

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Engineering Science
Kemiantekniikan koulutusohjelma

Tuija Nyman

**JAUHATUSPARAMETRIEN VAIKUTUS JAUHATUSTUOTTEEN
PARTIKKELIKOKOON JA SUODATTUVUUTEEN**

Työn tarkastajat:	Professori TkT	Antti Häkkinen Ritva Tuunila
Ohjaajat:	TkT TkT	Ritva Tuunila Teemu Kinnarinen

ALKUSANAT

Haluan kiittää professori Antti Häkkistä ja TkT Ritva Tuunilaa diplomityön aiheesta ja työn tarkastamisesta. Suuri kiitos myös Ritvalle työn jauhatuspuolen ohjaamisesta ja TkT Teemu Kinnariselle suodatuspuolen ohjaamisesta ja tulosten laskentaan liittyvästä avusta. Kiitän molempia myös kommentteista työtä kirjoitettaessa. Haluan kiittää myös samoissa laboratorioissa toimineita kemiantekniikan laitoksen henkilökuntaa käytännön ohjeista ja ystävällisyydestä.

Kiitos opiskelukavereilleni pitkäksi venähtäneestä ajasta yliopistossa. 0990-tyttöjen kanssa pystyi jakamaan niin opiskeluun liittyvät asiat ja siihen liittymättömätkin. Paljon hienoja muistoja ja tapahtumia on mahtunut näihin vuosiin, onneksi osa niistä on tallennettu valokuviinkin. Ihania ja tärkeitä ystäviä on myös Lappeenrannan ulkopuolella, kiitos heille kaikille.

Kiitän tuesta ja kannustuksesta myös vanhempiani ja muuta perhettä. Iso kiitos myös Immolle.

Lappeenranta, 27.1.2016

Tuija Nyman

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Engineering Science
Kemiantekniikan koulutusohjelma

Tuija Nyman

Jauhatusparametrien vaikutus jauhatustuotteen partikkelikokoon ja suodattavuuteen

Diplomityö

2016

77 sivua, 37 kuvaa, 17 taulukkoa, 3 liitettä

Työn tarkastajat: Prof. Antti Häkkinen
TKT Ritva Tuunila

Hakusanat: rikastushiekka, helmimylly, kakkusuodatus, partikkelikokojakauman leveys, kakun ominaisvastus

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia ensin jauhatustietojen vaikutus rikastushiekan hienousasteeseen eli miten partikkelikokojakaumaa kuvaavat partikkelikoot muuttuvat. Tämän jälkeen tutkitaan miten rikastushiekan hienousasteen muuttuminen vaikuttaa jauhattujen rikastushiekkalietytetyiden suodattavuuteen. Partikkelikokojakauman variaatioista yritetään löytää yhteys suodinkakun ominaisvastuksen ja huokoisuuden välillä.

Jauhatustietojen suoritettiin laboratoriomittakaavan helmimyllyllä märkäjauhatuksena. Jauhatustietojen varten tehtiin kolmitasoinen faktorikoetsuunnitelma, jossa muuttujina ovat lasihelmien halkaisija, jauhatustietojen aika ja sekoittelimen pyörimisnopeus. Suodatus toteutettiin vakiopainesuodatuksena kolmella eri suodatuspaineella Nutsche-suodattimella.

Työn tuloksista saatiin selville, että partikkelikokojakauman leveys korreloi suodinkakun ominaisvastuksen kanssa. Kun partikkelikokojakauma leveys muuttui kapeammaksi, saatiin kakun ominaisvastus pienemmäksi ja suodatukseen kulunut aika lyheni. Kapein partikkelikokojakauman leveys saatiin suurimmalla helmen halkaisijalla, pisimmällä jauhatustietojen ajalla sekä suurimmalla sekoitusnopeudella.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Engineering Science
Degree Programme of Chemical Engineering

Tuija Nyman

The effect of grinding parameters on grinding product's particle size and filterability

Master's thesis

2016

77 pages, 37 figures, 17 tables, 3 appendices

Examiners: Prof. Antti Häkkinen
D.Sc. (Tech) Ritva Tuunila

Keywords: tailings, stirred bead mill, cake filtration, particle size distribution span, specific cake resistance

The aim of this master's thesis is to investigate first how the degree of fineness in tailing samples is changing using different grinding parameter variations. Secondly, it is investigated how samples with different particle size distribution are behaving in pressure filtration. The goal is to find out some sort of connections between coefficients determinate from particle size distribution and filtration coefficients, specific cake resistance and porosity.

Laboratory scale stirred bead mill is used in the grinding part having glass beads as grinding medium. There is a three-level factorial design for grinding tests. Different parameters in that design are diameter of grinding media, grinding time and stirrer speed. For the filtration part, Nutsche filter is used under constant pressure. Three different filtration pressures are used in the experiments.

From the results we were able to discover connection between particle size distribution span and specific cake resistance. It seems that narrow PSD span makes specific cake resistance low and filtration happens quicker. The narrowest span was obtained with largest bead size and longest grinding time and highest rotating speed.

SYMBOLILUETTELO

A_c	suodinkakun poikkipinta-ala	, m ²
A_m	suodatuspinta-ala	, m ²
c	suodatuskonsentraatio	, kg m ⁻³
c_w	lietteen kiintoainepitoisuus	, -
D	partikkelin halkaisija	, m
D_{10}	partikkelin halkaisija, jonka alle on 10 % näytteen partikkeleista	, μm
D_{50}	partikkelin halkaisija, jonka alle on 50 % näytteen partikkeleista	, μm
D_{90}	partikkelin halkaisija, jonka alle on 90 % näytteen partikkeleista	, μm
$D_{[3,2]}$	pinta-alan keskiarvohalkaisija	, μm
$D_{[4,3]}$	tilavuuden keskiarvohalkaisija	, μm
h_c	suodinkakun korkeus	, m
m	märän ja kuivan suodinkakun massan suhde	, -
m_s	kiintoaineen massa, kuiva	, g
m_w	kiintoaineen massa, märkä	, g
Q	virtausnopeus	, m s ⁻¹
R_m	suodatusväliaineen vastus	, m ⁻¹
S_w	partikkelin ominaispinta-ala	, m ² kg ⁻¹
t	aika	, s
t_s	vakiopainesuodatuksen alkamisajankohta	, s
v_i	partikkelien osuus kokoluokassa	, -
V	suodoksen tilavuus	, m ³
V_c	suodinkakun kokonaistilavuus	, m ³

V_s	suodoksen tilavuus vakioainesuodatuksen alkamishetkellä	, m ³
V_v	huokosten tilavuus suodinkakussa	, m ³
w	kuivan suodinkakun massa pinta-alaa kohden	, kg m ⁻²
α	suodinkakun ominaisvastus	, m kg ⁻¹
α_{av}	keskimääräinen suodinkakun ominaisvastus	, m kg ⁻¹
ε	suodinkakun huokoisuus	, -
ε_{av}	suodinkakun keskimääräinen huokoisuus	, -
ρ_l	lietteen tiheys	, kg m ⁻³
ρ_s	kiintoaineen tiheys	, kg m ⁻³
ρ_w	suodoksen tiheys	, kg m ⁻³
μ	suodoksen viskositeetti	, Pa s
Δp	paine-ero kakun yli	, Pa

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	3
2	KAIVOSTOIMINTA SUOMESSA	4
	2.1 RIKASTUSPROSESSI	8
3	RIKASTUSPROSESSIN HIENONNUS	11
	3.1 Murskaus	11
	3.2 Jauhatus	12
	3.2.1 Tankomylly	12
	3.2.2 Kuulamyly	14
	3.2.3 AG- ja SAG-myllyt	16
4	RIKASTUSHIEKKA	17
	4.1 Tiivistetyt kaivosjätteet	17
	4.2 Jauhatuksen vaikutus kaivosjätteen käsittelyyn	19
	4.3 Rikastushiekan kiintoainepitoisuuden vaikutus loppusijoitukseen	20
5	HELMIMYLLY	21
	5.1 Jauhinmateriaali ja koko	22
	5.2 Sekoitusnopeus	23
6	PARTIKKELEIDEN KARAKTERISOINTI	24
	6.1 Laskennalliset partikkelikoot	25
	6.2 Partikkelikokojakauman leveys	26
7	SUODATUS	27
	7.1 Nutsche-suodatin	28
	7.2 Kakkusuodatuksen parametreja	30
8	KOESUUNNITTELU	33
	KOKEELLINEN OSA	35
9	RIKASTUSHIEKKALIIETTEEN KARAKTERISOINTI	36
	9.1 Koostumus	36
	9.2 Kiintoainepitoisuus ja tiheydet	36
	9.3 Partikkelikokojakauma	36
10	JAUHATUSKOKEET	38
	10.1 Alustava jauhatuskoe	38

10.2	Jauhatuskoesarja.....	40
11	SUODATUSKOKEET	42
12	TULOKSET.....	44
12.1	Jauhatuskokeet.....	44
12.2	Jauhatusparametrit.....	46
12.2.1	Helmikoko.....	47
12.2.2	Jauhatusaika	48
12.2.3	Sekoitusnopeus.....	49
12.3	Partikkelikokojakauman leveys.....	50
12.4	Suodatus	53
12.4.1	Kakun ominaisvastus.....	53
12.4.2	Huokoisuus.....	55
12.5	Regressioanalyysi.....	57
12.5.1	Sauterin keskiarvohalkaisija, $D_{[3,2]}$	58
12.5.2	D_{50} -me diaanipartikkelikoko	59
12.5.3	D_{90} -partikkelikoko.....	60
12.5.4	Partikkelin ominaispinta-ala, S_w	62
12.5.5	Kakun keskimääräinen ominaisvastus, α_{av}	63
12.6	Partikkelikokojakauman leveys ja kakun ominaisvastus	66
12.7	Partikkelikokojakauman leveys ja huokoisuus.....	69
13	JOHTOPÄÄTÖKSET	71
14	LÄHDELUETTELO	72
	LIITTEET	77

1 JOHDANTO

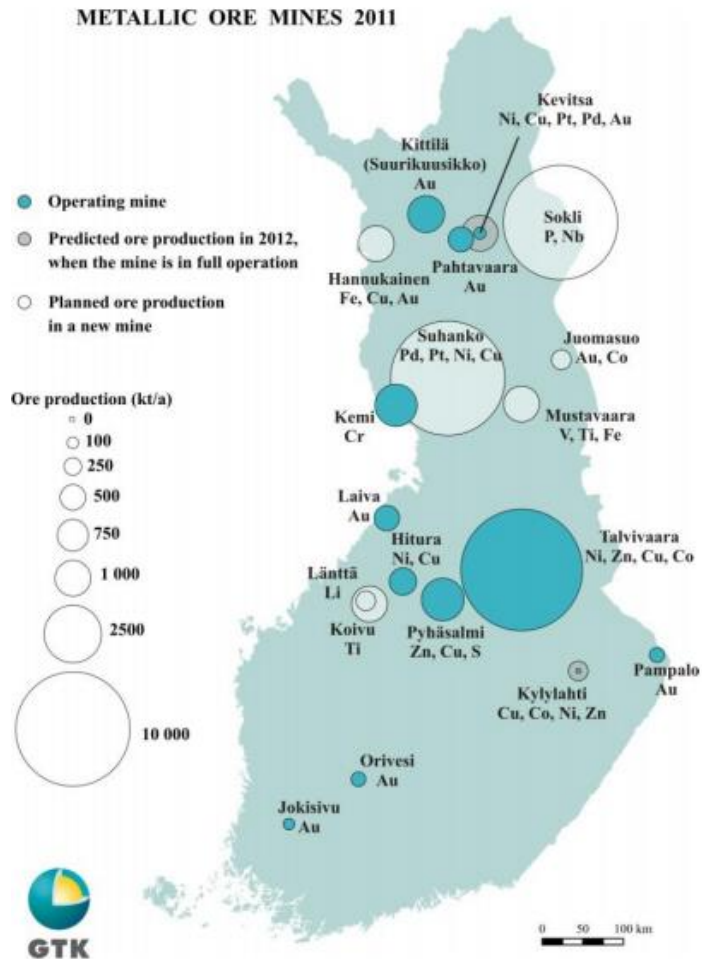
Rikastushiekka on kaivosteollisuuden mineraalien rikastusprosessissa syntyvä jäte, joka tavanomaisesti varastoidaan suuriin patoaltaisiin. Lietemäisen rikastushiekkajätteen varastointi patoaltaisiin on osoittautunut ympäristön kannalta epävakaaksi ratkaisuksi, koska patoaltaan reunuksen murtuessa rikastushiekkaliete leviää ympäristöön. Turvallisempi säilytystapa olisi lietteen varastointi lietealtaiden sijasta kiinteässä muodossa kasoihin. Tällainen olomuodon muutos vaatii aina suodatusta. Rikastusprosessissa tapahtuvalla jauhatuksen optimoinnilla voitaisiin yrittää vaikuttaa rikastushiekan käyttäytymiseen suodatuksessa.

Diplomityön tarkoituksena on tutkia ja selvittää erilaisten jauhatusparametrien vaikutus jauhattavaan materiaaliin ja sen jauhautumiseen helmimyllyssä. Jauhautumiskokeita varten tehtiin kolmitasoinen faktorikoesuunnitelma, jossa muuttujia jauhatusprosessissa ovat jauhinkappaleina käytettävien lasikuulien halkaisija, jauhatukseen käytettävä aika ja helmimyllyn tappisekoittimen pyörimisnopeus.

Helmimyllyjauhatuksen jälkeen näytteet suodatettiin. Kakkusuodatuksessa tarkkailtiin, miten näytteiden hienousasteiden erot vaikuttivat rikastuslietteen suodattavuuteen. Suodatuksessa havaittiin eroja suodatukseen käytettävässä ajassa ja suodinkakun paksuudessa. Nämä muutokset oli selitettävissä hienousasteen muuttumisella eli partikkelikokojakaumaa kuvaavien keskimääräisten partikkelikoiden muuttumisella kokeiden välillä. Regressioanalyysillä saatiin selville mitkä muuttujat vaikuttavat eniten rikastushiekan hienousasteeseen, minkä tuloksena jauhatusajalla näyttäisi suurin vaikutus useimpaan partikkelikokojakaumaan kuvaavaan partikkelikokoon.

2 KAIVOSTOIMINTA SUOMESSA

Kokko [1] on koonnut raportin Suomen kaivosteollisuudesta vuodelta 2013. Malmimetallia louhivia kaivoksia on raportin mukaan toiminnassa Suomessa 12 kappaletta. Niiden liikevaihto on yhteensä 1,1 miljardia euroa ja ne työllistävät Suomessa 2 280 henkilöä. Metallimalmikaivosten sijainnit Suomessa sekä kunkin kaivoksen tärkeimmät mineraalit on esitetty kuvassa 1. Kaivokset ovat suhteutettu toisiinsa käyttäen vertailuna kaivoksien vuotuisia malmin louhintamääriä. Kartan siniset pallot kuvaavat toiminnassa olevia kaivoksia. Harmaat pallot ovat kaivoksia, joiden tuotanto saavutti täyden tuotantokapasiteetin vuoden 2012 aikana. Lisäksi karttaan on merkitty valkoisin palloin kaivokset, jotka ovat vasta suunnitteilla raportin tekohetkellä. Suomen maaperällä olevat kaivokset ovat sijoittuneet maan itä- ja pohjoisosiin. Suomen kaivostoiminnassa yleisimmin rikastettavat metallirikasteet ovat kulta, kupari, kromi, nikkeli ja sinkki. Metallimalmikaivoksista malmia louhittiin 20,8 milj. tonnia vuoden 2013 aikana. [1,2]



Kuva 1 Malmimetallikaivokset Suomessa vuonna 2011 [2].

Talvivaaran kaivos Sotkamossa on toimivista kaivoksista kaikkein suurin 10 000 kilotonnin vuosikapasiteetillaan. Sieltä saadaan nikkeliä, sinkki-, kupari-, uraani- ja kobolttirikastetta. Muut kaivokset joiden vuosittainen mineraalituotanto ylittää 1000 kilotonnia ovat Kittilä, Kemi sekä Pyhäsalmi. Niiden rikastetuotantoon kuuluvat edellä mainittujen rikasteiden lisäksi kulta-, kromi-, rikki- ja hopearikaste. Taulukossa I on käyty tarkemmin läpi vuonna 2011 toiminnassa olleiden kaivosten omistamat yhtiöt, kaivannaistuotteet ja niiden tuotantomäärät sekä kerrottu mihin saakka kaivokset jatkavat toimintaansa [1,2,3].

Mineraalien kysyntä on kasvanut 2000-luvulla kansainvälisesti ja kaivosalalla on pitkät perinteet Suomessa. Nämä seikat ovat lisänneet sijoittajien mielenkiintoa perustaa kaivos Suomeen vuoteen 2012 saakka. Potentiaalisen sijoituskohteen Suomesta tekee geologisen tiedon saatavuus, hyvin järjestetty infrastruktuuri ja poliittinen vakaus. Hyödykkeiden korkeat hinnat mahdollistavat suljettujen kaivosten uudelleenavaamisen. Toisaalta ongelmia voivat tuottaa pitkät lupaprosessit ja kiristytvä verotus. Edelleen esiintyy myös kaivostoiminnan vastaista ilmapiiriä. Myös rahoituksen saamisen vaikeus ja siitä johtuva investointien väheneminen uhkaavat kaivosalaa [3,1].

Kaivosala on suurien uudistuksien kynnyksellä, kun sitä tulisi toteuttaa ympäristön kannalta kestäväällä tavalla, huomioiden samalla taloudelliset ja sosiaaliset osatekijät. Metallien markkinahinnat heiluvat koko ajan ja voivat muuttua esimerkiksi maiden asettamien vientikieltojen tai teknologian kehittymisen vuoksi. Kaivosalan kehittäminen kestävämmäksi ja vihreämmäksi toimialaksi voitaisiin toteuttaa ratkaisemalla nykyisiä ongelmia muun muassa sivuvirtojen hallinnassa tai (jäte)vesienkäsittelyssä [1].

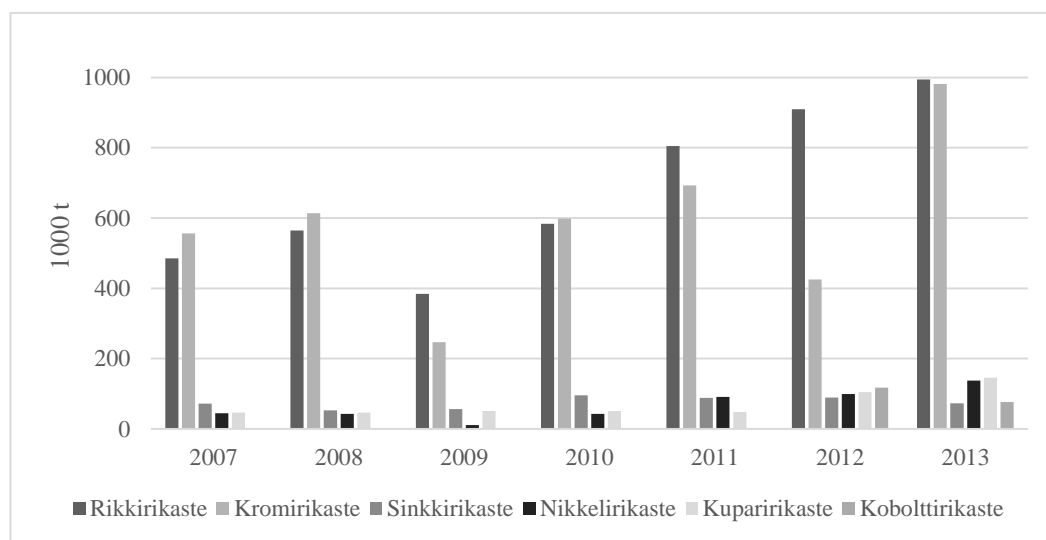
Taulukko I Suomessa vuonna 2011 toiminnassa olevien kaivosten tiedot [1,3].

Kaivos, paikkakunta Yhtiö	Mineraali	Tuotantokapasiteetti	Kaivoksen käyttöaika	
Suurikuusikko, Kittilä	Agnico-Eagle Finland Oy	Au	160 000 unssia	Vuoteen 2044 saakka
Hitura, Nivala	Belvedere Mining Oy	Ni, Cu, Co, Pt, Pd	Ni: 2 500 t	Vuoteen 2018 saakka
Pahtavaara, Sodankylä	Lapland Goldminers Oy	Au	25 720 unssia	Ainakin kaksi vuotta
Kemi, Keminmaa	Outokumpu, Chrome Oy	Cr	1,3 m ³ t	Ei tietoa
Jokisivu, Huittinen	Dragon Mining Oy	Au	25 780 unssia	Vuoteen 2016 saakka
Orivesi	Dragon Mining Oy	Au	Sisällytetty edelliseen	Vuoteen 2015 saakka
Pyhäsalmi, Pyhäjärvi	Pyhäsalmi Mine Oy	Cu, Zn, S, Ag, Au	Cu: 14 000 t Zn: 32 300 t	Vuoteen 2018 saakka
Pampalo, Ilomantsi	Endomines Oy	Au	Au: 25 700 - 28 900 unssia	N.A.
Talvivaara, Sotkamo	Talvivaara Sotkamo Oy	Ni, Zn, U	Ni: 50 000 t Zn: 100 000 t	2069
Laivakangas, Raahe	Nordic Mines Oy	Au	118 000 unssia	2017
Kevitsa, Sodankylä	Kevitsa Mining Oy	Cu, Ni, PGM, Au	Ni: 10 000 t Cu: 20 000 t	32 vuotta
Kylylahti, Polvijärvi	Kylylahti Copper Oy	Cu, Ni, Zn, Au	Cu: 8 000 t Au: 8 400 unssia Zn: 1 600 t	8 – 9 vuotta

2.1 RIKASTUSPROSESSI

Kaivosalan toimialaraportista [1] tilastotietoa vuodelta 2014 Suomen mineraalirikasteen tuotantomääristä vuosilta 2007–2013 on esitelty taulukossa II ja kuvassa 2. Taulukosta ja kuvasta nähdään, että rikki- ja kromirikasteita on tuotettu eniten. Koboltti on suhteellisen uusi mineraalirikaste. Sitä on tuotettu vasta vuodesta 2012 lähtien.

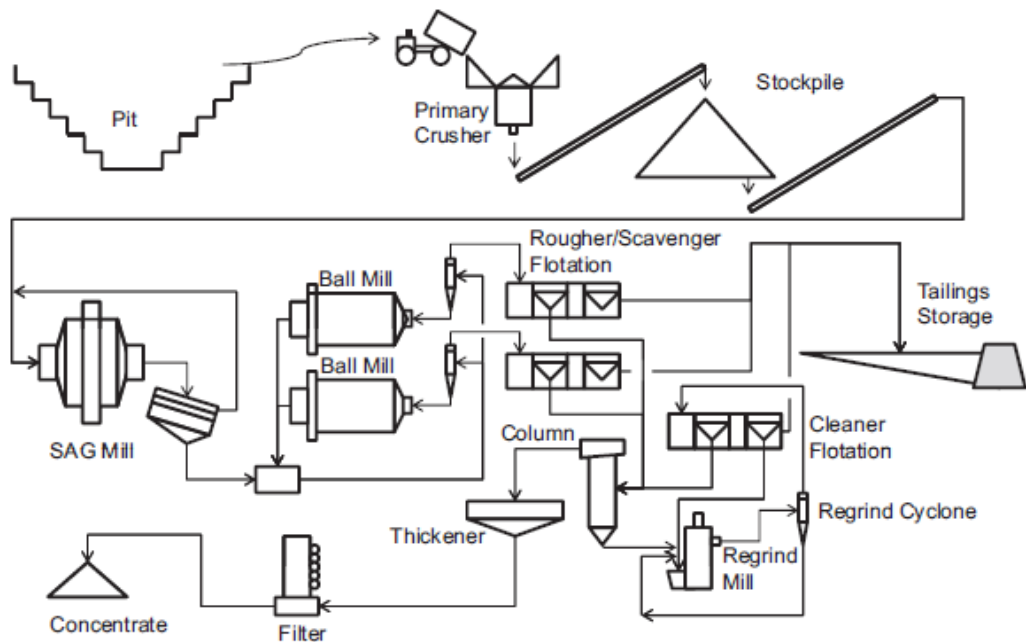
Taulukko II		Mineraalirikasteiden tuotanto Suomessa, vuosittainen tuotantomäärä [1].					
Rikaste	2007, tonnia	2008, tonnia	2009, tonnia	2010, tonnia	2011, tonnia	2012, tonnia	2013, tonnia
Rikki	485 780	564 204	383 901	584 085	804 884	909 299	994 155
Kromi	556 101	613 544	246 818	598 000	692 527	425 217	981 452
Sinkki	71 812	52 518	56 197	95 305	87 974	89 026	72 910
Nikkeli	44 824	43 038	11 413	43 151	91 196	99 089	137 911
Kupari	46 325	46 096	50 876	50 709	48 668	104 393	145 758
Koboltti						117 819	76 210
Yhteensä	1 204 842	1 319 400	749 205	1 371 250	1 725 249	1 744 843	2 408 696



Kuva 2 Suomessa toimivien kaivosten mineraalirikastetuotanto vuosina 2007 – 2013 [1].

Gunson *et al.* [4] on esittänyt havainnekuvan tyypillisestä rikastusprosessista (kuva 3). Malmin rikastusprosessi alkaa avolouhokselta. Sieltä malmi kuljetetaan murskaukseen, jossa karkean materiaalin partikkelikoko saadaan jauhatukseen sopivaksi. Jauhatusosiota kuvassa 3 edustavat SAG-mylly, kaksi kuulamyllyä ja myöhemmin prosessissa esiintyvä uudelleenjauhatusyksikkö. Myllyjen jälkeen prosessissa on luokittimina toimivia sykloneita, jotka palauttavat liian karkean malmin takaisin jauhatukseen.

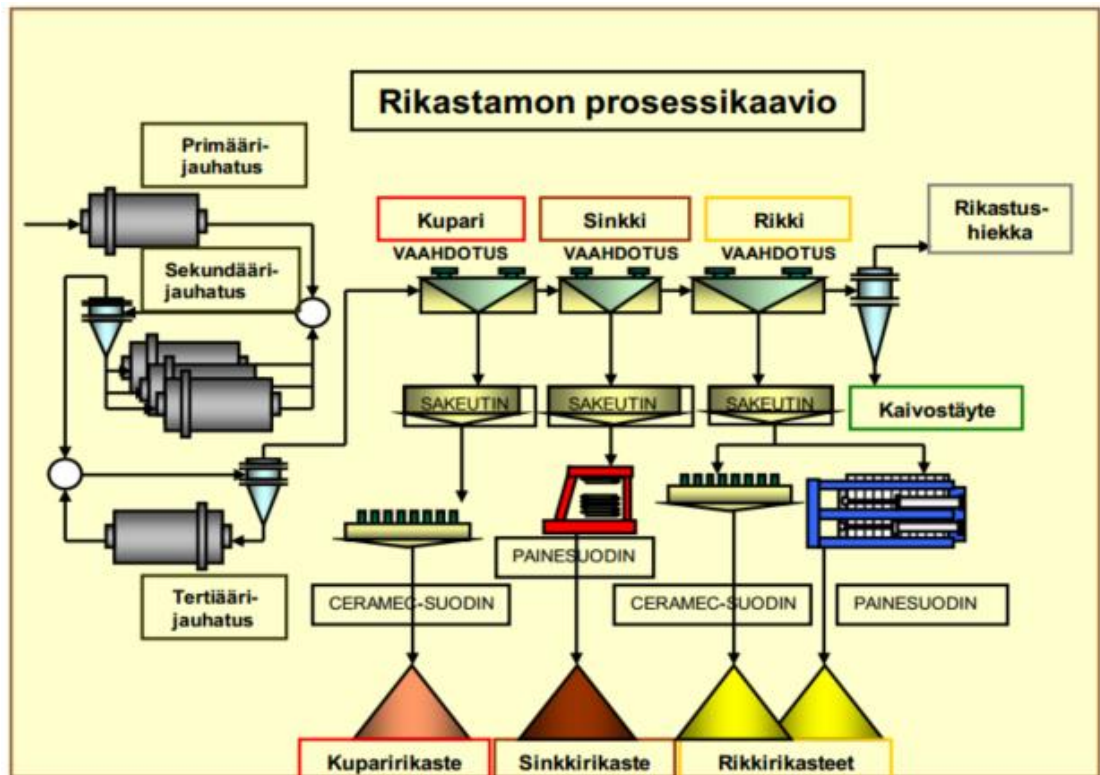
Jauhatuksen jälkeen prosessikaaviossa on esitetty flotaatio, jossa malmin partikkelien laskeutumisominaisuuksien perusteella erotellaan prosessissa eteenpäin jatkava osuus ja prosessissa syntyvä jäte omilleen. Rikastusprosessissa syntyvää jätettä kutsutaan rikastushiekäksi. Osa rikashiekkavirrasta on mahdollista ohjata vielä uudelleenjauhatusyksikön lävitse, jolloin sopiva osuus jatkaisi matkaa rikasteeksi. Flotaation jälkeen massavirta ohjataan sakeuttimen kautta suodatukseen. Suodatuksesta saadaan lopullinen tuote eli mineraalirikaste.



