

# JAUHATUSPIIRIN ERI PARAMETRIEN VAIKUTUS JAUHATUSTULOKSEEN

Lampiaho Tommi

Opinnäytetyö

Konetekniikka  
Insinööri (AMK)

2024

Konetekniikan koulutus  
Insinööri (AMK)

---

<b>Tekijä</b>	Tommi Lampiaho	<b>Vuosi</b>	2024
<b>Ohjaaja</b>	DI Jukka Joutsenvaara		
<b>Toimeksiantaja</b>	Outokumpu Chrome Oy		
	DI Timo Pulkkinen		
<b>Työn nimi</b>	Jauhatuspiirin eri parametrien vaikutus jauhatustulokseen		
<b>Sivumäärä</b>	45 + 0		

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kartoittaa Outokumpu Chrome Oy:n Kemmin kaivoksen rikastamon jauhatuspiirin eri parametrien vaikutusta rikastustulokseen sekä jauhatuspiirin hyviä ajotapoja. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää jauhatuksen lopputuloksen kannalta merkittävimmät ohjausmuuttujat sekä parhaat säädöt ja ajotavat nykyiselle rikastamon jauhatuspiirille. Tässä työssä jauhatuksen onnistumisen laatumittarina käytettiin partikkelikokojakaamaa.

Opinnäytetyössä tutkittiin jauhatuksen lopputuloksen kannalta merkittävimpiä ohjausmuuttujia, sekä parhaita säätöjä ja ajotapoja uudistetulle jauhatuspiirille. Tutkimuksella pyrittiin selvittämään millä ohjausmuuttujilla ja säädöillä jauhetun rikasteen raekoko saadaan sopivaksi spiraalirikastusta ajatellen, sekä mitkä ovat jauhatuspiirin parhaat ajotavat ja säädöt erilaisilla jauhatuspiirin syöttömäärillä.

Tietoperustana tässä työssä käytettiin aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, toimeksiantajan omia aikaisempia aiheeseen liittyviä tutkimuksia, Outokumpu Oy:n intranettiä, aiheeseen liittyviä aikaisemmin tehtyjä opinnäytetöitä, työn tekijän omaa vahvaa prosessitietämystä sekä omakohtaisia kokemuksia työssään rikastamolla.

Opinnäytetyön tuloksina saatiin joukko erilaisia kehityskohteita rikastamon jauhatuspiiriin, raportti koeajojen aikana otettujen näytteiden tuloksista sekä tämä opinnäytetyöraportti. Edellä mainittujen tulosten avulla toimeksiantaja voi tulevaisuudessa kehittää jauhatuspiirin toimintaa sekä parantaa hienorikasteen laatua ja saantia.

**Avainsanat** tankomylly, malmi, jauhatuspiiri, seula-analyysi, raekoko, spiraalirikastus

Mechanical Engineering  
Bachelor of Engineering

---

<b>Author</b>	Tommi Lampiaho	<b>Year</b>	2024
<b>Supervisor(s)</b>	M.Sc. Jukka Joutsenvaara		
<b>Commissioned by</b>	Outokumpu Chrome Oy		
	M.Sc. Timo Pulkkinen		
<b>Title</b>	The effect of different parameters of the grinding circuit on the grinding result		
<b>Number of pages</b>	45 + 0		

---

The purpose of this thesis was to survey the effect of different parameters of the grinding circuit on the grinding results at Outokumpu Chrome Oy's Kemi mine concentrator plant, as well as the good practices to operate the grinding circuit. The aim of the thesis was to find out the most significant control variables in terms of the result of grinding, as well as the best adjustments and operating methods for the current grinding circuit. In this work, the particle size distribution was used as a quality measure of grinding success.

The thesis examined the most significant control variables in terms of the result of grinding, as well as the best adjustments and operating methods for the renewed grinding circuit. The research aimed to find out which control variables and adjustments are used to get the grain size of the ground concentrate suitable for spiral concentrators, and which are the best operating methods and adjustments of the grinding circuit with different feeding amounts of the grinding circuit.

The data base used in this work was literature related to the topic, the client's own previous studies related to the topic, Outokumpu Oy's intranet, previously completed theses related to the topic, the author of the work's own strong process knowledge and personal experiences in his work at the concentrator plant.

The thesis resulted in several different development targets for the grinding circuit, a report on the results of the samples taken during the test runs, and this thesis report. With the help of the above-mentioned results, the client can in the future develop the operation of the grinding circuit, as well as improve the quality and supply of fine concentrate.

**Keywords** rodmill, ore, grinding circuit, sieve analysis, grain size, spiral concentrator

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	KEMIN KAIVOS .....	9
2.1	Kemin kaivoksen rikastusprosessi .....	10
2.1.1	Murskaus .....	10
2.1.2	Jauhatus .....	12
2.1.3	Hienorikastus .....	12
2.1.4	Palarikastus .....	14
2.1.5	Vesienkäsittely .....	15
3	MALMIN JAUHATUS .....	16
3.1	Myllyt .....	16
3.1.1	Myllyn nopeus .....	16
3.1.2	Myllyn täyttöaste .....	17
3.1.3	Jauhinkappaleet .....	17
3.2	Tankomylly .....	18
4	SPIRAALIRIKASTUS .....	20
4.1	Spiraalin toiminta .....	20
4.2	Rikastuskriteeri .....	22
5	RAEKOKO .....	23
5.1	Seula-analyysi .....	23
6	KOKEELLINEN OSUUS .....	25
6.1	Kokeelliseen osuuteen valmistautuminen .....	25
6.2	Koeajosuunnitelma .....	26
6.3	Koeajojen muuttujat .....	27
6.4	Koeajojen suorittaminen .....	28
7	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU .....	31
7.1	P80-lukuun vaikuttavat tekijät .....	34
7.2	Alle 90 µm:n kokoisten partikkeleiden osuuteen vaikuttavat tekijät ....	37
8	HAVAITUT KEHITYSKOHTTEET .....	40
8.1	Myllyjen täyttöasteen seurannan parantaminen ja tankojen riittävyyden varmistaminen .....	40

8.2	Derrick-luokitusseulojen syötön optimointi.....	40
8.3	2510-kaivolta lähtevälle lietteelle tiheydensäätöpiiri .....	41
8.4	2200-myllyn purkuputken parantaminen.....	41
9	POHDINTA.....	43
	LÄHTEET.....	45

## ALKUSANAT

Tahdon kiittää Kemin kaivoksen tutkimusinsinööri Timo Pulkista aktiivisesta ja ammattimaisesta ohjaamisesta, tehdessäni tätä opinnäytetyötä. Erityiskiitokset myös Kemin kaivoksen tutkimusinsinööri Ville Naakalle aktiivisesta osallistumisesta tähän työhön, rikastamon tuotantoinsinööri Heikki Rantalankilalle opinnäytetyön aiheen hankkimisesta, laboratorion henkilökunnalle näytteiden analysoinnista, sekä työkavereille rikastamolla tuesta ja avusta. Kiitän myös Jukka Joutsenvaaraa, joka toimi Lapin AMK:n puolesta ohjaajana työssäni. Valtavat kiitokset myös Saaralle ja lapsille opiskelurauhan järjestämisestä iltaisin.

Kemissä 28.3.2024

Tommi Lampiaho

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Outokumpu Chrome Oy ja opinnäytetyön aiheena on kartoittaa Kemin kaivoksen rikastamon jauhatuspiirin eri parametrien vaikutusta jauhatustulokseen sekä jauhatuspiirin hyviä ajotapoja. Kaivoksella tuotetaan kromipitoista hieno- ja palarikastetta, jota käytetään terästeollisuuden raaka-aineena. Tämän työn tarkoituksena ja tavoitteena on selvittää jauhatuksen lopputuloksen kannalta merkittävimmät ohjausmuuttujat sekä parhaat säädöt ja ajotavat nykyiselle rikastamon jauhatuspiirille, parantaa rikastuksen lopputulosta sekä kehittää laitoksen operointia uudistetun jauhatuspiirin osalta. Kokeellisessa osuudessa jätetään huomioimatta jauhatuksen syötteen laatu, koska nykyisen louhintatekniikan ja maan alla tapahtuvan esimurskauksen takia ei voi tietää mitä malmityyppejä, milloinkin nostetaan maan päälle rikastukseen. Koeajojen aikana kerätään kuitenkin näytteitä jauhatuksen syöttestä, jotta voidaan tutkia jälkikäteen malmin kovuutta ja sitä, miten se vaikuttaa jauhatustuloksiin.

Kemin kaivoksen rikastamolla on toteutettu tuotantokapasiteetin nosto vuonna 2022. Tuotantokapasiteettia on nostettu, jotta pystyttäisiin kestävän kaivostoiminnan mukaisesti hyödyntämään matalamman  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -pitoisuuden malmeja, laskemaan louhinnan kustannuksia sekä pidentämään kaivoksen elinkaarta. Tämän projektin yhteydessä jauhatuspiiriä on muutettu lisäämällä siihen toinen tankomyly. Aikaisemmin yhdellä tankomylyllä toteutetussa jauhatuspiirissä jauhatuksen kiertokuorma syötettiin takaisin tankomylyyn ja tämä rajoitti jauhatuksen syötteen määrää. Uudessa kahdella tankomylyllä toteutetussa jauhatuspiirissä jauhatuskapasiteettia on lisätty ohjaamalla jauhatuksen kiertokuorma kokonaan toiseen tankomylyyn. Prosessimuutosten jälkeen rikastustuloksissa erityisesti saannin osalta on havaittu tason laskua, mutta tässä vaiheessa ei vielä tiedetä mikä osuus saannin laskusta selittyy syötteen muutoksella ja mikä osuus rikastusprosessin muutoksilla. Jauhatuksen onnistuminen on merkittävä tekijä spiraalirikastamon prosessin toimivuuden kannalta, koska jauhatuksen tehtävänä on saada kromiitin raekoko sopivaksi ja vapauttaa kromikiteet sivukivestä spiraalirikastusta varten.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa kerrotaan aluksi Kemin kaivoksen historiasta sekä kaivoksen rikastusprosessista. Tämän jälkeen kerrotaan yleistä tietoa malmin jauhatuksesta ja tankomylyjauhatuksen periaatteista. Lopuksi teoriaosuudessa käsitellään spiraalirikastuksen teoriaa ja kerrotaan tutkimusmenetelmistä, joilla analysoidaan koeajojen aikana otettuja näytteitä prosessista.

Opinnäytetyön kokeellisessa osuudessa pyritään selvittämään uudistetun jauhatuspiirin parhaat ajotavat, kehittämään laitoksen operointia sekä parantamaan rikastuksen lopputulosta. Kokeellisessa osuudessa suoritetaan joukko ennalta suunniteltuja koeajoja erilaisilla jauhatuksen parametreillä ja näiden koeajojen aikana kerätään prosessista näytteitä. Näytteille suoritetaan raekokoanalyysi kaivoksen omassa laboratoriossa ja tästä saadun datan perusteella pyritään löytämään jauhatuksen lopputuloksen kannalta merkittävimmät ohjausmuuttujat sekä parhaat säädöt jauhatuspiirille.



## 2 KEMIN KAIVOS

Outokumpu Oyj:n tytäryhtiön Outokumpu Chrome Oy:n omistama Kemin kaivos sijaitsee Keminmaan kunnan alueella Elijärvellä. Kemin kaivos on EU:n alueen ainoa kromikaivos. Kaivoksen malmin louhinta tapahtuu maan alla ja louhitusta malmista rikastetaan pala- ja hienorikastetta kaivosalueella maan päällä sijaitsevilla rikastamolla. Kromiesiintymä löydettiin vuonna 1959 ja kaivostoiminta käynnistyi vuonna 1968. Kaivoksen toiminta alkoi avolouhoksena, mutta vuonna 2003 kaikki kaivoksen tuotanto siirtyi maan alle ja viimeiset avolouhinnat suoritettiin vuonna 2005. (Outokumpu Oyj 2024b.)

