

**Mika Annala**

## **KUULAMYLLYN MATERIAALIVIRTA**

**Jauhinkuulien lisäyksen vaikutus raekokoon ja liukoisuuteen**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kemiantekniikka  
Maaliskuu 2021**

**TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ**

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Maaliskuu 2021	<b>Tekijä/tekijät</b> Mika Annala
<b>Koulutusohjelma</b> Kemiantekniikan koulutusohjelma		
<b>Työn nimi</b> KUULAMYLLYN MATERIAALIVIRTA		
<b>Työn ohjaaja</b> Laura Rahikka		<b>Sivumäärä</b> 34 + 3
<b>Työelämäohjaaja</b> Timo Mäkelä		
<p>Boliden konsernin sinkkitehtaalla Kokkolassa sinkkipasutolla pasutetta jauhetaan Wärtsilän valmistamalla kuivajauhatusmyllyillä. Kuulamylyihin 1 ja 2 vaihdetaan kuulia yleensä isoimmista seisokeissa. Pasuton kuulamylyillä kuulien lisäystä on tutkittu erittäin vähän, eikä liukoisuuteen vaikuttavia kokeita ole kokeiltu aikaisemmin. Työn tarkoituksena on tarkastella kuulien lisäyksen vaikutus raekokoon ja Zn-happoliukoisuuteen. Jauhatuskokeiden aikana lisättiin kuulia ja näytteitä otettiin ennen ja jälkeen kuulamylyyn.</p> <p>Näytteiden analysoinnin suoritti Bolidenin laboratorio, johon näytteet toimitettiin. Näytteistä analysoitiin raekoko, Zn- ja Si-happoliukoisuus. Saatujen tuloksien mukaan raekoko pieneni, joka paransi Zn-happoliukoisuutta ja pienensi Si-happoliukoisuutta.</p> <p>Työssä tuloksiin vaikutti uuniin syötettävän rikasteiden syöttösuhde, joka vaikuttaa uunista tulevien sinkkipasutteen raekokoon ja koostumukseen. Kuulamylystä poistuvaan pasutteen raekokoon ja Zn- ja Si-happoliukoisuuteen vaikuttaa uunipasutteen koostumus ja kuulamylyyn täyttöaste.</p>		
<b>Asiasanat</b> Täyttöaste, syöttösuhde, raekoko, happoliukoisuus		

**ABSTRACT**

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> March 2021	<b>Author</b> Mika Annala
<b>Degree programme</b> <b>Degree programme in Chemical Engineering</b>		
<b>Name of thesis</b> BALL MILL MATERIAL FLOW		
<b>Instructor</b> Laura Rahikka	<b>Pages</b> 34 + 3	
<b>Supervisor</b> Timo Mäkelä		
<p>At Boliden group`s zinc plant in Kokkola, the roast is ground in dry grinding mills manufactured by Wärtsilä. Ball mills 1 and 2 are usually replaced with balls at the largest downtimes. Very little research has been done on the addition of Balls in roaster ball mills, and no experiments affecting solubility have been tried before. The purpose of this work is to examine the effect of bead addition on fraction size and Zn solubility. During the grinding experiments, balls were added and samples were taken before and after the ball mill.</p> <p>The analysis of the samples was performed by the laboratory of Boliden to which the samples were delivered. Samples were analyzed for particle size, Zn and Si acid solubility. According to the results obtained, the grain size decreased, which improved the Zn acid solubility and decreased the Si acid solubility.</p> <p>In the work, the results were influenced by the feed ratio of concentrates fed to the roaster furnace, which affects the particle size and composition of the zinc roast from the roaster furnace. The particle size and Zn and Si acid solubility of the roast leaving the ball mill are affected by the composition of the oven roast and the degree of filling of the ball mill.</p>		
<b>Key words</b> The degree of filling, the feed ratio, particle size, acid solubility		

## KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

laserfraktiopartikkelikokoanalysointilaite = Analysointilaite, jolla tutkitaan materiaalin hiukkasten koon ja eri hiukkaskokojen määrän mittausta.	
Täyttöaste	täyttöasteella tarkoitetaan jauhinkappaleiden (kuulat, tangot) määrää verrattuna myllyn tilavuuteen
Syötösuhde	sinkki pasuton uunien siloihin syötettävien rikastelaatujen seoksille.
Reakoko	jauhetun tuotteen karkeutta
Happoliukoisuus	aineen kyky liuota happoihin
(t/h)	jauhatuskapasiteetti, tuhatta kiloa tunnissa
d1	on suurin kappalekoko ennen hienonnusta
d2	on suurin kappalekoko hienonnuksen jälkeen
ntod	myllyn todellinen kierrosluku/min
nc	myllyn kriittinen kierrosluku/min
np	myllyn kierroslukuprosentteina kriittisestä
Vk	kuulien tilavuus myllyssä
Vm	myllyn sisätilavuus
nkr	kriittinen pyörimisnopeus
T	aineen määrä, joka on läpäissyt seulan
C	vakio, jonka numeerinen arvo riippuu materiaalista, hienonnuksen menetelmästä ym.
$\rho$	seulottavan kiven ominaispaino
x	seula-aukon koko
f	seulan aukkojen osuus seulapinnasta
p	seulan läpäisseen aineen massa
f	koeseulonnan avulla saatu prosenttiluku, joka osoittaa, kuinka suuri osa näytteestä on hienompaa kuin ko. seula-aukko
s	seulan syötteen massa

**TIIVISTELMÄ  
ABSTRACT  
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY  
SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 YRITYKSEN ESITTELY .....</b>	<b>2</b>
2.1 Pasutto .....	3
2.2 Puhdistamo .....	4
2.3 Elektrolyysi .....	5
2.4 Valimo .....	6
2.5 Rikkihappo.....	7
<b>3 JAUHATUS .....</b>	<b>8</b>
3.1 Kuulamyly.....	8
3.2 Kriittinen kierrosluku.....	9
3.3 Myllyn täyttöaste .....	10
3.4 Myllyn rakenne.....	10
3.5 Myllynvuoraus .....	12
3.6 Jauhinkappaleet .....	13
3.7 Myllyn teho .....	14
3.8 Myllyn tiedot.....	14
<b>4 KOKEIDEN TARKOITUS.....</b>	<b>15</b>
4.1 Koejärjestely .....	15
4.2 Kokeen suoritus .....	18
4.2.1 1-Pasutuslinja .....	18
4.2.2 2-Pasutuslinja .....	21
4.3 Näytteiden käsittely ja analysointi.....	24
4.4 Tulosten tarkastelu.....	25
4.4.1 Happoliukoisuus .....	25
4.4.2 Raekoko 1 – Kuulamyly .....	29
4.4.3 Raekoko 2 – Kuulamyly .....	31
<b>5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....</b>	<b>33</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>34</b>
<b>LIITTEET</b>	

## KUVAT

KUVA 1. Ilmakuva teollisuusalueesta.....	2
KUVA 2. Pasuton prosessi.....	3
KUVA 3. Puhdistamon prosessi .....	4
KUVA 4. Elektrolyysin prosessi.....	5
KUVA 5. Katodisinkkilevyjä.....	6
KUVA 6. Valimon prosessi .....	6
KUVA 7. Rikkihapon prosessi.....	7
KUVA 8. Leikkaus arinamylystä.....	8
KUVA 9. Kriittinen kierrosluku .....	9
KUVA 10. Kuulamylyyn rakenne .....	10
KUVA 11. Pasuton 1 - kuulamylyyn syöttöpää.....	11
KUVA 12. Pasuton 1 - kuulamylyyn purkupää .....	12
KUVA 13. Pasuton kuulamylyyn sisältä .....	12
KUVA 14. Kuulamylyyn kuulia .....	13
KUVA 15. Kuulamäärien laskenta .....	16
KUVA 16. Kuulaämpärit ja huomiolaput .....	17
KUVA 17. Näytteenotto astia ja pasute näytettä astiassa .....	17
KUVA 18. Näytteenotto kauhanvarsi ja Redler-kuljetin .....	18
KUVA 19. Redler-kuljetin ja purkaussuppilo.....	19
KUVA 20. Pasute näytettä sinkkiämpäriässä .....	19
KUVA 21. Kuulamylyyn purkaussuppilon näytteenotto paikka ja näytteenotto kauha.....	20
KUVA 22. Näytteen ottokauha kuulamylyyn purkauspuolella .....	20
KUVA 23. Kuulamylyyn syöttöruuvin turvakatkaisijat .....	21
KUVA 24. Kuulamylyyn syöttöruuvin luukku auki ja pasutetta.....	21
KUVA 25. Näytteenotto kauha ja näytteenotto aukko .....	22
KUVA 26. Näyte jäähtymässä sinkkiämpäriässä .....	22
KUVA 27. Redlerin-purkaus suppilon luukku .....	23
KUVA 28. Redlerin-purkaus suppilon suojaverkko .....	23

## TAULUKOT

TAULUKKO 1. Kuulamyly - 1 pasutteen happoliukoisuustulokset ennen kuulamylyä .....	25
TAULUKKO 2. Kuulamyly - 1 pasutteen happoliukoisuustulokset kuulamylyyn jälkeen. ....	25
TAULUKKO 3. Kuulamyly - 2 pasutteen happoliukoisuustulokset ennen kuulamylyä .....	27
TAULUKKO 4. Kuulamyly - 2 pasutteen happoliukoisuustulokset kuulamylyyn jälkeen .....	27
TAULUKKO 5. Kuulamyly - 1 pasutteen raekoko tulokset ennen kuulamylyä.....	29
TAULUKKO 6. Kuulamyly - 1 pasutteen raekoko tulokset kuulamylyyn jälkeen.....	29
TAULUKKO 7. Kuulamyly - 2 pasutteen raekoko tulokset ennen kuulamylyä.....	31
TAULUKKO 8. Kuulamyly - 2 pasutteen raekoko tulokset kuulamylyyn jälkeen.....	31

## KUVIOT

KUVIO 1. Happoliukoisuuskuvaaja ennen 1-kuulamylyä.....	26
KUVIO 2. Happoliukoisuuskuvaaja 1-kuulamylyyn jälkeen .....	26
KUVIO 3. Raekokokuvaaja ennen 1-kuulamylyä .....	28
KUVIO 4. Raekokokuvaaja 1-kuulamylyyn jälkeen .....	28
KUVIO 5. Happoliukoisuuskuvaaja ennen 2-kuulamylyä .....	30
KUVIO 6. Happoliukoisuuskuvaaja 2-kuulamylyyn jälkeen .....	30
KUVIO 7. Raekokokuvaaja ennen 2-kuulamylyä .....	32
KUVIO 8. Raekokokuvaaja 2-kuulamylyyn jälkeen .....	32

## 1 JOHDANTO

Opinnäytteen toimeksiantaja on Boliden Kokkola. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia kuulien määrän lisäyksen vaikutusta jauhatukseen vaikutusta ja lisäyksen vaikutusta pasutteessa olevan sinkin ja piin liukoisuuteen hapossa. Boliden Kokkolan tehtaasta on tarkoitus tulla maailman tehokkain ja taloudellisin sinkkitehdas maailmassa. Boliden Kokkola on toiseksi suurin sinkkitehdas Euroopassa.

Tavoitteena on analysoida pasute-materiaalia ennen ja jälkeen kuulamylyn jauhinkuulien lisäyksen aikana. Raekokonäytteet analysoidaan Bolidenin Kokkolan laboratoriossa laserdiffraktio raekokoanalysointilaite Malvern Mastersizer 3000:lla, jossa Hydro EV-näytteen syöttäjä sekä happoliukoisuutta mitattaessa käytetään Thermo iCAP 7000 inductively coupled plasma-optical emission spectrometriä.

Tietoja opinnäytetyöstä käytetään kuulamylyn jauhatuksen optimointiin, jolla saadaan parempi rikasteen liukoisuus tuotteen liuotuksessa puhdistamalla. Tutkimuksessani testasin molempien linjojen kuulamylyjä erikseen, lisäämällä niihin kuulia kolmessa eri erässä 100 kg kerralla. Tuloksista voi päätellä, onko jatkossa tarvetta seurata kuulamylyjen kuulamääriä ja verrata niitä tässä opinnäytetyössä saatuihin tuloksiin. Sinkkipasutolla ei ole suoritettu vastaavaa koetta aikaisemmin, vaan kuulia on vaihdettu kuulamylyyn yleensä vain isoimmissa seisokeissa.

