toiminta perustuu kohtauskulman määrittämiseen värähtelyä mittaamalla. Kohtauskulmalla tarkoitetaan sitä kohtaa myllystä, johon materiaali iskeytyy. (Millsense presentation 2016)

7 KOKEELLINEN OSA

Tutkimuksen tarkoituksena oli heittokulman määrittäminen ja optimointi. Lohkaremyllyjen heittokulman simulointia varten oli suoritettava seuraavia mittauksia ja näytteenottoja:

- Lietetiheydet ja raekoot syklonien ylitteestä ja alitteesta sekä myllyn tuotteesta.
- Raekokojakauma myllyn sisältä.
- Syöttö (t/h)
- Myllyjen sähköteho (kW)
- Vesimäärät (m³/h)
- Täyttöaste (%)
- Kuulien syöttömäärä (t/vko)

7.1 Täyttöasteen mittaus

Täyttöasteen fyysistä mittausta ns. ”crash stop” -tyylisesti ei ole harjavallassa ennen mitattua, joten ennen työn aloittamista käytiin tarkkaan läpi kaikki turvallisuuteen liittyvät seikat. Suurimpia turvallisuusriskejä aiheuttavat kostea ja kuuma ympäristö, myllyn kattoon tarttuneet kuulat, jotka voivat pudota sekä lietteeseen uppoaminen. Mittaus luokitellaan säiliötyöksi, joka aiheuttaa yrityksen toimintatavoista riippuen tiettyjä toimenpiteitä. Ulkopuolella tulee olla vahti, jonka lisäksi on laadittava pelastussuunnitelma. Lämpötilan ja suuren höyrymäärän vuoksi myllyn on annettava jäähtyä riittävän kauan ennen sisäänmenoa.

Lohkaremyllyjen täyttöasteen mittaus suoritettiin 8.6.2021. Ennen myllyjen pysäytystä otettiin lietenäytteet rakokauhalla (ylite, alite ja myllyn tuote). Rakokauha on metallinen kauha, jossa on pieni suuaukko, jotta saadaan suuresta virtausmäärästä tasainen näyte. Näistä näytteistä analysoitiin raekokojakauma sekä lietetiheys, jotka on esitetty liitteistä 3-4.

Näytteenoton jälkeen mylly pysäytettiin tehon laskettua alimpaan arvoon juuri ennen lohkaropanoksen syöttöä. Sisälle päästiin noin puolentoista tunnin jäädyttämisen jälkeen. Ensimmäisenä havaintona kävi ilmi, että sisällä ei ollut juuri lainkaan vettä tai lietettä vaan molempien myllyjen sisällä oli kuivaa.

Täyttöasteen mittausta suoritettiin sekä mittaamalla rullamitalla kuonapatjan etäisyys katosta sekä laserkeilaamalla. Laserkeilauksen suoritti Takila Oy. Materiaalinäytteet otettiin lapiolla pitkittäin kolmesta eri kohdasta noin 20 cm syvyydeltä. Sisältä otettujen materiaalinäytteiden raekokojakauma liitteessä 6. Kuvat 9-11 on julkaistu Boliden Harjavallan luvalla.



Kuva 9. LM1 täyttöastemittauksessa.

Kuva 10. LM2 täyttöastemittauksessa



Kuva 11. Laserkeilain LM2:ssa.

7.2 Syötön mittaus ja laskenta

Kuonarikastamolla ei ole luotettavaa punnitusmenetelmää käytössä siilojen ja jauha-
tuksen välissä. Syöttömäärää voidaan siis arvioida joko ylösajomäärien avulla, jolloin
siilot aiheuttavat melko suurta epävarmuutta tai punnitsemalla hihnalla kulkevaa ma-
teriaalia käsin. Toinen vaihtoehto on yksinkertaisesti punnita hihnalla liikkuva mate-
riaali käsin ja mitata hihnan nopeus. Tässä epätarkkuutta aiheuttaa syötteen epätasai-
suus.

Hihnan nopeus mitattiin TRIFITEK TR-550 optisella takometrillä. Jakohihnalta, joka
jakaa syötteen myllyjen kesken otettiin kolme näytettä murskesyötön sekä molempien
lohkaresyöttimien ollessa erikseen päällä samoilla asetusarvoilla, kuin täyttöastemit-

tausta edeltävänä aikana. Näytteet punnittiin näytteenvalmistusosaston vaa'alla. Murskesyöttö on jatkuvaa ja lohkaresyöttimien käyntiaika saatiin Wedge- prosessianalyysiohjelmasta. Tuloksista saatiin laskettua keskimääräinen syöttö seuraavasti:

Hihnan nopeus	0,75 m/s
Lohkaresyötin 1 käyntiaika	101 min
Lohkaresyötin 2 käyntiaika	81 min
(8 tunnin aikana ennen mittausta)	

Taulukko 1. Syötön kokonaismäärän laskenta

		Syöttö			
	kg/m	Kg/s	kg/min	t/8h	t/h
Murske	12	9	540	259,2	32,4
Ls1	44,5	33,375	2002,5	201,585	25,19813
Ls2	52	39	2340	188,76	23,595

yht: 81,2 t/h

Syöttöä voidaan arvioida myös ylösajon eli siiloihin ajetun tonnimäärän perusteella. Saman tarkkailujakson eli täyttöastemittausta edeltävän kahdeksan tunnin aikana ylösajo oli yhteensä 570 t, mikä tarkoittaa keskimäärin 71,25 t/h. Molemmissa mittaauksissa on omat epätarkkuutensa, joten todellisen syötön voidaan arvioida olevan välillä 70-80 t/h. Keskimääräinen syöttö vuorokautta tai kuukautta kohti on huomattavasti pienempi, johtuen prosessissa tapahtuvista katkoksista.

8 TULOKSET

8.1 Täyttöaste

Rullamitalla suoritetuista mittauksista saatiin tulokseksi kuonapatjan korkeus katosta, sekä korkeuden (H) suhde halkaisijaan (D). LM1 ja LM2 korkeudet olivat vastaavasti 2807 mm ja 2560 mm ja halkaisijat 4288 mm ja 3788 mm, jolloin H/D arvoiksi saadaan 0,655 ja 0,676.