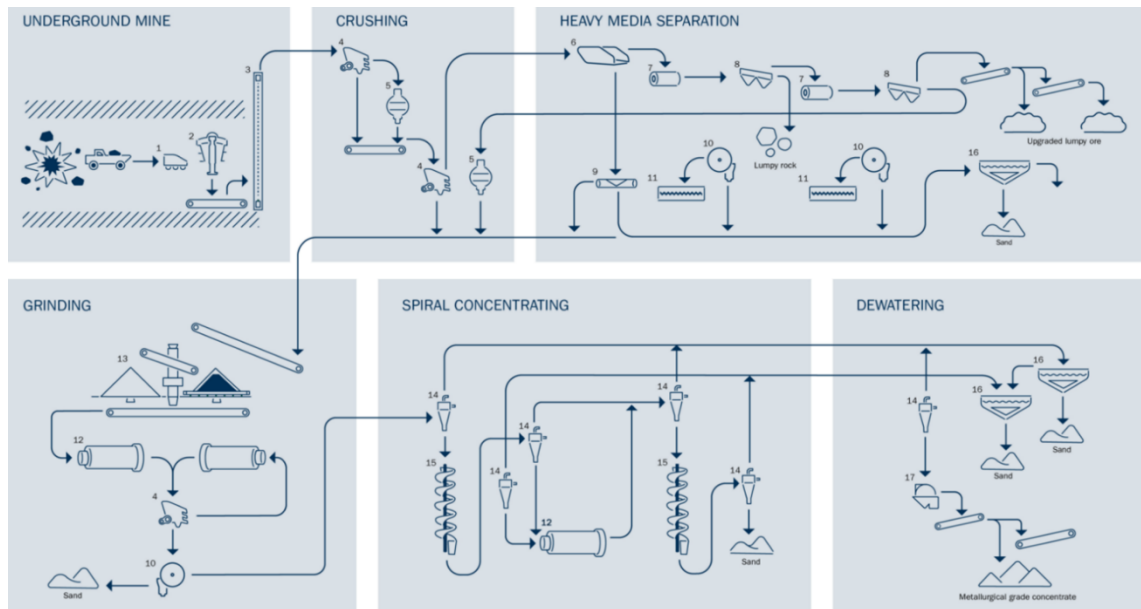
Kaivosta on laajennettu kolmeen kertaan, vuosina 1985, 2013 ja 2017–2023. Viimeisimpään laajennukseen Outokumpu investoi 280 miljoonaa euroa, ja se piti sisällään kaivoksen laajentamisen 500 metrin syvyydestä 1000 metrin syvyyteen, sekä siirtymisen uuteen louhintamenetelmään. Kaikki kaivoksella tuotettu rikaste kuljetetaan jatkojalostettavaksi Outokummun omalle ferrokromitehtaalle Tornioon, jossa siitä valmistetaan ruostumatonta terästä. Vuoteen 2025 mennessä Outokummulla on tavoitteena tehdä Kemin kaivoksesta maailman ensimmäinen toiminnassa oleva hiilineutraali kaivos. Osana tätä tavoitetta lokakuussa 2023 kaikki kaivosalueella käytetyt fossiiliset polttoaineet korvattiin uusiutuvilla ratkaisuilla. Kuviossa 1 on esitetty Kemin kaivosalue. (Outokumpu Oyj 2024b; Outokumpu Oyj 2024c.)



Kuvio 1. Outokummun Kemin kaivosalue (Outokumpu Oyj 2024c.)

## 2.1 Kemin kaivoksen rikastusprosessi

Rikastusprosessi perustuu painovoimaan, ja siinä hyödynnetään malmin ja sivukiven ominaispainojen eroja. Rikastus tapahtuu palarikastamolla raskasväliainerotusrummuissa ja hienorikastamolla spiraalierottimissa. Kaivoksen kromimalmin päämineraali on kromiitti ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), ja se on kaivoksen ainoa arvomineraali. Malmi on oksidimalmia ja sen kromioksidipitoisuus on keskimäärin 22 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Kemin kaivoksen rikastusprosessissa ei käytetä lainkaan kemikaaleja, lukuun ottamatta flokkulanttia, jota käytetään vedenkäsittelyssä veden selkeyttämiseksi. Kuviossa 2. on esitetty Kemin kaivoksen materiaalin virtauskaavio. (Outokumpu Oyj 2024d.)



Kuvio 2. Kemin kaivoksen virtauskaavio. (Outokumpu Oyj 2024e.)

### 2.1.1 Murskaus

Maanalaisella murskaamolla esimurskattu malmi nostetaan nostokoneella maan pinnalla sijaitseviin tornisiiloihin. Siiloista malmi kuljetetaan hihnakuljettimilla murskaamoon, jossa on käytössä kaksi kartiomurskainta. Murskaamolla on myös yksi esimurskaimena toimiva leukamurskain, jolla voidaan tarpeen vaatiessa murskata autoilla murskaamolle kuljetettua malmia. Leukamurskaimella murskattu malmi kuljetetaan hihnakuljettimilla samoihin tornisiiloihin, joihin kuljetetaan

myös maan alla esimurskattu malmi. Murskausprosessin ensimmäisen kartiomurskaimen välys on 50 mm, ja toisen kartiomurskaimen (kuvio 3.) välys on 10 mm. Kuljettuaan ensimmäisen kartiomurskaimen läpi malmi seulotaan joko palarikastamon syötteeksi tai hienorikastamon syötteeksi. Kappalekooltaan yli 10 mm:n kokoinen malmi menee palarikastamon syötteeksi ja alle 10 mm:n kokoinen malmi menee murskevarastolle hienorikastamon syötteeksi. Palarikastamolta takaisin murskaamolle tuleva välituote murskataan toisella 10 mm:n välykseen säädetyllä kartiomurskaimella ja kuljetetaan murskevarastolle hienorikastamon syötteeksi. (Outokumpu Oyj 2024d.)



Kuvio 3. Kartiomurskain



### 2.1.2 Jauhatus

Murskevarastolta malmi syötetään vaunusyöttimellä hihnakuljettimelle, joka kuljettaa malmin jauhatukseen. Jauhatuspiiri koostuu kahdesta tankomyllystä (1800 kW ja 560 kW), kahdeksasta Derrick-luokitusseulasta ja kahdesta Metson UFS-seulasta. Tankomylllyissä jauhinkappaleina käytetään terästankoja. Jauhatusseen saapuva hienorikastamon syöte kuljetetaan isompaan tankomylllyyn, jossa se jauhautuu malmilietteeksi. Liete pumpataan luokitusseuloille, joiden aukkokoko on 850  $\mu\text{m}$  ja erotusraja 700  $\mu\text{m}$ . Seulojen alite, eli seulaverkoista läpi mennyt tuote siirtyy hienorikastukseen. Seulojen ylite siirtyy pienempään tankomylllyyn lisäjauhatusseen, jonka jälkeen se pumpataan uudestaan luokitusseuloille. Kuviossa 4 on esitetty oikealla puolella primäärijauhatusmylly ja vasemmalla puolella lisäjauhatusmylly. (Outokumpu Oyj 2024d.)



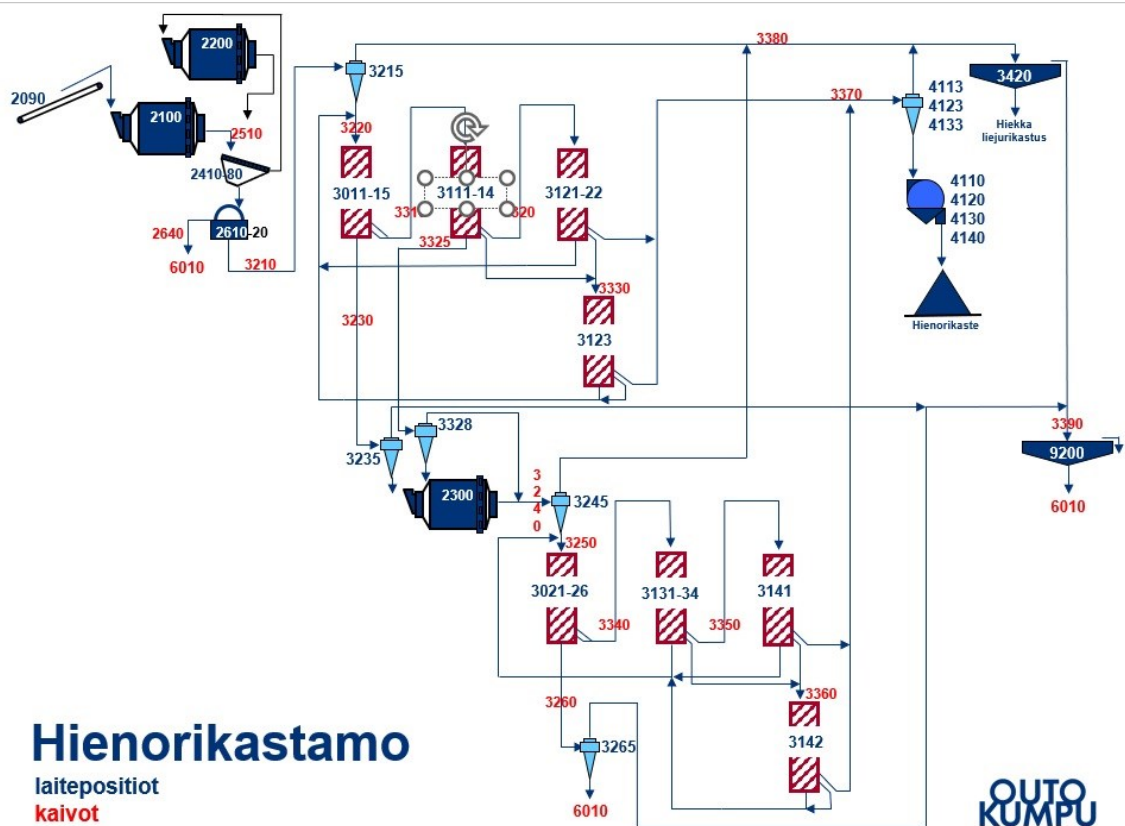
Kuvio 4. Kemin kaivoksen rikastamon tankomyllyt

### 2.1.3 Hienorikastus

Hienorikastamon keskeisimmät prosessilaitteet ovat spiraalierottimet, hydrokyklonit, kuulamyly ja rumpusuotimet. Spiraalierottimissa malmi luokituu painovoiman ja keskipakovoiman vaikutuksesta rikasteeksi, välituotteeksi ja jätteeksi.

Kuulamyly toimii hienorikastamon lisäjauhimenä ja siinä käytetään jauhinkappaleina teräskuulia. Hydrosykloneilla erotellaan kevyitä partikkeleita raskaan kromiitin seasta pyörrevirtauksen ja keskipakoisvoiman avulla. Rumpusuotimilla sekä suotimien imukoneikoilla rikaste kuivataan lopuksi alle 5 prosentin jäännöskosteuteen. Talvella rumpusuotimille ajetaan höyryä kuivatuksen tehostamiseksi. (Outokumpu Oyj 2024d.)

Spiraalierottimet jaetaan neljään eri vaiheeseen, jotka ovat: esirikastus, hienopiiri, karkeapiiri ja riperikastus. Spiraalirikastukseen saapuva malmi syötetään hydrosyklonin kautta esirikastuspiiriin, jonka rikaste ja välituote kulkeutuu karkeapiiriin. Esirikastuksen jäte kulkeutuu hydrosyklonin kautta kuulamylyyn lisäjauhatukseen. Lisäjauhettu liete menee riperikastukseen, josta rikaste ja välituote pumpataan hienopiiriin. Hieno- ja karkeapiirin läpäissyt rikaste pumpataan rumpusuotimille, joilla siitä poistetaan kosteus ennen rikastehalliin kuljetusta. Kuviossa 3. esitetty rikastamon jauhatuksen ja hienorikastamon prosessikaavio. (Outokumpu Oyj 2024d.)



Kuvio 5. Jauhatuksen ja hienorikastamon prosessikaavio. (mukaiillen Outokumpu Oyj 2024a.)

#### 2.1.4 Palarikastus

Palarikastamon keskeisimmät prosessilaitteet ovat pesuseula, kaksi raskasväliaine-erotusrumpua ja kaksi väliaineseulaa. Erotusrumpujen väliaineena käytetään piirautalietettä (FeSi), jonka tiheys on ensimmäisessä erotusrummussa 3,2 kg/l ja toisessa erotusrummussa 3,5–3,65 kg/l. Ensimmäisen erotusrummun väliaineen tiheys pyritään pitämään vakiona, mutta toisen erotusrummun väliaineen tiheyttä voidaan säätää halutun kromipitoisuuden tai tuotettujen palarikaste tonnin mukaan. (Outokumpu Oyj 2024d.)

Palarikastamon syöte puretaan palarikastesiilosta tärysyöttimellä hihnakujiimmelle, joka vie syötteen pesuseulalle. Pesuseulalla syöte pestään ja alle 10 mm:n kokoinen malmi tippuu pesuseulan läpi murskevarastolle menevälle kuljettimelle. Pesuseulalta palarikastemalmi tippuu purkupäässä hihnakujiimmelle, joka kuljettaa sen ensimmäiseen erotusrumpuun. (Outokumpu Oyj 2024d.)

Ensimmäisessä erotusrummussa kevyt palakivi erotetaan raskastuotteesta, keltuttamalla se väliaineen päällä väliaineseulan alatasolle. Raskastuote nostetaan pyörivän erotusrummun sisällä olevien hyllyjen avulla rummun raskastuoteränniin, josta se valuu väliaineseulan ylätasolle. Väliaineseulalla malmista pestään piirauta pois. Alatason palakivi tippuu hihnakujiimmelle, joka kuljettaa sen ulos. Palakiveä käytetään maanrakennuksessa ja kaivoksessa louhosten täytössä. Ylätasolla kulkeva raskastuote menee väliaineseulalta toiseen erotusrumpuun, jossa erotellaan palarikaste ja välituote. Toinen erotusrumpu ja väliaineseula toimivat samoin kuin ensimmäisen piirin vastaavat. Toisen erotusrummun ja väliaineseulan jälkeen kevyempi välituote menee seulan alatasolta takaisin murskaamolle, jossa se murskataan hienorikastamon syötteeksi. Raskaampi palarikaste kuljetetaan hihnakujiimmella palarikastehalliin. Kuviossa 6 on esitetty ensimmäinen erotusrumpu sekä väliaineseula. (Outokumpu Oyj 2024d.)