## 2 YRITYKSEN ESITTELY

Boliden Kokkola kuuluu ruotsalaiseen Boliden-konserniin, joka on yksi maailman johtavista sulatto- ja kaivosyhtiöistä. Boliden-konserni perustettiin vuonna 1924.(Boliden 2020.) Konsernin päätuotteet ovat sinkki ja kupari, joiden lisäksi yhtiö tuottaa myös kultaa, hopeaa ja lyijyä. Boliden-konsernilla on useita tuotantolaitoksia Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Irlannissa. Boliden omistaa Suomessa kaksi sulattoa, Kokkolan sinkkitehtaan ja Harjavallan kuparisulaton, Sekä kaksi kaivosta. Boliden Kevitsa on tuotantomäärältään Suomen suurin avolouhos, jonka päätuotteet ovat nikkeli- ja kuparirikasteet ja se tuottaa, jonkin verran myös kultaa, platinaa, palladiumia sekä kobolttia. (Boliden Kevitsa Mining Oy 2020.) ja toisena kaivoksena tuotantoansa lopettava, Kylylahden kupari-, kulta- ja sinkkikaivos. (Boliden Kylylahti.)

Kokkolan sinkkitehtaalla aloitettiin sinkin valmistus vuonna 1969, kun Kokkolaan suurteollisuusalueelle perustettiin Outokummun sinkkitehdas (KUVA 1). Sinkkitehdas siirtyi Outokummulta Bolidenin omistukseen vuonna 2004 toteutetun yritysjärjestelyn yhteydessä. (Boliden Kokkola 2020 a.) Boliden osti vuonna 2010 Kemiralta Kokkolan Kemiran rikkihapon tuotantolaitoksen. Rikkihappotehtaalla tuotetaan sinkkipasutolta saatavasta rikkidioksidikaasusta rikkihappoa noin 326 000 tonnia vuodessa. (Boliden Kokkola 2020 b.)

Vuonna 2020 Boliden AB-konsernin liikevaihto oli 56 321 miljoonaa Ruotsin kruunua eli noin 5372 miljoonaa euroa ja liikevoitto 8 935 miljoonaa kruunua eli 852 miljoonaa euroa. Konserni työllisti vuoden lopussa 5 800 henkilöä, joista noin 1500 Suomessa. Boliden Kokkola on 315 000 tonnin tuotantokapasiteetiltaan Euroopan toiseksi suurin ja maailman kuudenneksi suurin sinkkitehdas.

Suuri osa tehtaan raaka-aineena käyttämästä sinkkirikasteesta tulee Bolidenin omilta kaivoksilta Ruotsista, Irlannista, mutta rikasteita ostetaan myös muilta kaivosyrityksiltä Euroopasta, Pohjois-Amerikasta ja Etelä-Amerikasta. Sinkkitehdas on Kokkolan suurin yksityinen työnantaja. Vuoden 2019 lopussa tehdas työllisti 550 henkeä. (Boliden Kokkola 2020 a.)



KUVA 1. Ilmakuva teollisuus alueesta (Caverion 2020.)



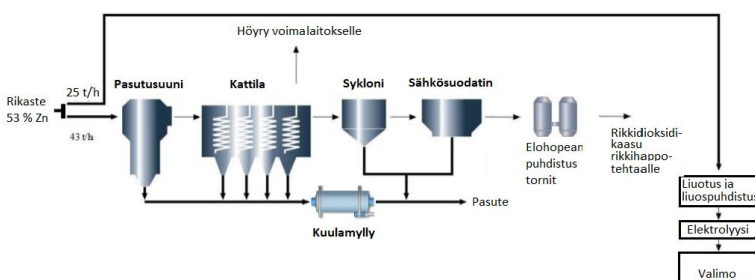
## 2.1 Pasutto

Boliden Kokkolan pasutto-osastolla on kaksi leijupetiperiaatteella toimivaa melkein identtistä pasutuslinjaa (KUVA 2). Pasutuslinja käsittää pasutusuunin, jätelämpökattilan, kaksi sykklonia, kaksi sähkösuodatinta ja kuulamylyn. Pasutusuuneissa tapahtuvan reaktion tehtävä on muuttaa sinkkisulfidirikaste (ZnS) oksidiseen helpommin liukenevaan muotoon sinkkioksidiksi (ZnO) (pasutteenksi) ja rikki hapettuu samalla rikkioksidiksi (SO<sub>2</sub>).

Pasutuksessa tapahtuu seuraava reaktio (kaava 1):



Pasutus on eksoterminen reaktio, jossa rikaste poltetaan leijupetiuunissa noin 950 °C:ssa käyttäen apuna ilmaa n. 43 tuhatta m<sup>3</sup> /h. Ilmansyöttö uunin pohjassa olevien reikien kautta saa uunissa olevan rikaste-pedin leijumaan saaden rikasteessa oleva rikin palamaan ja siitä syntyy rikkikaasua. Pasute kulkeutuu ylivuodon kautta pasutteen jäähtymykseen ja sieltä Redler-kuljettimella kuulamylylle, jossa pasute jauhetaan hienommaksi ja helpommin liukenevaksi tuotteeksi. Kuulamylyltä hienojakoinen pasute siirretään kuljettimilla pasutesiiloihin, jossa sitä varastoidaan liuotusta varten. Uunista rikkikaasu kulkeutuu jätelämpökattilaan, jossa lämpöä sisältävästä kaasusta otetaan lämpö talteen jäädyttämällä kattilan jäähtyselementtejä jäähdytysvedellä. Kuuma kaasu höyryttää veden, ja höyry johdetaan 65 baarin paineessa voimalaitokselle, josta saadaan energiaa. Kaasun mukana kulkeutuu jonkin verran hienojakoista pasutepölyä, jota erotetaan kaasusta kattilassa, sykloneissa ja sähkösuodattimissa. Hienojakoinen pöly palautuu pasutteen joukkoon, joko ennen tai jälkeen kuulamylyä. Rikkikaasu sisältää elohopeaa ja muita yhdisteitä, jotka erotetaan kaasusta pesemällä Hg-torneilla, josta rikkikaasu jatkaa happotehtaalle rikkihappo tuotantoon ja kaasunpesusta syntyvä pesusakka sivutuotteelle jatkokäsittelyyn. (KUVA 2.) (Rasimäki 2018.)



KUVA 2. Pasuton prosessi (Boliden Kokkola Oy)

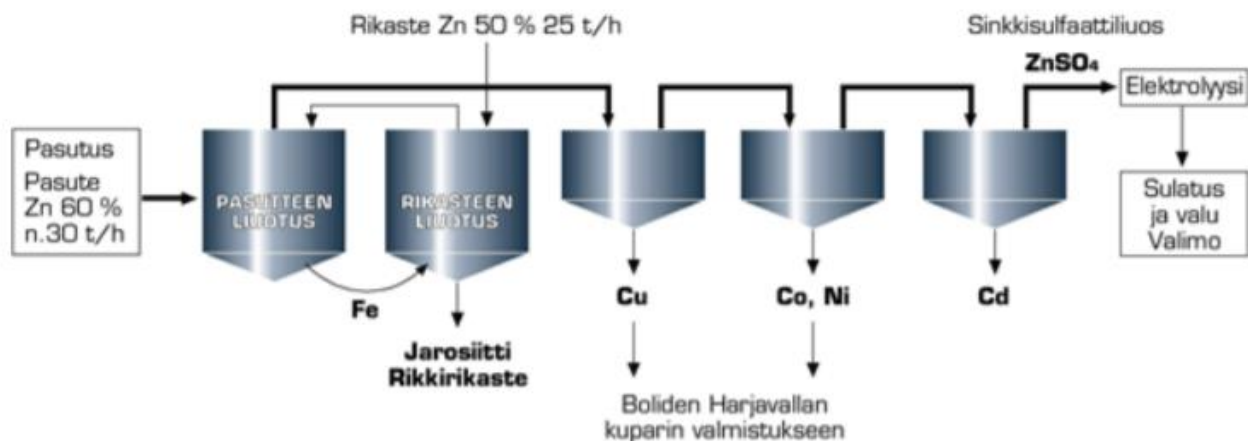
## 2.2 Puhdistamo

Boliden Kokkolan puhdistamo-osastolla liuotuksessa pasutolta tuleva pasute sekä puhdistamon suoraliuotuksessa suoraliuotukseen syötetty sinkkirikaste liuotetaan rikkihappopitoiseen paluuhappoon, jota palautuu elektrolyysiosastolta liuoskierrossa. Paluuhapossa pasutteen sinkki liukenee sinkkisulfaattiksi. Liuotuksen jälkeen syntynyt sinkkisulfaattiliuos menee liuospuhdistukseen, jossa rauta saostetaan rautasakaksi eli jarosiitiksi ja seuraavissa prosessivaiheissa kupari koboltti, nikkeli ja kadmium saostetaan metallisakkoina. (Korhonen-Helander ja Willman 2015.)

Liuotuksessa tapahtuu seuraava reaktio (kaava 2):



Puhdistus perustuu sähkökemialliseen jännitesarjaan, jossa pelkistetään ja saostetaan sinkkipulverilla sinkkiä jalommat metallit. Puhdistamolla prosessi toimii kolmivaiheisessa jatkuvatoimisessa prosessissa (KUVA 3). Liuotuksen jälkeen sinkkisulfaattiliuos pumpataan elektrolyysiosastolle.



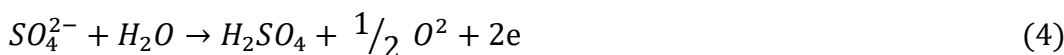
KUVA 3. Puhdistamon prosessi (Boliden Kokkola Oy)

## 2.3 Elektrolyysi

Elektrolyysillä saadaan sähkövirran avulla aikaiseksi hapettumisreaktion. Elektrolyysi koostuu virtapiiristä ja tasavirtalähteestä sekä sähköä johtavasta sinkkisulfaattiliuoksesta. Puhdistamolta tulee sinkkisulfaattiliuos elektrolyysin kylmäsäiliöihin syöttörännejä pitkin. Elektrolyysiosasto koostuu 4 virtapiiristä, yhdessä virtapiirissä on 14 riviparia ja yhdessä rivissä on 15 allasta. Jokaisessa altaassa on 44 katodia ja 45 anodia. Jokaiseen altaaseen pumpataan sinkkisulfaattiliuos kylmäsäiliöistä syöttörännejä pitkin, altaista lämmennyt liuos menee paluurännejä pitkin kuumasäiliöihin ja sieltä pumpataan jäähdytystornien kautta kylmäsäiliöihin ja puhdistamolalle paluuhappona. Virtapiireihin syötetään virtakiskoja pitkin 16 - 43 kiloampeerin virtaa, jotta saadaan sinkki saostumaan alumiinisiin katodilevyihin kemiallisen reaktion avulla. (Hätinen 2009.).

Elektrolyysissä altaissa olevien alumiinilevyjen eli katodien pinnalle saostuu sähkövirran avulla sinkkisulfaattiliuoksesta metallinen sinkki. Sinkin annetaan kasvaa katodien pinnalla, jonka jälkeen katodit nostetaan altaista ja katodit siirretään irrotuskoneille, jossa sinkkilevy irrotetaan katodien pinnalta irrotuskoneilla. Sinkki siirretään irrotuskoneilta välivarastoon, josta valimo hakee sinkkilevyniput uuniin sulatettavaksi tai irrotuskoneilta suoraan uuniin. (KUVA 4). (Hätinen 2009.)

Elektrolyysissä tapahtuu seuraava reaktio (kaava 3 ja 4):



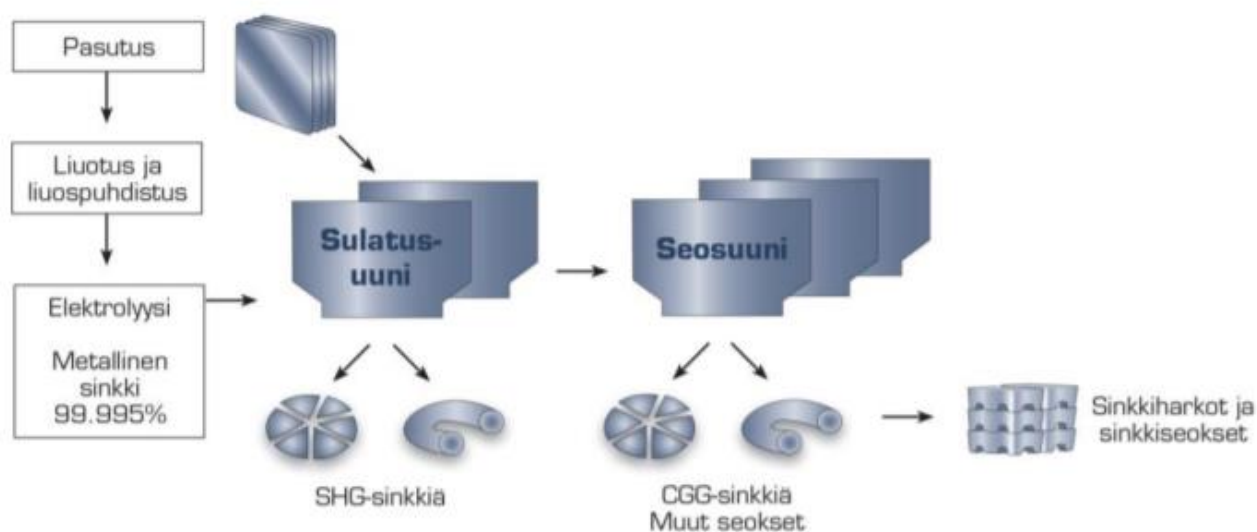
KUVA 4. Elektrolyysin prosessi (Boliden Kokkola Oy)

## 2.4 Valimo

Valimon tehtävänä on sulattaa elektrolyysiltä saatavat katodisinkkilevyt (KUVA 5). Valimon induktio-uunissa ja sulatettu sinkki valetaan joko 25 kilon harkoiksi tai 1200 kg–4000 kg:n sinkkijumboiksi. Valimon prosessia on kuvattu kuvassa 6. Valimo valaa asiakkaiden tilaamia lopputuotteita. Tuotteet voivat olla puhdasta SHG-sinkkiä tai asiakkaiden haluamia erikoistuotteita, esimerkiksi erityispuhtaita patterilaatuja ja muilla metalleilla seostettuja tuotteita, kuten sinkkialumiiniseosta (CGG) (Boliden Kokkola CGG.).



