

Hans Hanman Chan
Magnus Nørstenes
Steinar Ysland Jensen

Test-rigg for skader på lager med akustisk emisjon (AE)

Bacheloroppgave i Konstruksjonsteknikk, maskin
Veileder: Nuria Espallargas
Medveileder: Haakon Tvedt
Juni 2022

Hans Hanman Chan
Magnus Nørstenes
Steinar Ysland Jensen

Test-rigg for skader på lager med akustisk emisjon (AE)

Bacheloroppgave i Konstruksjonsteknikk, maskin
Veileder: Nuria Espallargas
Medveileder: Haakon Tvedt
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon



Kunnskap for en bedre verden

RAPPORT BACHELOROPPGAVEN

Tittel (Både på norsk og engelsk kreves)

Test-rigg for skader på lager med akustisk emisjon (AE)

Test-Rig for Damage on Bearings with Acoustic Emission (AE)

Prosjektnummer

MTP-K-2022-16

Forfatter(e)

Hans Hanman Chan

Magnus Nørstenes

Steinar Ysland Jensen

Veileder(e) internt

Prof. Nuria Espallargas

Stipendiat Haakon Tvedt

Rapporten er ÅPEN

Dato levert

10.06.2022

Kort sammendrag (Både på norsk og engelsk kreves)

Det har blitt ferdig laget et design av en lab-skala rigg for destruktivtesting av hjullagere med AE sensorer. Denne oppgaven omhandler informasjonshenting for teori innsamling som skal brukes på riggen, og for flere design avgjørelser som har blitt gjort. Riggen kunne ikke bli produsert før endt prosjekt, men videre arbeid er satt for fremtiden.

It has been finished a design of lab-scale rig for destructive testing of bearings with AE sensors. The thesis takes deals with theory collection to be used on the rig, and for several design decisions that have been made. The rig could not be produced before the end of the project, but further work has been set for future.

Stikkord:

Kulelager

Akustisk emisjon

Destruktivtesting

Maskinkonstruksjon

Keywords:

Ball Bearings

Acoustic Emission

Destructive testing

Machine construction

FORORD

Dette prosjektet er en bacheloroppgave ved Institutt for maskinteknikk og produksjon (MTP) ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven var utført fra 10.januar 2022 til 10.juni 2022

Oppgaven var gitt internt i NTNU av vår veileder, Professor Nuria Espallargas Alvarez, og utføres sammen med med-veileder, Stipendiat Haakon Tvedt.

Rapporten dekker akustisk emisjon, konseptutvikling, maskindeler, maskinproduksjon, og destruktiv-testing.

Denne oppgaven har gitt prosjektgruppen utfordringer, men samtidig også gitt oss muligheten til å lære mye. I løpet av dette semesteret har vi lært å fordele arbeidsoppgaver, finner stadig nye forbedringer på design og konsepter, samt skriving og strukturering av rapporten. Vi håper det vi har lært på NTNU våren 2022, kommer til stor nytte i møte med arbeidslivet.

Vi ønsker derfor masse takk til,

Nuria Espallargas Alvarez, Professor ved institutt for maskinteknikk og produksjon (MTP) NTNU. For hennes hjelp til organisering, og for muligheten til å skrive denne oppgaven.

Haakon Tvedt, Stipendiat ved institutt for maskinteknikk og produksjon (MTP). For hans kontinuerlige hjelp med design og utvikling, oppgavestrukturering, og tilgang til material.

Børge Holen, Avdelingsingeniør. For hans innspill for å lage et konsept som kan produseres.

Szymon Bernat, Forsker ved avdeling for materialer og nanoteknologi, SINTEF industry. For å ha delt sine høyst relevante erfaringer med oss. Vi har bygget mye av vår egen inspirasjon på hans tidligere arbeid, noe som vi er svært takknemlige for, og en inspirasjon til oppsettet av systemet.

SAMMENDRAG

Det ble laget en lab-skala rigg for destruktiv testing av rullelager, med akustisk emisjonssensorer for maskinlæring.

Oppgaven omfatter lagning av flere konsepter, som ledet til et endelig design. Det endelige designet skulle til slutt produseres og monteres til en SEW DC-motor. Veien frem til det endelige designet, var å hente inn informasjon rundt sensorene for akustisk emisjon og last sensor, toleranser, pasninger, kraft- og spennings distribusjon. Dette ble brukt til å gjøre ulike valg på forskjellige deler av systemet.

Det har blitt gjort egne utregninger på pasningsforbindelser og toleranser, og egne valg av dimensjoner, deler og komponenter til riggen. Valgene har blitt tatt fra anbefalinger og det som passer til verktøyene tilgjengelig for montering.

Produksjonen ble til slutt ikke produsert ferdig før semester slutt. Det ble istedenfor laget 3d-print av produktet som det foreløpige endelige resultatet.

ABSTRACT

A lab-scale rig was made for destructive testing of roller bearings, with acoustic emission sensors for machine learning.

The thesis includes the creation of several concepts, which led to a final design. The final design will then finally be produced and mounted to a SEW DC motor. The path to the final design, was through gathering of information about the sensors for acoustic emission and load sensor, tolerances, fits, load and stress distribution. This was used to make different choices on different parts of the system.

Separate calculations have been made on fit-connections and tolerances, and separate selections of dimensions, parts and components for the rig. The choices have been made from recommendations and what suits the tools available for assembly.

In the end, the production was not finished until the end of the semester. Instead, a 3D print of the product was made as the result.

Innholdsfortegnelse

FORORD.....	i
SAMMENDRAG	iii
ABSTRACT	v
1 Innledning.....	1
Problemstilling	1
1.1 Effektmål	2
1.2 Penger, midler og tid.	2
2 Teori	3
2.1 Sensorer.....	3
2.1.1 Akustisk emisjon.....	3
2.1.2 Lastsensor.....	6
2.2 Lager.....	8
2.2.1 Lager	8
2.2.2 Levetid til et lager.....	13
2.2.3 Alternativ for lagermontering	14
2.3 Slitasjer og utmattelse.....	15
2.3.1 Utmattelse.....	15
2.3.2 Slitasjer	17
2.3.2.4 Creep.....	21
2.3.2.5 Tribokjemisk slitasje	22
2.3.2.5.1 Galvanisk korrosjon	22
2.4 Smøring	23
2.4.1 Smøring	23
2.4.2 Smøremiddelforurensing.....	27
2.5 Toleranser.	28
2.5.1 Pasninger og toleranseverdier	30
2.5.2 Beregning av for lageret.....	32
2.5.3 Beregning av krympepasning.....	35
2.6 Produksjon.....	39
2.6.1 Deformasjon	40
2.6.1.1 Temperatur.....	42
2.6.2 Materiale.....	43
2.6.3 CNC maskin	45
2.6.3.1 CNCs begrensninger.....	47

3	Metode.....	48
3.1	Datafangst og informasjonskilder.....	48
3.2	Begrensninger og rammer	48
3.2.1	Brukerkravspesifikasjoner.....	49
3.2.2	Produktkravspesifikasjoner	50
3.3	Planlagt produksjon.....	53
3.5	Utførelser.....	54
3.5.1	Bruk av pakninger/forseglinger	54
3.5.2	Utførelse av krympepasning for Sleeveen.	58
3.6	Kraftpåføring	59
3.6.1	Den endelige normallasten - skrueløsningen.	62
3.6.2	Skruen i forhold til last sensor.....	63
3.7	Design av konsepter	64
3.7.1	Konseptutvikling.....	64
3.7.2	Konseptene.....	65
3.7.3	Motorstativ	71
3.8	Drift.	72
3.8.1	Sammensetnings prosedyre.	72
3.8.2	Sikker oppstart.....	74
3.8.3	Vedlikehold	74
4	Resultater.....	75
4.1	Designet	75
4.1.1	Hovedhuset	76
4.1.2	Sleeven	79
4.1.3	Lagerfestet og sensorhusene	80
4.1.4	Lokket	83
4.1.5	Lager.....	85
4.2	Suksessfaktorer	86
5	Diskusjon.....	87
5.1	Prosessen	87
5.2	Tidsforbruk	88
5.3	Fallgruver.....	89
5.4	Vurderinger.....	90
5.4.1	Vurdering av kileforbindelse.	90
5.4.2	Vurdering av klaringspasning til lagerfestet.....	90

5.4.3	Smøring for lageret.....	91
6	Konklusjon og videre arbeid	92
	Vedlegg	93
6.1	Vedlegg A.....	93
7	Referanser.....	94

1 Innledning

Dette kapitlet dekker vår definerte problemstilling for prosjektet, effektmålene for riggen, og litt om våre forventninger.

Problemstilling

For roterende deler i ulike maskiner, er det vanlig å bruke rullelagre (1). Et rullelager består av små kuler eller sylindere som med minimal friksjon stabiliserer og tar imot roterende bevegelser (2). I små og store maskiner er det ofte kritisk at lageret er i god stand for at maskinene skal fungere optimalt (3).

Konsekvenser av utslitt lager, er at det kan senke effektiviteten til maskiner betraktelig. Andre essensielle deler i maskinen kan også bli ødelagt som følge av skade eller slitasje på lager (3). Disse delene er heller ikke alltid lette å erstatte, avhengig av applikasjonen art. Dette kan lede til store konsekvenser og kostnader for brukeren av maskinen. Å vite tidlig når lageret burde byttes vil på flere måter være lønnsomt.

Vi ønsker derfor å utføre flere tester med akustisk emisjonssensorer (AE-sensorer), for tidlig gjenkjenning av når ulike lagere burde erstattes. Oppgaven blir gjort for å utføre destruktiv testing, og innsamling av data. Riggen skal være i stand til å utføre slitasje-eksperimenter på kulelager med AE. Data fra testingen vil bli brukt til maskinlæring for klassifisering av vanlige slitasjeformer og lagersvikt.

Dette prosjektet prøver å utfordre andre sine løsninger på destruktiv testing for innsamling av data med AE-sensorer. Målet er å komme med noen innovative smarte løsninger i designvalg, som er utenfor det som har blitt gjort før. Andre design har ofte brukt støttelager for ekstra stabilisering av lastbærende aksling (4), og noen har utelukket sirkulerende smøring. Vårt design er ment å gjøre det mer kompakt ved å droppe støttelager, samtidig som det bruker sirkulerende smøring på lageret.

1.1 Effektmål

Det langsiktige målet er vedvarende drift, og enkel sammensetning av riggen for å forebygge feilbruk. Bruk av systemet skal bringe inn data for maskinlæring, og vil virke som et utgangspunkt til hvordan videre forbedringer kan utføres.

Signalanalyse og eventuelle anvendelser av maskinlæring faller utenfor oppgavens hovedfokus, men er allikevel faktorer som kan påvirke designvalg. Et effektmål er å minimere antall komponenter som kan avgi AE signaler til sensorene.

1.2 Penger, midler og tid.

Det resulterende produktet skal klare å teste relativt små hjullager. Dette gjør det lettere å forholde seg til produksjon og sammensetting, som kommer av at delene til oppsettet vil være relativt liten i forhold til lageret.

Nåværende budsjett tillater noen feil avgjørelser på de mest kritiske og avanserte delene som lages. Målet er å bruke mest mulig billige og tilgjengelige ressurser, for å holde oss godt innenfor budsjettet. Dette skal påvirke valg under konsept, og produksjons perioden.

Et annet mål som har kommet underveis i produksjonsprosessen, er å ta mest mulig miljøbesparende valg. Ved å redusere sløsing av materiale og annet forbruk, vil miljøbesparelser komme som tillegg til økonomiske besparelser.

Produksjonen har blitt planlagt til en gang i sommerferien 2022, eller starten av høstsemesteret. Dette blir diskutert nærmere i diskusjonen.

2 Teori

Før designet kunne bli ferdigstilt, var det viktig å samle så mye teori rundt det ønskede oppsettet som mulig. Den innsamlede infoen ble videre sett over for å oppdage de ulike problemstillingene, og til å finne bedre designløsninger.

2.1 Sensorer

I systemet skal det integreres bruk av ulike sensorer for ulike formål. Dette vil da være AE sensorer, som skal brukes for datainnsamling, Og lastsensorer for måling av belastningskraft som skal påføres under et forsøk. Dette krever da kunnskap om deres funksjonalitet og begrensninger.

2.1.1 Akustisk emisjon

Akustisk emisjon (AE) er høyfrekvente elastiske spenningsbølger, som kan spre seg i materiale og fanges opp av AE-sensorer. AE-sensorer kan gjøre om bevegelser på nanometernivå om til elektriske signaler (5).

AE-sensorer brukes som for å sjekke endringer i helsetilstanden til et forsøkslager. Mottakeren kan normalt ta opp frekvenser i spenningsbølgene mellom 20kHz og 1MHz (5). AE er god på tidlig feildeteksjoner sammenlignet med andre metoder som vibrasjonsanalyse, og kan brukes over flere måneder hvis man ønsker å overvåke helsetilstanden over lengre tid. Signalene fra AE-sensorene kan sammen med maskinlæring gjenkjenne feil i hjullager i maskiner.

AE er en ikke-destruktiv testmetode, eller bedre kjent som “Non-Destructive Testing” (NDT) (6). Det vil si at metoden i seg selv ikke sender ut energi som påfører spenninger eller tøyninger på forsøkslageret. Måleelektronikken kalles da for en passivsensor, som brukes til å “lytte” etter de ultrasoniske, elastiske spenningsbølger som beveger seg i materialet (6). Disse er i form av lydbølger i materialet som ikke kan høres av mennesker på grunn av for høy frekvens, og kan for eksempel sammenlignes med små” jordskjelv” i metallens mikrostruktur (6). Disse omformes fra mekanisk til elektriske-signaler i sensoren, som plottes grafisk gjennom programvare.

Måten sensorene mottar signaler, er ved å plukke opp spenningsbølger som kommer fra deformasjoner i materialet. Deformasjonene kan ofte være startpunktet for sprekkdannelser eller andre utmattings slitasjer som reduserer lagerets levetid (7). AE-sensorer kan brukes på

ulike lagre inntil brudd, for å senere gjenkjenne frekvensene og gi tidlig forvarsel med maskinlæring.

Lasten lageret opplever under bruk, kan over tid virke utmattende og skape sprekkdannelser (8). Ved radiallasten vil det konsentreres et stresspunkt, som for den stasjonære ytre ringen vil være det området med størst slitasje. For en roterende indre-ring vil derimot slitasjen føres jevnt over hele flaten. Dette kan forårsake utmattelse og slitasjemerker mellom kulene og ringene (6).

2.1.1.1 Akustisk emisjon i forhold til vibrasjonsanalyse.

Vibrasjoner kan si mye om maskinens helsetilstand (8). Vibrasjoner kan komme som konsekvens av utslitte lager brukt i maskineri. Store vibrasjoner kan forårsake skader på andre viktige deler i det samme system. Tidlig oppdagelse av når lageret er slitt, kan derfor bidra til å unngå disse skadene.

Vibrasjonsanalyse sammen med maskinlæring har lenge vært en metode å samle inn data til tidlig feildeteksjon av lager (9). De kan sammen fortelle om alvorligheten til en defekt i lageret, men er avhengig av defekter på overflaten av materiale som øker vibrasjonsnivået. Skader som “sub-surface cracking” kan derfor ikke vibrasjonssensorene registrere (10).

Alternativt kan man detektere sub-surface cracking ved å bruke AE. Dette kan være en begynnende skade på et lager som ikke gir utslag til vibrasjoner, noe som VA er avhengig av. AE kan derimot registrere de elastiske spenningsbølgene som opptrer tidligere ved syklisk kraftpåføring rundt sprekken, og kan være så tidlig som 10 sekunder fra starten av et forsøk (11). Dette er en fordel for hurtige tester, og avlesning av tidlige endringer. VA derimot må brukes over lengre tid før man kan konkludere noe.

2.1.1.2 Kriterier for akustisk emisjon.

Det er noen kriterier man burde overholde når man bruker AE sensorer. Selve sensorene er mottakelige for signaler som reiser over lengre avstander i et system. Man burde av denne grunn vite hvilke signaler som kommer fra forsøkslageret, og hvilke som kommer fra resten av systemet (6). Dette kan gjøres ved å montere flere AE sensorer ved de andre lagrene i systemet, og senere eliminere disse fra analysen.

En bruker av AE sensorer burde ha god kompetanse innen måleteknikken. Det vil være mye støy i dataene, og man må være sikker på hva man ser etter for å innsamle relevant informasjon (12). Dette krever da kjennskap og riktig bruk av utstyr og programvare.

Man må være bevisst over at AE-sensorer ikke klarer å oppdage defekter som allerede har oppstått. Dette er på grunn av energien fra deformasjonen som allerede har blitt frigjort. Derimot vil det være mulig å oppdage allerede eksisterende defekter under testing, dersom defekten gir typiske tegn på tilstedeværelse i dataen. Sprekker forverres raskt under belastninger, noe som AE-sensorene kan kjenne igjen (6)

2.1.1.3 Effektiv bruk av to AE-sensorer

Dersom man har to sensorer, kan disse brukes til å lokalisere sprekker eller sprekkdannelser. Med bare en sensor kan dette være umulig (6).

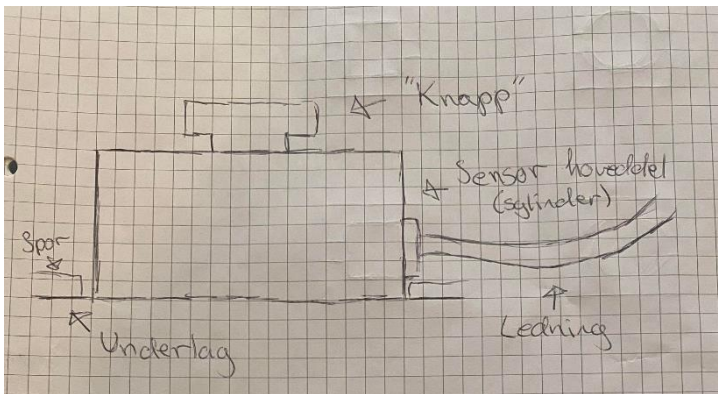
Måten to sensorer lokaliserer feil, er ved å måle intervallene mellom maks amplitude som registreres i sensorene (12).

Sensorene kan bli plassert flere steder i et system, og fortsatt lese av data fra en bestemt del i systemet. Mer effektivt er det om sensorene er oppspenn på samme del som omringer det som testes (12).

2.1.2 Lastsensor

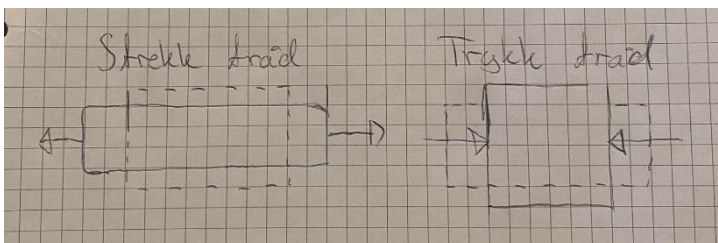
Ved å sette lastsensoren mellom en normalkraft og et underlag, kan man lese av hvilken normalkraft underlaget opplever. Dette gjelder så lenge kraften er under sensorens øvre grense. Det man får ut av en lastsensor, er muligheten til gjentakende forsøk under like kontrollerte forhold.

Det finnes lastsensorer i flere fasonger og størrelser. En av de aller minste er den som blir kalt for en “subminiature compression only button load cell”, som minner om en sensor med knapp på ene flaten (13). Denne sensoren er sylindrisk, og egner seg godt til å måle kompresjonskrefter.



Figur 2.1 Enkel figur av lastsensoren (13).

Vanligvis vil en lastsensor være sammensatt av flere metalltråder med ulik resistans, etter hvilken kraft sensoren opplever. Endringen i resistans kommer av deformering i metalltrådene når en normalkraft påføres sensoren som man kan se i figuren 2.2 (14).



Figur 2.2 Strekkmåler mekanisme i en lastsensor (14).

Deformasjonen i metallstrukturen til sensoren og resistansen er tilnærmet proporsjonale. Det samme er forholdet mellom resistans og spenning. Ved å måle mengden strøm som passerer, kan man med datakalibrering vite omtrent hvilken last som blir påkjent (14).

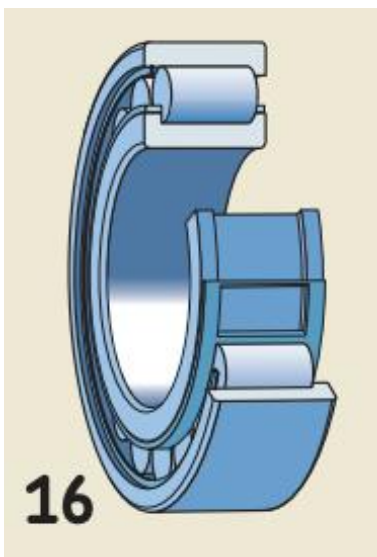
Kraften påkjent sensoren skal helst være konsentrisk kraft fordelt jevnt over sensorens overflate. Det sikrer sensoren mot spenningskonsentrasjon, slik at den overlever lenger og måler hele kraften påført objektet under (14).

2.2 Lager

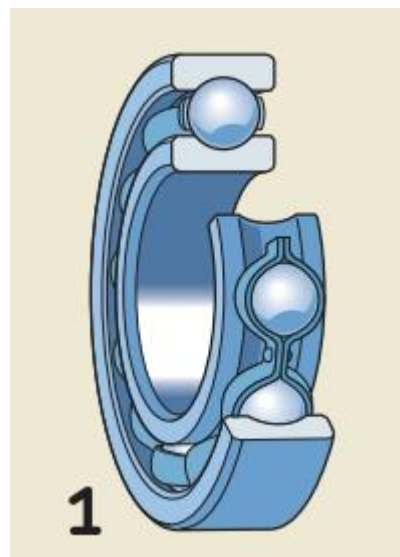
2.2.1 Lager

Lager er en komponent som tillater og sørger for stabile roterende bevegelser, med minimal friksjon. Det finnes flere ulike lager, som kan velges etter vilkår for bruk (15). Enkle rullelager fungerer som en kombinasjon av to ringer med rulleelementer imellom, som kan bevege relativt i forhold til hverandre. Til vanlig er en av ringene fastsatt.

Lagertypene over er henholdsvis en-radet kulelager som figur b, og rullelager som figur a.



Figur 2.3 a Illustrasjon av rullelager (8)

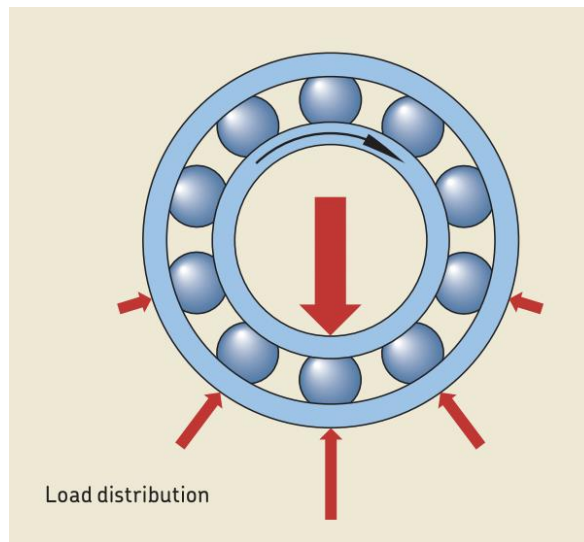


Figur 2.3.b Illustrasjon av kulelager (8)

Lager brukes på flere ulike måter, etter hvilken funksjon de skal ha i systemet. Variasjoner kan være om de skal ta aksialkraft, være selvstabiliserende, om de er ment for å bære tunge laster eller holde lageret i høy fart over lang tid (16).

Systemer som bruker normalt høy rotasjonshastighet, kan kulelager være det lageret som passer best. Dersom lageret skal ta opp større krefter, vil rullelager normalt være det tryggeste alternativet.

Ved vanlig bruk av rullelager, bærer ofte lageret en roterende aksling, og står statisk mot ytterringen. Dette kan man se i “direct current” motorer, bil akslinger, vindmøller med mer (17). Man kan også ha omvendt tilfelle, der lasten “henger” på ytterringen og akselen blir motkraften. Det vil være relativt likt som at lasten kommer fra akselen, så lenge kraften er jevnt fordelt på ytterringen. (8) (8).