Kuvio 6. Erotusrumpu ja väliaineseula

### 2.1.5 Vesienkäsittely

Rikastamon prosessissa käytetään suljettua vesikiertoa, joka muodostuu pystyselkeyttimistä, yhdestä rikastehiekka-altaasta ja kahdesta selkeytsaltaasta. Prosessista poistuva vesi ja liete pumpataan pystyselkeyttimeen, jossa kiintoaine painuu selkeyttimen pohjalle. Ylitteeksi erottuva vesi otetaan takaisin prosessiin ja pohjalle painunut kiintoaine pumpataan rikastushiekka-altaalle. Rikastushiekka-altaassa kiintoaineen annetaan laskeutua altaan pohjalle, jonka jälkeen vesi pumpataan kahden peräkkäin olevan selkeytsaltaan kautta takaisin rikastamon prosessiin. Tarvittaessa prosessiin voidaan ottaa lisävettä Veitsiluodon makeavesikanavasta. (Outokumpu Oyj 2024d.)

### 3 MALMIN JAUHATUS

Jauhatus on malmin hienonnuksen viimeinen vaihe. Jauhatusessa malmi-murske hienonnetaan rikastusprosessin edellyttämää ominaispinta-alaa, raeko-kojakaumaa tai puhtaaksijauhatusastetta vastaavaksi. Onnistunut jauhatus antaa mahdollisuuden hyvän rikastustuloksen saavuttamiseksi, mutta se ei yksistään takaa hyvää rikastusprosessin lopputulosta. Liian karkeaksi jauhatuksessa jäänyt rikastusprosessin syöte näkyy lopputuloksessa huonona rikasteen pitoisuutena ja taas liian hienoksi jauhattu syöte kuluttaa turhaa energiaa sekä huonontaa rikasteen saantoa. (Lukkarinen 1985, 175.)

#### 3.1 Myllyt

Kaivosteollisuudessa malmit jauhetaan pääsääntöisesti rumpumaisissa, vaakatasossa pyörivissä myllyissä. Jauhinkappaleina myllyissä käytetään terästankoja, valurautakuulia, teräskuulia tai jauhiniieriöitä. Jauhinkappaleina voidaan käyttää myös malmikappaleita, jolloin kyseessä on autogeenijauhatus. Myllyssä olevat irralliset jauhinkappaleet joutuvat jauhatukseen sopivaan liiketilaan, myllyn pyöriessä tasaisella nopeudella. (Lukkarinen 1985, 175 - 176.)

Myllyn toimintaan ja sen jauhatuskapasiteettiin vaikuttaa myllyn koko, nopeus ja rakenne, jauhettavan aineen ominaispaino ja jauhautuvuus, jauhinkappaleiden muoto ja materiaali, jauhinkappalepanoksen määrä eli myllyn täyttöaste. (Lukkarinen 1985, 178.)

##### 3.1.1 Myllyn nopeus

Mylly pyörii aina tasaisella nopeudella, pois lukien myllyn käynnistyksen jälkeistä kiihdytystä. Myllyn nopeus valitaan myllyn koon, tarvittavan kapasiteetin tai halutun jauhatustehtävän mukaan. Nopeutta seurataan kierrosluvun avulla, joka laskee montako prosenttia kriittisestä nopeudesta on myllyn nopeus. Kriittinen nopeus on se kierrosluku, jolla myllyn pyöriessä sen sisäkehään nojaava liukumaton kappale ei enää irtoa. Nopeuden tulisi olla syötön vaihteluiden mukaan portaattomasti säädettävissä. Nopeasti pyörivässä myllyssä jauhinkappaleet hienontavat syötettä iskemällä, kun ne nousevat myllyn kehällä ylös ja tippuvat sieltä



alas. Tätä kutsutaan katarakti-ilmiöksi ja se soveltuu hyvin karkeaan jauhatukseen. Hitaasti pyörivässä myllyssä jauhinkappaleet hienontavat syötettä hiertämällä, kun ne pyörivät hitaasti myllyn mukana. Tätä ilmiötä kutsutaan kaskadi-ilmiöksi ja se soveltuu hyvin hienoon jauhatukseen. (Lukkarinen 1985, 178 – 182.)

### 3.1.2 Myllyn täyttöaste

Täyttöasteella ilmoitetaan myllyn sisällä olevan jauhinkappalepanoksen määrä prosentteissa vuoratun myllyn sisätilavuudesta. Täyttöasteen  $V$  likiarvon laskemiseen voidaan käyttää Bondin kaavaa:

$$V = 113 - 126 \left( \frac{H}{D} \right) \quad (1)$$

missä

$H$	on	Jauhinkappalepanoksen yläpinnan etäisyys myllyn katosta [m]
$D$	on	Myllyn sisäläpimitta [m]

Liiallinen täyttöaste myllyssä aiheuttaa myllylle tehonoton kasvua ja voi pahimmillaan estää myllyn käynnistämisen. (Lukkarinen 1985, 183.)

### 3.1.3 Jauhinkappaleet

Jauhinkappaleet suorittavat myllyssä jauhatustyön. Jauhinkappaleiden tulee olla sitä painavampia, mitä karkeampaa ja kovempaa syöte on ja niiden tulee olla tarpeeksi sitkeää materiaalia selviytyäkseen tehtävästään. Jauhinkappaleesta ilmoitetaan yleensä sen tehollinen ominaispaino, joka tarkoittaa jauhinkappaleen ja sitä ympäröivän lietteen ominaispainojen erotusta. Kuviossa 7 on esitetty tankomyllyn jauhinkappaleina käytettäviä terästankoja. (Lukkarinen 1985, 186.)

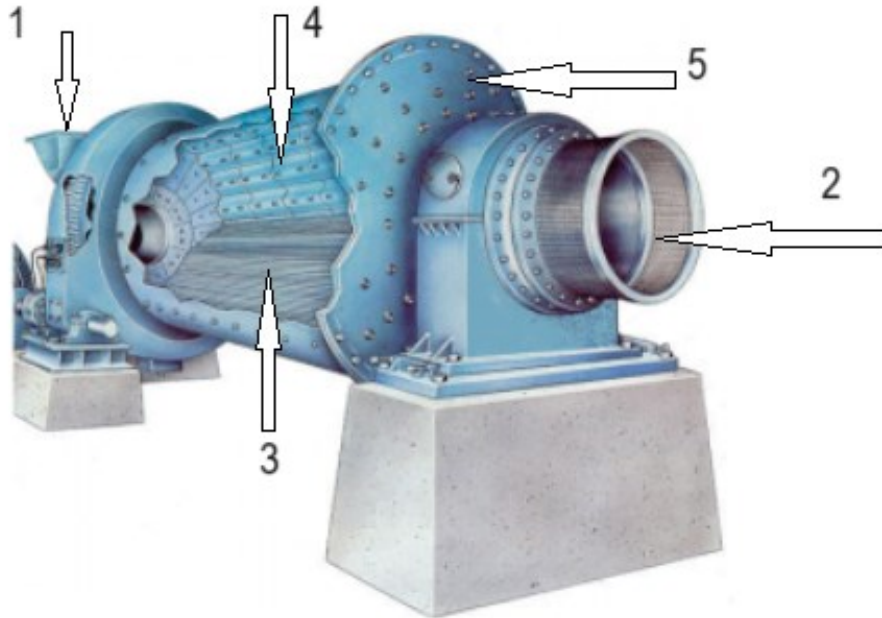


Kuvio 7. Tankomyllyn jauhinkappaleet

### 3.2 Tankomylly

Tankomyllyn jauhinkappaleina käytetään terästankoja. Tankomyllyn pituus on tyypillisesti 1,4–1,6-kertainen suhteessa sen läpimittaan, jotta tangot eivät pääsisi kieppumaan myllyssä. Tankojen tehokkaan toiminnan kannalta syötteen maksimikarkeus on 35 mm. Myllyn sisällä oleva tankomassa hienontaa malmia murskaamalla ja hienontamalla, riippuen siitä kuinka suurella nopeudella myllyä ajetaan. Kuviossa 8 on esitetty tankomyllyn rakenne (1. jauhettavan materiaalin syöttö, 2. jauhetun tuotteen poisto, 3. jauhinkappaleet, 4. myllyn vuoraus, 5. päätyvuorauksen kiinnityspultti). Tankomyllyn jauhatuskapasiteetti sen kokoon nähden on suuri, mutta sen jauhusteho loppuu nopeasti, kun maksimikapasiteetti

ylitetään. Maksimikapasiteetin ylittyessä myllyyn syötetty liete syöksyy liian nopeasti myllystä ulos. Tyypillisesti lietetiheys tankojauhatusksessa on 65–75 %. (Lukkarinen 1985, 203 – 204.)



Kuvio 8. Tankomyllyn rakenne (mukaillen 911metallurgist 2016.)

Hyvän jauhatustuloksen saavuttamiseksi jauhatusmyllyillä käytetään yleisesti täyttöasteen arvona 30–50 %, mutta tankomyllyillä paras jauhatustulos saadaan 25–35 %:n täyttöasteella. Jauhinkappaleina käytettävien tankojen tulee olla riittävän sitkeää, mutta kuitenkin sopivan haurasta. Tankojen tulee kestää katkeamatta 20–25 mm:n paksuuteen asti ja tämän jälkeen katketa vääntyilemättä. Vääntynyt tanko myllyssä aiheuttaa jauhatustehon huonontumisen, kun se sotkee suorien tankojen liikettä. Tankojen lisääminen myllyyn vaatii myllyn pysäytyksen toimenpiteen ajaksi. Uudet tangot ammutaan yksitellen paineilmalla toimivan tankotykin avulla purkupäästä myllyyn sisälle. (Outokumpu Oyj 2024d.)

## 4 SPIRAALIRIKASTUS

Spiraaliksi kutsutaan poikkileikkaukseltaan suunnilleen puoliympyrän muotoista kierteelle taivutettua ränniä (Lukkarinen 1987, 212). Spiraalirikastuksen etuja ovat yksinkertaiset laitteet, alhaiset käyttökustannukset, se että prosessissa ei tarvita kemikaaleja, prosessin ympäristöystävällisyys, toimivuus melko leveällä partikkelikokoalueella sekä toimivuus usein alhaisella vesimäärällä. Spiraaleja räätelöidään käsiteltävien materiaalien, käyttötarkoituksen ja erilaisten prosessivaiheiden mukaan. Rakenne niissä voi vaihdella käsiteltävästä materiaalista riippuen kierrosten lukumäärän, spiraalin profiilin, rikasteottojen ja mahdollisen lisäveden mukaan. (kaiva.fi 2024.)

### 4.1 Spiraalin toiminta

Spiraalin toiminta perustuu mineraalien tiheyseroihin, maan vetovoimaan, lietteen ja kourun pohjan väliseen kitkaan, lietteen sisäisiin leikkausvoimiin sekä keskipakoisvoimaan. 15-45 % kiintoainetta sisältävä rikastettava liete syötetään spiraalin yläpäässä olevaan syöttölaatikkoon ja lietteen virratessa spiraalia pitkin siihen vaikuttavat edellä mainitut voimat. Lietteän virratessa rakeet pyrkivät kerrostumaan sekä horisontaali- että vertikaalitasossa ja rakeissa tapahtuu hidasteista vajoamista että keskinäistä pujottelua. Raskaat rakeet pysyttelevät spiraalin keskiosan lähellä ja kevyet rakeet ajautuvat suuremman nopeuden alueelle spiraalin ulkokehälle, horisontaalitasossa vaikuttavan säteen suuntaisen nopeusgradientin takia. Vertikaalitasossa tarkasteltaessa kevyet rakeet liikkuvat lietteen yläosassa ja raskaat rakeet liikkuvat lähellä spiraalin pohjaa. Keskipakoisvoiman vaikuttaessa lietevirtauksen eri komponentteihin siihen muodostuu pyörre. Pyörre pyrkii kuljettamaan virtauksen yläpinnalla olevia rakeita sen kehälle päin ja virtauksen pohjalla olevia rakeita keskelle päin. Pyörteen vaikutuksesta raskaat rakeet asettuvat spiraalin tasaiselle osalle ja joutuvat sisäreunaan sijoitettuihin rikasteen poistoaukkoihin. (Lukkarinen 1987, 213 – 214.)

Spiraalin alapäässä on omat poistumisaukot rikasteelle, välituotteelle ja jätteelle (kuvio 9.). Jäte poistuu spiraalin ulkokehän aukosta, välituote keskeltä ja rikaste



sisäkehän aukosta. Rikasteen ja välituotteen aukkojen ottoja voidaan säätää niissä olevilla siivekkeillä. Siivekkeitä säädetään syötteen määrän ja laadun mukaan. (Lukkarinen 1987, 214.)