Käyttäen Bondin täyttöasteen kaavaa (6), saadaan täyttöasteeksi:

VLM1 30,5 %

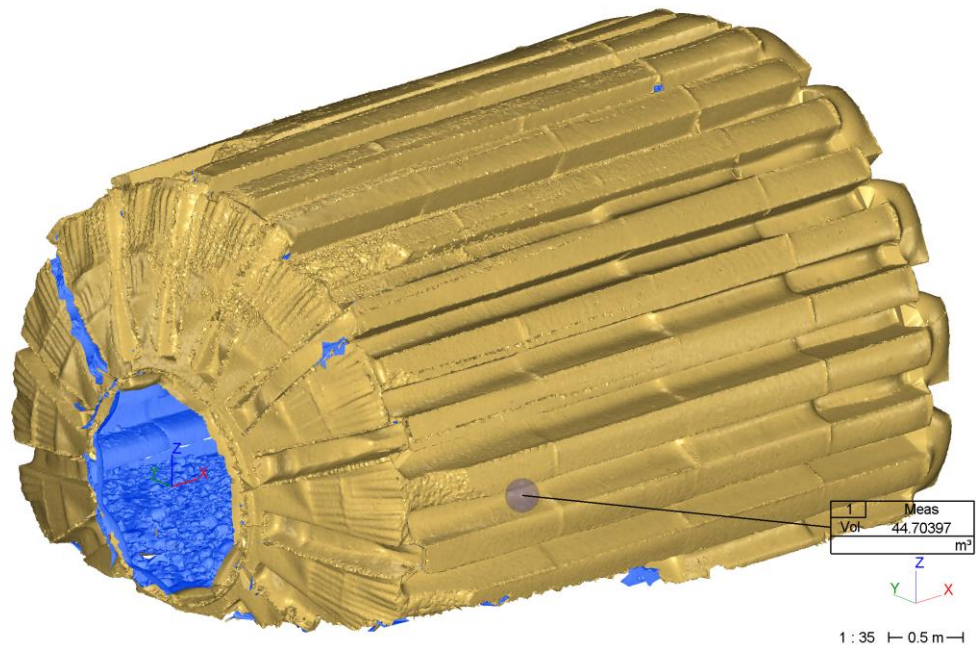
VLM2 27,8 %

Vertailuna täyttöaste voidaan myös lukea kuvan 8. taulukosta, jolloin

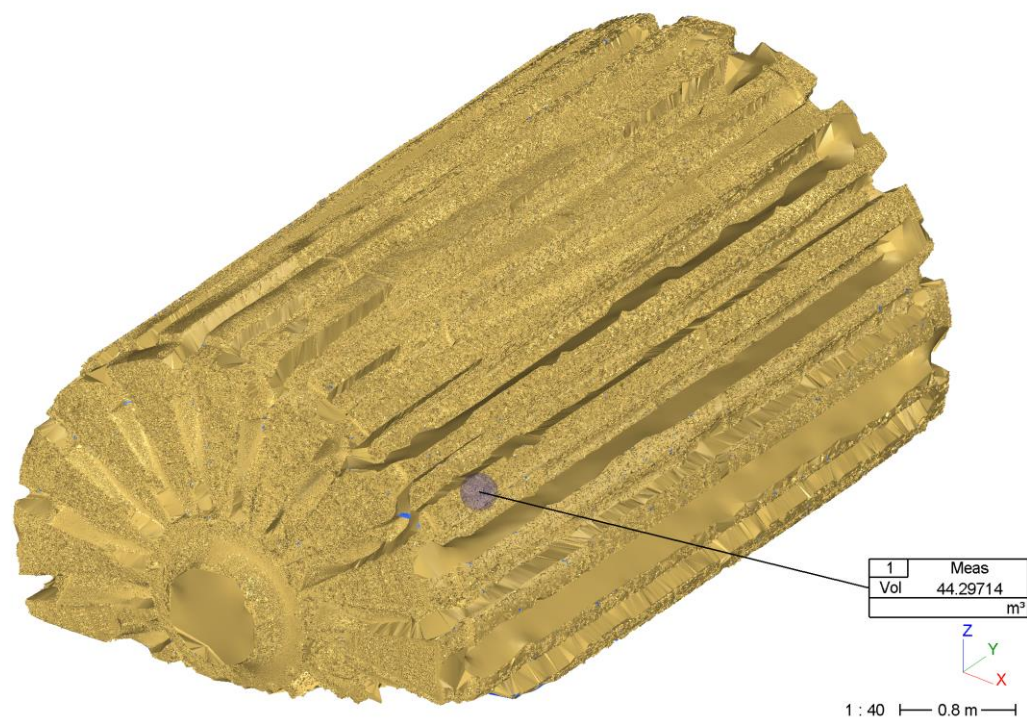
VLM1 31 %

VLM2 27 %

Tämän lisäksi täyttöaste voidaan laskea laserkeilausten perusteella.



Kuva 12. Laserkeilausten perusteella mallinnettu LM1:n tyhjä tilavuus.



Kuva 13. Laserkeilausten perusteella mallinnettu LM2:n tyhjä tilavuus.

Näiden tilavuuksien perusteella täyttöaste voidaan laskea ks. taulukko 2.

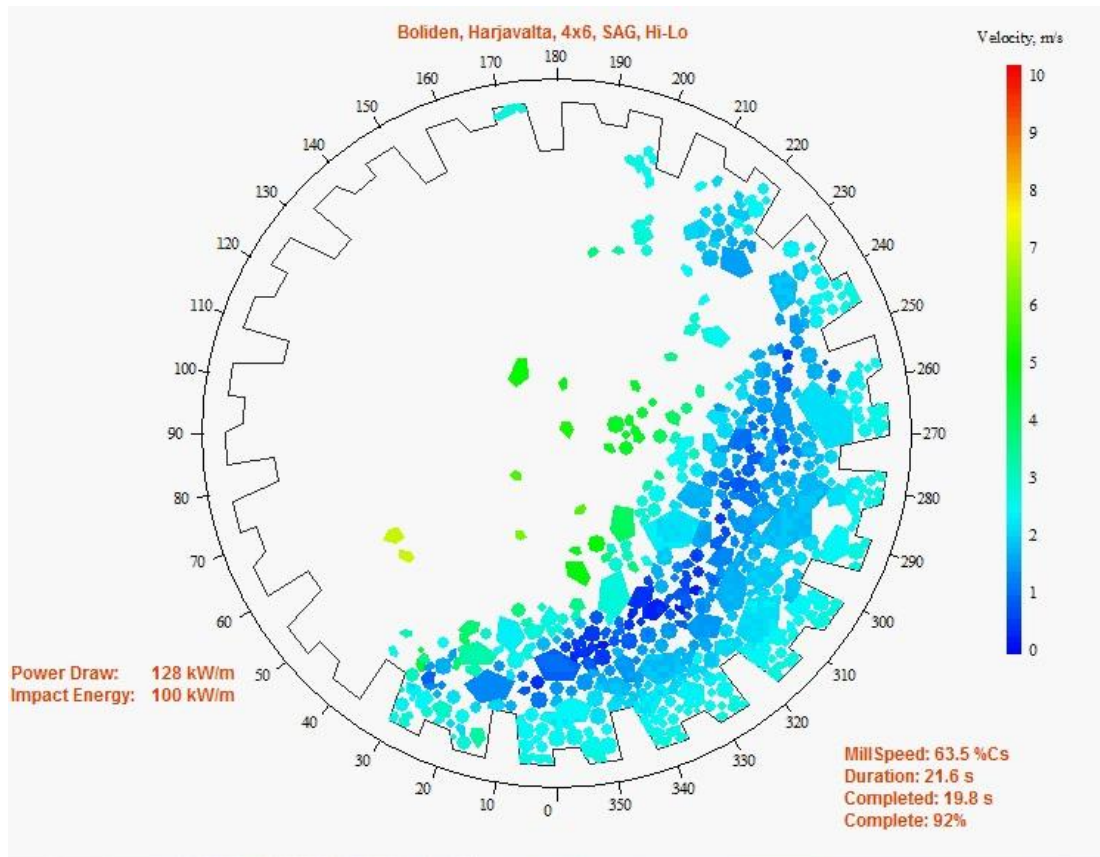
Taulukko 2. Täyttöaste laserkeilausten perusteella.