Figur 2.4 Spenningsfordeling i et lager (8)

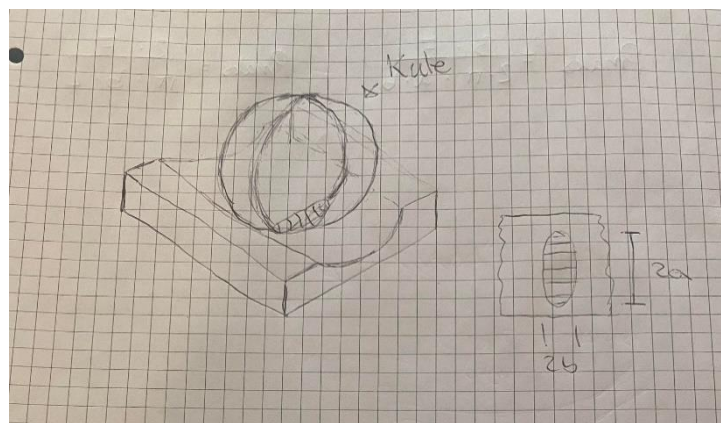
Ved noen kraftpåkjenninger er det en fordel med rullelager over kulelager. Dersom kraften lageret opplever er en aksialkraft, vil ikke kulelager klare å motstå denne like godt som rullelager. Dette kommer av kulenes geometri i forhold til rullebanen, som ikke har den samme vinkelrette motkraften sylindrene har i et rullelager. Det samme gjelder for radiellkrefter, på grunn av sylindrenes større kontaktflate med rullebanen (16).

Kontakten mellom en kule i en kulebane vises som et punkt, eller som en rett linje for en sylinder i en flat rullebane. I teorien med perfekte kuler, sylindere og baner, vil det bli opp mot uendelig høye spenninger i disse kontaktpunktene. Dette kommer av at kontaktarealet blir tilnærmet lik 0 (spenning = kraft / areal). Dette er derimot ikke det realistiske tilfelle, ettersom det vil komme elastisk deformasjoner i kulene, sylindrene og rullebanen i disse punktene. Denne elastiske deformasjonen, lager et overflateareal mellom punktene som reduserer spenningene til et potensielt akseptabelt nivå. En måte å beregne spenningene i disse kontaktflatene, er ved å bruke formlene for Hertz kontakt spenninger (18)

Kriteriene for å bruke formlene til Hertz, er (15):

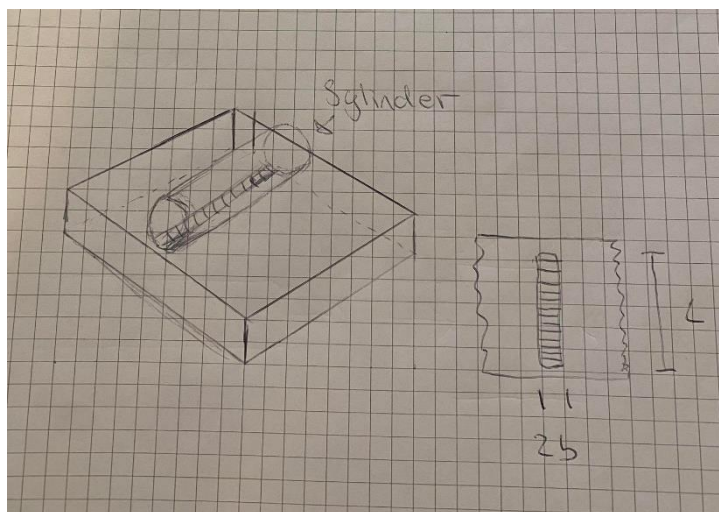
- Overflatene må være glatte og friksjonsfrie
- Delene må være isotropiske, altså ha like vilkår i materiale i alle retninger, samtliges å være elastiske
- Kontaktpunktet er relativt lite i forhold til størrelsen av delene i kontakt
- Deformasjonene til materiale må være små, og være innenfor elastiske grenser

Man kan bruke formlene for Hertz kontaktspenninger når to flater uavhengig av form er i kontakt med hverandre med ulik radius (15). For kulelager og rullelager kan sporene se slik ut



Figur 2.5 Kontaktflate basert på kuler (18)

Her kan man se at kontaktflaten mellom kulen og den konkave rullebanen, sammen lager et elliptisk overflateareal når lageret blir påkjent kraft.



Figur 2.6 Kontaktflate baser på ruller (18)

For et rullelager vil derimot kontaktflaten mellom sylindere og rullebanen sammen lage et rektangel ved påkjenning av kraft.

Basert på variablene til kontaktflatene over, kan man finne den teoretiske maksimale spenningen som opptrer innenfor de respektive kontaktflatene henholdsvis variablene a , b og l (18).

$$P_{max} = \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b} \quad P_{max} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot b \cdot l}$$

Formelen til venstre viser den maksimale spenningen for kuler i konkav bane ut fra normalkraften og kontaktflaten. Formelen til høyre viser det samme for sylinder i flat rullebane. P_{max} blir på formlene over den maksimale spenningen, og F blir normalkraften.

Med disse formlene kan man finne ut omtrentlig hvilke spenninger som opptrer i lageret mellom en kule eller en sylinder og de respektive lager ringene. For å bruke formlene, må kraften stå normalt på rulleelementene.

Formlene sier noe om hvilken type lager, eller størrelsen på lageret som burde brukes. Et lager består av flere rulleelementer som tar opp kraften, så den virkelige spenningen vil være lavere enn den beregnede med Hertz.

Det ble prøvd å finne samsvar mellom Hertz kontakt spenninger og lagrenes lastekapasitet.
Det gjettes at det kan være et samsvar, men det ble ikke klart å finne noe kilde på dette.

2.2.2 Levetid til et lager

I SKF sine formelhefter, samt det som er skrevet i Arne Dørums Maskindeler 1 (19), kan man beregne levetiden til et hjullager. Den nominelle levetiden beregnes ut fra 90% sannsynlighet for at lageret ikke svikter av slitasje (20). Dette kan beregnes på følgende måte:

Når man velger størrelsen til et lager, må først bæreevnen til den finnes via det dynamiske last kapasiteten, definert av symbolet C. Last kapasiteten tilsvarer den konstante normallasten som lageret tåler i en million omdreininger (20,21). Man kan bruke verdien videre til å beregne levetid av lager med samme produktnummer som opplever ulik last og smøringsforhold.

Ved levetiden til rullerende lager, brukes levetidsformelen etter SKF håndboken på side 27, (8)

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Eller,

$$\frac{C}{P} = L_{10}^{\frac{1}{p}}$$

Levetiden er formulert som L_{10} levetid i millioner omdreininger med 90% prosent. For beregning brukes det dynamiske bæretallet i newton kraft N, ekvivalent lagerlast P i N, og eksponent p som er for kulelager: 3, rullelager: $\frac{10}{3}$.

Formelen for å finne antall driftstimer, hvor n er rotasjonshastighet definert i rpm:

$$L_{10h} = \frac{10^6 \times L_{10}}{60 \times n}$$

Forholdene til lageret spiller også en rolle på lagerets levetid, og blir ofte lagt til som en faktor a_1 og a_{23} . Her er a_1 faktor for sannsynliglevetid og a_{23} for smøringsforhold.

Faktoren a_1 kommer av sannsynlighet for at lageret opprettholder levetiden. Dersom sannsynligheten skal være høyere enn 90% for levetiden, reduseres den med en faktor a_1 fra tabell dratt ut fra produsent.

Ved 90% sannsynlighet for å opprettholde levetiden er faktoren 1, og lavere enn 90% vil faktoren øke, men faller utenfor tabellene brukt.

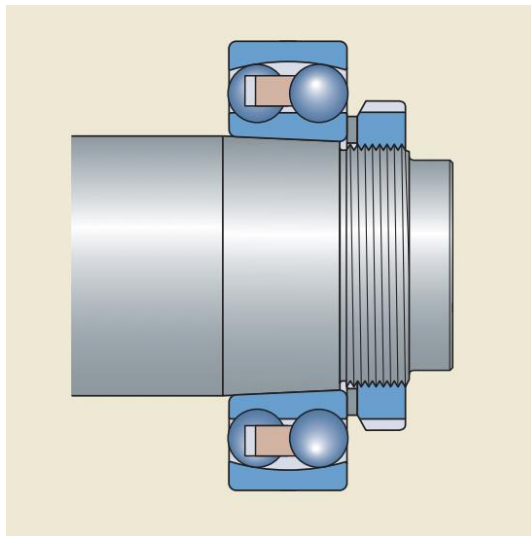
Disse faktorene kan da settes inn i den modifiserte levetidsformelen under,

$$L_{na} = a_1 \cdot a_{23} \cdot L_{10}$$

Faktorene nevnt over er nærmere forklart under kapittel 2.4.1 smøring i denne oppgaven.

2.2.3 Alternativ for lagermontering

Blant metodene som kan brukes for å feste et lager på en aksling, er å bruke det som kalles for en ‘*adapter sleeve*’ (tilpasnings krage), vist i figur 2.7. Det skal gjøre det mulig å montere lager på en aksling ved hjelp av en ‘*adapter nut*’. Lageret påføres ved å strammes ved hjelp av en ‘*lock nut spanner*’, som er et spesialverktøy laget til adapter nuten. Sammen kan disse brukes for å utføre en presspasning av lageret til akselen.



Figur 2.7 Tilpasnings krage og lager (8)

2.3 Slitasjer og utmattelse

Slitasje i et lager vil si fjerning av materiale, som kommer av uoptimale omstendigheter under drift av lageret. Ofte er det smøringstilstand, forurensninger i smøringen og generelt dårlig bruk av lageret som forårsaker slitasje (22)

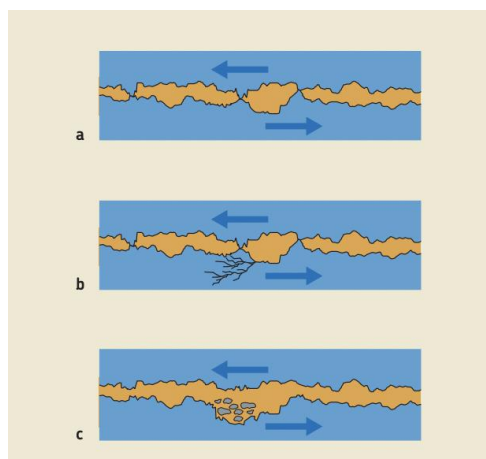
Utmattelse er varige forandringer i et materials struktur fra varierende belastninger, som over tid kan lede til fullstendig svikt. Utmattelse kan komme som en kombinasjon av påkjenninger og faktorer som varme, rust, vibrasjoner og materielle defekter (23).

Av de ulike kombinasjonene kan lageret svikte på flere måter, som ved vibrasjons utmatting. Dette kan forekomme av fretting, som kan gjøre ringene til lageret ujevnt, og skape varierende spenninger under rotasjon. Videre over tid kan dette lede til sprekkdannelse gjennom dets svingende bevegelser (24).

2.3.1 Utmattelse

2.3.1.1 Overflate- og underflate utmattelse

Slitasje langs overflaten av sporingen til rulleelementene, kommer ofte av dårlig smøringsforhold. Smøringsforholdet kan være forurensning i smøringen, for lite eller feil type smøring som skaper kontakt mellom flatene (25).



Figur 2.8 Spalling som følge av for liten smøringsfilm (25) .

Når det blir metall mot metall kontakt med relativ bevegelse mellom delene, vil det skje en slitasje langs de utsatte flatene. Kontakten mellom flatene kan forårsake mikrosprekker i materialstrukturen, som videre skaper mikrospalling og til slutt tydelige tegn på overflateslitasje. Risikoen øker dersom det skjer glidning i motsetning til rulling mellom kulene i lageret og ringene (25). Dette kan skje for eksempel i områder rulleelementene opplever høy akselerasjon side 50 (25). De utsatte smøringsforholdene er ved grense- og mikset smøringstilstand.

Overflate slitasjer kan også forårsake større sprekker, som igjen forverrer slitasjen. Sprekker er smale defekte åpninger som er avrivning mellom kornene i metallstrukturen. For lageret kan dette være en konsekvens av langvarig hard bruk med ujevne ringer. Ujevne ringer kan komme som resultat av slitasje over et spesifisert område.

Sprekker kan også komme av overdreven last, vekslende spenninger og temperatur. Sprekkdannelse på lageret kan ha stor påvirkning på lagerets videre slitasjeutvikling. Det er vanlig at det blir slitt bort materiale rundt sprekken. Derfor er det viktig å oppdage sprekker tidlig (25) .

2.3.1.2 Underflate utmattelse

Opprinnelsen til sprekke varierer. Noen ganger starter sprekken på innsiden av ringene til lageret, andre ganger på utsiden.

Underflate utmattelse kommer vanligvis som konsekvens av sykliske høye spenninger over et punkt (25).

Når for eksempel en kule i et lager kommer over et sted på rullebanen den tar opp stor kraft, kommer det kompresjon og skjærspenninger i det den ruller forbi. Avhengig av kraften, temperaturen og antall sykluser, kan det skje en endring i materialstrukturen som skaper splittelse mellom metallkornene. Dette skaper underflate sprekker i de svakeste utsatte områdene i ringen. Over tid vil denne sprekken utvikle seg til overflaten, og skape spalling på ringen. Dette vil igjen skape større slitasje når kulene ruller over, og levetiden er redusert

2.3.2 Slitasjer

Underflateutmattelse kommer vanligvis som konsekvens av sykliske høye spenninger over et gitt punkt på innerringen (25). Når for eksempel en kule i et lager kommer over et sted på rullebanen den tar opp stor kraft, kommer det kompresjon og skjærspenninger i det den ruller forbi. Avhengig av kraften, temperaturen og antall sykluser, kan det skje en endring i materialstrukturen som skaper splittelse mellom metallkornene. Dette skaper underflate sprekker i de svakeste utsatte områdene i ringen. Over tid vil denne sprekken utvikle seg til overflaten, og skape spalling på ringen. Dette vil igjen skape større slitasje når kulene ruller over, og skaper gjentakende spalling.

2.3.2.1 *Adhesive wear (klebende slitasje)*

Slitasjen “Adhesive wear” kommer av områder med høy kontakt spenninger, som forårsaker bindinger mellom flatene (26). Bindingene kan komme som resultat av bevegelse i et lager, som ikke har tilstrekkelig smøring (mixed state). Rulleelementene kan i denne tilstanden komme i kontakt med ringene rundt, som med høy rotasjonshastighet kan skape varme for sveising mellom delene. Materiale mellom ringene og rulleelementene vil forveksles, og kan gjøre smørefilmen mindre (25).

Kraften, som gjerne er på en ide av lageret, er området der rulleelementene i lageret akselereres. Dette kan forårsake glidning på rulleelementene. De områdene mellom rulleelementene og ringene som kommer i kontakt under glidning, kan få veldig høy temperatur, og smelte områdene sammen. Temperatur endringene kan også føre til overflate sprekker, som skaper nye slitasjer og utmattelser.

Hvis overflatene fortsetter å gnis mot hverandre, vil forbindelsene i materialets struktur brytes, og flak av materialet vil løsne (3). Dette kan unngås ved bruk av smøring, eller belegg med høy friksjon koeffisient.

2.3.2.2 *Galling*

Galling er en kombinasjon av friksjon og vedheft mellom to metall overflater. Flatene er i kontakt med hverandre, som kan være konsekvens av liten til ingen nødvendig smøring mellom to deler. Når overflatene blir gnidd mot hverandre, vil partikler fra den ene, bli overført til den andre. Galling må ikke forveksles med kaldsveis og slipende nedslitning, selv om de ligner (27). Forskjellen mellom disse tre, er at kaldsveising er sammenkobling av to legemer, mens slipende nedslitning er en skade som forekommer når et hardt materiale møter et mykt. Galling er da i området mellom disse.

Figuren under viser hva som vil skje inni kulelageret, mellom kulene og den ytre og indre ringen, når kulelageret kjøres på høy fart, under stor belastning, og hvor det er veldig lite smøring til stede. Galling er et langsiktig problem, i tilfeller hvor overflater er i kontakt med hverandre. Dette er et problem som kan forhindres ved jevnlig ettersyn og vedlikehold.



Figur 2.9 Creep på lagerets indre-ringveg (8)

2.3.2.3 Fretting

Fretting er en slitasje mellom to flater som opplever korrosjon. Fretting kan oppstå mellom ytterringen og huset, og inner ringen og sleeveen. Det kommer ofte av relativ bevegelse mellom delene, som skaper små avslippte partikler av ringene. Disse kan ende opp som korrosjon i form av jernoksid. Korrosjonspartiklene er større enn partiklene i stål, som vil skape ubalanse og ulik spenningsdistribusjon i lageret (25,8)

For å ta hensyn mot fretting, burde man passe på at lageret ikke er montert til ujevne flater, og at pasningen er riktig. Ujevne flater kan komme av dårlige produserte av deler, og pasningen burde gi god kontakt med lageret.

Man kan gjenkjenne fretting som en rødlig eller mørk farge på ringene. (28)

2.3.2.4 Creep

Ved bruk av klaringspasning til lageret, er det viktig å minimere sannsynligheten for creeping. Creeping er den relative bevegelsen mellom ringene til lageret og festet rundt. Når man kjøper et lager, er det vanlig å få med informasjon om den minimale lasten den burde ta. Denne lasten er ment som kraften som skal til for å unngå creeping under normale omstendigheter for lager med klaringspasning.

Dersom lasten på lageret er for lav, vil friksjonskraften mellom ytreringen og kulene være større enn ytreringen og huset. Dette gjør at ytreringen begynner å rotere i forhold til huset, altså at det blir creeping (8) (29). Creeping gjør at det blir fretting på ringene, noe som over tid vil ødelegge lageret eller andre deler av systemet. Ved creeping kan slitasje bli så store at det skjer ujevnheter eller dimensjonsendringer på ringene. Med denne forandringen i rullebanen til kulene, kan det komme økte vibrasjoner og redusert effektivitet til systemet (30)

2.3.2.5 Tribokjemisk slitasje

Tribokjemisk slitasje er definert som den kjemiske reaksjonen som forekommer mellom smøring og en overflate (31).

Viktigheten i tribokjemiske slitasje, ligger i konsekvensen av å velge feil smøring. Valg av smøring burde bli tatt i sammenheng av materialbruk og bruksforhold. Dersom det ikke blir valgt riktig, kan slitasje forekomme som følge av reaksjoner mellom smøringen og materiale, som for eksempel rust. Korroderte områder sammen med slitasje kan veldig effektivt slite ut materiale. (32)

2.3.2.5.1 Galvanisk korrosjon

Når to metaller av ulikt materiale kommer i kontakt over lengre tid, kan det mest “uedle” av materialene begynne å korrodere. For det “edleste” av materialene vil det derimot foregå en reduksjonsreaksjon som for eksempel oksygenreduksjon (33). Dette vil fungere som katode og være beskyttet mot korrosjon, i motsetning til det mer “uedle” materialet som fungerer som anode og korroderer (34). Uedle metaller står foran hydrogen i spenningsrekken, og har derfor negativ standard elektrodepotensial. Generelt vil uedle metaller være materiale som oksideres lett i luft eller vann. Edle metaller som for eksempel gull kan finnes fritt i naturen, ettersom de ikke reagerer på luft, vann eller fortynna syrer. Dette er også grunnen til at de blir kalt edle (35).

Når man sammenligner to materialer med hverandre, har det i utgangspunktet ingenting å si hvor uedle metallene er. Derimot hvor de ligger i forhold til hverandre i spenningsrekken, sier noe om hvilken som blir offeranode og hvilken som fungerer som katode. Dette gjelder på tvers av materialer og mellom samme materialer med ulike legering (33).

Dersom materialene er helt like, vil de være på samme sted i spenningsrekken. Det vil derfor ikke være noen offeranode, og man kan slippe å bekymre seg for galvanisk korrosjon. (33).

2.4 Smøring

Formålet med smøring er å minimere metall mot metall kontakt (36). Denne funksjonen er kritisk for lagerets levetid, hvor smøring i lager forebygger mot friksjon mellom rulleelementene og veggene til rullelageret (8). Lagerets tilstand etter n antall omdreininger er i stor grad avhengig av riktig bruk av smøring og smøringstypen. Andre funksjoner til smøringen er at det fungerer som antirusting, varme overfører, fjerning av avslitt materiale (37).

2.4.1 Smøring

Ved beregning av levetid til et lager, må man legge til en faktor for sannsynlig levetid og smøringsforholdene lageret er i. Dette kan baseres på hvor ren smøringen er, viskositeten og temperaturen. Faktorene til smøring for levetid henvises ofte som a_1 og a_{23} . a_{23} kommer av temperatur, rotasjonshastighet og viskositet i smøringen. Forholdet mellom disse kan gjennom to ulike grafer gi forholds konstanten k ,

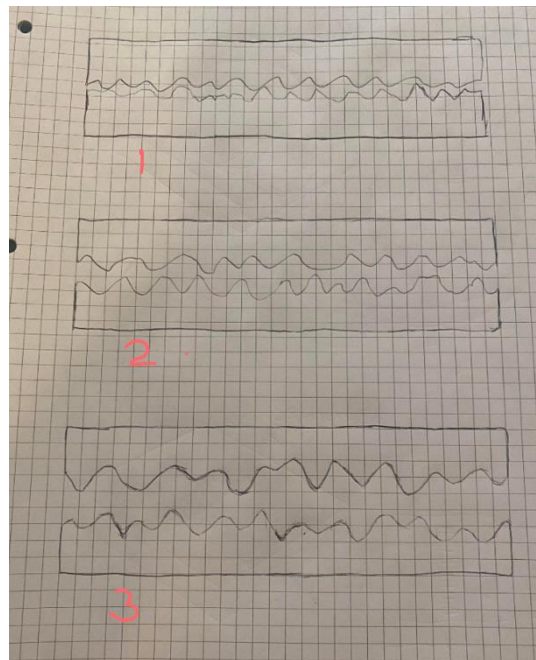
$$k = \frac{v}{v_1}$$

v står for virkelig viskositetsverdi, som er for eksempel satt av ISO VG 46, og v_1 for den nødvendige viskositet. Denne konstanten brukes i en annen tabell for å finne faktoren a_{23}

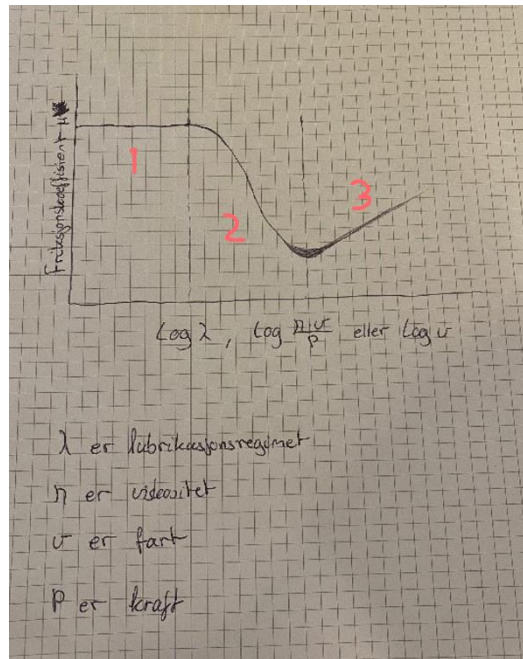
Ifølge SKF's levetidsformel for hjullager, vil en helt ren smøring tilsi en tilnærmet uendelig levetid (38). Tillegget til formelen er en erstatning av faktoren a_{23} med faktoren kalt a_{SKF} , som har en øvre grense på faktor 50 (38) (19).

Stribecks kurven

Dersom man ønsker en grafisk fremstilling av friksjonen (friksjonskoeffisienten) i et lager, sammenlignet med faktorer som fart, viskositet og kraft, kan man bruke Stribecks kurven. (39) Denne viser tre smøringsforhold i et lager, som er: kontakt mellom metalleder, mikset kontakt og smøring, og full separasjon av smøring. Av denne grafen kan man få et innsyn i hva som skjer i lageret, og hvilke forhold av fart, viskositet og kraft som lageret trives best i, vist som laveste punkt på kurven i figur 2.8.



Figur 2.7 Oljefilm (39)



Figur 2.8 Smøringkurve (39)

Figurene viser smøringsforhold i sammenheng med Stribecks kurven. Fase 1 er kontakt mellom metalleder, fase 2 er mikset kontakt og fase 3 er full separasjon av smøring som vises i figur 2.7

Helt på starten av kurven kan man se det som er tørt mellom kontaktflatene, smøringen bærer ingenting av lasten lageret blir påført. Etter hvert som faktorene som fart og viskositet øker, eller den påkjente kraften på lageret reduseres, vil smøringsforholdene gå over til en ny fase. Dette er mikset kontakt og smøring. Her er det fortsatt noe mekanisk kontakt mellom ringene, men smøringen vil også være med på å bære lasten. Ettersom friksjonskoeffisienten er lavere for smøring enn metall mot metall kontakt, vil den totale friksjonsmotstanden i lageret reduseres på grunn av smøringens til stede værelse (40)

Når forholdene er gode nok, vil det ikke lenger være noe metall mot metall kontakt. Det vil si at det er en riktig balanse mellom viskositet, fart og kraft. Da vil det være full separasjon mellom delene, hvor friksjon kun vil forekomme imellom smøringen og metalledene, og i smøringen i seg selv (41).

