

Simuleringsforsøk av primærmøllekretsene på Titania AS

Mari Kristin Tro

Tekniske geofag

Innlevert: september 2017

Hovedveileder: Rolf Arne Kleiv, IGP

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geovitenskap og petroleum

Sammendrag

«Simuleringsforsøk av primærmøllekretsene på Titania AS» er skrevet av Mari Kristin Tro. Den er skrevet på Institutt for geologi og bergteknikk ved Norges teknisknaturvitenskapelige universitet i Trondheim våren 2017.

Hensikten med denne oppgaven var å se mulighetene for å simulere primærmøllekretsene ved Titania med en pilotkrets satt opp på Oppredningslaboratoriet ved IGB ved å sammenligne partikkelstørrelsefordelingen på kretsproduktet, interne massestrømmer, skilleeffektivitet og energiforbruk. Det skulle også kommenteres hvordan endringer i oppsett/driftsparametere for pilotprosessene påvirker parameterne som er nevnt. Det skulle også gjøres innledende forsøk med repulping på sikt og vurdere effekten av dette opp mot sikting uten repulping.

Ved forsøk for å simulere primærmøllekretsene ble det satt opp en pilotkrets med sikt for å simulere møllekrets 1 til 3, og med syklon for å simulere møllekrets 4. Ved pilotforsøk med sikt ble tre driftsparametere variert; turtall, påmatingshastighet og lysåpning på sikt, og ved syklonforsøk ble underløpsdiameteren variert.

Resultatene viste at partikkelstørrelsefordelingen ble finere enn Titanias, både ved sikte- og syklonforsøk, og et optimalt pilotoppsett for simulering av primærmøllekretsene ble dermed ikke oppnådd. Resultatene viser derimot at dette skal være mulig å oppnå ved å endre enkle driftsparametere.

Forsøkene med repulping viste små forskjeller mellom et siktetrinn uten og med repulping. Ved videre pilotforsøk kan det være interessant å se på ulike løsninger for vanntilsatsen på dette trinnet. Swecosiktene som ble brukt til dette forsøket kan også ha økt kapasiteten på klasseringstrinnet slik at effekten av repulpingen ikke kommer til sitt fulle potensial.

Abstract

"Simulation of the primary millcircuit at Titania AS" is written by Mari Kristin Tro. It is written at the Department of Geoscience and Petroleum at the Norwegian University of Science and Technology in Trondheim in the spring of 2017, and is on ... pages.

The purpose of this task was to look at the possibilities of simulating the primary mill circuits at Titania with a pilot circuit set up at the IGB Survey Laboratory by comparing the particle size distribution of the circuit product, internal mass currents, separation efficiency, and energy consumption.

It should also be commented on how changes in the setup / operating parameters for the pilot processes affect the parameters as mentioned. Initial trials with repulping was a part of the assignment and assess the effect of this against sifting without repulping.

By attempting to simulate the primary mill circuits, a pilot circuit was established with the aim of simulation mill circuits 1 to 3 with a screen, and with cyclone for simulation mill circuit 4. For simulation tests with screens, three operating parameters were varied; speed of the mill, feed rate and screening size, and in the simulation tests with a cyclone, the apex diameter was varied.

The results showed that the particle size distribution was finer than Titanias, both with a screening and cyclone separation step, and an optimal pilot setup for simulation of primary mill circuits was thus not achieved. The results, on the other hand, show that this should be possible by changing simple operating parameters.

The experiments with repulping showed small differences between a screening step without and with repulping. With further pilot tests, it may be interesting to look at different solutions for the water supply at this stage. The screens used for this experiment may also have increased the capacity of the classifying step so that the effect of repulping does not come to its full potential.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for geologi og bergteknikk ved Norges teknisknaturvitenskapelige universitet i Trondheim våren 2017.

Oppgaven er gjennomført i samarbeid med Titania A/S. Kai-Inge Seim har vært ekstern kontaktperson og har kommet med gode innspill under prosessen. Wolfgang Schubert har også kommet med svar på spørsmål og vært behjelpelig under hele prosessen. Tusen takk for å ha fått tildelt en flott oppgave og all hjelp.

En stor takk må også rettes til Erik Larsen, Håkon Havskjold og Torkjell Breivik ved Oppredningslaboratoriet ved IGP for all hjelp med oppsett og kjøring av pilotkrets. Dette prosjektet kunne ikke blitt gjennomført uten deres arbeidsvilje og positive innstilling.

Ved NTNU har Rolf Arne Kleiv vært veileder og kommet med synspunkter og kommentarer. Takk for at kontordøren din alltid er åpen og at du tar deg tid til å komme med innspill på hvordan ting kan gjøres, svare på alle spørsmål og konstruktive diskusjoner.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	i
Abstract	iii
Forord	v
Figurliste.....	ix
Tabelliste	xi
1 Oppsett av rapport	2
1.1 Definisjoner og forkortelser.....	2
2 Innledning.....	4
2.1 Titania A/S.....	4
2.2 Primærmøllekretsene ved Titania.....	6
2.3 Oppgaven.....	7
2.4 Mål og avgrensinger	8
3 Teoretisk bakgrunn.....	9
3.1 Maling i lukket krets.....	9
3.2 Bruk av sikt eller sykklon i en lukket møllekrets	10
3.3 Repulping.....	11
4 Metode.....	12
4.1 Pilotoppsett	12
4.2 Prøvetaking pilot.....	15
4.3 Analysemetoder	16
4.3.1 Partikkelstørrelseanalyse	16
4.3.2 Kjemisk analyse	18
4.4 Beregningsmetoder	20
4.4.1 Beregning og analyse av separasjonsresultat	20
4.4.2 Beregning av turtall	22
5 Del 1: Simulering av møllekrets med sykklon	23
5.1 Kretsoppsett	23
5.2 Resultater	25
5.2.1 Sykklon 1.....	25
5.2.2 Sykklon 2.....	27
5.2.3 Sykklon 3.....	27
5.3 Diskusjon	29

5.3.1	Vurdering av hvordan endringer i driftsparametere påvirker resultatet.....	29
5.3.2	Vurdering av hvordan pilotkretsen gjenspeilet storskalakrets på Titania	31
6	Del 2: Simulering av møllekrets med sikt.....	33
6.1	Kretsoppsett	33
6.2	Resultater	36
6.2.1	Forsøk med ulikt turtall	36
6.2.2	Forsøk med økt påmatingshastighet	38
6.2.3	Forsøk med ulik lysåpning på sikt.....	38
6.3	Diskusjon	39
6.3.1	Vurdering av hvordan endringer i driftsparametere påvirker resultatet.....	39
6.3.2	Vurdering av hvordan pilotkretsen gjenspeilet storskalakrets på Titania	46
7	Del 3: Re-pulping	48
7.1	Kretsoppsett	48
7.2	Resultater	49
7.2.1	Med re-pulping	50
7.2.2	Uten re-pulping	50
7.3	Diskusjon	52
8	Konklusjon og videre anbefalinger	55
9	Referanser.....	57

Figurliste

Figur 2-1: Grovt flytskjema over prosessene malmen gjennomgår før endelig produkt (Titania A/S, 2002, p. 55)	5
Figur 4-1: Generelt flytskjema for pilotoppsett. (1) Kulemølle (2) pumpe med frekvensomformer (3) syklon eller sikt.	13
Figur 4-2: Pilotmølle.	14
Figur 4-3: Innsiden av møllen etter kulene ble lagt inn.	15
Figur 4-4: Mastersizer	17
Figur 4-5: Partikkelstørrelseanalyse gjort på samme materiale med camsizer og mastersizer	18
Figur 4-6: Fastmontert FPXRF	19
Figur 4-7: En enkel prosess med to produkter	20
Figur 4-8: Eksempel kornfordelingskurve (Figur 3.1-2, Sandvik et al., 1999, s.143)	21
Figur 5-1: Flytskjema for krets med syklon. Definisjonene for massestrøm 1-7 ligger i tabell 4-1.	23
Figur 5-2: Syklon 1	24
Figur 5-3: Syklon 2	24
Figur 5-4: Syklon 3	25
Figur 5-5: Partikkelstørrelsefordelingen til kretsproduktet for syklon 1 ved ulike underløpsdysediameter (D_u) i forhold til Titanias kretsprodukt.	26
Figur 5-6: TiO_2 -gehaltene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet ved forsøkskjøring med syklon 1 og underløpsdiameter 7,5 mm.	26
Figur 5-7: Partikkelstørrelsefordeling for kretsproduktet ved bruk av syklon 2 i kretsen med ulike underløpsdiameterer og partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet ved Titania. ...	27
Figur 5-8: Partikkelstørrelsefordeling for kretsproduktet ved bruk av syklon 3 i kretsen med ulike underløpsdiameterer og partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet ved Titania. ...	28
Figur 5-9: TiO_2 -gehaltene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet ved forsøkskjøring med syklon 3 og underløpsdiameter 10 mm.	28
Figur 5-10: Skillekurve for syklon 1 ved ulike underløpsdiameterer [mm] og for Titanias syklon i møllekrets 4.	29
Figur 5-11: Skillekurve for syklon 2 ved ulike underløpsdiameterer [mm] og for Titanias syklon i møllekrets 4.	29
Figur 5-12: Skillekurve for syklon 3 ved ulike underløpsdiameterer [mm] og for Titanias syklon i møllekrets 4.	30
Figur 5-13: Sammenligning av sirkulerende last syklon 1, 2 og 3.	30
Figur 5-14: Spesifikt energiforbruk ved forsøkskjøringene med syklon 1-3.	31
Figur 6-1: Pilotoppsett med sikt.	34
Figur 6-2: Swecosikt.	34
Figur 6-3: Bilde av swecosikt under forsøkskjøring. Massen presses ut i kantene av rotasjonsvibrasjonen og materialet bygges opp i kantene til det går ut i returrøret.	35
Figur 6-4: Nærbilde av sikteduk på swecosikt. Her kan man se de kvadratiske lysåpningene.	35
Figur 6-5: Partikkelstørrelsefordeling for kretsprodukt ved 390 μm sikt og ulikt turtall og for Titanias kretsprodukt.	37
Figur 6-6: Partikkelstørrelsefordeling for kretsprodukt ved 450 μm sikt og ulikt turtall og for Titanias kretsprodukt.	37

Figur 6-7: Partikkelstørrelsefordeling for kretsprodukt ved økende påmatingshastighet og for Titanias kretsprodukt.....	38
Figur 6-8: Partikkelstørrelsefordeling for kretsprodukt ved endring i lysåpning på sikt og for Titanias kretsprodukt.....	39
Figur 6-9: Skillekurve for 390 μm sikt ved 150 kg/h påmatingshastighet og ulikt turtall, og skillekurven for Titanias sikt.....	40
Figur 6-10: Skillekurve for 450 μm sikt ved 150 kg/h påmatingshastighet og ulikt turtall, og skillekurven for Titanias sikt.....	40
Figur 6-11: Spesifikt energiforbruk ved endring i turtall ved en påmatingshastighet på 150 kg/h.	41
Figur 6-12: Skillekurve for 390 μm sikt ved ulik påmatingshastighet, og skillekurven for Titanias sikt.....	42
Figur 6-13: (A) Sikt etter resterende masse er fjernet, men før spyling. (B) Sikt etter spyling, men før ultralydbehandling.....	43
Figur 6-14: Spesifikt energiforbruk ved endring i påmatingshastighet ved bruk av sikt med lysåpning 390 μm og turtall 40 rpm.....	43
Figur 6-15: Skillekurve ved forsøkskjøringer med ulik lysåpning på sikt.....	44
Figur 6-16: Spesifikt energiforbruk ved forsøkskjøringer med ulike lysåpning på siktetrinn ved turtall 40 rpm og påmatingshastighet 300 kg/h.....	45
Figur 6-17: TiO ₂ -gehaltene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet ved en forsøkskjøring med sikt og to med syklon som har samme partikkelstørrelsefordeling.....	46
Figur 7-1: Oppsett swecosikt. (A) Første sikt (B) Retur fra første sikt og påsetning vann til re-pulping (C) Andre sikt (D) Uttak kretsprodukt.....	48
Figur 7-2: Slange som ble brukt til re-pulping. Den ble sammenklemt for å få trykk og spre vannet mer utover for å dispergere partikler fra hverandre. Ble koblet på i punkt (B) i figur 7-1.....	49
Figur 7-3: Partikkelstørrelsefordeling for totalt kretsprodukt for 390 og 450 μm som første sikt med re-pulping.....	50
Figur 7-4: Partikkelstørrelsefordeling for totalt kretsprodukt uten re-pulping sammenlignet med re-pulping.....	51
Figur 7-5: TiO ₂ -gehaltene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet fra det første siktet i repulptrinnet.....	51
Figur 7-6: TiO ₂ -gehaltene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet fra det andre siktet i repulptrinnet.....	52
Figur 7-7: Skillekurve for forsøk med repulping (450 μm som første sikt) og uten repulping#2.....	53
Figur 7-8: Partikkelstørrelsefordeling for pågangsmateriale ved repulpforsøkene.....	54

Tabelliste

Tabell 2-1: Dimensjoner for kulemøllene i primærmøllekretsene.	6
Tabell 2-2: Syklondimensjoner for syklobatteri som lukker møllekrets 4.	6
Tabell 4-1: Oversikt over massestrømmer fra Figur 4-1	13
Tabell 4-2: Prosent av kritisk turtall ved ulike rotasjonshastigheter (rpm).	14
Tabell 4-3: Fordeling av kulestørrelser.	15
Tabell 5-1: Oversikt over dimensjoner til forsøkssykloner.	24
Tabell 5-2: Sirkulerende last og effektbruk mølle for ulike underløpsdyser på syklon 1.	26
Tabell 5-3: Sirkulerende last for ulike underløpsdyser på syklon 2.	27
Tabell 5-4: Sirkulerende last og effekt mølle for ulike underløpsdyser på syklon nr. 3.	28
Tabell 6-1: Sirkulerende last og effekt mølle.	37
Tabell 6-2: Sirkulerende last og effekt mølle ved økende påmatingshastighet.	38
Tabell 6-3: Sirkulerende last ved økende lysåpning sikt.	39
Tabell 7-1: Sirkulerende last og effekt mølle ved forsøkskjøringer med repulping.	50
Tabell 7-2: Sirkulerende last og effekt mølle ved forsøkskjøringer uten repulping.	51

1 Oppsett av rapport

Denne rapporten er en masteroppgave innen mineralprosessering ved Norges Tekniske og Naturvitenskapelige universitet og er gjennomført ved bedriften Titania AS og Oppredningslaboratoriet ved IGP. Rapporten starter med bakgrunnsinformasjon om Titania AS og en kort oversikt over de viktigste prosessene i oppredningsanlegget. En nærmere oversikt over primærmølletrinnet, som er den viktigste prosessen for denne rapporten, vil så bli presentert. Videre vil problemstillinger, mål og avgrensninger for oppgaven bli gjennomgått.

Kapittel tre gjennomgår relevant teori fra litteraturen som beskriver maling i lukket krets og hvordan syklon eller sikt fungerer ulikt som klasserer i en slik krets. En kort forklaring bak begrepet repulping vil så bli presentert.

I kapittel fire vil et generelt oppsett av pilotforsøk og pilotutstyr bli presentert. Dette kapittelet inkluderer også en oversikt over prøvetaking av pilotkrets, og de metoder for analyser og beregninger som er blitt brukt og ligger til bakgrunnen for resultatene som blir presentert.

Hoveddelen av rapporten består av kapittel 5-7, og er delt opp i tre deler:

Del 1: Simulering av møllekrets med sykloner

Del 2: Simulering av møllekrets med sikt

Del 3: Re-pulping

Hver enkelt del inneholder en forklaring av kretsoppsett og hvilket utstyr som ble utnyttet til de enkelte forsøkene, resultater fra analyser og en diskusjon som omhandler disse delene separat. Diskusjonen på del 2 vil også inneholde en kort sammenligning av resultatene fra forsøkskjøringene med sikt i forhold til ved bruk av syklon som klasserer.

Samlede konklusjoner fra rapporten oppsummeres i kapittel åtte.

1.1 Definisjoner og forkortelser

Frimalte korn: korn som kun består av et mineral. Dette begrepet brukes som regel om det verdifulle mineralet.

Dødmaling: nedmaling av partikler som er under den gitte skillegrense for klasserer.

Stabil møllekrets: Mengde av materiale inn i møllekretsen er det samme som materialmengden som går ut.

Sirkulerende last: Forholdet mellom mengden retur som sendes tilbake i møllekretsen fra en klasserer og ny pågangsmateriale.

HGMS: Høyfelts magnetseparering

Sikteeffektivitet: Hvor effektivt en klasserer skiller materialet over og under skillegrensen.

Kg/h, t/h: kilo per time, tonn per time

Rpm: Rounds per minute

2 Innledning

2.1 Titania A/S

Titania A/S holder til i Hauge i Dalane. Hovedproduktet som utvinnes i dag er ilmenitt, og i tillegg produseres to biprodukter – magnetitt og et kiskonsentrat. Ilmenittkonsentratet selges på verdensmarkedet til pigmentfabrikker og til mellomforedling. Magnetitt benyttes i kullutvinning til rensing av kull. Kiskonsentratet for sin del selges for sitt innhold av nikkel og kobber.

Bedriften ble startet opp i 1902 som Aktieselskapet Titania og har i hovedsak tatt ut malm fra to forskjellige forekomster. Fra 1916 og frem til 1965 var det underjordsproduksjon i Storgangen ved Sandbekk. Fra og med 1960 ble det dagbruddsdrift på Tellnes. Tellnesforekomsten er verdens største forekomst av ilmenittmalm (Titania A/S, 2002). Produksjonen på Tellnes utgjør om lag åtte prosent av den totale verdensproduksjonen av pigmentråstoff.

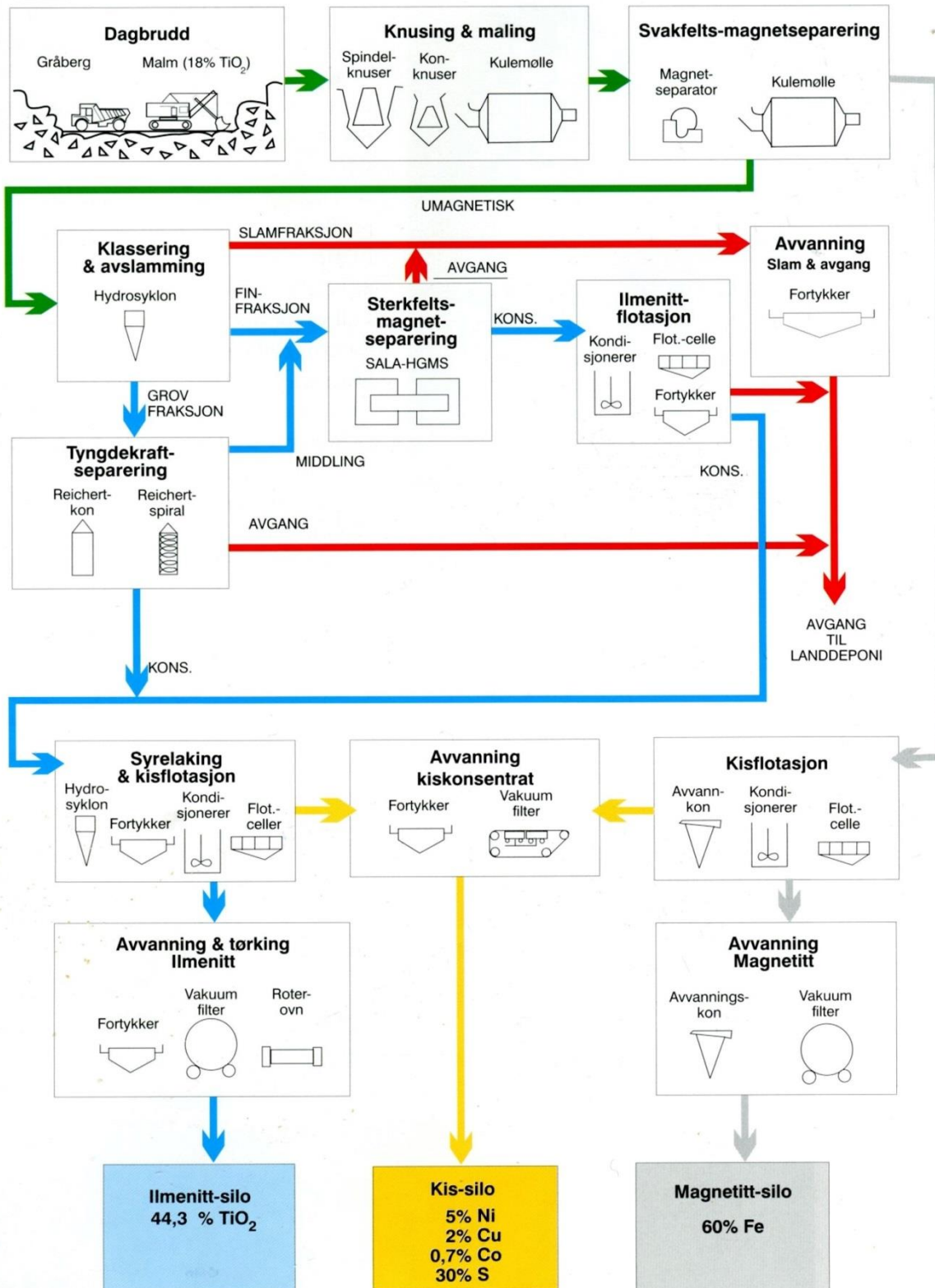
Etter malmen er tatt ut fra bruddet fraktes den videre til oppredningsverket hvor den gjennomgår flere steg for å skille de verdifulle mineralene ut og bearbeides til salgbare produkter. For å fremstille disse produktene gjennomgår malmen flere prosesser. Operasjonene i oppredningen ved bedriften kan deles inn i flere hovedprosesser:

- Knusing
- Nedmaling
- Klassering
- Mineralseparasjon
- Avvanning
- Avgangsdeponering

Disse prosessene og sammenhengen mellom dem er vist i et forenklet flytskjema i figur 2-1



Flytskjema - Mineralseparering



Figur 2-1: Grovt flytskjema over prosessene malmen gjennomgår før endelig produkt (Titania A/S, 2002, p. 55)

2.2 Primærmøllekretsene ved Titania

Primærmølletrinnet ved Titania består av fire kulemøller som står i parallell og får identisk type pågangsmateriale levert fra knusettrinnet. Alle er overløpsmøller som står i lukket krets med en klasserer som sender for grove partikler i retur tilbake i mølla for videre nedmaling. Partikler kan dermed ikke forlate kretsen før det har kommet under den gitte kuttstørrelsen for klassereren og sendes da videre i prosessen.

Møllene på Titania er nummerert fra 1 til 4, hvor mølle 1 til 3 er kulemøller av identisk størrelse og er alle lukket med Derrick-sikt. Eneste differansen mellom disse tre er at mølle 3 har installert hastighetsregulator for å kunne regulere turtall. Mølle 4 har derimot et større indre volum enn de andre og er lukket med sykkloner. Dimensjonene for de ulike møllene er vist i tabell 2-1.

Tabell 2-1: Dimensjoner for kulemøllene i primærmøllekretsene.

Mølle	Effektiv indre diameter [m]	Effektiv indre lengde [m]
1,2,3	3,15	5,05
4	4,98	5,05

Klassereren som blir brukt i møllekrets 1 til 3 er fire Derricksikt som får lik pågang fra en fordeler. Derricksiktene er utformet med rektangulære lysåpninger med en bredde på 390 μm . På mølle 4 brukes et sykklonbatteri med enten fire eller fem sykkloner i drift samtidig. Syklondimensjonene er vist i tabell 2-2. Sirkulerende last ved normal drift for kretsene er 43% for møllekrets 1 til 3 og 320% for møllekrets 4. Det spesifikke energiforbruket ved normal drift for kretsene er 7,39 kWh/t for møllekrets 1 til 3 og 8,83 kWh/t for møllekrets 4.

Tabell 2-2: Syklondimensjoner for sykklonbatteri som lukker møllekrets 4.

Indre diameter (D)	508 mm
Diameter innløp (D _i)	131 mm
Diameter overløp (D _o)	171 mm
Diameter underløp (D _u)	83 mm
Konvinkel	20°

Hvordan primærmølletrinnet behandler materialet er en viktig faktor for videre prosess. Det ønskelige resultatet er å ha maksimal frimaling av verdifulle mineraler med minst mulig

dødmaling som kan føre til unødig finstoff og slamproduksjon. For grovt materiale kan gjøre videre prosess ueffektiv og føre til at man kan ende opp med et dårligere produkt eller tape verdifulle mineraler som ikke er frimalt. For nedmalt materiale med en høy finstoffandel kan også føre til tap av verdifulle mineraler og ha negative effekter videre i prosessen:

- Fine magnetittpartikler kan gå tapt ved svakfelts magnetseparasjon og kan gå videre til HGMS-separering og flotasjon.
- Finstoff er uønsket i flotasjon. Dette vil føre til økte kostnader og kjemikaliebruk.
- Verdifulle mineraler som er for mye nedmalt kan gå tapt ved gravitativ separering.

Økt finstoffproduksjon fra primærmølletrinnet kan dermed føre til uønskede tap videre i prosessen og forhøye kostnader.

2.3 Oppgaven

Masteroppgaven vil utføres med Titania AS som ekstern samarbeidspartner.

Oppgaven består i å vurdere mulighetene for å benytte pilotmølla ved Oppredningslaboratoriet ved IGP til å simulere de lukkede primærmøllekretsene ved Titanias oppredningsanlegg. Det skal gjennomføres pilotforsøk der kretsen lukkes med syklon og der kretsen lukkes med sikt. Partikkelstørrelsesfordelingen til møllekretsproduktet fra Titanias oppredningsanlegg vil representere målet man skal forsøke å oppnå.

Oppgaven skal:

1. Sammenligne pilotprosessene med fullskalaproessen med hensyn på partikkelstørrelsesfordeling for kretsprodukt, interne massestrømmer, skilleskarphet for prosessen som lukker kretsen og energiforbruk. Sammenligningen skal belyse i hvilken grad pilotprosessene gjenspeiler fullskalaproessen.
2. Gjøre rede for, og om mulig forklare, hvordan endringer i oppsett/driftsparametere for pilotprosessene påvirker resultatet i punkt 1.
3. Beskrive de praktiske utfordringene og begrensningene ved pilotskalaproessen og komme med forslag til endringer i kretsoppsett eller driftsparametere som kan vil kunne gi bedre samsvar mellom pilot og fullskala.

