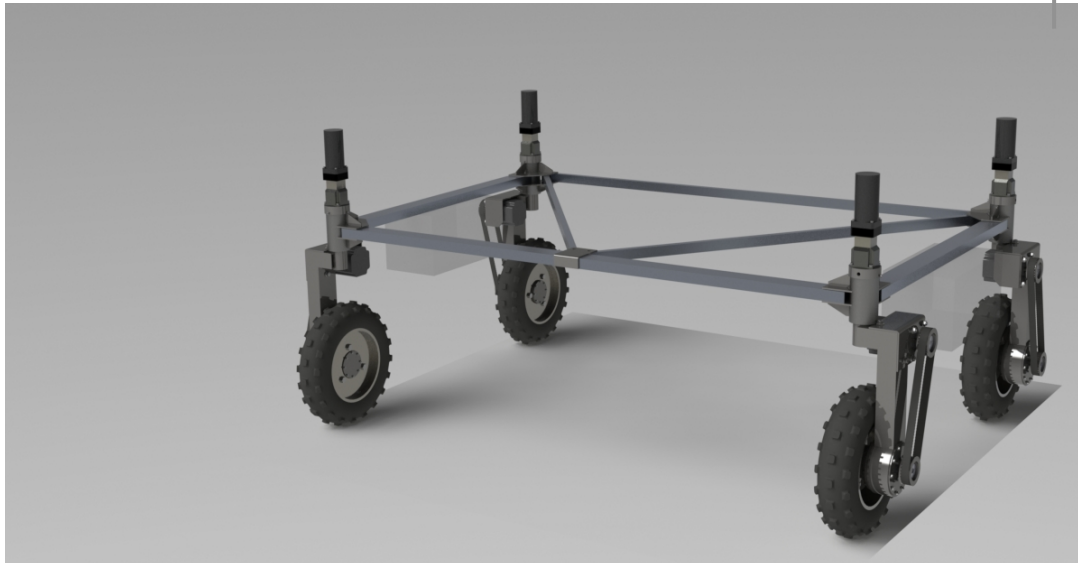




Våren | 2014



# Rammekonstruksjon for autonom landbruksmaskin

Fredrik Blomberg

Mastergradsoppgave ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet  
Instituttet for matematiske realfag og teknologi



## Forord

Masteroppgaven er en del av masterprogrammet Maskin, prosess- og produktutvikling ved Instituttet for matematiske realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven er på totalt 30 studiepoeng. Dagens landbruksmaskiner er så store og tunge at jorda pakkes som reduserer jordas evne til å gro vekster. I tillegg kan forbruket av gjødsel og sprøytemidler reduseres ved bruk av presisjonslandbruk. Målet med masteroppgaven er å konstruere en ramme for en autonom landbruksmaskin.

Arbeidet er del av et prosjekt med fem masteroppgaver. Vi har sammen konstruert og bygget en prototype til en autonom landbruksmaskin. Denne oppgaven tar for seg rammen til maskinen, fra ide til prototype. Det er foretatt beregningssimuleringer av konstruksjonen før den ble produsert.

Opgaven innledes med en teoridel om materialer og konstruksjonstyper. Videre følger konseptevalueringen og beregninger som verifiserer holdbarheten til designet. Til slutt er det gjort rede for tanker om videre arbeid for konseptet.

Masteroppgaven kan brukes som veiledning i konstruksjonen av enkle terrenggående autonome landbruksmaskiner. Jeg håper mitt arbeid kan hjelpe andre som ønsker å fremstille et liknende kjøretøy.

Jeg kunne aldri skrevet denne oppgaven uten hjelp fra fagfolk og venner. Først må jeg takke min veileder professor Pål Johan From som har bistått når det trengtes. Biveileder på konstruksjonssiden var førsteamanuensis Geir Terjesen og verkstedsjef på NMBU Bjørn Brenna med produksjonen. Teksten i oppgaven har fått finpuss av Dag Hernes og Erik Hernes. Tusen takk alle sammen.

Som del av arbeidet inngikk en tur til Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFJR. Der fikk prosjektgruppen innføring i robotstyringer og aspekter ved fremdriften til kjøretøyer i ulendt terreng. Turen til Brasil ble sponset av CAPES-SIU-2013/10076.

Takk til NJF for økonomisk bidrag som gjorde prosjektet mulig å gjennomføre.

Ås 12/5-2014

---

Fredrik Blomberg



## Sammendrag

Formålet med oppgaven er å konstruere en ramme til en autonom landbruksmaskin. Landbruket i dag preges av store og tunge maskiner. Landbruksmaskinene vokser i størrelse for å gjøre landbruket mer effektivt. En stor maskin kan utføre mer arbeid på mindre tid. Men når maskiner blir tunge fører det til jordpakking. Når jordsmonnet blir sammentrykt blir kvaliteten på jorda redusert. I dagens landbruk går 90% av drivstofforbruket til håndtering av jordpakking. Denne oppgaven er en del av et forskningsprosjekt som har til hensikt å utvikle autonome løsninger på jordpakking og implementering av presisjonslandbruk.

Prosjektgruppen har arbeidet med robotstyringer og fremdrift for kjøretøyer i ulendt terreng, og analysert utfordringene norsk landbruk står overfor. På denne bakgrunn utarbeidet gruppen spesifikke krav den autonome landbruksmaskinen må tilfredsstille. Kravene er at maskinen skal ha fremdrift på alle hjul, batterier som energikilde, sving på samtlige hjul for gode manøvreringsegenskaper og ha lav vekt. Konseptet gruppen utviklet, innebærer at roboten bærer verktøyet i stedet for å trekke det etter slik som traktorer gjør.

I oppgaven analyseres ideer og materialvalg til rammen. Det er brukt beregninger og simuleringer for å finne dimensjoner på komponenter i konstruksjonen. Vår landbruksmaskin består av en U-formet ramme med et åpent område i midten hvor verktøyet kan monteres. I hjørnene monteres en kombinert svinge- og fremdriftsmekanisme. Fremdriften blir drevet av likestrømsmotorer mens servomotorer svinger hjulene. For å få ønsket arbeidsmoment blir det montert gir med utvekslingsforhold 1:60 på hver motor. Mellom servomotoren og underarmen hvor hjulene er plassert er det to koniske rullelager. Rullelagrene er overdimensjonerte og kan byttes ut til mindre vinkelkontakt kulelager. Arbeidsområdet til roboten er på ujevne underlag. For optimal fremdrift må hjulene og være bevegelige slik at dekkene kan ha kontakt med underlaget. Rammen er gjort bevegelig ved å bruke aluminiumsrør som rammelementer og hengsle verktøyet til rammen med momentfrie ledd. Resultatene fra simuleringer og utførte beregninger viser at det er tilstrekkelig med 60x30x2,5 millimeter tverrsnitt på aluminiumsrørene. For å gjøre systemet rimeligst mulig skal roboten være utstyrt med mesteparten av elektroniske utstyret som er nødvendig for de ulike applikasjoner.



## Abstract

The main objective of this thesis is to construct a frame for an autonomous agriculture machine. Today the agriculture sector consist of large and heavy machinery. Agriculture machines grow in size to become more effective. A large machine can do more work in less time then a smaller machine. But heavy machines causes the soil to compress. The quality of the soil reduces when the soil become compressed. About 90 % of the energi consumption is used to overcome probles related to compressed soil. This thesis is part of a scientific project which develops an autonomous solution to compressed soil and implementing presicion farming.

The project group have worked with controlling electrical motors, with aspects regarding driving a vehicle in terrain and analyzed challenges in the Norwegian agriculture and how to overcome this challenges. From this analysis we made requirements for the autonomous machine. The requirements were: Four wheel drive system, batteries as energy source, all of the wheels with steering cability and a low weight design. Insted of pulling the tools like tractors oparate the robot will carry the tools.

In this thesis design ideas and choice of construction materials are analyzed. Suitable dimensions on parts are found by using simulations and calculatltions. With a U-shaped frame it's possible for tools to mount in the center of the robot. In each corner a combined propulsion and steering mechanism. The propulsion motor is a direct current motor and the steering motor a presice servomotor. It was necessary to combine each motor with a gear to get desired output momentum. Between the servomotor and the arm holding the wheels there is two tapered roller bearings. The bearings are oversized and can be replaced by smaller angular contact ball bearings. The main working area for the robot will be on soil. To make sure every wheel always stays in contact with the ground the frame is constructed flexible. Aluminium tubes makes the frame deflectable. Tools mounted inside the frame are hinged with rotational links. Results from simulations and calculations concludes that it is sufficient with a aluminium tube cross section of 60x30x2,5 mm. By mounting most of the necessary electronics onboard the robot, instead on each tool, we can reduce the retail price of the system.