Kuva 3 Havainnekuva rikastusprosessin vaiheista. [4].

Rikastusprosessit ovat kuitenkin yksilöllisiä ja ne on aina suunniteltava kyseiselle kaivospaikalle ja siellä käsiteltäville mineraaleille. Yksilöllisestä mineraalin rikastusprosessista on esimerkkinä Pyhäsalmen rikastuskaavio, joka on esitetty kuvassa 4 [5]. Jauhatusosuus on jaettu tässä rikastusprosessissa kolmeen eri osaan: primääri-, sekundääri ja tertiäärijauhaukseen. Eri jauhatusosioiden välissä on luokittimet (esimerkiksi sykloni tai seula), jotka palauttavat liian karkean jauhatustuotteen takaisin myllyyn ja päästävät sopivan kokoiset rakeet jatkamaan.

Tertiäärijauhauksen jälkeen prosessissa on kolme vaahdotusyksikköä, joiden tarkoituksena on kerätä kukin mineraali erikseen talteen. Vaahdotuksen jälkeen rikasteiden kulku jatkuu sakeuttimille ja sitten erilaiset suodattimet keräävät kupari-, sinkki-, ja rikkirikasteen erilleen. Viimeisen vaahdotusprosessin jälkeen luokitin erottaa rikastushiekan ja kaivostäyteen erilleen. Kaivostäyte käsitellään vielä painesuodatuksessa, jotta siinä mahdollisesti rikkirikastetta saadaan talteen.



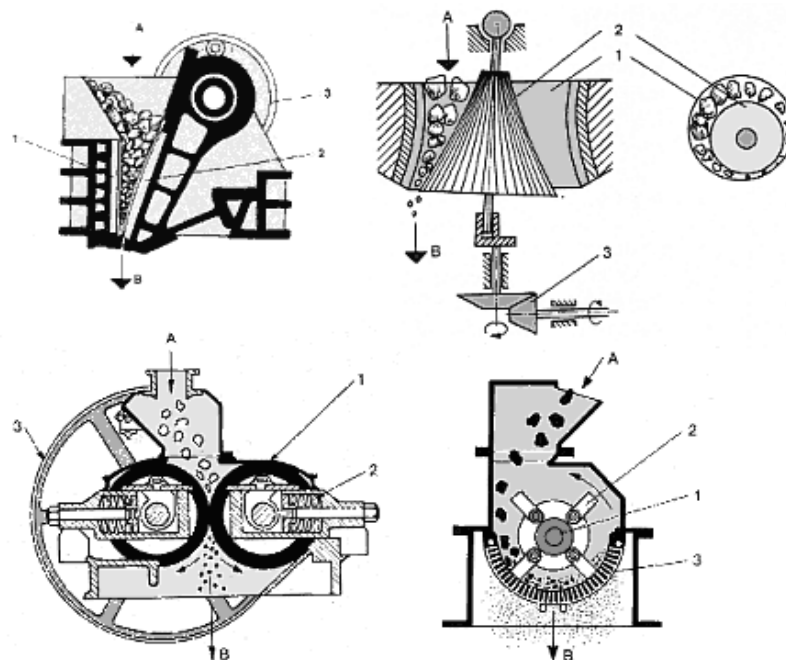
Kuva 4 Pyhäsalmen rikastamon prosessikaavio [1].

3 RIKASTUSPROSESSIN HIENONNUS

Malmin rikastusprosessi alkaa hienonnuksesta. Ensimmäisenä hienonnuksenvaiheena voidaan pitää malmilohkareen irrottamista peruskalliosta dynamiitin avulla. Hienontaminen jaetaan murskaukseen ja jauhatukseen. Murskauksen tehtävä on pienentää malmi sopivan kokoiseksi jauhatusta varten ja jauhatuksen tehtävä on vapauttaa metallimineraalit ja sivukivi toisistaan [6].

3.1 Murskaus

Murskauksen päätarkoitus on pienentää malmi sopivan kokoiseksi jauhatusta varten. Murskaus jaetaan Wills [6] toimesta primaari- ja sekundaarimurskaukseen, missä primaarivaiheen malmin syöttökoko on jopa 1,5 m ja tuotekoko 10 – 20 cm. Sekundaarivaiheen jälkeen malmi on halkaisijaltaan 0,5 – 2 cm. Primaarivaihe toteutetaan leukamurskaimella tai kartiomurskaimella. Ne ovat kuvassa 5 ylärivillä. Primaarivaiheen murskaimilla murskaus tapahtuu aina avoimessa hienonnuksipiirissä. Myöhemmissä vaiheissa murskaus voidaan suorittaa myös suljetussa hienonnuksipiirissä.



Kuva 5 Murskaimet ylhäältä oikealta alkaen: leukamurskain, kartiomurskain, valssimurskain ja iskumurskain [7].

Sekundaarivaiheen murskaimet ovat kevyempirakenteisia primaarivaiheen murskaimiin verrattuna. Hienonnettavasta massasta on jo poistettu primaarivaiheen yhteydessä mahdollisesti harmia aiheuttavat sivuosat, kuten puu- tai saviaines. Sekundaarimurskaimista on esitelty valssimurskain ja iskumurskain kuvassa 5 alarivillä. Tehdessä päätöstä siitä minkä tyyppistä karkean murskauksen laitetta kannattaa hienonnutpiiriin hankkia, tärkein tieto on käsiteltävän malmin suurin mahdollinen koko ja mikä on prosessin vaatima murskeen tuotantokapasiteetti [6].

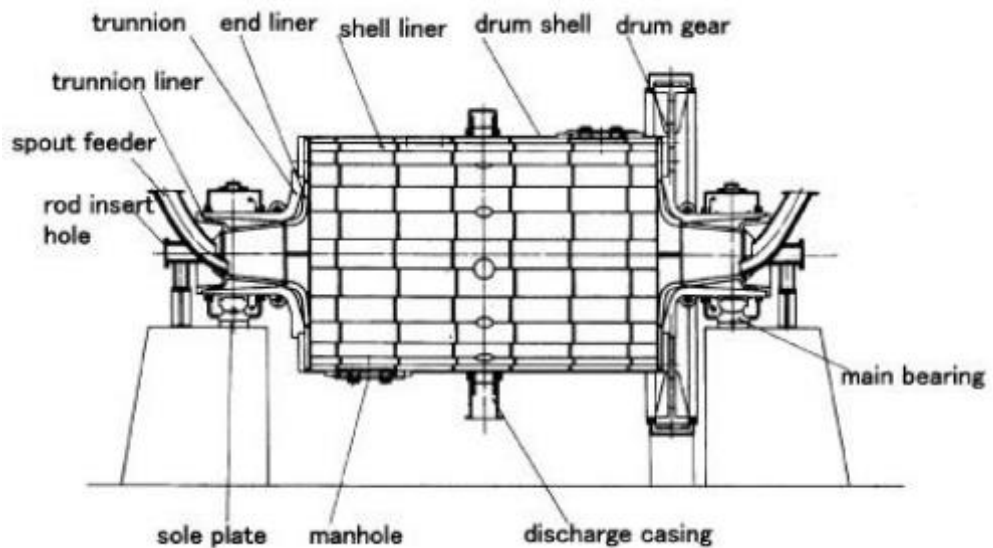
3.2 Jauhatus

Irtaimia jauhinkappaleita sisältävät myllyt jaetaan kahteen luokkaan: rumpumaiset myllyt ja sekoitusmyllyt. Rumpumainen mylly soveltuu karkeajauhatukseen ja sekoitusmylly on soveltuva hieno- ja ultrahienojauhatukseen. Wills [6] mukaan mineraaliteollisuudessa rumpumaisia myllyjä käytetään karkeajauhatukseen. Karkea jauhatuksessa malmin syöttökoko rumpumaisiin myllyihin on 5 – 250 mm ja tuotekooksi saadaan 40 – 300 µm. Jauhatuksessa käytetään apuna jauhinkappaleita, jotka ovat vapaassa liikkeessä myllyn sisällä. Ne voivat olla terästankoja, kuulia tai jauhettavan materiaalin isot partikkelit voivat toimia jauhinkappaleina. Jauhatuksen aikana partikkelit jauhautuvat pienemmiksi pääosin iskun ja hiertämisen voimasta. Tuotteen partikkelikokoa säädellään jauhinkappaleiden, sekoitineliimen pyörimisnopeuden eli sekoitusnopeuden, syötettävän raaka-aineen koon sekä jauhatuspiirin tyyppin (avoin/suljettu) avulla [6]. Seuraavassa kappaleessa esitellään lyhyesti kolme erilaista rumpumaista myllyä: tankomylly, kuulamyly, AG- ja SAG-myllyt. Sekoitusmyllyistä helmimylly esitellään tarkemmin omassa kappaleessaan.

3.2.1 Tankomylly

Tankomylly soveltuu hienomurskaukseen tai karkeajauhatukseen. Syötettävä materiaali voi olla kooltaan jopa 50 mm ja tuote pienenee jopa 300 µm kokoiseksi. Tankomyllyä käytetään enemmän vasta hienojauhatusvaiheessa, koska kostea syöttömateriaali saattaa aiheuttaa kuristumista jauhatuksen aikana. Tankomyllyn rakenne on havainnollistettu kuvassa 6. Tankomyllyjen alaluokkia on luotu sen perusteella, missä on jauhettun tuotteen poistoaukko. Vaihtoehtoina ovat poisto kehän

keskeltä, lopusta tai ylivuotona. Jauhatusuotteen poistaminen laitteen kehän keskiosasta tuottaa karkeampaa tuotetta, jossa hienon materiaalin osuus on vähäinen. Syöttö tapahtuu myllyn kummastakin päädystä. Kehän lopussa oleva poisto soveltuu ainoastaan märkäjauhatukseen ja siinä syöttö tapahtuu vain toisesta päädystä, toisen päädyn ollessa umpinainen. Kaivosteollisuudessa eniten käytetty tankomyllytyyppi on ylivuotopoisto. Siinä ei ole poistoaukkoa kehällä vaan avonaiset päädyt. Toisesta päädystä syötetään jauhettava materiaali rumpuun ja toisesta saadaan jauhautunut tuote ylivuotona. Tämän tyyppinen mylly toimii sarjassa kuulamyllyn kanssa, ollen välivaiheena murskauksesta tulleelle materiaalille. Märkäjauhatuksessa tankomyllylle syötettävä liete on kiintoainepitoisuudeltaan 65 – 85 p- %. Tankomylly käytetään lähes aina avoimessa jauhatuspiirissä [6].



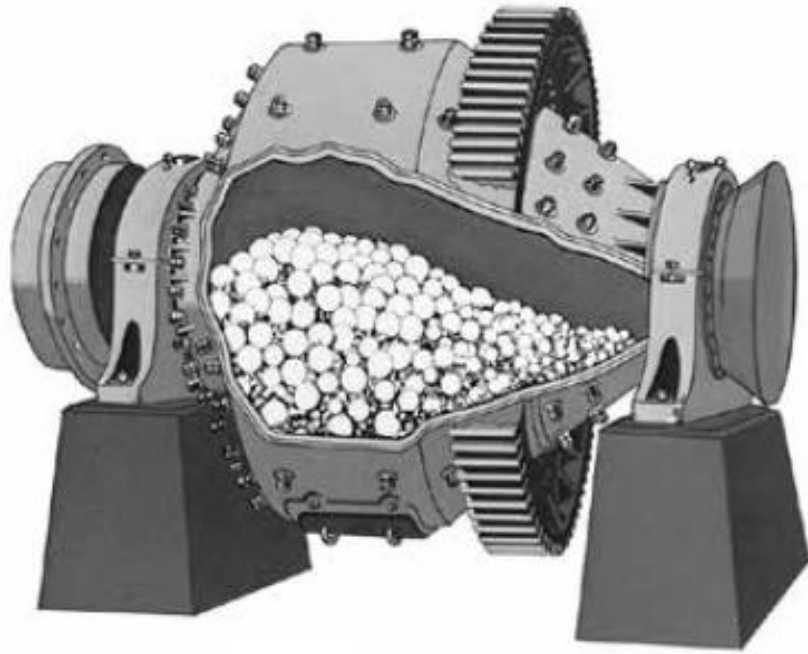
Kuva 6 Havainnekuva tankomyllystä, jossa jauhatusuotteen poistoaukko kehän keskellä [8].

3.2.2 Kuulamyly

Kuulamyly sopii jauhatusprosessin viimeiseen vaiheeseen, kuten se on esimerkiksi kuvan 3 esittämässä rikastusprosessissa. Kuulamylyn rakenne on esitelty kuvassa 7. Kuulamyly sisältää teräksisiä kuulia jauhinkappaleina. Kuulilla on suurempi jauhatuspinta-ala kuin terästankoilla, joten jauhettu tuotekin on hienompaa partikkelikooltaan. Halkaisijasuhde määrittelee mitä termiä kuulamylymaisista laitteista käytetään. Kuulamyly nimitystä käytetään silloin, kun myllyn pituuden suhde sen halkaisijaan on 1 – 1,5 tai vähemmän. Kun suhde on 3 – 5, käytetään nimitystä putkimyly [6].

Pitkä mylly voidaan myös jakaa osiin eli kamareihin, joissa materiaali etenee erikokoisten jauhinkappaleiden käsittelyssä niin, että kuulakoko pienenee materiaalin siirtyessä kamarista toiseen. Samassa myllyssä voi olla tankoja, kuulia tai pieniä kiviä, jolloin ei tarvita erillisiä mylyä vaadittuun hienousasteeseen pääsemiseksi [6].

Myös kuulamylyjä voidaan luokitella jauhetun materiaalin poistotavan mukaan. Ne ovat poistoputken ylivuoto sekä matalapoisto. Jälkimmäisessä myllyn sisälle asennetaan säleikkö, joka estää liian karkean materiaalin poistumista myllystä. Eroina näissä kahdessa poistotavassa on se että, matalapoistomylyyn voidaan syöttää karkeampaa jauhettavaa materiaali kuin ylivuotopoistomylyyn. Kuulamylyjä, joissa on poistoputken ylivuoto, suositaan enemmän, koska niiden käyttäminen on yksinkertaista ja ne soveltuvat sekä hienojauhatukseen että uudelleenjauhatukseen. Materiaalin jauhautumiseen vaikuttavat monet asiat kuulamylyssä. Syötettävän lietteen tulisi olla mahdollisimman sakeaa, jotta se jämähtää kuulien pintaan. Kiintoainepitoisuus tuli olla malmilaadusta riippuen 65 – 80 p- %. Kuulien jauhatuspinta-ala on merkittävä vaikutus jauhautumisen tehokkuuteen [6].

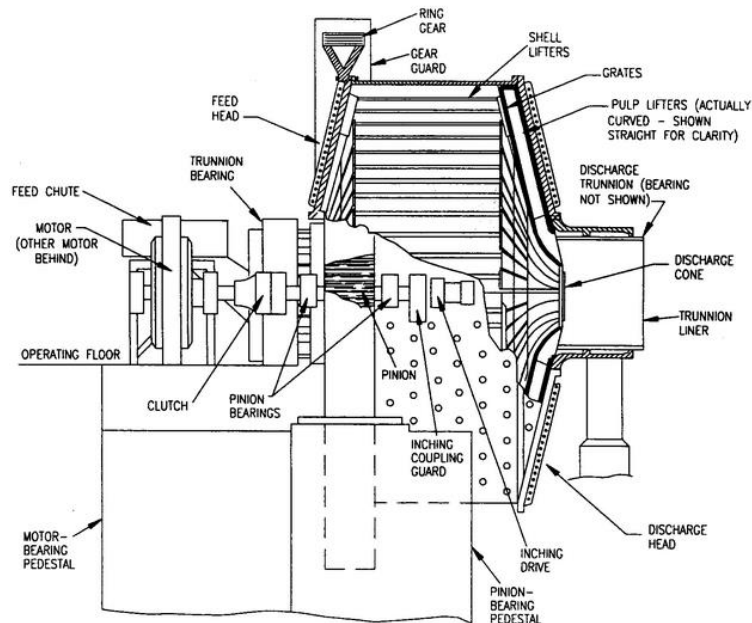


Kuva 7 Havainnekuva kuulamyllystä [9].

3.2.3 AG- ja SAG-myllyt

Autogeeni- ja puoliautogeenimyllyjen (AG ja SAG) rakenne on esitetty kuvassa 8. AG-mylly poikkeaa muista rumpumaisesta myllyistä ja SAG-myllystä siten, että se ei sisällä lainkaan metallisia liikkuvia jauhinkappaleita myllyn sisällä vaan jauhettavan malmin tai materiaalin isommat kappaleet toimivat jauhinkappaleina. Syötettävän malmin koko on siten tärkeää olla sopivan kokoista tätä tarkoitusta varten. Etuina autogeenimyllyissä on niiden myllyn kyky käsitellä erityyppisiä malmilaatuja eikä malmin tarttuvuus tai savimaisuus ole ongelma. Kumpaakin myllyä voidaan käyttää sekä märkä- että kuivajauhatuskseen. Niihin syötettävän malmin koko voi olla 200 mm ja tuotekooksi saadaan 0,1 mm [6].

AG/SAG-myllyihin syötettävän malmin koko(jakauma) joudutaan miettimään tarkemmin kuin muissa rumpumaisissa myllyissä. Niissä rummun sisällön massasta valtaosa on malmia eikä jauhainmateriaalia ja siten pienetkin muutokset syötössä muuttavat tuotettakin. Jauhatustulos on niissä myös enemmän ennalta-arvaamatonta kuin kuula- ja tankomyllyissä. Autogeenijauhatus vaatiikin useita koejauhatusia aina uudelle materiaalille, jotta mylly saadaan säädetty tuottamaan haluttua partikkelikokojakaumaa [6].



Kuva 8

Puoliautogeeninen mylly [10].

4 RIKASTUSHIEKKA

Bussiére [11] on määritellyt rikastushiekan siten, että se koostuu maaperän kiviaineksesta josta on jo otettu talteen arvokkaat mineraalit ja metallit. Rikastushiekka koostuu siis suuresta määrästä vettä, jauhetusta kivistä ja hiekasta. Kaivoksen tuottama jäte on perinteisesti varastoitu suuriin varastoaltaisiin lietteenä 25...45 %:n [11] kiintoainepitoisuudessa. Sieltä lietteen sisältämä vesi joko haihtuu tai se imeytyy maaperään, lietteen samalla tiivistyen. Rikastushiekan loppukäsittelyyn liittyvät ongelmat ovat pääosin sen fyysisen stabiilisuuden varmistaminen loppusijoituspaikassa sekä rikastuksen yhteydessä tuotetun kiintoaine- ja nestejätteen geokemiallinen pysyvyys ilman että ne aiheuttavat esimerkiksi pinta- ja pohjavesien saastumista. Rikastushiekka voi myös sisältää erilaisia kemikaaleja, mikä täytyy ottaa huomioon rikastushiekan loppukäsittelyssä [12,13].

4.1 Tiivistetyt kaivosjätteet

Tiivistettyihin kaivosjätteisiin voidaan lukea Bussiéren [11] mukaan sakeutetut, pastasakeutetut sekä suodatetut kaivosjätteet. Kaikkien kolmen käsittelytavan tavoitteena on parantaa jätteen fyysistä stabiilisuutta. Sakeuttamisella ja pastasakeuttamalla voidaan myös mahdollisesti parantaa jätteen kemiallista stabiilisuutta. Hyötynä näissä menetelmissä on se, että jätteelle ei tarvitse rakentaa erillistä loppusijoitusallasta, mikä vähennetään jätevedenkäsittelystä aiheutuvia ongelmia. Ilman altaita ei ole tarvetta rakentaa patoa suojaamaan ympäristöä ja säästyään esimerkiksi patovuodoilta.

Palkovitsin [14] mukaan riski veden kertymisestä perinteisen patoaltaan pinnalle vähenee tai se voidaan välttää kokonaan. Loppusijoituspaikan jätteen tasalaatuisuutta puoltaa se, että levityksen aikana tapahtuu hyvin vähän segregoitumista verrattuna nestemäisempään jätteeseen. Palkovitsin [14] mukaan, että rikastuksen jätteenkäsittely tiivistämällä ei onnistu jokaisessa kaivoksessa. Etuina kuitenkin tiivistetyssä jätevirrassa on tiivis liete/kuiva-ainekakku. Kaivosjäte on tiivistettynä vähemmän alttiimpi muutoksille ulkoilmassa tuulta ja sadetta vastaan [11]. Rikastusjätteen käsittely tiivistämällä on hyvä vaihtoehtoja sen oletetun pienemmän

ympäristövaikutuksen vuoksi. Suurimpia etuja ovat lopullisen jätteen stabiilisuus sekä kokonaisprosessin veden tarpeen väheneminen, kun jätteestä saatu vesi voitaisiin kierrättää takaisin rikastusprosessiin [12].

Sakeuttamisen tavoitteena on tuottaa tasalaatuista kaivosjätettä, joka pystyy kantamaan oman painonsa. Prosessissa lietteen kiintoainepitoisuus nostetaan 50 – 70 %, jolloin liete muistuttaa ominaisuuksiltaan korkeaviskoosista nestettä. Suuresta kiintoainepitoisuudesta huolimatta kaivosjäte tulisi edelleen olla pumpattavissa [11].

Pastasakeutettu kaivosjäte on korkeaviskoosinen seos jätteestä, vedestä ja joskus myös sidosaineesta. Pastasakeutetun kaivosjätteen kiintoainepitoisuus nostetaan korkeammalle kuin sakeuttamisessa. Kaivosjätteen kiintoainepitoisuus halutaan välille 70–85 %. Kiintoainepitoisuuden nostaminen tapahtuu syöttämällä jäte ensin sakeuttimeen, jossa sen kiintoainepitoisuus nousee 65 %. Tämän jälkeen kiinteitynyt jäte pumpataan kakkusuodattimelle ja siitä edelleen osuudelle, jossa kiintoainekakusta ja puhtaasta tai kierrätetystä vedestä tehdään pasta. Sidosaineen käytön mahdollisuus tekee pastasakeutustekniikasta mielenkiintoisen, koska sen avulla mahdolliset kontaminaatiovaaran aiheuttavat komponentit voidaan sitoa massaa sidosaineen avulla [11].

Suodatettu kaivosjäte on koostumukseltaan kiintoainekakku, jota pystytään siirtämään maansiirtämislaitteilla. Sen vesipitoisuus on matala, 10–20 %. Tällainen koostumus saadaan aikaan, kun liete sakeutetaan ensin ja johdetaan sitten paine- tai vakuumisuodatukseen. Prosessissa käytetään joko rumpu-, levypakka-, horisontaalista tai vertikaalista nauhasuodatinta. Merkittävin haitta suodatustekniikan käyttämisessä kaivosjätteenkäsittelyssä perinteiseen käsittelytapaan verrattuna on suuret kustannukset. Toisaalta suodatusmenetelmä on potentiaalinen vaihtoehto alueille, joissa on vedestä pulaa tai sen käyttö on tarkoin säädeltyä. Sakeuttamiseen ja pastasakeuttamiseen verrattuna suodattaminen tuottaa kaivosjätettä, joka on lujempaa ja tiiviimpää. Tällä tavoin käsitellyn kaivosjätteen tarvitsema varastointitila on pienin, koska se voidaan varastoida kasoihin. Lopullinen jäte pitää myös hyvin muotonsa eli ei ole altis painautumiselle tai nesteytymiselle. Bussiére [11] mainitsee kahden kaivoksen, chileläinen La Copla mine sekä kanadalainen The Raglan mine, joissa

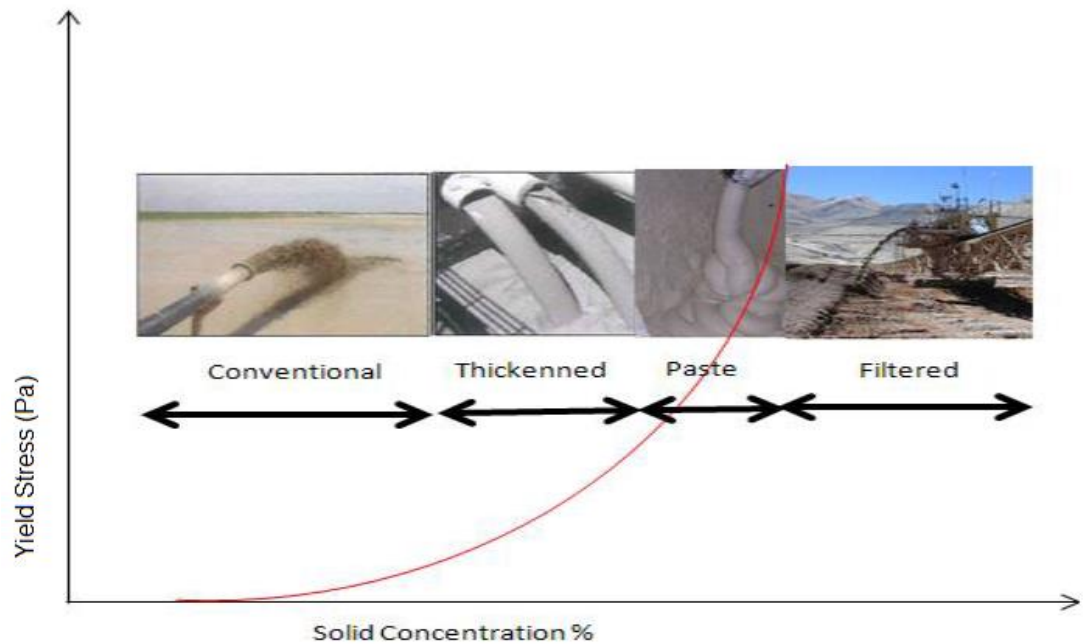
käytetään suodatustekniikkaa kaivosjätteen käsittelyssä. La Colpa mine valitsi suodatustekniikan, koska siellä haluttiin tehostaa kullan talteenottoa rikastushiekasta sekä tiedostettiin alueen tarkka vedensääntely. Alueella esiintyy myös maanjäristyksiä ja niiden varalta haluttiin menetelmä, joka tuottaa fyysisesti stabiilia rikastusjätettä.