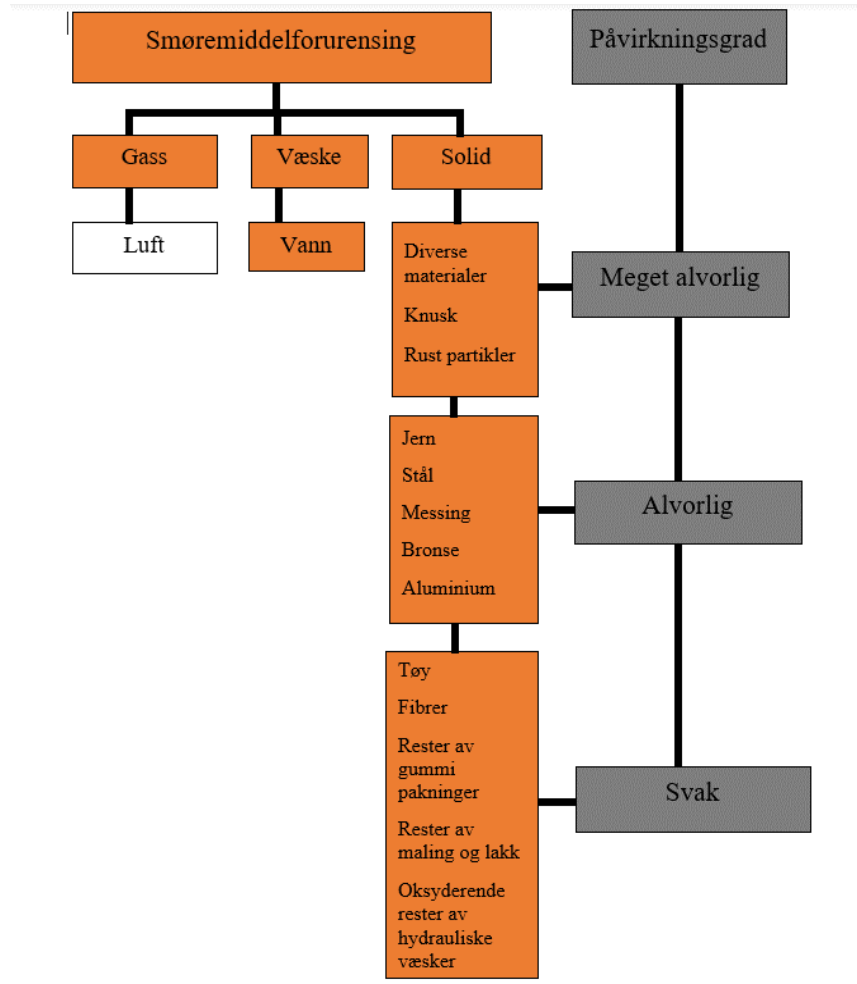
Dersom farten eller viskositeten blir for høy, vil friksjonen igjen øke, selv om det er full separasjon mellom metalledene. Dette kommer som konsekvens av økt motstand i skjærstyrken til smøringen selv. Smøring, som andre fluider, liker ikke å bli delt fra hverandre, blant annet på grunn av sammenhengende krefter som oppstår mellom molekylene i like fluider (42).

Man kan se på hver parameter for seg selv i Stribeck kurven, som for friksjon i forhold til bare fart, men bare så lenge de andre parameterne holder seg konstante. Dette vil være en forenkling, ettersom det i virkeligheten vil være nesten umulig å holde de andre parameterne konstante (41,25).

2.4.2 Smøremiddelforurensing

Ved forurensete smøremidler, vil det være gjenværende urenheter i smøringen. Dette er uønskede elementer som ødelegger, forvrenger eller skader et hjullager under drift. (43)

Oversikt over mulige smøremiddelforurensing og alvorlighetsgrad.



Forurensing av smøremiddel er et vanlig problem for mange industrier. En studie gjort av 'National Research Council of Canada' (NRCC), viser at 82% av lagerskader skjer på grunn av dårlige smøremidler, eller partikkelforurensninger (44). Dette skjer under alle slags mulige forhold og omgivelser.

Enten det er innendørs i fabrikkhaller, ute i friluft eller på havet, og som ikke er fullstendig mulig å eliminere fra et driftsmiljø. Forurensing kan redusere tiden et emne kan gå uten vedlikehold fra år til måneder, i noen tilfeller fra uker til dager.

- Forurensning kan føre til frysing av maskineriet, etter hvert som smøremidlene blir stadig tykkere og til så hardt at bevegelige deler låser seg fast (45)
- Kan redusere effektiviteten til pumpene, og tetne til ledningene som fører smøremidler til de steder hvor det trengs.
- Forurenset smøring kan ripe, slite eller skjære bort fragmenter av rulle- eller hjullagrene, noe som fører til stadige hyppigere svikt og unødige stans.

Smøremiddel forurensning kan skje i det miljøet hvor det transporteres, lagres eller brukes. Enten når det blir injisert inn i maskineriet eller eventuelle forurensninger som emnet selv bærer på. Eksempler på slike forurensninger er hverdagslige ting som støvpartikler, såpe fra rengjøring og dårlig montering av tetningsmateriale. Blanding av smøremidler som ikke har identiske egenskaper er også et problem som bør unngås (46).

2.5 Toleranser.

Toleranser er den øvre og nedre distansen en parameter avviker fra den nominelle dimensjonen (47).

Måten toleranser defineres på, er ofte todimensjonalt på tegninger av komponenten man ønsker å lage. Her blir dimensjonen definert, og hvilke avvik man ønsker. Denne informasjonen er viktig for å oppnå den ønskede funksjonen av komponenten. I verste fall, kan deler ikke passe sammen, bli for store osv. (47).

Med CNC maskin, kan toleranser variere med arbeidet som blir gjort. En typisk toleranse for CNC er +/- 0,10mm, men det finnes varianter som har en +/- 0.0025mm toleranse (48). Med finere toleranser kreves det i midlertidig større bevissthet angående budsjettet. Prisen øker eksponentielt med de toleransene man ønsker av CNC maskiner (49)

Tabel med toleranser (50)

Toleranse (+/- mm)	Pris i faktorverdi
0.75	0.2
0.50	0.6
0.25	0.9
0.125	1
0.063	1.3
0.025	2
0.012	5.2

Figuren over viser forholdet mellom pris og toleransesetting

Toleransene i prosjektet ble vist i form av enten symmetrisk eller bilaterale avvik. Formålet med toleransene var å tydeliggjøre hvilke områder som ikke skulle freses eller bores, og hvilke avvik som var tillatt. Noen områder av kuttingen hadde spesifikke formål, så her ble det satt finere toleranser for å minimere sannsynlighet for feil mellom dimensjonene (51)

Med symmetriske verdier kan avviket bli både lavere og høyere enn den satte nominelle dimensjonsverdien. Fordelen med denne toleransesettingen, er at den tillater en viss feil for produsenten, noe som gjør det enklere og billigere (51).

Bilateral toleransesetting gjør det mulig for toleransesetteren å begrense hvor mye større eller mindre dimensjonen kan være fra den nominelle verdien. Derfor kan man se på bilateral toleransesetting som mer brukertilpasset enn symmetrisk. En fordel med bilateral toleransesetting er at det kan avgrense områder produsenten burde unngå for å ikke krysse kutt med hverandre (51).

2.5.1 Pasninger og toleranseverdier

Funksjonen til pasninger handler om samhandlingen av ulike toleranser. Disse er standardiserte toleranser til de nominelle dimensjonene som er satt for nav og aksel (52). Toleranser er kategorisert og vist med ulike bokstaver og kapitler for nav eller aksler via standarder, som også inkluderer tabeller for anbefalte pasninger (52) (53). Disse er basert på tidligere erfaringer, og skal gjøre det enklere for ingeniøren og produsenten å beregne og sette riktige gode toleranser (53). Valg av pasninger kan bli gjort med egne utregninger av formler tilpasset toleranser og sannsynlighet.

Krympepasning, klaringspasning og presspasning brukes med forskjellige fordeler og ulemper. Valg av hvilken pasningstype man burde bruke kan man finne som anbefalinger i håndboken til SKF (8). Dette er for å få montert lageret og dimensjonert sleeveen på en god måte. Ved å velge riktige dimensjoner og pasninger mellom sleeveen, lageret og huset, kan man optimalisere driften og minimere sannsynligheten for slitasje (skf.com).

For å finne riktig pasning er det viktig å beregne hvor stor avpressings- og påpressingskraft og tillatt torsjonsmoment som ønskes av en forbindelse mellom to deler. Dette kan være basert på beregninger til motorens maksimale effekt, forventede og beregnede friksjonskrefter rundt delene, verktøy tilgjengelig osv. For eksempel om man bare har enkle verktøy for å ta noe av og på, kan det være lurt å prøve en pasning med lavere påpressingskraft.

Den vanlige anbefalingen for pasningstype mellom lageret og huset er “klaringspasning” (skf.com) (tabell A-1). Klaringspasning er en type pasningen for at to deler ikke fester seg sammen. Dette kan være ønskelig når to deler skal bevege seg i forhold til hverandre, og samtidig være så tett som mulig (52).

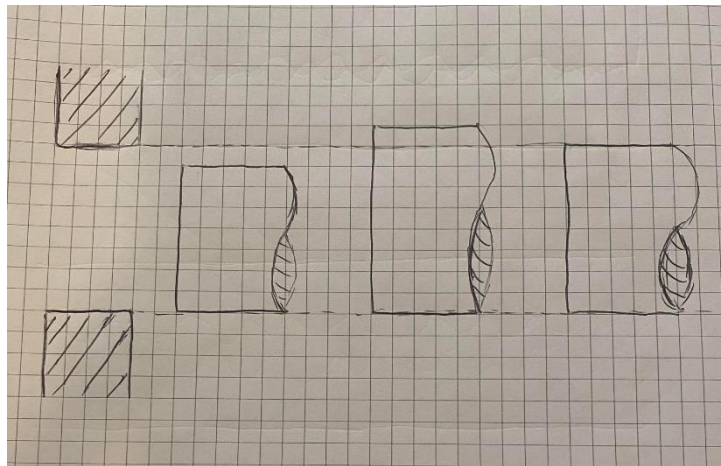
For presspasning er det kontakt eller tilnærmet helt kontakt mellom aksel og navet. Denne kan presses på for hånd eller med verktøy avhengig av pasningen (52).

Dersom man ønsker å være veldig sikker på godt feste kan man bruke krympepasning. Her er de nominelle dimensjonene for store for hverandre ved temperatur under normal bruk. En av delene må varmes, avkjøles eller begge for at de skal passe i hverandre. Kontakttrykket kan være veldig stort (54).

Med klaringspasning mellom lageret og huset, krever lageret en minste radialkraft for å fungere optimalt. Kraften er forhåndsregnet av SKF for at ytringen ikke roterer mot huset.

Dersom man ønsker å bruke en annen type pasning, kan man finne alternativer i tabellene i håndboken til SKF (8).

Figuren under viser en enkel sammenligning av de ulike pasningene nevnt ovenfor, i forhold til nominelt nav størrelse vist til venstre på figuren.



Figur 2.9 Inspirert av Salguti (55).

2.5.2 Beregning av for lageret.

Før man begynner beregning, utføres en tynnveggs test for å se om spenningen fra presspasningen vil være konstant over hele indre ringen til lageret. Liten s kan for eksempel her være veggtykkelsen til indringingen av lageret.

$$d \geq 4 \times s \quad (2.1)$$

$$s = \frac{d_{(ytte)} - d_{(indre)}}{2}$$

Starter med å hente anbefalt toleranseklassene fra SKF håndboken (8). For presspasningen brukes anbefaling fra "Appendix A-1" på side 334, en forbindelse til kulelageret. "Appendix A-4" på side 337 brukes for klaringspasningen.

Videre er toleranser definert for aksler ved hjelp av småbokstaver, mens boret/navet er definert med storbokstaver. Dette er fint å forholde seg til når man skal lette etter pasninger og andre toleranser.

Oversettelse av symbolene i appendiksene, og leser av for kulelager (ball bearings):

P: resulterende last som påføres lageret, som er bestemt til den eneste lasten 4,5 kN.

C: lagerets dynamiske bæringstall oppgitt til 16,8 kN, finne igjen på nettsiden for lager Model 6007 (56).

Får da for presspasning Verdiene i denne tabellen over finnes igjen i "Appendix B" på side 344 i håndboken, under "Normal to heavy"

Toleranse	Øa (µm)	Na (µm)
K5 (aksel)	13	2
SKF bor	0	-12

Får da for klaringspasning disse verdiene i tabellen under finnes igjen i "Appendix B-2" på side 352 i håndboken, "light to normal"

Toleranse	Øa (µm)	Na (µm)
H7 (bor)	30	0

SKF aksel	0	-13
-----------	---	-----

Ser videre på om dette gir den ønskede pasninger ved hjelp av diameterforskjellen. Dette er utført ved hjelp av **NS-EN ISO 286-1:2010**, etter eksempel 3 på side 32 for å finne presspasning (53). Basert på dette eksempelet, har vi formelen under for maks diameter forskjell,

$$\Delta d_{max} = Na_{(bor)} - \emptyset a_{(aksel)}$$

Og minst diameter,

$$\Delta d_{min} = \emptyset a_{(bor)} - Na_{(aksel)}$$

Hvis begge verdiene kommer ut negativt, får vi en presspasning. Motsatt er dette en klaringspasning. Dersom det er både negativt og positivt, kalles dette for mellompasning.

Videre beregninger har blitt utført ved hjelp av Excel regneark, som har innsatte formler som er basert på kapittel 4 i Arne Dørums Maskindeler 1 (19).

Hvordan man finner diameter forskjellene som skal brukes til videre beregning kan man se under, som gir pressmonnet til forbindelsene. Herfra er det lurt å gjøre det om til millimeter for videre beregning,

$$\Delta d_{max} = \emptyset a_{(aksel)} - Na_{(bor)} \quad (2.2)$$

$$\Delta d_{min} = Na_{(aksel)} - \emptyset a_{(bor)}$$

Videre korrigeres dette mot sannsynlighet og glatting, som gir et nye pressmonn som skal brukes til videre beregning (19). Dette vil si at maks pressmonn minker og minste pressmonn øker.

$$\Delta d_{(korr)} = \Delta d_{(midd)} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{T_a}{2}\right)^2 + \left(\frac{T_b}{2}\right)^2\right) - 4(R_{a(aksel)} + R_{a(nav)})}$$

$$\Delta d_{(midd)} = \frac{(\Delta d_{(maks)} + \Delta d_{(min)})}{2}$$

T_a står for toleransvidden til akselen, og betyr T_b tilsvarende for boret. R_a er profiletsmiddelavvik for ruhet, som definert for presspasning ved sliping av boret, R_a mellom 0,3 – 2,0, og en findreid aksel R_a er mellom 0,8 – 2,5 (19). Videre antas at begge ringene for lageret ligger på $R_a = 0,3$, basert på finslipings prosessen den opplever under produksjon. (57)

For maks korrigert pressmon brukes adisjon, og motsatt for å finne minste korrigerte pressmon som skal brukes videre. Formelen over brukes også for korrigerende av pressmon ved beregning av krympepasningen, og det tillate driftsmomentet senere. Her kan man også stoppe å beregne for klaringspasningen på grunn av det ikke opptrer spenninger for forbindelsen.

Videre kan maks og minimum tangentialspenning som lagerets indre-ring opplever fra presspasningen i navets tverrsnitt. Dette brukes for å finne flattrykket, som gir grunnlag for montering og avmontering av lageret.

Formelen under er for tangential spenning (19),

$$\sigma_t = \Delta d \cdot \frac{E}{d_m}$$

$$d_m = \frac{(d_{(ytte)} + d_{(indre)})}{2}$$

Δd settes inn med de korrigerte maks og min pressmonene. Elastisitetsmodulen E for kulelageret, antas til å være likt vanlig stålmateriale på $210 \cdot 10^5 \text{MPa}$ (58). Mildere diameter brukes, som er for den ytterste og innerste diameteren for lagerets indre-ring.

Videre er det mulig å beregne påpressingskraften F , som er nødvendig for presse lageret kaldt på sleeve. Formelen under er da for nødvendig kraft F (19).

$$F = \mu \times p \times \pi \times d \times L$$

$$p = 2 \times s \times \frac{\sigma_t(\text{max})}{d_m}$$

Trykk formelen p er basert på tank med overtrykk, hvor max tangensial spenning. Dette er for å finne det største trykket som opptrer på overflaten mellom navet og boret. Den dynamiske friksjonskoeffisienten antas til å ligge på $\mu = 0,08 - 0,10$.

For å finne avpressingskraft, byttes μ med μ_1 , hvor den statiske friksjonskoeffisienten er $\mu_1 = 0,10$ for en pressforbindelse (19).

2.5.2.1 Tillat driftsmoment for lagerets indre-ring.

Basert på det overførbare momentet en presspasning kan takle, kan det være lurt å forebygge mot glidning mellom lagerets indre ring vegg som tar på sleeveen. Dette blir kalt creeping og kan både komme av feil pasningssetting, skader og slitasje, og at kraften på lageret ikke er stor nok.

Formelen under er viser nødvendig overførbart moment basert på Arne Dørums maskindeler 1 i kapittel 4 (19)

$$T = \mu_1 * p * \pi * \frac{d^2}{2} * L \quad (2.3)$$

For presspasning antas statiskfriksjonskoeffisient som $\mu_1 = 0,10$ (19)

Trykket p står for det minste korrigerede trykket som oppstår i forbindelsen. Neste er diameteren d for motortappen, og L for lengden til hullet/navet.

2.5.3 Beregning av krympepasning.

Basert på den angitte toleransen n6 for motor tappen gitt av SEW, kan vi med nettressursen “mec Engineering Spreadsheets” (59) finne en pasning som inkluderer denne klassen. Denne inkluderer standard utdrag fra både ANSI B4.2-1978 og ISO 286-1 (2010), hvor vi fant frem til den ønskede pasningen H6 til n6. Dette skal passe til koblinger for å overføre lavt torsjonsmoment uten kile ifølge beskrivelsen som fulgte med for denne pasningen.

Ut ifra dette, finner man disse verdiene it ifra ISO 286-2, 2010 (60).

Toleranse klasse	Øa (µm)	Na (µm)
H6	13	0
n6	28	15

Dette blir brukt til beregning som visst tidligere i kapittel 2.5.2 for å finne avpressingskraften F , og til å se på situasjonen kun med oppvarming (kun krymping).

Formelen under er for å finne nødvendig temperaturforskjell, eller mer presist er dette for å finne den nødvendige oppvarmingen av sleeveen som skal krympes på motortappen (19).

$$\Delta T = \frac{\Delta d}{\alpha \cdot d}$$

Δd er da maks korrigert diameterforskjell av toleranse verdiene over, α er termisk lengdeutvideleses koeffisient, og d er diameteren på motortappen på 22mm.

Verdien for alpha finnes igjen på “thyssenkrupp Materials” sin nettside (61).

For å finne den ønskede slutt temperaturen inkluderes også sleeveens temperatur, som antas til å være lik omgivelsene til verkstedet. Dette kan da måles på forhånd før krymping.

For fullført krymping kan man vurdere spenningene som oppstår fra forbindelsen. Dette kommer under materialsvikt kapitlet under. Dette krever da maks trykket som oppstår fra forbindelsen.

Ifølge tidligere formel for tynnvegg (2.1), er rør-veggen til sleeveen definert som tjukk. Dette gir da et mindre forutsigbart spenningsfordeling i sleeveen. For å finne maks trykket som oppstår fra forbindelsen, brukes formelen under basert på krympeforholdet og flatetrykket (19).

$$\frac{\epsilon}{p} = 1000 \left[\frac{1}{E_2} \left(\frac{1 + x_2^2}{1 - x_2^2} + \nu_2 \right) + \frac{1}{E_1} \left(\frac{1 + x_1^2}{1 - x_1^2} - \nu_1 \right) \right]$$

$$\epsilon = \frac{\Delta d_{max}}{d}$$

$$x_1 = \frac{d_i}{d}, x_2 = \frac{d}{d_y}$$

Benevnelsen 2 brukes for navet og 1 for akselen. Det antas noe likt materialegenskaper for begge delene, som vil si at *Poissonstall* gir $\nu_2 = \nu_1$ og Elastisitetsmodulen gir $E_1 = E_2$.

ϵ står for den relative diameter forskjellen, eller krympeforholdet, hvor Δd_{max} er den korrigerede maks diameterforskjellen som visst tidligere på formel (2.2). Den siste variabelen er da d for diameteren til motortappen.

Herfra skrives formelen over om til å finne trykket p for finne maks trykket.

2.5.3.1 *Materialsvekt på sleeve og lagerfestet.*

Ved hjelp av beregnet maks tangensial- og resulterendespenning, kan man vurdere hva materialets mekaniske egenskaper skal være i forskjellige deler av systemet. Dette er viktig for å forebygge mot skader på blant annet sleeveen og lagerfeste. Formelen for dette er tangensialspenning (2.3).

Tangensialspenninger vil her si spenninger forårsaket av forbindelser mellom to deler, som presser mot hverandre med en konstant kraft over et gitt overflateareal. Av dette kan man beregne det minste trykket for forbindelsen, slik at det ikke begynner å gli som visst over. Resulterende spenninger er derimot den største spenningen fra trykket som oppstår fra en pasning. Dette vurderes for navet som opplever dette som strekk og skjær, og som bør som helst være under flytegrensen for å ikke permanent endre geometrien på delen.

Formelen under er for maks resulterende spenning i et nav, som i dette tilfelle blir lagerfestet, hullet til sleeveen.

$$\sigma_{res} = \frac{p_{max}}{1 - x_2^2} \cdot \sqrt{(3 + x_2^4)}$$
$$x_2 = \frac{d_i}{d_y}$$

For presspasningen behandles sleeveen som en massiv aksel, ettersom lageret sitter et stykke ut på sleeveen hvor det ikke finnes noe hullrom. På dette området, opplever sleeveen en trykkspenning fra presspasningen på lageret, men trykk er vanligvis ikke kritisk nok til å svikte delen. Det resulterende spenningen fra maks trykket kan da vurderes mot lagerets indre-ring. Dette antas til å være vanlig lagerstål type 52100

Videre kan man vurdere krympepasningen mellom sleeveen og motortappen. Vi ser da på den resulterende spenningen på sleeveen som nav. I dette tilfelle settes grensen ved flytegrensen til 304 stålet (62).

For lagerfestet var det ikke noe spenninger fra presspasning å ta hensyn til. Dette skal stemme med klaringspasningen som er utført for denne forbindelsen. Spenningene lagerfestet vil da oppleve, vil være skjær og bøy mellom lastskruen og lageret. Dette har blitt videre testet i Solidworks, som sier at ingen store spenninger er påkjent i lagerfestet.

2.6 Produksjon

Spenning i et materiale, er den indre distribusjonen av kraft som er fordelt gjennom materiale. Spenningsfordelingen kan komme fra en eller flere kraftkilder, og kan virke som trykk, strekk, bøy og skjær spenninger (63,64). Av spenningstypene er det strekk og trykk spenninger som er de foretrukne for materiale å forholde seg til. Torsjon, bøy og skjærspenninger kan redusere i stor grad hvilken last materialet klarer å ta.

Formelen under gjelder for trykk, strekk og skjær spenninger.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Av formelen over henvises σ som mål på spenninger, F som kraften påkjent og A for tverrsnittsareal (65). Generelt kan man si at økt tverrsnitt vil redusere spenningene i dette område. Formen på tverrsnittet har i midlertidig også noe å si på hvor store laster materialet klarer å ta.

2.6.1 Deformasjon

Deformasjoner er noe et materiale kan få som konsekvens av temperatur endringer og påkjente belastninger. Materiale kan bli strukket, trekket sammen, få vridning eller bøye seg. Deformasjon i materialet kan endre formen til strukturen, slik at spenninger som bøyespenning blir enda høyere.

Når man lager en sammensatt struktur, er det viktig å ta høyde for deformasjon som kan komme i materiale. Dersom deformasjonene er elastiske, vil ikke deformasjonene nødvendigvis bli verre over tid, og ofte komme tilbake til sin opprinnelige tilstand når det er uten spenninger. Ved plastisk deformasjon derimot, vil deformasjonen være permanent, og kan fort forverre seg over tid (66).

Målet er derfor å holde seg innen den elastiske deformasjonen. For å gjøre det enklere å vite hvor denne grensen ligger, har forskere og ingeniører funnet ut hvilke spenninger denne grensen ligger til ulike materialer. På norsk kalles denne grensen for flytspenning.

Forskjellige materialer deformerer seg ulikt til samme spenningsdistribusjon og temperatur. Materialer som aluminium har omtrent en tredjedel av den elastisitetsmodulen som stål har (66). Denne relativt lave elastisitetsmodulen, som er en faktor på hvor lett materiale deformerer seg, gjør at man må ta mer høyde for dimensjonsendringer med aluminium enn med stål. Derfor er det ikke alltid aluminium egner seg like godt som materialvalg, selv om det har like høy flytespenningsgrense.