## Innholdsfortegnelse

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Innledning</b>                                       | <b>1</b>  |
| 1.1      | Bakgrunn  | 1         |
| 1.2      | Prosjektbeskrivelse                                     | 1         |
| 1.3      | Mål for oppgaven  | 2         |
| 1.3.1    | Begrensninger   | 2         |
| <b>2</b> | <b>Teorikapittel</b>                                    | <b>3</b>  |
| 2.1      | Symboler og terminologi                                 | 3         |
| 2.2      | Materialer  | 6         |
| 2.2.1    | Metaller  | 7         |
| 2.2.2    | Plastikk  | 10        |
| 2.2.3    | Organiske materialer                                    | 13        |
| 2.3      | Sammenføyninger   | 14        |
| 2.3.1    | Liming (Adhesiver)                                      | 14        |
| 2.3.2    | Nagler, skruer og klinker                               | 15        |
| 2.3.3    | Sveis   | 15        |
| 2.3.4    | Pasninger   | 16        |
| 2.4      | Konstruksjonstyper                                      | 16        |
| 2.5      | Friksjon  | 19        |
| <b>3</b> | <b>Design av rammen</b>                                 | <b>20</b> |
| 3.1      | Krav  | 20        |
| 3.2      | Designprosess   | 22        |
| 3.2.1    | Ulike versjoner   | 22        |
| 3.2.2    | Materialvalg  | 27        |
| 3.3      | Kalkulasjoner og simulering                             | 27        |
| 3.3.1    | Aluminiumsrørene med påkjenninger fra fremdriftsmotorer | 28        |
| 3.3.2    | Kulelagerhus med påkjenninger fra fremdriftsmotorer     | 29        |
| 3.3.3    | Valg av kulelager                                       | 31        |
| 3.3.4    | Aksling mellom servogir og underarm                     | 33        |
| 3.3.5    | Beregninger og simuleringer av rammen under bruk        | 35        |
| 3.4      | Produktarkitektur                                       | 48        |
| 3.4.1    | Kulelagerhussammenstilling                              | 48        |
| 3.4.2    | Underarmssammenstilling                                 | 49        |
| 3.4.3    | Rammesammenstilling                                     | 51        |
| <b>4</b> | <b>Verktøydesign og oppbevaringsstasjon</b>             | <b>53</b> |
| <b>5</b> | <b>Byggeprosess</b>                                     | <b>56</b> |
| 5.1      | Kostnader   | 56        |
| 5.2      | Bilder av produksjonen og sammenstillingen              | 57        |
| 5.3      | Erfaringer  | 63        |
| <b>6</b> | <b>Kommersialisering</b>                                | <b>64</b> |
| <b>7</b> | <b>Konklusjon</b>                                       | <b>66</b> |
| 7.1      | Resultater og anbefalinger                              | 66        |
| 7.2      | Videre arbeid   | 67        |
| <b>8</b> | <b>Referanser</b>                                       | <b>68</b> |
| <b>9</b> | <b>Vedlegg</b>  | <b>70</b> |



# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Dagens landbruksmaskiner i vestlige land blir større og større for å rekke over mer areal. Lønnskostnader legger press på landbruket så bønder må gjøre mer arbeid på mindre tid. Trenden vi ser er at maskinene blir større med tiden. Dette medfører at jordsmonnet blir pakket av vekten på maskinene. Jorda pakkes så hardt sammen at den reduserer evnen til å produsere avlinger. I dag veier en vanlig traktor i Norge fra 6,5 tonn til 12 tonn (Valtra T- og S-serie)[1]. Etter at tyngre verktøy eller redskap er montert bak på traktoren, er det vanlig å kompensere ekstra vekt bak med lodd foran på traktoren. Loddene kan være på ett til to tonn. Det er spesielt betenkelig at landbruksnæringen ikke har et bevisst forhold til jordpakking forårsaket av tyngden på maskiner som er i bruk. I en artikkel publisert i ”Den faglige baggrund”, påstås det at 90% av dieselforbruket til traktoren går med til å håndtere jordpakking [2]. Landbruket kan spare betydelige mengder energi på å utvikle maskiner som ikke pakker jorden.

En annen utfordring er bruken av sprøytemidler og fertilisering (gjødsling). Mange av dagens maskiner overbruker disse ressursene. For mye sprøytemidler fører til at avlingene ikke vokser som de skal og giftstoffer kan følge næringskjeden videre til menneske. Det er ikke gunstig for mennesker å innta sprøytemidler. Kunstgjødsling er videre energikrevende å produsere. Brukes det for mye kunstgjødsling, innebærer det en unødvendig ressursbruk. For å bøte på disse uheldige sidene kan man implementere presisjonslandbruk. Det vil si kun å sprøyte der det er nødvendig og kun legge gjødsling i den mengden som trengs.

## 1.2 Prosjektbeskrivelse

For å forhindre overbruk av sprøytemidler og gjødsling og for å snu trenden med tunge landbruksmaskiner, har NMBU startet et forskningsprosjekt. NMBU vil konstruere en autonom landbruksmaskin som kan utføre arbeidsoppgavene en traktor utfører i dag. I prototypstadiet skal maskinen i starten så, gjødsling og sprøyte fordi det er operasjoner som krever mindre energi. Landbruksmaskinen skal være egnet til å drive med presisjonslandbruk. Den skal også kunne opereres uten ledsager for å redusere arbeidstidene til bonden. Maskinen skal være i størrelsesorden 10-20 ganger mindre enn dagens traktorer. For å kompensere for størrelsen må antall maskiner som anvendes økes. Landbruksmaskinen skal kunne fungere i team med andre maskiner for å drive et effektivt jordbruk.

Et delmål for prosjektet er at den autonome landbruksmaskinen skal brukes i undervisningen på NMBU. Elever skal kunne tilegne seg erfaringer om automasjon og hvordan kontrollere autonome maskiner. En mobil robot er en god plattform å utføre laboratorieøvelser med.

Prosjektansvarlig er professor Pål Johan From. Prosjektet startet opp januar 2014. Det er fem mastergradsoppgaver som bidrar til prosjektet. Jørgen Torgersen og Lars Grimstad



jobber med motorer til fremdrift og styring, batterier, kommunikasjon mellom motorstyringsenhetene og motorstyringer. Fredrik Meltzer har ansvaret for dekk og energibruk. Marit Svenkerud analyserer behovet for automasjon i landbruket. Undertegnede har ansvaret for rammekonstruksjonen til maskinen.

Januar 2014 reiste hele gruppen til universitet Rio de Janeiro i Brasil (Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFJR) for å få faglig påfyll. Det brasilianske lærestedet har en egen avdeling på det tekniske instituttet som arbeider med og utdanner folk innen automasjon. Siden NMBU ikke besitter like mye kompetanse på området, var det mye å lære av studenter og lærere i Brasil. Vi lærte spesielt mye om batteriteknologi, motorvalg og motorstyringer.

### **Mål for prosjektet**

Bygge en fungerende autonom plattform som kan videreutvikles til et kommersielt produkt. Høste erfaringer rundt autonomt presisjonslandbruk.

## **1.3 Mål for oppgaven**

Målet for oppgaven er å konstruere en funksjonell rammekonstruksjon til den autonome landbruksmaskinen og dokumentere erfaringer fra produksjonen av rammen.

### **1.3.1 Begrensninger**

- Endre designet på aksling mellom servogir og underarm
- Simulere og optimalisere underarmskonstruksjonen
- Gjøre fysiske tester av rammen
- Utvikle festepunkter for verktøyene
- Utvikle lade- og verktøystasjon
- Designe batteriholdere
- Godkjenne maskinen i forhold til gjeldene regelverk
- Ferdigstille maskinen for masseproduksjon





## 2 Teorikapittel

### 2.1 Symboler og terminologi

Tabell 1: Symboler brukt i oppgaven

|                           | Symbol   | Benevning               | Forkortelse     |
|---------------------------|----------|-------------------------|-----------------|
| Lengde                    | L, l     | Millimeter              | mm              |
| Areal                     | A        | Millimeter <sup>2</sup> | mm <sup>2</sup> |
| Vekt                      | m        | Kilogram                | kg              |
| Kraft                     | F        | Newton                  | N               |
| Moment                    | M        | Newtonmeter             | Nm              |
| Trykk- og strekkspenning  | $\sigma$ | Megapascal              | MPa             |
| Skjærspenning             | $\tau$   | Megapascal              | MPa             |
| Annet arealmoment         | I        | Millimeter <sup>4</sup> | mm <sup>4</sup> |
| Motstandsmoment           | W        | Millimeter <sup>3</sup> | mm <sup>3</sup> |
| Elastisitetsmodulus       | E        | Megapascal              | MPa             |
| Skjærmodulen              | G        | Megapascal              | MPa             |
| Poission's tallet         | $\nu$    | -                       | -               |
| Effektivitet              | $\eta$   | Prosent                 | %               |
| Friksjonskoeffisient      | $\mu$    | -                       | -               |
| Diameter                  | D, d     | Millimeter              | mm              |
| Ekvivalent dynamisk kraft | P        | Newton                  | N               |