For pilotskalakretsen som lukkes med sikt skal oppgaven i tillegg:

4. Gjøre innledende forsøk med repulping på sikt og vurdere effekten av dette opp mot sikting uten repulping.

Oppgaven skal også gi et kortfattet teoretisk grunnlag for maling i lukket krets med fokus på konsekvenser/premisser for valg av syklon eller sikt, samt en kort beskrivelse av de relevante prosessene ved Titania.

2.4 Mål og avgrensinger

Målsetningen med arbeidet som er gjort i forbindelse med denne rapporten er å:

- gi en vurdering om mulighetene for å benytte pilotmølla ved Oppredningslaboratoriet ved IGP til å simulere primærmøllekretsene ved Titanias oppredningsanlegg.
- Vise hvordan endringer i oppsett/driftsparametere påvirker pilotkretsen.
- gjøre innledende forsøk med repulping på sikt og vurdere effekten av dette opp mot sikting uten repulping

Forsøksarbeidet som presenteres i denne rapporten fokuserer kun på primærmøllekretsene på Titania. På grunn av tidsmessige begrensninger er kun et begrenset antall forsøk gjennomført og det er ikke gjort noen systematisk gjentakelse av disse for å sikre statistisk gjentakelsessikkerhet. Alle forsøkene regnes derfor som innledende og har den hensikt å gi en indikasjon på hvordan et pilotoppsett kan settes opp for å simulere storskalaprosessen og hvilken effekt repulping har.

Det er blitt gjort antagelser ved pilotoppsett som kan ha hatt påvirkning på det endelige resultatet som ikke er blitt diskutert videre i oppgaven. Disse antagelsene er gjennomgått i kapittel 4.1.

Vurderingen av mulighetene for forsøksoppsett ved IGP er kun ment som veiledende ved videre vurdering av pilotoppsett.

3 Teoretisk bakgrunn

I dette kapittelet skal det fokuseres på bakgrunnsteori som er viktig for grunnforståelsen bak resultatene og diskusjonene i denne rapporten. Det skal først gjennomgås grunnleggende teori for maling i lukket krets og hvordan bruk av sikt eller syklon i en slik krets kan endre kretsens virkemåte. Det vil så kort forklares hva repulping er og hva dette kan brukes til.

3.1 Maling i lukket krets

For å forstå hvorfor man ønsker nedmaling i en lukket krets må man først se på hva som skjer i en åpen møllekrets. I en åpen krets mates materialet inn i møllen med en hastighet beregnet for å produsere riktig produkt i en passering. Denne typen krets brukes sjelden i mineralbehandling, da det ikke er kontroll over produktstørrelsesfordeling. Påmatingshastigheten må være lav nok til å sikre at hver partikkel tilbringer nok tid i møllen til å bli brutt ned til produktstørrelsen. Som et resultat er mange partikler i kretsproduktet overmalt (dødmalt) som forbruker energi unødvendig, og kretsproduktet kan være vanskelig å behandle på grunn av bred partikkelstørrelsefordeling.

Primærmaling foregår dermed nesten alltid i lukket krets, hvor materiale av ønsket størrelse fjernes av en klasserer, som returnerer for store partikler tilbake til møllen. I en lukket møllekrets blir det ikke gjort noen innsats for å påvirke hele størrelsesreduksjonen i en enkelt passering. I stedet er fokuset på å fjerne materiale fra kretsen så snart den når den nødvendige størrelsen. Ved nedmaling til en bestemt størrelse, kan en kapasitetsøkning på opptil 35% oppnås ved lukket kretsoperasjon i forhold til en åpen krets (Wills & Napier-Munn, 2005). Materialet som returneres til møllen av klassereren kalles *sirkulerende last*, og massevekten av denne returen uttrykkes som en prosentandel av massevekten av ny pågang tilført kretsen.

Formålet med å male ned materiale i en lukket krets er dermed å:

- *Kontrollere toppstørrelse på materiale som blir sendt til videre prosess:*
Ved å kontrollere toppstørrelsen på materialet som blir sendt videre i prosessen kan man øke andelen frimalte korn og øke effekten på videre separasjonstrinn.
- *Redusere slamproduksjon:*
Ved å få en raskere gjennomstrømningshastighet på materiale gjennom mølla vil mølleproduktet bli grovere. Man reduserer dermed muligheten for at små partikler som blir påsatt på mølla blir dødmalt.
- *Øke nedmalingskapasitet*

- *Optimalisere energiforbruket*

Nedmaling i en optimal lukket krets fører til at gjennomstrømningshastigheten blir større og at partikler forlater kretsen når de kommer under den gitte kuttstørrelsen. Kombinasjonen av dette fører til at energien som blir satt til mølla brukes til å male ned for grovt materiale og reduserer energiforbruk for å male ned allerede frimalte korn (dødmaling).

3.2 Bruk av sikt eller syklon i en lukket møllekrets

For at en lukket malekrets skal fungere som beskrevet i kapittel 3.1, må klassereren i kretsen fungere optimalt. De mest brukte skillemekanismene i primærmalekretser er sikt eller sykloner, som har to forskjellige separasjonsmetoder med ulike fordeler og ulemper.

Bruk av sikt i en lukket krets gir en klasserer som er oftere enklere å styre ønsket kuttstørrelse på, siden dette er styrt av lysåpningen på siktet. Effektiviteten av siktet kan derimot blant annet bli påvirket av fastprosent på pågangen til siktet og påmatingshastighet. Ved for høy fastprosent vil partiklene klistres sammen, eller så kan enkelte partikler aldri få muligheten til å gå igjennom. Dermed kan korn som allerede er under kuttstørrelsen føres tilbake i mølla sammen med returen. Det er dermed ønskelig ved bruk av sikt å la hvert enkelt partikkel få en sjanse til å gå igjennom flere ganger for å øke effektiviteten på siktet. Denne uønskede effekten kan også forekomme ved for høy pågangsmengde. For høy påmatingshastighet kan føre til at små partikler skylles lettere over siktet og blir feilklassert (Wills & Napier-Munn, 2005).

Det fører oss til den største ulempen med sikt; kapasitet. For å ha samme kapasitet som sykloner ved samme pågangsmengde, trenger man et stort sikteareal. Sikt er en dyrere installasjon å sette opp og vedlikeholde, i tillegg til å ta opp større areal enn sykloner med samme kapasitet (Wills & Napier-Munn, 2005).

Sykloner bruker sentrifugalvirkning for å klassifisere, noe som øker klassifiseringen av fine partikler, gir mye skarpere separasjoner og øker optimal sirkulasjonsbelastning. De har mye mindre gulvareal enn mekaniske klassifiseringsmaskiner med samme kapasitet og har lavere kapitalkostnader og installasjonskostnader. På grunn av deres mye raskere tiltak kan malekretsen raskt bringes i balanse ved endringer i kretsen.

Sykloner er derimot mer følsom for mineralenes egenvekt enn sikt, noe som betyr at partikler klassifiseres ikke bare av størrelse, men også av spesifikk egenvekt. En liten partikkel med høy egenvekt kan derfor oppføre seg på en lignende måte som en stor partikkel med lav egenvekt.

Partikler med høy egenvekt vil dermed søke til underløpet av syklonen. Når en malm som inneholder et tungt verdifullt mineral er malt, vil det derfor sannsynligvis forekomme overmaling av dette materialet fordi det blir returnert i sirkulasjonsbelastningen, selv om det er under den nødvendige produktstørrelsen. Det vil dermed være en vanskeligere beregning for ønsket kuttstørrelse ved bruk av sykkloner enn med sikt (Wills & Napier-Munn, 2005).

3.3 Repulping

Når materiale skal skilles etter partikkelstørrelse over et sikt, er en av utfordringene med denne skillemetoden sammenhengende partikler som nevnt i kapittel 3.2. Siden vannet renner gjennom tidlig på siktet, vil ofte de mindre partiklene klistre seg fast til andre når materialet er fuktig. Dette fører til at små partikler under kuttstørrelsen kan følge med materialet som går over siktet og bli feilplassert i den grove strømmen. Ved slike forhold kan dette føre til lav sikteeffektivitet.

Repulping er et begrep som brukes for et sikt som bruker vann for å dispergere partikler for å øke sikteeffektiviteten. På et repulpsikt vil pågangen settes på et ordinært sikt uten ekstra vanntilsats hvor materialet beveger seg over siktet uten noen annen ytre påvirkning. Etter materialet har passert første sikterunde vil en vanntilsats med trykk dispergere sammenhengende partikler. Disse frigjorte partiklene har dermed en større sannsynlighet for å bli korrekt klassert.

Ved bruk av et optimalt repulptrinn i en malekrets, kan dette teoretisk redusere dødmaling ved å få et mer effektivt skille.

4 Metode

I dette kapitlet blir først det generelle pilotoppsettet som ble brukt ved forsøkskjøring beskrevet og hvordan denne ble prøvetatt. Deretter vil det gjennomgås hvilke analyse- og beregningsmetoder som er blitt tatt i bruk for å få resultatene som er grunnlaget for denne rapporten.

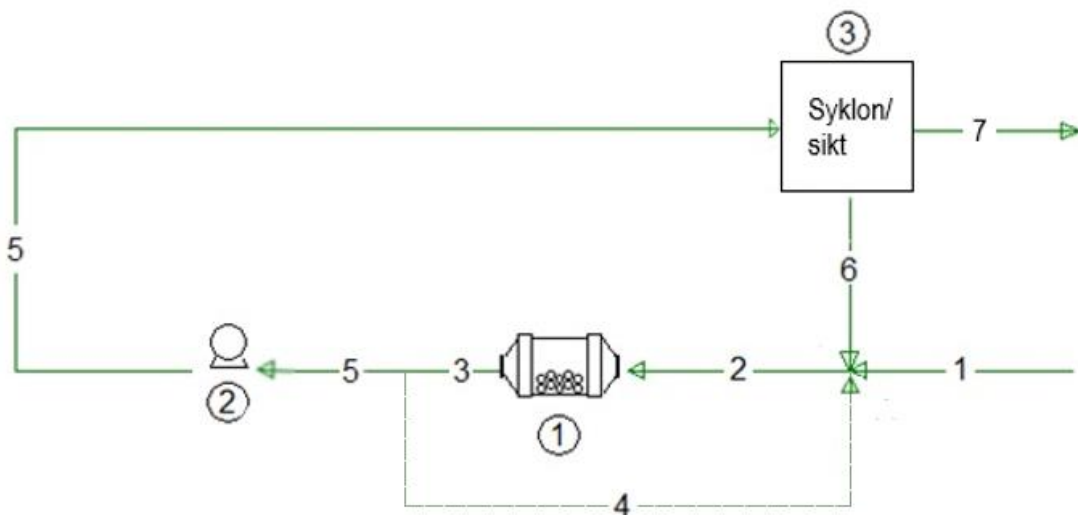
4.1 Pilotoppsett

Piloten ble satt opp i oppredningslaben på NTNU med identisk oppsett som ved Titania AS med en lukket møllekrets. Kretsen var likt oppbygd for alle forsøk bortsett fra separeringstrinnet som bestod av enten syklon, sikt eller sikt med et repulpingtrinn. Et generelt flytskjema for kretsen med syklon eller sikt er vist i figur 4-1.

Det som skiller pilotoppsettet fra den reelle kretsen på Titania, er at det ble satt opp en sikt på utløpet til mølla med en lysåpning på 4 mm hvor den groveste delen av mølleproduktet ble tatt ut før syklon/sikt (se massestrøm 4 i generelt flytskjema). Dette var for å forhindre at pumpene og syklonene gikk tett. For å få en balansert massebalanse ble dette materialet samlet opp kontinuerlig og tømt tilbake i innløpet i mølla som retur hvert 3-5 minutt. Siden massestrøm 4 ble sendt tilbake i retur manuelt er denne strømmen merket med stiplede linje i figur 4-1. Det legges dermed vekt på at videre i denne rapporten skilles det mellom *mølleprodukt* og *pågang sikt*. Tabell 4-1 viser en full oversikt over massestrømmene.

Det ble tilsatt vann ved inn- og utløp på møllen. Begge ble styrt manuelt med kran, men vanntilsetningen ved innløpet var utstyrt med et flowmeter som overvåket vannmengden som var påsatt. Vanntilsetningen ved utløpet ble manuelt prøvetatt etter forsøk for å beregne vannmengden som ble tilsatt til kretsen i dette punktet. Ved enkelte forsøk var det nødvendig med ekstra vanntilsetning ved innløpet. Dette ble også kontrollert manuelt etter endt prøvekjøring.

Det ble brukt en kontinuerlig mater for å få nytt materiale inn i mølla. Denne materen ble innstilt manuelt og hadde ikke målere for å vise påmatingshastighet. Siden materen ikke hadde overvåkning over pågangsmasse som ble påsatt på møllekretsen, var det viktig å kalibrere materen før oppstart og sjekke at denne ga en stabil påmating.



Figur 4-1: Generelt flytskjema for pilotoppsett. (1) Kulemølle (2) pumpe med frekvensomformer (3) syklon eller sikt.

Tabell 4-1: Oversikt over massestrømmer fra Figur 4-1

Massestrøm nr.	Definisjon
1	Pågang
2	Total pågang mølle
3	Mølleprodukt
4	Grovdelt mølleprodukt (> 4 mm)
5	Pågang syklon/sikt (< 4 mm)
6	Retur
7	Kretsprodukt

Kulemølle

Forsøksmølla som ble brukt er vist i Figur 4-2. Den har en effektiv indre diameter på 0,69 meter og en effektiv indre lengde på 1 meter. Utløpsmekanismen på denne møllen er «grate discharge», noe som skiller seg ut fra Titanias som er en overløpsmølle. Figur 4-3 viser et bilde fra innsiden av mølla hvor man kan se silveggen hvor materialet kan strømme gjennom. Siden Titanias kulemøller er overløpsmøller vil ikke materialet gå gjennom silveggen, men må gå i overløpet ved utløpet av mølla.



Figur 4-2: Pilotmølle.

Ved Titania brukes prosent av kritisk turtall for å måle omdreiningshastighet på møllene. Forsøksmølla styres etter rpm, så for å kunne sammenligne turtallet med Titanias innstillinger ble prosent av kritisk turtall kalkulert ut fra formel vist i kapittel 4.4.2. Tabell 4-1 viser en oversikt over verdiene for hvor mange prosent av kritisk turtall de enkelte turtallene gir.

Tabell 4-2: Prosent av kritisk turtall ved ulike rotasjonshastigheter (rpm).

Innstilling for omdreiningshastighet på forsøksmølle [rpm]	% av kritisk turtall
40	78
33	65
32	63

Videre i rapporten vil det bli referert til turtall som rpm.

Kulefylling

For å få en representativ størrelsesfordeling for kulefyllingen ble det antatt at ved regelmessig påfylling av nye kuler ville fordelingen i de ulike størrelsesfraksjonene blir som vist i tabell 4-3.

Tabell 4-3: Fordeling av kulestørrelser.

Størrelsesfraksjon [mm]	%Vektandel
75-50	40 %
50-38	30 %
38-25	20 %
25-	10 %

Ved Titania blir kulefyllingen målt fra bunn i mølla til topp av kulefylling som en prosentandel av den indre diameteren. For å bruke like mye kulefylling på Titania (25%), ble det kalkulert hvor stort volum av forsøksmølla dette tilsvarte. Deretter ble det antatt en totalvekt for kulene som skulle ta hensyn til luftrom som oppstår mellom kulene i fyllingen. Deretter ble vektene for de ulike størrelsesfraksjonene utregnet etter vektandelen vist i tabell 4-3 og veid opp.



Figur 4-3: Innsiden av møllen etter kulene ble lagt inn.

4.2 Prøvetaking pilot

Ved prøvekjøring ble verdien for møllevekten overvåket. Ved oppstart av en ny prøvekjøring, steg denne verdien. Når denne verdien stabiliserte seg over tid ble det antatt at kretsen var stabil. Med dette menes at kretsen har stabilisert seg etter oppstart og at det går like mye masse inn som ut av systemet. Materialet som beveger seg i de ulike strømmene vil dermed ikke endre seg nærmere, og vil være representative for forholdene som oppstår slik kretsen blir kjørt ved dette tidspunktet. Når en stabil krets ble oppnådd, ble det prøvetatt ved tre steder:

- Grovdel mølleprodukt
- Retur
- Kretsprodukt

For å få et oversiktsbilde over massebalansen ble hele massestrømmen tatt direkte over i en prøvebøtte når prøvene ble tatt. Fra massestrømmen ble flyttet over til prøvebøtten til strømmen ble kuttet, ble tiden tatt. Våtvektene til prøvene ble så loggført, og de våte prøvene ble satt til tørking. Tørrvektene til prøvene ble også loggført etter de var ferdigtørket, og ut fra dette ble fastprosent for strømmene og massebalansen for systemet beregnet. Denne massebalansen ble brukt i ettertid for å dobbeltsjekke at systemet var stabilt ved prøvetaking.

4.3 Analysemetoder

4.3.1 Partikkelstørrelseanalyse

For å analysere partikkelstørrelsefordeling ble manuell sikting på siktetårn og mastersizer brukt på materialet som ble prøvetatt ved forsøkskjøringene. En prøve i denne rapporten (kretsproduktet fra møllekrets lukket med sikt) er også blitt analysert på camsizer ved laboratoriet på Titania.

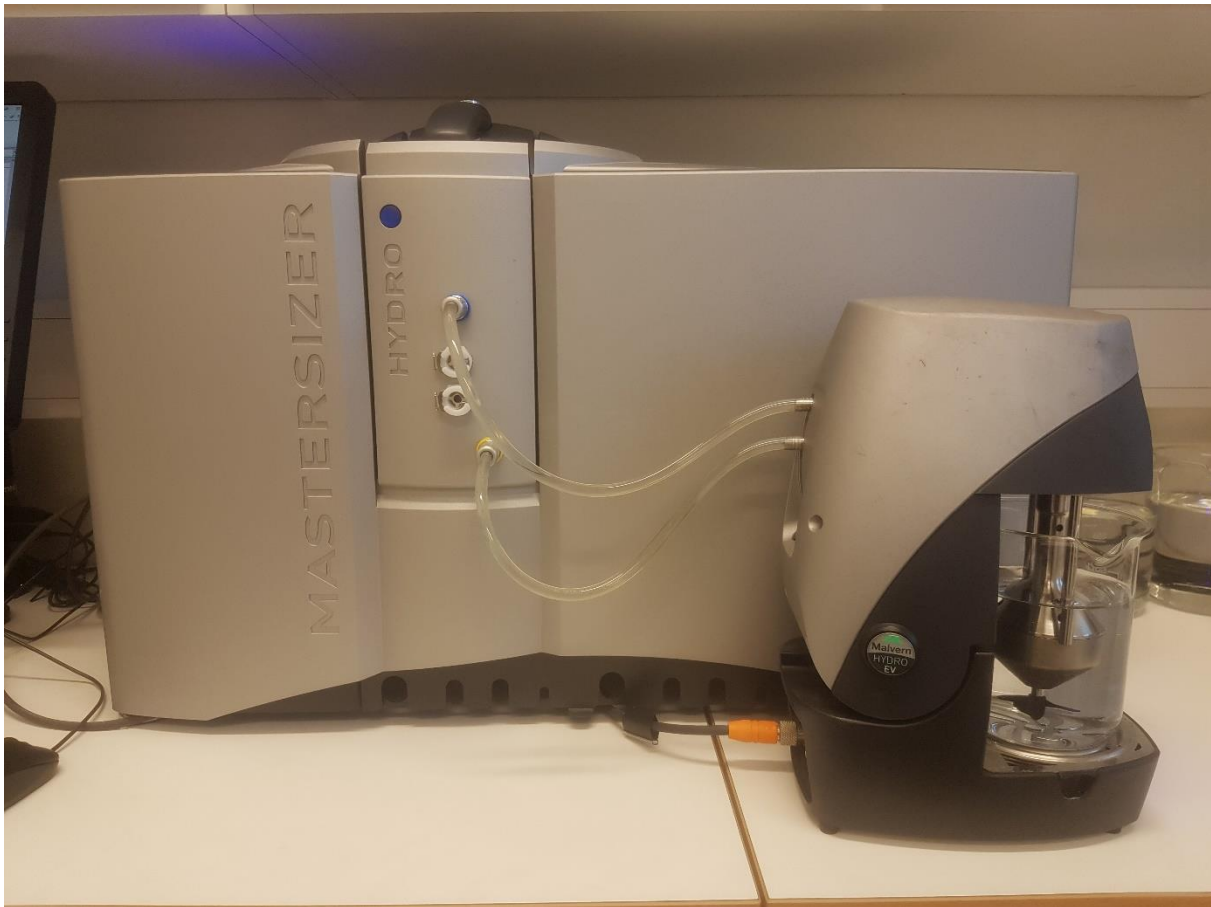
Mastersizer

Mastersizer brukes til å analysere partikkelstørrelser med laserdiffraksjon. Ved partikkelstørrelseanalysering av prøvene tatt ved forsøkskjøring, har denne analysemetoden blitt brukt til å analysere kornfordelingen for:

- Prøver med en toppstørrelse under 1 mm
- Prøver med en toppstørrelse over 1 mm, men her har kun materialet under 208 μm blitt analysert på mastersizer.

Ved laserdiffraksjonsmåling sendes en laserstråle gjennom en dispergert partikkelprøve, og vinkelvariasjonen i intensiteten til det spredte lyset måles. Store partikler sprer lys i små vinkler i forhold til laserstrålen og små partikler sprer lys ved store vinkler. Vinkelspredningsdataene analyseres deretter for å beregne størrelsen på partiklene som skapte spredningsmønsteret ved

hjelp av Mie-teorien om lysfordeling. Partikkelstørrelsen blir da rapportert som en volumekvivalent sfærediameter.



Figur 4-4: Mastersizer

Sammenslåing av mastersizer og manuell siktedata

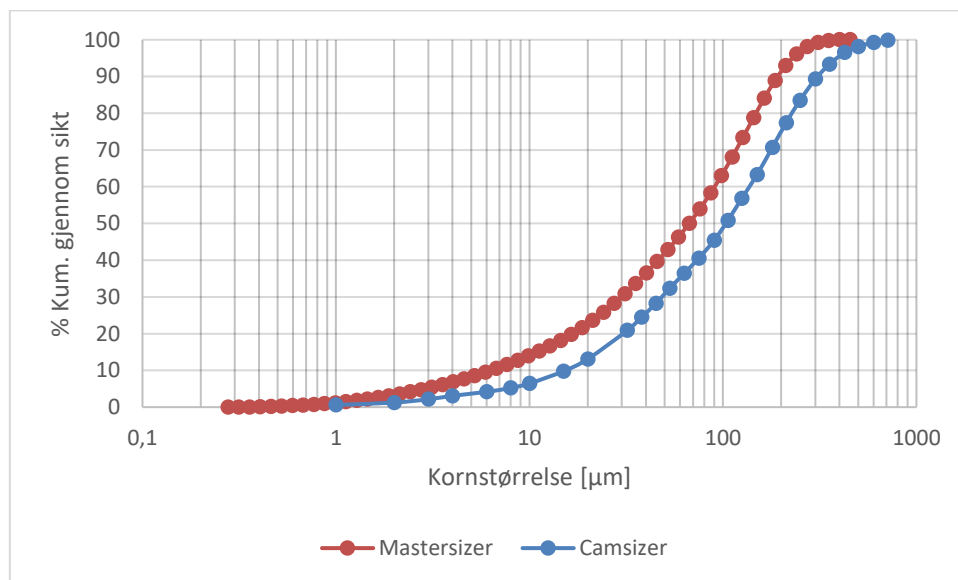
Mastersizer ble som nevnt brukt på prøver som hadde en toppstørrelse under 1 mm. For de prøvene som var i denne størrelsesordenen ble prøven først siktet manuelt. Partiklene under 208 μm ble så analysert på mastersizer malvern slik at man fikk en mer grundig analyse av kornfordelingen for det fineste materialet.

Ved disse tilfellene er det viktig å ta hensyn til at mastersizer bruker laser for å måle kornstørrelse. Når man sikter ut en finfraksjon manuelt for så å analysere denne på mastersizer, vil man få en toppstørrelse høyere enn siktesatsen man har brukt (i dette tilfellet en toppstørrelse over 208 μm). Dette forekommer når avlange korn går igjennom sikteåpningen, men blir målt til en grovere kornstørrelse når de analyseres med laser. Dette korrigeres med å legge til andelen med korn over 208 μm i mastersizeranalysen i det manuelle sikteresultatet. Andelen korn som

måles over 208 μm har vært 2-4% av den totale prøven av materiale under 208 μm , og man kan da anta at denne tilnærmingen er tilstrekkelig for å korrigere prøveresultatene.

Analyser på mastersizer i forhold til camsizer

Som nevnt i starten av dette delkapittelet er det blitt brukt camsizeranalyse for Titanias kretsprodukt fra siktekrets. Camsizer bruker bildeanalyser for å bestemme partikkelstørrelse, og bruker dermed en annen analyseteknikk enn mastersizer. For å sammenligne disse to analysemetodene ble materiale fra den ene møllekretsen analysert på mastersizer i tillegg til camsizer. Analysene viste at mastersizeren gir generelt et finere resultat enn ved analysering på camsizer, men med varierende forskjeller. Et eksempel på resultater fra de to analysemetodene gjort på samme material dette er vist i figur 4-5.



Figur 4-5: Partikkelstørrelseanalyse gjort på samme materiale med camsizer og mastersizer

4.3.2 Kjemisk analyse

For å analysere prøvene kjemisk ble en FPXRF (Field-Portable X-Ray Fluorescence) ble valgt som analyseverktøy for å få raske analyser. FPXRF-analysatoren måler de karakteristiske energinivåene av røntgenstråler som sendes ut fra elementer når det bestråles med en høyenergisk fotonkilde (røntgenrør eller radioaktiv kilde). Energien til hver røntgenstråle identifiserer et bestemt element tilstede i prøven, og hastigheten til røntgenstrålene av en gitt energi bestemmer mengden av elementet som er tilstede i prøven.