4.2 Jauhatusen vaikutus kaivosjätteen käsittelyyn

Jauhatus ja sen aiheuttamat muutokset jätteen partikkelikokojakaumassa vaikuttavat siihen, miten kaivosjätettä loppuvaiheessa käsitellään, kuljetetaan ja varastoidaan. Tärkeintä mineraaliteollisuudessa on optimoida arvokkaan mineraalin talteenotto kannattavasti. Tähän tarvitaan jauhatusa, jotta kiviainekset saadaan erilleen. Jauhatus on samalla suuri kustannus erilaisine laitteineen ja suurine käyttökustannuksineen. Kun jauhatus optimoidaan maksimaalisen mineraalin talteenoton mukaan, voi se tuoda mukanaan lisäkustannuksia jätteen loppukäsittelyvaiheessa. Rikastushiekan hienompi jauhatusaste vaikuttaa Palkovitsin [15] mukaan sakeutettuun sekä suodatettuun kaivosjätteeseen muun muassa pienentämällä partikkelin laskeutumismisnopeutta ja pidentäen viipymäaika. Hienomman materiaalin käsittely nostaa siis vedenpoistokustannuksia sekä vähentää kaivosjätteestä poistetun nesteen määrää. Tehokas jauhatus malmin rikastusvaiheessa vähentää karkean osuuden määrää ja aiheuttaa siten pengerrysmateriaalin puutetta [16].

4.3 Rikastushiekan kiintoainepitoisuuden vaikutus loppusijoitukseen

Rikastusjätteen loppukäsittelymenetelmän valintaan vaikuttavat monet tekijät. Yksi merkittävimmistä on jätteelle varatun alueen koko, varastointialueen maanpinnan muoto sekä rikastuslietteen reologiset muutokset vaihtelevissa konsentraatioissa. Rikastushiekkalietteen kiintoainepitoisuuden vaikutusta jätteenkäsittelyyn on esitetty kuvassa 9 [16]. Kuvasta nähdään että rikastuslietteen kiintoainepitoisuus ohjaa loppukäsittelymenetelmän valintaa, koska jätelietteen ominaisuudet muuttuvat kiintoainepitoisuuden kasvaessa. Tämä nähdään kuvan 9 myötölujuuden käyrästä. Alhaisilla kiintoainepitoisuuksilla lietteen pumppaus lietealtaisiin onnistuu. Sakeutettuja lietteitäkin voidaan vielä siirtää pumppauksen voimin. Lietteiden kiintoainepitoisuuden kasvaessa myös lietteiden myötölujuus reagoi herkemmin pieneenkin muutokseen lietteiden koostumuksessa [16].



Kuva 9

Rikastushiekan käsittelymenetelmien (perinteinen, sakeutus, pastasakeutus ja suodatus) vertailu kiintoainepitoisuuden avulla [16].

5 HELMIMYLLY

Sekoitusmyllyjä, kuten helmimyllyjä, käytetään muun muassa lääke- ja maalliteollisuudessa, jossa on tarvetta hienojauhatukselle. Helmimyllyjauhauksen tutkimuksessa on kartoitettu muun muassa seuraavia jauhatusprosessiin liittyviä seikkoja: jauhatuskappaleiden liikkuminen myllyssä, aktiivinen jauhatustilavuus, jauhinkappaleiden kuluminen, energian siirtyminen, skaalausongelmat sekä virtarajoitukset [17].

Nousevana trendinä on ollut jo useiden vuosien ajan sekoitusmyllyjen käyttö, kun halutaan jauhatuspiiriin mukaan uudelleenjauhatusta tai tuotteen koko menee hienojauhatuksen puolella. Tutkimuksen puolella kokeissa on siirretty käyttämään sekoitusmyllyä hoitamaan normaalisti kuulamyllylle sopivaa kohtaa prosessissa. Jauhinkappaleiden valinnassa suurin painoarvo on sen materiaalin kustannuksella sekä sen jauhamistehokkuudella [18].

Tutkimuksien [19] tuloksissa on ehdotettu, että sekoitusmyllyillä hienojauhatuksessa tuotteen partikkelikojakauman leviäminen vähenee, kun tuote saadaan jauhettua hienommaksi. Jakauman leveys kapenee, kun kasvatetaan jauhautumiseen vaikuttavia energioita. Tuotteen partikkelikojakauman leveyden määrää pääosin jauhettavan materiaalin ominaisuudet siten, että kovempi jauhettava materiaali, esimerkiksi kvartsi, tuottaa kapeamman partikkelikojakauman kuin pehmeämmät materiaalit (esimerkiksi kalsiitti).

5.1 Jauhinmateriaali ja koko

Sekoitusmyllyihin on tarjolla useita erilaisia jauhinkappaleita ja päätökseen vaikuttavat esimerkiksi kappaleiden koko, materiaali ja materiaalin ominainen kovuus. Yleisimmin jauhinkappaleita käytetään muun muassa karkeaa hiekkaa tai paloiteltua malmia kustannussyistä. Karkean hiekan ongelmana on kuitenkin se, että se hajoaa nopeasti eikä ole tasalaatuista, mikä johtaa jauhatusväliaineen suureen kulutukseen jauhatuksen aikana sekä myllyn sisäpinnan kulumiseen. [17]. Pienillä pyörimisnopeuksilla karkeata materiaalia jauhettaessa Celep *et al.* [20] huomauttaa, että lasisen tai keraamisen jauhinkappaleiden käyttäminen on tehottomampaa kuin suuren tiheyden omaavaa materiaalia.

Karkealle materiaalille (syöttö D_{80} n. 46 μm ja tuote D_{80} n. 15 μm) tehokkain jauhatus saavutetaan 1,2 – 1,7 mm [18] kokoisella jauhinmateriaalilla. Tätä pienempi koko, 0,6 - 0,85 mm osoittautui tehottomammaksi pienentämään tuotetta lisää. Jos tuotteeksi kooksi halutaan alle 7 μm , pienempi kuulakoko on parempi vaihtoehto. Jauhatuksen lopputuloksen kannalta on merkitystä, onko jauhinkappaleina käytettävä materiaali uutta vai kulunutta. Uusi materiaali on käyttämätöntä ja siten tasaisen pyöreää, kun taas kulunut jauhinmateriaali on epäsäännöllisen muotoista. Jauhettava tuote tulee hienommaksi kuluneemmalla jauhinmateriaalilla, koska epäsäännöllisestä materiaalista kuluu irti materiaalia mikä edelleen on avustaa jauhaantumista. Celep *et al.* [20] mukaan optimaalinen kuulakoon – jauhettavan materiaalin partikkelikokosuhte olisi 20:1. Se kuitenkin vaihtelee välillä 7:1 – 20:1, riippuen mitä mineraalia jauhetaan ja mitä käytetään jauhinmateriaalina.

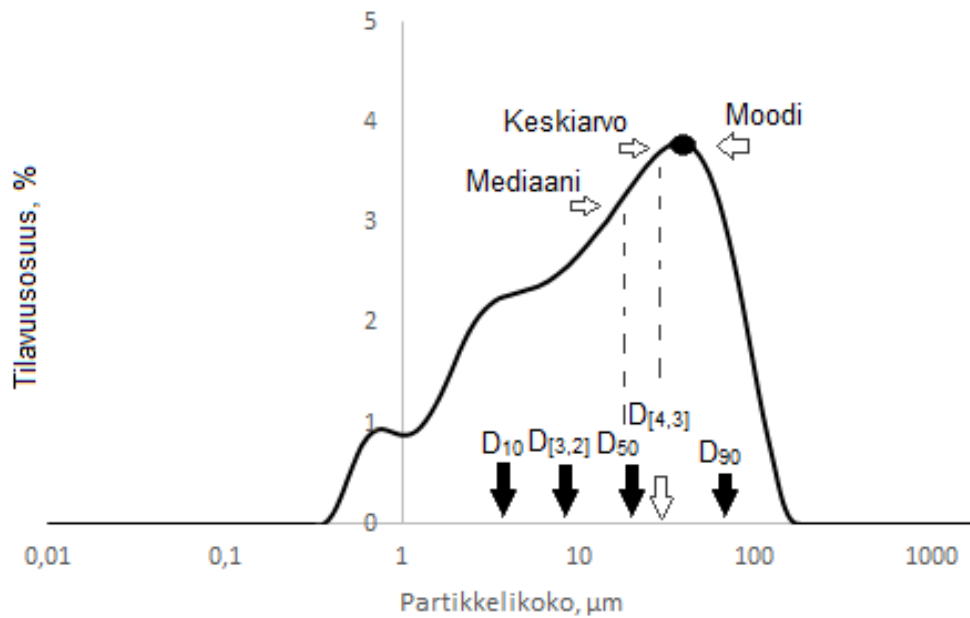
5.2 Sekoitusnopeus

Jancovic [18] sai kokeissaan selville että kahdella eri sekoitusnopeudella (1000 ja 1500 rpm), nopeammalla sekoitusnopeudella on isompi vaikutus jauhautuvuuteen. Karkealla jauhattavalla materiaalilla ja suurella sekoitusnopeudella saadaan muutosta partikkelikokojakauman karkeaan päähän eli isot partikkelit jauhautuivat paremmin. Hienommalla jauhinmateriaalilla sekoitusnopeuden kasvattaminen ei aiheuttanut suurta muutosta sekoitusnopeuksien vaihteluvälillä. Toisin sanoen jo 1000 rpm nopeudella saavutettiin lähes maksimaalinen jauhautuminen. Jancovic kuitenkin esittää, että nostamalla yhä sekoitusnopeutta, saataisiin muutosta aikaan myös hienommalla jauhinmateriaalilla.

Jauhinmateriaalin ja sekoitusnopeuden suhteesta toisiinsa Jancovic [18] selvitti että liian pienellä jauhinmateriaalilla osa siitä jää paikoilleen kun sekoituselimen sekoitusnopeus pidetään vakiona. Tällöin vaihtoehtona on nopeuden kasvattaminen jotta kaikki jauhinmateriaali saadaan liikkeelle. On siis mahdollisesti olemassa optimaalinen sekoitusnopeus-kuulakoko – pari.

6 PARTIKKELEIDEN KARAKTERISOINTI

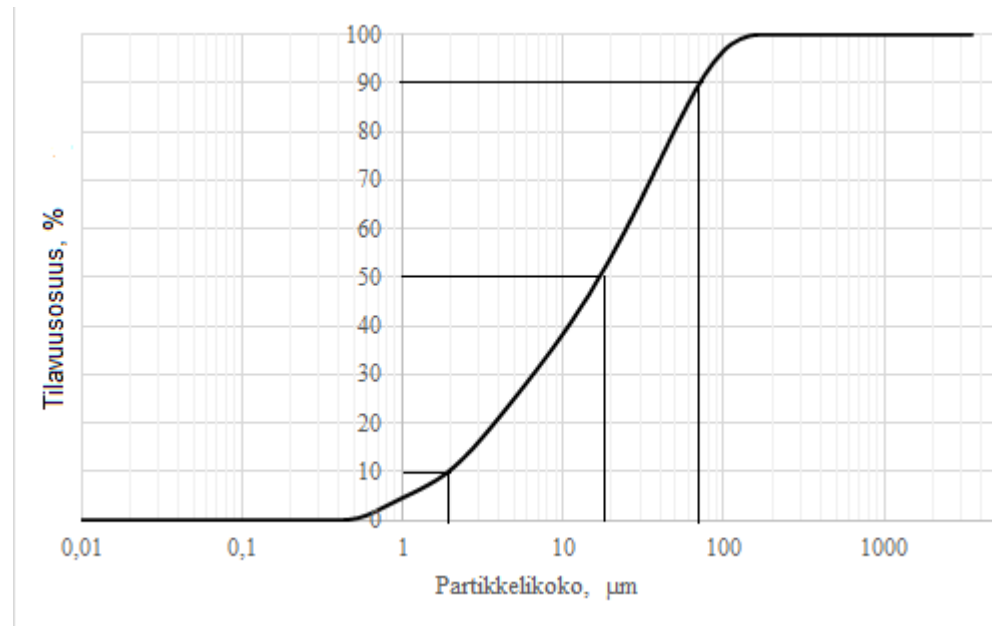
Partikkelikokojakaumia voidaan määrittää laserdiffraktiometrin avulla. Laite määrittää partikkelin koon sironneen valon perusteella ja antaa tulokseksi tilavuuskokojakauman. Instrumentti soveltuu laajalle partikkelivälillä riippuen määrittystavasta. Mie'n tavalle on annettu suuntaa-antava kokoväli 0,1 – 40 μm [21]. Kuvassa 10 on esitetty havainnekuva partikkelikokoanalyysin tuloksista.



Kuva 10

Havainne partikkelikokojakauman keskimääräistä tai muuten kuvaavista partikkelikoista tilavuusosuusjakaumana, mukailten [2].

Partikkelikokojakauman kumulatiivisesta jakaumasta (kuva 11) saadaan määritettyä partikkelikoot D_{10} , D_{50} ja D_{90} . Tilavuusjakaumassa D_{10} , D_{50} ja D_{90} kuvaavat partikkelien halkaisijoita jotka jakavat tilavuusjakauman näytteen kokonaistilavuuden 10 %, 50 % ja 90 % [2].



Kuva 11 Tilavuusosuusjakauman kumulatiivinen partikkelikokojakauma ja D_{10} , D_{50} ja D_{90} partikkelikoot.

6.1 Laskennalliset partikkelikoot

Sauterin keskiarvohalkaisija, $D_{[3,2]}$ kuvaa partikkelikokojakauman keskimääräisen pinta-alan mukaisen halkaisijan. Sitä varten mahdollinen tilavuusosuusjakauma tulee muuttaa pinta-alajakaumaksi. Se voidaan laskea yhtälöllä [23, 22].

$$D_{[3,2]} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3 v_i}{\sum_{i=1}^n D_i^2 v_i} \quad (6.1)$$

jossa D on partikkelin halkaisija (m) ja v_i on partikkelin osuus kussakin kokoluokassa.

Tilavuuden keskiarvohalkaisija, $D_{[4,3]}$, saadaan partikkelien tilavuusosuusjakaumasta seuraavasti:

$$D_{[4,3]} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^4 v_i}{\sum_{i=1}^n D_i^3 v_i} \quad (6.2)$$

Ominaispinta-alan pystyy myös määrittämään laserdiffraktiometrin avulla, kun tiedossa on mitattavan materiaalin kiintoaineen tiheys, ρ_s . Toinen tapa on laskea partikkelien massasta riippuvainen ominaispinta-ala, S_w , [2] käyttäen Sauterin keskiarvoahkaisuajaa $D_{[3,2]}$ ja kiintoaineen tiheyttä ρ_s . Yksiköksi ominaispinta-alalle saadaan $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$

$$S_w = \frac{6}{D_{[3,2]} \cdot \rho_s} \quad (6.3)$$

6.2 Partikkelikokojakauman leveys

Partikkelikokojakauman leveys [19] [22] voidaan määrittää seuraavilla yhtälöillä:

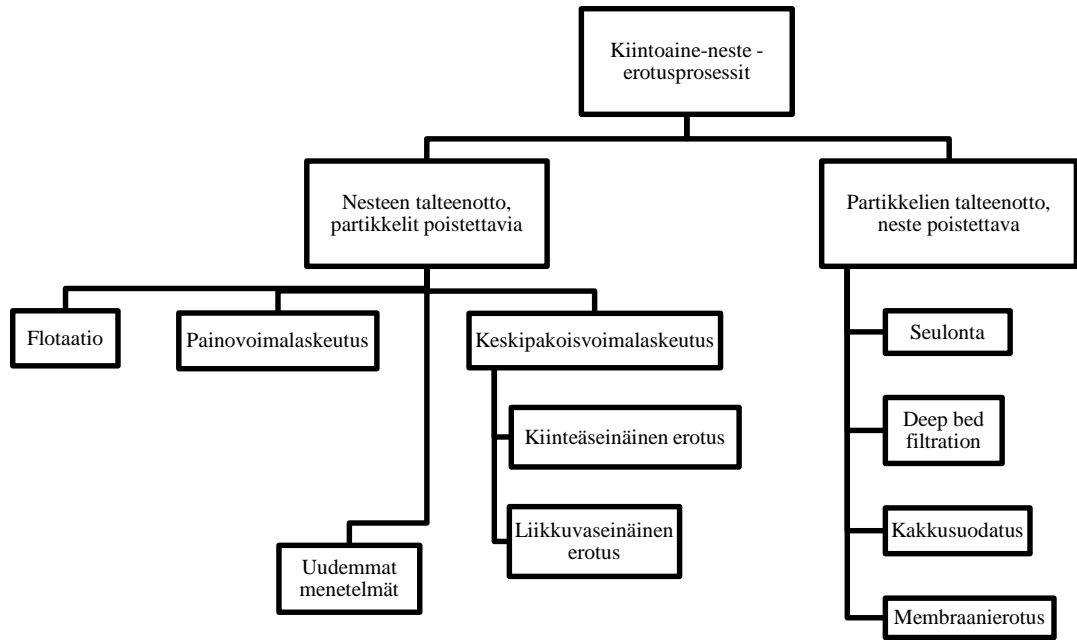
$$\frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (6.4)$$

$$D_{[4,3]} - D_{[3,2]} \quad (6.5)$$

joista yhtälöön (6.4) viitataan jatkossa suhdemenetelmänä ja yhtälöön (6.5) erotusmenetelmänä.

7 SUODATUS

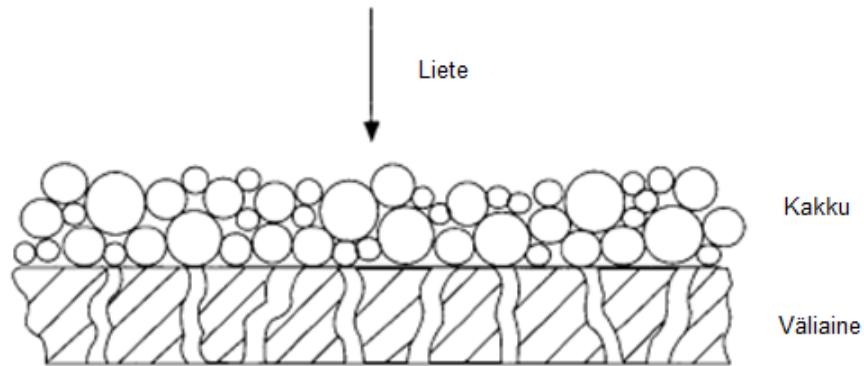
Suodatus kuuluu kiintoaine-neste – erotusprosessien alaryhmään jossa lietteestä otetaan talteen kiintoaine ja neste poistetaan. Erilaisia kiintoaine-neste – erotusprosesseja on esitelty kuvassa 12.



Kuva 12 Kiintoaine-neste – erotusprosessit ja niiden kategorisointi, mukaillen [21].

Suodatusprosessissa lietteen kiintoaine ja neste erotetaan toisistaan, kun neste läpäisee huokoisen suodatusväliaineen. Jotta ilmiö saadaan aikaan, tarvitaan paine-ero (tai painehäviö) suodatinväliaineen eri puolille. Paine-ero kuvataan termillä Δp ja se voidaan tehdä monella eri tavalla kuten esimerkiksi painovoimalla, vakuumilla tai paineistamisella [21].

Kakkusuodatuksessa liete laskeutuu suodattimessa suodatusväliaineen päälle muodostaen siihen lietteen sisältämästä kiintoaineesta kakun silloin, kun kiintoaineen partikkelit ovat suurempia kuin suodatusväliaineen huokoset. Samalla lietteen neste pyrkii paine-eron luoneen kaasun työntämänä läpäisemään suodatusväliaineen. Nesteestä käytetään suodatusväliaineen läpäistyään nimitystä suodos. Kakkusuodatus on yleisimmin käytetty suodatusmuoto mineraaliteollisuudessa [21]. Kakkusuodatuksen peruseriaate on esitetty kuvassa 13.

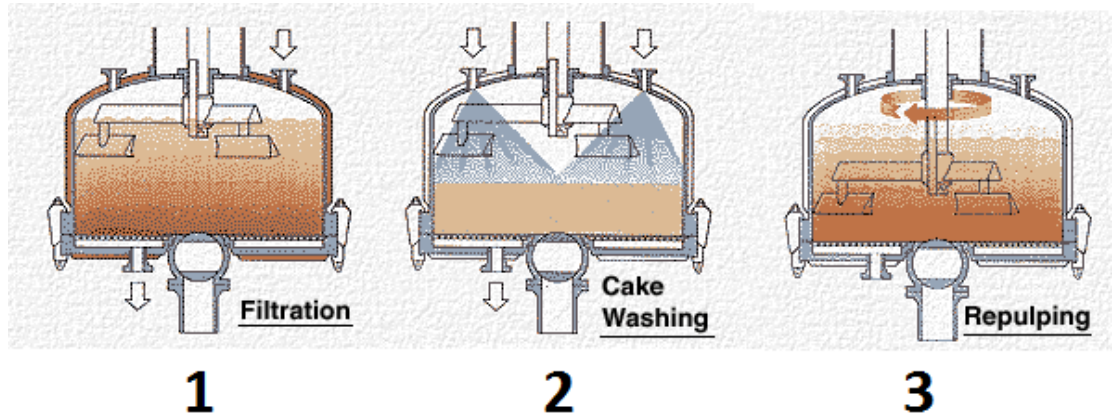


Kuva 13 Kakkusuodatuksen periaate [21].

7.1 Nutsche-suodatin

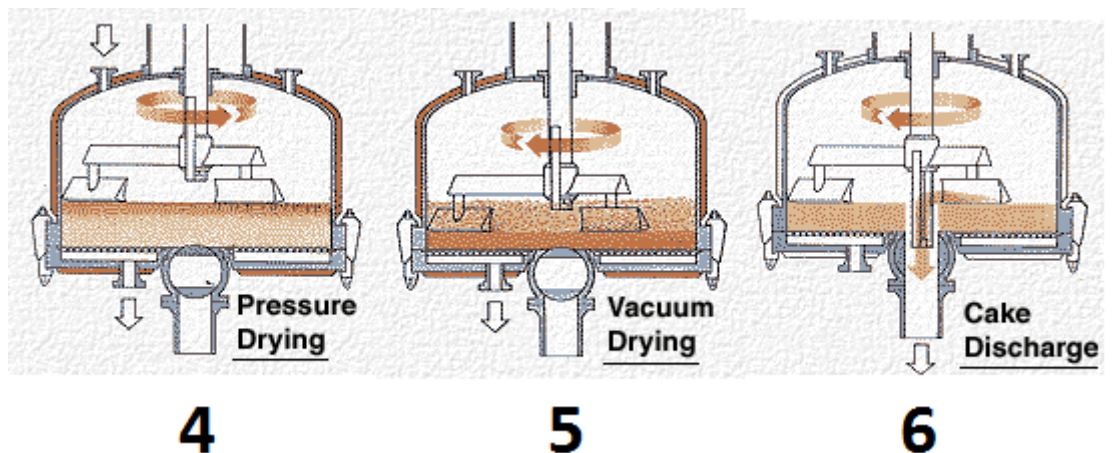
Nutsche-suodatin on käytössä pääsääntöisesti panostoimisessa teollisuudessa, kuten hienokemikaalien ja lääkkeiden valmistuksessa. Suodatin kykenee myös käsittelemään helposti syttyviä, myrkyllisiä tai korroosiota aiheuttavia aineita. Kyseistä suodatinta voidaan käyttää sekä vakuumi- että painesuodatukseen. Suodatin on suunniteltu käytettäväksi 2 - 3 bar paineessa. Suodattimen koosta riippuen suodatustilaan voidaan päästä avaamalla joko suodatuskammion yläosasta oleva kansi tai suodatuskammion pohja on irrotettavissa [24].

Nutschella tehtävä suodatus on kuusivaiheinen prosessi. Ensimmäiset kolme vaihetta on esitelty kuvassa 14 ja loput kolme kuvassa 15. Kuvan 14 ensimmäisessä kohdassa liete syötetään suodatuskammioon, joka tämän jälkeen paineistetaan. Paineen avulla suodos syrjäytetään ja tällöin kiintoaine alkaa kertymään suodatinväliaineen päälle. Seuraavassa kohdassa tapahtuu kakun pesu. Tällöin suodatuskammion ylälaidasta tulee vettä kakun päälle. Nutsche-suodattimen etuna on sen kyky tasoittaa muodostuneen kakun pinta ennen pesun aloittamista. Tällöin syntynyt kakku tulee pestyä tasaisesti. Kolmantena vaiheena on uudelleen liettäminen. Sen tarkoituksena poistaa ylimääräinen neste kiintoaineesta liikkuvien lapojen avulla. Lavat liikkuvat hitaasti kuorien kakkua kerros kerrokselta muuttaen sen lietteeksi [24].



Kuva 14 Nutsche-suodatuksen ensimmäiset kolme vaihetta: suodatus, kakun pesu sekä uudelleen liettäminen [24]

Kuvassa 15 on esitetty Nutsche-suodatuksen kolme viimeistä vaihetta. Kaksi ensimmäistä niistä käsittelevät muodostuneen kakun kuivaamista ja viimeisenä on kakun irrottaminen suodatuskammioista. Kohdassa 4 on kuvattu painekuivaus. Ilmaa tai kaasua syötetään kammioon niin kauan kunnes voidaan todeta, ettei kakkua saada enää kuivemmaksi. Pienin mahdollinen jäännöskosteus mahdollistetaan pyörittämällä lapoja kakun pinnalla ja syöttämällä siihen paineilmaa kontrolloidusti. Tällöin pinnan mahdolliset halkeamat sulkeutuvat, eikä ilma pääse kulkemaan muodostuneen kiintoainekerroksen lävitse. Toinen kuivauksen vaihe on vakuumikuivaus. Siinä liikkuvien lapojen avulla tiivistetään kakkua entisestään. Viimeisenä vaiheena suodatuksessa on kakun poisto [24].



Kuva 15 Nutsche-suodatuksen kolme viimeistä vaihetta: painekuivaus, vakuumikuivaus sekä kakun irrottaminen [24].

7.2 Kakkusuodatuksen parametreja

Suodinkakun ominaisvastus saadaan laskettua suodatusyhtälöstä, joka on johdettu Darcy'n yhtälöstä. Kakun ja suodatinväliaineen lävitse kulkeva virtaus, Q , määritellään seuraavanlaisesti [21]

$$Q = \frac{\Delta p A_m}{\alpha \mu w + \mu R_m} \quad (7.1)$$

missä,	Q	suodoksen virtausnopeus, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
	Δp	paine-ero, Pa
	A_m	suodatuspinta-ala, m^2
	α	suodinkakun ominaisvastus, m kg^{-1}
	μ	viskositeetti, Pa s
	w	kakun massa pinta-alayksikkö kohden, kg m^{-2}
	R_m	suodatusväliaineen vastus, m^{-1}

Jotta suodatuksen aikana tallennetusta datasta saadaan laskettua keskimääräinen suodinkakun ominaisvastus, α_{av} , tulee yhtälö (7.1) muuttaa seuraavanlaisesti:

$$\frac{dt}{dV} = \alpha_{av} \mu c \frac{V}{A_m^2 \Delta p} + \frac{\mu R_m}{A \Delta p} \quad (7.2)$$

, jossa	t	aika, s
	V	suodoksen tilavuus, m^3
	α_{av}	suodinkakun keskimääräinen ominaisvastus, m kg^{-1}
	c	suodatuskonsentraatio, kg m^{-3}

Integroimalla edellinen yhtälö ja järjestelemällä termejä, voidaan suodinkakun keskimääräinen ominaisvastus α_{av} laskea suodatusdatasta kun tiedetään vakiopainesuodatuksen alkuhetki t_s ja sitä vastaava suodoksen tilavuus V_s yhtälöllä (7.3). t_s on aika, joka kuluu paineen nostamiseen halutulle tasolle suodatuksen alusta, ja V_s suodoksen tilavuus, mikä ehti kerääntyä tuona aikana.

$$\frac{t-t_s}{V-V_s} = \frac{\alpha_{av}\mu c}{2A_m^2\Delta p} (V + V_s) + \frac{\mu R_m}{A_m\Delta p} \quad (7.3)$$

, jossa t_s vakiopainesuodatuksen alkamisajankohta, s
 V_s suodoksen tilavuus vakiopainesuodatuksen alkamishetkellä, m³

Suodinkakun keskimääräinen ominaisvastus kuvaa kakun kykyä vastustaa suodoksen virtausta kakun lävitse. Kokoonpuristumattomilla kakuilla kakun ominaisvastus kasvaa samassa suhteessa kakun paksuuden kanssa. Ominaisvastukselle määritetään keskimääräinen arvo, koska vastus ei ole sama koko kakun paksuudelta [25].