Tabell 2: Oversikt over formler

| Formel  |   | Nr.  |
|---|---|------|
| Forholdet mellom skjærmodulen og elastisitetsmodulsen | $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$  | 2-1  |
| Von Mises hypotese                                    | $\sigma_{Von\ Mises} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + \tau_{xy}^2}$ | 2-2  |
| Friksjonskraft  | $F_{friksjon} = N * \mu$  | 2-3  |
| Vandring på frambjelke                                | $Vandring_{(grader)} = \tan(vinkel) * \frac{L}{2}$                                      | 3-1  |
| Normalkraft per hjul                                  | $F_L = \frac{m * g * KF}{4}$  | 3-2  |
| Utgående moment på gir                                | $M_{aksling} = M_{motor} * Utveksling * \eta$   | 3-3  |
| Skyvekraft per hjul                                   | $F = \frac{M_{motor}}{r_{hjul}}$  | 3-4  |
| Spenning i al.rør                                     | $\sigma_{al.rør} = \frac{M_{motor}}{W} + \frac{F}{A}$                                   | 3-5  |
| Kraft i x-retning i øverste kulelager                 | $F_{Tx} = -F_{Bx} = \frac{M}{l_k}$  | 3-6  |
| Friksjonskraft mellom hjul og underlag                | $F_R = N * \mu = F_L * \mu$   | 3-7  |
| Opptredende moment i giret før hjulslipp              | $M_{motor} = \frac{d_H}{2} * F_R$   | 3-8  |
| Summen av momenter er null                            | $\sum M_{F_B} = 0$  | 3-9  |
|   |   | 3-20 |
| Summen av kreftene i x-retning                        | $\sum F_x = 0$  | 3-10 |
| Grunnlag for valg av beregningsformel av kulelager    | $F_L + \frac{0,6}{Y} * F_{Tx} \geq \frac{0,6}{Y} * F_{Bx}$                              | 3-11 |
| Ekvivalent kraft i nederste kulelageret               | $P_{ekvivalent\ B} = XF_{Bx} + (F_L + \frac{0,6}{Y} * F_{Tx})$                          | 3-12 |
| Ekvivalent kraft i øverste kulelageret                | $P_{ekvivalent\ T} = F_{Tx}$  | 3-13 |
| Sikkerhetsfaktor på kulelager                         | $Sikkerhetsfaktor = \frac{Basic\ load\ limit}{P_{ekvivalent\ B}}$                       | 3-14 |
| Maks spenning i aksling                               | $\sigma_{maks} = \sigma_{bøyning} + \sigma_{trykk}$                                     | 3-15 |



|   |   |              |
|---|---|--------------|
| Sikkerhetsfaktor mot flyt i aksling         | $Sikkerhetsfaktor = \frac{\sigma_y}{\sigma_{maks}}$   | 3-16         |
| Flytter kraften til enden av bjelken        | $M_1 = M_2$   | 3-17         |
| Nedbøyning av fast innspent utkragerbjelke  | $y = \frac{F * l^3}{3 * E * I}$                       | 3-18         |
| Bøyespenning                                | $\sigma_{bøye} = \frac{M}{I} * y$                     | 3-19<br>3-29 |
| Summen av krefter i y-retning er lik null   | $\Sigma F_y = 0$                                      | 3-21         |
| Momentlikning for første lengdeinterval     | $M(x_1) = Fa * x$                                     | 3-22         |
| Skjærkraftlikning for andre lengdeinterval  | $F(x_2) = Fa - F_1$                                   | 3-23         |
| Momentlikning for andre lengdeinterval      | $M(x_2) = Fa * x - F_1 * (x - l_1)$                   | 3-24         |
| Skjærkraftlikning for tredje lengdeinterval | $F(x_3) = Fa - F_1 - F_2$                             | 3-25         |
| Momentlikning for tredje lengdeinterval     | $M(x_3) = Fa * x - F_1 * (x - l_1) - F_2 * (x - l_2)$ | 3-26         |
| Maclay funksjon                             | $EIy'' = M(x)$  | 3-27         |



## 2.2 Materialer

**Elastisitetsmodulus (E)** er egenskapen et materiale har til å motstå deformasjon ved trykk-/strekkspenninger. Når et materialet deformeres vil lengden endres. Tøyningen ( $\epsilon$ ) er forandringen i lengde delt på opprinnelig lengde. Elastisiteten til et materiale er vinkelkoeffisienten i et belastnings-/tøyningsdiagram. For å bestemme elastisitetsmodulusen til et materiale benyttes strekkprøving. Ved strekkprøving måles lengdeendringen til prøvestaven ved økende påført strekkspenning. Måles i  $\text{N}/\text{mm}^2$  eller MPa. Elastisitetsmodulusen for stål er omkring 210 000 MPa, mens for plastikk omkring 20 000 MPa.

**Skjærmodulen (G)** er egenskapen et materiale har til å motstå tverrkontraksjoner. Når et legeme endrer lengde medfører det at tverrsnittsarealet til legemet forandres. Forholdet mellom endringen i lengderetning og tverretning er en materialavhengig konstant som benevnes Poisson's tallet ( $\nu$ ). Poisson's tallet er dermed forholdet mellom skjærmodulen og elastisitetsmodulen.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Ligning 2-1}$$

**Flytspenning ( $R_e$ )** er laveste spenningen som permanent deformerer materialet. Spenning er kraft delt på areal. Ikke alle materialer har en tydelig flytspenning. Spenningen som fører til varig deformasjon for materialer uten flytgrense kommer fra en prosentandel av strekkfastheten. Måles i  $\text{N}/\text{mm}^2$  eller MPa. Tre eksempler på stållegeringer som benyttes i industrien har flytspenning på henholdsvis 235 MPa, 275 MPa og 355 MPa.

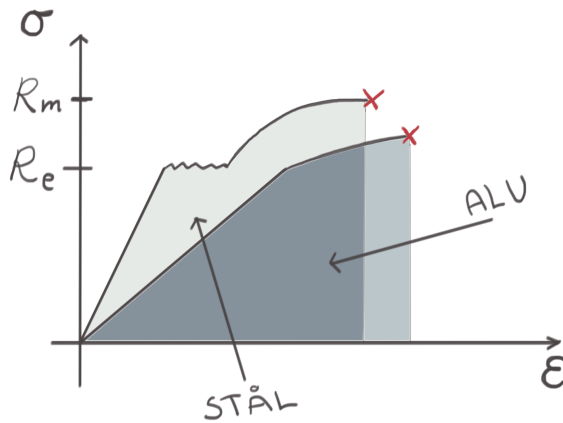
**Strekkfastheten ( $R_m$ )** er høyeste spenning materialet tåler før det går til brudd. Måles i  $\text{N}/\text{mm}^2$  eller MPa. Strekkfasthet på plast spenner seg fra 10 MPa til 80 MPa, for stål er strekkfastheten fra 310 MPa til over 1000 MPa.

**Von Mises hypotese** er en metode for å finne den totale spenningen i et legeme som utsettes for både skjær- og trykkspenninger. [3]

$$\sigma_{\text{Von Mises}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + \tau_{xy}^2} \quad \text{Ligning 2-2}$$

Stål oppfører seg på en spesiell måte når det utsettes for høye spenninger. Når det gjelder spenning forårsaket av tøyning, forblir materialet nesten uforandret helt frem til det begynner å flyte ( $R_e$ ). Spenninger utløst av lavere flytespenningen kalles elastisk deformasjon. Stålet vender tilbake til sin opprinnelige form. Når flytspenningen overstiges vil materialet deformeres og forbli deformert. Dette kalles plastisk deformasjon. Økes spenning videre vil stålet tilslutt gå i brudd ( $R_m$ ). Aluminium oppfører seg annerledes fordi aluminium ikke har

en tydelig flytsone. En angir derfor heller at flytspenningen til aluminium er 80% av strekkfastheten. Total energi opptatt av metallet er integralet av tøyning spennings grafen. Aluminium kan deformeres mer før brudd og opptar mer energi enn stål. I konstruksjoner som skal beskytte innholdet ved deformasjon, for eksempel en bil, er aluminium et egnet materiale fordi det konsumerer mye energi på å deformeres.



Figur 1: Tøyning/spenningsgraf. Tøyningen ( $\epsilon$ ) på horisontal akse er deformert lengde delt på opprinnelig lengde. Spenningen ( $\sigma$ ) på vertikal akse er kraft på areal. Behovet av energi for å deformere metallet er det samme som arealet under grafen.