KUVA 5. Katodisinkkilevyjä (Boliden Kokkola Oy)

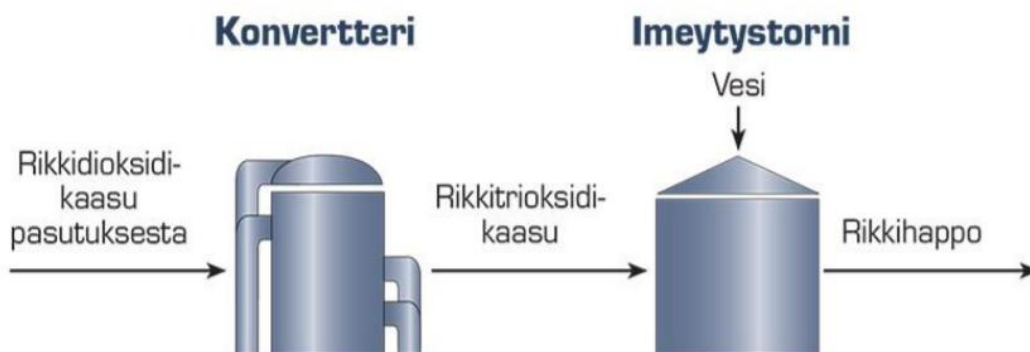


KUVA 6. Valimon prosessi (Boliden Kokkola Oy)

## 2.5 Rikkihappo

Rikkihapon valmistusprosessi Bolidenin rikkihappotehtaalla alkaa rikkidioksidikaasun puhdistuksella. Pesutorneissa ja märkäsähkösuotimissa pasutolta tulevasta rikkidioksidikaasusta poistetaan halogeeneja, elohopeaa, pölyä ja kaasumaisia epäpuhtauksia. Seuraavaksi kaasu kuivataan kuivaustornissa imeyttämällä sitä väkevässä rikkihapossa. Kaasu kulkee lämmönvaihtimen kautta matkalla konvertteriin, jossa kaasu hapettuu rikkitrioksidiksi kulkiessaan kontaktimassakerrosten läpi. Konvertterin jälkeen rikkitrioksidikaasu menee imeytystorniin, jossa rikkitrioksidi imeytetään tornissa kiertävään väkevään rikkihappoon. Imeytyksessä rikkitrioksidikaasu reagoi rikkihapossa olevan veden kanssa muodostaen lisää rikkihappoa. Prosessissa syntyy jonkin verran lämpöenergia, joka otetaan talteen ja hyödynnetään kaukolämpönä. (Heikura 2017.) Kuvassa 7 on kuvattu rikkihapon prosessikaavio, jossa kaasu hapettuu rikkitrioksidiksi kulkiessaan kontaktimassakerrosten läpi. Konvertterin jälkeen rikkitrioksidikaasu menee imeytystorniin, jossa rikkitrioksidi imeytetään tornissa kiertävään väkevään rikkihappoon. Imeytyksessä rikkitrioksidikaasu reagoi rikkihapossa olevan veden kanssa muodostaen lisää rikkihappoa. Prosessissa syntyy jonkin verran lämpöenergiaa, joka otetaan talteen ja hyödynnetään kaukolämpönä. (Heikura 2017.)

Rikkihapolla tapahtuu seuraava reaktio (kaava 5 ja 6):



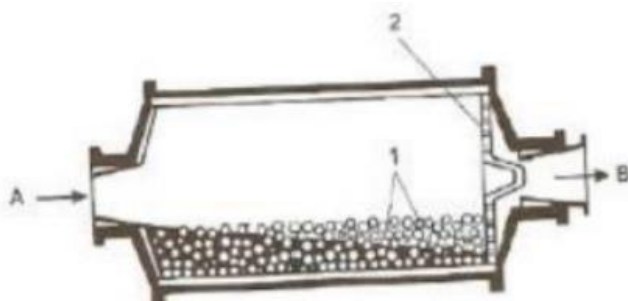
KUVA 7. Rikkihappoprosessi (Boliden Kokkola Oy)

### 3 JAUHATUS

Jauhatusta käytetään karkean aineen hienontamisessa. Jauhatusta tapahtuu rumpumaisissa, vaakatasossa pyörivissä myllyissä, joiden sisällä olevat jauhinkappaleet jauhavat syötetyn tuotteen, kuten esimerkiksi malmin tai kuten tässä opinnäytetyössä pasutteen. Jauhautuminen perustuu iskuihin, puristukseen, hankaukseen ja hiertoon (jauhinkappaleiden putoamis- ja vierintäliikkeeseen). Jauhinkappaleina käytetään teräs- tai valurautakuulia, terästankoja ja jauhineriöitä. Myös jauhettavien materiaalien kappaleita voidaan käyttää jauhinkappaleina, jolloin puhutaan autogeenijauhatuksesta. Jauhatusta tapahtuu joko kuivatai märkäjauhatuksena. Märkäjauhatusta on yleisimmin käytetty menetelmä, vaikka jauhatusta prosessin kannalta ei ole paljon eroa sillä, että suoritetaanko jauhatusta märkä- vai kuivajauhatuksena. (Kaiva 2014.).

#### 3.1 Kuulamyly

Tavalliseen kuulamylyyn kuuluu yksi jauhatusosasto erotukseksi ns. yhdysmyllystä, jossa on kaksi tai useampia peräkkäisiä osastoja. Materiaalin poistotavan mukaan erotetaan ylitemyly ja arinamyly. Boliden Kokkolan Sinkkipasutolla on käytössä arinamylyjä yksi molemmilla pasutuslinjoilla. Arinamylyksi kutsutaan myllyä, jossa tuotteen poisto tapahtuu yhden tai useamman arinan kautta, jotka on sijoitettu joko myllyn kehälle, tavallisesti lähelle poistopäätä tai päätyyn. Sinkkipasuton kuulamylyssä on päätyarina. Päätyarina on sijoitettu myllyn sisäpuolelle lähelle poistopäätä. Arina on siten suunniteltu, että se läpäisee tuotteen, mutta ei jauhinkappaleita ja että sen ja päätyseinän väliin muodostuu tukisäleistö siipipyörä, joka myllyn pyöriessä toimii sisäpuolisena nostolaitteena. Nostettu materiaali valuu poistopään kaula-aukosta ulos. Kuvassa 8 on esitetty arinamylyn rakenne. (Melanen 2013).



A jauhettavan materiaalin syöttöpää

B jauhetun materiaalin poistopää

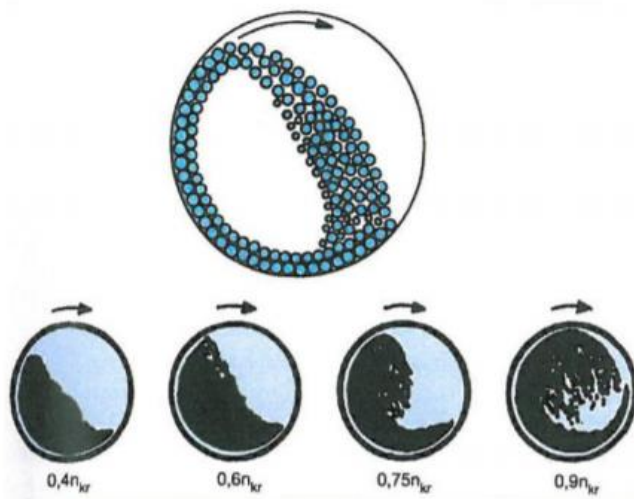
1 jauhinkappaleet

2 arina, jonka kautta jauhettu materiaali poistetaan.

KUVA 8. Leikkaus arinamylystä. (Pihkala 2011).

### 3.2 Kriittinen kierrosluku

Jauhatusmyllyn kriittiseksi kierrosluvuksi kutsutaan sitä kierrosnopeutta, jolla jauhinkappaleet pysyvät painovoiman vaikutuksesta juuri ja juuri myllyn kehällä irtautumatta sieltä myllyn pyöriessä tasaisella nopeudella. Kriittisellä kierrosluvulla keskipakovoima vaikutus kappaleeseen on yhtä suuri. Kuvassa 9 on esitetty materiaalin käyttäytyminen kuulamylyssä kriittisellä kierrosluvulla.



KUVA 9. Kriittinen kierrosluku ( $n_{kr}$  = kriittinen pyörimisnopeus)

Myllyjen pyörimisnopeudet ovat tavallisesti 50 – 90 % kriittisestä nopeudesta, yleisesti käytetty arvo on 76%. Jos myllyn pyörimisnopeus on alikriittisellä nopeudella, niin jauhinkappaleet sekä jauhettava tuote eivät jauhaudu kunnolla. Vastaavasti ylikriittisellä nopeudella tuote ja jauhinkappaleet eivät irtoa rummun sisäkehältä kunnolla. Pyörimisnopeuden lisäys lisää myllyn kapasiteettiä, mutta sillä on vain vähäinen vaikutus myllyn tehokkuuteen. (Melanen 2013).

Myllyn kriittisen pyörimisnopeus lasketaan yhtälöllä (kaava 7):

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} \text{ 1/min} \quad (7)$$

$n_c$  = Kriittinen pyörimisnopeus

$D$  = Mylly halkaisija m

$d$  = Kuulan halkaisija m

### 3.3 Myllyn täyttöaste

Myllyn täyttöaste on yleensä 0,3–0,5 eli 30-50%, myllyn täyttöasteella tarkoitetaan täytekappaleiden tilavuuden suhdetta myllyntilavuuteen. Hyvän jauhatustuloksen saavuttamiseksi myllyn täyttöasteen tulisi olla 30-50 % eli 0.3–0,5. (Kaiva 2014).

Myllyn täyttöaste lasketaan yhtälöllä (kaava 8):

$$T\ddot{a}y\ddot{t}\ddot{t}\ddot{o}a\ddot{s}t\ddot{e} = \frac{V_k}{0,62 V_m} \quad (8)$$

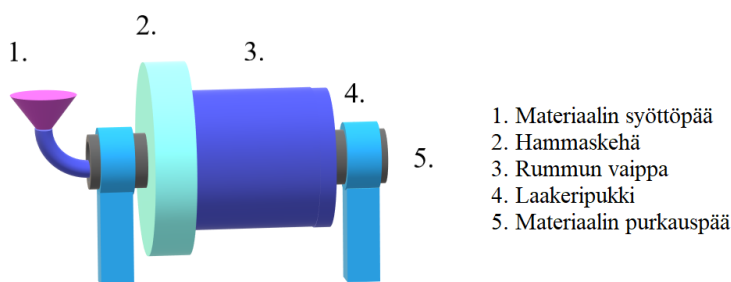
$V_k$ = kuulientilavuus

$V_m$ =myllyntilavuus

### 3.4 Myllyn rakenne

Mylly koostuu vaipasta, sen päihin kiinnitetyistä päädyistä ja päätyihin kiinnitetyistä kauloista. Kaulan ympärillä on laakerointi, jonka varassa mylly lepää laakeripukeilla. Moottorin voima välitetään myllyyn vaihteiston hammaspyörän avulla, vaihteiston hammaspyörä pyörittää myllyn vaipan ympärillä olevaa hammaskehää. (Kaiva 2014). Kuvassa 10 esitetään kuulamyllyn rakenne.