Figur 4-6: Fastmontert FPXRF

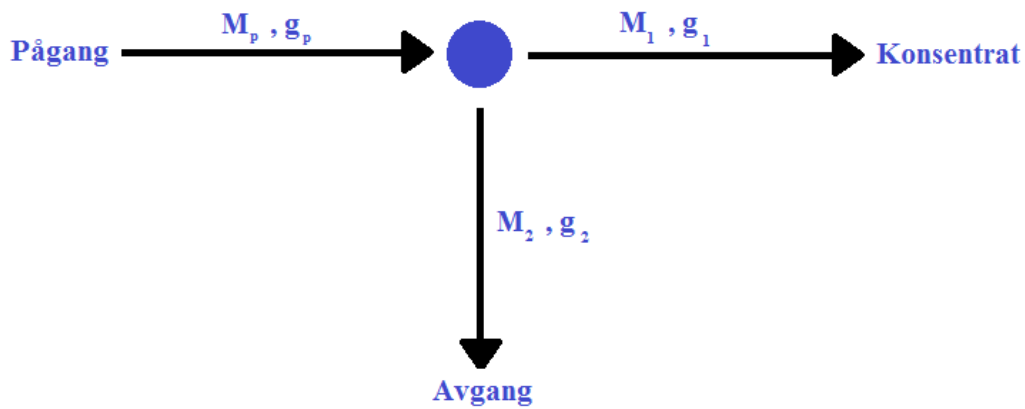
Preparering av prøver og analyse

FPXRF ble brukt til å analysere elementinnholdet i ulike fraksjoner i prøvematerialet. Prøvene ble først siktet opp i fraksjoner på siktestativ og hver fraksjon ble splittet opp for å få en prøve på 15-20 gram. Disse oppsplittede prøvene ble så malt ned i slyngmølle og preparert opp i en prøvebeholder.

Ved bruk av en FPXRF vil prøveresultatene bli mer nøyaktig når prøven analyseres over tid. I dette tilfelle ble dermed prøvene analysert i 120 sekunder. Analyseverktøyet ble derfor fastsatt i et stativ, slik at vibrasjonsstøy ble redusert og analysene ble mest mulig nøyaktig.

4.4 Beregningsmetoder

4.4.1 Beregning og analyse av separasjonsresultat



Figur 4-7: En enkel prosess med to produkter

Når en massestrøm deles i to eller flere delstrømmer, vil summen av delstrømmene være lik pågangsstrømmen. Hvis man eksempelvis tar for seg en pågang som splittes inn i konsentrat og avgang med tilhørende gehalter av mineral i (se Figur 4-7) kan man bruke ligning (1) og (2) som oppfyller systemet.

$$M_1 g_{i1} + M_2 g_{i2} = M_p g_{ip} \quad (1)$$

$$M_1 + M_2 = M_p \quad (2)$$

Løsningen av disse to likningene kalles *toproduktsformelen*:

$$\frac{M_1}{M_p} = \frac{g_{ip} - g_{i2}}{g_{i1} - g_{i2}} \quad (3)$$

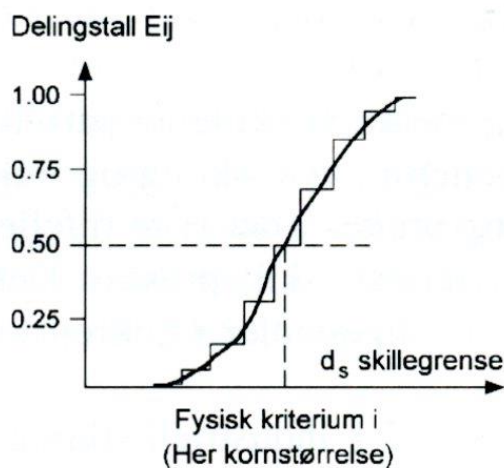
Ved skilleprosesser deles partikkelsamlingen (mengden) pågang i delmengder som kalles produkter. Vanligvis brukes en eller annen fysisk egenskap som skillekriterium. Det enkleste eksempel er at vi deler pågangen i to delmengder etter kornstørrelse hvor partiklene har større

eller mindre diameter enn d_s som da blir skillegrensen. Kornstørrelse blir da skillekriteriet (Sandvik et al., 1999).

Fortsetter vi å bruke kornstørrelse som skillekriterium, vil grovgods i finfraksjonen og fingods i grovfraksjonen være feilplassert. Ved å bestemme vekt og sikteanalyse for hvert av produktene kan man beregne delingstallet E for hver kornklasse. *Delingstallet* E_i definerer hvor meget av pågangsmassen i kornklasse i som ender i det undersøkte produkt, j (Sandvik et al., 1999);

$$E_{ij} = \frac{M_j \cdot g_{ij}}{M_p \cdot g_{ip}} \quad (4)$$

For å analysere verdiene av delingstallet for de forskjellige fraksjonene setter man verdiene inn i en *skillekurve* (se eksempel Figur 4-8). Dess brattere denne skillekurven er, dess bedre skille gir skilletrinet.



Figur 4-8: Eksempel kornfordelingskurve (Figur 3.1-2, Sandvik et al., 1999, s.143)

I denne rapporten er delingstallet satt som en funksjon av pågang sikt og kretsprodukt.

4.4.2 Beregning av turtall

Møllas kritiske turtall defineres som det turtall hvor sentrifugalkraft og tyngdekraft er like store for et massepunkt som befinner seg på møllens innvendige periferi. Massepunktet vil da følge trommelen rundt, mens ved lavere turtall vil malelegemet slippe trommelen når det kommer til en viss høyde og bevege seg i en kaste- eller rullebane mot nedre del av trommelen. For å finne en sammenheng mellom møllas diameter og hvor stort det kritiske turtallet vil være, brukes formelen (Sandvik et al., 1999):

$$n_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g \cdot 1800}{D}} = 42,3 \cdot D^{-0,5}$$

hvor

n_c = møllens kritiske turtall [rpm]

g = tyngdens akselerasjon [m/s^2]

D = møllens diameter [m]

5 Del 1: Simulering av møllekrets med syklon

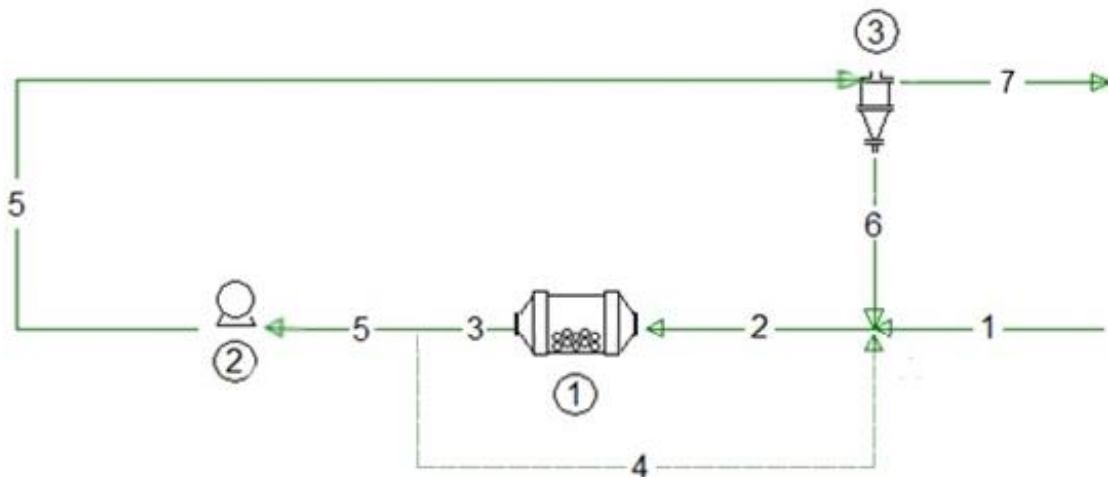
I dette kapitlet blir kretsoppsettet og resultatene fra forsøkskjøringene ved møllekrets med syklon gjennomgått og diskutert. Hver syklon ble prøvd ut med ulike underløpsdyser for å se hvordan kretsen ble påvirket av ulike syklondimensjoner for å forsøke å simulere møllekrets 4 på Titania. Syklonene som ble brukt i disse forsøkene var:

- Syklon 1: syklon med 55 mm indre diameter
- Syklon 2: syklon med 80 mm indre diameter
- Syklon 3: Mozley syklon

Det ble i tillegg forsøkt å kjøre kretsen med en syklon med syklondiameter 45 mm, men det viste seg at den ikke hadde nok kapasitet til å brukes til dette forsøket. Dette førte til at systemet gikk tett fort etter oppstart, og det er dermed ingen analyser å vise til. For de resterende syklonene fikk man kretsen stabil og fikk prøvetatt massestrømmene.

5.1 Kretsoppsett

Figur 5-1 viser oppsettet for pilotkretsen med syklon. Strømmene er like som det generelle flytskjemaet fra kapittel 4.1 med en syklon som klasserer.



Figur 5-1: Flytskjema for krets med syklon. Definisjonene for massestrøm 1-7 ligger i tabell 4-1.

Det ble gjennomført forsøk med tre sykloner med ulik størrelse i kretsen. Disse ble prøvd med ulike underløpsdiameterere for å kartlegge hvordan endringene i denne driftsparameteren endrer resultatet. En oversikt over dimensjonene på syklonene som ble kjørt og prøvetatt er vist i tabell 5-1.

Tabell 5-1: Oversikt over dimensjoner til forsøkssykloner.

Syklon nr	Diameter [mm]	Overløpsdiameter [mm]	Underløpsdiameter (D_u) [mm]
1	55	14.8	10, 9, 8, 7.5
2	80	15	10, 9, 8
3	62	14	10, 8

Ved alle forsøkskjøringer med syklon som klasserer var det kun syklonparametere som ble endret. Påmatingshastighet og turtall på mølle var dermed konstant på henholdsvis 150 kg/h og 40 rpm.

Bilder av syklonene som ble brukt er vist i figur 5-2 til 5-4.



Figur 5-2: Syklon 1



Figur 5-3: Syklon 2



Figur 5-4: Syklon 3

5.2 Resultater

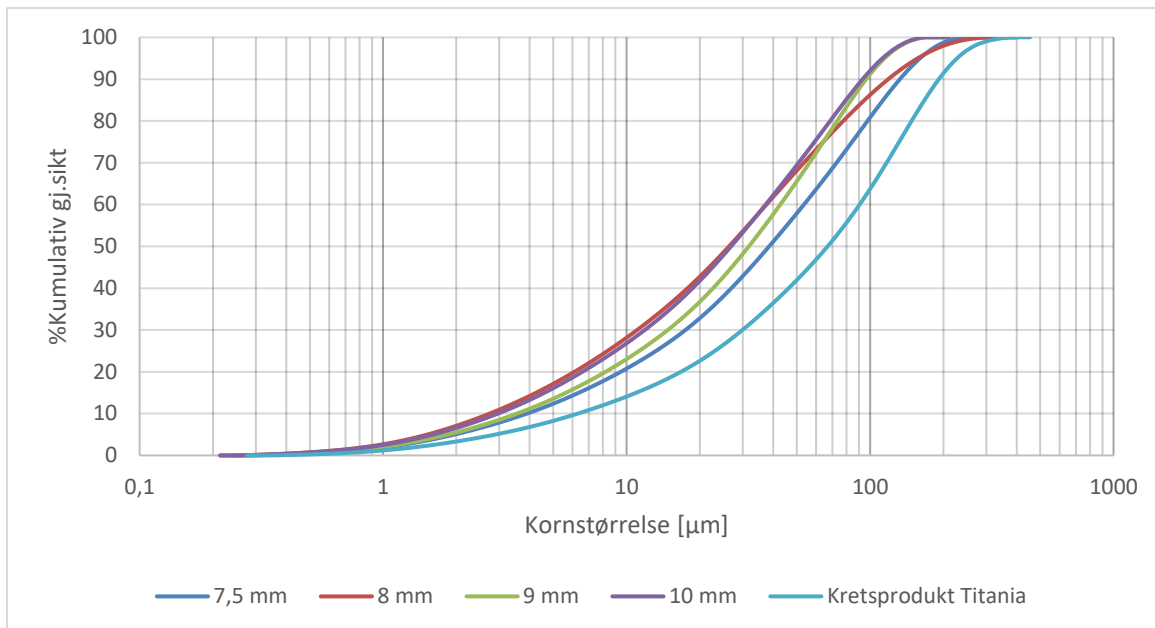
I dette resultatkapittelet er resultatene delt opp i underkapitler hvor partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet, sirkulerende last og effekt mølle for hver enkelt syklon blir vist frem og sammenlignet med underløpsdyser med ulik diameter. Enkelte av kretsproduktene er i tillegg analysert med FPXRF.

For å få en korrekt sammenligning mellom kornstørrelsefordelingen til kretsproduktet i den reelle møllekretsen på Titania og det som ble prøvetatt ved pilotkjøringene, ble materiale fra Titania analysert på mastersizeren på NTNU. Dette for å redusere risikoen for forskjeller mellom analysemetoder (se kapittel 4.3.1).

5.2.1 Syklon 1

Figur 5-5 viser partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet fra møllekretsen ved ulike underløpsdiameter på syklon 1. Ved forsøk med denne syklonen ga den minste underløpsdysen på 7,5 mm diameter det groveste kretsproduktet, mens den største underløpsdysen (10 mm) ga det fineste kretsproduktet.

Sirkulerende last og effekt mølle økte med økende underløpsdiameter (Se tabell 5-2).

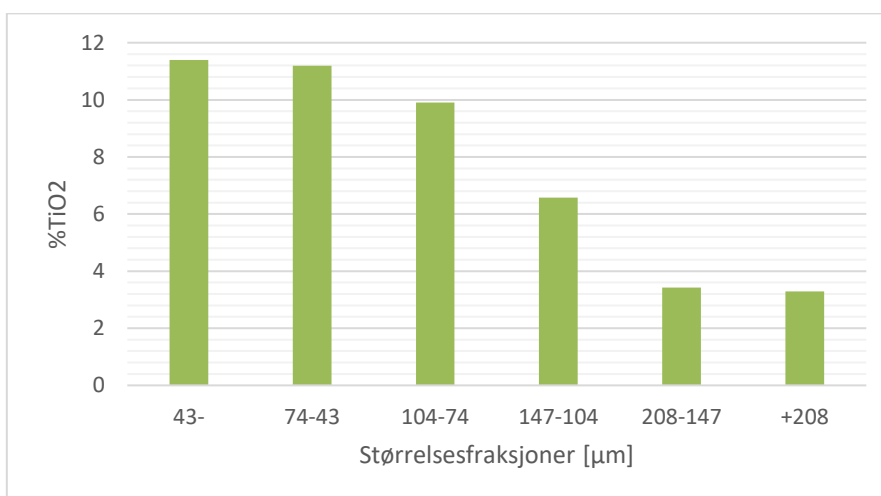


Figur 5-5: Partikkelstørrelsefordelingen til kretsproduktet for sykklon 1 ved ulike underløpsdysediameter (D_u) i forhold til Titanias kretsprodukt.

Tabell 5-2: Sirkulerende last og effektbruk mølle for ulike underløpsdyser på sykklon 1.

Du [mm]	Sirkulerende last	Effekt mølle [kW]
10	534%	4,4
9	424%	4,3
8	305%	4,23
7,5	309%	4,23

Figur 5-6 viser en oversikt over TiO_2 -gehaltene i ulike størrelsesfraksjoner i kretsproduktet ved bruk av underløpsdiameter 7,5 mm. Gehalten i de største fraksjonene er lave, og øker i de lavere fraksjonene.

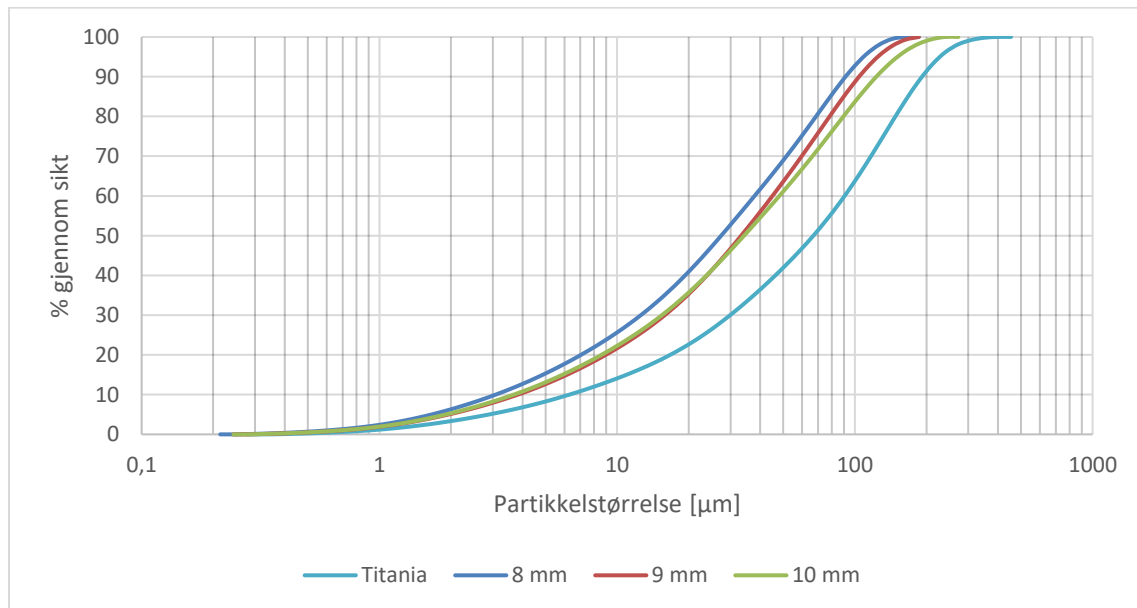


Figur 5-6: TiO_2 -gehaltene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet ved forsøkskjøring med sykklon 1 og underløpsdiameter 7,5 mm.

5.2.2 Syklon 2

Figur 5-7 viser partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet fra møllekretsen ved ulike underløpsdiameter på syklon 2. Ved forsøk med denne syklonen ga den største underløpsdysen på 10 mm diameter det groveste kretsproduktet, mens den minste underløpsdysen (8 mm) ga det fineste kretsproduktet.

Sirkulerende last og effekt mølle økte med økende underløpsdiameter (Se tabell 5-3).



Figur 5-7: Partikkelstørrelsefordeling for kretsproduktet ved bruk av syklon 2 i kretsen med ulike underløpsdiameter og partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet ved Titania.

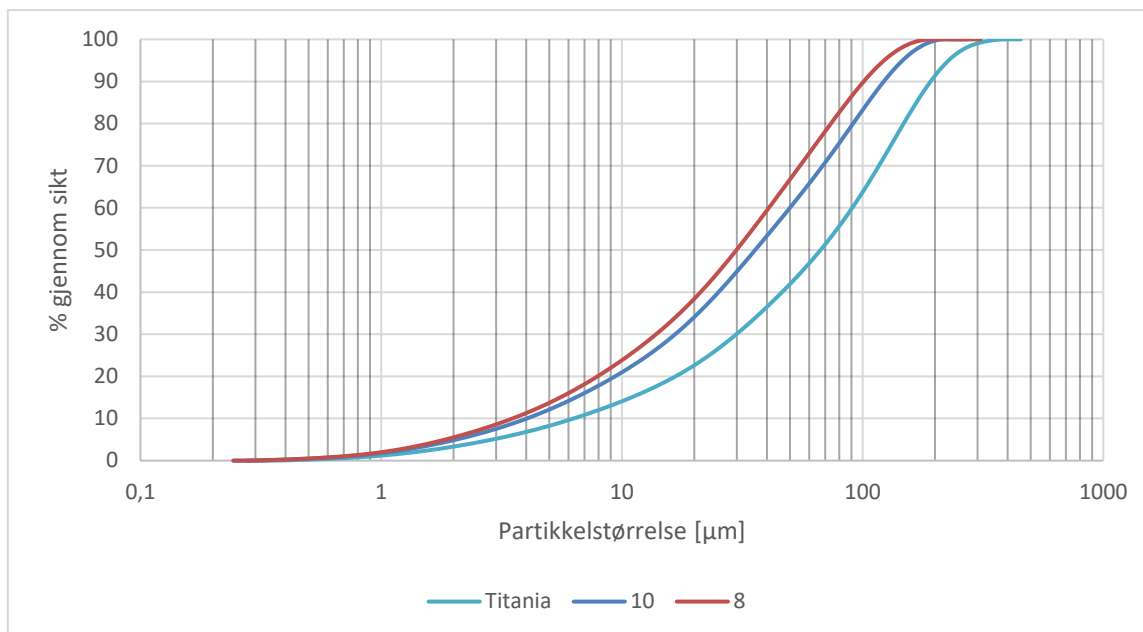
Tabell 5-3: Sirkulerende last for ulike underløpsdyser på syklon 2

Du [mm]	Sirkulerende last	Effekt mølle [kW]
10	559%	4,42
9	440%	4,34
8	320%	4,2

5.2.3 Syklon 3

Figur 5-8 viser partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet fra møllekretsen ved ulike underløpsdiameter på syklon 3. Ved forsøk med denne syklonen ga den største underløpsdysen på 10 mm diameter det groveste kretsproduktet, mens den minste underløpsdysen (8 mm) ga det fineste kretsproduktet.

Sirkulerende last og effekt mølle økte med økende underløpsdiameter (Se tabell 5-4)

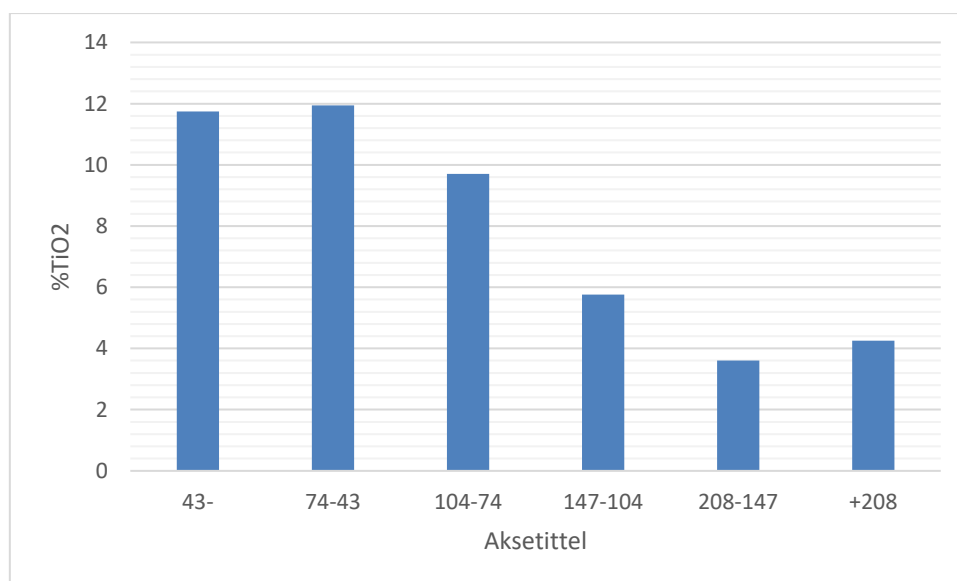


Figur 5-8: Partikkelstørrelsefordeling for kretsproduktet ved bruk av sykklon 3 i kretsen med ulike underløpsdiametere og partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet ved Titania.

Tabell 5-4: Sirkulerende last og effekt mølle for ulike underløpsdyser på sykklon nr. 3

D_u [mm]	Sirkulerende last	Effekt mølle[kW]
10	741%	4,4
8	501%	4,37

Figur 5-9 viser en oversikt over TiO₂-gehaltene i ulike størrelsesfraksjoner i kretsproduktet ved bruk av underløpsdiameter 10 mm. Gehalten i de største fraksjonene er lave, og øker i de lavere fraksjonene.



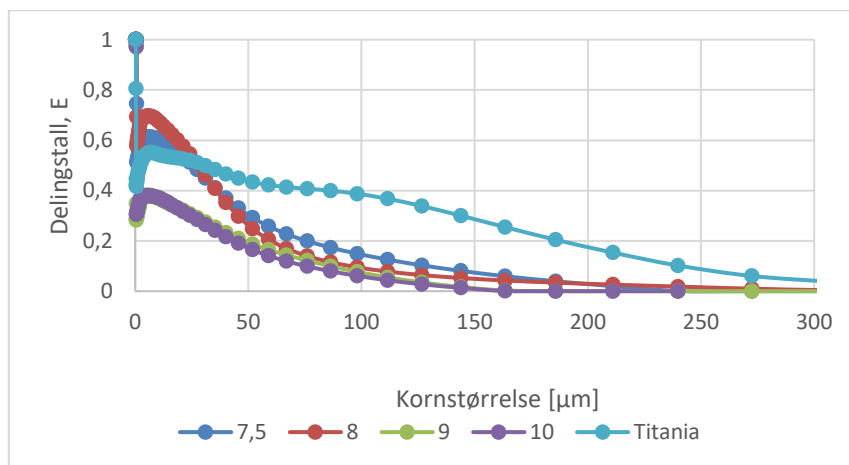
Figur 5-9: TiO₂-gehaltene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet ved forsøkskjøring med sykklon 3 og underløpsdiameter 10 mm.

