

Prosessbeskrivelse av et pukkverk - en kostnads- og optimaliseringsstudie

Helene Fromreide Nesheim

Tekniske geofag

Innlevert: juli 2018

Hovedveileder: Steinar Løve Ellefmo, IGP

Medveileder: Vegard Olsen, Franzefoss
Børge Johannes Wigum, IGP

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geovitenskap og petroleum



MASTEROPPGAVEN

<i>Kandidatens navn</i>	Helene Fromreide Nesheim
<i>Oppgavens tittel</i>	Prosesskartlegging av et pukkverk – en kostnads- og optimaliseringsstudie
<i>Veiledere</i>	Steinar Løve Ellefmo og Børge J. Wigum
<i>Samarbeidspartner, bedrift:</i>	Franzefoss Pukk AS v/ Vegard Olsen
<i>Utfyllende tekst</i>	<p>Opgaven skal utføres som en komparativ studie og skal sammenligne bruken av et permanent knuseverk og et mobilt knuseverk. Dette er en videreføring av prosjektoppgave utført i samarbeid med Franzefoss Pukk avd. Vassfjell høsten 2017. Prosjektoppgavens formål var en kartlegging av prosessen i et pukkverk. Masteroppgaven skal, med bakgrunn i prosjektoppgaven, se videre på prosessen med et særlig fokus på materialstrøm og økonomi. Oppgaven utføres som et ledd i utbedringen av prosessanlegget og som en videre oppfølging av kapasiteter og kostnader i Vassfjell. De siste årene er det byttet ut flere knusere og sikt. Detaljeringsgraden skal være på et overordnet nivå tilsvarende detaljeringsgraden i et innledende forstudie (scoping).</p> <ul style="list-style-type: none">• Det skal lages et nytt og oppdatert flytskjema for pukkverket. Flytskjemaet dekker det stasjonære verket.• Det skal lages en kostnadsstruktur hvor enkelte elementer i flytskjemaet prissettes ved bruk av data fra QlikView (Franzefoss' eget økonomistyringsprogram) og presenteres ved hjelp av NTNUs kostnadsmodell.• Hovedprosessene i pukkverket presenteres og det skal visualiseres teoretiske modeller på kostnad og kapasitet, disse resultatene presenteres som egne kapasitets- og kostnadsflytskjema.• Hvordan brukes åpen/lukket krets og sikt, og hvordan spiller dette inn på produksjonen (kvalitet, kapasitet).• For det mobile verket skal ulike leverandører av mobilknusere kontaktes. Leiekostnader og kostnadsfordeling er særlig interessant og skal benyttes for å sammenligne kostnadsbildet i Vassfjell rundt bruken av stasjonært knuseverk mot innleie av mobilt knuseverk. <p>Informasjonsinnhenting skjer hovedsakelig gjennom innhenting av erfaringsdata og feltstudier. Prosjektoppgavens resultatdel ga en oversikt over prosessen i Vassfjell i form av et tekstkapittel og en IDEF-modell. Tekstkapittelet blir gjengitt i masteroppgaven og IDEF-modellen vil kunne brukes som støtte i tilfeller hvor dette er hensiktsmessig. Enkelte deler av bakgrunnskapittelet fra prosjektoppgaven vil også brukes videre i masteroppgaven</p>
<i>Studieretning</i>	Mineralproduksjon og teknisk ressursgeologi
<i>Hovedprofil</i>	Mineralproduksjon
<i>Tidsrom</i>	13.02.2018 til 13.07.2018

Steinar L. Ellefmo

Steinar L. Ellefmo, førsteamanuensis og hovedveileder

Skjemaet tas inn som side 1 i masteroppgaven

NTNU, 05.07.2018

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for geovitenskap og petroleum ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet våsemesteret 2018. Oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng og utgjør hele fagemnet TGB 4926 Mineralproduksjon, masteroppgave.

Masteroppgaven er gjennomført i samarbeid med Franzefoss Pukk AS, avdeling Vassfjell. Undertegnede har hatt sommerjobb i naboanlegget sommeren 2017, samt skrevet prosjektoppgave for bedriften i løpet av høsten 2017. Kontaktperson og medveileder fra Franzefoss Pukk har vært Vegard Olsen, regionssjef Trøndelag. Førsteamanuensis, Steinar L. Ellefmo, er hovedveileder og instituttets representant for oppgaven, mens Børge J. Wigum er medveileder fra NTNU.

Takk til Franzefoss Pukk sentralt for bidrag til oppgaven. En ekstra stor takk til avdeling Trøndelag ved Lia og Vassfjell for den tålmodighet og åpenhet som dere har vist meg, og da spesielt Sturla, Alf og de andre i Vassfjell. 5 år med teoritung skolegang er nå over for min del, men den kunnskapen jeg har tillagt meg har liten verdi uten den erfaringen og praktiske tilnærmingen dere sitter med.

Tusen hjertelig takk til Vegard, Steinar og Børge. Deres tilbakemeldinger og veiledning er noe jeg har satt stor pris på, det har vært veldig fint og behagelig å ha så dyktige veiledere med på laget.

En siste takk sendes til andre personer som har vært behjelpelig i forbindelse med oppgaven. Dette gjelder utstyrslleverandører og andre med kjennskap til oppgavens innhold, samt personer i min omgangskrets som har bidratt til å holde motivasjonen oppe gjennom det siste halvåret.

Forsidebilde: Dronebilde over Vassfjell, tatt juni 2017 (Mr. Drone, Franzefoss Pukk)

Sammendrag

Hva koster det egentlig å produsere et tonn pukk? Dette er viktig informasjon for en pukkprodusent. Ved hjelp av NTNUs kostnadsmodell er selve knusekostnaden for Franzefoss' pukkverk i Vassfjell beregnet. For en tretrinnskust masse i et stasjonært anlegg med årlig produksjon rundt 600 000 tonn, ligger knusekostnaden på 18.24 kr fordelt på 5.11 kr/tonn i primær, 5.76 kr/tonn i sekundær og 7.37 kr/tonn for tertiærtrinnet. I 2017 hadde anlegget en totalproduksjon på over 1.2 millioner tonn. For å få dette til måtte Franzefoss leie inn mobilknusing fra eksterne leverandører for å spe på produksjonen. Mobilknusing er dyrt å leie og gjennomsnittsprisen for et grovkust materiale ligger på 22.06 kr/tonn basert på tall fra de to siste årene i Vassfjell. Vil det i lengden være gunstig å benytte innleid mobilknusing til en så stor ekstraproduksjon i anlegget, eller vil det være mer gunstig å investere i en egen mobilknuser?

Som med de fleste andre ting her i verden er det i det lange løp bedre å eie enn å leie. Det bør derfor brukes tid på å vurdere og gjennomføre en omfattende beregning av nødvendig bruk av en mobilknuser i det stasjonære verket. Jo tidligere i en produksjonsprosess dette blir avklart, jo større avkastning vil en eventuell investering gi. Det strider likevel mot målet om en lean produksjon å investere i en mobilknuser dersom den er mye inaktiv. Da vil knuseren fungere som en verdi som glemmes bort i lagring. Valget mellom innleie og selveie er derfor en kompleks problemstilling som videre bør utredes gjennom detaljerte kostnadsberegninger.

Å gjennomføre prosessanalyser av verket i et simuleringsverktøy kan være en kostnadsbesparende prosess. En slik analyse kan optimalisere driften med tanke på kvalitet og kvantitet. Ved hjelp av AggFlow ble det konkludert med at driften i Vassfjell kan maksimeres ved å øke kapasiteten inn i det stasjonære verket per time fra 400 tonn til 436 tonn. Dersom man i tillegg justerer CSS på tertiærknuseren vil resultatet bli mindre finstoff og en høy andel av det mest ønskede 8/11-produktet.

Som en basis i kartleggingsarbeidet av verket ble det utarbeidet et nytt flytskjema for anlegget. Dette er brukt som grunnlag både for kostnadsmodellen og prosessanalysene som er gjennomført.

Abstract

What does it cost to produce a ton of aggregates? This is important information for an aggregate producer. With the help of NTNU's cost model, the actual cost of crushing in Franzefoss' quarry Vassfjell was calculated. For a crushing process in a stationary plant with three crushing stages, and an annual production of 600 000 tonnes, the total crusher cost is 18.24 NOK/ton, divided into 5.11 NOK/ton in the primary stage, 5.76 NOK/ton in the secondary stage and 7.37 NOK/ton in the tertiary stage. In 2017, the plant had a total production of over 1.2 million tons. In order to do this, Franzefoss had to hire mobile crushing from external suppliers to reflect the production numbers. Renting of a mobile crusher is expensive and the average price of a coarse crushed material is 22.06 NOK/ton based on the cost of the last two years in Vassfjell. In the end, will it be beneficial to use external suppliers for this much extra production in the facility, or would it be more beneficial to invest in an own mobile crusher unit? As with most other things in the world, it is better to own than to rent. Time should be used to assess and implement a comprehensive calculation of the necessary use of a mobile crusher in the stationary plant. The earlier in a production process this will be clarified, the greater the return of a possible investment. It is nevertheless contrary to the goal of a lean production to invest in a mobile crusher if it is highly inactive. The crusher would then act as a value hidden in storage. The choice between renting and owning is a complex issue that should be further investigated through detailed cost calculations.

Implementations of process analysis of the facility in a simulation tool can be a cost-saving process. Such analysis can optimize operations in terms of quality and quantity. After analysis in AggFlow, it was concluded that the operation in Vassfjell could be maximized by increasing the hourly capacity into the stationary plant from 400 tons to 436 tons. In addition, one could adjust the CSS on the tertiary crusher, the result will be less fines and a high share of the most desired 8/11-product.

A new flow chart over the plant was prepared as a basis for the mapping of the facility. The flow chart is used as a foundation both for the cost model and for the process analysis that have been completed.

Innhold

Forord	iii
Sammendrag	v
Abstract	vii
Innhold	ix
Figurliste.....	xiii
Tabelliste	xv
Formelliste.....	xvi
Ordliste	xvii
1 Introduksjon	1
1.1 Avgrensning.....	1
1.2 Struktur	2
2 Bakgrunn	3
2.1 Franzefoss Pukk.....	3
2.1.1 Vassfjell Pukkverk	3
2.2 Tilslagsmaterialer	6
2.3 Prosessen i Vassfjell	8
2.3.1 Forekomstevaluering	8
2.3.2 Dagbruddsdrift	8
2.3.3 Partikkelreduksjon og sortering	9
2.3.4 Varelogistikk	10
2.3.5 IDEF	11
3 Teori	14
3.1 Flytskjema	14
3.1.1 AggFlow	14
3.2 NTNU kostnadsmodell	15

3.2.1	Avskrivning	16
3.2.2	Renter	17
3.2.3	Reparasjon og service.....	18
3.2.4	Driftsstopp.....	18
3.2.5	Slitedeler.....	19
3.2.6	Elektrisk kraft	21
3.2.7	Annet knuseverksutstyr	22
3.2.8	Andre kostnader	23
3.3	Knusing.....	24
3.3.1	Kjefteknuser	25
3.3.2	Konknuser	28
3.3.3	Mobilknuser	31
3.3.4	Knuseteori	33
3.4	Sikting.....	37
3.4.1	Vibrerende sikt	39
3.4.2	Sikteteori	40
3.5	Transportbånd.....	42
3.6	Matere.....	43
3.6.1	Primærmater	44
3.6.2	Fingermater	45
3.7	Valg av prosess	45
3.7.1	LEAN	48
4	Metode.....	51
4.1	Anleggsbesøk.....	51
4.2	Flytskjema og prosessanalyser	51
4.3	NTNUs kostnadsmodell	52
4.3.1	QlikView	52

4.3.2	Driftsjournal	56
4.3.3	Investeringskostnader	58
4.4	Mobilknusing	58
5	Resultat	59
5.1	Flytskjema	59
5.2	NTNU kostnadsmodell	61
5.2.1	Avskrivning	61
5.2.2	Renter	62
5.2.3	Reparasjon og vedlikeholdskostnader	63
5.2.4	Driftsstopp	65
5.2.5	Slitedeler	65
5.2.6	Elektrisk kraft	66
5.2.7	Andre kostnader	68
5.2.8	Forutsetninger	68
5.2.9	Kostnadsmodell 10 år avskrivning	69
5.2.10	Kostnadsmodell 15 og 30 år avskrivning	71
5.3	Valg av prosess	73
5.3.1	Standarddrift, lukket krets	75
5.3.2	Maksimert drift	78
5.3.3	Kornfordelingskurver	83
5.4	Mobilknusing	84
6	Diskusjon	89
6.1	Flytskjema	89
6.2	NTNU kostnadsmodell	89
6.3	Valg av prosess	94
6.4	Mobilknusing	99
7	Konklusjon	102

8	Videre arbeid	104
9	Referanser.....	105
10	Vedlegg	109

Figurliste

Figur 1: Ressursverdivurdering Vassfjell, modifisert etter (NGU, 2017).....	4
Figur 2: Bruk av tilslagsmaterialer i Norge (Wigum, 2017)	6
Figur 3: Stykkstørrelse og hardhet for ulike materialer (Metso, 2015).....	7
Figur 4: Grunnmodell IDEF, modifisert etter (Nesheim, 2017).....	12
Figur 5: A1-modell, fokusområder er skravert, modifisert etter (Nesheim, 2017)	13
Figur 6: Lineær avskrivning, prinsipp.....	16
Figur 8: Ulik opplagring av den bevegelige kjeven i en kjeftetygger (Wills og Finch, 2016)	26
Figur 9: Lukket og åpen utløpsspalte på en kjefteknuser (Metso, 2011)	26
Figur 10: Kjefteknuser, rotasjonsknuser (Viilo, 2011).....	27
Figur 11: Konkuser (Viilo, 2011).....	29
Figur 12: Knuseprinsipp for konkuser (Rothery og Mellor, 2007)	29
Figur 13: Kapasiteter CH660-konkuser, modifisert etter (Sandvik SRP AB, 2014)	30
Figur 14: Spesifikasjoner HP4 F, modifisert etter (Metso, 2014)	31
Figur 15: Lokotrack LT106 mobilknuser (Metso, 2016)	32
Figur 16: Kostnadsoversikt – dagbrudd (Zimmermann og Kruse, 2006)	33
Figur 17: Ulike typer kjeftelater (Mayo, 2006).....	35
Figur 18: Dimensjoner på en sikteduk (Nesheim, 2017).....	38
Figur 19: Utforming av sikteduk (Metso, 2015)	38
Figur 20: Snitt av transportbånd med ulike dimensjoner (Metso, 2015).....	42
Figur 21: Ulike typer matere og deres bruksområde (Metso, 2015)	44
Figur 22: Fingermater (Star Trace (P) Ltd., u.å.)	45
Figur 23: Hovedprinsippene innen Lean-produksjon, (Lean Enterprise Institute, u.å.).....	49
Figur 24: Eksempel på regnskapsark i QlikView.....	53
Figur 25: Driftsjournal, mal (Franzefoss)	57
Figur 26: Nytt flytskjema laget i AggFlow, Vassfjell.....	60
Figur 27: Kornfordelingskurve sprengrøys, Vassfjell.....	74
Figur 28: Standarddrift trinn 1 og 2, lukket krets.....	76
Figur 29: Standarddrift trinn 3, lukket krets.....	77
Figur 30: Maksimert drift trinn 1 og 2, lukket krets.....	78
Figur 31: Maksimert drift trinn 3, lukket krets.....	79
Figur 32: Maksimert drift trinn 1 og 2, åpen krets	80
Figur 33: Maksimert drift trinn 3, åpen krets	81

Figur 34: Maksimert trinn 3, endret CSS fra 16 til 19 mm	82
Figur 35: Kornfordelingskurven til 8/11 i Vassfjell.....	83
Figur 36: Kornfordelingskurve 8/11 i AggFlow	83

Tabelliste

Tabell 1: Antatt belastning for knusere, (Sandvik, Digre og Malvik, 1999).....	21
Tabell 2: De ulike elementene i strømprisen, modifisert etter (Smarte Penger, 2018)	22
Tabell 3: Oversikt over kornstørrelser i de ulike knusetrinnene, modifisert etter (Sandvik, Digre og Malvik, 1999).....	24
Tabell 4: Kostnadselementer i primærknuseri	54
Tabell 5: Kostnadselementer i sekundærknuseri.....	54
Tabell 6: Kostnadselementer i tertiærknuseri.....	55
Tabell 7: Kostnadselementer i sikteanlegg.....	55
Tabell 8: Beregning av antall driftsuger per år	61
Tabell 9: Realrentenivå fra 1997-2016, modifisert etter (Statistisk sentralbyrå, u.å.)	62
Tabell 10: Produsert tonnasje stasjonært verk, Vassfjell	63
Tabell 11: Reparasjon- og vedlikeholdskostnader, Vassfjell	64
Tabell 12: Slitedelskostnader, Vassfjell	65
Tabell 13: Strømprisens ulike elementer for industri.....	66
Tabell 14: Installert effekt for knuseverksutstyr, Vassfjell	67
Tabell 15: Antatt belastning for knuserne, Vassfjell.....	67
Tabell 16: Forutsetninger for kostnadsmodell	68
Tabell 17: Kostnader stasjonært knuseverk, Vassfjell	69
Tabell 18: Kostnadsmodell med 10 år avskrivningstid.....	70
Tabell 19: Oppdeling av kostnad og avskrivning for hhv. fastverk og knusere, Vassfjell	71
Tabell 20: Kostnader fastverk, Vassfjell	71
Tabell 21: Kostnader knusere, Vassfjell.....	72
Tabell 22: Kostnadsmodell med 15 og 30 år avskrivning.....	72
Tabell 23: Resultater densitetstest, Vassfjell.....	73
Tabell 24: Produsert tonnasje mobilknusing og stasjonært verk, Vassfjell	84
Tabell 25: Forutsetninger for kostnadsmodell, mobilknusing	85
Tabell 26: Kostnader mobilt knuseverk, Vassfjell	86
Tabell 27: Kostnadsmodell, mobilknusing.....	87
Tabell 28: Leiekostnader mobilknusing [kr], Vassfjell.....	87
Tabell 29: Leiekostnader mobilknusing [kr/tonn], Vassfjell	88

Formelliste

Formel 1: Avskrivning	17
Formel 2: Avskrivningstid (brukstid).....	17
Formel 3: Renter.....	18
Formel 4: Driftsstoppkostnader.....	19
Formel 5: Driftsstopp	19
Formel 6: Elektrisk kraft	21
Formel 7: Lønn.....	23

Ordliste

Abrasive materialer

Slitesterkt materiale med høy hardhet og skarpe kanter. Kan ha en slipende effekt.

Fraksjon

Størrelsesinndeling på berget. Fordeles normalt etter korndiameter.

Gabbro

Magmatisk dypbergart. Inneholder blant annet jern, plagioklas, pyroksen og olivin. Fargen på bergarten avhenger av mineralinnholdet. Relativt grovkornet.

Grønnstein

Omdannet magmatisk bergart dannet ved vulkansk aktivitet på havbunnen. Innhold av mineraler som epidot, kloritt og amfibol gir en grønnlig farge. Finkornet.

Polyuretan

Polymer med samme mekaniske egenskapene som plast og med elastisiteten til gummi.

Rockwool

Steinull er et spesialprodukt som benyttes i byggebransjen som isolasjonsprodukt med fordeler som brannbeskyttelse, støyreduksjon og lang holdbarhet.

Subbus

Masser sortert ut før eller rett etter grovknusing. Inneholder ofte mer finstoff og er av lavere kvalitet enn pukk knust i flere trinn.

Tilslag

Fellesbetegnelse for bergmasser brukt i asfalt- og betongproduksjon.

1 Introduksjon

Pukk er et lavprisprodukt som tas ut i store kvanta og selges til lav tonnpris sammenlignet med andre typer mineraluttak. Når marginene er små og tonnasje høy, kan det være mye penger å spare på mindre justeringer i driften. Den optimale driften finnes ikke, men det kan gjøres optimaliserende arbeid i prosessen både for å bedre kvalitet, bedre kvantitet og senke kostnadsnivået. Disse tre faktorene oppfylles ikke nødvendigvis av den samme prosessflyten og det må gjøres vurderinger og prioriteringer for valg av driftsmetode. For å kunne gjøre optimaliserende arbeid i et knuseverk er det viktig at driften er godt kartlagt.

Målet med denne oppgaven er å kartlegge driften i Vassfjell tilstrekkelig til å kunne produsere et flytskjema og gjennomføre prosessanalyser på verket. Hva må til for å kunne utføre en slik oppgave og har Franzefoss nok informasjon til et slikt arbeid? I en prosessanalyse, hvilke elementer er det hensiktsmessig å se på og hvor er det eventuelt et forbedringspotensial? Franzefoss leier inn mobilknusing ved behov, er dette den mest økonomisk gunstige måten å drive et verk på? Hva koster det egentlig å produsere et tonn ferdigprodukt i et stasjonært anlegg og hvilke elementer er det som spiller inn på kostnaden?

Masteroppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven, *Prosesskartlegging av et pukkverk – Vassfjell Pukkverk*, skrevet høsten 2017. I denne oppgaven ble prosessen i Vassfjell kartlagt på et overordnet nivå og deretter nedtegnet som en IDEF-modell hvor de største kostnadsbærerne i hvert prosessledd ble identifisert. Masteroppgaven viderefører kartleggingen på et mer detaljert nivå og blant annet resultatdelen fra prosjektoppgaven vil brukes videre som basis i denne oppgaven.

1.1 Avgrensning

Optimalisering kan gjøres i alle deler av en bedrift; personal, prosess, planlegging osv. Denne oppgaven tar utgangspunkt i knuseverket i Vassfjell, den delen av gruvedrift som går fra primært knusetrinn til ferdigknust produkt i sekundært- og tertiært trinn. Å finne den optimale driften av et prosessanlegg er vanskelig og lar seg som regel ikke gjøre, men det er likevel viktig med kontinuerlig forbedringsarbeid i alle ledd i prosessen. Arbeidet gjort i denne oppgaven baserer seg på generell knuse- og sikteteori med fokus på optimaliserende vurderinger av kostnad og kvantitet. Hvor optimaliserende kostnadsdrift defineres som minst

mulig produksjon av uønskede produkter, mens optimaliserende kvantitetsdrift defineres som mest mulig produksjon av ønskede produkter. Oppgaven tar utgangspunkt i den maskinparken som allerede eksisterer i Vassfjell og tar ikke hensyn til kostnader rundt eventuelle endringer og utbedringer i verket.

1.2 Struktur

- 1 **Introduksjon** – formål med oppgaven
- 2 **Bakgrunn** – kort om Franzefoss, prosessen deres og tilslagsmaterialer
- 3 **Teori** – inngående om kostnadsmodell, knuseverksutstyr og prosessvalg
- 4 **Metode** – kort beskrivelse av informasjonsinnhenting gjort ifm. oppgaven
- 5 **Resultat** – presentasjon av oppgavens resultater
- 6 **Diskusjon** – vurdering av oppnådde resultater
- 7 **Konklusjon**
- 8 **Videre arbeid**
- 9 **Referanser**
- 10 **Vedlegg**

2 Bakgrunn

Kapittelet gir en kort innføring i Franzefoss Pukk, driften i Vassfjell og de produktkrav som settes for anlegget. Dette for å gi leser tilstrekkelig informasjon for best mulig forståelse av oppgavens formål og resultater. Kapittelet gjengir kartleggingen av prosessen i Vassfjell fra prosjektoppgaven i høst.

2.1 Franzefoss Pukk

Franzefoss Bruk ble etablert i 1919 med produksjon av kalkmel og knust stein. I dag består Franzefoss AS av flere datterselskap, deriblant Franzefoss Pukk AS og Franzefoss Gjenvinning AS. Konsernet er en ledende aktør innen pukk og gjenvinningstjenester i Norge.

Franzefoss Pukk AS har 13 pukkverk fordelt utover Sør- og Midt-Norge. Pukkverkene leverer tilslagsmaterialer til asfaltprodusenter, samt pukk, sand, grus og jord til blant annet privatmarked, offentlig sektor, bygg- og anleggsbransjen og bergindustrien.

Det produseres samlet rundt 4 millioner tonn per år på disse anleggene og det er rundt 113 ansatte (Franzefoss AS, 2016a).

Franzefoss har et mål om å forvalte ressursene sine på en god måte slik at det sikres et bærekraftig uttak av de ikke-fornybare ressursene. Dette medfører at bedriften analyserer driften med hensyn til ulike tidsperspektiv. De har både langsiktige produksjonsplaner i tillegg til mer kortsiktige planer. Som et ledd i miljøfokus, planlegges driften med et mål om full livssyklus for både produkt og uttaksområde. Det ønskes størst mulig gjenvinning og gjenbruk av produkter, forsvarlig deponering og det settes krav til tilbakestilling av uttaksområdet for å sikre etterbruk av landskapet.

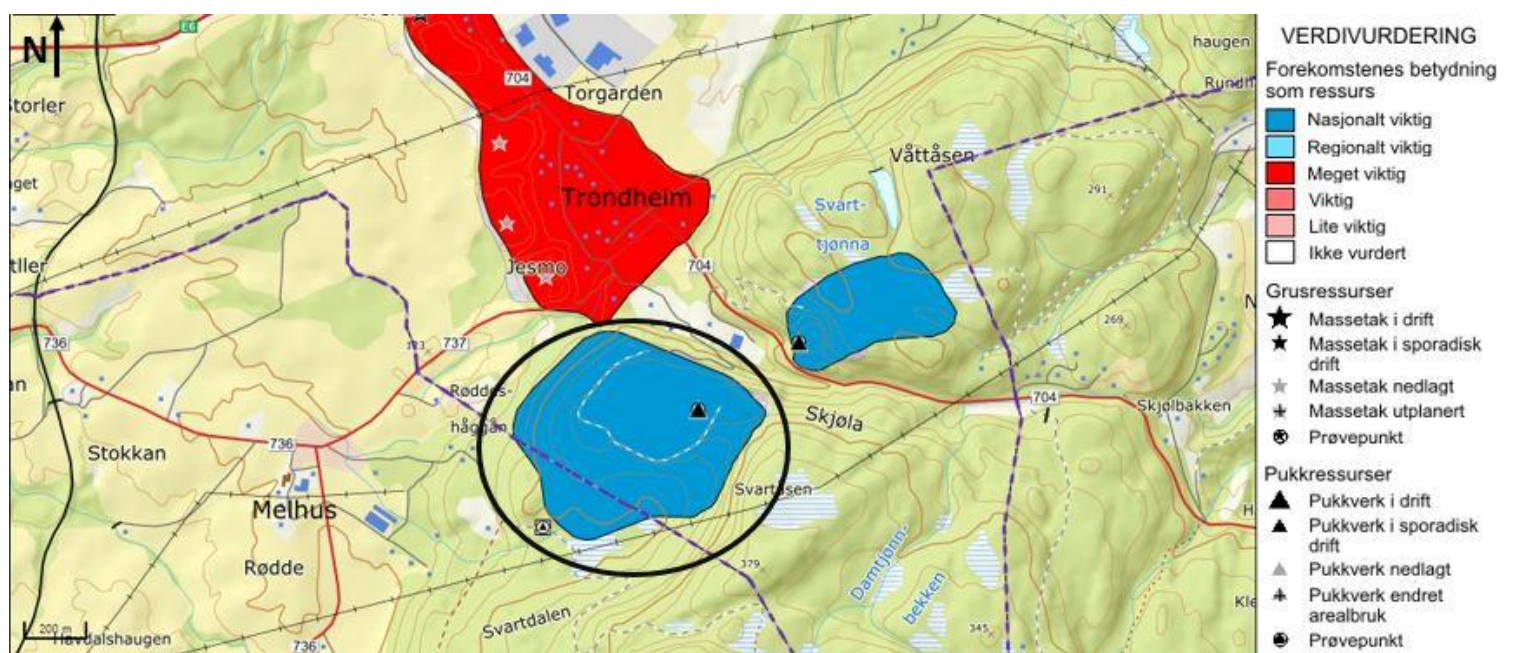
Franzefoss ønsker å være en synlig og god aktør i lokalsamfunnet, og har som motto å være «samfunnets beste valg».

2.1.1 Vassfjell Pukkverk

Vassfjell pukkverk ligger 14 km sør for Trondheim og har vært i drift siden 1985. Verket er et av Franzefoss' største, og hadde i 2017 et uttak over 1 mill. tonn. Dagbruddet drives i grønnstein og gabbro, forekomsten er klassifisert som en «nasjonalt viktig ressurs» av NGU

(NGU, 2015). Figur 1 er et utsnitt fra NGU sin nasjonale berggrunnsdatabase og viser verdivurderingen av området rundt Vassfjell Pukkverk. Anlegget og ressursområdet er markert med en svart ring. Forekomsten ligger hovedsakelig innenfor Trondheim kommune, men av figuren kan man se at den også krysser kommunegrensen til Melhus. Denne delen av forekomsten er per i dag i en reguleringsfase og er ikke tatt ut.

Anlegget produserer ulike pukkfraksjoner til privatmarkedet og offentlig instanser, samt tilslagsmaterialer til asfalt, betong og jernbane. Veidekke har i den forbindelse et eget asfaltverk plassert på anleggsområdet som tar imot tilslagsmaterialer til bruk i asfaltproduksjon.



Figur 1: Ressursverdivurdering Vassfjell, modifisert etter (NGU, 2017).

I tillegg til pukk- og tilslagsproduksjon, mottar anlegget asfaltflak og betong til bearbeiding, samt slam, biogjødsel og kvernet hage- og parkavfall til kompostering (Franzefoss AS, 2016b). Grønn Vekst Norge AS har et eget område på anlegget hvor det foregår produksjon og utsalg av miljøvennlig jord og jordprodukter.

Det er per i dag 15 faste ansatte i anlegget fordelt på primærgraver, kjøring av masse til sjakt, verksoperatører, ferdigvarelastere, dumperførere, reparasjon og vedlikehold, operatør av vaskeanlegg for vasking av masser, samt administrative stillinger. Franzefoss satser på kompetanse og gir derfor flere av sine ansatte dobbelt fagbrev og faglig påfyll gjennom jevnlig kurs (Franzefoss AS, 2018). En slik satsing gir de ansatte en bedre forståelse og

større innsikt i driften, samt at bedriften blir mindre avhengig av enkeltpersoner med særkompetanse.

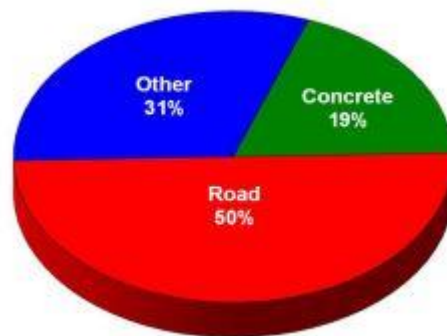
2.2 Tilslagsmaterialer

Ifølge “HARDE FAKTA om mineralnæringen – Mineralstatistikk 2016” ble det solgt 99 millioner tonn mineralmaterialer i Norge I 2016. 85 millioner tonn gikk til byggematerialer, hvorav 70 millioner tonn var knust stein og 15 millioner tonn var naturlige sand- og grusressurser (Direktoratet for mineralforvaltning med Bergmesteren for Svalbard, 2016).

Typiske produkter som produseres i et pukkverk er:

- Tilslagsmaterialer til betong, asfalt og jernbaneballast
- Maskinsand som blant annet benyttes til finavretting, idrettsbaner og hellelegging
- Samfengt pukk til topplag på vei, bærelag og avretting
- Subbus til bruk i bærelag, topplag og avretting
- Pukk til grøfting, strøsingel og fylling

Det er store behov for tilslagsmaterialer i vei og bygg- og anleggsbransjen. Figur 2 viser hvordan bruken av tilslagsmaterialer i Norge fordeler seg. Asfalt er det mest brukte veidekket i Norge og består av 94 – 95% tilslagsmaterialer og 5-6% bituminøst bindemateriale (Statens vegvesen, 2017), mens betong består av 60 – 80% tilslagsmaterialer, 7 – 15% sement, 14 – 18% vann og 2 – 8% luft (Seegebrecht, u.å.). Følgelig står veitilslag og betongtilslag for størsteparten av de produserte tilslagsmaterialene.

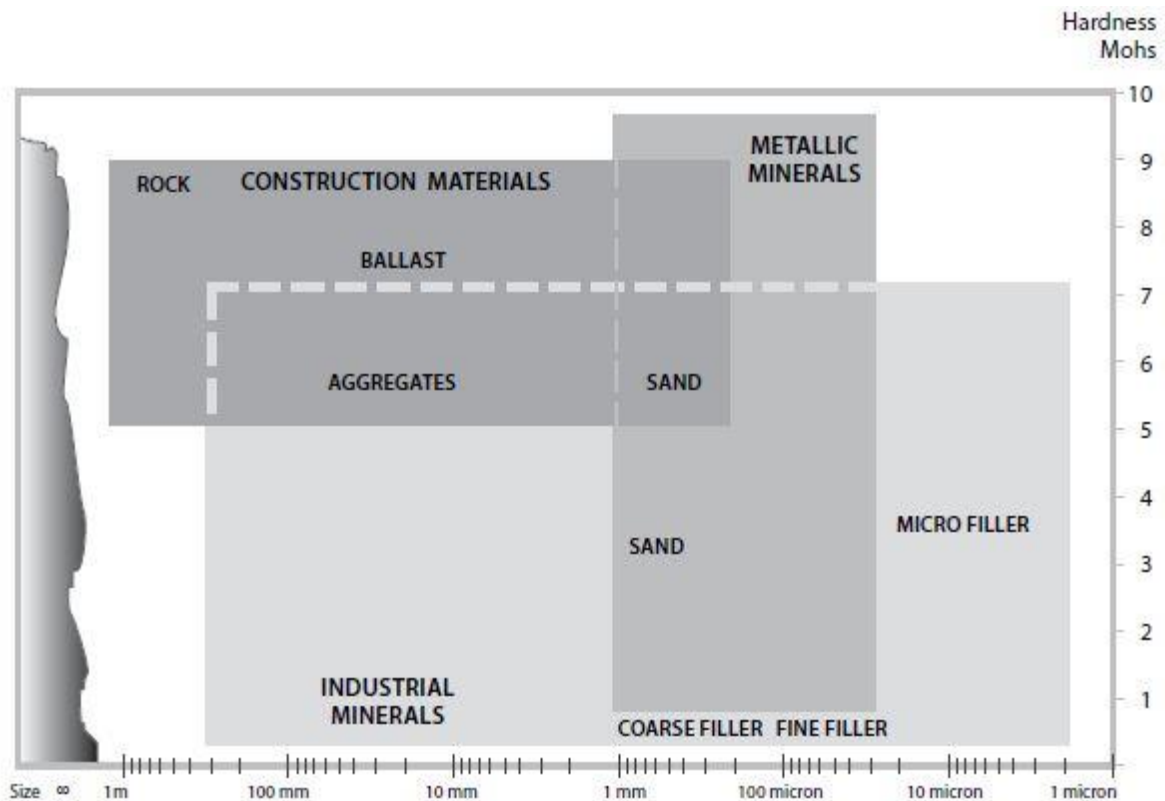


Figur 2: Bruk av tilslagsmaterialer i Norge (Wigum, 2017)

Det er strenge kvalitetskrav til tilslagsmaterialer og disse kravene er nedfelt i standarder. Eksempler på aktuelle standarder er NS-EN 12620 «Tilslag for betong», NS-EN 13043 «Tilslag for bituminøse masser og overflatebehandlinger for veger, flyplasser og andre trafikkarealer» og NS-EN 13242 «Tilslag for mekanisk stabiliserte og hydraulisk stabiliserte

materialer til bruk i bygg- og anleggsarbeid og vegbygging». Disse standardene definerer blant annet krav til kjemisk innhold, mekaniske og fysiske egenskaper for tilslagsproduktet (Vegdirektoratet, 2015).

