

PERMANENTMAGNETISK OPPLAGRING FOR STORE
TROMMELMØLLER BRUKT I GRUVEINDUSTRIEN

PERMANENT MAGNET BEARING FOR LARGE TUMBLING MILL USED IN MINING

KARL CHRISTIAN SANDSTØ

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP
INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2011



Forord

Dette prosjektet er gjennomført våren 2011. Sommeren 2009 og 2010 har jeg hatt sommerjobb ved Outotec. Under tiden som sommeransatt har jeg lært mye og sett forbedringspotensialer innen bergverksindustrien. Et tema som til stadighet virket å være en utfordring var selve opplagringen av trommelmøllene brukt ved kverning av steinmasser. Dette prosjektet har derfor dreid seg om opplagring. Opplagring er aktuelt over alt der det er bevegelse.

Spesielle utfordringer ved prosjektet har vært å forstå muligheter og begrensninger ved magneter. Arbeidet med oppgaven har vært krevende men lærerikt.

Takk til Odd-Ivar Lekang for veiledning ved prosjektoppgave. Spesiell takk til alle på Oslokontoret til Outotec, Kjell Winther, Olav Røed, Sverre Nakkim, Knut, Bjørn og Jeff Belke. Takk til Lars Christian Sandstø for rettlesning av oppgaven.

Ås, den 15.5.2011

Karl Christian Sandstø

Sammendrag

Fremvoksende økonomier har økt etterspørselen etter energi og setter press på prisene. EU har innført utslippstak og startet med kvotehandel med CO₂. Dette tvinger bedrifter til å øke effektiviteten på sine produksjonsanlegg. For leverandører til industrien vil fremtidens kunder i større grad vektlegge produktenes energiforbruk. En forsvinnende stor andel energi går tapt når maskiner roterer. Ved å redusere friksjon i lager kan man redusere energibehovet.

Hovedmålet med prosjektet har vært å utvikle en lagerløsning som gir økt effektivitet for møller. Først ble det gjennomført en kartlegging av alternative opplagringsteknologier. Teknologiene med de mest lovende egenskapene ble gjenstand for fordypning. Det ble utarbeidet konseptforslag for opplagring av møller brukt i bergverksindustrien. Konseptutvelgelsen ble gjennomført ved at de forskjellige teknologiene ble sammenlignet. Opplagring ved bruk av permanentmagneter ble videreført. Flere konstruksjonsforslag ble utformet i en konseptualiseringsprosess for permanentmagnetlageret. Lageret ble tilpasset en allerede eksisterende mølle. De forskjellige konstruksjonsforslagene ble så sammenlignet. Den valgte konstruksjonen ble deretter modellert. Kritiske deler av konstruksjonen ble optimalisert og vurdert ved FEM analyse. Kostnadene forbundet med produksjon er beregnet. Modellen av permanentmagnetlageret er blitt rendert og presentert.

Permanentmagnetlager har vist seg som et effektivt alternativ som opplagring av møller.

Innholdsfortegnelse

1	Litteraturstudie	1
1.1	Bakgrunn for oppgaven	1
1.2	Prosessen fra større stein til partikler	1
1.3	Knusemaskiner	2
1.3.1	Kjefteknuser	2
1.3.2	Konknuser	3
1.3.3	Knusing ved rull	4
1.3.4	Hammerknuser	4
1.4	Kverningsteknologi	5
1.4.1	Ulike måter steinenes størrelse reduseres på ved kverning.....	6
1.4.2	Trommelmøller.....	7
1.4.3	Roterende vertikale møller	7
1.5	Opplagring av Trommelmøller.....	8
1.5.1	Kulelager	10
1.5.2	Hydrodynamisk lager	11
1.5.3	Hydrostatisk lager	12
1.5.4	Hydrostatisk lager, komposittsmøring	13
1.6	Lagre med stor lastkapasitet og lav rotasjonshastighet	13
1.6.1	Glidelager	13
1.6.2	Metall, med teflon eller smørelommer.....	14
1.6.3	Glidelager av kompositt	14
1.7	Lager med høy rotasjonshastighet	15
1.7.1	Magnetlager.....	15
1.7.2	Magneter.....	15
1.7.3	Typer permanentmagneter.....	15
1.7.4	Permanentmagnetens energitetthet og temperatur:	17
1.7.5	Utvikling nye permanentmagneter	17
1.7.6	Priser og prisutvikling permanentmagneter	18
1.7.7	Elektromagneter	19
1.7.8	Halbach array	19
1.8	MagLev, Magnetic Levitation	19
1.8.1	Electrodynamic Suspension	20
1.8.2	Electromagnetic Suspension	21
1.9	Roterende magnetlager	21
1.9.1	Aktive magnetlager	21
1.9.2	Magnetlager og motordrift i ett	22

1.9.3	Passivt magnetlager	23
1.10	Smarte væsker	24
1.10.1	Ferrovæske	24
1.10.2	Magnetorheological (MR) væske	25
1.10.3	Semiaktiv dempning ved magnetorheologica væske.	25
2	Innledning	27
2.1	Kort idébeskrivelse	27
2.2	Problemstillinger:	27
2.3	Målsettinger	28
2.4	Begrensninger	28
3	Produktplanlegging	29
3.1	Prosesstrinn og delmål	29
3.2	Milepælsplan	29
3.2.1	Markedsdefinisjon	30
3.2.2	Oppdragsbeskrivelse	30
3.2.3	Kravspesifikasjoner	31
3.3	Fysiske krav til mølle	31
4	Ide og Konseptgenerering	32
4.1	Konsept 1; “Høy og lavviskositetssmøring i ett ved bruk av magnetorheologica væske”	33
4.2	Konsept 2; “Løft ved Luft”	35
4.3	Konsept 3; “Løft ved Permanentmagneter”	36
4.4	Konsept 4; “Løft ved induisert spenning i krets”	41
4.5	Konsept 5; “Løft ved elektromagnetisme”	44
5	Konseptutvalg	45
5.1	Utvalgelse av lageplassering	45
5.2	Utvalgelse av magnetisk lagerkonsept	45
5.3	Utvalgelse av lagerkonsept	46
5.4	Oppsummering	46
6	Videre konseptualisering	47
6.1	Bakgrunn	47
6.2	Problemstillinger	49
6.3	Målsettinger og begrensninger	49
6.4	Kravspesifikasjoner	49
6.5	Konseptutarbeidelse	51
6.5.1	Konseptualisering, holdere for magneter.	51
6.5.2	Konseptualisering, bærende profil som skal holde magnetprofilene.	53

6.5.3	Konseptualisering, fundament.....	56
6.5.4	Utvelgelse av konstruksjonskonseptene, lagerdelen monter på møllekropp.....	59
6.5.5	Utvelgelse av konstruksjonskonseptene, lagerdelen montert på bakken.	60
7	Grunnlagsberegninger	61
7.1	Dimensjoneringsgrunnlag for magneter	61
7.1.1	Krevd areal for løft	63
7.1.2	Vekten av magneter på skaldelen av lageret	65
8	Strukturoptimering	67
8.1	Strukturoptimering Fundamentstol	67
8.1.1	Mål med strukturoptimaliseringen	67
8.1.2	Elementer	67
8.1.3	Materiale.....	67
8.1.4	Opplagring og laster	67
8.1.5	Resultat strukturoptimering.....	68
9	Fremstilling og produksjonskostnader	71
9.1	Fremstilling og produksjonskostnader.....	71
10	Formgivning og design.....	72
10.1	Fundamentdelen.....	73
10.2	Skaldelen av lageret.....	74
11	Diskusjon og konklusjon.....	76
11.1	Forbedringspotensialer.....	76
11.2	Konklusjon.....	76
11.3	Videre arbeid.....	77
12	Kilder.....	78
12.1	Skriftlige kilder	78
12.2	Internettkilder.....	78

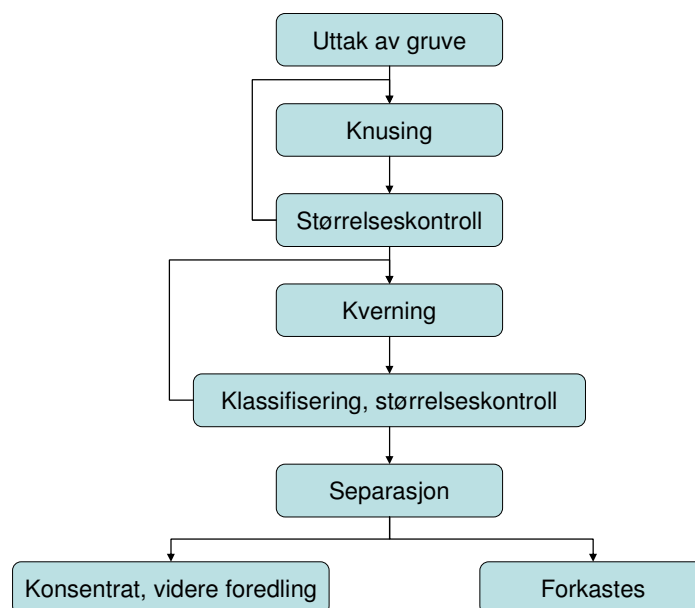
1 Litteraturstudie

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Innen gruvedrift er de største enkeltkostnadene rentekostnader og energikostnader. De ekstreme størrelsene gir at en stor andel av kostnadene ved oppgradering eller etablering av produksjonsanlegg, er direkte avhengig av mengden råmaterialer som skal til for å lage maskinene. De stigende energiprisene, og det økte fokuset på mengden CO₂ som slippes ut i de forskjellige industriene gir nye krav når det kommer til effektivitet.

1.2 Prosessen fra større stein til partikler

Mineraler oppstår i mange forskjellige former. Edlere metaller, som gull og platina, finner man i metallisk form. Metaller som lett oksiderer og som er i forbindelse med andre stoffer kaller man mineraler. Omdanning av mineraler til metaller er en svært energikrevende prosess. Mineralene kan være både bundet i alt fra sandlignende sedimenter til hard granitt. Halvharde til harde sedimenter, steiner, vil normalt kreve en prosess der man først henter ut steinene, enten fra dagbrudd eller underjordiske ganger. Steinmassene vil normalt ved uttak fra gruva ha den størrelsen knusemaskineriet er dimensjonert for. Knusemaskinene påfører steinene et stort trykk slik at de sprekker opp i mindre biter. Trykket påføres ved at steinene klemmes sammen. Steinene går så igjennom en størrelseskontroll. Dersom steinene er for store gjentas prosessen. Knusingen kan skje i flere steg og med flere forskjellige typer knusemaskiner, dette avhenger av steinens størrelse og egenskaper. De sedimentene som har riktig størrelse kvernes. Steinknusingprosessen er vist i ett forenklet flyskjema (fig. 1). Det er gjort en spesifikk undersøkelse av energikonsumet ved de forskjellige prosessene innen reduksjon av steinstørrelsene. Undersøkelsen fra de Canadiske kobbergruvene viste at knusingen krevde i snitt 2,2kWh⁻¹, kverningen krevde 11,6kWh⁻¹ og 2,6kWh⁻¹ for flotering. (Wills et al. 2006) 35% av salgsprisen for kobber er estimert at går med til å dekke kostnadene av den energien som skal til i produksjonsprosessen (Dahlstrom 1986). I USA er det estimert at 50% av denne energien brukes i foredlingsprosessen (Wills et al. 2006).



Figur 1. Flytdiagram for gruve

1.3 Knusemaskiner

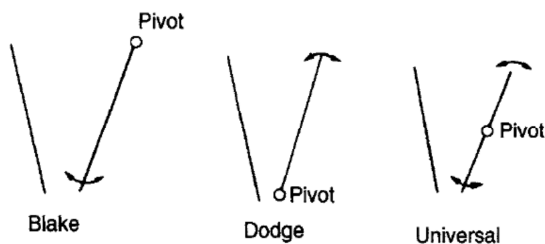
Knusing skjer ofte i to eller flere steg avhengig av steinens egenskaper. Primærknuseren er større maskiner hvis egenskap er å redusere steinstørrelsen til en størrelse som er praktisk for transport og mating til sekundær knuser eller direkte til kverning. Normalt vil steinene ha en størrelse på opp mot 1,5 meter i diameter ved uttak fra graven. Nyere primærknusere kan ta steiner på 2 meter i diameter. Etter å ha vært igjennom knusemaskineriet en gang, primærknusing, vil steinene være på mellom 10-20 cm. Møllene, som brukes til kverning, er i stand til å kverne steiner på denne størrelsen, men dette er mindre effektivt enn å redusere størrelsen på steinene ytterligere gjennom knusing. Steinene knuses nok en gang, sekundærknusing, til de har en størrelse på mellom 0,5 og 2 cm (Wills et al. 2006). Primærknuseren er som ofte enten en kjeveknuser, eller en gyroknuser. I noen tilfeller blir impulsknusere brukt, men dette er sjeldent.

Sekundærknusere er ofte av en mye mindre dimensjon. En vanlig type sekundærknuser er konknuseren. Konknuseren kommer i flere forskjellige varianter.

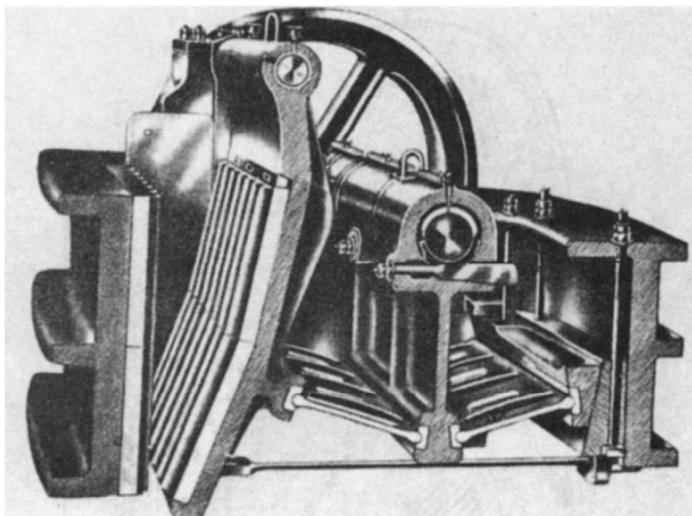
I noen tilfeller er tertiærknusing mer effektivt enn at steinen går videre til kverning etter sekundærknusing. Ved tertiærknusing brukes de samme type maskinene som ved sekundærknusing.

1.3.1 Kjefteknuser

Kjefteknuseren er en primærknuser, designet som en dyrekjeve. To plater står i en vinkel i forhold til hverandre (fig.2). Den ene platen er fast mens den andre er leddet i den ene enden. Det finnes tre måter å ledde kjeven på. Ved å variere vinkelen på den leddede platen vil steinene oppleve press og sprekke opp i mindre steiner, for så å falle lenger ned. Kjefteknuser konstrueres med ett svinghjul som virker med ett stort moment (fig. 3).



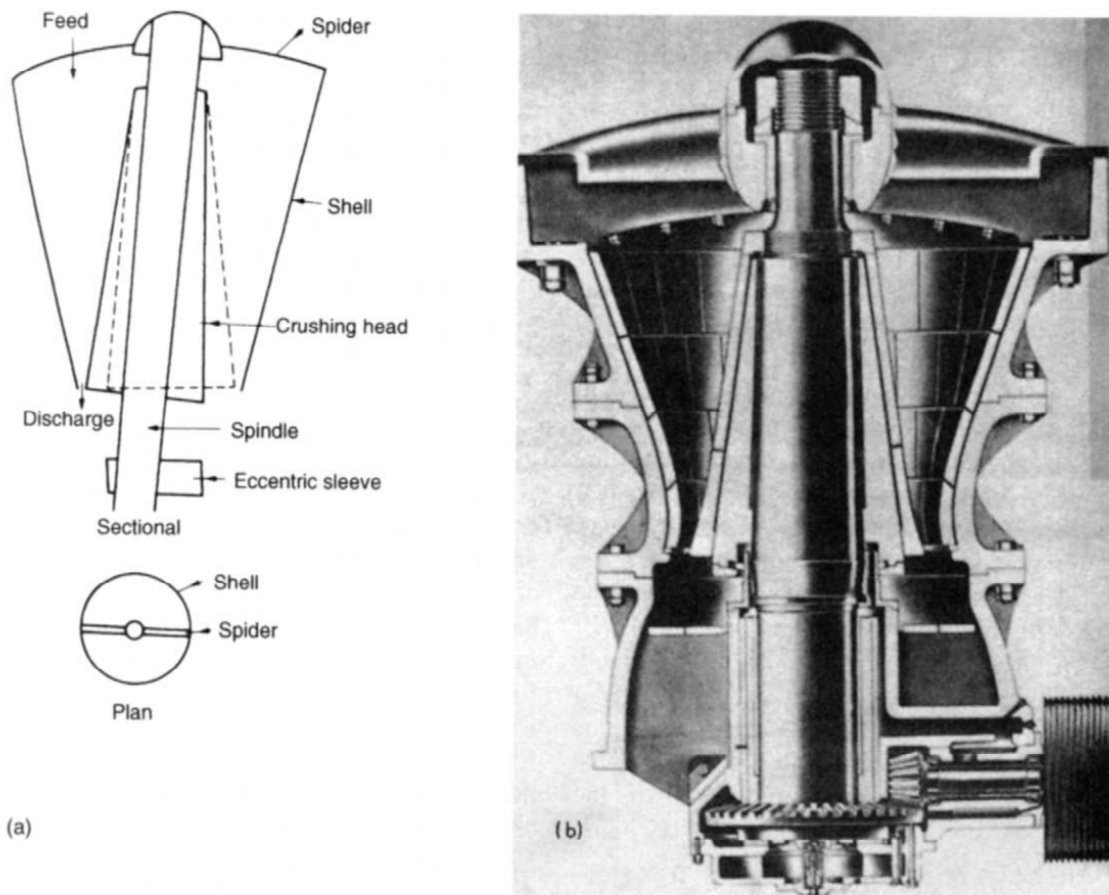
Figur 2. Kjefteknuser, forskjellige måter å ledde kjeven,



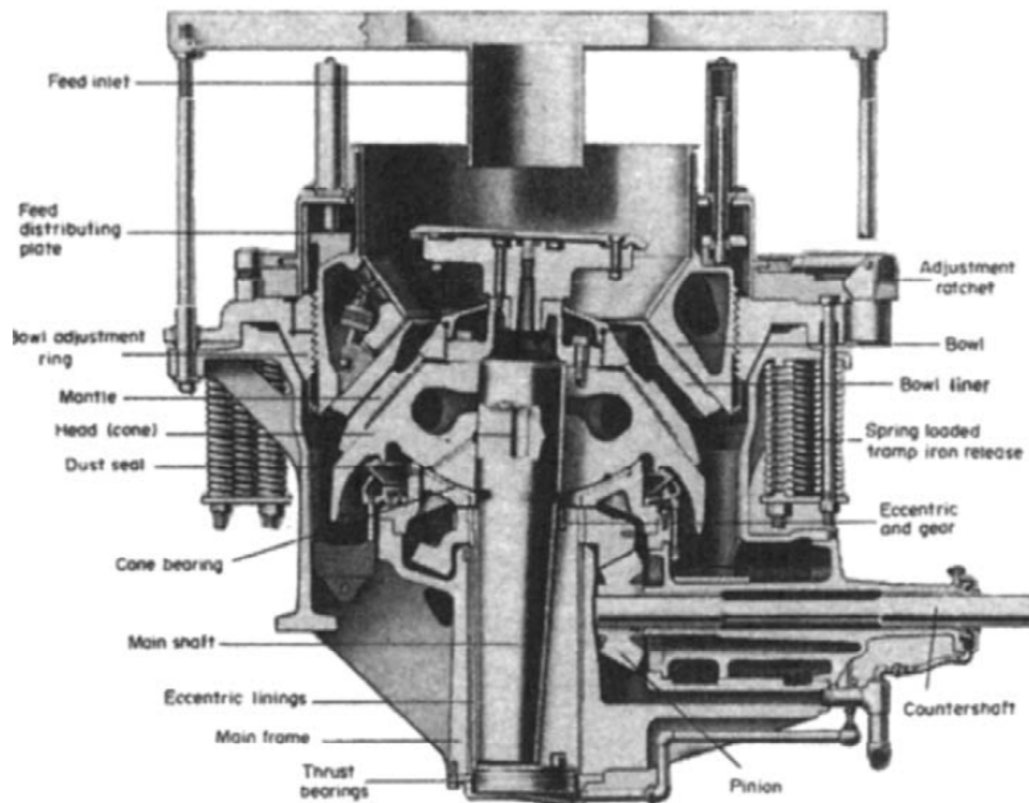
Figur 3. Kjefteknuser, halvmodell, (Wills et al. 2006)

1.3.2 Konknuser

Konknuseren brukes som primærknuser og sekundærknuser. Konknuseren bruker det samme prinsippet som kjefteknuseren, steinene presses sammen, for så å falle ned, for så igjen å presses sammen. Forskjellen her er at konknuseren roterer. En konknuser består av en roterende aksel med konisk del. Den koniske delen er montert slik at når akslingen roterer vil den koniske delen ha en eksentrisk bevegelse. Steinene klemmes hver gang akslingen roterer. Akslingen roterer omkring 85 til 150 ganger i minuttet (Wills et al. 2006) (fig. 4a og b). En mindre versjon av konknuseren brukes ofte som sekundærknuser. Denne versjonen er konstruert slik at akslingen er festet til et lager som når det roterer fører akslingen i en konisk bevegelse (fig. 5)



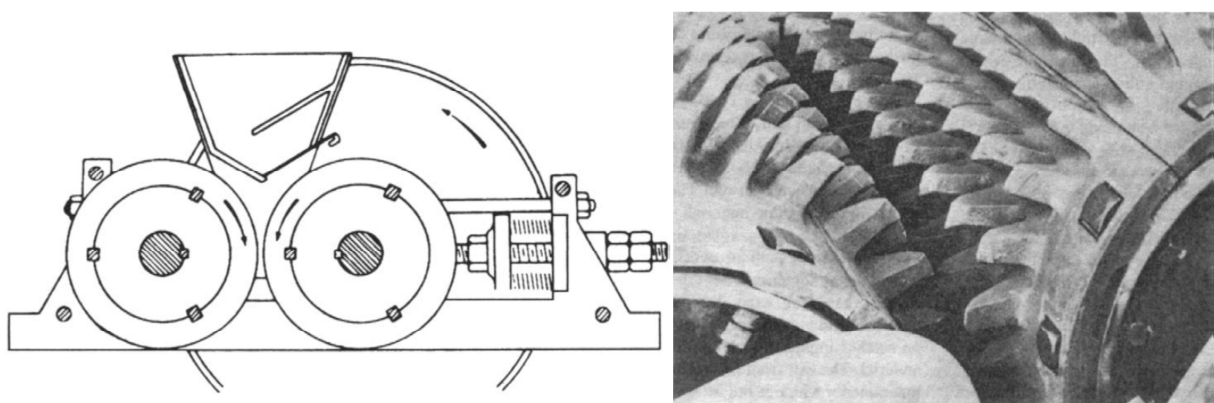
Figur 4, Gyroknuser, (a) funksjonsdiagram, (b) snitt halvmodell, (Wills et al. 2006)



Figur 5, Snitt av Symons knuser, (Wills et al. 2006)

1.3.3 Knusing ved rull

Steinene kvernes her mellom ruller (fig. 6a). Rullene har en ujevn overflate slik at steinene hele tiden trekkes ned mellom rullene (fig. 6b). Størrelsesreduksjonen av steinene er begrenset sammenlignet med konknusere og kjefteknusere. Rullene kan monteres flere etter hverandre. Dette er en nå sjeldnere brukt metode. Dersom man ønsker å redusere størrelsen med et stort forhold vil rullene måtte være store, noe som gjør at disse har en mye høyere anskaffelseskostnad enn alternative knusemetoder.

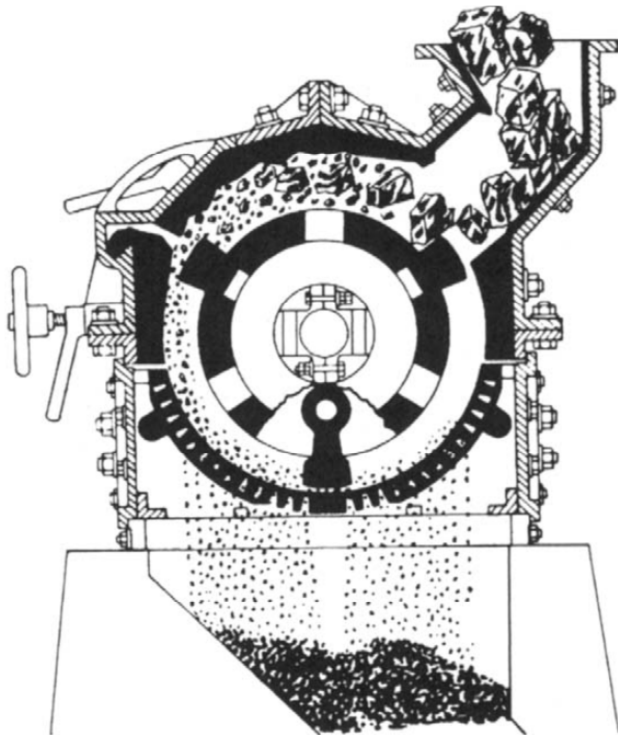


Figur 6, (a) Knusing ved rull, (b) Ujevn overflate, (Wills et al. 2006)

1.3.4 Hammerknuser

Hammerknuser går også under betegnelsen slagknuser. Hammerknuseren fungerer ved at en aksling roterer. På akslingen sitter det flere slaglister som fungerer som hammere. Når akslingen roterer slår slaglistene steinene mot knuseplatene slik at de knuser. Konisk formede

knusere har et svært stort reduksjonsforhold på steinen. Dette i kombinasjon med den koniske formen gir at det faller en del smale og lengre steiner igjennom. En hammermølle unngår dette. Den skaper steiner med mer symmetrisk mål. Denne er derfor mer populær både for å knuse stein, for reduksjon av kullbiters størrelse til destruksjon av utrangerte biler.



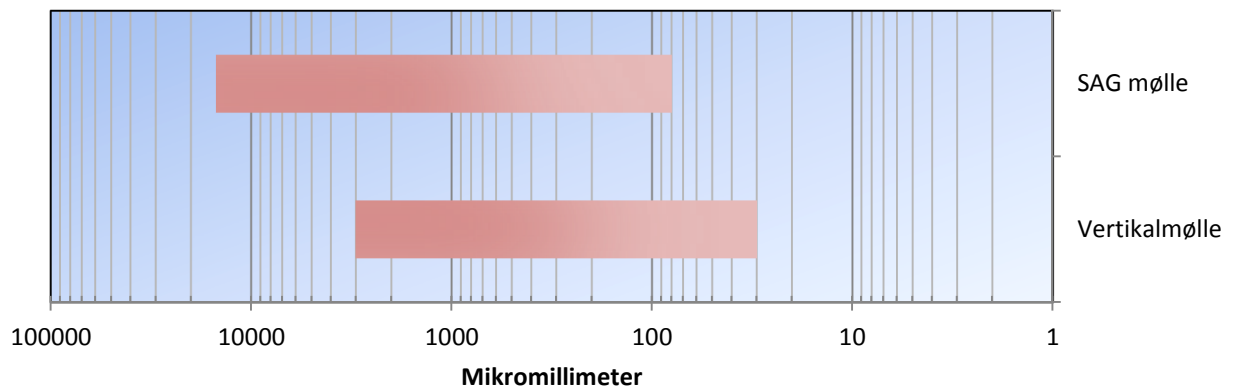
Figur 7, Hammermølle, (Wills et al. 2006)

1.4 Kverningsteknologi

De to mest brukte typer av kverningsteknologi (fig. 8a og b). Teknologiene har forskjellige egenskaper. Trommelmølle er mest effektiv mellom 1,5cm og ned til 2mm. Vertikale møller er effektive i spekteret fra 2mm og ned til 0,2mm (fig. 9). Normalt vil steinen tas inn i en trommelmølle, før de eventuelt går videre til en vertikalmølle. I tilfeller der det ikke er behov for finere partikler, bruker man kun trommelmølle. Steinens egenskaper og ønsket resultat bestemmer hvilken metode man bruker. Flotasjon, som er det siste steget i prosessen, fungerer mer effektivt jo mindre partiklene er, ned til en nedre grense. Normalt vil man derfor måtte finne den mest optimale partikkelstørrelsen ut i fra økonomiske analyser, der man inkluderer både energien ved kverning og resultatet av flotasjonen. Vertikalmøllen har vist seg å være mer effektiv enn trommelmølle innenfor sitt arbeidsområde. Ved oppstart av et nytt prosesseringssenter vil røremøller gi muligheten for en gradvis utbygning av anlegget, slik kan man bygge ut anlegget med lavere risiko, mindre kapital bindes på en gang. Kverneprosessen er mer intensiv i en røremølle, enn i en trommelmølle.



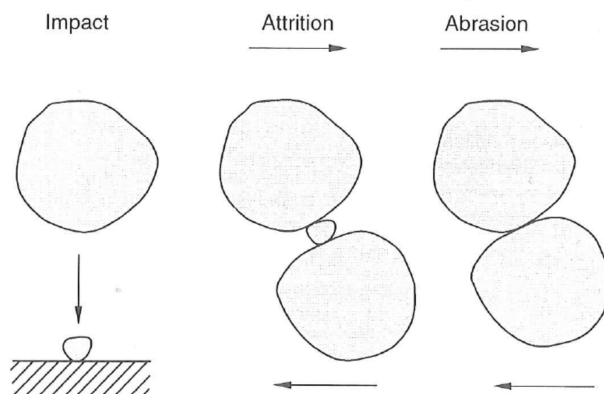
Figur 8. (a) Typisk trommelmølle (Grindingmill 2010), (b) Vertikal mølle, (Metso 2010)



Figur 9, Effektivitet ved kverning av forskjellige størrelser, basert på (METSO 2011)

1.4.1 Ulike måter steinenes størrelse reduseres på ved kverning

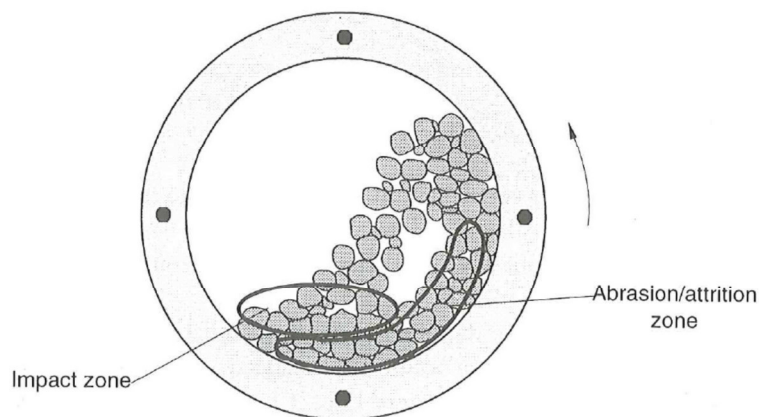
I det møllene roterer er det tre måter steinene reduseres i størrelse. Reduksjon ved kollisjon er når partiklene treffer hverandre vinkelrett på kollisjonsplanet. Attrition er når en mindre stein glir mellom større steiner eller stålballer. Gjennom abrasjon, det vil si slitasje som oppstår når partiklene glir langs med hverandre (fig. 10).



Figur 10, Typer reduksjon av steinstørrelser, (Napier-Munn 1996)

1.4.2 Trommelmøller

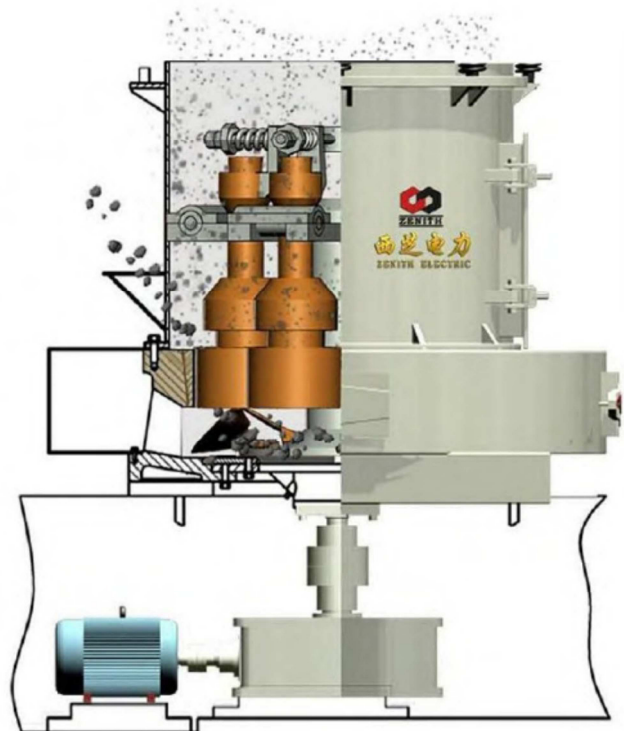
Trommelmøller er roterende sylindre. Det finnes tre typer trommelmøller. Autogen mølle (AG), der steinene knuses ved at de treffer hverandre. Semiautogen mølle (SAG), der steinene knuser mot hverandre og baller av stål. Stangmølle, der det er flere stenger som gjør slik at steinene knuses. Autogen betyr "selvpåført" eller "egenprodusert". Man har i den senere tid gått mer og mer bort fra stangmøller. Felles for alle er at de har en sylindrisk form. Møllene er opplagret i hver ende med enten kulelager, hydrostatisk eller hydrodynamisk lager. Når møllene roterer faller eller glir steinene og de eventuelle tilleggsmaterialene og treffer bunnen i mølla. Når materialene gnisser mot hverandre, eller treffer hverandre, sprekker steinene opp i mindre steiner. Hvor fort materialene slites ned bestemmes av antall lag med masser og relativ hastighet mellom lagene. Forholdet mellom kverning ved gnissing og kverning ved kollisjon bestemmes av rotasjonshastigheten, antall lag med masser (partikkelstørrelse og % fylling) i mølla og diameteren på møllen.



Figur 11. Bevegelser innside mølle (Napier-Munn 1996).

1.4.3 Roterende vertikale møller

Vertikale røremøller fungerer ved at bevegelsen skjer roterende med aksel i vertikal retning. Det er flere varianter av vertikale møller. En av teknologiene fungerer ved at partiklene løftes ved en skruvebevegelse slik at de hele tiden gnisser mot hverandre, reduksjonen av partikkelstørrelsene skjer hovedsakelig ved abrasjon og attrition (fig. 8b). Ett annet teknologialternativ er roterende ruller der partiklene knuses mellom rullene og veggen (fig. 12). Vertikale møller er ofte av mindre dimensjoner enn trommelmøllene. Dersom et gruveselskap ønsker å starte produksjon, eller utvide, kan vertikale møller være en god løsning dersom man har problemer med likviditeten. Man har muligheten til en gradvis utbygging.