5.3 Diskusjon

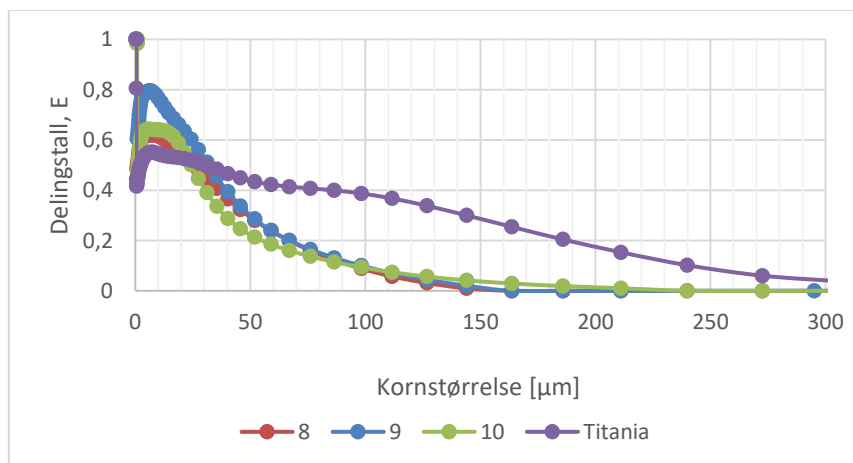
5.3.1 Vurdering av hvordan endringer i driftsparametere påvirker resultatet

Skillekurvene er vist som forholdet mellom pågang sikt og kretsproduktet. For sykklon 1 (figur 5-10) ga de to minste underløpsdysene (7,5 og 8 mm) en skillekurvene som er brattere enn ved de to største underløpsdysene (9 og 10 mm). For de to minste underløpsdysene vil 27-30% av pågangsmateriale til sikt i kornklassen 50 μm være korrekt plassert i kretsproduktet. For de to største underløpsdysene er 18-19% korrekt plassert i samme kornklasse. Den store forskjellen mellom disse ser man i produkt under 50 μm , hvor de to minste underløpsdysene gir et bedre (brattere) skille enn ved bruk av de to største underløpsdysene.

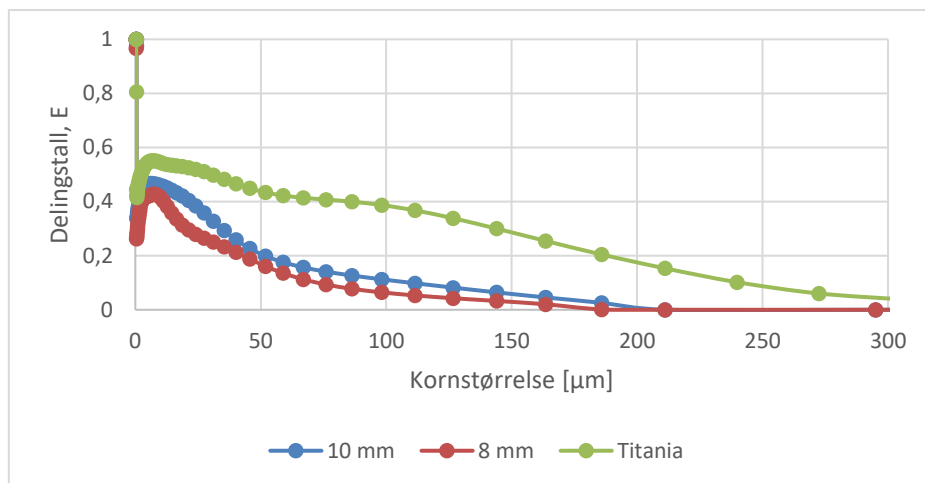
Endring i underløpsdiameter for sykklon 2 og 3 ga ikke store variasjoner i skilleeffektiviteten. Skillekurven for sykklon 2 (figur 5-11) viser at denne gir en høyere skilleeffektivitet enn for sykklon 1 (ved høy underløpsdiameter) og sykklon 3. Figur 5-12 viser at skillekurven for sykklon 3 er slak uansett underløpsdyse og at sykklonen har en lavere skilleeffektivitet.



Figur 5-10: Skillekurve for sykklon 1 ved ulike underløpsdiameterer [mm] og for Titanias sykklon i møllekrets 4.

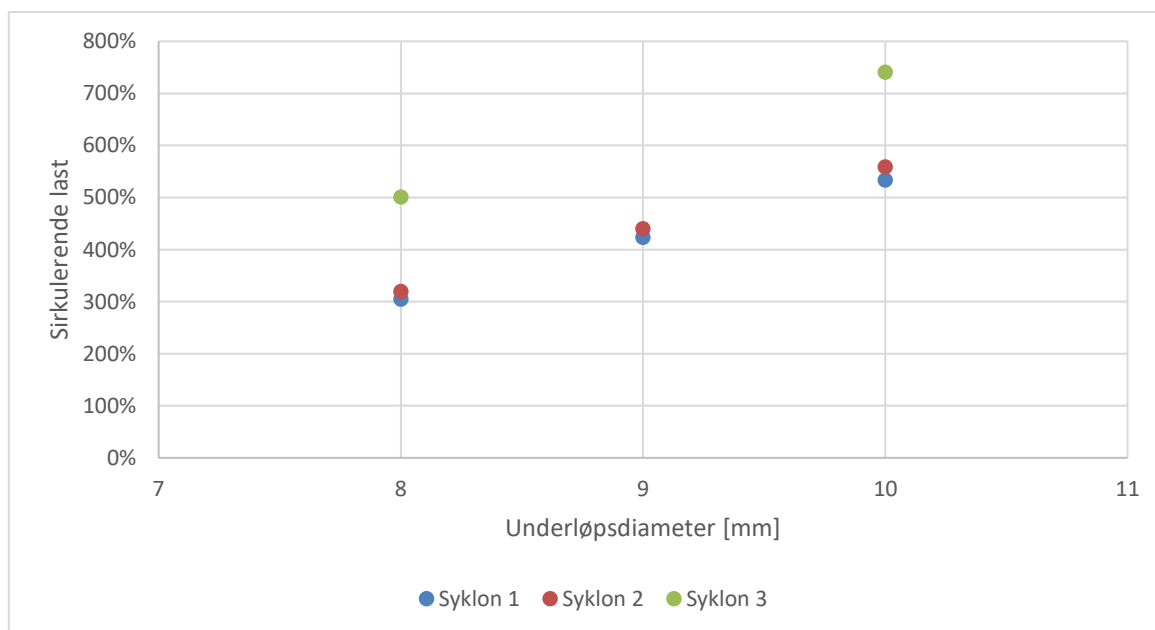


Figur 5-11: Skillekurve for sykklon 2 ved ulike underløpsdiameterer [mm] og for Titanias sykklon i møllekrets 4.



Figur 5-12: Skillekurve for syklon 3 ved ulike underløpsdiametere [mm] og for Titanias syklon i møllekrets 4.

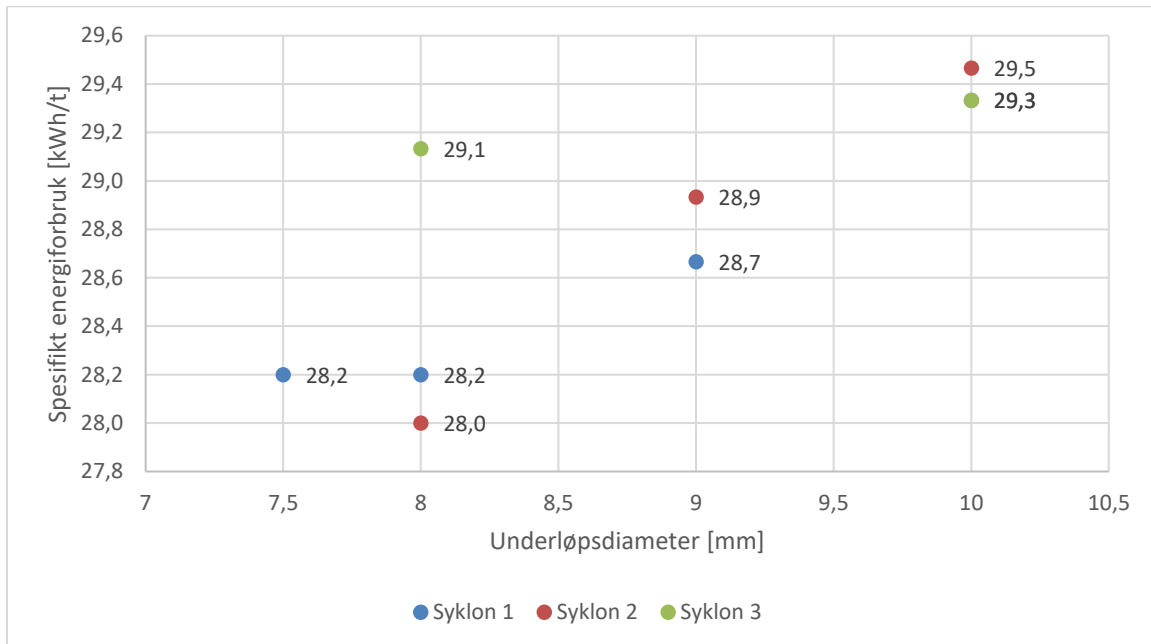
Den sirkulerende lasten økte med økende underløpsdyser for alle syklonene (figur 5-13). Syklon 1 og 2 ga like sirkulerende laster ved samme underløpsdiametere, mens syklon 3 ga en høyere sirkulerende last.



Figur 5-13: Sammenligning av sirkulerende last syklon 1, 2 og 3.

Effekten på mølla varierte mellom syklonene og underløpsdysene som ble brukt, og siden påmatingshastigheten var lik for alle syklonene varierer det spesifikke energiforbruket deretter. For syklon 1 var differansen mellom det spesifikke energiforbruket ved underløpsdiameter 8 mm til 10 mm med 1,1 kWh/t. For syklon 2 var denne differansen 1,5 kWh/t. Syklon 3 ga derimot en mindre differanse i spesifikt energiforbruk ved bruk av 8 og 10 mm underløpsdyser; 0,2 kWh/t. Som vist i figur 5-14 lå det spesifikke energiforbruket ved forsøkskjøring med syklon 3 og underløpsdiameter 8 mm høyere enn de to andre syklonene ved bruk av samme

underløpsdiameter. Ved bruk av 10 mm underløpsdiameter var derimot energiforbruket for mølla det samme ved installasjon av syklon 1 og 3 (29,3 kWh/t) og 0,2 kWh/t høyere for syklon 2.



Figur 5-14: Spesifikt energiforbruk ved forsøkskjøringene med syklon 1-3.

5.3.2 Vurdering av hvordan pilotkretsen gjenspeilet storskalakrets på Titania

Syklonene som er blitt brukt i forsøkskjøringene har gitt en lavere skillegrense enn ved Titania ved de driftsparametere pilotkretsen har blitt kjørt på, og kretsproduktet har blitt for fint for å kunne simulere Titanias krets. Skillekurvene for forsøkssyklonene viser at syklon 1 (ved lav underløpsdiameter) og syklon 2 har en bedre sikteeffektivitet enn syklonene på Titania. De fineste kornene søker lett til overløpet, og gir en bratt skillekurve. Titanias sykloner gir et mindre presist skille, noe som må tas i betraktning ved eventuelt videre forsøk. Hvis syklonen i forsøkskretsen fungerer bedre enn syklonen den skal simulere, kan dette gi et ukorrekt bilde for endringer i kretsparametere på pilotskala i forhold til hvordan de fungerer i storskala.

Partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktene var ved alle forsøkskjøringene med syklon var, som nevnt tidligere, for fine i forhold til Titanias kretsprodukt. I forhold til hverandre var ikke variasjonen stor mellom partikkelstørrelsefordelingen ved forsøkskjøringene. Skillekurvene for syklon 3 skilte seg derimot ut med en kurve som var nærmere Titanias, selv om kuttstørrelsen var lavere. Dette kan tyde på at denne syklonen skiller mer likt som syklonene i møllekrets 4 på Titania, og kan gi et mer likt skilleresultat som ved storskala hvis man får til å gjøre kretsproduktet ved forsøkskjøringene grovere.

Underløpsdiameterne som ble forsøkt på syklon 3 var 10 og 8 mm. Med disse underløpsdiameterne er den sirkulerende lasten rundt dobbelt så høy som ved storskala på møllekrets 4 som kun har 320% sirkulerende last. Siden denne syklonen gir en lignende tendens til skilleeffektivitet, kan en mindre underløpsdyse kanskje føre til et grovere kretsprodukt med en lik skillekurve og en sirkulerende last som er nærmere det som er ønskelig å simulere. Det eneste forbeholdet for at et slikt forsøk kan gjennomføres er at syklonen fortsatt har nok kapasitet ved redusering av underløpsdiameter.

For syklon 1 og 2 var den sirkulerende lasten ved det ønskede simuleringsresultatet med de minste underløpsdysene, men forsøkssyklonene hadde en brattere skillekurve enn Titanias sykloner og fungerer dermed mer effektivt enn klassereren de skal simulere.

På Titania er det spesifikke energiforbruket 8,83 ved normale innstillinger på 210 t/h. Dette er mye lavere enn det spesifikke energiforbruket som blir brukt ved forsøkskjøringer ved NTNU, og kan dermed ikke brukes i direkte sammenligning med Titanias målinger. Effektmålingene har derimot vist seg å være følsomme for endringer i driftsparametere og kan dermed brukes for å sammenligne endringer i spesifikt energiforbruk ved forsøkskjøringer. En sammenligning av disse verdiene kan uansett gi viktig informasjon om redusering eller økning i energiforbruk ved endringer av driftsparametere ved simulering.

6 Del 2: Simulering av møllekrets med sikt

I dette kapitlet blir kretsoppsettet og resultatene fra forsøkskjøringene ved møllekrets med sikt gjennomgått og diskutert. Ved disse forsøkskjøringene er variasjoner i ulike driftsparametere blitt forsøkt; turtall, påmatingshastighet og lysåpning på sikt.

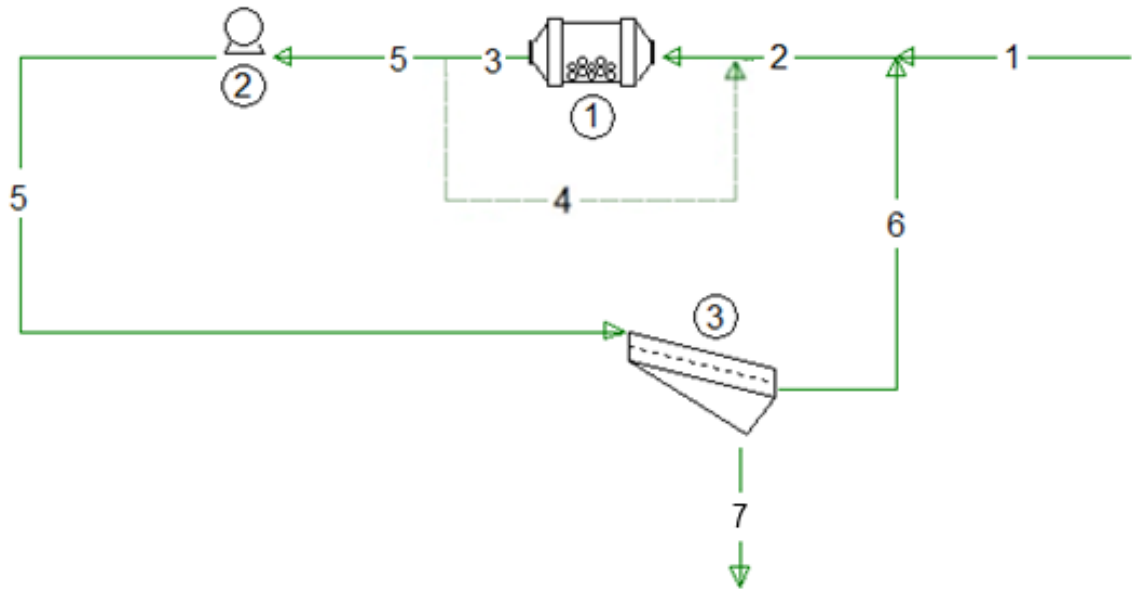
Siden de tre møllekretsene som er lukket med sikt har et identisk oppsett, er data for møllekrets 3 som er kjørt ved 78% av kritisk turtall og en påmatingshastighet på 85 t/h blitt brukt ved sammenligning med pilotkrets og sees på som representativ for møllekrets 1-3.

Partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet fra møllekrets 3 ved Titania er fra prøvetaking sommeren 2016 i tilknytning til prosjektoppgave skrevet av undertegnede, og er analysert på camsizer. Som vist i kapittel 4.3.1 kan det vise seg at prøver som blir analysert på camsizer gir et grovere resultat enn hvis samme prøve blir analysert på mastersizer. Kornfordelingen for Titanias kretsprodukt er derfor ment som henvisende, og resultatene fra prøvekjøringene kan dermed være nærmere ønsket resultat enn det vises til i grafene.

6.1 Kretsoppsett

Kretsen ble satt opp med samme elementer som vist i kapittel 4.1 med swecosikt (Figur 6-2) som klasserer. Det ble som normalt tilsatt vann ved innløpet og utløpet på mølla, men under forsøk som ble kjørt med en påmatingshastighet over 200 kg/h måtte det tilsettes mer vann ved

innløpet for å forhindre tettkjøring i innløp. Det ble dermed installert en ekstra vanntilsats med mer trykk ved innløpet for å forhindre at pågangsmasse bygde seg opp.



Figur 6-1: Pilotoppsett med sikt.



Figur 6-2: Swecosikt.

Swecosiktet fikk tilsatt pågang midt over siktet. Siktet bruker roterende vibrasjon for å sikte gjennom partikler finere enn lysåpningen. Partikler som er for grove bygges opp langs kanten oppå siktet før det bygges opp en stor nok masse for å bli presset ut returslangen og går tilbake i mølla. Et eksempel på dette er vist i figur 6-3.



Figur 6-3: Bilde av swecosikt under forsøkskjøring. Massen presses ut i kantene av rotasjonsvibrasjonen og materialet bygges opp i kantene til det går ut i returrøret.

Siktesatsene som ble brukt ved forsøkskjøring var:

- 390 μm
- 425 μm
- 450 μm
- 550 μm

Alle disse siktesatsene var utformet med kvadratiske lysåpninger (se figur 6-4). I tillegg til endringer i lysåpning, ble det gjort variasjoner i turtall og påmatingshastighet.



Figur 6-4: Nærbilde av sikteduk på swecosikt. Her kan man se de kvadratiske lysåpningene.

6.2 Resultater

I dette delkapittelet vil partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet, sirkulerende last og effekt mølle ved de ulike forsøkskjøringene bli presentert. For enkelte prøvekjøringer vil også kjemiske analyser bli presentert. Resultatene er sammenlignet og delt inn i tre underkapittel:

1. *Forsøk med ulikt turtall*

Ved disse forsøkene ble det satt på en fast påmatingshastighet på 150 kg/h med to ulike turtallsinnstillinger for to siktesatser med lysåpning 390 og 450 μm .

2. *Forsøk med økt påmatingshastighet*

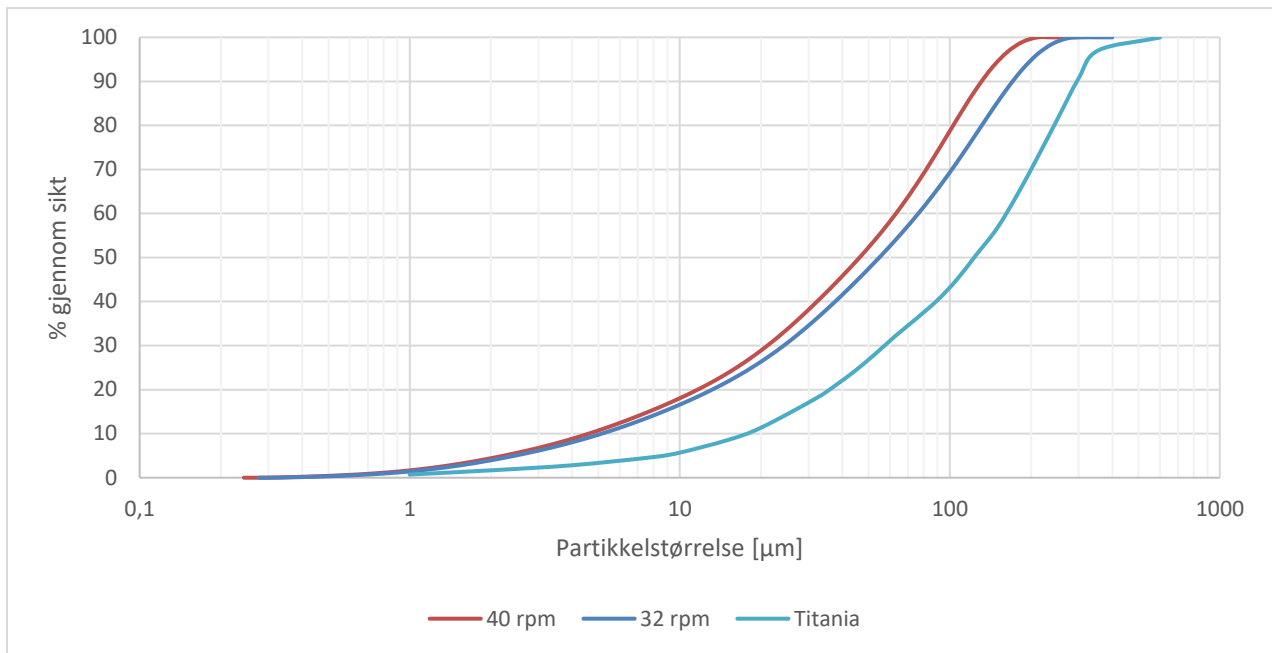
Ved disse forsøkene var lysåpningen på siktesatsen fastsatt på 390 μm og konstant turtall på 40 rpm. Påmatingshastigheten ble da økt med 50 kg/h per forsøkskjøring fra 150 kg/h til 300 kg/h.

3. *Forsøk med ulik lysåpning på sikt*

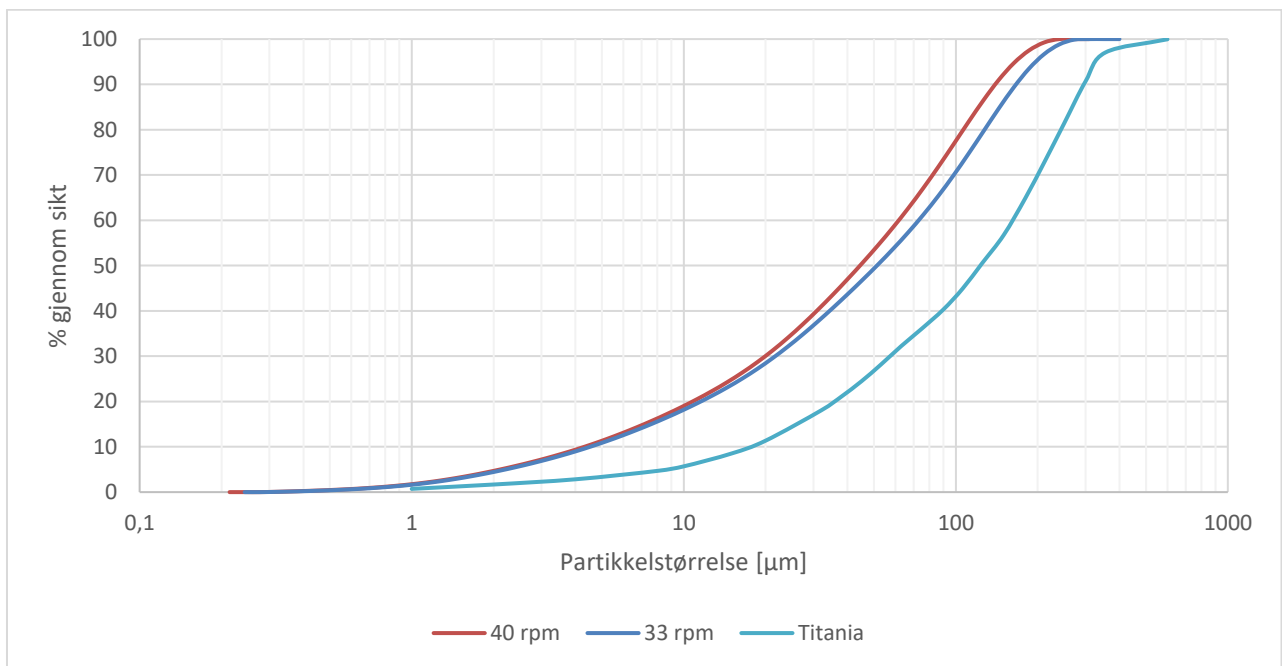
Ved disse forsøkene var påmatingshastigheten fastsatt på 300 kg/h og turtall 40 rpm. Kun lysåpningen på siktesatsen ble endret.

6.2.1 **Forsøk med ulikt turtall**

Ved disse forsøkene ble det kjørt med en fast påmatingshastighet på 150 kg/h. To siktesatser med ulik lysåpning ble forsøkt i kretsen: 390 og 450 μm . Disse ble igjen kjørt i en møllekrets hvor mølla hadde to ulike turtall: 40 rpm og 32/33 rpm. Figur 6-5 og 6-6 viser partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet ved disse forsøkene hvor man kan se at kretsproduktet ble grovere ved lavere turtall i forhold til samme lysåpning ved 40 rpm.



Figur 6-5: Partikkelstørrelsefordeling for kretsprodukt ved 390 µm sikt og ulikt turtall og for Titanias kretsprodukt.



Figur 6-6: Partikkelstørrelsefordeling for kretsprodukt ved 450 µm sikt og ulikt turtall og for Titanias kretsprodukt.

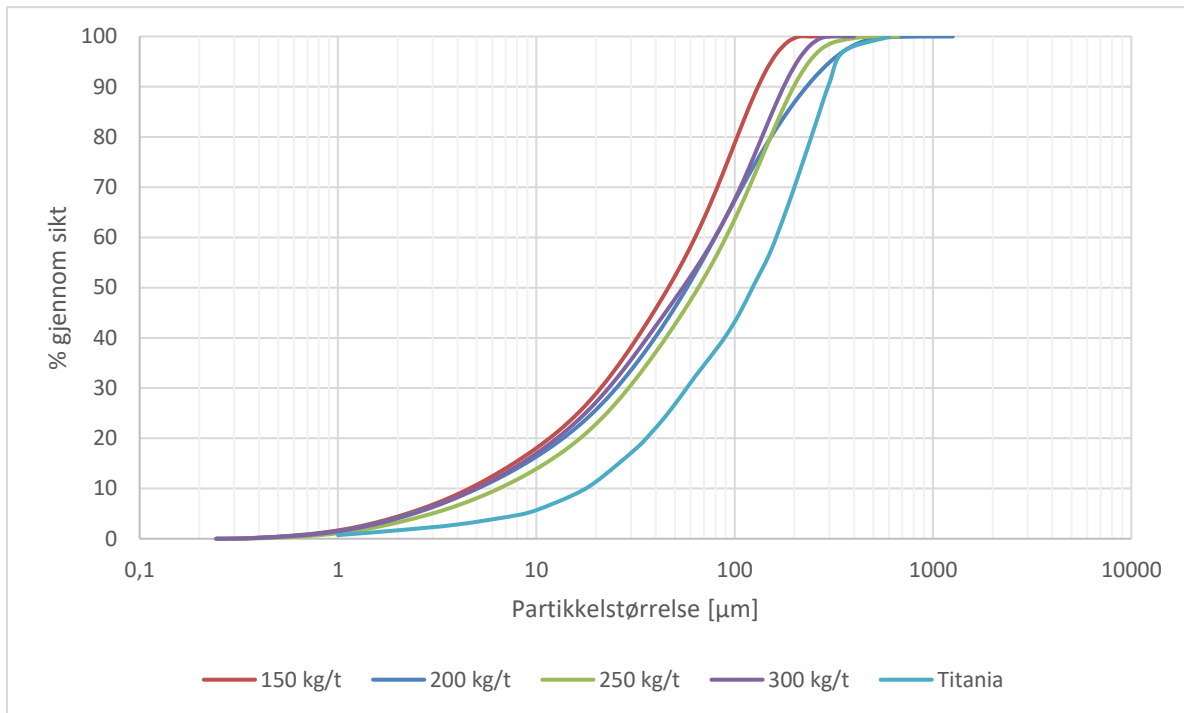
Tabell 6-1 viser sirkulerende last og effekt mølle for de ulike forsøkene.