Yhtälöissä (7.1 – 7.3) esiintyvä viskositeetti, μ , voidaan määrittää suodatettavan lietteen lämpötilasta riippuvalla yhtälöllä (7.4)

$$\mu = 10^{-4,4518 - \left(\frac{220,57}{149,39 - T_{liete}}\right)} \quad (7.4)$$

Yhtälöissä (7.1 – 7.3) esiintyvä suodatuskonsentraatio, c , eli suodinkakun kuivan kiintoaineen massa jaettuna suodoksen tilavuudella tulee yhtälöstä (7.5)

$$c = \frac{c_w \rho_w}{1 - m c_w} \quad (7.5)$$

missä, c_w lietteen kiintoainepitoisuus, -
 ρ_w suodoksen tiheys, kg m⁻³
 m määrän ja kuivan kakun suhde, -

Suodinkakun keskimääräinen huokoisuus, ε_{av} , kuvaa suodinkakun huokosten tilavuuden osuutta koko kakun tilavuuteen. Se voidaan laskea joko yhtälön (7.6) [26] avulla

$$\varepsilon_{av} = 1 - \frac{m_s}{\rho_s A_c h_c} \quad (7.6)$$

missä,	m_s	kiintoaineen massa, kg
	ρ_s	kiintoaineen tiheys, kg m ⁻³
	A_c	kakun pinta-ala, m ²
	h_c	kakun korkeus, m

tai yhtälöllä (7.7) [2] voidaan laskea seuraavasti

$$\varepsilon_{av} = \frac{V_v}{V_c} \quad (7.7)$$

missä,	V_v	huokosten tilavuus, m ³
	V_c	suodinkakun kokonaistilavuus, m ³

Panossuodatuksessa suodatuksen edetessä kankaan vastuksen osuus vähenee sitä mukaan, kun kakkua muodostuu kankaan päälle. Tällöin muodostuneen kakun vastus kasvaa, vaikuttaen virtausnopeuden asteittaiseen putoamiseen [21].

Suodinkakun huokoisuuteen vaikuttaa millaisia partikkeleita suodatettavassa lietteessä on ja miten niitä on käsitelty (esimerkiksi jauhatus). Kun suodinkakun huokoisuus kasvaa, suodoksen virtaus kakun lävitse tapahtuu helpommin. Paine-ero kakun yli eli Δp vaikuttaa myös huokoisuuteen, siten että suurella paine-erolla saadaan pieni huokoisuus [27]. Kakun huokoisuutta voi myös tarkastella yhdessä kakun saturaation kanssa. Kakun saturaatio on suodinkakun huokosissa olevan nesteen tilavuusosuus suodinkakussa [25].

Kokoonpuristumattoman kakun suodatuksessa kakun keskimääräinen ominaisvastus voidaan teoreettisesti liittää partikkelikokojakauman Sauterin keskiarvohalkaisijaan $D_{[3,2]}$ sekä suodinkakun huokoisuuteen Kozeny-Carman yhtälöllä [2].

$$\alpha_{av} = \frac{180(1-\varepsilon)}{\rho_s(D_{[3,2]})^2 \varepsilon^3} \quad (7.8)$$

8 KOESUUNNITTELU

Koesuunnittelua käytetään tutkittavien parametrien vaikutusten kontrolloitiin [20]. Koesuunnittelun hyötynä on kokeiden lukumäärän minimointi säästämällä aikaa ja materiaalikustannuksia. Box-Behnken suunnittelua käyttäen saadaan selville optimaaliset jauhatusolosuhteet ilman, että jokaista koevaihtoehtoa joudutaan käymään läpi. Tilastollisilla menetelmillä selvitetään kunkin parametrin voimakkuus ja sekä niiden keskinäiset vaikutukset mitattavaan arvoon. Box-Behnken koesuunnittelun yhtälö on muotoa:

$$N = k^2 + k + c_p \quad (8.1)$$

missä, k muuttuvien parametrien määrä
 c_p keskikohdan toistojen lukumäärä

Taulukko III Riippumattomat parametrit ja niiden vaihteluvälit, mukailten [20].

Riippumattomat parametrit	Symbols		Coded levels		
			<u>Alataso</u>	<u>Keskitaso</u>	<u>Ylätaso</u>
	Uncoded	Coded	-1	0	+1
Kuulan koko, mm	X_1	x_1	1	2	3
Jauhatusaika, min	X_2	x_2	5	10	15
Pyörimisnopeus, rpm	X_3	x_3	300	500	700

X_i ja x_i välinen suhde taulukossa III saadaan seuraavista muunnoksista:

$$x_i = \frac{(x_i - X_i^0)}{\Delta X_i} \quad (8.2)$$

missä, x^i koodiarvo (coded value)
 X^i vastaava varsinainen arvo
 X_i^0 varsinainen arvo keskitasolla
 ΔX^i lisäys joka saadaan alimman ja keskiarvon erotuksesta

Näin ollen saadaan

$$x_1 = \frac{(X_1 - 2)}{1} \quad (8.3)$$

$$x_2 = \frac{(X_2 - 10)}{5} \quad (8.4)$$

$$x_3 = \frac{(x_3 - 500)}{200} \quad (8.5)$$

Näistä arvoista saadaan luotua malli:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (8.6)$$

missä β_i on regressioanalyysin tuloksena saatava kertoimen arvo kullekin muuttujalle. Yhtälöllä (8.6) voidaan laskea ennustetut riippuvat muuttujat (y-muuttujat), kun tiedetään riippumattomien muuttujien (x-muuttujat) arvot ja mitatut arvot (y-muuttujat).

Kolmitasoinen faktorikoesarja, jossa 0-kokeen toisto on tehty viisi kertaa, on esitetty taulukossa IV.

Taulukko IV		Kolmitasoinen faktorikoesuunnitelma		
Koe #	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0	
2	1	1	-1	
3	1	-1	-1	
4	1	1	1	
5	0	0	0	
6	-1	1	-1	
7	1	-1	1	
8	0	0	0	
9	-1	1	1	
10	-1	-1	-1	
11	-1	-1	1	
12	1	0	0	
13	-1	0	0	
14	0	-1	0	
15	0	0	1	
16	0	0	0	
17	0	0	-1	
18	0	1	0	
19	0	-1	-1	
20	1	0	-1	
21	-1	0	-1	
22	-1	-1	0	
23	0	0	0	
24	0	-1	1	
25	0	1	-1	
26	1	1	0	
27	1	0	1	
28	0	1	1	
29	1	-1	0	
30	-1	0	1	
31	-1	1	0	

KOKEELLINEN OSA

Kokeellisessa osassa tutkittiin erilaisten jauhatusparametrien (helmikoko, jauhatusaika ja sekoituselimen pyörimisnopeus) yhdistelmien vaikutus rikastushiekan jauhautumiseen helmimyllyssä ja jauhatuksen jälkeiseen suodatukseen eri suodatuspaineilla Nutsche-suodattimella.

Kokeellinen osuus voidaan jakaa kahteen kokonaisuuteen: jauhatukseen ja suodatukseen. Jauhatusosion tarkoituksena on selvittää miten jauhatusparametrit vaikuttavat rikastushiekan hienousasteeseen eli miten partikkelikokojakauma sekä eri keskimääräiset tai muut kuvaavat partikkelikoot muuttuvat, kun jauhatusparametrien yhdistelmiä muutetaan.

Suodatusosiossa sitten selvitetään miten rikastushiekan hienousaste eli partikkelikokojakauma sekä eri keskimääräiset tai muut kuvaavat partikkelikoot vaikuttavat rikastushiekkalietteen suodattavuuteen eri suodatuspaineilla suodatettaessa. Kokeellisessa osuudessa käytiin seuraavat vaiheet läpi:

1. Rikastushiekkalietteen karakterisointi
2. Alustava jauhatuskoe
3. Jauhatuskokeet
4. Suodatuskokeet
5. Regressioanalyysi

9 RIKASTUSHIEKKALIETTEEN KARAKTERISOINTI

Kokeisiin valittiin rikastushiekkaliete, joka on jäänyt jätteeksi malmin rikastusprosessista Kevitsan kaivokselta.

9.1 Koostumus

Rikastushiekkalietteestä oli jo aikaisemmin [28] määritetty ICP-OES avulla lietteestä löytyvien alkuaineiden pitoisuuksia. Lähteen kahdesta rikastushiekkalietteistä meidän kokeisiin valittu liete oli vähärikkinen rikastushiekkaliete. Määrityksessä oli saatu seuraavat tulokset (mg/kg): Cu (429), Ni (1180), Fe (77300), Au (0,05), Pd (0,07), Pt (0,11) ja S (6600).

9.2 Kiintoainepitoisuus ja tiheydet

Lietteen tiheys määritettiin mittalasin avulla ja kiintoainepitoisuus standardin [29] mukaisesti. Lietteen keskimääräiseksi tiheydeksi saatiin 1098 kg m^{-3} ja lietteen keskimääräiseksi kiintoainepitoisuudeksi 14,9 p- %. Kiintoaineen keskimääräiseksi tiheydeksi saatiin tulokseksi 3130 kg m^{-3} . Kiintoaineen tiheys määritettiin pyknometrin avulla liettäen kuivattua rikastushiekkaa veteen. Ennen varsinaista määrittystä, kiintoaineen annettiin vettyä n. 30 min, samalla sekoittaen syntyvää lietettä.

9.3 Partikkelikokojakauma

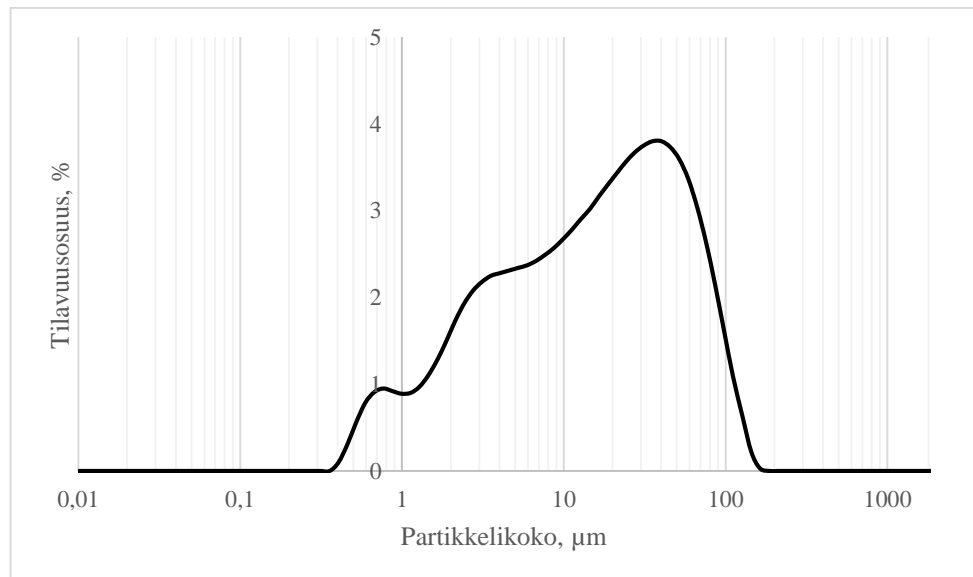
Partikkelikokojakauman määritykset suoritettiin Malvern Mastersizer 3000 partikkelikokoanalysointilaitteella, joka hyödyntää laserdiffraktiota partikkelikokojakauman määrittämisessä. Partikkelikokojakauma saatiin tilavuusjakaumana, minkä käyttö on perusteltua, koska mineraalijauheissa (rikastushiekassakin) pienten partikkelien osuus on iso verrattuna suuriin partikkeleihin. Tällöin lukumääräjakauman käyttö ei kuvaisi jakaumaa totuuden mukaisesti. [2]

Jokainen partikkelikokonäyte analysoitiin vähintään kahdesti kun yksi analyysi tekee aina viisi eri kokojakauman määrittystä. Jokainen näyte analysoitiin useampaan kertaan tulosten luotettavuuden varmistamiseksi. Partikkelikokoanalysointipumpun nopeutena käytettiin 3250 rpm.

Mie-laskentaa hyödynnettiin mittaustulosten perusteella tehtävään partikkelikokojakauman määrittämiseen. Mie'tä suositellaan käytettävän, kun analysoidaan jauhattua tai murskattua kiintoainetta sisältävää näytettä, jolloin partikkelit ovat muodoltaan epäpallomaisia. Mie-laskentaa varten tuli arvioida rikastushiekalle taitekerroin. Rikastushiekan taitekertoimeksi arvioitiin 1,75, koska hiekalle se on tyypillisesti välillä 1,73 – 1,89 [30, 31].

Partikkelikokoanalyysin tulokset jauhamattomalle rikastushiekalle eli partikkelikoot D_{10} , D_{50} ja D_{90} sekä $D_{[3,2]}$ ja $D_{[4,3]}$ ja ominaispinta-ala S_w (laskettu yhtälöllä 6.3) ovat esitettyinä taulukossa V. Kuvassa 16 on esitetty jauhamattoman rikastushiekan partikkeleiden tilavuusosuusjakauma.

	D_{10}	D_{50}	D_{90}	$D_{[3,2]}$	$D_{[4,3]}$	S_w
	μm	μm	μm	μm	μm	$\text{m}^2 \text{kg}$
Rikastushiekka	1,92	16,8	70,8	5,12	27,6	374

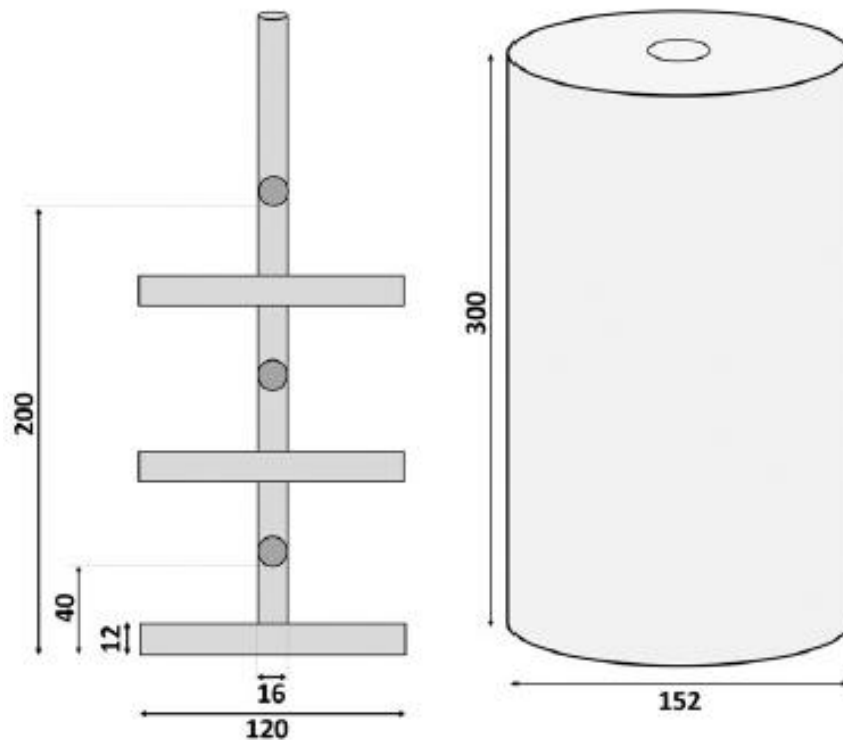


Kuva 16 Jauhamattoman rikastushiekkalietteen tilavuusosuusjakauma.

10 JAUHATUSKOKEET

Jauhatuskokeita varten käytettävissä olevaa rikastushiekkaliete sekoitettiin kunnolla n. 48 h ajan ja jaettiin sen jälkeen kahden litran osanäytteisiin. Yhden lietenäytepurkin painoksi tuli noin 2,2 kg, joka oli sitten aina kunkin jauhatuskokeen lietemäärä.

Kuvassa 17 on esitetty rikastushiekkalietteen jauhatusprosessissa käytetty helmimylly ja sekoituselin. Sekoituselimen on 6 tappiparia sisältävä tappisekoitin. Tappisekoittimen tapit ovat aseteltu vastakkaisille puolille tapin runkoa siten, että jokaisen tappiparin etäisyys toisiinsa nähden on 28 mm. Tappiparin kokonaispituus on 120 mm, mikä määrittää aktiivisen jauhatusalueen.



Kuva 17 Rikastushiekkalietteen jauhatuskokeissa käytetty tappisekoitin ja helmimylly, mitat ilmoitettu millimetreinä [2]

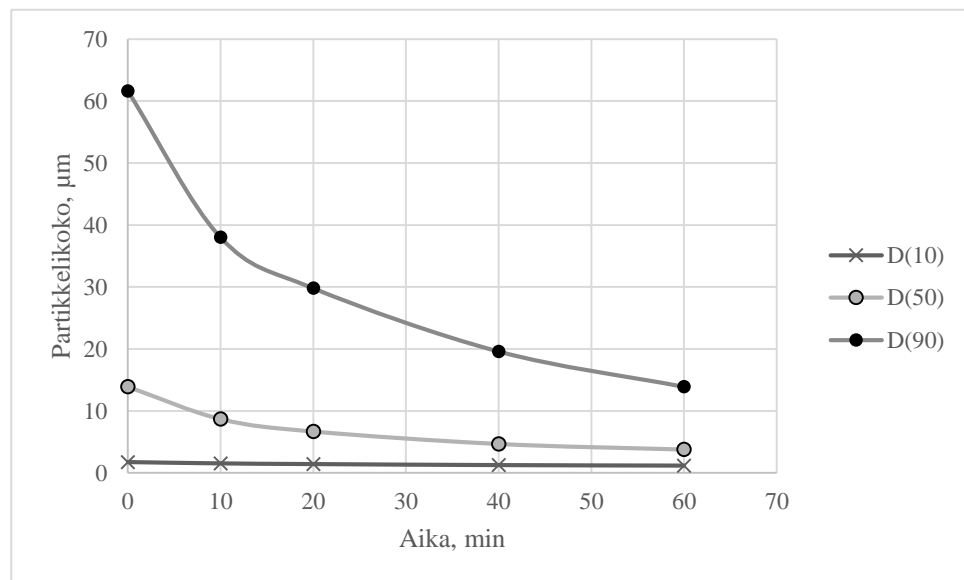
10.1 Alustava jauhatuskoe

Rikastushiekkalietteelle tehtiin alustava jauhatuskoe, jossa tutkittiin yleisesti rikastushiekan jauhautuvuutta helmimyllyssä. Jauhatuskokeen aikana sekoitineliimen pyörimisnopeus oli 500 rpm, lasihelmien halkaisija 2 mm ja niitä käytettiin 2 kg

(myöhemmässä koesarjassa lasihelmien määrä nostettiin 3 kg per jauhatuspanos). Alustavan jauhatuskokeen keskimääräiset partikkelikoot ja niiden muuttuminen jauhatuksen edetessä ovat esitettyinä taulukossa VI ja kuvassa 18.

Taulukko VI Jauhatuskoe rikastushiekan jauhautumisesta helmimyllyssä, kun sekoitusnopeus 500 rpm ja helmikoko 2 mm.

Jauhatusaika, min	D_{10} μm	D_{50} μm	D_{90} μm
0	1,73	13,9	61,6
10	1,52	8,69	38,0
20	1,41	6,68	29,8
40	1,25	4,67	19,6
60	1,17	3,76	13,9



Kuva 18 Rikastushiekan jauhautuvuus jauhatusajan funktiona. Sekoitusnopeus 500 rpm ja helmien halkaisija 2 mm.

Kuvasta 18 ja taulukon VI arvoista nähdään, että D_{50} ja D_{90} – arvoissa tapahtui suurin muutos jo ensimmäisen 20 min aikana ja D_{10} -arvon muutos oli hyvin vähäistä. Partikkelikokojen muutosten perusteella jauhatusajoiksi varsinaisiin kokeisiin valittiin siten 5, 10 ja 15 min. 2 mm helmikoko ja 500 rpm sekoitusnopeus valittiin varsinaisen jauhatuskokeiden faktorikoesarjan nollatasoksi.

10.2 Jauhatuskoesarja

Jauhatuskokeet toteutettiin märkäjauhatuksena helmimyllyssä, jossa käytettiin sekoituselimenä tappisekoitinta. Koesarjassa käytettävän helmimyllyn mitat on esitetty kuvassa 17. Kokeet suoritettiin punnitsemalla ensin 3 kg lasihelmiä myllyn pohjalle. Lietepönttöä sekoitettiin huolellisesti kauhalla, jotta jauhettava näytesuspensio saatiin tasalaatuiseksi ja sekoittunut liete kaadettiin myllyyn.

Ennen ajanoton aloittamista, sekoitineliötä pyöritettiin hyvin hiljaisella vauhdilla, jotta sekoitineliin voitiin laskea lähelle myllyn pohjaa kuitenkin vielä aloittamatta rikastushiekan jauhaantumista. Kun sekoituselin oli oikealla tasolla, sekuntikello laitettiin päälle ja sekoitusnopeus säädettiin haluttuun arvoon. Jauhatuskokeen jälkeen rikastushiekkaliete eroteltiin lasihelmistä seulan avulla. Helmet pestiin puhtaiksi mahdollisista rikastushiekkajäämistä ennen kuin niitä käytettiin uudelleen. Koska jauhettaessa rikastushiekkaliete lämpenee helmimyllyjauhatuskokeen aikana, tuli sen antaa jäähtyä huoneenlämpöiseksi ennen suodatuskoetta. Näin tehden varmistettiin että lietteen mahdolliset viskositeettimuutokset eivät vaikuta suodatuksen tulokseen.

Taulukossa VII on esitetty jauhatuskoesarjan kussakin kokeessa käytettävät jauhatusparametrien todelliset arvot. Helmikokoina käytettiin 1, 2 ja 3 mm lasikuulia, ja sekoitusnopeutena 300, 500 ja 700 rpm. Jauhatusajat ovat jo aikaisemmin mainitut 5, 10 ja 15 min. Vastaava koesarja normitetuilla arvoilla (-1, 0, ja 1) on esitetty taulukossa IV.

Nollakohta eli koe, jossa kaikki muuttujat ovat normituilta arvoiltaan 0, on toistettu viisi kertaa ja ovat kokeet numero 1, 5, 8, 16 ja 23. Näissä kokeissa helmikoko on 2 mm, jauhatusaika 10 min ja sekoitusnopeus 500 rpm.

Taulukko VII Jauhatuskoesarja, jossa on esitetty helmikoon, jauhatusajan ja sekoitusnopeuden vaihtelut kussakin jauhatuskokeessa.

Koe #	Helmikoko mm	Jauhatusaika min	Sekoitusnopeus, rpm
1	2	10	500
2	3	15	300
3	3	5	300
4	3	15	700
5	2	10	500
6	1	15	300
7	3	5	700
8	2	10	500
9	1	15	700
10	1	5	300
11	1	5	700
12	3	10	500
13	1	10	500
14	2	5	500
15	2	10	700
16	2	10	500
17	2	10	300
18	2	15	500
19	2	5	300
20	3	10	300
21	1	10	300
22	1	5	500
23	2	10	500
24	2	5	700
25	2	15	300
26	3	15	500
27	3	10	700
28	2	15	700
29	3	5	500
30	1	10	700
31	1	15	500

11 SUODATUSKOKEET

Jauhetut rikastushiekkalietteet suodatettiin laboratoriomittakaavan Nutsche-painesuodattimella vakiopainesuodatuksena kolmella eri suodatuspaineella (2, 4 ja 6 bar). Suodattimen kammion tilavuus oli 350 cm^3 . Suodatusväliaineena suodatuskokeissa käytettiin selluloosasta (T-1000) tehtyä levyä, jonka paksuus oli 3,6 mm. Näyte otettiin sekoitusastiasta, jossa lietettä sekoitettiin kunnolla ennen näytteen ottoa. Levy uitettiin vedessä ennen sen laittamista suodattimeen. Jokaista suodatusta varten otettiin uusi, puhdas selluloosalevy käyttöön, jotta suodatusväliaineen vastus saatiin pysymään vakiona [2]. Suodatuspinta-alaksi kokeissa määritettiin $22,5 \text{ cm}^2$ ja kokeet suoritettiin huoneenlämpötilassa ($22 \text{ }^\circ\text{C}$).

Suodatusta varten rikastushiekkalietettä punnittiin $250 \pm 1 \text{ g}$ per suodatuskoe. Juuri ennen lietteen kaatamista suodattimeen, lietettä sekoitettiin vielä voimakkaasti, jotta suodatettava näytesuspensio saatiin tasalaatuiseksi. Liete kaadettiin suppilon avulla ripeästi ja tasaisesti suodattimeen ja suodattimen yläosassa oleva tuloventtiili suljettiin. Suodatus lähti käyntiin heti kun tuloventtiilin sulkemisen jälkeen avattiin kaasuventtiili. Typpikaasulla tuotettiin suodatuksen tarvitsema paine-ero. Suodatuksen aikana mitattiin Labview-ohjelman avulla mittausdataksi suodatuksen aikana kertynyt suodoksen massa sekä paine suodatuskammiossa. Lietenäytteen astia ja suppilo punnittiin heti suodatuksen alun jälkeen, jotta tiedettiin tarkasti kuinka paljon punnitusta lietteestä jäi mahdollisesti astiaan tai suppiloon. Liitteen I mittauspöytäkirjassa mainittu lietteen massa on todellinen suodatuskammioon laitettu lietemäärä.

Mittauspöytäkirjaan merkittiin myös suodatuksen tuloksena suodinkakun mitat (paksuus, massa märkänä ja kuivana). Ne ja muut suodatusparametrien arvot löytyvät liitteestä I. Näistä ja mittausdatasta saatiin laskettua kullekin suodatukselle kakun keskimääräinen ominaisvastus α_{av} yhtälöllä (7.3) sekä suodinkakun keskimääräinen huokoisuus ε_{av} yhtälöillä (7.6 ja 7.7).

Taulukossa VIII on esitetty jauhamattoman rikastushiekkalietteen eli nollanäytteen suodatuksen tulokset eli kolmessa eri suodatuspaineessa saadut suodinkakkujen keskimääräiset huokoisuudet sekä keskimääräiset ominaisvastukset.

Taulukko VIII Jauhamattoman rikastushiekan suodinkakun keskimääräinen huokoisuus ja keskimääräinen ominaisvastus vakioaine kakkusuodatuksessa.

	<i>2 bar</i>	<i>4 bar</i>	<i>6 bar</i>
ϵ_{av} , -	0,511	0,500	0,508
α_{av} , m kg ⁻¹	4,98·10 ⁺¹¹	5,30·10 ⁺¹¹	5,42·10 ⁺¹¹

12 TULOKSET

12.1 Jauhatuskokeet

Jauhatusparametrit ja partikkelikokojakaamaa kuvaavat partikkelikoot D_{10} , D_{90} , D_{50} , laskennalliset keskiarvohalkaisijat $D_{[3,2]}$, $D_{[4,3]}$ ja partikkelin ominaispinta-ala S_w ovat esiteltyinä taulukossa IX, jossa on myös taulukossa VI esitetyn faktorikoesuunnitelman normitettuja arvoja vastaavat jauhatusparametrien todelliset arvot.