	LM1	LM2
Kokonaistilavuus (m ³)	64,40718	59,05288
Tyhjä tilavuus (m ³)	44,70397	44,29714
Jauhinkappaleiden tilavuus (m ³)	19,70321	14,75574
Täyttöaste (%)	30,59	24,99

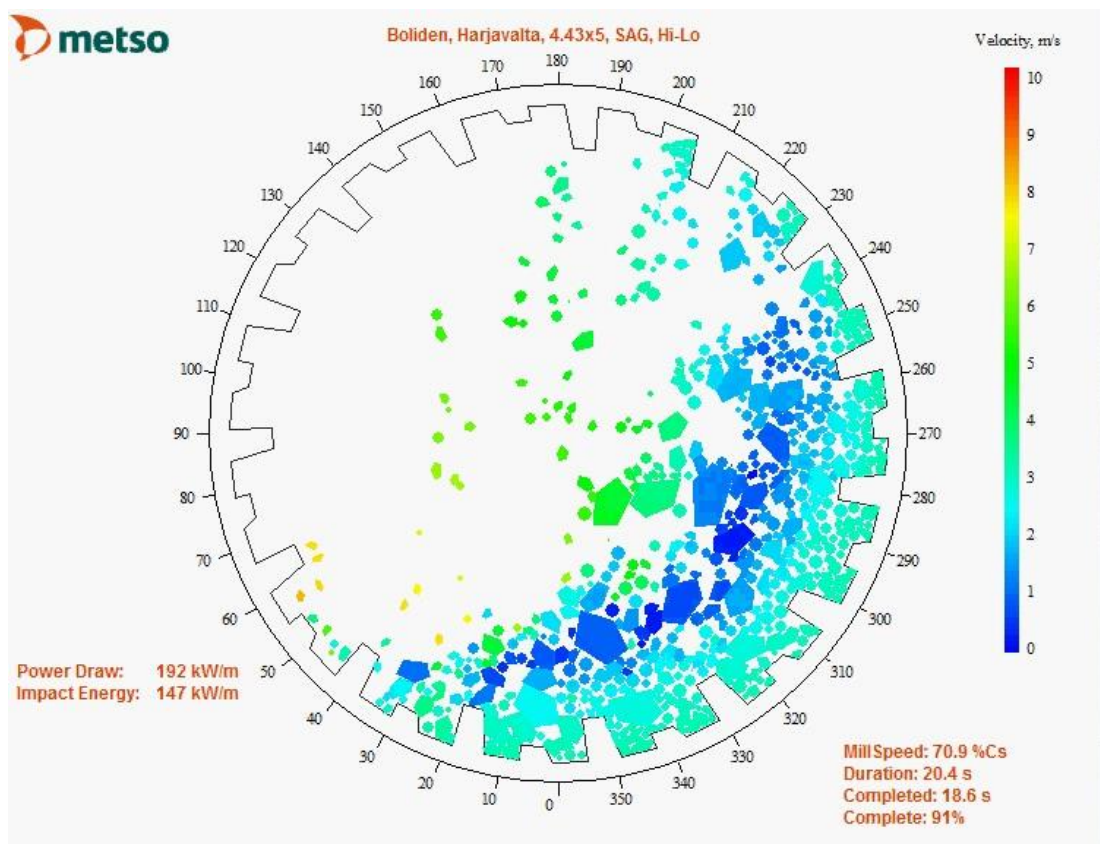
Näin ollen voidaan todeta, että lohwaremylly 1. ja lohwaremylly 2. keskimääräinen täyttöaste mittauksen aikana vastaavasti 30,7 % ja 26,6 %.

8.2 Heittokaari

Heittokaari tai liikerata simuloitiin Metson mallinnusohjelmalla. Ohjelmalla saadaan luotua videotiedosto, josta näkee jauhettavan materiaalin liikkeen ja liikeradan toiminnassa mitatuilla parametreilla. Simuloinnin helpottamiseksi molempien myllyjen kohdalla on käytetty 29 % täyttöastetta.



Kuva 14. Lohkaremylly 1. heittokaari.



Kuva 15. Lohkaremylly 2. heittokaari.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että täyttöaste vaikuttaa sopivalta kyseisillä ajoarvoilla. Lohkaremyllyjen 1. ja 2. täyttöasteet laskutavasta riippuen olivat keskimäärin vastaavasti 30,7 % ja 27,6 %. Täyttöaste ja heittokaari vastaavat melko hyvin kuvassa 7. keskellä näkyvää optimaalista tilannetta. Myöskään videon perusteella kuona ei näytä osuvan vuoraukselle vaan putoaa kuonapatjalle. Toisaalta suuremmat kappaleet eivät juurikaan putoa korkealta eikä niiden nopeus ylitä juurikaan 5 m/s, jonka perusteella voidaan päätellä, ettei jauhaminen tapahdu niiden osalta iskulla, vaan hiertämällä.

Lisäksi voidaan todeta, ettei yhdellä täyttöasteen mittauksella saada vielä kattavaa tulosta tilanteesta. Täyttöaste vaihtelee syöttöarvojen vaihtelun ja jauhattavan materiaalin epätasaisuuden vuoksi. Tämän vuoksi myöskään simulaatio ei kerro kattavasti keskimääräisestä tilanteesta, vaan kuvaa hetkellistä jauhamista hetkellä ennen täyttöaste-mittausta. Kattavamman tiedon saamiseksi täyttöasteen mittausta pitäisi suorittaa usein ja pidemmällä ajanjaksolla. Täydestä kuromasta pysäyttäminen ja käsin mittaminen on kuitenkin hidasta, epätarkkaa ja aiheuttaa tuotannon pysähtymistä, jonka vuoksi olisi kannattavaa käyttää jatkuvatoimista täyttöasteen mittausta. Tällöin täyttöasteen mittaus sekä säätäminen onnistuisi paremmin.

LÄHTEET

Asiakastieto www-sivut. Viitattu 3.9.2021

<https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/boliden-harjavalta-oy/15917399/taloustiedot>

ASM international www-sivut. Viitattu 3.9.2021

<https://www.asminternational.org/membership/awards/historical-landmarks>

Boliden Harjavallan www-sivut. Viitattu 15.8.2021 <https://www.boliden.com/fi/operations/smelters/boliden-harjavalta>

Boliden Harjavallan yritysesite 2020. Viitattu 15.8.2021

<https://indd.adobe.com/view/978b9e46-3492-45e2-9ad7-ae1c844ab22b>

Bond, F. 1961. Crushing and grinding calculations. Milwaukee: Allis-Chalmers industrial.

Dandotiya Rajiv, Decision Support Models for the Maintenance and Design of Mill Liners, Doctoral thesis. Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology, 2011.

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

Hänninen, H., Karppinen, M., Leskelä, M. & Pohjakallio, M. 2019. Tekniikan kemia 14.-15. painos. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy

Jalkanen, H., Vehviläinen, J., Poijärvi, J. 2010 Copper in solified sopper smelter slags. Scand J Metall

Kaiva.fi www-sivut. Viitattu 17.9.2021 <https://kaiva.fi/koulutus-ja-tyo/tyoelama-ja-ammattit/tuotantoprosessit/>

M. Korpi, O. Suominen, J. Jansson, J. Pihlasalo, M. Vilkkö. 2019 Plant-wide optimization of a copper smelter: how to so it in practice?