### 2.2.1 Metaller

Kjennetegnet til metalliske materialer er metallbindingene mellom atomene. Metallbindinger er atomer som pakkes sammen i grupper som kalles krystaller eller korn. Alle atomene gir fra seg det ytterste valenselektronet som får bevege seg fritt i krystallstrukturen. Fordi elektronene ikke er bundet fast leder metaller varme og elektrisitet godt. Metallbindinger gjør det mulig å flytte på atomene i forhold til hverandre ved ytre påkjenninger. Metall kan derfor formes og beholde formen. Metallstrukturen er aldri helt tettpakket og homogen. Mellom krystallene kan det være hull, forskyvninger, ansamlinger av legeringselementer og størrelsesforskjeller på krystaller som endrer egenskapene til metallet. Mennesket har helt siden jernalderen utforsket metoder for å endre egenskapene til metaller. Mange av de samme metodene som ble brukt i tidligere tider brukes fortsatt i større skala. Et eksempel er når stål blir smidd for å oppnå en hard egg på kniver. Plogen som velter jorda får gjennom dette forlenget levetid. Forskjellen er at før i tiden brukte smeden hammer og ambolt for å deformere stålet, nå brukes store hydrauliske presser.

En positiv egenskap til metallene er at de kan gjenbrukes. Når et metall varmes opp kan man få tilbake opprinnelig krystallstruktur. Det kreves vesentlig mindre energi for å smelte om metall enn å utvinne metall fra skrap. Ved å resirkulere aluminium kreves det kun 5% av energien som behøves til å utvinne aluminiumen fra naturen.



Ikke alle metallkrystaller er bygget opp med samme form. De ulike strukturene påvirker egenskapene til metallet. Det finnes tre krystallstrukturer.

**Kubisk romsentrert struktur.** Eksempel på metall med denne strukturen er jern, stål, krom og wolfram. Kjennetegnet til disse metallene er høy styrke og hardhet.

**Kubisk flatesentrert struktur.** Eksemplet på metall med denne strukturen er bløtere metaller som aluminium, bly, kobber og gull. Et og samme metall kan endre struktur ved ulike temperaturer. Jern har under 906 grader celsius kubisk romsentrert struktur, men endrer til kubisk flatesentrert når temperaturen øker.

**Heksagonal tettpakket struktur.** Metaller med denne strukturen er stoffer med høy strekkfasthet og høy hardhet. Et eksempel er titan.

Det er fire måter å øke styrken til et metall.

**Tilsette andre metaller og danne legeringer.** Kornstrukturen inneholder alltid feil og hulrom. Ved å tilsette legeringsmetaller og lage blandingskrystaller, vil tilsetningsmetallene plassere seg i hulrommene. Ved plastisk deformasjon vil legeringselementene jobbe mot bevegelse mellom kornene og styrke metallet.

**Bearbeide kaldt metallet.** Ved å deformere metallet i romtemperatur vil dislokasjoner flytte på seg til de treffer en korn grense. Det kreves mer kraft for å lage nye enn å flytte på dislokasjoner. Metallet tåler mer påkjenner når dislokasjonene er sperret av korn grensene. Ulempen med kald deformasjon er at duktiliteten blir mindre. Metallet går til brudd ved mindre forlengelse en før bearbeidingen. Plater av stål vil normalt være kaldbearbeidet av store valser for å oppnå tynne former.

**Redusere kornstørrelsen i metallet.** Når en dislokasjon treffer en korn grense stopper dislokasjonen opp. Reduseres kornstørrelsene i metallet vil det oppstå flere korn grenser og derfor gjør det mer sannsynlig at en dislokasjon vil bremses opp.

**Herde metallet ved varmebehandling.** Når en legeringen varmes opp dannes det nye krystaller av legeringselementene. Ved rask avkjøling kan krystallene bevare sin nye form. Legeringskrystallene vil forhindre dislokasjoner å flytte på seg.

Stål som kun består av jern og karbon har en strekkfasthet på 310 MPa. Ved å tilsette legeringer og bearbeide stålet kan det oppnå en strekkfasthet på 1200 MPa. Det er nesten firedobling av styrken.

## Stål

Stål er det mest brukte metallet i landbruksmaskiner. Alt fra redskap til maskiner er i all hovedsak konstruert av stål. I landbruket er det behov for et vidt spekter av stålkvaliteter. En plog må ha en hard og holdbar overflate for ikke å slites rask ned, drivakslinger på en traktor må være robuste mot deformasjon og ha høy strekkfasthet og oppbevaringstanker for melk skal ikke kunne gå i oppløsning og skilles ut i væsken. Stål har en elastisitetmodulus på rundt 210 000 MPa. Strekkfastheten varierer fra 250 MPa til over 1000 MPa. Stål har en relativt høy egenvekt på 7,8 kg/dm<sup>3</sup>. Stålets egenskaper samt pris gjør det egnet for robuste maskiner. Stål er kombinasjon av grunnstoffet jern (Fe) og karbon (C) med et karboninnholdet på under 2 %. Stållegeringer med høyere karboninnhold benevnes støpejern. Ved å variere innholdet av karbon endres stålets mekaniske egenskaper. Mer



karbon øker stålets strekkfasthet, herdbarhet, hardhet og slitestyrke. Reduseres karboninnholdet blir stålet mer sveisbart, tåler mer deformasjon og slagseigheten øker.

I stålet blandes jern og karbon ulikt ved forskjellige varmebehandlinger. Ved herding oppvarmes stålet til jernet danner austenitt struktur. Dette er en kubisk flatesentrert struktur som gjør det mulig å løse karbonet jevnt fordelt mellom jernatomene. Etter rask nedkjøling danner stålet herdestruktur som gjør det hardere og sterkere. Karbonatomene rekker ikke å vokse sammen før stålet har nådd romtemperatur og det dannes spenninger i metallstrukturen. Herdestruktur gjør metallet sterkere og sprøere.

Norsk Stål lagerfører et stål med betegnelsen WELDOX. For å lage et stål med høy strekkfasthet, men fortsatt ha en god sveisbarhet er det tilsatt bor (B). Ved å bruke legeringer og varmebehandlinger oppnås de ønskede egenskaper. Nedenfor er en tabell over kjemiske variasjoner av ulike typer stål.

Tabell 3: Kjemisk sammensetning i ulike stållegeringer.

| Hva              | Navn          | Kjemisk sammensetning % |               |              |             |               |              |       |       |       |       |
|------------------|---------------|-------------------------|---------------|--------------|-------------|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|                  |               | C                       | Cr            | Ni           | Mo          | Si            | Mn           | B     | P     | S     | N     |
| Konstruksjonstål | S355JR        | 0,24                    | -             | -            | -           | 0,55          | 1,60         | -     | 0,045 | 0,045 | 0,009 |
| Støpejern        |               | 2,5-<br>4,0             | -             | -            | -           | 2,0-<br>2,50  | 0,5-<br>1,30 | -     | 0,20  | -     | -     |
| Høystyrkestål    | WELDOX<br>700 | 0,13                    | 0-<br>0,60    | -            | 0-<br>0,50  | 0,22-<br>0,45 | 1,40         | 0,002 | -     | -     | -     |
| Rustfritt        | X8Cr17        | ≤0,10                   | 16,0-<br>18,0 | 8,5-<br>11,5 | 2,0-<br>2,5 | -             | -            | -     | -     | -     | -     |

Stål er et av de eldste konstruksjonsmaterialene. Stål finnes i mange legeringsvariasjoner, fra svake til sterke, sprø til myke, korrosjonsbestandige til syrefast. Stål har forholdsvis stor vekt i forhold til styrke, og energieffektive kjøretøy går av den grunn vekk fra stål. Stål er avhengig av sterk varme for å produseres.

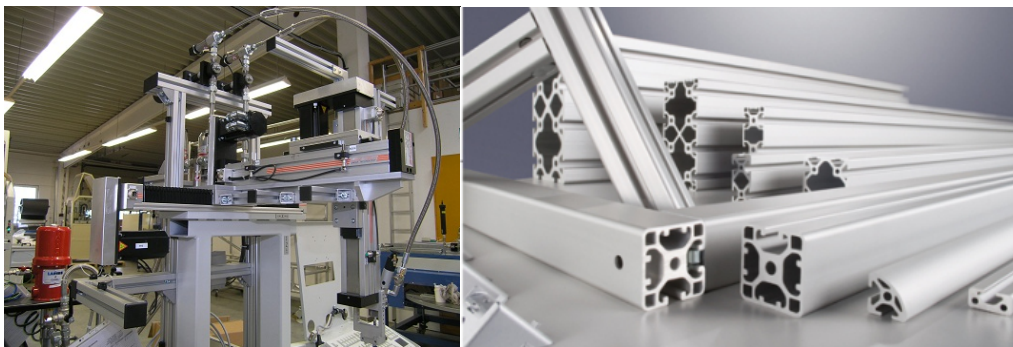
### Aluminium

Aluminium er et lettmetall. Med en tetthet på  $2,7 \text{ kg/dm}^3$  har det tre ganger mindre masse per volum enn stål. Aluminium har en elastisitetmodulus på  $79\,000 \text{ MPa}$  som er en tredel av stålets. Det vil si at aluminium vil ha tre ganger så stor deformasjon i forhold til stål når to identiske strukturer påføres lik kraft. Disse egenskapene medfører at konstruksjoner laget av aluminium beveger seg mer. For å unngå spenningskonsentrasjoner er det vanlig å bruke bolter, nagler eller andre sammenføyningsmetoder som tillater bevegelse.