Figur 3 viser vanlige fraksjoner for ulike mineralske materialer i tillegg til materialets hardhet basert på Mohs hardhetsskala.



Figur 3: Stykkstørrelse og hardhet for ulike materialer (Metso, 2015)

Av figuren kan det ses at tilslagsmaterialer inkluderer et stort spenn av stykkstørrelser, fra sandfraksjoner til omkring en meter i størrelse. Hardhetsskalaen viser også at det stilles krav til materialene som skal brukes i konstruksjoner, og det brukes hovedsakelig berg med en hardhet på 5 og høyere. Hardhet vil også være en viktig faktor i valg av utstyr og slitasje på dette.

2.3 Prosessen i Vassfjell

Franzefoss Pukk AS avdeling Vassfjell produserer, som tidligere nevnt, pukk fra en gabbro- og grønnsteinsforekomst. Dette delkapittelet beskriver hele prosessen i Vassfjell, fra in situ forekomst til ferdig salgsprodukt.

2.3.1 Forekomstevaluering

Som tidligere nevnt strekker forekomsten i Vassfjell seg over kommunegrenser og Franzefoss er midt i en reguleringsfase for å kunne utvide den eksisterende bruddgrensen slik at man kan ta ut en større del av den nasjonalt viktige forekomsten. En reguleringsprosess er omfattende og tidkrevende, det er derfor viktig å begynne så tidlig som mulig for å kunne sikre kontinuerlig drift. I Vassfjell er det tatt hensyn til tidsaspektet for områderegulering slik at driften er sikret i behandlingsperioden.

2.3.2 Dagbruddsdrift

Franzefoss Pukk region Trøndelag har et eget bergsprengningsteam bestående av fire boreoperatører og en bergsprengningsleder. De sørger for avdekking, boring, lading og sprengning på alle Franzefoss' anlegg i Trøndelag.

Ofte er berget som skal tas ut dekket av masser. Om avdekking av denne massen er nødvendig eller ikke, avgjøres før hver enkelt borerunde. Dersom pallen som skal drives er en terrengpall med skog og/eller løsmasser, må avdekking gjennomføres først. Er pallen dekket med sylte, kan denne fjernes eller gjennombores avhengig av hva den består av og avhengig av en vurdering av risikoen ved eventuell gjennomboring (NFF, 2005). Boringen utføres i henhold til oppsatt boreplan og etterpå produserer operatør en borerapport som inneholder dato for boring, antall hull, boremeter, boremønster og gjennomsnittlig pallhøyde.

Som sprengstoff benyttes det hovedsakelig slurry i Vassfjell. Sprengstoffet leveres av Orica, som også stiller med ladetruck og operatør. Dynamitt benyttes som primer i borehullet, mens Booster benyttes som initiering og energigiver til primeren. Etter at sprengning er utført, leveres det en salverapport med dato og klokkeslett for sprengning, forbruk av de ulike sprengstofftypene, salvestørrelse (flate, volum og vekt), samt forbruk av tennere.

Sprengrøysen lastes på hjullaster eller gravemaskin. Hjullaster brukes hovedsakelig til å laste

sprengt materialet på transportmaskiner, dumper eller lastebil, til stasjonært verk eller ut av bruddet. Den kan også benyttes til direkte transport fra sprengrøys til det stasjonære verket. Gravemaskinen benyttes også for lasting til transport, men brukes i tillegg når materialet skal videre i et mobilt anlegg. Ved bruk av en mobilknuser, plasseres knuser og gravemaskin i umiddelbar nærhet til røys slik at gravemaskinen laster direkte fra røys til knuser. Fordelen med en gravemaskin er at den er mobil med stor framkommelighet på ujevnt underlag og kan derfor stå oppå røysen i motsetning til en hjullaster som må kjøre rundt på bakkeplan langs røysen. Gravemaskinen brukes også til pigging av storstein som skal inn i mobilt eller stasjonært verk. Storstein slippes fra høyde og ned på en kule slik at den brytes i mindre og håndterlige størrelser. Dersom storstein sendes inn i verket kan den føre til heng i sjakt og knuser, dette gir produksjonsstopp og tapte kostnader. Ettersom at det i Vassfjell allerede benyttes gravemaskin i driften, vil det være mer kostnads- og tidseffektivt å bryte ned storstein ved å bruke denne sammen med en kule sammenlignet med for eksempel en hydraulisk hammer. Franzefoss har ikke egen mobilknuser og leier derfor inn mobilknusing ved behov.

2.3.3 Partikkelreduksjon og sortering

Sprengrøysen transporteres og tippes ned i sjakten som fører til primærknuseren. Knuseren er en K160-kjeftetygger, en rotasjonsknuser. Før knuseren er det plassert en fingermater med åpning 10 cm som slipper gjennom understørrelser slik at disse ikke går gjennom knuseren. Understørrelsen kan tas ut og selges som et subbusprodukt.

Etter primærknuseren er det plassert et transportbånd med vekt som gir en indikasjon på masseflyten gjennom det første knusetrinn. Primærknuseren danner et 0/300-produkt som kan tas direkte ut til salg eller det kan sendes videre til neste knusetrinn.

Etter primærknuseren er det montert en utjevningsslomme, en buffersilo, som til enhver tid er fylt med 0/300-fraksjon. En stopp i primærknuseriet har store ringvirkninger for resten av verket ettersom de andre knusetrinnene er avhengig av råvarer fra første knusetrinn.

Buffersiloen er derfor et tiltak for å begrense skadene ved en eventuell produksjonsstopp.

Et transportbånd tar materialet videre til sekundærknuseren, en CH660 konknuser fra Sandvik. Før knuseren er det plassert en fingermater med åpning 60 mm, fingermateren kan ta ut understørrelser til salg som subbusprodukt. Resten av overstørrelsene fra subbussiktet tas inn igjen i prosessen sammen med produktene fra andre knusetrinn. Denne produktstrømmen

går til et grovsikt med varierende innstillinger etter behov. Finstoffene kan lage et 0/16- eller 0/32-produkt, 22/63-fraksjonen går på silo eller til lager, det kan produseres en 80/140-rockwoolfraksjon, en 22/120-fraksjon eller så kan materialstrømmens overkorn (>63 mm) sendes i lukket krets tilbake til sekundærknuseren.

Materialet som sendes på silo går videre i tredje knusestrinn, en Metso HP4 konknuser. Tertiærproduktet føres ut på et transportbånd med installert vekt som tar materialet videre til et sikt. Siktet sender +22 mm-fraksjonen til silo som ferdig produkt eller for en runde til i tredje knusestrinn, 16/22 og 11/16 går på silo, mens -11 mm går til et nytt sikt som skiller ut 0/4, 4/8 og 8/11, alle fraksjoner på silo. Fra silo kan ferdigprodukter lastes direkte på lastebilplanet hvor lastingen skjer automatisk og styres av fører.

Etter hvert knusestrinn leveres det en produksjonsrapport som blant annet inneholder dimensjoner på inntaks- og produktåpning, kapasitet og tonnasje. For hvert produkt som tas ut av prosessen, gjennomføres det laboratorietester. Dette resulterer i en egen laboratorierapport. Resultatene fra denne kan blant annet brukes som samsvarserklæring, ytelseserklæring eller teknisk spesifikasjon for produktet.

2.3.4 Varelogistikk

Pukk er, som tidligere nevnt, et lavprisprodukt og er avhengig av nærhet til kundegrunnlaget. En tommelfingerregel er at dersom transportavstanden overgår 40 km, vil transportkostnadene bli større enn produksjonsinntekten. Ferdigvarer lagres i anlegget enten i hauger, noen under tak og noen i fri luft, samt lagring i syv siloer som er plassert sist i det stasjonære verket. Varelogistikken genererer mye trafikk på anlegget, hovedsakelig fra storkunder som kommer for å hente produkter. Anlegget er også åpent for private kunder som kjøper mindre kvanta. Det foregår også annen kjøring i bruddet, såkalt internkjøring. Dette er masser som av ulike grunner må flyttes innad i anleggsområdet. Etersom Veidekke har et eget asfaltverk på området spares det mye penger på transportkostnader mellom brudd og asfaltverk. Professor Børge Wigum har presentert fremtidige pukkverk som en samling av pukkverk, asfaltverk og blandeverk (Garathun, 2014). I Vassfjell drives det med andre ord etter anbefalingene.

Grønn Vekst har jordproduksjon på anleggsområdet og bruker finstoffer fra pukkverket i sin produksjon. Det er knapphet på natursand i verden i dag, Grønn Vekst har derfor begynt å

bruke maskinsand som erstatning for natursand (Grønn vekst, u.å.). Finstoffer er ofte et problemprodukt for pukkverk, men med et kundegrunnlag også for denne fraksjonen får Franzefoss brukt tilnærmet hele forekomsten i Vassfjell.

2.3.5 IDEF

ICAM står for Integrated Computer Aided Manufacturing og er en metode utviklet og finansiert av det amerikanske flyvåpenet på 1970-tallet. Formålet med programmet var å øke produksjonseffektiviteten ved å se på forretningsprosesser ved hjelp av nyere datateknologi. En IDEF-modell består av en hovedprosess eller hovedaktivitet som dekomponeres til mindre og mer detaljerte delprosesser. Hovedprosessen skal møte et behov, mens output av prosessen skal dekke et behov. IDEF kan både brukes til å kartlegge eksisterende systemer i en bedrift, men brukes også for å lage og integrere nye prosesser og systemer (National Institute of Standards and Technology, 1993).

2.3.5.1 IDEF0

IDEF0-modellen, som vist i Figur 4, bygges opp rundt en prosess hvor man fra venstre får inn en input, som ved hjelp av styrende og støttende elementer resulterer i en output mot høyre. En enkel prosess kan ta inn flere input og produsere flere output. Eventuelle sekundæroutput representerer uønskete produkter.

Nederst i høyre hjørne i prosessboksen i figuren, finnes det en «X». I en ferdig IDEF0-modell vil denne være erstattet med et tall som beskriver hvor i en sekvens prosessen foregår.

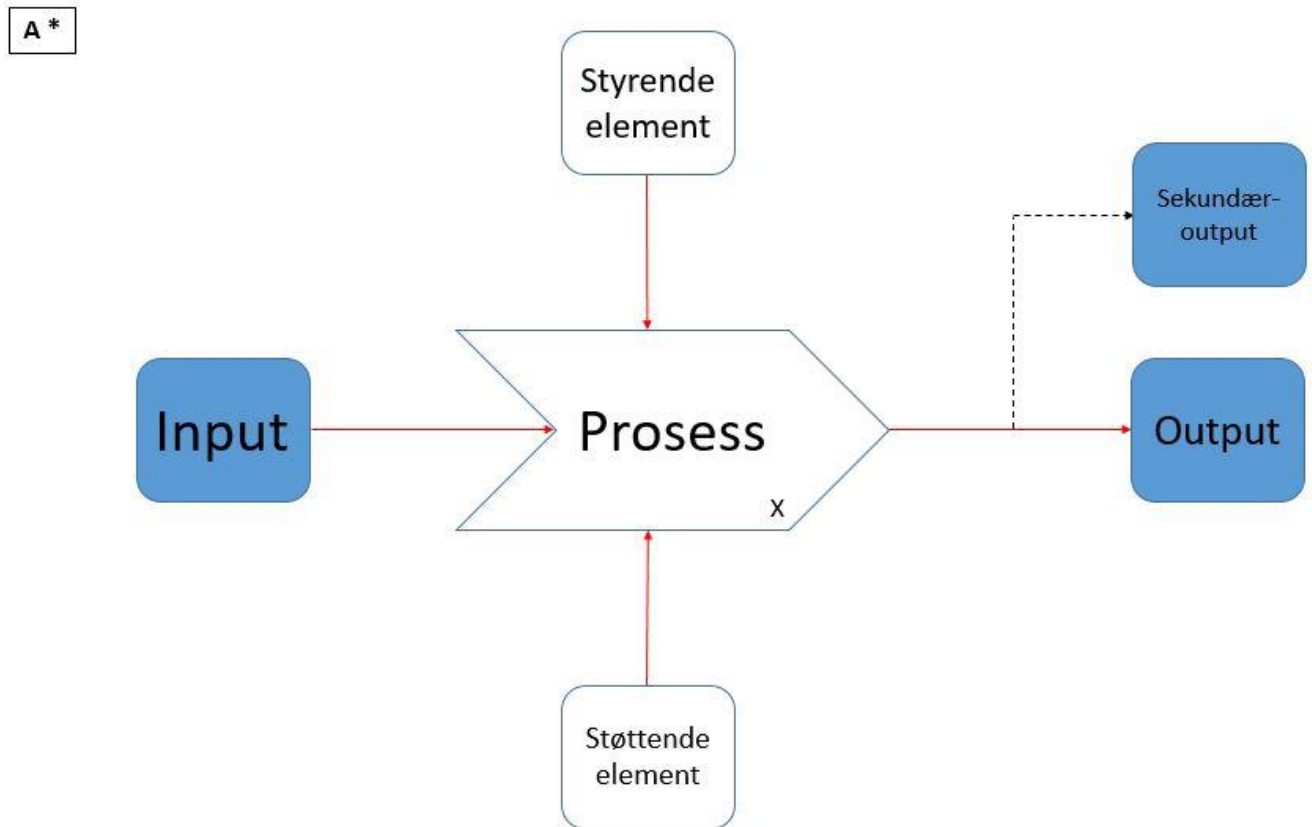
Som nevnt over er IDEF-modellen bygget opp av en struktur hvor en hovedprosess brytes ned i mindre delprosesser. Det finnes ingen begrensning på antall dekomponeringsnivå, dette avhenger av ønsket detaljeringsgrad i forhold til prosjektets formål.

A0-modellen er det øverste nivået i strukturen, og tar for seg det overordnede behovet, formålet med modelleringen. Dette nivået kalles et toppnivå kontekstdiagram.

Under A0-nivået kan man legge til flere kontekstdiagram (A1, A2 osv.) eller bryte ned til underdiagrammer (A11, A12 osv.).

Alle elementer som inkluderes i en hovedprosess må finnes igjen i større detaljeringsgrad lenger ned i delprosessene (Business Consulting Group, u.å.).

Øverst i venstre hjørne på Figur 4 **Feil! Fant ikke referanse kilden.** er det en boks markert med «A*», dette definerer hvilket strukturnivå som presenteres, eksempelvis A0 for øverste kontekstnivå eller A11 for første prosess i kontekstdiagram A1.

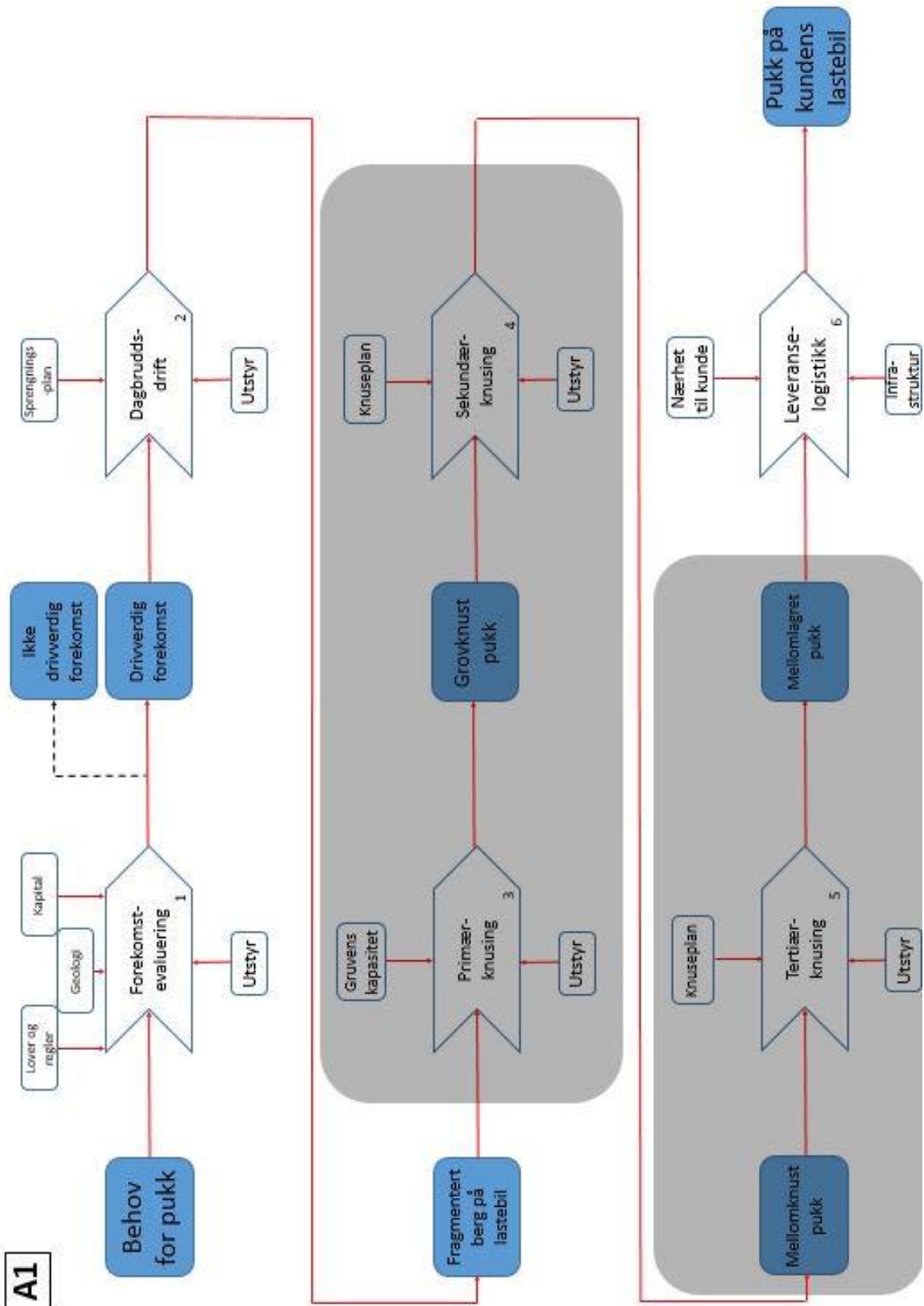


Figur 4: Grunnmodell IDEF, modifisert etter (Nesheim, 2017)

- En input skal konsumeres eller endres av en prosess.
- Output er et produkt av prosessen.
- Kontrollerende element er bestemmende for når og hvordan en prosess kan utføres, eksempler er lover eller planer.
- Støttende element brukes i prosessen, men den forbrukes ikke, det kan for eksempel være utstyr eller systemer.

2.3.5.2 IDEF0-modell over Vassfjell

Figur 5 viser A1-modellen i Vassfjell. De skraverte boksene definerer fokusområde for oppgavens problemstillinger.



Figur 5: A1-modell, fokusområder er skravert, modifisert etter (Nesheim, 2017)

3 Teori

Dette kapittelet tar for seg teoridelen av oppgaven. Det som defineres her brukes sammen med metodedelen for å produsere og beskrive et resultat.

3.1 Flytskjema

Et flytskjema er, som navnet tilsier, en oversikt over flyten i en hvilken som helst prosess. Det er den visuelle framstillingen av et handlingsforløp og brukes ofte innen mineralproduksjon for å presentere prosessanlegget i et verk (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Flytskjemaet er en forenklet presentasjon av det som i utgangspunktet kan være en komplisert prosess, og kan fungere som basis for videre simuleringsanalyser (Øien, Bardal og Johannessen, 1993). Det finnes mange ulike visualiserings- og simuleringsverktøy på markedet, Bruno, Aggflow og PlantDesign er eksempler på slike programmer. SGS Mineral Services (2005) viser til at utviklingen av et flytskjema kan være et hjelpemiddel til å bestemme de optimale driftsparametere i en eksisterende eller planlagt prosess. Utviklingen av et flytskjema er, ifølge SGS, den beste måten å kunne utvikle en praktisk og kostnadseffektiv materialflyt, generere høyere verdier i prosessen gjennom energioptimalisering, forbedre utvinning, øke kostnadsbesparelser, samt at utforming av et flytskjema kan minimere risikoen forbundet med pilottesting eller prosessendringer. Viktige forhold å ta hensyn til i et flytskjema er ønsket produksjonsvolum, produktkrav, inngående materiale og utformingen av materialstrømmen (Øien, Bardal og Johannessen, 1993).

Det finnes ingen standard for hvordan et flytskjema skal utformes, men det brukes enkle og gjenkjennelige symboler for de ulike maskinene. Kapasiteter og maskinspesifikasjoner kan angis.

3.1.1 AggFlow

BedRock Software er produsent av AggFlow og ga ut programmet for første gang i 1993 (BedRock Software Inc., 2018a). AggFlow brukes til simulering av prosesser innen tilslag- og mineraluttak med fokus på knusing, maling, sikting og eventuell vasking av materialer. Programmet opererer som et planleggings- og optimaliseringsverktøy for eksisterende og planlagte verk. AggFlow fungerer slik at man velger utstyr og utstyrsinnstillinger, legger inn ønsket eller eksisterende tonnasje gjennom verket, samt geologiske testresultater (hardhet,

kornfordelingskurver mm.) for uttaksmaterialet. Informasjonen som hentes ut av programmet kan benyttes til sammenligning av et kalkulert, teoretisk resultat og det faktiske resultatet. Programmet brukes av tilslag- og mineralprodusenter for å identifisere flaskehals og for å optimalisere driften, mens anleggsplanleggere bruker det i planleggingsfasen hvor utforming av prosess og utstyr skal velges (BedRock Software Inc., 2018b).

3.2 NTNU kostnadsmodell

Aune, *et al.* (1992) definerer kostnader som «verdien målt i penger av de produksjonsmidler som forbrukes ved framstillingen av et produkt». I Prosjektrapport 18-92 *Knusing av stein til anleggsformål* er det definert en kostnadsstruktur for beregning av prisen det koster å produsere et tonn av vegfundamentmateriale i et stasjonært anlegg. Modellen tar inn elementer som til sammen utgjør definisjonen av knusekostnader (Øien, Bardal og Johannessen, 1993);

- Avskrivning
- Renter
- Reparasjon og service
- Driftsstopp
- Slitasje
- Andre driftskostnader

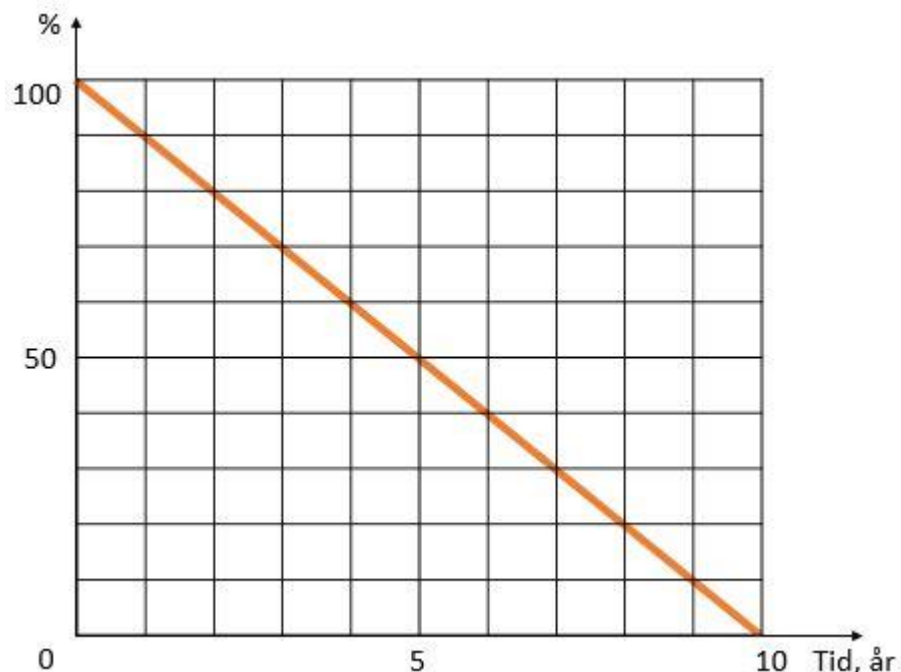
Disse elementene og deres parametere blir gjennomgått og forklart i dette kapittelet. Det skilles mellom direkte og indirekte kostnader hvor direkte kostnader kan knyttes direkte opp mot hver enkelt av de ulike kostnadsbærerne i en prosess, mens de indirekte kan knyttes opp mot ingen eller flere kostnadsbærere samtidig (Stoltz, 2014). Alle de ovennevnte elementene går under direkte kostnader sammen med andre driftskostnader som for eksempel lønn og forsikringer. Eksempler på indirekte kostnader kan være kostnader til administrasjon og ledelse, planlegging, fortjeneste, driftsforstyrrelser eller fellesressurser (verksted, lager o.l.) (Aune, *et al.*, 1992).

I et standard driftet anlegg beregnes det tap av 8 min arbeid per klokke time i tillegg til en time totalt tap ved oppstart, avslutning og andre driftsforstyrrelser. Et arbeidsskift i anlegg på 7.5 timer tilsvarer da 5.5 effektive timer (Øien, Bardal og Johannessen, 1993). Det beregnes

derfor arbeid 5.5 eh/skift, 5 dager/uke og 44 uker/år.

3.2.1 Avskrivning

Avskrivning er den planlagte nedskrivningen av en maskins verdi (Aune, *et al.*, 1992). Det finnes ulike avskrivningsmetoder; bruksavhengig og tidsavhengig avskrivning. Den bruksavhengige avskrivningen skjer etter hvor mye en maskin har gått, eksempelvis etter produsert tonnasje eller effektive timer. Den tidsavhengige avskrivningen skjer etter en forhåndsbestemt tid. Disse to metodene kan også kombineres til en modifisert bruksavhengig avskrivning i tilfeller hvor økonomisk brukstid er langt fram i tid. Da vil ikke-avskrevet kapital reduseres fortere enn det den bruksavhengige avskrivningen vil tilsi (Øien, Bardal og Johannessen, 1993). Figur 6 viser prinsippet med tidsavhengig lineær avskrivning for en maskin med avskrivningstid på 10 år. I år 0 vil maskinen ha 100% uavskrevet, mens etter 10 år vil hele maskinens verdi være avskrevet.



Figur 6: Lineær avskrivning, prinsipp

Avskrivningsgrunnlaget er summen av investeringer og investeringsavgift (Øien, Bardal og Johannessen, 1993). Investeringsavgiften var en lovpålagt avgift som skulle betales på varer som ble benyttet som driftsmidler i produksjonen, samt arbeid utført på disse driftsmidlene (Aune, *et al.*, 1992). Avgiften ble innført i 1969 og var først på 13% før den i 1989 ble satt

ned til 7%. Investeringsavgiften ble helt avskaffet i 2002 (Investeringsavgift, 2017).

Formel 1 viser hvordan beregning av avskrivning gjøres i kostnadsmodellen.

Formel 1: Avskrivning

$$\text{Avskrivning} = \frac{\text{Avskrivningsgrunnlag}}{\text{Kapasitet} \times \text{Avskrivningstid (brukstid)}}$$

Hvor kapasitet er tonnasje gjennom verket per time, mens avskrivningstid (brukstid) er definert av Øien, Bardal og Johannessen (1993) som:

Formel 2: Avskrivningstid (brukstid)

$$t_a = \text{antall skift} \times \frac{eh}{\text{skift}} \times \frac{\text{driftsdager}}{\text{uke}} \times \frac{\text{driftsuker}}{\text{år}} \times \text{avskrivningstid(år)}$$

For en avskrivningstid på 10 år i et stasjonært verk med to skift vil avskrivningstiden basert på brukstid bli:

$$t_a = 2 \times 5.5 \times 5 \times 44 \times 10 = 24\,200 \text{ eh}$$

For mobile verk antas det drift ett skift per dag, en halvering av brukstiden til et stasjonært verk:

$$t_a = 1 \times 5.5 \times 5 \times 44 \times 10 = 12\,100 \text{ eh}$$

I Øien, Bardal og Johannessen (1993) rundes disse avskrivningstidene ned til hhv. 24 000 eh for stasjonært verk og 12 000 eh for mobile verk.

3.2.2 Renter

Dersom egen- eller fremmedkapital er bundet til varige produksjonsmidler, oppstår det rentekostnader. Egenkapital er egne penger, mens fremmedkapital er lånte penger (Aune, *et al.*, 1992). Rentekostnadene er den restverdien en maskin sitter igjen med i den gitte perioden beregningene gjøres for. Restverdien baserer seg på avskrivningsgrunnlaget som vil være investering minus tidligere avskrivning.

3.2.2.1 Realrente

Realrente er differansen mellom nominell rente og inflasjonsraten. Realrenten definerer den reelle lånekostnaden, den reelle avkastningen (Finansleksikon, 2018). Som regel brukes konsumprisindeksen som justeringsfaktor for inflasjon.

Formel 3 viser hvordan beregning av renter gjøres i kostnadsmodellen.

Formel 3: Renter

$$\text{Renter} = \frac{1}{3} \times \frac{\text{Avskrivningsgrunnlag}}{\text{Kapasitet} \times \text{Avskrivningstid (brukstid)}} \times \text{Realrente} \times \text{Avskrivningstid (år)}$$

Formelen multipliseres med 1/3 fordi renter regnes degressivt. Det vil si at rentesatsen antas størst i begynnelsen av verkets levetid og at den synker med tiden. I en rentetrekant vil 1/3 være trekantens tyngdepunkt og det er dette tyngdepunktet som benyttes i Formel 3.

3.2.3 Reparasjon og service

Reparasjonskostnader innbefatter reservedeler, nødvendige materialer for reparasjoner og lønnskostnader. Servicekostnader er kostnader som går til det daglige vedlikeholdet av maskinene (Øien, Bardal og Johannessen, 1993). For anleggsmaskiner vil reparasjonskostnadene øke jo eldre maskinen blir, den må repareres oftere. For en knuser vil det være annerledes ettersom reparasjon og skifte av deler vil gjøre knuseren så god som ny, alder vil derfor ikke ha stor innvirkning på reparasjonskostnadene. I beregninger blir gjennomsnittlige reparasjonskostnader på knuseutstyr gitt uavhengig av utstyrets alder. De reparasjonskostnader som øker med brukstiden kalles for variable reparasjonskostnader, mens faste reparasjonskostnader er uavhengig av maskinens alder (Aune, *et al.*, 1992).

Reparasjonskostnader presenteres som kr/tonn.

3.2.4 Driftsstopp

Dersom en maskin får driftsstopp vil det oppstå direkte og indirekte driftsstoppkostnader. De direkte kostnadene vil være reparasjonskostnader for den aktuelle maskinen, de indirekte kostnadene vil typisk være stillgang på tilhørende maskiner i driftskjeden som berøres, lagring av reservedeler eller i verste fall den største kostnaden, tap av produksjon (Aune, *et al.*, 1992). Erfaringstall viser at driftsstoppkostnader har en sammenheng med reparasjonskostnadene,

denne sammenhengen er gitt i Formel 4:

Formel 4: Driftsstoppkostnader

$$V_D(x) = k \times V_R(x) = k \times (V_F + V_v)$$

Hvor $V_D(x)$ er driftsstoppkostnader, V_F er faste reparasjonskostnader, V_v er variable reparasjonskostnader, x er antall timer og k er driftsstoppfaktoren. Fordi det er vanskelig å skille reparasjonskostnader og servicekostnader fra hverandre, antas det at reparasjonskostnader står for 50% av kostnadsbolken «reparasjon og service» (Aune, *et al.*, 1992).

3.2.4.1 Driftsstoppfaktor

Driftsstoppfaktoren sier noe om hvor viktig maskinen med driftsstopp er for driftskjeden og varierer mellom 0 – 1. Dersom maskinen er avgjørende for om produksjonen kan fortsette, vil k være stor. Er maskinen et uavhengig ledd fra resten av produksjonskjeden vil k være liten og ligge rundt 0 – 0.2. En driftsstoppfaktor på 0.3 – 0.4 er ifølge Aune, *et al.* (1992) en riktig faktor å sette for en maskin av «viss betydning» for produksjonen.

En knuser med driftsstopp har potensielt stor innvirkning på resten av produksjonen og skulle i utgangspunktet hatt en høy driftsstoppfaktor, men fordi knuseverk er store investeringer vil det ikke være lønnsomt å lagre reservemaskiner i tilfelle en driftsstopp skulle oppstå.

Ettersom antall effektive timer er satt til 5.5 i et 7.5 timers skift vil dette spare opp en reserve for eventuell stans i produksjon da maskinene normalt går mer enn 5.5 time i løpet av et skift. Basert på dette settes driftsstoppfaktoren lavere. Øien, Bardal og Johannessen (1993) har i sin kostnadsmodell satt driftsstoppfaktoren for stasjonært verk til 0.10 og faktoren for mobilt verk er satt til 0.15. Formel 1 Formel 5 viser hvordan kostnadene ved driftsstopp beregnes ved å bruke 50% av reparasjons- og servicekostnadene og driftsstoppfaktoren.

Formel 5: Driftsstopp

$$\text{Driftsstopp} = \frac{\text{Rep.kost. primær} + \text{rep.kost. sekundær} + \text{rep.kost. tertiær}}{2} \times \text{Driftsstoppfaktor}$$

3.2.5 Slitedeler

Slitedeler er de delene som slites mest i en maskin og som krever hyppigere utskiftning

sammenlignet med større hoveddeler. Slitedelene er ofte i direkte kontakt med materialet som går gjennom verket og omfatter blant annet knuseplater, mantel og sikteduker.

Byttefrekvensen på slidedeler er avhengig av egenskapene til berget som knuses, samt kvalitet og utforming av maskinen og dens slidedeler. Kvartsrike bergarter sliter betraktelig mer på utstyr enn berg med lavt innhold av kvarts og ulike konfigurasjoner på blant annet knuseåpning og utløpsspalt vil påvirke den totale slitasjen av maskinen (Øien, Bardal og Johannessen, 1993).

Slitedelskostnader presenteres som kr/tonn.