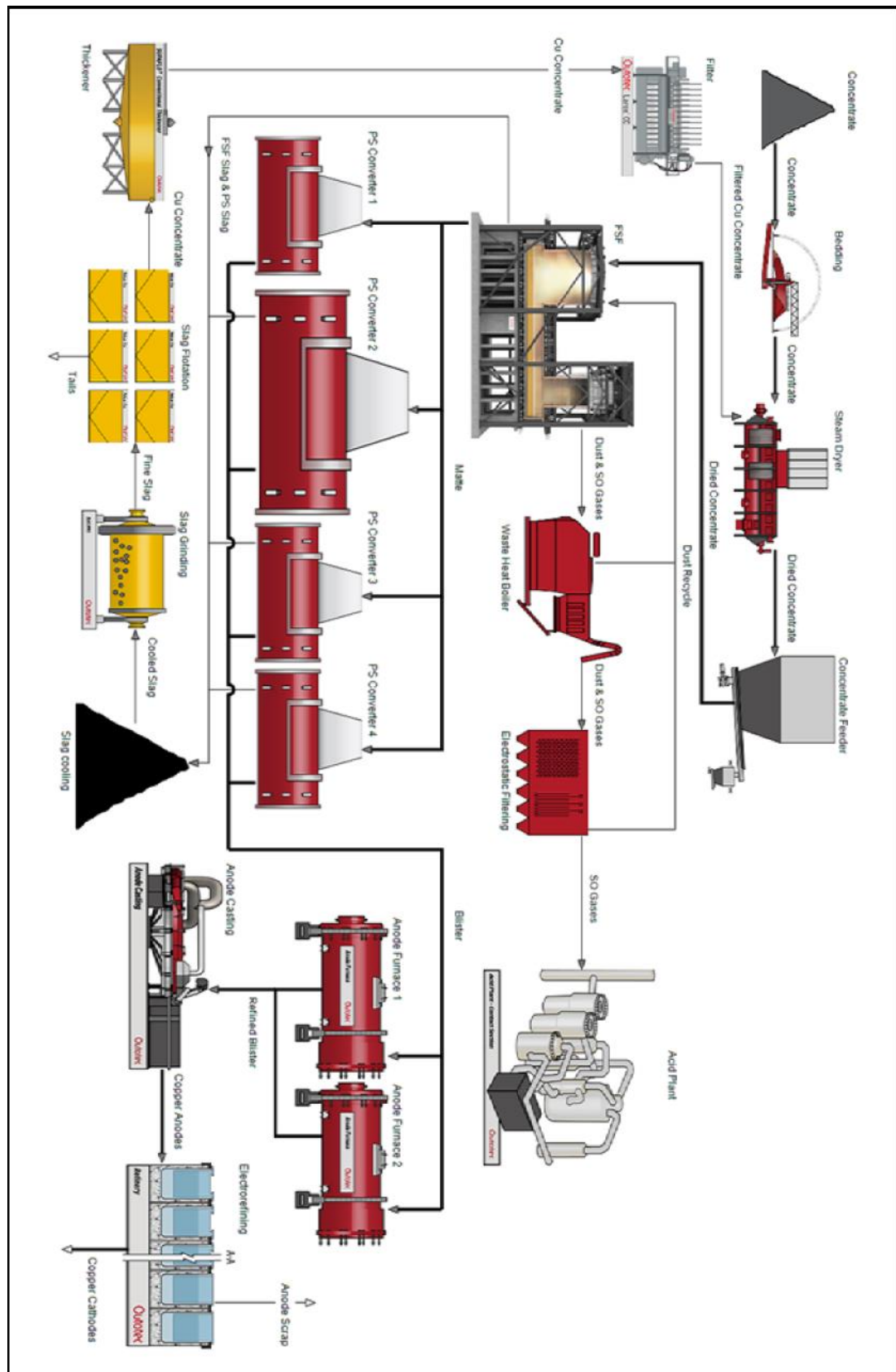
Metso:Outotec Basics in minerals processing handbook. 12. painos, 2021.

Pihkala J. 2018 Prosessiteknikka. 3. painos. Helsinki: Next Print Oy

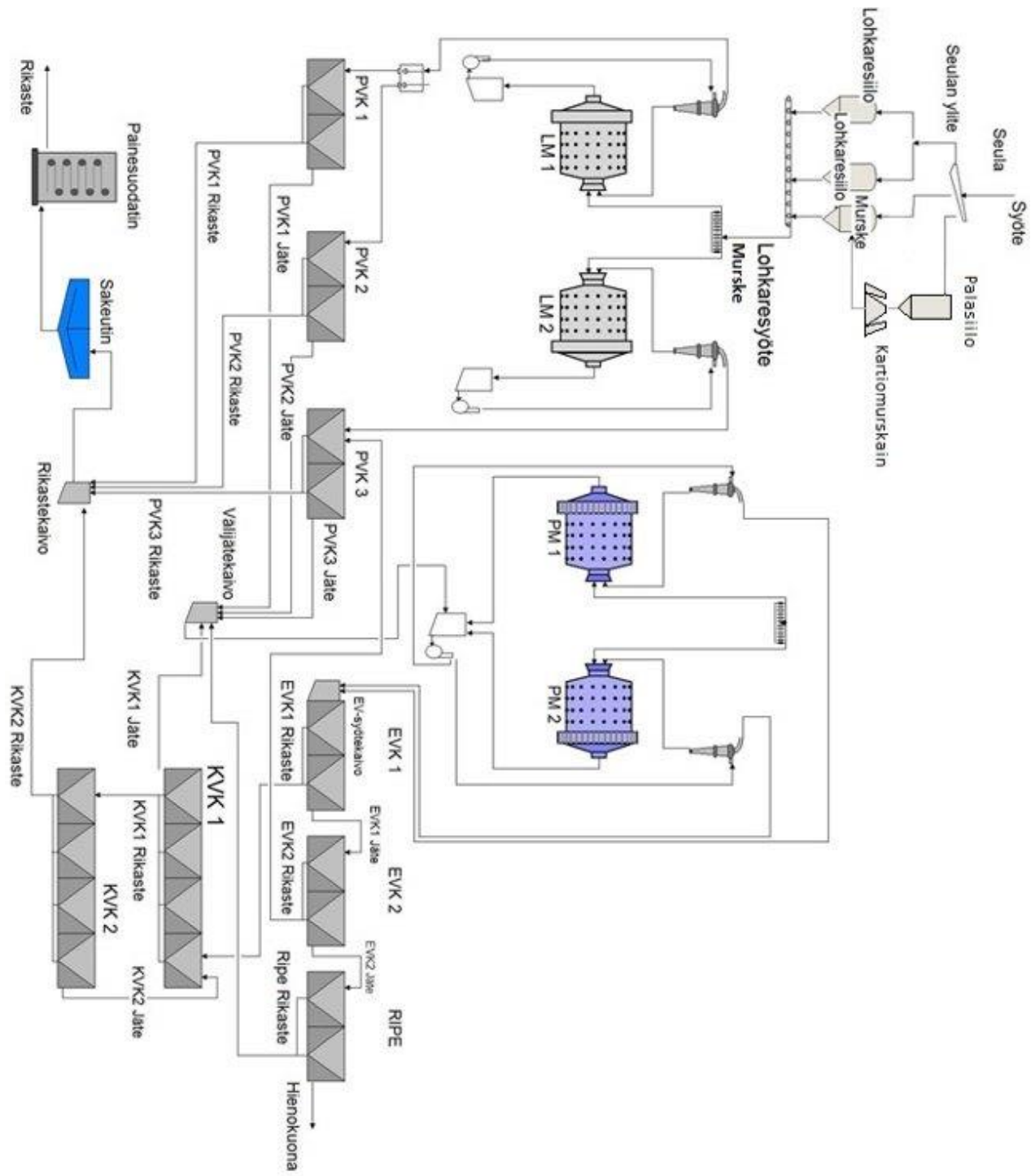
Wills, B.A. & Napier-Munn, T.J., Mineral processing technology. 7. painos. 2006.
Elsevier Science & Technology Books