Som stål kan aluminium herdes, glødes og tilsettes legeringer for å endre egenskapene. Når aluminium herdes varmes det til innherdingstemperatur. Denne varierer mellom legeringene. Målet med innherdingen er å samle legeringselementene sammen i aluminiumskrystallene.

Deretter foretas det en raskt avkjøling for å beholde strukturen. Videre må metallet varmtherdes i etterkant for å skille ut legeringselementene. Prosessen gjør metallet sterkere og hardere. Fordi aluminium blir innherdet med høy temperatur dannes det en svak og myk sone rundt sveiser. Det er nødvendig å utføre herdeprosessen på hele konstruksjonen for å få samme struktur i delen samt sammenføyningen. Siden aluminium mister styrke og da hele konstruksjonen må i en herdeovn etter sveising, er det enklere å bolte eller nagle.

Aluminium er enkelt å forme og kan ekstruderes. Aluminiumen varmes opp til den blir mykere og deretter presses metallet gjennom former av store hydrauliske presser. Plasseres flere former etter hverandre kan det produseres avanserte lukkede profiler. Profilene kan brukes som byggesett og benyttes i stor grad i automasjonsindustrien. Spor i sidene på profilene kan være tilpasset braketter og muttere. Bruksområdet er enormt.



Figur 2: Aluminiumprofil og bruksområde. [100]

### Titan

Titan er et metall med gode korrosjons, styrke og vektgenskaper. Overflater som trenger gode korrosjonsegenskaper, tildekkes med tynne plater av titan. På grunn av høy pris og strenge krav til bearbeiding benyttes titan kun til spesielle formål. Strekkfastheten til titan varierer fra ikke levert titan på 390 MPa til legeringer på 1100 MPa. Titan har en lav egenvekt på  $4,54 \text{ kg/dm}^3$ . Kroppen reagerer ikke på titan, og materialet inngår derfor i proteser. Deler i en flymotor som utsettes for sterke krefter og intens varme, er ofte produsert av titan.

### 2.2.2 Plastikk

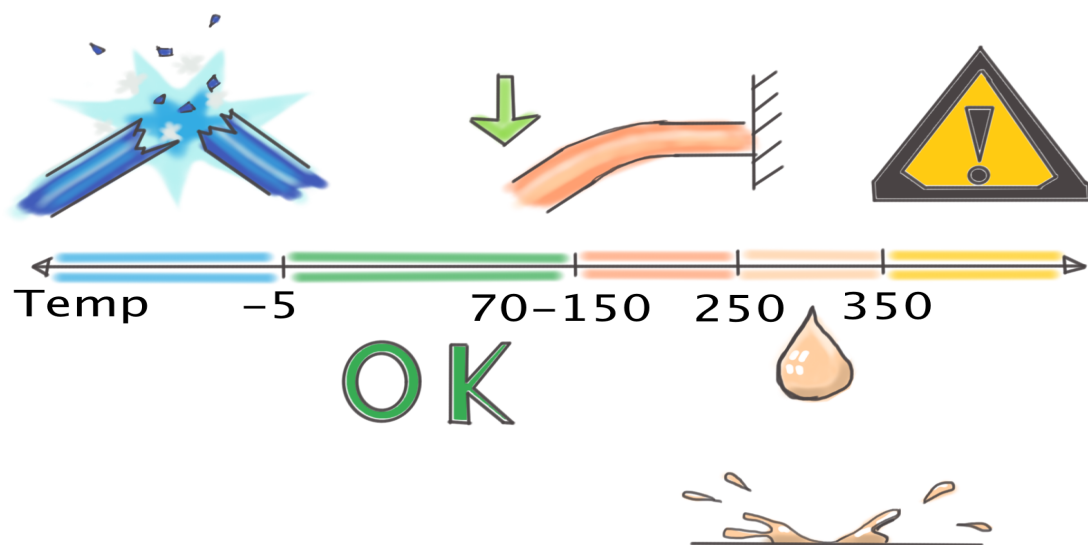
Kategorien plastikk favner en stor materialgruppe. Plast er kunstig fremstilt av olje, gass eller cellulose. Plast består mindre molekyler som knyttes sammen til lange kjeder. Hvilke molekyler som anvendes og hvordan disse er knyttet til hverandre avgjør plastens materialegenskaper. Plast deles i to hovedkategorier. Inneholder platen lange molekyllkjeder kalles den termoplast. Plast bygget av molekyllkjeder som er bundet sammen, benevnes herdeplast. Begge plasttyper kan kombineres med armering og danne en kompositt. Armeringen kan være lager av fiber, metaller eller tråder av keramiske stoffer. Hensikten med å armere platen er å øke strekkfastheten.



## Termoplast

Termoplast er trådaktige, lineære eller forgrenede molekykjeder. Et visuelt bilde er en kjele med kokt spagetti. Termoplast har en tetthet på 0,9 til 2,5 kg/dm<sup>2</sup>. Styrken varierer mye mellom ulike plasttyper, miljø og temperatur. Vanlig termoplast blir myk når den varmes opp til 70-150 grader celsius. Varmes platen mer smelter den og blir flytende. Når den nedkjøles gjenoppretter platen samme struktur som før. Termoplast er derfor resirkulerbart og kan sammenføres med sveising. Overstiger platen smeltetemperaturen vil molekylene endre seg og ødelegge platen. Platen blir sprø, hard og kan bli forkullet om temperaturen er høy nok. Senkes temperaturen under glasstemperaturen blir platen sprø, hard og mister evnen til å deformeres. De fysiske egenskapene setter begrensinger til termoplast som konstruksjonsmateriale. Konstruksjonen får en begrenset driftstemperatur på eksempelvis -5 til 70 grader celsius.

Termoplastmolekylene blir delt når de utsettes for UV-stråler. Det er derfor termoplast blir sprø og forandrer farge ved langvarig oppbevaring utendørs i sollys. Skal et produkt laget av termoplast fungere over lengre tid i sollys må det beskyttes mot UV-stråling.



Figur 3: Skjematisk fremstilling av temperaturpåvirkning av termoplast. Ikke i skala. Blå farge (temp < -5) indikerer glasseringstemperatur, grønn farge (-5 til 70-150) er driftstemperatur, oransj (70-150 til 250) er mykningsfasen, brun (250 til 350) er smeltetemperatur og gul (temp > 350) er temperaturer hvor molekylene i platen endres og platen kan ikke gjenopprette opprinnelig struktur.



Figur 4: Termoplastramme i Husqvarna TE300 motorcrosssykkel. Plast har forbedret styrkeegenskapene så mye at termoplast nå benyttes som bærende konstruksjon i motorsykler. [101]

Fordeler ved termoplast er at det er mulig å produsere avanserte former på kort tid. Plasten varmes opp så den blir flytende og kan fordeles jevnt i former. Ved presstøping varmes platen opp og trykkes inn i avkjølte former. Når platen har stivnet tas produktet ut og nytt støp kan skje. Frekvensen på produksjonen avhenger av størrelsen på delen, men er objektet på størrelse med et kaffekrus, kan det presses ut et sett med kopper på 10 sekunder. Prestøping er derfor en meget effektiv produksjonsmetode. Ved rotasjonsstøping helles pulver av termoplast i en lukket form. Formen roterer og varmes opp til smeltetemperaturen for å fordele platen likt rundt. Så avkjøles formen og delen kan tas ut. Slike produksjonsmetoder er meget kostnadseffektive i stor skala. Mindre båter på 8 til 18 fot kan lages med rotasjonsstøping. Ulempen med termoplast er lav styrke, temperaturavhengige materialer og dyrt produksjonsutstyr. Presser og støpeformer er avanserte verktøy og krever mye tilpasning. Når produksjonen først er tilpasset, kan man presse ut deler med høy frekvens. LEGO brikker er ABS plast produsert i presstøper. I 2012 produserte Lego 5,2 millioner brikker per time med en geometrisk presisjonsavvik på maksimalt 0,005 millimeter. LEGO har en feilrate på 18 enheter av 1 million produserte enheter[4].