Figur 12, Vertikal mølle, (Zenith 2011)

1.5 Opplagring av Trommelmøller

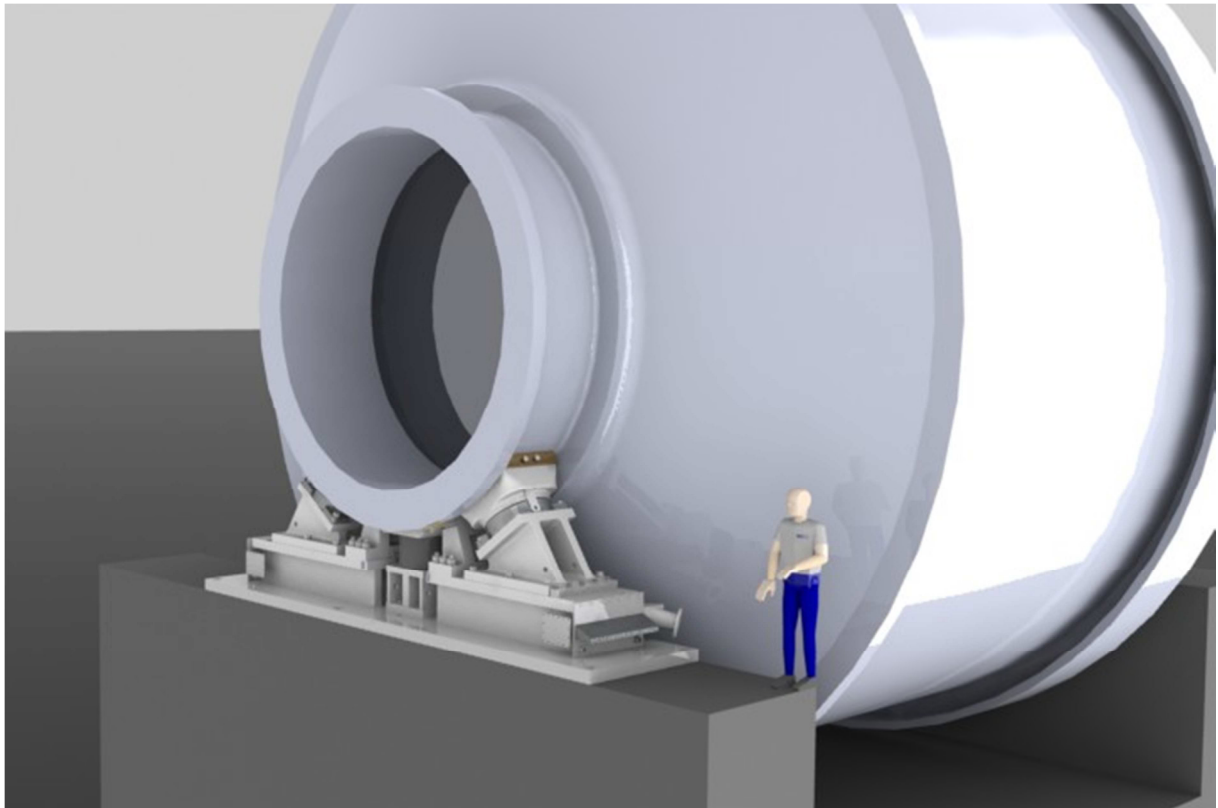
Trommelmøllene finner man i størrelser fra små, drevet ved hjelp av hest og kjerre, til store opp til 12 meter i diameter og 6,1 meter lange (Wills et al. 2006). Normalt opplagres møllene i tappen (fig. 13a) Man har også møller som er opplagret på skallet (fig. 13b). Opplagring på skallet eller i tappen avhenger av hva som er lønnsomt og av hva kunden ønsker. Mindre møller er oftere enn større møller opplagret i skallet. Opplagring i skallet har utfordringer knyttet til stabilitet. Opplagring av tappen har den fordel at disse er mer stabile ettersom opplagringspunktene er plassert lengre fra hverandre enn ved opplagring av skall. Man kan også standardisere på tappstørrelser, mens diameteren på skallet ofte er basert på spesifikke ønsker fra kunden. Ulempen ved opplagring i tappen er at opplagringspunkter plassert i stor avstand med en last mellom gir større spenninger i konstruksjonen.



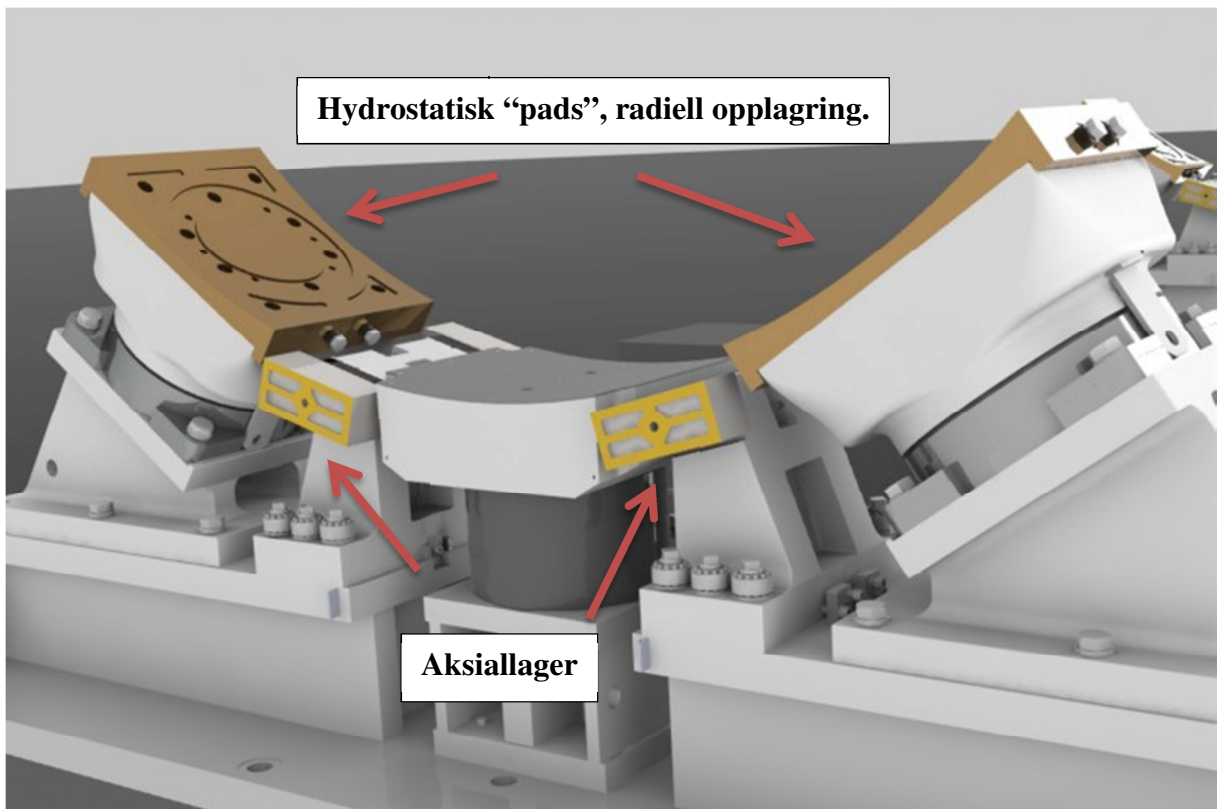
Figur 13.(a) Mølle opplagret i tapp (DoveMining), (b)Opplagret i skall, (KHD)

Opplagringsmetode avhenger av størrelse på møllene. Mindre møller med opp til to meter lager kan bruke kulelager eller hydrodynamisk opplagring. På større møller med tapp på to meter eller mer bruker man oftere hydrostatisk lagre.

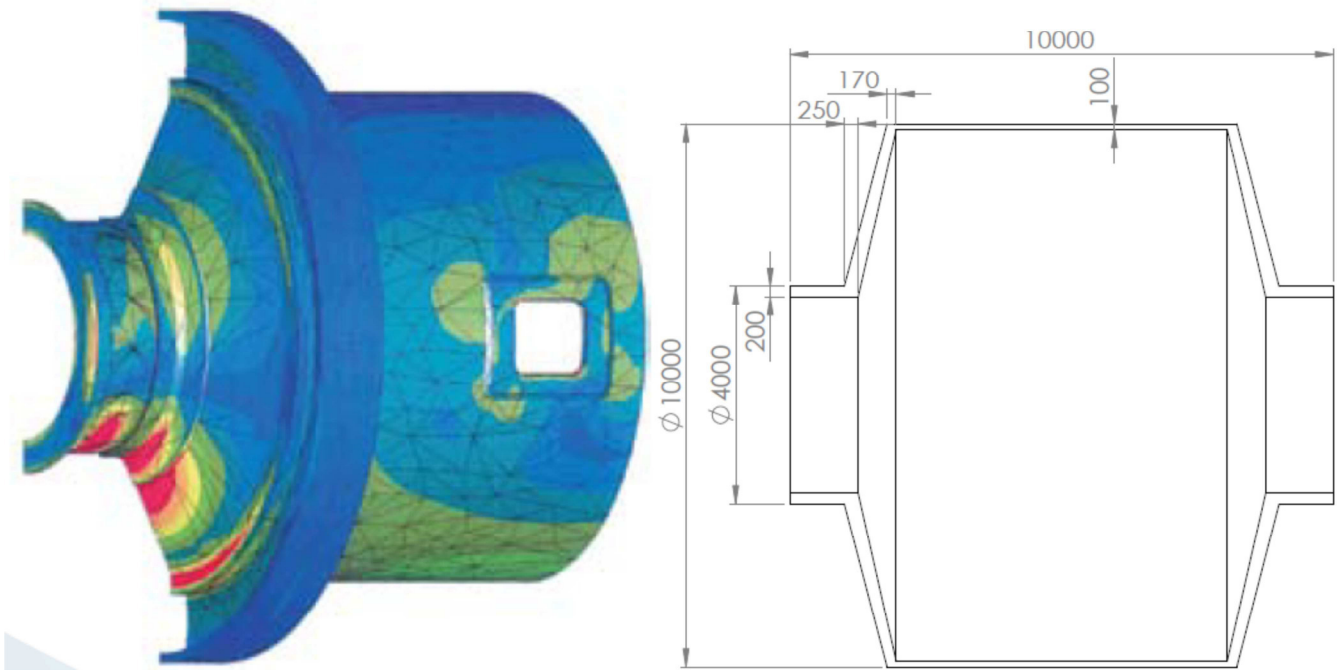
Under konstruksjon av trommelmøller vil man ofte få store spenningskonsentrasjoner i overgangene mellom geometriene. Spenningskonsentrasjonene er fremhevet av et FEM verktøyet ved en rød farge (fig. 16a) Normalt er tappen støpt i en del, slik at lagerbanen er hel og dermed har få sjøter som ville gitt spenningskonsentrasjoner. Opplagring ved “pads” gir store spenningskonsentrasjoner både der lagerpads er i kontakt med møllekroppen og i geometriovergangene, på tappen og kanten av skallet (fig. 14). Dette er deler av møllegeometrien som er utfordrende å konstruere. Gevinsten ved optimalt design er stor mens resultatet av en feildimensjonering med påfølgende sprekkdannelse kan være økonomisk katastrofal. En tapp på større møller kan veie over 100 tonn. Større trommelmøller har store dimensjoner på tykkelsen i skall og tapp. For møller på med diameter på rundt 10 meter finner man ofte skalltykkelser på 100mm mens tappen kan ha tykkelser på over 200mm (Figur 16b).



Figur 14. 10m diameter mølle med hydrostatisk opplagring, basert på (Outotec 2010)



Figur 15. Hydrostatisk lager, radielt og aksialt, 4m diameter. Basert på (Outotec 2010).



Figur 16. (a)Spenninger i konstruksjon ved opplagring i tapp. (FLsmidth). (b)Vanlige dimensjoner for stor mølle, 20MW motor eller større.

1.5.1 Kulelager

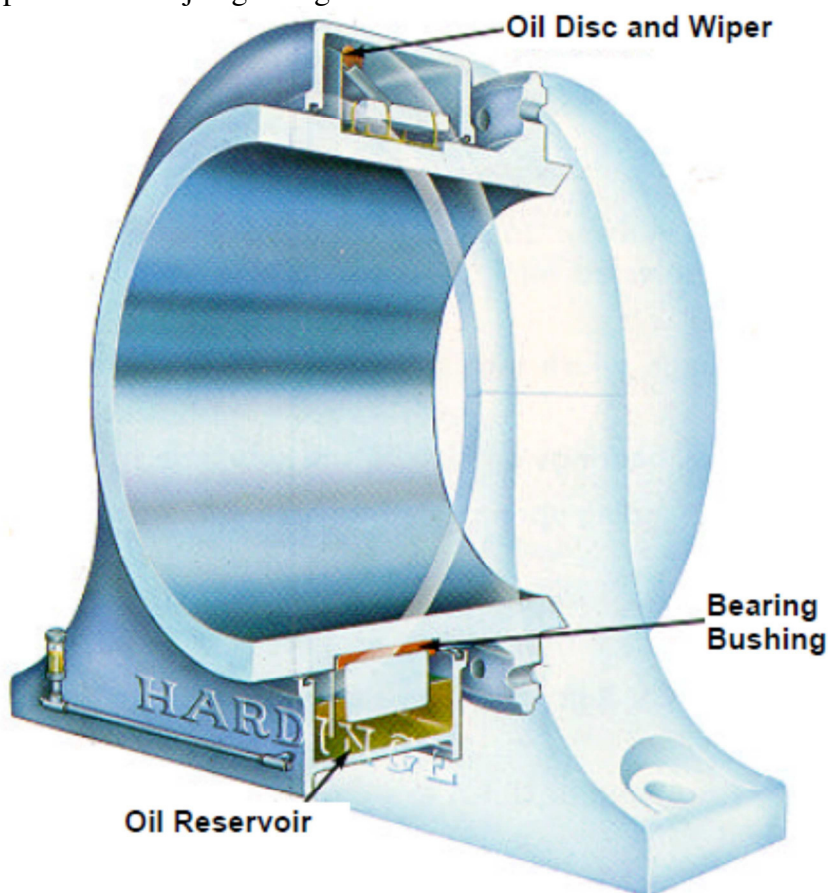
Kulelager består av to ringer spærert av flere kuler (fig. 17). Kulelager har en begrenset lastkapasitet. Kontaktarealet er begrenset til en liten del av hver kule. Kulelager kommer i standard størrelser. Normalt vil man få kulelager levert fra ekstern leverandør. Kulelagrene kan være vannkjølte, eller de har sirkulasjon av olje med kjøling. Større kulelagre smøres konstant. En leverandør kan levere kulelagre i størrelser med opp til 3,8 meter indre diameter og med kapasitet til å ta en radial last på 460 tonn (SKF 2011). Keramiske kulelagre har blitt mer tilgjengelig i mindre størrelser av lagre. Keramiske lagre påstås å ha samme kapasitet som kulelager i stål. Keramiske produkter er ikke like utsatt for korrosjon som metall. Keramiske lagre skal også ha lavere friksjon ettersom kulene er maskinert finere, noe som igjen tillater at man kan kjøre med mindre olje. De keramiske delene forurenses også oljen i mindre grad. Keramiske lagre er ikke magnetiske og blir heller ikke dette i drift. Dette gir at kulene skal holde seg renere.



Figur 17. Kulelager, (easybizvietnam)

1.5.2 Hydrodynamisk lager

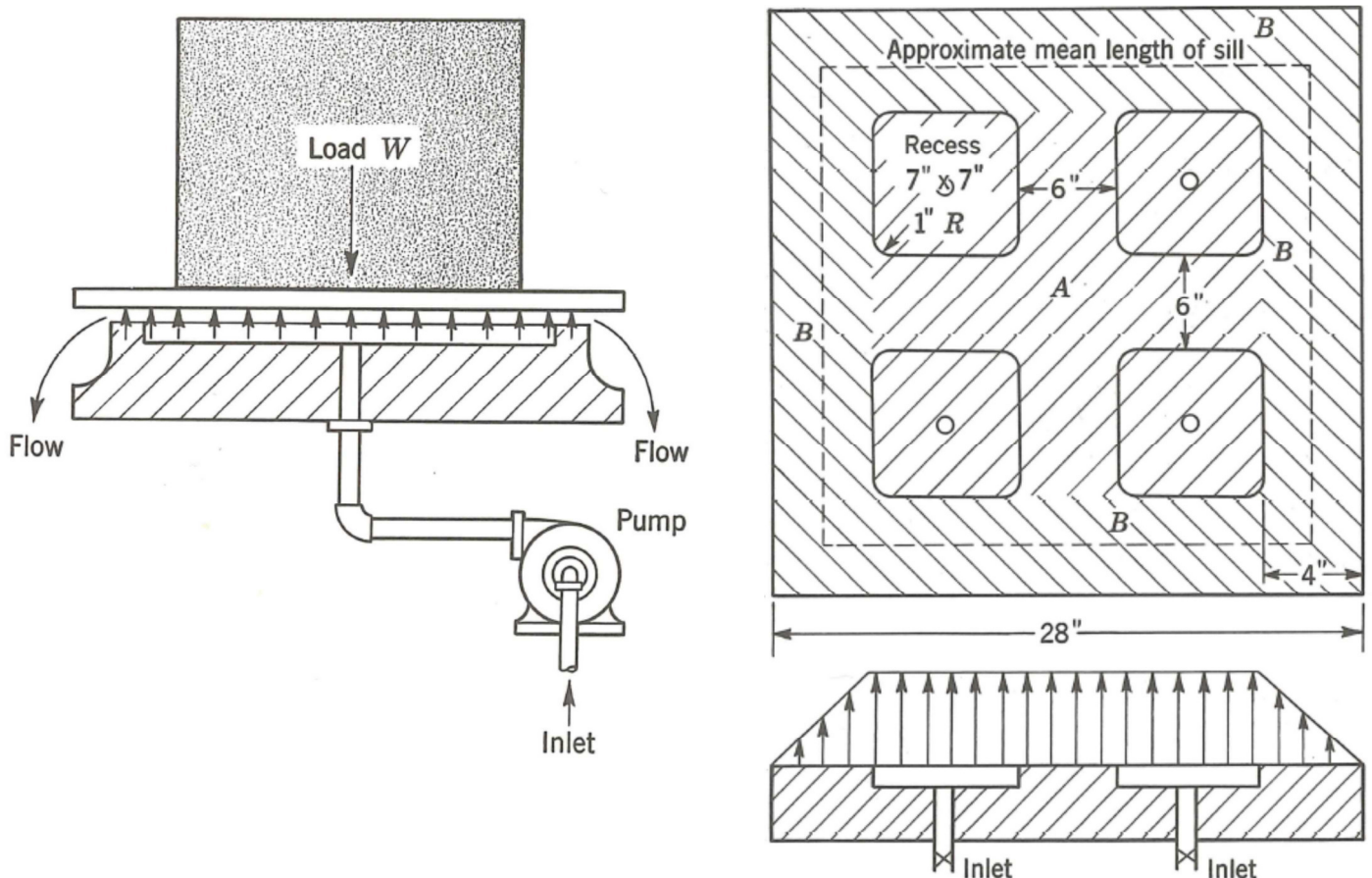
Hydrodynamisk smøring er når en lagerflate dekkes med smøring. Lagerflaten dekkes ved at en del av flaten befinner seg i direkte kontakt med en beholder med smøremiddel.. Når lagerflaten så klemmes mot en annen lagerflate vil smøremiddelet fordele seg som en tynn film mellom lagene (fig. 18). Skjærbevegelsen skjer i smøremiddelet. Hydrodynamisk smøring er noe vi finner i de fleste maskiner. For roterende lagre kommer lagerbanen i kontakt med et oljebad, olje suger seg til overflaten på lagerbanen og blir dratt med rundt. Oljen presses så mellom de to lagerflatene. Tykkelsen på oljefilmen avhenger av den relative hastigheten mellom lagerflatene og oljens viskositet. Teoretisk øker bæreevnen når tykkelsen på oljefilmen reduseres helt til uendelig. Ugjevnheter i lagerflatene er en begrensende faktor, sammen med oljens termiske egenskaper og elastisitet. Ved lave relative hastigheter kan oljefilmen brytes. Oljefilmen er tynn, fra 0,001mm til 0,1mm tykk. Friksjonkoeffisienten avhenger av viskositet og utforming av lagerflatene, men er mellom 0,1 og 0,0001 (Fuller 1984). En utfordring med hydrodynamiske lagre er under oppstart. Det er stor motstand ettersom lagerbanen ikke er smurt. Oljefilmen brytes ved høyt trykk og lav nok relativ hastighet mellom lagerbanene. En løsning på dette er å ha et sekundærlager som avlaster midlertidlig mens rotasjonshastigheten økes inntil selvsmøringen er i gang. Lagerets dårlige egenskaper ved oppstart er også en begrensende faktor av lagerets kapasitet. For større lagre, slik som for møller, vil oljefilmens tykkelse i forhold til deformasjoner i lagerflaten være en utfordring. Store lagre har en tendens til noe deformasjon, jo større jo mer deformasjon. Resultatet av en ujevn lagerbane kan være en brutt oljefilm. Dersom oljefilmen brytes vil det oppstå stor slitasje og mulig havari.



Figur 18, Hydrodynamisk lager (METSO 2011).

1.5.3 Hydrostatisk lager

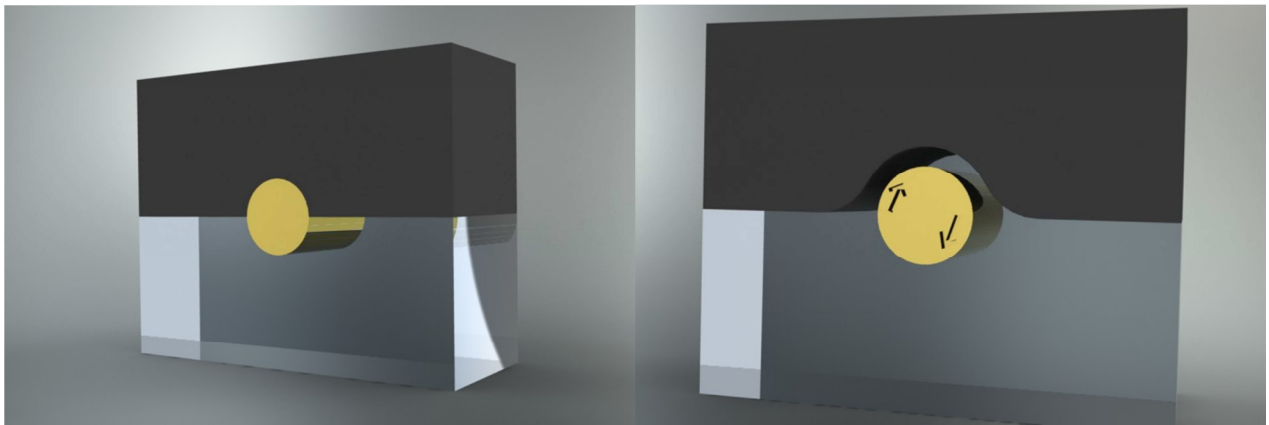
Et hydrostatisk lager fungerer ved at olje pumpes inn i et kammer mellom to flater som skal løftes fra hverandre (fig. 19a). Trykket gjør at de to flatene deles av en oljefilm. Oljefilmen er vanligvis på rundt 0,1mm tykkelse (Fuller 1984). Dimensjonering skjer i flere trinn. Trinn en er å avgjøre lasten lageret skal løfte. Maksimalt trykk ut fra normale hydraulikkssystemer er rundt 15MPa (150 bar) (Green 2010, pers. med.) Det tilgjengelige trykket avgjør så størrelsen på flaten. Ved beregning av lagerflaten lar man normalt trykket være konstant over fordypningene, mens trykket synker proporsjonalt mellom fordypningens kant og lagerets kant (fig. 19b). Det vil lekke olje langs kantene av lageret, dette er med på å bestemme pumpens kapasitet. Når trykk og lagerflate er satt, er tykkelsen på oljelaget mellom de to flatene avhengig av oljens viskositet. Tykkelsen på oljelaget er med på å avgjøre stivheten og dempningseffekten i lageret. Lastvariasjoner avgjør kravet til oljens stivhet og dempningseffekt. Pumpesystemet består normalt av pumpe, akkumulatortank, partikkelfilter og kjølesystemer. For trommelmøller må man også ha varmelement slik at oljen holder ønsket temperatur. Oljen kjøles ned av møllekroppen. Dersom en pumpe skulle havare eller av andre årsaker stanse mens møllen roterer, vil akkumulatortanken levere olje inntil møllen har stoppet å rotere. Dersom oljestrømmen skulle stanse helt, ligger det lagermateriale på lagerskålen som tar opp eventuell kontaktfriksjon. Lagermaterialet er ofte av et mykt metall eller plast. Lagermaterialet brukes for å unngå at det skjer deformasjoner i deler av konstruksjonen som er vanskelig eller dyrt å bytte ut. I et hydrostatisk lager har oljen som oppgave å dempe vibrasjoner og å smøre. For at oljefilmen skal ha en tilfredsstillende tykkelse, bruker man ofte oljer med høyere viskositet. Høyere viskositet gir høyere friksjon og dermed større energitap enn dersom man kunne bruke tynnere oljer.



Figur 19. (a) Hydrostatisk prinsipp. (b) Trykket over flaten (Fuller 1984).

1.5.4 Hydrostatisk lager, komposittsmøring

Ved å påføre et smøremiddel med lavere viskositet langs den ene lagerflaten, oppnår man en friksjonskraft som er en kombinasjon av friksjonskraften i smøremiddelet med lav viskositet og oljen med høy viskositet. Dette er en teknologi som ikke er i bruk enda men som er på forskningsstadiet. Man beholder den dempende egenskapen til smøremiddelet med høyere viskositet, mens friksjonen i større grad skjer i smøremiddelet med lavere viskositet. Man har observert at mange væsker med lav viskositet har en tendens til å søke de områdene med størst skjærkrefter dersom det er en bevegelse (Joseph 2009). I et forsøk med olje og vann er prinsippet vist. Vannet, med lavere viskositet ble med overflaten på staven under rotasjon og fortrent oljen (Szeri 2010) (fig. 20). Slik ble det lavere friksjon enn om man skulle spinne staven i kun olje.



Figur 20. (a) Før bevegelse, (b) Ved rotasjon av stav. Basert på (Szeri 2010)

1.6 Lagre med stor lastkapasitet og lav rotasjons hastighet

1.6.1 Glidelager

Glidelager fungerer ved at man har to flater bestående av materiale med lav friksjonskoeffisient. Flatene glir mot hverandre. Noen glidelagre er selvsmørende med porer i flaten. Porene inneholder smøremiddel som fordeler seg på overflaten. I offshoreindustrien brukes glidelager i ekstreme miljøer der korrosjon og påskjenninger er store utfordringer. Glidelagre fungerer både i tørr tilstand og nedsenket i væske. Glidelager fungerer ved lave hastigheter og høy belastning. To typer glidelager er vist. Glasfiberforsterket komposittlager (fig. 21a). Metallisk selvsmørende glidelager med porer fyllt med smøremiddel (fig. 21b).



Figur 21.(a) Komposittlager (PMCServi 2011b). (b) Selvsmørende glidelager (PMCServi 2011c).

1.6.2 Metall, med teflon eller smørelommer.

Metalliske glidelagre kan være laget av bronse, jern, nikkell eller rustfritt stål. Normalt bruker man ett tørt smøremiddel, som eksempel grafitt. Grafitten er da jevnt fordelt utover hele flaten. Man kan også bruke teflon jevnt fordelt. Ved bruk løsner det hele tiden grafittpartikler som setter seg på lageroverflaten og smører. Dersom forholdene tilsier det kan man bruke flater med fordypninger eller hull fylt med smøremiddel. Viktig ved valg av teknikk er glideflatenes relative hastighet, lagerlasten og temperatur. Metalliske glidelagre har lav stillestående friksjon noe som gir gode egenskaper under starten på en bevegelse. Lagrene har ett stort temperaturspenn. Metaller leder strøm og det vil derfor ikke bygge seg opp elektrostatiske spenninger. En friksjonskoeffisient på mellom 0,10-0,15 er ganske høy (Tabell 1). Lagrene egner seg dårlig ved en kombinasjon av kontinuerlig drift, stor belastning og med store relative hastigheter mellom lagrene.

Tabell 1. Egenskaper glidelager av bronse, (PMCServi 2011a)

Material property	Unit	Value
Max. permitted static load (\bar{p})	MPa	150
Max. permitted dynamic load (\bar{p})	MPa	90
Max. silding speed (U)	m/s	0.4
Max. $\bar{p}U$ -value	MPa \times m/s	1.5
Friction coefficient (dep. on operating cond.)	μ	0.10 to 0.15
Temperature range	$^{\circ}\text{C}$	-100 to +250

1.6.3 Glidelager av kompositt

Glidelager med komposittflater er spesielt utviklet for å ha lave friksjonskoeffisienter sammenlignet med andre glidelagere. Smøringen sitter i fibrene, slik smøres lagerbanen konstant. Det er mulig å tilføre smøring utover den som er i fibrene. Den største tillatte relative hastigheten er på 0,3 meter per sekund (Tabell 2). Dette er en begrensende faktor og lageret passer best for lave hastigheter. Konstruksjonsmessig forsterkes komposittflaten med en ytre kappe av glassfiber. Komposittlagre har stor motstandsdyktighet i kjemiske miljøer. Komposittlager har også relativt lav friksjonskoeffisienter sammenlignet med smurte glidelagre i metall. Friksjonskoeffisienten er mellom 0,03 og 0,12 (Tabell 2).

Tabell 2. Egenskaper glidelager av kompositt, (PMCServi 2011a)

Material property	Unit	Value
Max. permitted static load (\bar{p})	MPa	220
Max. permitted dynamic load (\bar{p})	MPa	120
Max. sliding speed (U)	m/s	0.3
Max. $\bar{p}U$ -value	MPa \times m/s	1.8
Friction coefficient (dep. on operating cond.)	μ	0.03 to 0.12
Temperature range	$^{\circ}\text{C}$	-100 to +160

1.7 Lager med høy rotasjonshastighet

Valget av opplagring avhenger av rotasjonshastighet og last. Ved høye rotasjonshastigheter må man ha en lav friksjonskoeffisient for ikke å tape for mye energi. Innen fysikkmiljøene er det en del forskning på magnetiske og elektromagnetisk opplagring. Man ønsker å lagre energi ved hjelp av svinghjul. Dette setter krav til svært lav friksjonskoeffisient og høy stabilitet.

1.7.1 Magnetlager

Magneter har den egenskapen at to ulike poler tiltrekker hverandre, mens to like poler frastøter. Akkurat som gravitasjonskraften øker denne kraften eksponensielt jo nærmere de to polene kommer hverandre. Magnetfelt kan skapes både ved å påføre et materiale et annet magnetfelt, ved å drive strøm gjennom en spole og da harde magneter som har et magnetfelt uavhengig av omgivelsene. Teknologien rundt magnetlager har hatt stor utvikling fra midten av 90-tallet og frem til nåtid. Spesielt har det vært en stor utvikling innen aktive magnetlagre. Hovedsakelig med bakgrunn i at man har utviklet teknologi som skal til for å måle bevegelse, prosessorer for beregninger og elektronikken som skal til for å sende de nødvendige strømmene til de aktive magneter.

1.7.2 Magneter

En magnet er et objekt som lager et magnetisk felt. En permanentmagnet er en magnet som har ett magnetfelt uten ytre påvirkning. Permanentmagnet kalles også harde magneter. Ferromagnetisme er et fellesbegrep for en mekanisme som gjør at visse materialer former seg som myke og harde magneter. Et materiale som er magnetisert, vil si at materialets partikler står i samme retning med sine magnetfelt. Summen av dette gir et magnetfelt for hele gjenstanden. I tilfeller der alle partiklene står i samme retning kaller man ferromagnet, mens i tilfeller der det er en blanding, men der det fortsatt er et magnetfelt, kaller man ferrimagnet. Antiferro er når partiklene utjevner hverandre og det ikke er noe magnetfelt. Myke magneter er magneter som etter saturasjon går tilbake til sin opprinnelige tilstand. Saturasjon vil si at man påfører et magnetfelt som gjør slik at de magnetiske domenene i materialet stiller seg parallelt. På den måten skaper materialet et magnetfelt. Permanentmagneter er materialer der de magnetiske domenene ikke blir påvirket i særlig grad av ytre magnetfelt så lenge man holder seg under den spesifikke Curie temperaturen. Ved magnetisering eller avmagnetisering av permanentmagneter må temperaturen være over Curie temperaturen. Man varmer opp materialet, setter det i et magnetfelt og lar det kjøle ned. Permanentmagnetens domener vil da holde seg parallellt når det settes i et ytre magnetfelt.

1.7.3 Typer permanentmagneter

Neodymium Boron ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) er en av de mest populære magnetene. Magneten har lav pris og høy effekt. En oversikt over eksisterende magneter og deres egenskaper er vist i Tabell 3. Neodymium magneter har en lav Curie temperatur. Samarium Cobalt magneter er en annen populær type magnet. Denne har en høy Curie temperatur noe som tillater høyere temperaturer under drift.

Tabell 3. Magneter og deres egenskaper (Marinescu et al. 2007).

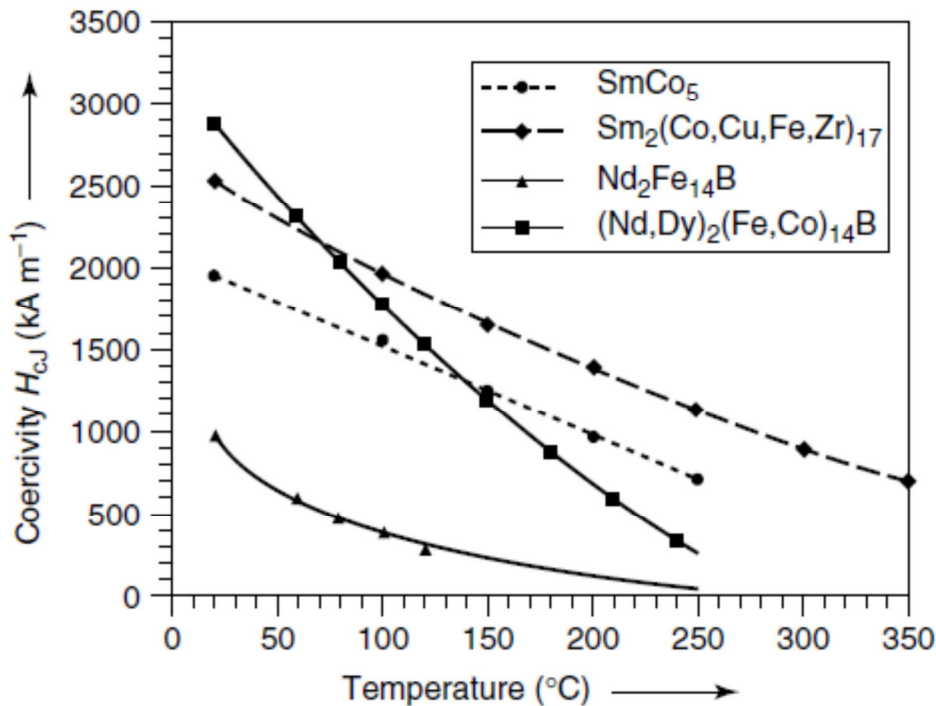
Compound	$\mu_0 M_s$ (T)	H_A (MA m ⁻¹)	T_C (°C)	References
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.6	5.36	312	Buschow (1991)
Pr ₂ Fe ₁₄ B	1.56	6.96	292	Buschow (1991)
Nd ₂ Fe ₁₄ C	1.5	7.60	262	Buschow (1991)
Sm ₂ Fe ₁₇ N _{2.3}	1.54	11.20	476	Coey and Sun (1990)
Sm ₂ Fe ₁₇ C	1.24	4.24	279	DeMooij and Buschow (1988)
Sm ₂ Fe ₁₅ Ga ₂ C	≈1	>7.20	346	Shen <i>et al.</i> (1994)
Sm ₂ Fe ₁₅ Si ₂ C	≈1	7.20	305	Shen <i>et al.</i> (1994)
SmFe ₁₁ Ti ₁	1.16	7.36	312	Buschow (1991)
SmFe ₁₀ V ₂	1.10	4.80	337	Buschow (1991)
SmFe ₁₀ Mo ₂	0.97	>4	187	Buschow (1991)
NdFe ₁₁ TiN _{0.5}	≈1.30	6.40	467	Yang <i>et al.</i> (1991)
SmFe ₃	0.81	11.20	377	Buschow (1977) and Wecker, Katter, Schnitzke and Schultz (1991)
Sm ₂ Co ₁₇	1.25	5.20	920	Strnat (1988)
Sm ₂ (Co _{0.7} Fe _{0.3}) ₁₇	1.45	8	840	Strnat (1988)
Pr ₂ (Co _{0.53} Fe _{0.47}) ₁₇	1.56	2.56	760	Sayanarayana, Fujii and Wallace (1984)
SmCo ₅ ^a	1.14	≤35.20	681–747	Korolev <i>et al.</i> (1975) and Buschow (1977)
PrCo ₅	1.20	13.60	620	Strnat (1988)
LaCo ₅	0.91	14	567	Strnat (1988)
YCo ₅	1.06	10.40	630	Strnat (1988)
SmCo ₄ B	≈0.5	96 ^b	237	Ido, Ogata and Maki (1993)
SmCo ₂ Fe ₂ B	≈0.7	12	509	Ido, Ogata and Maki (1993)

^aReference data vary because of a wide homogeneity range for the alloy.