Tabell 6-1: Sirkulerende last og effekt mølle.

Lysåpning [µm]	Turtall [rpm]	Sirkulerende last	Effekt mølle[kW]
390	40	11%	3,8
	32	16%	3,38
450	40	10%	3,83
	33	15%	3,47

6.2.2 Forsøk med økt påmatingshastighet

Ved dette forsøket ble påmatingshastigheten på forsøkskjøringene økt trinnvis med 50 kg/h fra 150 til 300 kg/h. Alle forsøkene ble kjørt med et sikt med lysåpning 390µm og et turtall på 40 rpm. Figur 6-7 viser partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet ved de ulike forsøkene. Den viser at fra 150 kg/h til 250 kg/h blir kretsproduktet grovere ved økt påmatingshastighet. Når kretsen ble kjørt med en påmatingshastighet på 300 kg/h er det finere enn ved lavere tonnasje, men grovere enn ved 150 kg/h.



Figur 6-7: Partikkelstørrelsefordeling for kretsprodukt ved økende påmatingshastighet og for Titanias kretsprodukt.

Tabell 6-2 viser sirkulerende last og effektbruk mølle ved ulike påmatingshastigheter. Begge disse parameterne øker ved økende påmatingshastighet. Sirkulerende last øker gradvis fra 150-250 kg/h, mens fra 250 kg/h til en påmatingshastighet på 300 kg/h nesten tredobles den sirkulerende lasten.

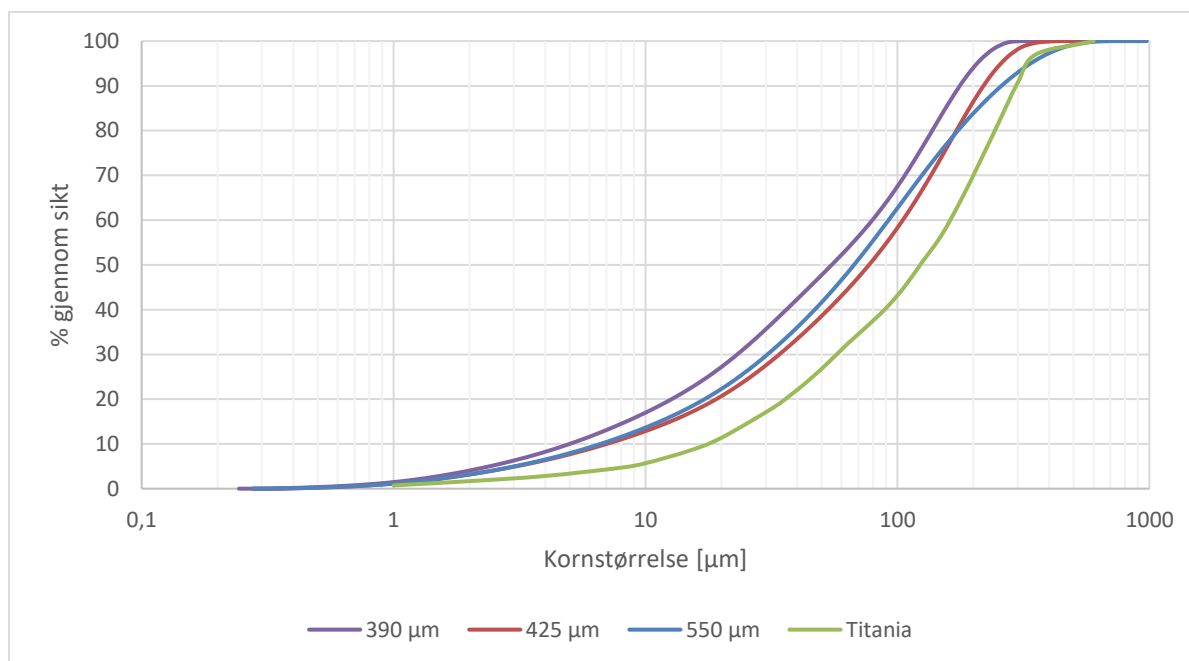
Tabell 6-2: Sirkulerende last og effekt mølle ved økende påmatingshastighet.

Påmatingshastighet [kg/h]	Sirkulerende last	Effekt mølle[kW]
150	11%	3,8
200	22%	3,86
250	36%	3,99
300	93%	4,08

6.2.3 Forsøk med ulike lysåpninger på sikt

Forsøkene i kapittel 6.2.2 viste at partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet ble grovere når påmatingshastigheten økte. Det ble dermed kjørt forsøk med en høy påmatingshastighet

(300 kg/h) og sikt med større lysåpning for å få et lignende resultat som ved Titania. Figur 6-8 viser partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet fra disse forsøkskjøringene. Den sirkulerende lasten ble redusert ved økende lysåpning på siktet som vist i tabell 6-8. Resultatene som vises for forsøkskjøringen med 390 μm sikt er den samme forsøkskjøringen som henvises som forsøkskjøring med 300 kg/h i kapittel 6.2.2.



Figur 6-8: Partikkelstørrelsefordeling for kretsprodukt ved endring i lysåpning på sikt og for Titanias kretsprodukt.

Tabell 6-3: Sirkulerende last ved økende lysåpning sikt.

Lysåpning sikt [μm]	Sirkulerende last
390	93%
425	43%
550	41%

6.3 Diskusjon

6.3.1 Vurdering av hvordan endringer i driftsparametere påvirker resultatet

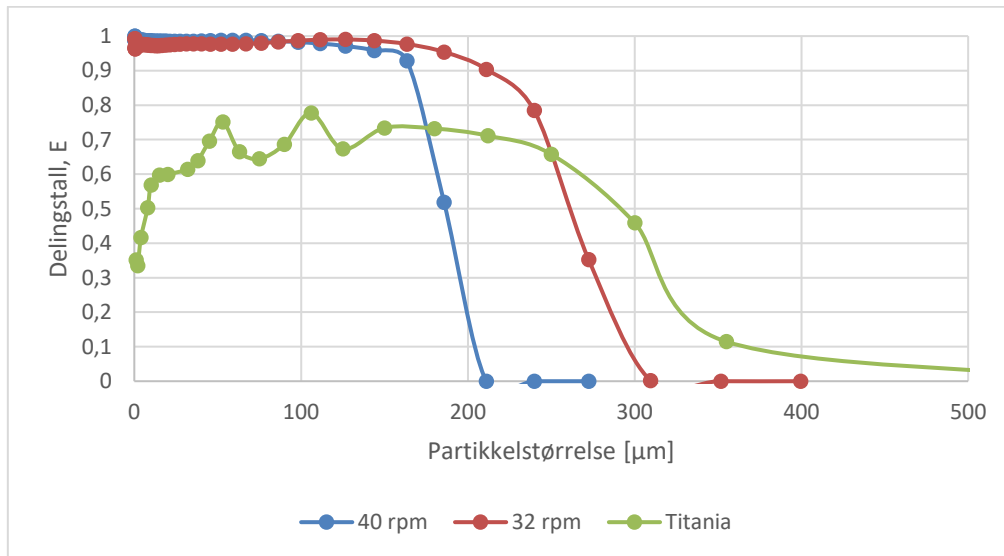
I dette delkapittelet vil det diskuteres hvordan endringene i oppsett/driftsparametere påvirker partikkelstørrelsefordelingen for kretsprodukt, interne massestrømmer, skilleskarphet for siktet og energiforbruk ved pilotkjøring. Det vil også være en generell sammenligning av resultatene fra del 1 mot del 2. Disse er delt inn under hvilke endringer som ble gjort i kretsen:

- Redusering av turtall
- Ulik påmatingshastighet
- Ulik lysåpning på sikt

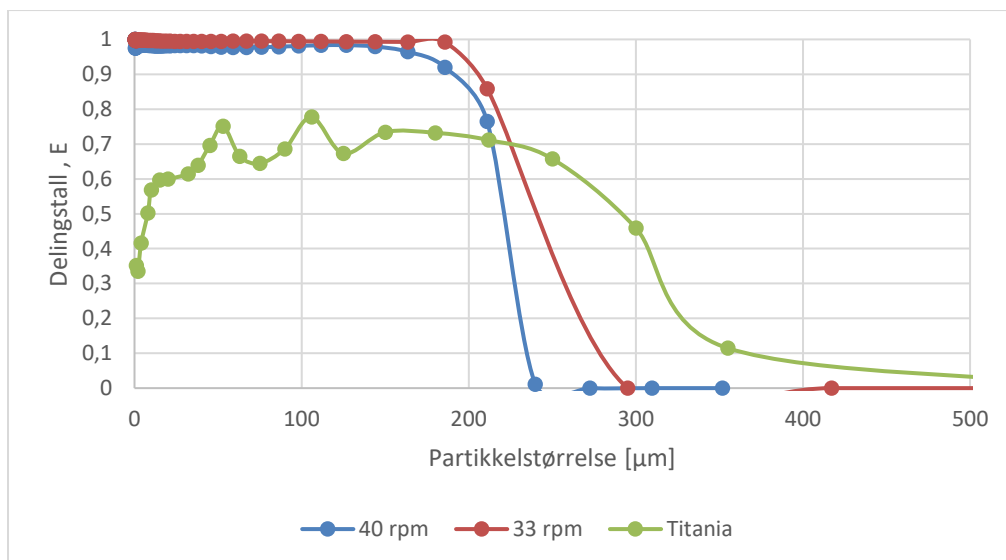
- Sikt i forhold til sykron som klasserer

Redusering av turtall

Ved redusering av turtall ble partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet grovere som vist i kapittel 6.2.1. Dette vises i skillekurvene i figur 6-9 og 6-10 ved at kuttstørrelsen for siktet er ved en høyere partikkelstørrelse. Skillet er derimot litt slakere ved et lavere turtall, noe som viser til en mindre effektivt sikteprosess.

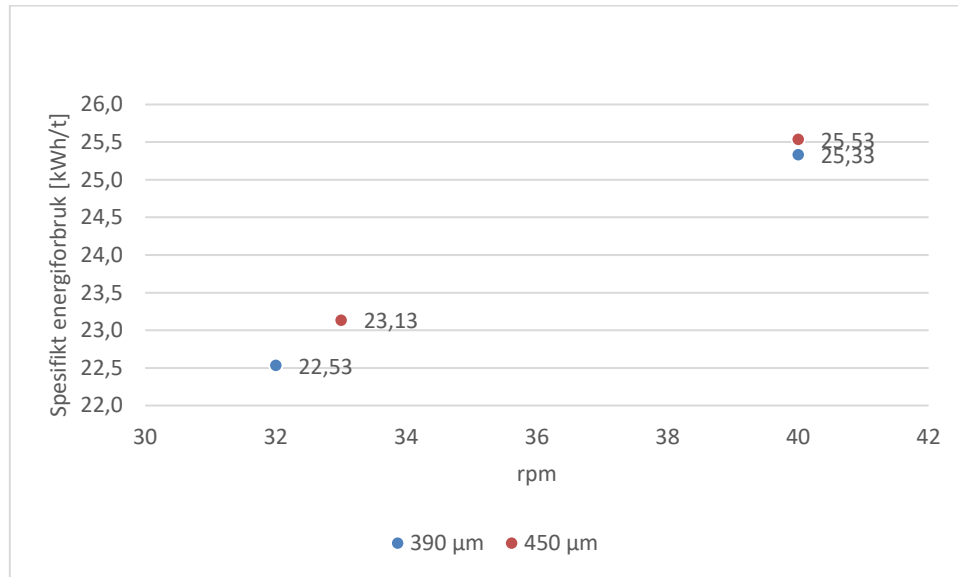


Figur 6-9: Skillekurve for 390 µm sikt ved 150 kg/h påmatingshastighet og ulikt turtall, og skillekurven for Titanias sikt.



Figur 6-10: Skillekurve for 450 µm sikt ved 150 kg/h påmatingshastighet og ulikt turtall, og skillekurven for Titanias sikt.

Den sirkulerende lasten ble redusert med 5 prosentpoeng ved bruk av både 450 og 390 μm sikt når turtallet økte. Dette viser at materialet ble raskere nedmalt ved høyere turtall. Det spesifikke energiforbruket økte ved høyere turtall, siden effekten øker ved raskere møllehastighet (figur 6-11).

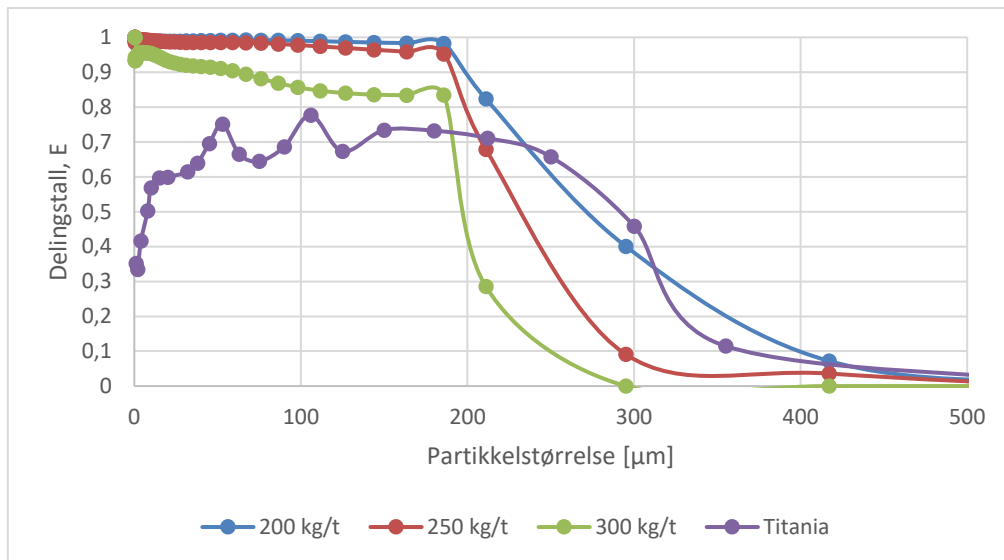


Figur 6-11: Spesifikt energiforbruk ved endring i turtall ved en påmatingshastighet på 150 kg/h.

Ulik påmatingshastighet

Partikkelstørrelsefordelingen for forsøkene ved ulik påmatingshastighet viste at kretsproduktet ble finest ved 150 kg/h og grovest ved 200 og 250 kg/h. Ved de to sistnevnte forsøkskjøringene var alle partikler plassert korrekt i kretsproduktet under 190 μm (se figur 6-12). For grovere kornstørrelser enn 190 μm var det et mindre klart skille ved 200 kg/h enn ved 250 kg/h, ved at med en påmatingshastighet på 200 kg/h ble skillekurven brattere.

Ved 300 kg/h viser skillekurven en ineffektiv sikteprosess under 190 μm i forhold til ved lavere påmatingshastighet. For partikler i størrelsen 190 til 100 μm er 15 % av materialet i denne størrelsesfraksjonen feilplassert av klassereren og går dermed i returen tilbake i mølla i stedet for i kretsproduktet. Dette ineffektive skillet kan ha ført til et finere kretsprodukt, ved at partikler som allerede har en partikkelstørrelse lavere enn lysåpningen går i retur og blir videre nedmalt i mølla.



Figur 6-12: Skillekurve for 390 µm sikt ved ulike påmatingshastigheter, og skillekurven for Titanias sikt.

Etter forsøkskjøringen med 300 kg/h i påmatingshastighet ble sikten undersøkt. Etter resterende masse som lå igjen på siktet ble fjernet, så sikten ut som vist i figur 6-13A. Siktet var tettet igjen på det midtre partiet med masse. Figur 6-13B viser siktet etter spyling, hvor det fortsatt er partikler kilt fast i lysåpningene i midten av sikten. Dette kan ha ført til ineffektiv sikting, siden det er størst sjanse for partiklene å gå gjennom sikten på det midtre partiet av sikten hvor pågangen kommer inn. Hvis et partikkel som har en partikkelstørrelse under størrelsen på lysåpningen blir forhindret å gå gjennom sikten på det midtre partiet, vil det havne i returmassen som sendes ut mot kanten av siktet (se figur 6-3). Når et partikkel havner i denne massen vil det ha en lavere sjanse å gå gjennom siktet på grunn av at det klebres til de andre partiklene i massen eller at det ikke havner direkte på siktet.

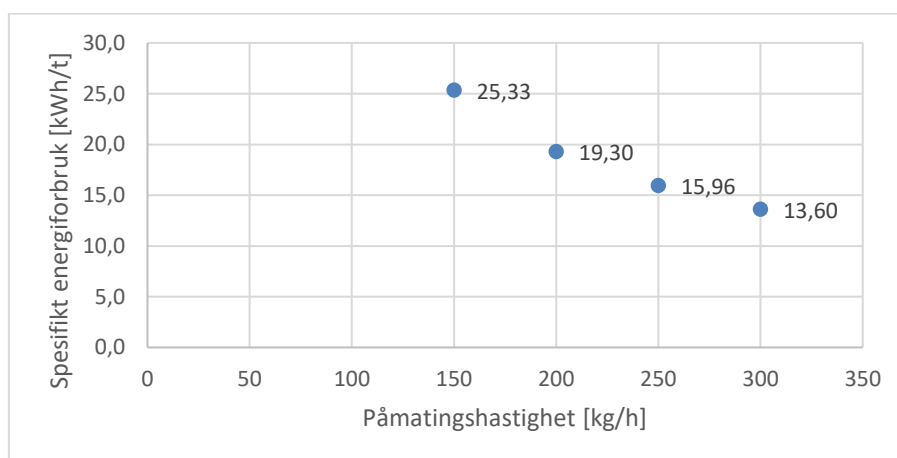
Denne teorien støttes opp når man ser på den sirkulerende lasten for de ulike forsøkskjøringene. Fra 150 kg/h til 250 kg/h øker den sirkulerende lasten fra henholdsvis fra 11% til 36%. Ved forsøkskjøringen med 300 kg/h økte den sirkulerende lasten til 93%. Den sirkulerende lasten har dermed nesten blitt tredoblet ved å øke påmatingshastigheten fra 250 til 300 kg/h, noe som virker urealistisk i forhold til økningen mellom forsøkskjøringene med lavere påmatingshastighet.



Figur 6-13: (A) Sikt etter resterende masse er fjernet, men før spyling. (B) Sikt etter spyling, men før ultralydbehandling.

Som vist i resultatkapittelet økte effekten gradvis fra laveste til høyeste påmatingshastighet. Økningen i effekt var 280 W fra 150 til 300 kg/h. Denne endringen i effekt er liten i forhold til endringen i påmatingshastighet, og dermed vil energien per tonn som er malt ned (kWh/t) blir lavere. Ved å kjøre inn mer tonn materiale per time vil altså denne energien brukes på en større massestrøm, noe som vil redusere energiforbruket per tonn med materiale. Det spesifikke energiforbruket for forsøkskjøringene ved endring i påmatingshastighet er vist i figur 6-14.

På grunn av at det er lite variasjon i effektforbruk ved økning i påmatingshastighet, vil dermed det spesifikke energiforbruket nesten halveres ved å doble påmatingshastigheten. Denne driftsparameteren er dermed den mest avgjørende for endringer i spesifikt energiforbruk.

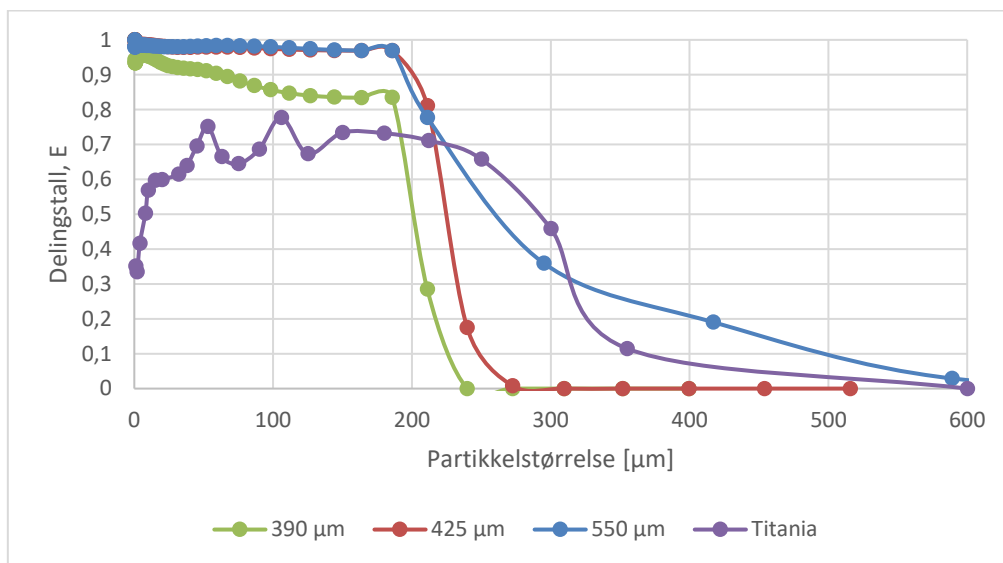


Figur 6-14: Spesifikt energiforbruk ved endring i påmatingshastighet ved bruk av sikt med lysåpning 390 μ m og turtall 40 rpm.

Ulik lysåpning på sikt

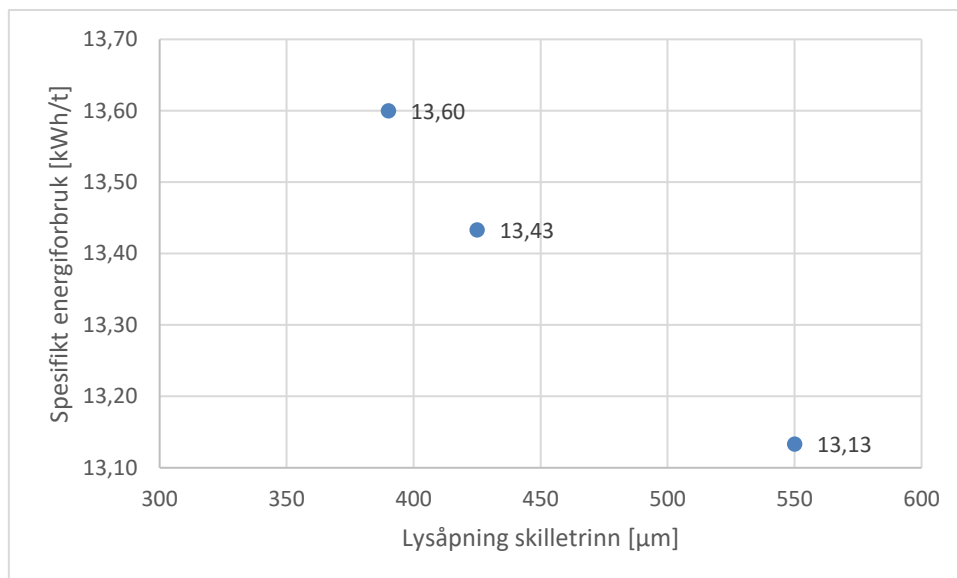
Forsøkskjøringen med 390 μm sikt er som nevnt tidligere samme som ble diskutert ved forsøk med ulik påmatingshastighet og vil ikke bli diskutert videre her. Ved forsøkskjøringen med 425 μm sikt ble partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet grovere enn ved 300 μm . Kretsproduktet ved bruk av 550 μm sikt ble meget likt som ved 425 μm sikt, men fordelingen ble i dette tilfellet slakere med en høyere toppstørrelse.

Skillekurvene for disse forsøkene viser at ved forsøkskjøringen hvor 425 μm sikt var installert i kretsen hadde man et effektiv skille, noe som gjenspeiles i en bratt skillekurve i figur 6-15. Man kan se i samme figur at kuttstørrelsen har vært lav ved dette forsøket (alt under 300 μm går i retur). Ved bruk av 550 μm sikt er derimot sikteeffektiviteten lavere, noe som gjenspeiles i en slak kurve. Selv om skillekurven har en lavere stigningsgradient fra toppstørrelsen til 190 μm , er nærmest alt under plassert korrekt i kretsproduktet. De finere kornene har dermed blitt skilt korrekt, mens de grovere kornene (over 190 μm og under 550 μm) har blitt skilt mer ineffektivt.



Figur 6-15: Skillekurve ved forsøkskjøringer med ulik lysåpning på sikt.

Den sirkulerende lasten reduseres ved økende lysåpning, noe som viser til at flere partikler slippes gjennom siktet. Endringene i effekt ved å endre lysåpningen på siktet var mindre i forhold til å variere turtall og påmatingshastighet. Siden påmatingshastigheten var konstant ved disse forsøkskjøringene, varierte det spesifikke energiforbruket på samme måte. Energiforbruket ble redusert ved reduisering i lysåpning som vist i figur 6-16.



Figur 6-16: Spesifikt energiforbruk ved forsøkskjøringer med ulike lysåpning på siktetrinn ved turtall 40 rpm og påmatingshastighet 300 kg/h.