Myllyjen pyöritys tapoja on useita erilaisia, joissakin suurissa ja uudemmissa myllyissä mylly on sähkömoottorin roottori ja sen ympärille on rakennettu staattorirengas. Tällaisilla ratkaisuilla mahdollistetaan suurempi teho ja vääntömomentti ja myllyn nopeus on säädettävissä ja huollon ryömintäkäyttö onnistuu ilman erillistä moottoria (Kaiva 2014). Boliden Kokkolan pasuton kuulamyllyt pyörivät vakio nopeudella 25,4 r/min ja nopeutta ei voi muuttaa kuin vaihtamalla vaihteiston välityssuhdetta tai sähkömoottori. Kuvissa 11 ja 12 on pasuton 1- kuulamyllyn päätykuvat ja suojaverkkoja.



KUVA 10. Kuulamyllyn rakenne.





KUVA 11. Pasuton 1- kuulamylllyn syöttöpää



KUVA 12 Pasuton 1 – kuulamylllyn purkupää

### 3.5 Myllyvuoraus

Myllyvuorausosat ovat vaihdettavia kulutusosia, joiden tarkoituksena tehostaa jauhatusprosessia sekä toimia kulutussuojana myllyn runkorakenteelle. Vuorauksella vaikutetaan jauhatukseen eli tarkoituksena on tehostaa energian siirtymistä jauhinkappalepanokseen ja jauhettavaan materiaaliin. Vuorauksessa on myllyn kehällä matala levymäinen vuorausosuuus sekä korkeampi nostava vuorausosuuus eli nostaja. Vuorauksen korkeuden vaihtelu vaikuttaa jauhettavan materiaalin ja jauhinkappalepanoksen liikkeeseen myllyn pyöriessä. Vuorausosien mitoituksella ja porauksen jaolla voidaan vaikuttaa myllyn jauhatustehokkuuteen, joten vuorausprofiilin ja porauksen suunnittelu mylly- ja prosessikohtaisesti on tärkeää jauhatustuloksen ja vuorauksen kestävyuden kannalta (Hämäläinen 2018.) Boliden Kokkolan pasutolla vuoraus materiaali on teräs ja vuoraus painaa 6,6 t. Kuvassa 13 näkyvät vuoraus ja päätyarina. kuva on otettu seisokissa huollon yhteydessä.



KUVA 13 Pasuton kuulamyly sisältä.

### 3.6 Jauhinkappaleet

Yhtä ja samaa myllyä voidaan käyttää jauhatukseen erilaisilla jauhinkappaleilla varustettuna ja eri nopeuksilla. Jauhinkappaleina käytetään yleensä kuulia, tankoja ja jauhettavan materiaalin joukossa olevia isompia kappaleita. Jauhin kappaleet tekevät myllyn pyöriessä jauhatustyön, sitä painavampia jauhinkappaleita tarvitaan mitä karkeampaa syötetty materiaali on. (Lukkarinen 1985.s.207.)

Kuulamyllyssä jauhettavan materiaalin hienontaminen perustuu isku- sekä hienojauhatukseen kuulien massan ja vuorauksen välissä, Kuulien määrä kuulamyllyssä syötteen karkeuden ja tarvittavan tuotteen hienouden mukaan. Kuulat valmistetaan yleensä teräksestä sekä voidaan käyttää myös seostettuja (Cr, Mn, Si) valurautaseoksia (Pihkala 2011.s.29.)

Bolidenin Kokkolan pasutolla kuulamyllyissä on käytössä halkaisijaltaan 2 tuuman teräskuulia. Kuulia tulisi olla myllyssä noin 4,5 t kg. Kuvassa 14 esitetään 2 tuuman kuulia, joita lisättiin opinnäytetyössä kuulamyllyyn.



KUVA 14. Kuulamyllyn kuulia.

### 3.7 Myllyn teho

Myllyn kapasiteetti riippuu ratkaisevassa määrin jauhinkappaleiden efektiivisestä ominaispainosta sekä myllyn nopeudesta. On luonnollista, että kapasiteetin kasvaessa myös myllyn tehonkäyttö kasvaa ja päinvastoin. Samoin on luonnollista, että tyhjän myllyn tehonkäyttö ilman jauhettavaa materiaalia ja ilman jauhinkappaleita on tietyllä nopeudella aina sama; myllyn nopeuden kasvaessa myös se suurenee. Myllyn kokonaistehon käyttö muodostuu tyhjäkäyntitehon käytön ja jauhinkuorman liikuttamiseen tarvittavan tehon summasta. On tunnettua, että myllyn tuotteen lämpötila on aina korkeampi kuin myllyyn syötetyn materiaalin keskimääräinen lämpötila. Tutkimukset ovat osoittaneet, että suurin osa myllyn pyörittämiseen käytetystä energiasta muuttuu lämmöksi ja vain vähäinen osa tulee käytetyksi "hyödylliseen" jauhatukseen. Karkeaksi keskiarvoksi voidaan sanoa, että 85 % jauhatukseen käytetystä nettoenergiasta muuttuu lämmöksi (Boliden Kokkola Q.)

### 3.8 Myllyn tiedot

Bolidenin sinkkipasuton kuulamyly on Wärtsilän valmistama kuivajauhatusmyly, jossa kattila- ja uunipasuute jauhetaan ja sen teknillisiä arvoja ovat.

- rummun sisähalkaisija 1650 mm
- rummun pituus 1700 mm
- kierrosluku (75 % nkr) 25,4 r/min
- tarvittava moottoriteho 55 kW
- myllyn kokonaispaino ilman vuorausta n. 9,5 t
- vuorauksen painon. 6,6 t
- Myllyn kapasiteetti on normaalisti 8 t/h ja maksimiarvo 16 t/h.
- Jauhettavan pasutteen maksimilämpötila on 250 °C.
- Jauhinkappaleet ovat halkaisijaltaan 2":n kuulia.

Kuulamylyn loppupäästä on yhdistetty venttiilillä varustettu putki kuulamylyn imuilman pussisuodatimeen, joka vetää ilmaa kuulamylystä, jolloin kuulamylyyn tulee myös alipainetta. Näin menetellen kuulamyly ei pölytä hienojakoista pölyä hallin ilmaan. (Boliden Kokkola Q.)

## 4 KOKEIDEN TARKOITUS

Jauhatusta käytetään karkean aineen hienontamisessa. Jauhatusta tapahtuu rumpumaisissa, vaakatasossa pyörivissä myllyissä, joiden sisällä olevat jauhinkappaleet jauhavat syötetyn tuotteen kuten esimerkiksi malmin tai kuten tässä opinnäytetyössä pasutteen. Jauhautuminen perustuu iskuihin, puristukseen, hankaukseen ja hiertoon (jauhinkappaleiden putoamis- ja vierintäliikkeeseen). Jauhinkappaleina käytetään teräs- tai valurautakuulia, terästankoja ja jauhinlieriöitä. Myös jauhettavien materiaalien kappaleita voidaan käyttää jauhinkappaleina, jolloin puhutaan autogeenijauhatuksesta. Jauhatusta tapahtuu joko kuiva- tai märkäjauhatuksena. Märkäjauhatusta on yleisimmin käytetty, menetelmä vaikka jauhatusprosessin kannalta ei ole paljon eroa sillä, että suoritetaanko jauhatusta märkä- vai kuivajauhatuksena. (Kaiva 2014).

### 4.1 Koejärjestely

Koejärjestelyt aloitettiin käymällä läpi näytteenotto, kuulien lisäys, Redlerien ja kuulamylyjen turvallinen käyttö kokeen aikana. Ohjeistus käytiin läpi tutustumalla käyttöturvallisuusohjeisiin ja käymällä vuoron etumiehen kanssa paikan päällä katsomassa oikea toimintamalli ja turvallinen työskentely sekä turvakytkimien sijainti hätätapauksien varalta. Tehtiin näytteenotto suunnitelma (LIITE 3).

Aloitettiin tarvittavien tarvikkeiden hankkiminen ja vieminen kohteisiin.

Aloitettiin näytetyössä tarvittavien kuulien laskeminen käyttämällä kaavoja 9 ja 10. Kokeisiin tarvittiin molemmille pasuttolinjoille 3 \* 100 kg kuulia. Yhden kuulan halkaisija oli 2” eli 5,08 cm säde  $r = 2.54$  cm kuulan tilavuus laskettiin käyttämällä kaavaa 9. Kuulan paino saatiin laskemalla kaavalla 10. Näytetyössä yhdellä kertaa lisättävien kuulien määrä lasketaan kaavalla 11 ja kaiken kaikkiaan kuulia tarvitaan 300 kg / kuulamyly. Kuvassa 15 on esitetty kuulien laskenta.

Kuulan tilavuus lasketaan yhtälöllä (kaava 9):

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (9)$$

Kuulan massa lasketaan yhtälöllä (kaava 10):

$$m = V * \rho \quad (10)$$

Kuulien lukumäärä lasketaan yhtälöllä (kaava 11)

$$lkm = m * m_t \quad (11)$$

Kuulat laitettiin sinkkiämpäreihin, jolloin ämpäriin tuli 93 kuulaa eli 50,265 kg:n ämpäreitä tuli kaksi jokaista koekertaa varten, eli ämpäreitä tuli kuulamylyä kohti 6 kpl, ja niihin laitettiin huomiolaput, ettei kukaan vahingossa ota tai sekoita ämpäreitä. Kuvassa 16 esitetään 1 kuulamylyllä valmiiksi laitettuja, kuulaämpäreitä ja huomiolappuja.

D	2"	0,0508 m
r	1"	0,0254 m
V		0,00006864197 m <sup>3</sup>
ρ		7874 m <sup>3</sup>
m		kuulan paino
$m_t$		kuulien paino yhteensä 100 kg
lkm		kuulien määrä kpl

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad V = \frac{(4\pi 0,0254 \text{ m})^3}{3} = 0,00006864197 \text{ m}^3$$

$$m = V * \rho \quad m = 7874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,00006864197 \text{ m}^3 = 0,54048689673 \text{ kg}$$

$$lkm = m * m_t \quad lkm = 0,54048689673 \text{ kg} / 100 \text{ kg} = 185,018361417034 \text{ kpl} \approx 185,02 \text{ kpl} \approx 186 \text{ kpl}$$

- 1- kuulamyly koe \* 3 kuulien lisäämistä kertaa \* 186 kpl kuulia = 556 kpl kuulia
  - 2- kuulamyly koe \* 3 kuulien lisäämistä kertaa \* 186 kpl kuulia = 556 kpl kuulia
- yhteensä.                    1116 kpl 603,18 kg

KUVA 15. Kuulamäärien laskenta.



KUVA 16. Kuulaämpärit ja huomiolaput

Kuulamyly 1:een teetettiin pasuton kunnossapidossa näytteenottokauha (KUVA 17) Redlerin-päädyn näytteiden ottoa varten, jotta kädet pysyvät luukkujen ulkopuolella, eivätkä kädet tai vaatteet pääse tarttumaan Redler-kuljettimen liikkuviin osiin.



KUVA 17. Näytteenottoastia ja pasutenäytettä astiassa.

## 4.2 Kokeen suoritus

Kokeet suoritettiin molemmille pasutuslinjoille erikseen. Kokeet poikkesivat toisistaan vain näytteenoton osalta. Vaikeuksia tuotti ennen 2 kuulamylyä otettava näyte, joka jouduttiin ottamaan kuulamylyn syöttöruuvilta. Näytteenotto onnistui vain pysäyttämällä näytteenoton ajaksi kuulamylyn syöttöruuvi turvakatkaisijasta, jolloin pysähtyi myös Redler-kuljetin, jonka jälkeen pääsi ottamaan näytteen avaamalla kuulamylyn syöttöruuvin huoltoluukun.

### 4.2.1 1-Pasutuslinja

Pasutuslinjalla 1. koe aloitettiin ilmoittamalla valvomoon työskentelystä kuulamylyillä ja samalla otettiin käyttöön radiopuhelin yhteydenpitoa varten. Näytteenotto aloitettiin avaamalla Redlerin luukku ja suoja verkko, 1. näyte otettiin Redler-kuljettimelta purkaussuppiloon putoavasta pasutteesta (KUVA 19) pitkävartisella näytteenottokauhalla (KUVA 18) jolloin kädet pysyvät luukkujen ulkopuolella turvallisuussyistä.



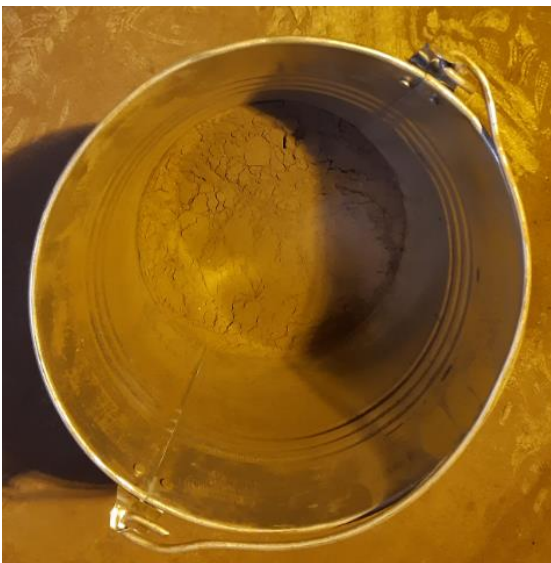
KUVA 18. Näytteenottokauhanvarsi ja Redler-kuljetin.