Prisen på 3D-printere reduseres stadig. Nå er det mulig for privatpersoner å ha sin egen printer hjemme. En 3D-printer varmer opp termoplasttråder og legger dem ut på et brett. Akkurat som en limpistol, bare at ekstrudermunnstykket er datastyrt med nøyaktige servomotorer. Nå er det å mulig få kjøpt en enkel printer som kan skrive ut deler på størrelse med en knyttneve for 24 000 kr [5]. Mulighetene med en slik printer er enorme. Er printeren stor nok, kan det produseres ferdige rammer med alle deler ferdig montert. Ulempen med slike printere er produksjonstiden per enhet. Det tar lang tid å produsere deler fordi printeren legger lag for lag. Et lag kan være 1/10 millimeter som gir 2800 lag på 28 centimeter. 3D-printere bruker enten ABS- eller PLA-plastikk. Strekkfastheten til ABS-plast er 40-50 MPa og til PLA-plast er 70 MPa. Styrken til produkter som er skrevet ut, avhengig av belastningsretningen (anistrop materiale), noe som må tas hensyn til.



## Herdeplast

I motsetning til termoplast som har molekyllkjeder som kan beveges i forhold til hverandre, har herdeplast molekyllkjeder som er festet i hverandre. Herdeplast kan derfor ikke endre form etter at molekylene er satt. Herdeplast blir ikke mykere ved oppvarming, men har samme egenskaper til temperaturen blir høy nok til å forandre molekyllstrukturen. Fordelen med herdeplast er høy styrke, gode kjemiske egenskaper og enkel produksjon. Herdeplast er mye brukt som komposittmateriale sammen med forsterkningsmaterialene kevlar, karbonfiber og glassfiber. Med forsterket kjerne kan herdeplast få et bedre styrke til vekt forhold enn andre konstruksjonsmaterialer. De letteste og sterkeste tråsykkelrammene er produsert av karbonfiberforsterket herdeplast. Herdeplast har form som en tyktflytende masse før herderen er tilsatt og kan smøres ut eller støpes i former. Herderen forandrer molekyllstrukturen til plasten. Ulike typer herdeplaster har ulike herdetider. Ulempen med herdeplast er at materialet er ikke gjenbrukbart og herdeplast er svært giftig. Krever godkjente ventilerte produksjonslokaler.

Eksempler på bruksområder er båtskrog, deksler, tråsykkelrammer og racerbilrammer.

### 2.2.3 Organiske materialer

Organiske materialer er de eldste konstruksjonsmaterialene menneskene har brukt. En stor fordel med organiske materialer er at de er fornybare. Jordkloden lider av overforbruk og naturressurser er mangelvare. Fornybare materialer kan produseres rimelig og materialene er nedbrytbare.

Av organiske materialer er det treverk som er mest brukt. I bygningskonstruksjoner er det mye benyttet i land hvor det er tilgang på skog. Treverk er et anisotrop materiale hvor egenskapene er avhengig av orienteringen. Trær er oppbygget av lange fiber i lengderetning. Påføres det kraft på tvers av veden, er ikke styrkeegenskapene like gode. Da er det styrken mellom fibre og ikke fibre selv som blir belastet.

I rammekonstruksjoner til kjøretøy og bygninger er bambus benyttet. En rasktvoksende tresort med sirkulært rørform som er et godt egnet konstruksjonsprofil. Bambus vokser utrolig fort, på litt over et år kan bambus vokse 15 meter i høyde og bli 0.3 meter i diameter. Det er mulig å kjøpe en tråsykkel laget av bambus. Tonkin bambus er benyttet som fiskestenger.

Organiske materialer som treverk er byttet ut med andre materialer på grunn av mekaniske egenskaper. Trevirke har høy vekt i forhold til styrke. Når andre konstruksjonsmaterialer har lik pris som treverk er det lite hensiktsmessig å velge treverk.



## Sammendrag av materialeegenskapene

Tabell 4: Grov oversikt over mekaniske egenskaper til utvalgte materialer[6]

| Materiale  | Strekfasthet (MPa) | Elastisitetsmodulus (MPa) | Egenvekt kg/cm <sup>3</sup> |
|------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Stål       | 255-1200           | 200 000 - 216 000         | 7.9                         |
| Aluminium  | 200-1000           | 76 000 – 79 000           | 2.50 – 2.95                 |
| Titan      | 390-1100           | 90 000 – 137 000          | 4.36 - 4.84                 |
| Termoplast | 10 - 85            | 3 000 – 67 000            | 1.04 – 2.20                 |
| Kompositt  | 200 - 1000         | 21 000 – 60 000           | 1.55 – 1.95                 |
| Trevirke   | 5 - 45             | 2 000 – 25 000            | > 1                         |

## 2.3 Sammenføyninger

### 2.3.1 Liming (Adhesiver)

Liming er en gammel sammenføyningsmetode. Lim kan lages av organisk materialer. På 1900 tallet kom de kjemiske limene. Lim er en enkel og allsidig metode å hefte to deler sammen. Det er ikke krav til tykkelse eller forskjell i tykkelse på deler som skal sammenslutes. Lim kan bevare styrken i mange ulike miljøer og liming er en lett sammenføyningsmetode. Ulemper med liming er at lim er temperaturavhengig, forringelse av kvalitet kan inntreffe over tid og lim kan bestå av skadelig kjemiske stoffer. Det stilles strenge krav til ventilasjon i lokalet hvor liming skal utføres.

For å lime ulike materialer må man velge riktig lim. Hvert materialet har sin spesielle måte å hefte på. Lim kan enten lage en kjemisk binding inn i materialet eller hefte i overflaten. Riktig limprosedyre er viktig for å få optimal heft. Lim er ikke like sterk binding som andre sammenføyningsmetoder, men fordelen med lim er at det er flytende og kan benyttes over større arealer. En skrue har et begrenset areal kreftene overføres over, ved bruk av lim kan man enkelt mangedoble arealet. Derfor kan liming være sterkere enn sveising hvis stort nok areal heftes sammen. Lim er mest motstandsdyktig mot skjærkrefter og minst mot motstandsdyktig mot skrell.

Lim er tilgjengelig i flere ulike varianter:

**Herdelim** – Består av en eller to komponenter hvor herder og base blandes sammen for å lage binding. Tokomponent lim kan være det samme som herdeplast. Når komponentene er blandet sammen, vil det dannes en permanent binding som ikke er reverserbar. Epoksyylim er et eksempel på lim, men produktet brukes også i kompositt plaster.

**Løsemiddel lim** – Lager en binding når løsemidlet fordampes. Et løsemiddel kan tørke på sekunder og er ferdig herdet på timer. Derav benevnelsen hurtigtørkende lim. Når limingen utføres riktig kan styrken på sammenføyningen være like sterk som tokomponent lim.



**Kontaktlim** – Påføres begge flater som skal heftes, så skal limet tørke og hefte seg fast til overflatene hver for seg. Når limet er helt ferdig tørket presses de limte flatene mot hverandre. De behandlede delene reagerer med hverandre og delene heftes sammen.

**Smeltelim** – Limpistoler bruker smeltelim, termoplast, som limesubstans. Når termoplast varmes opp til smeltetemperatur kan plasten påføres overflater som skal heftes. Limet stivner og hefter når temperaturen faller til romtemperatur. På et senere tidspunkt er det er mulig å varme opp limet så heften løsner.

### 2.3.2 Nagler, skruer og klinker

Skrueforbindelser har mange fordeler. Derfor brukes de i alle typer rammekonstruksjoner. Enten det er bygninger eller kjøretøyer, det er alltid en skrue å finne. Skruerforbindelser har den fordelen at sammenføyningene ikke er permanent, men kan tas fra hverandre enkelt. Forbindelsen blir også tøyelig noe som er ønskelig i en ramme i et kjøretøy. Ulempene ved en skrueforbindelse er hullkantrykk, sårbarhet mot korrosjon og fare for utrivning i mykere materialer. Skruens styrke er avhengig av arealet på tverrsnittet samt materialet skruen er produsert i. For å øke styrken til en skrueforbindelse, kan man enten øke størrelse på skruen, bytte til en skrue med høyere strekkfasthet eller endre antall skruer.

Nagler og klinker deler mange av de samme fordelaktige egenskapene til skruene. Forskjellen mellom de to typene forbindelse er at nagler og klinker er en permanent sammenføyning. Nagler fjernes ved å ødelegge naglen og borre de ut. I flyskrog er nagler brukt i utstrakt grad. Et aluminiumsflyskrog utsettes for varierende belastninger og må ha muligheten til å bevege seg. Aluminiumen som benyttes i fly reduserer styrken ved varmebehandling. Å nagle er en enklere sammenføyingsmetode som krever mindre opplæring enn sveising.