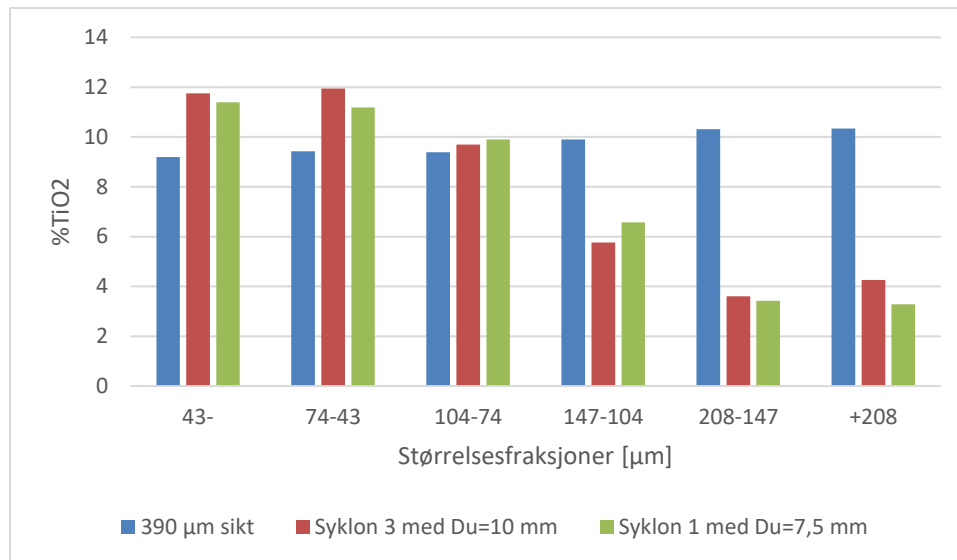
Sikt i forhold til syklon som klasserer

Under forsøkskjøringene hvor møllekretsene som har blitt lukket med sikt, har man sett følgende forskjeller i forhold til møllekretsene lukket med syklon:

- Lavere sirkulerende last
- Brattere skillekurver
- Lavere spesifikt energiforbruk

I tillegg ser man en forskjell i elementfordelingen i de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet. Figur 8-17 viser en oversikt over TiO_2 -gehaltene i ulike størrelsesfraksjoner i kretsproduktet fra en forsøkskjøring med sikt og to med syklon. Disse kretsproduktene har nærmest identisk partikkelstørrelsefordeling, og man kan dermed sammenligne gehaltene i fraksjonene direkte mot hverandre. Elementanalysen på sikteprøven viser at TiO_2 er nærmest jevnt fordelt over fraksjonene med en antydning til høyere gehalt i de groveste fraksjonene.

Elementanalysene for kretsproduktet ved forsøkskjøringene med syklon viser at TiO_2 oppkonsentreres i de fineste fraksjonene. Dette kommer av at sykloner skiller ikke kun på partikkelstørrelse, men også på egenvekt. Som forklart i kapittel 3.2 vil dermed blant annet ilmenitt, som er et tyngre mineral, gå lettere til underløpet til møllen enn lettere mineraler. Resultatet blir da at ilmenitt males mer ned, og beriker TiO_2 -gehalten i de lavere størrelsesfraksjonene.



Figur 6-17: TiO_2 -gehaltene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet ved en forsøkskjøring med sikt og to med syklon som har samme partikkelstørrelsefordeling.

6.3.2 Vurdering av hvordan pilotkretsen gjenspeilet storskalakrets på Titania

Vurderingsgrunnlaget for sammenligningen mellom pilotkretsen og storskalakretsen på Titania skal baseres på partikkelstørrelsefordelingen, skillekurven, massebalanse og energiforbruk. Sammenligningen skal belyse i hvilken grad pilotprosessene gjenspeilte fullskalaproessen.

Som vist i resultatkapittelet, var partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet finere enn Titanias kretsprodukt for alle forsøk. Selv om man ikke nådde en korrekt grovhet på kretsproduktet, ble produktet grovere ved visse endringer i driftsparametere. Ved å kjøre mølla med et lavere turtall, øke påmatingshastigheten, eller øke lysåpningen på siktet var det mulig å produsere et grovere kretsprodukt. Forsøkskjøringene som ga et kretsproduktene nærmest det ønskede resultatet var en kombinasjon av disse to faktorene; ved en påmatingshastighet på 300 kg/h, og med lysåpning 425 og 550 μm .

De kvadratiske lysåpningene på swecosikten kan ha ført til at man produserer et finere kretsprodukt enn ved bruk av Derricksikt med rektangulære lysåpninger. Ved bruk av rektangulære lysåpninger kan grove avlange korn slippe lettere gjennom, mens på swecosikt vil det være vanskelig for disse kornene å slippe gjennom. Det samme gjelder for korn som ligger i størrelsesjiktet rett under 390 μm . Disse kornene har en mindre sannsynlighet for å treffe korrekt i sikteåpningene og slippe igjennom, og sannsynligheten for at de spretter tilbake er større på et swecosikt i forhold til på Derricksikt som brukes i møllekretsen på Titania.

Det kan også diskuteres hvor nært det ønskede resultatet disse forsøkskjøringene var på å få korrekt partikkelstørrelsefordeling. Titanias kretsprodukt er som nevnt analysert på camsizer, noe som har vist seg å gi et grovere resultat enn ved analyse på mastersizer som ble brukt ved analysering av prøvemateriale fra disse forsøkskjøringene.

I forhold til Titanias skillekurve vist i kapittel 6.3.1 har swecosiktene en generelt høyere sikteeffektivitet. I Titanias siktekrets vil partikler under 200 μm bli rundt 30% av materialet bli feilplassert i returen i stedet for å gå i kretsproduktet. Dette kan føre til et problem ved simulering hvis ønsket er å undersøke hvilke endringer i driftsparametere som kan øke siktekapasitet eller sikteeffektivitet for å gi noen eksempler. Hvis målet med å oppnå ønsket partikkelstørrelsefordeling for kretsprodukt er nådd, kan likevel en mer effektivt klasserer i pilotkretsen oppføre seg annerledes ved endringer i driftsparametere enn et med lavere sikteeffektivitet.

Forsøkene med 150 kg/h i påmatingshastighet ga en lav sirkulerende last i forhold til Titanias møllekretser med sikt. Ved å doble denne påmatingshastigheten økte den sirkulerende lasten til verdier som var lik Titanias. Det er dermed mulig å nå en lik indre massebalanse på pilotkjøring som ved storskala.

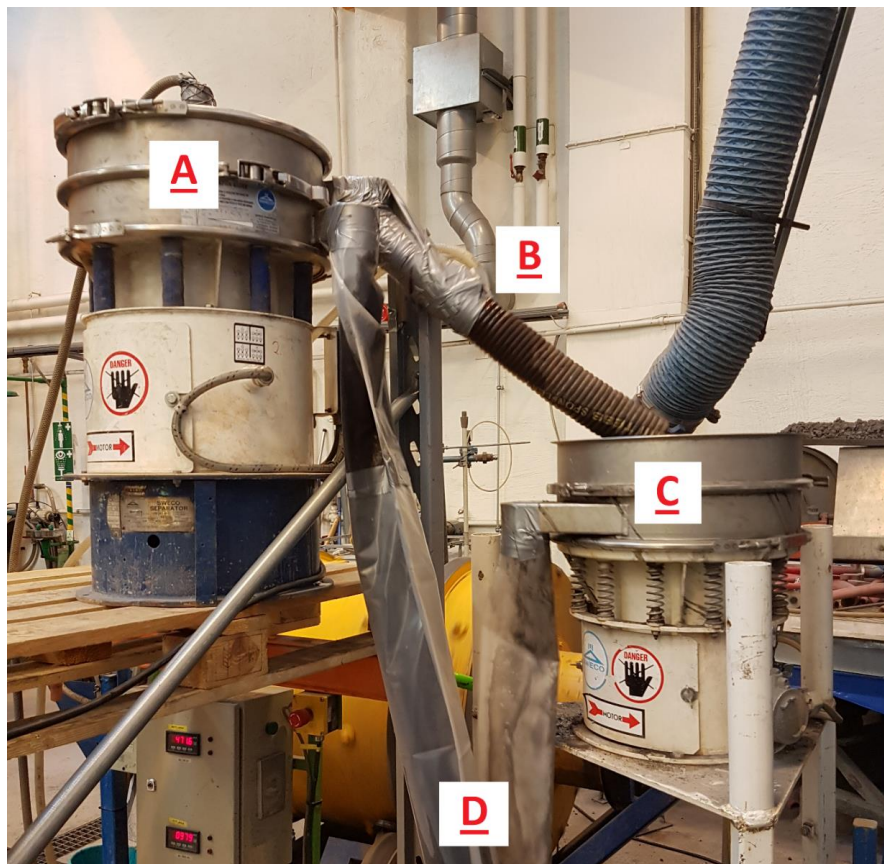
På Titania er det spesifikke energiforbruket 7,39 ved normale innstillinger på 85 t/h og 78% av kritisk turtall. Dette er mye lavere enn det spesifikke energiforbruket som blir brukt ved forsøkskjøringene ved NTNU, og kan dermed ikke brukes i direkte sammenligning med Titanias målinger. Effektmålingene har derimot vist seg å være følsomme for endringer i driftsparametere og kan dermed brukes for å sammenligne endringer i spesifikt energiforbruk ved forsøkskjøringene. En sammenligning av disse verdiene kan uansett gi viktig informasjon om reduisering eller økning i energiforbruk ved endringer av driftsparametere ved simulering.

7 Del 3: Re-pulping

I dette kapittelet blir kretsoppsettet og resultatene fra forsøkskjøringene ved møllekrets med et repulpingtrinn gjennomgått og diskutert.

7.1 Kretsoppsett

Kretsoppsettet ble satt opp som i kapittel 4.1 med et repulp-trinn som klasserer. Dette trinnet ble satt opp som vist i figur 7-1. Hvis man ser på denne figuren, gikk pågang sikt først inn på en swecosikt (A) med lysåpning en lysåpning på enten 450 eller 390 μm . Det som går igjennom sikten går ut av kretsen som første kretsproduktstrøm (D). Returen fra denne sikta ble så sendt gjennom et rør med en vinkel på 45 grader (B) hvor vann ble tilsatt for å dispergere partiklene. Materialet havner så på det andre siktet i klasserertrinnet (C) som har en lysåpning på 425 μm . Det som går igjennom sikta går ut av kretsen som andre kretsproduktstrøm, mens returen fra dette trinnet går tilbake i innløpet på mølla. Massen som gikk gjennom første og andre sikt ble tatt ut av kretsen og ble lagt sammen i en pumpe til et *totalt kretsprodukt*.



Figur 7-1: Oppsett swecosikt. (A) Første sikt (B) Retur fra første sikt og påsetning vann til re-pulping (C) Andre sikt (D) Uttak kretsprodukt

Vannet som er påsatt i punkt (B) ble sammenklemt som vist i figur 7-2 for å få økt trykk og spre vannet mer utover i røret for å forsøke å dispergere massestrømmen i returstrømmen fra første sikt.



Figur 7-2: Slange som ble brukt til re-pulping. Den ble sammenklemt for å få trykk og spre vannet mer utover for å dispergere partikler fra hverandre. Ble koblet på i punkt (B) i figur 7-1.

Den andre sikten i klassereren (punkt B i figur 7-2) var konstant satt på en lysåpning på 425 μm , mens den første sikten enten var satt opp med 450 eller 390 μm lysåpning. Forsøkene med repulping ble prøvd ut med både 390 og 450 μm lysåpning, mens forsøkene uten repulping kun ble forsøkt med 450 μm på første sikt på grunn av lite forskningsmateriale.

Alle forsøkene ble kjørt med en påmatingshastighet på 300 kg/t og turtall på 40 rpm. Under prøvetaking ble prøvene tatt på samme måte som beskrevet i kapittel 4.2 bortsett fra at kretsproduktet ble prøvetatt fra både det første og det andre siktet. Kornfordeling og massestrøm for det totale kretsproduktet ble så beregnet ut fra metoden i kapittel 4.4.1 ut fra kretsproduktet fra det første og det andre siktet.

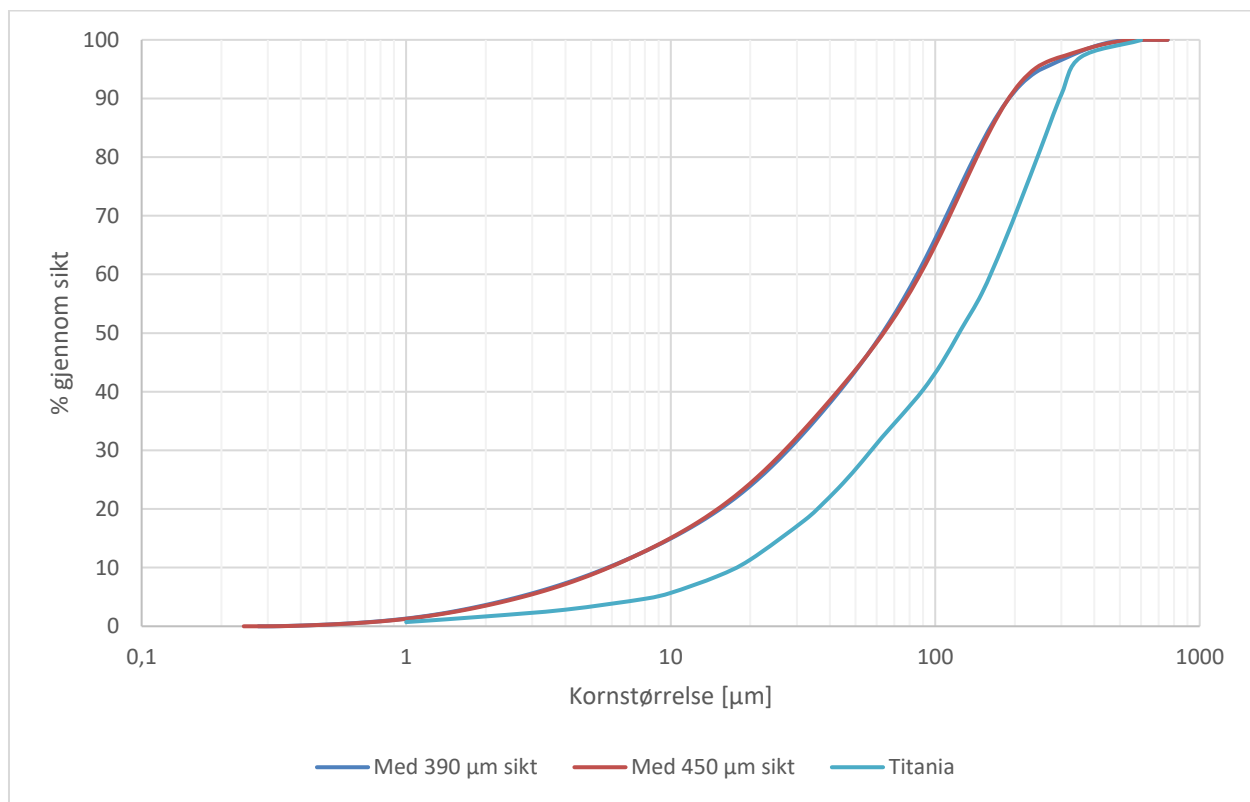
Prøvetaking under de to forsøkene uten repulping foregikk under samme forsøkskjøring. Etter kretsen ble stabil og første prøvetaking ble tatt, ble ikke kretsen stoppet eller endret på. Kretsen fikk dermed stabilisere seg på nytt under samme forhold og andre prøvetaking ble tatt.

7.2 Resultater

I dette delkapittelet vil partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet, sirkulerende last og energiforbruk ved de ulike forsøkskjøringene bli presentert. For enkelte prøvekjøringer vil også kjemiske analyser bli presentert.

7.2.1 Med re-pulping

Partikkelstørrelsefordelingen for det totale kretsproduktet fra de to forsøkene med re-pulping med ulik lysåpning på første sikt var identiske (se figur 7-3).



Figur 7-3: Partikkelstørrelsefordeling for totalt kretsprodukt for 390 og 450 µm som første sikt med re-pulping.

Endringen av lysåpning på det første siktet ga ikke store variasjoner for sirkulerende last og effekt på mølla som vist i tabell 7-1.

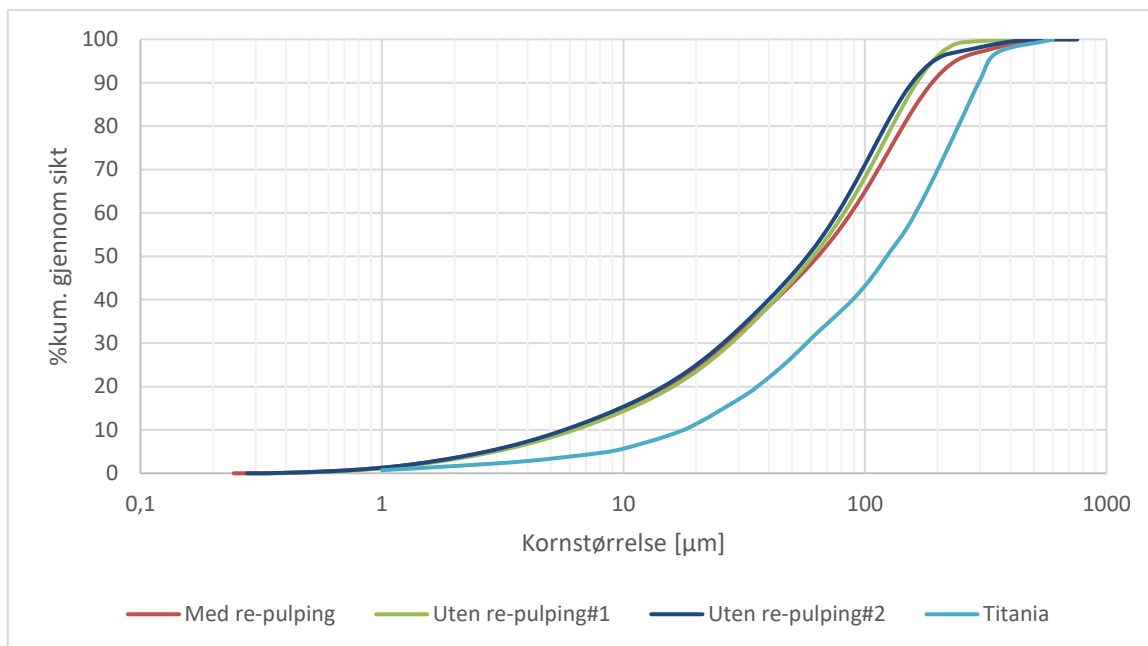
Tabell 7-1: Sirkulerende last og effekt mølle ved forsøkskjøringer med repulping.

Lysåpning første sikt [µm]	Sirkulerende last	[kW]
390	39,4%	3,99
450	39,6%	3,91

7.2.2 Uten re-pulping

Forsøkene uten repulping ble kun gjennomført med 450 µm sikt som første sikt og 425 µm sikt som andre sikt som forklart i kapittel 7.1. Partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet uten repulpingen var relativt like mellom første og andre prøvekjøring. Ved andre prøvekjøring ble toppstørrelsen større enn ved den første.

Den sirkulerende lasten økte med 16 prosentpoeng fra første til andre forsøkskjøring, mens effekten var konstant ved begge forsøk.

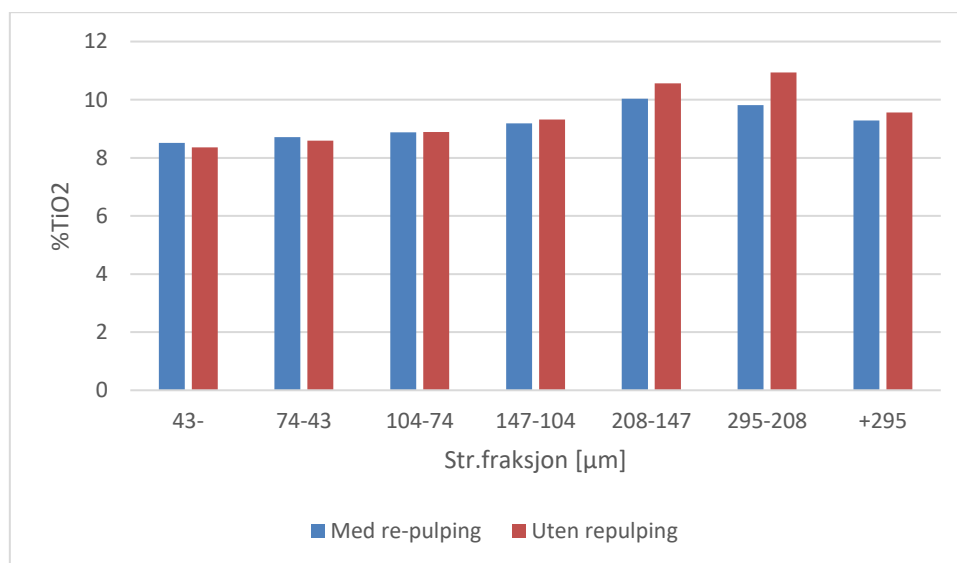


Figur 7-4: Partikkelstørrelsefordeling for totalt kretsprodukt uten re-pulping sammenlignet med re-pulping.

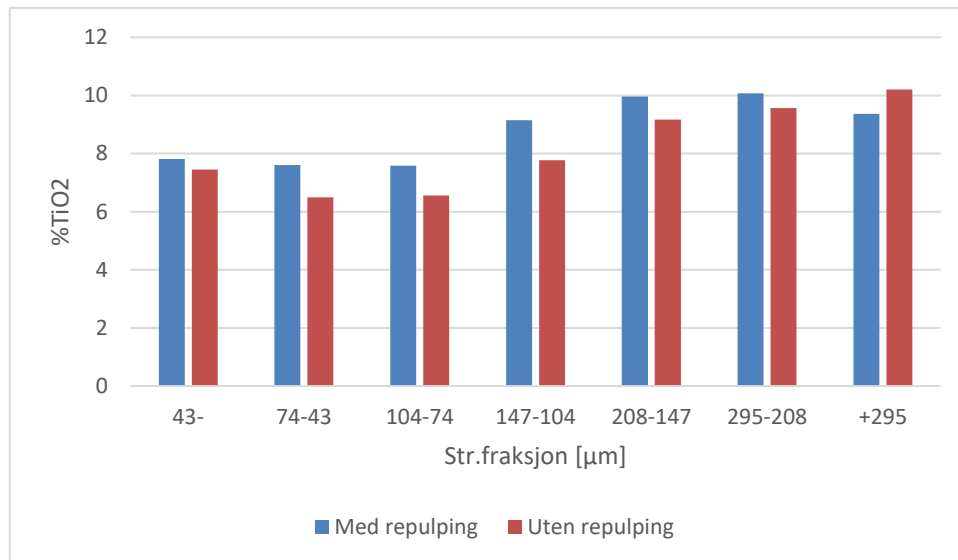
Tabell 7-2: Sirkulerende last og effekt mølle ved forsøkskjøringer uten repulping.

Forsøk nr [µm]	Sirkulerende last	[kW]
1	47%	4,03
2	63%	4,03

Figur 7-5 og 7-6 viser en oversikt over TiO₂-gehalten i ulike størrelsesfraksjoner for kretsproduktet fra den første og den andre sikten i repulptrinnet.



Figur 7-5: TiO₂-gehaltenene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet fra det første siktet i repulptrinnet.

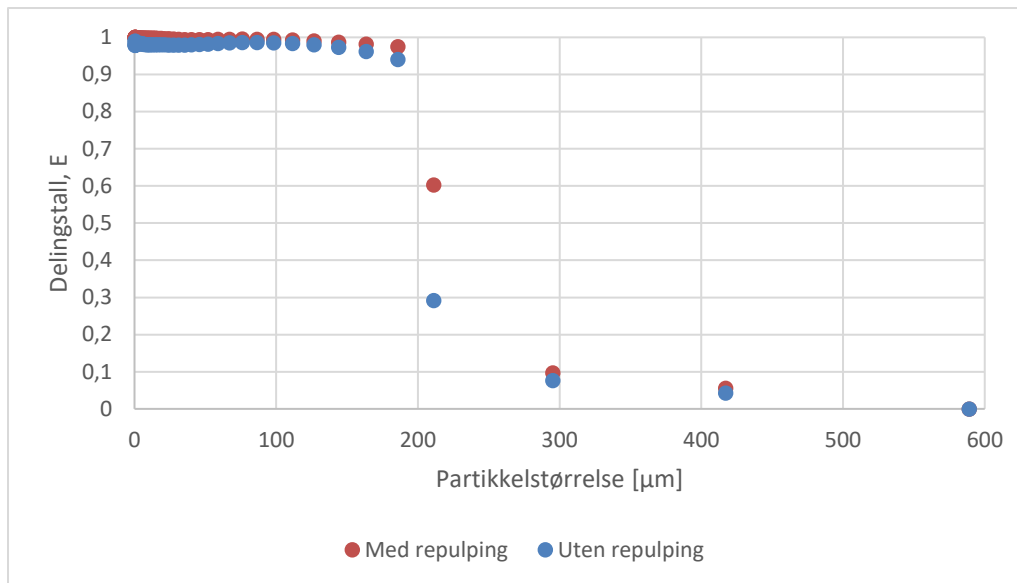


Figur 7-6: TiO_2 -gehaltene for de ulike størrelsesfraksjonene i kretsproduktet fra det andre siktet i repulp trinnet.