Xie, C., et al, 2020 Investigation of the effect of filling level on the wear and vibration of a SAG mill by DEM. Particuology.

KUPARINTUOTANNON PROSESSIKAAVIO



KUONARIKASTAMON PROSESSIKAAVIO



LOHKAREMYLLY 1. PARTIKKELIKOKOANALYYSI

SEULA-ANALYYSI

Näyte : LM1 Syklonin ylitte	Seulonta:	x
Myllä ja jauhinkappaleet	Kuiva:	
k.a./vesijauh.aika	Märkä:	x
Proj.numero/Työtilaus	Käsin:	
Tilaaaja/Tekijä: Ts	Kone:	
Pvm: 12.7.2021	Uä-seulonta	

PUNNITTU SEULONNAN SYÖTE (KUIVA)

i	Käytettävissä olevat seulat	Käytetyt seulat	seulalle jäänyt		Kum. läpäisy %
			grs	%	
1			0,00		100,00
2				0,00	100,00
3				0,00	100,00
4				0,00	100,00
5	3350			0,00	100,00
6	2360			0,00	100,00
7	1700			0,00	100,00
8	1180			0,00	100,00
9	850			0,00	100,00
10	600			0,00	100,00
11	425			0,00	100,00
12	300	212	1,62	0,52	99,48
13	212	150	8,07	2,61	96,86
14	150	106	25,77	8,35	88,51
15	106	75	38,55	12,49	76,02
16	75	53	46,78	15,16	60,87
17	53	45	15,84	5,13	55,73
18	45	32	30,69	9,94	45,79
19	38	25	16,14	5,23	40,56
20	20	20	21,25	6,88	33,68
21		-20	103,95	33,68	0,00

KOKONAISMASSA(LASK.) 308,66 100,00

D80 = 84 µm
D50 = 37 µm

SEULA-ANALYYSI

Näyte : LM1 Syklonin alite	Seulonta:	x
Myllä ja jauhinkappaleet	Kuiva:	
k.a./vesijauh.aika	Märkä:	x
Proj.numero/Työtilaus	Käsin:	
Tilaaaja/Tekijä: Ts	Kone:	
Pvm: 12.7.2021	Uä-seulonta	

PUNNITTU SEULONNAN SYÖTE (KUIVA)

i	Käytettävissä olevat seulat	Käytetyt seulat	seulalle jäänyt		Kum. läpäisy %
			grs	%	
1			0,00		100,00
2				0,00	100,00
3				0,00	100,00
4				0,00	100,00
5	3350	2360	0,96	1,19	98,81
6	2360	1700	1,12	1,38	97,43
7	1700	1180	1,32	1,63	95,80
8	1180	850	1,64	2,03	93,77
9	850	600	1,84	2,27	91,50
10	600	425	2,35	2,90	88,60
11	425	300	3,81	4,71	83,89
12	300	212	6,02	7,44	76,46
13	212	150	9,43	11,65	64,81
14	150	106	10,74	13,27	51,54
15	106	75	8,54	10,55	41,00
16	75	53	8,13	10,04	30,95
17	53	45	2,13	2,63	28,32
18	45	32	3,80	4,69	23,63
19	38	25	1,83	2,26	21,37
20	20	20	2,45	3,03	18,34
21		-20	14,85	18,34	0,00

KOKONAISMASSA(LASK.) 80,96 100,00

D80 = 251 µm
D50 = 101 µm

LOHKAREMYLLY 1. PARTIKKELIKOKOANALYYSI

SEULA-ANALYYSI					
Näyte :		LM1 Myllyn tuote		Seulonta:	x
Mylly ja jauhinkappaleet				Kuiva:	
k.a./vesi/jauh.aika				Märkä:	x
Proj.numero/Työtilaus				Käsin:	
Tilaaja/Tekijä:				Kone:	
Pvm:		8.7.2021		Uä-seulonta	

PUNNITTU SEULONNAN SYÖTE (KUIVA)