Formelen for forlengelse (deformasjon langs kraft akse) av materiale, er gitt ved denne formelen: (65)

$$e = \frac{(L - L_0)}{L_0}$$

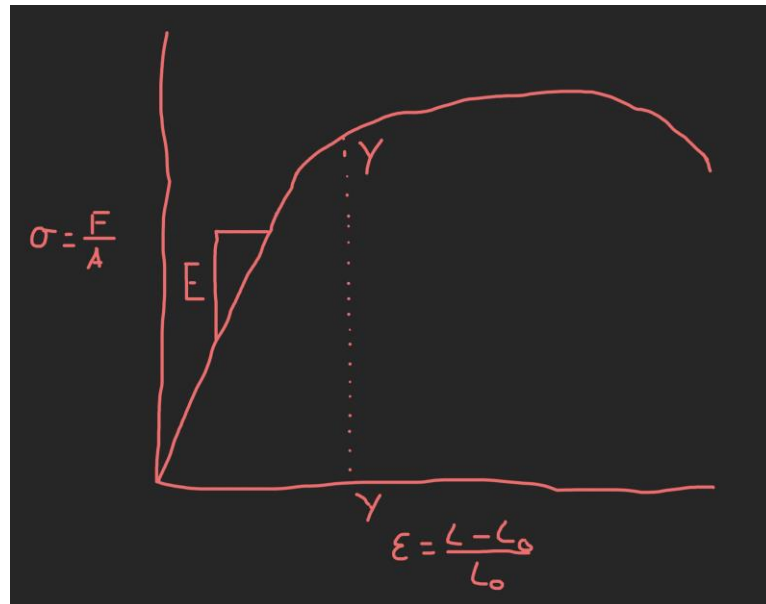
Her er e den relative forlengelsen, L_0 den opprinnelige lengden, og L er den nye lengden. Formelen blir blant annet brukt til konvensjonell flytegrense og for å finne elastisitetsmodulen til materiale (66).

Formelen for spenning uttrykt med relativ forlengelse og elastisitetsmodul kan uttrykkes som:

$$\sigma = e \cdot E$$

Her er σ spenninger, E for elastisitetsmodul og e er relativ forlengelse. (66,65)

Forholdet mellom spenninger og relativ forlengelse kalles *Hookes lov* i den elastiske fasen til materialet (64).



Figuren over viser hvordan forholdet mellom spenninger og relativ forlengelse kan se ut. Punktet Y på figuren viser hvor flytspenningen til et materiale vil være. Forbi dette punktet vil materiale oppleve noe permanent deformasjon. Frem til punkt Y foregår deformasjonen hovedsakelig elastisk, vist som E.

Ved en sammensatt struktur av flere deler, er det viktig at man tar høyde for dimensjonsendringer som følge av økt temperatur. Om man ikke gjør dette, kan spenningene i disse områdene bli høye, og potensielt skape vridninger eller andre måter få en plastisk deformering (54).

2.6.1.1 Temperatur

Temperatur kommer som konsekvens av energi som endrer kvalitet (67). Som når mekanisk energi blir gjort om til varme ved friksjonsmotstand.

Temperatur kan ha en svekkende effekt på materialer og kjemiske forbindelser som pakninger (68). Økt temperatur gjør at ting ekspanderer som følge av økt energi mellom atomene i materiale, som kolliderer og presses seg fra hverandre (69). En konsekvens av økt energi i materiale, er at materiale lettere deformeres og svekker styrken til materiale (69). Motsatt blir det når temperaturen synker, der volumet reduseres og materiale blir stivere, men har også lettere for å knekke.

Deler og komponenter kan ha klassifisert hvilke temperaturer de bør brukes i, etter hvilket materiale de er laget av. Komponenter som for eksempel forseglinger kan miste mye av sin tiltenkte funksjon som følge av temperatur endringer (70). Ved økt temperatur kan slitasjen på forseglingen bli veldig stor, noe som gjør at man må bytte det ofte. Dette er definert i kapittel 5.4 i Parker O-ring Handbook (71). Ved lav temperatur kan forseglingen bli stiv og miste mye av sin tetteevne. Et "worst-case scenario" på hvilken effekt lav temperatur kan ha på forseglingen "O-ring", kan man lese seg opp på Feynman sitt appendix om romraketten Challenger side 2 (72).

For å holde systemet stabilt og vedlikeholdt over en lengre periode, er det viktig å minimere negative effekter temperatur har på systemet. Måter man kan sikre at temperaturen ikke blir for høy, er ved å ha konstant nedkjølt gjennomstrømming og fordele varmen over en større overflate. Dette kan for eksempel bli gjort ved bruk av sirkulerende smøring gjennom et eksternt pumpesystem. Andre måter kan være ved kjøleapparat eller bruke lokasjon og værforhold som virkemiddel. Dersom man ikke har kontroll på temperaturen, kan komponenter fort slites ut og forbindelser ryke, noe som også kan være farlig for de rundt (68)

2.6.2 Materiale

Mulige materielle valg:

Vanlig stål	Legering av jern og maks to vektprosent karbon. Inneholder elementer som mangan, fosfor og svovel.
Rustfritt stål	Finnes i 5 grupper, med Austenittisk som den viktigste gruppen, som inneholder 16-17% krom, 8-25% molybden, og viktigst av alt, 8% nikkel. Høy korrosjonsmotstand.
Aluminium	Grunnstoff. Veldig tøyelig og lett å formere. Lang holdbarhet kombinert med korrosjonsmotstand.
Jern	Grunnstoff. Magnetisk. Reagerer med oksygen og vann i lufta.

Vårt valg, **rustfritt stål**, er for å unngå mulige rustskader som vil skade innretningen i det langsiktige. Det er mange forskjellige varianter av dette materialet, så det som gir best mulige resultatet velges etter hva vi har råd til.

De vanligste typene er: **A1**, **A2** og **A4**, hvor bokstaven **A** står «austenittisk» (73)

A1	Enklest å maskinere.
A2	Rustfritt, består av en legering av krom og nikkel. Effektiv motstand mot korrosjon i mange miljøer.
A4	Syrefast, legering består av molybden og krom. Høyest motstands-evne mot korrosjon.

Rustfritt stål deles opp i to hoved grupper:

De forholdsvis billige **kromlegerte**, og dyrere **krom-nikkellegerete**.

Austenittisk rustfritt stål klassifiseres som **AISI 200-** og **300** grupper. **300-serien** er krom-nikkel legeringer, **200-serien** står for komposisjoner med *Mangan (Mn)* eller *Nitrogen (N)*, i stedet for *nikkel*.

Det har blitt bestemt å gå for **rustfritt 18/8 stål, type 304** som materiell for designet, for å unngå unødige langsiktige problemer, som for eksempel *galvanisk korrosjon*, men også andre årsaker til korrosjon. Betegnelsen **(18/8)** står for **18% krom** og **8% nikkel**. *Galvanisk rusting*, skjer når to ulike metaller kommer i kontakt med hverandre mens de er omgitt av

elektrolytt. Følgende som skjer er at det mest uedle metallet vil løses opp elektrokjemisk, mens det edlere metallet får en reduksjonsreaksjon på overflaten.

A4 legeringen kan stå imot alle former for korrosjon, inkludert galvanisk, pga. molybdeninnholdet. Inkludert er også ypperlige kryogeniske evner og toleranse for høye temperaturer.

Type 304 rustfritt (18%-20% krom og 8%-10.5% nikkel), også kjent som «**18/8 stål**» er den mest vanlige typen som brukes. Innretningene vil skjæres ut fra en solid blokk med **18/8 rustfritt stål** ved bruk av CNC maskin.

Materialets mekaniske egenskaper til **Type 304** rustfritt stål (62,62).

Strekfastheten	304 N/mm ²
Flytegrensen	215 N/mm ²

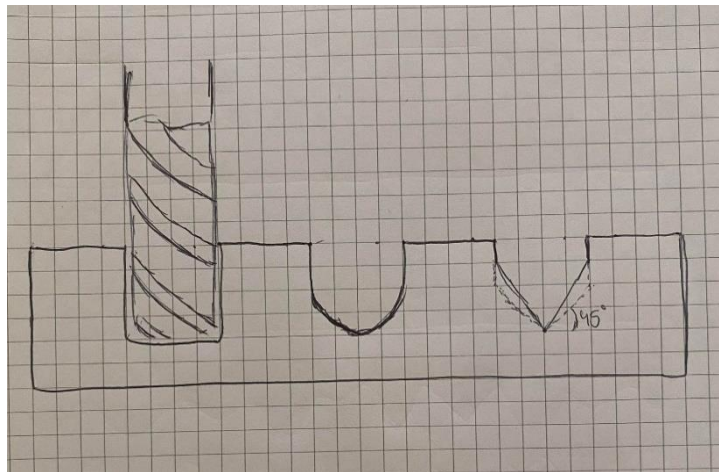
2.6.3 CNC maskin

CNC maskiner kommer i flere varianter, men vi skal holde oss til en av de mest vanligste variantene, som fokuserer på fresing. Disse maskinene kommer med konfigurasjoner som benytter normalt fra 3 til 5 akser (74). De kan fjerne overflødig materiale, lage former spesifisert av designeren, og hull, med gjenger hvis ønskelig.

Liste over noen tilgjengelige CNC endestykkene for fresen.

Hovedverktøyene i vårt tilfelle er:

1. **Endefresere** (til venstre), som brukes for å fjerne hoveddelen av materialet, og til å lage hull uten gjenger. Disse drillene variere i størrelse, avhengig av mengden man ønsker å fjerne.
2. **Kule bits** (midten), til å lage kurvede overflater. Disse vil bli brukt til å lage utdypninger til tetnings-materiale som O-ringene.
3. **V-bits** (til høyre), fungerer som chamfer og brukes til å lage skråvinklede kanter, eller innrisser i overflaten, (noe som ikke er relevant i dette prosjektet). Formen gjør det også mulig å lage utskjæringer hvor firkant formede tetninger skal plasseres.



Figur 2.10 tilgjengelige CNC endestykkene for fresen.

Grunnen til at CNC maskin er en svært ønskelig produksjonsprosess, er systemets helautomatiske funksjonalitet, kombinert med stor nøyaktighet og elegante bevegelser. Sluttproduktet etter en CNC produksjon vil ofte være tilsvarende likt det man har tegnet (75). Sammenlignet med en 3d printer, vil CNC maskinen fjerne materiale, i stedet for å bygge det

opp. Formene CNC kan lage er derfor mer begrenset enn en 3d-printer, men gir fortsatt høy design frihet og styrke i forhold.

(75)

Sammenlignet med annet produksjonsmaskineri, så er CNC maskiner favoritt valget for prosjekter som krever presisjon, effektivitet og høy kvalitet. Det store utvalget av verktøy som brukes, er en av grunnene til at maskinen er så allsidig. For at produksjonen skal foregå uten problemer, og oppnå det forventede resultatet, er det noen betingelser alle verktøy må oppfylle for å kunne brukes (76):

- sterkere enn materialet det bearbeider
- Styrke og seighet, til å stå imot skjærekrefter, vibrasjoner og støt for å unngå flising av verktøyet.
- Varmebestandighet til å takle varmen fra fresingen.
- God slipeytelse, god varmebehandling, god sveiseytelse og høy ytelse i produksjon.

2.6.3.1 *CNCs begrensninger*

CNC har store fordeler når det kommer til presisjon, kostnads- og tidseffektivitet, men det er også andre, mindre positive sider, som (77):

- Oppsettet er kostbart
- Krever erfarne operatører.
- Vanskelig å vedlikehold
- Trenger stor plass og gode forhold

Slutt produktet kan også kreve noe videre bearbeiding før det brukes. Videre, CNC kan ikke skjære i vinkler. Arbeidsstykket må ligge vinkelrett i forhold til skjærverktøyet, siden skjæringen **kun** kan arbeide i en vinkelrett retning. At CNC jobber fort, og med stor presisjon, er et velkjent faktum. Men tiden maskinen vil bruke på å fullføre produktet, kommer an på variabler som materialets egenskaper, redskapet/ene som skal brukes, skjærehastigheten, antallet rpm og flyten av kjølevæske. Intrikate detaljer er også en begrensende faktor. Jo mer intrikat prosjektet/prototypen er, desto lengre tid vil det ta maskinen å fullføre hele prosessen.

CNC kan kun bruke et verktøy omgangen. Programmeringen sier også når maskinen skal stoppe så verktøy kan skiftes. Så må operatøren gi klarsignal til maskinen om å fortsette. Laging av prototyper i et eksperimentelt stadium, og produkter som krever høy presisjon, kombinert med lang holdbarhet, er hovedbruksområdet for CNC. Samt muligheten for modifisering ved et senere tidspunkt hvis ønskelig.

3 Metode.

For dette kapitlet, gås gjennom hvilke metoder som ble brukt for å samle informasjon, hvordan teorien ble brukt, hvordan konklusjoner ble tatt og hvordan alt skal bli satt sammen.

3.1 Datafangst og informasjonskilder.

Før designprosessen begynte, var det viktig å vite nødvendig kunnskap for å lage et godt produkt. Det relevante var å vite hvilke kriterier vi måtte overholde, og hvilke komponenter vi burde kjøpe på nett.

Komponenter kjøpt på nett ble O-ringer, SKF forseglinger, hjullager og lastsensor. Disse ble lest godt opp på, og beregnet av tabellverdier, og sammenlignet med andre produkter for å finne den best tilpasset motoren og vårt design. Hver komponent ble evaluert mot andre lignende komponenter, før det beste alternativet ble tatt med videre til det endelige designet.

Kriterier ble funnet av oss selv og mer erfarne personer rundt oss. Blant de som ble funnet av oss selv var dimensjoner rundt sensorfestet, festemetode til motoren og hvordan lageret skulle ligge i systemet. Av andre vi spurte ble det funnet kriterier som dimensjoner, hvordan systemet må festes til motoren og hvordan alt burde festes sammen. Dette blir mer sett på senere i metoder og resultater.

Innhenting av informasjon har hovedsakelig skjedd fra kilder på nett, pensumhefter eller personer på NTNU. Kilder på nett har vært gode for detaljerte beskrivelser av tilpasninger, dimensjoner og toleranser til komponenter. Disse har i flere tilfeller blitt gjort om til CAD-fil (Computer Aided Design – fil), for å sammenlignes med resten av systemet i 3D.

For eksempel rullelager var viktig å bestemme relativt tidlig i designprosessen. Alle andre dimensjoner i systemet ble bestemt etter størrelsen på lageret. Det gjorde det også mulig å holde kontinuerlige beregninger fra start av.

3.2 Begrensninger og rammer

Begrensningene satt til oppgaven har vært viktig for å definere hvilke rammer vi må holde oss innenfor. Dette tydeliggjør ønsket tidsforbruk på ulike faser, og hjelper til med å begrense

valg for oss å jobbe videre med. Av disse begrensningene har det blitt laget en brukerkravspesifikasjon og produktkravspesifikasjon for det endelige produktet. Disse skal integreres inn i systemets funksjonalitet og for produksjonsprosessen av riggen.

3.2.1 Brukerkravspesifikasjoner

Bruker	Brukerkravspesifikasjon
Sluttbruker (prosjektveiledere)	<ul style="list-style-type: none"> • Enkel å sammensette, og demontering for vedlikehold • Sikkerhet til brukeren. Spesielt fordi høy rotasjonshastighet brukes, hvor roterende deler kan rive med seg ting • Alle kostnader skal godkjennes av veileder først
Funksjon	<ul style="list-style-type: none"> • Kan håndtere langvarig bruk for utførelse av destruktivtesting, og AE for data å hente data. • Håndterer galling, utmattingslitasjer, fretting og tribokjemiske feil • Skal greie å sette høyt last på forsøkslager
Produsent (studentene)	<ul style="list-style-type: none"> • Den kan være produsert gjennom NTNU, med noe innkjøp hvor det er nødvendig • Endelige dimensjoner godkjennes av både produsent og sluttbruker
Materiale og produksjon	<ul style="list-style-type: none"> • Kostnadene til produksjon av designet må holde seg innenfor budsjettets grenser • Ingen av delene kan overstige en bredde på over 40mm • Vi må forholde oss til det materiale som er tilgjengelig på verkstedet, men kommer mest sannsynlig til å kreve at det er stål • Materialet håndterer testmiljøet definert av sluttbruker

3.2.2 Produktkravspesifikasjoner

Beskrivelse	Skal	Bør	Merknad
-------------	------	-----	---------

1. Funksjon

Sette høy last på lager	x		450 kg (maks for sensor)
Bevegelsesfrihet for lager		x	Ingen hindring langs kraft vektor
Sirkulerende smøring	x		Mulig å bytte smøring, pumpen håndterer smøringstypen
Sentrering til motor		x	For sikkerhet og funksjon
Beskytte aksel til motor	x		For å kunne bruke motoren senere
Samle data av alt som skjer i systemet	x		For videre forskning og hva systemet er laget for
Tetning og pakninger	x		Forhindre lekkasjer under drift, SKF-pakninger har også egne spesifikasjoner

2. Miljø

Være korrosjonsbestandig		x	Variasjonen og forurensningen i smøringene kan forårsake korrosjon
Ha dreneringsmuligheter		x	Stor sannsynlighet for søl av smøring
Tiltak for å redusere støy eller informere andre om støy		x	Det er viktig å passe på egen hørsel og andre sin

3. Fysiske dimensjoner

Maks bredde på 40mm		x	Ble endret mot slutten til «bør» etter endring av materiale tilgjengelig
Hull til motorfeste (konsept 2)	x		D = 130mm for å kunne festes til motor, utnytter motor flensen
Riktig toleranser	x		Har betydning for at delene passer sammen, og produksjon
Enkel sammensetning	x		Utførelse for hånd, og noe bærbarhet

4. Kostnad til produksjon

Holde seg innenfor budsjettet	x		Ikke overskride de midlene som er tilgjengelig
Gjøre delene enkle og billige å produsere		x	Billigere produksjon

5. Levetid og vedlikehold

Lang levetid		x	Bør holde seg lenge nok til utførte tester er gjennomført
Periodisk vedlikeholds sjekker	x		Skal sjekkes for å se om riggen tilfredsstiller kvalifikasjoner for innsamlet data
Enkelt å bytte slitte deler		x	Simpelheten til bytting av deler kan gå på bekostning for økt sikkerhet
Rengjøring mellom hver test	x		Utføres for testing og datainnsamlingens skyld.

Designkriterier

Designet hadde under designprosessen visse kriteriet som måtte overholdes. Dette var for å sikre en raskere produksjon ved å gjenbruke materiale tilgjengelig på verkstedet, og for at funksjonen i alt skulle samsvare bra med sensorene brukt.

En av de mer betydningsfulle kriteriene som kom underveis i designprosessen, var å overholde maks tykkelse per del på 40mm. Dette gjorde at konseptavgjørelser måtte endres, og at videre designavgjørelser ble vanskeligere å avgjøre. Den nye tykkelsen ble overholdt, selv etter ny informasjon om materiale kom. Vi kunne i utgangspunktet dimensjonert delene større etter dette. Informasjonen kom etter designet var ferdig laget og mot slutten, så vi opprettholdt derfor designet som det i utgangspunktet var til produksjon.

Andre dimensjoneringskrav kom av sensorene. Hele flatene i kontakt med sensorene skulle bli dekket. Dette satte et minste dimensjoneringskrav på lagerfeste og sensorhusene, som er de i kontakt med sensorene. Den minimale bredden av delene kunne ikke være mindre enn diameteren til sensorene

Et av de største utfordringene med designprosessen, har vært å forholde seg til festehullene i flensen på motoren. Disse punktene har en avstand på 110mm fra hverandre som ikke kan endres. Konsekvensen av festepunktene har vært at alt må tilpasses og forholde seg rundt disse hullene.

Et viktig moment i designet, har vært at sikkerhet alltid må overholdes. Derfor er det sammensatte systemet mest mulig lukket for å redusere potensielle farer. Som for eksempel roterende deler eller oljesøl med høy temperatur.

For alle sensorene har det blitt satt et ønske at de ikke skal bli dekket av smøring under testing. Derfor har stort fokus vært på pakninger som oppnår dette. I tilfelle det fortsatt skulle komme oljesøl, har det også blitt satt av plass for dreneringshull og panne under.

3.3 Planlagt produksjon.

Produksjonsmetoden CNC, er valgt for å oppnå de spesifikasjonene satt for funksjoner og geometrien til riggens deler. Produkt kommer til å være unikt, så vi kunne se bort fra masseproduksjonsteknikker.

Delene i riggen har blitt dimensjonert med vekt på toleranser og pasninger. CNC kontrollerte maskiner har derfor blitt sett på som det mest fornuftige alternativet for oss.

Det vil ikke bli produsert deler i andre materiale enn metall. Forseglinger og sensorer blir kjøpt på nett.

I tillegg til de opprinnelige konseptene av riggen, ble det laget et konsept for stativ til motoren. Motorstativet skulle bli produsert med tilgjengelig materiale på NTNU. Dette ville være materiale som ikke skulle brukes. Det foretrukne valget, var materialet stål innen størrelsen 20 x 20 x 20mm. Formen på tverrsnittet skulle helst være firkantet, men andre former kunne bli akseptert.

Stål ble valgt det som det foretrukne valget på grunn av styrken, tilgjengeligheten, og for å unngå potensielle forurensninger som avslippt flis fra treverk. Produksjonen av stativet skulle bli gjort ved kutting og sveising av oppmålt materiale.

Målet med designet var å sikre at motoren sto stabilt, men også hadde rom å bevege seg i tilfelle hardere slag og vibrasjon. Vibrasjoner i motoren ville være viktig å dempe mest mulig, både for riggens helse og for redusert støynivå.

Måten vibrasjonene fra systemet skulle dempes, var ved å tilføre gummi i utsatte flater. Flatene ville vært mellom motor og stativ, og stativ og monteringsbord. Gummien er også med på å gi god toleranse for stabilisering og bevegelse for motoren. Ved hardere slag absorberer gummien godt energien og muligens retter opp motoren til riktig posisjon igjen fra roll, pitch og yaw bevegelser (78).

3.5 Utførelser

3.5.1 Bruk av pakninger/forseglinger

3.5.1.1 O-ringen.

O-ringer er en veldig vanlig applikasjon for tetting til ulike maskiner mellom utsatte flater. Det er en isolerende komponent både for statiske og dynamiske deler. O-ringer finnes i forskjellige former, størrelser og stivheter. I det ferdige produktet har o-ringer en veldig sentral rolle i tetting og stabilisering (71).

3.5.1.2 Bruken av O-ring.

O-ring er en meget vanlig komponent brukt til mange forskjellige formål. Ettersom O-ringer brukes veldig mye, har det blitt utviklet og optimalisert i stor grad. Derfor finnes det alle slags størrelser, tykkelser, stivheter og former for ringene. Informasjonen man kan hente rundt installasjoner, anbefaling til form og størrelse og hvordan det kan brukes er også veldig stor.

For riggen har det vært utfordrende å finne isolering som ikke er i konflikt med lagerets deformerende bevegelsesretning. En isolering som i stor grad er elastisk har derfor vært ønskelig. Ved høy elastisitet er bevegelsesfriheten til lageret fortsatt høy, og lett å beregne motstanden til. En O-ring i klassisk design har den ønskede funksjonen til å oppnå disse kvalifikasjonene. Fordi det finnes så mange typer, kan modifisering i senere tid lett gjennomføres hvis ønskelig.

3.5.1.3 Plassering av O-ring

I riggen skal O-ringen bli plassert der lageret står fritt i forhold til resten av systemet. Dette er lagerfestet mellom husene, der det er to flater som trenger tetting. Det skal bli laget en egen form for O-ringen i hovedhuset og lokket, slik at den sitter godt og kan tette mot lagerfeste.

3.5.1.4 Montering og utbytting av O-ringer

Monteringen av O-ringen skal bli gjort i henhold til anbefalinger for installasjon. Vanligvis settes O-ringer i en egen «hule» som gir akkurat nok klarering til at den kan tette bevegende deler. Dette er ikke ønskelig i vår rigg, ettersom den ikke har noe bevegelsesfrihet i hulen. Derfor er ikke designvalg gjort helt etter anbefalingene, men blitt brukt som veiledning og kalibrering til valget.

3.5.1.5 Deformasjon av O-ringer

Man kan finne hvilken motkraft kompresjon av O-ringer medfører. For å finne hvilken motkraft man kan forvente, kan man se i tabeller som sammenligner størrelsen, hardheten og kompresjonsgraden til ringene. Dette kan være relevant å vite for å oppnå komprimering av ringene, uten at kraften blir for stor til at det blir metall mot metall kontakt.