3.2.6 Elektrisk kraft

Knusere er massive maskiner som krever mye energi. Ofte går over halvparten av det samlede strømforbruket i et verk til disse (Øien, Bardal og Johannessen, 1993). Ifølge Sandvik, Digre og Malvik (1999) går mellom 2 – 5% av hele verdens energiforbruk til fragmenteringsprosesser (knusing og maling). Det meste av energien som tilføres en fragmenteringsprosess absorberes av maskinen og vil derfor aldri overføres til materialet. 98 – 99% av den tilførte energien går tapt som varme. Energikostnadene avhenger av materialets hardhet, nedknusningsgrad av berget og den installerte effekten i maskinene. Formel 6 viser de ulike elementene som inngår i beregningene av kostnadene for elektrisk kraft.

Formel 6: Elektrisk kraft

$$\text{El. kraft} = \frac{(\text{Installert effekt knusere} + \text{installert effekt annet utstyr}) \times \text{Antatt belastning}}{\text{Kapasitet}} \times \text{Strømpris}$$

Antatt belastning er den anslåtte belastningen i prosentandel av den fulle belastningen utstyret kan utsettes for. Øien, Bardal og Johannessen (1993) har samlet normal antatt belastning for ulike knusestrinn, disse vises i Tabell 1.

Tabell 1: Antatt belastning for knusere, (Sandvik, Digre og Malvik, 1999)

Knusertype	Belastning i % av full belastning
Grovknusere	50 – 70 %
Mellomknusere	60 – 90 %
Finknusere	70 – 95 %

Belastning for sikt, mater og transportbånd er ofte lavere ettersom de som regel er overdimensjonert kapasitetsmessig i verket, utnyttelsen ligger rundt 60 – 70% ifølge Øien, Bardal og Johannessen (1993).

Installert effekt for knuseverksutstyret er definert av leverandør og er gitt i kW, mens strømpris er gitt i kr/kWh.

Strømprisen består av flere ulike elementer og vil variere gjennom året og er avhengig av hvor

i landet bedriften er plassert (Smarte Penger, 2018). Tabell 2 er et eksempel på de prisledd som inkluderes i den totale kraftprisen. Eksempelet tar utgangspunkt i en husholdning med et gjennomsnittlig årlig forbruk på 20 000 kWh.

Tabell 2: De ulike elementene i strømprisen, modifisert etter (Smarte Penger, 2018)

Prisledd	Øre per kWh
Kraftpris	25.00
+ nettariff (fastledd)	10.00
+ nettariff (energiledd)	20.00
= pris eks. avgifter	55.00
+ forbruksavgift	16.58
= pris eks. mva	71.58
+ 25% mva	17.90
= pris per kilowatttime	89.48

Fordi forbruket vil være betraktelig større for et industrianlegg, vil prisnivået være høyere for et anlegg enn for husholdningsforbruket som er presentert i Tabell 2.

3.2.7 Annet knuseverksutstyr

Sammenlignet med knusernes kostnader i forbindelse med reparasjon, service og slitedeler, har matere, transportører og sikt langt lavere utgifter. Matere er hardføre maskiner og har lave kostnader. Erfaringsdata fra 1992 viser at for beltematere ligger kostnadene på 0.05 – 0.10 kr/t, mens for andre mer slitesterke matere vil kostnaden være rundt 0.05 kr/t. På et transportbånd vil de største kostnadene ligge i reparasjon av båndskader, kostnadene ligger i sjiktet 0.05 – 0.10 kr/t ifølge erfaringsdataene. Jo lengre et transportbånd er (40 – 60 m), jo lavere kostnader. For et sikt er utgiftene avhengig av siktetype, antall sikteduker, siktedukmateriale og egenskapene til berget som skal siktes. Erfaringsdataene fra 1992 viser at gjennomsnittlige kostnader til reparasjon, service og slitedeler ligger på rundt 0.20 – 0.25 kr/t for et sikt. I stasjonære verk finner en ofte siloer til bruk ved mellomlagring av materialer. Siloluker, silobunn og silovegg er mest utsatt for slitasje, kostnadene er uansett lave og ligger rundt 0.05 kr/t (Øien, Bardal og Johannessen, 1993).

3.2.8 Andre kostnader

Det finnes andre kostnader som ikke går under en større kategori, men som likevel er særdeles viktig å ta hensyn til. Lønn, forekomstevaluering og dagbruddsdrift (ref. Figur 5: A1-modell, fokusområder er skravert, modifisert etter (Nesheim, 2017)Figur 5), tilrigging og opprydding er alle poster som fører til kostnader eller krav til kapital.

Størrelsen på verket vil avgjøre hvor mange ansatte som trengs for å drifte anlegget. Det vil være forskjell på nødvendig antall ansatte for et stasjonært verk sammenlignet med et mobilt verk. Formel 7 viser hvilke elementer som er inkludert for beregning av lønn i kostnadsmodellen:

Formel 7: Lønn

$$Lønn = Antall\ ansatte \times \frac{Antall\ timer\ per\ skift}{Antall\ eff.\ timer\ per\ skift} \times \frac{Timelønn \times 1.5}{Kapasitet}$$

Hvor antall effektive timer per skift, som tidligere nevnt, er 5.5 timer per 7.5 timers skift. Mens faktor 1.5 indikerer at det for hver ansatt må påberegnes rundt 50% sosiale utgifter i tillegg til timelønnen. Sosiale utgifter består blant annet av forsikringer, feriepenger og arbeidsgiveravgift (Sander, 2017).

Innkommende materialer har gjennomgått dagbruddsdrift, boring, sprengning, lasting og transport, som genererer kostnader. I tillegg kommer grunnleie, royalties (tonnøre) og eventuelle avgifter som ekstrakostnader under denne posten.

Tilrettelegging og montering av verket varierer og beregnes for hvert enkelt anlegg. Montering og installasjon av elektrisk kraft gis som et prosentpåslag på investeringene. Erfaringstall sier at det for montering kan brukes 20% påslag på investeringskostnadene, mens det for elektriske installasjoner kan brukes 10 – 20%. Begge estimatene gjelder for stasjonære verk, for et mobilt anlegg vil kostnadene kunne bli høyere (Øien, Bardal og Johannessen, 1993).

Mineralloven (2009) pålegger produsenter innen mineralindustrien å stille med nok

egenkapital til å kunne sikre opprydding og tilbakesetting av uttaksområdet etter endt drift. Denne kapitalen må være tilstede for å få lov til å starte opp mineraluttak på et område og skal være tilgjengelig under driften for å sikre opprydding ved plutselig eller uventet driftsslutt.

3.3 Knusing

Det er tre hovedgrunner til at knusing er et steg i mineralproduksjon;

- Knusing gjør generelt berget mer håndterbart både for transport og for videre prosessering.
- Ved uttak av verdifulle mineraler og metaller, vil knusing frigjøre disse fra resten av avgangen.
- Innen tilslagsproduksjon vil et eller flere knusetrinn produsere tilslag i ønsket størrelse og form.

Knusing kan gjøres i flere knusetrinn avhengig av formålet med produktet. Innen gruvedrift er det vanlig med to eller tre knusetrinn, men i enkelte tilfeller kan det også være nødvendig med et fjerde knusetrinn. Tabell 3 viser typiske matestørrelser inn i et knusetrinn, samt hvilke produktstørrelser som produseres i det enkelte knusetrinn.

Tabell 3: Oversikt over kornstørrelser i de ulike knusetrinnene, modifisert etter (Sandvik, Digre og Malvik, 1999)

Pågang, d_{80}	Produkt, d_{80}	Betegnelse
1000 – 300 mm	300 – 50 mm	Grovknusing, Primærknusing
300 – 50 mm	100 – 20 mm	Mellomknusing, Sekundærknusing
100 – 20 mm	20 – 5 mm	Finknusing, Tertiærknusing

Som man kan se av Tabell 3, har primærknuseren den største mate- og produktstørrelsen og har derfor de største kapasitetene av de ulike knuserne. I mange anlegg korresponderer primær knuseplan med bruddets uttaksplan (Wills og Finch, 2016).

Det finnes mange ulike knusere på markedet i dag, dette kapitlet tar kun for seg de

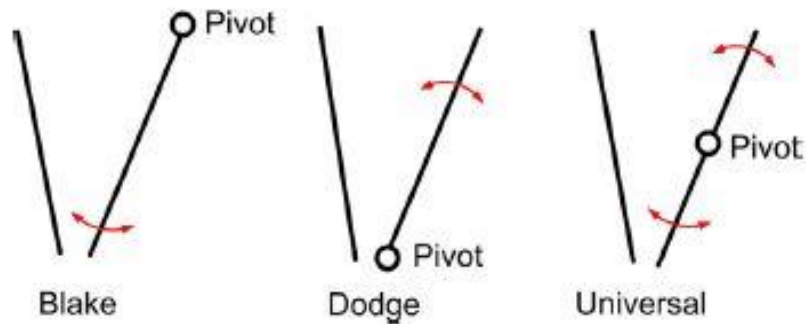
maskinene som benyttes i Vassfjell i dag. Alle knuserne i anlegget er såkalte trykk-knuser som brukes for harde, medium harde og abrasive materialer (finkornete og harde mineraler, sedimentære og metamorfe bergarter) (Rothery og Mellor, 2007). Materialet gjennomgår kompresjon mellom to knusedeler enten kontinuerlig eller som en engangskompresjon. Skvisingen av materialet kan skape en indre spenning i berget, hvilket kan redusere kvalitet og stabilitet av produktet. Dersom materialet blir utsatt for slag istedenfor trykk vil berget knuses langs naturlige korngrenser og problemet med indre spenninger elimineres.

Reduksjonsforholdet for trykk-knuser ligger normalt på 4 – 5, hvor reduksjonsforholdet er forholdet mellom matestørrelse inn i knuser og produktstørrelse av materialet ut av knuser. Reduksjonsforholdet er med på å bestemme antall knusestrinn i en prosess.

Dersom innmatingsvolumet i en knuser er større enn produktvolumet ut av knuseren, kalles det for overmating (choked feeding). Ved overmating vil berget gjennomgå knusing mellom knusedelene, men også knusing mellom partiklene vil forekomme. Arrestert knusing er det motsatte, hvor volum ut er større enn volum inn (Wills og Finch, 2016). Knusekvalitet og – effektivitet er avhengig av materialstrøm gjennom knuseren og vil variere etter hvilken maskin man benytter.

3.3.1 Kjeftknuser

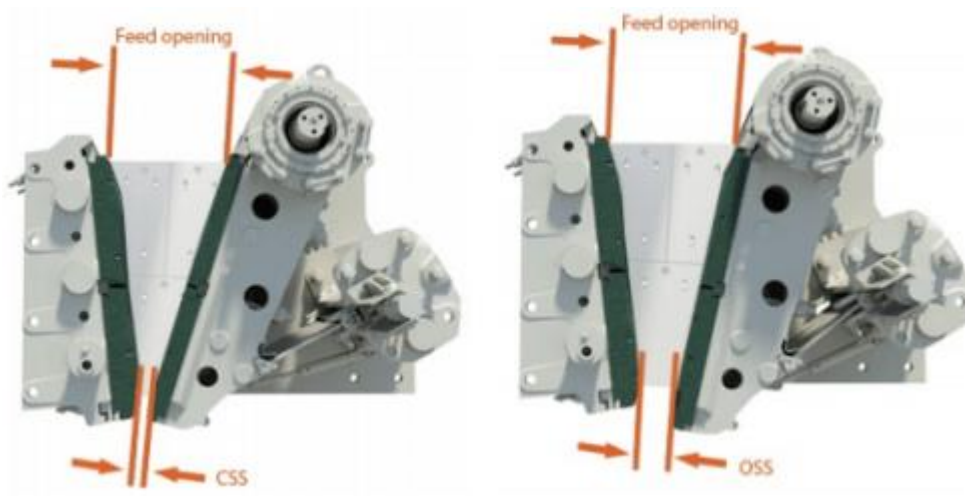
Blakeknuseren ble patentert i 1858 og utgjør basisen for de fleste kjeftknuserne i dag. Patenten beskriver knuseren ved at den “consists of a pair of jaws, one fixed and the other movable, between which the stones are to be broken” (Blake, 1858). Knuseren har altså en fast del og en bevegelig del som berget blir knust mellom. Wills og Finch (2016) beskriver hvordan opplagringen av den bevegelige delen klassifiserer knuseren. Figur 7 viser de ulike måtene kjeven kan festes på.



Figur 7: Ulik opplagring av den bevegelige kjeven i en kjeftetygger (Wills og Finch, 2016)

Man ser av figuren at Blakeknuseren er fast i toppen av den bevegelige kjeven hvilket betyr at det er utløpsåpningen som varierer når kjeven beveges. Forskjellen mellom åpen utløpsspalt OSS (maksimal distanse mellom kjevne) og lukket utløpsspalt CSS (minimum distanse mellom kjevne) er kalt slaglengde. Slaglengden er normalt satt til 1 – 7 cm for en kjefteknuser (Metso, 2015). Figur 8 viser henholdsvis lukket utløpsspalte og åpen utløpsspalte på en kjefteknuser.

Gapet er inntaksåpningen til knuseren, «feed opening» i Figur 8. For en Blakeknuser vil denne være konstant. Gapet utgjør, sammen med knuseplatens bredde, knuserens dimensjoner. En kjeftetygger med dimensjonene 1200 mm x 1600 mm har et gap på 1200 mm og knuseplater med bredde 1600 mm. De største knuserne har kapasiteter opp mot 1200 tonn/time (Gupta og Yan, 2006).



Figur 8: Lukket og åpen utløpsspalte på en kjefteknuser (Metso, 2011)

Blakeknuseren kan deles opp i flere undertyper av knusere basert på hvilket bevegelsesmønster den bevegelige kjeven har mot den faste kjeven. Det mest vanlige er en elliptisk bevegelse og disse knuserne kalles for rotasjonsknusere. Figur 9 viser skissen for en typisk rotasjonsknuser hvor den stiplede linjen viser kjevens nedre posisjon før den presses opp i øvre posisjon av en eksentrisk aksel, berget trykkes gjennom knuseren. Den største bevegelsen i en rotasjonsknuser vil være i toppen av kjeven, nær gapet (Barratt, Mular og Halbe, 2002). En kjefteknuser har en bevegeshastighet som vil ligge i området 100 – 350 rpm (Wills og Finch, 2016).



Figur 9: Kjefteknuser, rotasjonsknuser (Viilo, 2011)

Kjefteknuseren opererer vanligvis i åpen krets med eller uten et sikt i forkant og prosessen er normalt tørr. Knuserne er satt til å være i drift rundt 75% av den tilgjengelige produksjonstiden (Wills og Finch, 2016). Primærknuseren dimensjoneres ofte etter største innkommende materialstørrelse og er derfor direkte avhengig av anleggstekniske valg gjort i dagbruddsdriften (Sandvik, Digre og Malvik, 1999).

3.3.1.1 K160

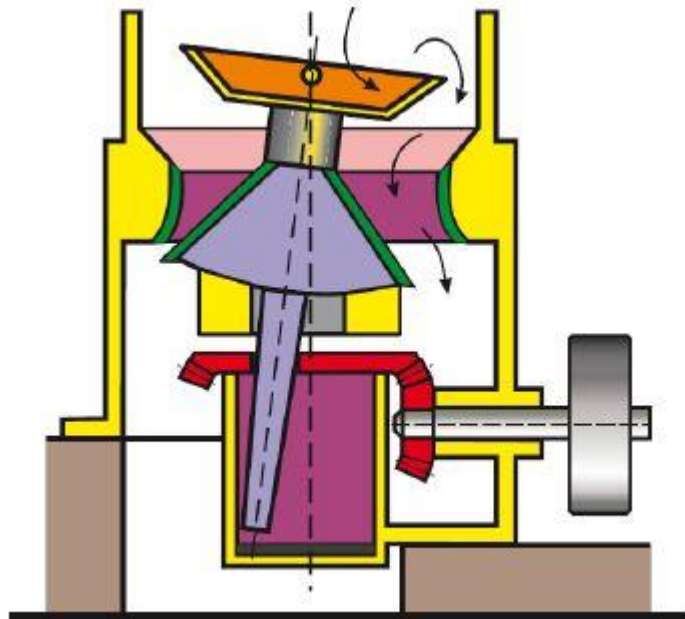
Primærknuseren i Vassfjell er en rotasjonsknuser, modell K160 fra Lokomo (Metso) med konveks nuseplate. Kjefteknuserer har som regel lang teknisk levetid gitt at den brukes og vedlikeholdes på en god måte. Typiske slitedeler som for eksempel knuseplater, kan på enkelt vis byttes ut, mens hovedkonstruksjonen består (Rothery og Mellor, 2007). Ved utskiftning av slitedeler, fremstår knuseren som ny (Øien, Bardal og Johannessen, 1993). Dette er tilfellet i Vassfjell hvor knuseren ble produsert på 1960-tallet og installert i anlegget på 1970-tallet. Modellen finnes ikke lenger på markedet i dag, men tilsvarende deler kan fortsatt oppdrives fra nyere modeller. Inntaksåpningen på knuseren er 1400 mm x 1600 mm og utløpsspalten er satt til 180 – 200 mm.

Hovedformålet med primærknusing er å grovknuse det sprengte berget slik at det kan transporteres på bånd til videre nedknusing (Viilo, 2011).

3.3.2 Konknuser

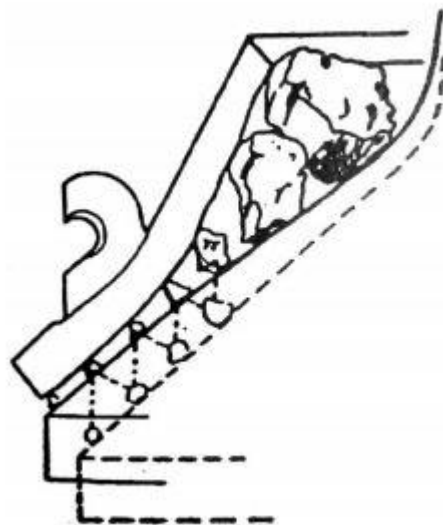
Konknuseren er den vanligste knuseren i sekundært- og tertiært knusetrinn grunnet sine høye kapasiteter og lave driftskostnader (Rothery og Mellor, 2007). Figur 10 viser oppsettet til en standard konknuser. Knusemaskinen har en oscillerende aksel som gir bevegelse til konmantelen slik at den går med elliptiske bevegelser inni det faste knusekammeret. Den største åpningen mellom mantel og kammer er den åpne utløpsspalten (OSS), mens den minste åpningen vil være lukket utløpsspalt (CSS). Prinsippet er det samme som i en kjefteknuser, se Figur 8. Det er CSS sammen med knuserens eksentrisitet som styrer kapasiteten på knuseren og det er her forskjellen på en sekundær og en tertiær knuser ligger. Den tertiære knuseren har mindre utløpsspalt for å kunne håndtere finere materialer (Viilo, 2011).

Knuserne gis navn etter kraftdraget til knuseren eller diameter på konmantelen, eksempelvis har en HP200-konknuser 200 hestekrefter. De største konknuserne har en kapasitet rundt 3000 – 4500 tonn/time, men vanlig kapasitet ligger på 200 – 700 tonn/time. Sekundær- og tertiærknuserne har en hastighet på 700 – 1000 rpm og har derfor mye større hastighet sammenlignet med de store primærknuserne. Den høye hastigheten utsetter materialet for mange hurtige kompresjoner gjennom hele knusekammeret heller enn gradvis kompresjon i en saktegående primærknuser (Wills og Finch, 2016).



Figur 10: Konkuser (Viilo, 2011)

Optimal kornform for det knuste produktet gjennom konkuseren vil som regel forekomme hos de kornene som ligger i størrelsesområdet rundt CSS. Figur 11 viser hvordan et korn beveger seg mellom knusekammer og mantel gjennom knuseren. Tyngdekraft og mantelens bevegelse gjør at hvert korn blir komprimert seks ganger i knuseren (Rothery og Mellor, 2007).



Figur 11: Knuseprinsipp for konkuser (Rothery og Mellor, 2007)

3.3.2.1 Sandvik CH660 EC

I Vassfjell er sekundærknuseren en konkuser CH660-modell fra Sandvik. Figur 12 viser de ulike knuserkapasitetene en CH660-knuser kan ha.

	Max motor-size kW	Max feed size mm	Nominal capacity in t/h with crusher running at CSS mm									
			13	16	19	22	25	32	38	44	51	
CH660	315	EC	275	–	177	190-338	203-436	216-464	246-547	272-605	298-662	328-511
		CX	245	–	174-194	187-374	200-488	212-519	242-592	268-654	293-521	323-359
		C	215	–	171-190	184-367	196-480	209-510	238-582	263-643	288-512	317-353
		MC	175	–	162-253	174-426	186-455	198-484	226-552	249-499	273-364	–
		M	135	–	197-295	211-440	226-470	240-500	274-502	302-403	–	–
		MF	115	192	207-369	222-396	237-423	252-450	287-451	318-363	–	–
		F	85	195-304	210-328	225-352	241-376	256-400	292-401	323	–	–
		EF	65	211-293	227-316	244-298	261-290	–	–	–	–	–

Figur 12: Kapasiteter CH660-konkuser, modifisert etter (Sandvik SRP AB, 2014)

CH660-knuseren i Vassfjell er en EC-modell som kan ta imot materialer med størrelser opp til 275 mm. Kapasiteten på knuseren vil variere med lukket spalteåpning og de oppgitte tallene i Figur 12 er veiledende. Knuseren i Vassfjell har tre forhåndsprogrammerte innstillinger for knuserkonfigurasjoner;

- CSS 65 – 70 for produksjon av 80/140 rockwool
- CSS 50 for produksjon av 22/63 i lukket krets
- CSS 65 for produksjon av 22/120 i åpen krets

Materialet som kommer inn i et sekundært knusetrinn er som regel lettere å håndtere enn det som går til primærtrinnet fordi fragmentene er mindre i størrelse, i tillegg til at ulike typer forurensninger som jord og lavkvalitetsmaterialer er fjernet. Formålet med knusetrinnet er å produsere ferdige grovprodukter eller å gjøre materialet håndterlig for enten tertiærknusing eller maling (Viilo, 2011).

3.3.2.2 HP 4 F

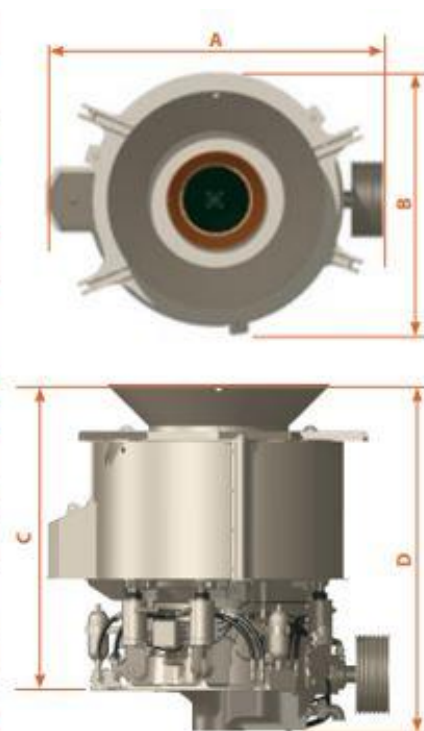
Tertiærknuseren i Vassfjell er en Metso HP4 finknuser. Knuseren er innstilt slik at den kjører basert på amperetforbruk. Generelle spesifikasjoner kan ses i Figur 13. Finknuseren har en materåpning på 116 mm og en minste utløpsspalt på 10 mm.

Dimensions				
Modèles	A mm (in)	B mm (in)	C mm (in)	D mm (in)
HP3	2 778 (109.37)	2 146 (84.49)	2 475 (97.44)	2 817 (110.90)
HP4	2 955 (116.34)	2 512 (98.90)	2 754 (108.42)	3 147 (123.90)
HP5	3 438 (135.35)	2 695 (106.10)	2 893 (113.90)	3 295 (129.72)
HP6	3 854 (151.73)	3 062 (120.55)	3 522 (138.66)	3 953 (155.63)

Technical information				
	Nominal feed opening mm (in)	Maximum power kW (hp)	Crusher weight kg (lb)	Complete crusher weight* kg (lb)
HP3	220 (8.66)	220 (300)	13 040 (28 750)	17 600 (38 800)
HP4	252 (9.92)	315 (400)	19 810 (43 670)	25 800 (56 880)
HP5	312 (12.28)	370 (500)	24 970 (55 050)	28 820 (63 540)
HP6	330 (13.00)	450 (600)	33 000 (72 750)	45 400 (100 090)

* Complete crusher weight: crusher + subframe, motor sub frame, covers, feed and discharge arrangement

Cavities								
Cavity	Minimum setting mm (in)				Feed opening mm (in)			
	HP3	HP4	HP5	HP6	HP3	HP4	HP5	HP6
Extra-coarse	25 (1.00)	28 (1.10)	30 (1.20)	30 (1.20)	200 (7.89)	237 (9.33)	312 (12.30)	328 (12.91)
Coarse	20 (0.79)	25 (1.00)	25 (1.00)	25 (1.00)	183 (7.20)	203 (7.99)	252 (9.90)	279 (10.98)
Medium	15 (0.59)	16 (0.63)	20 (0.79)	20 (0.79)	156 (6.14)	158 (6.22)	195 (7.70)	196 (7.71)
Fine	11 (0.43)	10 (0.39)	10 (0.39)	13 (0.52)	95 (3.74)	116 (4.55)	130 (5.10)	106 (4.17)
Extra-fine	8 (0.31)	8 (0.31)	6 (0.24)	9 (0.35)	18 (0.71)	67 (2.64)	50 (2.00)	52 (2.05)



Figur 13: Spesifikasjoner HP4 F, modifisert etter (Metso, 2014)

Tertiærknusing utføres for å produsere riktig varestørrelse eller for å gjøre materialet håndterlig for videre knusing eller maling.

3.3.3 Mobilknuser

En mobilknuser er en transportabel knuserenhet og benyttes av flere årsaker:

- Dersom det stasjonære verket av ulike grunner har produksjonsstans.
- I tilfeller hvor man trenger høyere produksjon enn hva det stasjonære verket har kapasitet til.
- Hvis det blir store avstander mellom sprengrøys og knuser i et brudd.

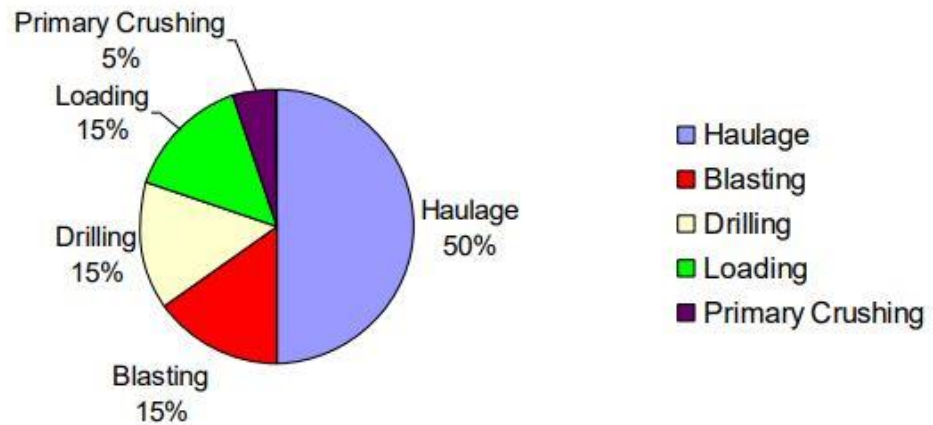
Den mobile enheten kan bestå av én enkelt knuser, men kan også være et mer avansert mobilt knuseverk og inneholde mater, transportbånd og sikt. Det finnes også mobile sikteenheter som er kompatible med knuserne. Mobilknusing brukes til både primær grovknusing og sekundær/tertiær finknusing. De fleste stasjonære knusemodeller er i dag tilgjengelig også som mobile anlegg; kjefteknusere, konknusere, slagknusere osv. og har normalt kapasiteter på 300 – 1000 tonn/time (Michaud, 2015).

Knuseren plasseres i umiddelbar nærhet til sprengningsområdet og sprengrøys lastes direkte opp i det mobile knusekammeret. En mobilknuser krever minst to lastere, en for mating av materialet inn i knuseren og en til å transportere bort de ulike produktene som produseres og lagres i hauger under transportbåndet ut av knuseren. Transportbånd kan erstatte den siste lasteren og fungere som transportør av ferdigknuste produkter. Figur 14 viser prinsippet med en mobilknuser, i dette tilfellet Metso sin LT106-mobilknuser.



Figur 14: Lokotrack LT106 mobilknuser (Metso, 2016)

Produksjonsprosessen i et dagbrudd består av mange aktiviteter, såkalte enhetsoperasjoner. Typiske enhetsoperasjoner vil være boring, lading, sprengning, lasting, transport og knusing. Zimmermann og Kruse (2006) har anslått kostnadene for hver enkelt aktivitet, kostnadsoversikten kan ses i Figur 15.



Figur 15: Kostnadsoversikt – dagbrudd (Zimmermann og Kruse, 2006)

Avhengig av størrelsen på dagbruddet og drivstoffpriser vil transport stå for 30 – 60% av de totale driftskostnadene. Bruk av mobilknusere og/eller transportbånd vil eliminere behovet for transportmaskiner og på den måten redusere kostnadene ved å kutte antall ansatte, maskiner og drivstoff til et minimum. Ifølge Zimmermann og Kruse (2006) kan en kombinasjon av mobile og faste transportører spare et anlegg for opp mot 2/3 av de eksisterende transportkostnadene.

3.3.4 Knuseteori

Knuseteori er et komplekst og omfattende tema. Det finnes uendelige muligheter for valg av knusere og knuserkonfigurasjoner. De faktorene som nevnes i denne oppgaven vil være kun en brøkdel av det totale situasjonsbildet som må tas hensyn til.

3.3.4.1 Generelt

Berg er omtrent ti ganger svakere når det utsettes for strekkspenning sammenlignet med kompresjon. Strekkspenninger danner grovere partikler enn kompresjon som danner mer finpartikler (Wills og Finch, 2016).

En viktig faktor å ta hensyn til ved prosessplanlegging og valg av knusere, er reduksjonsforholdet. Høye reduksjonsforhold gir mer finstoff enn lavere reduksjonsforhold. Ved tilslagsproduksjon er det derfor fordelaktig med lavere reduksjonsforhold per knusestrinn for å unngå store mengder med finstoff (Metso, 2015). Sammen med jevn, kontrollert mating og utsikting av finstoff før hvert knusestrinn vil lave reduksjonsforhold sørge for lite finstoff

og bratt kornfordeling for de endelige knuseproduktene (Rothery og Mellor, 2007).

Dersom det er kornformen på det ferdige produktet som er av stor viktighet, vil det være essensielt å se på kløvene i bergarten. Det er bergartens kløv som til syvende og sist vil påvirke hvordan den endelige partikkelformen vil være, men også innstillingen på knuseren kan være med å bestemme kornformen. En finkornet bergart krever tettere utløpsspalte på knuseren for å få brudd langs kløvene sammenlignet med grovkornete bergarter som kan tolerere en større utløpsspalte (Rothery og Mellor, 2007).

Ifølge (Wills og Finch, 2016) er de fleste grovknuseprosessene gjort som tørre prosesser, mens finknusing kan gjøres tørt og vått.

Kapasiteten og effektiviteten til en knuser er avhengig av valgt bruksmetode. Viilo (2011) har listet opp noen faktorer som vil senke kapasitet og effektivitet i større eller mindre grad:

- Tilstedeværelse av klebrig materiale i mateproduktet.
- Fuktighet i materialet eller klima generelt.
- Feil motorstørrelse på knuseren.
- Ekstremt vanskeligknust eller hardt materiale.

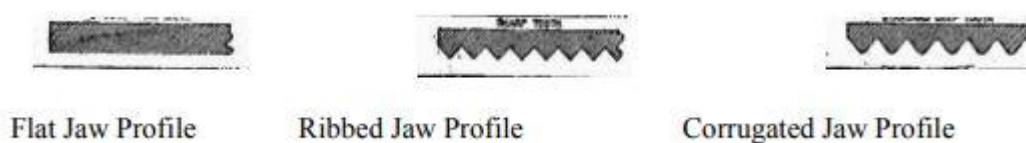
3.3.4.2 Kjefteknuser

En kjefteknuser kan gjennomgå både choked og arrestert knusing. Ved choked knusing inkluderes finstoff i knusekammeret hvilket kan føre til pakking som igjen vil kunne ødelegge knusekammeret. Derfor vil choked knusing uten finstoff være en foretrukket måte å kjøre knuseren på fordi det gir jevn slitasje og en partikkel-partikkel-knusing som kan gjøre slitasjen på utstyr mindre og kapasiteten gjennom knuseren større. Partikkel-partikkel-knusing i primærknuseren kan dessuten redusere partikkel-metall-knusing i senere knusestrinn og på den måten spare kostnader for slitedeler og vedlikehold. En av ulempene med choked mating er at det vil bli produsert mer finstoff (Wills og Finch, 2016).

Større slaglengde gir større masseflyt gjennom knusekammeret. En del av materialet vil, ved stor slaglengde, gå gjennom kammeret uten å knuses. Slaglengden bør velges på bakgrunn av ønsket produktstørrelse. Plastiske materialer krever stor slaglengde, mens harde eller sprø bergarter krever kortere slaglengde (Wills og Finch, 2016). I knuseren vil størrelsen på lukket

utløpsspalt representere d_{50} for produktet (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Ved valg av hastighet er det viktig å velge en som ikke er for høy. Målet bør være at alle partikler skal gjennomgå komprimering minst en gang gjennom knusekammeret (Kumar, 2012). Vinkelen mellom kjevene vil påvirke det gjennomgående materialet. Dersom vinkelen blir for stor vil materialet enten gå rett gjennom uten å bli knust, eventuelt kan man risikere at kjevene ikke får godt nok tak på partiklene. En stor vinkel vil dessuten hive materialet oppover i knuseren tilbake mot mateåpning, dette senker den totale kapasiteten på knuseren. Normalt er vinkelen satt mindre enn 26° . Valg av slaglengde, hastighet og kjevevinkel må alle ses i sammenheng. Disse tre faktorene har stor påvirkning på materialets bevegelse gjennom knuseren og påvirker den endelige produktstørrelsen.

I kjefteknuseren kan kjevene ha ulikt design. Figur 16 viser ulike typer kjefteplater. Ifølge Mayo (2006), er bølgete kjefteplater det mest vanlige i bergverkdirft i dag. Bølgeplatene sørger for knusing ved kompresjon, strekk og skjær, mens de flate platene kun knuser ved hjelp av kompresjon (Wills og Finch, 2016).



Figur 16: Ulike typer kjefteplater (Mayo, 2006)

Som tidligere nevnt vil kompresjonsknusing gi mer finstoff enn knusing på strekk. Hvis målet er å produsere minst mulig fint materiale vil en løsning kunne være å velge bølgete knuseplater (Wills og Finch, 2016). I tillegg til de ulike plateutformingene i Figur 16 vil det også være mulig å velge om kjeveplatene skal være konveks eller rett. Dersom man bruker en konveks knuseplate vil knusing av materialet skje lenger oppe i knusekammeret, hvilket kan gi økt kapasitet i knuseren (Øien, Bardal og Johannessen, 1993).