7.3 Diskusjon

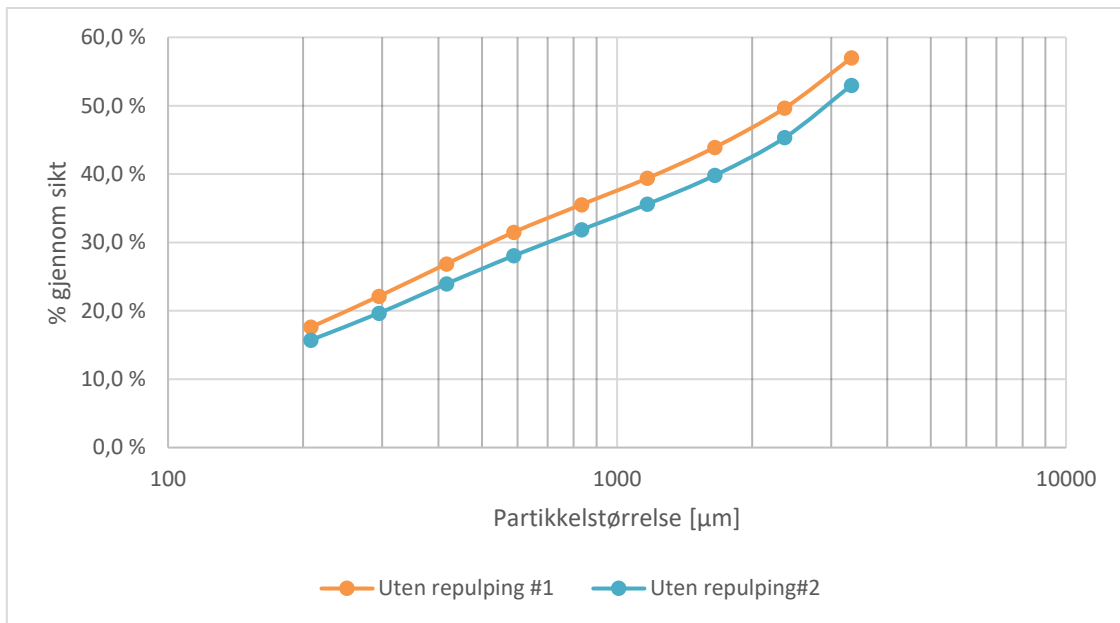
Partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet med og uten repulpingen var identisk for de fineste partiklene opp til $50 \mu\text{m}$ som utgjorde d_{45} . Over $50 \mu\text{m}$ ble kretsproduktet grovere under forsøkskjøringene med repulping i forhold til uten repulping. Et eksempel på dette er ved d_{90} som var $187 \mu\text{m}$ med repulping og $160 \mu\text{m}$ uten repulping, en 17% økning i d_{90} .

Skillekurvene for forsøkskjøringene med og uten repulping viser at skilleeffektiviteten for de to metodene slik som forsøkskjøringene ble gjennomført ikke har de store variasjonene (se figur 7-7). De største forskjellene ligger i kornklassen 185 og $211 \mu\text{m}$. I kornklassen $185 \mu\text{m}$ er 97% av materialet gått i kretsproduktet med bruk av repulping, mens uten er 3 prosentpoeng lavere. I kornklassen $211 \mu\text{m}$ er 60% av materialet gått i kretsproduktet med bruk av repulping, mens uten er 30 prosentpoeng lavere. Dette kan vises i partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktene, siden kretsproduktet med repulping ble grovere i de største størrelsesfraksjonene i forhold til uten bruk av repulping.



Figur 7-7: Skillekurve for forsøk med repulping (450 μm som første sikt) og uten repulping#2.

Den sirkulerende lasten økte ved forsøkskjøringene uten repulping i forhold til med repulping. Dette kan ha ført til det finere kretsproduktet når mer materiale i de grovere kornklassene går i retur for videre nedmaling. De to forsøkskjøringene uten repulping har en stor differanse i sirkulerende last (16 prosentpoeng differanse). Dette kan ikke ha kommet fra endringer i driftsparametere siden forsøkene ble kjørt kontinuerlig etter hverandre uten ytre påvirkning. En mulig forklaring for dette var en endring i partikkelstørrelsefordelingen til pågangsmaterialet som er vist i figur 7-8. Her kan man se at pågangsmaterialet som ble prøvetatt ved forsøk nr 1 var finere enn ved forsøk nr 2. Dette kan ha ført til at pågangen til sikt ble grovere, og dermed fikk en høyere sirkulerende last.



Figur 7-8: Partikkelstørrelsefordeling for pågangsmateriale ved repulpingforsøkene.

Det spesifikke energiforbruket varierte lite mellom forsøkene. Med repulping hadde mølla et energiforbruk på 13,3 kWh/t ved 390 μm som første sikt og 13 kWh/t med 450 μm som første sikt. Uten repulping fikk man et likt spesifikt energiforbruk for begge forsøkene; 13,4 kWh/t. Det er dermed en liten økning i energiforbruk uten repulping, men ikke en så klar forskjell at man kan konkludere med at repulping reduserer forbruket av energi brukt på nedmaling.

Det kan diskuteres hvor representativ disse forsøkene er for et reelt repulping trinn. Disse forsøkene ble kun gjennomført med en innstilling for repulpingtrinnet i forhold til vanntilsetning. En endring i hvordan vannet sprer seg, trykk, innfallsvinkel og vannmengde kunne ha påvirket dispergeringen av sammenhengende partikler og gitt et klarere resultat fra prøvekjøringen.

Det kan også diskuteres hvorvidt swecosikt er den beste løsningen for et slikt forsøk. Skillekurven viser at klasseringstrinnet er effektivt både med og uten repulping. På swecosikt beveger massen seg på en annen måte enn ved derricksikt siden swecosikt bruker rotasjonsvibrering. Ved å doble siktearealet i forhold til sikteforsøkene gjort i del 2 av denne rapporten, har man økt siktekapasiteten betraktelig.

8 Konklusjon og videre anbefalinger

Simulering av møllekretsene på Titania ble ikke oppnådd ved disse forsøkskjøringene, siden partikkelstørrelsefordelingen for kretsproduktet ble for fin. Likevel tyder analysene på at dette kan oppnås ved hjelp av enkle justeringer.

Ved prøvekjøring av pilotkrets med sikt viste resultatene at kretsproduktet kan gjøres grovere ved redusering av turtall på møllen, økning av påmatingshastighet og økning i lysåpning på sikt. En påmatingshastighet på 300 kg/h ser ut til å gi en korrekt sirkulerende last ved fungerende klasserer. Siden siktene er kvadratiske på swecosiktene som er blitt brukt på pilotkretsen, kan det være en fordel å gå for et sikt med større lysåpninger enn Derricksiktet med rektangulære lysåpninger som pilotkretsen skal etterligne.

Ved prøvekjøring av pilotkrets med sykklon så det ut til at sykklon 3 hadde en lik skilleeffektivitet som sykklonene på Titania. Denne ga et for fin partikkelstørrelsefordeling ved driftsparameterne som ble brukt ved forsøkskjøring og hadde en høy sirkulerende last i forhold til Titanias møllekrets. Dette kan rettes opp med å bruke en underløpsdyse med mindre diameter med forbehold om at sykklonen fortsatt har nok kapasitet. Dette kan føre til at kuttstørrelsen i sykklonen øker og reduserer i tillegg sirkulerende last.

Hvis kapasiteten på sykklon 3 blir for lav ved de reguleringene, er det også mulig å bruke sykklon 2 og øke påmatingshastighet, redusere turtallet på møllen eller en kombinasjon. Disse endringene viste seg i sikteforsøkene å gi et grovere mølleprodukt. Sykklon 2 har ved erfaring vist seg å ha en høyere kapasitet enn de to andre forsøkssyklonene, og kan dermed være passende ved slike forsøk.

Forsøkene med repulping viste at det ikke utgjorde de store forskjellen under disse forsøkskjøringene. Videre forsøk på dette temaet burde se nærmere på virkningen av trykk, spredning og mengde på vanntilsatsen. Swecosiktene som ble brukt til dette forsøket kan også ha økt kapasiteten på klasseringstrinnet slik at effekten av repulpingen ikke kommer til sitt fulle potensial. Det kan dermed være interessant å se på bruk av en annen type sikt.

9 Referanser

Sandvik, K. L., Digre, M., & Malvik, T. (1999). *Oppredning av primære og sekundære råstoffer*. Trondheim: Tapir Forlag.

Titania A/S. (2002). *Titania i 100! - jubileumsbok for Titania A/S*.

Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2005). 7 - Grinding mills *Wills' Mineral Processing Technology (Seventh Edition)* (pp. 146-185). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Vedlegg 1 – Partikkelstørrelsefordeling sykklon

Sykklon 1 (kretsprodukt)							
7,5 mm		8 mm		9 mm		10 mm	
Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum
0,243229928	0	0,214080116	0	0,243229928	0	0,214080116	0
0,276348869	0,00064338	0,243229928	0,000644247	0,276348869	0,000677866	0,243229928	0,000597777
0,313977388	0,071399609	0,276348869	0,075087776	0,313977388	0,075478614	0,276348869	0,069776675
0,356729522	0,160880802	0,313977388	0,173088593	0,356729522	0,17103947	0,313977388	0,161243128
0,40530292	0,269495432	0,356729522	0,295219539	0,40530292	0,288007455	0,356729522	0,275604491
0,460490222	0,39896086	0,40530292	0,442979483	0,460490222	0,428345074	0,40530292	0,414280936
0,523191999	0,552124876	0,460490222	0,618766783	0,523191999	0,595117242	0,460490222	0,579467443
0,594431444	0,733287255	0,523191999	0,826526805	0,594431444	0,792834595	0,523191999	0,774731275
0,675371072	0,948409141	0,594431444	1,072308716	0,675371072	1,027670563	0,594431444	1,005518276
0,767331691	1,204937625	0,675371072	1,36448973	0,767331691	1,307288558	0,675371072	1,279351173
0,871813953	1,511238805	0,767331691	1,713563823	0,871813953	1,640269076	0,767331691	1,60562270
0,990522844	1,875625038	0,871813953	2,131379546	0,990522844	2,035129503	0,871813953	1,994876672
1,125395506	2,305124429	0,990522844	2,629835531	1,125395506	2,49909876	0,990522844	2,457606939
1,278632847	2,804306291	1,125395506	3,219219692	1,278632847	3,036982042	1,125395506	3,002741175
1,45273546	3,374609165	1,278632847	3,906605018	1,45273546	3,650582462	1,278632847	3,636239233
1,650544424	4,014574091	1,45273546	4,694881044	1,650544424	4,339083159	1,45273546	4,360359707
1,87528767	4,721056971	1,650544424	5,582931474	1,87528767	5,100422921	1,650544424	5,17409623
2,130632654	5,490967915	1,87528767	6,567024479	2,130632654	5,933125568	1,87528767	6,074840082
2,420746202	6,322766638	2,130632654	7,642802119	2,420746202	6,837713171	2,130632654	7,060635223
2,75036251	7,21722931	2,420746202	8,806902209	2,75036251	7,817174087	2,420746202	8,131968528
3,124860397	8,177601351	2,75036251	10,05774037	3,124860397	8,876648842	2,75036251	9,2923851
3,550351077	9,209343248	3,124860397	11,39583759	3,550351077	10,02268679	3,124860397	10,54797833
4,033777887	10,31927944	3,550351077	12,82406898	4,033777887	11,26215444	3,550351077	11,90603818
4,58302959	11,51396864	4,033777887	14,34736505	4,58302959	12,60089655	4,033777887	13,37295965
5,207069109	12,79787183	4,58302959	15,97119652	5,207069109	14,04257947	4,58302959	14,95178224
5,916079783	14,17253867	5,207069109	17,69938721	5,916079783	15,58830075	5,207069109	16,64053329
6,721631549	15,63725244	5,916079783	19,53303997	6,721631549	17,23737893	5,916079783	18,43298107
7,636869741	17,19074095	6,721631549	21,47104817	7,636869741	18,9893576	6,721631549	20,32195136
8,676729602	18,83410424	7,636869741	23,51136389	8,676729602	20,84690224	7,636869741	22,30380381
9,858180007	20,57341745	8,676729602	25,65361664	9,858180007	22,81806009	8,676729602	24,38289456
11,20050036	22,42091808	9,858180007	27,90117514	11,20050036	24,91696115	9,858180007	26,57315301
12,72559522	24,39567364	11,20050036	30,26140122	12,72559522	27,1642682	11,20050036	28,89563074
14,45835172	26,52417121	12,72559522	32,74565483	14,45835172	29,58810327	12,72559522	31,37488982
16,42704571	28,83841948	14,45835172	35,37002291	16,42704571	32,22287143	14,45835172	34,03687444
18,66380319	31,37021567	16,42704571	38,1538832	18,66380319	35,10354284	16,42704571	36,90601189
21,2051245	34,14286132	18,66380319	41,11475119	21,2051245	38,25638737	18,66380319	39,99955857
24,09248	37,16338246	21,2051245	44,26082657	24,09248	41,69025749	21,2051245	43,32060073
27,37298677	40,4185452	24,09248	47,58431008	27,37298677	45,39258559	24,09248	46,85353707
31,10017752	43,87668932	27,37298677	51,0585271	31,10017752	49,33279138	27,37298677	50,56529764
35,33487411	47,49596229	31,10017752	54,6403972	35,33487411	53,47299909	31,10017752	54,41297404
40,14618012	51,23716739	35,33487411	58,27860214	40,14618012	57,78218929	35,33487411	58,35614216
45,61260848	55,07571307	40,14618012	61,92555859	45,61260848	62,24588039	40,14618012	62,36979916
51,82336267	59,00608586	45,61260848	65,54734223	51,82336267	66,86365674	45,61260848	66,45060314
58,87979241	63,03701594	51,82336267	69,12510717	58,87979241	71,63260812	51,82336267	70,61017309
66,8970475	67,18024367	58,87979241	72,64792813	66,8970475	76,51944251	58,87979241	74,85635376
76,0059569	71,43766234	66,8970475	76,10240704	76,0059569	81,43016357	66,8970475	79,16811098
86,35516364	75,78868813	76,0059569	79,46614526	86,35516364	86,19239449	76,0059569	83,47379056
98,11355046	80,17708605	86,35516364	82,70737357	98,11355046	90,5649262	86,35516364	87,64168322
111,4729957	84,50027551	98,11355046	85,7867975	111,4729957	94,28145804	98,11355046	91,4854593
126,6515044	88,60759061	111,4729957	88,65993652	126,6515044	97,11998528	111,4729957	94,78963667
143,8967659	92,31155734	126,6515044	91,28092694	143,8967659	98,97873383	126,6515044	97,35811819
163,4901957	95,41596763	143,8967659	93,60558084	163,4901957	99,8616273	143,8967659	99,08123846
185,7515276	97,75974855	163,4901957	95,59384453	185,7515276	99,99933516	163,4901957	99,95438879
211,0440316	99,27359309	185,7515276	97,21273143	211,0440316	100	185,7515276	99,99956876
239,7804412	99,97649872	211,0440316	98,44240208	239,7804412	100	211,0440316	100
272,4296895	99,99974406	239,7804412	99,28766088	272,4296895	100	239,7804412	100
309,5245607	100	272,4296895	99,77393697	309,5245607	100		
351,6703846	100	309,5245607	99,96120204	351,6703846	100		
399,5549145	100	351,6703846	99,99955442	399,5549145	100		
453,9595504	100	399,5549145	100	453,9595504	100		
515,7720903	100	453,9595504	100	515,7720903	100		

Syklon 2 (kretsprodukt)					
8 mm		9 mm		10 mm	
Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum
0,188423753	0	0,214080116	0	0,243229928	0
0,214080116	0	0,243229928	0	0,276348869	0,000661876
0,243229928	0,000578134	0,276348869	0,000631596	0,313977388	0,073350625
0,276348869	0,067428629	0,313977388	0,070182542	0,356729522	0,164887715
0,313977388	0,155606208	0,356729522	0,158486304	0,40530292	0,275622663
0,356729522	0,265613488	0,40530292	0,266015327	0,460490222	0,407325323
0,40530292	0,398746366	0,460490222	0,394538523	0,523191999	0,56303621
0,460490222	0,557068831	0,523191999	0,546960495	0,594431444	0,747416515
0,523191999	0,743996336	0,594431444	0,727660205	0,675371072	0,966979053
0,594431444	0,964793794	0,675371072	0,942710584	0,767331691	1,229905871
0,675371072	1,226772741	0,767331691	1,199713944	0,871813953	1,545443219
0,767331691	1,539093856	0,871813953	1,507239005	0,990522844	1,922854454
0,871813953	1,912074022	0,990522844	1,873842037	1,125395506	2,370083246
0,990522844	2,356012526	1,125395506	2,306816119	1,278632847	2,892456169
1,125395506	2,879716459	1,278632847	2,810981772	1,45273546	3,491899802
1,278632847	3,489114698	1,45273546	3,387972779	1,650544424	4,167112304
1,45273546	4,186499583	1,650544424	4,036440974	1,87528767	4,914798024
1,650544424	4,970861734	1,87528767	4,75329088	2,130632654	5,731531398
1,87528767	5,839353809	2,130632654	5,535533184	2,420746202	6,615472995
2,130632654	6,789261332	2,420746202	6,381994469	2,75036251	7,567419453
2,420746202	7,819497925	2,75036251	7,294325325	3,124860397	8,591227864
2,75036251	8,931080081	3,124860397	8,277268449	3,550351077	9,693695702
3,124860397	10,12688381	3,550351077	9,338284135	4,033777887	10,88356991
3,550351077	11,41118659	4,033777887	10,48643262	4,58302959	12,169458
4,033777887	12,78900929	4,58302959	11,73054415	5,207069109	13,5573948
4,58302959	14,26507037	5,207069109	13,07730526	5,916079783	15,04971674
5,207069109	15,84279517	5,916079783	14,53034638	6,721631549	16,6459912
5,916079783	17,52451966	6,721631549	16,09083142	7,636869741	18,34550148
6,721631549	19,31291363	7,636869741	17,75949188	8,676729602	20,15102434
7,636869741	21,21292024	8,676729602	19,54016454	9,858180007	22,07159178
8,676729602	23,23463209	9,858180007	21,44292088	11,20050036	24,12271359
9,858180007	25,3949031	11,20050036	23,48534472	12,72559522	26,32521105
11,20050036	27,71615894	12,72559522	25,69266524	14,45835172	28,70375543
12,72559522	30,22384557	14,45835172	28,09711241	16,42704571	31,28327365
14,45835172	32,94386531	16,42704571	30,73409298	18,66380319	34,08250144
16,42704571	35,89795436	18,66380319	33,63432267	21,2051245	37,10655856
18,66380319	39,09648785	21,2051245	36,81425582	24,09248	40,3417333
21,2051245	42,53123291	24,09248	40,26893957	27,37298677	43,75542771
24,09248	46,17204828	27,37298677	43,97106231	31,10017752	47,30263271
27,37298677	49,9708376	31,10017752	47,8776673	35,33487411	50,93865598
31,10017752	53,87368124	35,33487411	51,94341823	40,14618012	54,63492693
35,33487411	57,83898114	40,14618012	56,13602942	45,61260848	58,39033712
40,14618012	61,85508858	45,61260848	60,44582282	51,82336267	62,22973102
45,61260848	65,94695706	51,82336267	64,88171199	58,87979241	66,18794782
51,82336267	70,16295788	58,87979241	69,45325907	66,8970475	70,28589111
58,87979241	74,54261713	66,8970475	74,14572109	76,0059569	74,50934834
66,8970475	79,07577675	76,0059569	78,89815692	86,35516364	78,79732088
76,0059569	83,66924294	86,35516364	83,59107856	98,11355046	83,04044502
86,35516364	88,13465382	98,11355046	88,04572216	111,4729957	87,09040844
98,11355046	92,20540716	111,4729957	92,03951607	126,6515044	90,78033126
111,4729957	95,58898816	126,6515044	95,34404969	143,8967659	93,95033223
126,6515044	98,05378236	143,8967659	97,78392321	163,4901957	96,47642247
143,8967659	99,52275342	163,4901957	99,32941852	185,7515276	98,29741141
163,4901957	99,99808884	185,7515276	99,99626395	211,0440316	99,43612794
185,7515276	100	211,0440316	100	239,7804412	99,99717138
211,0440316	100	239,7804412	100	272,4296895	100

Syklon 3 (kretsprodukt)			
8 mm		10 mm	
Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum
0,243229928	0	0,243229928	0
0,276348869	0,000620121	0,276348869	0,000662221
0,313977388	0,068670953	0,313977388	0,073419122
0,356729522	0,154164402	0,356729522	0,165163826
0,40530292	0,257338435	0,40530292	0,276364387
0,460490222	0,379748975	0,460490222	0,409004396
0,523191999	0,524127404	0,523191999	0,566459187
0,594431444	0,694694961	0,594431444	0,753865746
0,675371072	0,897362436	0,675371072	0,97835234
0,767331691	1,139534598	0,767331691	1,248827738
0,871813953	1,429515381	0,871813953	1,575311564
0,990522844	1,775503557	0,990522844	1,967783258
1,125395506	2,184338863	1,125395506	2,434708655
1,278632847	2,660335304	1,278632847	2,981597261
1,45273546	3,204685215	1,45273546	3,610112351
1,650544424	3,815882634	1,650544424	4,318242573
1,87528767	4,491270663	1,87528767	5,10171596
2,130632654	5,229223413	2,130632654	5,956255097
2,420746202	6,03101711	2,420746202	6,8798267
2,75036251	6,901584167	2,75036251	7,874157008
3,124860397	7,848968871	3,124860397	8,945276687
3,550351077	8,882769774	3,550351077	10,10307172
4,033777887	10,01197881	4,033777887	11,35978608
4,58302959	11,24272765	4,58302959	12,72766802
5,207069109	12,57679965	5,207069109	14,21653549
5,916079783	14,01204927	5,916079783	15,83236137
6,721631549	15,54490717	6,721631549	17,57712352
7,636869741	17,17398106	7,636869741	19,44988432
8,676729602	18,90378604	8,676729602	21,4497558
9,858180007	20,74664037	9,858180007	23,57915222
11,20050036	22,72199597	11,20050036	25,8460035
12,72559522	24,85479981	12,72559522	28,26529086
14,45835172	27,17408845	14,45835172	30,85989289
16,42704571	29,70985582	16,42704571	33,658274
18,66380319	32,48644929	18,66380319	36,68810127
21,2051245	35,51395629	21,2051245	39,96746085
24,09248	38,78153317	24,09248	43,49688614
27,37298677	42,25604809	27,37298677	47,25565193
31,10017752	45,88780521	31,10017752	51,20421333
35,33487411	49,62313498	35,33487411	55,29304297
40,14618012	53,42080106	40,14618012	59,47563677
45,61260848	57,26546727	45,61260848	63,71952016
51,82336267	61,17113662	51,82336267	68,00801269
58,87979241	65,17290791	58,87979241	72,33094001
66,8970475	69,30976392	66,8970475	76,66847023
76,0059569	73,60336643	76,0059569	80,97528128
86,35516364	78,03609795	86,35516364	85,1692396
98,11355046	82,52968421	98,11355046	89,12527931
111,4729957	86,93201901	111,4729957	92,67918457
126,6515044	91,0232359	126,6515044	95,64994422

Syklon 1 (retur)							
7,5 mm		8 mm		9 mm		10 mm	
Size Classes (µm)	%Kum	Size Classes (µm)	%Kum	Size Classes (µm)	%Kum	Size Classes (µm)	%Kum
0,243229928	0	0,214080116	0	0,243229928	0	0,460490222	0
0,276348869	0	0,243229928	0	0,276348869	0	0,523191999	0
0,313977388	0	0,276348869	0	0,313977388	0	0,594431444	0,000694
0,356729522	0	0,313977388	0	0,356729522	0	0,675371072	0,062719
0,40530292	0	0,356729522	0	0,40530292	0	0,767331691	0,136272
0,460490222	0	0,40530292	0	0,460490222	0,000480704	0,871813953	0,222307
0,523191999	0	0,460490222	0	0,523191999	0,04614167	0,990522844	0,322336
0,594431444	0	0,523191999	0	0,594431444	0,119648016	1,125395506	0,437406
0,675371072	0,00022661	0,594431444	0	0,675371072	0,205718917	1,278632847	0,56767
0,767331691	0,020546761	0,675371072	0,000407615	0,767331691	0,306226037	1,45273546	0,712348
0,871813953	0,088431552	0,767331691	0,036100994	0,871813953	0,423449647	1,650544424	0,869895
0,990522844	0,16821798	0,871813953	0,107364089	0,990522844	0,559384456	1,87528767	1,038527
1,125395506	0,260034966	0,990522844	0,189666749	1,125395506	0,71527061	2,130632654	1,216897
1,278632847	0,363859371	1,125395506	0,283029393	1,278632847	0,89117669	2,420746202	1,404631
1,45273546	0,478891647	1,278632847	0,387169933	1,45273546	1,085820336	2,75036251	1,602497
1,650544424	0,603603023	1,45273546	0,501021324	1,650544424	1,296811975	3,124860397	1,81219
1,87528767	0,736183934	1,650544424	0,622887394	1,87528767	1,521347992	3,550351077	2,03584
2,130632654	0,875061	1,87528767	0,750914216	2,130632654	1,757143104	4,033777887	2,275426
2,420746202	1,019341093	2,130632654	0,883636091	2,420746202	2,003210783	4,58302959	2,532257
2,75036251	1,168982352	2,420746202	1,02038672	2,75036251	2,260166773	5,207069109	2,806701
3,124860397	1,324687476	2,75036251	1,161379272	3,124860397	2,529995108	5,916079783	3,098316
3,550351077	1,487622152	3,124860397	1,30747664	3,550351077	2,815423516	6,721631549	3,406358
4,033777887	1,659081522	3,550351077	1,459813927	4,033777887	3,119155202	7,636869741	3,730566
4,58302959	1,840212053	4,033777887	1,61944964	4,58302959	3,443289017	8,676729602	4,072129
5,207069109	2,031870251	4,58302959	1,787164671	5,207069109	3,789188606	9,858180007	4,434384
5,916079783	2,234658981	5,207069109	1,963461077	5,916079783	4,157738217	11,20050036	4,822991
6,721631549	2,449121182	5,916079783	2,148757565	6,721631549	4,549847168	12,72559522	5,245856
7,636869741	2,676065142	6,721631549	2,343702639	7,636869741	4,96719517	14,45835172	5,71303
8,676729602	2,917029352	7,636869741	2,549541188	8,676729602	5,413080168	16,42704571	6,236131
9,858180007	3,174652409	8,676729602	2,76855121	9,858180007	5,893002869	18,66380319	6,827098
11,20050036	3,452866819	9,858180007	3,004292362	11,20050036	6,41467534	21,2051245	7,496792
12,72559522	3,757203824	11,20050036	3,261546979	12,72559522	6,987909879	24,09248	8,254373
14,45835172	4,095390295	12,72559522	3,546236274	14,45835172	7,624950013	27,37298677	9,108809
16,42704571	4,477826522	14,45835172	3,86559207	16,42704571	8,34082365	31,10017752	10,07165
18,66380319	4,917676904	16,42704571	4,228371622	18,66380319	9,153031644	35,33487411	11,16305
21,2051245	5,430723613	18,66380319	4,645058326	21,2051245	10,0805066	40,14618012	12,41772
24,09248	6,035377324	21,2051245	5,128353932	24,09248	11,14270428	45,61260848	13,88953
27,37298677	6,75326182	24,09248	5,694433325	27,37298677	12,3597945	51,82336267	15,65184
31,10017752	7,610560523	27,37298677	6,365278212	31,10017752	13,75472004	58,87979241	17,79231
35,33487411	8,640127789	31,10017752	7,171987022	35,33487411	15,35727772	66,8970475	20,40295
40,14618012	9,884053314	35,33487411	8,158574472	40,14618012	17,20962771	76,0059569	23,56735
45,61260848	11,39583842	40,14618012	9,385327539	45,61260848	19,37133708	86,35516364	27,34731
51,82336267	13,24128116	45,61260848	10,93020583	51,82336267	21,92114716	98,11355046	31,77063
58,87979241	15,49801667	51,82336267	12,88689371	58,87979241	24,95323239	111,4729957	36,82227
66,8970475	18,25420902	58,87979241	15,35937709	66,8970475	28,56753791	126,6515044	42,44146
76,0059569	21,60663136	66,8970475	18,4539745	76,0059569	32,85574238	143,8967659	48,5246
86,35516364	25,65686329	76,0059569	22,27013602	86,35516364	37,88450698	163,4901957	54,93289
98,11355046	30,50270234	86,35516364	26,89045969	98,11355046	43,67681249	185,7515276	61,50181
111,4729957	36,22222115	98,11355046	32,36900894	111,4729957	50,19336627	211,0440316	68,05033
126,6515044	42,84916095	111,4729957	38,71710595	126,6515044	57,31741717	239,7804412	74,3894
143,8967659	50,33999264	126,6515044	45,88631689	143,8967659	64,84515761	272,4296895	80,32855
163,4901957	58,53752021	143,8967659	53,74887148	163,4901957	72,4838476	309,5245607	85,68277
185,7515276	67,14136302	163,4901957	62,07865033	185,7515276	79,86098989	351,6703846	90,28511
211,0440316	75,70137529	185,7515276	70,53956235	211,0440316	86,55270054	399,5549145	94,0073
239,7804412	83,65239178	211,0440316	78,69257442	239,7804412	92,14183401	453,9595504	96,78396
272,4296895	90,40177151	239,7804412	86,035059	272,4296895	96,30624153	515,7720903	98,63562
309,5245607	95,4669421	272,4296895	92,079751	309,5245607	98,92469702	586,0012172	99,67754
351,6703846	98,63955549	309,5245607	96,47133666	351,6703846	99,99507992	665,7929599	99,99839
399,5549145	99,94692379	351,6703846	99,10896049	399,5549145	100	756,4493935	100
453,9595504	99,99980634	399,5549145	99,99624469			859,4498883	100