Kuvio 9. Spiraalin alapään poistumisaukot

## 4.2 Rikastuskriteeri

Painovoimaisen rikastuksen soveltuvuutta malmin rikastamiseen voidaan tutkia rikastuskriteerillä, joka on menetelmän onnistumismahdollisuutta kuvaava vertailuluku. Vertailuluvun ollessa yli 2,5 malmin rikastaminen painovoimaisella menetelmällä on helppoa. Vertailuluvun ollessa 2,5-1,75 malmin rikastaminen onnistuu rakeille, jotka ovat karkeampia kuin 0,2-0,15 mm ja luvun ollessa 1,5-1,25 rikastaminen onnistuu 1,7 mm:ä karkeammille rakeille.

$$R_{kr} = \frac{\rho_r - \rho_v}{\rho_k - \rho_v} \quad (2)$$

missä

$R_{kr}$	on	Rikastuskriteerin vertailuluku
$\rho_r$	on	Raskaan mineraalin tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_k$	on	Kevyen mineraalin tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_v$	on	Väliaineen tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]

Rikastuskriteerin vertailuluvun ollessa negatiivinen, painovoimaista malminrikastamista tulee harkita tarkkaan. (Lukkarinen 1987, 166.)

## 5 RAEKOKO

Raekoon ilmaiseminen on helppoa, jos kyseessä on säännöllinen kappale, kuten pallo tai kuutio. Halkaisijan pituus kuvaa pallon kokoa ja särmä ilmaisee kuution kokoa. Rakeiden ollessa epäsäännöllisiä niiden raekoosta puhuttaessa on mainittava, miten niiden koko on määritetty ja se ettei absoluuttista raekokoa ole olemassa. Epäsäännöllisten rakeiden raekoko määritetään yleensä seulomalla näyte ja niiden koko ilmaistaan olevan kokoa  $d_A$ . Raekoko  $d_A$  kuvastaa sellaisen neliömäisen seula-aukon pituutta jonka rae läpäisee. Raekoolle saadaan raja-arvot kun seulasarjassa on useita seuloja. Raekoko voidaan joissakin tapauksissa ilmoittaa seulaluokkaa rajoittavien seulojen seula-aukkojen keskiarvona. Raekoon määrittäminen seulomalla voidaan suorittaa joko kuiva- tai märkäseulontana, ja tulokseksi tästä toimenpiteestä saadaan seula-analyysi. (Lukkarinen 1985, 12 – 13.)

### 5.1 Seula-analyysi

Seula-analyysi jaottelee rakeet niiden koon mukaan, eikä siinä huomioida rakeiden muita ominaisuuksia. Se on siis hyvin yksinkertainen tapa määrittellä raekoko. Partikkeleiden kykyyn läpäistä seula-aukot voi vaikuttaa niiden muoto, kosteus ja pintavaraus. Seula-analyysi soveltuu yleensä partikkeleille joiden raekoko on vähintään 45  $\mu\text{m}$ . Liian hienot rakeet voivat vääristää analyysin tulosta yhteen kasautumalla suuremmiksi rakeiksi. (Pihkala 2011, 38.)

Raekoon määrittämisessä käytettävää seulojen joukkoa kutsutaan seulasarjaksi. Esimerkiksi tyypillinen seulasarja SFS-EN 933-2 koostuu 63  $\mu\text{m}$ :n, 90  $\mu\text{m}$ :n, 125  $\mu\text{m}$ :n, 180  $\mu\text{m}$ :n, 250  $\mu\text{m}$ :n, 355  $\mu\text{m}$ :n, 500  $\mu\text{m}$ :n, 710  $\mu\text{m}$ :n, 1 mm:n, 1,4 mm:n, 2 mm:n ja 2,8 mm:n seulaverkoista (SFS-EN 933-2:2020, 5). Tämän lisäksi laitteistoon kuuluu pohjan keräysastia ja seulojen ravistelija. Kuviossa 10 on esitetty seula-analyysi laitteisto. Seulottavan aineen karkeus määrittelee seula-analyysin näytteen määrän, ja tässä nyrkkisääntönä voidaan pitää että seulottavan materiaalin suurimpiin rakeisiin verrattuna näytteen määrä on 100-kertainen (esim. 1 mm  $\rightarrow$  100 g). (Pihkala 2011, 38 – 39.)





Kuvio 10. Seula-analyysiin käytettävä laitteisto

Seulonta tehdään ravistelemalla näyte seulasarjan läpi suurimmasta seulasta pienimpään ja rakeet jäävät aina sille seulaverkolle jonka seula-aukkoa ne eivät pysty läpäisemään. Jokaiselle seulaverkolle jääneet rakeet punnitaan erikseen ja tuloksena saadaan prosentuaalinen osuus kokonaismassasta tietyllä raekoko-alueella. Seuloja on yleensä vähintään viisi ja ne kaikki ovat eri kokoa. (Pihkala 2011, 39.)



## 6 KOKEELLINEN OSUUS

Tämän työn kokeelliseen osuuteen kuului joukko jauhatuspiirin koeajoja, joiden tarkoituksena ja tavoitteena oli selvittää jauhatuksen lopputuloksen kannalta merkittävimmät ohjausmuuttujat sekä parhaat säädöt ja ajotavat nykyiselle rikastamon jauhatuspiirille. Koeajot suoritettiin kahdessa osassa Kemin kaivoksen rikastamon jauhatuspiirissä. Jauhatuspiirissä jauhaminen suoritetaan kahdella tankomyllyllä, joista isompi 2100 mylly toimii primäärijauhatusmyllynä ja pienempi 2200 mylly lisäjauhatusmyllynä. Lisäjauhatusmyllyssä jauhetaan jauhatuksen kierto-kuorma, eli luokitusseulojen ylitteestä tulevat liian suuret partikkelit. Lisäjauhatuksen jälkeen liete pumpataan uudestaan luokitusseuloille.

### 6.1 Kokeelliseen osuuteen valmistautuminen

Opinnäytetyön kokeelliseen osuuteen valmistautuminen aloitettiin välittömästi työn alettua, koska oli heti alusta asti selvää, että työhön kuuluu kokeellinen osuus. Valmistautuminen alkoi malmin jauhamisen teorian tutkimisella, perehtymisellä malmin jauhamisessa käytettävän tankomyllyn toimintaan, sekä perehtymisellä spiraalirikastuksen asettamille vaatimuksille liittyen jauhettuun malmiin.

Kun tietoperustaa oli hankittu tarpeeksi, alkoi tutustuminen Kemin kaivoksen rikastamon jauhatuspiirin toimintaan. Jauhatuspiirin toiminnan tutkimisessa avainasemassa olivat prosessinhoitajat, jotka operoivat prosessinohjausjärjestelmällä jauhatuspiirin prosessia. Prosessinhoitajia haastatteleamalla syntyi käsitys jauhatuspiirin toiminnasta ja siinä olevista pullonkauloista, jotka mahdollisesti täytyy ottaa huomioon tulevien koeajojen aikana. Ainoaksi vakavammaksi häiriötekijäksi koeajoja ajatellen saattoi muodostua 2510-kaivolta derrick-luokitusseulojen syöttöpyttyyn pumpattavan lietteen lietetiheys. Lietetiheyden kasvaessa liian suureksi, syöttöpyttylle menevä linja voi mennä tukkoon ja pahimmillaan pysäyttää koko hienorikastusprosessin. Liian suuren lietetiheyden estämiseksi prosessinohjausjärjestelmään on asetettu alaraja 2100-myllyn lisävesiventtiilille. Venttiilin pienimmäksi venttiilikulmanasetukseksi oli asetettu järjestelmään 43 %. Koeajossa venttiilikulman alarajaa piti alentaa 35 %:iin jotta 2100-myllyn lisävesikerroin saatiin menemään säädölle ja vastaamaan todellisuudessa koeajosuunnitelman mukaisia arvoja. Lisävesi annostellaan myllyihin suhdeasetuksella, eli sillä

säädetään myllyjen lietetiheys. Jos 2100-myllyn lisävesikerroin on esimerkiksi 0,4, niin myllyyn annostellaan vettä 0,4-kertaisesti suhteessa sinne syötettyyn malmiin ja myllyn lietetiheys on näin ollen 60 %. Kun jauhatuspiirin toiminnasta ja sen ohjausmuuttujista oli tarpeeksi hyvä kuva, oli seuraavana vuorossa koeajosuunnitelman laatiminen.

## 6.2 Koeajosuunnitelma

Ennen koeajojen suorittamista laadittiin toimeksiantajan kanssa Excel-taulukon koeajosuunnitelma (taulukko 1.). Suunnitelmassa määriteltiin koeajojen muuttujat sekä sovittiin mistä kohdasta prosessia otetaan koeajojen aikana näytteitä. Taulukkoon on lisäksi merkitty 2100 myllyn paino, jota voidaan tarvittaessa käyttää täyttöasteen ilmaisimena.

Muuttujiksi koeajoihin päätettiin 2100 myllyn kierrosnopeus, 2200 myllyn kierrosnopeus, jauhatuksen syöttömäärä, 2100 myllyn täyttöaste, 2200 myllyn täyttöaste sekä myllyn lietetiheys. Kaikille muuttujille määriteltiin korkea ja matala taso, lukuun ottamatta 2200 myllyn kierrosnopeutta. Prosessinohitaja sai määritellä parhaaksi katsomansa kierrosnopeuden 2200 myllylle, koska sen vakioiminen tiettyyn nopeuteen on mahdotonta vaihtelevan kiertokuorman takia. Prosessinohitajan tuli merkitä taulukkoon jokaisen koeajon aikana 2200 myllyn kierrosnopeus.

Taulukko 1. Koeajosuunnitelma

Koejärjestys	2100 kierrokset	2100 syotto	2100 Paino	Myllyjen lisävesikerroin	2200 kierrokset	2100 täyttöaste	2200 täyttöaste
1	13	310	355	0,5			
2	8	310	355	0,4			
3	8	250	355	0,5			
4	13	310	355	0,5			
5	13	250	355	0,4			
6	8	250	355	0,4			
7	13	250	385	0,4			
8	8	310	385	0,5			
9	8	250	385	0,5			
10	13	310	385	0,4			
11	13	250	385	0,5			
12	8	310	385	0,4			

### 6.3 Koeajojen muuttujat

Tässä osiossa on lyhyt kuvaus koeajoihin valituista muuttujista, sekä siitä mikä niiden tarkoitus on jauhatusprosessin kannalta. Jauhatuksen syöttömäärä, 2100-myllyn lisävesikerroin ja 2100-myllyn kierrokset ovat ennalta määritellyt. 2200-myllyn kierrokset prosessin hoitaja säätää tilanteen mukaan sopiviksi ja myllyjen täyttöasteet mitataan jauhinkappaleiden lisäyksen yhteydessä.

2100-mylly toimii jauhatuspiirissä primäärijauhatusmyllynä. Myllyn kierrokset määrittävät myllyn pyörimisnopeuden. Kierroksia säädetään pääsääntöisesti jauhatuksen syötteen kovuuden mukaan. Mitä kovempaa malmi on, niin sitä kovemmat kierrokset myllyyn täytyy säätää, jotta malmi jauhautuu. Toinen myllyn kierroksiin vaikuttava tekijä on jauhatuksen syöttömäärä. Syöttömäärää lisättäessä huomattavan paljon, pitää myllyyn lisätä kierroksia.

2200-mylly toimii lisäjauhatusmyllynä jauhatuspiirissä. Myllyn kierrokset määrittävät myllyn pyörimisnopeuden. Kierrokset säädetään jauhatuspiirin kiertokuorman mukaan siten että mitä enemmän kiertokuormaa on, niin sitä enemmän myllyyn täytyy asettaa kierroksia.

2100-myllyn lisävesikertoimella säädetään myllyn lietetiheyttä. Tyypillisesti tankojauhatusksessa myllyn lietetiheytenä pidetään 60-75 %. Lisävesikerroin säättää myllyyn menevää lisävettä suhteessa myllyn syötemäärään. Lisävesikertoimen ollessa 0,4, myllyyn ajetaan lisävettä 0,4 kertaisesti suhteessa syötteen määrään ja näin ollen myllyn lietetiheys on 60 %.

Myllyjen täyttöasteet ilmoittavat myllyn sisällä olevan jauhinkappalepanoksen määrää prosenteissa vuoratun myllyn sisätilavuudesta. Tankomyllyn täyttöaste mitataan yleensä myllyn sisällä, mittaamalla jauhinkappalepanoksen yläpinnan etäisyys myllyn katosta käyttämällä Bondin kaavaa. Tankomyllyillä paras jauhatustulos saadaan 25-35 %:in täyttöasteella.