Det finnes flere ulike typer primærknusere. De vanligste er kjefteknuser og gyratoryknuser. Metso har laget fire grunnregler for valg av riktig primærknuser (Metso, 2015);

- Regel 1: bruk alltid kjefteknuser hvis mulig da disse har minst kapitalkostnader.
- Regel 2: ved lavkapasitetsproduksjon bør kjefteknuser brukes. Storstein håndteres av en hydraulisk hammer.

- Regel 3: ved høykapasitetsproduksjon (800 – 1500 tonn/time) bør kjefteknuser med stort gap benyttes.
- Regel 4: ved veldig høy produksjon (>1200 tonn/time) bør en gyratoryknuser benyttes.

Av de fire grunnreglene kan det ses at kjefteknuser er den foretrukne knuseren.

3.3.4.3 Konknuser

Dersom en konknuser blir brukt korrekt, vil den i stor grad kunne påvirke kornformen til produktet. For å oppnå en optimal kubisk kornform er det enkelte forhold som bør være på plass. Metso presenterer i sin håndbok for knusing og sikting «10 gylne regler» som vil sørge for optimal knusing i en konknuser (Viilo, 2011);

1. Knusekammeret må fylles helt. Hele mantelhodet må være dekket av stein.
2. Det må opprettholdes en stabil og kontinuerlig mating.
3. 10 – 30% av matematerialet bør være mindre enn utløpsspaltens størrelse, finstoff som filler og 0 – 4 mm unngås.
4. Maksimal matestørrelse 50 mm i et tertiærtrinn er anbefalt. Reduksjonsforholdet bør være rundt 3.
5. Riktig fordeling av matematerialet. Massen bør ikke være segregert og må fordeles jevnt i knusekammeret.
6. Utløpsspalten bør settes lik ønsket produkt.
7. Korrekt valg av knusekammer slik at det blir choked mating.
8. Riktig og oppdatert knuser. Nye knusere med bedre egenskaper vil komme på markedet.
9. Lukket krets vil forbedre kornform ved hjelp av slitasje på og gjenknusing av flisige korn.
10. Masseflyt. Særlig ved høykvalitetsproduksjon er det viktig å benytte selektive kretser hvor sekundære og tertiære produkter ikke blandes.

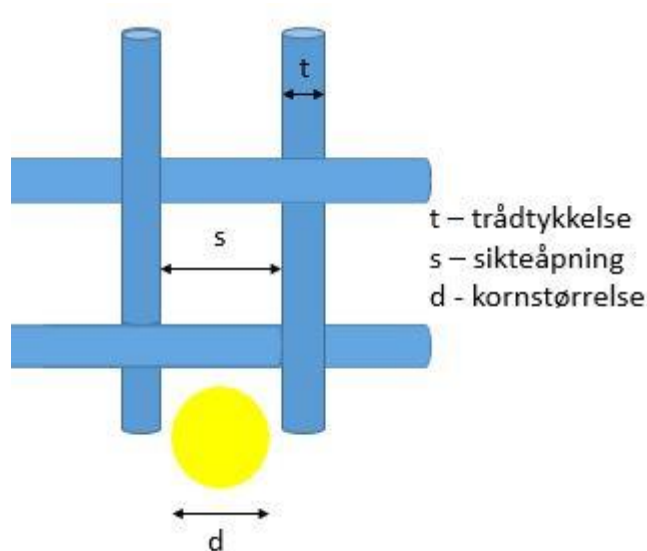
Rothery og Mellor (2007) og Wills og Finch (2016) nevner flere av de samme faktorene som Metso. Konknuseren er avhengig av korrekt kornfordeling og et velgradert mateprodukt som fordeles langs hele knuseåpningen for å sikre jevn slitasje på maskinen. Innfris ikke disse

elementene vil man risikere redusert knuserkapasitet, dårlig kornform og ujevn slitasje på utstyret. Vanlige reduksjonsforhold ligger typisk rundt 6 – 8:1 for sekundærknuser og 2 – 3:1 for tertiærknusere. Disse reduksjonsratioene vil potensielt kunne gi god kornform dersom de andre faktorene nevnt ovenfor er innfridd. Sandvik, Digre og Malvik (1999) legger også vekt på fullmating nær pakkingsgrensen for materialet. Dette vil si at knuseren bør overmates slik at det oppstår interpartikulær knusing, kornene vil da ikke ha mulighet til å rotere fritt i knusekammeret. En slik innstilling vil være gunstig for kubisiteten og kornformen til produktet.

3.4 Sikting

En sikteprosess går ut på at man ved hjelp av en sikteflate skiller en masse basert på ulike kornstørrelser. Sikteflaten definerer skillegrensen mellom to fraksjoner. Fine fraksjoner passerer gjennom sikteflaten, mens grove fraksjoner går over siktet. Sikting benyttes hovedsakelig på kornstørrelser i størrelsesorden 300 mm til ca. 40 μm og kan foregå enten som våt eller tørr prosess. For grovsikting er det mest vanlig med tørrsikting, mens våtsikting normalt brukes på de mindre kornstørrelsene. For de aller minste fraksjonene, $-250 \mu\text{m}$, kan det være hensiktsmessig å benytte en metode som kalles klassering istedenfor sikting (Wills og Finch, 2016).

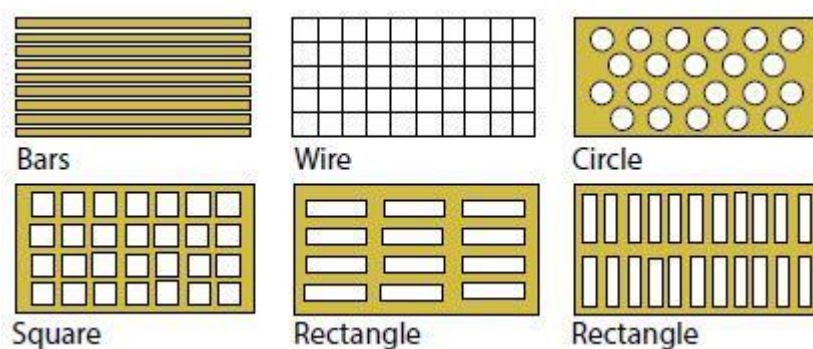
Figur 17 viser en sikteflate med siktetråder vevd sammen til kvadratiske åpninger som danner en sikteduk. En sikteduk kan lages i ulike materialer som eksempelvis stål, bronse, gummi, plast og kunstfiber. Valg av dukmateriale er avhengig av den mekaniske påkjenningen siktet skal utsettes for. I dag er de mest vanlige siktedukene laget av polyuretan og gummi (Øien, Bardal og Johannessen, 1993).



Figur 17: Dimensjoner på en sikteduk (Nesheim, 2017)

Sikteåpningen, s , styres av ønsket skillegrense på produktet. Ved industriell sikting, sikting av store kvanta, settes sikteåpningen litt større enn ønsket skillegrense for å opprettholde god kapasitet på siktet. Det betyr at for et gitt produkt må man forvente forurensning på 3 – 5% med større korn som har passert sikteåpningen (Kleiv, 2013).

Sikteåpningens størrelse vil variere etter hvilken skillegrense man ønsker på materialet som går gjennom siktet, mens sikteåpningens form har stor betydning for hvilken kornform som passerer. Figur 18 viser den store variasjonen i mulige utforminger av en sikteduk.



Figur 18: Utforming av sikteduk (Metso, 2015)

Det finnes mange ulike siktemaskiner og forskjellen defineres av sikteflatens bevegelse, sikteflatens helning og siktedukmateriale (Metso, 2015). Valg av siktemaskin bestemmes av materialegenskapene til bergmassen og ønsket siktekapasitet i verket. Den viktigste

hovedgruppen av sikt er vibrerende sikt og den mest vanlige siktemaskintypen er frittssvingende sikt (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Metso (2015) deler opp siktetypene på en litt annerledes måte og kategoriserer de i fire ulike siktemodeller; enkel hellende, dobbel hellende, trippel hellende og banansikt. Enkel hellende står for rundt 80% av alle sikt rundt om i verden og er et stratigrafisikt. For å få en sirkulær bevegelse må siktet installeres med en helning på 15°, mens en lineær bevegelse krever en helning på 0°–5°.

Innen pukkproduksjon har sikting av masser tre hovedfunksjoner, forventet sikteeffektivitet i parentes (Rothery og Mellor, 2007):

1. Unngå understørrelser inn i knuser (80 – 85%).
2. Unngå over- og understørrelser inn i neste trinn (85 – 90%).
3. Å produsere ferdigprodukter med jevn størrelse (90 – 97%).

I følge Øien, Bardal og Johannessen (1993) skjer det ofte i praksis at siktene er underdimensjonert sammenlignet med kapasiteten på knusere og transportører i anlegget.

3.4.1 Vibrerende sikt

Vibrerende sikt bruker vibrasjoner for å skape bevegelse i partikkelsen som transporteres over siktet. Maskinen består av en jevn sikteflate som vibrerer i vinkel på sitt eget plan. Vibrerende sikt er en hovedtype av sikt, men det finnes mange undertyper. Forskjellen på de ulike konstruksjonene ligger i hvordan sikterammen er opplagret (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Et fast opplagret sikt danner en lineær bevegelse, mens frittssvingende sikt vil danne sirkulær eller elliptisk bevegelse avhengig av om den er enakslet eller toakslet (Øien, Bardal og Johannessen, 1993). Uavhengig av hvordan den vibrerende bevegelsen i siktet er, vil hovedmålet være å danne en stratigrafi i partikkelsen. Stratigrafi er en gradering i massen hvor de fine partiklene beveger seg mellom de grovere partiklene og legger seg nederst (Rothery og Mellor, 2007). Siktet kan installeres horisontalt eller med helning, dette avhenger av konstruksjonen og materialet.

I Vassfjell er det første siktet et grovsikt, et todekket frittssvingende sikt med omtrentlig dimensjon 2400 mm x 7200 mm (bredde x lengde). De to neste siktene er et tredekket og et todekket sikt med helning og en omtrentlig dimensjon på 3000 mm x 6000 mm. Begge todekk-siktene har en sikteduk av gummi, mens tredekk-siktet har en sikteduk av polyuretan.

3.4.2 Sikteteori

I likhet med knuse teori finnes det også uendelige muligheter rundt valg av sikt og sikteteori. Kapittelet presenterer noen av de valgene som må tas ved planlegging av sikteutstyr i et verk.

3.4.2.1 Åpen og lukket krets

Knusing kan foregå i åpen eller lukket krets avhengig av hvor i prosessen et eventuelt sikt er plassert. I en åpen krets er siktet plassert før knuseren for å fjerne understørrelser slik at disse ikke går gjennom knuseren. Bruken av sikt i åpen krets øker den totale kapasiteten gjennom knuseren, reduserer slitasje og unngår pakking av finstoff i knusekammeret. Store andeler finstoff i knusekammeret er uønsket, men til tross for dette bør ikke siktet installeres med for liten sikteåpning fordi små mengder finstoff i knuseren vil gi mindre slitasje på enn et knusekammer uten noe finstoff. Mayo (2006) viser også til hvordan et sikt foran knuseren kan eliminere lavkvalitetsmaterialer fra videre nedknusing. Det er unødvendig å bruke knuserkapasitet på dårlige masser som er uønsket i et ferdigprodukt. Jo tidligere i prosessen dette materialet siktes ut, jo bedre. Fjerning av masser som er mindre enn utløpsspalten før knuseren vil sørge for at knuseren opererer med maksimal effektivitet.

I en lukket krets vil siktet være plassert i etterkant av en knuser for å sikte ut overstørrelser fra å gå videre i verket. Overstørrelsene returneres til knuseren og blir knust for andre gang hvilket vil gi et høyere reduksjonsforhold for knuseren (Metso, 2015). Ved å bruke sikt i en lukket krets vil mengden finstoff reduseres og man får en mer kontrollert og bratt kornfordelingskurve. En ulempe med lukket krets er derimot at kapasiteten på knuseren synker (Wills og Finch, 2016, Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Knusing i lukket krets er ikke egnet for bruk i et primært knusetrinn, men er ideell for lavere knusetrinn hvor det er et ønske om smale fraksjoner med bratte kornfordelingskurver (Metso, 2015).

3.4.2.2 Konfigurasjoner på siktemaskin

Det er mange faktorer som påvirker siktekapasiteten og sikteeffektivitet, blant annet (Sandvik, Digre og Malvik, 1999):

- Sikteåpning – størrelse og areal
- Pågang – mengde, kornfordeling og fuktighet
- Siktekonstruksjon – antall dekk, helning på siktet, duktype, trådtykkelse
- Våt- eller tørrsikting

Sikteåpningen kan sikre ønsket kornform for produktet. Eksempelvis vil kvadratiske hull i en lukket krets eliminere elongerte korn fordi disse ikke kommer gjennom siktet og derfor blir sendt i retur til knuseren for andregangs knusing. Dette gir et mer kubisk produkt og en brattere kornfordelingskurve (Rothery og Mellor, 2007). Kvadratiske hull i sikteduken er mest brukt i dag. Dersom siktets kapasitet er viktig vil rektangulære hull i lengderetningen være hensiktsmessig å velge, mens sirkulære hull vil kunne øke dekkets levetid ved grovsikting (Metso, 2015).

Sikt kommer i dag med mange ulike dimensjoner (bredde x lengde) og med ulikt antall dekk. Jo større dimensjoner og jo flere dekk, dess større kapasitet. Sikt med to og tre dekk er av de mest vanlige siktedimensjonene i dag (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Vinkelen på siktet kan variere mellom alt fra horisontale sikt til sikt med 40° helning. Denne helningen må ses i sammenheng med duktype og pågang. Vinkelen kan ikke bli så stor at materialet ikke får feste. Partiklene må ha mulighet til å passere sikteåpningen (Rothery og Mellor, 2007). Det finnes mange ulike type sikteduker. Før var stålduk det mest vanlige, men i dag er det gummi- og polyuretanduk som er det mest vanlige (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). For tørt materiale større enn 35 mm vil gummiduk være det beste alternativet fordi det er motstandsdyktig mot abrasjon. Dersom massen er våt og fin (0 – 50 mm) vil polyuretan være den mest gunstige sikteduken da den sørger for nøyaktig separasjon og i tillegg er motstandsdyktig mot abrasjon. Er materialet finkornet og fuktig, vil gummiduk være førstevalget. Gummi er et fleksibelt materiale, samt at man ved bruk av gummi unngår blanding av sikteduksåpningene. Hvor tykk sikteduken er vil også påvirke sikteresultatet. Tynnere sikteduker gir større kapasitet og større nøyaktighet, mens tykkere sikteduker vil forhindre blanding og er mer slitesterkt. Tykkelsen på sikteduken må ikke overgå produktstørrelsen. (Metso, 2015)..

Sikt er massive maskiner med stor slitasje på underlaget. Konstruksjonene krever et solid fundament og dette gjelder spesielt ved montering av vibrerende sikt. Dersom flere sikt monteres i nærheten av hverandre er det viktig å sørge for at vibrasjonene ikke går med samme frekvens da dette kan føre til brudd i konstruksjonen (Sandvik, Digre og Malvik, 1999)

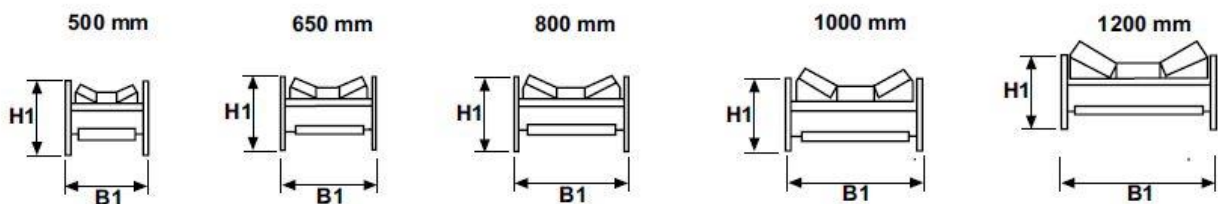
3.5 Transportbånd

Transportbånd er det desidert viktigste transportutstyret i et knuseverk. Båndene er en billig og enkel løsning for materialtransport mellom de ulike maskinene i verket. Valg av transportbånd skjer på grunnlag av fire nøkkelparametere (Metso, 2015):

- Tonnasje
- Type materiale og dets størrelse
- Helning
- Distanse

Det må også tas hensyn til slitasje på utstyr og miljøpåvirkende forhold som støv, støy og kjemikalier.

Et transportbånd består av mange ruller, bæreruller og returrull, plassert etter hverandre i en trauform. I Figur 19 ses snittet av ulikt dimensjonerte transportbånd hvor H1 er høyden på rammeverket, mens B1 er båndbredden. De vanligste båndbreddene er definert over hvert enkelt bånd i figuren (Metso, 2015). Antall ruller per snitt er avhengig av den totale kapasiteten på båndet, det vanligste er å bruke tre ruller som i Figur 19. Trauvinkel til rullene er vanligvis 30° eller 45°. Når rammeverket er installert, overtrekkes rullene med selve transportbeltet (Øien, Bardal og Johannessen, 1993).



Figur 19: Snitt av transportbånd med ulike dimensjoner (Metso, 2015)

Normal båndbredde ligger, som Figur 19 viser, rundt 0.6 – 1.2 m. Bredden er avhengig av ønsket kapasitet over båndet ettersom et bredere bånd har plass til mer materiale enn et smalere bånd. Hastigheten på et transportbånd justeres etter hvor tykk man ønsker at materialsengen på båndet skal være, men normalt settes hastigheten til 1 – 1.8 m/s.

Transportbånd er enten horisontale eller installert med en høydeforskjell. Det vanligste er flatbeltet transportbånd med en maksimal helning på 18°. Helningen på båndet kan variere og vil være avhengig av materialet som fraktes, om det er tørt eller våt produksjon, samt hvordan

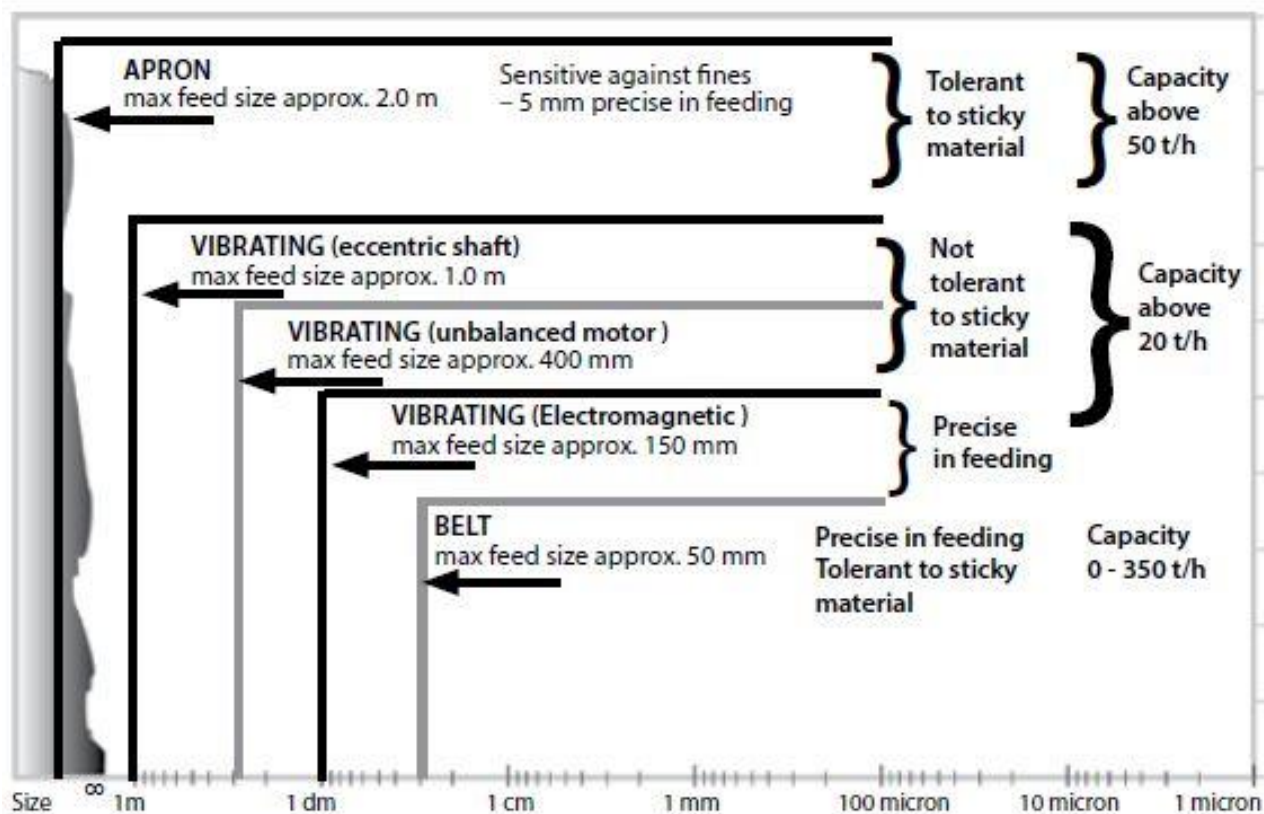
båndets struktur og materiale er. Polyester, aramid og stålleddninger er alle forsterkninger som brukes som beltemateriale, disse beskyttes av et topp- og bunnlag (Metso, 2015).

Transportbånd kan brukes til korte og lange avstander, fra noen meter til flere kilometer. De har høy kapasitet og de mest effektive båndene kan i dag ta unna flere tusen tonn i timen ved behov (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Fordi at transportbånd er billig og effektivt knuseverksutstyr, er det vanlig å overdimensjonere disse.

3.6 Matere

Matere blir brukt for å kontrollere materialstrømmen inn i en knuser, et sikt eller et transportbånd. Det er flere grunner til at man ønsker å ha kontroll på materialstrømmen; det kan være kapasitetsbegrensende maskiner i anlegget som bruker lenger tid med materialet og derfor risikerer overbelastning ved ukontrollert massestrøm inn. For å oppnå ønskede varespesifikasjoner på ferdigvarer vil det dessuten være nødvendig med god materialkontroll og muligheten for å starte og stoppe en materialstrøm i et produktutløp (Rothery og Mellor, 2007).

Det finnes mange ulike typer matere og hvilken man velger avhenger blant annet av bergets egenskaper, størrelse på anlegget og materens funksjon. Noen matere fungerer både som sikt og mater, mens andre er lukket og kun har en matefunksjon. Figur 20 viser en oversikt over ulike type matere og hvordan de kategoriseres basert på størrelsen på materialet de skal håndtere. Figuren viser hovedtypene av matere, det finnes også mange underkategorier for flere av matertypene.



Figur 20: Ulike typer materer og deres bruksområde (Metso, 2015)

3.6.1 Primærmater

En primærmater er, som navnet tilsier, en mater som er installert i forbindelse med primært knusetrinn. Noen primærknusere er selvmatende, eksempelvis gyratoryknuseren, mens andre primærknusere som for eksempel kjefteknusere må mates kontinuerlig. Kjefteknusere mates ofte med en dumper eller annen laster som gir ujevn mating, noe som er negativt for knuseeffektiviteten og kan gi større slitasje på knuseren. En sjakt eller annen lagringsenhet sammen med en mater i forkant av primærknuseren vil gi en jevn mating inn i knusetrinnet (Rothery og Mellor, 2007). Primærmaterer og materer som plasseres foran andre knusere har ofte den egenskapen at de kan sikte bort understørrelser fra å gå gjennom knuseren, dette både øker kapasiteten i den respektive knuser i tillegg til at de dårligste kvalitetene kan tas ut før neste trinn hvis ønskelig (Øien, Bardal og Johannessen, 1993). Primærmaterne er ofte større enn de materne som følger videre i prosessen, konstruksjonen må tåle større påkjenninger fra grovgodset og kravet til mekanisk styrke vil være høyere for en primærmater sammenlignet med materer som plasseres lenger ut i materialflyten (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Kapasiteten på primærmateren vil være avhengig av hvilken matertype man velger. Ifølge

Metso (2015) vil en apronmater ha en kapasitet på 300 – 12 000 tonn/time, mens en vibrerende mater vil ha en kapasitet på mellom 300 – 1200 tonn/time.

3.6.2 Fingermater

En fingermater er en type vibrerende mater med kapasitet mellom 30 – 600 tonn/time. Fingermateren består av et øvre trinn med springfjær eller gummifester og 1 – 3 lavere seksjoner med traktformete «fingre». Materen i Figur 21 viser en typisk oppbygging av en fingermater. Den består av en ramme opplagret i to eksentriske aksler som får rammen til å vibrere når motoren slås på. Dersom materen håndterer mindre materialer vil vibreringen kunne induseres ved bruk av elektromagnetisme (Rothery og Mellor, 2007). Materen på figuren har tre seksjoner og materialet flyttes fra øverste seksjon og ned til enden av maskinen ved hjelp av vibrasjoner med en lineær bevegelse.



Figur 21: Fingermater (Star Trace (P) Ltd., u.å.)

En fingermater fungerer også som et siktemedie hvor understørrelser går mellom fingrene, mens overstørrelsene går over og ned i knuseren som er plassert etter materen (Star Trace (P) Ltd., u.å.).

3.7 Valg av prosess

Det finnes mange ulike produsenter og leverandører av knusere og annet knuseverksutstyr. Kombinert med unik geologi, ulike produktbehov og store variasjoner i anleggsstørrelse, gir dette utallige muligheter for utstyrskonstellasjoner i hvert enkelt anlegg. I tillegg vil konfigurasjonene på utstyret kunne endres og gi små og store utslag på prosessen.

Materialeegenskapene til det berget som tas ut, ønsket reduksjonsforhold, årlig uttak og driftsplan er alle faktorer som spiller inn på de valg som må tas ved utforming av et knuseverk. Vurderingene bør være helt eller delvis klar i løpet av planleggingsfasen av et uttak ettersom det er i denne fasen at det vil være mest naturlig og økonomisk å gjøre disse valgene (Michaud, 2015).

Sandvik, Digre og Malvik (1999) nevner fem elementer som danner et grunnlag for valg av oppbygging av en prosess:

1. God kjennskap til rågodsets sammensetning og struktur.
2. Utførte forsøk og tilhørende resultater.
3. Produktkrav.
4. Delprosessenes virkemåte og muligheter.
5. Erfaringsdata fra andre anlegg med tilsvarende materialer.

Etter at alle faktorer er tatt hensyn til, vil det i mange tilfeller fortsatt være flere mulige løsninger for anlegget. Hvilken løsning som er mest optimal og vil gi det beste økonomiske utbyttet er et resultat av prøving og feiling og vil best finnes ved hjelp av prosessanalyser i et av de mange simuleringsverktøyene som finnes på markedet i dag (Sandvik, Digre og Malvik, 1999).

Et anlegg er geografisk bundet til den geologiske forekomsten, det første som må vurderes er derfor (Rothery og Mellor, 2007):

- Avstand mellom sprengningsområde og knuseverk
- Terreng mellom sprengningsområde og knuseverk
- Maksimal størrelse på materialet som skal transporteres
- Tilgjengelig kapital og tilgjengelig/eksisterende utstyr
- Kapasitetskrav

De ovennevnte elementene vil være viktige faktorer i valget mellom stasjonært og mobilt knuseverk. Når dette er bestemt kan knusere og annet knuseutstyr bestemmes i større detaljeringsgrad.

En viktig vurdering i optimaliseringsarbeidet er hvorvidt det skal installeres et enkelt system eller flere parallelle system. Belastningen i de lavere knusestrinnene er mye større enn i de overdimensjonerte primærknuserne. For å utnytte primærknuserens kapasitet i enda større

grad, er det mulig å installere parallelle løp i de lavere knusetrinnene, eksempelvis to tertiærknuser som deler på massene gjennom det tredje knusetrinnet. Parallelle massestrømmer vil kreve større kapital og høyere driftskostnader. En fordel med parallelle systemer vil være at ved eventuell driftsstopp vil produksjonen kunne fortsette, men det vil likevel være mest gunstig med enkle massestrømmer og større maskiner ettersom kapital- og driftskostnadene blir mindre jo større maskinenheten er. Et annet viktig valg vil være å se på bruken av buffere i verket. En buffer er en opplagring av materialer i eller etter prosessen. Bruken av buffere i anlegget gjør at konsekvensene ved driftsstopp blir mindre da knusetrinnene til en viss grad blir uavhengig av hverandre så lenge bufferlageret har materialer og ta av (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Hvor stor bufferkapasiteten og varelageret skal være vil være en vurderingssak. Det er ikke økonomisk gunstig å ha for store lagre av ferdigvarer eller mellomlagerprodukter fordi de binder opp økonomiske midler, man ønsker en LEAN-prosess (Haugen, 2015).

Det vil være en fordel å planlegge et fleksibelt anlegg som enten kan produsere varer som speiler de ulike markedskonjunktorene eller som på enkelt vis kan utbedres og/eller utvides ved behov (Sandvik, Digre og Malvik, 1999). Dimensjoneringsvalgene på knuser vil være avhengig av ulike faktorer, disse er definert av Rothery og Mellor (2007):

- Kapasitetskrav
- Maksimal størrelse på mateproduktet
- Materialeegenskaper til mateproduktet
- Produktkrav

Det finnes mange ulike typer og størrelser av sikt, transportbånd og matere, normalt blir disse styrt av valget som gjøres med knuserne. Det er vanlig i dag at knuseverksutstyr gjøres kompatibelt med den enkelte knuser. Overdimensjonering av utstyret vil i de aller fleste tilfeller være mest hensiktsmessig. Jo større en maskin er, jo lavere vil vedlikeholdskostnadene være ved å kjøre utstyret med lavere kapasitet enn det den maksimalt kan ta. En slik løsning vil likevel ikke være den mest økonomiske ettersom verket vil være ineffektivt, samt at store investeringer krever større kapital (Rothery og Mellor, 2007). Derfor vil en mellomting være å foretrekke; en løsning hvor man ikke overdimensjonerer unødige og gir unødvendig høye fremtidige driftskostnader, men overdimensjonerer nok til at en eventuell fremtidig utvidelse ikke utgjør store ekstrakostnader.

Det er ofte størst fokus på riktig valg av knusere i en prosess, men Viilo (2011) påpeker viktigheten av at en knuser kun er en enkelt komponent i en omfattende prosess. Produksjonen er helt avhengig av tilpasset knuseverksutstyr som blant annet matere, transportbånd, sikt, motorer og lagringsenheter. Viilo har laget en liste med faktorer som alle bør være vurdert for optimal prosess;

1. Velg riktig knusekammer for det aktuelle materialet.
2. Velg riktig kornfordeling for mateproduktet.
3. Sørg for kontrollert mating i hele verket.
4. Jevn fordeling av mateprodukt i hele knusekammeret, gjelder spesielt for konknusere.
5. Korrekt dimensjonering av transportbånd under knuseutløp. Båndene bør tolerere maksimal kapasitet fra knuseren.
6. Korrekt dimensjonering av sikt, særlig i lukket krets.
7. Automasjon.
8. Tilstrekkelig utløpsareal for knuserutløp.

Et knuseverk kan optimaliseres med hensyn til produktkvalitet, tonnasje eller økonomiske resultater. Ferdigvarer av høy kvalitet med gode mekaniske egenskaper har som regel gått gjennom en eller flere lukkede kretser i systemet og opprettholdt et lavt reduksjonsforhold gjennom prosessen (Rothery og Mellor, 2007). En lukket krets vil senke den totale tonnassen som kan tas gjennom verket per tid, da gjennomgått materiale sendes i retur til forrige knusetrinn. Den optimale materialflyten for produktkvalitet og maksimal tonnasje vil derfor normalt være ulik og det må vurderes hvilken av de to egenskapene som gir størst utbytte (Sandvik, Digre og Malvik, 1999).

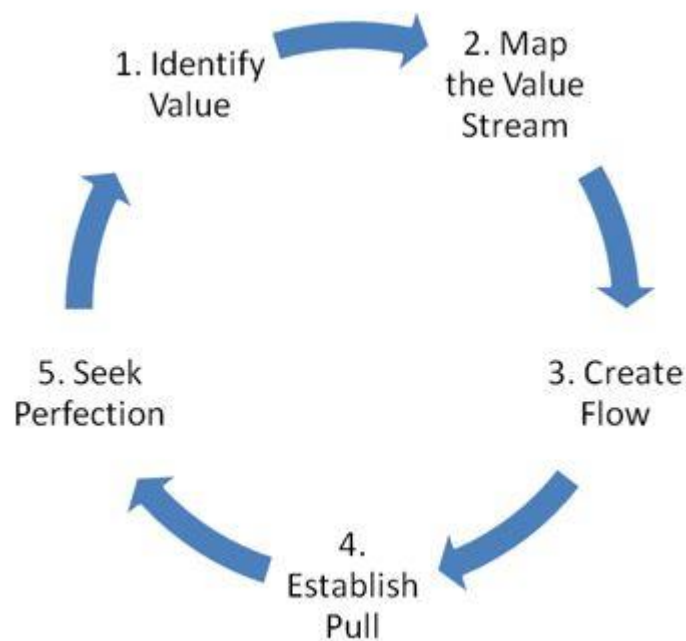
3.7.1 LEAN

Lean er en produksjonsfilosofi utviklet av Toyota Production System for effektivisering av produksjonsprosesser. Hovedformålet er å maksimere kundeverdien samtidig som man minimerer avfallet. Kundens verdi defineres som tiden det tar fra bestilling av en vare til betaling er gjennomført, mens minimering av avfall betyr å unngå overproduksjon (Lean Enterprise Institute Inc., u.å.).

Det er fem hovedprinsipper som må følges opp gjennom hele Lean-prosessen (Womack og Jones, 2003) og (Lean Enterprise Institute, u.å.);

- Produktet må gis en verdi. Verdien må ses fra en kundes standpunkt og reflektere det en kunde er villig til å betale for et gitt resultat.
- Alle trinnene i en verdistrøm må identifisere for hvert enkelt produkt. Dersom det finnes ett eller flere trinn som ikke genererer verdi, bør disse fjernes.
- Det skal sikres en verdiflyt hvor de verdiskapende elementene til enhver tid skal være i bevegelse og ikke lagres. Produksjonen deles opp i tette sekvenser.
- Når verdistrømmen er etablert er det opp til kunden å bestemme produksjonshastighet. Det er markedet som bestemmer hvor mye som skal produseres av en produktenhet til enhver tid.
- Siste punkt er søken etter perfektjon. Verdistrømmen er identifisert, sløsende elementer er eliminert, en verdiflyt er etablert og styres av etterspørsel fra markedet. De fire ovenstående punktene kan på nytt vurderes. Lean-produksjon er med andre ord en kontinuerlig prosess.

Figur 22 viser hvordan de fem hovedprinsippene itereres og er avhengig av hverandre.



Figur 22: Hovedprinsippene innen Lean-produksjon, (Lean Enterprise Institute, u.å.)