^bAt 4.2K.

1.7.4 Permanentmagnetens energitetthet og temperatur:

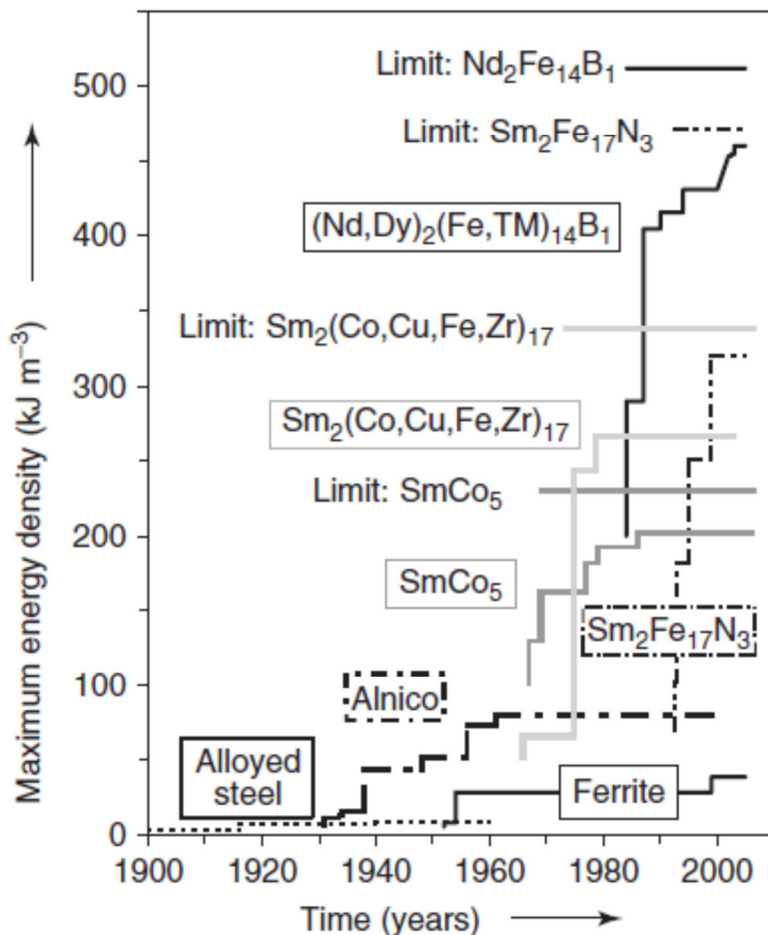
Magnetens energitetthet reduseres med tiden. Reduksjonens størrelse i forhold til tid er sterkt avhengig av temperaturen og eventuelt magnetfelt den befinner seg i. Forskjellige typer magneter har forskjellige typer egenskaper ved forskjellige temperaturer. Generelt vil magnetene ha størst energitetthet ved 20°C (Rodewald 2007). Ved høyere temperaturer reduseres energitettheten midlertidlig (fig. 22). Permanente endring skjer når temperaturen holdes høyere enn en temperaturgrense som er individuell for de forskjellige magnetene. Endringen skjer over tid. Temperaturgrensen er ikke den samme som Curie temperaturen der man kan endre magnetfeltet.



Figur 22. Motstanden mot endring i magnetisering i forhold til temperaturen (Rodewald 2007).

1.7.5 Utvikling nye permanentmagneter

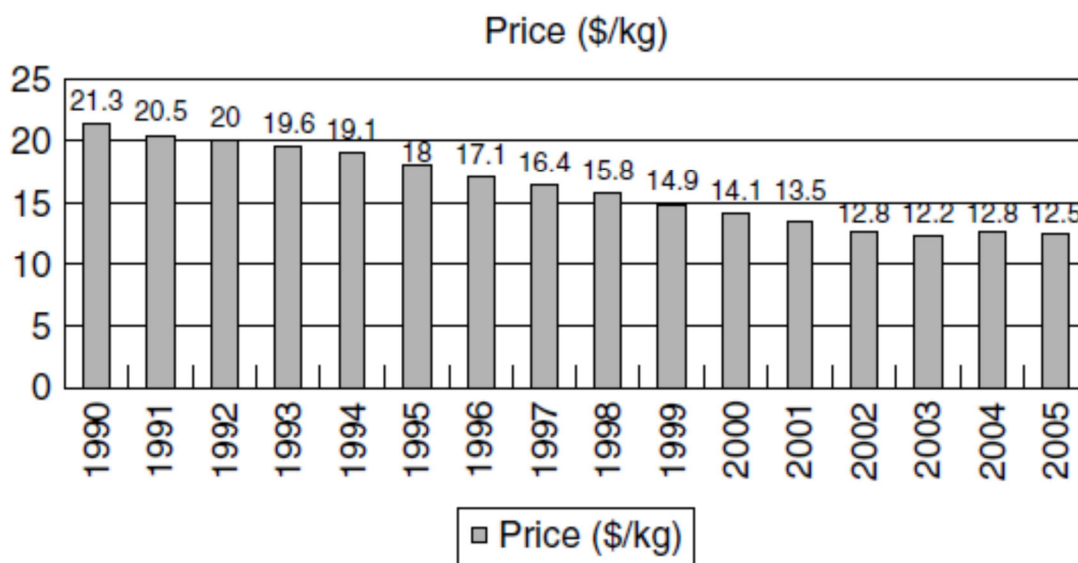
Det skjer en utvikling innen magneter. Nye former for magneter utvikles gjennom forskning. Nye optimaliserte teknikker ved produksjon skaper nye og sterkere magneter. Utviklingen fra tidlig 1900 tallet og frem til i dag (fig. 23).



Figur 23. Utvikling energitetthet magneter (Rodewald 2007).

1.7.6 Priser og prisutvikling permanentmagneter

Kina fremstår som en av de større produsentene av magneter. Prisutviklingen for harde magneter har vært negativ. I snitt 0,9% årlig reduksjon (Luo 2007). Endringer i råvarepriser har innvirkning på prisene. Fra 2005 og frem mot finanskrisen steg råvareprisene. Etter finanskrisen har prisene igjen begynt å stige. Nd₂O₃, en viktig komponent i Neodymium magneter, forutsies å stige fra \$33 pr. Kg i 2007 til \$40-50 i 2012 (Kingsnorth 2007).



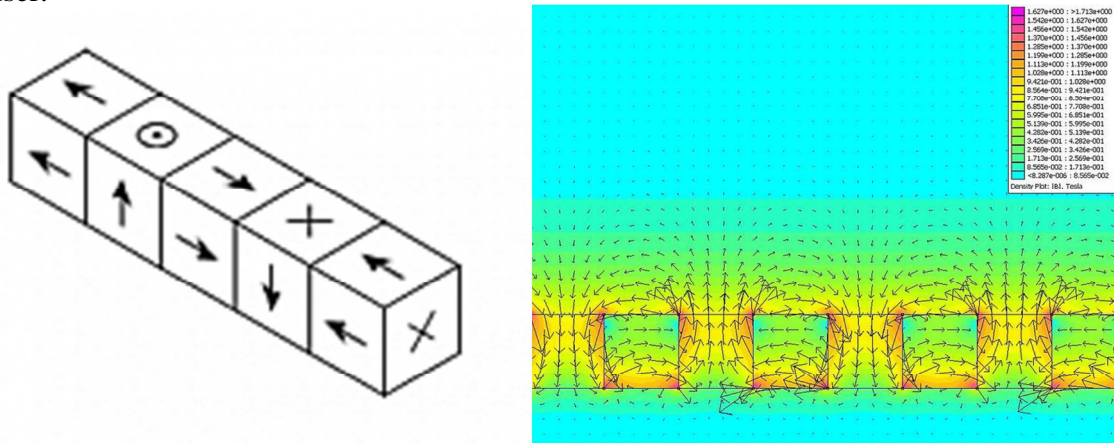
Figur 24.(a) Sjelden jord magnet, pris/kg, solgt fra Kina (Luo 2007).

1.7.7 Elektromagneter

Elektromagnetene er spoler med en jernkjerne. Magnetfeltets retning kan varieres i hver spole avhengig av hvilken vei man kjører strøm gjennom spolen. Gjennom å variere spenningen gjennom spolene variere man styrken på magnetfeltet. Elektromagneter skaper varme. Når det går en strøm gjennom en ledning vil ledningen ha en motstand. Dette blir igjen til varme. Ved store elektromagneter vil man normalt være avhengig av en form for kjøling. Det er normalt med vannkjøling i elektromagneter som virker ved romtemperatur.

1.7.8 Halbach array

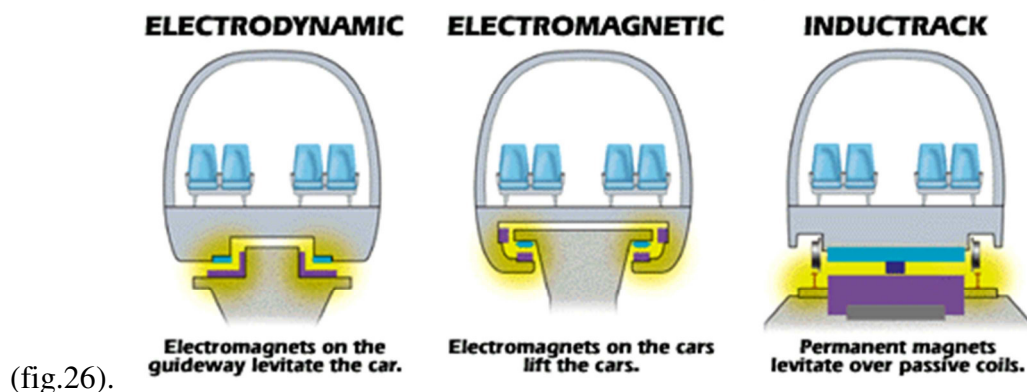
I 1973 oppdaget Mallinson at det hadde en effekt hvordan man plasserte magnetfelt ved siden av hverandre. Klaus Halbach definerte og klarte i 1980 å fokusere magnetfelt i ønskede retninger. Figur 25(a) viser hvordan man organiserer firkantede magneter for å skape et halbach array. (b) viser fluxtvektorene som skapes. Av figuren ser man at det skapes ett sterkere magnetfelt over enn under. Dette feltet er opp til dobbelt så sterkt som det fluxfeltet en eller flere magneter ville skapt dersom de ikke var organisert i samme rekkefølge som (a) viser.



Figur 25. Halbach Array. (Trueknowledge 2011), (b) Halbach Array fluxtetthet (Wikipedia 2009).

1.8 MagLev, Magnetic Levitation

Magnetisk levitasjon vil si å bruke kraften som skapes mellom magneter til å motvirke gravitasjonskraft. Det er to hovedteknologier for å skape løft. “Electrodynamic Suspension” og “Electromagnetisk Suspension”. Inductrack er en form for “Electrodynamic Suspension”

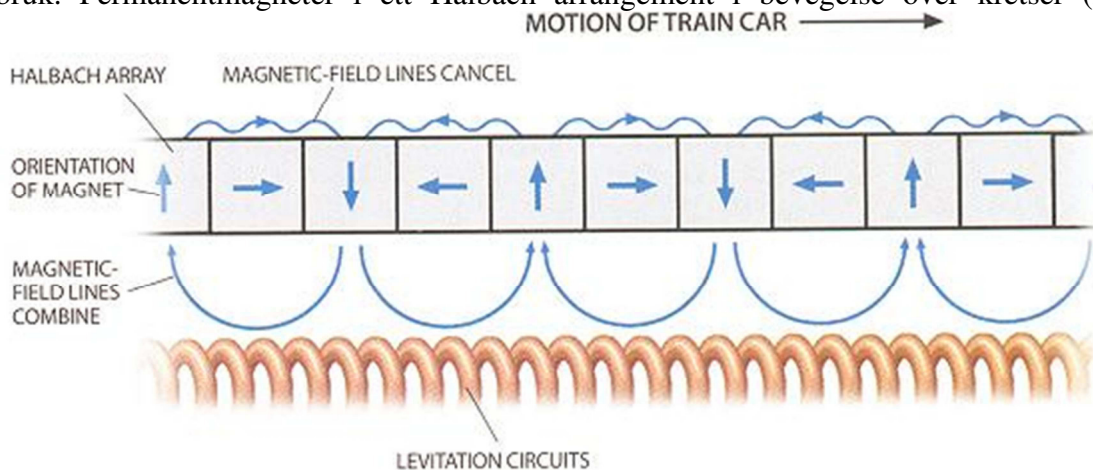


(fig.26).

Figur 26. Forskjellige typer sveveteknikker (MetroWest 2008).

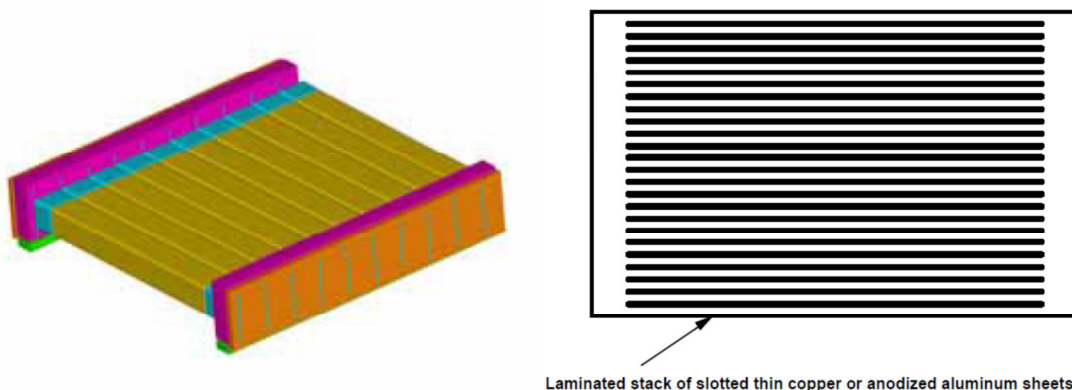
1.8.1 Electrodynamic Suspension

“Electrodynamic Suspension” fungerer ved at man fører en magnet over en leder. Magnetfeltet fra magneten induserer en spenning i en leder som sitter i en krets. Strømmen som induseres i lederen virker i hele kretsen. Kretsen får da ett magnetfelt. Når det induseres en spenning i en krets, vil denne ha en tidsforsinkelse. Det vil si at det tar tid å bygge opp spenning. Når den relative hastigheten mellom lagerbanene er stor nok sammenfaller kretsens magnetfelt med magnetene som føres over lederen. De to magnetfeltene frastøter hverandre. Slik skapes et løft 90 grader på bevegelsen. Når avstanden mellom magnet og krets reduseres, vil frastøtingen øke. Når avstanden økes synker frastøtingen. Dersom den relative hastigheten er for lav vil magnetfeltet være for svakt til å løfte magnetene og toget. Man har to hovedtyper av teknologier for å skape elektrodynamisk løft, JR-MagLev og Inductrack. JR-MagLev metoden bruker superledende magneter, mens Inductrack benytter seg av permanentmagneter i ett Halbach arrangement. Inductrack er basert på nyere forskning og er ikke i kommersiell bruk. Permanentmagneter i ett Halbach arrangement i bevegelse over kretser (fig. 27).



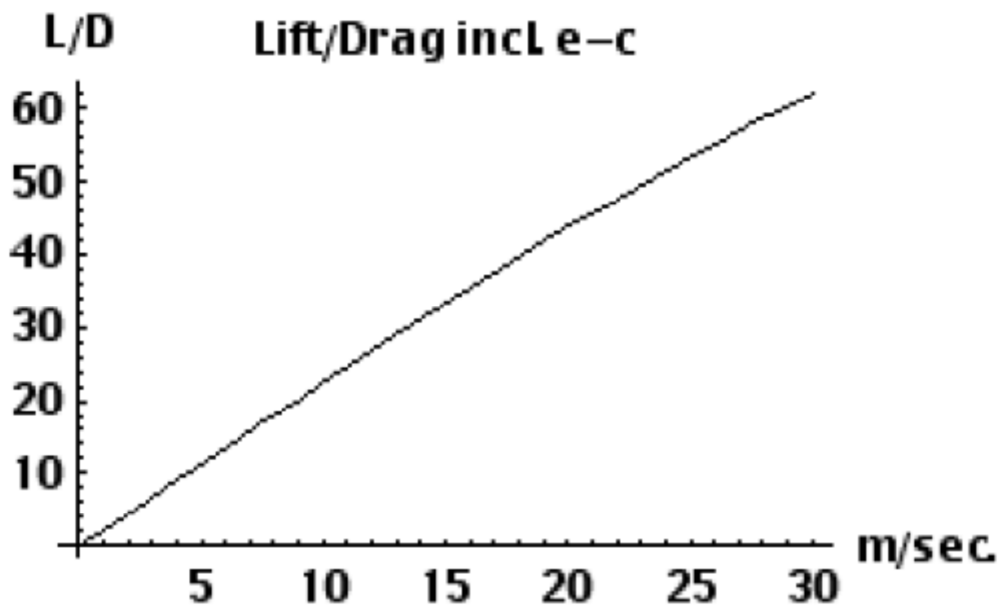
Figur 27. Magneter i Halbach arrangement induserer under bevegelse en spenning i en leder som igjen gir ett løft (Malewicki 2003).

Det kan skapes ett løft ved en hastighet på 1,2km/h (Post 2005). Inductrack teknologien er relativt fersk og det forskes fortsatt på hvordan optimalisere teknologien. I ett forsøk sammenlignet man løft/motstand forholdet for to forskjellige måter å utforme skinnegangen. viser en “trappebane”. Tynne kobberledninger flettet sammen og loddet i de langsgående skinnene. Kobberledningene er isolert med ett metallag i rustfritt stål (fig 28a). Kobber eller aluminiumsplater lagt etter hverandre. Platene er jordet i enden og er isolerte mot hverandre (fig. 28b).



Figur 28. (a) Alternativ 1, (b) Alternativ 2 (Post 2005).

Resultatet av forsøket viste at alternativ to skapte mest løft i forhold til motstand. Forholdet mellom løft og motstand for alternativ 2 er vist (fig. 29). Figuren viser hvordan forholdet blir større jo høyere hastighet.



Figur 29. Løft i forhold til motstand ved hastighet (Post 2005).

Ved stans i elektrisitetstilførselen:

Tog basert på JR-MagLev teknologi medbringer ett batteri slik at det skal ha mulighet til å holde seg svevende inntil det har stanset. Inductrack er uavhengig av strøm og vil holde seg svevende så lenge toget har en minimum fart. Den kineiske energien i toget går med til å holde det svevende inntil det har stanset helt.

Magnetfeltets innvirkning på resten av konstruksjonen:

Ved bruk av JR-MagLev teknologien med superledere som elektromagneter, må kupèvognen isoleres for å hindre at passasjerene blir utsatt for magnetisme. Inductrack bruker Halbach arrangement. Permanentmagneter er posisjonert i ett Halbach arrangement. Den magnetiske resultatanten av Halbach arrangementet gjør at man unngår magnetisme i kupèn.

1.8.2 Electromagnetic Suspension

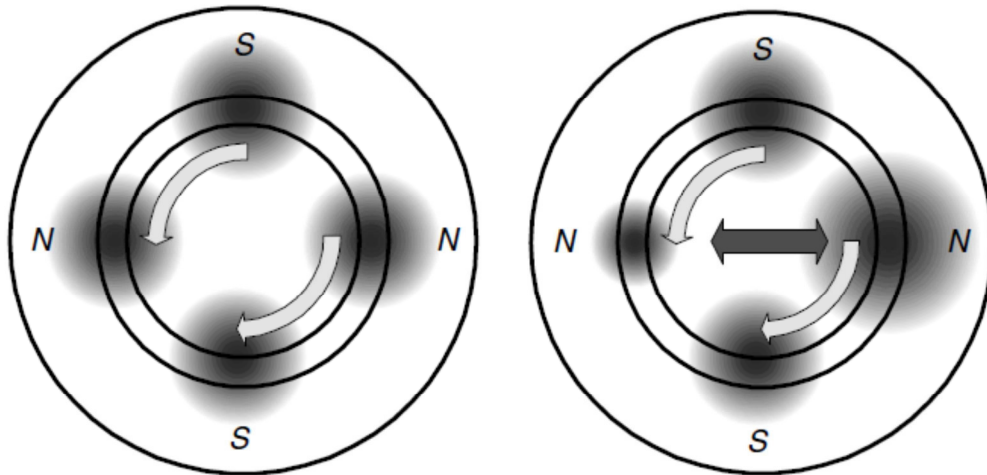
Electromagnetic Suspension, EMS fungerer på samme måte som aktive magnetlager. Det sitter elektromagneter på kroppen til toget. Langs skinnegangen er det magneter. Togets posisjon måles hele tiden og ut i fra disse varieres strømstyrken i elektromagnetene slik at toget har den ønskede posisjonen. Det er ca. 15 millimeter mellom elektromagnetene og magnetene (Wikipedia 2011a). Teknologien krever strøm for å løfte toget, i tilfelle av strømbrudd er det et batteri om bord i toget som skal holde det svevende inntil toget har stoppet.

1.9 Roterende magnetlager

1.9.1 Aktive magnetlager

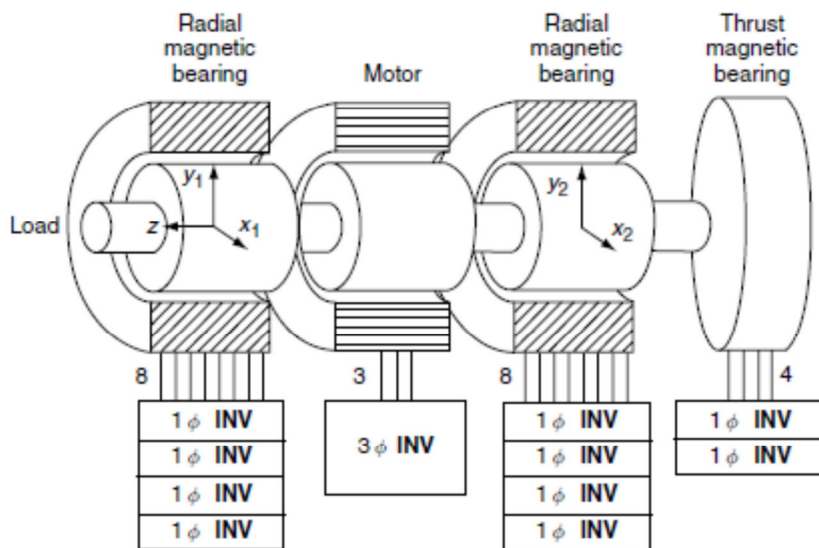
En roterende aksling i et magnetlager vil ha ujevnheter. Disse ujevnheterne kan være radielle variasjoner. Det aktive systemet må dempe disse bevegelene. Fluxens styrke øker jo nærmere man kommer magneten. Systemet må derfor hele tiden måle posisjonen til akslingen

i forhold til de aktive magnetene. Strømstyrken bestemmer magnetfeltets styrke innenfor de fysiske begrensningene. En aksel der magnetfeltene er like rundt hele (Figur 30a). Vektorsummen av kreftene som virker er null. En ubalansert aksling der det påføres et større magnetfelt på den ene siden for å balansere (fig. 30b).



Figur 30(a) Balansert fluxtetthet, (b) ubalansert fluxtetthet. (Chiba et al. 2005)

Ved å regulere fluxen kan man posisjonere akslingen. Små avstander og store hastigheter setter høye krav til måleinstrumenter og prosesseringsverktøy. Fra midten av 90 tallet og frem til i dag har det skjedd stor utvikling innen reguleringsteknikk, noe som igjen har gjort aktive magnetlagre mulig (Chiba et al. 2005). En elektrisk motor med to aktive magnetlagre, ett på hver side (fig. 31).

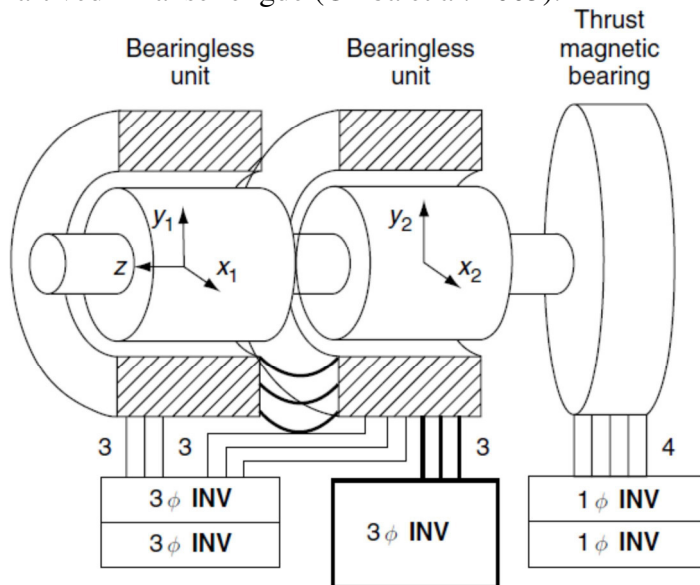


Figur 31, Motor med magnetisk lager, (Chiba et al. 2005)

1.9.2 Magnetlager og motordrift i ett

Elektriske motorer konverterer elektrisk energi til mekanisk energi. Ved å føre strøm gjennom spoler skaper man ett magnetfelt som trekker på permanentmagneter som er festet på akslingen, på den måten skapes et moment som gjør slik at akslingen roterer. De samme

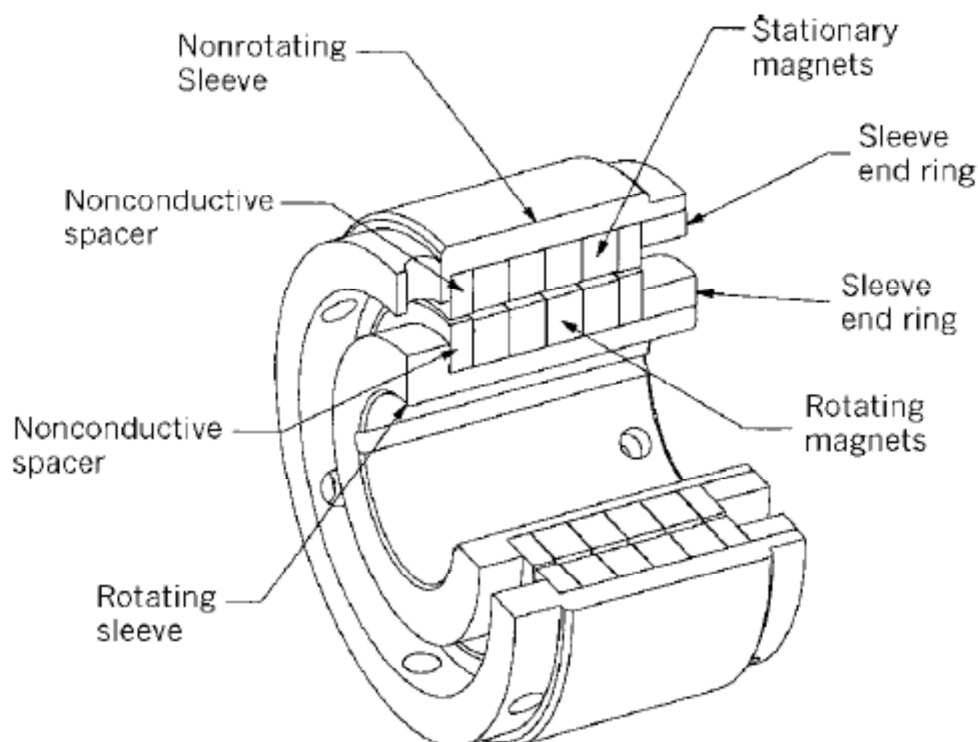
magnetene og spolene kan brukes til å posisjonere akslingen i en kombinert motor og lager oppsett. Sammenligner man kombinert magnetlager og motor med motor og lager for seg, er det flere forskjeller. Kombinert magnetlager og motordrift kan være mer kompakt, har lavere materialkostnader ettersom man bruker de samme magnetene og spolene, og kan skape større kraft ved lik aksellengde (Chiba et al. 2005).



Figur 32. Kombinert motor og lager, (Chiba et al. 2005)

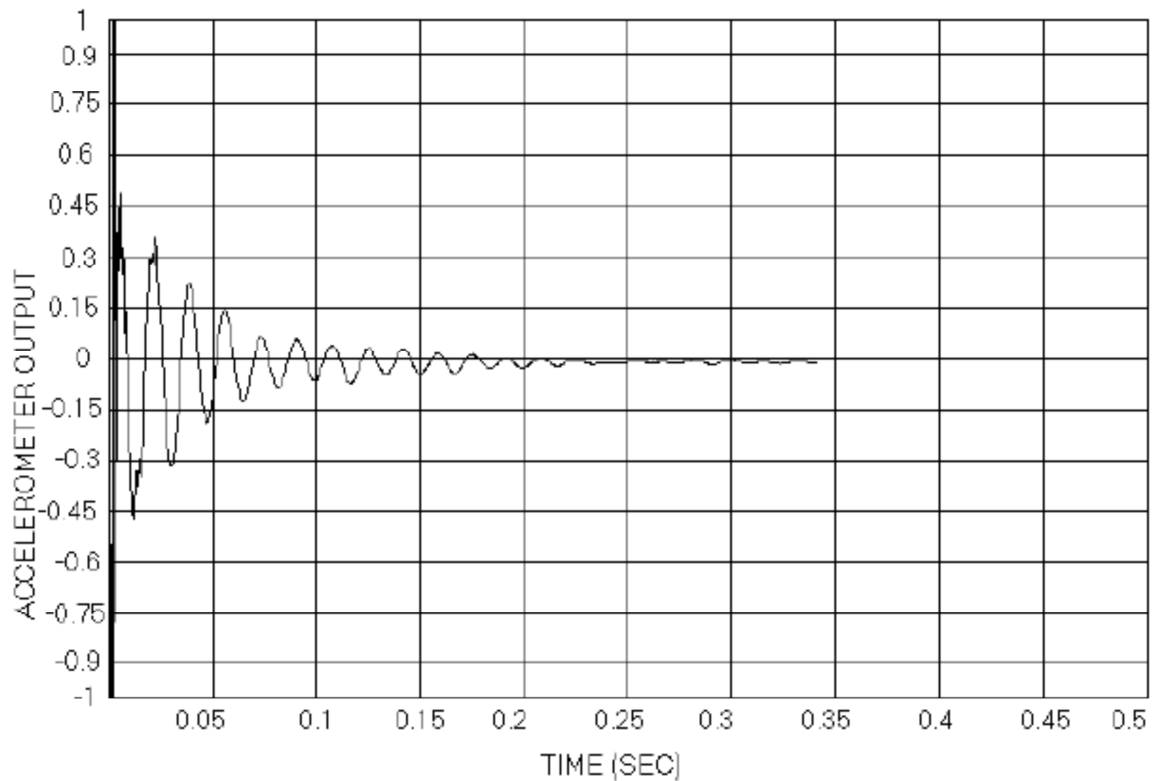
1.9.3 Passivt magnetlager

Passive magnetlager har den fordel at de ikke trenger kontrollsystemer. For aktive magnetlagere må man ha kontrollsystemer som er både avanserte og tidkrevende å utvikle. Ulempen ved passive magnetlager er at lageret ikke har like god demping som aktive magnetlager av samme størrelse. Det er derfor utsatt for egensvinginger, og heller ikke egnet for sterkt varierende last. Et permanentmagnetlager er utviklet ved forskning gjort for NASA (fig. 33).



Figur 33, Modell av passivt magnetlager (Siebert 2002)

Permanentmagnetlager har vist seg å ha en dempende efek på bevegelser Ved et laboratorieforsøk ble dempningseffekten funnet. Ved å utsette en passiv magnetlagersammensetning for ett støt. Figur 34 viser akslingens svingninger. Den radielle dempningseffekten ble kalkulert til 6,5% (Siebert 2002).



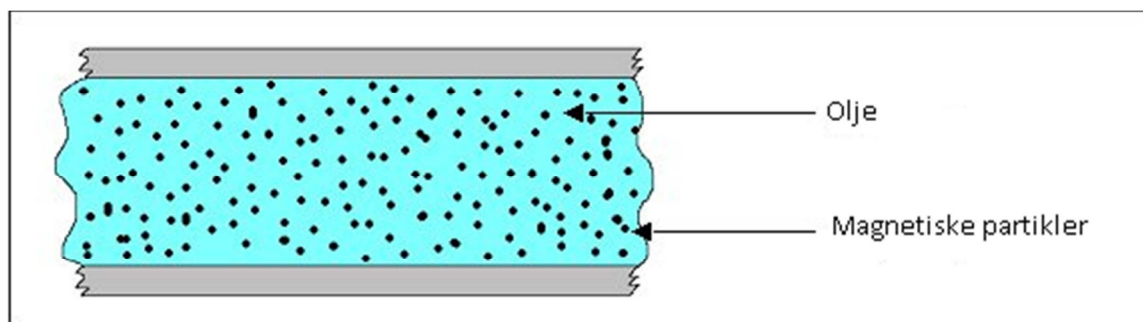
Figur 34. Radial fri vibrasjon ved slagtest, vertikal bevegelse enden av aksling målt med akselerometer (Siebert 2002).

1.10 Smarte væsker

Væsker som endrer egenskaper ved påvirkning av ytre magnetfelt har skapt nye muligheter innen demping av bevegelser.

1.10.1 Ferrovæske

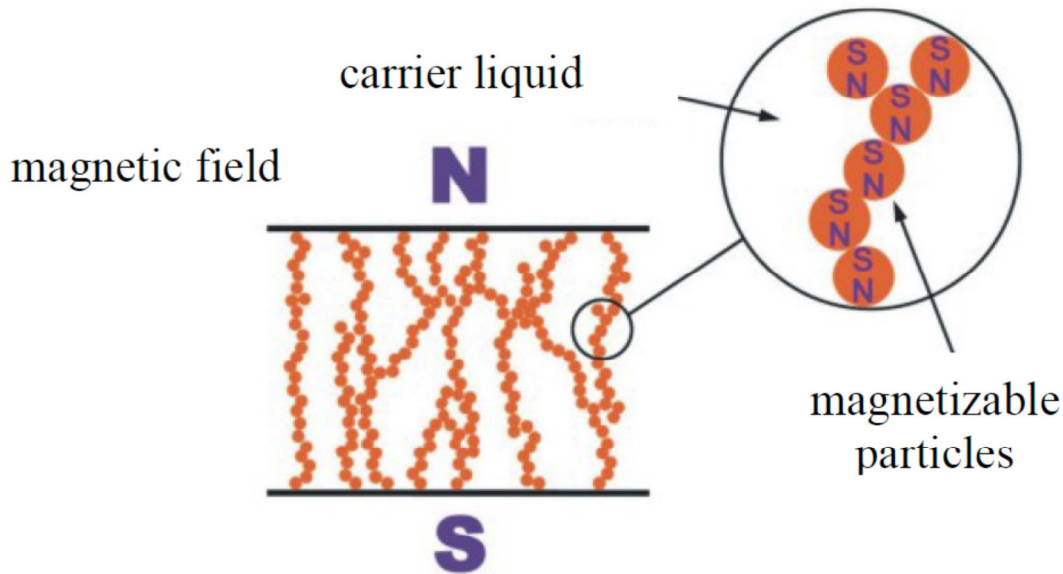
Færovæske er en væske tilsatt partikler av forskjellige typer magnetisk jern. Rundt 10 nanometer i størrelse (Helmenstine 2011). Partiklene er dekket av et stoff som hindrer overflatespenning og frastøter andre like partikler, slik hindres klumping. Partiklene fordeler seg ved Brownsk bevegelse, tilfeldig i væsken ettersom de er så små.