KUVA 19. Redler-kuljetin ja purkaussuppilo.

Näyte otettiin sinkkiämpäriin, jonka jälkeen luukku suljettiin. Sinkkiämpäri näytteineen siirrettiin turvalliseen paikkaan jäähtymään (KUVA 20) ja siirryttiin kuulamylllyn purkauspuolelle ottamaan näytettä.



KUVA 20. Pasute näytettä sinkkiämpärissä.

Kuulamylllyn purkauspuolella sekoittuvat kuulamylllyn läpikulkeva pasute ja sähkösuodattimelta ja sykloneilta tuleva hienopasute. Näytteenottoaika sijaitsee purkaussuppilon sivussa (KUVA 21), josta näytteenottokauhalla (KUVA 22) jouduttiin ottamaan useita kertoja näytettä sinkkiämpäriin jäähtymään näyttekauhan kauhan koon takia.



KUVA 21. Kuulamylyn purkaussuppilon näytteenottoaika ja näytteenottokauha.



KUVA 22. Näytteenottokauha kuulamylyn purkauspuolella.

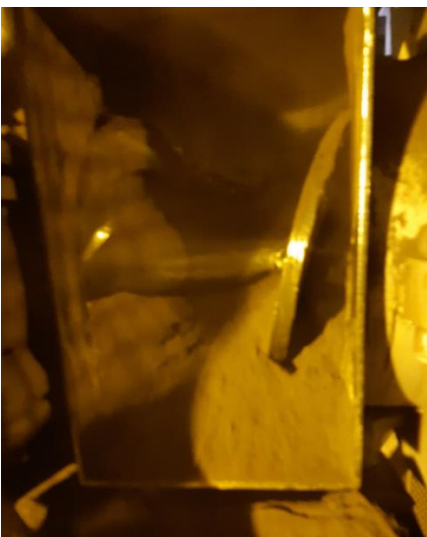
Näytteen oton jälkeen avattiin Redler-kuljettimen luukut ja aloitettiin lisäämään kuulia ensimmäisestä erästä, kuulia lisättiin muutama kuula kerrallaan, ettei kuulamylyn syöttöruuvi mene jumiin ja pysähdy. Kuulien lisäyksen jälkeen oli 2 tunnin tauko. Tauon jälkeen siirrettiin sinkkiämpäreistä näytteet omiin näyteastioihin ja 2. kokeessa uusittiin 1. kokeessa tehdyt toimet. Tehtiin samat vaiheet vielä 3. Kerran uudelleen. 4- kokeessa otettiin vain näytteet, jonka jälkeen näytteet vietiin Bolidenin laboratorioon analysointia varten. Kokeiden aikana kirjattiin ylös tapahtumien kellonajat (LIITE 4).

#### 4.2.2 2-Pasutuslinja

Pasutuslinjalla-2 Koe 1 aloitettiin ilmoittamalla valvomoon työskentelystä kuulamyyllyillä ja samalla otettiin käyttöön radiopuhelin yhteydenpitoa varten. Näytteenotto laittamalla kuulamyllyn syöttöruuvien luukun alle sinkkiämpäri, jonka jälkeen ilmoitettiin valvomoon, jotta voitaisiin kytkeä kuulamyllyn syöttöruuvi pois käytöstä hätäkatkaisijasta (KUVA 23). Avattiin pasutteen syöttöruuvien luukku (KUVA 24) ja kaavittiin näytekauhalla pasutetta sinkkiämpäriin. Suljettiin kuulamyllyn syöttöruuvien luukku ja laitettiin turvakatkaisijat käyttöasentoon, jonka jälkeen ilmoitettiin valvomoon Redlerin ja kuulamyllyn syöttöruuvien käyttöönottoa varten. Siirrettiin sinkkiämpäri näytteineen turvalliseen paikkaan odottamaan, että pasute jäähtyy.



KUVA 23. Kuulamyllyn syöttöruuvien turvakatkaisijat.



KUVA 24. Kuulamyllyn syöttöruuvi luukku auki ja pasutetta

Kuulamylyn purkaussuppilosta otettiin näytteet näytteenottoaukosta näytteenottokauhalla ja laitettiin sinkkiämpäriin (KUVA 25) ja sinkkiämpäri siirrettiin turvalliseen paikkaan jäähtymään (KUVA 26).



KUVA 25. Näytteenottokauha ja näytteenottoaukko.



KUVA 26. Näyte jäähtymässä sinkkiämpärissä.

Siirryttiin Redler-kuljettimen purkauspäähän, josta avattiin luukku (KUVA 27) ja suojaverkko (KUVA 28), jonka jälkeen aloitettiin syöttää ensimmäinen erä kuulia Redlerin-purkaussuppiloon muutama kuula kerrallaan, ettei kuulamylyn syöttöruuvi tukkeudu ja pysähtyessään pysäytä myös Redler-kuljetinta.



KUVA 27. Redlerin-purkaussuppilon luukku.



KUVA 28. Redlerin-purkaussuppilon suojaverkko.

Kuulien lisäyksen jälkeen suljettiin Redler-kuljettimen purkaussuppilon suoja-  
verkko ja luukku. Odotettiin 2 tuntia ja laitettiin jäähtymässä olleet näytteet numeroituihin astioihinsa. Seuraavaksi toistettiin pasutuslinja-2 kokeessa 1-kokeessa tehdyt toimet. Tehtiin samat vaiheet vielä 3 kerran uudelleen. 4-kokeessa otettiin vain näytteet, jonka jälkeen näytteet vietiin Bolidenin laboratorioon analysointia varten.

### 4.3 Näytteiden käsittely ja analysointi

Näytteet toimitettiin laboratorioon 5l merkityissä näyteastiassa noin 1 kg näytettä/ astia, molempien koekäytöiden jälkeen. Näytteet analysoitiin Boliden Kokkolan laboratoriossa sinne toimitetuista näytteistä, näytteistä analysoitiin raekoko ja happoliukoinen Zn ja Si.

Raekoko:

Ennen kuulamylyä otetut näytteet on esiseulottu 630  $\mu\text{m}$ :n seulan läpi, koska sitä isommat partikkelit saattavat tukkia raekokoanalysointilaitteen. Tuon 630  $\mu\text{m}$ :n seulan läpimennyt aines on analysoitu raekokoanalysointilaitteella ja yli 630  $\mu\text{m}$ :n osuus on lisätty jälkeensä raekokokuvaajaan. Analysointilaitteena on käytetty Laser diffraktio raekokoanalysointilaitteita Malvern Mastersizer 3000:ta, jossa on Hydro EV-näytteen-  
syöttäjä.

Happoliukoiset:

4g näytettä sekoitetaan 30 minuuttia 100 millilitraan 100 mg/l rikkihappoa sisältävään liuokseen. Näyte huuhdellaan mittapulloon 500 millilitran lopputilavuuteen ja suodatetaan. Suodoksesta tehdään sopiva laimennos ICP-OES-laitetta varten. Mittauksessa käytetty laite on Thermo iCAP 7000 inductively coupled plasma - optical emission spectrometer.

## 4.4 Tulosten tarkastelu

Työn tarkoituksena oli tutkia kuulien määrän lisäämisen vaikutus kuulamyllystä poistuvan pasutteen reakokoon ja Zn- ja Si-happoliukkoisuuteen. Vertailussa oli tarkoitus selvittää, voiko kuulien lisäämisellä saavuttaa paremman jauhatustason ja paremman happoliukkoisuuden. Happoliukkoisuuden analysointituloksissa ennen ja jälkeen kuulamyllystä tuloksia kuvataan kuulamyllly 1 (TAULUKKO 1) ja (TAULUKKO 2) sekä kuulamyllly 2 (TAULUKKO 3) ja (TAULUKKO 4.) Mittaustulosten avulla tutkittiin pasutteen raekokoa ja Zn-happoliukkoisuutta ennen ja jälkeen kuulamyllystä (LIITE 1). Näytteitä otettiin ennen kuulien lisäämistä ja noin 2 tuntia lisäämisen jälkeen, kuulien lisääminen tapahtui kolmessa 100 kg erässä. Näytteet analysoitiin Bolidenin laboratoriossa.

Tuloksiin ennen kuulamyllystä vaikutti uuniin syötettävän rikasteen syöttösuhteet ja uunin toiminta, sekä huoltotoimenpiteet mittausten aikana kuten esimerkiksi arinarautojen lisäys ja uunin rassaus. Kuulamylllyn jälkeen tuloksiin vaikutti, kuulamylllyn täyttöaste ja syklonilta kuulamylllyn purkauspuolelle palautuva hienojakoisen pölyn sekoittuminen näytteeseen.

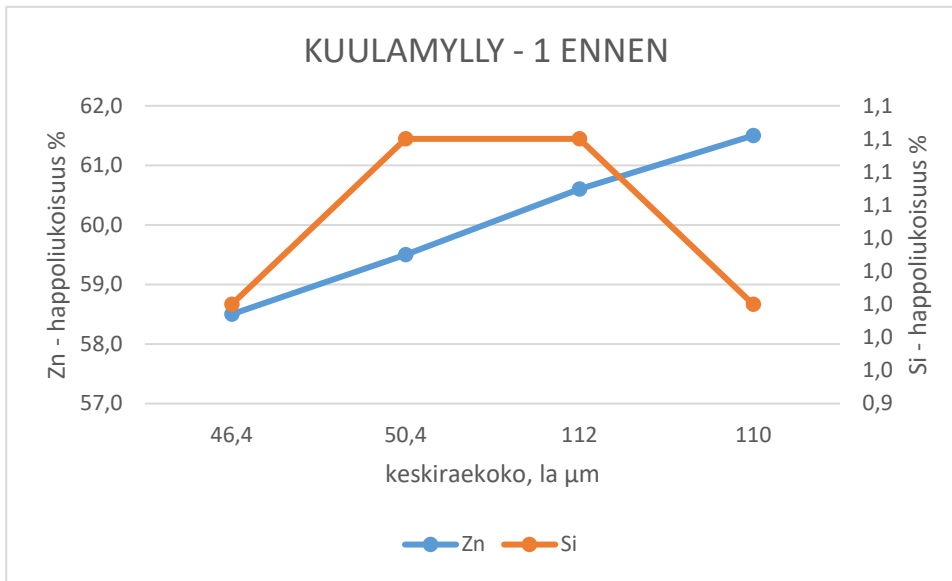
### 4.4.1 Happoliukkoisuus

TAULUKKO 1. Kuulamyllly -1 pasutteen happoliukkoisuustulokset ennen kuulamyllystä.

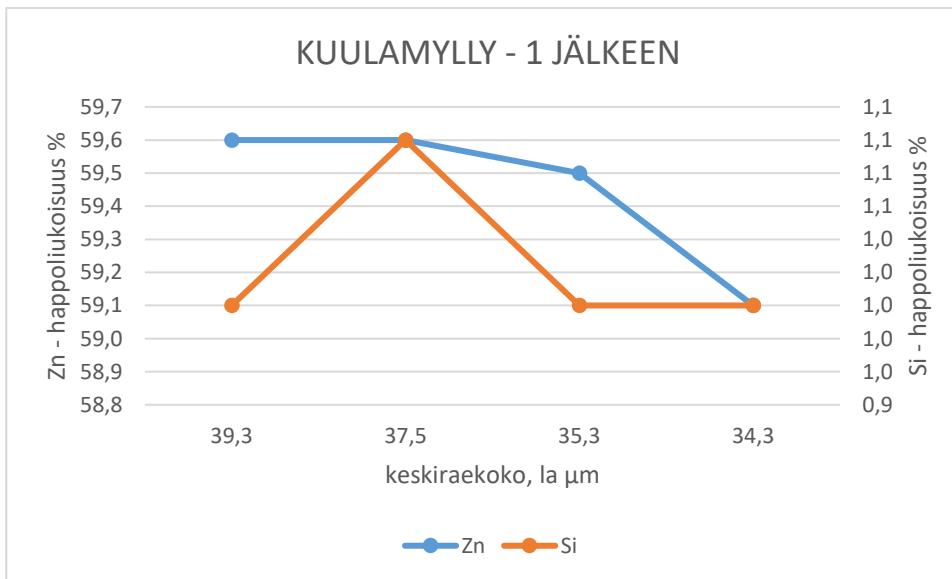
Opinnäytetyö kuulamyllly-1 16.7.	Zn hl	Si hl	Keski- rae
	%	%	koko, la µm
Näyte 1. ennen 1-kuulam.	58,5	1	46,4
Näyte 3. ennen 1-kuulam.	59,5	1,1	50,4
Näyte 5. ennen 1-kuulam.	60,6	1,1	112
Näyte 7. ennen 1-kuulam.	61,5	1	110

TAULUKKO 2. Kuulamyllly -1 pasutteen happoliukkoisuustulokset kuulamylllyn jälkeen.