Optimal produksjon innen gruvedrift vil medføre null avfall, såkalt «zero waste»-produksjon, hvor avfall defineres som deponert masse. Stein og grus er ikke-fornybare ressurser og det er derfor viktig å sørge for en bærekraftig utnyttelse av ressursen. Bærekraftig produksjon kan sikres ved massebalanse i anlegget, at det sørges for at alle fraksjoner som produseres blir brukt. I tilslagsproduksjon er det hovedsakelig de fineste fraksjonene som representerer et problem. Disse produseres ofte i store mengder samtidig som markedet er begrenset, hvilket betyr at massene i mange tilfeller deponeres. Løsninger på dette problemet kan være å:

- Lage et marked for de uønskede fraksjonene.
- Optimalisere prosessen med mål om å redusere mengden av produsert fint materiale.

Mitchell (2009) viser til at beregninger av massebalanser har gitt at opp mot 30% av produsert materiale i et anlegg er vil være fint tilslag. Dette tallet er avhengig av blant annet geologiske forhold, brytningsmetode, anleggsdrift og vil følgelig variere fra verk til verk.

Haugen (2015) har definert noen kjennetegn for Lean-produksjon innen gruvedrift:

Det skal ikke produseres bedre kvaliteter enn det kunden etterspør og betaler for. Det er ønskelig å fjerne produksjonsvariasjoner - hver aktivitet skal ha samme resultat hver gang den gjennomføres. I tillegg skal det jobbes mot en balansert produksjon. Det vil si at man produserer akkurat nok og ikke «gjemmer» verdier i mellomlagring. Produksjonen bør derfor speile markedet slik at det ikke produseres uønsket materialer. Resultatet av en Lean-produksjon vil kunne være reduserte produksjonskostnader og en mer bærekraftig drift.

4 Metode

Informasjonsinnhenting for hele oppgaven er gjort gjennom litteraturstudier (bøker, artikler, internettsider, interne dokumenter i Franzefoss) og feltstudier i Vassfjell. I tillegg til skriftlig og muntlig kommunikasjon med veiledere fra NTNU, ansatte i Franzefoss og leverandører av maskineri til pukkproduksjon. Metodekapitlet beskriver kort hvordan informasjonen er innhentet for den enkelte problemstilling.

4.1 Anleggsbesøk

Sommeren 2017 var undertegnede ansatt som sommerstudent i Franzefoss Pukk, hovedsakelig i deres anlegg i Lia. Arbeidet inkluderte også enkelte dager med omvisning og arbeidssted i Vassfjell. I forbindelse med prosjektoppgave, masteroppgave og enkeltemner ved NTNU høst 2017 og vår 2018 er det flere ganger i løpet av denne perioden arrangert ekskursionsjoner med omvisninger, samt møter i anlegget hvor fokus har vært på oppgavens problemstillinger innen prosess, drift og kostnader.

4.2 Flytskjema og prosessanalyser

Det nye flytskjemaet er laget med støtte i eldre eksisterende flytskjema over anlegget fra 1991 og 2015 (se Vedlegg 1 og Vedlegg 2), i tillegg til muntlig kommunikasjon med personell i bruddet. Nyprodusert flytskjema er tatt med til Vassfjell for revisjon i flere omganger sammen med ansatte med god kjennskap til prosessen. Det nye flytskjemaet inneholder oppdaterte maskinnummer for den enkelte maskin i prosessen, disse maskinnummerne er hentet fra operatørsystemet i Vassfjell levert av VisionTech AS.

Ingeniørfirmaet Gummi- & Maskinteknikk AS har tidligere vært på befaring i anlegget og har i den forbindelse laget en maskinliste med oversikt over alle transportbåndene og deres konfigurasjoner. Denne informasjonen har videre blitt satt inn som innstillinger for de ulike båndene i AggFlow. Innstillingene til de andre delene i prosessen, knusere, matere og sikt, er innhentet gjennom kommunikasjon med de ansatte. Simuleringene i AggFlow ble gjort ved å bruke de innebygde mulighetene i programmet. Først ble en modell av prosessen slik den er i dag laget, deretter ble det laget såkalte «operating modes» hvor maskinkonfigurasjoner ble endret. En enkelt operating mode beskriver en endring i prosessen. Hver operating mode ble deretter prøvekjørt for å se utfallet av endringen. De ulike innstillingene ble endret med basis i

generell knuse- og sikteteori hentet fra litteratur og leverandørbrøsjyrer.

4.3 NTNUs kostnadsmodell

Kostnader for slitedeler, reparasjon og service er hentet fra QlikView og er spesifikke for knuseverket i Vassfjell. Elementer som driftsstoppfaktor, strømpris, effekter og realrente er hentet fra erfaringsdata, leverandørbrøsjyrer og annen litteratur.

De kostnadene som er presentert i Prosjektrapport 15A-92 er kostnader basert på prisnivået 15. januar 1992 og er ikke sammenlignbare med dagens prisnivå uten en prisjustering. I Vedlegg 3 ligger kostnadsindeks for anleggsmaskiner per mai 2018. Indeksen omfatter kostnader til avskrivning, renter, reparasjon og vedlikehold, drift og førerlønn (Bruland, 2013). Denne brukes for sammenligning av prisnivå i resultatene.

4.3.1 QlikView

Som økonomistyringsverktøy benytter Franzefoss seg av QlikView. Programmet er bygget opp slik at man kan se og sammenligne budsjett og faktiske kostnader i en valgfri periode over måned, kvartal eller år. De ulike anleggene i Franzefoss Pukk og de forskjellige kostnadsbærerne som finnes i anlegget kan isoleres og ses for seg selv. QlikView kan vise et overordnet totalregnskap, et mer detaljert undernivå med hovedkostnader eller et detaljert regnskap på fakturanivå. Figur 23 viser et utklipp fra QlikView hvor bæreren er dumperen i Vassfjell, en Perlini DP 705. Kostnadsdataene er hentet fra oktober 2016 og viser deler av det oppsatte regnskapet på et overordnet nivå. De totale driftskostnadene var 27 (*x1000*) NOK. Går man videre inn i regnskapselementet kan man se fordelingen av de 27 (*x1000*) NOK. Går man ned enda et til nivå vil det vises fakturabeløp for hvert enkelt element innen regnskapsgruppen.

I denne oppgaven er det hovedsakelig driftskostnadene for det stasjonære verket og kostnadene ved innleie av mobilknusing som er interessant. Disse kostnadene benyttes videre i kostnadsmodellen og til sammenligningen av stasjonært verk og mobilknusing. De neste kapitlene gir en gjennomgang av de ulike kostnadsbærerne og deres elementer definert i QlikView. Maskinnummeret for det enkelte element vil være det samme som er definert i flytskjemaet.

Sist oppdatert 24.06.2018 03:43:50

Velkommen
Hvordan bruke
Regnskap
Prognose
Sammenlign
Rapportering
Analyse

2015
2016
2017
2018
Q1
Q2
Q3
Q4
Jan
Feb
Mar
Apr
Mai
Jun
Jul
Aug
Sep
Okt
Nov
Des
Status

RESULTAT	RESULTAT DETALJERT	RESULTAT FORDELT	BILAG	BALANSE	SALDOBALANSE
Resultatrapport					
Regnskapslinje					
Andre hjelpestoffer	0	0	0	0	0
Driftskostnader	-27	0	-27	-76	0
Leie og renhold	0	0	0	0	0
Leie maskiner og inventar	-2	0	-2	-2	-2
Innleie Personell	0	0	0	0	0
Driftsmateriell og rekvisisita	-8	0	-8	-55	-55
Inventar og kontorutstyr	0	0	0	0	0
Rep og vedlikehold	-17	0	-17	-19	-19
Fremmede driftstjenester	0	0	0	0	0
Reklame	0	0	0	0	0
Reise/Representasjon	0	0	0	0	0
Honorarer	0	0	0	0	0
Bilgodtgjørelse	0	0	0	0	0
Kontorrekvisita	0	0	0	0	0
Telefon/p	0	0	0	0	0
IT-kosty	0	0	0	0	0
Egne tr	0	0	0	0	0
Konting	0	0	0	0	0
Forsikr	0	0	0	0	0
Diverss	0	0	0	0	0
Provisj	-2	0	-2	-2	0
Tap på	-8	0	-8	-42	-22
Sum ne	-17	0	-17	-17	0

Konto	Virkelig okt 16	Virkelig okt 15	Avvik	Regnskap HIÅ jan 16 - okt 16	Regnskap HIÅ jan 15 - okt 15
Sum Driftskostnader					
6311 Leie av driftsmaskiner/utstyr	-2	0	-2	-2	0
6512 Driftsmateriell	-8	0	-8	-42	-22
6613 Reparasjoner av utstyr	-17	0	-17	-17	0

Figur 23: Eksempel på regnskapsark i QlikView

4.3.1.1 Primærknuseri

Primærknuseriet er første del av det stasjonære verket og inneholder primærknuser, tre matere og to transportbånd. Tabell 4 viser de ulike elementene og maskinnummer for hver enkelt utstyrsdel som kostnadsføres i kostnadsbæreren «2000 Primærknuseri».

Tabell 4: Kostnadselementer i primærknuseri

Knuser	Mater	Sikt	Transportbånd
20KN01	20MA02		20TR01
	20MA03		20TR02
	20MA04		

Kostnader for slidedeler, reparasjon og vedlikehold og leiekusing er hentet ut fra primærknuseriet for årene 2016 og 2017.

4.3.1.2 Sekundærknuseri

Sekundærknuseriet består av en konknuser, to matere, to sikt og 10 transportbånd. Tabell 5 viser de ulike elementene og maskinnummer for hver enkelt utstyrsdel som kostnadsføres i kostnadsbæreren «2200 sekundærknuseri».

Tabell 5: Kostnadselementer i sekundærknuseri

Knuser	Mater	Sikt	Transportbånd
22KN01	22MA01	22SK03	22TR01
	22MA02	22SK01	22TR02
			22TR06
			22TR07
			22TR08
			22TR09
			22TR10
			22TR11
			22TR12
			22TR13

Kostnader for slidedeler, reparasjon og vedlikehold og leiekusing er hentet ut fra sekundærknuseriet for årene 2016 og 2017.

4.3.1.3 Tertiærknuseri

Det siste knusetrinnet består av en konknuser, fire matere og fem transportbånd. Tabell 6 viser de ulike elementene i knusetrinnet, samt de ulike maskinnummerne på de forskjellige utstyrsdelene.

Tabell 6: Kostnadselementer i tertiærknuseri

Knuser	Mater	Sikt	Transportbånd
24KN01	24MA01		24TR01
	24MA02		24TR02
	24MA03		24TR03
	24MA04		24TR04
			24TR05

Kostnader for slidedeler, reparasjon og vedlikehold og leieknusing er hentet ut fra tertiærknuseriet for årene 2016 og 2017.

4.3.1.4 Sikteanlegg

Sikteanlegget er definert som siste del av det stasjonære verket og innbefatter siloanlegget. «2800 Sikteanlegg» består av to sikt, fire transportbånd og syv siloer, maskinnummer er gitt i Tabell 7.

Tabell 7: Kostnadselementer i sikteanlegg

Knuser	Mater	Sikt	Transportbånd	Silo
		28SK02	28TR02	28SI01
		28SK03	28TR03	28SI02
			28TR04	28SI03
			28TR05	28SI04
				28SI05
				28SI06
				28SI07

Kostnader for slidedeler, samt reparasjon og vedlikehold er hentet ut fra sikteanlegget for årene 2016 og 2017.

4.3.2 Driftsjournal

I Vassfjell registreres all drift og produksjon i verket i en standard driftsjournal laget i Excel. Journalen fylles ut av de ansatte på daglig basis og samles automatisk i uke- og årsrapporter.

4.3.2.1 Utfylling av driftsjournal

En driftsjournalmal ligger tilgjengelig for de ansatte i dokumentmappene på de interne datamaskinene, malen kan ses i Figur 24. Det er operatøren i verket som fyller ut journalen.

Som figuren viser er det mye som kan registreres, deriblant:

- Klokkeslett for oppstart og slutt
- Vær og temperatur den aktuelle dagen
- Eventuelle stopp og årsaker til disse
- Antall lass med materiale inn i verket og hvilken salve det hentes fra
- Hvilke produkter som produseres

I journalen er verket delt opp i grovverk og finverk hvor grovverket (G) er definert som primær- og sekundærknuseri, mens finverket (F) er tertiærknuseri og sikteanlegg. Ved stopp i driften fylles det ut start- og stopptidspunkt for hendelsen, om det oppstod i finverket eller grovverket og en årsakskode som beskriver grunnen til driftsstoppen. Driftsjournalen ble gjort elektronisk i 2016, før dette ble journalene fylt ut for hånd på papir.

Tonnasjer for finverk og grovverk fra 2016 og 2017 er hentet ut fra driftsjournalene og benyttet videre i kostnadsmodellen.

OPPSTART	06:00	06:00	MANDAG	01.01.2018	UNE	1	VASSFJELL				INSPEKSJONSGRUNDER				0
SLUTT	16:00	16:00	OPERATØR FIN				OPERATØR GROV				KL				0
			TEMP/VAR MORSEN		% Rest						GROV				
			TEMP/VAR KVELD		%						FIN				
			STØVDEMPING		GROVVERK							SALVE			
					FINVERK							AVSTANDSALVE / MATER			
					SVIRBJØDE							HØYDEFORSKJELL SALVE / MATER			
STOPP	VERK	FIN	GROV	ÅRSÅK	ENHET	KOMMENTAR					VAR	TOMM	KOMMENTAR		
FRA	TIL	G	F								0/11		0/11		
06:00	15:00	F	08:00	Z5	PLANL_STOPP						0/35		0/35		
06:00	15:00	G	09:00	Z5	PLANL_STOPP						0/20		0/20		
											0/22		0/22		
											0/32		0/32		
											0/45		0/45		
											0/63		0/63		
											0/180		0/180		
											0/230		0/230		
											16/120		16/120		
											16/180		16/180		
											16/230		16/230		
											16/300		16/300		
											0/2		0/2		
											0/4		0/4		
											0/8		0/8		
											2/4		2/4		
											4/8		4/8		
											8/11		8/11		
											11/35		11/35		
											16/22		16/22		
											22/45		22/45		
											4/35		4/35		
											8/35		8/35		
											4/32		4/32		
											15/33		15/33		
											32/63		32/63		
											ROCKWOOL		ROCKWOOL		

PLANLAGT START	06:00	06:00	STRØMFØRBRUK		HARRING / SIKTING	
PLANLAGT SLUTT	16:00	16:00	MÅLER 1	KWh	FRA	TIL
PLANLAGT DRIFT	20:00	10:00	MÅLER 2	KWh		
MERTID DRIFT	00:00	00:00	MÅLER 3	KWh		
NETTID	20:00	10:00	MÅLER 4	KWh		
NETTID DRIFT	00:00	00:00	MÅLER 5	KWh		

PLANLAGT START	06:00	06:00	STRØMFORBRUK		HARRING / SIKTING	
PLANLAGT SLUTT	16:00	16:00	MÅLER 1	KWh	FRA	TIL
PLANLAGT DRIFT	20:00	10:00	MÅLER 2	KWh		
MERTID DRIFT	00:00	00:00	MÅLER 3	KWh		
NETTID	20:00	10:00	MÅLER 4	KWh		
NETTID DRIFT	00:00	00:00	MÅLER 5	KWh		

GROVVERKET				FINVERKET			
FRA	TIL	OPPSETT	20VEGL	VEKT 2	VEKT 3	VEKT 4	VEKT 5
06:00	16:00	0					

Figur 24: Driftsjournal, mal (Franzefoss)

4.3.3 Investeringskostnader

Ulike leverandører er kontaktet for innhenting av priser på knusere, matere, sikt og transportbånd. Leverandørene har oppgitt bruttopris for de ulike maskinene, altså generelle priser uten særavtaler. Prisene er brukt som et grunnlag for beregning av investeringskostnadene brukt i kostnadsmodellen for Vassfjell. Lia Pukkverk har nettopp investert i nytt knuseanlegg og investeringskostnadene fra dette anlegget er benyttet som avskrivningsgrunnlag i kostnadsmodellen for Vassfjell. Begge anleggene er Franzefossanlegg drevet i samme type bergart og med noenlunde lik produksjonsstørrelse.

4.4 Mobilknusing

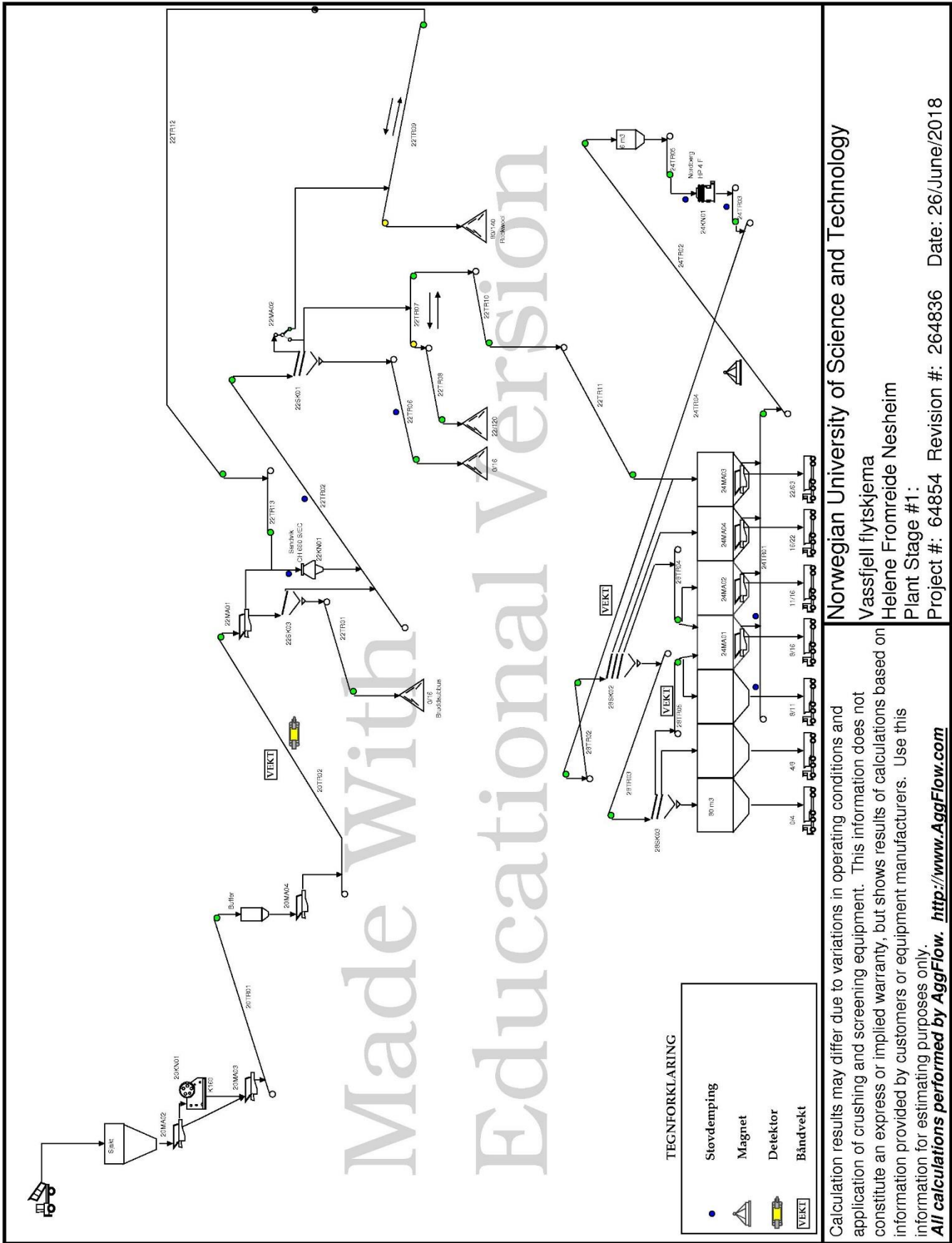
Leverandør av mobilknusing har blitt kontaktet per telefon for innhenting av informasjon om prosedyrer for leieknusing. Leiekostnader er hentet fra QlikView og tonnasje er hentet fra fakturasystemet. Informasjon til kostnadsmodellen, blant annet driftsstoppfaktor, effekter og lønnsnivå, er hentet fra erfaringsdata, litteratur og leverandørbrøsjyrer.

5 Resultat

Dette kapitlet viser oppgavens resultater. Kapitlet gir en kort forklaring på det enkelte resultat. Videre utbrodering av resultatet for hver enkelt av oppgavens problemstillinger tas i diskusjonskapitlet.

5.1 Flytskjema

Nytt og oppdatert flytskjema kan ses i Figur 25. Den nye fremstillingen er en kombinasjon av de gamle flytskjemaene for verket. Maskinnummer for hver enkelt utstyrsdel er oppdatert og lagt ved i tegningen. Det samme gjelder for nye tilskudd i utstyrsparke som ikke var inkludert i det nyeste flytskjemaet fra 2015.



Figur 25: Nytt flyttskjema laget i AggFlow, Vassfjell

5.2 NTNU kostnadsmodell

Delkapitlene tar for seg hvordan de ulike elementene i kostnadsmodellen er beregnet eller antatt. Til slutt i kapittel 5.2 vil forutsetningene og selve kostnadsmodellen presenteres.

5.2.1 Avskrivning

Tabell 8 presenterer de ulike elementene som brukes i beregningen av avskrivningstid (brukstid).

Tabell 8: Beregning av antall driftsuger per år

Avskrivningstid	
- Fastverk	30 år
- Knusere	15 år
Driftsuger/år	44
Driftsdager/uke	5
Skift/dag	2
Effektive timer/skift	6.5

Det er to endringer i de nye beregningene sammenlignet med modellen fra 1992. For pukkverket i Vassfjell brukes 6.5 effektive timer/skift istedenfor 5.5 effektive timer/skift. Avskrivningstiden er dessuten delt opp i to, fastverk og knuser, med henholdsvis 30 år og 15 år. Den gamle modellen brukte en generell avskrivningstid på 10 års. Disse endringene gir forandringer i Formel 2: Avskrivningstid (brukstid):

$$t_a = 2 \times 6.5 \times 5 \times 44 \times 30 = 85\,800 \text{ eh}$$

For stasjonært fastverk,

$$t_a = 2 \times 6.5 \times 5 \times 44 \times 15 = 42\,900 \text{ eh}$$

For stasjonær knuser og

$$t_a = \frac{1}{2} \times 2 \times 6.5 \times 5 \times 44 \times 15 = 21\,450 \text{ eh}$$

For mobilt verk.

Investeringsavgiften er fjernet fra modellen da denne er avskaffet og ikke erstattet av annen avgift.

5.2.2 Renter

Realrenten var 14.6% i kostnadsmodellen fra 1992. I de nye beregningene er det tatt utgangspunkt i realrenten de siste 20 årene mellom 1997 – 2016. Tabell 9 viser Statistisk sentralbyrå sitt registrerte realrentenivå for disse årene i tillegg til beregning av gjennomsnittlig realrente på 3.68%.

Tabell 9: Realrentenivå fra 1997-2016, modifisert etter (Statistisk sentralbyrå, u.å.)

	Nominell utlånsrente	Prisstigning ¹	Beregnet realrente ²
1997	6	2.6	3.4
1998	9.7	2.3	7.5
1999	7.6	2.3	5.3
2000	8.9	3.1	5.8
2001	8.6	3	5.7
2002	8.6	1.3	7.4
2003	4.7	2.5	2.2
2004	4	0.4	3.6
2005	4	1.6	2.4
2006	4.7	2.3	2.4
2007	6.7	0.8	5.9
2008	7.3	3.8	3.5
2009	4.3	2.1	2.2
2010	4.6	2.5	2.1
2011	5	1.2	3.8
2012	4.7	0.8	3.9
2013	4.7	2.1	2.6
2014	4.4	2	2.4
2015	3.6	2.1	1.5
2016	3.5	3.6	-0.1
¹ Prisstigning er satt lik prosentvis vekst i konsumprisindeksen fra året før.			
² Realrente er definert som utlånsrente minus prisstigning.			
	Sum		73.50
	Gj.snitt		3.68

5.2.3 Reparasjon og vedlikeholdskostnader

Tabell 10 viser den produserte tonnasje i det stasjonære verket i Vassfjell. Tallene er hentet fra driftsjournalen som føres i anlegget. Verket er delt opp i grovverk (primærknuseri og sekundærknuseri) og finverk (tertiærknuseri og sikteanlegg). Tonnasjen gjennom finverket er lavere enn gjennom grovverket fordi det tas ut ulike produkter langs hele produksjonslinjen.

Tabell 10: Produsert tonnasje stasjonært verk, Vassfjell

Tonnasje, driftsjournal		
	Grovverk	Finverk
2016	423 417	296 372
2017	469 313	303 590

Tonnasjene i tabellen er benyttet som grunnlag for beregning av reparasjon- og vedlikeholdskostnader per tonn i anlegget. Tabellen på neste side, Tabell 11, viser reparasjon- og vedlikeholdskostnader for hver enkelt kostnadsbærer. Kostnadene er hentet fra QlikView for produksjonsårene 2016 og 2017. For beregning av kr/tonn er kostnadene dividert på tonnasje fra Tabell 10. Det er den gjennomsnittlige kostnaden per tonn som benyttes videre i kostnadsmodellen.

Tabell 11: Reparasjon- og vedlikeholdskostnader, Vassfjell

Reparasjon- og vedlikeholdskostnader		
Primær	Kr	Kr/tonn
2016	135 000	0.32
2017	191 000	0.41
Gj.snitt kr/tonn primær		0.36
Sekundær	Kr	Kr/tonn
2016	338 000	0.80
2017	165 000	0.35
Gj.snitt kr/tonn sekundær		0.57
Tertiær	Kr	Kr/tonn
2016	44 000	0.15
2017	64 000	0.21
Gj.snitt kr/tonn tertiær		0.18
Sikteanlegg	Kr	Kr/tonn
2016	107 000	0.36
2017	215 000	0.71
Gj.snitt kr/tonn sikteanlegg		0.53

5.2.4 Driftsstopp

Som i 1992-modellen antas det også i den nye modellen at reparasjonskostnader utgjør 50% av de totale rep. - og vedlikeholdskostnadene. Driftsstoppfaktor for stasjonært verk er 0.1.

5.2.5 Slitedeler

Tabell 12 viser slitedelskostnadene for hver enkelt kostnadsbærer i Vassfjell for produksjonsårene 2016 og 2017. Kostnadene er hentet fra QlikView. For beregning av kr/tonn er kostnadene dividert på tonnasje fra Tabell 10. Det er den gjennomsnittlige kostnaden per tonn som benyttes videre i kostnadsmodellen.

Tabell 12: Slitedelskostnader, Vassfjell

Kostnad slitedeler		
Primær	Kr	Kr/tonn
2016	362 000	0.85
2017	644 000	1.37
Gj.snitt kr/tonn primær		1.11
Sekundær	Kr	Kr/tonn
2016	995 000	2.35
2017	358 000	0.76
Gj.snitt kr/tonn sekundær		1.56
Tertiær	Kr	Kr/tonn
2016	45 000	0.15
2017	369 000	1.22
Gj.snitt kr/tonn tertiær		0.68
Sikteanlegg	Kr	Kr/tonn
2016	571 000	1.93
2017	838 000	2.76
Gj.snitt kr/tonn sikteanlegg		2.34

5.2.6 Elektrisk kraft

Tabell 13 viser de ulike elementene som til sammen definerer strømprisen. Tabelloppsettet er likt det i Tabell 2, men med oppdaterte tall for industrien. Basert på tall hentet fra strømmålerne i Vassfjell i 2016, er det årlige strømforbruket beregnet å ligge rundt 1 150 000 kWh. For å fastsette prisene på de ulike elementene er det hentet erfaringstall fra Bondkall, et av Franzefoss' anlegg på Østlandet.

Tabell 13: Strømprisens ulike elementer for industri

Prisledd	Øre per kWh
Kraftpris	28.00
+ nettariff (fastledd)	0.03
+ nettariff (energiledd)	3.00
= pris eks. avgifter	55.03
+ forbruksavgift	48.00
= pris eks. mva	103.03
+ 25% mva	25.80
= pris per kilowatttime	128.83

I 1992 var ikke nettleien skilt ut fra kraftprisen slik den er i dag. Ved å lage en oversikt som i Tabell 13 er det enkelt å holde orden på de elementer som er medberegnet i modellen. Tabell 14 viser en oversikt over knuseverksutstyret i Vassfjell og den installerte effekten per maskin. Knuseverksutstyr med modellnavn i parentes indikerer at modellen er antatt basert på tilgjengelige informasjon. Installert effekt for knusere, matere og sikt er hentet fra leverandørbrøsjyrer, mens effekten for transportbånd er hentet fra båndoversikten som er produsert av Ingeniørfirmaet Gummi- og Maskinteknikk AS.

Tabell 14: Installert effekt for knuseverksutstyr, Vassfjell

Knuseverksutstyr	Installert effekt
K160 (C150)	200 kW
CH660	315 kW
HP4F	315 kW
Matere	
- Primærmater (VF661-2V)	30 kW
- Andre matere (VF561-2V)	15 kW x7
Sikt	
- Horisontal (LH2473-2)	55 kW
- Skrå 1-dekk (CVB2661-1)	22 kW
- Skrå 2-dekk (RF3061-2)	60 kW
- Skrå 3-dekk (CVB2661-3)	30 kW
Transportbånd	316 kW
TOTAL	1448 kW

Det er den totale effekten i Tabell 14 som benyttes videre i kostnadsmodellen.

En generell oversikt med forventet antatt belastning på de ulike knuserne er gitt i større intervaller i Tabell 1. Tabell 15 viser antatt belastning for den enkelte knuser i Vassfjell.

Tallene er basert på erfaringer i verket og er et anslag.

Tabell 15: Antatt belastning for knuserne, Vassfjell

Antatt belastning	
Grovknuser	75%
Mellomknuser	75%
Finknuser	70%
Gj.snitt	73.33%

Det er den gjennomsnittlige belastningen som benyttes videre i kostnadsmodellen.

5.2.7 Andre kostnader

Lønnskostnadene i 1992-modellen er utdatert og det opereres med en annen andel sosiale utgifter. I den nye modellen brukes gjennomsnittstimelønn for en anleggsarbeider i 2018 som ligger på 215 kr, den gamle modellen brukte en timelønn på 100 kr. De sosiale utgiftene er et tillegg på ca. 45% i dag i motsetning til 50% i den eldre modellen.

5.2.8 Forutsetninger

Tabell 16 har samlet de gjennomgåtte elementene i dette kapittelet. Tabellen viser de forutsetninger som er satt ved videre beregninger.

Tabell 16: Forutsetninger for kostnadsmodell

Investeringsavgift	Eksisterer ikke lenger
Realrente	3.68 %
Avskrivningstid	
- antall år stasjonært verk, generell	10 år
- antall år stasjonært fastverk, diff.	30 år
- antall år stasjonær knuser, diff.	15 år
- brukstid stasjonært verk, generell	24 200 eh
- brukstid stasjonært fastverk, diff.	85 800 eh
- brukstid stasjonær knuser, diff.	42 900 eh
Driftsstoppfaktor	
- stasjonære anlegg	0.10
Elektrisk kraft	
- installert effekt	1448 kW
- utnyttelse av motor (gj.snitt)	0.7333
- strømpris	128.03 øre/kWh
Lønn	
- antall personer	3 stk
- timebetaling	215 kr/time
- effektive timer per skift (7.5t)	6.5 eh
- sosiale kostnader	45 %

5.2.9 Kostnadsmodell 10 år avskrivning

Franzefoss bruker lineær avskrivning over 10 år som basis ved investering i knuseverksutstyr.

Tabell 17 gir en oversikt over investering- og riggekostnader ved anlegget i Vassfjell.

Tabell 17: Kostnader stasjonært knuseverk, Vassfjell

UTSTYR	ANT.	ENH.	BELØP
Primærknuseri	1		16 358 025
Sekundærknuseri	1		31 358 025
Tertiærknuseri	1		26 358 025
Sum			74 074 075
Montering	20	%	14 814 815
El. Installasjoner	15	%	11 111 111
Avskrivningsgrunnlag			100 000 001
Kapasitet			400
		t/eh	

Som i modellen fra 1992 er det antatt at montering vil utgjøre et påslag på 20%, mens opprigg av elektriske installasjoner vil være 15%. Tallene for kostnadsbærerene er funnet ved å bruke en totalsum for hele verket på 100 millioner, dette tallet er basert på de totale kostnadene for det nye anlegget i Lia Pukkverk. Kapasiteten gjennom verket er satt til 400 t/eh. Dette er et gjennomsnitt ettersom kapasiteten vil variere med de ulike produksjonsmulighetene i anlegget.

Avskrivningsgrunnlag og kapasitet blir brukt til videre beregninger i Tabell 18. Tabellen viser den endelige kostnadsmodellen med 10 års avskrivningstid. 10 års avskrivning tilsvarer 24 200 eh i brukstid og det er disse tallene som er brukt i beregningen av avskrivning og renter. Alle elementene i Tabell 18 er regnet ut ved hjelp av formlene presentert i kapittel 3.2 «NTNU kostnadsmodell».

Tabell 18: Kostnadsmodell med 10 år avskrivningstid

Kostnadsmodell				
<i>[kr/tonn]</i>	Fastverk	Knuser		Total
Avskrivning	7.75	2.58		10.33
Renter	0.95	0.32		1.27
	Primær	Sekundær	Tertiær	Total
Rep. og vedlikehold	0.36	0.57	0.71	1.65
Slitedeler	1.11	1.56	3.03	5.70
Driftsstopp				0.08
Elektrisk kraft				3.40
Lønn				2.70
SUM	7.40	8.06	9.67	25.13

Primærkostnaden er funnet ved:

$$\frac{1}{3} \times (10.33 + 1.27) + 0.36 + 1.11 + \frac{1}{3} \times (0.08 + 3.40 + 2.70) = 7.40 \text{ kr/tonn}$$

Sekundærkostnaden er funnet ved:

$$\frac{1}{3} \times (10.33 + 1.27) + 0.57 + 1.56 + \frac{1}{3} \times (0.08 + 3.40 + 2.70) = 8.06 \text{ kr/tonn}$$

Tertiærkostnaden er funnet ved:

$$\frac{1}{3} \times (10.33 + 1.27) + 0.71 + 3.03 + \frac{1}{3} \times (0.08 + 3.40 + 2.70) = 9.67 \text{ kr/tonn}$$

5.2.10 Kostnadsmodell 15 og 30 år avskrivning

Fordi fastverk og knusemaskiner ikke nødvendigvis har samme avskrivningstid kan det være hensiktsmessig å dele disse opp. Tabell 19 viser hvordan det i oppgaven er valgt å dele opp fastverk og knusemaskiner etter ulik avskrivningstid. Den totale investeringskostnaden på 100 millioner er delt opp i fastverk, knusere og tre knusetrinnen. Oppdelingen er basert på erfaringstall og det generelle prisnivået på knuseutstyr.