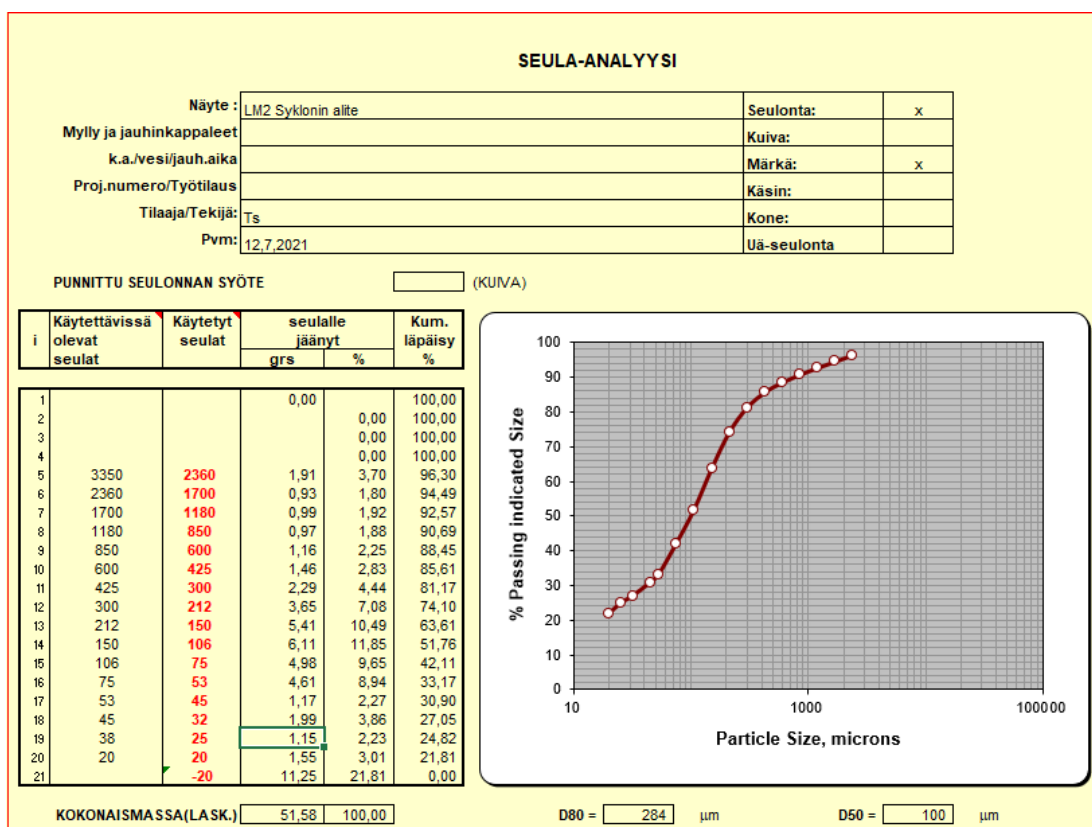
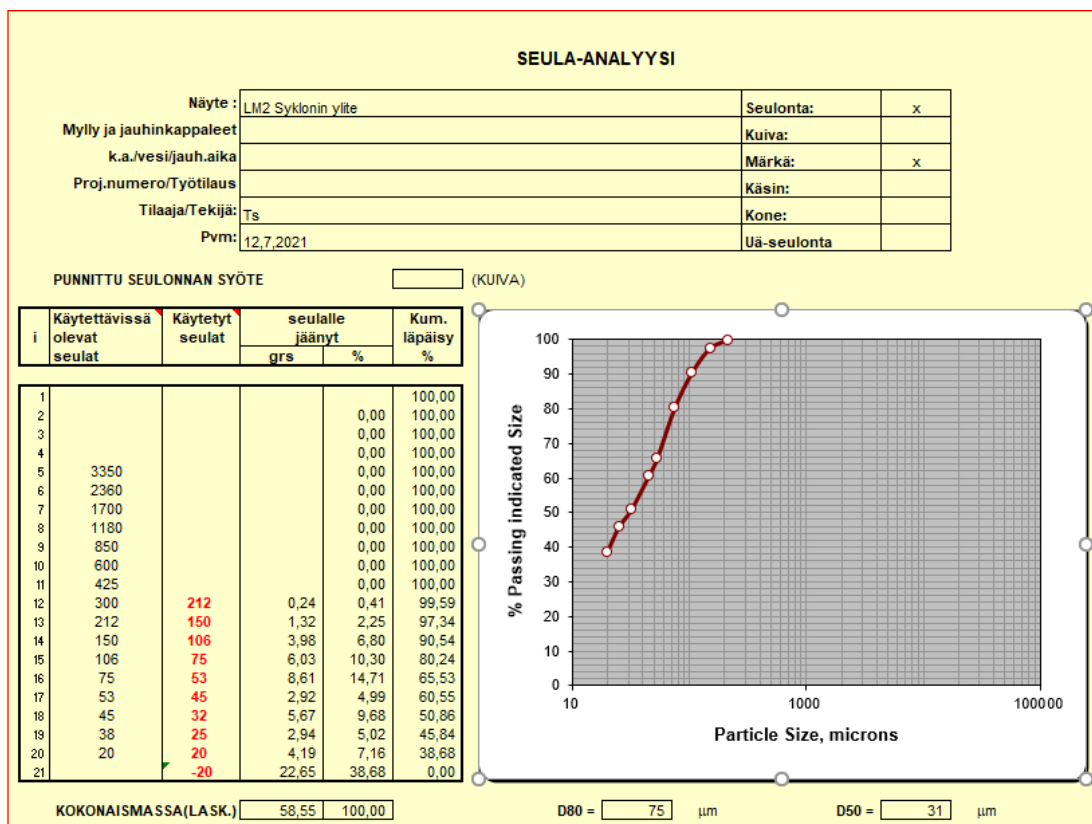
i	Käytettävissä olevat seulat	Käytetyt seulat	seulalle jäänyt		Kum. läpäisy %
			grs	%	
1			0,00		100,00
2				0,00	100,00
3				0,00	100,00
4				0,00	100,00
5	3350	2360	14,53	3,16	96,84
6	2360	1700	4,75	1,03	95,81
7	1700	1180	6,16	1,34	94,47
8	1180	850	5,78	1,26	93,22
9	850	600	7,07	1,54	91,68
10	600	425	8,28	1,80	89,88
11	425	300	13,59	2,95	86,93
12	300	212	20,59	4,47	82,45
13	212	150	36,81	8,00	74,45
14	150	106	50,87	11,05	63,40
15	106	75	49,61	10,78	52,62
16	75	53	54,95	11,94	40,68
17	53	45	16,60	3,61	37,07
18	45	32	14,81	3,22	33,85
19	38	25	32,12	6,98	26,87
20	20	20	22,71	4,94	21,94
21		-20	100,94	21,94	0,00

KOKONAISMASSA(LASK.) 460,17 100,00

D80 = 191 μ m D50 = 70 μ m

Particle Size, microns

LOHKAREMYLLY 2. PARTIKKELIKOKOANALYYSI



LOHKAREMYLLY 2. PARTIKKELIKOKOANALYYSI

SEULA-ANALYYSI					
Näyte :		LM2 Myllyn tuote		Seulonta:	x
Mylly ja jauhinkappaleet				Kuiva:	
k.a./vesijauh.aika				Märkä:	x
Proj.numero/Työtilaus				Käsin:	
Tilaaaja/Tekijä:				Kone:	
Pvm:		8.7.2021		Uä-seulonta	
PUNNITTU SEULONNAN SYÖTE (KUIVA)					

i	Käytettävissä olevat seulat	Käytetyt seulat	seulalle jäänyt		Kum. läpäisy %
			grs	%	
1			0,00		100,00
2				0,00	100,00
3				0,00	100,00
4				0,00	100,00
5	3350	2360	9,35	2,29	97,71
6	2360	1700	2,45	0,60	97,11
7	1700	1180	3,35	0,82	96,29
8	1180	850	3,20	0,78	95,51
9	850	600	4,19	1,03	94,49
10	600	425	5,41	1,32	93,16
11	425	300	10,09	2,47	90,69
12	300	212	16,90	4,13	86,56
13	212	150	32,75	8,01	78,55
14	150	106	50,15	12,27	66,28
15	106	75	45,60	11,16	55,12
16	75	53	54,96	13,45	41,67
17	53	45	10,15	2,48	39,19
18	45	32	29,76	7,28	31,91
19	38	25	8,53	2,09	29,82
20	20	20	15,08	3,69	26,13
21		-20	106,80	26,13	0,00