Opinnäytetyö kuulamyllly-1 16.7.	Zn hl	Si hl	Keski- rae
	%	%	koko, la µm
Näyte 2. jälkeen 1-kuulam.	59,6	1	39,3
Näyte 4. jälkeen 1-kuulam.	59,6	1,1	37,5
Näyte 6. jälkeen 1-kuulam.	59,5	1	35,3
Näyte 8. jälkeen 1-kuulam.	59,1	1	34,3



KUVIO 1. Happoliukoisuus kuvaaja ennen 1-kuulamyllyä. Keskiraekoko kuvaajassa esitetty koejärjestyksessä 1.3.5.7.



KUVIO 2. Happoliukoisuus kuvaaja 1-kuulamyllyn jälkeen. Keskiraekoko kuvaajassa esitetty koejärjestyksessä 2.4.6.8

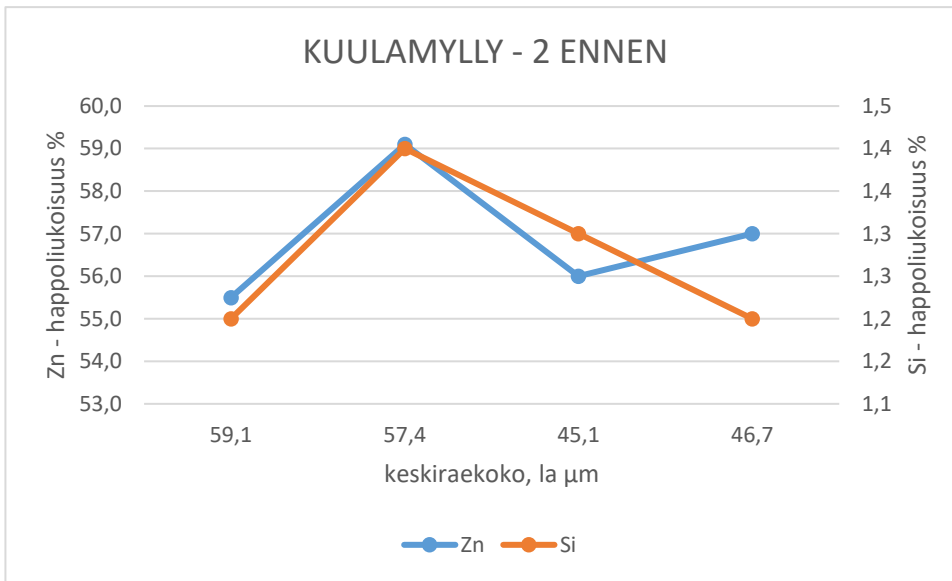


TAULUKKO 3. Kuulamyly - 2 pasutteen happoliukoisuustulokset ennen kuulamylyä.

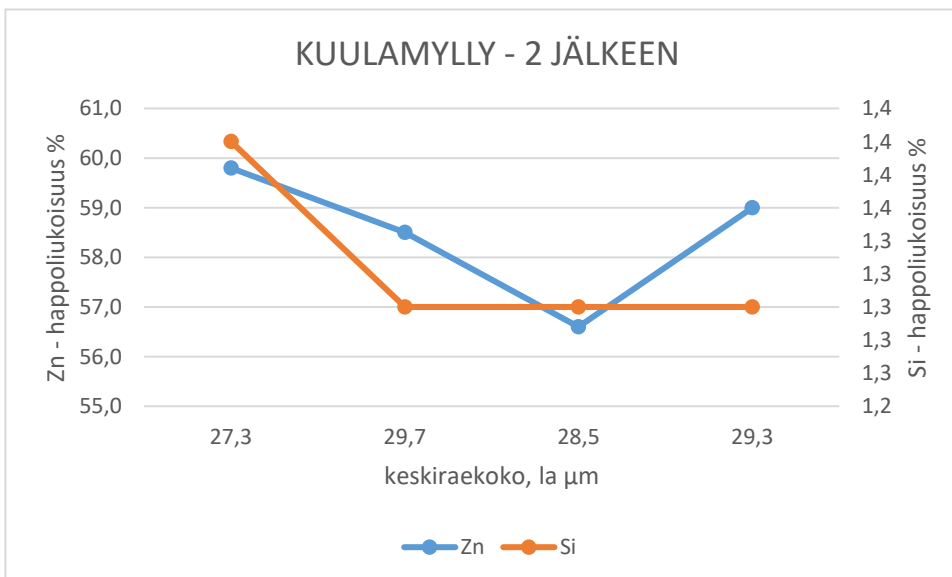
Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	Zn hl	Si hl	Keskirae koko, la µm
	%	%	
2-KOE näyte 9. ennen 2-kuulam	55,5	1,2	59,1
2-KOE näyte 11. ennen 2-kuulam	59,1	1,4	57,4
2-KOE näyte 13. ennen 2-kuulam	56	1,3	45,1
2-KOE näyte 15. ennen 2-kuulam	57	1,2	46,7

TAULUKKO 4. Kuulamyly - 2 pasutteen happoliukoisuustulokset kuulamylyn jälkeen.

Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	Zn hl	Si hl	Keskirae koko, la µm
	%	%	
2-KOE näyte 10. jälkeen 2-kuulam	59,8	1,4	27,3
2-KOE näyte 12. jälkeen 2-kuulam	58,5	1,3	29,7
2-KOE näyte 14. jälkeen 2-kuulam	56,6	1,3	28,5
2-KOE näyte 16. jälkeen 2-kuulam	59	1,3	29,3



KUVIO 3. Happoliukoisuus kuvaaja ennen 2-kuulamyllyä. Keskiraekoko kuvaajassa esitetty koejärjestyksessä 9.11.13.15



KUVIO 4. Happoliukoisuus kuvaaja 2-kuulamyllyn jälkeen. Keskiraekoko kuvaajassa esitetty koejärjestyksessä 10.12.14.16

#### 4.4.2 Raekoko 1 – Kuulamyly

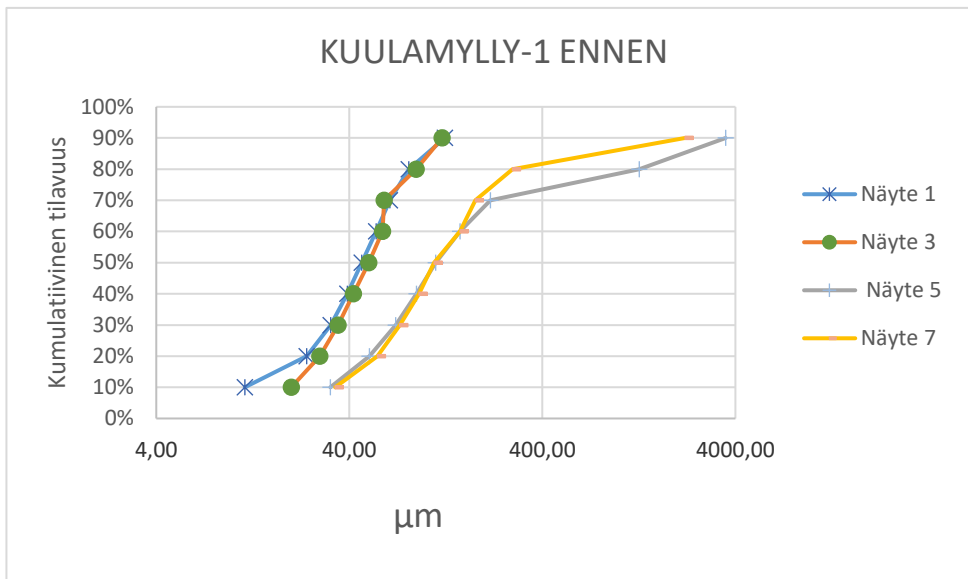
Raekoot Dv (10)(20)(50)(80)(90) tulevat suoraan laboratorion tuloksista esimerkkinä (LIITE 2) josta (30)(40)(60)(70) laskettu manuaalisesti (LIITE 2) kuvaajasta. Taulukkoon jouduttiin laskemaan jokaisesta näytteestä esimerkin mukaisesti.

TAULUKKO 5. Kuulamyly -1 pasutteen raekoko tulokset ennen kuulamylyä.

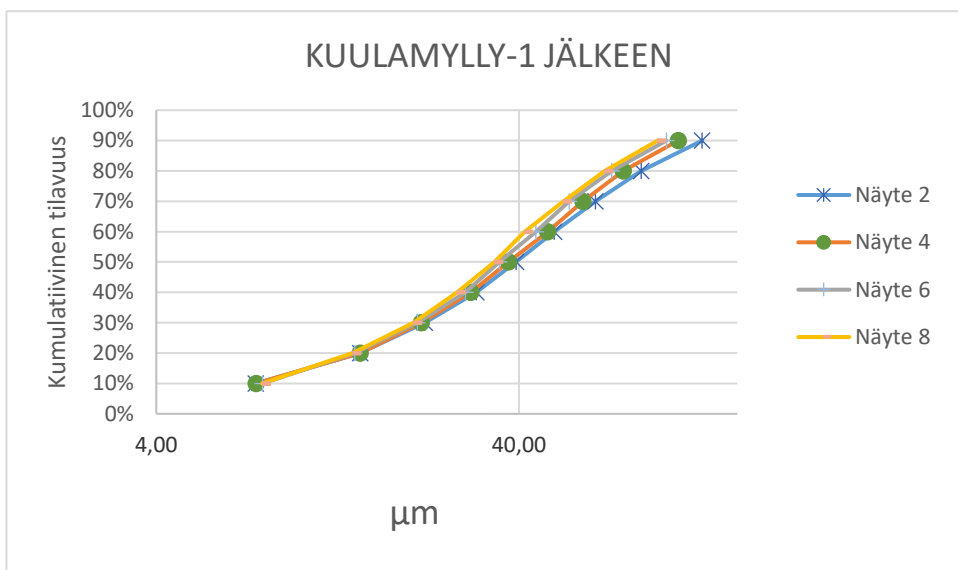
		Näyte 1	Näyte 3	Näyte 5	Näyte 7	
Dv(10)	10 %	11,50	20,00	31,90	33,80	
Dv(20)	20 %	24,10	28,10	50,80	56,00	
	30	30 %	32,00	35,00	69,50	73,00
	40	40 %	39,00	42,00	89,00	92,00
Dv(50)	50 %	46,40	50,40	112,00	110,00	
	60	60 %	55,00	59,50	150,00	150,00
	70	70 %	65,00	60,50	215,00	180,00
Dv(80)	80 %	81,20	88,80	1270,00	280,00	
Dv(90)	90 %	125,00	121,00	3560,00	2190,00	

TAULUKKO 6 Kuulamylyyn 1 pasutteen raekoko tulokset kuulamylyyn jälkeen.

		Näyte 2	Näyte 4	Näyte 6	Näyte 8	
Dv(10)	10 %	7,53	7,54	7,86	7,83	
Dv(20)	20 %	14,60	14,60	14,10	13,90	
	30	30 %	22,00	21,50	21,00	20,50
	40	40 %	30,50	29,50	28,50	27,00
Dv(50)	50 %	39,30	37,50	35,30	34,30	
	60	60 %	50,00	48,00	44,50	41,50
	70	70 %	65,00	60,00	55,00	53,00
Dv(80)	80 %	86,90	77,60	72,10	69,00	
Dv(90)	90 %	128,00	110,00	102,00	96,50	



KUVIO 5. Raekoko kuvaaja ennen 1-kuulamyllyä.



KUVIO 6. Raekoko kuvaaja 1-kuulamyllyn jälkeen.