### 2.3.3 Sveis

Sveis er en sammenføyingsmetode der materialene som skal heftes, smeltes sammen. Materialer som smelter og gjenopptar opprinnelig form ved avkjøling, egner seg til sveising. Det er flere metoder for å varme opp materialet til smeltetemperatur. For metaller utnyttes evnen til å lede elektrisk energi. Når elektronene beveger seg i metallet vil det føre til temperaturøkning som igjen vil smelte metallet. Ved å bruke elektrisitet har man god kontroll over hvor og hvor mye varme som tilføres. En annen metode er å anvende en ekstern varmekilde til å øke temperaturen. For eksempel et gassbluss eller en varm metallprofil som holdes inntil materialet.

Fordelen med sveis er fleksibiliteten til former og konstruksjoner som kan lages og styrken på sammenføyningen. Så lenge deler berører hverandre kan de smeltes sammen. Ulempen ved sveising er at materialer ikke går tilbake til opprinnelig struktur. Jern- og aluminiumkrystaller endres ved varmebehandlinger og de mekaniske egenskapene rundt området som er sveiset, forandres. I et smeltebad vil også nitrogengass og oksygen gass blande seg med materialene. For å unngå problemstillingen må man blåse vekk luften med en edelgass som ikke reagerer i smeltebadet. Det er avgjørende for kvaliteten til en sveis hvor nøyaktig området er rengjort, hvilke legeringer som sveises, hvilke gasser man bruker og



varmen som tilføres. Derfor er sveising en egen profesjon som krever mye kunnskap for å utføres korrekt.

Etter at en konstruksjon er ferdigstilt med sveising, kreves det sjekk av sammenføyningene. Det finnes ulike metoder for å verifisere kvaliteten av en sveis. En kan bruke ultralyd, fargestoffer som festes i sprekker eller gjennomlyse sveisen med røntgenstråler.

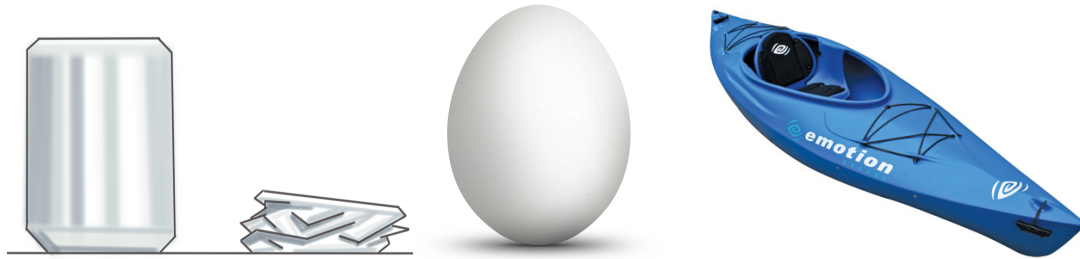
#### 2.3.4 Pasninger

Materialer utvides og krymper ved varierende temperaturer. Ved å varme opp en del så den utvides kan den tres på en annen del. Når delene avkjøles vil den ytre delen krympe og trekke seg fast rundt den indre. Kulelager og akslinger bruker pasninger som sammenføyningsmetode. Overflater som brukes i en pasning må være produsert med høy nøyaktighet. Stor grad av nøyaktighet øker produksjonskostnadene.

### 2.4 Konstruksjonstyper

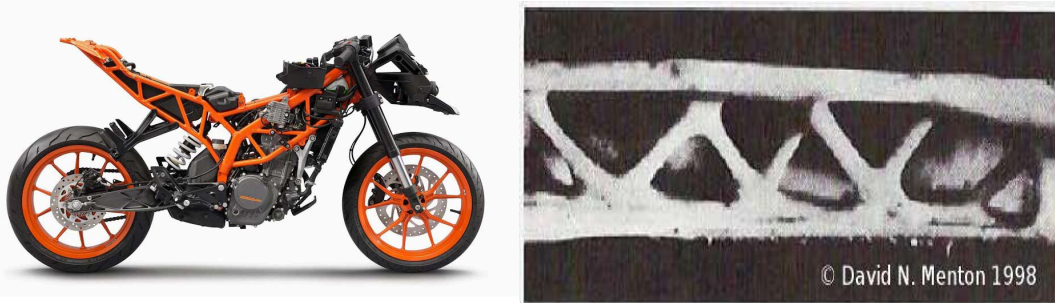
For å møte kravene til en konstruksjon er det viktig å bruke riktig materiale, men det er like avgjørende å benytte riktig konstruksjonstype. Forskjellen på å benytte to ulike konstruksjonstyper kan være stor. En personbil har en helt annet rammekonstruksjon enn en lastebil fordi kjøretøyene må oppfylle ulike bruksområder. Materialene i begge kjøretøyene kan være de samme.

**Skallkonstruksjon** er som navnet tilsier, en konstruksjon laget av skall. Det er en av de sterkeste konstruksjonstypene som finnes. Når en geometri gir høy styrke kan materialbruken reduseres uten å redusere styrken. I maskiner og rammer der lav vekt er viktig er skallkonstruksjoner mye brukt. En annen fordel er at overflaten på konstruksjonen står for bæringen. Det gjør det mulig å designe et stort spekter av former for å lage et produkt med helt spesielle geometrier. Ulempen med skallkonstruksjoner er at de er kompliserte å beregne. Takket være datamaskiner er styrkeberegningen blitt mye enklere enn ved manuelle beregninger. En annen kritisk utfordring med skallformen er at konstruksjonen kan kollapse hvis det inntreffer en skade i skallet. En brusboks fremstilt av aluminium tåler at en voksen mann på 100 kg overfører all sin vekt til den, men så fort det lages en liten bulk i siden av boksen vil den kollapse. I naturen finnes det mange former for skallgeometrier, for eksempel egg. På grunn av kompliserte geometrier kan skallkonstruksjoner være avansert å produsere og vedlikeholde. Det medfører høyere kostnader.



Figur 5: Eksempler på skallkonstruksjoner. Til venstre en brusboks som er blitt utsatt for krefter og bulket i siden. Boksen vil kollapse. I midten et hønseegg og til høyre en havkajakk. [102][103]

**Fagverkkonstruksjoner** er strukturer sammensatt av rør eller bjelker. Ved å sette sammen konstruksjonselementene i mønster kan man oppnå stor styrke. I et fagverk er alle elementene fritt opplagret, de tar ikke opp moment. Det gjør styrkeberegningen enkel. Fagverkprinsippet legges ofte til grunn ved bygging av broer, bygninger, motorsykelrammer og andre bærende konstruksjoner. I motsetning til skallkonstruksjoner kan et fagverk fortsette å bære etter at det er deformert, vel og merke med redusert kapasitet. Fagverk kan ha stor styrke mot vektforhold og være enkle å produsere. For at fugler skal kunne fly må de ha et sterkt og lett skjelett. Ved å benytte fagverkstruktur innvendig i beinene kan veggtykkelsen reduseres uten å redusere styrken.



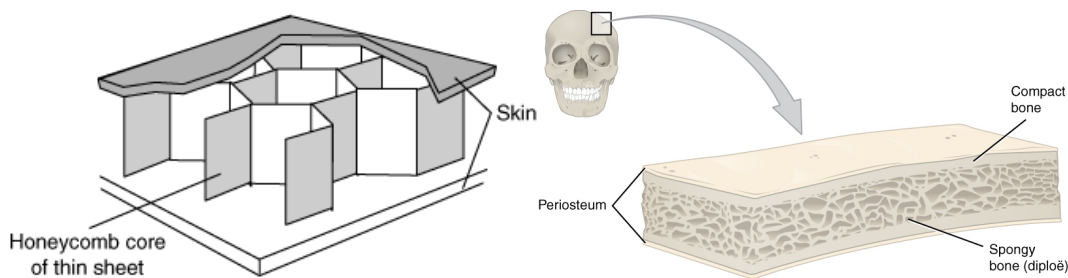
Figur 6: Fagverkkonstruksjoner, til venstre KTM RC390 racing motorsykel, til høyre innsiden av et fuglebein. [104][105]

**Rør- og bjelkekonstruksjoner** er enkle konstruksjonselementer. De kan settes sammen til fagverk eller fungere alene. Profiltverrsnittet varierer fra enkle hullprofiler til kompliserte ekstruderte elementer. Fordeler med rør- og bjelkekonstruksjoner er at de er enkle å beregne, billige og fleksible. På samme måte som for fagverk er en bjelke bærende selv om den er deformert. Når et element utsettes for bøyepeninger virker kreftene sterkest ytterst i profilet. Derfor kan et en lage profiler som har mye gods ytterst i profilet mens kjernen er tom. Bambustrær vokser så kjernen er hul mens fibre danner et rør. Treet sparer energi på å unnlate å fylle helle tverrsnittet med fiber.