KOKONAISMASSA(LASK.) 408,72 100,00

D80 = 160 μm

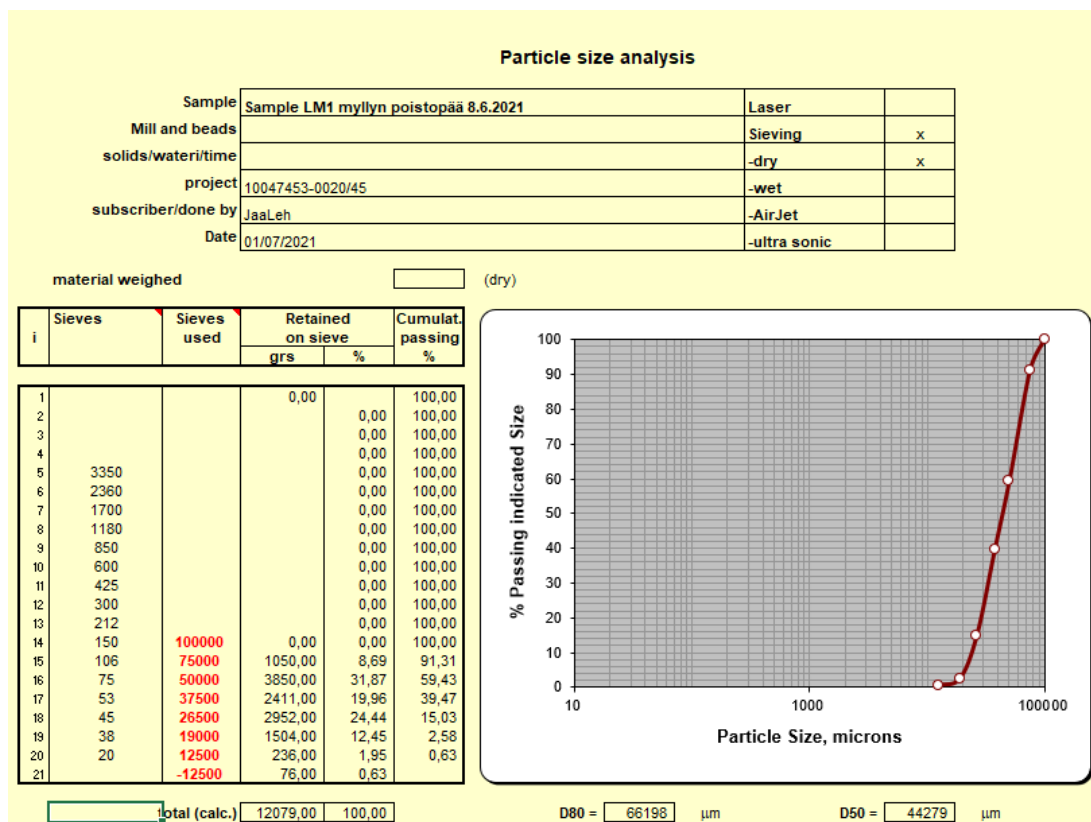
D50 = 66 μm

Particle Size, microns

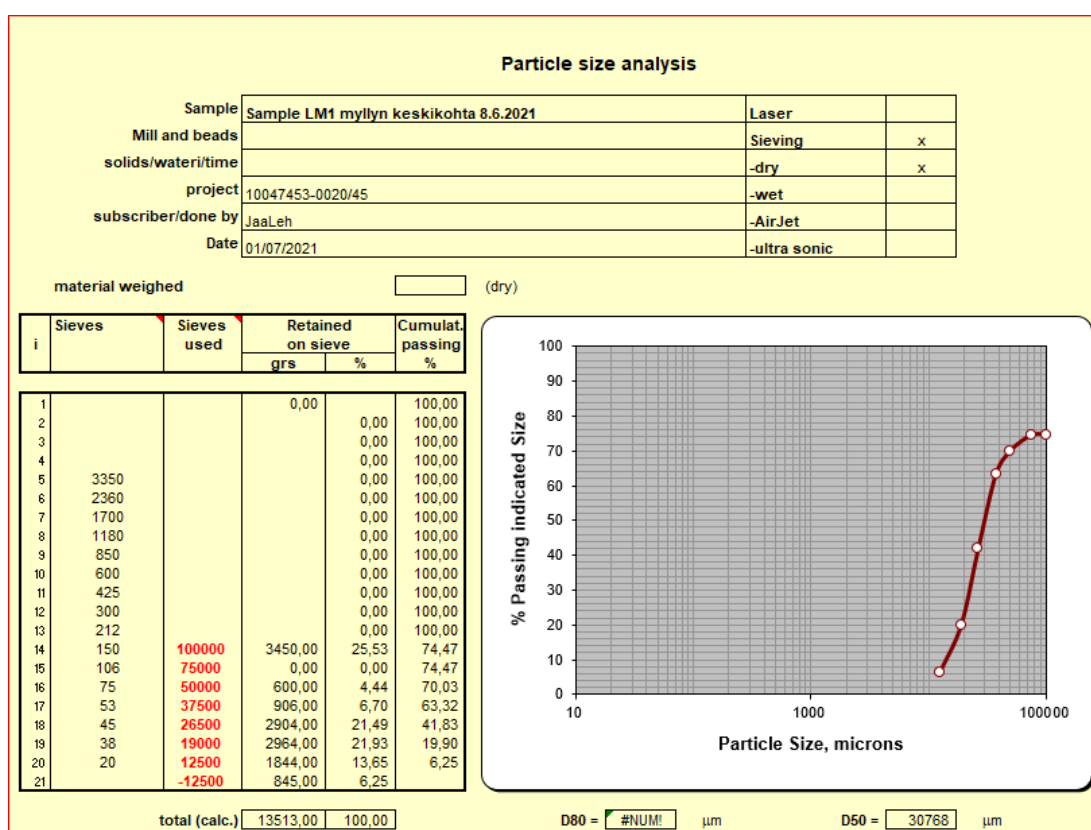
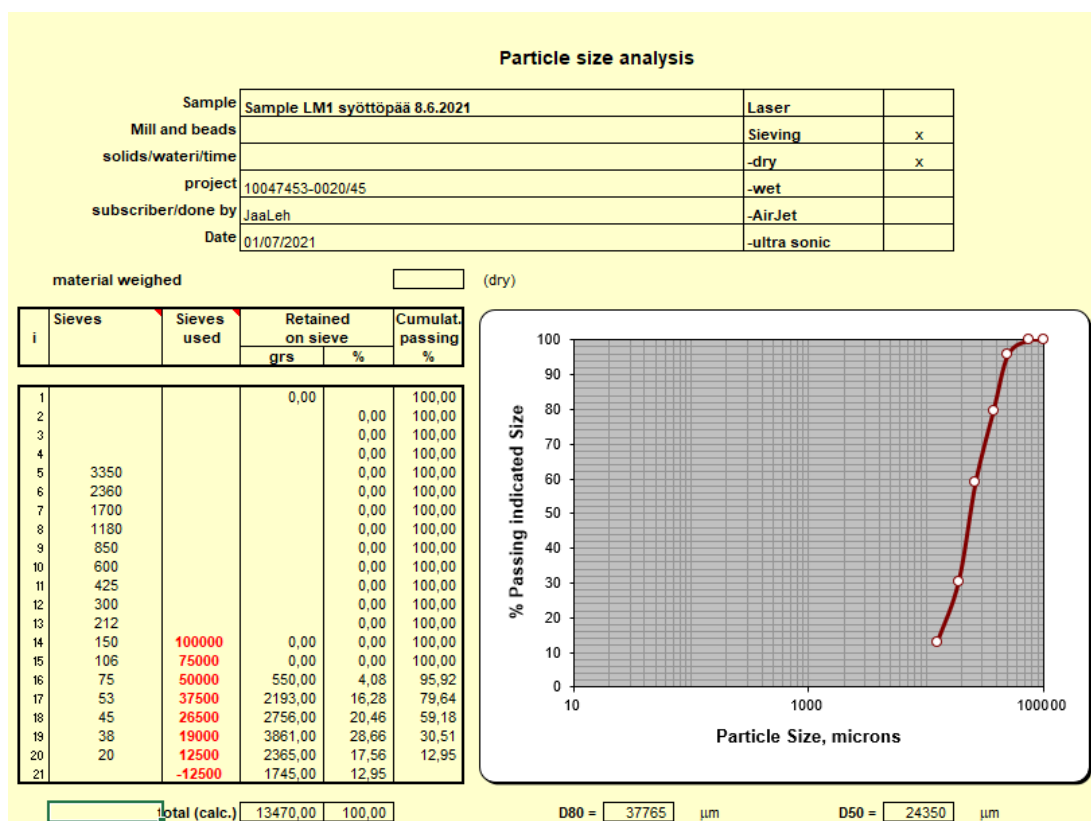
LIETENÄYTTEIDEN TIHEYDET