Figur 35. Magnetiske partikler i væske basert på (Wikipedia 2011b).

1.10.2 Magnetorheological (MR) væske

Væske tilsatt isolerte magnetiske partikler. Partiklene er større en de man finner i ferrovæsken. Størrelsen gjør at disse klumper seg dersom væsken er stillestående. MR væske ligner vanlig motorolje når det ikke er utsatt for magnetfelt. Når man introduserer et magnetfelt på MR væske vil væskens viskositet øke. De isolerte partiklene vil stille seg langs magnetfeltet og skape en situasjon (fig. 36). Maksimal viskositet oppnår man ved de magnetiske partiklenes saturasjonspunkt. Da vil ett økt magnetfelt ha liten effekt.



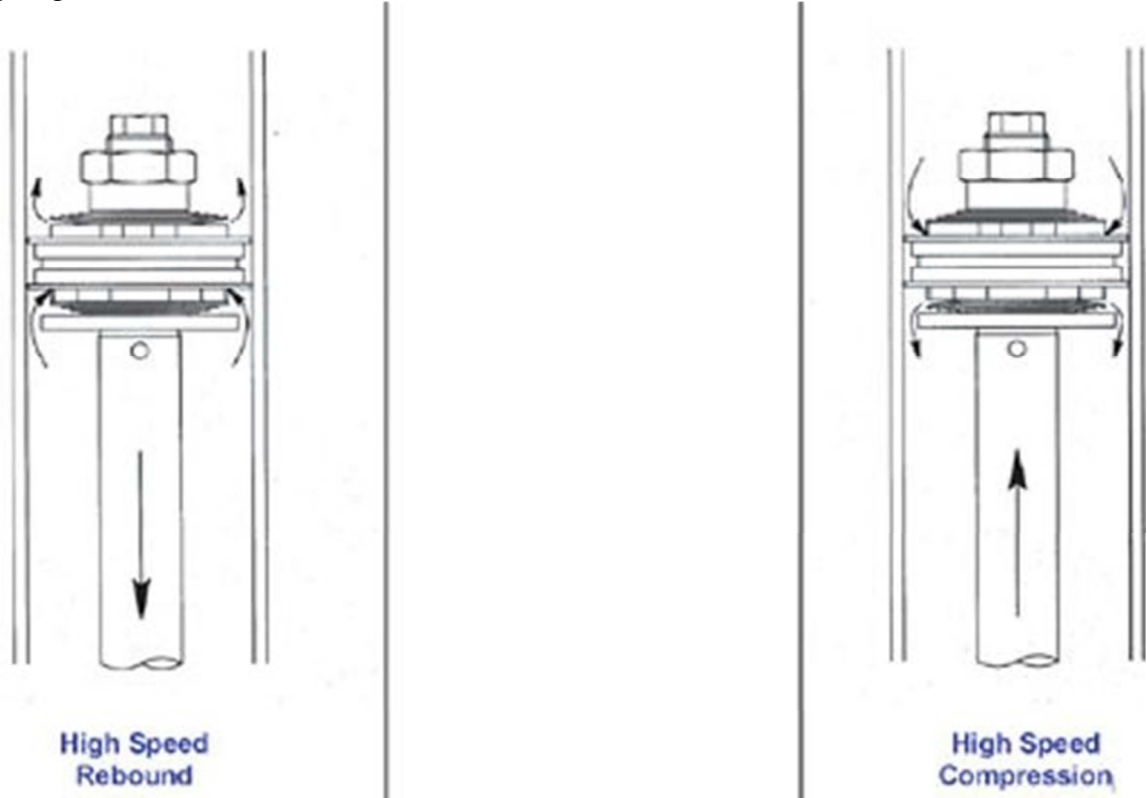
Figur 36, Magnetorheological væske i magnetfelt (M. Kciuk 2006).

Det er utviklet MR væsker som er stabile innenfor ett temperaturspenn på -50 til 150°C (M. Kciuk 2006). Størrelse og fordelingen av partiklene har en innvirkning på viskositetsendringen ved påføring av magnetfelt, typisk har de magnetiske partiklene en størrelse på mellom 3 og 5 mikrometer (M. Kciuk 2006). MR væsker er mindre sensitive for fuktighet og forurensning enn andre magnetiske væsker, og er derfor bedre egnet til bruk i hardere miljøer.

1.10.3 Semiaktiv dempning ved magnetorheologica væske.

En normal dempingssylinder (fig. 37). Dempningen skjer ved at olje klemmes fra ett kammer til neste kammer. Hvor mye motstand bestemmes av størrelsen på kraften som påføres og viskositeten til væsken. Dersom man bruker magnetorheologica væske kan man ved å påføre ett magnetfelt endre væskens viskositet. På den måten endrer man dempningseffekten. Denne egenskapen utnyttes i moderne sportsbiler slik at disse får bedre veigrep gjennom aktiv

dempning.



Figur 37. Oljedemper funksjon. (SportCompactCar 2011)

2 Innledning

Utvinning av mineraler krever store mengder energi. Etter hvert som befolkningsveksten fortsetter øker også knappheten på energi. Energiprisene stiger, det samme gjør gruveindustriens utgifter til drift ettersom disse er sterkt forbundet.

Etter finanskrisen 2008 har nå råvareprisene igjen begynt å stige. Fremvoksende økonomier som India og Kina står for store deler av den økte etterspørselen. Flere milliarder mennesker ønsker en livsstil på materielt nivå med den vestlige verden. Økt forbruk gir økt marked for råmaterialer som igjen muliggjør utvinning av råmaterialer fra nye gruver. Nye gruver, eller utbygging av gamle, vil gi et økt marked for leverandører til gruveindustrien.

Ved å ta i bruk nye teknologier på opplagring, vil man kunne redusere den totale materialbruken og da også energiforbruket i forbindelse med produksjon. Ny teknologi kan også muliggjøre enklere produksjonsmetoder som også er kostnadsbesparende. Videre kan ny teknologi kunne muliggjøre bruk av opplagring som har mindre friksjon og på den måten er mer energibesparende.

2.1 Kort idébeskrivelse

Den nye lagerløsningen vil være en kombinasjon av ett permanentmagnetlager og ett sekundærlager for stabilitet. Sekundærlageret vil også fungere som en løfteløsning når man skal gjennomføre vedlikehold på permanentmagnetiske lageret.

2.2 Problemstillinger:

Under prosjektet har det dukket opp flere problemstillinger. Det er flere momenter ved utvikling av en maskin. Størrelsen gjør at valgt teknologi må være på et slikt nivå at muligheten for feil er redusert til det minimale og at produsert vare fungerer.

Sikkerhet:

Sikkerheten til arbeiderne skal ivaretas selv om det oppstår funksjonsfeil i lagerløsningen. I konstruksjonen av lagerløsningen må det tas hensyn til de sannsynlige og usannsynlige feil som kan oppstå, og som kan føre til personskade.

Driftsikkerhet:

I prosessindustri er det mye fokus på effektivitet. Massene går direkte mellom de forskjellige prosesseringsmaskineriet. Det er få og store maskiner. En stans i en maskin gir igjen stans i tilførselen av masser til neste maskin. Produksjonen blir redusert mens kostnader forbundet med arbeidskraft og finanskostnader fortsatt løper. Lagerløsningen må derfor være driftsikker. En feil aleine skal ikke være nok til at det skjer store materielle ødeleggelser. Konstruksjonen må være slik at deler det kan oppstå feil eller som utsettes for slitasje kan byttes ut i løpet av kort tid. Konstruksjonen bør også være slik at en unngår muligheten for feil gjennom å spille på lag med naturen. Det vil si å finne løsninger som er enkle og driftsikre og som ikke er mer avanserte enn nødvendig.

Vekt:

Vekt har lite å si for effektiviteten til en mølle. Møllen roterer med konstant hastighet og er stasjonær. Friksjonen i lager stiger proporsjonalt med vekten. Materialforbruket i produksjonsprosessen søkes minimert for å redusere kostnadene ved produksjon. Reduksjonen i vekt søkes redusert gjennom nye typer lagerløsninger.

Materiale:

En mølle er en roterende maskin. Den største utfordringene ved selve møllekonstruksjonen er utmattning. Ståltypen er derfor mindre viktig da det er liten forskjell på stålkalitetene med hensyn på utmattning. For lagerløsningen søkes det å optimalisere materialene opp mot kostnader. Størrelsen gir at det er viktig med kostnadseffektive materialer.

Pris:

Utviklingen av ny lagerløsning vil kreve større investeringer i forskning og utvikling (FoU) enn om man bruker eksisterende løsninger. De fleste produsentene av møller har standardiserte løsninger der det kreves svært lite FoU ved tilpasning til nye møller. FoU på ny lagerløsning må være mulig å gjennomføre, med en kostnad det er mulig å tjene inn igjen gjennom det stipulerte konkurransefortrinnet man forventer den nye teknologien vil gi.

Produksjonsmetode:

Designet bør fremme rimelige og enkle produksjonsmetoder. Fordyrende løsninger som må støpes eller andre spesiellagede komponenter som medfører økt risiko søkes minimert.

2.3 Målsettinger

Hovedmålsettingen:

Finne, konseptualisere og designe en lagerløsning for store roterende møller til bruk i gruveindustrien.

Delmålsettinger:

- Kartlegge problematiske størrelser, rotasjonshastighet, fyllmassens vekt og den totale vekten.
- Utvikle flere konseptforslag på lagerløsninger.
- FEM analyse av valgte konseptforslag.
- Beregne kostnader for beste konseptforslag

2.4 Begrensninger

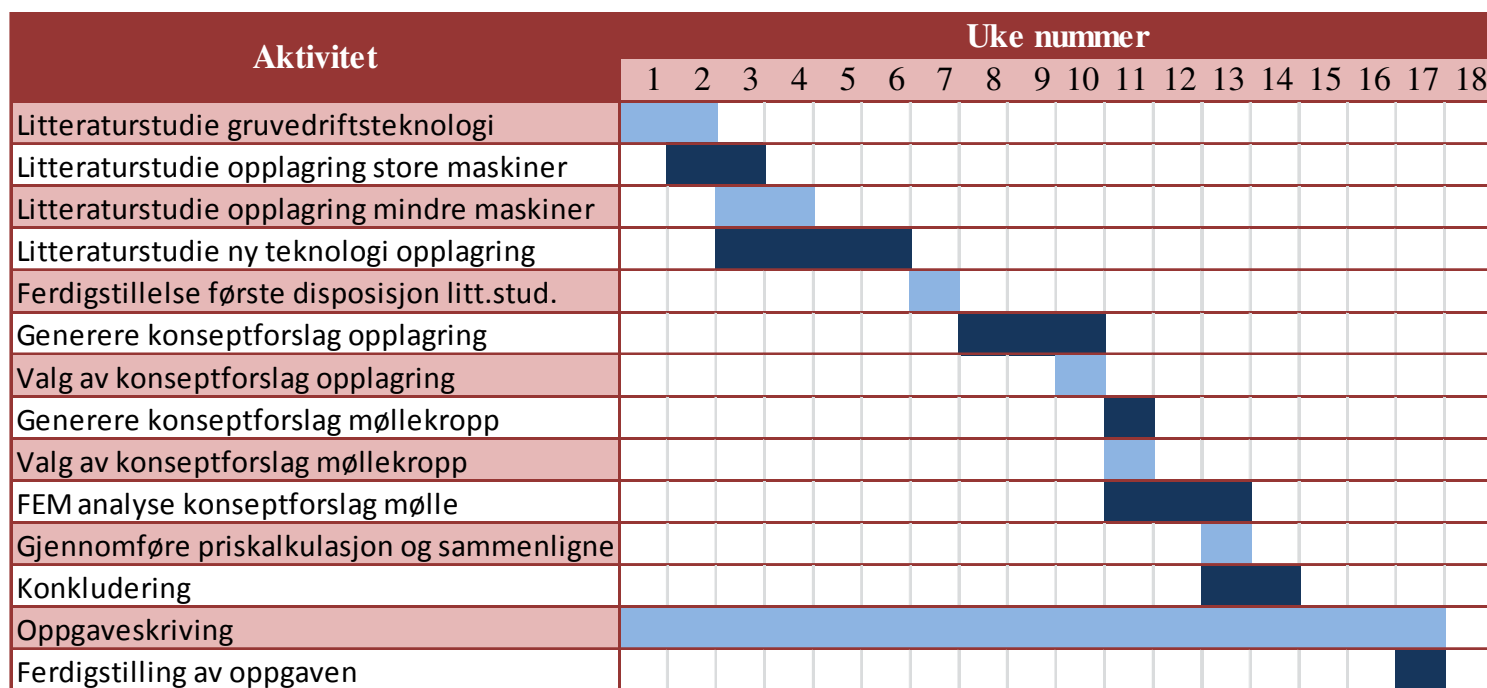
- De tekniske spesifikasjonene for valgte lagerkonsept vil ikke være detaljert.
- FEM analyse av konsept vil være av møllekroppen og lagerets innvirkning på konstruksjonen av denne.

3 Produktplanlegging

3.1 Prosesstrinn og delmål

- Litteraturstudie rundt teknologi brukt ved knusing og kverning av stein i bergverksindustrien. Litteraturstudie på forskjellige type lagre og lagerløsninger.
- Delmål 1: Gjennomført innledende litteraturstudie.
- Delmål 2: Ferdigstille produktspesifisering.
- Delmål 3: Ferdigstille konseptforslag.
- Delmål 4: Gjennomføre konseptutvalg og konsepttesting.
- Delmål 5: Ferdigstille designforslag/FEM analyser.
- Delmål 6: Ferdigstille en priskalkulasjon for sammenligning med eksisterende anlegg. Vurdere pris kontra nytte.
- Delmål 7: Ferdigstille konklusjon
- Delmål 8: Ferdigstille oppgaven. Gjennomlesning.
- Delmål 9: Trykk og innlevering

3.2 Milepælsplan



Figur 38. Milepælsplan

3.2.1 Markedsdefinisjon.

Markedet ønsker maskiner til kverning av masser. Enten det er utbygging av gammelt maskineri eller det er installasjon av nytt. Det er en tendens til at markedet ønsker større møller. Større møller gir nye utfordringer med tanke på konstruksjon og produksjon sett i forhold til mindre møller. Prisene forbundet med produksjon av de forskjellige delene øker med størrelsen, det samme gjør den finansielle risikoen. Markedet søker å minimere den finansielle risikoen gjennom å få størst mulig kvernekapasitet, til lavest mulig pris i kombinasjon med bruk av leverandører man har hatt god erfaring med. En ny opplagringsløsning ville kunne gi en leverandør av møller ett konkurransefortrinn. Produktet ville diversifisere fra konkurrentenes. Diversifiseringen skjer gjennom å kunne levere ett produkt med lavere driftskostnader og til en lavere pris enn konkurrentene.

Større møller, der opplagring skjer i tappet, krever også støping av svært store dimensjoner. Slik støping kan bare skje noen få steder i verden. Når det er høykonjunktur vil det være kø ved disse støpeanleggene. Det er også stor risiko forbundet med støping og ved store dimensjoner kan risikoen bli svært stor ettersom at resultatet av en feilstøp vil gi forsinkelser og ytterligere kostnader.

3.2.2 Oppdragsbeskrivelse

Søker å utvikle en løsning for opplagring av møller. Møllene vil ha størrelse på seks meter eller større i diameter. Møllens lengde kan være fra fire meter og større, noe som gir at mølle med fyllmasse vil veie fra 200 tonn og oppover. Geometrien til øvrige komponenter må tilpasses de krav størrelsen setter.

Tabell 4. Oppdragsbeskrivelse

Mission statement: Opplagring av møller	
Beskrivelse av produktet	<ul style="list-style-type: none">• Lagerløsningen skal være effektiv og bidra til at materialforbruket reduseres.• Vedlikeholdskostnadene ønskes redusert.
Viktige mål:	<ul style="list-style-type: none">• Lagerløsningen skal kunne standardiseres slik at det kreves minimalt med utvikling ved tilpasning til nye dimensjoner.• Lagerløsningnen skal muliggjøre enda større mølledimensjoner
Primær markeder	<ul style="list-style-type: none">• Finforedling av metaller, gruvedrift
Sekundær marked	<ul style="list-style-type: none">• Sentrifuger, store turbiner.
Antagelser og begrensninger	<ul style="list-style-type: none">•
Bidragstyttere	<ul style="list-style-type: none">• Outotec• UMB

3.2.3 Kravspesifikasjoner

Kravenes viktighet er vurdert på en skala fra en til fem hvor fem er viktigst.

Tabell 5. Kravspesifikasjoner

Roterende Mølle	
Behov:	Viktighet
1. Rotere	5
2. Miljøvennlig	3
3. Vekt	1
4. Montering	3
5. Robusthet	5
6. Sikkerhet	5

3.3 Fysiske krav til mølle

Fyllingsgrad: ca. 30%

Tetthet fyllingsmasse: ca. 4000kg/m³ (blanding av stein, stålballer og vann)

Diameter skall: 5-10 meter

Lengde: 4-10 meter

(Winther, pers. med. 2011)

Vekten av konstruksjonen per. meter vil øke med ett antall tonn (Tabell 6). Dette er kun tilnærminger for å forenkle utviklingsprosessen. Forutsetningen her er at man ser bort fra tappen. Normalt vil tappen gi noe økt vekt, men dette er lite i forhold til vekten av innmaten. Vekten øker med diameteren.

Tabell 6. Vekt per meter for mølle, ved diameter.

Diameter	Vekt fyllmasse (tonn/meter)	Vekt stålkonstruksjon (tonn/meter)	Total vekt (tonn/meter)
5	24	6,2	30
6	34	7,4	41
7	46	8,7	55
8	60	9,9	70
9	76	11,2	88
10	94	12,4	107

4 Ide og Konseptgenerering

Konseptgenerering og valg skjer ved følgende metodikk.

1. Utarbeide konseptalternativer
2. Utarbeide en utvalgsmatrise
3. Gi konseptene en poengvurdering
4. Rangerer de ulike konseptene
5. Kombinering og videreutvikling av konseptene.
6. Gjøre endelige valg
7. Evaluer resultatene og prosessen.

(Bøe 2008)

I dagens møller er det både bruk av opplagring i tapp og skall. Å velge enten tapp eller skalloplagring før man gjennomfører en konseptgenerering vil begrense muligheter. Begge alternativer er derfor vurdert i konseptualiseringsprosessen.

4.1 Konsept 1; “Høy og lavviskositetssmøring i ett ved bruk av magnetorheologica væske”

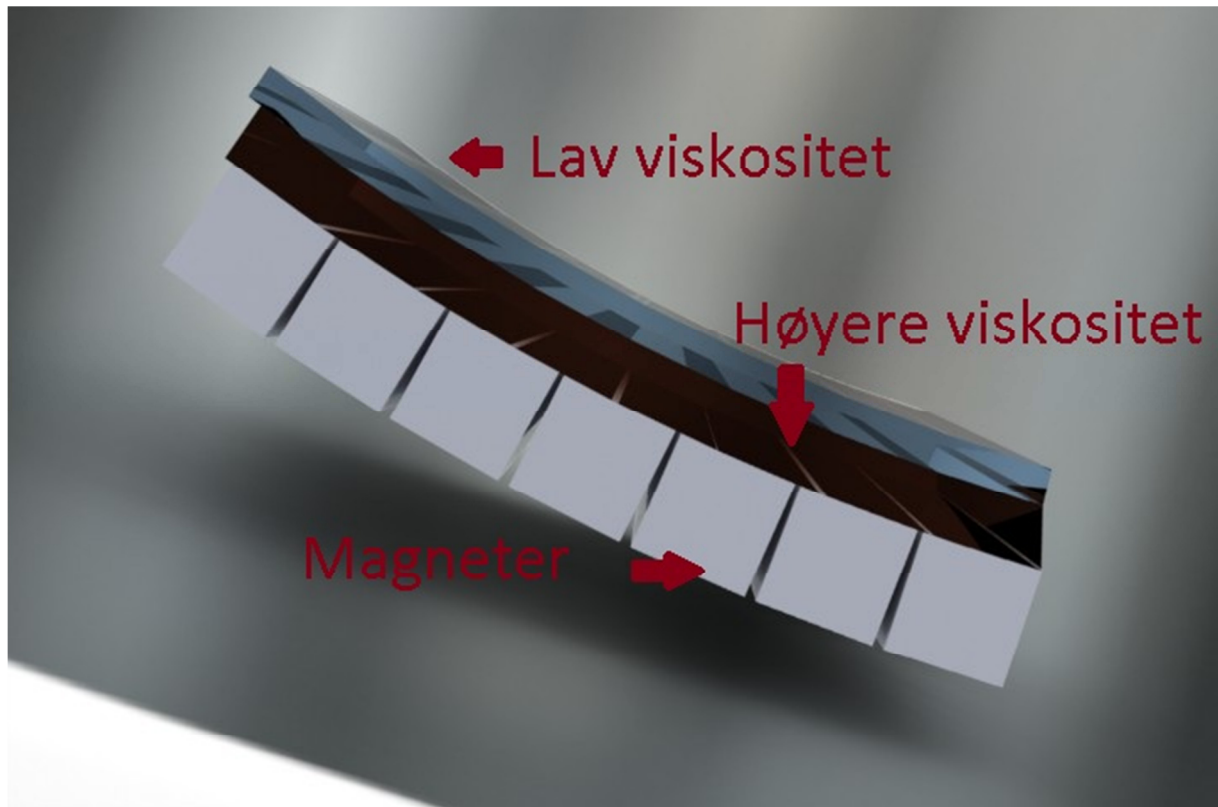
Ved dagens hydrostatiske lagerløsninger må man ved valg av viskositet på olje, ta hensyn til oljens dempningseffekt. Dempningseffekten avhenger av oljefilmens tykkelse og oljens viskositet. Viskositeten bestemmer også friksjonen og energitapet i lageret, ettersom lagerbanene kun er i kontakt med oljefilmen. Det er i oljefilmen skjærkreftene tas opp. Ved å bruke magnetorheologica væske som oljefilm, kan man variere viskositeten til oljen gjennom bruk av magnetfelt. I ett lager der flatene er delt med olje skjer det hele tiden en skjærbevegelse i oljen når lageret roterer. Dersom skjærbevegelsen skjer i et lag med lav viskositet fremfor et med høyere viskositet, vil man få lavere friksjon.

Type magnet:

For å skape ett magnetfelt er permanentmagneter det enkleste alternativet. Alternativ to er bruk av elektromagneter. Ved hjelp av elektromagneter kan man variere viskositeten gjennom å variere magnetfeltets styrke. Dette er fordelaktiv dersom temperaturen varierer, for eksempel ved oppstart av systemet. Kald olje har høyere viskositet enn varm olje.

Plassering:

Man kan arrangere magnetene slik at det er ett konstant magnetfelt nærmest “padsen”. Den delen av oljen som befinner seg i magnetfeltet ville da ha en høyere viskositet enn den oljen som befinner seg lenger fra (fig. 39). Løsningen ville kunne gi en tykkere oljefilm med bedre dempningsegenskaper samtidig som det er ett lag med lav viskositet nærmere den delen av lageret som roterer. Skjærbevegelsen skjer da i den oljen som ikke er påvirket av magnetfeltet. Dette gir lavere friksjon.

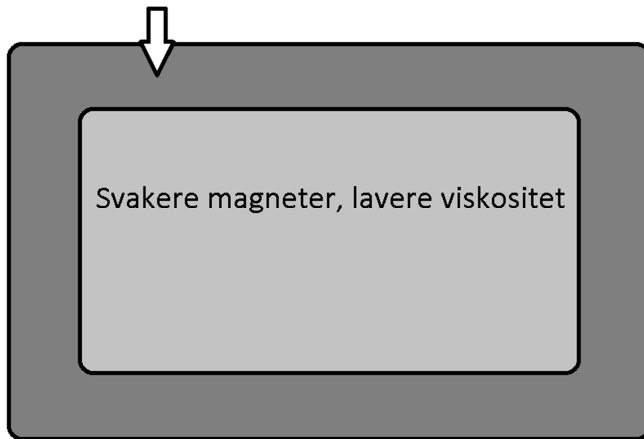


Figur 39. Komposittsmøring ved bruk av magneter.

Tilpasset ønskede egenskaper:

Magnetene kan arrangeres slik at man endrer oljens egenskaper på steder der det er spesielle utfordringer. Ved modifikasjon av de hydrostatiske “padsene” brukt på dagens opplagring av møller, vil man kunne oppnå forbedring i funksjon. Man kan skape en slags demning slik at oljen ikke flyter ut over kantene på “padsen” men holder seg rimelig stasjonær. Ett sterkere magnetfelt langs kantene på “padsen” vil gi høyere viskositet i dette området og dermed lavere oljestrøm (fig. 40). Lavere oljestrøm vil igjen gi besparelse i at hydraulikkpumpene vil måtte pumpe mindre olje som igjen gir lavere effekttap. Effekttapet ville stort sett gått over i varmeenergi i oljen. For hydrostatiske og hydrodynamisk opplagrede møller er dette ikke ett problem da man hele tiden må varme opp oljen slik at den har ønsket driftstemperatur. I alternativt maskineri kunne man tenke seg at en reduksjon i oljestrømmen ville også redusere behovet for kjøling av oljen. En løsning med lavere oljestrøm og en mer lettflytende olje ville også redusere kravet til dimensjoner på rør for transport av smøreoljen, som igjen kunne gitt plassbesparelse.

Sterkere magneter, høyere viskositet.



Figur 40. Fordeling magnetfelt hydrostatisk lager”pads”

Opphopning av magnetiske partikler:

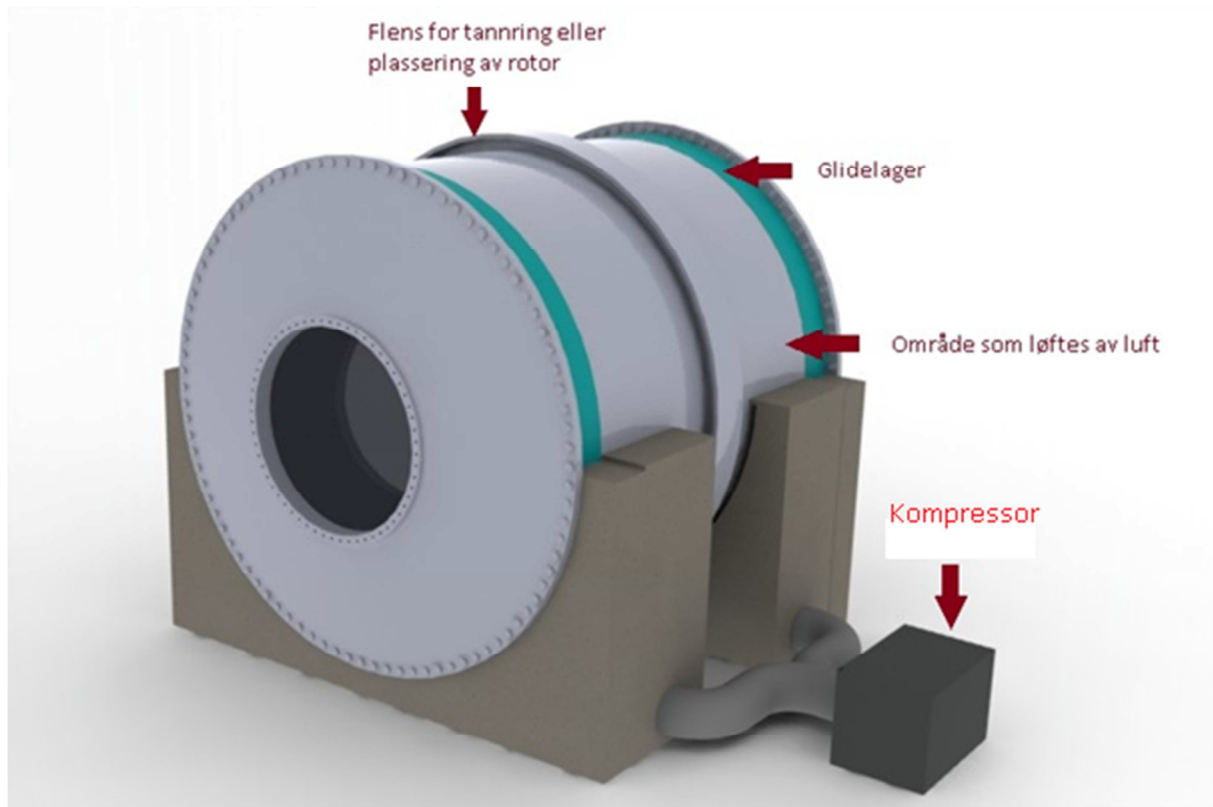
Oljestrømmen må være så stor at magnetpartiklene i væsken hele tiden flyter med væsken og ikke samler seg over magnetene. Et alternativ til å la væsken flyte hurtig nok til at partiklene flyter med, er å bruke elektromagneter. Ved å slå disse av og på, ville man kunne hindre opphopning av magnetiske partikler.

Partikkelstørrelse og kompatibilitet med ett hydraulisk system:

Metalliske partikler er med på å påføre den hydrauliske pumpen slitasje. Partiklene i den magnetorheologica væske må være så små at filteret som renses oljen slipper disse partiklene igjennom. Partiklene er på mellom 3 og 5 μm (M. Kciuk 2006). Ved dagens hydrostatiske lager bruker Outotec filter med 10 μm absolutt. Det betyr at den største størrelsen på partikler filteret skal slippe igjennom er på 10 μm . Partiklene er derfor på grensen til å slippe gjennom filteret. Det bør undersøkes om det er mulig med mindre partikler.

4.2 Konsept 2; “Løft ved Luft”

En kompressor pumper en luftstrøm inn under møllekroppen. Luften går fra kompressoren og inn i fundamentet. Der fordeles den. Trykket fordelt på møllens flate vil skape løft. (fig. 41). Friksjonen i et eventuelt sekundærlager er avhengig av vekten til møllen. Friksjonskraften reduseres når møllen løftes med luft. Luft har lav viskositet og dermed lav friksjon. Lav viskositet vil også gi en stor luftstrøm sammenlignet med ett hydrostatisk lager der man bruker ett flytende stoff, som eksempel olje. Luftstrømmen er avhengig av størrelsen på spalten. Man kan ved lufttrykk løfte en andel av møllens vekt og la sekundærlageret løfte resten. Ved å la møllen være i en konstant posisjon kan man minimere luftspalten der luften slipper ut. Luftstrømmen kan også reduseres med kapper som sleper langs møllekroppen.



Figur 41. Glidelager og luftlager.

Sekundærlager

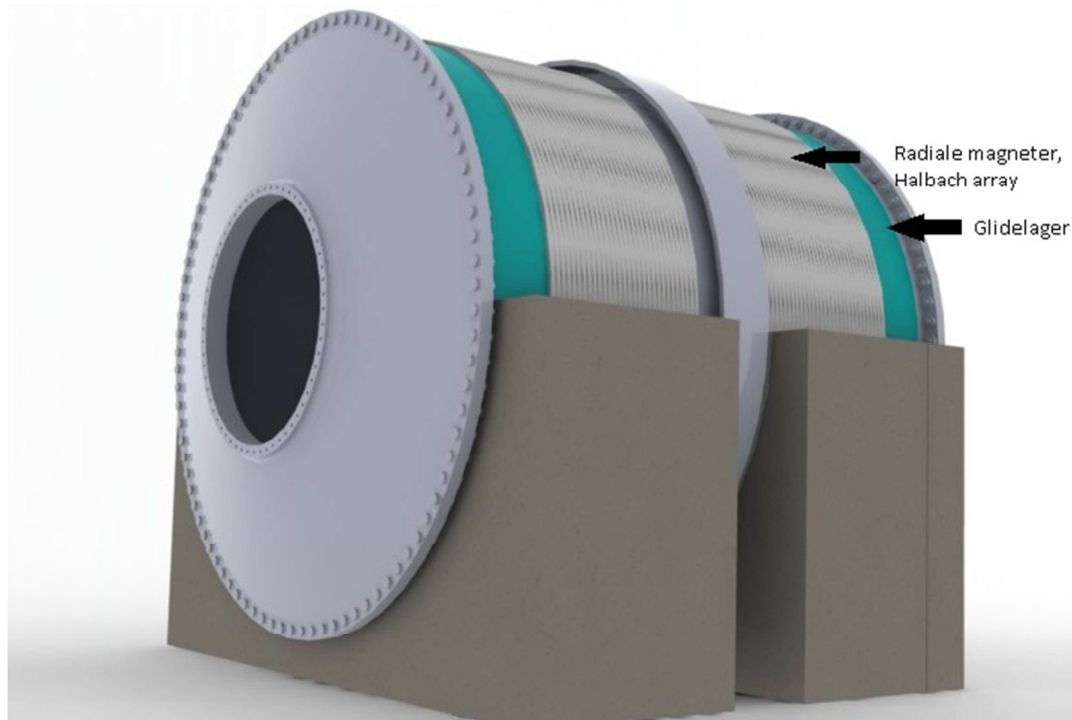
Det vil være to måter å designe ett kombinert lager. Man kan ha ett aktivt lager der luftmengden og retning varieres, slik at mølla holdes i en konstant posisjon. Alternativt kan man la et sekundærlager ta seg av lastvariasjonene mens luftstrømmen holdes jevn. Flere typer lager kan brukes som sekundærlager. Glidelager kan ta store laster ved lave hastigheter og er ikke egnet til kontinuerlig drift med de laster og hastigheter man finner ved møller. Selvsmørende glidelager vil kunne fungere som sekundærlager dersom man reduserer vekten gjennom løft ved luft. Glidelageret ville da ta lastvariasjoner. Glidelageret vil også kunne fungere som et nødlager i situasjoner der luftlageret svikter.

Drift:

Luftstrømmen kan gi kombinert løft og drift. Man kunne montere turbiner på møllekroppen. Disse kunne man påføre en retningsstyrt luftstrøm. Effekttapet vil være en utfordring, drift ved luftstrøm vil ha lav virkningsgrad.

4.3 Konsept 3; “Løft ved Permanentmagneter”

Møllen løftes av permanentmagneter. Det vil være ett konstant løft fra magnetene enten møllen er i ro eller roterer. Permanentmagnetene monteres på møllens skall og på fundamentet. Magnetene må være sammenhengende slik at det er ett jevnt magnetfelt rundt hele (fig. 42).

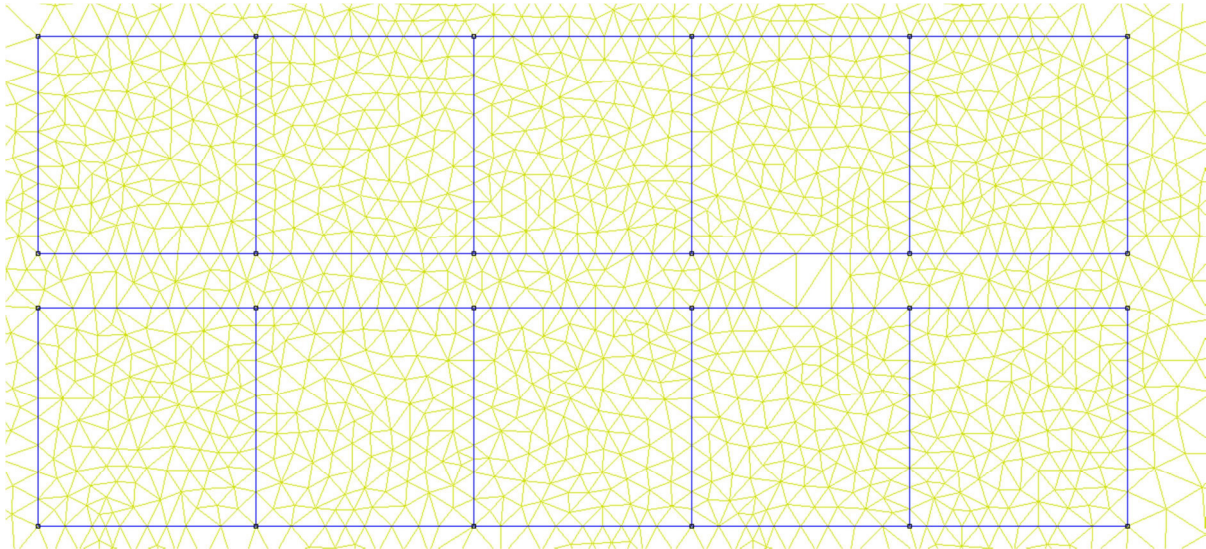


Figur 42. Glidelager og magnetlager, magneter i Halbach arrangement.