#### 6.4 Koeajojen suorittaminen

Koeajot suoritettiin kahdessa osassa, peräkkäisinä päivinä. Ensimmäinen koeajosarja suoritettiin ennen uusien tankojen lisäämistä tankomyllyihin, jolloin täyttöasteet olivat matalalla tasolla ja tämän jälkeen lisättiin uudet tangot myllyihin. Alkuperäinen suunnitelma oli lisätä 2100-myllyyn 13 nippua tankoja ja 2200-myllyyn 5 nippua tankoja. Kun tankoja alettiin lisäämään myllyihin, huomattiin että uusia tankoja ei ollut tuotu jauhimolle tarpeeksi sulamaan ulkona olevasta kylmästä varastosta. Tangot pitää tuoda talviaikaan hyvissä ajoin sisälle sulamaan, koska jäisinä ne aiheuttavat ongelmia tankotyössä. Vähäisen tankomäärän takia suunnitelma ei toteutunut ja todellinen määrä oli 2100-myllyyn 10 nippua tankoja ja 2200-myllyyn 2 nippua tankoja. Ennen ja jälkeen tankojen lisäämisen käytiin molemmissa myllyissä sisällä mittaamassa tankokuorman etäisyys myllyn nostajaan lasermittarilla ja tämän jälkeen laskettiin myllyjen täyttöaste sekä merkittiin ne Excel-taulukkoon. Seuraavana päivänä ajettiin toinen puolisko koeajoista, täyttöasteiden ollessa korkealla tasolla

Koeajojen aikana prosessinohitaja syötti koeajonumeron mukaiset säädöt jauhatuspiiriin, jonka jälkeen odotettiin prosessin tasaantumista. Prosessin tasaannuttua odotettiin 15–20 minuuttia ennen näytteiden ottoa, jotta kaivoissa oleva liete oli varmasti ehtinyt täysin vaihtua. Näytteitä otettiin kaksi sarjaa jauhatuksen tuotannosta (kuvio 11.), eli spiraalirikastukseen menevästä lietteestä sekä yksi sarja jauhatuksen syöttestä. Tätä työtä varten jauhatuksen tuotannon yhden sarjan

näytteistä tutkittiin partikkelikokoa seula-analyysillä Kemin kaivoksen omassa laboratoriossa ja he kirjasivat analyysin tulokset Excel-taulukkoon. Toinen sarja jauhatuksen tuotannosta näytteistä ja jauhatuksen syötteen näytteet lähetettiin geologian tutkimuskeskukselle analysoitavaksi. Toimeksiantaja halusi selvittää näistä näytteistä jauhatuksen lopputuotteen puhtaaksijauhatusasteen sekä syötteen kovuuden. Näiden näytteiden tulokset eivät ehdi tähän opinnäytetyöhön ja siksi niitä ei sisällytetä tähän työhön.



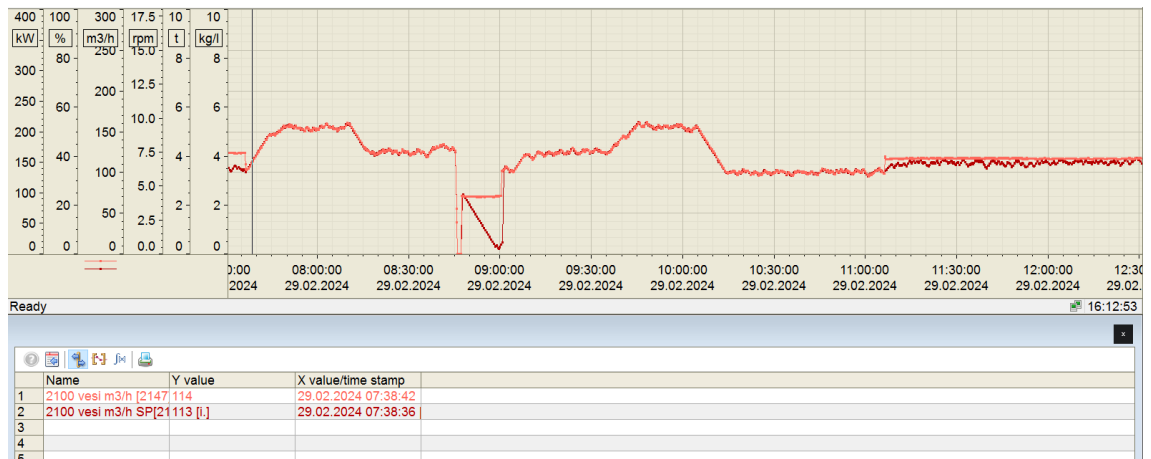
Kuvio 11. Näytteiden otto jauhatuksen tuotannosta

Koeajojen suorittaminen onnistui ongelmitta kuten osattiin odottaakin, koska kaikki koeajovariantit olivat sellaisia, joita jauhatuspiirissä ajetaan normaali tilanteissakin. Ainoastaan koeajo numero kolmen aikana koeajo piti hetkeksi keskeyttää, koska 3340-kaivon pumppu 3342 lopetti pumppaamasta lietettä. Koeajoa päästiin jatkamaan, kun kaivon pinta saatiin pumpattua alemmaksi ja kaivon toi-

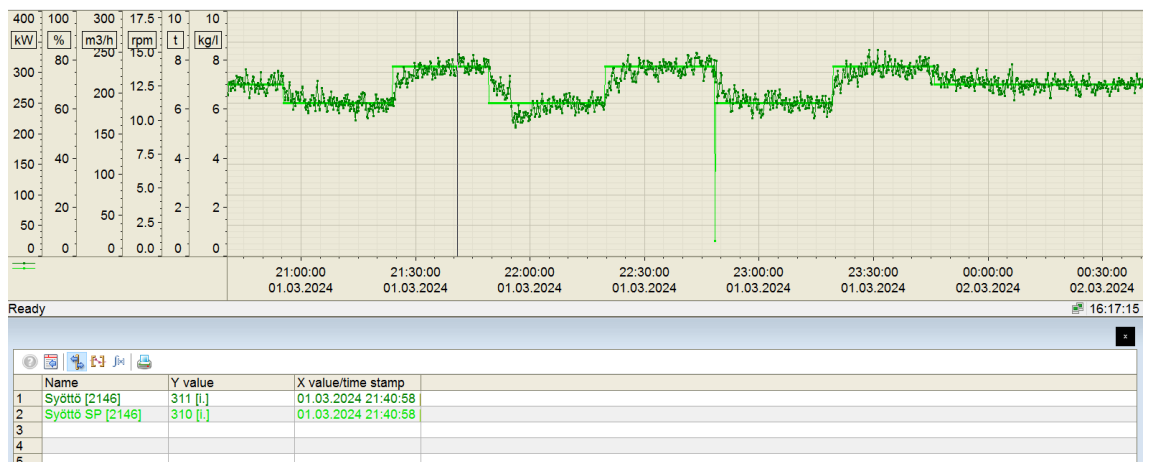
nen pumppu 3341 pystyttiin käynnistämään. 3340-kaivon liete tulee riperikastuspiirin spiraaleiden rikaste- ja välituotekouruilta. Asiasta keskusteltiin valvomossa olevan prosessin hoitajan kanssa, joka tiesi heti kertoa, että prosessin häiriö ei johtunut meneillään olleesta koeajosta, vaan pumppu oli yksinkertaisesti kulunut loppuun eikä tästä syystä enää pumpannut.

## 7 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Ennen tulosten tarkastelua käytiin läpi koeajosuunnitelman mukaisten ohjausparametrien toteutumisen käyttämällä Siemens S7 prosessinohjausjärjestelmän trendityökalua. Kuvioissa 12 ja 13 on esitetty trendityökalu, jolla pystytään tutki-  
maan prosessia. Kun koeajosuunnitelman mukaisten säätöjen toteutuminen oli varmistettu, voitiin aloittaa laboratorion lähettämien seula-analyysin tulosten ana-  
lysointi.



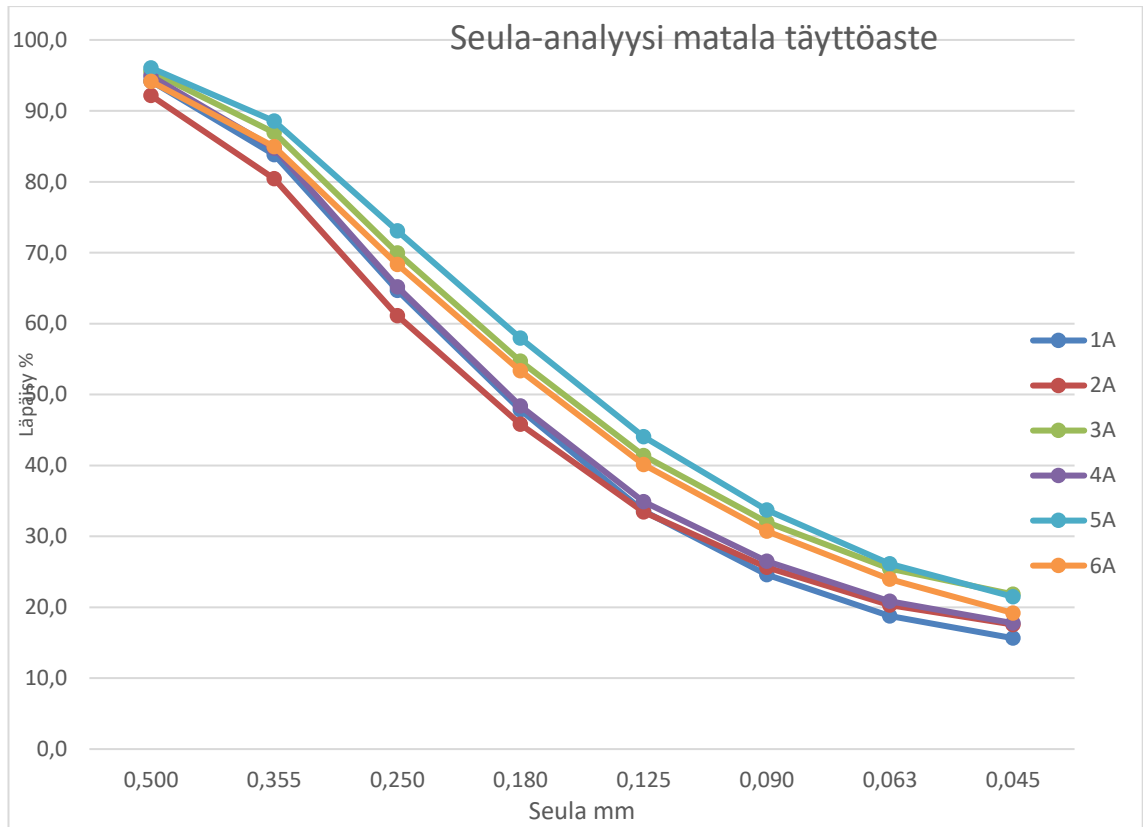
Kuvio 12. 2100-myllyn lisäveden trendi (Siemens S7 2024.)



Kuvio 13. Jauhatuksen syöttömäärän trendi (Siemens S7 2024.)

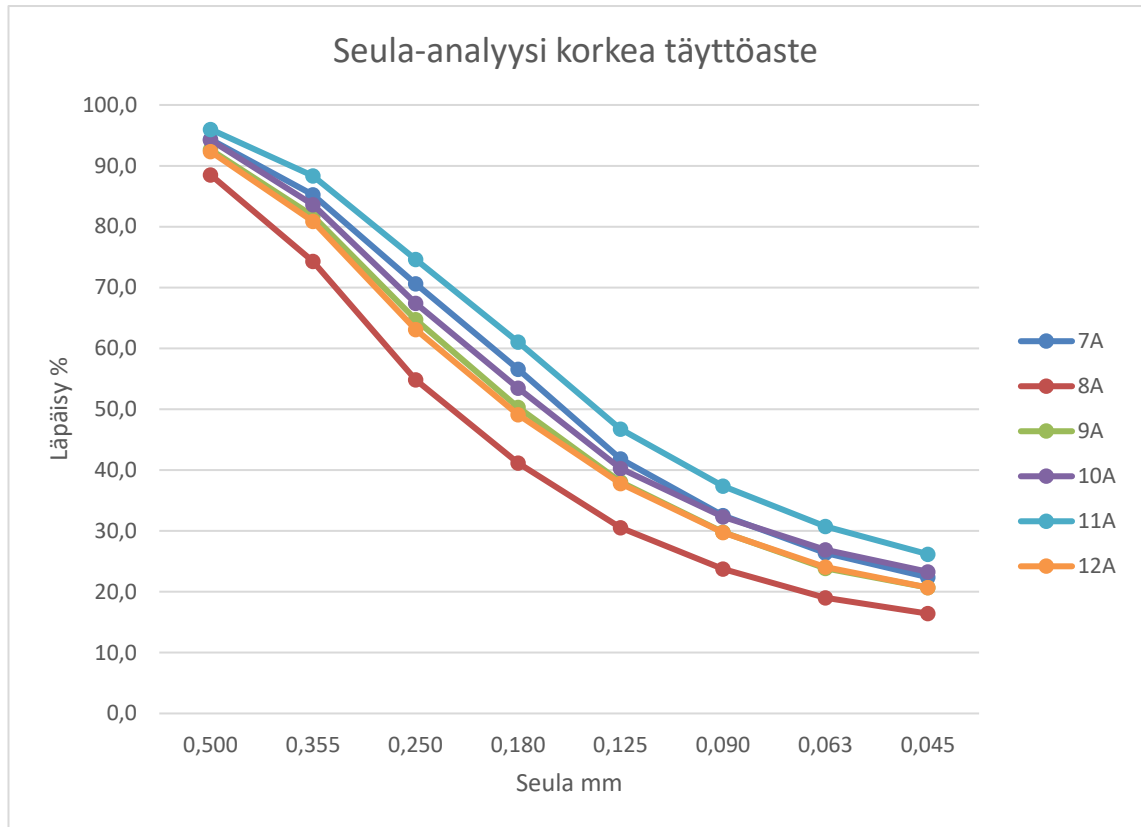
Seula-analyysin tulosten tarkastelu alkoi tekemällä kuvaajat analyysin tuloksista. Kuvaajat tehtiin sekä matalan- että korkean täyttöasteen tuloksista (kuvio 14. ja

kuvio 15.). Seula-analyysin tuloksista jauhautumista ajatellen mielenkiintoisimmat arvot ovat P80-luku, joka tarkoittaa seulakokoa jonka 80 % näytteen rakeista läpäisee, sekä alle 90 µm:n kokoisten rakeiden massaosuus, koska tätä pienempiä partikkeleita ei saada enää spiraalirikastuksella hallitusti rikasteeksi, vaan ne ajautuvat sattumanvaraisesti rikasteeksi tai jätteeneksi.