LM1 Myllyn tuote	2362 g/l
LM2 Myllyn tuote	2419 g/l
LM1 Syklonin ylite	1898 g/l
LM2 Syklonin ylite	1852 g/l
LM1 Syklonin alite	2244 g/l
LM2 Syklonin alite	2178 g/l

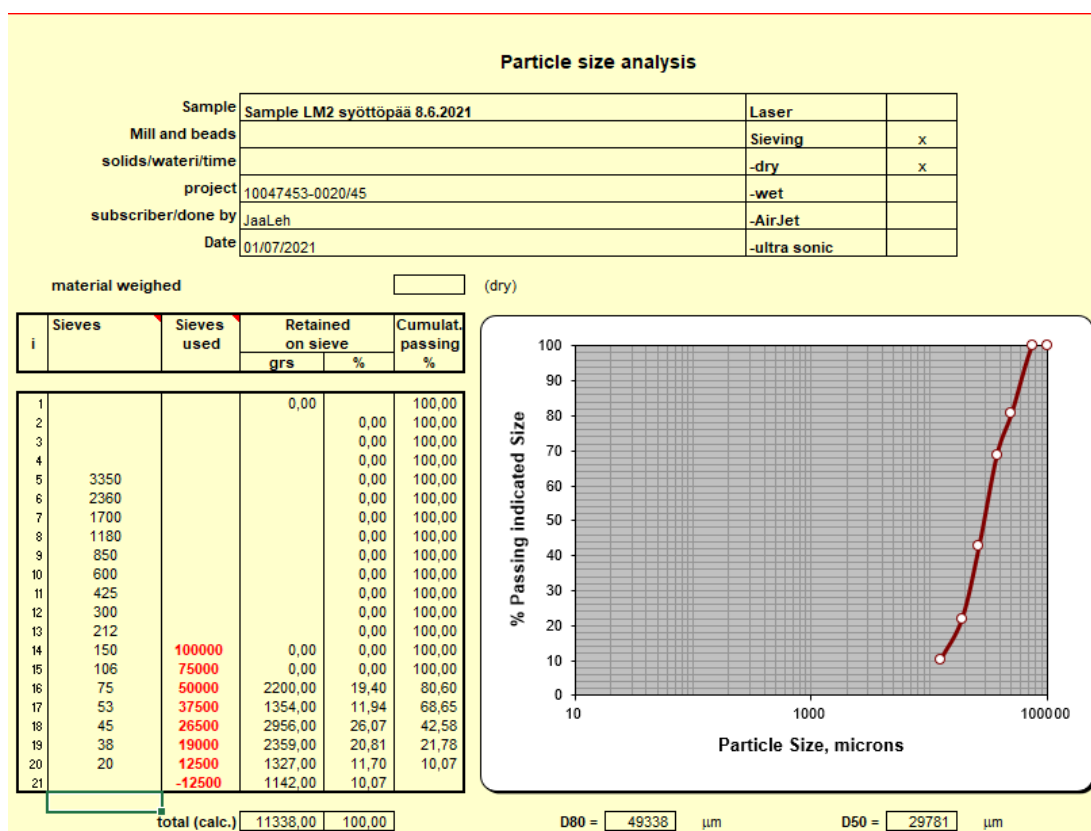
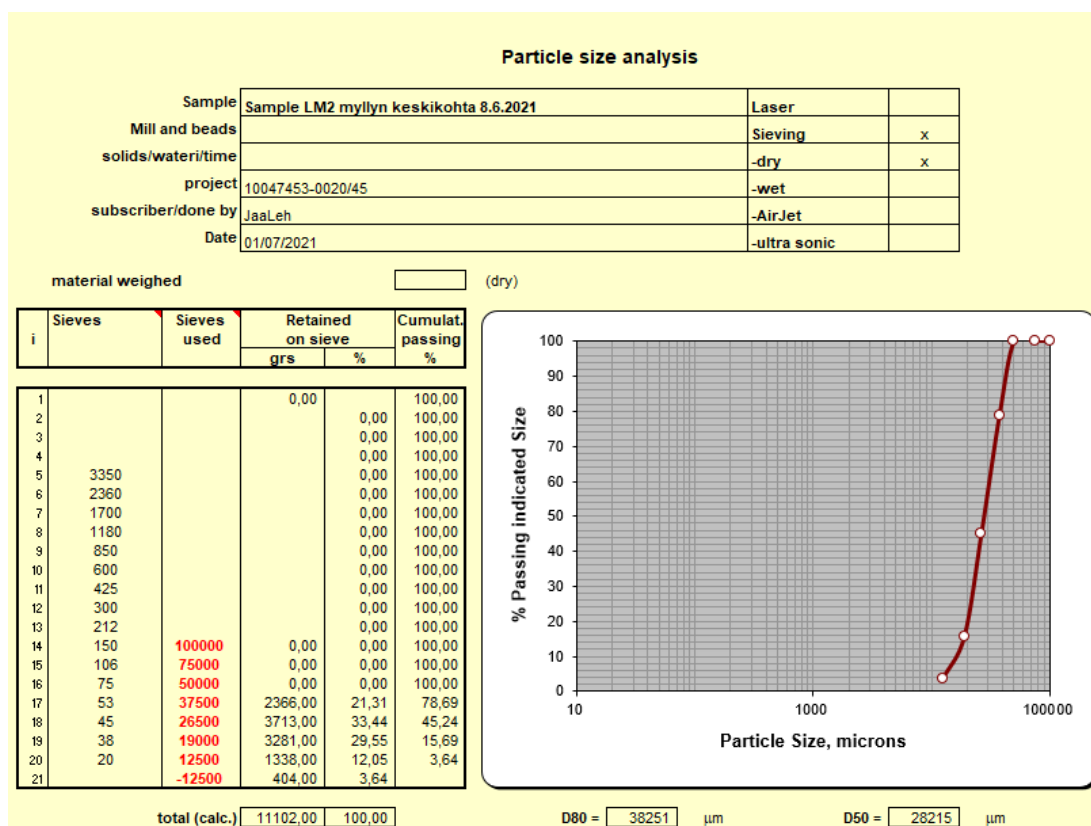
MYLLYJEN SISÄNÄYTTEIDEN RAEKOKO



MYLLYJEN SISÄNÄYTTEIDEN RAEKOKO



MYLLYJEN SISÄNÄYTTEIDEN RAEKOKO



MYLLYJEN SISÄNÄYTTEIDEN RAEKOKO