Syklon 2 (retur)					
8 mm		9 mm		10 mm	
Size Classes (µm)	%Kum	Size Classes (µm)	%Kum	Size Classes (µm)	%Kum
0,675371072	0,000700777	0,871813953	0,000554973	0,871813953	0,000757
0,767331691	0,061301479	0,990522844	0,045930084	0,990522844	0,062642
0,871813953	0,131664641	1,125395506	0,097747439	1,125395506	0,133168
0,990522844	0,211959677	1,278632847	0,15485661	1,278632847	0,210929
1,125395506	0,302635544	1,45273546	0,216068658	1,45273546	0,294605
1,278632847	0,403515513	1,650544424	0,279800787	1,650544424	0,382466
1,45273546	0,513577418	1,87528767	0,344287387	1,87528767	0,472607
1,650544424	0,631211533	2,130632654	0,408097169	2,130632654	0,563585
1,87528767	0,754649332	2,420746202	0,470495508	2,420746202	0,654831
2,130632654	0,882536728	2,75036251	0,531604883	2,75036251	0,74681
2,420746202	1,014368799	3,124860397	0,592282549	3,124860397	0,840819
2,75036251	1,150614583	3,550351077	0,653781472	3,550351077	0,938538
3,124860397	1,292531345	4,033777887	0,717329251	4,033777887	1,041551
3,550351077	1,441782309	4,58302959	0,783802519	4,58302959	1,151051
4,033777887	1,599987262	5,207069109	0,853630665	5,207069109	1,267829
4,58302959	1,768342248	5,916079783	0,926949612	5,916079783	1,392403
5,207069109	1,947436483	6,721631549	1,003913713	6,721631549	1,52519
5,916079783	2,137360612	7,636869741	1,085095634	7,636869741	1,666666
6,721631549	2,338113011	8,676729602	1,171975276	8,676729602	1,817477
7,636869741	2,550221154	9,858180007	1,267359749	9,858180007	1,978481
8,676729602	2,775454663	11,20050036	1,375587532	11,20050036	2,150808
9,858180007	3,017283961	12,72559522	1,502482855	12,72559522	2,336313
11,20050036	3,280919597	14,45835172	1,65510634	14,45835172	2,538713
12,72559522	3,573220274	16,42704571	1,841233132	16,42704571	2,765103
14,45835172	3,902689352	18,66380319	2,068759224	18,66380319	3,027437
16,42704571	4,279181577	21,2051245	2,345462614	21,2051245	3,343711
18,66380319	4,713141	24,09248	2,679661723	24,09248	3,738743
21,2051245	5,214747444	27,37298677	3,082280637	27,37298677	4,24441
24,09248	5,793709435	31,10017752	3,570467192	31,10017752	4,89931
27,37298677	6,460494636	35,33487411	4,172454511	35,33487411	5,748081
31,10017752	7,229529584	40,14618012	4,932762709	40,14618012	6,84074
35,33487411	8,124501999	45,61260848	5,916089055	45,61260848	8,232448
40,14618012	9,185170445	51,82336267	7,207914806	51,82336267	9,984229
45,61260848	10,4741136	58,87979241	8,910400564	58,87979241	12,16536
51,82336267	12,08131154	66,8970475	11,13302846	66,8970475	14,8576
58,87979241	14,12488948	76,0059569	13,97851925	76,0059569	18,15996
66,8970475	16,74693028	86,35516364	17,52535028	86,35516364	22,18992
76,0059569	20,10353827	98,11355046	21,80882067	98,11355046	27,07518
86,35516364	24,34787602	111,4729957	26,80370237	111,4729957	32,93037
98,11355046	29,6047523	126,6515044	32,41209115	126,6515044	39,81672
111,4729957	35,93737003	143,8967659	38,45954149	143,8967659	47,68862
126,6515044	43,3095775	163,4901957	44,70205921	163,4901957	56,33955
143,8967659	51,54945044	185,7515276	50,84522016	185,7515276	65,36802
163,4901957	60,3244872	211,0440316	56,57540485	211,0440316	74,18776
185,7515276	69,14242335	295	80,68285604	239,7804412	82,10301
211,0440316	77,39303949	417	90,68261708	272,4296895	88,45073
239,7804412	84,44214958	589	94,46036294	309,5245607	92,79617
272,4296895	89,77232624	833	96,27507163	351,6703846	95,0852
309,5245607	93,14759796	1168	97,42120344	399,5549145	95,36269
351,6703846	94,56367894	1651	98,37631328	453,9595504	95,36307
589	94,57032047	2362	99,14040115	515,7720903	95,36307
833	96,30536844	3327	99,61795606	589	95,36307
1168	97,55052051			833	96,94091
1651	98,44866299			1168	97,95524
2362	99,12226985			1651	98,55096

Syklon 3 (retur)			
8 mm		10 mm	
Size Classes (µm)	%Kum	Size Classes (µm)	%Kum
0,40530292	0,000488764	0,523191999	0,000524388
0,460490222	0,047989386	0,594431444	0,048729897
0,523191999	0,103509861	0,675371072	0,105815656
0,594431444	0,167452897	0,767331691	0,172444226
0,675371072	0,241132102	0,871813953	0,249851137
0,767331691	0,326210106	0,990522844	0,339079055
0,871813953	0,424366012	1,125395506	0,440596275
0,990522844	0,536981475	1,278632847	0,554111462
1,125395506	0,664699442	1,45273546	0,678506972
1,278632847	0,807070941	1,650544424	0,812078481
1,45273546	0,962445069	1,87528767	0,953056753
1,650544424	1,128262537	2,130632654	1,10024818
1,87528767	1,301763017	2,420746202	1,253509912
2,130632654	1,480889608	2,75036251	1,413846834
2,420746202	1,665013005	3,124860397	1,58312409
2,75036251	1,855182764	3,550351077	1,763541903
3,124860397	2,053883913	4,033777887	1,957067095
3,550351077	2,264459194	4,58302959	2,165011173
4,033777887	2,490365815	5,207069109	2,387897413
4,58302959	2,734406651	5,916079783	2,625696212
5,207069109	2,998128794	6,721631549	2,878375746
5,916079783	3,281681903	7,636869741	3,146604415
6,721631549	3,584317913	8,676729602	3,432435681
7,636869741	3,905567121	9,858180007	3,739619452
8,676729602	4,247087861	11,20050036	4,073449274
9,858180007	4,614565432	12,72559522	4,440597907
11,20050036	5,019073677	14,45835172	4,84933013
12,72559522	5,477678079	16,42704571	5,309728881
14,45835172	6,013006206	18,66380319	5,833640062
16,42704571	6,651082624	21,2051245	6,434574472
18,66380319	7,417369083	24,09248	7,128103456
21,2051245	8,332066225	27,37298677	7,933107246
24,09248	9,406576392	31,10017752	8,873928724
27,37298677	10,64332766	35,33487411	9,983182612
31,10017752	12,04069535	40,14618012	11,3044446
35,33487411	13,60361057	45,61260848	12,89340336
40,14618012	15,35827204	51,82336267	14,81604264
45,61260848	17,36648012	58,87979241	17,14356308
51,82336267	19,73322739	66,8970475	19,94484696
58,87979241	22,60176877	76,0059569	23,27767192
66,8970475	26,13238653	86,35516364	27,17893243
76,0059569	30,4644772	98,11355046	31,65296947
86,35516364	35,66567668	111,4729957	36,65816929
98,11355046	41,67683319	126,6515044	42,09391904
111,4729957	48,26903382	143,8967659	47,79123234
126,6515044	55,03367457	163,4901957	53,51226197
143,8967659	61,42396341	185,7515276	58,96379891
163,4901957	66,85640253	211,0440316	63,82909524
185,7515276	70,86276381	295	84,00784305
211,0440316	73,25373653	417	91,39318885

Vedlegg 2- Partikkelstørrelsefordeling siktekrets

390.150.40				390.150.32			
Kretsprodukt		Retur		Kretsprodukt		Retur	
Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum
0,243229928	0	0,243229928	-8,4231E-15				
0,276348869	0,000465999	0,276348869	-8,4231E-15				
0,313977388	0,051862138	0,313977388	2,72788E-05	0,276348869	0	0,27634887	4,0065E-11
0,356729522	0,1293358	0,356729522	0,002906229	0,313977388	0,000645627	0,31397739	3,05629E-05
0,40530292	0,223796883	0,40530292	0,00711948	0,356729522	0,068562327	0,35672952	0,003357915
0,460490222	0,336762027	0,460490222	0,012160878	0,40530292	0,151826375	0,40530292	0,020744344
0,523191999	0,470876709	0,523191999	0,01813513	0,460490222	0,251107401	0,46049022	0,044326891
0,594431444	0,630059041	0,594431444	0,025209517	0,523191999	0,36869649	0,523192	0,071656375
0,675371072	0,819614828	0,675371072	0,033605214	0,594431444	0,508175358	0,59443144	0,103250949
0,767331691	1,046031761	0,767331691	0,043585424	0,675371072	0,674465685	0,67537107	0,139919808
0,871813953	1,316403465	0,871813953	0,055425034	0,767331691	0,873749419	0,76733169	0,182676338
0,990522844	1,637503779	0,990522844	0,069364405	0,871813953	1,112984198	0,87181395	0,232644788
1,125395506	2,014663875	1,125395506	0,085555401	0,990522844	1,399099049	0,99052284	0,290895728
1,278632847	2,450771149	1,278632847	0,104016126	1,125395506	1,737956212	1,12539551	0,358243913
1,45273546	2,945830324	1,45273546	0,124617105	1,278632847	2,13333889	1,27863285	0,435062686
1,650544424	3,497473386	1,650544424	0,147119398	1,45273546	2,586334119	1,45273546	0,521189493
1,87528767	4,102462042	1,87528767	0,171268121	1,650544424	3,095469012	1,65054442	0,615985702
2,130632654	4,75867182	2,130632654	0,196915753	1,87528767	3,657716391	1,87528767	0,718553658
2,420746202	5,466669306	2,420746202	0,224126601	2,130632654	4,27006138	2,13063265	0,828024051
2,75036251	6,230210968	2,75036251	0,253219265	2,420746202	4,930999711	2,4207462	0,943782028
3,124860397	7,055619613	3,124860397	0,284735156	2,75036251	5,641440527	2,75036251	1,065569906
3,550351077	7,950351244	3,550351077	0,319348074	3,124860397	6,404883582	3,1248604	1,193522653
4,033777887	8,92107713	4,033777887	0,357740617	3,550351077	7,226943644	3,55035108	1,328194598
4,58302959	9,971736221	4,58302959	0,400479937	4,033777887	8,114272448	4,03377789	1,470529663
5,207069109	11,10234721	5,207069109	0,447934238	4,58302959	9,073019324	4,58302959	1,621710474
5,916079783	12,30950425	5,916079783	0,5002694	5,207069109	10,10731301	5,20706911	1,782954588
6,721631549	13,58871328	6,721631549	0,557535406	5,916079783	11,21860887	5,91607978	1,955438898
7,636869741	14,93779245	7,636869741	0,619820389	6,721631549	12,40627655	6,72163155	2,140416539
8,676729602	16,36049298	8,676729602	0,687442908	7,636869741	13,66915082	7,63686974	2,339395622
9,858180007	17,86848781	9,858180007	0,761097997	8,676729602	15,00778059	8,6767296	2,554340278
11,20050036	19,48091703	11,20050036	0,84189836	9,858180007	16,42606558	9,85818001	2,78765926
12,72559522	21,22301058	12,72559522	0,931336579	11,20050036	17,93177782	11,2005004	3,041834533
14,45835172	23,12494148	14,45835172	1,031185854	12,72559522	19,53725378	12,7255952	3,318971098
16,42704571	25,21897999	16,42704571	1,143247906	14,45835172	21,26093844	14,4583517	3,620531825
18,66380319	27,53351397	18,66380319	1,268906957	16,42704571	23,12763539	16,4270457	3,947080848
21,2051245	30,08536025	21,2051245	1,408590371	18,66380319	25,16558858	18,6638032	4,297932224
24,09248	32,87380173	24,09248	1,561349238	21,2051245	27,40070595	21,2051245	4,670917229
27,37298677	35,87956901	27,37298677	1,724787762	24,09248	29,84989179	24,09248	5,0626453
31,10017752	39,07075875	31,10017752	1,895502091	27,37298677	32,51598059	27,3729868	5,469452826
35,33487411	42,41589569	35,33487411	2,070072303	31,10017752	35,38632168	31,1001775	5,888893601
40,14618012	45,90119848	40,14618012	2,246458376	35,33487411	38,43644769	35,3348741	6,321326654
45,61260848	49,54510271	45,61260848	2,425386506	40,14618012	41,63867809	40,1461801	6,770884809
51,82336267	53,40182081	51,82336267	2,611177258	45,61260848	44,97258346	45,6126085	7,244805746
58,87979241	57,54991843	58,87979241	2,811607784	51,82336267	48,4329552	51,8233627	7,750350749
66,8970475	62,06698484	66,8970475	3,036606222	58,87979241	52,03350833	58,8797924	8,289758439
76,0059569	66,99577395	76,0059569	3,295829907	66,8970475	55,80652877	66,8970475	8,855049902
86,35516364	72,30833773	86,35516364	3,595386439	76,0059569	59,79854943	76,0059569	9,425428029
98,11355046	77,87509313	98,11355046	3,93421532	86,35516364	64,05951079	86,3551636	9,969618417
111,4729957	83,45102219	111,4729957	4,301212597	98,11355046	68,62212054	98,1135505	10,45411681
126,6515044	88,69349545	126,6515044	4,674508799	111,4729957	73,47373734	111,472996	10,85719348
143,8967659	93,21904656	143,8967659	5,023984609	126,6515044	78,52875616	126,651504	11,18653743
163,4901957	96,69486858	163,4901957	5,317438573	143,8967659	83,61068485	143,896766	11,49508568
185,7515276	98,95026532	185,7515276	5,529701146	163,4901957	88,45516212	163,490196	11,8878583
211,0440316	99,98069008	208	5,651994024	185,7515276	92,74278977	185,751528	12,51287415
239,7804412	99,9999458	295	8,970099668	211,0440316	96,16468232	211,044032	13,53269676
272,4296895	100	417	28,12846069	239,7804412	98,51808617	239,780441	15,07943457
		589	53,63602805	272,4296895	99,76752238	272,42969	17,20277158
		833	64,26725729	309,5245607	99,998932	309,524561	19,82698271
		1168	76,96566999	351,6703846	100	351,670385	22,7363285
		1651	86,56330749	399,5549145	100	399,554914	25,6044919
		2362	94,53672942			589	52,66684874
		3327	99,37246216			833	100
						1168	100
						1651	100
						2362	100
						3327	100

450.150.40				450.150.33			
Kretsprodukt		Retur		Kretsprodukt		Retur	
Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum	Size Classes (µm)	%kum
0,214080116	0	0,313977388	7,48521E-11	0,243229928	0	0,40530292	2,34472E-05
0,243229928	0	0,356729522	7,48521E-11	0,276348869	0,000430459	0,46049022	0,002323045
0,276348869	0,000612811	0,40530292	7,48521E-11	0,313977388	0,047875978	0,523192	0,005093395
0,313977388	0,067700835	0,460490222	0,000211532	0,356729522	0,12394863	0,59443144	0,008383699
0,356729522	0,151370193	0,523191999	0,020199812	0,40530292	0,216319424	0,67537107	0,012291373
0,40530292	0,251754236	0,594431444	0,043743359	0,460490222	0,326361369	0,76733169	0,016932371
0,460490222	0,370325984	0,675371072	0,071149441	0,523191999	0,456681617	0,87181395	0,022423676
0,523191999	0,509759562	0,767331691	0,10306192	0,594431444	0,611267527	0,99052284	0,028864013
0,594431444	0,674224645	0,871813953	0,140179646	0,675371072	0,795643294	1,12539551	0,036308166
0,675371072	0,869573835	0,990522844	0,183102741	0,767331691	1,016722845	1,27863285	0,044745418
0,767331691	1,103133345	1,125395506	0,232221696	0,871813953	1,282283898	1,45273546	0,05409112
0,871813953	1,383096601	1,278632847	0,287608294	0,990522844	1,60007001	1,65054442	0,064200653
0,990522844	1,717506036	1,45273546	0,348997764	1,125395506	1,976640256	1,87528767	0,074907409
1,125395506	2,112974556	1,650544424	0,415890817	1,278632847	2,416246558	2,13063265	0,086074204
1,278632847	2,573468912	1,87528767	0,487759119	1,45273546	2,920146347	2,4207462	0,097638245
1,45273546	3,099621721	2,130632654	0,56425904	1,650544424	3,486741462	2,75036251	0,109632688
1,650544424	3,689012314	2,420746202	0,645334528	1,87528767	4,112665566	3,1248604	0,122180793
1,87528767	4,337539862	2,75036251	0,731172182	2,130632654	4,794475172	3,55035108	0,135468547
2,130632654	5,041463371	3,124860397	0,822093888	2,420746202	5,530251221	4,03377789	0,149705768
2,420746202	5,799265929	3,550351077	0,918479364	2,75036251	6,320535638	4,58302959	0,165089141
2,75036251	6,612623445	4,033777887	1,020708448	3,124860397	7,168459948	5,20706911	0,181783636
3,124860397	7,486284191	4,58302959	1,129081434	3,550351077	8,079143264	5,91607978	0,199937185
3,550351077	8,427022275	5,207069109	1,24377857	4,033777887	9,058446609	6,72163155	0,219731221
4,033777887	9,441965904	5,916079783	1,365001937	4,58302959	10,11132738	7,63686974	0,241456787
4,58302959	10,53677273	6,721631549	1,493298846	5,207069109	11,2404049	8,6767296	0,265603299
5,207069109	11,7143193	7,636869741	1,629873738	5,916079783	12,44561751	9,85818001	0,29292607
5,916079783	12,9746423	8,676729602	1,776800131	6,721631549	13,72518795	11,2005004	0,32446962
6,721631549	14,31618716	9,858180007	1,936934316	7,636869741	15,07744579	12,7255952	0,361557991
7,636869741	15,73782574	11,20050036	2,113449535	8,676729602	16,50328258	14,4583517	0,405755495
8,676729602	17,24135198	12,72559522	2,309217046	9,858180007	18,0079435	16,4270457	0,458748321
9,858180007	18,83320666	14,45835172	2,526287062	11,20050036	19,60140865	18,6638032	0,522114294
11,20050036	20,52489116	16,42704571	2,765455357	12,72559522	21,29846278	21,2051245	0,597008105
12,72559522	22,33336621	18,66380319	3,025943943	14,45835172	23,11924202	24,09248	0,683839885
14,45835172	24,282088	21,2051245	3,305422077	16,42704571	25,0880856	27,3729868	0,782040738
16,42704571	26,40012278	24,09248	3,600652595	18,66380319	27,22921389	31,1001775	0,890006525
18,66380319	28,71758834	27,37298677	3,908819201	21,2051245	29,56020722	35,3348741	1,005291893
21,2051245	31,25825608	31,10017752	4,229297823	24,09248	32,08595747	40,1461801	1,125066245
24,09248	34,03206174	35,33487411	4,56538295	27,37298677	34,79572068	45,6126085	1,246747378
27,37298677	37,03083638	40,14618012	4,92523656	31,10017752	37,66502941	51,8233627	1,368664624
31,10017752	40,22971808	45,61260848	5,321136204	35,33487411	40,66318571	58,8797924	1,490624043
35,33487411	43,59543639	51,82336267	5,766372251	40,14618012	43,7649104	66,8970475	1,614267872
40,14618012	47,10002192	58,87979241	6,270140279	45,61260848	46,9615526	76,0059569	1,74311404
45,61260848	50,73453832	66,8970475	6,831849296	51,82336267	50,26660579	86,3551636	1,882098228
51,82336267	54,51569518	76,0059569	7,437055378	58,87979241	53,7144713	98,1135505	2,036429615
58,87979241	58,48164644	86,35516364	8,0572912	66,8970475	57,35451292	111,472996	2,209817869
66,8970475	62,6776569	98,11355046	8,655421598	76,0059569	61,24242049	126,651504	2,402446951
76,0059569	67,13590106	111,4729957	9,197137017	86,35516364	65,42755631	143,896766	2,609257166
86,35516364	71,85331513	126,6515044	9,667360398	98,11355046	69,93306079	163,490196	2,81927187
98,11355046	76,76936743	143,8967659	10,08767604	111,4729957	74,72995407	185,751528	3,016640745
111,4729957	81,74914062	163,4901957	10,52869341	126,6515044	79,71269838	211,044032	3,183762936
126,6515044	86,58081286	185,7515276	11,11027558	143,8967659	84,68635345	295	6,80165435
143,8967659	90,9944203	211,0440316	11,98413793	163,4901957	89,3758818	417	27,06222865
163,4901957	94,70653599	239,7804412	13,29773255	185,7515276	93,46460442	589	50,9406657
185,7515276	97,48734123	272,4296895	15,14452874	211,0440316	96,66315876	833	66,28075253
211,0440316	99,24692898	309,5245607	17,51363526	239,7804412	98,80351345	1168	76,98986975
239,7804412	99,9961906	351,6703846	20,25807834	272,4296895	99,87579991	1651	85,96237337
272,4296895	100	399,5549145	23,10071434	309,5245607	99,9994445	2362	93,84949349
309,5245607	100	589	49,38074907	351,6703846	100	3327	99,276411
		833	64,08384362	399,5549145	100	351,670385	22,7363285
		1168	75,95383891			399,554914	25,6044919
		1651	85,58643429			589	52,66684874
		2362	93,90014131			833	100
		3327,00	99,46			1168	100
						1651	100
						2362	100
						3327	100

Vedlegg 3- XRF analyser

SAMPLE	Ti
3045 -38	11,19
3045 53-38	10,315
3045 74-53	11,141
3045 104-74	11,032
3045 147-104	10,894
3045 208-147	9,669
3045 295-208	6,844
3045 425-295	3,456
3045 pluss 425	2,884
3044 -53	12,795
3044 74-533	15,302
3044 104-74	16,613
3044 147-104	18,191
3044 208-147	19,393
3044 294-208	19,347
3044 425-295	16,069
3044 589-425	12,894
3044 833-589	9,23
3044 1168-833	8,202
3044 pluss 1168	9,345
RP.450.425 F450 43-	8,517
RP.450.425 F450 74-43	8,71
RP.450.425 F450 104-74	8,876
RP.450.425 F450 147-104	9,188
RP.450.425 F450 208-147	10,037
RP.450.425 F450 295-208	9,811
RP.450.425 F450 pluss 295	9,289
RP.450.425 F425 -43	7,814
RP.450.425 F425 74-43	7,602
RP.450.425 F425 104-74	7,586
RP.450.425 F425 147-104	9,144
RP.450.425 F425 208-147	9,962
RP.450.425 F425 295-208	10,068
RP.450.425 F425 pluss 295	9,365
RP.450.425 G425 43-	6,136
RP.450.425 G425 147-104	6,47
RP.450.425 G425 208-147	9,031
RP.450.425 G425 295-108	8,97
RP.450.425 G425 pluss 295	8,181
URP#2 F425 43-	7,613
URP#2 F425 74-43	7,08
URP#2 F425 104-74	7,374
URP#2 F425 147-104	8,451
URP#2 F425 208-147	9,844
URP#2 F425 208-147	9,481
URP#2 F425 pluss 295	9,953