Kuvio 14. Seula-analyysin kuvaaja tankomyllyjen matalalla täyttöasteella





Kuvio 15. Seula-analyysin kuvaaja tankomylyjen korkealla täyttöasteella

P80-luku saadaan määritettyä seula-analyysin tulosten kuvaajista käyttämällä kahden pisteen välistä suoran yhtälöä ja alle 90 µm:n kokoisten rakeiden osuus nähdään suoraan jokaisen näytteen tulostaulukosta. Taulukossa 2. on havainnollistettu esimerkki näytteen 1A seula-analyysin tuloksista, josta voidaan suoraan lukea alle 90 µm:n kokoisten rakeiden osuus (24,6 %) ja ottaa kaksi pistettä P80-luvun laskemiseksi. Jokaisesta näytteestä on raekoon lisäksi analysoitu kromiitin ja raudan pitoisuudet. Taulukosta käy myös ilmi seula-analyysissä käytetty seulasarja.

Taulukko 2. Näytteen 1A seula-analyysin ja pitoisuuksien tulokset

P80 laskentakaava			
	$y=kx+b$		
k	$(y_1-y_2)/(x_1-x_2)$	182,4293	A1 P80 0,334
b	$y_1-kx_1$	19,04762	
x, kun y=80:	$x=(y-b)/k$	0,334115	1A alle 90 $\mu\text{m}$ 24,60 %

<b>Näyte: 1A</b>			
<b>Pvm: 29.02.24</b>			
Seula mm	Seulalle jäänyt g	Läpäisy %	
0,500	22,1	5,8	94,2
0,355	39,6	10,4	83,8
0,250	73,0	19,2	64,7
0,180	64,0	16,8	47,9
0,125	54,5	14,3	33,6
0,090	34,1	8,9	24,6
0,063	22,2	5,8	18,8
0,045	12,0	3,1	15,6
-0,045	59,6	15,6	
381,1			

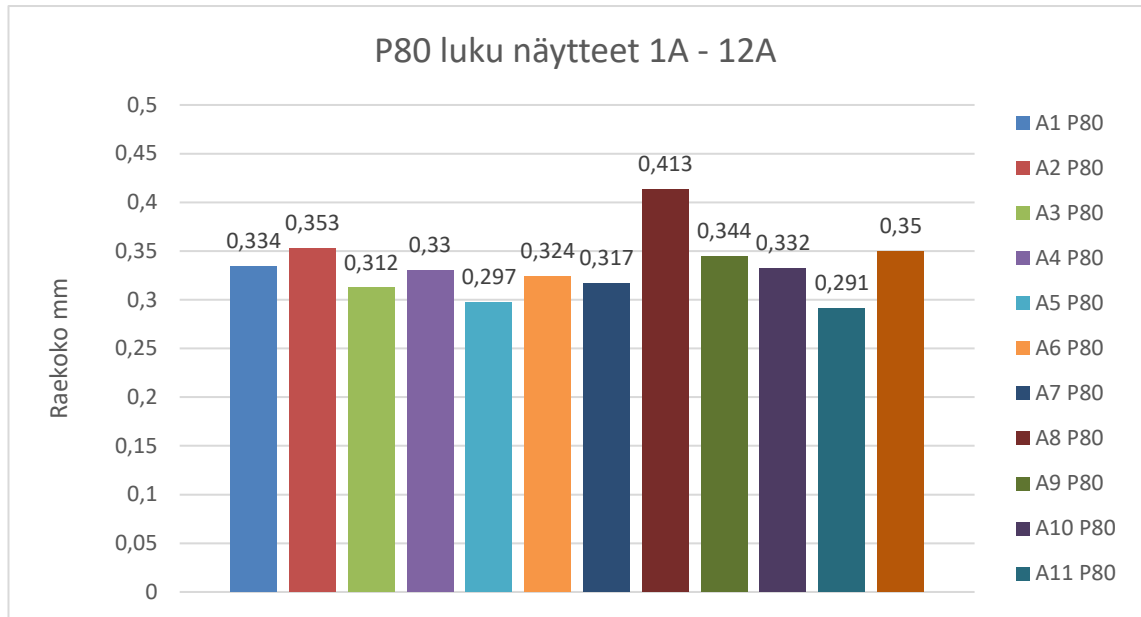
  

		Cr2O3	Fe
<b>Kokonaisnäyte:</b>		<b>28,4</b>	<b>12,6</b>
Seula mm		Cr2O3	Fe
0,500		21,8	10,3
0,355		28,7	12,6
0,250		32,9	14,1
0,180		35,0	14,9
0,125		35,6	15,3
0,090		33,5	14,6
0,063		32,1	13,9
0,045		26,5	12,0
-0,045		17,1	8,30

### 7.1 P80-lukuun vaikuttavat tekijät

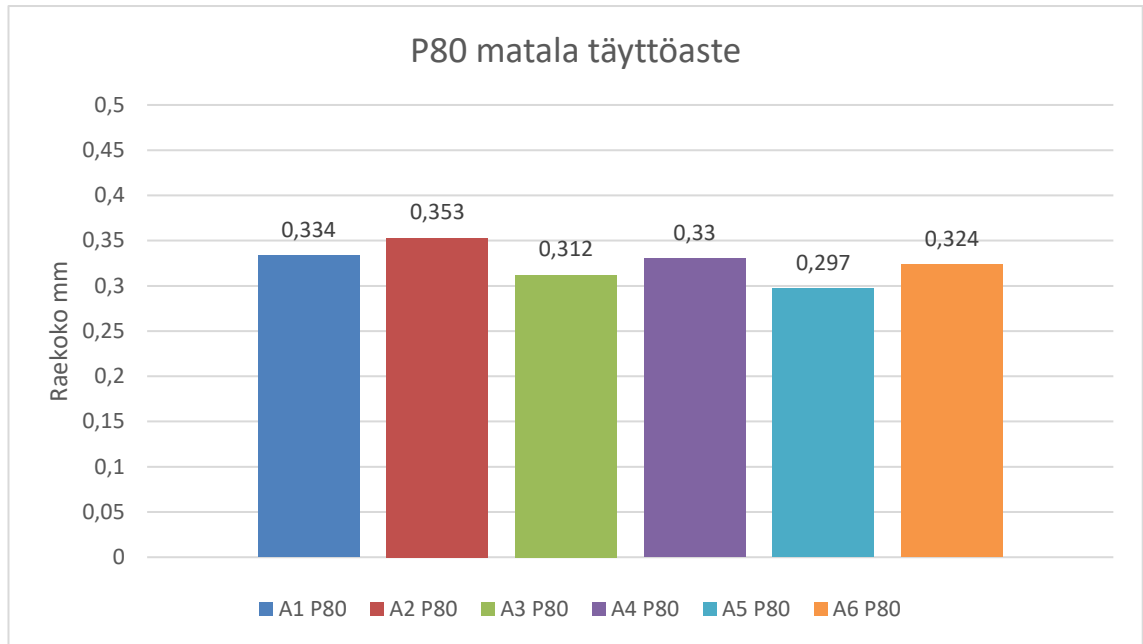
Yhdessä aikaisemmin toimeksiantajalle tehdyssä jauhatusta käsittelevässä opinäytetyössä P80-luvun tavoitteena primäärimyllyn tuotteelle on ilmoitettu 450  $\mu\text{m}$  (Kostamo 2016, 43). Toimeksiantajan lähteistä vuodelta 2011 löytyy tieto, jossa jauhatuksen tuotteen P80 tavoite on 355  $\mu\text{m}$ . Virallista yhtä oikeaa lukua P80:lle ei ole tiettävästi olemassa. Aikaisemmissa tutkimuksissa ja lähteissä näitä edellä mainittuja lukuja on pidetty raekoon tavoitteena. Tämän työn tutkimustulokset auttavat toivon mukaan tulevaisuudessa tunnistamaan prosessin kannalta jauhatustavoitteen mitä seurata.

Yleiskatsauksella seula-analyysin tuloksista tehtyyn P80-luvun kuvaajaan (kuvio 16.) voidaan huomata, että suurimman ja pienimmän P80-luvun erotus on 122  $\mu\text{m}$ . Kumpikin näistä luvuista on saatu korkean täyttöasteen näytteistä, mutta matalan täyttöasteen näytteestä löytyy hyvin lähellä matalinta lukua oleva P80-luku.

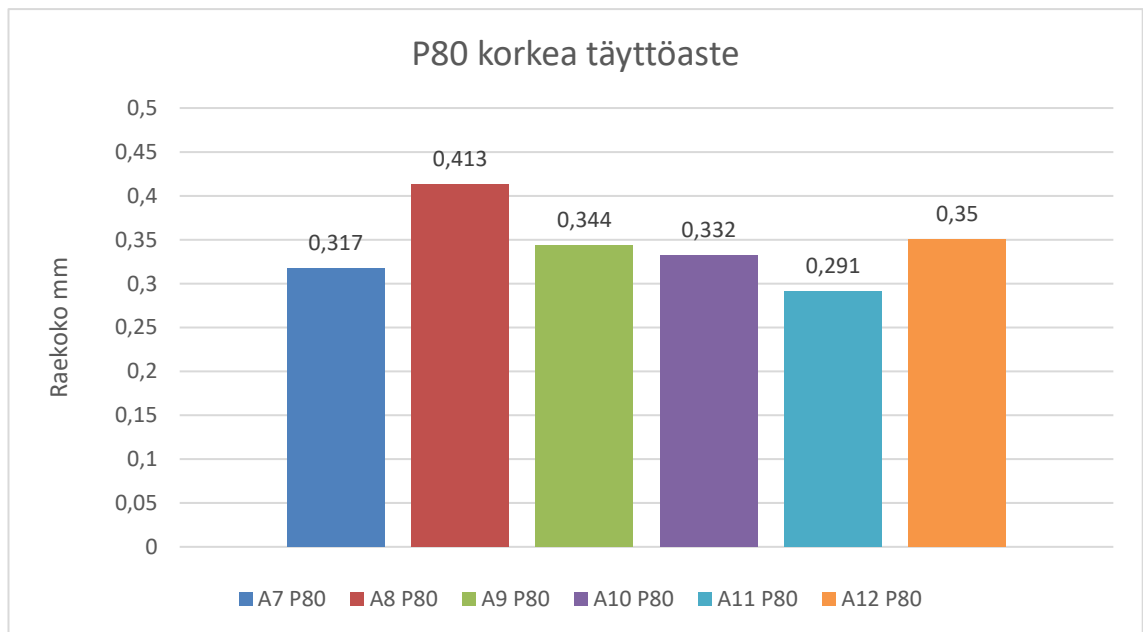


Kuvio 16. P80 luku kaikista näytteistä

Tarkasteltaessa matalan- ja korkean täyttöasteen koeajosarjojen kuvaajia (kuvio 17. ja kuvio 18.) erillään, voidaan todeta, että jauhatuksen tuotteen raekoko pysyy tasaisempana huolimatta jauhatuspiirin ohjausparametrien muutoksista, kun tankomylyissä on matala täyttöaste. Raekoon suurimmaksi vaikuttavaksi tekijäksi jauhatuspiirissä näyttää vaikuttavan primäärimyllyn kierrokset sekä myllyjen täyttöasteet (taulukko 3.). Tarkasteltaessa taulukon 3. koeajoja 8 ja 12, voidaan todeta, että jauhinmyllyjen ollessa korkealla täyttöasteella, 2100-myllyn lisävesiker-toimella, eli myllyn lietetiheydellä vaikuttaisi olevan merkittävä yhteys P80-lukuun. P80-luvun tavoitteen ollessa 450  $\mu\text{m}$ , voidaan todeta, että jokaisessa koeajossa jauhatuksen tuote on ylijauhautunut, mutta P80-luvun tavoitteen ollessa 355  $\mu\text{m}$  voidaan jauhatustulosta pitää onnistuneena.