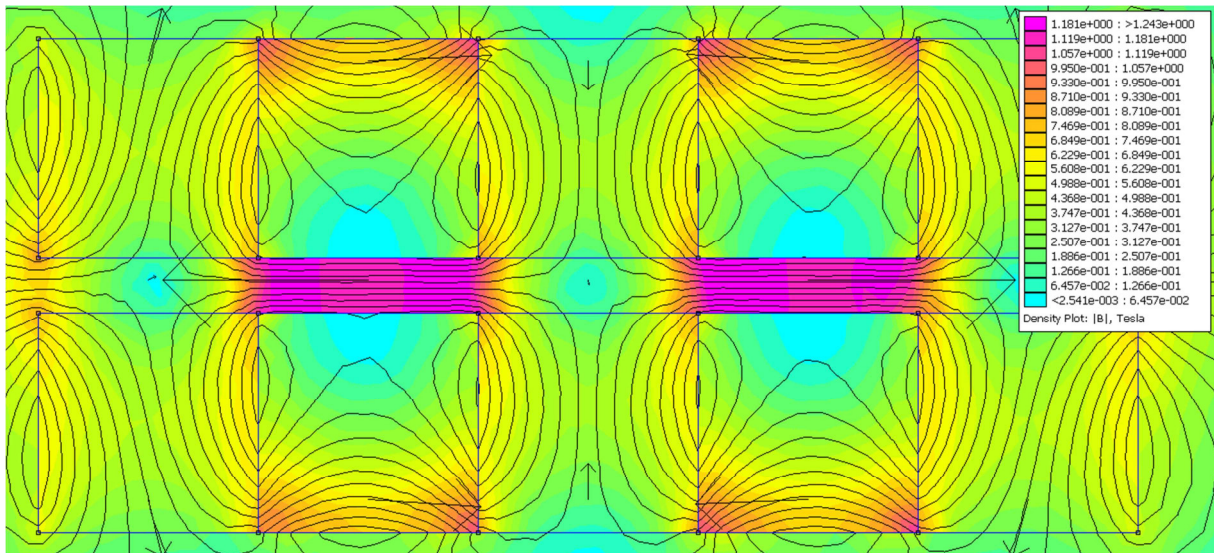
Ved bruk av FEMM 4.2 er det gjort en rask vurdering av løftekapasiteten (frastøting). Nedodymium magneter er plassert i Halbach arrangement. Magnetene er 10x10 cm, fem på hver rekke.

- Type magnet: NdFeB 32MGOe
 - Lineært B-H forhold
 - Relativ μ_x : 1,045
 - Relativ μ_y : 1,045
 - Coercivity: 883310 A/m
 - Electrical Conductivity: 0,694 MS/m
- Størrelse: 5 stk. 10x10x10 cm.
- Antall: 2 rekker med 5 magneter, 25 mm mellom rekkene
- Arrangement Halbach arrangement
- Mesh: 10 mm.
- Program: FEMM 4.2

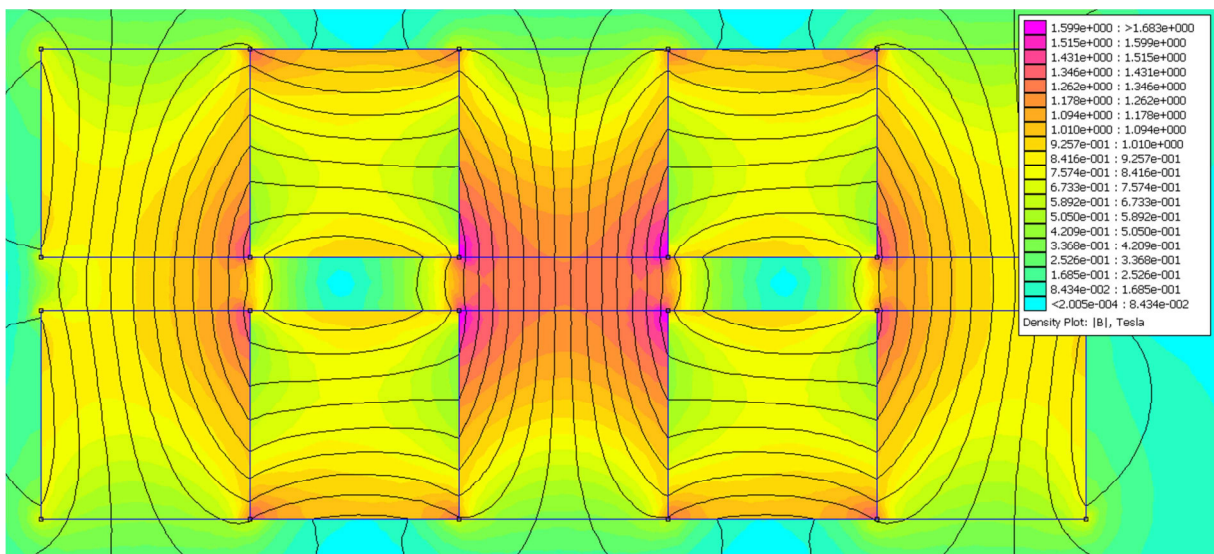
Resultatet av å integrere kraftsummen av magnetene på rekke, viste at det var en kraft mellom de to magnetrekkene på 14,8kN. Integreringen ble gjort av FEMM programmet. Kraften tilsvarer ett løft på 30 tonn per kvadratmeter. Det samme ble gjort for å se tiltrekningskraften (fig. 45). Her ble kraften noe større enn ved frastøting. Forskjellen var mindre enn 20%.



Figur 43. MESH for to rekker a fem magneter. Størrelse mesh 10mm.



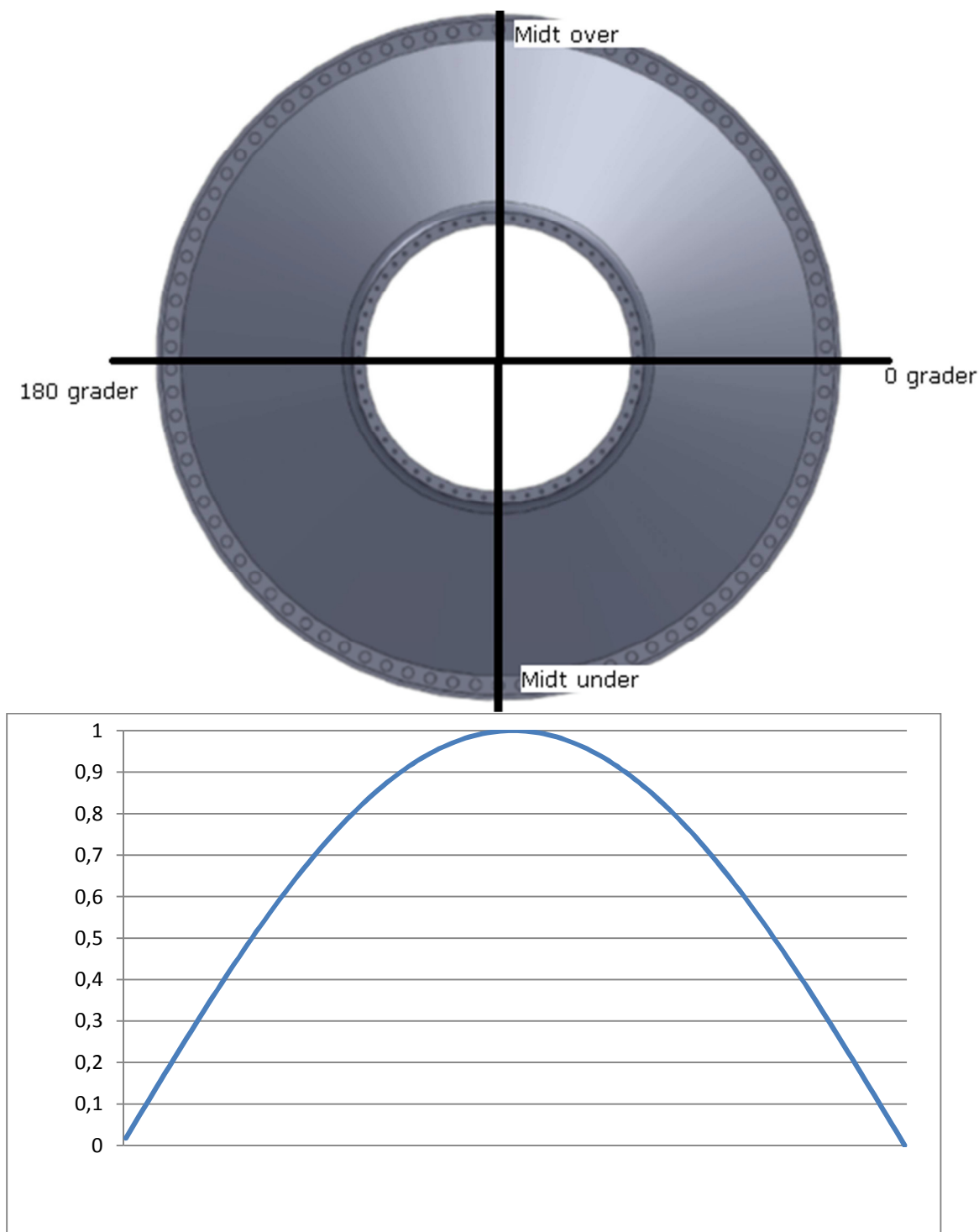
Figur 44. Fluxtetthet Halbacharrangement, frastøtende.



Figur 45. Fluxtetthet, Halbacharrangement, tiltrekkende.

Arrangement:

Det er kun den vertikale komponenten av en kraft mellom magnetene som vil virke i løfteretningen. Ettersom en mølle er rund., er det kun midt under og midt over man får at all kraften virker i vertikal retning. På hver side av møllen er løftet lik null. Jo nærmere midten man kommer jo større andel av kraften virker i løfteretning. Midt under og midt over vil 100% av kraften gå med til løft, her virker kraften vertikalt (fig. 46). Dersom man har magneter montert på hele den nedre halvdel av møllen vil i snitt 64% av kraften virke i vertikal retning.



Figur 46. Andel av kraften som virker i loddrett retning ved radielt lager. 180 ° til 0°.

Dersom man kun bruker halve kapasiteten, gjennom å kun løfte på den nedre halvdel ved hjelp av magneter som frastøter vil lastkapasitet per lengdemeter bli slik vist i Tabell 7. Av tabellen går det frem andel av møllekroppen som må dekkes med magneter. Ved en diameter på 5 meter vil man måtte dekke 20% av møllekroppen med 10x10 cm magneter av typen Neodymium 32MGOe i Halbach arrangement. Avstanden mellom lagerbanene (magnetarrangementene) er da 25mm. For 10 meter mølle, som er blant de største møllene man for tiden produserer, må 35% av det utvendige arealet dekkes. Beregninger viser at det er mulig med møller med diameter på opp til 30 meter med Neodymium 32MGOe.

Tabell 7. Totalt løft per meter ved bruk av nedre halvdel, Neodymium 32MGOe magneter i Halbach arrangement.

Diameter (meter)	Total vekt (tonn/meter)	Totalt løft mulig ved magneter (tonn/meter)	Andel
5	30	151	20 %
6	41	181	23 %
7	55	211	26 %
8	70	241	29 %
9	88	271	32 %
10	107	302	35 %
11	128	332	39 %
12	151	362	42 %
13	175	392	45 %
14	202	422	48 %
15	231	452	51 %
16	261	483	54 %
17	294	513	57 %
18	328	543	60 %
19	364	573	64 %
20	402	603	67 %
21	442	633	70 %
22	484	664	73 %
23	527	694	76 %
24	573	724	79 %
25	620	754	82 %
26	670	784	85 %
27	721	814	89 %
28	774	844	92 %
29	829	875	95 %
30	886	905	98 %
31	945	935	101 %
32	1005	965	104 %

Møllen er en svært stor konstruksjon noe som gir at elastisitet i materialet kan gi større deformasjoner. Den vil trykkes inn der magnetene i lageret frastøter hverandre og den vil strekkes der magnetene tiltrekker hverandre. Dette kan unngås/redueres gjennom å variere magnetarrangementets tiltrekking/frastøting langs sidene slik at møllen har minimal deformasjon under rotasjon.

Sekundærlager:

Flere typer lager kan brukes som sekundærlager. Passivt magnetlager med et glidelager som sekundærlager vil ikke kreve noen form for aktiv styring. Dette begrenser utviklingskostnadene i stor grad. Mulighetene for tekniske feil er mindre.

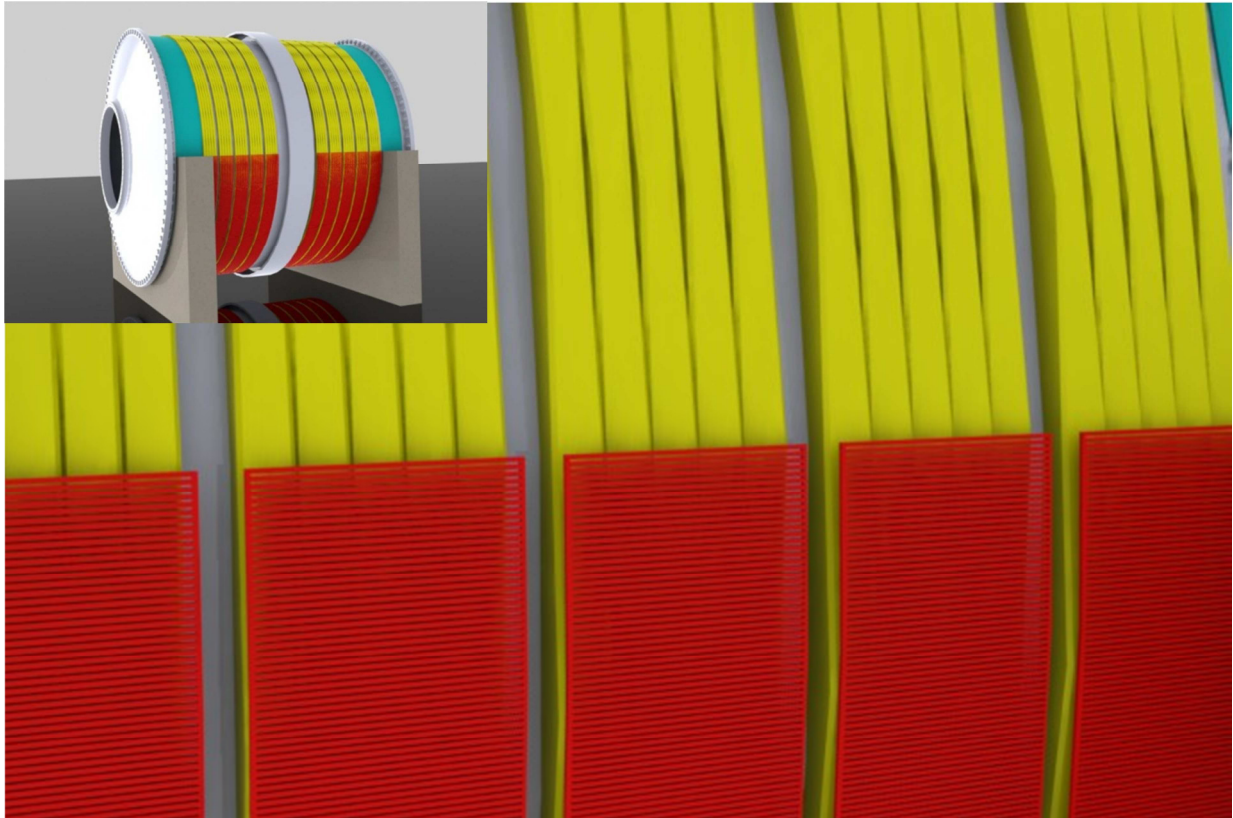
NASA gjennomførte forskning på dempningseffekten og stivheten til passivt permanentlager. De kom frem til dempningseffekten tidligere beskrevet i litteraturstudiet. Om denne dempningseffekten er stor nok, kunne det muliggjøre at permanentmagnetlageret ikke trenger sekundærlager. Utfordring her er driftsystemet. Dersom den drives ved tannring vil små bevegelser ha en innvirkning, likeså med ringmotor. Små bevegelser på 0,5mm kan endre kraften mellom rotor og stator med opp til 20 tonn (Winther 2011). I tilfeller der man skal vedlikeholde magnetlageret, ved montering og demontering, vil det være nødvendig med en konstruksjon som kan holde møllen oppe uten magnetlageret.

Innbygging:

Magnetlageret må bygges inn i ett støvtett kammer slik at det ikke forurenses. De hydrostatiske lagrene er innebygde og utstyrt med tettningsringer. Ved å lage en vegg fra det hydrostatiske lageret på den ene siden av møllen, til det hydrostatiske lageret på andre siden av møllen, vil man få en tett innkapsling av magnetene.

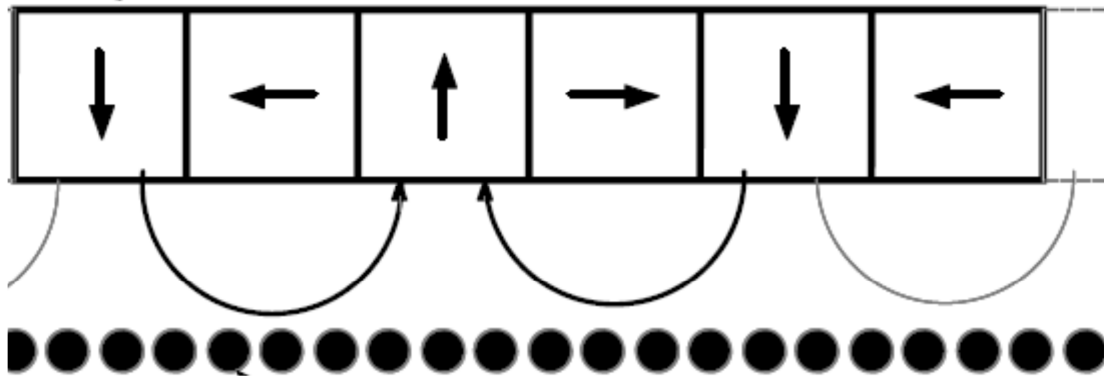
4.4 Konsept 4; “Løft ved indusert spenning i krets”

På møllekroppen er det montert magneter og i fundamentet er det montert ledninger. Ledningene er koblet sammen i hver ende til en krets. Ledningene ligger horisontalt og parallellt med møllens akse. Konseptet er modellert (fig. 47)



Figur 47. Utnyttelse av Lorentz kraften.

Magnetene må arrangeres på rekke og orienteres i forhold til ledningene i fundamentet (fig. 48). Når møllen roterer, vil magnetfeltet over lederne i fundamentet variere og det induseres dermed en spenning. Den induserte spenningen vil skape et magnetfelt som igjen vil virke slik at ledningen og magnetene frastøter hverandre. Tettheten mellom ledere og mellom magnetene kan varieres. Man kan ha større tetthet på ledere der man for eksempel ser at størstedelen av kraften vil virke mot tyngdekraften. Dette må vurderes ut i fra lastvariasjoner, noe som vil bestemme de ønskede egenskapene på forskjellige deler av lageret. Dersom strømmen skulle forsvinne, vil mølla holde seg svevende og bremse seg selv så lenge den relative hastigheten mellom magnetene og spolen er større enn ett minimum.

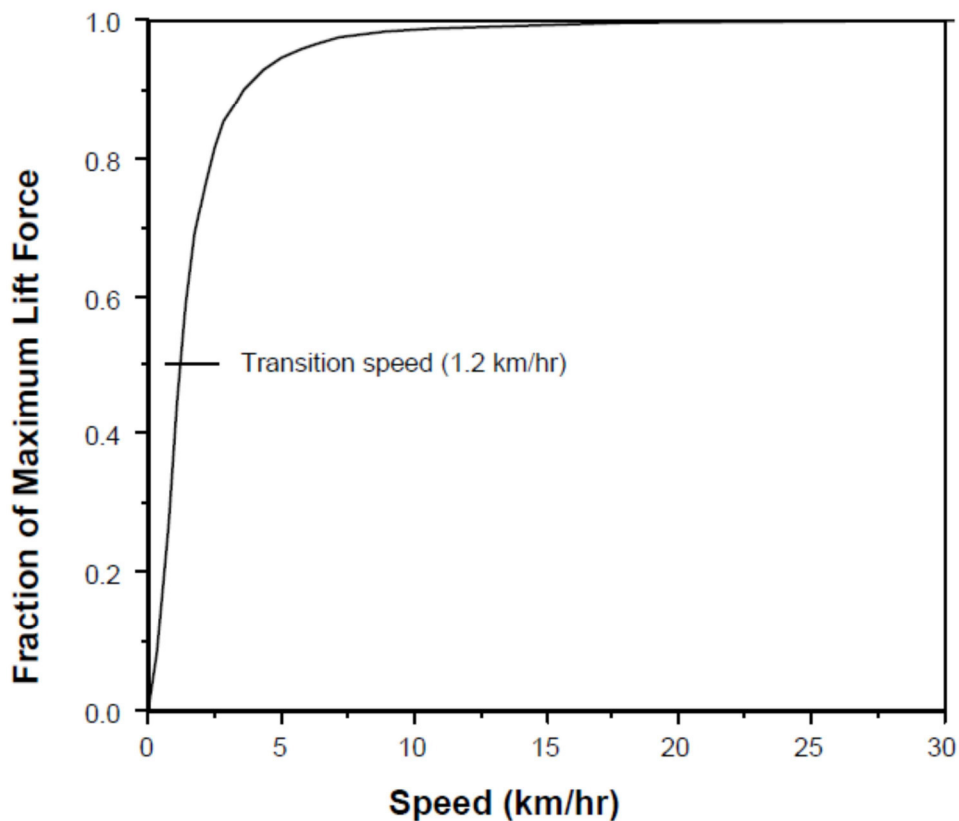


Figur 48. Halbach arrangement over ledere (Post 2005).

Løft avhengig av relativ hastighet:

Forskning har vist at man kan få løft ved så lav hastighet som 1,2 km/t (Post 2005). Denne hastigheten kan tilpasses gjennom konstruksjonen av magnetlageret slik at den er optimal i forhold til ønskede egenskaper. En mølle med diameter på rundt 10 meter roterer med rundt 9 omdreining per minutt. Dette gir en relativ hastighet mellom lagerfundament og møllekroppen på 17 km/t. Ved 17km/t vil lageret ha tilnærmet full løftekapasitet ved samme løsning som Inductrack (fig. 49). Denne løsningen kunne kombineres med konsept 5. Dersom man satte en spenning på kretsen slik at det ble skapt løft før møllen roterte, ville man unngå stor friksjon i oppstartstidspunktet. Man kunne så slå av tilførselen av strøm når møllen er i drift.

Fraction of Maximum Levitation Force vs Speed



Figur 49. Andel av maksimalt løft ved lave hastigheter (Post 2005).

Størrelse løft:

I teorien skal man ved bruk av denne teknologien kunne løfte 50 tonn per m². I praksis har man funnet at magnetlageret løfter 30 tonn per m² ved bruk av Neodymium magneter i Halbach arrangement (Heller 2003). Teknologien vil derfor gi den samme kapasiteten som i konseptet "Løft ved Permanentmagneter", men med redusert bruk av magneter ettersom det kun er den ene delen av lageret som er dekket med magneter. Tabell 7 er aktuell også i denne problemstillingen og viser de mulighetene man har med teknologien.

Dette systemet vil ikke kreve noen form for aktiv styring. Dette begrenser utviklingskostnadene i stor grad og mulighetene for tekniske feil er mindre.

Å indusere en spenning krever en kraft. Denne kraften er magnetlagerets friksjon eller motstand. Det er en tung konstruksjon og vil kreve ett sterkt magnetfelt for å skape stort nok løft. Hvor stor denne motstanden er avhenger av hvor optimalisert konstruksjonen ender opp med å bli.

Sekundærlager:

Motoren som driver møllen, må ha stort nok dreiemoment til å overgå stillestående friksjonen i sekundærlageret. Det er kun sekundærlageret som holder mølla ved oppstart før man har hastigheten som skal til for at det induseres en stor nok spenning til at det skapes ett løft. Friksjonskraften man finner i glidelager er større enn i hydrostatisk lager. Sammenlignet med hydrostatisk lager, kan glidelager ha mer enn 1000 ganger mer friksjon ved lik last. En løsning ville være å gjøre glidelageret til et hydrostatisk lager ved oppstart. Arealet er stort og det ville derfor ikke være nødvendig med spesielt stort trykk. Når møllen løftes av magnetfeltene som frastøter hverandre, kan hydraulikksystemene slås av.

4.5 Konsept 5; “Løft ved elektromagnetisme”

På møllen er det montert permanentmagneter. Når møllen skal løftes lar man en strøm gå gjennom spoler montert på fundamentet. På en nedre halvdel av møllen vil elektromagnetene frastøte seg permanentmagnetene montert på møllekroppen. I en øvre halvsirkel kan elektromagnetene tiltrekke seg permanentmagnetene. Møllen kan løftes før det er i drift, noe som gir gode egenskaper ved oppstart.

Løftekapasitet:

Elektromagnetene har stor energitetthet. Løftekapasiteten vil derfor begrenses av permanentmagnetene montert på møllekroppen. I den nedre halvdel der permanentmagnetene og elektromagnetene er ment å frastøte hverandre, vil det derfor minimum være like løftemuligheter som ved “løft med permanenmagneter” (Tabell 7).

Permanentmagneter på møllekroppen:

Magnetene på møllekroppen monteres i ett Halbach arrangement for å forsterke magnetfeltet på den siden som vender ut fra møllekroppen og mot elektromagnetene. Det er flere måter å arrangere magnetene for å skape en ønsket effekt. Magnetfeltene kan både arrangeres slik at de er varierende, slik at de kan brukes til både løft og drift. Eller de kan monteres med magnetfeltene parallelt med rotasjonsaksen. Dersom de er montert parallelt med rotasjonsaksen vil det ikke være mulig med kombinert drift og løft.

Elektromagneter på fundamentet:

Elektromagnetene i fundamentet vil være av en stor størrelse og det er å forvente at det vil kreves en form for kjøling. Mest sannsynlig vannkjøling. Som nevnt ved diskusjonen rundt arrangement av permanentmagnetene, vil elektromagnetene kunne brukes til både løft og drift.

Aktiv eller passive styring av elektromagneter:

Elektromagnetene kan både være passive og aktive. Ved bruk av passive magneter kan man avlaste ett sekundærlager med en konstant kraft. Lastvariasjoner vil da tas opp av sekundærlageret. Aktivt magnetlager ville gitt tilnærmet null friksjon gjennom å være helt uavhengig av ett sekundærlager så lenge det er i drift. Det vil være et energitap i form av varmeutvikling i elektromagnetene og tilhørende styringselektronikk.

Et aktivt lager ville kreve styring. Sensorer ville kontinuerlig måtte måle møllens posisjon i forhold til fundamentet. Ved hjelp av en styringsenhet må målingene avleses, for så å tolkes og til slutt bestemme styrken på de aktuelle elektromagnetene. Dette har vært en utfordring å programmere på mindre magnetlagre brukt i forskning. Disse lagrene har fungert for svinghjul med liten varierende last. For en mølle kan lasten variere med 20% (Winther 2011).

Den magnetiske frastøtingen eller tiltrekningen øker mer enn proporsjonalt med avstanden mellom magnetene. Det er derfor mange parametere som må tas med i en eventuell utvikling av programvare for styringsenheten. Man kan forvente at programmeringen kan være en stor kostnadsdriver ved utvikling av ett slikt lager. De elektronikkomponentene som skal til for å gi stor nok strøm i elektromagnetene vil også være svært store og spesiallaget, noe som igjen vil drive kostnadene. Å kombinere posisjonering og drift i ett vil igjen sette ytterligere krav til programmeringen og igjen skape større kostnader. En programvare med flere parametere vil være en programvarer med flere muligheter for feil, noe som igjen øker risikoen både under utvikling og når møllen er i drift. Det bør derfor tas en analyse på om kostnaden ved kombinert drift og løft er mindre enn om man lot de to være adskilt.

5 Konseptutvalg

5.1 Utvelgelse av lageplassering

Alternativ 1 er opplagring i tapp, mens alternativ 2 er opplagring i møllekropp. Skalaen er fra -1 til 1. Der -1 er laveste score.

Tabell 8. Valg av opplagring i skall eller tapp.

Kriterier	Alternativ opplagring	
	Tapp	Skall
Stabilitet	1	0
Montering	0	0
Produksjon tapp	0	1
Produksjon møllekropp	1	1
Produksjon lagerflate	1	0
Materialmengde tapp	0	1
Materialmengde møllekropp	1	1
Utviklingskostnader	0	0
Teknologiske muligheter	0	1
Sum poeng	4	5
Rangering	2	1
Videreføres	Nei	Ja

5.2 Utvelgelse av magnetisk lagerkonsept

Skalaen er fra -1 til 1. Der -1 er laveste score.

Tabell 9. Valg av type magnetisk lagerkonsept å sammenligne med alternative konsepter.

Kriterier	Alternativ			
	1	3	4	5
Stabilitet, behov for sekundærlager	1	0	0	0
Montering	1	0	1	0
Mengde magneter	1	0	1	1
Mengde stål i konstruksjon	-1	1	1	1
Utviklingskostnader	-1	1	0	-1
Energiforbruk produksjon	1	0	1	0
Energiforbruk ved bruk	0	1	-1	-1
Teknologisk utfordrende	0	1	0	-1
Sum poeng	2	4	3	0
Rangering	4	1	2	3
Videreføres	Nei	Ja	Nei	Nei

Konsept 3 ble funnet som det beste alternativet av de magnetiske lagerkonseptene. Denne sammenlignes så med alternativet for løft i skall, som er konsept 2, løft ved hjelp av luft.

5.3 Utvelgelse av lagerkonsept

Skalaen er fra -1 til 1. Der -1 er laveste score.

Tabell 10. Sammenligning av konsept 2 og 3.

Kriterier	Alternativ	
	2	3
Stabilitet, behov for sekundærlager	0	0
Montering	1	0
Mengde stål i konstruksjonen	1	1
Utviklingskostnader	1	1
Energiforbruk produksjon	0	1
Energiforbruk ved bruk	-1	1
Teknologisk utfordrende	1	1
Sum poeng	3	5
Rangering	2	1
Videreføres	Nei	Ja

5.4 Oppsummering

Konsept 3, "Løft ved Permanentmagnet" viste seg å være det beste konseptet å gå videre med ut ifra utvalgsmatrisene og på bakgrunn av de kriteriene som ble satt.

6 Videre konseptualisering

6.1 Bakgrunn

Konseptet “Løft ved permanentmagneter” skal utvikles til et nivå der det går å sammenligne med eksisterende mølle. For å sammenligne teknologien med eksisterende teknologi har Outotec funnet frem en skallopplagret mølle i den aktuelle størrelsen. Geita, navnet prosjektet rundt møllen fikk, ble i sin tid utviklet av Nordberg og har vært i drift siden 1999. En sammensettingstegning (fig.50). Nederst i hjørnene på sammensettingen ser man de hydrostatiske lagrene. Lagerbanen på møllekroppen omkretser hele møllen. På midten ser man tannringen. Møllen drives av to eksterne motorer montert på hver side. Mellom motor og tannring er det girkasse, brems og piniong.

Geita konstruksjon:

Skallet med lagerbanen har en stor dimensjon. Skallet er delt i segmenter, hver på 180 ° for å kunne produseres. To og to segmenter er satt sammen og utgjør en komplett sylinder. Flensene er skrudd sammen med bolter. Boltrekken parallelt med møllens akse går ikke helt fra kant til kant, men er avbrutt av lagerbanen (fig. 50).

Utfordringer ved Geita:

I skjøten mellom skallsegmentene kan det oppstå en glippe. Dette har vært ett problem tidligere. Små mengder av massene inne i møllen kan sive ut og skape problemer for det hydrostatiske lageret.

Videre er det en utfordring at det er en skjøl i lagerbanen. Det er svært lav toleranse på lageret. Oljefilmen er på rundt 0,1mm (Fuller 1984). En liten forskyving mellom de to skalldelene kan derfor føre til at oljefilmen brytes når skjøten passerer, noe som igjen gir havari. Videre er det funnet at mølla er stivere i sammenføyningene, noe som har ført til at hver gang sammenføyningen passerer lageret opplever lageret ett hopp i trykket. Dette har ikke vært noe problem, men er ett moment å ta med videre.

Pakningene som hindrer olje fra å sive ut av lageret, eller hindre støv i å komme i kontakt med smøremiddelet, må omkretse hele lageret. Pakningen har en diameter på 9,4 meter. Pakningen blir spesiallaget og er kostbar. Det kan oppstå lekkasjer.

6.2 Problemstillinger

Videreutvikle konseptet “Løft ved Permanentmagneter”. Formgi og designe en teknisk løsning for innfesting av magneter på møllekroppen og i fundamentet.

6.3 Målsettinger og begrensninger

Hovedmål: Formgi og designe en enkel teknisk løsning for infesting av magneter. Styrkeberegne den tekniske løsningen med de laster som tidligere er brukt i FEA beregninger for prosjektet Geita.

Delmål:

- Kartlegge de påkjenninger magnetene og innfestning vil utsettes for.
- Foreslå en konstruksjonsløsning
- Gjøre FEM-analyser av konstruksjonsforslaget og foreslå ett optimalt design
- Grovberegne komponent og fremstillingskostnader.

Begrensninger:

- Ser ikke på tekniske løsninger for drift.
- Ser ikke på tekniske løsninger for aksiallager.
- Ser ikke på innkapsling av lager.
- Ser ikke på sekundærlager.

6.4 Kravspesifikasjoner

Formgivning og design.

- Produktene må ha en formgivning og design som er enkel å produsere og vedlikeholde.

Dimensjoner:

- Alle komponenter vil tilpasses laster og eksisterende geometri til Geita.

Magnetenes løfteevne:

- Materialbruk for permanentmagnetene vil optimaliseres. Det skal søkes å minimeres materialbruken.

Magnetfeltets retning og magnetenes arrangement:

- Magnetene skal plasseres i ett Halbach arrangement. Magnetfeltet på møllen skal sammenfalle med magnetfeltet i fundamentet slik at det skapes ett løft. Magnetfeltet må være konstant slik at det ikke induseres spenninger.

Utmatning:

- Materialeegenskaper og geometri må tilpasses de laster og det antall sykluser møllen utsettes for.

Miljøtilpasninger:

- Komponentenes materialer må tilpasses de miljømessige utfordringene. Eller de må isoleres fra kontamisjon av de syrer og baser som er i bruk i gruvedrift.

Montering og vedlikehold:

- Magnetene er svært sterke. Dersom de skulle oppnå kontakt vil det kunne være nødvendig med verktøy for å igjen separere disse. Magnetene har så stor kraft at det

kan føre til personskader i form av klemskader. Søker derfor en enkel løsning der magnetene er i en slik størrelse at det uten for store verktøy skal kunne skiftes ut.

Uønskede effekter:

- Feste og braketter for magnetene må ikke være av ett materiale og utforming som fremmer oppbygning av Eddy strømmer.