3.5.1.6 Tetninger

3.5.1.7 Pakning.

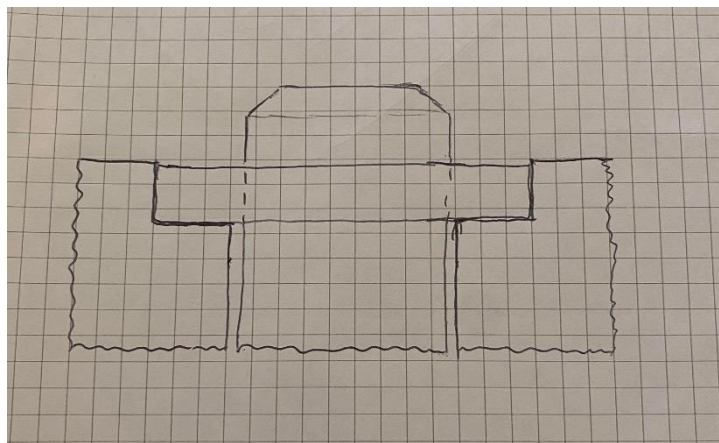
SKF forsegling skal brukes for å tette hele systemet for lekkasje rundt sleeveen. Ønsket er at den skal beholde smøringen i systemet inne, og ugunstige forhold i luften ute.

Valg av rett pakning er ikke enkelt. Utvalget av pakninger er stort, både for størrelser, materialer og former. Valg av pakning må ta forbehold til variasjoner i nøyaktigheten på akslingen, ruheten på akslingen, trykket og tilstanden til smøringen og temperaturen rundt. Materialene og formen på forseglingen kan være spesifikt egnet for en smøring og driftsforhold, men egne seg dårlig i andre (8).

Måten pakningen holder smøringen inne i systemet er ved an «pumpe-effekt» som pakningen har ved riktig bruk. Derfor skal etter riktig montering og det SKF lover, omtrent all smøringen forbli i systemet og forhindre merkbar lekkasje (79).

For å oppnå alle kravene som er satt SKF forseglingen i vårt system, er planen å kjøpe flere forseglinger i materiale FKM (Fluor rubber) i ulike former for best tilpasning og funksjon.

Monteringen av forseglingen kan se ut slik som figuren under viser



Figur 3.1 SKF forsegling mot hus

Figuren 3.1 skal illustrere en SKF forsegling presset inn mot veggen av et hus, og tette rundt en sleeve.

Noe som kan være relevant å vite før montering og bruk av forseglingen:

Sleeven trenger i utgangspunktet ikke spesiell modifisering for montering av forseglingen, men burde kanskje dekkes over skarpe kanter som kan skape sprekker i gummi.

Før montering er det viktig at alt ser riktig ut, uten noen form for ujevnheter eller slitasjemerker. Dersom det kommer slitasjemerker underveis, kan dette tyde på feil sentrering av sleeveen, riggen eller temperaturen mellom dem. Eller at pakningen ikke tåler smøringen, og derfor må erstattes med en annen type.

Pakningen vil bli plassert i et sylindrisk hulrom rundt sleeveen i hovedhuset, tilpasset deres dimensjoner. For å sikre god og sikker montering, vil jevn inn pressing bli gjort med en hammer og kraftfordeler. For eksempel kan en stiv skive brukes som kraftfordeler. Om trykket ikke blir fordelt jevnt, er det en sannsynlighet at den sitter skjevt på. En konsekvens av dette kan være den tetter dårligere, og at smøring vil renne ut av systemet.

I pakningen er det en avstiver i form av en fjær som gir en konstant friksjonskraft. Retningen forseglingen monteres skal helst være så den hule siden av forseglingen er vendt mot den sirkulerende smøringen (8).

3.5.2 Utførelse av krympepasning for Sleeveen.

Helt på starten var ikke krympepasning noe prioritert i avgjørelsen for feste av sleeveen. Krympepasning ble vurdert som en mindre fordelaktig festemetode sammenlignet med kald presspasning. Med krymping kan det bli vanskelig å erstatte sleeveen, noe som først var ønskelig å kunne gjøre. Nå har sikkerheten/tryggheten rundt sleeveen fått økt fokus. For å ikke ta noen unødvendige sjanser, skal kilen på akseltappen bli tatt av, og sleeveen krympes på. Ved krymping vil også produksjonen av sleeveen bli enklere, og sentrering av sleeveen som er viktig, vil være mer sikker.

En annen fordel med krymping av sleeveen, er avpressingskraften sleeveen får fra akselen. Med kald utførelse som på-pressing av sleeveen, ble det beregnet en nødvendig på-pressingskraft på 26 kN, for at den skal sitte trygt på. Dette er en utførelse som ikke kan bli gjort for hånd. Ved å varme opp sleeveen, unngås selve på-pressingen. Ved å varme opp sleeveen til den har ekspandert nok til å overkomme toleransene til akslingen, kan delene “sklis” på hverandre før det krympes.

Montering med varme kan bare vare i noen sekunder før sleeveen begynner å trekke seg samme. Dette kan bli et problem hvis sleeveen har avkjølt seg mye før den får dekket hele lengden av motortappen (80). Sannsynligheten for dette skjer er liten, men det er viktig å ikke holde arbeidstiden lenge. Frysing av motortappen kan også være et alternativ brukt i tandem med oppvarmingen av sleeveen for å øke hullklaring og sikrere monteringen.

I vårt tilfelle, er krymping spesielt nærliggende fordi sleeveen ikke skal demonteres like ofte som lageret. Den blir derfor sett på som en mer “permanent” løsning til motoren, inntil man gjør en ny prosess for å ta den av igjen. Dette krever innkjøp av bærbare utstyr som kan påføre varme på sleeveen mens den sitter på motortappen.

3.6 Kraftpåføring

Kraft alternativer

For å utmatte lageret, skal lageret bli utsatt for en konstant normalkraft. Vi har derfor vurdert ulike metoder for hvordan en konstant og stor nok kraft normalkraft kan oppnås, samtidig som det helst skal være mulig å regulere. Metodene stod mellom pneumatikk, hydraulikk, skrue og elektrisk aktuator. Under har det blitt lagt til en vurderingstabell med faktorer for grunnlag til det endelige valget. Scorene har blitt bestemt sammen i gruppa med individuelle vurderinger, om de ulike faktorene. Som man kan se i scoren under, er det uavgjort mellom skruer og aktuator, men det endelige valget falt på skrueløsningen. Dette var fordi den var mest tilgjengelig, og er enklest å inkludere i vårt system.

	Pneumatikk	Hydraulikk	Skruer	Aktuator
Enkel å implementerer	-1	-1	1	0
Trenger ekstra utstyr	-1	-1	0	0
Pris/kostander	0	-1	1	0
God og nok krafttilførsel	1	1	-1	1
Kontrollerbarhet	1	1	0	0
Rengjøring	1	-1	1	1
Støy til nærmiljøet	-1	0	1	1
Sum	0	-2	3	3

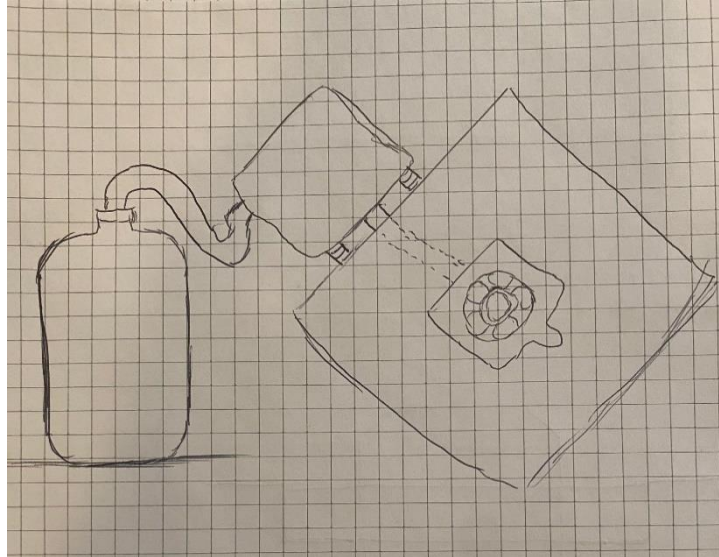
Figur nr. Vurdering av normallast alternativene.

Pneumatisk sylinder.

Pneumatikk er basert på å utnytte et kompresjonstrykk fra gasser. Dette kan gi en konstant kraft og er målbart, men kommer med ulempen av at nødvendig overflateareal til sylindren må være høyt nok i forhold til lufttrykket ($F = P \times A$, her er F kraft, P trykk og A tverrsnittet til stempelet i sylindren). Noe som kan gjøre delen ganske stor.

Systemet er lett og bærbart, men tar opp relativt mye plass fra aggregatet, kompressoren, slangene og eventuell rigg som må kjøpes eller lages for den. Kompliseringen av at det krever eget stativ oppsett, eller stå på en spesiell måte på husene, kan gjøre det noe dyrt og vanskelig å jobbe med (81).

Det pneumatiske oppsettet er relativt rent fordi det ikke er noe olje søl, men kommer med ulempen av høyt trykk i systemet og mulig lekkasje av luft mellom slangene (82).



Figur 3.2 Tegnet figur av pneumatisk oppsett.

Hydraulisk sylinder.

Hydraulikk er i prinsippet det samme som pneumatikk, men utnytter væske som et kompresjonsmiddel mot stempelet. Væsken er ofte en form for olje som ikke er kompressibelt.

Systemet gir konstant kraft, er målbart og er enklere å kontrollere i sammenligning med pneumatikk. Det er også litt tryggere, ettersom man slipper det høye trykket i slangene til pneumatikk. Metoden kan potensielt nå større krefter, og er av de fire metodene den med høyest oppnåelig kraft (81).

Oppsettet er stort og tungt, og kommer med potensiale for oljesøl som gjør at den kan trenge mye rengjøring og vedlikehold. Det er også noe mer kostbart sammenlignet med pneumatikk ettersom systemet bruker relativt dyre deler og i tillegg væsker for å fungere (83).

Skrue med gjenger.

Planen er at normallasten påføres ved tilstramming av en skrue mot gjengene i hovedhuset. Kraften oppnådd fra skruen mot lageret skal måles og kontrolleres med bruk av en lastsensor mellom skruen og lagerfeste. Alternativt ide er å bruke en momentnøkkel til å strammeskrue, som samsvarer med lastsensorens verdier.

Systemet er den simpleste i sin metodikk i forhold til resten, men er noe vanskeligere å få kontrollert konstant kraft. Dette skyldes at det er rotasjonsfrihet for skruen, ettersom vi ikke klarte å finne en god løsning på å låse den fast i ønsket posisjon. Det har blitt tenkt løsninger rundt bruk av mutter, men å få tilgang på innsiden av hovedhuset under testing har ikke vært ønskelig, så dette ble forkastet. Det er også utfordringer ved låst posisjon ved ekspansjon av materiale under drift. Planen ble til slutt å påføre skruehode et konstant moment, som skruen må motvirke for å løsne opp i kraften på lageret. Dette burde være en enkel og sikker måte å holde kraften fra skruen konstant.

Skruen kan inkluderes som en del av riggen, og trenger ikke noe ekstra utstyr utenom en skiftenøkkel for å stramme. Dette skal være tilgjengelig ellers i verkstedet, eller kjøpes inn etter behov. Det gjør løsningen billig og bærbar som en ekstra fordel.

Lineær elektrisk aktuator.

En lineær aktuator bygges på det samme prinsippet som beskrives i skrue-løsningen over. Forskjellen er at metodikken inkluderer en drivmotor som kontrollerer og kjører stempelet ved gjengene.

Systemet gir konstant kraft og åpner muligheter til noe større og like krefter i forhold til skrue-løsningen. Den er normalt noe svakere i forhold til pneumatikk og hydraulikk, men skal passe fint til det som skal prøves for i vårt system. Aktuatoren er laget kompakt, men kan bli noe stor, tung og kompleks å feste ordentlig. (81).

Monteringen av aktuatoren kan komplisere designet. Hvis det monteres direkte på riggen, må konseptet tilpasses til dette. Alternativet er da å gjøre det eksternt, men dette krever innkjøp eller konstruksjon av eget stativ. Vi ønsker ikke dette i første stadiet på grunn av den økte kompleksiteten (84).

3.6.1 Den endelige normallasten - skrueløsningen.

Til å påføre en normallast på lageret, er det planlagt å bruke en last skrue. Denne bruker kun torsjonsmoment og friksjonen i gjengene som kraftbidrag. Lastmengden kan enkelt beregnes med en lastsensor eller moment nøkkel. Lasten vil naturlig virke normalt på lagerfestet.

Skrueløsningen tenkes å være fingjenget. Dette øker nøyaktigheten på kraftpåkjenningen, samt enkelt enda høyere laster enn for grovgjenget. Denne økte nøyaktigheten med fingjenger kommer av økt omdreiningsrate for forflytning i motsetning til grovgjenger. Med en økt omdreiningsrate for forflytning, vil ikke omdreininger på skruen gi like store kraftutslag på lageret som ved grovgjenget. Formelen for aksial kraft av skruen er vist med formelen under (Maskindeler 1 side 8.9) (19):

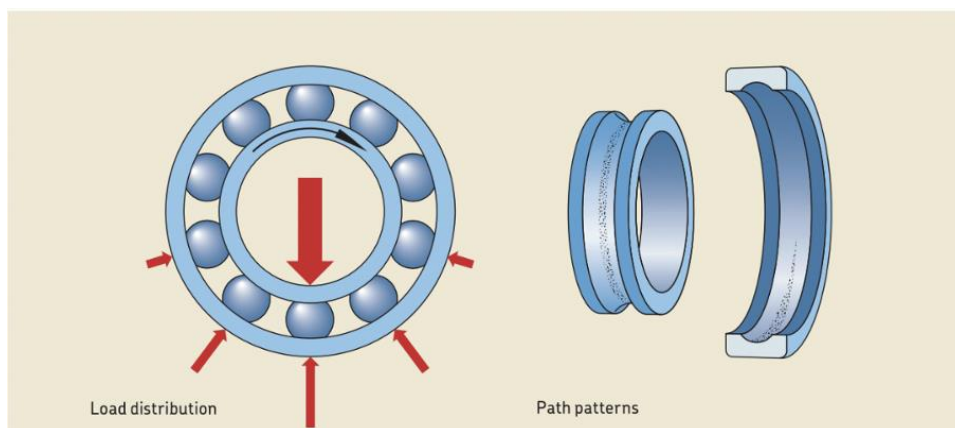
$$T_t = F_a \cdot \tan(\alpha + \epsilon_1) \cdot \frac{d_2}{2}$$

Som man kan se av formelen, er det torsjonsmomentet (T_t), stigningsvinkelen (α), friksjonsvinkelen (ϵ) og midt-diameteren til skruen (d_2), det som avgjør aksialkraften fra skruen.

Redskapet til å holde skruen fast er enda ikke bestemt.

3.6.2 Skruen i forhold til last sensor

Vi tenker at lastsensoren ikke være i direkte kontakt med lageret. Å ha sensoren i direkte kontakt med lageret, kan bidra til uberegnelige spenningskonsentrasjoner i ytterringen. Sensoren skal derfor være et mellomledd til lastskruen og lagerfeste under. Målet er at lastskruen vil spre kraften jevnt over lastsensoren før det når lagerfestet. Derfor skal “knappen” være opp mot lastskruen, og flaten ned mot lagerfestet. På denne måter tror vi det blir en mest mulig jevn kraftfordeling i lagerfestet, inntil det når forsøkslageret. Dette vil være tilnærmet likt som at lageret opptar last fra akselen. Bildet under viser kraftfordelingen vi prøver å oppnå



Figur 3.3 Ønsket distribusjon (8).

Ønsket lastdistribusjon i lager. Kraften er den samme jevnt fordelt langs ytterringen, som lasten fra aksel

3.7 Design av konsepter

3.7.1 Konseptutvikling

I løpet av denne oppgaven har tre forskjellige konsepter kommet frem, med det samme formålet: samle inn AE-data. Forskjellen mellom konseptene har i all hovedsak vært hvordan de ble festet til motoren. Et av konseptene var ment for feste til 'arbeidsbordet', det andre for feste direkte på motoren rundt flensen og det tredje for å bli festet på sleeveen. Til slutt ble det andre konseptet valgt til videre utvikling, etter avstemning av gruppen sammen.

Det ble gjort flere designendringer av de ulike konseptene frem til konseptevalueringen. Før konseptevalueringen ble ikke konseptene inspirert av hverandre. Målet var at vi ikke skulle vite noe av hva andre har tenkt eller gjort på starten. Dette var for å ha større uavhengighet til personlige meninger og design frihet.

Utviklingen av konseptene kom som konsekvens av ny relevant kunnskap og informasjon rundt begrensinger av designet. I et par tilfeller endret konseptene drastisk fra utgangspunktet etter ny informasjon om begrensninger. Etter at konseptene var ferdigstilt, ble de sammenlignet opp mot hverandre med ønsket funksjon og sammensetting, for så å ta kvaliteter fra hvert av konseptene. Etter dette ble det laget en sammenligningsliste som man kan se evaluering og valg av konsept for videre design utvikling, vedlagt under.

All ny informasjon som endret designvalgene, var henholdsvis designavgjørelser for å redusere produksjonspris, hvordan sensorer skulle brukes, størrelsen på sensorer, hvor nærme sensorene kunne være lageret, tetting av systemet og hvilken bredde de ulike delene kunne ha.

Sluttresultatet av konseptene ble den enkleste, og mest kompakte løsningen vi kunne komme med. Et av konseptene skulle bli tatt med videre for større fokus og utvikling frem til produksjon.

Det er også tatt med konsept for stativet til motoren her.

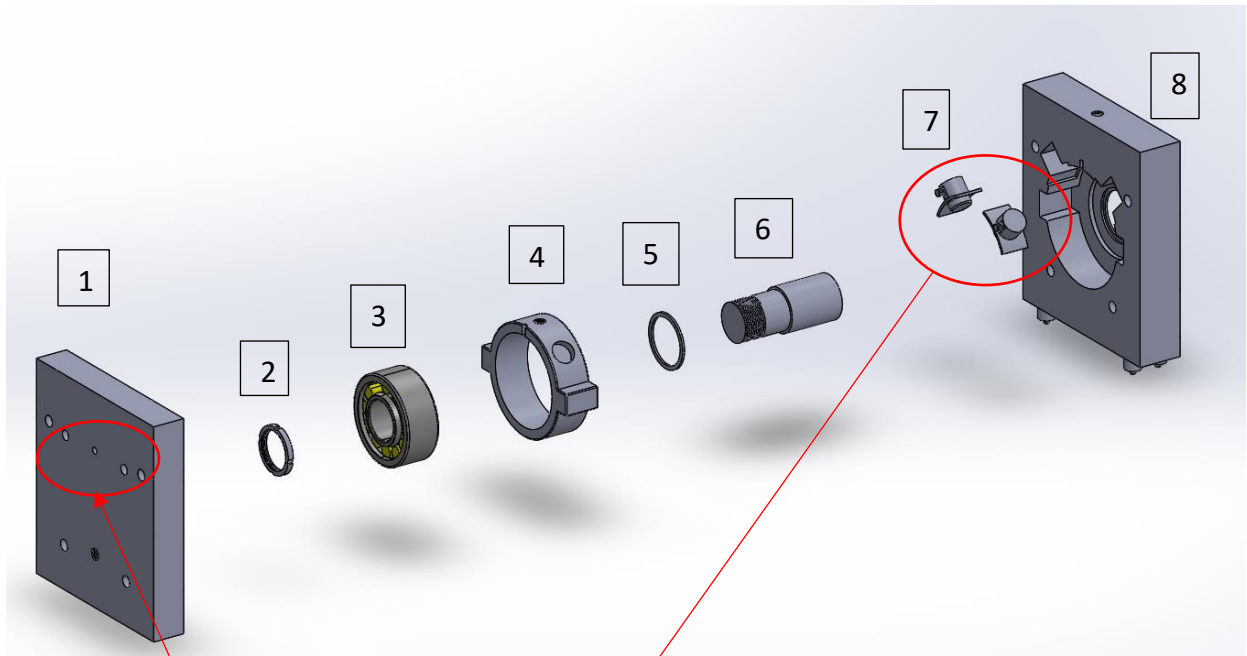
3.7.2 Konseptene

Konsept 1

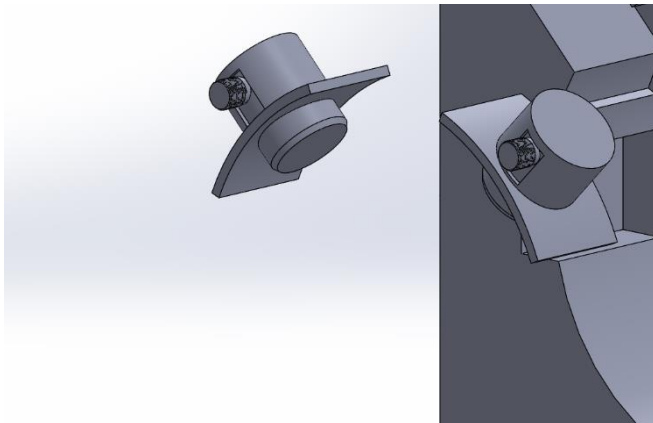
Konsept 1 er basert på at testtriggen skal stå på egenhånd, uavhengig av motoren.

Tankegangen bak dette konseptet er en testtrigg som ikke er avhengig av festepunktene på motorflensen. Riggeren står sikret til bordet, på egen hånd og vil gi naturlig motkraft når bevegelseskruen påfører trykk. Trykket påføres manuelt og skrugjengene vil skape motkraft som følge av trykkøkningen, ved bruk av vektstang prinsippet.

Ulempen er at testtriggen må justeres i forhold til høyden til akslingen på motoren for å være helt sentrert.



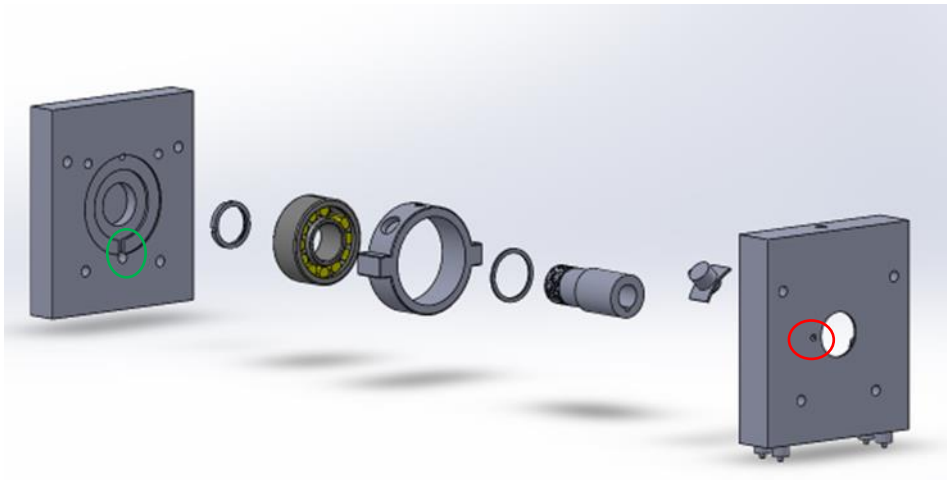
Utgangshull for sensor ledninger.



Bildet over viser akustiske sensorer inn i deksler som sikrer konstant, uavbrutt kontakt med de punktene hvor målingene hentes. Dette skjer ved å plassere springfjærer med lav fjærkraft mellom toppen av sensorene og undersiden av dekseltoppene.

Ledninger til sensorer går gjennom den heldekkende enden av riggen. (1). Dette sikrer at ledningene er helt fri vridninger eller oljer som brukes når riggen kjører. Lageret (3) plasseres inn i huset (4) hvor sensorene plasseres i hvert sitt hull på oversiden. Disse monteres på akslingen (6) som så festes på akslingen til motoren. Forseglingen (5) monteres på akslingen før den festes til motorakslingen.

Lageret vil bli sikret til akslingen ved bruk av lås mutter (lock nut) (2). Med bruk av en lås mutter nøkkel, (lock nut spanner), og SKF tabeller blir sikringen enkel, i tillegg til at demonteringen blir like enkel. Dette er en veltestet og velbrukt metode som er enkel å lære, og lett å bruke.