Tabell 19: Oppdeling av kostnad og avskrivning for hhv. fastverk og knusere, Vassfjell

Fastverk	Inv.	Avskrivningstid	Knuser	Inv.	Avskrivningstid	Totalinvestering
Primærknuseri	20 mill.	30 år	K1	5 mill.	15 år	25 mill.
Sekundærknuseri	30 mill.	30 år	K2	10 mill.	15 år	40 mill.
Tertiærknuseri	25 mill.	30 år	K3	10 mill.	15 år	35 mill.
	75			25		100

Tabell 20 gir en oversikt over investering- og riggekostnader for fastverket i Vassfjell. Av totalt 100 millioner i investeringskostnader, står fastverk for 75 millioner fordelt som vist i tabellen.

Tabell 20: Kostnader fastverk, Vassfjell

UTSTYR	ANT.	ENH.	BELØP
Primærknuseri	1		13 518 518
Sekundærknuseri	1		23 518 518
Tertiærknuseri	1		18 518 518
Sum			55 555 554
Montering	20	%	11 111 111
El. Installasjoner	15	%	8 333 333
Avskrivningsgrunnlag			74 999 998
Kapasitet			t/eh 400

Tabell 21 viser kostnadsfordelingen for knuserne i verket. Totalt beregnes kostnadene for knuserne å være 25 millioner av den totale investeringskostnaden.

Tabell 21: Kostnader knusere, Vassfjell

UTSTYR	ANT.	ENH.	BELØP
Primærknuseri	1		2 839 507
Sekundærknuseri	1		7 839 507
Tertiærknuseri	1		7 839 507
Sum			18 518 521
Montering	20	%	3 703 704
El. Installasjoner	15	%	2 777 778
Avskrivningsgrunnlag			25 000 003
Kapasitet			t/eh 400

Tabell 22 viser den endelige kostnadsmodellen med 30 års avskrivningstid for fastverk og 15 års avskrivningstid for knusere. 30 års avskrivning tilsvarer 85 800 eh i brukstid, mens 15 år tilsvarer 42 900 eh. Det er disse tallene som er brukt i beregningen av avskrivning og renter. Alle elementene i Tabell 22 er regnet ut ved hjelp av formlene presentert i kapittel 3.2 «NTNU kostnadsmodell».

Tabell 22: Kostnadsmodell med 15 og 30 år avskrivning

Kostnadsmodell				
[kr/tonn]	Fastverk	Knuser		Total
Avskrivning	2.19	1.46		3.64
Renter	0.80	0.27		1.07
	Primær	Sekundær	Tertiær	Total
Rep. og vedlikehold	0.36	0.57	0.71	1.65
Slitedeler	1.11	1.56	3.03	5.70
Driftsstopp				0.08
Elektrisk kraft				3.40
Lønn				2.70
SUM	5.11	5.76	7.37	18.24

Primærkostnaden er funnet ved:

$$\frac{1}{3} \times (3.64 + 1.07) + 0.36 + 1.11 + \frac{1}{3} \times (0.08 + 3.40 + 2.70) = 5.11 \text{ kr/tonn}$$

Sekundærkostnaden er funnet ved:

$$\frac{1}{3} \times (3.64 + 1.07) + 0.36 + 1.11 + \frac{1}{3} \times (0.08 + 3.40 + 2.70) = 5.76 \text{ kr/tonn}$$

Tertiærkostnaden er funnet ved:

$$\frac{1}{3} \times (3.64 + 1.07) + 0.36 + 1.11 + \frac{1}{3} \times (0.08 + 3.40 + 2.70) = 7.37 \text{ kr/tonn}$$

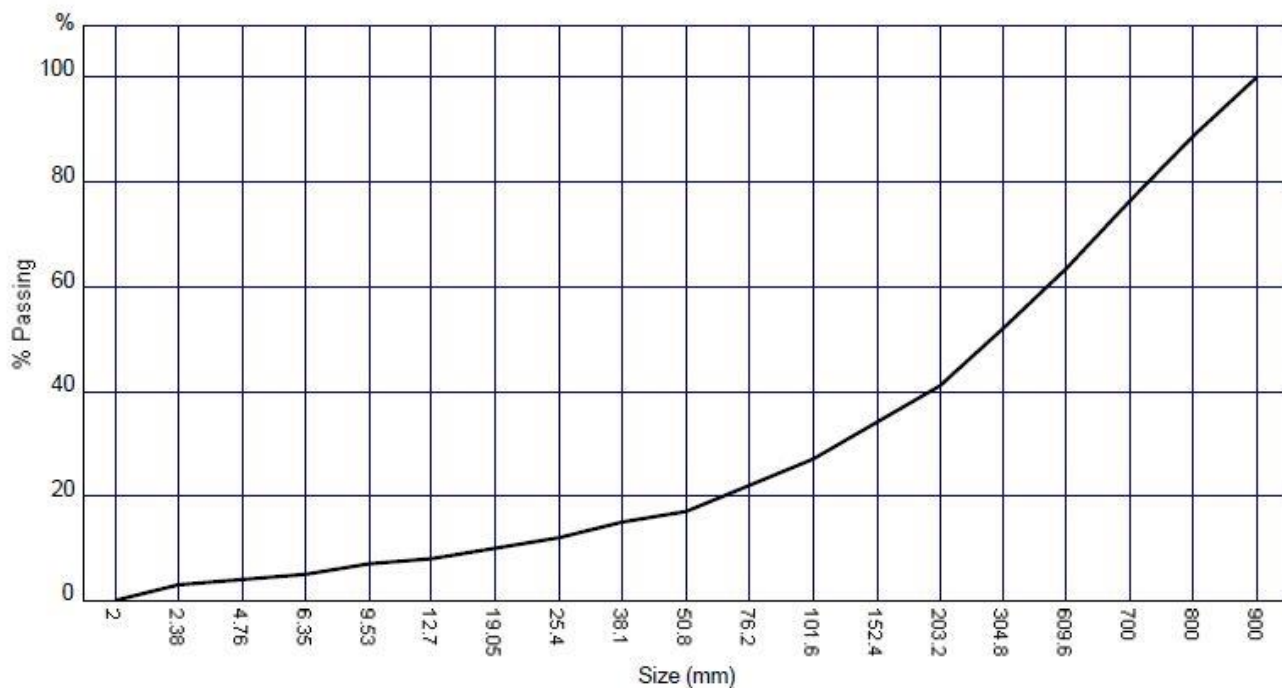
5.3 Valg av prosess

Veidekke har gjennomført en densitetstest på prøver tatt i Vassfjell. Prøvene ble utført 03.04.2017 med stein tatt ut 31.03.2017. Tabell 23 viser spesifikk densitet for disse prøvene.

Tabell 23: Resultater densitetstest, Vassfjell

Prøve 1	Prøve 2	Gjennomsnitt
3.072 g/cm ³	3.066 g/cm ³	3.069 g/cm ³

I AggFlow finnes det flere forhåndsdefinerte bergarter og kornfordelingskurver for materialet som går inn i prosessen. Ingen av disse var tilfredsstillende og det ble laget en egen masse for Vassfjell, denne kan ses i Figur 26. Gjennomsnittstettheten i Tabell 23 på 3.069 g/cm³ ble lagt inn som spesifikk tetthet, mens bulk tetthet ble satt til 1.6. I Vassfjell opereres det normalt med en 0 – 900 mm sprengrøys, men det finnes ingen analyser av sprengrøysen. I Franzefoss' anlegg Lierskogen på Østlandet har de gjort en slik analyse av sprengrøysen. I Lierskogen opereres det med en 0 – 700 mm sprengrøys (se Vedlegg 4). 0 – 900 mm-kornfordelingskurven i Figur 26 er en forskjøvet kurve basert på materialet i 0 – 700 mm-røysen. I Lierskogen benyttes fin gradering, mens det i Vassfjell er brukt medium gradering med noe mindre finstoff.



Figur 26: Kornfordelingskurve sprengrøys, Vassfjell

Med en bulk tetthet på 1.6 tonn/m^3 og en silo med størrelse 80 m^3 vil den totale kapasiteten på siloen være:

$$80 \text{ m}^3 \times 1.6 \frac{\text{tonn}}{\text{m}^3} = 128 \text{ tonn}$$

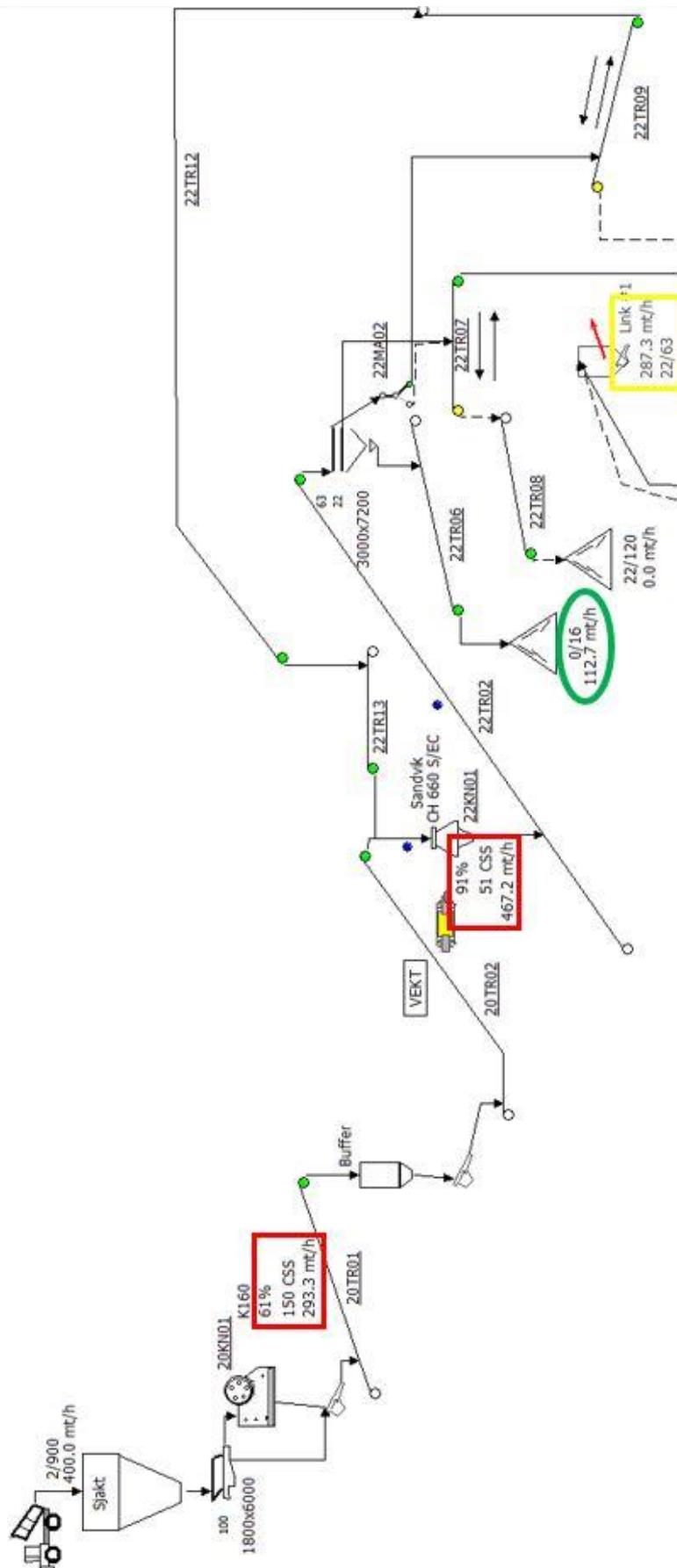
Bufferen over tertiærknuseren har en størrelse på 6 m^3 og vil dermed ha en kapasitet på:

$$6 \text{ m}^3 \times 1.6 \frac{\text{tonn}}{\text{m}^3} = 9.6 \text{ tonn}$$

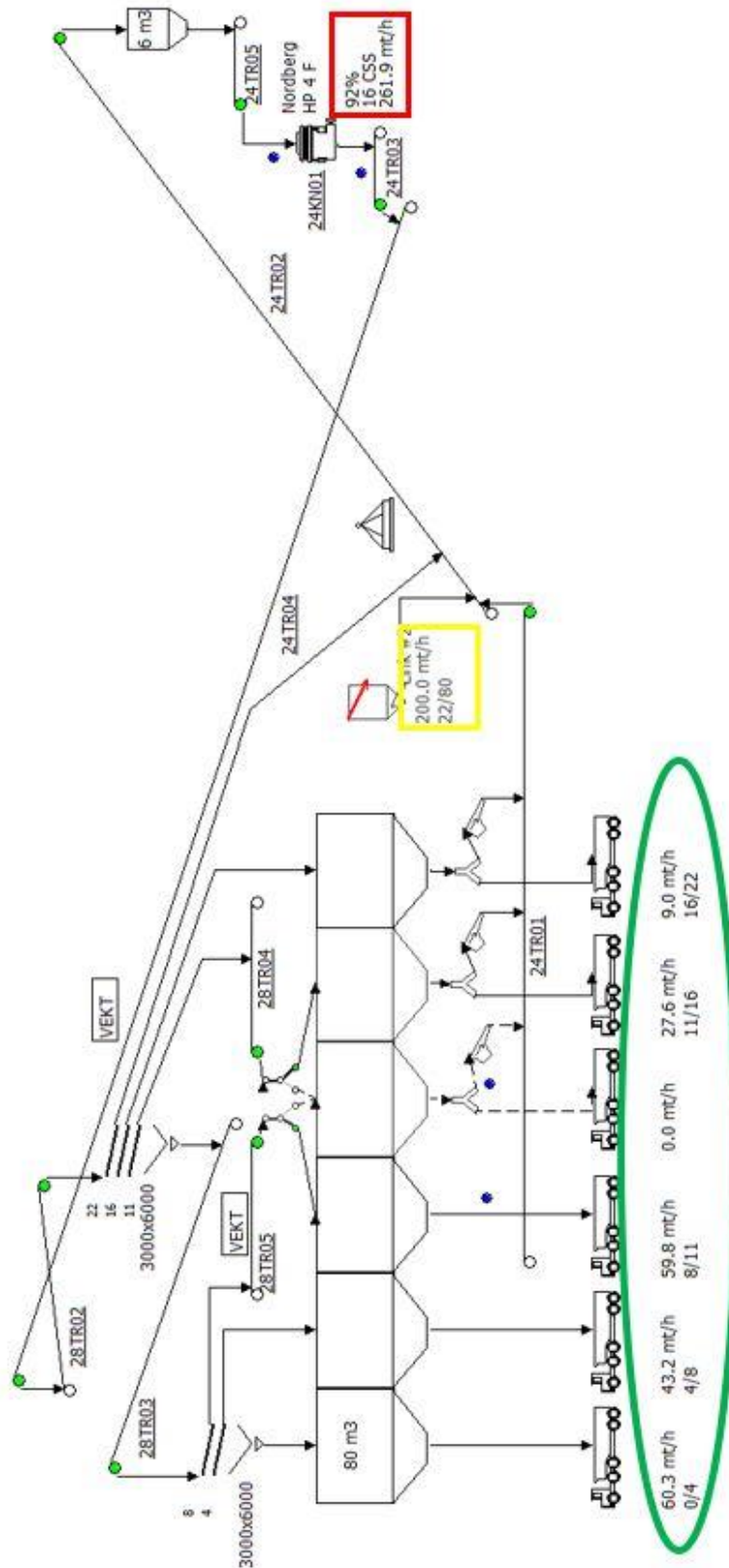
5.3.1 Standarddrift, lukket krets

Figur 27 og Figur 28 viser AggFlow-analysen for normal drift i Vassfjell med en kapasitet på 400 tonn i timen. Lukket krets på sekundært knusestrinn med retur på +63-fraksjonen er den vanligste prosessflyten i anlegget. Figurene nedenfor viser prosentvis utnyttelse, CSS og tonnasje gjennom hver enkelt knuser. Disse tallene er markert med røde bokser.

Figurene viser produktstørrelser og antall tonn produsert per time av det enkelte produkt, disse tallene er markert med en grønn sirkel. Den gule boksen indikerer siloen mellom sekundært og tertiært knusestrinn. I boksen står tonnasje inn i siloen på sekundærsiden og tonnasje ut av knuseren på tertiærsiden. De ulike dimensjonene for sikt, sikteduk og matere står ved siden av hver enkelt maskin. Transportbåndene er konfigurert basert på informasjon fra båndoversikten for Vassfjell. Masseflyt er oppgitt på de steder hvor det er hensiktsmessig.



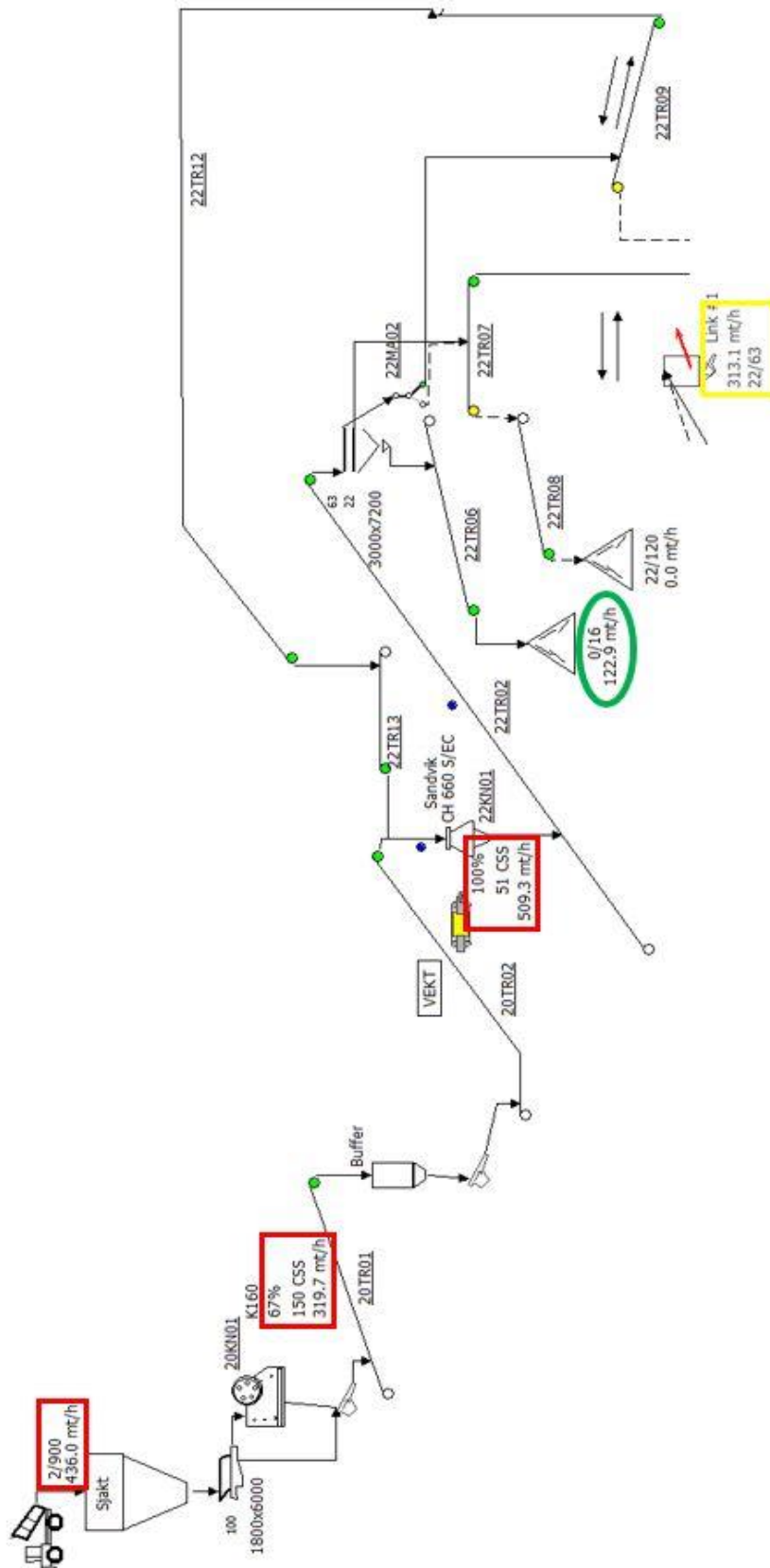
Figur 27: Standarddrift trinn 1 og 2, lukket krets



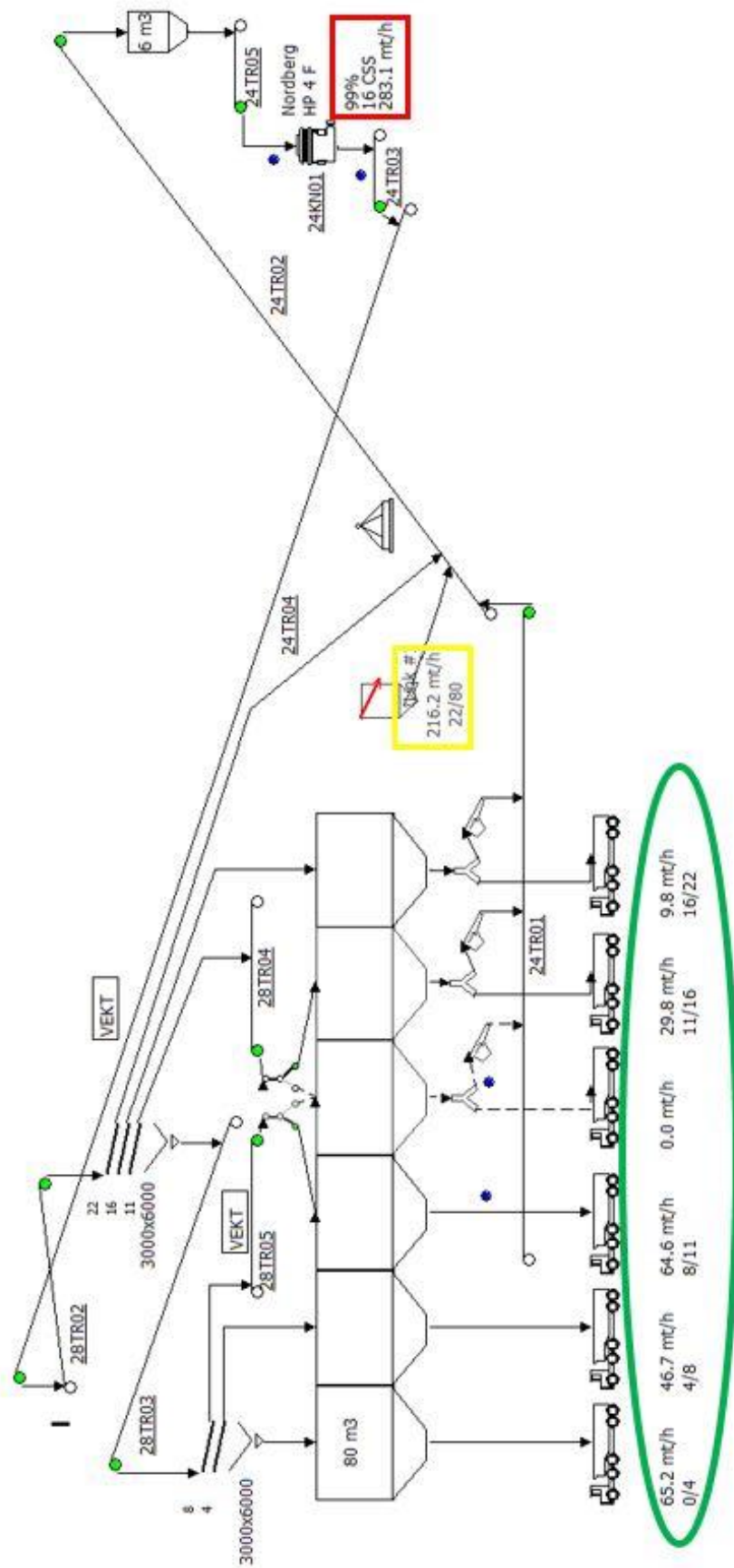
Figur 28: Standarddrift trinn 3, lukket krets

5.3.2 Maksimert drift

Figur 29 og Figur 30 viser standarddriften, men med maksimerte kapasiteter gjennom verket.

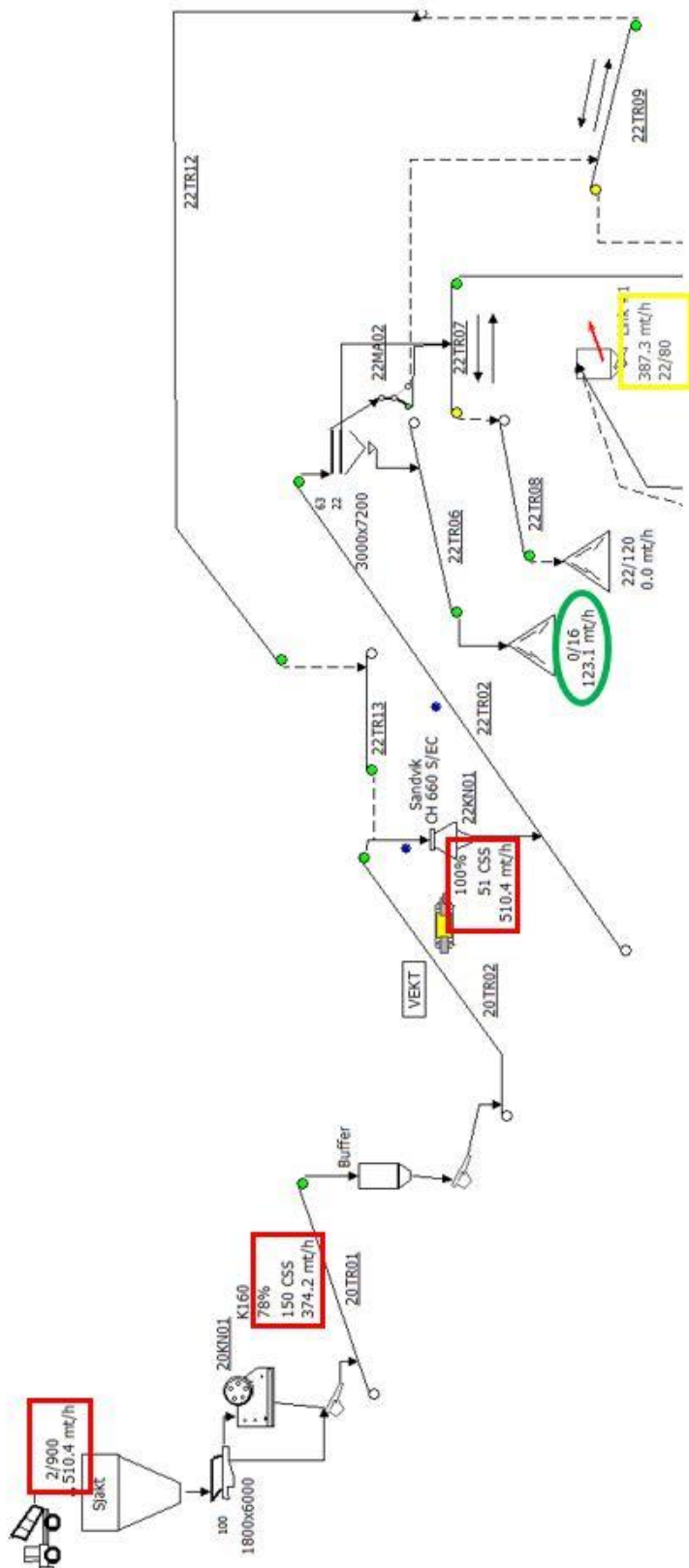


Figur 29: Maksimert drift trinn 1 og 2, lukket krets

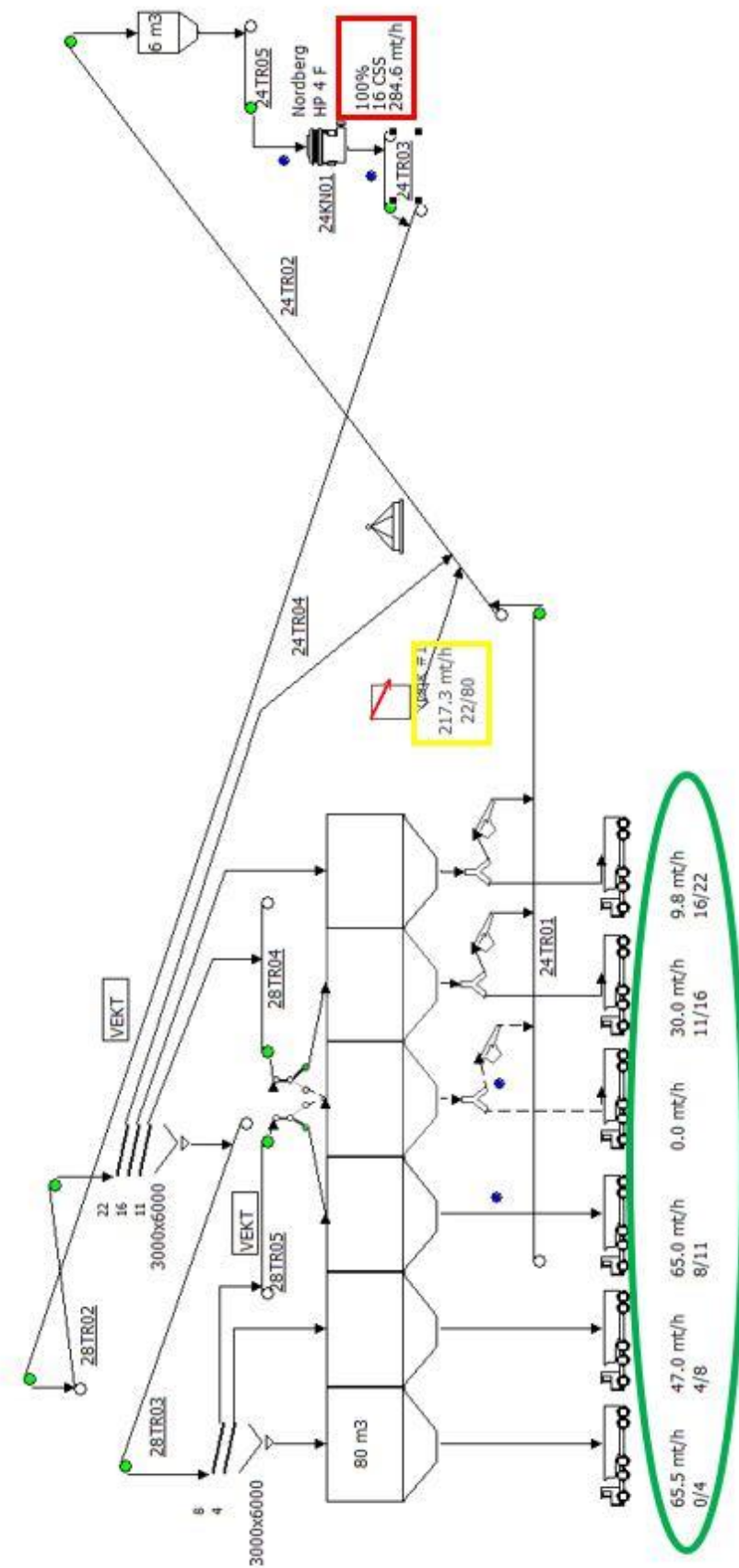


Figur 30: Maksimert drift trinn 3, lukket krets

Figur 31 og Figur 32 viser maksimert drift gjennom verket med åpen krets istedenfor lukket.

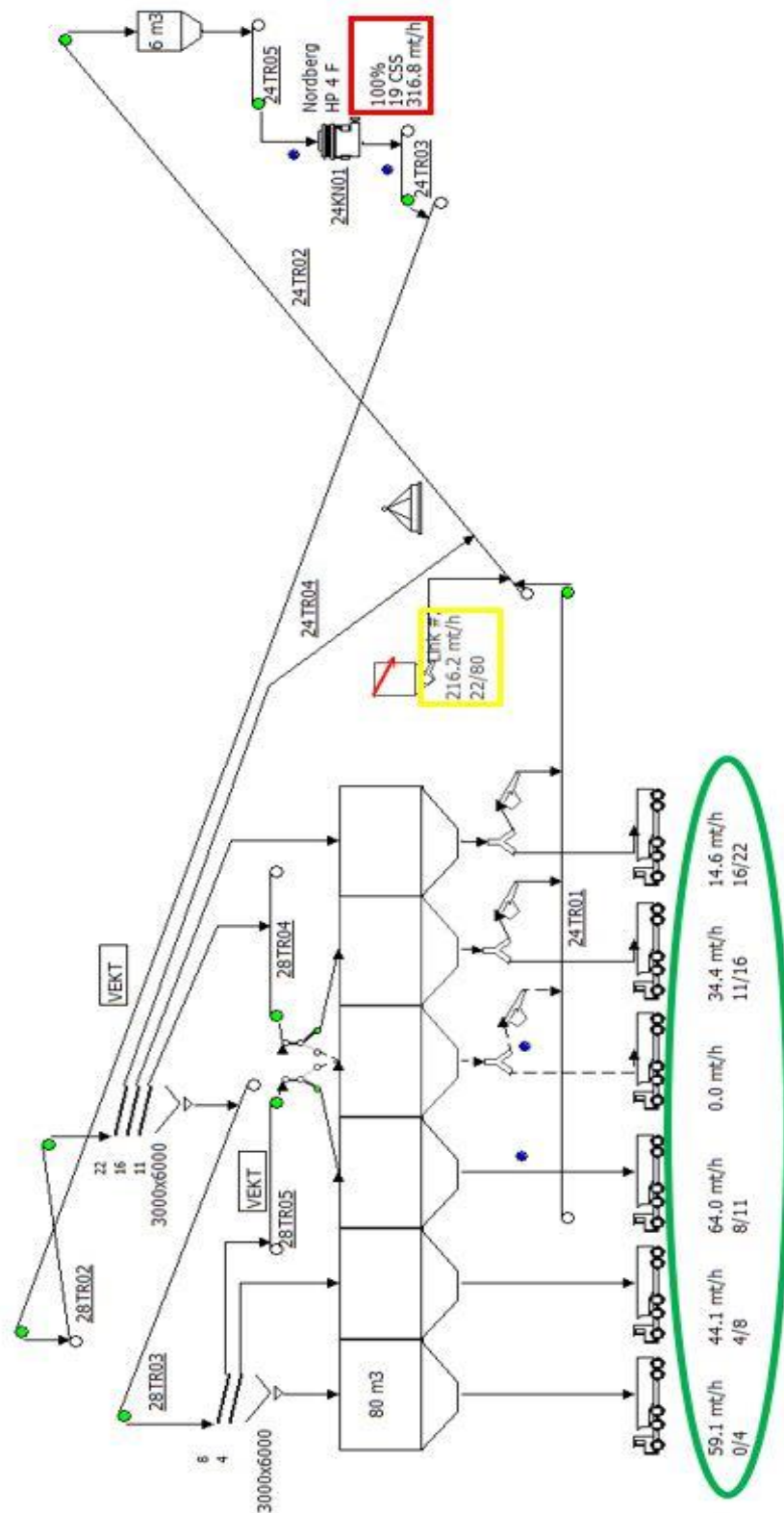


Figur 31: Maksimert drift trinn 1 og 2, åpen krets



Figur 32: Maksimert drift trinn 3, åpen krets

Figur 33 viser maksimert drift gjennom tertiærverket når CSS på HP4-knuseren endres fra 16 mm til 19 mm.