Taulukko IX Jauhatuskokeiden todelliset jauhatusparametrit (helmikoko, jauhatusaika ja sekoitusnopeus) ja jauhatus tuotteiden partikkelikokojakaamaa kuvaavat partikkelikoot kussakin jauhatuskokeessa.

Koe #	Helmen koko mm	Jauhatusaika min	Sekoitusnopeus, rpm	D_{10} μm	D_{50} μm	D_{90} μm	$D_{[3,2]}$ μm	$D_{[4,3]}$ μm	S_w $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$
1	2	10	500	1,42	7,17	30,6	3,65	12,7	525
2	3	15	300	1,50	8,06	33,0	3,88	14,1	494
3	3	5	300	1,44	8,10	31,3	3,76	13,2	510
4	3	15	700	1,36	4,72	16,1	3,09	7,88	620
5	2	10	500	1,47	7,33	31,9	3,70	13,2	518
6	1	15	300	1,32	6,91	33,7	3,43	13,5	559
7	3	5	700	1,54	7,71	28,0	3,85	12,5	498
8	2	10	500	1,46	7,62	34,0	3,73	13,7	514
9	1	15	700	1,25	5,32	32,8	3,12	13,5	614
10	1	5	300	1,50	8,72	38,0	3,91	15,4	490
11	1	5	700	1,44	7,87	39,7	3,74	15,8	512
12	3	10	500	1,57	8,14	32,1	3,97	13,8	483
13	1	10	500	1,37	7,50	39,4	3,59	15,5	534
14	2	5	500	1,60	10,30	50,3	4,21	19,5	455
15	2	10	700	1,33	5,88	26,0	3,31	11,3	579
16	2	10	500	1,46	7,55	33,8	3,74	13,8	512
17	2	10	300	1,41	7,79	37,2	3,69	15,1	519
18	2	15	500	1,41	6,89	34,9	3,60	14,1	532
19	2	5	300	1,48	8,95	42,7	3,91	17,0	490
20	3	10	300	1,55	9,06	37,5	4,03	15,5	476
21	1	10	300	1,39	8,31	40,4	3,71	16,0	517
22	1	5	500	1,57	10,6	57,3	4,20	21,7	456
23	2	10	500	1,52	8,45	42,6	3,94	17,0	486
24	2	5	700	1,54	8,79	41,0	3,99	16,3	480
25	2	15	300	1,40	7,66	39,1	3,65	15,4	525
26	3	15	500	1,42	6,31	22,7	3,48	10,4	551
27	3	10	700	1,42	6,05	21,9	3,43	10,3	559
28	2	15	700	1,24	4,63	20,1	2,95	9,46	650
29	3	5	500	1,62	9,81	38,3	4,19	16,0	457
30	1	10	700	1,30	6,68	39,0	3,40	15,0	564
31	1	15	500	1,37	7,90	46,1	3,65	17,3	525

Kaikissa partikkelikokojakaumaa kuvaavissa partikkelikoiden arvoissa saatiin muutos jauhamattoman rikastushiekan ja jauhattujen näytteiden välillä. Jauhamattoman rikastushiekan keskimääräiset partikkelikoot on esitetty taulukossa V ja jauhetuille taulukossa IX.

Jauhamattoman rikastushiekan alle 10 % osuutta vastaava partikkelikoko D_{10} on 1,92 μm , hienontuen jauhatuskokeissa kokovälille 1,25 – 1,62 μm . Jauhatuskokeissa ja jauhamattomaan verrattuna D_{10} arvoon saatiin vähiten muutosta, koska lähtöaineena käytetty rikastushiekka oli jo varsin hienojakoista. Jauhatuskokeissa käytetty helmimyyly ei pystynyt valituilla jauhatusparametrien arvoilla juurikaan hienostamaan hiekan pienintä fraktiota. Tämä on nähtävissä alustavan jauhatuskokeen kuvassa 18.

Jauhamattoman rikastushiekan 50 % osuutta vastaava partikkelikoko D_{50} on 16,8 μm , hienontuen jauhatuskokeissa kokovälille 4,63 μm – 10,30 μm . Jauhamattoman rikastushiekan alle 90 % osuutta vastaava partikkelikoko D_{90} on 70,8 μm , hienontuen jauhatuskokeissa kokovälille 16,1 μm – 57,3 μm . $D_{[4,3]}$ on jauhamattomalle rikastushiekalle 27,6 μm , hienontuen jauhatuskokeissa kokovälille 7,88 μm – 21,7 μm . $D_{[3,2]}$ on jauhamattomalle rikastushiekalle 5,12 μm , hienontuen jauhatuskokeissa kokovälille 2,95 μm – 4,21 μm . $D_{[3,2]}$ avulla lasketun S_w arvot ovat vastaavasti välillä 455 – 620 $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ siten, että pienemmällä $D_{[3,2]}$ arvolla saatiin suurin ominaispinta-alan arvo yhtälön (6.2) mukaisesti.

Jauhatuskokeiden pienimmät partikkelikokoarvot parametreille D_{10} , D_{50} ja $D_{[3,2]}$ saadaan kokeessa 28. Siinä lasikuulan koko on 2 mm, jauhatusaika 15 min ja sekoitusnopeus 700 rpm. Pienimmät arvot parametreille D_{90} ja $D_{[4,3]}$ saadaan kokeessa 4. Siinä vastaavat koeolosuhteet ovat: lasikuulan halkaisija 3 mm, jauhatusaika 15 min ja sekoitusnopeus 700 rpm. Tästä voisi päätellä, että isompi helmi hajottaa paremmin rikastushiekan karkeaa osuutta ja pienemmällä helmellä muutos on suurempi partikkelikokojakauman hienommassa päässä.

Jauhatuskokeiden suurimmat partikkelikokoarvot parametreille D_{90} , $D_{[4,3]}$ ja $D_{[3,2]}$ saadaan kokeessa 22, kun lasikuulan koko on 1 mm, jauhatusaika 5 min ja sekoitusnopeus 500 rpm. D_{10} saa suurimman arvon kokeessa 29 ja D_{50} kokeessa 14. Näiden koeolosuhteet vastaavasti: 3 mm, 5 min, 500 rpm sekä 2 mm, 5 min ja 500 rpm. Tuloksista nähdään vastaava päätelmä kuin partikkelikokojakauman minimiarvoissa. 1 mm kuulakoolla karkeaan osuuteen ei saada muutosta, varsinkaan pienimmällä jauhatusajalla. D_{10} on suuri, koska 3 mm helmet eivät saa jauhettua enää hienoa osuutta hienommaksi.

Yhteenvetona voisi sanoa että 1 mm helmet vaikuttavat D_{10} - arvoon, 2 mm helmet D_{50} - arvoon ja siten 3 mm D_{90} - arvoon. Helmikoko – jauhettavan materiaalin partikkelikoon suhteeksi saatiin 520:1 (1 mm, D_{10} 1,92 μm), 119:1 (2 mm, D_{50} 16,8 μm) ja 42:1 (3 mm, D_{90} 70,8 μm). Optimaalinen helmikoon – jauhettavan materiaalin partikkelikoon suhde olisi 7:1 - 20:1 [20].

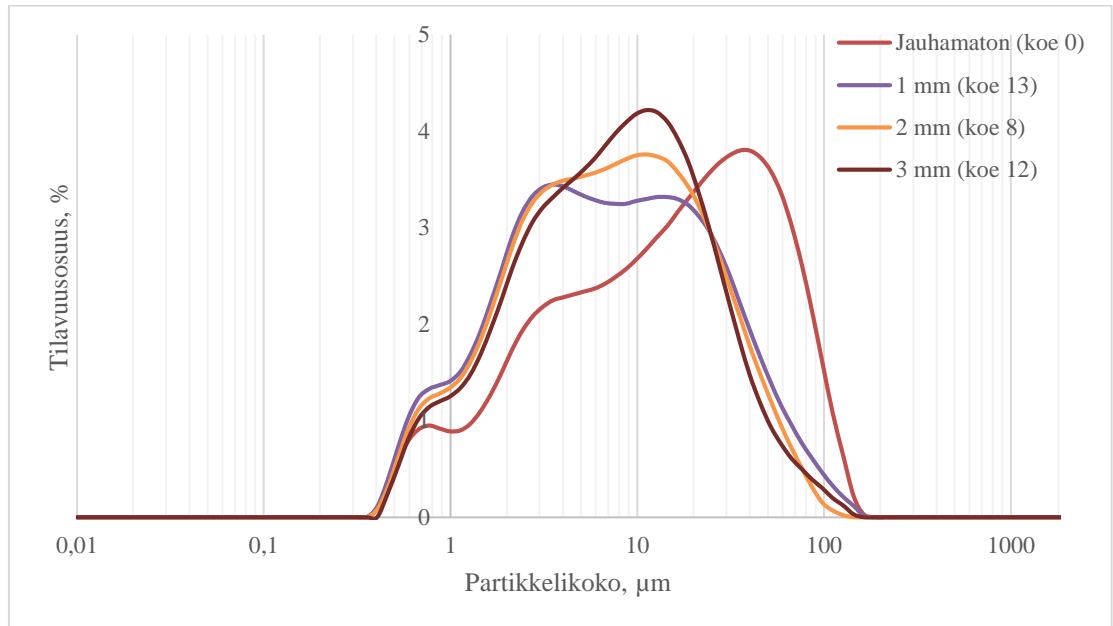
12.2 Jauhatusparametrit

Jauhatusparametrit rikastushiekan märkäjauhatuksessa helmimyllyssä ovat lasihelmien halkaisija, sekoituselimen pyörimisnopeus ja jauhatusaika. Jauhatusparametrien vaikutusta esitellään seuraavissa kolmessa kuvassa (kuvat 19–21) siten, että vain yksi parametri kolmesta muuttuu muiden pysyessä faktorikoesarjan keskiarvossa (0-arvo).

Partikkelikokojakauman muoto kertoo partikkelien koon suhteesta toisiinsa. Jos tiheysjakauman muoto on korkea ja kapea, silloin näytteen partikkelit kokoluokaltaan hyvin lähellä toisiaan. Näyte jonka partikkeleiden välillä on selkeitä kokoeroja, on tiheysjakaumaltaan leveä ja matala [3].

12.2.1 Helmikoko

Kuvassa 19 on esitetty jauhinkappaleina käytettävien lasihelmien halkaisijan koon muuttumisen vaikutus rikastushiekkalietteen partikkelikojakaumaan. Jauhatusaikana kokeissa käytettiin 10 min ja sekoitusnopeutena 500 rpm.

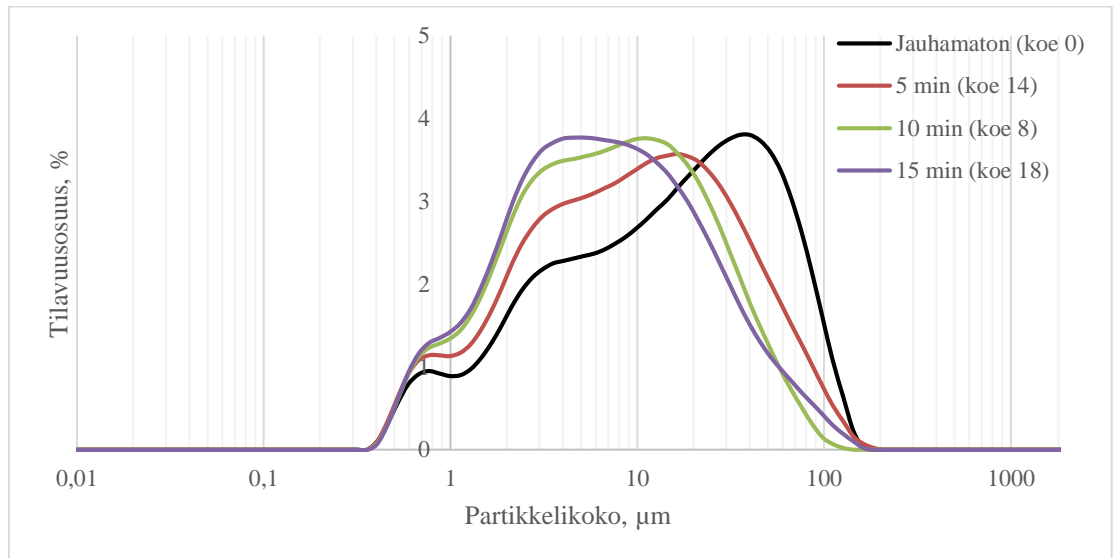


Kuva 19 Helmikoon vaikutus rikastushiekkalietteen jauhautuvuuteen, kun jauhatusaikana käytettiin 10 min ja sekoitusnopeutena 500 rpm.

Helmikoon muuttuminen näyttäisi vaikuttavan eniten jakauman huippuihin. Yhden millimetrin helmillä partikkelikojakauma kokeessa 13 on kaksihuippuinen. Muilla kokeilla on selkeämmin vain yksi huippu. Isoin ero saadaan partikkelikojakauman moodiin, eli kokoluokkaan jossa on eniten partikkeleita. Jauhamattomalle se on 39,9 μm ja muuttuu seuraavasti: 3,8 μm (1 mm), 11,9 μm (2 mm) ja 12,1 μm (3 mm).

12.2.2 Jauhatusaika

Koejauhatuksessa tuloksista (kuva 18) todettiin, että rikastushiekka alkaa jauhaantumaan heti jauhatusprosessin alusta lähtien. Lisäksi jauhaantuminen näyttäisi alkavan niin nopeasti, että jo viiden minuutin jauhatuksen jälkeen voitaisiin nähdä rikastushiekassa eroavaisuutta jauhamattomaan verrattuna. Jauhaantuminen hidastuu 20 minuutin jälkeen jauhatusta kannattanut jatkaa 15 min pidempään. Kuvassa 20 on esitetty jauhatusajan vaikutusta rikastushiekan partikkelikokojakaumaan helmikoon ja sekoitusnopeuden pysyessä vakiona (2 mm ja 500 rpm).

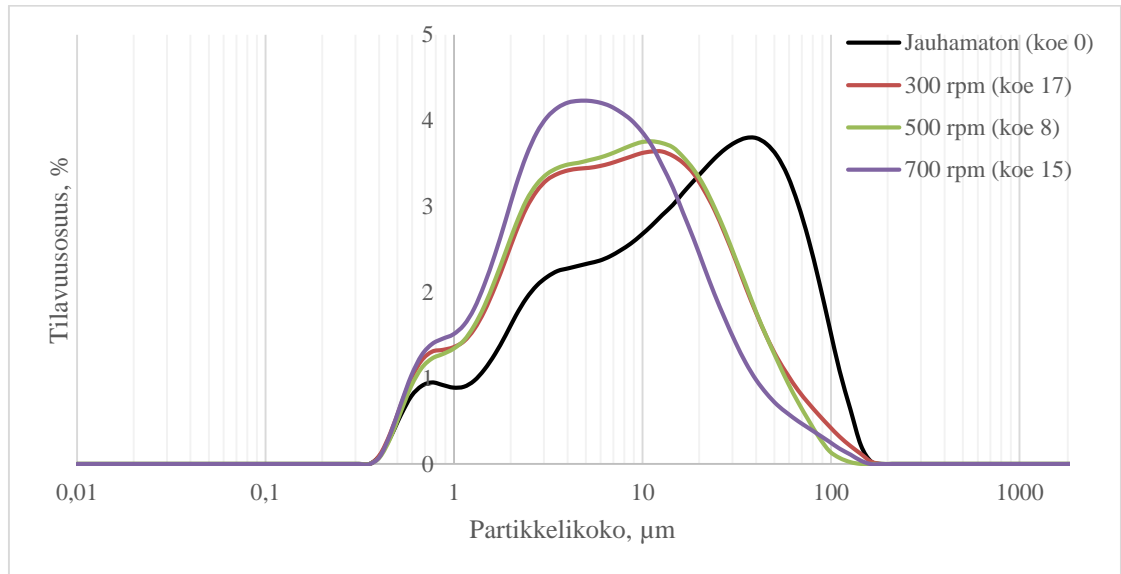


Kuva 20 Jauhatusajan vaikutus rikastushiekkalietteen jauhautuvuuteen, kun helmikokona käytettiin 2 mm ja sekoitusnopeutena 500 rpm.

Jauhatusajan kasvattaminen näyttäisi kaventavan partikkelikokojakaumia 5 ja 10 min jauhatusajan välillä partikkelikokojakauman karkean osuuden kohdalla. 15 min jauhatusajalla partikkelikokojakauman loppuosa sijoittuu kahden edellä mainitun käyrän väliin. Helmikoon muuttamiseen verrattuna jauhatusajan partikkelikokojakaumat eivät mene päällekkäin niin paljon ja pienelläkin ajan muutoksella saatiin näkyvä ero. D_{10} , D_{50} ja D_{90} – arvot ovat selkeästi suuremmat vain 5 min jauhatuksen jälkeen (koe 14), mutta rikastushiekan jauhaantuminen saavuttaa maksimitason pian 10 min täytyttyä eivätkä D_{10} , D_{50} ja D_{90} – arvot enää juurikaan eroa kokeitten 8 ja 18 välillä ($1,46 \mu\text{m} \rightarrow 1,41 \mu\text{m}$; $7,62 \mu\text{m} \rightarrow 6,89 \mu\text{m}$; $34,0 \mu\text{m} \rightarrow 34,9 \mu\text{m}$).

12.2.3 Sekoitusnopeus

Sekoitusnopeuden kasvattamista ja partikkelikokojakauman muuttumista sen mukana on esitetty kuvassa 21, kun muut jauhatusparametrit pidettiin vakiona (helmen halkaisijan 2 mm, jauhatusaika 10 min).



Kuva 21 Sekoittimen sekoitusnopeuden vaikutus rikastushiekkalietteen jauhautuvuuteen, helmikokona ja jauhatusaikana käytettiin 2 mm ja 10 min.

Kuvasta on nähtävissä, että kahdella alemmalla sekoitusnopeudella partikkelikokojakauman käyrät menevät lähes identtisesti. Kahteen muuhun sekoitusnopeuteen verrattuna vasta 700 rpm sekoitusnopeudella rikastushiekan karkeaa osuutta saatiin selkeästi pienennettyä. Merkittävin muutos saadaan D_{90} -lukuun. Alemmat sekoitusnopeudet antavat D_{90} – arvon 34 – 37 µm ja huippunopeudella päästään kokoon 26 µm. Tilavuusjakauman keskiarvohalkaisijaa kuvaava $D_{[4,3]}$ pienenee sekoitusnopeuden mukana 15,1 µm (300 rpm) → 13,7 µm (500 rpm) → 11,3 µm (700 rpm).

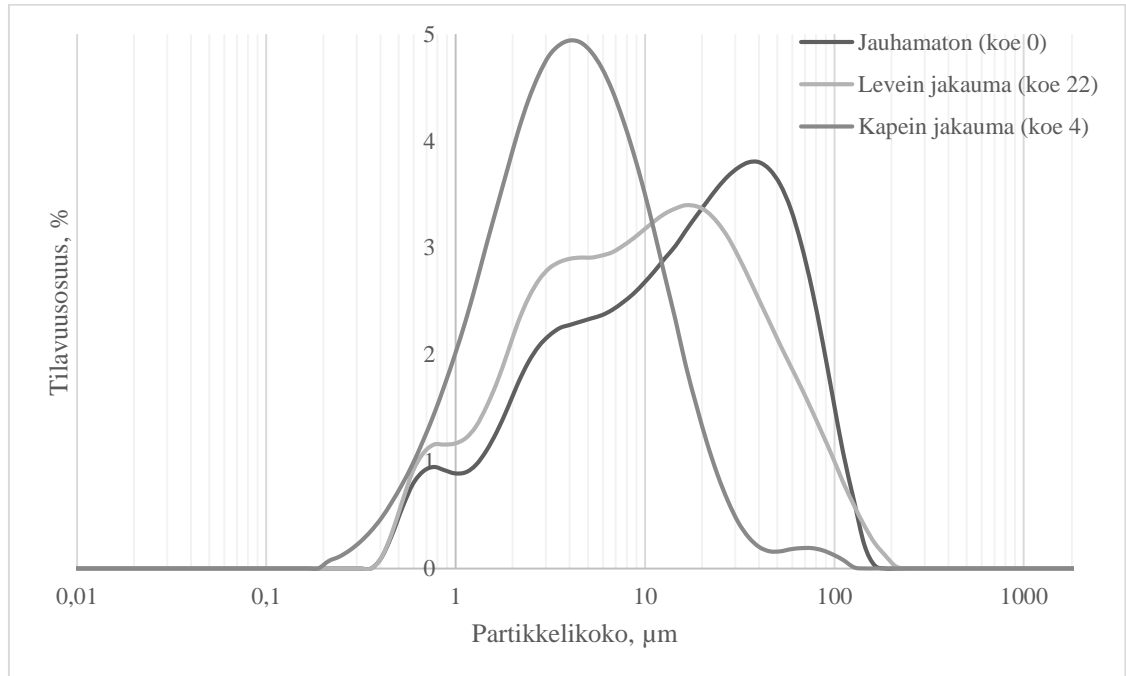
12.3 Partikkelikokojakauman leveys

Partikkelikokojakauman leveydelle löytyy kirjallisuudessa kaksi erilaista menetelmää. Erotusmenetelmässä [2] käytetään jakauman leveyden määrittämiseen tilavuuden mukaista keskiarvohalkaisijaa $D_{[4,3]}$ ja keskimääräisen pinta-alan mukaista halkaisijaa $D_{[3,2]}$ ja partikkelikokojakauman leveys lasketaan näiden kahden erotuksena yhtälön (6.5). Suhdemenetelmässä [19] verrataan D_{10} , D_{50} ja D_{90} parametreja. Ne saadaan määritettyä kumulatiivisesta jakaumasta (kuva 11). Suhdemenetelmässä leveys saatiin yhtälöllä (6.4). Partikkelikokojakauman leveydet löytyvät taulukosta X.

Taulukko X Partikkelikokojakauman leveys, määritettynä yhtälöiden (6.5 ja 6.4) mukaisesti.

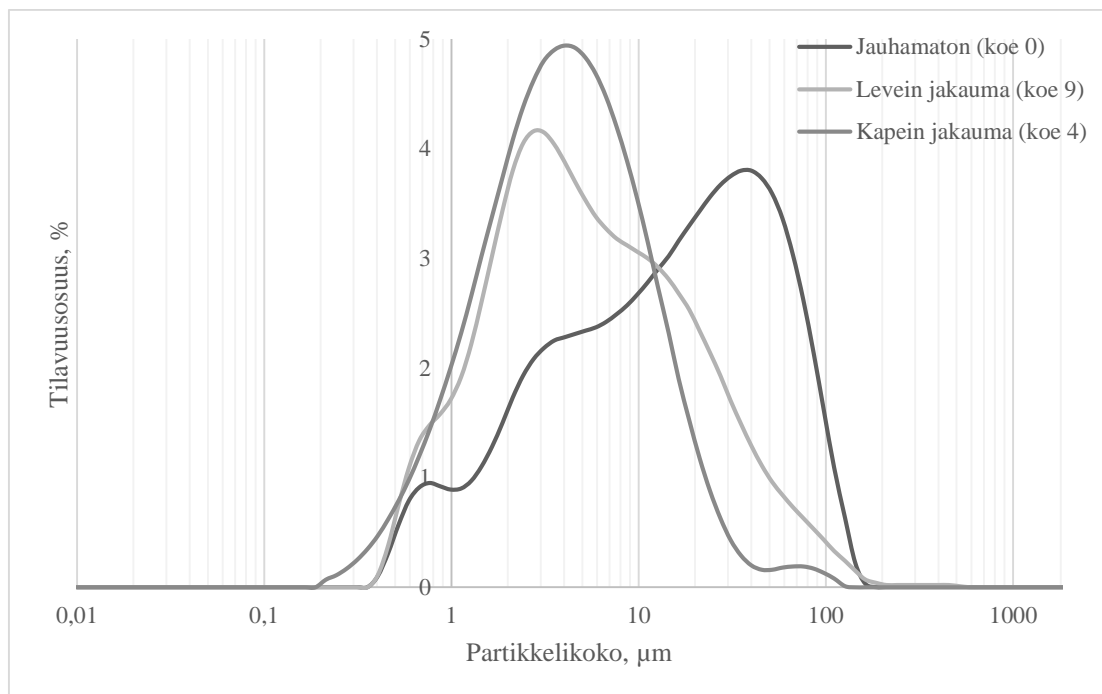
Koe #	Erotus, μm ($D_{[4,3]} - D_{[3,2]}$)	Suhde, - ($D_{90} - D_{10}$)/ D_{50}
0	22,5	4,10
1	9,1	4,07
2	10,2	3,91
3	9,4	3,69
4	4,8	3,12
5	9,5	4,15
6	10,1	4,69
7	8,7	3,43
8	10,0	4,27
9	10,4	5,93
10	11,5	4,19
11	12,1	4,86
12	9,8	3,75
13	11,9	5,07
14	15,3	4,73
15	8,0	4,20
16	10,1	4,28
17	11,4	4,59
18	10,5	4,86
19	13,1	4,61
20	11,5	3,97
21	12,3	4,69
22	17,5	5,26
23	13,1	4,86
24	12,3	4,49
25	11,8	4,92
26	6,9	3,37
27	6,9	3,39
28	6,5	4,07
29	11,8	3,74
30	11,6	5,64
31	13,7	5,66

Jauhamattomalle rikastushiekalle saatiin partikkelikokojakauman leveyden arvoksi 22,5 μm erotusmenetelmällä mitattuna. Erotusmenetelmällä määritetty levein partikkelikokojakauma saatiin kokeessa 22: 17,5 μm ja vastaavasti kapein kokeessa 4: 4,8 μm . Kuvassa 22 on esitetty kokeiden 22 ja 4 partikkelikokojakaumat jauhamattoman rikastushiekan partikkelikokojakauman kanssa.



Kuva 22 Erotusmenetelmä: levein partikkelikokojakauma: 17,5 μm (muuttajat 1 mm, 5 min ja 500 rpm), kapein partikkelikokojakauma 4,8 μm (muuttajat 3 mm, 15 min, 700 rpm). Jauhamattoman rikastushiekan partikkelikokojakauman leveys on 22,5 μm .

Jauhamattomalle rikastushiekalle saatiin partikkelikokojakauman leveyden arvoksi 4,10 suhdemenetelmällä mitattuna. Levein partikkelikokojakauma saatiin kokeessa 9: 5,93 ja vastaavasti kapein kokeessa 4: 3,12. Kuvassa 23 on esitetty kokeiden 9 ja 4 partikkelikokojakaumat jauhamattoman rikastushiekan partikkelikokojakauman kanssa.



Kuva 23 Suhdemenetelmä: levein partikkelikojakauma: 5,93 (muuttujat 1 mm, 15 min ja 700 rpm), kapein partikkelikojakauma 3,12 (muuttujat 3 mm, 5 min, 700 rpm). Jauhamattoman rikastushiekan partikkelikojakauman leveys on 4,10.

Kummassakin partikkelikojakauman leveyden määrittämissä kapein partikkelikojakauma saatiin kokeessa 4. Leveimmän partikkelikojakauman tuloksissa yhtenäistä on helmikoko. Muut jauhatuserot ovat suuremmat suhdemenetelmän leveimmän partikkelikojakauman tuloksessa.

Erotustavalla lasketuissa partikkelikojakauman leveyksissä löytyy enemmän arvoja, jotka selvästi poikkeavat muusta joukosta. $D_{[3,2]}$ ja $D_{[4,3]}$ arvoihin ovat voineet vääristyä joko jauhatuksessa tai partikkelikokoanalysointia varten mitattaessa. Suhdetavalla mitattuina arvot ovat selkeästi lähempänä toisiaan. Tämä voisi johtua siitä, että mahdolliset virheet eivät vaikuta niin voimakkaasti D_{10} , D_{50} ja D_{90} - arvoihin kuin $D_{[3,2]}$ ja $D_{[4,3]}$ - arvoihin. Tämä johtuu siitä, että $D_{[3,2]}$ ja $D_{[4,3]}$ ovat laskennallisia keskiarvokokoja, kun taas D_{10} , D_{50} ja D_{90} määritellään suoraan kumulatiivista partikkelikojakaumasta.