Kuvio 17. P80 tulokset, kun jauhinmyllyssä on matala täyttöaste



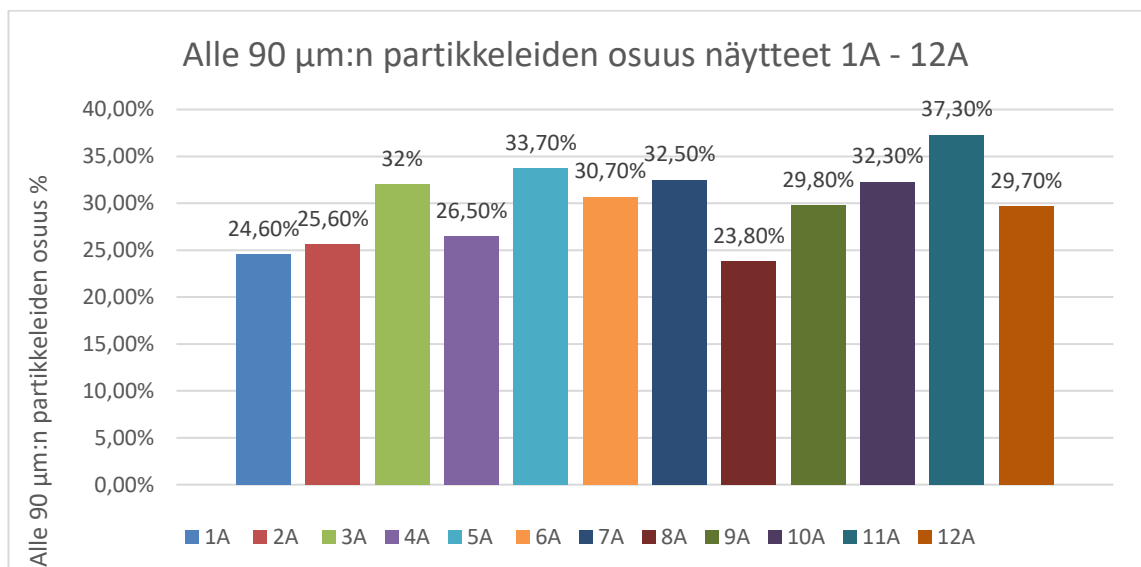
Kuvio 18. P80 tulokset, kun jauhinmyllyssä on korkea täyttöaste

Taulukko 3. Kaikkien koeajosarjojen muuttujat, ohjausparametrit ja P80 luvut

Koejärjestys	Pvm.	Klo.	2100 kierrokset	2100 syotto	2100 Paino	2100 - Myllyn lisavesikerroin	2200 kierrokset	2100 täyttöaste	2200 täyttöaste	Kiertokuorma	2510 kaivon tiheys	P80
1	29.helmi	7:45	13	310	355	0,5	12	32,8 %	23,4 %	400	1,68	0,334
2	29.helmi	8:10	8	310	355	0,4	14	32,8 %	23,4 %	400	1,74	0,353
3	29.helmi	8:40/9:00	8	250	355	0,5	8	32,8 %	23,4 %	400	1,61	0,312
4	29.helmi	9:35	13	310	355	0,5	13	32,8 %	23,4 %	375	1,66	0,330
5	29.helmi	10:05	13	250	355	0,4	6	32,8 %	23,4 %	352	1,66	0,297
6	29.helmi	10:35	8	250	355	0,4	14	32,8 %	23,4 %	400	1,66	0,324
7	1.maalis	21:00	13	250	385	0,4	7	34,8 %	27,4 %	340/70	1,62	0,317
8	1.maalis	21:25	8	310	385	0,5	14	34,8 %	27,4 %	460/110	1,66	0,413
9	1.maalis	21:50	8	250	385	0,5	14	34,8 %	27,4 %	400/110	1,6	0,344
10	1.maalis	22:20	13	310	385	0,4	7	34,8 %	27,4 %	370/50	1,69	0,332
11	1.maalis	22:50	13	250	385	0,5	7	34,8 %	27,4 %	340/30	1,61	0,291
12	1.maalis	23:20	8	310	385	0,4	13	34,8 %	27,4 %	390/65	1,7	0,350

## 7.2 Alle 90 µm:n kokoisten partikkeleiden osuuteen vaikuttavat tekijät

Seula-analyysin tulosten pohjalta tehtyä kuvaajaa (kuvio 19.) tarkasteltaessa voidaan todeta että myllyjen täyttöasteella on merkittävä yhteys alle 90 µm:n kokoisten partikkeleiden osuuteen näytteissä. Taulukkoa 4. tutkiessa voidaan todeta, että myllyjen täyttöasteiden ollessa korkealla, ylijauhautumiseen vaikuttaa huomattavasti 2100-myllyn kierrosten suhde jauhatuksen syöttömäärään. Esimerkiksi koeajonumeroissa 9 ja 11, jauhatuksen syöttömäärä on sama, mutta ylijauhettujen partikkeleiden osuudessa on 7,5 %:n ero.



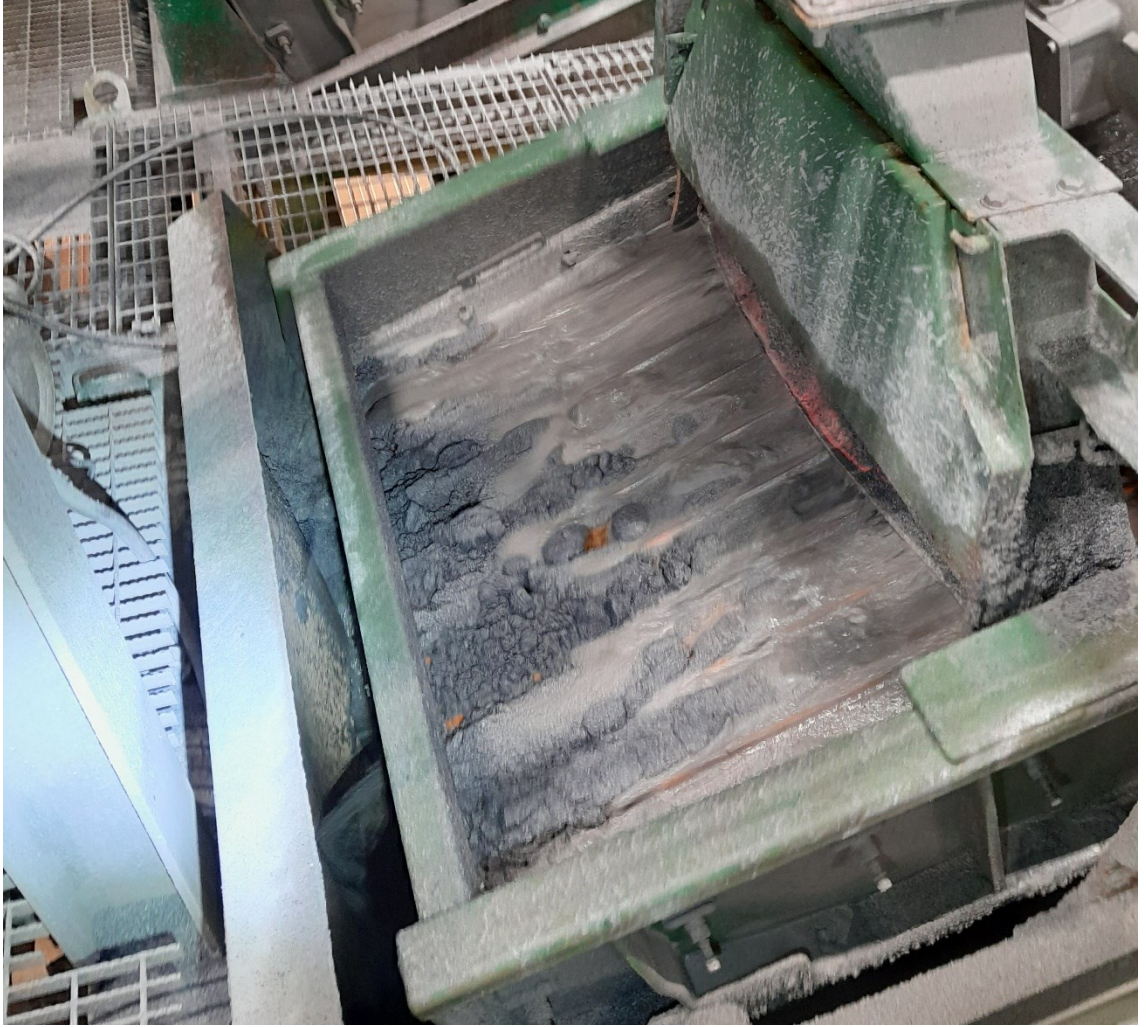
Kuvio 19. Alle 90 µm:n kokoisten partikkeleiden osuus näytteissä

Taulukko 4. Kaikkien koeajosarjojen muuttujat, ohjausparametrit ja alle 90 µm:n kokoisten partikkeleiden osuus

Koe-järjestys	Pvm.	Klo.	2100 kierrokset	2100 syotto	2100 Paino	2100 - Myllyn lisavesikerroin	2200 kierrokset	2100 tayttoaste	2200 tayttoaste	Kiertokuorma	2510 kaivon tiheys	Alle 90 µm osuus
1	29.helmi	7:45	13	310	355	0,5	12	32,8 %	23,4 %	400	1,68	24,6 %
2	29.helmi	8:10	8	310	355	0,4	14	32,8 %	23,4 %	400	1,74 !	25,6 %
3	29.helmi	8:40/9:00 !	8	250	355	0,5	8	32,8 %	23,4 %	400	1,61	32,0 %
4	29.helmi	9:35	13	310	355	0,5	13	32,8 %	23,4 %	375	1,66	26,50
5	29.helmi	10:05	13	250	355	0,4	6	32,8 %	23,4 %	352	1,66	33,70
6	29.helmi	10:35	8	250	355	0,4	14	32,8 %	23,4 %	400	1,66	30,70
7	1.maalis	21:00	13	250	385	0,4	7	34,8 %	27,4 %	340/70	1,62	32,50
8	1.maalis	21:25	8	310	385	0,5	14	34,8 %	27,4 %	460/110	1,66	23,80
9	1.maalis	21:50	8	250	385	0,5	14	34,8 %	27,4 %	400/110	1,6	29,80
10	1.maalis	22:20	13	310	385	0,4	7	34,8 %	27,4 %	370/50	1,69	32,30
11	1.maalis	22:50	13	250	385	0,5	7	34,8 %	27,4 %	340/30	1,61	37,30
12	1.maalis	23:20	8	310	385	0,4	13	34,8 %	27,4 %	390/65	1,7	29,70

Ylijauhautumisen estämiseksi vaikuttaisi olevan parasta ajaa jauhatuspiiriä siten että jauhatuksen syöttömäärää pidetään korkealla, 2100-myllyn kierroksia matalalla ja 2200-myllyn kierroksia säädettäisiin luokitusseuloilta tulevan kiertokuorman mukaan. Näin ajettaessa malmi ei jauhautuisi liian hienoksi primäärimyllyssä. Keskusteltaessa asiasta prosessinhoitajien kanssa, kävi ilmi että 2200-myllyn, eli lisäjauhatusmyllyn purkupään putki menee helposti tukkoon, jos myllyyn syötettävä kiertokuorma kasvaa liian suureksi. 2200-myllyssä olisi kapasiteettia jauhaa suurillakin syöttömäärillä tuleva kiertokuorma, jos 2100-myllyä ajetaan pienillä kierroksilla.

Koeajojen aikana kävi myös ilmi, että ylijauhautumista tapahtuu prosessissa jatkuvasti, koska hienoa ainesta pääsee derrick-luokitusseuloilta ylitteen mukana 2200-myllyyn. Asiaa tutkittaessa kävi ilmi, että luokitusseuloille syötettävä liete ei jakaudu tasaisesti seuloille, vaan joillekin seulaverkoille menee liikaa lietettä, ja seulaverkon seulontakapasiteetti ylittyy. Kuviossa 20 on esitetty kuinka seulontakapasiteetin ylittyessä seulaverkon päällä kulkeva märkä lietepatja ajautuu ylitteeseen.