6.5 Konseptutarbeidelse

6.5.1 Konseptualisering, holdere for magneter.

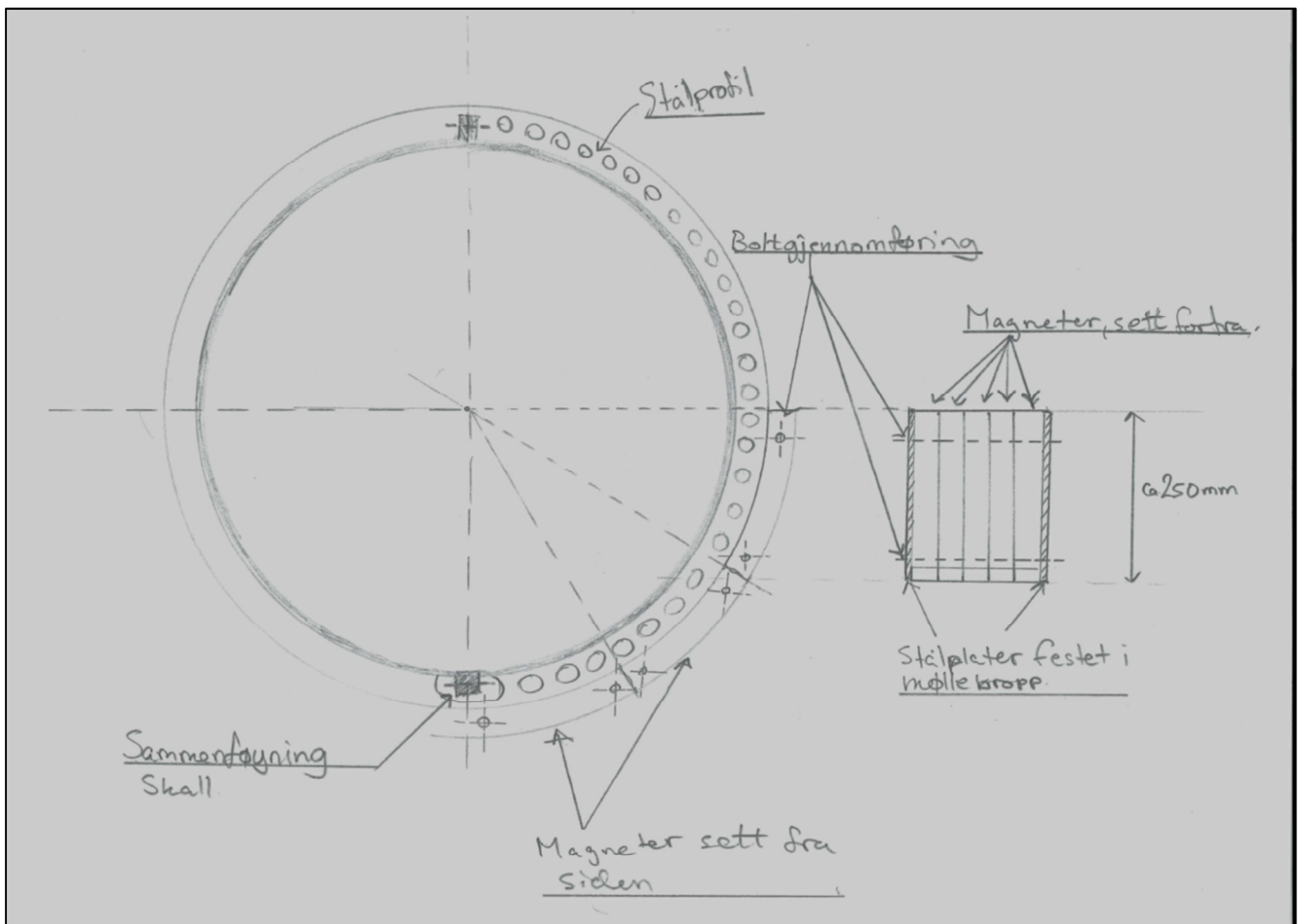
Materialer:

Aluminium er ett materiale som er lite magnetisk. Materialet egner seg derfor som konstruksjonsmateriale i ett permanentmagnetlager. Velger derfor at de fleste profiler er av aluminium utenom fundamentstolen som vil være av s235 stål.

Magneter festet sammen med bolter:

Magnetene er tredd inn på to bolter som er festet i en brakett til møllen. Ved montering og demontering skyver man de aktuelle magnetene inn på boltene. Størrelsen på magnetene avhenger av hva som er praktisk størrelse. Magnetene kan monteres/demonteres fra begge sider. Magnetene er plassert i segmenter (fig. 51). Segmentene er montert på en omkretsende brakett. Magnetene dekker hele møllens omkrets.

Magnetene må borres hull i. Hullet vil redusere magnetens styrke. Det sprø materialet kan sprekke opp under maskinering eller mens det er i bruk.

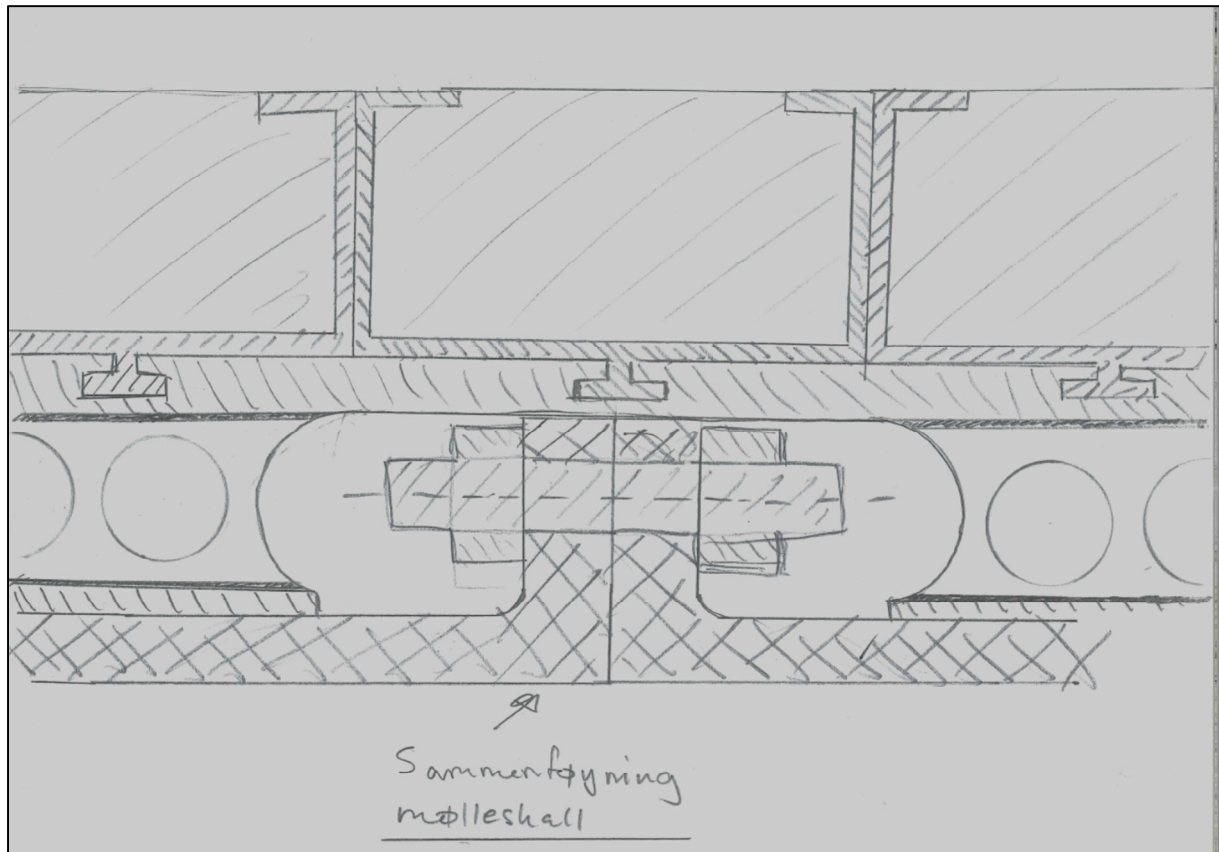


Figur 51. Magnetfester ved boltgjennomføring.

Magneter i bokser som skyves på plass i egne spor:

Magnetene ligger i bokser. Boksene er skøvet inn på spor i en T profil. Magnetene ligger på rekker innover i figuren (fig. 52). Magnetfeltet vil virke vinkelrett på figurens flate. Dersom en magnet skulle sprekke, kan man skyve ut boksen for så å skyve ut de forskjellige magnetene og bytte ut eventuell ødelagt magnet. Boksen kan så skyves inn igjen. Løsning tillater at man har reservebokser med magneter som er klare til å skyves på plass.

Magnetenes posisjon må bygges ut noe fra utvendig på møllekroppen. Dette fordi mølleskallet har sammenføyninger som bygger ut (fig. 52). Disse kan man også se i (fig. 50)



Figur 52. Kutt av løsning for festebrakett for magneter i boks.

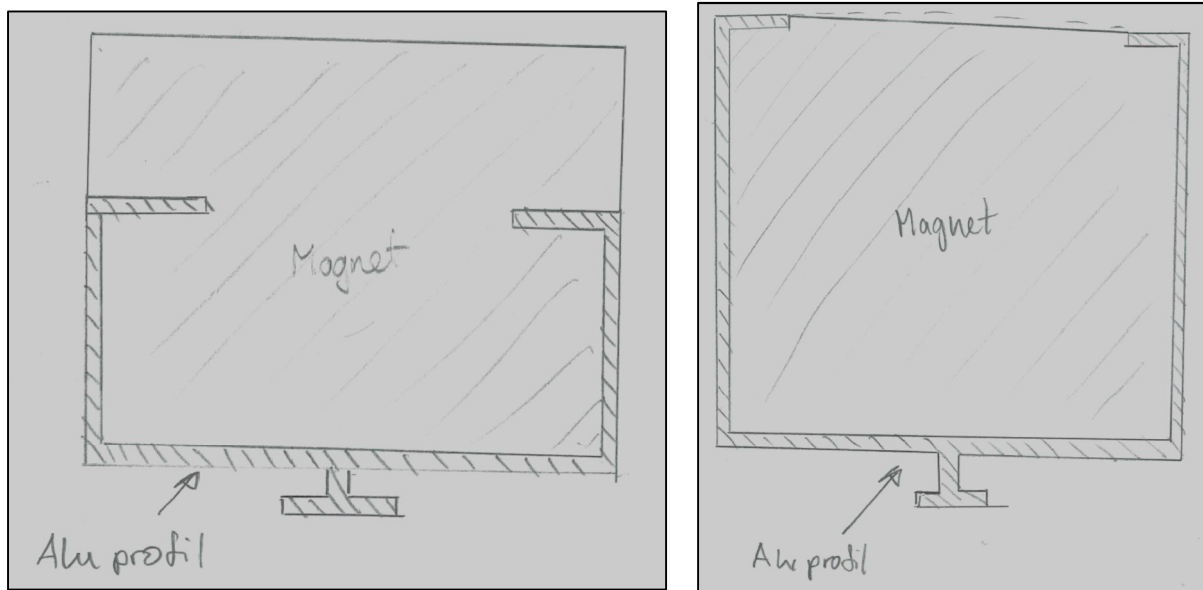
Alternativt utforming av boks for magneten, 1:

Magnetene holdes på plass med en kant. Løsningen er utfordrende på den måten at magnetene er av sprø materialer. Det er da negativt med en sprekke midt i magneten. Løsningen krever også mer maskinering. Utformingen av den delen av boksen som stikker inn i magneten bør være optimalisert i forhold til ikke å skape noen spenningskonsetrasjoner i magneten (fig. 53a).

Alternativt utforming av boks for magneten, 2:

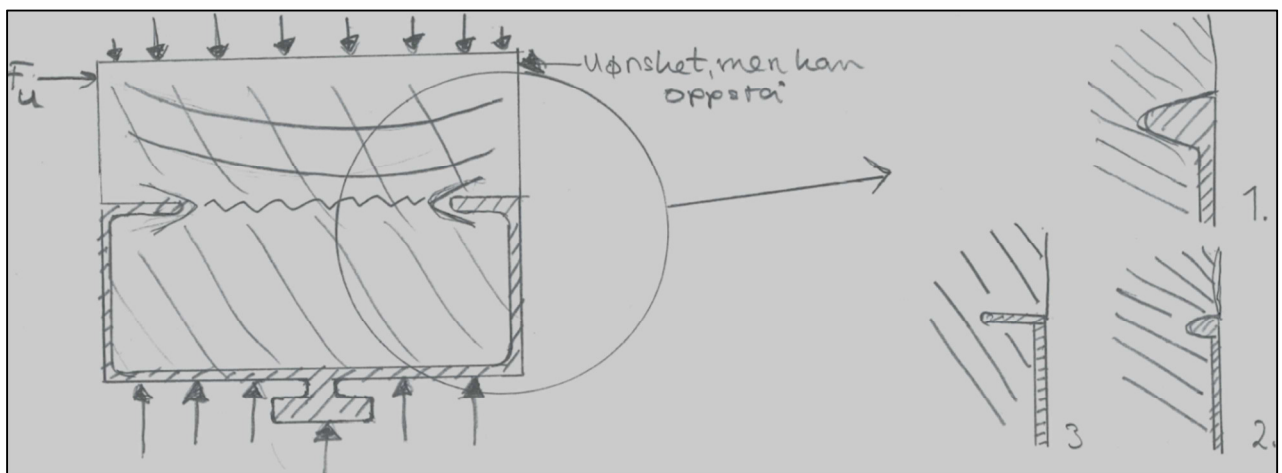
En løsning der boksen skal holde magneten. Dekker en del av overflaten. Krever minimalt med bearbeiding av magneten. Kan skape Eddy strømmer i boksen. Derfor viktig at det er ett ikke magnetisk materiale slik som aluminium. Løsningen gjør at det kan oppstå svingninger i løftet etterhvert som møllen roterer. Hver gang den delen av magneten som er dekket passerer en annen magnet, vil kraften i dette punktet være mindre enn over resten av møllen. Det vil

dannes en svingende bevegelse. Dette er negativt og vil være med på å øke kravet til konstruksjonen av møllene med tanke på utmatning (fig. 53b)



Figur 53. (a) Magnetinnfesting i boks, alternativ 1. (b) Magnetinnfesting boks, alternativ 2.

Tre forskjellige alternative profiler (fig. 54). Profil 1 og 2 har ett design som virker å redusere muligheten for sprekkdannelse i magneten. Profil 3 har har ett design som kan intrudere spenninger i spissen.

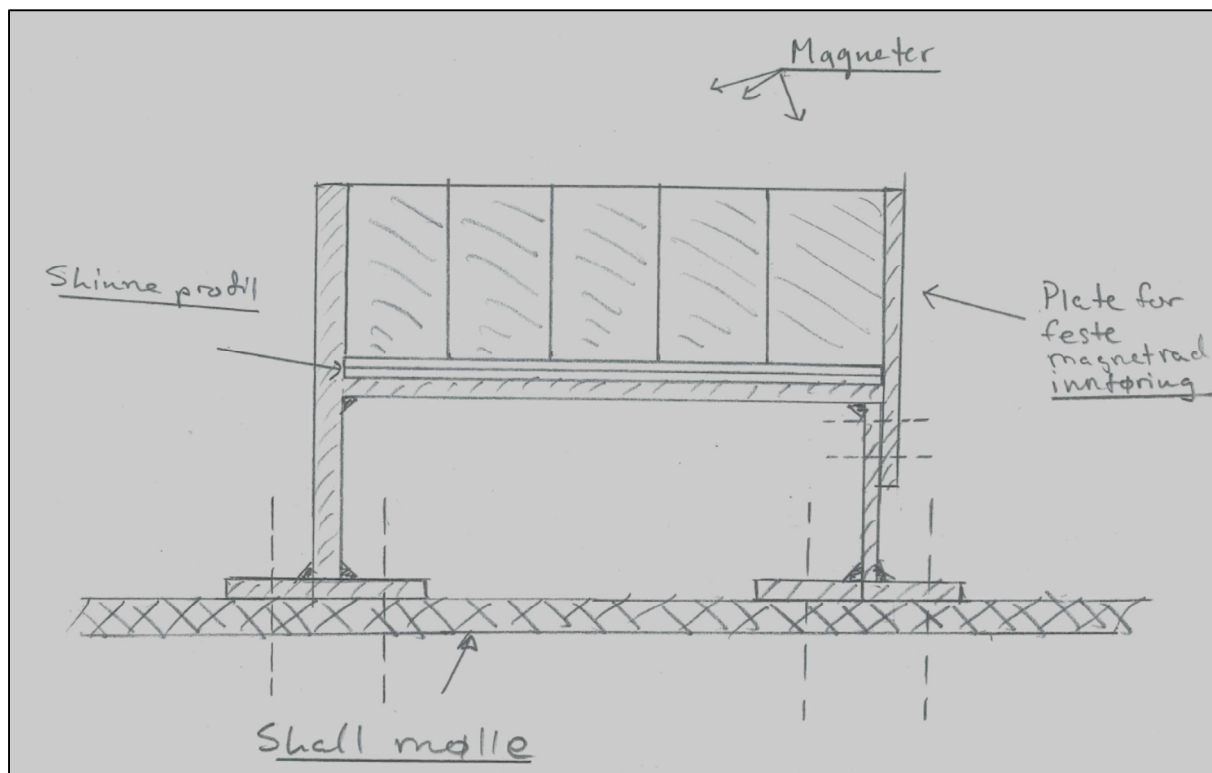


Figur 54. Redusere spenninger i magnet ved optimalt profildesign.

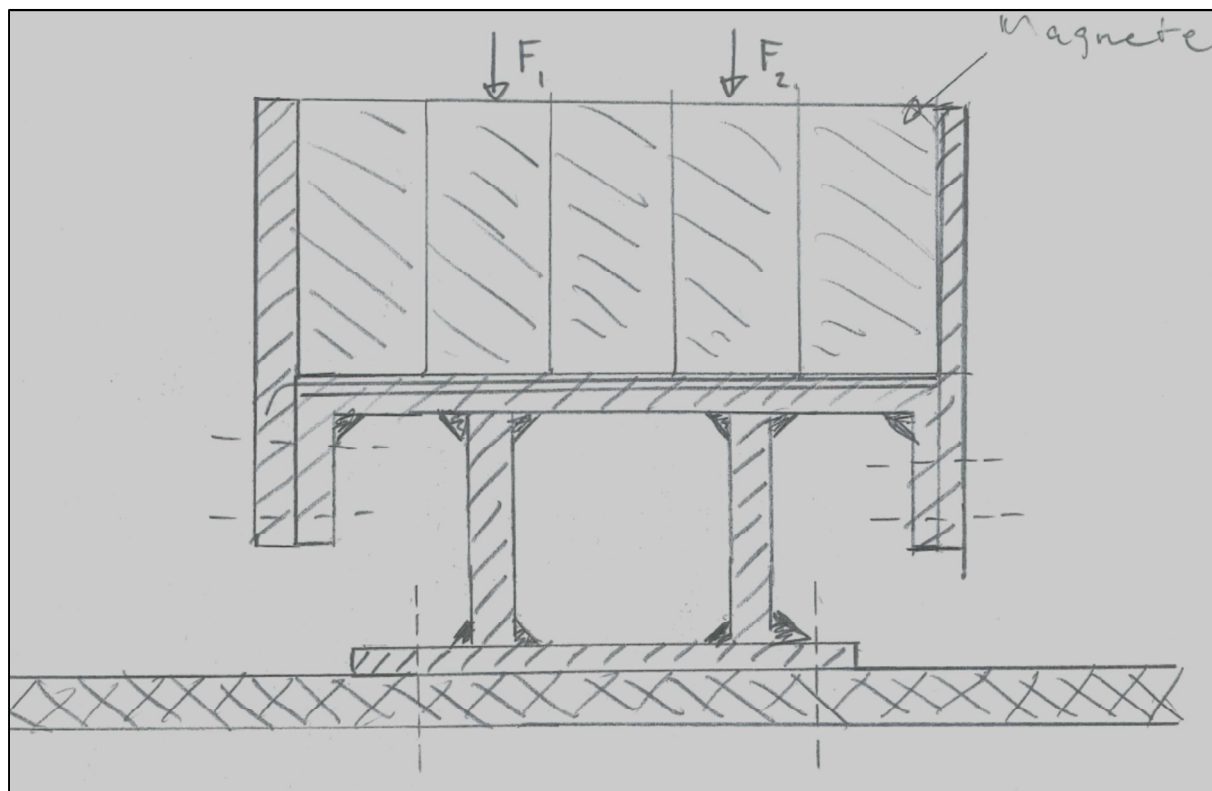
6.5.2 Konseptualisering, bærende profil som skal holde magnetprofilene.

Den bærende profilen gir festet til magnetene en økt diameter, slik at magnetene får virket rundt hele konstruksjonen. Den økte diameteren er for at man skal bygge over skjøten mellom skalldelene (fig. 52). Selv om bruk av magnetlager kan gi lavere spenningskonsentrasjoner og derfor en lettere mølle kropp, vil det fortsatt være behov for en skjøt. Alternativ 1 er en profil der den venstre siden er hel, mens på den høyre siden er det en plate skrudd fast som igjen holder boksen med magnetene på plass (fig. 55). Når magnetene skal skiftes ut fjerner man denne platen.

Kraften vil virke på magnetene i midten. Dette gjør at en slik konstruksjon ville få unødvendige nedbøyning i midten (fig. 55). Alternativ 2 for en bærende profil. Denne profilen vil i større grad enn alternativ 1 hindre nedbøyning (fig. 56).

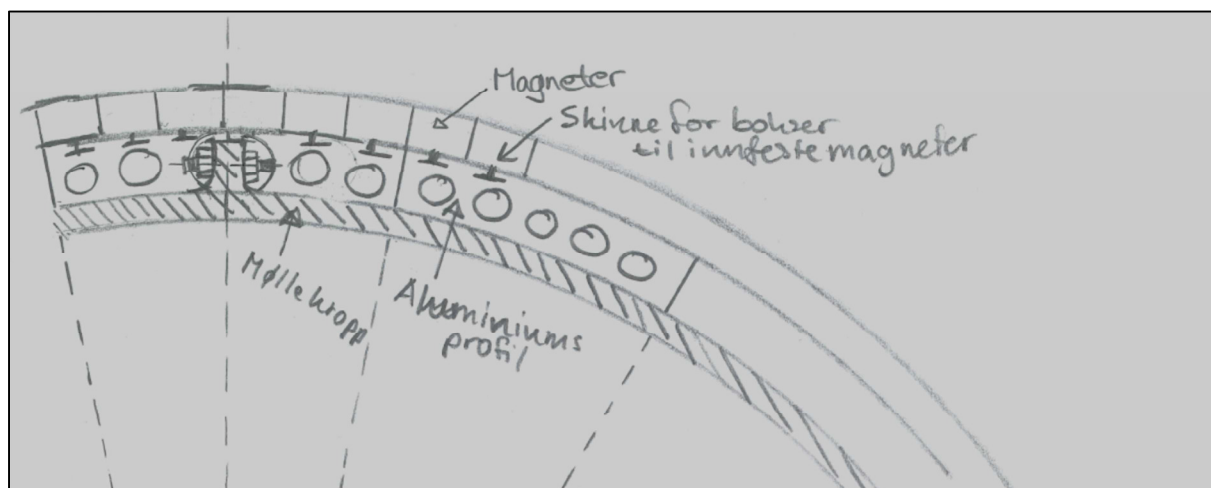


Figur 55. Bærende profil, alternativ 1.



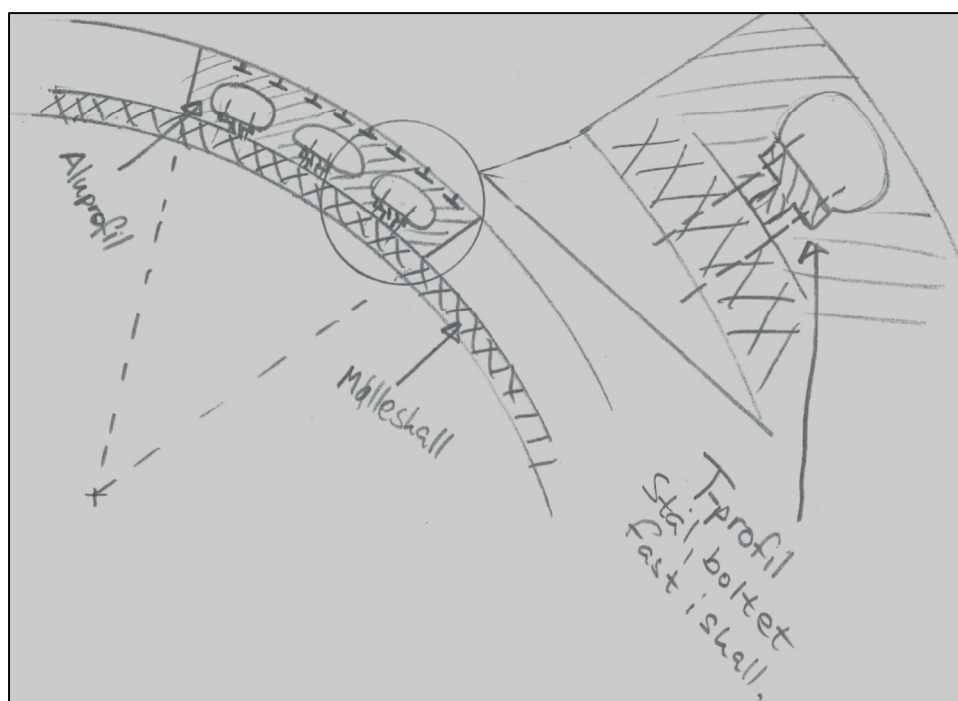
Figur 56. Bærende profil, alternativ 2.

Den bærende profilen kunne også ekstruderes i en bit (fig. 57). De ekstruderte profilene kan så settes samme etter hverandre slik at de er sammenhengende rundt møllekroppen. Ved å ekstrudere profilene unngår man sveising. Man må drille hull for bolter slik at man kan skru profilen fast i møllekroppen, eventuelt lime den til møllekroppen. Det er fordelaktig å ha en løsning der delene enkelt kan skiftes ut. Å skru virker derfor som det beste alternativet.



Figur 57. Alternativ 3. Bærende Aluminiumsprofil montert på mølleskallet.

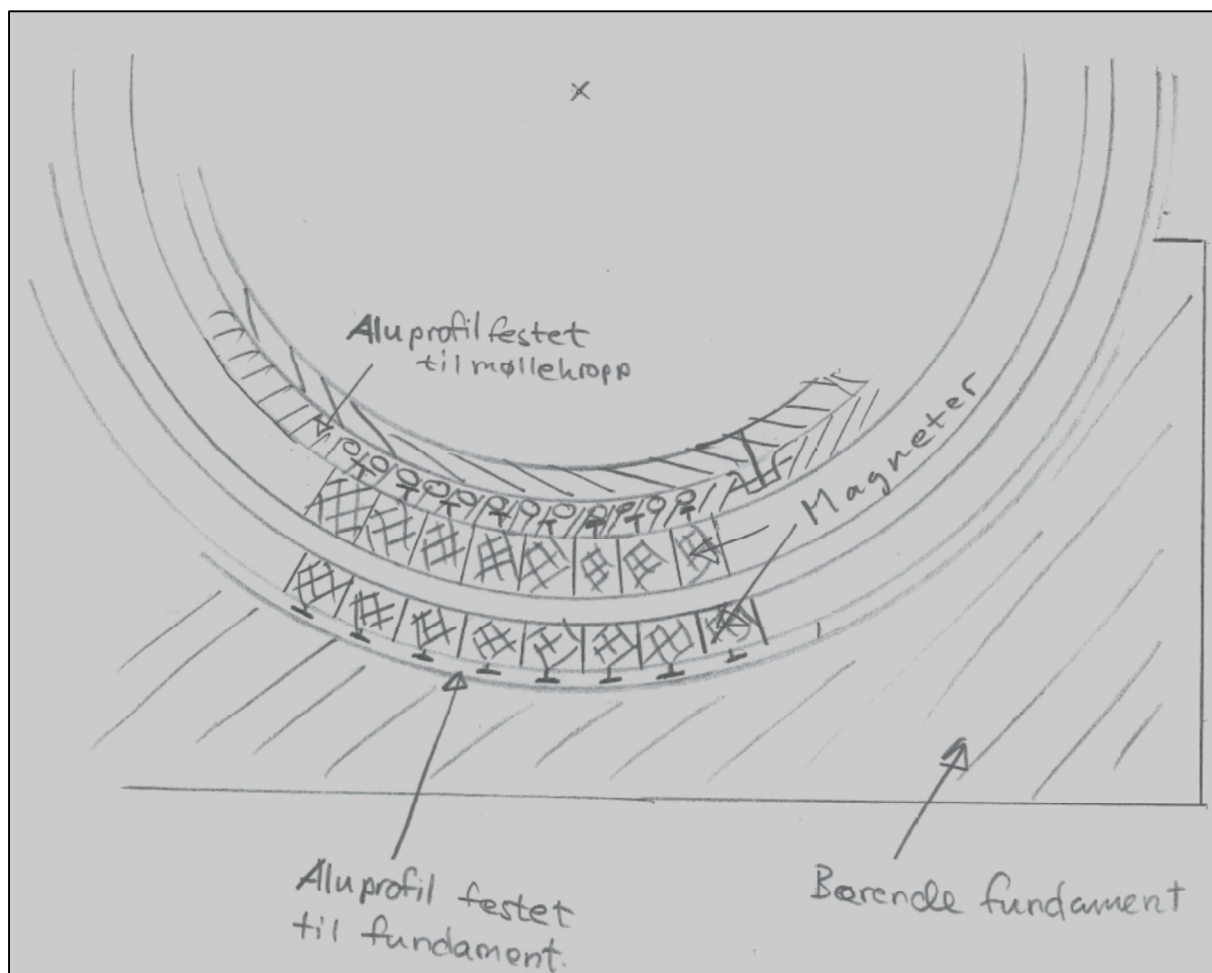
Feste av aluminiumsprofilen til møllekroppen kan skje ved hjelp av skruer (fig. 58). Ved bruk av T-profiler i stål kan man få ett bra feste for skruene man bruker for å skru fast den bærende profilen til møllekroppen. Bruk av T-profilen gjør at plassering av skruer blir gjort enklere. T-profilen i stål gir en forsterket sone for skruene. Man kan også bruke flattstål i stede for T-profil. Da vil det være nok med to skruer per flattstål, mens med T-profil vil man måtte borre på hver side av flensen.



Figur 58. Feste for bærende aluminiumsprofil. Alternativ 3.

6.5.3 Konseptualisering, fundament.

Fundamentet lageret skal plasseres på, mellom lager og fast grunn, kan enten være flyttbart eller montert permanent i bakken. En enkel sammensetning av lageret (fig. 59).

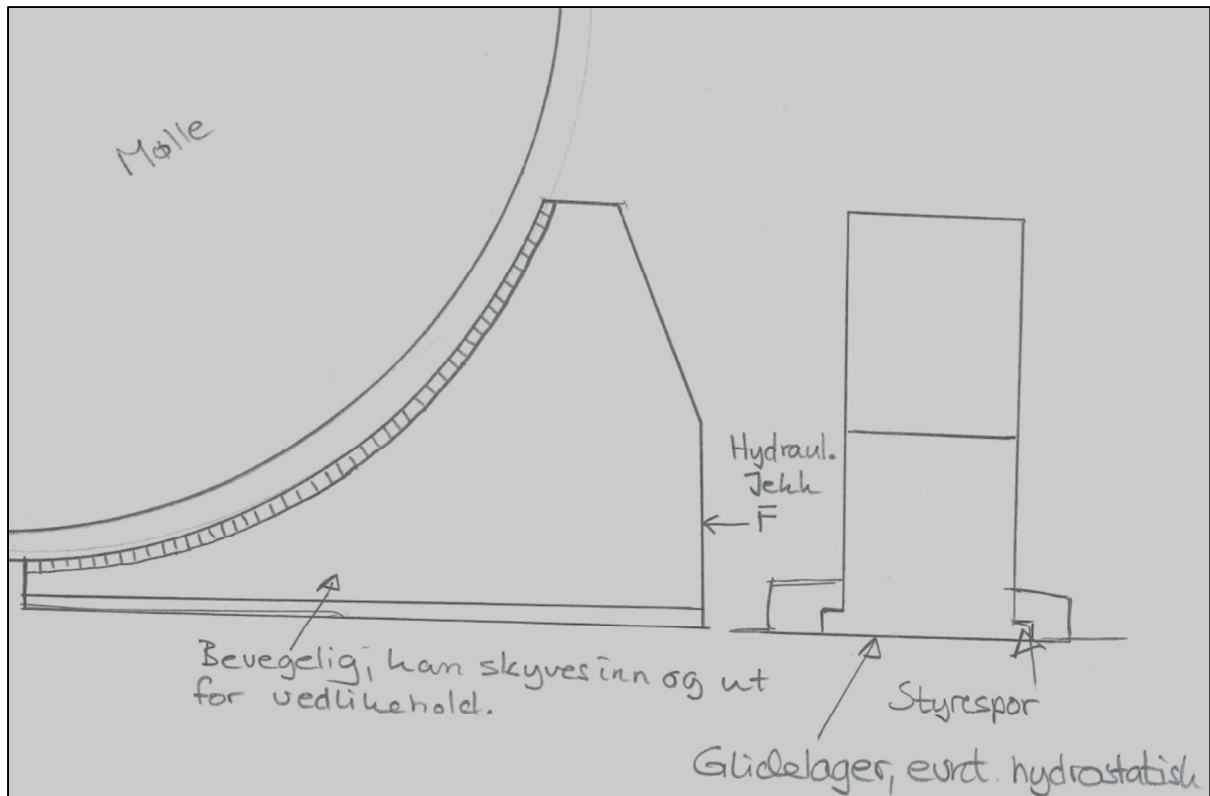


Figur 59. Sammenensetning med profiler og magneter montert på fundamentet.

Bevegelig, fastmontert fundament:

Ett bevegelig fundament tillater enklere vedlikehold, da magnetene ikke er utsatt for trykk når man har flyttet dette ut av magnetfeltet til magnetene på møllen (fig. 60). Fundamentet må være stivt for sideveis bevegelse da det kan oppstå situasjoner der kraften ikke bare virker radielt, men også aksielt. Dersom lageret skulle forskyve seg på en eller annen måte vil det oppstå store krefter som kan brikke fundamentet over. Ved bruk av stålprofiler betegnet med styrespor i figuren, kan løsningen fundamenteres i bakken.

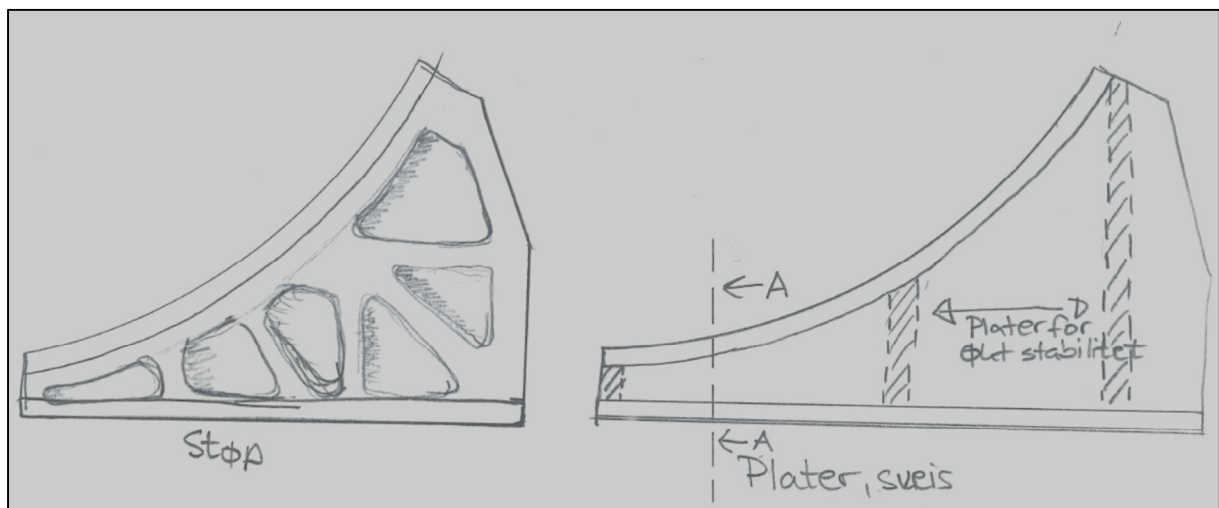
Når man skal ha på plass lageret vil det oppleve økt kraft jo nærmere magnetene på møllen man plasserer dette. Det bevegelige fundamentet kan enten skrus på plass ved hjelp av en stor skrue, eller man kan bruke en hydraulisk sylindere med en låsefunksjon når lageret er i posisjon. Det vil normalt være hydrauliske anlegg med pumpekapasitet på 20MPa tilgjengelig. Mellom grunnen og fundamentet kan det være ett glidelager. Det er svært skjeldent at man vil måtte trekke ut lagerfundamentet noe som igjen gir at glidelageret kan være selvsørende for minst mulig vedlikehold.