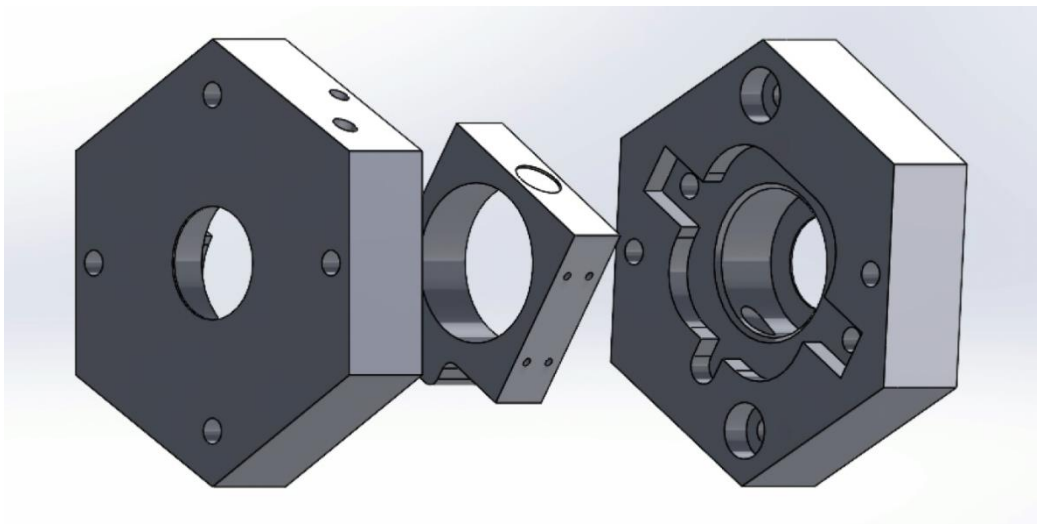
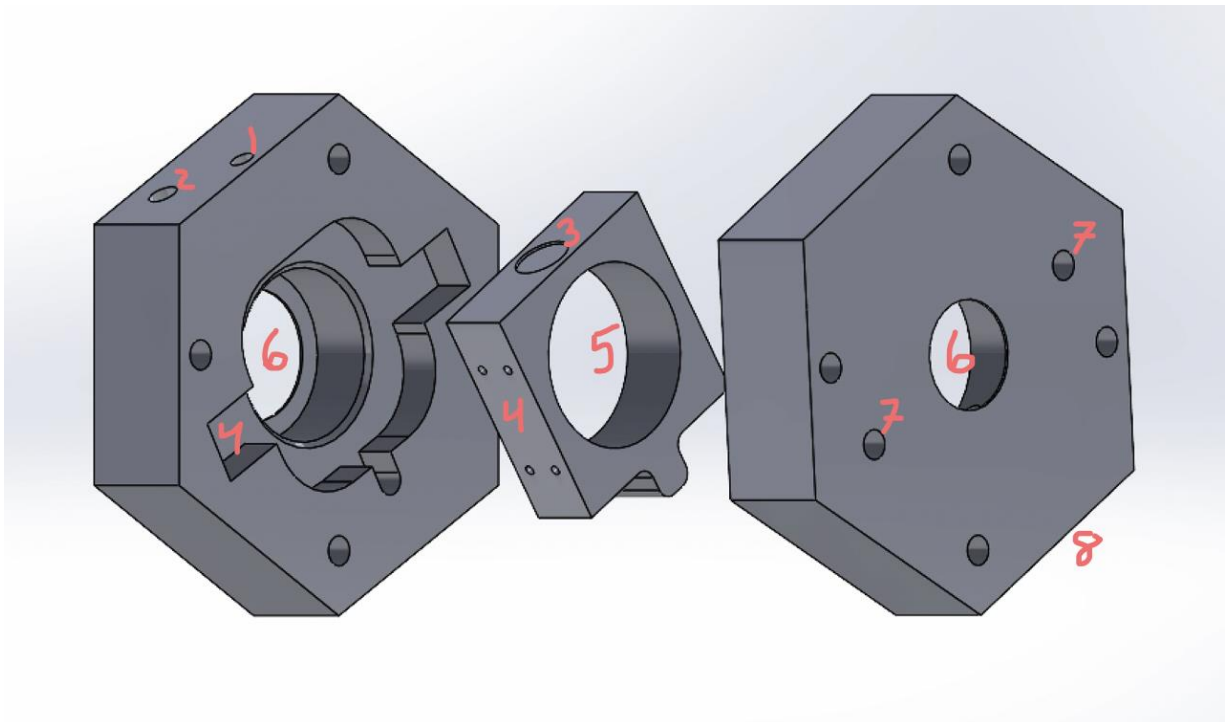
Oljen vil bli innført gjennom en ledning som skrues på testtriggen (rød sirkel, bildet over). Plasseringen gjør at oljen/smøremidlet blir påført direkte på kulene eller rullene i lageret mens det kjører. Drenering skjer gjennom avløpet i den heldekkende enden, (grønn sirkel). Dette avløpet har skrugjenger på den åpne siden, som gjør det mulig å montere av en avløpsslang, eller en avstengning hvis man ønsker å holde oljen inni testtriggen. Etter testen, kan testtriggen plasseres på skrå, og la oljen renne ut på egen hånd, hvis ønskelig av sikkerhets grunner.

Designet ble endret av den hensyn til CNC produksjonen. En av begrensingene til CNC er at det ikke kan skjære i vinkler. Begge hoved delene (1 og 8), ble tegnet etter denne infoen. Den opprinnelige formen hadde rund overside, men dette gjorde produksjonen vanskeligere enn nødvendig, så derfor ble formen endret til kvadratisk.

Konsept 2

Dette konseptet baserer seg på feste direkte til motoren. Festet til motoren blir i konseptet gjort med en gjengestang, som går gjennom flensen på motoren og begge husene. Brukt i konseptet. Ønsket er at sentreringen av husene alene skal skje med innstramming av skruene til motoren.

Konseptet endte opp omtrent som figurene vist under:



En utfordring med dette konseptet var å få plass til alle deler og sensorer innenfor de fire motorfestehullene. Designvalgene har i stor grad blitt tatt for å unngå konflikt med hullene, maksimere rommet og tilegne de funksjonene den skal ha på en enkel og sikker måte. Alle kriteriene som kom underveis, ble overholdt med dette konseptet.

Funksjonene til konseptet er å gi test lageret en konstant kraft ved bruk av skruer, vist i punkt 1. Den skal ha inngang og utgang til smøring, punkt 2 og 8. Den skal ha plass og feste til lastsensor og 2 akustiske emisjonssensorer, vist henholdsvis 3 og 4. Videre er kravet at det skal være plass til lageret, vist som punkt nr. 5. Hullene vist som punkt 6 er ment for inngang og utgang av sleeveen, og hullene vist som punkt 7 er ment for utgang av ledningene til sensorene. En bekymring av sensorene har vært å få ledningene ut til computeren. Ledningene er relativt stive, så en enkel vei ut for ledningene blir gjort med disse hullene.

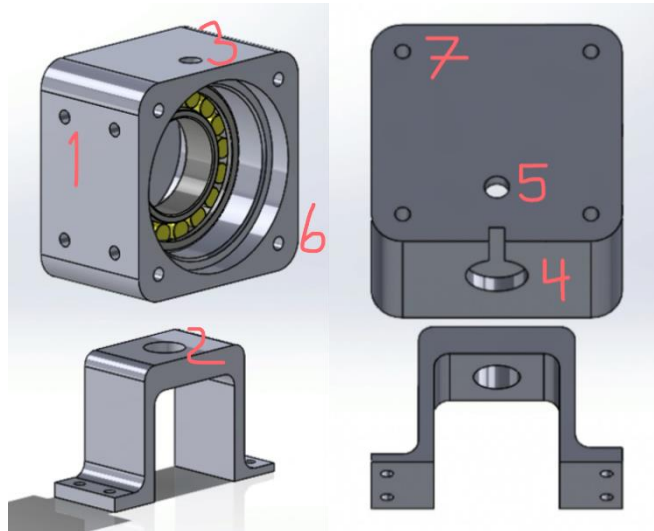
I figuren over blir ikke huset til sensorene og aksel sleeveen vist, som følge av at personen som tok bildet ikke fikk lagt dem med.

Konsept 3

Dette konseptet baserer seg på feste direkte på sleeveen, som igjen er festet til motoren. Sentreringen av dette konseptet blir gjort automatisk av sleeveen, og lastskruen dersom den blir plassert rett under. Hele systemet består av tre deler, "boksen", skruefeste og sleeveen. Dette konseptet skal være den billigste og raskeste å produsere, med forhåpentligvis like bra funksjonalitet som konsept 1 og 2. Konseptet kom sent i designprosessen som konsekvens av ny info om produksjon, og ønske om å få produsert noe i tide.

Systemet fungerer ved at lageret skal «flyte» på sleeveen, med en påpresset «boks» rundt. Boksen vil være festet for begge akustiske emisjonssensorer (en på hver side) nr.1, ha ekstern lastskruemontering nr. 2, inngang til smøring nr. 3, lastsensor nr. 4, utgang til smøring nr. 5 og feste for motstand til rotasjon foran og bak 6 og 7.

Ønsket er at boksen og lageret sammen sitter godt nok til at kraften som påkjennes ikke skaper noen form for vridning. Dette er kanskje den største usikkerheten til hele konseptet, og vært en stor faktor for å unngå dette konseptet.



Evalueringen for det endelige valget av konsept blir vist i tabellen under.

3.7.2.1 Sammenligning av konseptene

Spesifikke produktkravspesifikasjoner	Konsepter:		
	K1	K2	K3
Skal			
Sentrere til motor	2	3	3
Sette høy last på lager	3	3	3
Minimere vridning på lager	2	3	1
Sirkulerende smøring	3	3	3
Minimere motstand langs normallasten	2	2	3
Være robust og stabil	3	3	1
Bør			
Være så enkel som mulig	2	2	3
Snittet	17	19	17

Konklusjonen fra dette diagrammet ble konsept 2, som vist med den med høyest score

3.7.3 Motorstativ

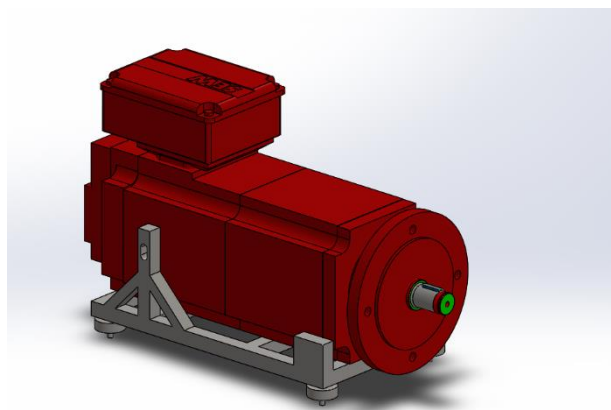
I tillegg til konseptene over har det blitt laget et bærende stativ for motoren. Denne skal sørge for at flensen til motoren ikke kommer i kontakt med underlaget, og at motoren er godt festet til bordet av sikkerhetshensyn. Dette skal også forebygge mot vibrasjonene fra motoren for å beskytte både maskin og bord.

Produksjonsprosessen skal bli gjort på verkstedet i NTNU med helt enkle firkantrør, sveising og skrueforbindelser som ligger tilgjengelig for alle. Dersom denne produksjonen trenger senere modifikasjoner, skal det være enkelt å gjennomføre dette også på NTNU.

Om ingenting av stativet fungerer som den skal, og modifikasjoner ikke fungerer, vil produksjonstiden og kostnaden være neglisjerbar og kan gjøres på nytt senere. Dette vil bare være en ekstra læringsprosess for oss om det blir tilfelle.

Støtte av motoren skal fokuseres under og på sidene av motoren, der festepunkter på motoren er tilgjengelige. Dimensjoneringen av stativet har blitt gjort med grove toleranser, slik at det skulle bli lettere å produsere det selv. Designet er ment å sørge for at minst mulig overflate av motoren blir dekket, slik at mest mulig varme kan unnslippe ut når motoren er i gang.

For å minimere påvirkningen av vibrasjoner fra motoren, skal det festes gummi på utsatte flater. Stativet skal festes med skrueforbindelser til bordet



Figur 3.4 Motor på motorfestet

Figuren 3.3 over illustrerer hvordan monteringen kunne sett ut.

3.8 Drift.

For det ferdige designet kom vi frem til følgende prosedyrer for vedlikehold, sammensetning, oppstart og demontering. Disse er igjen basert på designvalgene som ble innført i riggen, og funksjonskravene som har blitt satt for den.

3.8.1 Sammensetnings prosedyre.

Prosedyren for sammensetning er følgende: (Standard operasjons prosedyre)

Steg nummer	Instruksjon
1.	“Sleeven” varmes opp og monteres på akslingen til motoren, før den har krympet for mye.
2.	"Hoved huset" monteres og strammes hardt til flensen på motoren.
3.	Sett SKF pakning på plass innerst i Hovedhuset. Pass på jevnt press hele veien inn.
4.	Sett O-ringene på plass i sporet på første halvdel.
5.	AE sensorene monteres til “Sensorhusene” uten ledning.
6.	Sensorhusene skrues fast til “Lagerfestet”, en på hver side.
7.	Rullelageret blir presset på sleeven frem til det møter steget på sleeven.
8.	Lagerfestet blir satt på og skjøvet frem til det er over lageret og treffer O-ringen, og lageret treffer steget på sleeven
9.	Sett på plass låsering i sporet på sleeven. Den skal holde lageret inne.
9.	Lastsensoren blir satt på toppen av lagerfeste med knappen opp, og ledninger fra alle sensorer ført gjennom planlagte hull på “Lokket”.
10.	Stram inn last-skruen frem til den når lastsensor og holder den på plass, eller finn alternativ måte å holde sensoren på plass.
11.	O-ring blir satt i sporet på “Lokket”.
12.	Sett skruer gjennom hvert av hullene på lokket. (Alternativt, sett 1mm skiver rundt hver skrue mellom lokket og hovedhuset)
13.	Monter ytterhuset til hovedhuset ved å skru dem sammen etter ønsket tilstramming. (Alternativt, inntil skrivingene er godt presset dersom de blir brukt)
14.	Sjekk en runde visuelt om alt virker greit.

15.	Plasser olje panne under begge delene for å fange opp eventuelle uventede lekkasjer.
16.	Sett slanger til strømmende smøring på plass.
17.	Start alt og tilpass det som måtte være feil.

For demontering følger prosedyren i omvendt rekkefølge. Man burde være forsiktig med temperatur og oljesøl.

3.8.2 Sikker oppstart.

Oppstarten burde være på lav fart med lav kraft for å høre og se om alt virker på plass. Slangene burde sjekkes for tetninger, slik at ikke lageret kjører uten smøring. Dytt litt på riggen for å sjekke om noe virker løst før full testing.

Dersom det kommer en lyd, demonter delene og sørg for at skruene mot motoren er strammet godt, o-ringene er på plass, låseringen er i sporet og at Lokket er likt strammet i alle skruene til hovedhuset.

3.8.3 Vedlikehold

Etter hver testrunde, sjekk tilstanden til eventuelle pakninger eller tetninger. Vises det tegn på slitasje burde det byttes. Sjekk også om deler i kontakt med forsøkslageret blir slitt og burde byttes.

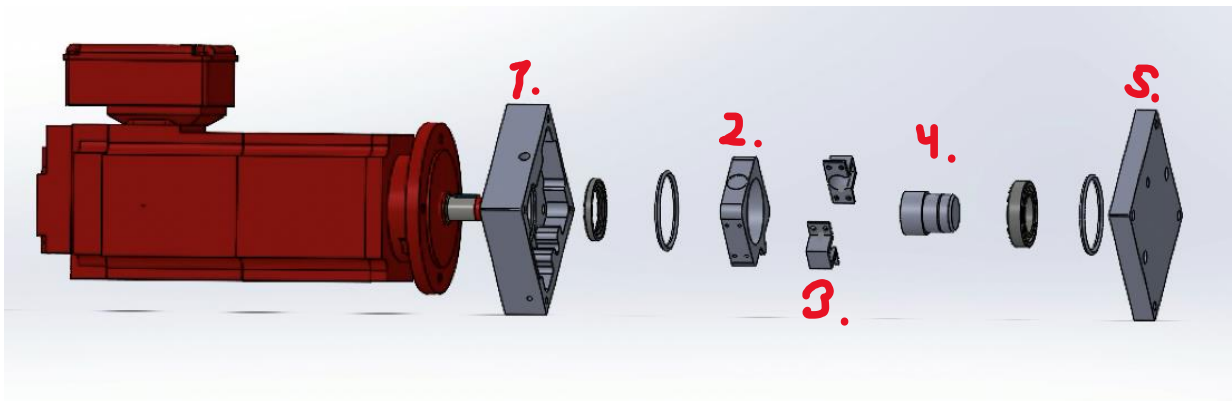
Etter bruk skal enheten tømmes for eventuelle oljer eller andre væsker som har blitt brukt under testing av lageret. Eventuelle rester burde fjernes ved bruk av papir eller noe annet rent. Dette burde gjøres hver gang ved slutten av en test, for å unngå mulig påvirkning til neste test. Enheten skal helst plasseres på et egnet tørt og sikkert sted ved lagring

4 Resultater

I dette kapitlet skal delene i det endelige system gjennomgås.

4.1 Designet

Det endelige designet baserer seg på retting av feil og inkludering av korreksjoner som kom til etter konsept perioden. Designet er av konsept 2, som baserer seg på feste til motoren og består av fem hoveddeler.

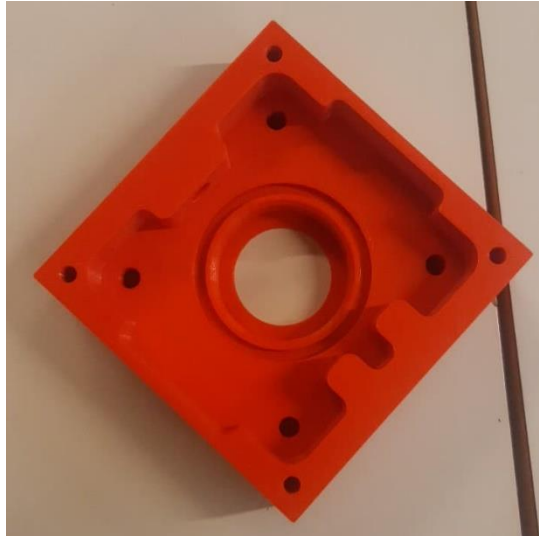


Figur 4.1 Hoveddelene

1. Hovedhus
2. Lagerfestet
3. Sensorhusene
4. Sleeve
5. Lokket

4.1.1 Hovedhuset

Hovedhuset er kanskje den mest sentrale delen i systemet. Den er forbindelsen mellom lagerfestet, sensorhusene, lokket og motoren.



Figur 4.2 insiden av hovedhuset



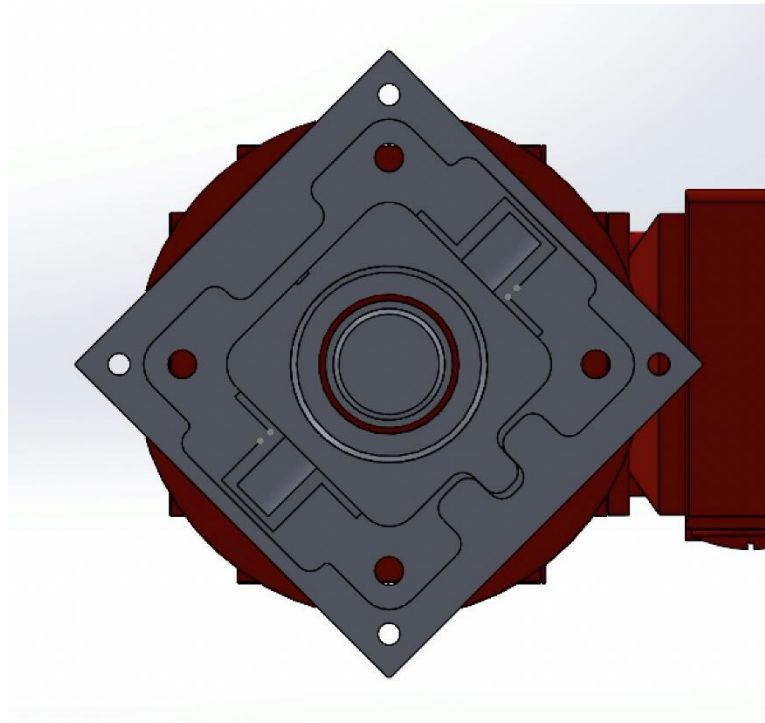
Figur 4.3 Utsiden av hovedhuset

Formen til hovedhuset ble firkantet av flere grunner. Formen gjør den enkel å produsere i CNC eller potensielt med manuell fres. Den gjør det også enklere å modifisere den igjen senere. På innsiden av Hovedhuset skal sleeveen, lagerfestet, sensorhusene, hjullageret og forseglinger få plass.

Funksjonen til Hovedhuset er å forbinde alle deler, sensorer og komponenter sammen, og tilpasse deres respektive funksjoner til resten av systemet. Hovedhuset skal også være festet

som holder alt riktig plassert i forhold til motoren, og gi inngang og utgang til sirkulerende smøring.

Forbindelsen mellom hovedhuset og motoren skal bli gjort med en presspasning og med skruer. Presspasningen vil bli gjort mellom flensen på motoren, og et spor på baksiden av huset. Skrueforbindelsen blir gjort på de innerste hullene i hovedhuset og flensen på motoren. Det har blitt laget god plass på innsiden av huset til disse skruene. Dette er for plass til skiver og muligheten til å bruke verktøy for god tilstramming.



Figur 4.4 Rigg uten lokk forfra

I midten av hovedhuset skal det også være plass til sensorhusene, lagerfestet, sleeven og lageret. Lastskruen står vinkelrett mot konsentrisk av Hovedhuset, og mot kilesporet lagerfestet skal være i. Dybden har blitt gjort så liten som mulig for å få plass til alt som utnytter bredden av huset.



Figur 4.5 Smøringshull

For den sirkulerende smøringen har det blitt bestemt en gjengeinngang, som skal koble til slangesystemet fra pumpen. Størrelsen ble bestemt til å være m6, ettersom det ble funnet et større utvalg slanger i denne størrelsen, og som mest sannsynlig vil være stort nok for god flyt av smøringen. Størrelsen på slangen skal passe for pumpesystemet, men faller nedenfor de anbefalte slangestørrelsene. Dette burde gå bra på grunn av hvordan pumpen brukes på slangen.

SKF forseglingen skal plasseres innerst i huset inntil en “vegg”. Det har blitt lagt frem akkurat den bredden den tiltenkte forseglingen kommer til å ha mellom veggen og smøringsinngangen. Dersom det brukes en forsegling som dekker en større bredde, for eksempel 1mm over, vil det dekke for noe av inngangen til smøringen. Dette kom som konsekvens av den begrensede bredden til huset, og har blitt vurdert av designeren til å burde gå bra.

For de gitte dimensjonskravene til forseglingen, finnes det to ulike typer forseglingsdesign i to ulike materialer. Her kan det prøves litt forskjellig å se hva som fungerer best.

På de ytterste hullene til huset skal det være gjenget. Det er her Lokket skal festes på.

4.1.2 Sleeve

Hovedformålet med sleeveen er overføre moment og rotasjon fra motoren til test lageret. Den vil også være flaten SKF forseglingen tetter mot og ha spor for låsering til forsøkslageret.



Figur 4.6 Sleeve

Sleeven vil forbindes til kulelageret og motortappen, og skal brukes til å overføre moment og rotasjon. Den skal påføres motortappen ved hjelp av krympepasning for godt feste, og ha en enkel presspasning for lageret.

På sleeveen vil det påføres et ekstra spor for en låse-ring, som skal brukes som sikring for å holde lageret på plass. Sporet kan sees som en tynn stripe på figuren over. Låse ring ble valgt over andre vanligere metoder som adaptor sleeve, fordi det ikke er mulig å bruke verktøy som “lock nut spanner” for å feste adaptor sleeveen i vårt system.

Dimensjonene til sleeveen ble bestemt ut fra diameteren, pasningen og lengden til akseltappen på motoren. Ettersom diameteren til akseltappen på motoren var 22mm, valgte vi å gå for 35mm diameter til sleeveen. Denne diameteren ga tilstrekkelige veggtykkelse til de påkjenningene sleeveen kunne oppleve senere.

I SKF sitt datablad, angående lager nr. 6007, ble det henviset til hvilke dimensjoner steget på sleeveen burde ha og hvilken pasning som skulle være ved festet. Steget ble funnet i databladet til å være anbefalt 40mm, som også passet bra til forseglingen.

En ytre diameter for sleeveen på 40mm, gjør det mulig å dekke hele akseltappens lengde, også der det skjer en dimensjonsendring på akseltappen. Dermed har forseglingen mulighet til å tette helt på innsiden av hovedhuset.