Kuvio 20. Hienoaines ajautuu luokitusseulan ylitteeseen

## 8 HAVAITUT KEHITYSKOHTTEET

Koeajoja suunniteltaessa ja koeajojen aikana prosessissa havaittiin useita kehityskohteita. Kehitettäviksi asioiksi havaittiin tankomyllyjen täyttöasteiden seurannan parantaminen, tankojen riittävän saatavuuden varmistaminen tankoja lisättäessä myllyihin, derrick-luokitusseulojen syöttömäärien optimointi, 2510-kaivon lietteen lietetiheyden hallinta ja 2200-myllyn purkuputken parannus. Kaikilla kehityskohteilla on suora vaikutus jauhatuspiirin toimintaan ja jauhatuksen tuotteen laatuun.

### 8.1 Myllyjen täyttöasteen seurannan parantaminen ja tankojen riittävyyden varmistaminen

Koeajojen aikana kävi ilmi, että varsinkin lisäjauhatusmyllyn täyttöaste oli kaukana tavoitellusta täyttöasteesta. Optimaalinen täyttöaste myllylle olisi 35 %, mutta koeajojen aikana suoritettua täyttöasteen mittauksessa ennen uusien tankojen lisäystä kävi ilmi, että täyttöaste on vain 23,4 %. Tankojen lisäyksen jälkeenkin täyttöaste jäi erittäin matalaksi, koska lisättäviä tankoja ei ollut varattu tarpeeksi käytettäväksi. 2200-myllyn täyttöastetta ei voida varmuudella todeta mitenkään muuten kuin suorittamalla täyttöasteen mittaus myllyn sisällä. 2100-myllyn täyttöastetta voi tarkkailla prosessinohjausjärjestelmästä näkyvästä myllyn painosta.

Myllyjen täyttöasteen seurannan parantamiseksi ja tankojen riittävyyden varmistamiseksi tulevaisuudessa myllyjen täyttöasteen mittaus tulisi suorittaa säännöllisesti tankojen lisäyksen yhteydessä. Aktiivisella täyttöasteen seurannalla muodostuu ennen pitkään käsitys myös siitä, kuinka paljon lisättäviä tankoja tulisi varata käytettäväksi tankojen lisäykseen.

### 8.2 Derrick-luokitusseulojen syötön optimointi

Jauhatuspiirissä on kahdeksan derrick-luokitusseulaa, joihin syötetään liete niiden yläpuolella olevista kahdesta syöttöpytyistä. Syöttöpytyistä liete virtaa vapaa-laskuna putkea pitkin luokitusseulalle, joka koostuu kolmesta eritasossa olevasta



seulaverkosta. Koska liete virtaa vapaalaskuna seulalle, niin lähimpänä syöttöpyttyä oleville seulaverkolle virtaa aina enemmän lietettä, kuin kauempana oleville seulaverkoille, koska virtaus on aina voimakkainta sinne, minne sen on helpoin mennä. Liian suuren virtausmäärän takia seulaverkon seulontakapasiteetti ylittyy ja hienoa ainesta pääsee seulan ylitteenä lisäjauhatusmyllyyn. Tämä aiheuttaa prosessissa ylijauhautumista.

Seulojen syöttöä pitää optimoida ylijauhautumisen estämiseksi. Asentamalla syöttöpytyn lähtöön supistaja, tai pienentämällä syöttöpytyltä lähimmälle seulaverkolle menevää linjaa, virtausta saadaan pienennettyä. Helpoin tapa olisi asentaa kuristusventtiili syöttölinjaan, mutta lietteessä olevien kovien kiintoaineiden takia se ei olisi kestävä ratkaisu.

### 8.3 2510-kaivolta lähtevälle lietteelle tiheydensäätöpiiri

2510-kaivon lietetiheyden kasvaessa liian suureksi, kaivolta derrick-seulojen syöttöpytyille menevä linja voi mennä tukkoon ja pysäyttää koko hienorikastusprosessin. 2510-kaivoon menee 2100- ja 2200-myllyjen tuotteet. Tukkeutumisoingelman välttämiseksi 2100-myllyn lisävesiventtiilin venttiilikulman alarajaksi on asetettu 43 %. Venttiilikulman alarajan ollessa noin suuri kävi ilmi, että 2100-myllyn lietetiheys on ollut jatkuvasti liian alhainen, noin 50 %:in luokkaa. Tankomyllyn ihanteellinen lietetiheys on 60–75 %. Myllyn alhaisella lietetiheydellä 2510-kaivon lietetiheys ei kasva liian suureksi, mutta todennäköisesti se kuitenkin vaikuttaa jollakin lailla jauhatuksen onnistumiseen.

2510-kaivon lietteelle on olemassa järjestelmässä lietetiheyden mittaus ja kaivoon voidaan annostella lisävettä, säätöventtiiliä aukaisemalla. Lietetiheyden mittauksesta ja lisävesiventtiilistä voi rakentaa järjestelmään automaattisen tiheydensäätöpiirin, joka pitää kaivon lietetiheyden automaattisesti vakiona.

### 8.4 2200-myllyn purkuputken parantaminen

Nykyisellään jauhatuspiirin kiertokuorman kasvaessa liian suureksi, täytyy jauhatuksen syöttömäärää pienentää tai lisätä kierroksia 2100-myllyyn, jotta kierto-

kuorman määrä vähentyy. Kiertokuorma on derrick-luokitusseuloilta tulevaa ylitettä, eli liian suuria partikkeleita, jotka eivät läpäise seulaverkkoa. Kiertokuorma menee 2200-myllyyn lisäjauhatukseen, mutta myllyn purkupään putkilinja menee helposti tukkoon liian suuresta lietemäärästä. Myllyllä on jauhatuskapasiteettia riittävästi, isommankin kiertokuorman jauhamiseen. Syöttömäärän pienentäminen vähentää hienorikastuksen tuotantoa ja 2100-myllyn kierrosten nostaminen aiheuttaa helposti malmin yli jauhamista. Ylijauhettua rikastetta ei saada talteen spiraalirikastuksessa.

2200-myllyn purkupään putkilinjassa liete menee vapaalaskuna 2510-kaivolle. Putkilinjaa suurentamalla ja asentamalla se jyrkemmälle laskulle kaivon saadaan jauhattua nykyistä enemmän kiertokuormaa, eikä jauhatuksen syöttömäärää tarvitse pienentää tai 2100-myllyn kierroksia nostaa kiertokuorman määrän pienentämiseksi. Paremmen toimiva jauhatuspiiri parantaa jauhatuksen tulosta sekä hienorikasteen saantia.

## 9 POHDINTA

Opinnäytetyö valmistui yllättävän vaivattomasti ja nopeaa. Vaikka minulla ei ollut juurikaan aikaisempaa kokemusta malmin jauhatuksesta, niin vahva kokemukseni erilaisten prosessien hallinnasta auttoi ymmärtämään tätäkin prosessia aika nopeasti. Toimeksiantajan puolelta tullut hyvä ja aktiivinen ohjaus tähän opinnäytetyöhön, sekä säännölliset työn etenemisen seurantalaverit auttoivat todella paljon työn suorittamisessa.

Keskeiset toimenpiteet tässä opinnäytetyössä olivat tiedon hankkiminen työn aiheesta, Kemin kaivoksen rikastamalla suoritettavat jauhatuspiirin koeajot sekä koeajojen tulosten raportointi.

Opinnäytetyö alkoi tiedon hankkimisella mineraalitekniikasta ja malmien hienonnuksesta. Kirjallisuusteoksia aiheesta oli vähän saatavilla, mutta löytämäni teokset olivat onneksi todella kattavia, ja niistä löytyi kaikki tarvittava tieto tämän työn tekemiseen. Jauhatuspiirin koeajot ajettiin kahdessa osassa Kemin kaivoksen rikastamalla ja kaikki koeajosuunnitelman mukaiset koeajot saatiin ajettua onnistuneesti ilman häiriöitä. Mineraalitekniikan ja malmin hienonnuksen teorian tutkimisen, koeajojen suorittamisen ja niiden tulosten raportoinnin johdosta syntyi tämä opinnäytetyöraportti.

Onnistuin mielestäni hyvin kertomaan yleisesti rikastamon prosesseista, malmin jauhatuksesta, spiraalirikastuksesta sekä kokeellisesta osuudesta ja sen tuloksista. Itse ottamani valokuvat tukevat ja havainnollistavat hyvin kirjoittamaani tekstiä ja antavat lukijalle selventävän kuvan siitä miltä tekstissä kuvaillut prosessilaitteet ja tilanteet todellisuudessa näyttävät.

Opinnäytetyön tarkoitukseen ja tavoitteisiin perustuvat kysymykset, ongelmat ja kehittämiskohteet joihin opinnäytetyöllä pyritään vastaamaan olivat jauhatuksen lopputuloksen kannalta merkittävimmät ohjausmuuttujat, hyvät säädöt ja ajotavat uudistetulle jauhatuspiirille, millä ohjausmuuttujilla ja säädöillä jauhetun rikasteen raekoko ja puhtaaksi jauhautuvuus saadaan optimaaliseksi spiraalirikastusta ajatellen, mitkä ovat jauhatuspiirin hyvät ajotavat ja säädöt erilaisilla jauhatuspiirin syöttömäärillä. Yhtäkään näistä kysymyksistä, ongelmista ja kehittämiskohteista

ei varmasti pysty kokonaan ratkaisemaan yhdellä tällaisella työllä, mutta onnistuin mielestäni kattavasti tutkimaan ja kehittämään nykyistä prosessia. Opinnäytetyötä tehdessä havaitsemani kehityskohteet auttavat varmasti parantamaan rikasteen saantia sekä laatua ja uskon työni tutkimustuloksista ja tästä raportista olevan hyötyä tulevaisuudessa toimeksiantajalle prosessia kehitettäessä. Kaiken kaikkiaan olen todella tyytyväinen työni lopputulokseen.

Opinnäytetyöni on eettisesti ja luotettavasti tehty. Kaikkiin tässä työssä julkaistuihin valokuviin ja tutkimustuloksiin on pyydetty toimeksiantajalta julkaisulupa, eikä tässä työssä yksilöidä henkilöitä. Kaikki opinnäytetyössä käytetty tieto löytyy virallisista ja julkisista lähteistä. Toimeksiantaja pystyy tulevaisuudessa hyväksikäyttämään tätä opinnäytetyötä, edelleen kehittäessään jauhatuspiirin toimintaa ja tämä työ antaa arvokasta tutkimustietoa malmin jauhatuksesta.

## LÄHTEET

911metallurgist 2016. Rod Mills. Viitattu 14.2.2024  
<https://www.911metallurgist.com/blog/rod-mills>

SFS-EN 933-2:2020 Kiviainesten geometrysten ominaisuuksien testaus. Osa 2: Rakeisuuden määrittäminen. Seulasarjat, aukkojen nimelliskoko. Suomen standardoimisliitto SFS.

Kaiva.fi 2024. Rikastus. Viitattu 14.2.2024 [https://kaiva.fi/wp-content/uploads/2014/12/Rikastus\\_kaiva.pdf](https://kaiva.fi/wp-content/uploads/2014/12/Rikastus_kaiva.pdf)

Kostamo, A. 2016. Kromiitin puhtaaksijauhatusteet Kemin kaivoksen tankomylyillä eri kierrosnopeuksilla ja täyttöasteilla. Opinnäytetyö, Centria-ammattikorkeakoulu. Viitattu 25.3.2024  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/114000/Kostamo\\_Annaleena.pdf.pdf;jsessionid=DC8E67206D05E222C2481436EB855E8D?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/114000/Kostamo_Annaleena.pdf.pdf;jsessionid=DC8E67206D05E222C2481436EB855E8D?sequence=1)

Lukkarinen, T. 1985. Mineraalitekniikka osa 1. Mineraalien hienonnus. 2. painos Helsinki: Insinööritieto.

Lukkarinen, T. 1987. Mineraalitekniikka osa 2. Mineraalien rikastus. Helsinki: Insinööritieto.

Outokumpu Oyj 2024a. HR laitepositiot, kaivot. O´net Outokummun sisäinen intranet. Viitattu 13.2.2024

Outokumpu Oyj 2024b. Kemin kaivos. Viitattu 7.2.2024  
<https://www.outokumpu.com/fi-fi/locations/kemimine>

Outokumpu Oyj 2024c. Outokummun Kemin kaivoksesta maailman ensimmäinen hiilineutraali kaivos vuoteen 2025 mennessä. Viitattu 7.2.2024  
<https://www.outokumpu.com/fi-fi/news/2023/outokummun-kemin-kaivoksesta-maailman-ensimmainen-hiilineutraali-kaivos-vuoteen-2025-mennessa-%E2%80%93lahes-kolmasosa-tavoitteesta-saavutetaan-nesteen-uusiutuvilla-polttoaineilla-3336064>

Outokumpu Oyj 2024d. Rikastamon prosessit. O´net Outokummun sisäinen intranet. Viitattu 13.2.2024

Outokumpu Oyj 2024e. Virtauskaavio Kemin kaivos. O´net Outokummun sisäinen intranet. Viitattu 13.2.2024

Pihkala, J. 2011. Prosessitekniikka: Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. Helsinki: Opetushallitus.

Siemens S7 prosessinohjausjärjestelmä. Viitattu 22.3.2024