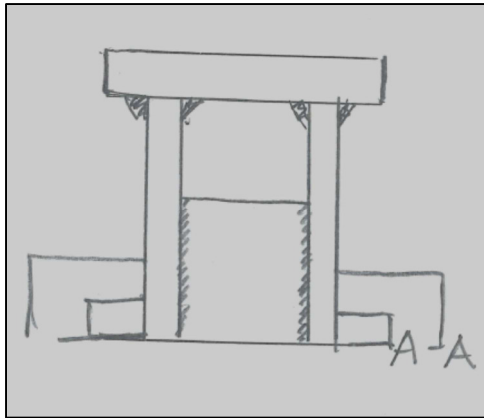
Figur 60. Bevegelig fundament.

Produksjonsmetode fundament:

Fundamentet vil ha store dimensjoner og måtte ta store laster. Figur 61 (a) viser ett støpt lagerfundament mens (b) viser ett sveist. De store størrelsene gjør at det er svært utfordrende å sveise en slik konstruksjon. Normalt ved denne størrelsen vil man støpe. Figur 62 viser ett snitt av en sveist plateløsning.



Figur 61. (a) Produksjonsmetode alternativ 1. Støpt fundament. (b) Produksjonsmetode alternativ 2. Fundament av sveiste plater.



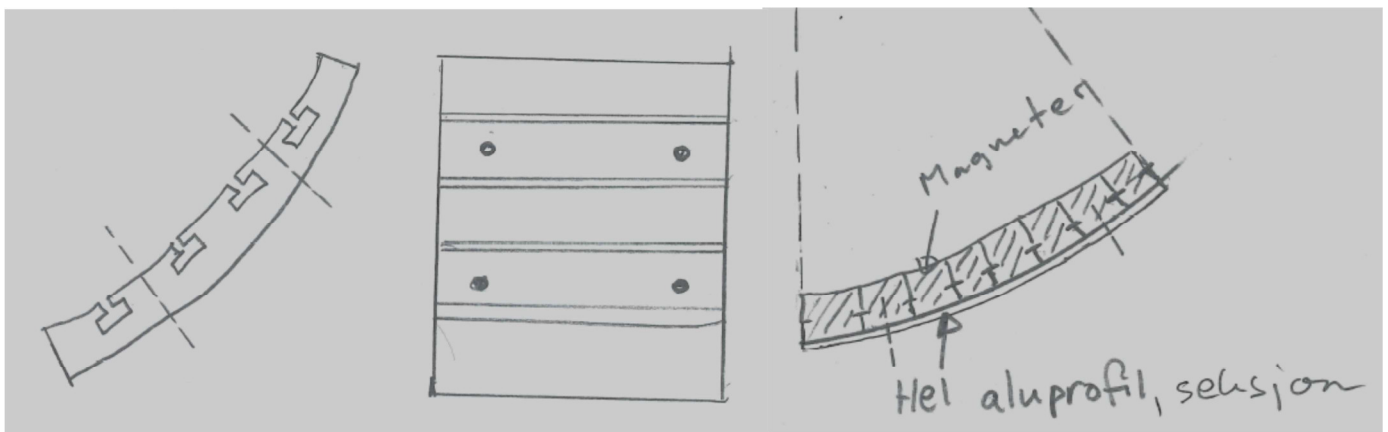
Figur 62. Snitt fundament sveiste plater.

Holdere for magneter på fundamentet:

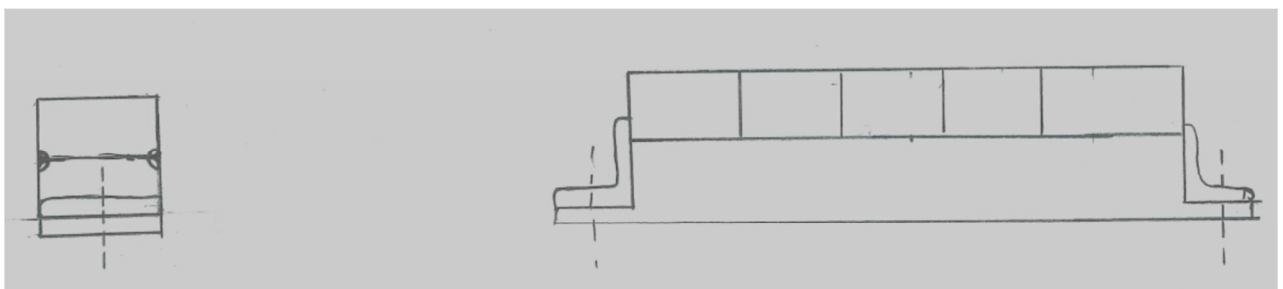
Profilene som skal feste magnetene til fundamentet trenger ikke være av lik type som for de som festes på møllekroppen. De vil ikke ha samme målene. Derfor må det utvikles egne tegninger og produksjonsmetode. Sporet magnetene holdes i aluprofilen med, vil være lik sporet som holder magnetene på møllekroppen (fig. 54).

Profil mellom holder for magneter og fundament:

To alternative profiler for innfestning av magneter. Alternativ 1 er en ekstrudert profil. Profilene utgjør segmenter som settes sammen etter hverandre. Profilene skrues fast i fundament. Alternativ 2 er en ekstrudert aluminiumsprofil der boksene som skal holde magnetene er inkludert i profilen (fig. 63). For alternativ 1 og 2 kan man bruke en L-profil til å holde magnetene på plass (fig. 64).



Figur 63. Alternativ 1. profil innfestning fundament sett fra siden (a) Alternativ 1 sett forfra (b). (c) Alternativ 2. Helprofil for feste av magnet i fundament.



Figur 64. Alternativ 2. Innfestning magneter i fundament.

6.5.4 Utvelgelse av konstruksjonskonseptene, lagerdelen monter på møllekropp.

Holder/fester for magneter:

Kriterier	Alternativ	
	Holder, profil	2 Bolter pr. Lengde
Montering	1	0
Mulighet for sprekk magnet	1	0
Produksjonskostnad	0	1
Sum	2	1
Videreføres	Ja	Nei

Profil holder magnet:

Kriterier	Alternativ	
	1	2
Monering	1	1
Mulighet for sprekk magnet	1	0
Produksjonskostnad	1	1
Sum	3	2
Videreføres	Ja	Nei

Bærende profil som skal holde magnetprofilene:

Kriterier	Alternativer		
	1	2	3
Montering	1	1	0
Enkelhet produksjon	0	0	1
Styrke	-1	0	1
Produksjonskostnad	0	0	1
Sum	0	1	3
Videreføres	Nei	Nei	Ja

6.5.5 Utvelgelse av konstruksjonskonseptene, lagerdelen montert på bakken.

Holder/fester for magneter, profil innfestning i fundament:

Kriterier	Alternativ	
	1	2
Montering	1	0
Produksjonskostnader	0	1
Sum	1	1
Videreføres	Ja	Nei

Fast/bevegelig fundament

Kriterier	Alternativ	
	Bevegelig	Fast
Montering	1	1
Vedlikehold	1	0
Produksjonskostnader	0	1
Sum	2	2
Videreføres	Ja	Nei

Vedlikehold vektes tyngre. Bevegelig fundament er å foretrekke foran ett fast montert.

7 Grunnlagsberegninger

7.1 Dimensjoneringsgrunnlag for magneter

Outotec har utført grunnlagsberegninger for Geita. Følgende er oppgitt og aktuelt for grunnlagsberegninger i forhold til magnetlageret (Ericsson 1999).

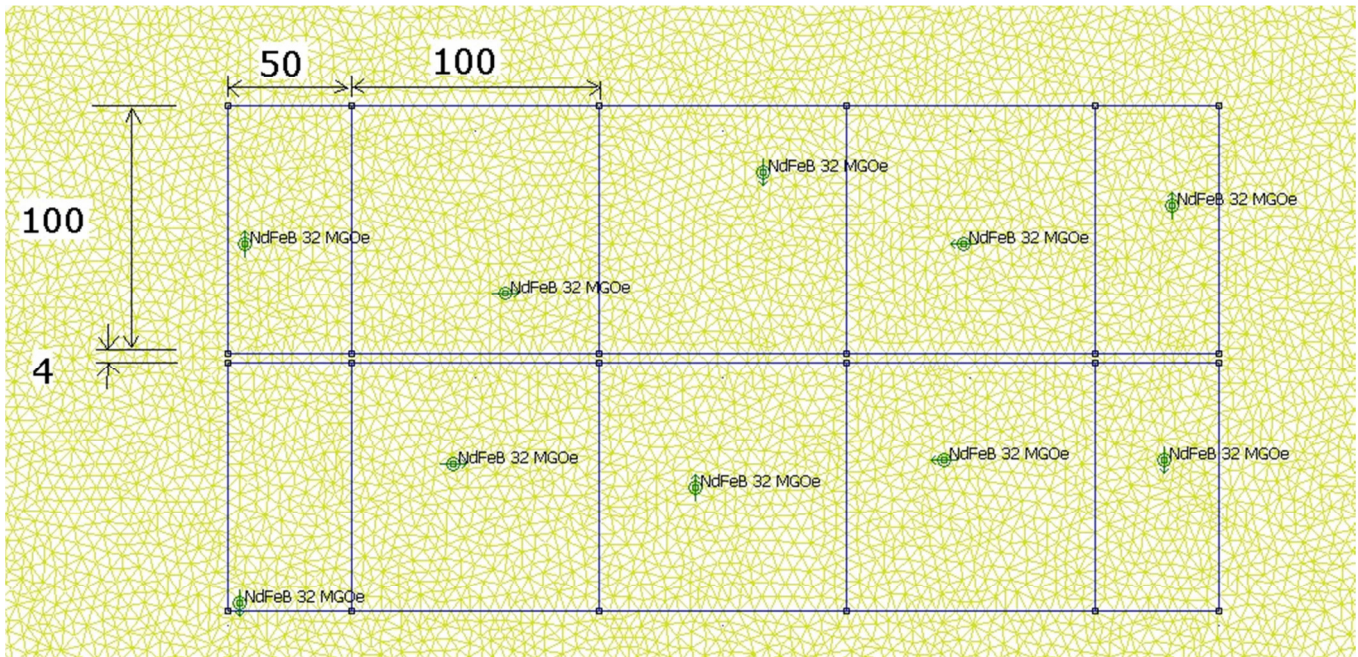
1. Hydrostatisk trykk fra fyllmassene 4020kg/m³
2. Fyllmassens vekt 393 tonn
3. Vekt hele stålkonstruksjon som opplagres 621 tonn

Fyllmassen vil være av lik vekt uansett lagerløsning ettersom denne er kundespesifikk. Stålkonstruksjonens vekt kan reduseres i forbindelse med optimalisering av konstruksjonen gjennom FEM analyse.

Vekt av magneter:

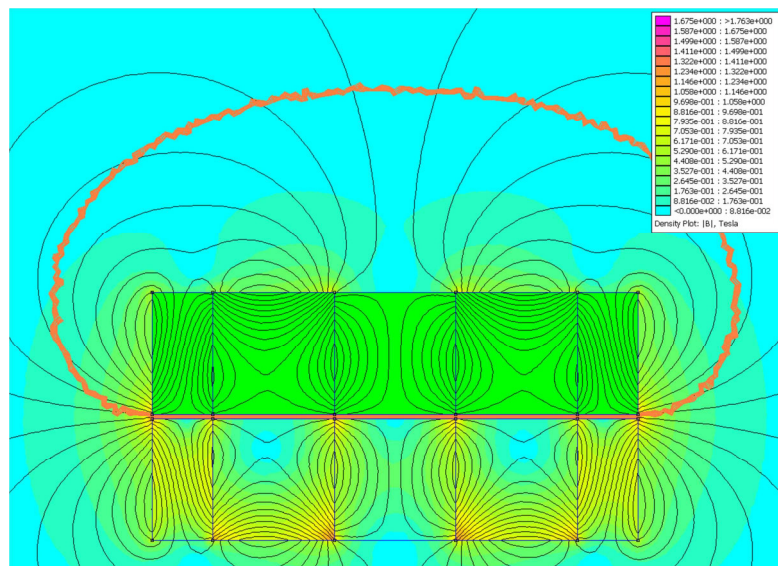
De innledende beregningene gjort i konseptualiseringsdelen viste at med 10X10 cm magneter, fem på rekke, kunne man løfte 30 tonn per kvadratmeter. Avstanden var her 25mm. Denne avstanden kan reduseres betraktelig. I større elektriske motorer kan avstanden mellom rotor og stator være rundt 4 millimeter på møller med diameter på rundt 10 meter og som drives av ringmotor (Winther 2011). Det er også mulig å redusere bredden på de magnetene som står på hver side i Halbach arrangementet. Det er også mulig å optimalisere vekten av magnetene mot kraften ved å variere dybden på magnetene, dette har jeg valgt å ikke gjøre. Med utgangspunkt i de nye forutsetningene velger jeg å gjøre en ny FEM analyse av magnetenes fraskyvningskraft.

- Type magnet: NdFeB 32MGOe
 - Lineært B-H forhold
 - Relativ μ_x : 1,045
 - Relativ μ_y : 1,045
 - Coercivity: 883310 A/m
 - Electrical Conductivity: 0,694 MS/m
- Størrelse: 2 stk. 5x10 cm, 3 stk. 10x10 cm.
- Antall: 2 rekker med 5 magneter, 4 mm mellom rekkene
- Arrangement Halbach arrangement
- Mesh: 5 mm.
- Program: FEMM 4.2



Resultat FEM analyse:

Programvaren har en funksjon kalt “Force via Weighted Stress Tensor” (FWST). Kraftene ble funnet for magneten merket i grønt. FWST gjør en versjon av et volumintegral ved Maxwell’s stress likninger. Programvaren gjør en vektet Laplas likning over luften som omgir de grønne blokkene. Konturene integralet ble gjort langs er vist i Figur 65.

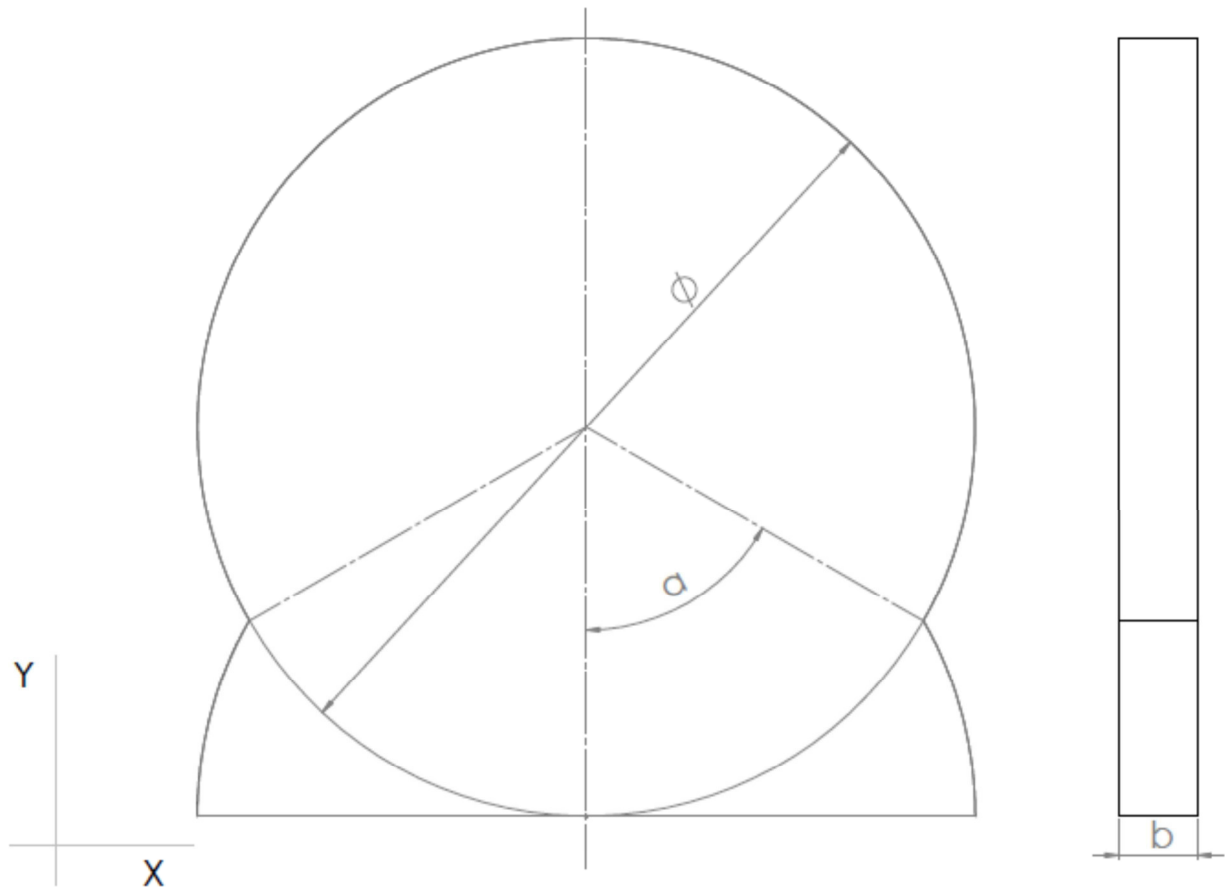


Figur 65. Konturen og blokkene valgt for integralet.

- Krefter pr. m²
 - X-retning ($F_{X_{NdFeB_Halbach}}$): 2,9 kN
 - Y-retning ($F_{Y_{NdFeB_Halbach}}$): 480 kN

7.1.1 Krevd areal for løft

Arealitet avhenger av vinkelen α . Jo mindre vinkel jo større må arealet bli for å skape nok løft. $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. Arealet bestemmes av møllens diameter \emptyset og bredden på lageret b (fig. 66)



Figur 66. Parametere lagerberegning.

Forutsetning:

- Lageret skal kunne løfte hele møllen inkludert innhold.
- Ser bort i fra vekten av magneter og tilbehør til magnetene.

Formler:

Overflateareal der kreftene virker

$$A_{lk} = \frac{2 \times \alpha}{360} \times \pi \times \emptyset \times b$$

Det prosentvise gjennomsnittet av kraften som virker i y-retning mellom lagerbanene:

$$Pf = \frac{\sum_{i=0}^{\alpha} \cos i}{\alpha}$$

Kraften som virker i y-retning mellom lagerbanene:

$$F_{y_totallager} = F_{yNdFeB_Halbach} \times Pf \times A_{lk}$$

Tyngdekraften som virker på møllen:

$$F_{y_totalmølle} = M_{totalmølle} \times g$$

Parametere:

- | | |
|---|----------------------|
| • Diameter ytre del magneter montert på mølleskall (\emptyset): | 9,8 m |
| • Vinkel lager (a): | 60° |
| • Møllen og fyllmassens totale vekt ($M_{total_mølle}$): | 1014 tonn |
| • Krefter pr. m ² magneter ($F_{yNdFeB_Halbach}$): | 480 kN |
| • Gravitasjonskraften (g) | 9,81m/s ² |

Utrekning:

Kraften som virker i y-retning skal være stor nok til å holde konstruksjonen i luften, uten noen annen form for støtte i y-retning. Da vil kraften som virker i y-retning måtte være like stor som den totale tyngdekraften på møllen.

$$F_{y_totallager} = F_{y_totalmølle}$$

Vinkelen (a) er satt til 60° ved skjønn. Det optimale ville være å sette opp likninger og finne en verdi der mengden magneter var minimert mens løftet var maksimert. Dette er ikke gjort etter en vurdering av omfanget og prioritering. Eneste variabel som ikke er bestemt er da bredden.

$$F_{y_{totalmølle}} = F_{y_{NdFeB_Halbach}} \times Pf \times A_{lk}$$

$$F_{y_{totalmølle}} = F_{y_{NdFeB_Halbach}} \times \frac{\sum_{i=0}^{\alpha} \cos i}{\alpha} \times \frac{2 \times \alpha}{360} \times \pi \times \emptyset \times b$$

$$b = \frac{F_{y_{totalmølle}}}{F_{y_{NdFeB_Halbach}} \times \frac{\sum_{i=0}^{\alpha} \cos i}{\alpha} \times \frac{2 \times \alpha}{360} \times \pi \times \emptyset}$$

$$b = \frac{1014 \times 10^3 \text{ kg} \times 9,81 \text{ ms}^{-2}}{480 \times 10^3 \text{ N} \times \frac{\sum_{i=0}^{60} \cos i}{60} \times \frac{2 \times 60}{360} \times \pi \times 9,8 \text{ m}}$$

$$b = \frac{9947340 \text{ N}}{480 \times 10^3 \text{ Nm}^{-1} \times 0,82 \times \frac{1}{3} \times \pi \times 9,8 \text{ m}}$$

$$b = \frac{9947340 \text{ N}}{4039334,2 \text{ N}}$$

$$\underline{b = 2,46}$$

Lagerets bredde vil totalt måtte være 2,46 meter. Det betyr at det kreves seks segmenter med 400mm bredde.

7.1.2 Vekten av magneter på skaldelen av lageret

Formel:

$$M = \frac{\pi D^2 \times \pi D_i^2}{4} \times b \times \rho$$

Parametere:

- Ytre diameter (D): 9,8m
- Indre diameter (D_i): 9,6m
- Tetthet NdFeB (ρ_{NdFeB}): 7500kg/m³ (Wikipedia 2011c)
- Bredde (b): 2,46 m

Utrekning:

$$M_{NdFeB} = \frac{\pi \times 9,8^2 - \pi \times 9,6^2}{4} \times 2,46 \text{ m} \times 7500 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{NdFeB} = 56224 \text{ kg}$$

Vurdering:

Massen av magnetene som sitter på mølleskallet er rundt 5% av den totale massen til møllen inkludert fyllmasser. Ettersom målet er at magnetene skal fjerne en stor del av løftet fra det

sekundære lageret, er det OK at denne økte vekten på 5% ikke er tatt med i dimensjoneringen av løftarealet for magnetene. Det vil ha liten hensikt i forhold til kostnadsvurdering av konseptet. Det er mulig at videre optimalisering av møllekonstruksjonen, ettersom magnetlageret har en større fordeling av løft på skallet, også ville gi en reduksjon i forbrukt stål i konstruksjonen. Velger derfor å ikke optimalisere magnetenes løfteflate ytterligere.

8 Strukturoptimering

8.1 Strukturoptimering Fundamentstol

Fundamentstolen vil utsettes for ett varierende trykk. Lastvariasjonene vil ikke være spesielt store. Fundamentstolen må være stiv for å unngå deformasjon.

8.1.1 Mål med strukturoptimaliseringen

En konstruksjon og profil som har følgende egenskaper

- Maksimal deformasjon: 0,2mm
- Maksimale spenninger platedeler: 90Mpa
- Maksimale spenninger sveis/skjøt: 50MPa
- Trykk i trykksonen: 0,48Mpa
- Minimalt materialforbruk

8.1.2 Elementer

Elementene som er brukt har betegnelsen "Tetrahedrons" i Ansys 13.0 Workbench.

8.1.3 Materiale

Materialet brukt i analysen har følgende lineærelastiske egenskaper:

Stål:

E-modul:

Poissons nummer:

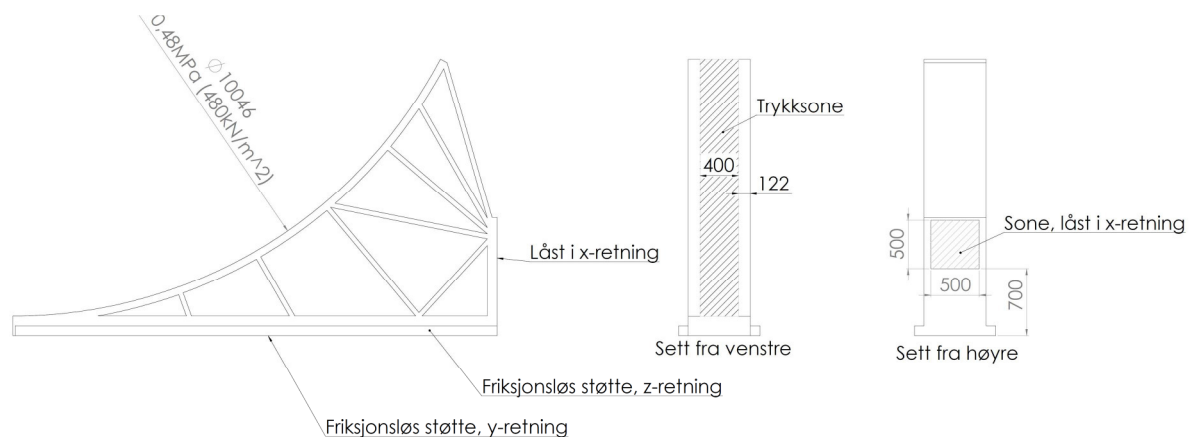
Tetthet:

$E = 210 \text{ Gpa}$

$\nu = 0,3$

7800 kg/m^3

8.1.4 Opplagring og laster



Figur 67. Fundamentstol, oppsett opplagring og laster.

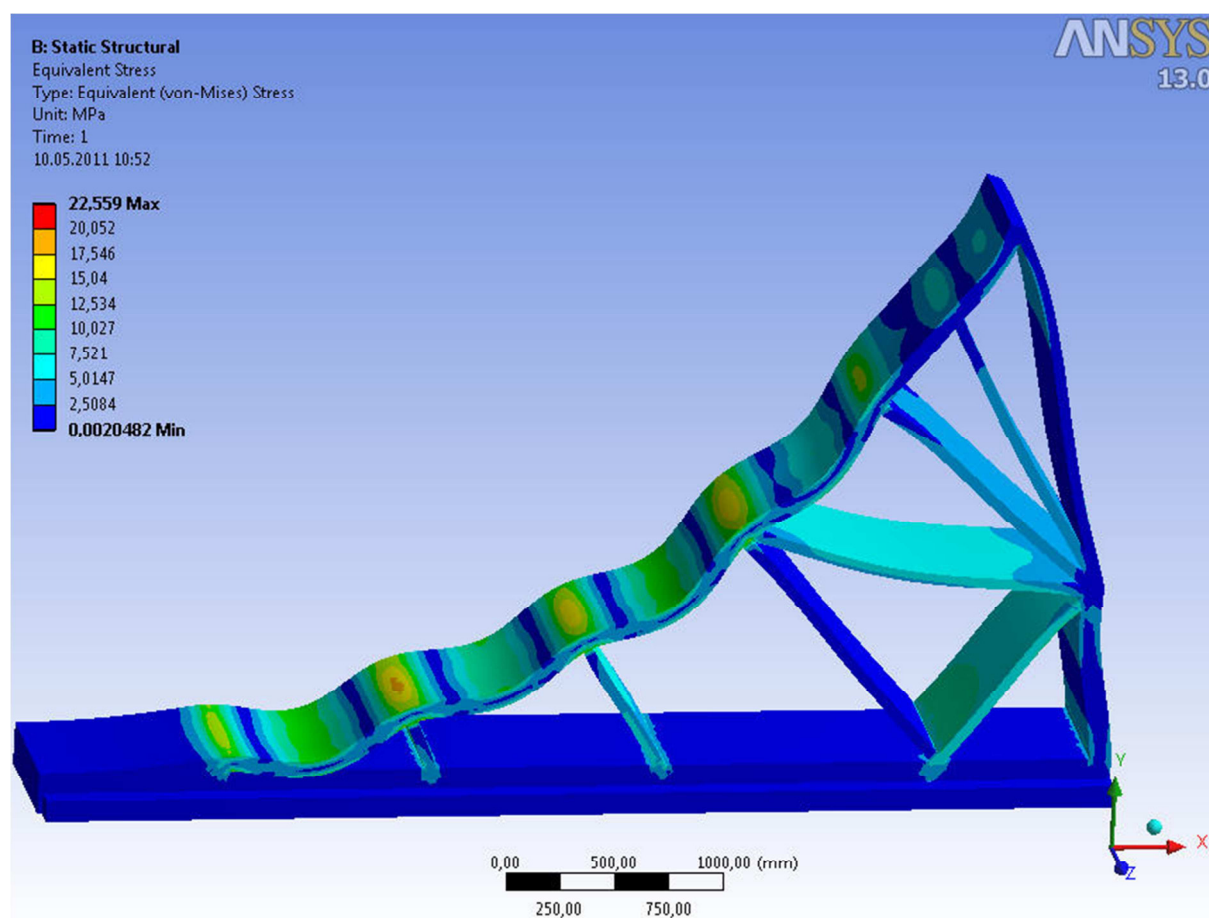
8.1.5 Resultat strukturoptimering

Ved endring av elementstørrelsene skjedde det ingen større (5%) endringer i maksimal deformasjon. Mener derfor FEM-analysen gir ett riktig bilde av den deformasjonen man vil oppleve i virkeligheten. Ettersom deformasjonen var en begrensning har spenningene i dette tilfellet ikke vært noen utfordring. Hoppet i spenninger som skjedde ved å gå fra elementer på 75mm til 50mm skjedde i kantene på sonen for den låste opplagringen i x-retning. Ettersom det ikke har vært store spenninger har jeg latt modellen være kantete slik at programvaren skulle jobbe raskere.

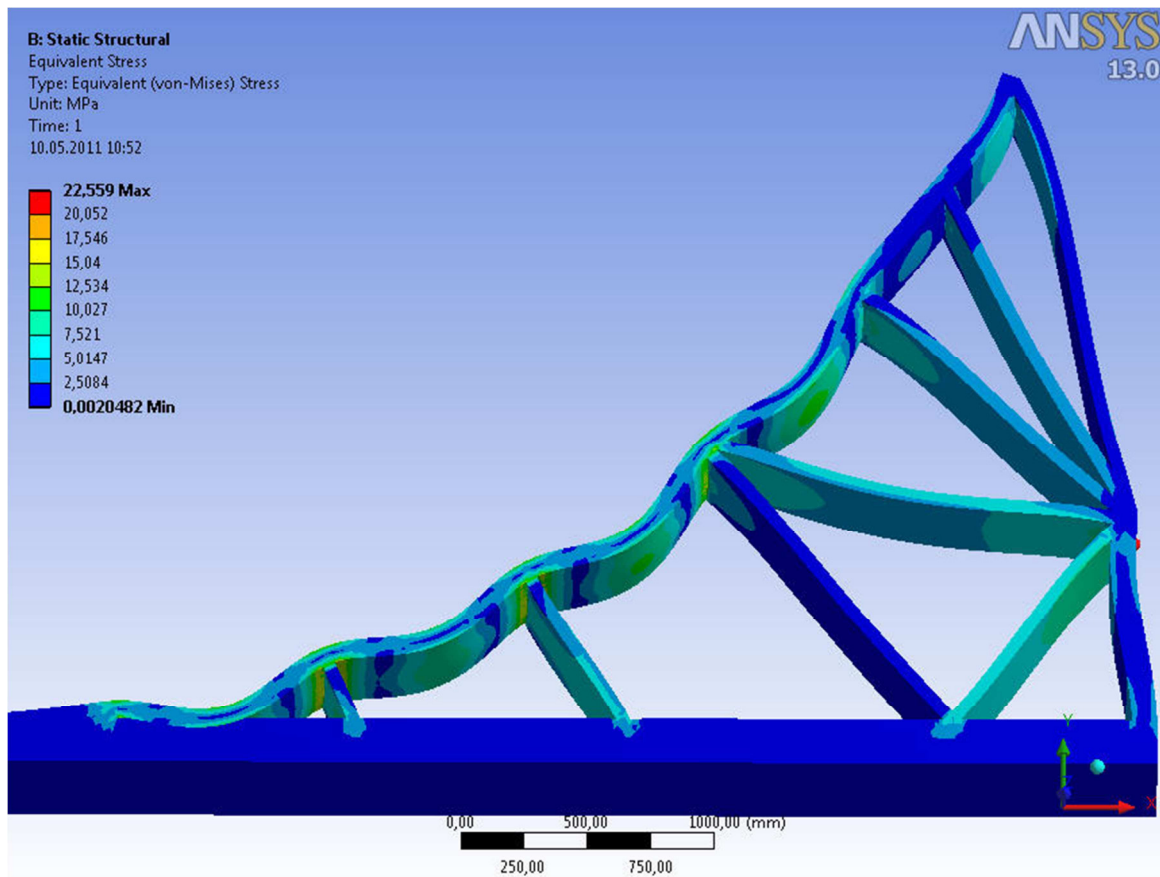
Tabell 11. Fundamentstol, spenninger og deformasjon FEM analyse.

FEM analyse				
Elementstørrelse (mm)	Antall noder	Antall elementer	Maksimal spenning, VonMises	Maksimal deformasjon
100	12710	6042	14,5MPa	0,129 mm
75	20318	10055	15,1MPa	0,131 mm
50	45483	24087	21,3MPa	0,134 mm
25	189304	106244	22,6Mpa	0,136 mm

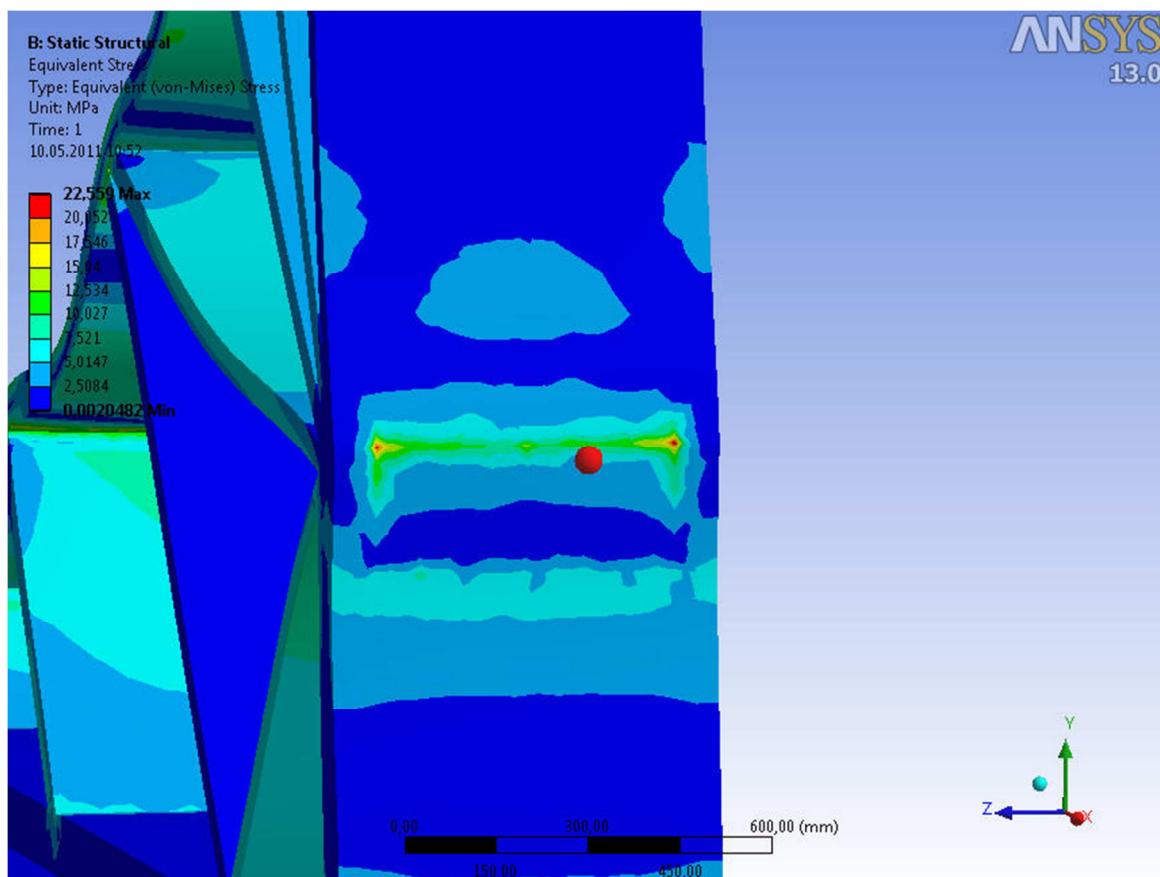
Tabell 12. Spenninger i funamentstol, sett fra siden.