#### 4.4.3 Raekoko 2 – Kuulamyly

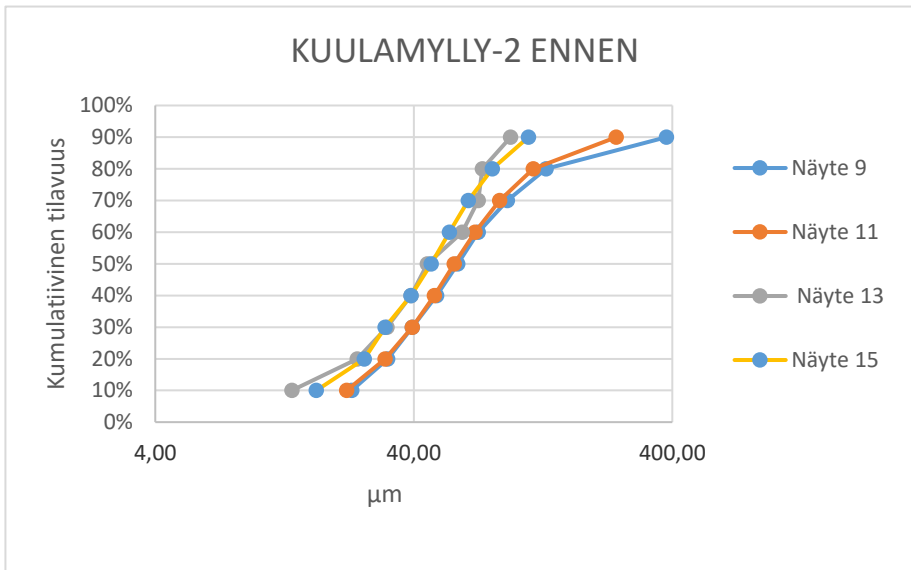
Raekoot (30)(40)(60)(70) on laskettu samalla lailla kuin 1- kuulamylyn esimerkin kohdalla.

TAULUKKO 7. Kuulamyly -2 pasutteen raekoko tulokset.

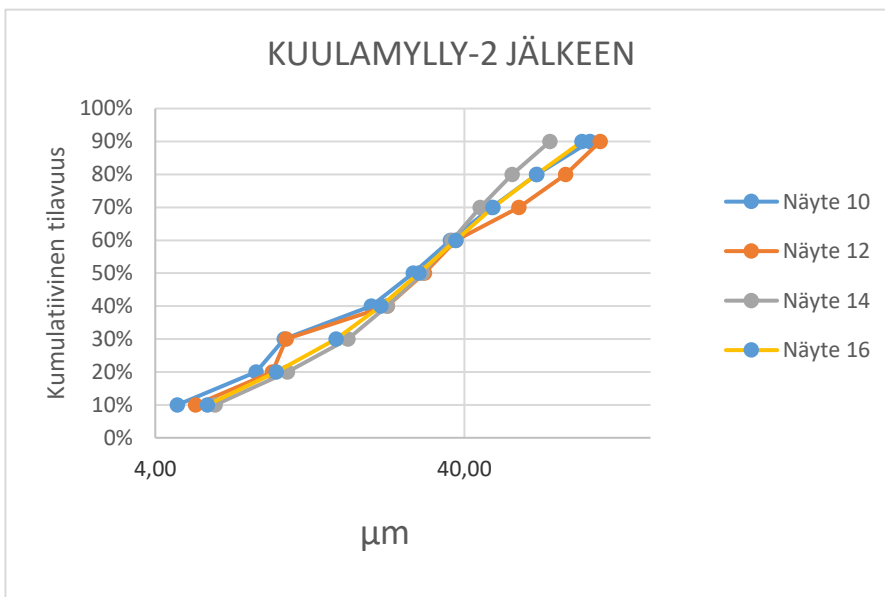
		Näyte			
		Näyte 9	Näyte 11	Näyte 13	Näyte 15
Dv(10)	10 %	23,00	22,00	13,50	16,80
Dv(20)	20 %	31,70	31,00	24,20	25,70
30	30 %	39,50	39,50	31,50	31,00
40	40 %	49,00	48,00	39,00	39,00
Dv(50)	50 %	59,10	57,40	45,10	46,70
60	60 %	71,00	69,00	61,50	55,00
70	70 %	92,00	86,00	71,00	65,00
Dv(80)	80 %	130,00	116,00	73,70	80,50
Dv(90)	90 %	380,00	243,00	94,80	111,00

TAULUKKO 8. Kuulamyly -2 pasutteen raekoko tulokset.

		Näyte 10	Näyte 12	Näyte 14	Näyte 16
Dv(10)	10 %	4,72	5,40	6,25	5,90
Dv(20)	20 %	8,48	9,58	10,70	9,86
30	30 %	10,45	10,60	16,80	15,40
40	40 %	20,00	22,50	22,50	21,50
Dv(50)	50 %	27,30	29,70	29,30	28,50
60	60 %	36,00	37,50	36,50	37,50
70	70 %	49,00	60,00	45,00	49,50
Dv(80)	80 %	68,60	85,00	57,10	68,50
Dv(90)	90 %	102,00	110,00	75,60	96,10



KUVIO 7. Raekoko kuvaaja ennen 2-kuulamyllyä.



KUVIO 8. Raekoko kuvaaja 2-kuulamyllyn jälkeen

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työn tavoitteena oli tarkastella kuulien lisäämisen vaikutusta raekokoon ja Zn-happoliukoisuuteen. Työn tuloksia vertailtiin kummallakin kuulamylyllä ennen ja jälkeen kuulamylyä otetuista näytteistä. Kokeet suoritettiin näytteidenotto-suunnitelman (LIITE 3) mukaan ja näytteidenottoajat ja kuulien lisääminen kirjattiin ylös (LIITE 4). Kokeesta saatujen tuloksien mukaan raekoko pieneni, joka paransi Zn-happoliukoisuutta ja pienensi Si-happoliukoisuutta. Tutkimus tuloksiin vaikutti uunipasutteen raekoon vaihteleva koostumus ja edustavan näytteen ottamisen toistaminen. (LIITE 4).

Työn tuloksista pääteltiin, että Bolidenin sinkkipasuton tulisi tehdä laajempi tutkimus kuulien lisäämisestä kuulamylyihin, jotta saataisiin optimaalinen lopputulos raekoossa ja Zn-happoliukoisuudessa.

## LÄHTEET

Boliden 2020. Bolidenin historia. Saatavissa: <https://www.boliden.com/fi/operations/about-boliden/bolidens-history>. Viitattu 19.11.2020.

Boliden Kevitsa Mining Oy. 2020. Technical report for the Kevitsa cu-ni-pge mine, Finland. SRK Consulting (Finland) Oy. 30559 Kevitsa Technical Report\_2019\_Final.docx. Saatavissa: [https://www.boliden.com/globalassets/operations/exploration/mineral-resources-and-mineral-reserves-pdf/2019/resources\\_and\\_reserves\\_kevitsa\\_technical\\_report\\_2019-12-31.pdf](https://www.boliden.com/globalassets/operations/exploration/mineral-resources-and-mineral-reserves-pdf/2019/resources_and_reserves_kevitsa_technical_report_2019-12-31.pdf). Viitattu 19.11.2020.

Boliden Kokkola 2020 a. Sulatot Kokkola. Saatavissa: <https://www.boliden.com/fi/operations/smelters/boliden-kokkola>. Viitattu 26.03.2021.

Boliden Kokkola 2020 b. Boliden annual reports 2019. Saatavissa: <https://vp217.alertir.com/afw/files/press/boliden/202003107199-1.pdf>. Viitattu 19.11.2020.

Boliden Kokkola CCG. CGG product sheet. Saatavissa: <https://www.boliden.com/globalassets/operations/products/zinc/cgg-product-sheet-2018.pdf>. Viitattu 23.03.2021

Boliden Kokkola Q. Boliden Quality first tietokanta KUULAMYLLY. Viitattu 26.11.2020

Boliden Kokkola SHG. SHG product sheet. Saatavissa: <https://www.boliden.com/globalassets/operations/products/zinc/shg-product-sheet-2018.pdf>. Viitattu 26.03.2021

Boliden Kylylahti Oy. Kevitsa R&R 2019 Review. Saatavissa: [https://www.boliden.com/globalassets/operations/exploration/mineral-resources-and-mineral-reserves-pdf/2019/resources\\_and\\_reserves\\_kevitsa\\_technical\\_report\\_2019-12-31.pdf](https://www.boliden.com/globalassets/operations/exploration/mineral-resources-and-mineral-reserves-pdf/2019/resources_and_reserves_kevitsa_technical_report_2019-12-31.pdf). Viitattu 26.03.2021

Caverion ilmakuva teollisuus alueesta. Saatavissa: <https://www.caverion.fi/referenssit/boliden-kokkola>. Viitattu 12.11.2020.

Hätinen A. 2009. Kemianteekniikan koulutusohjelma. Keski-pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/6380/hatinen\\_ari.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/6380/hatinen_ari.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Viitattu 07.03.2021

Heikura O-J. 2017. SO<sub>2</sub> - kaasun käsittely ja ilmanpäästömittausten vaatimustenmukaisuus. Kemianteekniikan koulutusohjelma. Kokkola Centrian Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://docplayer.fi/61100166-So2-kaasun-kasittely-ja-ilmapaastomittausten-vaa-timustenmukaisuus.html>. Viitattu 19.11.2020

Hämäläinen V. Myllynuorausten kunnonvalvonnan kehitys. Teknologiaosaamisen johtaminen Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/151791/Hamalainen\\_Ville.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/151791/Hamalainen_Ville.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Viitattu 07.01.2021

Kaiva 2014. Hienonnus. Kiintoaineiden lajittelu. Saatavissa: [https://kaiva.fi/wp-content/uploads/2014/12/Hienonnus\\_Kaiva-fi.pdf](https://kaiva.fi/wp-content/uploads/2014/12/Hienonnus_Kaiva-fi.pdf). Viitattu 26.03.2021



Korhonen-Helander M ja Willman J. 2015. Piimaan syötön optimointi. Kemianteeniikan koulutusohjelma Kokkola Centrian Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/102693/Korhonen-Helander\\_Merja%20Willman\\_Janne.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/102693/Korhonen-Helander_Merja%20Willman_Janne.pdf?sequence=1). Viitattu 19.12.2020

Lukkarinen, T. 1985. Mineraalitekniikka, Osa 1, Mineraalien hienonnus, 2. painos, Insinööritieto Oy, Viitattu 7.12.2020

Melanen, T. 2013. Helmimyllyn toimintaparametrien vaikutus jauhautuvuuteen. Kemianteeniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Saatavissa: [https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/93841/Kandidaatinty%C3%B6\\_Melanen.pdf?sequence=2](https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/93841/Kandidaatinty%C3%B6_Melanen.pdf?sequence=2). Viitattu 27.11.2020

Malvern Instruments Ltd. Saatavissa: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000>. Viitattu 12.11.2020.

Pihkala, J. 2011. Prosessitekniikka, Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit, 2. painos, Opetushallitus, 2007. Viitattu 21.11.2020

Pihkala, J. 2011. Prosessitekniikka, Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit, 1. painos, Opetushallitus. Viitattu 7.12.2020

Rasimäki J. 2018. Luuliima syöttöpisteen uudistaminen. Tuotantotalouden koulutusohjelma. Kokkola Centrian Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/143601/Rasinmaki\\_Jani.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/143601/Rasinmaki_Jani.pdf?sequence=1). Viitattu 19.11.2020

## LIITE 1

Pvm.-aika	Näyte/koe	Lisätieto	Zn		Keskirae koko, la µm
			hl %	Si hl %	
20200722-1143	Opinnäytetyö kuulamyly-1 16.7.	1-KOE näyte 1. ennen 1-kuulam.	58,5	1,0	46,4
20200722-1143	Opinnäytetyö kuulamyly-1 16.7.	1-KOE näyte 2. jälkeen 1-kuulam.	59,6	1,0	39,3
20200722-1143	Opinnäytetyö kuulamyly-1 16.7.	1-KOE näyte 3. ennen 1-kuulam.	59,5	1,1	50,4
20200722-1143	Opinnäytetyö kuulamyly-1 16.7.	1-KOE näyte 4. jälkeen 1-kuulam.	59,6	1,1	37,5
20200722-1143	Opinnäytetyö kuulamyly-1 16.7.	1-KOE näyte 5. ennen 1-kuulam.	60,6	1,1	112
20200722-1143	Opinnäytetyö kuulamyly-1 16.7.	1-KOE näyte 6. jälkeen 1-kuulam.	59,5	1,0	35,3
20200722-1143	Opinnäytetyö kuulamyly-1 16.7.	1-KOE näyte 7. ennen 1-kuulam.	61,5	1,0	110
20200722-1143	Opinnäytetyö kuulamyly-1 16.7.	1-KOE näyte 8. jälkeen 1-kuulam.	59,1	1,0	34,3