12.4 Suodatus

12.4.1 Kakun ominaisvastus

Kakun keskimääräinen ominaisvastus α_{av} laskettiin jokaisesta suodatuksesta yhtälöllä (7.3) mittausten aikana kerätyn mittausdatan avulla. Mittausdata sisälsi paineen vaihtelun ja suodatuksen aikana kertyneen suodoksen kumulatiivisen massan. Taulukossa XI on esitetty kunkin suodinkakun keskimääräinen ominaisvastus α_{av} . Liitteessä I on esitetty suodatuskokeiden mittauspöytäkirjat.

Taulukko XI Kakun ominaisvastuksen arvo kussakin paineessa

Koe #	α_{av}	α_{av}	α_{av}
	2 bar	4 bar	6 bar
	$\cdot 10^{11} m kg^{-1}$	$\cdot 10^{11} m kg^{-1}$	$\cdot 10^{11} m kg^{-1}$
1	4,98	5,25	5,86
2	4,21	4,60	5,06
3	6,68	7,12	7,87
4	2,32	2,75	3,16
5	5,49	6,03	6,34
6	8,85	10,13	10,55
7	3,08	3,41	3,76
8	5,09	5,35	6,03
9	6,25	7,17	7,56
10	8,80	9,53	9,56
11	6,07	6,70	7,19
12	2,86	3,22	3,63
13	6,62	7,17	8,06
14	5,03	5,56	5,79
15	3,62	4,12	4,43
16	4,84	5,16	5,65
17	8,45	8,52	8,87
18	3,95	4,56	4,98
19	7,97	8,48	8,79
20	4,34	4,78	5,13
21	8,87	9,33	9,91
22	6,77	7,62	7,95
23	4,45	4,91	5,43
24	4,10	4,39	4,82
25	7,24	7,00	8,22
26	2,50	2,92	3,30
27	2,35	2,80	3,09
28	3,04	3,53	4,00
29	3,35	3,84	3,91
30	5,79	6,38	7,10
31	6,37	7,34	8,06

Suodinkakun keskimääräisen ominaisvastuksen arvo vaihtelee riippuen suodatukseen kuluvasta ajasta, suodinkakun paksuudesta ja lietteen kiintoainepitoisuudesta. Vakiopainesuodatuksissakin suodatuspaine vaihtelee sitä mukaan kun suodinkakun paksuus kasvaa [21].

Partikkelikokojakauma ja suodinkakun keskimääräinen ominaisvastus ovat yhteydessä toisiinsa Kozeny-Carman [21] yhtälöllä (yhtälö 7.8). Kakun keskimääräisten ominaisvastusten arvojen vaihteluissa näkyy Sauterin keskiarvohalkaisijan $D_{[3,2]}$ muuttuminen eri jauhatuspanoksissa. Taulukosta XI nähdään, että kakun keskimääräinen ominaisvastus on alhaisin kokeessa neljä: $2,32 \cdot 10^{11} \text{ m kg}^{-1}$, $2,75 \cdot 10^{11} \text{ m kg}^{-1}$ ja $3,16 \cdot 10^{11} \text{ m kg}^{-1}$ (2, 4 ja 6 bar). Kokeessa 4 on myös mitattu jauhatustulosten pienin Sauterin keskiarvohalkaisija (3,09 μm).

Pieniä ominaisvastusten arvoja selittävät kokeessa 4 saatu tiheysjakauman muoto (esimerkiksi kuvassa 23). Tiheysjakauma on kapea ja korkea eli näytteen partikkelit koiden väliset erot ovat pieniä. Partikkelit saatiin jauhettua hyvin pieniksi tässä kokeessa, mikä johtaa kapeaan partikkelikokojakaumaan ja edelleen kapea partikkelikokojakauma näyttää kasvattavan suodinkakun keskimääräistä huokoisuutta (taulukko XII). Kokeissa nähtiin että hyvin hienoksi jauhetut näytteen suodattuivat nopeasti, mikä selittyisi korkealla keskimääräisellä huokoisuudella ja siten kautta myös vaikuttaa pieniin ominaisvastuksen arvoihin.

Muutama suodinkakun keskimääräisen ominaisvastuksen arvo on selkeästi muita suurempi, kuten esimerkiksi kokeissa 6, 10 ja 17. Niille yhteistä on muun muassa lietteen alhainen kiintoainepitoisuus (n. 9 p- %), mikä nostaa suodinkakun keskimääräistä ominaisvastusta. Ominaisvastuksen kasvu alhaisella suodatettavan lietteen kiintoainepitoisuudella johtuu siitä, että kakku muodostuu hitaasti ja sillä tulee olemaan pienempi huokoisuus.

12.4.2 Huokoisuus

Huokoisuus kuvaa suodinkakun huokosten tilavuuden suhdetta koko suodinkakun tilavuuteen [21]. Suodinkakkujen keskimääräiset huokoisuudet laskettiin yhtälöiden (7.6 ja 7.7) avulla, siten että ensin laskettiin kiintoaineen osuus koko suodinkakun tilavuudesta. Loppu osuus on muuta kuin kiintoainetta, mikä kuvaa kakun huokoisuutta.

Taulukossa XII on esitetty suodinkakun keskimääräinen huokoisuus, ε_{av} , jokaisessa kokeessa ja kolmessa eri suodatuspaineessa. Siitä nähdään, että huokoisuus on pääsääntöisesti suurin pienimmällä suodatuspaineella.

Taulukko XII Suodinkakkujen keskimääräiset huokoisuudet kussakin suodatuskokeessa ja –paineessa.

<i>Koe #</i>	ε_{av} , - 2 bar	ε_{av} , - 4 bar	ε_{av} , - 6 bar
0	0,511	0,500	0,508
1	0,585	0,564	0,542
2	0,578	0,565	0,561
3	0,551	0,562	0,537
4	0,654	0,642	0,635
5	0,570	0,569	0,562
6	0,572	0,549	0,553
7	0,588	0,582	0,564
8	0,566	0,560	0,548
9	0,596	0,581	0,571
10	0,555	0,530	0,534
11	0,555	0,548	0,548
12	0,583	0,572	0,565
13	0,553	0,568	0,533
14	0,528	0,535	0,529
15	0,597	0,590	0,587
16	0,544	0,565	0,579
17	0,518	0,543	0,546
18	0,574	0,583	0,573
19	0,555	0,551	0,548
20	0,565	0,545	0,546
21	0,554	0,537	0,533
22	0,523	0,523	0,520
23	0,554	0,546	0,549
24	0,566	0,554	0,546
25	0,547	0,549	0,551
26	0,611	0,600	0,596
27	0,622	0,611	0,599
28	0,623	0,623	0,621
29	0,561	0,552	0,545
30	0,588	0,573	0,560
31	0,575	0,551	0,542

Suodinkakun keskimääräinen huokoisuus kasvaa kun etäisyys suodatinväliaineeseen kasvaa [22]. Eli paksummalla kakulla on suurempi huokoisuus kuin ohuemalla kakulla. Suodinkakkujen paksuudet jokaisessa kokeessa ja kullekin suodatuspaineelle on esitetty liitteessä II. Taulukosta XII huomataan, että kokeessa 4 on selvästi muista eroava keskimääräinen huokoisuus. Kakun paksuus näissä suodatuskokeissa on ollut 14,05 mm (2 bar), 13,75 mm (4 bar) ja 13,35 mm (6 bar). Arvot ovat keskiarvoa jonkin verran suuremmat, kun keskimäärin suodinkakun paksuus on ollut esimerkiksi 2 bar paineessa 9,43 mm. Jauhamattoman rikastuslietteen suodinkakun paksuus oli 8,23 mm (2 bar), 7,60 mm (4 bar) ja 8,05 mm (6 bar) ja niitä vastaavat huokoisuudet 0,511, 0,500 ja 0,508.

Jauhatuksella näyttäisi olevan vaikutusta huokoisuuteen, koska jauhamattoman rikastushiekan keskimääräinen huokoisuus pysyy lähes vakiona suodatuspaineen muutoksesta huolimatta. Kuten jo ominaisvastuksia verratessa tuli ilmi, korkean huokoisuuden omaavissa kokeissa (esimerkiksi kokeet 4, 26, 27 ja 28) partikkelit saatiin jauhettua pieniksi ja suodatukseen kulunut aika oli lyhyt. Lyhyessä suodatusajassa kakun on täytynyt muodostua äkkiä ja kakkujen keskimääräiset huokoisuudet ovat sen myötä suuremmat.

12.5 Regressioanalyysi

Regressioanalyysin avulla ennustetaan riippuvaisen muuttujan arvoa, kun riippumattomat muuttujat tunnetaan sekä selvitetään onko riippumattomien ja riippuvien muuttujien välillä korrelaatiota. Riippumaton muuttuja on selittävä tekijä eli x-muuttuja ja riippuvainen muuttuja on selitettävä tekijä eli y-muuttuja [33, 34].

Regressioanalyysin mallin hyvyttä kuvataan selityskertoimella eli selitysasteella (R ja R square). Se kertoo kuinka luotettavia mallin avulla ennustetut riippuvat muuttujat ovat. Mitä suurempi selityskerroin mallille saadaan, sitä parempi malli on kyseessä. Selityskerroin on hyödyllinen tietää, kun tarkastellaan mitkä muuttujat kannattaa pitää mallissa mukana. Jos jonkin muuttujan poistaminen tai lisääminen kasvattaa selityskerrointa, niin se on oikeutettua [33].

Mallin merkitsevyys saadaan F-testillä [4]. Se kertoo miten malli on kokonaisuutena tilastollisesti merkittävä. P-arvo kertoo mikä tai mitkä muuttujat ovat mallin kannalta kaikkein oleellisimpia. Mitä pienempi P-arvo, sitä merkityksellisempi muuttuja on tilastollisesti. Jos jonkin muuttujan P-arvo on suurempi kuin 0,050 [34] 95 % luottamustasolla, tällöin tätä muuttujaa ei voida pitää tilastollisesti merkitsevänä. Muuttuja tulisi silloin poistaa mallista.

Regressiotulosten taulukoiden XIII-XVII kertoimien itsearvoista nähdään suoraan kunkin muuttujan vaikutus vasteeseen, koska analyysi suoritettiin normitetuilla arvoilla (-1, 0 ja 1). Jos arvo on taulukossa negatiivinen, silloin muuttujan kasvattaminen (esimerkiksi jauhatusajan pidentäminen) pienentää vastetta ja muuttujan pienentäminen kasvattaa vasteen arvoa.

12.5.1 Sauterin keskiarvohalkaisija, $D_{[3,2]}$

Sauterin keskiarvohalkaisija kuvaa partikkelikokojakauman keskimääräisen pinta-alan mukaisen halkaisijan. Taulukkoon XIII on listattu regressioanalyysin tulokset koskien Sauterin halkaisijaa ja jauhatusmuuttujia. Nollakoetta ei otettu mukaan.

Taulukko XIII Lineaarisen regression tulokset $D_{[3,2]}$ 95 % luottamustasolla, kuvaten muuttujien välisiä suhteita ja suuntaa kertoimien ja P-arvon avulla.

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>t-arvot</i>	<i>P-arvo</i>
Leikkauspiste	3,694	0,019	190,01	$6,5 \cdot 10^{-118}$
x_1 , helmikoko	0,052	0,026	2,03	0,046
x_2 , aika	-0,273	0,026	-10,69	$1,2 \cdot 10^{-17}$
x_3 , nopeus	-0,172	0,026	-6,73	$1,6 \cdot 10^{-9}$

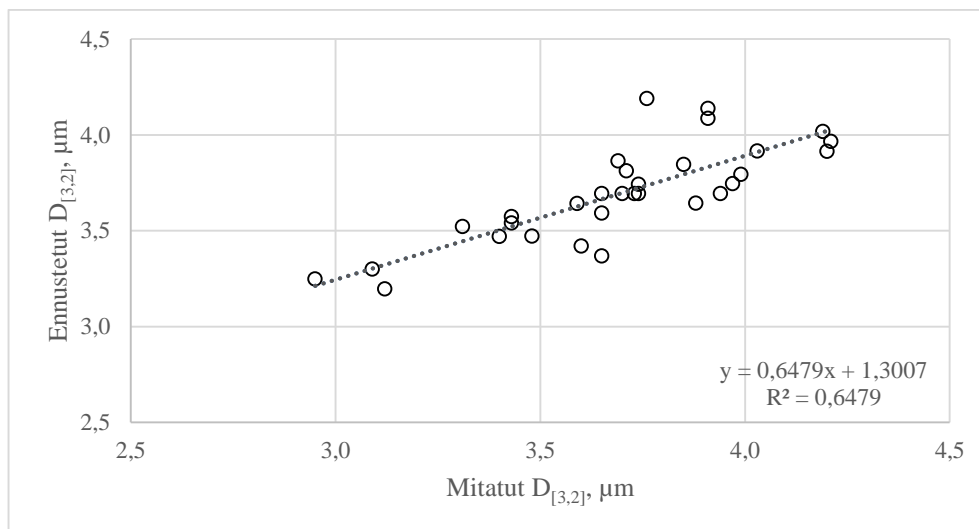
Sauterin keskiarvohalkaisijan ja jauhatusparametrien välisen regressioanalyysin korrelaatiokertoimen arvoksi saatiin 0,80 ja selityskertoimelle arvoksi 0,64. Yhtälön (8.6) mukainen regressioyhtälö on muotoa $y = 0,052 \cdot x_1 - 0,273 \cdot x_2 - 0,172 \cdot x_3 + 3,694$, jossa β_0 on leikkauspisteen kerroin, β_1 helmikoon kerroin, β_2 jauhatusajan kerroin ja β_3 sekoitusnopeuden kerroin.

Kertoimien itseisarvoista nähdään, että muuttujista jauhatusajalla on suurin vaikutus Sauterin keskiarvohalkaisijaan. Sen itseisarvo on kaikkein suurin. Jauhatusajan pidentämisen vaikutus tulee esiin kokeissa nro. 10 ja 21. Kokeessa 10 jauhatusaika on 5 min ja $D_{[3,2]}$ on 3,91 μm . Koe 21 suoritettiin 10 min jauhatuksena ja $D_{[3,2]}$ arvoksi saatiin 3,71 μm .

Jauhatusajan ja sekoituselimen pyörimisnopeuden kasvaessa $D_{[3,2]}$ arvo pienenee. P-arvoiltaan nämä kaksi muuttujaa ovat myös tilastollisesti merkitsevimmät, P-arvojen ollessa pienimmät kun leikkauspisteen P-arvoa ei huomioida.

Helmikoon kasvattaminen vastaavasti kasvattaa Sauterin halkaisijaa. Sen P-arvo on kaikkein pienin eli muuttujalla on vähiten vaikutusta tilastollisesti. Esimerkkinä kokeissa nro. 1 ja 12 helmikoon kasvattaminen muuttaa Sauterin halkaisijaa arvosta 3,65 μm 3,97 μm :iin.

Kuvassa 24 on esitetty mitatut ja ennustetut $D_{[3,2]}$ arvot.



Kuva 24 $D_{[3,2]}$ mitattujen ja regression avulla ennustettujen arvojen muodostama joukko.

12.5.2 D_{50} -mediaanipartikkelikoko

Mediaanikoko D_{50} jakaa tilavuuskokojakaumana esitetyn partikkelikokojakauman puoliksi, siten että 50 % näytteen partikkeleista on halkaisijaltaan pienempiä kuin sen ilmoittama luku [2]. Taulukkoon XIV on listattu regressioanalyysin tulokset koskien keskiarvopartikkelikokoa. Regressioanalyysi suoritettiin ilman jauhamattoman rikastushiekan tuloksia.

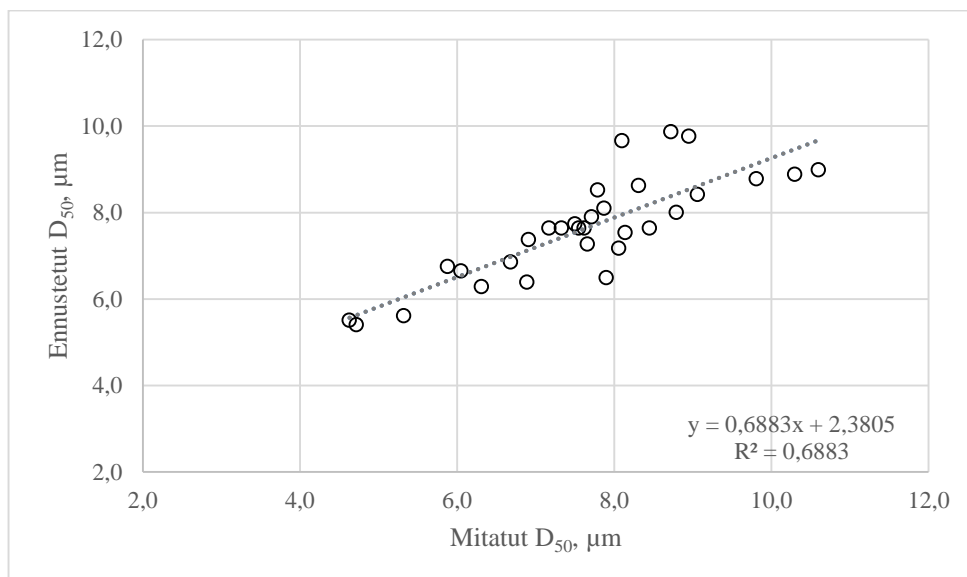
Taulukko XIV Lineaarisen regression tulokset D_{50} 95 % luottamustasolla, kuvaten muuttujien välisiä suhteita ja suuntaa kertoimien ja P-arvon avulla.

	Kertoimet	Keskivirhe	t-arvo	P-arvo
Leikkauspiste	7,638	0,083	91,72	$6,5 \cdot 10^{-90}$
x_1 , helmikoko	-0,103	0,109	-0,94	0,35
x_2 , aika	-1,247	0,109	-11,41	$4,1 \cdot 10^{-19}$
x_3 , nopeus	-0,884	0,109	-8,09	$2,9 \cdot 10^{-12}$

Keskiarvopartikkelikoon ja jauhatusparametrien välisen regressioanalyysin korrelaatiokerroimen arvoksi saatiin 0,83 ja selityskertoimelle arvoksi 0,69. Yhtälön (8.6) mukainen regressioyhtälö on muotoa $y = -0,103 \cdot x_1 - 1,247 \cdot x_2 - 0,884 \cdot x_3 + 7,638$, jossa β_0 on leikkauspisteen kerroin, β_1 helmikoon kerroin, β_2 jauhatusajan kerroin ja β_3 sekoitusnopeuden kerroin.

Taulukon XIV kertoimien etumerkistä nähdään, että kaikkien muuttujien kasvattaminen pienentää keskiarvopartikkelin D_{50} -kokoja. Merkittävin muuttuja on jauhatusaika, koska sen kertoimen itseisarvo on kaikkein suurin. Samalla se on myös tilastollisesti merkittävin pienimmällä P-arvolla.

Helmikoko on vähiten merkittävä, koska sen kertoimen itseisarvo on kaikkein pienin. Lisäksi sen P-arvo on yli 0,05 mikä tarkoittaa, ettei se muuttujana olisi tilastollisesti merkittävä ollenkaan. Kuvassa 25 on esitetty mitattujen ja mallin avulla ennustettujen keskiarvopartikkelikokojen jakautuminen.



Kuva 25 D_{50} mitattujen ja regression avulla ennustettujen arvojen muodostama joukko.

12.5.3 D_{90} -partikkelikoko

D_{90} – partikkelikoko jakaa tilavuuskokojakaumana esitetyn partikkelikokojakauman siten, että 90 % näytteen partikkeleista olevan halkaisijaltaan pienempiä kuin sen ilmoittama arvo. Taulukkoon XV on listattu regressioanalyysin tulokset.

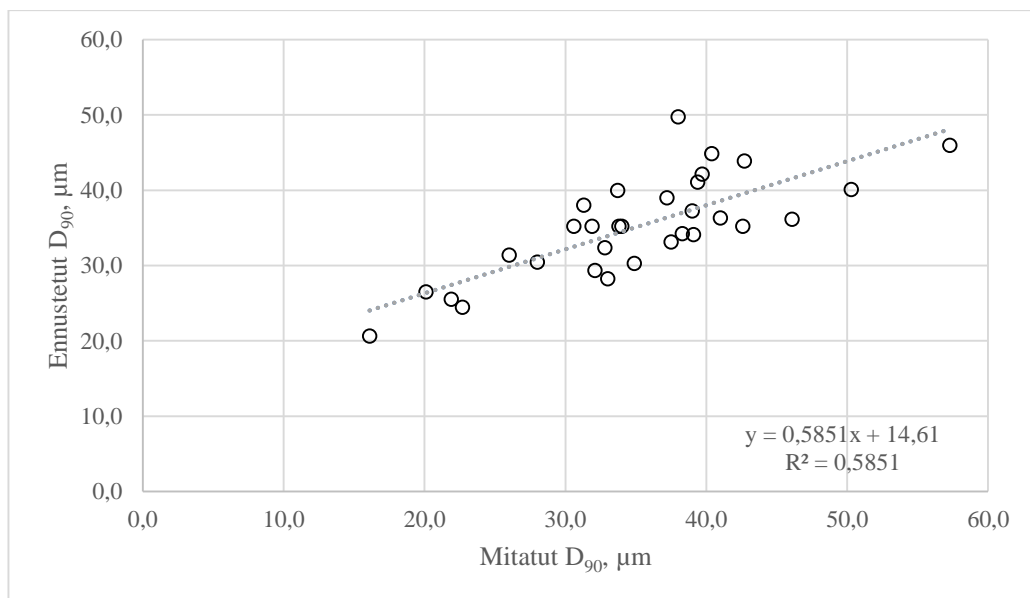
Taulukko XV Lineaarisen regression tulokset D_{90} 95 % luottamustasolla, kuvaten muuttujien välisiä suhteita ja suuntaa kertoimien ja P-arvon avulla.

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>t-arvo</i>	<i>P-arvo</i>
Leikkauspiste	35,210	0,580	60,71	$3,2 \cdot 10^{-74}$
x_1 , helmikoko	-5,861	0,761	-7,70	$1,8 \cdot 10^{-11}$
x_2 , aika	-4,894	0,761	-6,43	$6,2 \cdot 10^{-9}$
x_3 , nopeus	-3,794	0,761	-4,99	$3,0 \cdot 10^{-6}$

D_{90} -partikkelikoon ja jauhatusparametrien välisen regressioanalyysin korrelaatiokerroimen arvoksi saatiin 0,76 ja selityskertoimelle arvoksi 0,59. Yhtälön (8.6) mukainen regressioyhtälö on muotoa $y = -5,861 \cdot x_1 - 4,894 \cdot x_2 - 3,794 \cdot x_3 + 35,210$, jossa β_0 on leikkauspisteen kerroin, β_1 helmikoon kerroin, β_2 jauhatusajan kerroin ja β_3 sekoitusnopeuden kerroin.

Taulukosta XV nähdään, että merkittävin muuttuja D_{90} -arvon muuttumisessa on helmikoko, koska sen kertoimen itseisarvo on suurin. Samalla se on myös tilastollisesti merkittävin pienimmällä P-arvolla. Jauhatusaika on seuraavaksi merkittävin sekä kertoimen itseisarvolla että P-arvolla mitaten. Näillä mittareilla sekoittimen pyörimisnopeudella on vähiten vaikutusta jauhetun rikastushiekan D_{90} -partikkelikokoarvoon.

Kuvassa 26 on esitetty mitattujen ja regressiomallin avulla ennustettujen D_{90} -arvot.



Kuva 26 D_{90} mitattujen ja regression avulla ennustettujen arvojen muodostama joukko.

12.5.4 Partikkelin ominaispinta-ala, S_w

Partikkelin ominaispinta-ala on laskettu yhtälön (6.3) avulla, kun tiedettiin partikkelikokojakauman $D_{[3,2]}$ - arvo ja kiintoaineen tiheys. Taulukkoon XVI on listattu regressioanalyysin tulokset koskien rikastushiekan partikkelien ominaispinta-alaa ja jauhatusparametreja. Nollakoetta ei otettu huomioon.

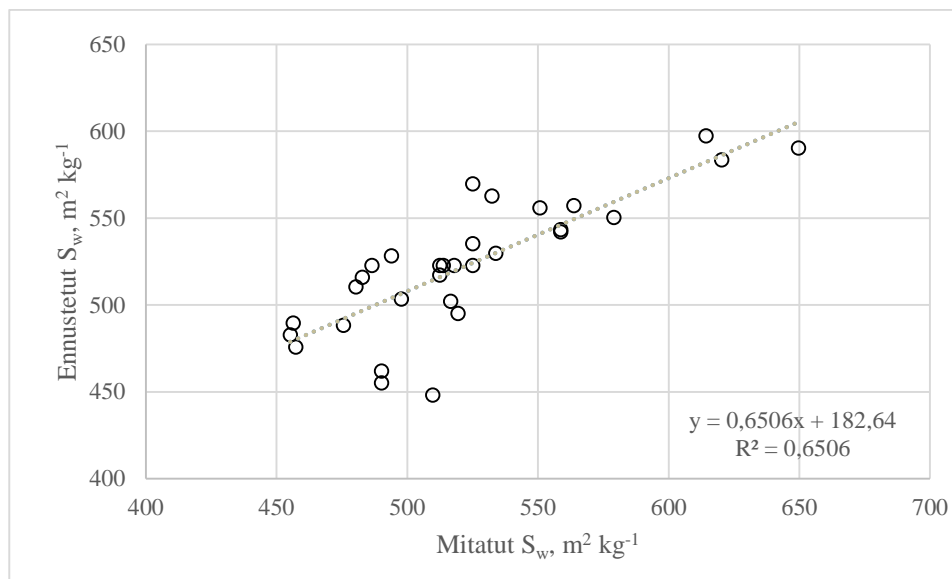
Taulukko XVI Lineaarisen regression tulokset S_w 95 % luottamustasolla, kuvaten muuttujien välisiä suhteita ja suuntaa kertoimien ja P-arvon avulla.

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>t-arvo</i>	<i>P-arvo</i>
Leikkauspiste	522,72	2,907	179,82	$8,7 \cdot 10^{-116}$
x_1 , helmikoko	- 6,90	3,815	- 1,81	0,074
x_2 , aika	40,03	3,815	10,49	$3,1 \cdot 10^{-17}$
x_3 , nopeus	27,60	3,815	7,24	$1,6 \cdot 10^{-10}$

Partikkelien ominaispinta-alan ja jauhatusparametrien välisen regressioanalyysin korrelaatiokertoimen arvoksi saatiin 0,80 ja selityskertoimelle arvoksi 0,65. Yhtälön (8.6) mukainen regressioyhtälö on muotoa $y = - 6,90 \cdot x_1 + 40,03 \cdot x_2 + 27,60 \cdot x_3 + 522,72$, jossa β_0 on leikkauspisteen kerroin, β_1 helmikoon kerroin, β_2 jauhatusajan kerroin ja β_3 sekoitusnopeuden kerroin.

Suurin kertoimen itseisarvo muuttujista on jauhatusajalla ja se on myös P-arvoltaan pienin. Se on kokeellisesti ja tilastollisesti merkittävin muuttuja partikkelin ominaispinta-alaan. Jauhatusaika ja sekoitusnopeus ovat kertoimiltaan positiivisia, joten niiden muuttujien kasvattaminen pienentää partikkelin ominaispinta-alaa. Myös $D_{[3,2]}$ regressioanalyysissä aika ja nopeus osoittautuivat merkittävimiksi muuttujiksi. Yhtäläisyys johtuu siitä, että partikkelin ominaispinta-alan laskennassa on tarvittu $D_{[3,2]}$ arvoa.