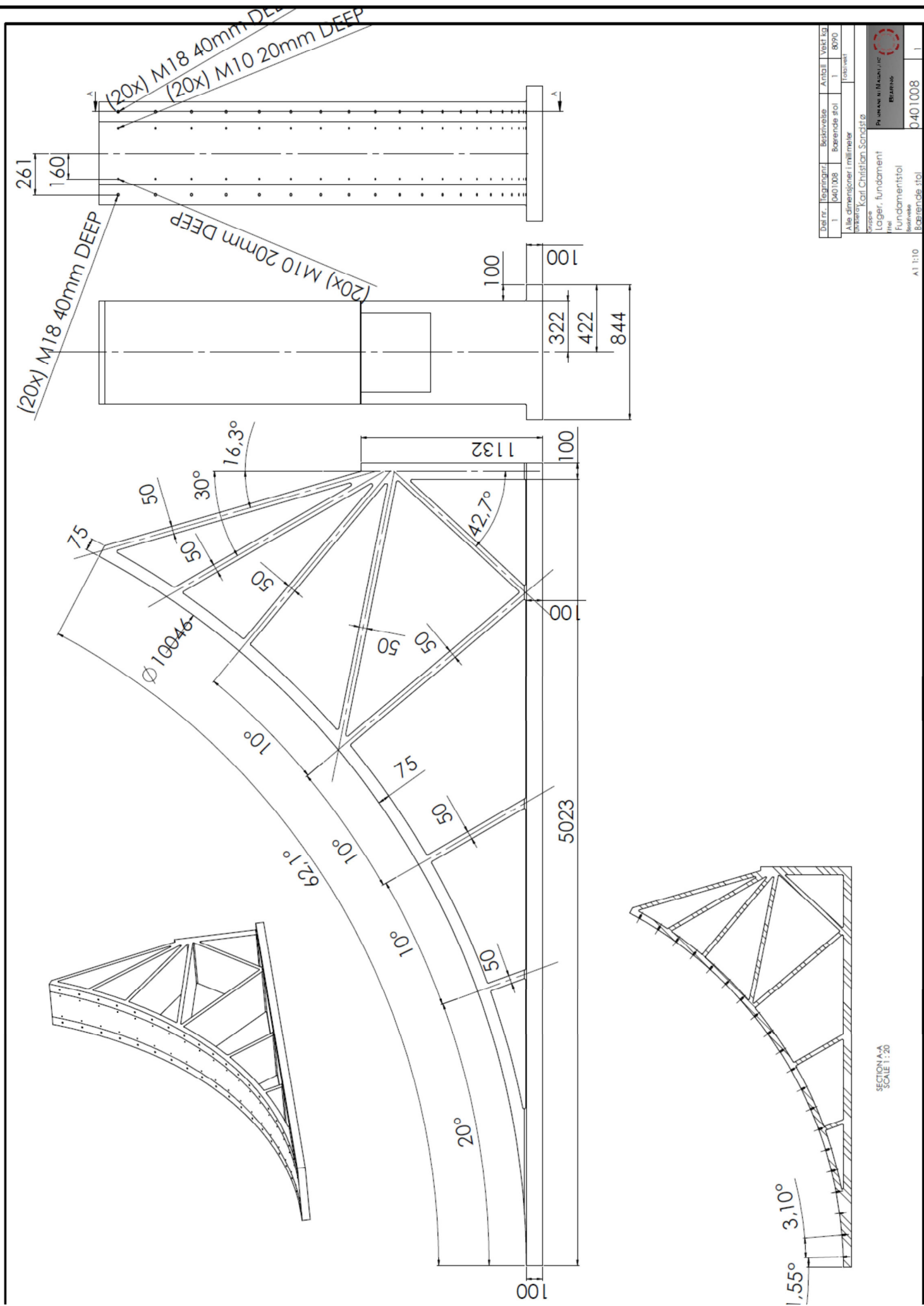
Figur 68. Spenninger i fundamentstol, sett fra siden.



Figur 69. Spenninger i dundamentstol, sett fra siden.



Figur 70. Spenninger i fundamentstol, spenninger ved sonen for låsing i x-retning.



Figur 71 Konstruksjonstegninger fundamentstol

9 Fremstilling og produksjonskostnader

9.1 Fremstilling og produksjonskostnader

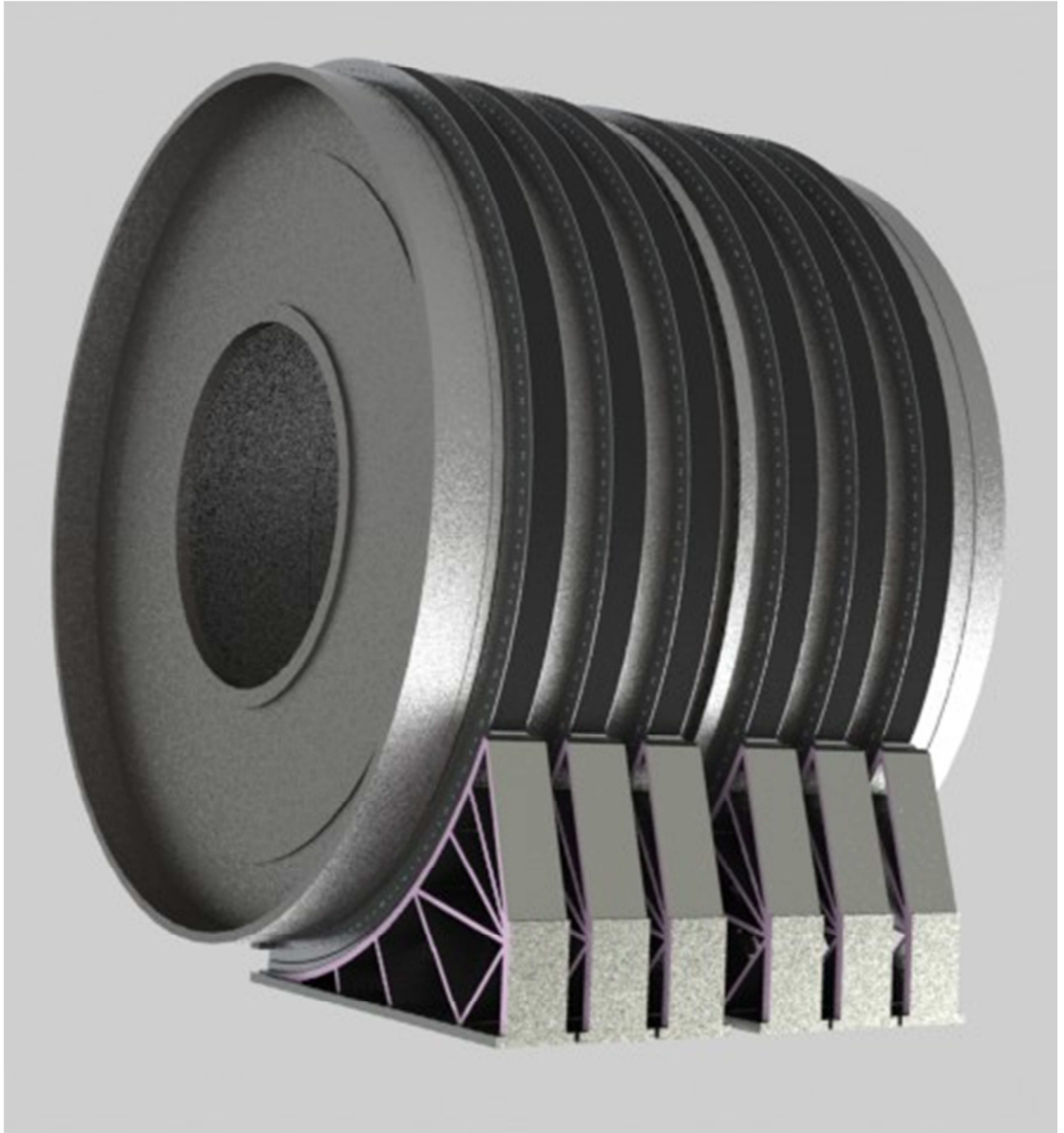
Noen priser er hentet fra utenlandske produsenter. 1 USD = 5,50kr, 1GBP = 9kr (Finn.no 2011). Prisen for magnetene er basert på historisk utvikling. Prisen er satt til US\$12 per kg. For fundament og magneter er det ikke tatt hensyn til bearbeiding og monteringskostnader. 0401002 må produseres i to deler og krever derfor to ekstruderingsformer. Kostnaden for et sett med seks lagre er 6 007 520 NOK (Tabell 13).

Tabell 13. Fremstillingskostnader

Komponent	Kvanta	Pris per enhet	Sum NOK
Skall			
8.8 M10x25 Bolt	2784 stk.	1,80kr	5011
8.8 M10 Skiver	2784 stk.	0,50kr	1378
8.8 M18x50 Bolt	2088 stk.	9kr	18 792
8.8 M18 Skiver	2088 stk.	1,1kr	2297
0403003 Aluplate	696 stk. 4kg 2784kg	38kr/kg	105 792
0403001 Holder	1740stk. 1kg	32kr/kg	55680
0403001 Holder	Ekstruderingsform		11 000
0401002 Profil	348stk. 19140kg	29kr/kg	555 060
0401002 Profil	2x ekstruderingsform	75000kr stk.	150 000
0403005 Magnet hel	5220stk. 40544kg	66kr/kg	2 675 887
0403014 Magnet halv	3480stk. 13515kg	66kr/kg	891 962
Sum skall			4 472 859
Fundament			
8.8 M10x25 Bolt	480stk.	1,80kr	864
8.8 M10 Skive	480stk.	0,50kr	240
8.8 M18x50 Bolt	480stk.	9kr	4320
8.8 M18 Skive	480stk.	0,50kr	240
0402020 L-profil	24stk. 1488kg	Alu: 29kr/kg	59 280
0402020 L-profil	Ekstruderingsverktøy		11 000
0403007 Holder	600stk. 1kg	Alu: 32kr/kg	19 200
0403007 Holder	Ekstruderingsverktøy		11 000
0403017 Profil	120stk. 1320kg	Alu: 29kr/kg	38 280
0403017 Profil	Ekstruderingsverktøy		75 000
0403018 Magnet hel	1800stk. 13981kg	NdFeB: 66kr/kg	922 720
0403019 Magnet halv	1200stk. 4660kg	NdFeB: 66kr/kg	307 573
0401011 Fundament	8090kg	S235: 10,50kr/kg	84 945
Sum fundament			1 534 662
Sum totalt			6 007 520

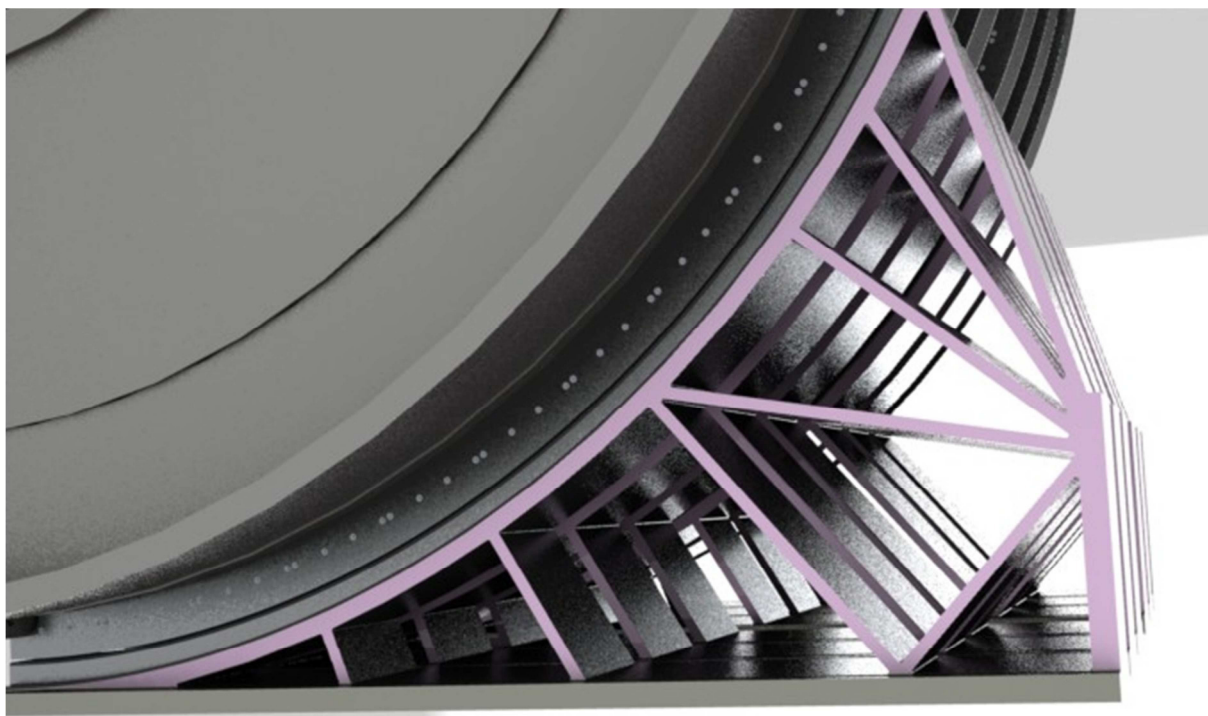
10 Formgivning og design

Ved å konstruere de forskjellige løsningene valgt i konseptualiseringsprosessen er følgende formgivning og design resultatet. Sammensetningen består av seks lagere plassert ved siden av hverandre. Mellom de to midterste lagrene er det plass til en tannring. På flensen i hver av endene til møllen kan man ha ett sekundærlager. Sekundærlager er ikke vist (fig. 72).

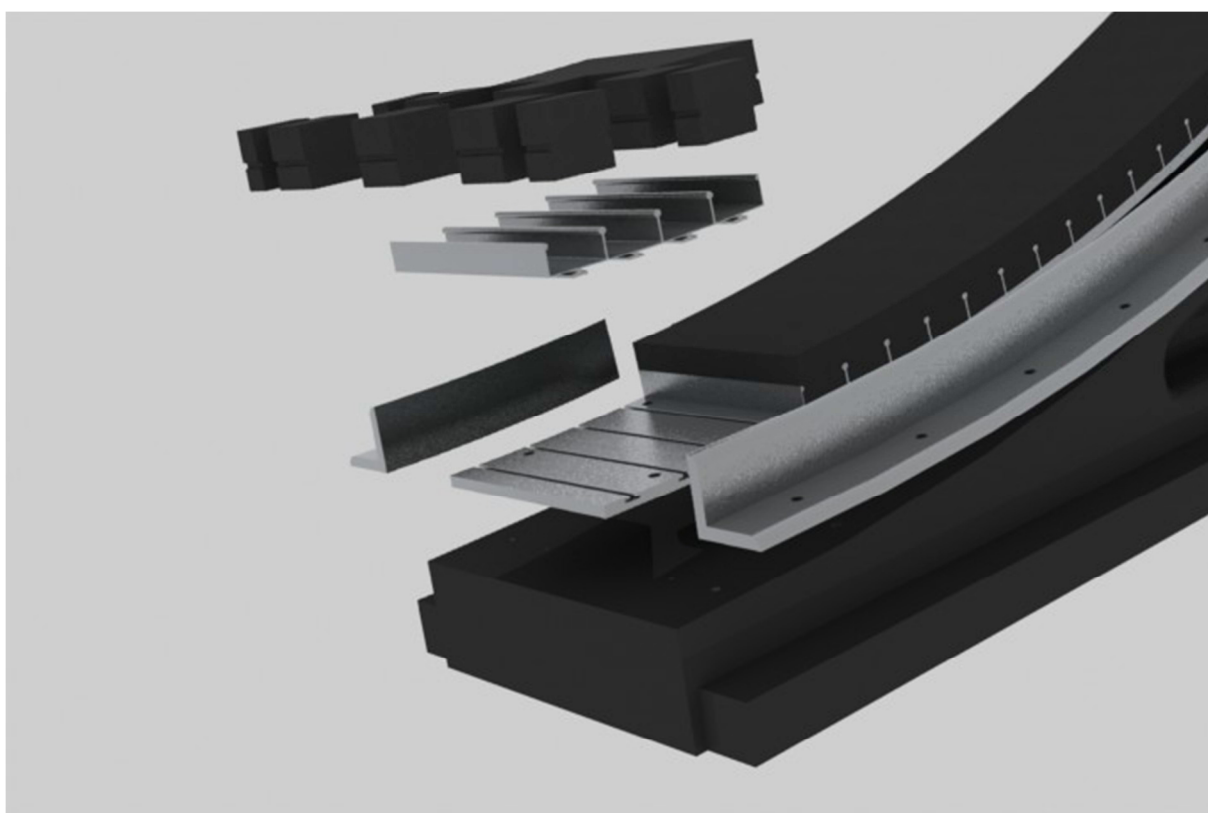


Figur 72. Sammensetning.

10.1 Fundamentdelen.

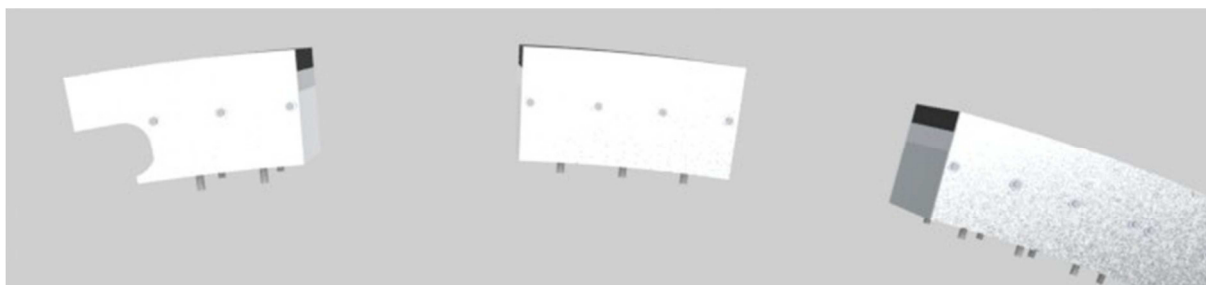


Figur 73. Helfigur fundament.



Figur 74. Fundamentdel, eksplodert.

10.2 Skalldelen av lageret.

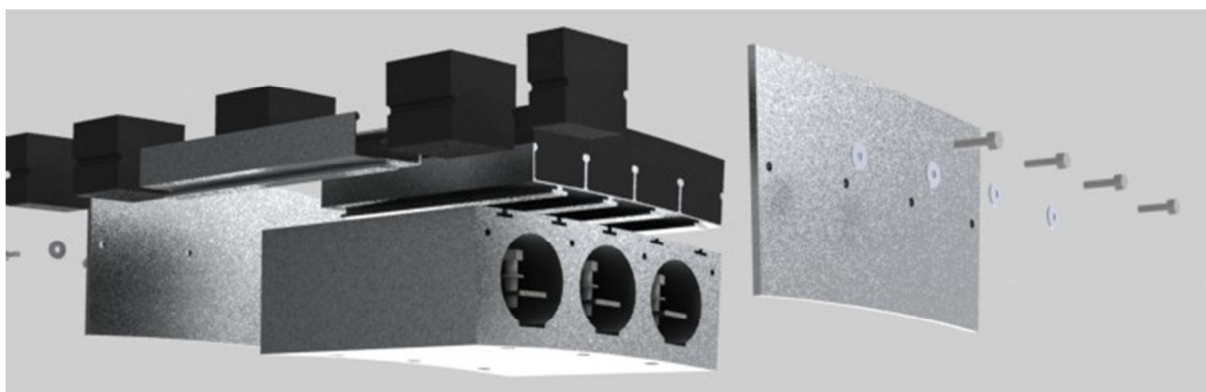


Figur 75. Sammensetning skalldel av lageret, eksplodert.

Mellomseksjon, monteres på mølleskall:

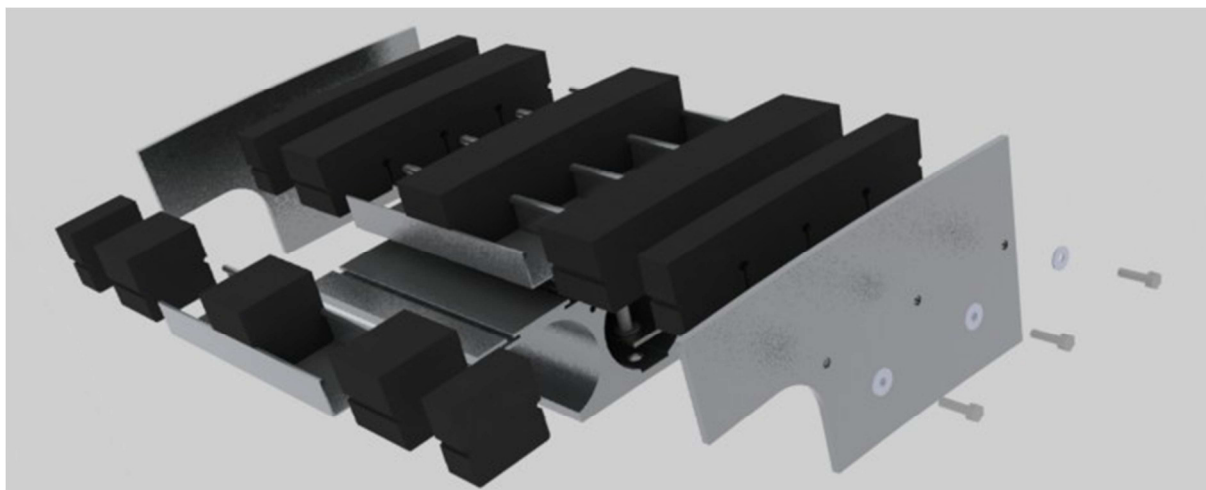


Figur 76. Mellomseksjon, sett fra siden overnifra.

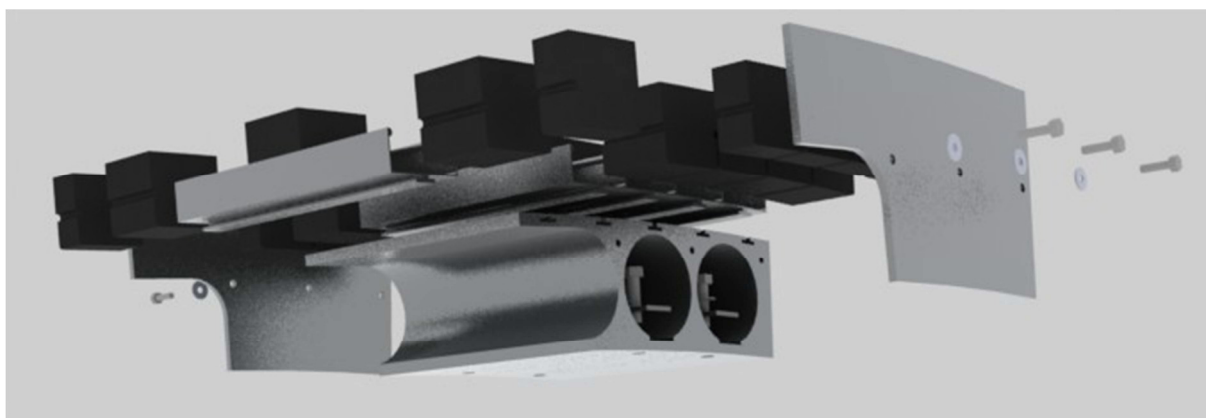


Figur 77. Mellomseksjon, sett fra siden underifra.

Skjøteseksjon, monteres på mølleskallet:



Figur 78. Skjøteseksjon, sett fra siden ovenifra.



Figur 79. Skjøteseksjon, sett fra undersiden.

11 Diskusjon og konklusjon

11.1 Forbedringspotensialer

Magnetene:

Magnetene kan optimaliseres ytterligere. Kostnadene vil da reduseres. Man vil både kunne optimalisere avstanden mellom magnetarrangementene som frastøter hverandre og selve magnetenes utforming og størrelse.

Konstruksjonsløsningen:

Lageret er tilpasset en allerede eksisterende mølle. Møllen hadde en flens som lageret måtte tilpasses. Dersom møllen var konstruert for magnetlager kunne man unngå denne flensen og igjen unngå unødvendig bruk av aluminiumsprofiler. Aluminiumsprofilen ble brukt for å øke magnetlagerets diameter slik at det kom på utsiden av flensen.

Fundamentstolen holdes fast i bakken ved skinner plassert på hver side. Disse er plasskrevende. Det burde være mulig å utvikle en løsning der fundamentstolen slik at disse kan stå tettere sammen samtidig som de er enkle å vedlikeholde.

Ved å tilpasse møllekonstruksjonen for magnetlager og utnytte de styrkemessige fordelene magnetlageret gir, vil man kunne få besparelser i materialbruken i forhold til dagens konstruksjoner. Tynnere materialer kan være enklere å bearbeide under bygging av mølle.

11.2 Konklusjon

I oppgaven er det kartlagt og redegjort for flere mulige opplagringsteknologier som kan være aktuelle for opplagring av møller til bruk i bergverksindustrien. Opplagringsteknologiene er sammenlignet og vurdert gjennom konseptualisering av de forskjellige alternativene. Permanentmagnetisk opplagring ble vurdert som det fremste alternativet. Det ble så utviklet en lagerløsning ved bruk av permanentmagneter. I konseptualiseringsprosessen for permanentmagnetlageret ble det fokusert på robusthet og enkel montasje. Skisser av konsepter ble brukt for å vise alternative konstruksjonsmetoder. Gjennom en konseptutvelgelse ble konstruksjonsmetodene vurdert. Den konstruksjonsmetoden med best vurdering ble så modellert. En FEM analyse ble gjort på en del av konstruksjonen. Lageret ble så presentert ved renderte modeller.

Anbefalinger

- **Effektivitet**
 - Permanentmagnetlager er et tilnærmet friksjonsløst lager. Under kontinuerlig drift vil den valgte typen permanentmagnetlager ha et neglisjerbart friksjonstap sammenliknet med andre typer lagre. Dette vil over tid gi et konkurransefortrinn i form av lavere energikostnader under driften av møllen.
- **Driftsikkerhet:**
 - Permanentmagneter gir en driftsikker løsning. Magnetene har lang levetid. Det er mulig med resirkulering av magnetene og det er for øvrig en miljøvennlig løsning. Ettersom det er berøringsfritt blir det så å si ingen slitasje så lenge fremmede elementer forhindres fra å trenge inn i magnetfeltet mellom trommel og fundament. Dette kan være en utfordring å forhindre. Vedlikeholdskostnadene antas å være lave i forhold til andre lagertyper.

11.3 Videre arbeid

- Magnetenes løftekapasitet bør optimaliseres i forhold til magnetenes masse.
- Festeordning for fundamentstolen bør videreutvikles slik at de kan monteres nærmere hverandre.
- Kontrollere hva som skjer dersom møllen kommer ut av posisjon. Vil magnetlageret øke dislokasjonen gjennom at kreftene virker i feil retninger.
- Det bør bygges en modell av en komplett mølle med permanentmagnetlager for å teste løfteevne og stabilitet

12 Kilder

12.1 Skriftlige kilder

- Bøe, J. K. (2008). *Produktutvikling og produktdesign - Fra ergonomi og regelverk til design og prototypebygging*: Institutt for matematiske realfag og teknologi.
- Chiba, A., Fukao, T., Ichikawa, O., Oshima, M., Takemoto, M. & Dorrell, D. G. (2005). *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*: Newnes.
- Dahlstrom, D. A. (1986). Impact of changing energy economics on mineral processing. *Mining Engng.*, 38 (45).
- Fuller, D. D. (1984). *Theory and Practice of Lubrication for Engineers*.
- Schweitzer, G. & Maslen, E. H. (2009). *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*: Springer.
- Wills, B. A., Napier-Munn, T. & Centre, J. K. M. R. (2006). *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*: Elsevier/BH.
- Ericsson, R. (1999). *Geita Sag Mill, Stress Analysis*: Nordberg. Upublisert manuskript.
- M. Kciuk, R. T. (2006). Properties and application of magnetorheological fluids. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18 (1-2): 127-130.
- Napier-Munn, T. J. (1996). *Mineral Comminution Circuits, Their Operation and Optimisation*: JKMRRC.
- Siebert, M. E., Ben; Jansen, Ralph; Fusaro, Robert L.; Morales, Wilfredo; Kascak, Albert ; Kenny, Andrew. (2002). *A passive Magnetic Bearing Flywheel*. 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Savannah, Georgia, July 29-August 2, 2001., s. 15: NASA.
- Thomas, C. E. (2009). *Introduction to Process Technology*: Delmar Cengage Learning.
- Sun, G. (2008). *Auxiliary Bearing Design Guides in Active Magnetic Bearing System*: VDM Verlag.
- Szeri, A. Z. (2010). Composite-film hydrodynamic bearings. *International Journal of Engineering Science*, 48 (11): 1622-1632.
- Outotec. (2010). *Hydrostatic Trunnion Bearing*.

12.2 Internettkilder

- DoveMining. *Tappopplagret mølle*. Tilgjengelig fra:
http://www.dovemining.com/upload/image/product/ball%20mill/ballmill_f04.jpg (lest 16.02).
- easybizvietnam. *Kulelager*. Tilgjengelig fra:
http://www.easybizvietnam.com/picture/product/200803/2008312_105522_Self-aligning%20Ball%20Bearings.jpg (lest 17.02).
- Finn.no. (2011). *Valutakalkulator med dagens valutakurs*: Finn.no. Tilgjengelig fra:
<http://www.finn.no/finn/travel/info/currency> (lest 15.05).
- FLsmidth. *FEM analyse opplagret i tapp*. Tilgjengelig fra:
http://www.flsmidth.com/~media/PDF%20Files/Grinding/Grinding_Mills08.ashx.
- Genta, G. (2005). *Dynamics of rotating systems*: Springer.
- Grindingmill. (2010). *Grinding Mill*. Tilgjengelig fra:
<http://www.grindingmill.info/index.html> (lest 09.05).

- Heller, A. (2003). *Maglev on the Development Track for Urban Transportation: Science & Technology*. Tilgjengelig fra: <https://www.llnl.gov/str/November03/Post.html> (lest 13.04).
- Helmenstine, A. M. (2011). *How to make liquid magnet*. Tilgjengelig fra: <http://chemistry.about.com/od/demonstrationexperiments/ss/liquidmagnet.htm> (lest 14.03).
- Joseph. (2009). Separation of flowing fluids. I: *Nature* 348, s. 487.
- KHD. *Skallopplagret mølle*. Tilgjengelig fra: <http://www.khd.com/tube-mills.html> (lest 16.02).
- Kingsnorth, D. J. (2007). "Minor Metals and Rare Earths 2007" Rare Earths: An Industry at the Crossroads. Tilgjengelig fra: www.arafuraresources.com.au/.../DJK-REsAnIndustryattheCrossroadsR5.pdf (lest 23.04.2011).
- Luo, Y. (2007). Current Status and Future Development of the Magnetic Materials Industry in China. 42.
- Malewicki, D. J. (2003). *Inductrack Passive Magnetic Levitation: AeroVisions*. Tilgjengelig fra: <http://www.skytran.net/press/sciam02.htm> (lest 01.04).
- Marinescu, M. G., Alexander Hadjipanayis & C., G. (2007). Rare-earth Nanocrystalline and Nanostructured Magnets. 30.
- MetroWest. (2008). *Maglev Trains*. Tilgjengelig fra: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=908512&page=5> (lest 13.04).
- Metso. (2010). *VertiMill*. Tilgjengelig fra: [http://metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/F58680427E2A748F852576C4005210AC/\\$File/Stirred-Milling-2010-Final-LowRes.pdf](http://metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/F58680427E2A748F852576C4005210AC/$File/Stirred-Milling-2010-Final-LowRes.pdf) (lest 10.05).
- METSO. (2011). *ROD MILLS*. Tilgjengelig fra: [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/38EE207BADF4A973C1256C5A002DB313/\\$File/Rod%20Mill%20EN.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/38EE207BADF4A973C1256C5A002DB313/$File/Rod%20Mill%20EN.pdf) (lest 20.02).
- PMCServi. (2011a). *DEVA produkter*. Tilgjengelig fra: http://www.pmcservi.no/.Dokumenter/DEVA_Product_Range.pdf (lest 18.02).
- PMCServi. (2011b). *Glidelager kompositt*. Tilgjengelig fra: <http://www.pmckatalogen.no/view.aspx?ProductId=650020-1-1&menyCategory=1,5> (lest 18.02).
- PMCServi. (2011c). *Glidelager metall*. Tilgjengelig fra: [http://www.pmckatalogen.no/preview.aspx?Category=\\$GlideDeva.glide&menyCategory=1,5](http://www.pmckatalogen.no/preview.aspx?Category=$GlideDeva.glide&menyCategory=1,5).
- Post, R. F. (2005). The Inductrack Maglev System. Tilgjengelig fra: http://www.inovexadvancedsolutions.ltd.uk/PATIPub/Shared%20Documents/09_Post_10_11_trans.pdf (lest 13.04.2011).
- Rodewald, W. (2007). Rare-earth Transition-metal Magnets. 36.
- SKF. (2011). *SKF 3811mm Lager*. Tilgjengelig fra: <http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?action=PPP&lang=en&imperial=false&windowName=null&perfid=134230&prodid=134230004> (lest 16.02).
- SportCompactCar. (2011). *Suspension shock diagram*. Tilgjengelig fra: http://www.modified.com/tech/0607_sccp_making_it_stick_part_6/photo_06.html (lest 14.03).
- Trueknowledge. (2011). *Halbach cylinder*. Tilgjengelig fra: http://www.trueknowledge.com/q/facts_about_halbach_cylinder (lest 10.03).
- Wikipedia. (2009). *InfiniteHalbachArray.JPG*. Tilgjengelig fra: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:InfiniteHalbachArray.JPG> (lest 10.03).
- Wikipedia. (2011a). *Maglev (Transport)*. Tilgjengelig fra: [http://en.wikipedia.org/wiki/Maglev_\(transport\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Maglev_(transport)) (lest 01.04).

- Wikipedia. (2011b). *Magnetorheological fluid*. Tilgjengelig fra:
http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetorheological_fluid (lest 14.03).
- Wikipedia. (2011c). *Neodymium Magnet*. Tilgjengelig fra:
http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet (lest 05.05).
- Zenith. (2011). *MTM Medium Speed Trapezium Mills*. Tilgjengelig fra:
<http://www.zenithcrusher.com/info/pdf/Products/MTM-Medium-Speed-Trapezium-Mill/MTM-Medium-Speed-Trapezium-Mills.pdf> (lest 10.05).