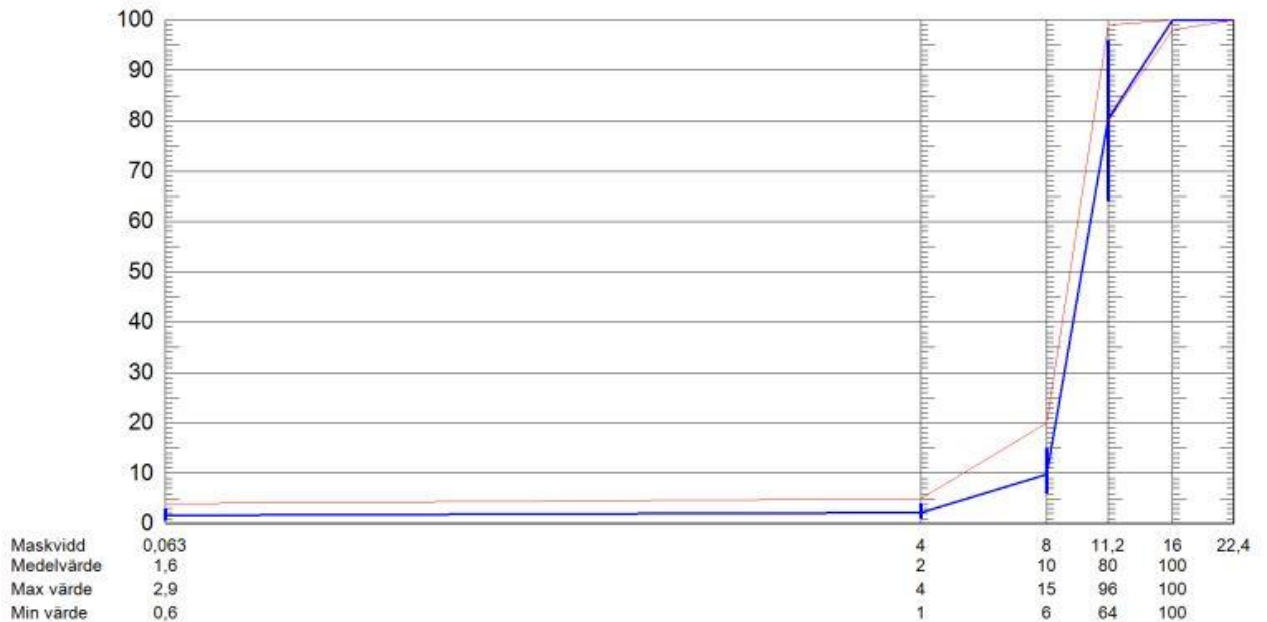


Figur 33: Maksimert trinn 3, endret CSS fra 16 til 19 mm

5.3.3 Kornfordelingskurver

Figur 34 viser den faktiske kornfordelingskurven til tilslagsproduktet 8/11 i Vassfjell.

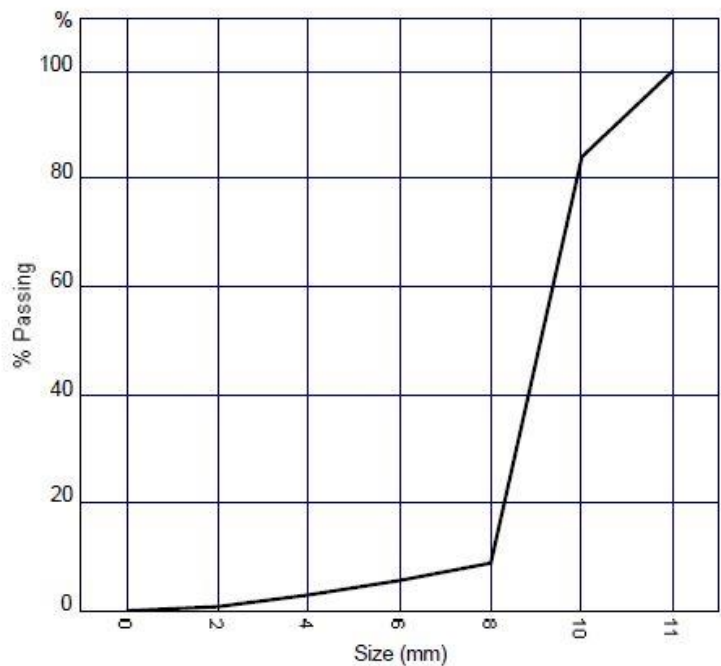
Kornfordelingskurven er laget ved hjelp av laboratorietester.



Figur 34: Kornfordelingskurven til 8/11 i Vassfjell

Figur 35 viser den AggFlow-beregnete kornfordelingskurven til 8/11.

Grading	% Pass	% Ret.	TPH
11	100.0	0	0
10	84.1	15.9	9.5
8	8.8	75.2	45.0
6	5.6	3.2	1.9
4	2.9	2.7	1.6
2	0.8	2.2	1.3
0	0.0	0.8	0.45
Total	--	100.0	59.8



Figur 35: Kornfordelingskurve 8/11 i AggFlow

5.4 Mobilknusing

Tabell 24 viser registrert tonnasje fra fakturert mobilknusing og tonnasje registrert i driftsjournalen for stasjonært verk. Tallene gjelder for produksjonsårene 2016 og 2017. Grovverket defineres av primær- og sekundærknuseri, mens finverk er tertiærknuseri og sikteanlegg.

Tabell 24: Produsert tonnasje mobilknusing og stasjonært verk, Vassfjell

	Tonnasje, mobilknusing		Tonnasje, driftsjournal	
	Grovknust	Finverk	Grovverk	
2016	250 589	296 372	423 417	
2017	537 220	303 590	469 313	

I 2017 ble det produsert 0 – 120 mm, 0 – 250 mm og 0 – 300 mm med mobilknusing, mens det i 2017 ble produsert 0 – 20 mm finknusing i tillegg. Gjennomsnittlig tonnasje fra mobilknusing for de to årene er 393 905 tonn per år. Dette gir en tonnasje per time lik:

$$44 \text{ uker} \times 5 \frac{\text{dager}}{\text{uke}} \times 1 \frac{\text{skift}}{\text{dag}} \times 6.5 \frac{\text{eh}}{\text{skift}} \times X = 393\,905 \text{ tonn}$$

$$X \approx 276 \text{ tonn/eh}$$

Kapasiteten per time blir brukt videre i kostnadsmodellen for mobilknusing.

Tabell 25 viser forutsetningene for kostnadsmodellen. Den er relativt lik Tabell 16, men det er gjort endringer for å tilpasse forutsetningene til bruken av mobilknuser og ikke stasjonært verk. Blant annet er driftsstoppfaktoren høyere, antall ansatte er lavere og det er lagt til et påslag på 50% på reparasjon, vedlikehold og slitedeler.

Tabell 25: Forutsetninger for kostnadsmodell, mobilknusing

Investeringsavgift	Eksisterer ikke lenger
Realrente	3.68 %
Avskrivningstid	
- antall år mobilknuser	15 år
- brukstid mobilknuser	21 450 eh
Reparasjon, service og slidedeler	
- påslag for mobile anlegg	50%
Driftsstoppfaktor	
- mobile anlegg	0.15
Elektrisk kraft	
- installert effekt	224 kW
- utnyttelse av motor (gj.snitt)	0.7333
- strømpris	128.03 øre/kWh
Lønn	
- antall personer	2 stk
- timebetaling	215 kr/time
- effektive timer per skift (7.5t)	6.5 eh
- sosiale kostnader	45 %

Kostnadene for slidedeler og reparasjons- og vedlikeholdskostnader beregnes med grunnlag i de tilsvarende kostnadene for primærknuseriet i det stasjonære verket. Det legges til et påslag på 50% og kostnadene blir som følger:

Slidedeler for mobilknuser:

$$1.1 \frac{\text{kr}}{\text{tonn}} + (0.5 \times 1.1) = 1.67 \frac{\text{kr}}{\text{tonn}}$$

Reparasjons- og vedlikeholdskostnader for mobilknuser:

$$0.36 \frac{\text{kr}}{\text{tonn}} + (0.5 \times 0.36) = 0.54 \frac{\text{kr}}{\text{tonn}}$$

Tabell 26 gir en oversikt over de totale investeringskostnadene for et mobilt knuseverk, dette inkluderer montering og elektriske installasjoner.

Tabell 26: Kostnader mobilt knuseverk, Vassfjell

UTSTYR	ANT.	ENH.	BELØP
Mobilknuser grov	1		4 500 000
Hjullaster	1		2 500 000
Gravemaskin	1		2 500 000
Sum			7 000 000
Montering	5	%	350 000
El. Installasjoner	10	%	700 000
Sum investeringer ekskl. Rigg			8 050 000
Investeringsavgift		%	-
Avskrivningsgrunnlag			8 050 000
Kapasitet		t/eh	276

Tabell 27 viser den endelige kostnadsmodellen for mobilknusing. Gravemaskin og hjullaster er tatt med som investeringer og er derfor en del av avskrivningsgrunnlaget, men de har ikke egne poster på reparasjon- og vedlikehold eller slitedeler.

Tabell 27: Kostnadsmodell, mobilknusing

Kostnadsmodell	
<i>[kr/tonn]</i>	Knuser
Avskrivning	1.36
Renter	0.25
Rep. og vedlikehold	0.54
Slitedeler	1.67
Driftsstopp	0.04
Elektrisk kraft	0.94
Lønn	2.61
SUM	7.40
+ hjullaster	9.77
SUM	17.17

Nederst i Tabell 27 er det tatt med et kostnadstall for hjullaster. Ved lasting av røys med $d_{50}=350$ mm på en hjullaster med kapasitet på 40 tonn, oppgir Sandvik, Digre og Malvik (1999) en tonnkostnad på 3.15 kr. Justert for prisnivå januar 1992 til mai 2018, vil denne kostnaden i dag ligge på 9.77 kr/tonn. Det er denne kostnaden som er lagt ved i modellen.

Tabell 28 viser totale leiekostnader til mobilknusing for produksjonsårene 2016 og 2017. Leiekostnadene inkluderer alle kostnadene ved innleie av knusetjenester: riggepost, produksjon av ulike fraksjoner, hjullaster, gravemaskin og operatører.

Tabell 28: Leiekostnader mobilknusing [kr], Vassfjell

Kostnad leieknusing	
2016	5 279 000
2017	12 381 000

Tabell 29 viser leiekostnadene per tonn ved mobilknusing. Kostnaden er en generell pris og tar ikke hensyn til hvilken fraksjon som er laget, dette er en gjennomsnittlig pris for alle mobilknuseproduktene.

Tabell 29: Leiekostnader mobilknusing [kr/tonn], Vassfjell

Kostnader per tonn	
2016	21.07
2017	23.05
Gj.snitt	22.06

Leveringstid på en mobilknuser fra leverandør ligger på 2 – 3 dager avhengig av pågang hos bedriften. Selve riggetiden i bruddet vil, for en LT106-mobilknuser, være cirka 1 time.

6 Diskusjon

Diskusjonskapittelet tar for seg oppgavens resultater i en mer omfattende grad. Det diskuteres rundt valg som er gjort og som kan ha påvirket resultatene. I tillegg vurderes gyldigheten til de svar som er funnet.

6.1 Flytskjema

Det ble gjort en vurdering av hvorvidt flytskjema og senere prosessanalyser skulle gjøres i AggFlow, Metso Bruno eller et annet simuleringstøyt. Valget falt til slutt på AggFlow i samråd med Franzefoss. Programmet ble valgt som visualiserings- og simuleringstøyt fordi det er brukervennlig og har et utstørsarkiv uavhengig av leverandør. Andre tilsvarende simuleringstøyt, eksempelvis Bruno, er laget av en utstørsleverandør og baserer seg derfor på eget utstyr. I nevnte Bruno må dermed alt utstyr som ikke kommer fra Metso legges inn manuelt i systemet. Maskinparken i Vassfjell er hovedsakelig Metsobasert, men har også innslag av andre utstørsleverandører, hvilket gjør AggFlow til et godt valg av simuleringstøyt. Dessuten har Franzefoss Pukk en bruker i Bruno og tidligere flytskjema er laget i dette programmet. Etersom denne oppgaven benytter AggFlow vil det være mulig å bruke tallene fra denne oppgaven til en resultatsammenligning av tilsvarende prosessanalyser gjort i Bruno. Dette vil sikre et større data- og vurderingsgrunnlag.

Å lage et nytt flytskjema er en krevende prosess, særlig dersom det gamle flytskjemaet er gammelt og utdatert. I et sånt tilfelle vil en god maskinliste være alfa omega. I Vassfjell var maskinlisten mangelfull og utdatert i forhold til dagens prosessflyt. De fleste maskiner er byttet ut og hele massestrømmen har gjennomgått store endringer etter at maskinlisten ble utarbeidet. Generelt burde alle anlegg ha en maskinliste lett tilgjengelig slik at den enkelt kan oppdateres dersom det kommer nytt utstyr inn. Mye tid hadde blitt spart dersom dette var tilfelle i Vassfjell.

6.2 NTNU kostnadsmodell

Kostnadsmodellen baserer seg på innhentede tall fra produksjonsårene 2016 og 2017 til tross for at flere elementer har tilgjengelige data fra enda lenger tilbake i tid. Dette er gjort fordi driftsjournalen hvor tonnasje registreres, ble gjort elektronisk i 2016. Det vil derfor være mest hensiktsmessig å begrense tall hentet fra andre kilder til årene 2016 og 2017 selv om disse er

tilgjengelig også for tidligere år. I den forbindelse er det viktig å tenke på at to år ikke nødvendigvis vil vise et representativt bilde av driften i et anlegg. En mer optimal modell burde ta inn informasjon fra minst 5 – 10 år avhengig av størrelsen på produksjonen og produksjonsmetode. En så stor syklus velges for å blant annet kunne inkludere kostnader ved utskiftning av utstyr, ha mulighet til å se et mer representativt nivå på reparasjon- og vedlikeholdskostnader gjennom utstyrets levetid. I tillegg vil en lengre syklus jevne ut «unormale tall» som eventuelle produksjonstopper eller nedgangstider grunnet marked, kapital eller andre produksjonspåvirkende faktorer.

I resultatdelen presenteres to ulike kostnadsmodeller for det stasjonære verket, en med generell avskrivningstid på 10 år og en med differensiert avskrivning mellom fastverk og knusere. Franzefosskonsernet bruker 10 års lineær avskrivningstid på knuseverksutstyr, hvilket gir en høy tonnpris. Ved å dele verket i fastverk og knusere vil man få større nøyaktighet på den reelle tonnprisen ettersom den faktiske levetiden på et fastverk er langt større enn 10 år. En knuser kan også, med skifte av slidedeler, ha lenger levetid enn 10 år og er derfor satt til 15 år i den differensierte modellen. I denne oppgaven antar man derfor at det går to knusere på levetiden av et fastverk. Ettersom primærknuseren i Vassfjell har stått siden 1970-tallet, vil åpenbart ikke en levetid på 15 år stemme for denne. Oppdelingen anses likevel som gyldig i oppgaven og gir en mer eksakt produktpris ettersom avskrivningen skal speile maskinens investering gjennom dens levetid. Videre vurderinger av de ulike elementene i kostnadsmodellen tar utgangspunkt i den differensierte modellen.

De investeringskostnadene som er lagt inn i modellen tar ikke hensyn til hele fastverket. I Vassfjell er det for eksempel bygget en sjakt og en tunnel fra sjakten til dagen. Dette er et omfattende arbeid som en gang i tiden har generert store kostnader. Fastverket som er definert i modellen er typisk knusehytte og overbygg, mens omfattende fundamentering, klargjøring og tilrettelegging av drift er antatt å allerede eksistere. I praksis skal kostnaden per tonn være enda større enn den er beregnet til i modellen. Tunnel og sjakt er en engangsinvestering, gitt at driving og bergsikring er tilstrekkelig. Kostnaden for denne utbyggingen vil derfor i teorien fordele seg på alle produserte tonn i verket. Den eksakte kostnaden for denne utbyggingen er ikke tilgjengelig i denne oppgaven, men i et forsøk på å se påvirkningen en økt investeringssum i fastverket har på ferdigproduktet, ble det lagt til 30 mill. i investeringskostnad på fastverksdelen. Resultatet ble en økning på 1.61 kr per tonn totalt

gjennom alle tre trinn. Ingen stor økning med tanke på at den totale investeringssummen økte med 40.5 millioner inkludert montering og elektriske installasjoner. I modellen tas det heller ikke hensyn til anleggsdriften i forkant av knuseverket. Berget skal kartlegges, bores, sprenges og fraktes, men ingen av disse faktorene legges ved i modellen. Disse enhetsoperasjonene vil derfor utgjøre enda flere kroner per tonn for ferdigproduktene hvor sprengningskostnadene, basert på erfaringstall, vil ha størst innvirkning på resultatet.

Realrenten er i oppgaven satt til 3.68%, et tall som er et utregnet gjennomsnitt for de 20 siste årene, fra 1996 – 2006. NTNUs kostnadsmodell er fra 1992 og hadde en uvanlig høy realrente på 14.6%. Statistikk viser at realrenten var høy i perioden 1988 – 1992, denne perioden er bevisst ikke regnet med i den oppdaterte tabellen da disse tallene i så stor grad skiller seg ut fra normalverdiene. Realrenten skiller seg fra resten av oppgaven ved at det tas inn data fra mer enn 2016 og 2017. Dette er fordi fastverket og K160-knuseren i Vassfjell har vært i anlegget i flere tiår og allerede er ferdig avskrevet eller kommet langt ut i avskrivningstiden. Det vil da være mer hensiktsmessig og nøyaktig å beregne realrenten for de årene verket faktisk har blitt avskrevet, enn å anslå en realrente for et verk som skal avskrives fra i dag og framover. Usikkerheten i valg av realrente vil uansett ikke være stor for det endelige resultatet. En relativt stor endring på 5% for realrenten, fra 3.68% til 8.68%, utgjør en forskjell på 1.45 kr totalt for alle tre knusetrinnene, i overkant av 48 øre per trinn. Disse tallene gjelder for kostnadsmodellen med differensiert avskrivningstid.

Oppsettet i økonomistyringsprogrammet, QlikView, er midt i en endringsprosess. Programmet skal gjøres mer nøyaktig og gi brukeren en større sikkerhet og forutsigbarhet i arbeidet. Det er derfor ikke gitt at data hentet ut fra tidligere år er korrekte. Det har vært mange kostnadsbærere å forholde seg til tidligere, dette er en av endringene som foregår, et enklere brukersnitt. Dersom en bruker gir mange valg, vil det oppstå usikkerhet. I QlikView betyr det at ikke alle kostnader nødvendigvis er lagt inn på riktig post og at ulike personer kan definere kategoriene ulikt. Det er kostnader for slidedeler, reparasjoner og vedlikehold som er hentet ut fra programmet. Beregningene i modellen er delt opp i primært, sekundært og tertiært trinn for å kunne gi en mer nøyaktig tonnpris per produkt heller enn en totalpris for hele verket. Kostnadene fra QlikView er også delt opp i de samme kostnadsbærerne, i tillegg til en egen bærer for sikteanlegget, hvilket i oppgaven er definert som tertiærtrinn. Dersom en kostnad berører hele knuseverket må kostnaden fortsatt plasseres i en kostnadsbærer. Hvilken

bærer denne blir plassert i vil kunne gjøre store utslag på tallene som hentes ut fra programmet. Det finnes ingen standardprosedyre for hvor slike eventuelle kostnader skal plasseres og det er derfor en eksisterende usikkerhet i disse elementene i modellen.

Driftsstoppfaktoren for knuserne er satt til 0.1 basert på erfaringstall. Knusere er store og dyre maskiner, det vil ikke være hensiktsmessig å lagre en reserveknuser på anlegget i tilfelle driftsstopp. I tilfeller hvor det blir stopp i produksjonen er det satt opp buffersoner i anlegget for mindre stopp, i tillegg til at det er mulig å leie inn mobilknusing ved lengre stopp. I beregningen av driftsstoppkostnader er det i den opprinnelige modellen antatt at reparasjonskostnadene utgjør 50% av de totale reparasjons- og vedlikeholdskostnadene. Det ble gjort forsøk på å beregne forholdet mellom disse to tallene basert på inndeling i QlikView. Resultatet ble at reparasjonskostnadene ifølge disse QlikView kun var 15% av de totale kostnadene. Det ble konkludert med at dette var altfor lavt sammenlignet med personellens erfaringer i verket. I modellen blir det derfor brukt opprinnelig tall, 50% på hver av de to delene. Dette utgjør en veldig liten usikkerhet i resultatene. Legges 15% inn i modellen, utgjør dette 9 øre på totalkostnaden per tonn i verket.

Ved beregning av elektrisk kraft, skal både strømpris, maskineffekter og antatt knuserbelastning inn i regnestykket. Strømprisen kan variere geografisk, variere med leverandør og variere for størrelse på verket. Strømprisen i modellen er basert på forbrukstall hentet fra Vassfjell, mens kostnadene er hentet fra Bondkall på Østlandet. Produksjonen ved dette bruket er mindre enn i Vassfjell, i tillegg til at det ligger i en annen landsdel. Begge disse faktorene kan spille en stor rolle for strømprisen. Påvirkningen på den totale tonnprisen vil likevel være så liten at usikkerheten ikke er stor. En økning i strømprisen på 50 øre vil øke den totale tonnprisen med 1.33 kr, cirka 44 øre per knusestrinn. Fordi det ikke er oppgitt modeller for sikt og matere i knuseverket, vil maskineffektene deres være et usikkerhetsmoment. Basert på de dimensjonene som er blitt gitt, er det funnet tilsvarende utstyr i leverandørbrøsjyrer. Den totale installerte effekten i anlegget vil kunne avvike fra den oppgitte totaleffekten i modellen. De fleste sikt og matere ligger likevel på et noenlunde likt effektnivå ved samme dimensjon. Gitt at den informasjonen Franzefoss har kommet med angående dimensjoner er korrekt, vil ikke avviket være så stort. 200 kW ekstra eller 200 kW mindre i modellen utgjør 47 øre på totalprisen. Den antatte belastningen av den enkelte knuser er avhengig av produksjonslinjen i verket, eksempelvis dersom 22/120 kjøres, står

tertiærtrinnet stille. Sammen med kyndig personell i Vassfjell er belastningen på den enkelte knuser antatt basert på knuseteori og erfaringer fra bruddet. Belastningen er antatt ut ifra andel kjøretid i løpet av et skift.

I modellen over det stasjonære verket er det antatt at det er stein i sjakten. Modellen beregner derfor ikke med ansatte som jobber med lasting på dumper og tipp i sjakt. Med en slik antakelse er det beregnet tre ansatte for det stasjonære verket. En operatør, en ferdiglaste og en til reparasjon og vedlikehold. I praksis kan dette antallet være 2 til 2.5 ved at verksoperatøren tar seg av reparasjon og vedlikehold ved produksjonsstopp, men for enkelhetsskyld er det beregnet tre personer i modellen. Beregningen av lønn tar inn antall effektive timer per skift som et element. Antall effektive timer vil variere stort fra dag til dag avhengig av produksjonsplan og for eksempel årstid. På vinteren drives ikke verket dersom det blir for mange kuldegrader, i tillegg vil driften forsinkes ved stort snøfall. Gjennomsnittsdriften anses likevel som effektiv, og det er i samråd med Franzefoss valgt 6.5 effektive timer per skift.

Modellen fra 1992 er basert på et stasjonært anlegg med kapasitet på 280 tonn/time. Resultatet ble der 7.69 kr/tonn. Justeres denne kostnaden til dagens prisnivå, er den tilsvarende tonnprisen i dag 23.85 kr. Kostnadsindeksen for anleggsmaskiner som er brukt til justering av kostnaden gir kun en indikasjon på prisnivå og bør ikke brukes til detaljerte beregninger ettersom verken en knuser, en mater eller et fastverk er definert som en anleggsmaskin. Tallet gir likevel en føling på om resultatet kan stemme. Gitt de store forskjellene i kapasitet og størrelse på verket, i tillegg lengre avskrivningstid kan det tyde på at 18.24 kr/tonn i dag høres rimelig ut. Et høyere lønnsnivå og lavere realrente er tilfellet i dag, men disse faktorene utgjør en mindre forskjell på totalresultatet enn for eksempel avskrivningstid og kapasitet.

6.3 Valg av prosess

Prosessanalysene er gjort i AggFlow, et program som aldri eller sjeldent har vært brukt blant ansatte eller studenter ved NTNU tidligere. Analysene bærer preg av prøving og feiling da det har vært et helt nytt program å sette seg inn i. Det må derfor tas hensyn til at det er store usikkerheter rundt analyseresultatene.

For å kunne gjennomføre gode prosessanalyser er det viktig at konfigurasjonene lagt inn i programmet er så realistisk som mulig. For å unngå følgefeil gjennom hele prosessen vil innkommende materiale være et av de viktigste elementene å få korrekt. I Vassfjell er det ikke gjort analyser av sprengrøysen, hvilket gir datamaterialet et usikkerhetsmoment som må tas til etterretning. Det er imidlertid gjort analyser av andre anlegg i Franzefosskonsernet, et av disse er Lierskogen hvor det er konkludert med at sprengrøysen består av en 0/700-fraksjon. Ved tidligere prosessanalyser i Vassfjell er det blitt brukt en 0/900-fraksjon som innkommende stein i prosessen. I denne oppgaven har basisen for den programmerte sprengrøysen i AggFlow vært en forskjøvet 0/700-fraksjon fra Lierskogen med mindre finstoff enn originalfraksjonen. Programmet har en svakhet ved at det ikke lar brukeren definere massen som skal prosesseres på en tilfredsstillende måte. For grønnstein-gabbroforekomsten i Vassfjell ble det kun lagt inn kornfordelingskurve, bulk tetthet og spesifikk tetthet. I en optimal prosessanalyse skulle det vært mulig å legge inn viktige faktorer som kjemisk innhold bergmekaniske og mineralogiske data. Massen som benyttes i programmet er en generell masse og vil ikke nødvendigvis oppføre seg slik som den reelle massen i Vassfjell vil gjøre gjennom prosessen.

Det foreligger også en usikkerhet i dimensjoner på utstyr i knuseverket. Transportbåndene i anlegget er godt kartlagt gjennom Ingeniørfirmaet Gummi- og Maskinteknikk AS, men det finnes per i dag ingen oversikt over dimensjoner på matere og sikt. I AggFlow er det definert dimensjoner (bredde x lengde) for de fleste matere og sikt som er tilgjengelig i dagens marked. Størrelsene på maskinene som er brukt i analysen er antatt basert på de forhåndsdefinerte dimensjonene i programmet i tillegg til noenlunde kvalifiserte gjetninger på øyemål av personell i Vassfjell. Enkelte matere og sikt har små variasjoner mellom de ulike dekkstørrelsene. For disse vil det være større usikkerhet enn for matere og sikt med større ulikheter i dimensjonene ettersom det er vanskeligere å skille mindre dimensjonsvariasjoner på øyemål. Det er klart at disse usikkerhetene vil kunne påvirke det endelige resultatet, men

totalt sett er de fleste sikt og matere et godt stykke unna å være underdimensjonert i AggFlow og kan derfor byttes ut hvis de er feil uten at det har stor innvirkning på resultatet.

Transportbåndene i programmet er lagt inn med korrekt lengde og bredde. Eventuell helning på båndene er ikke programmert ettersom denne informasjonen ikke er tilgjengelig. Det er derfor ikke tatt hensyn til høydeforskjeller i verket da disse ikke er kartlagt og dokumentert tilstrekkelig. I slutten av juni 2018 ble det gjennomført en ny befaring av anlegget for å oppdatere maskinlisten med transportbånd. Den nye informasjonen ble ikke mottatt tidnok til oppgaveslutt og er derfor ikke inkludert i analysen.

Det er mangler ved programmet ved at man ikke kan velge for eksempel type sikteduk på siktene. Hvilken sikteduk man bruker vil kunne påvirke effektiviteten og kapasiteten til siktet. Det er mulig å legge inn sikteeffektivitet selv i programmet, men dette ville blitt et for omfattende arbeid og er derfor ikke gjennomført. Siktene er derfor standardkonfigurasjon for programmet med masket sikteduk og kvadratiske åpninger. Stilles sikteduken inn på sikteåpning 8 mm, vil siktet dele massen perfekt ved 8 mm. Dette er ikke tilfellet i virkeligheten hvor under- og overstørrelser kan forurense en fraksjon. Siktene i programmet er stilt inn etter varenavn, for eksempel 4/8. I realiteten vil siktet være innstilt på en større åpning fordi det tillates større korn i varespesifikasjonene. Denne forskjellen er ikke tatt hensyn til i programmet og vil utgjøre en forskjell i endene av kornfordelingskurvene generert i AggFlow og fra reelle laboratorietester i Vassfjell. Produksjonen av ferdigvarer kan derfor være litt forskjøvet mot høyre i siloanlegget. AggFlow kan gi en høyere kornstørrelse enn det som er realiteten. En annen utfordring er at programmet simulerer et perfekt verk hvor det ikke tas hensyn til slitasje. I Vassfjell kan det for eksempel ikke produseres Rockwool når mantelen er helt ny, det kreves slitasje før knuseren kan stilles inn på en 80/140-fraksjon. For en lite slitt mantel vil CSS kunne settes til 65 – 70 mm i Rockwoolproduksjon, mens for en slitt mantel vil tilsvarende CSS være ned mot 35 mm. Slike nyanser i produksjonen tas ikke hensyn til i AggFlow.

Utløpsspalten på kjefteknuseren i primært trinn er satt til 180 – 200 mm i Vassfjell. Grunnet slitasje på utstyret over tid, er justeringsmekanismen ødelagt i knuseren. Dette gjør at utløpsspalten er gitt i et usikkert intervall og ikke som et konkret tall. Dersom primærknuseren i AggFlow konfigureres med en utløpsspalt på 180 mm oppstår det alarmer i systemet. Partikkelstørrelsen fra kjefteknuseren overskrider maksstørrelsen som sekundært knusetrinn

kan ta imot. En CH660-konknuser kan ta inn matematerialer med maksimal størrelse på 275 mm, mens en 180 mm-utløpsspalt på kjefteknuseren vil gi maksimal partikkelstørrelse på 320 mm og produserer derfor for store stykkstørrelser for sekundærknuseren. For å få programmet til å kjøre prosessen uten alarmer var det nødvendig å sette CSS på kjefteknuseren til 150 mm. Gapet på K160 er 1400 x 1600 mm, mens kjefteknuseren som er programmert i AggFlow er en C150-knuser med dimensjonene 1200 x 1400 mm. At gapet er mindre i programmet har ingenting å si for mateproduktet inn i primærknuseren, men vil kunne gi utslag på produktet ut av knuseren. For å kunne kjøre det verket som Franzefoss oppgir at de kjører, var det som sagt nødvendig å manipulere prosessen i AggFlow for å unngå alarmer på systemet. Det ble gjort en vurdering på at endring av CSS i primært knusestrinn ville ha mindre total påvirkning på resultatene enn manipulering til større inntaksåpning i sekundærknuseren. I utgangspunktet vil det gjelde at jo tidligere i prosessen det oppstår feilkilder, jo større vil den endelige feilen være. Likevel er det for denne prosessen vurdert at grovknusing vil påvirke ferdigproduktet i langt mindre grad enn det et finere knusestrinn vil gjøre.

I Vassfjell er det hovedsakelig 8/11-fraksjonen som er den «gylne» fraksjonen. Spørsmålet er hvordan man kan maksimere produksjonen av denne fraksjonen uten å overprodusere uønskede størrelser. Det er derfor gjort forsøk i AggFlow på å kjøre produksjon med lukket krets, maksimert lukket krets, åpen krets og variasjon i CSS i tertiærknuseren. Standarddriften med lukket krets har resultater tett opp mot maksimalkapasiteten for tertiærknuseren. Da den lukkede kretsen ble åpnet opp i AggFlow og kjørt på maksimal kapasitet, førte det til at tertiærknuseren utnyttet kapasiteten sin med 100%. 387.3 tonn ble sendt fra sekundært knusestrinn inn i 22/63-siloen. Tertiærknuseren tolererer bare 217.3 tonn i timen ut fra silo. Dette regnestykket går ikke opp siden siloen på 80 m³ kun kan lagre 128 tonn materialer med bulk tetthet på 1.6 tonn/m³, mens den faktiske differansen er 170 tonn. Tertiærknuseren er i dette tilfellet flaskehalsen, den begrensende maskinen. Den åpne kretsen maksimerer produksjonen av 8/11 med 65 tonn i timen, men det hjelper lite når prosessflyten ikke er i massebalanse. En maksimert åpen krets vil ikke være en mulighet i verket i Vassfjell slik som forholdene er i dag. I dag drives verket på en måte at når 22/63-siloen er full, stanses pågangen til tertiært knuseverk og det startes produksjon av 22/120 i sekundært knuseverk istedenfor. Slik fortsetter det helt til tertiært knusestrinn har kapasitet til å ta imot nye masser. Denne delen av driften har ikke vært mulig å legge inn på en hensiktsmessig måte i AggFlow. Dette kan være en av grunnene til at tertiærknuseren ligger helt opp mot maks kapasitet

uavhengig av hvilken prosess som kjøres. I de analysene som er gjort i AggFlow går hele massen utenom utsiktet 0/16 gjennom tertiærknuseren. I praksis vil denne massen altså kunne være mindre dersom prosessflyten endres til 22/120 og tertiærknuseren vil i dette tilfellet ikke kjøre opp mot maks kapasitet. Den maksimerte produksjonen med lukket krets er den prosessflyten som produserer nest mest 8/11 med 64 tonn i timen. Fordelen med denne flyten er at silo og andre elementer i prosessen tåler produksjonen, hvilket betyr at det i utgangspunktet skal være mulig å kjøre denne prosessen i Vassfjell. Ulempen med denne produksjonsflyten er at det dannes mye finstoff, 65.2 tonn 0/4 per time og 46.7 tonn 4/8 per time.