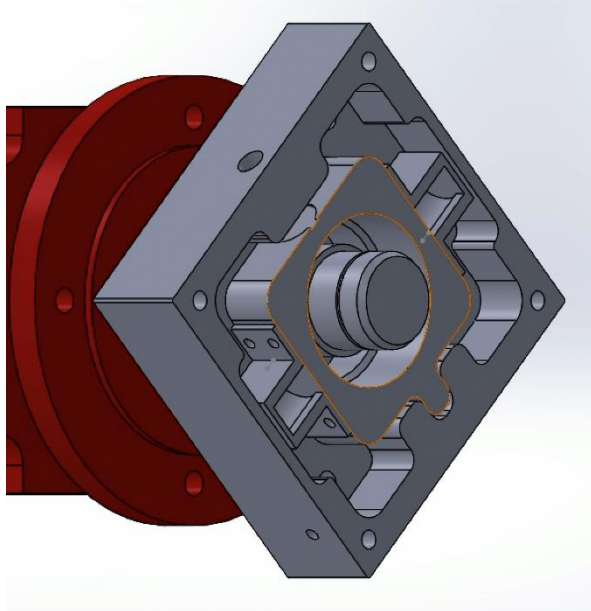
4.1.3 Lagerfestet og sensorhusene



Figur 4.7 lagerfestet

I tillegg til sleeveen er funksjonen til lagerfestet å holde lageret fast. Funksjonen er å holde lageret på plass, holde de akustiske emisjonssensorene inn mot lageret og ha plass for lastsensoren på toppen. Formen er avrundede hjørner for å unngå skarpe kanter, og for å gi litt mer plass i hovedhuset.

Hovedkontakten mellom hovedhuset og lagerfestet skal være via O-ringene. På denne måten skal systemet tettes og samtidig gi minimal friksjon mellom lagerfestet og hovedhuset. O-ringene kan også bidra til stabiliserende effekt mot vridninger av lagerfestet.

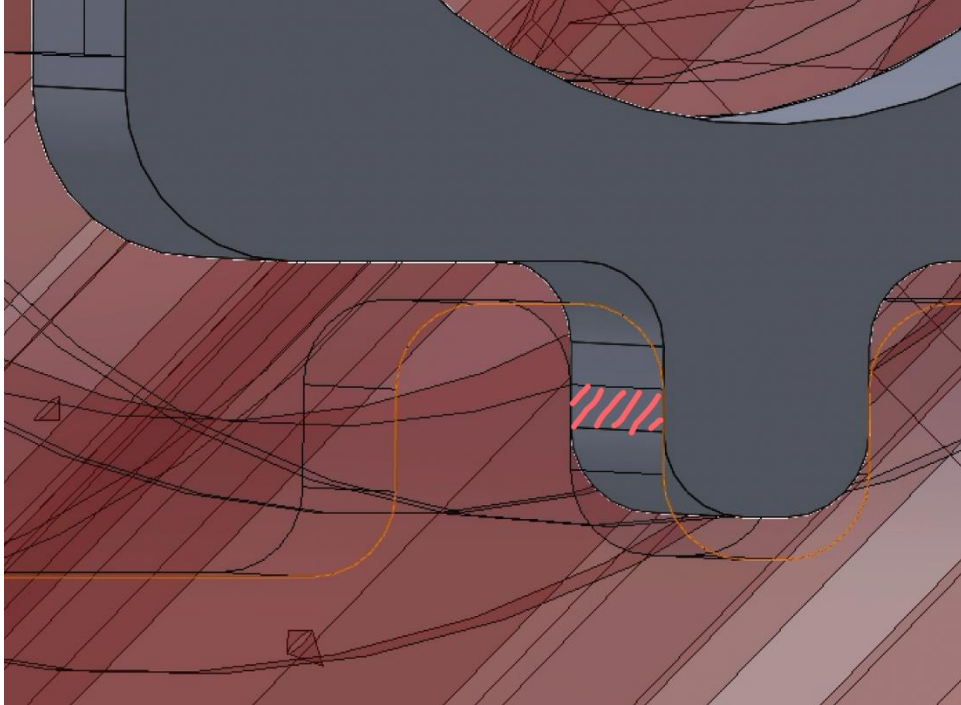


Figur 4.8 Rigg uten lokk

Hele lagerfestet blir dekket av hovedhuset. Dette er for at andre deler lett kan interagere med lagerfestet. Dette gjelder for eksempel last skruen, som står lengst vekk fra kanten av hovedhuset som mulig for å ikke lage spenninger over flyt ved tilstramming. Lagerfestet står i midlertidig ikke lenger inn i hovedhuset, enn at hovedhuset og lokket kan presse O-ringene mot lagerfestet ved montering.

Lagerfestet har blitt satt med strenge toleranse krav for å passe godt til sensorhusene og hovedhuset. Skruehullene på hver side av lagerfestet er dimensjonert slik at de er godt unna lageret. Dybden på hullene er bestemt til 9mm, som vil passe bra til feste av sensorhusene med en tykkelse på 2mm med 10mm skrue.

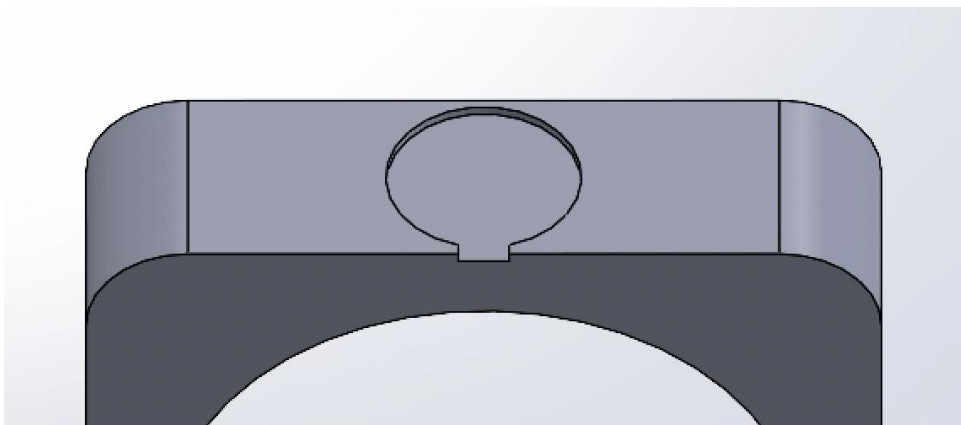
For kilen nederst på lagerfeste, har kravet vært at den skal være i kontakt med en tilsvarende form i hovedhuset. Forbindelsen skal holde igjen friksjonsmoment, og plassere sensorene riktig i forhold til last og resten av systemet. Toleransene har blitt satt fint i forbindelsen, og sørget for at forbindelsen trygt kan settes sammen.



Figur 4.9 Kontaktflate mellom festet og huset

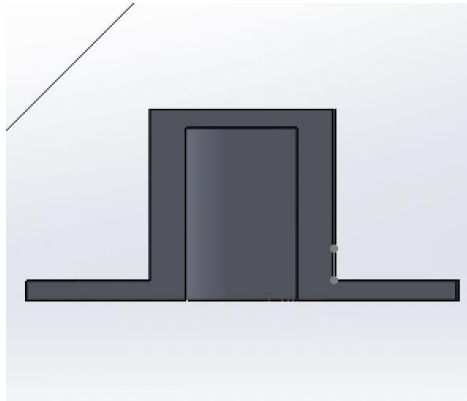
Det skraverte området viser kontaktflaten mellom lagerfestet og hovedhuset

Bredden til lagerfeste har blitt begrenset til å ikke være mindre enn sensordiameterne på 19mm. Bredden endte på 21mm. Kontaktflaten i forbindelsen mellom hovedhus og lagerfeste ble rektangulært formet i størrelse 2.5 x 21mm



Figur 4.10 Plass for lastsensor

For lastsensoren på toppen av lagerfestet ble det lagt en spordybde på 1mm. Grunnen til at dybden ikke ble gjort dypere for sensoren, var for å gjøre det enkelt for sensorledningen å gå over O-ringene og ut av lokket.



Figur 4.11 Sensorhus

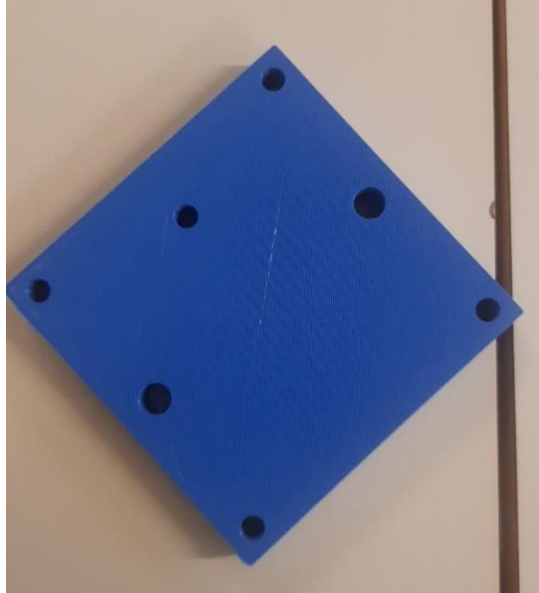
Sensorhusene skal brukes til AE sensorene. Ønsket er at sensorhusene vil bidra med konstant spenn mot AE sensorene ved tilførsel av en gummi bit. Dette er for at de skal sitte tett inn mot lagerfestet og lettere lese av elastiske spenningsbølger i materialet. Sensorhuset skal ha fire skruefester inn mot lagerfeste, som sikrer riktig posisjon og plass til sensorene.

Dimensjonen og toleransene til sensorhuset er satt for å passe omtrent perfekt i til sensorens størrelse. Dette er for å sikre at sensoren står rett i forhold til underlaget. Samtidig er det satt toleranser litt over sensoren diameter på 19mm, for at man kan sette sensorene inn lett. Det samme er “taket” der det er lagt av plass til gummi flaten.

4.1.4 Lokket



Figur 4.12 Innside



Figur 4.13 Utside

Den siste hoveddelen kalles «Lokket». Denne delen har to funksjoner: sikre tetting med justerbart trykk, og ha en utgang for smøringen. Det justerbare trykket på tettingen blir oppnådd ved å stramme skruene ytterst i systemet, inn mot hovedhuset. Denne tilstrammingen bestemmes av den som monterer systemet, og bør være så lav som mulig, så lenge den tetter. Det skal også brukes underlagsskiver på skruene mellom hovedhuset og lokket med ulike tykkelser, slik at man kan bestemme deformasjonsgraden som skjer på O-ringene. Fordelen med lav tilstramming er at det gir lageret i sentrum større bevegelsesfrihet av O-ringene, ettersom det blir mindre friksjonskraft.

Forholdet mellom dybden til det endelige sporet til O-ringene på 4mm og tykkelsen på de tiltenkte O-ringene på 5mm, ble bestemt som følge av det som ble funnet på nett. Vanlig bruk av O-ringer er ofte annerledes enn det vi har tiltenkt. Derfor var ikke spordybden funnet på nett i samsvar med den tiltenkte funksjonen vi hadde av O-ringene. Det ble derfor valgt en stor oring som kompensasjon for den lille plassen til deformasjon.

Størrelsen på oringen ble 65mm diameter på innsiden, og 75mm på utsiden. Hele flaten til oringen dekkes av lagerfestet.

Ettersom dette var ukjent terreng, ble en foreslått tilstramming på 20 kg mot O-ringene sett på som tilstrekkelig for tetting. Med sikkerhetsfaktor for tilstrekkelig tilstramming på 2, O-ring hardheten og diameteren, ble det beregnet hvor mye deformasjon O-ringene måtte ha for å

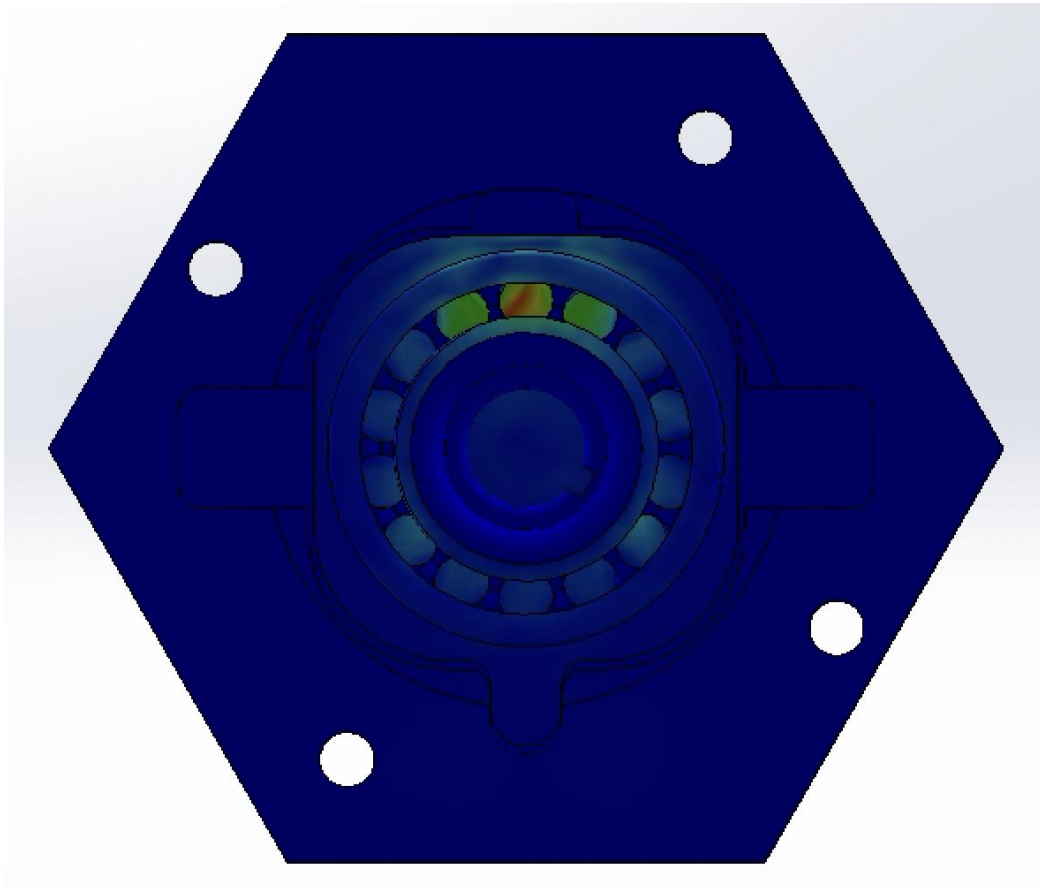
opprettholde tetting. Det ble funnet at en deformasjon på 0.5mm, altså 10% på hver av O-ringene, var mer enn nok til å oppnå dette (71) (se vedlegg).

4.1.5 Lager

Størrelsen på lageret ble bestemt etter det minste alternativet som er tilgjengelig, med en fastsatt indre diameter på 35mm. Det ble funnet et lager av den ønskede typen, som hadde en ytterdiameter på 62mm.

Lageret ble av typen “deep groove ball bearing”, produktnummer 6007 (85). Lageret ble valgt av dens lave dynamiske last kapasitet, og fordi den kunne ta noen aksialkrefter. At den tar aksialkrefter, gjør monteringen enklere og sammensetningen tryggere med andre deler.

Valg av pasninger og utregningen til pasningene kan finnes som et eget excel vedlegg til rapporten.



Figur 4.14 Simulasjon

Den oppnådde spenningsdistribusjonen i lageret ble slik som figuren viser, ut ifra Solidworks simulations. Det gamle konseptet blir brukt i denne simuleringen, som har helt like kriterier som det nye rundt lagerfestet

4.2 Suksessfaktorer

Suksessfaktorer har for oss vært det som har blitt oppnådd i designvalg og tilegnet kunnskap av prosjektet.

Det har vært flere suksessfaktorer. Blant annet har det blitt gjennomført et design godkjent for produksjon, flere nybegynnerfeil har blitt unngått og designet viser en del av den kunnskapen vi har fått gjennom prosjektet. Krav som måtte gjennomføres underveis i prosjektet har også blitt gjennomført av alle på gruppa.

Selv om ikke produktet ble produsert, fikk vi laget en prototype ved å 3d printe. Denne kan brukes til å visualisere og teste hvordan sensorer og komponenter vil sitte i systemet frem til produksjonen er ferdig.

5 Diskusjon

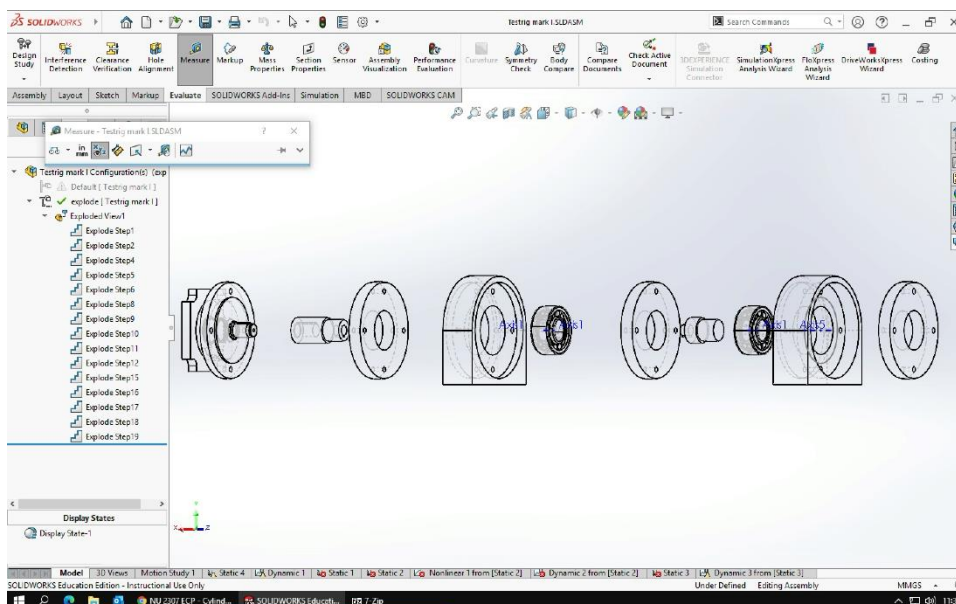
Dette kapittelet tar for seg de erfaringene og valgene som ble tatt frem til vårt ferdige design.

5.1 Prosessen

På starten var kunnskapen over hvordan man lager et godt produkt design lavt i gruppen. Fokuset gikk mot feil ting som konseptets sitt utseende, overkomplisering, og bruk av unødig mengde deler for å bygge systemet. Dette er tilsynelatende ganske vanlige feil for nye ingeniører før man får eksponert seg for erfaringer.

Konsekvensen av den lille erfaringen på starten kunne gjort produksjonen unødvendig dyr og komplisert om vi ikke hadde lært mer underveis.

En stor lærdom, har vært hvor viktig det er å spørre andre, gjøre ting enklest mulig, samt fokusere på systemets funksjon over estetikk. Av denne lærdommen ble det ferdige designet mye bedre enn konseptet lagd i utgangspunktet.



Figur 5.1 Figur av første konsept

Av figur 5.1 over kan man se noen litt vanlige nybegynnerfeil. Disse fokuserte mer på utseende og funksjon, enn funksjon og effektiv produksjon. For eksempel den kurvede formen til husene, som gjorde den vanskelig å produsere.

Den inneholdt også plass til normallasten, sensorene, og inn og uttak av smøring. Disse er elementer som ble tatt med videre til det endelige designet.

5.2 Tidsforbruk

Dersom nytt prosjekt nå ville påbegynt, ville problemstillinger blitt høyere prioritert på starten. Problemstillinger ville tilspisset idemyldringen vår mer fra starten enn det vi gjorde. Det ble brukt mye tid på å være uenige over hvilket konsept som var lurest å gå videre med. Likevel skal det nevnes at prosjektet krevde læring av nytt stoff, og ikke alt kunne forutsees.

Valget mellom konsept 1 og 2 ble tatt gjennom en debatt. Denne ble holdt av medlemmene i gruppa, og en ekstern som kunne komme med sine tanker over konseptene. Selv etter denne debatten tok det tid før alle i gruppen var enige i et konsept. Dette var tid som kanskje kunne gjort designet klart for produksjon tidligere. Derfor skulle vi tidlig ha definert tydeligere bruker- og produktkravspesifikasjonene, og brukt de mer aktivt til valg av et konsept.

Når designet virket ferdig og var på vei til å sendes til produksjon, ble det igjen uventede utfordringer. Verkstedet på NTNU ble stengt og plassen delene skulle produseres var usikre

Som følge av dette tok det tid etter at designet var ferdig, frem til det ble sendt til produksjon. Før designet ble sendt til en produsent måtte det klargjøres om produsenten hadde materiale tilgjengelig, det ble laget maskintegninger til produksjon, og kommunikasjonen gikk tregt.

På et tidspunkt ble det laget et alternativt konsept av tipsene som kom til hoved designet, som ble konsept 3. Denne var en potensiell erstatte for å få produsert et produkt innen fristen, ettersom den bare besto av en del. Den ble etter litt tid satt til side for å fokusere på det opprinnelige hoved designet.

I etterkant burde vi ha droppet å lage et alternativt konsept, og gått inn for å få sendt hoved designet tidligere. På denne måten kunne vi fått produsert tidligere et produkt vi var fornøyd med og hadde studert nøye.

Ved å spørre folk med erfaringen innen produksjon mot slutfasen av designet, lærte vi fortsatt mye nyttig. Det var under slutfasen da vi trodde alt var ferdig at detaljer vi ikke hadde tenkt

på kom frem. Dette var blant annet festet til flensen på motoren, som vi i utgangspunktet hadde en plan på, men som vi fikk vite ikke var den normale måten å feste på. Dermed ble designet raskt endret til presspasning på flensen med skrueforbindelse i tillegg, som var det vi fikk tips om. I utgangspunktet var planen å bare bruke skruene til å feste med.

5.3 Fallgruver

Fallgruvene vil her si det som skal til for at innsamlet data ikke blir nøyaktig, at produksjonen blir overdrevent dyr eller som gjør systemet umulig å sette sammen. Underveis i designfasen var det flere fallgruver innen valg av komponenter, riktig bruk av komponenter, sensorer, spenningsfordelinger og hvordan alt skulle settes sammen.

Tidlig i prosjektet var det viktig å identifisere disse fallgruvene og unngå dem mest mulig. Dette ble hovedsakelig gjort ved å spørre andre med erfaringer, og ved å lese seg opp på egenhånd. Det var ikke helt mulig å unngå dem, og dette var tid som ble brukt feil designvalg. Dette er for eksempel feil isoleringsmetode, som tok lang tid å rette på. Disse ble korrigert på best mulig måte når de ble oppdaget, og var forhåpentligvis til det bedre.

En av de største feilene som tok mest tid å finne ut av, var hvordan lastsensoren skulle vise den samme lasten som lageret opplever. På starten ble det fokusert på forseglinger som skulle tette systemet på en veldig sikker måte. Fallgruven her kunne vært at vi ikke oppdaget at forseglingen la seg rundt lagerfeste, som motvirket bevegelsesfriheten dens i kraft retning. Feil som har blitt oppdaget underveis har bare gjort oss mer bevisst på andre avgjørelser som har blitt tatt, og generelt blitt mer kritiske.

Andre potensielle fallgruver som enda ikke har blitt testet er AE-sensorenes spenn mot lagerfestet, o-ringenes evne til å tette og samtidig avgi minimal friksjon, sentralisering og sikkerhet til motor og feste. Konsekvensen av å ikke være bevisst på disse potensielle fallgruvene kan være at hele systemet ikke fungerer eller ikke burde brukes. Om bare en av disse er kritisk dårlig gjennomført, kan ikke systemet bli kjørt på en forsvarlig måte.

5.4 Vurderinger

5.4.1 Vurdering av kileforbindelse.

Kilen på akselen til motoren, som ble diskutert på starten av designperioden, var lenge svært aktuell. Inntil selve designet og produksjonsprisen ble diskutert, og aktualiteten rundt krympepassing av sleeveen ble dratt inn. Krymping av sleeveen viste seg å gjøre produksjonsprosessen enklere, og funksjonen til sleeveen sikrere. Det ble til slutt bestemt at kilen skal fjernes fra akselen til motoren.

Likevel er kileforbindelsen en fordel når det kommer til enkel sammensetning på motoren. Kile har også en fordel at den enkelt tar alt av torsjons motstanden i riggen. Dette er sant så lenge kilen og sleeveen tåler spenningene til maks effekt av motoren. Valget å velge bort kilen til fordel for krympepassing var svært vanskelig. Dette er fordi vi ikke ville modifisere motortappen i første stadiet, men et valg for økt sikkerhet og enkel produksjon til systemet.
(80)

5.4.2 Vurdering av klaringspassing til lagerfestet.

Klaringspassing har blitt valgt som en anbefalt passing mellom festet og lagerets ytre ring (8). Dette er den mest gunstige forbindelsen for simpelhet av sammensetningen av riggen, fordi det kan utføres for hånd.