Helmikoon kerroin on ainoana negatiivinen ja huomattavasti pienempi kuin muiden muuttujien kertoimien arvot. Lisäksi sen P-arvo on yli 0,05 mikä tarkoittaa, ettei se muuttujana olisi tilastollisesti merkittävä ollenkaan. Ominaispinta-alan mitatut sekä mallin avulla ennustetut arvot ovat esitetty kuvassa 27.



Kuva 27 S_w mitattujen ja regression avulla ennustettujen arvojen muodostama joukko.

12.5.5 Kakun keskimääräinen ominaisvastus, α_{av}

Suodinkakun keskimääräisen ominaisvastuksen ja koesarjan muuttujien välisen regressioanalyysin tuloksia on taulukossa XVII. Edellisistä poiketen, tässä regressioanalyysissä on mukana myös suodatuspaine yhtenä muuttujista. Jauhamaton rikastushiekka ei ollut mukana regressioanalyysissä.

Taulukko XVII Lineaarisen regression tulokset α_{av} 95 % luottamustasolla, kuvaten muuttujien välisiä suhteita ja suuntaa kertoimien ja P-arvon avulla.

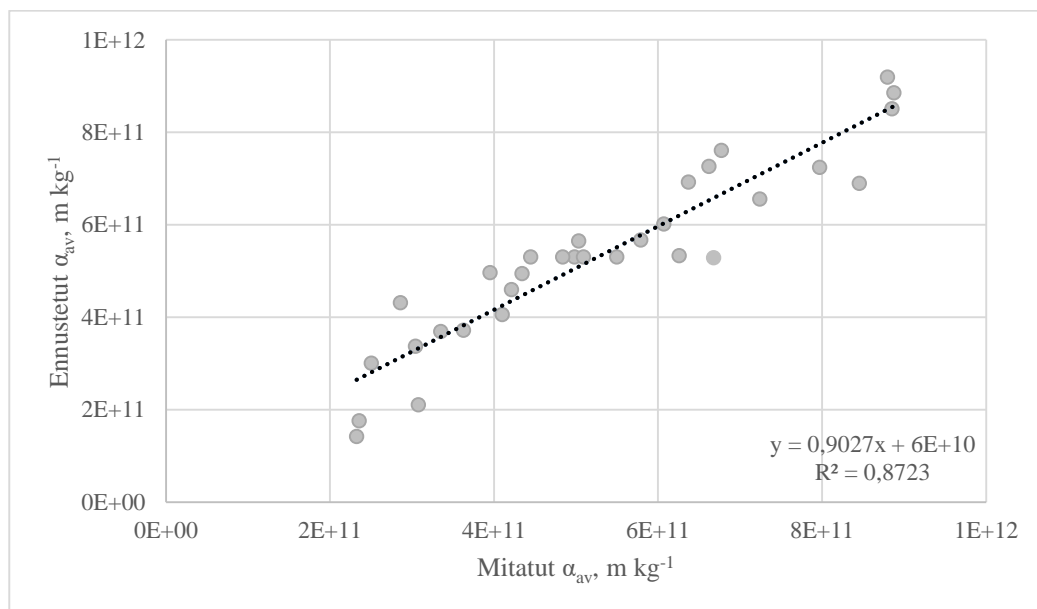
	Kertoimet $\cdot 10^{11}$	Keskivirhe $\cdot 10^9$	t-arvo	P-arvo
Leikkauspiste	5,79	7,20	80,36	$3,83 \cdot 10^{-84}$
x_1 , helmikoko	-1,96	9,45	-20,70	$1,38 \cdot 10^{-35}$
x_2 , aika	-0,34	9,45	-3,62	0,00048
x_3 , nopeus	-1,59	9,45	-16,83	$2,92 \cdot 10^{-29}$
x_4 , suodatuspaine	0,48	8,82	5,44	$4,68 \cdot 10^{-7}$

Kakun keskimääräisen ominaisvastuksen ja muuttujien välillä on selkeästi korrelaatio, korrelaatiokertoimeksi 0,94 ja selityskertoimen arvoksi 0,89. Yhtälön (8.6) mukainen regressioyhtälö on muotoa $y = -1,96 \cdot x_1 - 0,34 \cdot x_2 - 1,59 \cdot x_3 + 0,48 \cdot x_4 + 5,79$, jossa β_0 on leikkauspisteen kerroin, β_1 helmikoon kerroin, β_2 jauhatusajan kerroin, β_3 sekoitusnopeuden kerroin ja β_4 suodatuspaineen kerroin.

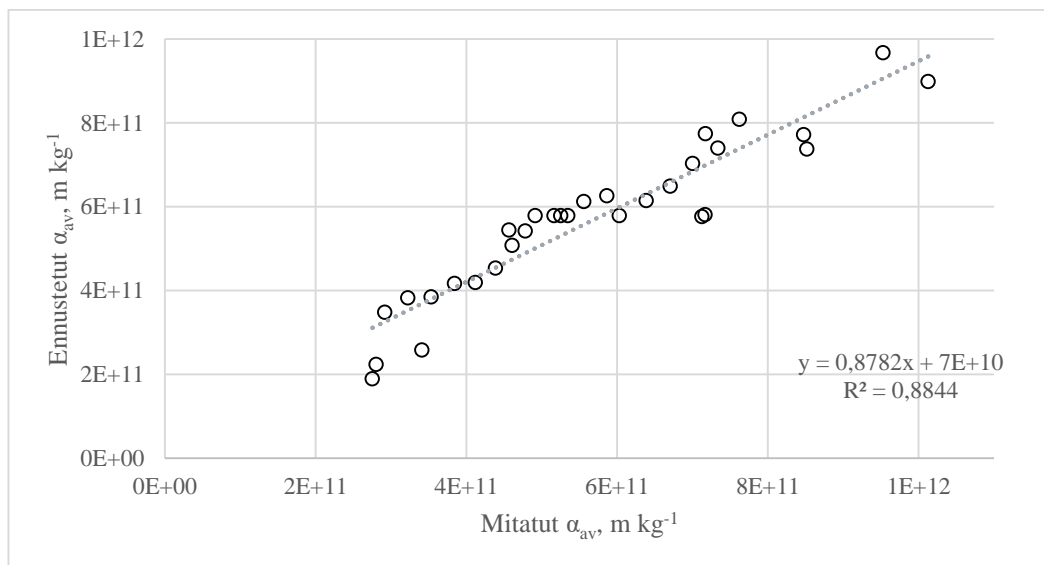
Suurin kertoimen itseisarvo muuttujista on helmikoolla ja vastaavasti pienin on jauhatusajalla. Helmikoon jälkeen suurin kertoimen itseisarvon on sekoitusnopeudella. Tilastollisesti merkittävin muuttuja pienimmällä P-arvolla on helmikoko ja seuraavaksi merkittävin on sekoitusnopeus.

Kertoimista voidaan tehdä seuraavat päätelmät: 1) helmikoon kasvaessa kakun ominaisvastus pienenee. Kokeessa 1 α_{av} on $4,98 \cdot 10^{+11}$ ja kokeessa 12 α_{av} on $2,86 \cdot 10^{+11}$. Muut muuttujat pysyivät samoina. 2) Pienemmällä jauhatusajalla kakun ominaisvastus kasvaa. Kokeessa 8 α_{av} on $5,09 \cdot 10^{+11}$ ja kokeessa 14 α_{av} on $5,03 \cdot 10^{+11}$. 3) Jauhatuksessa sekoitusnopeuden kasvattaminen pienentää kakun ominaisvastusta. Kokeessa 13 α_{av} on $6,62 \cdot 10^{+11}$ ja kokeessa 30 α_{av} on $5,79 \cdot 10^{+11}$.

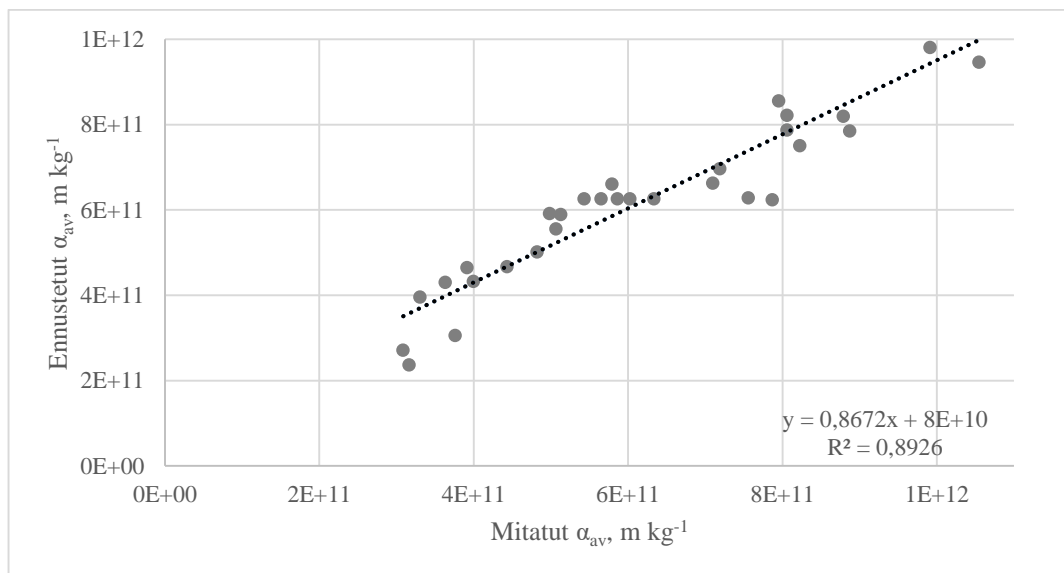
Mitattujen suodinkakkujen keskimääräisten ominaisvastuksien ja mallin avulla ennustettujen ominaisvastusten muodostama joukko on esitetty kuvissa 28 – 30, jaoteltuna suodatuspaineittain siten, että kuvassa 28 on 2 bar, kuvassa 29 4 bar ja kuvassa 30 6 bar suodatus.



Kuva 28 Mitattujen kakun keskimääräisten ominaisvastusten α_{av} (2 bar) ja regression avulla ennustettujen arvojen muodostama joukko (ilman 0-koetta).



Kuva 29 Mitattujen kakun keskimääräisten ominaisvastusten α_{av} (4 bar) ja regression avulla ennustettujen arvojen muodostama joukko (ilman 0-koetta).



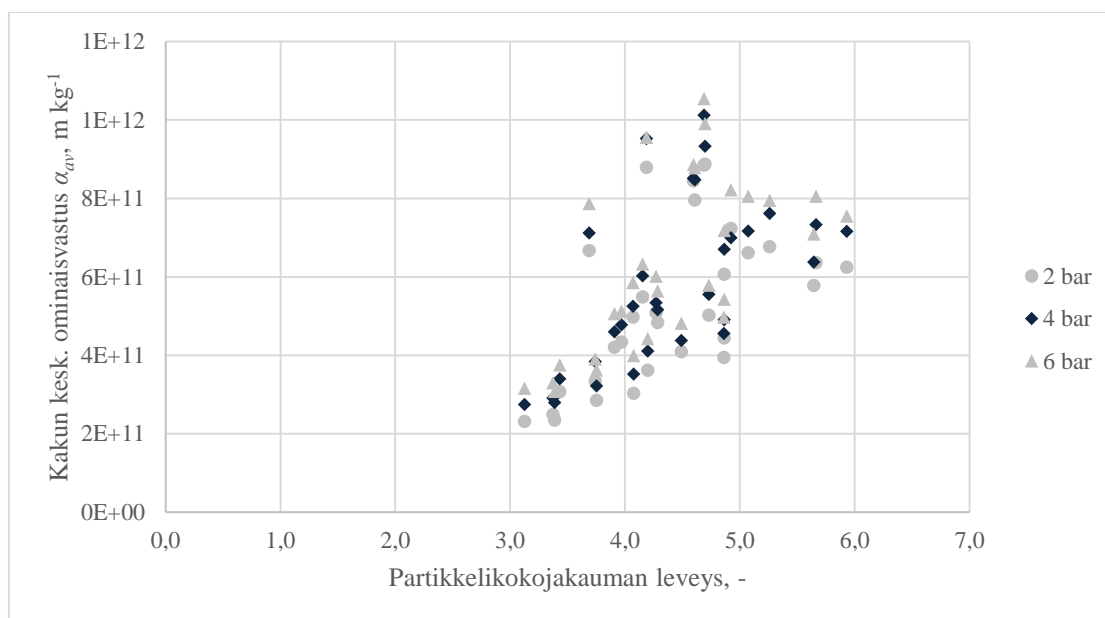
Kuva 30 Mitattujen kakun keskimääräisten ominaisvastusten α_{av} (6 bar) ja regression avulla ennustettujen arvojen muodostama joukko (ilman 0-koetta).

Kuvista 28–30 nähdään että selitysaste (R^2 -arvo) paranee kun paine kasvaa. Silloin pisteiden etäisyys on pienempi kuvaan piirrettyyn suoraan nähden. Mallin avulla saadut ennustetut kakun keskimääräiset ominaisvastukset ovat hieman luotettavampia suuremmissa paineissa.

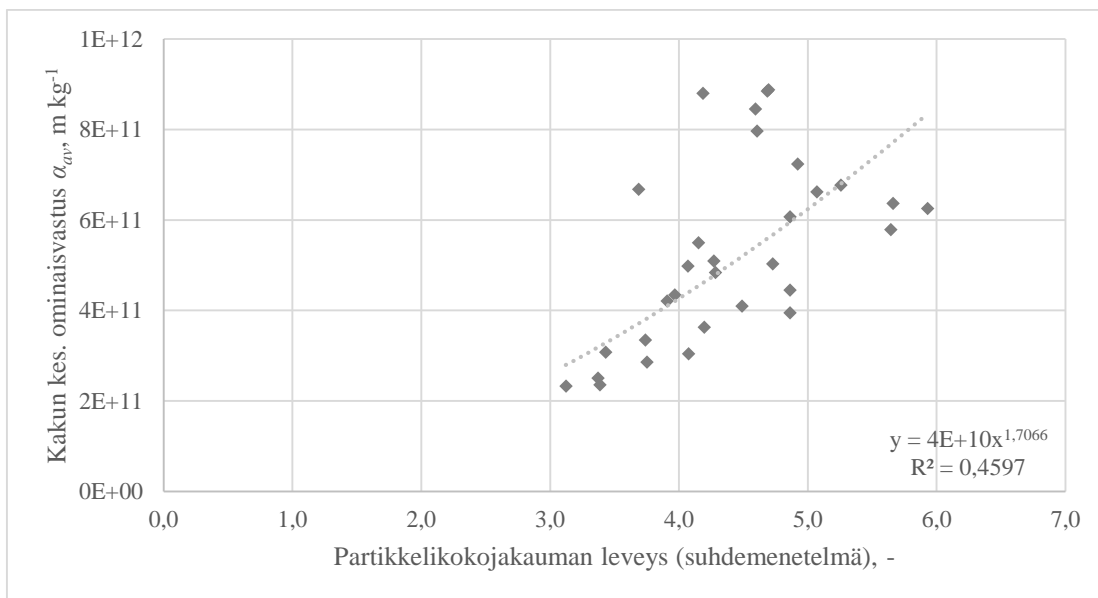
12.6 Partikkelikokojakauman leveys ja kakun ominaisvastus

Suhdemenetelmässä [23] verrataan D_{10} , D_{50} ja D_{90} parametreja. Ne kuvastavat 10 %, 50 % ja 90 % osuuksia näytteen partikkeleiden halkaisijoista, jotka ovat pienempiä kuin vastaavat halkaisijat. Tilavuuskokojakaumassa tämä tarkoittaa D_{10} , D_{50} ja D_{90} ovat halkaisijat, jotka jakavat partikkelien kokonaistilavuuden 10 %, 50 % ja 90 % alueisiin.

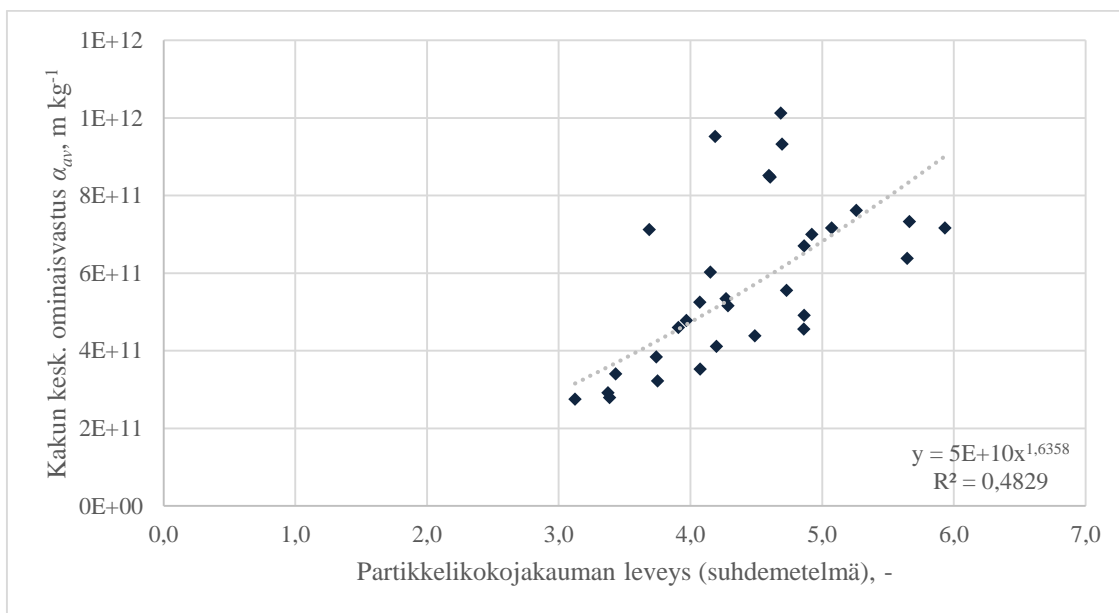
Suodinkakkujen keskimääräiset ominaisvastukset on esitetty partikkelikokojakauman leveyden funktiona kuvassa 31. Seuraavissa kuvissa (kuvat 32–34) on kuvan 31 mukaiset pisteet eriteltyinä paineittain omiin kuviin. Näihin kolmeen kuvaan on sovitettu potenssifunktio ja kuvien alalaidassa on sovitteen yhtälö sekä R^2 -arvo.



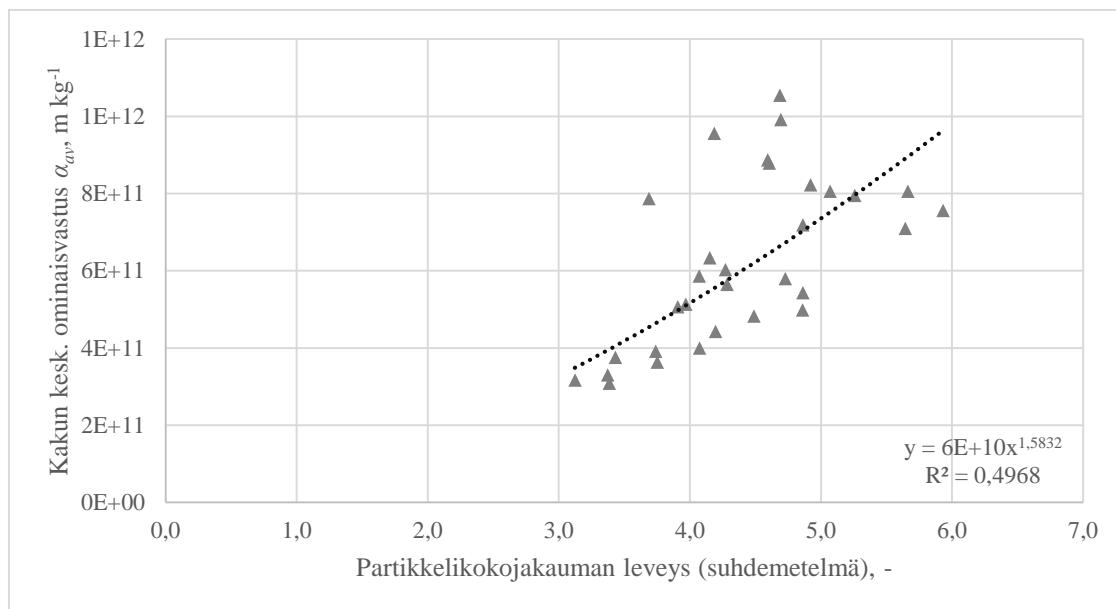
Kuva 31 Kakun keskimääräinen ominaisvastus jakauman leveyden funktiona kolmessa eri suodatuspaineessa.



Kuva 32 Kakun keskimääräinen ominaisvastus (2 bar) jakauman leveyden funktiona.



Kuva 33 Kakun keskimääräinen ominaisvastus (4 bar) jakauman leveyden funktiona.



Kuva 34 Kakun keskimääräinen ominaisvastus (6 bar) partikkelikokojakauman leveyden funktiona.

Partikkelikokojakauman leveyden ja kakun keskimääräisen ominaisvastuksen välillä näyttäisi olevan yhteys. Partikkelikokojakauman ollessa kapea, kakun keskimääräinen ominaisvastus on pienempi. Partikkelikokojakauman leveyden kasvaessa kakun keskimääräinen ominaisvastus kasvaa.

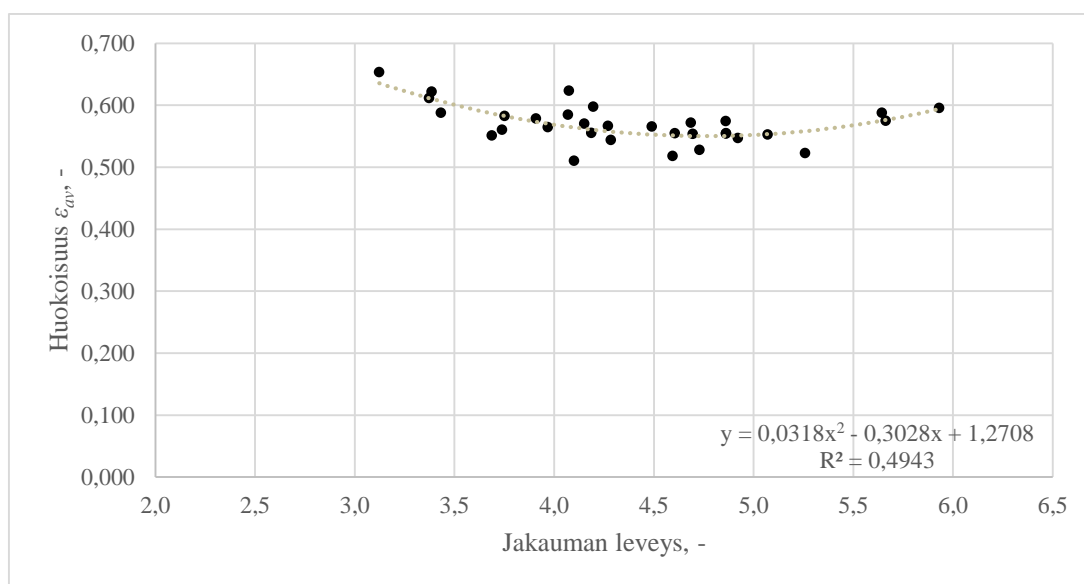
Pisteille, jotka ovat selvästi sovitteen yläpuolella, on yhteistä lietteen matala kiintoainepitoisuus (n. 9 p- %). Tämä johtaa laskennassa siihen, että kakun ominaisvastus kasvaa suureksi näissä kokeissa. Kokeissa 3, 10, 17, 19, 21, 25 lietteen kiintoainepitoisuus oli suodatusvaiheessa alle 10 p- %, mikä vaikutti kakun keskimääräisen ominaisvastuksen arvoon laskennassa.

Kuviin 32 – 35 saadaan sovitettua suora ja R^2 -arvo kasvaa kun suodatuspaine kasvaa. 2 bar paineessa R^2 on 0,46, 4 bar 0,48 ja suurimmassa 6 bar paineessa 0,50. Sovitteen kulmakerroin muuttuu myös merkittävästi kuvien välillä, siten että korkeimmassa paineessa käyrä on jyrkin ja loivenee kun suodatuspaine alenee. Tästä voisi päätellä, että 6 bar paineessa kakun keskimääräinen ominaisvastus on herkempi partikkelikokojakauman leveyden vaihtelulle.

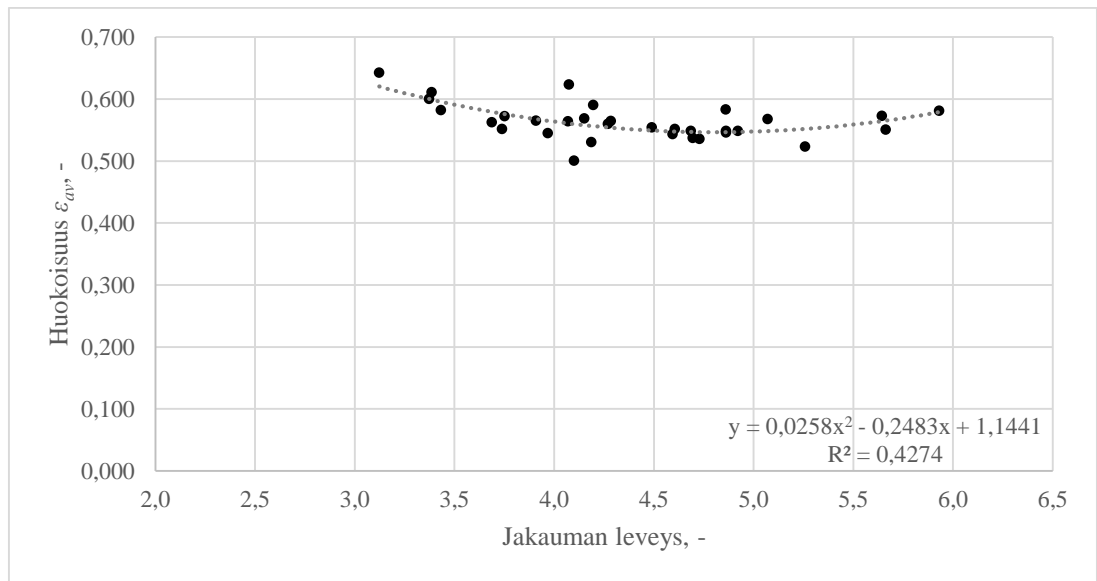
12.7 Partikkelikokojakauman leveys ja huokoisuus

Myös partikkelikokojakauman leveyden ja kakun keskimääräisen huokoisuuden välillä näyttäisi olevan yhteys. Jakauman ollessa kapeimmillaan tai leveimmillään, suodinkakun keskimääräinen huokoisuus on suurimmillaan. Huokoisuudet (2 bar) on esitetty jakauman leveyden funktiona kuvassa 35. Vastaavat kuvaajat 4 ja 6 bar:in paineissa löytyvät kuvista 36 - 37.