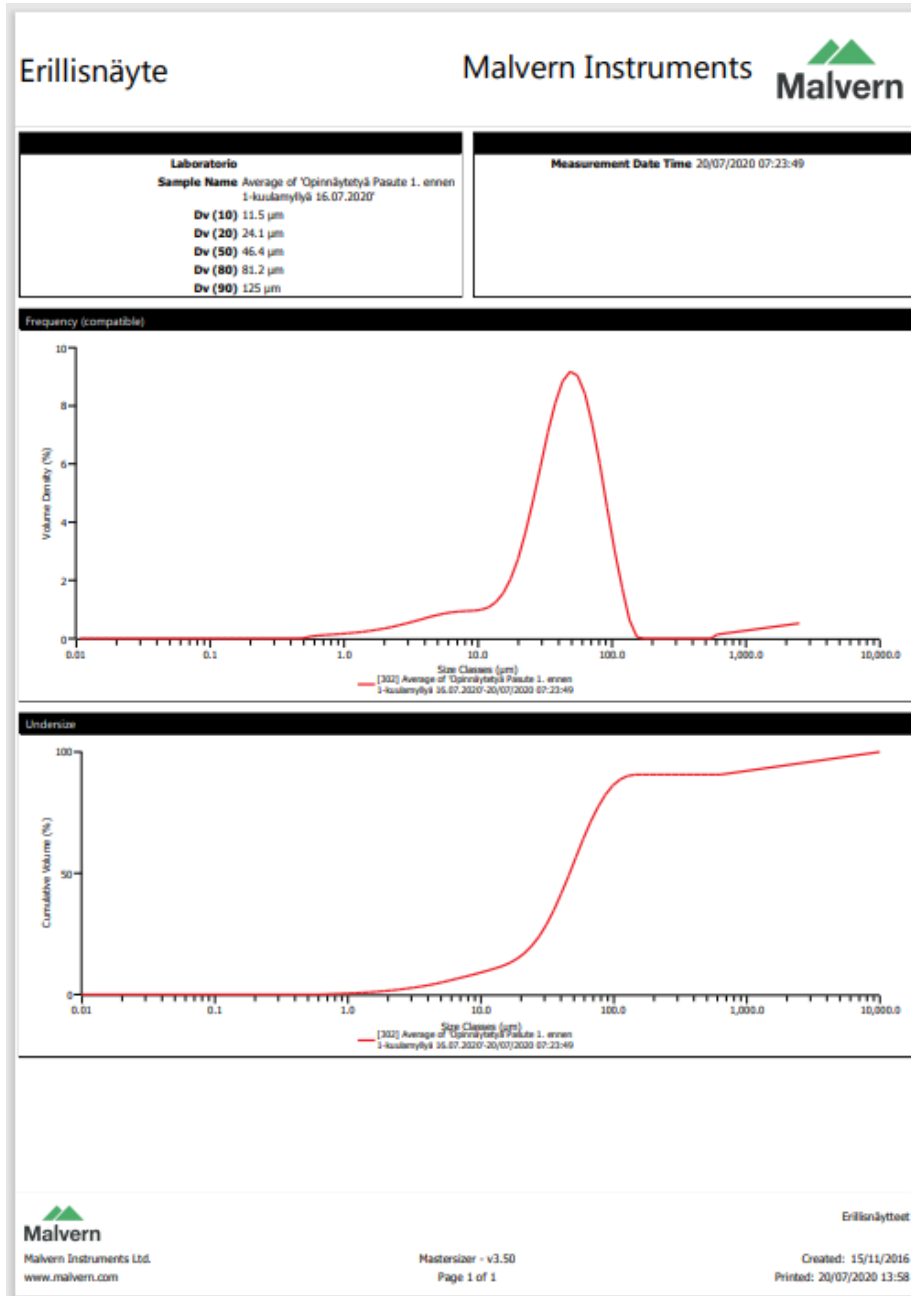
Zn – ja Si-happoliukoisuus 1- kuulamylylln näytteissä.

Pvm.-aika	Näyte/koe	Lisätieto	Si		Keskirae koko, la µm
			Zn hl %	hl %	
20200731-1258	Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	2-KOE näyte 9. ennen 2-kuulam	55,5	1,2	59,1
20200731-1258	Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	2-KOE näyte 10. jälkeen 2-kuulam	59,8	1,4	27,3
20200731-1258	Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	2-KOE näyte 11. ennen 2-kuulam	59,1	1,4	57,4
20200731-1258	Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	2-KOE näyte 12. jälkeen 2-kuulam	58,5	1,3	29,7
20200731-1258	Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	2-KOE näyte 13. ennen 2-kuulam	56,0	1,3	45,1
20200731-1258	Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	2-KOE näyte 14. jälkeen 2-kuulam	56,6	1,3	28,5
20200731-1258	Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	2-KOE näyte 15. ennen 2-kuulam	57,0	1,2	46,7
20200731-1258	Opinnäytetyö kuulamyly-2 30.7.	2-KOE näyte 16. jälkeen 2-kuulam	59,0	1,3	29,3

Zn – ja Si-happoliukoisuus 2- kuulamyllyn näytteissä.

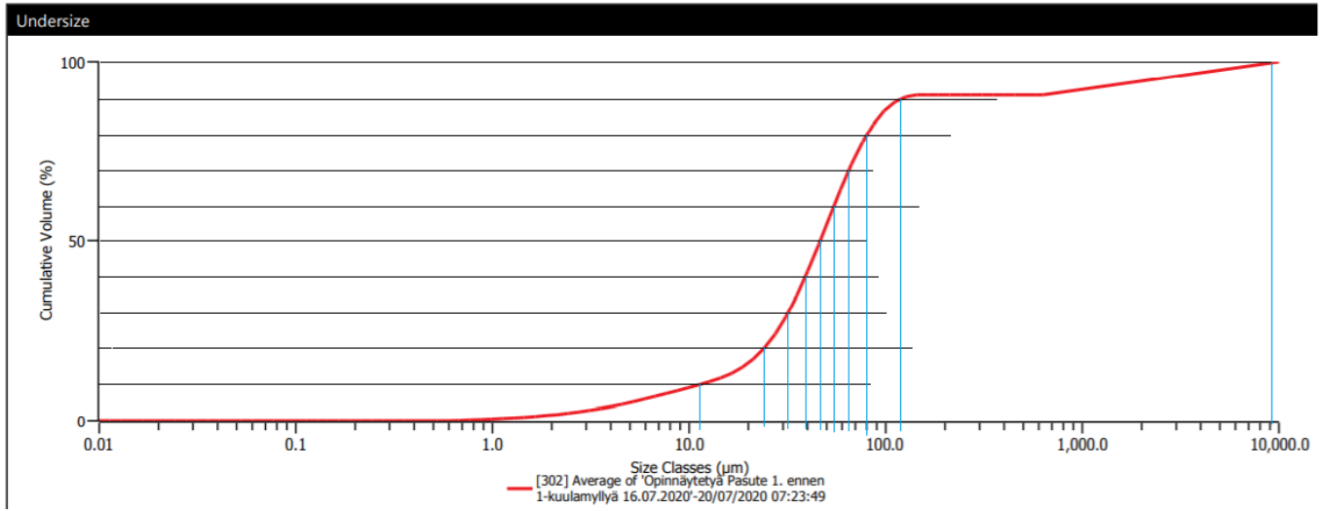
Liite 2 / 1

Erillisnäyte 1- kuulamyllyn 1-näytteen raakoista.



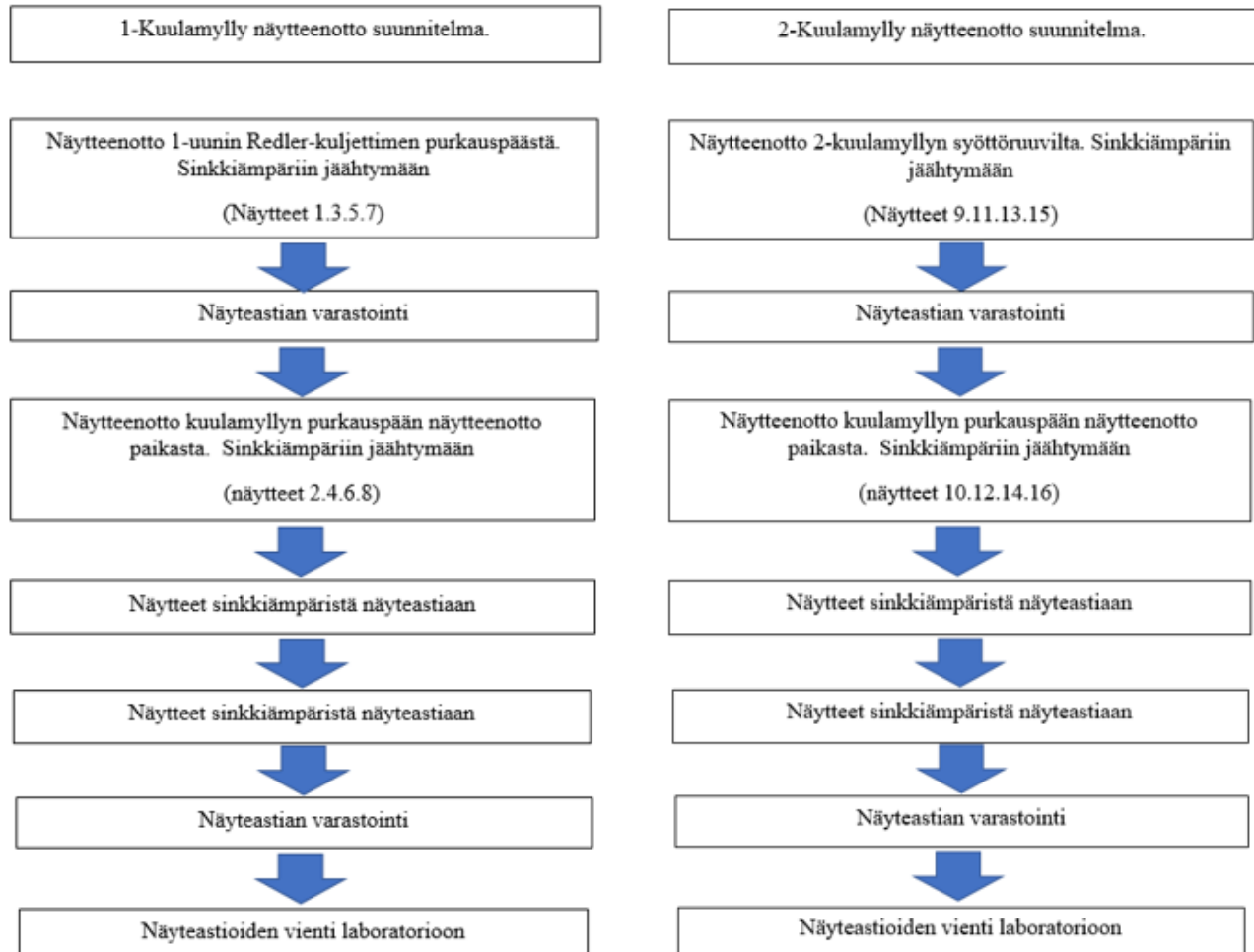
## LIITE 2/2

1- kuulamylyyn 1-näytteen raekoosta 20%,30%, 60%,70% arvojen tulkinta kuvaajasta.



## LIITE 3

Näytteenotto suunnitelma 1- ja 2-kuulamyllyille.



## LIITE 4

## Näytteenotto 1- ja 2-kuulamyllyillä

<b>KUULAMYLLY 1</b>			
1	1	Näyte 1	ennen kuulamylyä
	2	Näyte 2	kuulamyllyn jälkeen
	3	kuulien lisäys	1 puolelle

2	4	näyte 3	ennen kuulamylyä
	5	näyte 4	kuulamyllyn jälkeen
	6	kuulien lisäys	1 puolelle

3	7	näyte 5	ennen kuulamylyä
	8	näyte 6	kuulamyllyn jälkeen
	9	kuulien lisäys	1 puolelle

4	10	näyte 7	ennen kuulamylyä
	11	näyte 8	kuulamyllyn jälkeen

<b>KUULAMYLLY 2</b>			
5	13	näyte 9	ennen kuulamylyä
	14	näyte 10	kuulamyllyn jälkeen
	15	kuulien lisäys	2 puolelle

6	16	näyte 11	ennen kuulamylyä
	17	näyte 12	kuulamyllyn jälkeen
	18	kuulien lisäys	2 puolelle

7	16	näyte 13	ennen kuulamylyä
	17	näyte 14	kuulamyllyn jälkeen
	18	kuulien lisäys	2 puolelle

8	19	näyte 15	ennen kuulamylyä
	20	näyte 16	kuulamyllyn jälkeen

Päivä	
kellonaika	huomio!
15:25	36.10 kW
15:51	
16:00	

17:44	36.85 kW
17:56	
18:03	

19:43	37.88 kW
19:53	
20:00	

21:45	38.56 kW
21:55	

Päivä	
kellonaika	huomio!
8:25	36.02 kW
8:35	
8:51	

10:12	36.99 kW
10:24	
10:37	

12:14	37.70 kW
12:21	
12:37	

14:10	38.48 kW
14:20	