Det følger med en risiko av tidlig slitasje på grunn av potensiell bevegelsesfrihet mellom disse delene. Dette kommer som mulig creep, som kan forårsake slitasje på rullelagerets vegger og det som er i kontakt med dem. Dette er spesielt uønskelig fordi AE sensorene skal ha direkte kontakt med lageret, og at den har et veldig sensitivt kontaktelemt av keramikk som slippes veldig lett av.

For å forebygge mot mulig creep, må man velge en passing som likevel har nok kontakt med lageret. Man kan derfor utføre en lettere presspassing istedenfor, men kommer med ulempen av vanskelig sammensetning. Dette krever sannsynligvis innkjøp av spesialverktøy og eventuell introduksjon til varmetilføring.

Et annet alternativ er å bruke en mellompassing, som er et område mellom klaring- og presspassing. Dette er gir muligheten for å velge presspassing med redusert spenning, og er anbefalt i forhold til bedre rotasjonspresisjon. Dette settes av til IT-graden 6 ifølge SKF håndboken på side 33 for «Running accuracy requierments» (8).

Den påførte normallasten forandrer også til en grad kontaktflatene mellom lagerfestet og lageret. Dette vil si en økt friksjonsflate på et lite område. Basert på dette kan det være nok til å forebygge mot creep på lagerets ytre ring ved bruk av klaringspasning dersom kraften er høy nok. (80)

5.4.3 Smøring for lageret.

For vårt prosjekt, er målet å gjøre smøringsforholdene best egnet for gjentakende effektive tester. Det må ikke slite ned andre deler og komponenter som hovedhuset, sleeveen og pumpesystemet. Det er viktig at det ikke går som konsekvens av dårligere funksjon for resten av prosjektet. En måte å oppnå effektive gjentakende forsøksom er kontrollerte, tenker vi er ved bruk av lav viskositet og lite forurensning i smøringen til hjullageret. Dette oppnår høy friksjon basert på Stribeck kurven, som igjen skaper utmatting, slitasjer og reduserer levetiden til lageret.

Erfaringene samlet opp fra konsept og design prosessen har bidratt til at nye prosesser nå går raskere enn tidligere. For eksempel har effektiviteten til å finne og løse feil ved å oppsøke kilder, bruk av SolidWorks og iverksetting av nye arbeidsoppgaver blitt bedre under prosjektet. Disse er ferdigheter vi tar med oss videre. Dette gjør at vi nå raskere kan visualisere, utvikle og eliminere ulike konsepter, og komme videre til mulig design tidligere.

Vi har også blitt flinkere på å bruke computer aided design (CAD) system, som har blitt mye brukt under konsept og designprosessen. Dette kan øke sikkerheten og kvaliteten på produktet vi senere vil lage. Man kan få lagd bedre simuleringer, og det blir lettere for andre å fortsette der en selv slapp. Ved å lage en god CAD, redigere og lage på nytt flere ganger, har kunnskapen og effektiviteten for oss økt mye. Dette er en stor fordel for senere prosjekter, for jobb og til dette prosjektet.

6 Konklusjon og videre arbeid

Det har blitt utviklet et helhetlig design som tilfredsstillende de kravene som har blitt stilt. Det endelige designet er godt gjennomført produkt, og et godt utgangspunkt for potensielle senere modifikasjoner.

Det ble brukt god tid på å samle informasjon, som var viktig for flere av designvalgene som ble tatt senere. Gruppen har som en helhet tilegnet seg masse god kunnskap og erfaringer i å jobbe med et prosjekt og sammen som gruppe. Dette vil være fint for oss å ta med videre. Spesielt den utdypende kunnskapen vi har fått rundt lager og akustisk emisjon kan få ringvirkninger til senere utdanningsvalg og jobber

Vi som gruppe har også lært å jobbe over vider chat, dette en ny og spennende utfordring for oss å jobbe sammen på som var nyttig til erfaring til senere prosjekter.

Videre arbeid

Videre arbeid vil gå mot realisering av systemet. Dette vil si innkjøp og godkjenning av materiale for produksjon av de ulike delene i riggen og motorfestet. Og innkjøp av det nødvendige av forseglinger og pakninger, før eventuell sammensetning.

Testing vil da følge etter, som skal gjøres for å sikre at riggen kan driftes på en forsvarlig måte, og eventuelt begynne å destruktiv testing av lageret.

Alt som er nevnt over vil da skje etter endt prosjekttid, hvor bachelor gruppen allerede har levert denne oppgaven.

7 Vedlegg

Vedlegg av alle ulike beregninger, analyser, alt som har blitt gjort, men ikke er selve designet

7.1 Vedlegg A.

Copyright

Copyright in this website / app copyright of the information and software made available on this website / app rest with SKF or its licensors. All rights are reserved. All licensed material will reference the licensor that has granted SKF the right to use the material. The information and software made available on this website / app may not be reproduced, duplicated, copied, transferred, distributed, stored, modified, downloaded or otherwise exploited for any commercial use without the prior written approval of SKF. However, it may be reproduced, stored and downloaded for use by individuals without prior written approval of SKF. Under no circumstances may this information or software be supplied to third parties.

Copyright

Copyright in this website / app copyright of the information and software made available on this website / app rest with SKF or its licensors. All rights are reserved. All licensed material will reference the licensor that has granted SKF the right to use the material. The information and software made available on this website / app may not be reproduced, duplicated, copied, transferred, distributed, stored, modified, downloaded or otherwise exploited for any commercial use without the prior written approval of SKF. However, it may be reproduced, stored and downloaded for use by individuals without prior written approval of SKF. Under no circumstances may this information or software be supplied to third parties.

https://www.skf.com/group/footer/terms-and-conditions?fbclid=IwAR2kupm8atDmdcq_OgpwyueTACPpHy_NdD2vjdEJl4Po8jfUCcooSV7PYs

8 Referanser

1. Liu X, Wu X, Liu C. A comparison of acoustic emission and vibration on bearing fault detection. In Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE); 2011; Changchun. p. 922-926.
2. NSK Europe Ltd. nskeurope.com. [Online].; 2022 [cited 2022. Available from: <https://www.nskeurope.com/en/bearings/products/what-s-a-bearing.html>.
3. Lawrie RJ. EC&M. [Online].; 2001 [cited 2022. Available from: <https://www.ecmweb.com/content/article/20889840/bad-bearings-cause-motor-failures>.
4. Hiremath N. BEARING FAULT DETECTION USING ACOUSTIC EMISSION SIGNALS ANALYZED BY EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014 Mai.
5. Sridharan S. Delamination Behaviour of Composites. In Sridharan S, editor. Delamination Behaviour of Composites A volume in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering.: Woodhead Publishing; 2008. p. 741-762.
6. TWI Ltd. twi-global.com. [Online]. [cited 2022 Mars 28. Available from: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/acoustic-emission-testing#HowDoesAcousticEmissionTestingWork>.
7. Liu D, Pons DJ. Crack Propagation Mechanisms for Creep Fatigue: A Consolidated Explanation of Fundamental Behaviours from Initiation to Failure. Metals. 2018 August.
8. SKF. SKF bearing maintenance handbook [Dokument]. Sweden: SKF Group 2010; 2010 [cited 2022 Juni 10. Available from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/http://pishrowsanatravangard.ir/wp-content/uploads/2016/08/MAINTENANCE-HAND-BOOK.pdf>.
9. Lei Y, Yang B, Jiang X, Jia F, Li N, Nandi AK. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. Mechanical Systems and Signal Processing. 2020 April.
 1. Hidle EL. Early Detection of Subsurface Cracks in Rolling Element Bearings using the Acoustic Emission Time Series. Masteroppgave. NTNU, Institutt for maskinteknikk og produksjon; 2021.
 1. Lucas M. Acoustic Emission: The Next Generation of Vibration Techniques for reliableplant. [Online]. [cited 2022 Juni 10. Available from: <https://www.reliableplant.com/Read/28771/acoustic-emission-techniques>.
 1. Kaphle M, Cc A, Thambiratnam D, Chan T. Analysis of acoustic emission data for structural health monitoring applications. ResearchGate. 2010 November.
 1. Transducer Techniques. transducertechniques.com. [Online]. [cited 2022 Juni 3. Available from: <https://www.transducertechniques.com/slb-load-cell.aspx?fbclid=IwAR3Q5PpmE6AGVRYf5NspDL5--K9s56jwjEW9VcPcb7GiHZhJ-lio7LrpbNM>.
 1. FUTEK Advanced Sensor Technology, Inc. futek.com. [Online]. [cited 2022 Juni 2. Available from: <https://www.futek.com/how-a-load-cell-works>.
 1. SKF. Rolling bearings | SKF. [Online]. [cited 2022 Juni 8. Available from: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings>.
 - 5.

- 1 Velling A. Types of Bearings | Uses & Working Mechanisms Explained. Fractory. 2020 6. August.
- 1 koyo.jtekt.co. koyo.jtekt.co.jp. [Online].; 2019 [cited 2022. Available from: 7. <https://koyo.jtekt.co.jp/en/2019/06/column01-01.html>.
- 1 Collins D. linearmotiontips.com. [Online].; 2019 [cited 2022 Juni 10. Available from: 8. <https://www.linearmotiontips.com/what-are-hertz-contact-stresses-how-do-they-affect-linear-bearings/>.
- 1 Dørum A. Maskindeler 1 Anre Dørum, Pensumhefte. 2001st ed. Trondheim: Akademika; 9. 2001.
- 2 Collins D. linearmotiontips.com. [Online].; 2015 [cited 2022 Juni 10. Available from: 0. <https://www.linearmotiontips.com/bearing-load-capacity-explained/>.
- 2 SKF. skf.com. [Online]. [cited 2022 Juni 10. Available from: 1. <https://www.skf.com/uk/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-size/size-selection-based-on-rating-life/basic-dynamic-load-rating-c>.
- 2 Evans RD. Wear of Bearings. In Wang QJ, Chung YW, editors. Encyclopedia of Tribology. 2. Boston, MA; 2013. p. 4061-4068.
- 2 Industrial Metal Supply Company. What is Metal Fatigue? [Online].; 2020 [cited 2022 3. Juni 10. Available from: <https://www.industrialmetalsupply.com/blog/metal-fatigue>.
- 2 Waterhouse RB. Fretting fatigue. International Materials Reviews. 1992 Januar: p. 77-98. 4.
- 2 SKF. Bearing damage and failure analysis [Dokument].; 2017 [cited 2022 Juni 10. 5. Available from: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcjgklbflljqhlpkjhkhsfm0/https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcjgklbflljqhlpkjhkhsfm0/).
- 2 Dutta Majumdar J, Manna I. 21.5.2 Adhesive wear. In Lawrence J, Waugh DG, editors. 21 6. - Laser surface engineering of titanium and its alloys for improved wear, corrosion and high-temperature oxidation resistance. Kharagpur: Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials; 2015. p. 483-521.
- 2 What Is Galling? [Online].; 2019 [cited 2022 Juni 10. Available from: 7. <https://bortec.de/en/blog/what-is-galling/>.
- 2 F.Matlik , T.N.Farris , H.MurthyJ.. ScienceDirect. [Online].; 2003 [cited 2022. Available 8. from: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fretting-damage>.
- 2 JTEKT CORPORATION. JTEKT CORPORATION | News releases. [Online].; 2019 [cited 2022 9. Juni 10. Available from: https://www.itekt.co.jp/e/news/191008_1.html.
- 3 SKF. SKF Maintenance and Lubrication Products, Extending the Bearing Life Cycle 0. [Dokument].: SKF Group 2022; 2022 [cited 2022 Juni 10. Available from: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/094fe398236d3d0a-03000EN_tcm_12-595611.pdf#cid-595611.
- 3 Bart JCJ, Gucciardi E, Cavallaro S. 2 - Principles of lubrication. In Bart JCJ, Gucciardi E, 1. Cavallaro S, editors. Biolubricants.: Woodhead Publishing; 2013. p. 10-23.
- 3 Armada S. Tribocorrosion: A threat to materials. SINTEF Materials and Chemistry. 2013. 2.

- 3 Haaberg GM. Store norske leksikon på snl.no. [Online].; 2021 [cited 2022. Available from:
3. https://snl.no/galvanisk_korrosjon.
- 3 Haaberg GM. Store norske leksikon på snl.no. [Online].; 2018 [cited 2022. Available from:
4. https://snl.no/katodisk_beskyttelse.
- 3 Gravdal T. Store norske leksikon på snl.no. [Online].; 2022 [cited 2022. Available from:
5. <https://snl.no/edelmetall>.
- 3 Wes C. www.machinerylubrication.com. [Online]. [cited 2022. Available from:
6. <https://www.machinerylubrication.com/Read/28766/what-is-lubrication>.
- 3 Noria Corporation. www.machinerylubrication.com. [Online]. [cited 2022. Available
7. from: <https://www.machinerylubrication.com/Read/928/corrosion-preservative-treatment>.
- 3 SKF. www.skf.com/life-modification-factor-a-skf. [Online]. [cited 2022. Available from:
8. <https://www.skf.com/in/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-size/size-selection-based-on-rating-life/life-modification-factor-a-skf>.
- 3 TribonNet. TriboNet ABOUT TRIBOLOGY. [Online].; 2021 [cited 2022. Available from:
9. <https://www.tribonet.org/wiki/stribeck-curve/>.
- 4 Lenard Jg. Chapter 6 - An Examination of the Coefficient of Friction. In Lenard Jg, editor.
0. Metal Forming Science and Practice.: Elsevier Science Ltd; 2002. p. 85-114.
- 4 McGrory S. 52 - Lubrication. In Mobley RK, editor. Plant Engineer's Handbook. Woburn:
1. Butterworth-Heinemann; 2001. p. 915-960.
- 4 dheerajhinaniya. GeeksforGeeks. [Online].; 2021 [cited 2022. Available from:
2. <https://www.geeksforgeeks.org/fluid-friction/>.
- 4 SKF. EVOLUTION Technology Magazine from SKF. [Online].; 1999 [cited 2022. Available
3. from: <https://evolution.skf.com/us/bearing-contamination/>.
- 4 Moon M. www.machinerylubrication.com. [Online].; 2008 [cited 2022. Available from:
4. <https://www.machinerylubrication.com/Read/1291/lubricant-cleanliness>.
- 4 E. www.purelubrication.co.uk. [Online].; 2019 [cited 2022. Available from:
5. <https://www.purelubrication.co.uk/2019/04/25/why-is-my-oil-getting-thicker/>.
- 4 How to minimise the Lubrication Contamination? - Motion+Drives. [Online]. [cited 2022
6. Juni 10. Available from: <https://motion-drives.com/blog/2022/04/18/lubrication-contamination/>.
- 4 Dimensioning and Tolerancing [Dokument].; 2012 [cited 2022. Available from: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://engineering.tcnj.edu/wp-content/uploads/sites/194/2012/02/dimensioning_and_tolerancing.pdf.
- 4 Huang L. Everything You Need to Know About CNC Machining Tolerances [Bloginnlegg].;
8. 2020 [cited 2022 Juni 7. Available from: <https://www.rapiddirect.com/blog/cnc-machining-services-tolerances/>.
- 4 the high cost of tight tolerances [Bloginnlegg].; 2017 [cited 2022 Juni 7. Available from:
9. <https://www.cnccookbook.com/the-high-cost-of-tight-tolerances/>.
- 5 The High Cost of Tight Tolerances. [Online].; 2017 [cited 2022 Juni 7. Available from:
0. <https://www.cnccookbook.com/the-high-cost-of-tight-tolerances/>.

- 5 Saif M. The Engineers Pos. [Online].; 2020 [cited 2022 Juni 7. Available from:
1. <https://www.theengineerspost.com/tolerances-types/>.
- 5 Meyer RW. pasning - konstruksjonsteknikk i Store norske leksikon på snl.no. [Online].;
2. 2021 [cited 2022 Juni 7. Available from: <https://snl.no/pasning - konstruksjonsteknikk>.
- 5 NS-EN ISO 286-1. [Dokument].; 2010 [cited 2022. Available from:
3. <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=436188>.
- 5 Krol R, Siemiątkowski Z. The analysis of shrink-fit connection – the methods of heating
4. and the factors influencing the distribution of residual stresses. Heliyon. 2019
November.
- 5 Salguti S. www.tutorialspoint.com. [Online].; 2019 [cited 2022. Available from:
5. <https://www.tutorialspoint.com/what-are-fits-and-what-are-the-type-of-fits-in-metrology>.
- 5 SKF. www.skf.com/Deep groove ball bearings. [Online]. [cited 2022. Available from:
6. <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6007>.
- 5 Thayer K. How ball bearings are manufactured av Engineering360. [Online].; 2017 [cited
7. 2022 Juni 3. Available from: <https://insights.globalspec.com/article/4523/how-ball-bearings-are-manufactured>.
- 5 He J. www.astmsteel.com. [Online]. [cited 2022. Available from:
8. <https://www.astmsteel.com/product/52100-bearing-steel-aisi/>.
- 5 mec Engineering Spreadsheets. www.mec-engineering-spreadsheets.com. [Online].
9. [cited 2022. Available from: <https://www.mec-engineering-spreadsheets.com/documentation-area/fit-tolerances-and-applications/>.
- 6 NS-EN ISO 286-2. [Standard].; 2010 [cited 2022. Available from:
0. <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=442692>.
- 6 thyssenkrupp Materials (UK) Ltd. www.thyssenkrupp-materials.co.uk. [Online].; 2022
1. [cited 2022. Available from: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-304-14301.html>.
- 6 Cavallo C. All About 304 Steel (Properties, Strength, and Uses) for thomasnet.com.
2. [Online]. [cited 2022 Juni 7. Available from:
<https://www.thomasnet.com/articles/metals-metal-products/all-about-304-steel-properties-strength-and-uses>.
- 6 Structures Insider. The difference between Buckling, Compression & Shear av
3. structuresinsider.com. [Online].; 2021 [cited 2022 Juni 7. Available from:
<https://www.structuresinsider.com/post/the-difference-between-buckling-compression-shear>.
- 6 Collins D. Stress and strain: Mechanical properties of materials. [Online].; 2019 [cited
4. 2022 Juni 10. Available from: <https://www.linearmotiontips.com/mechanical-properties-of-materials-stress-and-strain/>.
- 6 MATMATCH. Basic Stress Analysis Calculations av Matmatch. [Online]. [cited 2022 Juni 7.
5. Available from: <https://matmatch.com/learn/property/basic-stress-analysis-calculations>.

- 6 Ormestad H. elastisitet - fysikk i Store norske leksikon på snl.no. [Online].; 2021 [cited 2022 Juni 7. Available from: <https://snl.no/elastisitet - fysikk>.
- 6 Univerisitetet i Oslo. Entropi - Institutt for biovitenskap. [Online].; 2021 [cited 2022 Juni 7. 7. Available from: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/e/entropi.html>.
- 6 Stott F. High-temperature sliding wear of metals. Tribology International - TRIBOL INT. 8. 2002 August: p. 489-495.
- 6 Allain R. Why Do Solids Expand When Heated? Wired. 2013 August. 9.
- 7 Fluoro FKM Rubber O Ring Seals - What is FKM? [Online]. [cited 2022 Juni 10. Available 0. from: <https://www.fst.com/sealing/products/materials/fkm/>.
- 7 Parker Hannifin Corporation. Parker O-Ring Handbook ORD 5700 [Dokument].; 2021 1. [cited 2022 Juni 7. Available from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgicclfeindmkaj/https://www.parker.com/Literature/O-Ring%20Division%20Literature/ORD%205700.pdf>.
- 7 Feynman RP. [Dokument].; 1986 [cited 2022 Juni 7. Available from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgicclfeindmkaj/https://www.refsmmat.com/files/reflections.pdf>.
- 7 Rustfritt stål. [Online].; 2022 [cited 2022 Juni 10. Available from: 3. [https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Rustfritt st%C3%A5l&oldid=22349395](https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Rustfritt_st%C3%A5l&oldid=22349395).
- 7 CloudNC. What's the Difference Between 3-axis, 4-axis & 5-axis Milling? av cloudnc.com. 4. [Online].; 2020 [cited 2022 Juni 7. Available from: <https://cloudnc.com/cnc-best-practices-3-whats-the-difference-between-3-axis-4-axis-5-axis-milling/>.
- 7 Eagle Stainless Tube & Fabrication, Inc. What are the Benefits of CNC Machining Service 5. vs. Manual Machining? for eagletube.com. [Online].; 2019 [cited 2022 Juni 7. Available from: <https://eagletube.com/about-us/news/what-are-the-advantages-of-cnc-machining-vs-manual-machining/>.
- 7 Hvordan velge riktig verktøy for CNC-maskinverktøy. [Online]. [cited 2022 Juni 10. 6. Available from: <http://no.deedcnc.com/info/how-to-choose-the-right-tool-for-cnc-machine-t-53104382.html>.
- 7 Hva er fordelene og ulempene ved CNC dreiebenk maskineringscenter. [Online]. [cited 7. 2022 Juni 10. Available from: <http://no.cjmetalparts.com/info/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-c-67328420.html>.
- 7 Linear Motion Tips. [Online].; 2020 [cited 2022 Juni 10. Available from: 8. <https://www.linearmotiontips.com/motion-basics-how-to-define-roll-pitch-and-yaw-for-linear-systems/>.
- 7 SKF. Principles of sealing selection and application | SKF. [Online]. [cited 2020 Juni 10. 9. Available from: <https://www.skf.com/group/products/industrial-seals/power-transmission-seals/principles>.
- 8 Air Products Inc. Shrink Fitting in Engineering av Air Products Inc. [Online]. [cited 2022 0. Juni 7. Available from: <https://www.airproducts.co.uk/campaigns/shrink-fitting-in-engineering>.

- 8 Baker M. Hydraulic vs. Pneumatic vs. Electric Actuators | Differences [Blogginnlegg].; 1. 2019 [cited 2022 Mai 25. Available from: <https://yorkpmh.com/resources/hydraulic-vs-pneumatic-vs-electric-actuators/>.
- 8 Rao RJM. Inst Tools. [Online].; 2020 [cited 2022 Juni 10. Available from: 2. <https://instrumentationtools.com/pneumatic-cylinder/>.
- 8 Momentum. What is a Hydraulic Cylinder and How Does it Work? Cylinder Basics. 3. [Online].; 2022 [cited 2022 Juni 7. Available from: <https://www.yatesind.com/what-is-a-hydraulic-cylinder>.
- 8 progressiveautomations. Progressive Automations. [Online].; 2020 [cited 2022 Juni 7. 4. Available from: <https://www.progressiveautomations.com/pages/actuators>.
- 8 SKF. www.skf.com. [Online]. [cited 2022 Mai 23. Available from: 5. <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6007>.
- 8 Marposs S.p.A. marposs.com. [Online].; 2022 [cited 2022. Available from: 6. <https://www.marposs.com/eng/product/acoustic-emission-sensors>.
- 8 Nortelco. www.nortelco.no. [Online]. [cited 2022. Available from: 7. <https://www.nortelco.no/no/Scaime-R10X-1-t.-100-t-Stainless-steel-compression-load-cell>.
- 8 Hofstad K. termisk utvidelseskoeffisient. Store norske leksikon. 2021. 8.
- 8 Reliance Steel & Aluminium CO. www.encoremetals.com. [Online]. [cited 2022. Available 9. from: <https://www.encoremetals.com/products/e52100.html>.
- 9 Dørum A. Maskindeler 2 Arne Dørum, Pensumhefte. 2006th ed. Olsen H, editor. 0. Trondheim: Akademika; 2006.
- 9 IBM. www.ibm.com. [Online].; 2021 [cited 2022. Available from: 1. <https://www.ibm.com/cloud/learn/machine-learning>.
- 9 Grillini L, Affatato S. Topography in bio-tribocorrosion. Bio-Tribocorrosion in Biomaterials 2. and Medical Implants. 2013.
- 9 Lenard JG. Tribology. Primer on Flat Rolling. 2014. 3.
- 9 NORDIC STEEL. Hva gjør egentlig rustfritt stål rustfritt? NORDIC STEEL.. 4.
- 9 Iowa State University, Center for Nondestructive Evaluation. NDE-Ed.org. [Online]. [cited 5. 2022. Available from: https://www.nde-ed.org/NDETechniques/AcousticEmission/AE_SourceLocation.xhtml.
- 9 Cerullo M. Sub-surface Fatigue Crack Growth at Alumina Inclusions in AISI 52100 Roller 6. Bearings. Procedia engineering. 2014: p. 333-338.
- 9 BearingNEWS. [Nettartikkel].; 2020 [cited 2022. Available from: <https://www.bearing-news.com/bearing-failure-rca-cracks/>.
- 9 Podgornik B, Jerina J. Surface topography effect on galling resistance of coated and 8. uncoated tool steel. Surface and Coatings Technology. 2012 Februar: p. 2792-2800.
- 9 Morales-Espejel GE. Evolution Online. [Online].; 2019 [cited 2022 Juni 10. Available from: 9. <https://evolution.skf.com/wear-and-surface-fatigue-in-rolling-bearings/>.