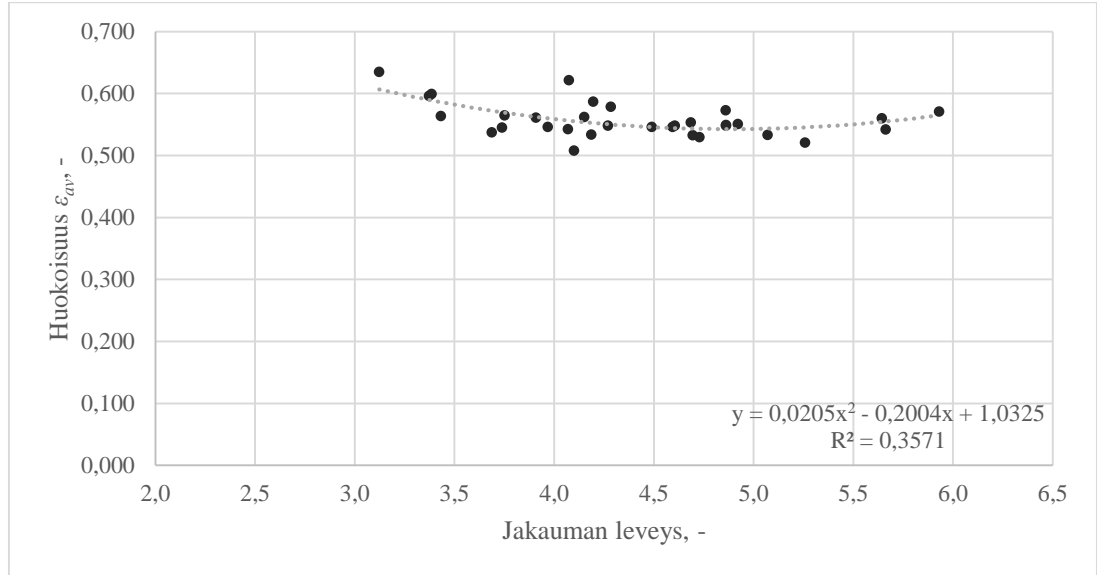
Päinvastoin kuin kakun ominaisvastuksen kanssa, sovituksen R^2 -arvo pienenee kun paine kasvaa.



Kuva 35 Suodinkakun keskimääräinen huokoisuus (2 bar) jakauman leveyden funktiona.



Kuva 36 Suodinkakun keskimääräinen huokoisuus (4 bar) jakauman leveyden funktiona.



Kuva 37 Suodinkakun keskimääräinen huokoisuus (6 bar) jakauman leveyden funktiona.

13 JOHTOPÄÄTÖKSET

Regressioanalyysin perusteella eniten Sauterin keskiarvohalkaisijan ($D_{[3,2]}$) arvoon vaikuttaa koesarjan muuttujista jauhatusaika, keskiarvopartikkelikoon (D_{50}) arvoon jauhatusaika, D_{90} -partikkelikokoarvoon helmikoko, partikkelin ominaispinta-alan (S_w) arvoon jauhatusaika ja suodinkakun keskimääräiseen ominaisvastuksen (α_{av}) arvoon helmikoko. Muuttujista jauhatusajan pidentäminen pienentää $D_{[3,2]}$ ja D_{50} - arvoja sekä kasvattaa S_w -arvoa. Helmikoon kasvattaminen pienentää D_{90} ja α_{av} - arvoja.

Leveydeltään kapein partikkelikojakauma suhdemenetelmällä saavutettiin 3 mm helmikoolla, 15 min jauhatusajalla ja 700 rpm sekoitusnopeudella kokeessa 4. Jakauman suhteelliseksi leveydeksi tulee silloin alle 4. Samassa kokeessa kakun keskimääräiset ominaisvastukset olivat suodatuskokeiden pienimmät arvot ja huokoisuudet suodatuskokeiden korkeimmat.

3 mm helmillä saadaan eniten pienennettyä partikkelikojakauman loppupäätä eli karkeaa osaa, kuitenkin muuttamatta jakauman hienoa osuutta. Jotta jakauman leveys saadaan pieneksi, tulisi D_{90} ja D_{50} arvojen olla mahdollisimman lähellä toisiaan. D_{10} - arvo voisi olla myös suuri, jolloin D_{90} ja D_{10} erotus olisi pieni. Partikkelikojakauma saadaan kapeimmaksi, kun jauhatus suoritetaan 3 mm lasikuulilla. Näissä kokeissa (2, 3, 4, 7, 12, 20, 26, 27 ja 29) kakun ominaisvastusten tulisi pysyä n. $4 - 5 \cdot 10^{11}$ m kg⁻¹ alueella. Kun suodinkakun keskimääräinen ominaisvastus on pienempi, suodatus sujuu nopeammin. Jakauman leveyden ollessa alle 4, suodatukseen kulunut aika vaihtelee noin seitsemästä minuutista 11 minuuttiin 6 bar paineessa.

Leveimmät partikkelikojakaumat vastaavasti saatiin silloin, kun käytettiin 1 mm kuulaa. Jakauman suhteelliseksi leveydeksi saatiin silloin yli 5. Pienellä kuulalla ja pitkällä jauhatusajalla sekä suurella sekoitusnopeudella D_{50} arvo pienenee nopeammin suhteessa kuin D_{90} arvo, jota ei saada pienennettyä tehokkaasti pienemmällä kuulakoolla. D_{50} ja D_{90} arvot ovat tuolloin kauempana toisistaan, mikä näkyy leveänä jakaumana. Kun jakauman leveys ylittää arvon 5, kakun ominaisvastus on n. $6 - 8 \cdot 10^{11}$ m kg⁻¹ alueella. Jakauma leveyden ollessa yli 5, suodatusaika vaihtelee noin 13 minuutista 16 minuuttiin 6 bar paineessa.

14 LÄHDELUETTELO

1. Kokko, M., Toimialaraportti 2/2014: Kaivosteollisuus. Työ- ja elinkeinoministeriö, 2014.
2. Uusisuo, M., Mining in Finland 2012. Regional Council of Lapland. 2012.
3. Hätönen, M., Hardy, M., Marjomaa, M., McCarthy, I., Nemes, J., The Finnish Mining Industry: An Overview, PwC. 2012.
4. Gunson, A., Klein, B., Veiga, M., Dunbar, S., Reducing mine water requirements, *J. Cleaner Prod.*, **21**(2012), 1. 71-81.
5. Simi, M., Selvitys tulevien kaivoshankkeiden tarjoamista liiketoimintamahdollisuuksista Raahen seutukunnan metalliyrityksille, Raahen Seudun Teknologiakeskus Oy, 2013.
6. Wills, B., *Will's Mineral Processing Technology; An introduction to the practical aspect of ore treatment and mineral recovery*, 7th ed., Butterworth-Heinemann, 2006, s. 118-181.
7. Pihkala, J., Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit, [Online]. Saatavilla: <http://prosessitekniikka.kpedu.fi/index-kg.htm>. [Haettu 13 Huhtikuu 2015].
8. XSM, Mining and Contraction, 2011. [Online]. Available: <http://orecrushersequipmentprice.com/rod-mill/> [Haettu 15 Huhtikuu 2015].

9. Metso Corporation, Basics in Minerals Processing, 2015.
10. Fairbanks Goldmining, Inc., SAG Mill: Semi-Autogenous Grinding Mill, 2014. [Online]. Saatavilla: http://ffden-2.phys.uaf.edu/211_fall2002.web.dir/keith_palchikoff/grinding_mill_2.html. [Haettu 16 Huhtikuu 2015].
11. Bussiére, B., Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches, *Can. Geotech. J.*, **44**(2007), 9, 1019-1052.
12. Cooper C., Palape, M., Handling uncertainty in tailings planning,” Teoksessa: Barrera, S., Niederhauser, M., Shaw, G., van Zyl, D., Wilson, W., Proceedings of the 2013 First International Seminar of Tailings Management, Santiago, Chile, August 28.-30.2013, Gecamin, Chile 2013. s. 117-125.
13. Meggyes, T., Niederleithinger, E., Witt, K., Csövári, M., Kreft-Burman, K., Engels, J., McDonald C., Roehl, K., Enhancing the Safety of Tailings Management Facilities, *Soil Sediment Contam.*, **17**(2008), 4, 323-345.
14. Palkovits, F., Thickened tailings offer effective disposal alternatives, *Eng. Min J.*, **208**(2007), 10, 62-67.
15. Palkovits, F., Paste Thickening: Considerations for Backfill vs. Tailings Management, *Eng. Min. J.*, **212**(2011), 9, 34-40.

16. Veizaga, A., Feliu, R., General criteria for selection of tailings deposition methods according to site conditions, Teoksessa: Barrera, S., Niederhauser, M., Shaw, G., van Zyl, D., Wilson, W., Proceedings of the 2013 First International Seminar of Tailing Management, Santiago, Chile, August 28.-30.2013, Gecamin, Chile 2013. s. 279-286.
17. Jankovic, A., A Review of Regrinding and Fine Technology: The Facts and Myths, Metso Minerals Process Technology Asia-Pasific, 2005.
18. Jankovic, A., Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills, *Miner. Eng.*, **16**(2003), 4, 337-345.
19. Jancovic, A., Sinclair, S., The shape of product size distribution in stirred mills, *Miner. Eng.*, **19**(2006), 15, 1528-1536.
20. Celep, O., Aslan, N., Alp, I., Tasdemir, G., Optimization of some parameters of stirred mill for ultra-fine grinding of refractory Au/Ag ores, *Powder Technol.*, **208**(2011), 1, 121-127.
21. Svarovsky, L., *Solid-Liquid Separation*, 4th ed., Butterworths & Co, Witham, Essex, 2000, s. 11-326.
22. Kinnarinen, T., Tuunila, R., Huhtanen, M., Häkkinen, A., Kejik P., Sverak, T., Wet grinding of CaCO₃ with stirred media mill: Influence of obtained particle size distribution on pressure filtration properties, *Powder Technol.*, **273**(2015), 54-61.
23. Rawle, A., Basic Principles of Particle Size Analysis, Malvern Instrument Limited, 2000.

24. Halberthal, J., The Nutsche Pressure filter, 2012. [Online]. Saatavilla: <http://www.solidliquid-separation.com/pressurefilters/nutsche/nutsche.htm>. [Haettu 13 Maaliskuu 2015].
25. Häkkinen, A., Filtration and Mixing luentokalvot, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2013.
26. Sorrentino, J., *Advances in correlating filter cake properties with particle collective characteristics*, Berichte aus der Verfahrenstechnik, Shaker Verlag GmbH, 2002, s. 36.
27. Häkkinen, A., Tuunila, R., Salmimies, R., Filtration and Mixing luentokalvot, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2013.
28. Matveinen, M., Selective leaching of multimetal tailings, Master's thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2014.
29. SFS, Suomen standardoimisliitto. 1990. SFS 3008 *Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjännöksen määrittäminen*. Helsinki: SFS
30. Keller, B., Bob's Rock Shop: Refractive Index and Critical Angle,” [Online]. Saatavilla: http://www.rockhounds.com/rockshop/gem_designs/refractive_index/index.shtml. [Haettu 15 Joulukuu 2015].
31. London, I. C., Imperial College Rock Library, [Online]. Saatavilla: <https://wwwf.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/rocklibrary/viewglossrecord.php?>. [Haettu 15 joulukuu 2015].

32. Tuunila, R., Partikkelitekniikka ja kiintoaineiden käsittely luentokalvot, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2013.
33. Karjalainen, L., *Tilastomatematiikka*, 8. toim., Pii-Kirjat, Jyväskylä, 2004, s. 116-119.
34. Taanila, A., Lineaariset regressiot, 2010. [Online]. Saatavilla: <http://myy.haaga-helia.fi/~taaak/m/regressio.pdf>. [Haettu 18 tammikuu 2015].

LIITTEET

LIITE I: Mittauspöytäkirja

LIITE II: Mittaustulokset

LIITE III: Jauhatuksen ja suodatuksen toistettavuus

Mittauspöytäkirja, 2 bar

Koe #	Lietteen tilavuus, ml	Lietteen massa, g	Suodoksen massa, g	Suodatu saika, s	Kakussa oleva neste, g	Kakun kapasiteisuus, -
0	226,32	248,56	211,02	1900	7,62	0,79
1	226,22	249,15	206,25	1526	9,33	0,74
2	226,45	248,70	207,20	1341	10,0	0,75
3	226,28	248,52	215,03	1695	7,24	0,76
4	227,85	250,24	195,69	916	16,45	0,68
5	226,87	249,16	208,11	1599	8,72	0,74
6	228,34	250,81	217,84	2249	7,61	0,74
7	227,07	249,39	198,02	1218	12,49	0,74
8	226,17	248,40	208,33	1686	9,77	0,75
9	225,68	247,86	206,83	1990	10,42	0,73
10	225,82	248,01	217,07	1996	6,03	0,77
11	226,67	248,95	211,81	1747	7,98	0,75
12	226,89	249,19	203,78	1159	12,57	0,73
13	226,16	248,39	206,96	2045	8,57	0,76
14	225,40	247,55	211,11	1666	8,50	0,77
15	226,23	248,46	200,28	1330	12,49	0,72
16	226,87	249,17	205,77	1669	7,98	0,80
17	226,43	248,68	215,16	1940	6,86	0,76
18	226,75	249,03	206,66	1404	10,89	0,74
19	226,81	249,10	216,39	1928	6,44	0,77
20	227,23	249,56	205,58	1534	9,58	0,76
21	226,26	248,49	208,41	2171	7,73	0,76
22	226,25	248,48	216,30	1804	6,56	0,78
23	226,06	248,28	206,64	1553	9,72	0,76
24	226,82	249,11	206,18	1403	9,86	0,75
25	226,92	249,22	214,88	1848	7,51	0,75
26	226,99	249,30	196,24	1025	14,57	0,71
27	227,38	249,73	197,88	946	14,97	0,70
28	227,01	249,32	198,38	1186	15,63	0,68
29	226,29	248,53	204,03	1219	10,22	0,76
30	226,10	248,32	204,32	1771	9,97	0,73
31	226,31	248,55	210,16	1827	8,60	0,74

Mittauspöytäkirja, 4 bar

Koe #	Lietteen tilavuus, ml	Lietteen massa, g	Suodoksen massa, g	Suodatus aika, s	Kakussa oleva neste, g	Kakun kappiteisuus, -
0	227,65	250,02	213,60	1139	6,70	0,80
1	226,86	249,15	208,83	852	8,75	0,76
2	227,01	249,32	204,74	790	9,29	0,76
3	226,87	249,16	216,97	981	6,85	0,77
4	228,23	250,66	195,90	555	15,28	0,69
5	226,31	248,55	209,74	928	8,10	0,76
6	226,59	248,86	215,07	1354	6,86	0,76
7	226,66	248,94	200,60	697	11,64	0,75
8	227,33	249,67	210,50	957	9,02	0,76
9	226,26	248,50	206,56	1176	9,84	0,74
10	226,51	248,77	218,28	1187	5,52	0,78
11	225,65	247,82	218,60	1031	7,17	0,77
12	226,34	248,58	199,36	665	11,57	0,75
13	225,20	247,33	211,62	1204	8,07	0,77
14	225,80	248,00	205,50	977	7,83	0,79
15	226,43	248,68	198,41	794	11,57	0,74
16	227,40	249,75	206,18	943	9,31	0,76
17	226,62	248,89	213,87	1127	6,86	0,77
18	226,49	248,75	205,01	825	10,04	0,75
19	226,56	248,82	219,86	1110	6,02	0,78
20	227,11	249,43	208,15	885	8,79	0,78
21	226,56	248,83	213,35	1288	6,99	0,78
22	226,17	248,40	214,31	1058	5,94	0,79
23	226,67	248,95	205,81	920	8,92	0,77
24	226,40	248,65	210,19	804	9,02	0,77
25	226,93	249,23	215,14	1004	7,01	0,76
26	226,83	249,12	196,91	608	13,75	0,74
27	227,38	249,30	194,91	571	13,68	0,72
28	226,88	249,18	197,57	706	14,46	0,70
29	226,46	248,71	207,27	728	9,62	0,77
30	226,53	248,80	204,39	1084	9,37	0,75
31	226,51	248,77	211,13	1096	7,90	0,76

Mittauspöytäkirja, 6 bar

Koe #	Lietteen tilavuus, ml	Lietteen massa, g	Suodoksen massa, g	Suodatus aika, s	Kakussa oleva neste, g	Kakun ka-pitoisuus, g
0	226,05	248,27	212,66	793	6,58	0,81
1	228,35	250,79	209,29	667	8,40	0,77
2	226,09	248,31	206,20	578	8,84	0,77
3	227,32	249,66	216,32	596	6,43	0,78
4	225,97	248,18	197,07	418	14,47	0,70
5	226,14	248,36	211,30	645	7,87	0,77
6	226,74	249,02	214,35	989	6,50	0,77
7	226,47	248,73	196,40	517	11,10	0,76
8	225,90	248,10	207,35	714	8,65	0,77
9	225,86	248,06	206,48	867	9,33	0,75
10	227,26	249,59	215,53	868	5,51	0,79
11	226,32	248,56	209,79	756	6,82	0,78
12	226,59	248,86	203,68	506	10,99	0,76
13	225,57	247,74	209,40	923	7,65	0,78
14	225,33	247,47	208,25	717	7,18	0,79
15	227,60	248,68	202,80	587	11,20	0,75
16	226,76	249,04	203,88	705	10,68	0,72
17	226,67	248,95	217,42	815	6,26	0,78
18	226,17	248,40	200,02	608	9,58	0,76
19	226,87	249,16	217,75	800	5,68	0,79
20	226,25	248,48	207,94	641	8,38	0,79
21	226,75	249,03	212,77	958	6,53	0,79
22	226,33	248,57	214,31	762	5,78	0,80
23	226,26	248,50	205,62	664	8,46	0,78
24	226,61	248,88	204,31	599	8,86	0,78
25	226,69	249,97	214,45	778	6,69	0,77
26	227,07	249,39	192,83	448	13,06	0,73
27	227,36	249,70	198,55	422	13,17	0,73
28	227,45	249,58	203,68	530	13,84	0,71
29	226,52	248,78	200,93	526	9,2	0,77
30	226,35	248,59	205,93	831	8,95	0,76
31	226,33	248,57	211,55	814	7,44	0,77

Mittaustuloksia 2 bar:n paineessa

Koe #	h_c , mm	m_w , g	m_s , g	m , -	c_w , -	c , kg m ⁻³	a , s m ⁻⁶ ·10 ¹⁰	Δp , bar
0	8,23	35,92	28,3	1,27	0,149	183,95	5,39	2,04
1	9,15	36,05	26,72	1,35	0,116	136,49	4,01	2,03
2	9,95	39,49	29,49	1,34	0,121	143,66	3,47	2,09
3	7,13	29,71	22,47	1,32	0,097	110,34	4,34	2,04
4	14,05	50,66	34,21	1,48	0,143	180,97	2,50	2,02
5	8,40	34,11	25,39	1,34	0,108	125,42	4,14	2,00
6	7,18	29,2	21,59	1,35	0,096	109,97	5,78	2,02
7	12,23	47,93	35,44	1,35	0,146	181,40	3,31	2,02
8	9,68	39,26	29,49	1,33	0,123	146,99	4,45	2,02
9	9,78	38,21	27,79	1,37	0,119	142,21	5,28	2,02
10	6,40	26,03	20,00	1,30	0,088	98,90	5,16	2,02
11	7,85	32,56	24,58	1,32	0,107	124,84	4,51	2,01
12	11,85	47,32	34,75	1,36	0,145	179,57	3,05	2,02
13	8,48	35,21	26,64	1,32	0,119	140,18	5,53	2,01
14	8,70	37,37	28,87	1,29	0,125	149,30	4,44	2,03
15	11,43	44,82	32,33	1,39	0,137	168,65	3,56	2,06
16	9,88	39,65	31,67	1,25	0,125	148,13	4,35	1,98
17	6,30	28,21	21,35	1,32	0,091	102,91	5,09	2,05
18	10,33	41,79	30,9	1,35	0,127	152,96	3,53	2,05
19	6,75	27,56	21,12	1,30	0,091	103,23	4,83	2,04
20	9,90	39,88	30,3	1,32	0,129	154,35	4,04	1,99
21	7,60	31,56	23,83	1,32	0,099	113,97	5,86	2,07
22	6,88	29,62	23,06	1,28	0,100	113,81	4,55	2,03
23	9,85	40,58	30,86	1,31	0,130	156,62	4,10	2,04
24	9,80	39,77	29,91	1,33	0,127	151,83	3,78	1,98
25	7,08	30,03	22,52	1,33	0,095	108,30	4,61	2,04
26	13,03	50,14	35,57	1,41	0,148	187,19	2,77	2,03
27	13,10	49,79	34,82	1,43	0,144	180,97	2,50	2,04
28	12,80	49,53	33,9	1,46	0,141	176,39	3,16	2,04
29	10,20	41,72	31,5	1,32	0,136	164,98	3,24	2,05
30	9,48	37,43	27,46	1,36	0,122	145,45	4,96	2,03
31	8,35	33,56	24,96	1,34	0,108	126,51	4,75	2,03

Mittaustuloksia 4 bar:n paineessa

Koe #	h_c , mm	m_w , g	m_s , g	m , -	c_w , -	c , kg m ⁻³	a , s m ⁻⁶ · 10 ¹⁰	Δp , bar
0	7,60	33,40	26,70	1,25	0,149	183,34	2,92	4,00
1	9,10	36,65	27,90	1,31	0,116	135,83	2,13	4,02
2	9,55	38,51	29,22	1,32	0,121	143,22	1,95	4,05
3	7,48	29,84	22,99	1,30	0,097	110,05	2,32	4,06
4	13,75	49,84	34,56	1,44	0,143	179,70	1,48	3,99
5	8,45	33,72	25,62	1,32	0,108	124,99	2,26	4,01
6	7,00	29,07	22,21	1,31	0,096	109,45	3,31	4,01
7	12,00	46,91	35,27	1,33	0,146	180,67	1,84	4,01
8	9,48	38,34	29,32	1,31	0,123	146,47	2,35	3,99
9	9,50	37,83	27,99	1,35	0,119	141,73	3,05	3,99
10	6,10	25,66	20,14	1,27	0,088	98,63	2,81	4,01
11	7,68	31,54	24,37	1,29	0,107	124,36	2,48	4,03
12	11,48	46,08	34,51	1,34	0,145	178,71	1,73	4,00
13	8,85	34,97	26,90	1,30	0,119	139,76	3,02	3,98
14	8,85	36,73	28,90	1,27	0,125	148,78	2,47	4,02
15	11,30	44,11	32,54	1,36	0,137	167,78	2,07	3,99
16	9,65	38,84	29,53	1,32	0,125	149,54	2,31	4,01
17	6,75	28,18	21,66	1,30	0,091	102,70	2,61	4,02
18	10,35	40,38	30,34	1,33	0,127	152,46	2,06	4,05
19	6,78	27,39	21,37	1,28	0,091	102,98	2,60	4,03
20	9,55	39,34	30,55	1,29	0,129	153,68	2,21	3,98
21	7,50	31,39	24,40	1,29	0,099	113,48	3,16	4,02
22	6,65	28,23	22,29	1,27	0,100	113,58	2,59	4,01
23	9,50	39,26	30,34	1,29	0,130	156,11	2,29	4,02
24	9,48	38,73	29,71	1,30	0,127	151,23	1,99	4,00
25	7,08	29,46	22,45	1,31	0,095	108,05	2,26	4,02
26	12,83	49,80	36,05	1,38	0,148	186,20	1,61	4,03
27	12,70	48,42	34,74	1,39	0,144	179,79	1,49	4,04
28	12,83	48,42	33,96	1,43	0,141	175,29	1,84	4,02
29	10,00	41,14	31,52	1,31	0,136	164,46	1,88	4,04
30	9,53	37,98	28,61	1,33	0,122	144,70	2,77	4,00
31	8,10	33,49	25,59	1,31	0,108	125,94	2,76	4,01

Mittaustuloksia 6 bar:n paineessa

Koe #	h_c , mm	m_w , g	m_s , g	m , -	c_w , -	c , kg m ⁻³	a , s m ⁻⁶ · 10 ¹⁰	Δp , bar
0	8,05	34,42	27,84	1,24	0,149	182,84	1,98	6,00
1	8,60	36,08	27,68	1,30	0,116	135,64	1,59	5,98
2	9,48	38,07	29,23	1,30	0,121	142,90	1,44	6,04
3	7,10	29,52	23,09	1,28	0,097	109,81	1,72	6,04
4	13,35	48,73	34,26	1,42	0,143	179,06	1,13	6,00
5	8,38	33,67	25,80	1,31	0,108	124,82	1,59	5,97
6	7,20	29,10	22,60	1,29	0,096	109,19	2,31	5,98
7	11,53	46,44	35,34	1,31	0,146	180,15	1,36	5,99
8	9,15	37,72	29,07	1,30	0,123	146,26	1,76	5,99
9	9,35	37,54	28,21	1,33	0,119	141,72	2,14	5,99
10	6,33	26,24	20,73	1,27	0,088	98,55	1,89	5,99
11	7,83	31,67	24,85	1,27	0,107	124,06	1,79	5,97
12	11,40	45,87	34,88	1,32	0,145	178,07	1,29	6,00
13	8,38	35,13	27,48	1,28	0,119	139,33	2,25	5,98
14	8,33	34,72	27,54	1,26	0,125	148,55	1,72	5,98
15	11,28	43,93	32,73	1,34	0,137	167,40	1,49	5,99
16	9,35	38,38	27,70	1,39	0,125	151,13	1,71	5,99
17	6,78	27,88	21,62	1,29	0,091	102,58	1,82	5,99
18	9,95	39,47	29,89	1,32	0,127	152,21	1,52	6,00
19	6,70	26,96	21,28	1,27	0,091	102,83	1,80	6,01
20	9,68	39,24	30,86	1,27	0,129	153,29	1,57	5,99
21	7,45	31,00	24,47	1,27	0,099	113,23	2,24	6,01
22	6,80	28,70	22,92	1,25	0,100	113,39	1,81	5,99
23	9,53	38,65	30,19	1,28	0,130	155,77	1,70	5,98
24	9,58	39,41	30,55	1,29	0,127	150,92	1,45	6,00
25	7,15	29,27	22,58	1,30	0,095	107,86	1,77	6,02
26	12,63	48,89	35,83	1,36	0,148	185,62	1,23	5,99
27	12,35	47,96	34,79	1,38	0,144	179,30	1,10	6,04
28	12,63	47,46	33,62	1,41	0,141	174,86	1,40	5,98
29	10,00	41,19	31,99	1,29	0,136	163,98	1,28	6,01
30	9,40	38,03	29,08	1,31	0,122	144,70	2,06	5,98
31	7,85	32,72	25,28	1,29	0,108	125,71	2,02	6,02

Jauhatuksen toistettavuus

Koe #	D ₁₀ µm	D ₅₀ µm	D ₉₀ µm	D _[3,2] µm	D _[4,3] µm	S _w m ² kg ⁻¹	
1	1,42	7,17	30,6	3,65	12,7	525,1	
5	1,47	7,33	31,9	3,70	13,2	518,0	
8	1,46	7,62	34,0	3,73	13,7	513,8	
16	1,46	7,55	33,8	3,74	13,8	512,4	
23	1,52	8,45	42,6	3,94	17,0	486,4	
	Keskiarvo, µm	1,47	7,62	34,58	3,75	14,08	511,1
	Keskihajonta	0,04	0,50	4,70	0,11	1,69	14,7
	RSD (%)	2,44	6,49	13,59	2,95	12,00	2,87

Suodatuksen toistettavuus

Koe #	<i>p</i> bar	ε -	α_{av} $\cdot 10^{+11} m kg^{-1}$
1	2	0,585	4,98
	4	0,564	5,25
	6	0,542	5,86
5	2	0,570	5,49
	4	0,569	6,03
	6	0,562	6,34
8	2	0,566	5,09
	4	0,560	5,35
	6	0,548	6,03
16	2	0,544	4,84
	4	0,565	5,16
	6	0,579	5,65
23	2	0,554	4,45
	4	0,546	4,91
	6	0,549	5,43
	Keskiarvo		
	2 bar	0,564	4,97
	4 bar	0,561	5,34
	6 bar	0,556	5,86
	Keskihajonta		
	2 bar	0,016	0,38
	4 bar	0,009	0,42
	6 bar	0,015	0,35
	RSD (%)		
	2 bar	2,76	7,68
	4 bar	1,59	7,81
	6 bar	2,61	5,92