Tertiærknuseren i Vassfjell kjøres på ampereforbruk og ikke CSS. Denne konfigureringen er det ikke mulig å kjøre i AggFlow og det måtte derfor velges en passende CSS for knuseren. CSS16 ble brukt som konfigurasjon i standarddriften fordi denne utløpsspalten var en av få muligheter til å unngå overkapasitet på knuseren. I tillegg ble kornfordelingskurven til de ulike ferdigproduktene undersøkt og sammenlignet laboratorietester i Vassfjell. Alle kornfordelingskurvene ble sammenlignet og vurdert som like nok til tross for at AggFlow sikter perfekt på fraksjon, mens det i realiteten er mindre skarpe størrelsesgrenser. Denne innstillingen gjør at øvre og nedre på kornfordelingskurvene vil være ulike og litt forskjøvet, men hovedinnholdet og formen vil være i samme intervall og derfor være tilstrekkelig like. For 8/11-fraksjonen vil 84.1% passere 10 mm-siktet i AggFlow, mens tilsvarende for den reelle massen vil være 80% på 11.2 mm-sikt. I et forsøk på å maksimere mengden 8/11 produsert, ble CSS16 endret til CSS19 ved maksimert lukket drift. Dette ga store mengder 8/11 med 64 tonn produsert. I tillegg var produksjonen av 0/4 den laveste av alle forsøk som ble gjennomført i analysen. 59.1 tonn ble produsert av det fineste materialet, samt 44.1 tonn av 4/8 som er det nest fineste materialet. Basert på de ulike prosessflytene som ble prøvd i programmet, er det denne som anbefales. Hvorvidt den kan gjennomføres og hvordan massebalansen samsvarer med faktisk produksjon i dag er usikkert da det som sagt ikke er sammenlignbart med ampereforbruk og CSS.

AggFlow kan ikke gjøre analyser på kvalitetsparametere for de ulike produktene.

Flisighetsindeks, styrke og motstandsdyktighet er viktige parametere i tilslagsproduksjon og bør tas hensyn til i planlegging av prosessflyt. Generelt vil lukket krets gi bedre kornform fordi elongerte korn sendes i retur og knuses to ganger. Forbedring av kvalitet kan også skje ved å ta ut 0/16-subbusmaterialer tidlig i prosessen slik at man blir kvitt lavkvalitetsprodukter

i en tidlig fase. Dette sparer kapasitet på verket i tillegg til at ferdigproduktene vil være av bedre kvalitet.

6.4 Mobilknusing

Mobilknusing benyttes hovedsakelig i Vassfjell ved lengre produksjonsstopp i det stasjonære verket eller ved behov for høyere produksjonskapasitet. De siste årene er det sistnevnte som har vært tilfelle de fleste gangene mobilknusing er benyttet. Det vil være forskjellige krav til Franzefoss basert på om det brukes stasjonærknusing eller mobilknusing. Stasjonærknusing krever en hjullaster med operatør, en dumper med operatør og en anleggsoperatør, alle ansatt i Franzefoss. Slitasje gjøres på eget utstyr og Franzefoss står selv for reparasjoner og vedlikehold. I Vassfjell er anleggsoperatøren også ansvarlig for eventuell service på utstyr. Ved innleid mobilknusing stiller leverandør med levering, montering og demontering av anlegget, hjullaster med operatør, gravemaskin med operatør samt at eventuelle reparasjoner og vedlikehold blir gjort av leverandør. Ved innleie betaler man lønn for to ekstra personer som ikke er ansatt i Franzefoss sammenlignet med vanlig stasjonær drift. Det betales også for opprigg av anlegget. Riggkostnaden varierer ut i fra hvor omfattende knusing som trengs; kapasitet og antall knuse- og siktetrinn. Riggposten er en engangskostnad, så jo flere tonn man får knust med mobilknusing på en enkelt tilrigging av utstyr, jo billigere vil knusekostnaden være per tonn. Hvis det først skal leies inn mobilknusing bør det derfor knuses i større kvanta for å få størst mulig utbytte av det midlertidige anlegget.

Enhetsoperasjonene i forkant av knuseanlegget vil være relativt like både ved mobilknusing og ved knusing stasjonært verk. Inntaksåpningen på et mobilt knuseanlegg vil i mange tilfeller være mindre enn en stasjonærknuser, hvilket gjør at det stilles større krav til splitting av stein i forkant av knuseren. I dag splittes storstein ved hjelp av gravemaskin og kule i Vassfjell. Gravemaskinen er plassert i sprengrøysen og laster på dumperen som deretter kjører massen til tipping i sjakten. Ved mobilknusing vil gravemaskinen være pålastet til mobilknuseren. En kule kan plasseres i umiddelbar nærhet slik at gravemaskinen kan splitte eventuell storstein før den laster i mobilknuseren. En hjullaster må sørge for kontinuerlig bortlasting av ferdigknuste masser.

Franzefoss kan kjøpe et eget mobilknuseri som driftes på egenhånd. Da vil man ikke være avhengig av et kundeforhold med en mobilknuseleverandør. Investeres det i et eget mobilt knuseverk slipper man ventetiden på minimum 2 – 3 dager for tjenesteleveranse ved at man gjør det selv og har både mannskap og utstyr tilgjengelig. Rigging av en mobilknuser på stedet tar rundt en time. I kostnadsmodellen er det antatt et monteringstillegg på 5%, ulikt tilsvarende tillegg på 20% i kostnadsmodellen for et stasjonært verk. Tillegget er satt såpass

lavt fordi det ikke krever omfattende montering for å få et mobilt anlegg opp å gå. Monteringstillegget er likevel ikke satt til 0% ettersom en mobilknuser vil kreve tilrigg hver gang den skal brukes etter stillegang eller hvis den skal transporteres til andre plasser i bruddet. Elektriske installasjoner er satt til 10% mot 15% for stasjonært verk. Dette er en antatt andel basert på at de fleste elektriske installasjoner allerede eksisterer i forbindelse med det stasjonære verket, men at det må påberegnes noen tilpasninger før bruk. Beregnet kostnad for det mobile knusettrinnet i kostnadsmodellen er 7.41 kr/tonn. Da er i tillegg investeringskostnaden for ny gravemaskin og hjullaster tatt med i beregningen. Det er også lagt inn en driftskostnad for en 40-tonns hjullaster på 9.77 kr/tonn slik at totalsummen uten gravemaskin legger seg på 17.17 kr/tonn for en engangsknust masse. Kornfordelingskurven til sprengrøysen brukt for beregning av driftskostnader hos hjullasteren er på 350 mm, mens kornfordelingskurven til sprengrøysen i AggFlow viser en d_{50} på rundt 300 mm. At den reelle fraksjonen er mindre gjør at driftskostnaden for hjullasteren skal være noe mindre enn 9.77 kr/tonn i kostnadsmodellen. Det er ikke oppgitt hvorvidt lønn er inkludert i driftskostnaden for hjullasteren, i så fall må også denne trekkes fra enten driftskostnaden eller i modellen slik at den ikke regnes dobbelt. Et tillegg for gravemaskin må også beregnes. I forbindelse med beregninger av kostnadsmodellen ble det hentet ut reparasjon-, vedlikehold- og slitedelskostnader fra QlikView for en gravemaskin og en hjullaster i Vassfjell. Disse ble vurdert ugyldig og forkastet til beregning for mobilknuser, ettersom disse maskinene opprinnelig benyttes i drift for det stasjonære verket og derfor håndterer helt andre kapasiteter og materialer sammenlignet med en maskin brukt til mobilt verk. For rep.-, vedlikehold- og slitedelskostnader for mobilknuseren, ble det antatt 50% påslag av tilsvarende kostnader for et stasjonært verk. Dette er samme verdi som ble benyttet i kostnadsmodellen fra 1992. Det er ikke funnet annen informasjon som tilsier at denne skal endres eller bør revurderes.

Gjennomsnittskostnaden for innleid mobilknusing i Vassfjell ligger på 22.06 kr/tonn for 2016/2017. Med den enorme økningen i bruk av mobilknusing de to siste årene vil det være naturlig å se på de ulike mulighetene som finnes, særlig om behovet for ekstra kapasitet vedvarer. I Vassfjell gikk de fra innleiekostnader på 5 mill. i 2016 til 12 mill. i 2017, og en mobil tonnasjøkning fra 250 000 tonn til 537 000 tonn. For å ta en god beslutning i spørsmålet om innkjøp eller leie av mobilknuser trengs det en detaljert kostnadsstudie på hjullaster og gravemaskin i tillegg til en oversikt over forventet fremtidig produksjonsplan. Valget er avhengig av mange faktorer som må ses opp mot hverandre. De tallene som er gitt i

denne oppgaven kan gi en indikasjon på kostnadsnivået, men det ligger usikkerheter i antakelser og elementer som gjør at modellen på et senere tidspunkt må finregnes for å kunne benyttes.

7 Konklusjon

- Det er arbeidskrevende å detaljkartlegge et pukkverk. Et avansert simuleringsverktøy kan ta inn mye informasjon for å gi nøyaktige analyser, men mye av denne informasjonen eksisterer ikke i knuseverket i dag. I tillegg kjører simuleringsverktøyet på perfekt utstyr, mens det i realiteten produseres i eldre verk utsatt for slitasje. Til tross for dette gir et analyseverktøy gode indikasjoner på eksisterende produksjonstall og forventet produksjon ved eventuelle endringer.
- Ved optimaliseringsfokus på tonnasje gjennom verket vil bruken av åpen krets produserer mer av både ønskede og uønskede produkter per time sammenlignet med det en lukket krets gjør. I Vassfjell vil maksimering av produksjonen med lukket krets på sekundært knusetrinn øke produksjonen av 8/11 fra 59.8 til 64.6 tonn. En åpen krets vil gi 65 tonn med 8/11, men den vil også overbelaste tertiærknuseren og er derfor ikke en prosessflyt som vil være mulig å realisere. En produksjonsmaksimering på lukket krets kjører 436 tonn/time inn i verket i motsetning til standarddrift på 400 tonn/time.
- Ved optimaliseringsfokus på kostnad gjennom verket er det ønskelig med minst mulig finstoff. Ved å justere CSS fra 16 mm til 19 mm i tertiærknuseren i lukket krets, vil den totale finstoffandelen minke. 59.1 tonn med 0/4 og 44.1 tonn med 4/8 produseres, samtidig som det vil være en relativt høy andel 8/11 med 64 tonn produsert. I Vassfjell drives K3 på ampereforbruk og det vil derfor være vanskelig å si hvordan verket i realiteten vil respondere på en slik konfigurasjon.
- For et stasjonært verk vil et ferdigprodukt gjennom primært knusetrinn koste 7.51 kr/tonn. Et totrinnsknust produkt gjennom primært og sekundært knusetrinn koster totalt 15.67 kr/tonn, mens et tretrinnsprodukt koster 25.45 kr/tonn.
- Dersom Vassfjell skal fortsette med høye produksjonstall i årene fremover vil det være nødvendig å vurdere innkjøp av eget mobilt knuseverk. Det stasjonære verket har en maksimalkapasitet på 600 000 tonn i året, mens totalproduksjon i verket ligger på over 1 million tonn i året. Produksjon med innleid mobilutstyr økte fra 250 000 tonn i 2016 til 537 000 i 2017. Innleie av mobilknusing er dyrt per tonn, med en gjennomsnittlig

pris på 22.06 kr, og utgjør derfor en stor post i driftskostnadene for verket. Den innleide mobilknusingen er hovedsakelig grovknusing og det er investering i en grovknust mobilknuser som vil være mest aktuelt. Kostnadsmodellen gir en knusekostnad på 7.40 kr/tonn for en mobilknuser. Dette er uten tillegget for hjullaster og gravemaskin. Det er behov for en detaljert kostnadsstudie før det kan dras en endelig konklusjon på hvorvidt et mobilt anlegg skal anskaffes.

8 Videre arbeid

Nå som den nye vekten i finverket snart er installert bør denne brukes til å innhente faktiske tall for produksjonen. Det er ikke nødvendigvis slik at teori og praksis gir samme resultat. Derfor er det viktig å kjøre egne tester og notere testresultatene. Disse praktiske resultatene kan senere legges inn i et simuleringsverktøy for å gjøre prosessanalysene mer realistisk.

Dersom man er mer konsekvent med utfylling av driftsjournalen vil dette kunne være et kjempeverktøy for videre arbeid. Fylles salvenummer inn i journalen, kan dette sammen med produkt rapporter si noe om materialkvaliteten i ulike deler av bruddet. Denne informasjonen kan gi grunnlag for en geologisk modell hvor kvalitetene er kartlagt i bruddet. En slik modell kan gi en mer LEAN-produksjon hvor høykvalitetsprodukter kan selges for høyere pris enn produkter med lavere kvalitet. En slik oversikt vil også kunne gi bedre forutsetninger for selektiv drift avhengig av markedet.

Det burde investeres litt tid til å gå over verket og lage en fullstendig maskinliste med alt utstyr, ikke bare transportbånd. Få inn dimensjoner på sikt og matere, inkluder gjerne de ulike forhåndsprogrammerte innstillingene på knuserne. Dette vil forenkle arbeidet med eventuelle senere prosessanalyser. Maskinlisten vil være et godt tillegg til et flytskjema, likt det gamle flytskjemaet fra 1991. Samtidig vil det være enkelt å oppdatere et flytskjema dersom man har en maskinliste som er à jour med de endringer som er gjort i anlegget.

9 Referanser

- Aune, S. E., *et al.* (1992) *Anleggsmaskiner. Kostnader, ytelse og driftskontroll*. Trondheim: Universitetet i Trondheim, Norges tekniske høgskole - institutt for anleggsdrift.
- Barratt, D. J., Mular, A. L. og Halbe, D. N. (2002) *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*. Society for Mining Metallurgy & Exploration Incorporated.
- BedRock Software Inc. (2018a) *History*. Tilgjengelig fra: <http://aggflow.com/history-1> (Hentet: 02.06 2018).
- BedRock Software Inc. (2018b) *What is AggFlow?* Tilgjengelig fra: <http://aggflow.com/what-aggflow> (Hentet: 02.06 2018).
- Blake, E. W. (1858) *Machine for crushing stone*. US20542A. Tilgjengelig fra: <https://patents.google.com/patent/US20542> (Hentet: 31.03.2018).
- Bruland, A. (2013) *Kompendium i anleggsteknikk - Kostnadsindeks for anleggsmaskiner*.
- Business Consulting Group (u.å.) *IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling)*. Tilgjengelig fra: http://b-c-group.ru/?page_id=188 (Hentet: 08.12 2017).
- Direktoratet for mineralforvaltning med Bergmesteren for Svalbard (2016) *HARDE FAKTA om mineralnæringen, Mineralstatistikk*, 2016. Tilgjengelig fra: https://dirmin.no/sites/default/files/harde_fakta_om_mineralnaeringen_ny.pdf (Hentet: 26.04.18).
- Finansleksikon (2018) *Realrente*. Tilgjengelig fra: <http://www.finansleksikon.no/Finansleksikon/R/Realrente.html> (Hentet: 18.06 2018).
- Franzefoss AS (2016a) *FPU firmapresentasjon Bratsberg Helselag* [Power point-presentasjon].
- Franzefoss AS (2016b) *Vassfjell - om anlegget*. Tilgjengelig fra: <https://www.franzefoss.no/anlegg/vassfjell/> (Hentet: 02.12 2017).
- Franzefoss AS (2018) *Den nye generasjonen*. Tilgjengelig fra: <https://www.franzefoss.no/den-nye-generasjonen/> (Hentet: 12.06 2018).
- Garathun, M. G. (2014) Norge er i ferd med å gå tom for god grus og puk, *Teknisk Ukeblad*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/sjefingenior-norge-i-ferd-med-a-ga-tom-for-god-grus-og-pukk/232304>.
- Grønn vekst (u.å.) *Natursand er en knapphetsressurs*. Tilgjengelig fra: <http://www.gronnvekst.no/aktuelt-oversikt/2015/12/18/natursand-er-en-knapphetsressurs> (Hentet: 15.12 2017).
- Gupta, A. og Yan, D. S. (2006) *Mineral Processing Design and Operations - An introduction*. Amsterdam: Elsevier.
- Haugen, S. (2015) *Lean mining*. Upublisert paper presentert på Vår møte.

- Investeringsavgift (2017) *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/investeringsavgift> (Hentet: 16.06 2018).
- Kleiv, R. A. (2013) *Industriell sikting*, forelesning i TGB 4227 Mineralproduksjon GK høst 2016 [Power point-presentasjon].
- Kumar, A. (2012) *Crushers*. Tilgjengelig fra: <http://technology.infomine.com/reviews/Crushers/welcome.asp?view=full#jaw> (Hentet: 26.03 2018).
- Lean Enterprise Institute (u.å.) *PRINCIPLES OF LEAN*. Tilgjengelig fra: <https://www.lean.org/WhatsLean/Principles.cfm> (Hentet: 16.12 2017).
- Lean Enterprise Institute Inc. (u.å.) *What is lean?* Tilgjengelig fra: <https://www.lean.org/WhatsLean/> (Hentet: 06.07 2018).
- Mayo, P. (2006) *Crusher Selection 3*. (Technical Briefing Paper No. 6): The Institute of Quarrying Australia.
- Metso (2011) Nordberg C series jaw crushers - Wear parts application guide. Tilgjengelig fra: <https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/application-guide-c-series-2603-en-lowres.pdf>.
- Metso (2014) *Nordberg cone crushers HP3, HP4, HP5 & HP6*. Tilgjengelig fra: <https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/cone-crushers-metso-nordberg-hp-en-2008.pdf> (Hentet: 25.06 2018).
- Metso (2015) *Basics in Minerals Processing Handbook*. 10. utg.
- Metso (2016) Lokotrack LT106. Finland: Metso. Tilgjengelig fra: <https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/mobile-jaw-crusher-lokotrack-lt106-en-2712.pdf> (Hentet: 25.06 2018).
- Michaud, L. D. (2015) *Mobile crushers*. Tilgjengelig fra: <https://www.911metallurgist.com/blog/mobile-crusher> (Hentet: 26.03 2018).
- Mineralloven (2009) *Lov av 19. juni 2009 nr. 101 om erverv og utvinning av mineralressurser*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2009-06-19-101> (Hentet: 15.10 2017).
- Mitchell, C. (2009) *Quarry Fines and Waste*. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey. Tilgjengelig fra: http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/6290/1/Quarry_Fines_and_Waste.pdf (Hentet: 26.04.18).
- National Institute of Standards and Technology (1993) Integration definition for function modeling (IDEF0).
- Nesheim, H. F. (2017) *Prosesskartlegging av et pukkverk - Vassfjell Pukkverk*: NTNU.
- NFF (2005) *Sikker boring gjennom sylte*. (Teknisk rapport 06). Tilgjengelig fra: http://nff.no/wp-content/uploads/2014/01/Teknisk_rapport_06.pdf.

- NGU (2015) *Pukkdaten - Forekomstområde 1601 - 502 - Vassfjell Pukkverk*. Tilgjengelig fra: http://aps.ngu.no/pls/oradb/grus_GP_Omrade_fakta.Main?p_objid=108593&p_spraak=N (Hentet: 02.12 2017).
- NGU (2017) Nasjonal berggrunnsdatabase. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/minkommune/?kommunenr=1601> (Hentet: 04.12.2017).
- Rothery, K. og Mellor, S. (2007) *Crushing and screening*. United Kingdom: The Institute of Quarrying.
- Sander, K. (2017) *Beregning av sosiale kostnader*. Tilgjengelig fra: <https://estudie.no/beregning-sosiale-kostnader/> (Hentet: 25.06 2018).
- Sandvik, K. L., Digre, M. og Malvik, T. (1999) *Oppredning av primære og sekundære råstoffer*. Trondheim: Tapir.
- Sandvik SRP AB (2014) *UNLEASH THE FULL POTENTIAL OF YOUR OPERATIONS*. Tilgjengelig fra: <https://www.rocktechnology.sandvik/globalassets/products/stationary-crushers-and-screens/pdf/cone-crusher-brochure-english.pdf> (Hentet: 25.06 2018).
- Seegebrecht, G. (u.å.) *THE ROLE OF AGGREGATE IN CONCRETE*. Tilgjengelig fra: <https://www.concretenetwork.com/aggregate/> (Hentet: 20.12 2017).
- SGS Mineral Services (2005) *Flowsheet development*. Tilgjengelig fra: <https://www.sgs.com/-/media/global/documents/flyers-and-leaflets/sgs-min-wa009-flowsheet-development-en-11.pdf> (Hentet: 12.06 2018).
- Smarte Penger (2018) *Slik er strømprisen bygget opp*. Tilgjengelig fra: <https://www.smartepenger.no/boligokonomi/484-slik-er-stromprisen-bygget-opp> (Hentet: 02.07 2018).
- Star Trace (P) Ltd. (u.å.) *Grizzly feeders*. Tilgjengelig fra: <http://www.magnetics.in/grizzly-feeders.html> (Hentet: 07.07 2018).
- Statens vegvesen (2017) *Asfalt*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/Vegteknologi/Vegbyggingsmaterialer/Asfalt> (Hentet: 04.12 2017).
- Statistisk sentralbyrå (u.å.) *Gjennomsnittlig utlåns- og innskuddsrente i bankene, prisstigning, beregnet realrente, effektiv rente for innenlandske obligasjoner (10 års) og Nibor (3 md.) per 31. desember. Prosent (SÅ 454)*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/300692/gjennomsnittlig-utlans-og-innskuddsrente-i-bankene.per-31.desember.prosent-sa-454> (Hentet: 29.06 2018).
- Stoltz, G. (2014) *Kostnad Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/kostnad> (Hentet: 16.06 2018).
- Vegdirektoratet (2015) *Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser*. <https://www.vegvesen.no/attachment/185231/binary/1090658>; Statens Vegvesen. (Hentet: 17.11.17).

- Viilo, K. (2011) *Crushing and Screening Handbook*. Tilgjengelig fra:
http://new.mapexusa.com/wp-content/uploads/2017/12/Metso-Crushing-and-Screening-Handbook-FifthEdition-lowres-03_2011.pdf (Hentet: 20.06 2018).
- Wigum, B. J. (2017) *Concrete aggregate*, forelesning i TGB 4250 Produksjon av tilslagsmaterialer vår 2017 [Power point-presentasjon].
- Wills, B. A. og Finch, J. (2016) *Wills' Mineral Processing Technology : An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 8. utg. Elsevier Science.
- Womack, J. P. og Jones, D. T. (red.) (2003) *Lean thinking - banish waste and create wealth in your corporation*.
- Zimmermann, E. og Kruse, W. (2006) *Mobile crushing and conveying in quarries - a chance for better and cheaper production!* Tyskland: ISCSM Aachen. Tilgjengelig fra:
<https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/12/mobile-crushing.pdf> (Hentet: 08.07 2018).
- Øien, H., Bardal, R. og Johannessen, O. (1993) *Knusing av stein til anleggsformål*. (Prosjektrapport 18-92). Trondheim: Universitetet i Trondheim, Norges tekniske høgskole - institutt for anleggsdrift.

10 Vedlegg

VEDLEGG 1 – Metso Flytskjema

VEDLEGG 2 – Flytskjema fra 1991

VEDLEGG 3 – Kostnadsindeks anleggsmaskiner, per mai 2018

VEDLEGG 4 – Kornfordelingskurve sprengrøys, Lierskogen

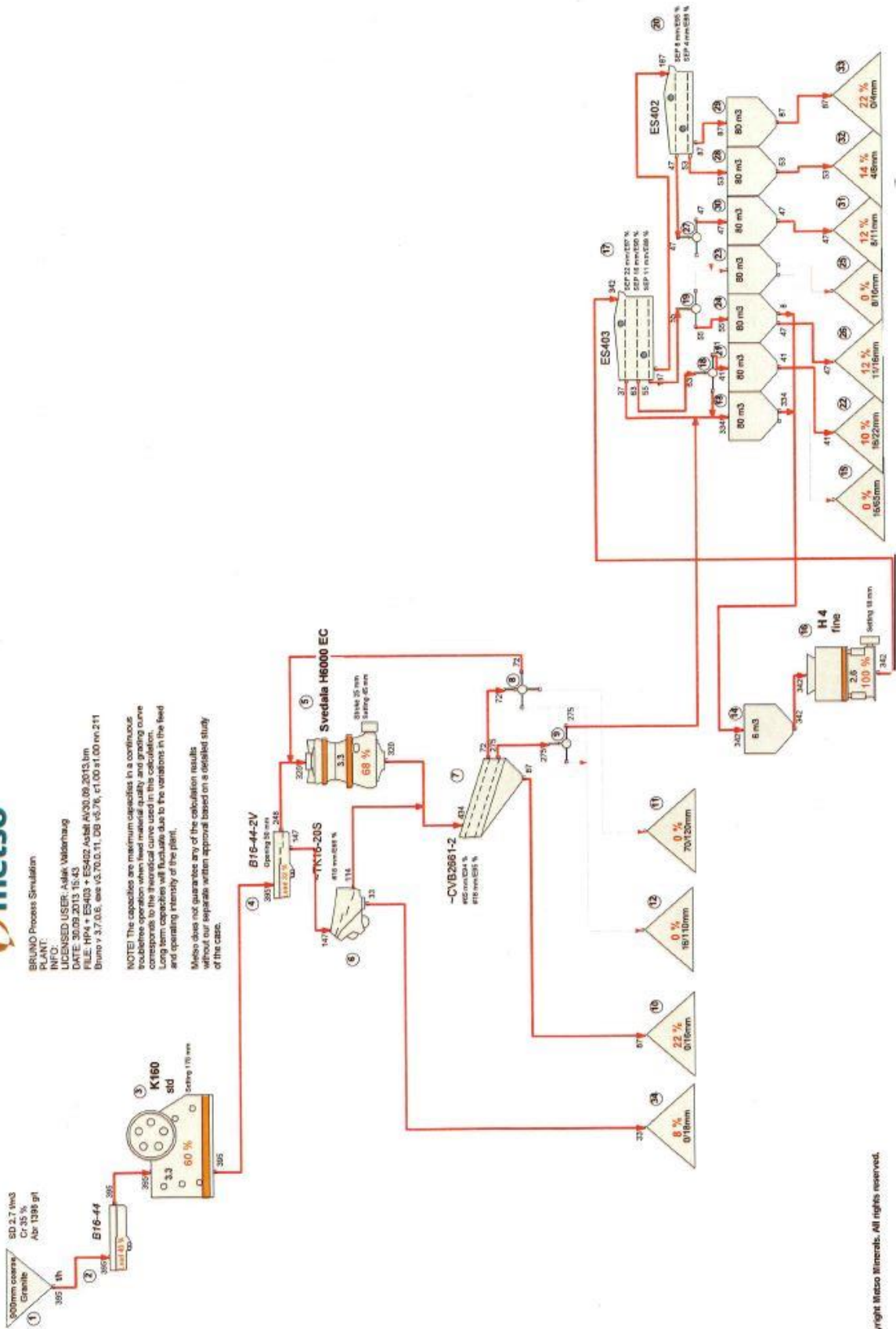
VEDLEGG 1 – Metso Flytskjema



BRUNO Process Simulation
 INFO:
 LICENSED USER: Askik Vidarhaug
 DATE: 30.09.2013 15:43
 FILE: HP4 + ES403 + ES402 Asali AV30.09.2013.lm
 Bruno v. 3.7.0.6, exe v5.70.0.11, DB v5.7%, r1.00 at 1.00 nm 211

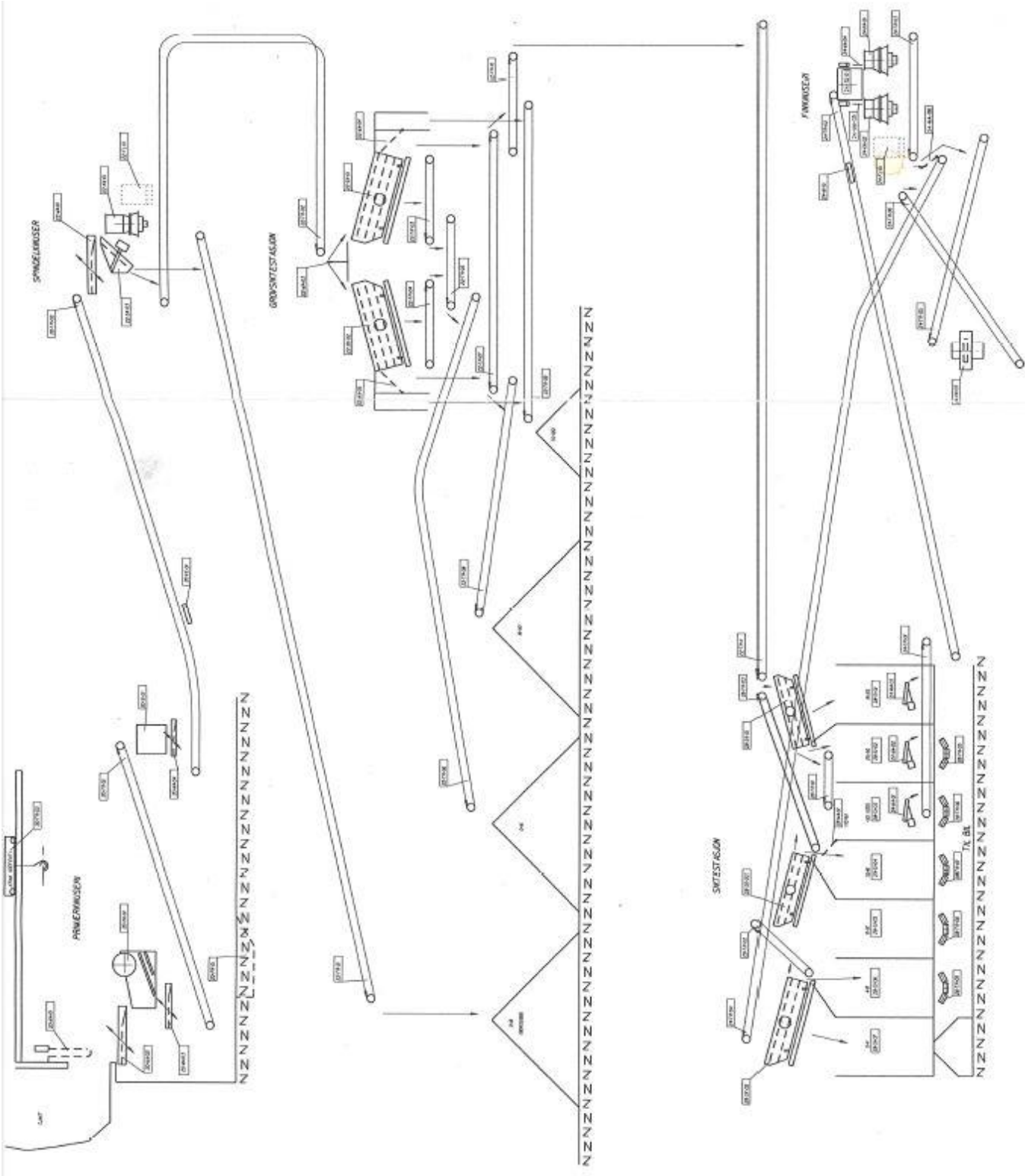
NOTE! The capacities are maximum capacities in a continuous trouble-free operation when feed material quality and grading curve corresponds to the theoretical curve used in this calculation. Long term capacities will fluctuate due to the variations in the feed and operating intensity of the plant.

Metso does not guarantee any of the calculation results without our separate written approval based on a detailed study of the case.



Copyright Metso Minerals. All rights reserved.

VEDLEGG 2 – Flytskjema fra 1991



VEDLEGG 3 – Kostnadsindeks anleggsmaskiner, per mai 2018

KOSTNADSINDEKS ANLEGGSMASKINER
mai 2018

År	15/1	15/2	15/3	15/4	15/5	15/6	15/7	15/8	15/9	15/10	15/11	15/12
1978	100,0	-	-	-	-	-	-	-	104,7	106,0	106,0	105,5
1979	105,5	106,6	108,1	108,8	109,5	109,4	109,7	110,1	110,1	112,8	114,2	114,0
1980	116,8	116,3	116,8	117,0	119,4	122,7	125,2	127,5	128,2	131,8	130,9	134,1
1991	262,3	261,8	262,4	260,6	263,5	264,5	266,2	266,2	266,2	266,6	267,5	266,3
1992	266,1	267,7	264,8	265,7	266,7	267,0	266,5	266,8	268,8	269,0	269,5	271,2
1993	269,7	269,6	270,5	269,9	269,5	269,3	269,5	270,2	270,5	270,6	272,1	272,5
1994	270,3	270,4	270,0	271,1	270,9	279,8	281,0	282,5	284,6	283,9	284,3	281,8
1995	282,9	282,8	282,4	281,3	283,0	287,9	287,8	287,7	288,2	289,1	289,3	290,2
1996	292,8	293,8	293,5	294,9	294,4	294,2	295,0	295,0	299,8	300,7	297,7	298,2
1997	298,3	298,8	292,6	292,3	293,0	293,8	295,9	296,8	296,1	303,6	304,8	303,5
1998	303,4	304,0	303,5	301,4	302,3	303,1	306,1	309,6	315,3	324,8	325,2	324,9
1999	326,9	325,3	325,0	326,0	325,9	324,9	324,5	327,0	328,6	327,4	329,5	334,1
2000	335,1	335,7	336,7	336,3	337,9	334,5	336,0	337,0	343,6	352,6	352,1	350,6
2001	349,5	350,9	350,0	350,7	349,9	350,6	350,2	349,9	351,8	351,7	350,4	350,0
2002	358,3	358,9	362,2	363,2	379,8	379,2	379,9	379,7	379,9	379,5	378,5	377,0
2003	376,1	377,3	378,9	371,0	368,3	368,1	367,5	367,8	369,4	372,1	371,9	367,2
2004	368,7	368,9	373,2	374,2	374,5	375,0	374,4	376,1	375,4	380,0	378,1	377,5
2005	374,7	376,1	379,7	379,8	378,8	379,8	381,9	384,4	386,1	389,8	390,2	387,3
2006	388,3	388,5	389,1	390,1	389,8	389,8	391,7	393,1	391,5	390,3	389,3	389,3
2007	391,0	391,3	394,2	395,9	396,3	411,5	413,9	414,3	425,1	429,2	437,9	439,6
2008	449,2	451,4	452,4	453,5	461,5	463,2	470,8	465,6	463,0	459,5	454,2	444,8
2009	446,7	445,3	448,3	449,0	446,2	450,5	446,1	448,6	448,9	447,9	452,5	451,3
2010	451,3	455,0	453,1	455,6	456,4	455,9	462,5	460,6	464,0	467,5	467,4	469,7
2011	475,5	478,9	482,6	485,7	482,1	489,3	491,2	489,1	492,2	494,6	496,8	494,0
2012	499,5	498,6	498,2	499,4	497,4	506,8	512,2	515,6	515,1	515,1	511,4	509,2
2013	508,4	511,2	508,7	514,1	524,8	524,1	527,1	526,0	508,2	507,1	510,0	509,0
2014	516,1	516,7	515,8	516,8	517,8	518,5	520,7	519,7	517,6	516,9	521,2	513,2
2015	511,6	516,5	513,7	512,0	513,9	516,0	512,3	515,4	519,0	520,2	522,5	522,2
2016	522,4	524,6	530,1	528,7	530,6	539,8	536,8	536,3	535,5	539,6	538,3	544,3
2017	549,8	550,9	553,6	551,6	553,9	551,0	552,0	551,6	557,7	559,5	564,7	565,6
2018	571,2	568,9	568,1	572,4	576,3							

VEDLEGG 4 – kornfordelingskurve sprengrøys, Lierskogen