Figur 7: Bjelke- og rørkonstruksjoner. Til høyre snitt av bambus. [106][107]

**Sandwichkonstruksjoner** lages av to plater limt sammen med en lett kjerne som holder platene adskilt. Som beskrevet tidligere opptrer bøyespenningene ytterst i et tverrsnitt. I en sandwichkonstruksjon har man to plater med materialer med høy styrke ytterst. Materialer som holder platene adskilt, kan være lette og rimelige. Sandwichkonstruksjoner kan i tillegg til å være meget sterke også være varmeisolerende. Ytterplatene kan være fremstillet av metall eller kompositter. Sandwichplater finnes i Ikea møbler, lastebilskap, flyskrog og dyrebein. Hodeskallen til mennesker er oppbygget av to lag med harde sterke bein og et porøst materiale mellom. Sandwichkonstruksjoner kan være svært rimelige da fyllmaterialet i midten kan være papp eller andre rimelige materialer. Ulempen med slike konstruksjoner er at de i likhet med skallkonstruksjoner kan være skjøre ved deformasjoner.

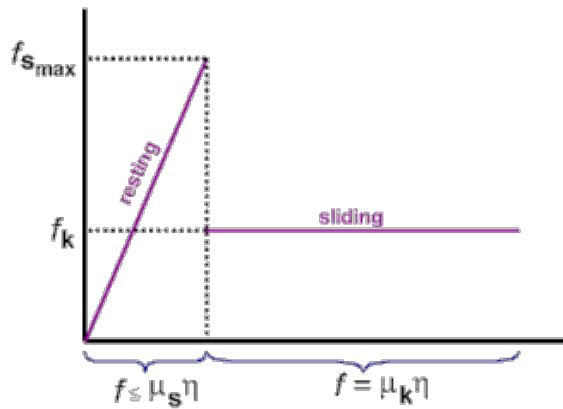


Figur 8: Til venstre fabrikkert sandwichkonstruksjon. Til høyre snitt av hodeskallen til mennesket. [108][109]



## 2.5 Friksjon

Friksjon er kraften som virker mot påvirkningskraften i kontaktflaten mellom to legemer.



Figur 9: Hvilefriksjon og kinetisk friksjon. [110]

Når et legeme står i ro i forhold til et annet legeme, oppstår hvilefriksjon. Når et legeme beveger seg i forhold til et annet legeme, dannes kinetisk friksjon. Friksjonskoeffisienten er lavere etter slipp når legemene beveger seg i forhold til hverandre. Maksimal hvilefriksjon ( $f_{s_{maks}}$ ) er alltid større enn den kinetiske friksjonen ( $f_k$ ). I beregningene benyttes hvilefriksjonen til å bestemme dimensjonene.

$$F_{friksjon} = N * \mu$$

Ligning 2-3

Referanser til teorikapittelet [7] [6] [8]

### 3 Design av rammen

#### 3.1 Krav

Krav til designet av roboten:

- Minimere størrelse av sikkerhet
- Lett vekt, unngå pakking av jord
- Beregnet for utendørs bruk
- Plass til å bytte verktøy enkelt
- Elektrisk fremdrift
- Minimalt vedlikehold
- Gode fremdrifts egenskaper (alle fire hjul i bakken til enhver tid)
- Alle hjul skal kunne svinge 360 grader om vertikal akse

Tabell 5: Liste over krav og komponenter til landbruksmaskinen.

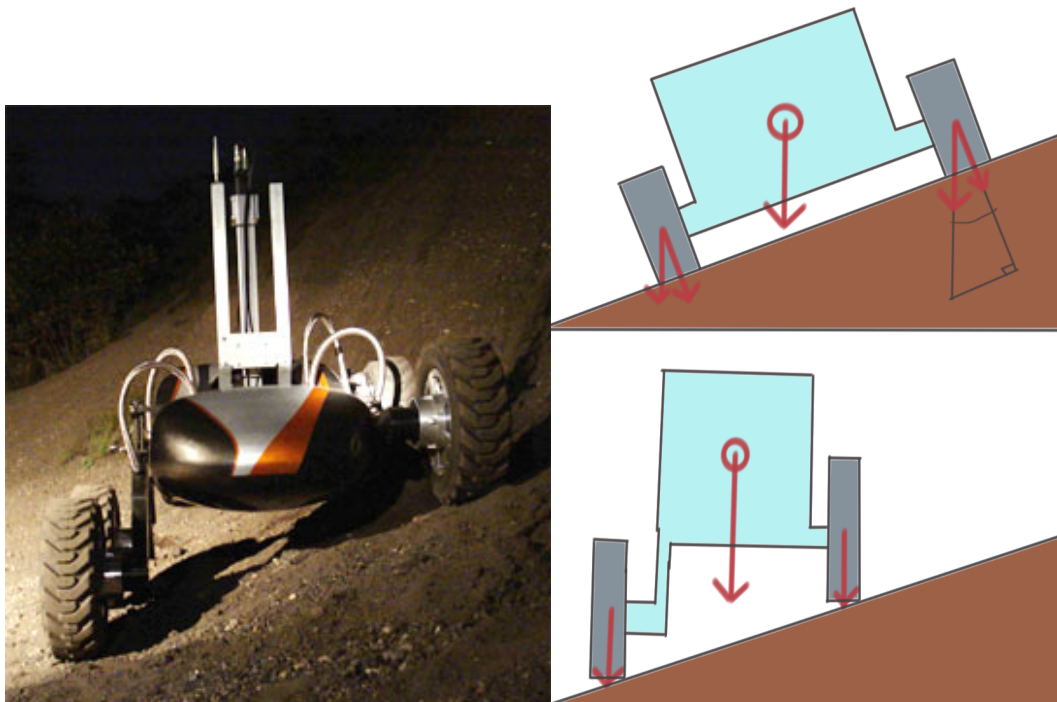
|                                |  |               |
|--------------------------------|--|---------------|
| <b>Lengde, bredde og høyde</b> | <b>1100 x 1700 x valgfritt</b>           |               |
| <b>Vekt</b>                    | 150 kg maskin og 150 kg verktøy med last | 300 kg totalt |
| <b>Motor fremdrift:</b>        | 3MEN Technology CO<br>BL821              | 500W<br>1.6Nm |
| <b>Gir:</b>                    | APEX Dynamics INC.<br>AL110              | 1:60          |
| <b>Servomotor</b>              | JVL Industri Elektronikk<br>A/S          |               |
| <b>Servogir</b>                | APEX Dynamics INC.                       | 1:60          |
| <b>Batterier</b>               | Golden Motors                            |               |
| <b>Hjul</b>                    | Snøfreser hjul                           | Ø 400 mm      |

Roboten skal operere utenfor vei og på jordet. Bruksmåten stiller krav til designet av roboten. Det er avgjørende at alle hjul har kontakt med bakken til enhver tid. Hvis et av fire hjul er i luften uten bakkekontakt vil kreften overføres via tre i stedet for fire hjul. Belastningen på konstruksjonen økes. Når hjul ikke er i kontakt med bakken brukes unødvendig energi på å rotere dem som ikke bidrar til fremdrift. De resterende hjulene må kompensere for at et hjul er luften.

Har et kjøretøy to hjul, vil begge hjul alltid ha kontakt med underlaget. Tilføres det et hjul til er det fortsatt kontakt mellom underlaget og hjulene i de fleste situasjonene. Problemet

oppstår når man monterer fire hjul på et kjøretøy. Da skal det minimale høydeforskjeller i terrenget til for at et hjul mister kontakten med underlaget. For å forhindre hjulløft må det finnes en form for ledd i kjøretøyskonstruksjonen. Biler, ATVer og lastebiler har alle bevegelige hjul. Gjerne muligheter for uavhengige bevegelse så alle hjulene skal ha optimalt bakkekontakt. Man streber alltid etter at et maksimalt areal fra dekket skal berøre bakken. En gokart har ingen bevegelige hjul, men den anvendes utelukkende på en spesialbygget bane hvor underlaget er plant. Kjøretøyets konstruksjon gjenspeiler bruksområdet.

Manøvrerings- og stabilitetsegenskapene til et kjøretøy er avhengig av plasseringen av tyngdepunktet. Desto høyere tyngdepunktet befinner seg, desto lettere vil kjøretøyet velte i en svingemanøver. For terrenggående kjøretøyer er det viktig å få tyngdepunktet så lavt så mulig. Det bidrar til at kjøretøyet vanskeligere velter over ende. Når et kjøretøy beveger seg i en skråning, vil massen av kjøretøyet hvile på hjulene. Kraften massen forårsaker vil alltid virke vertikalt mot jordens sentrum. Hjulene som befinner seg nederst i skråningen vil måtte overføre større krefter til underlaget enn hjulene som er øverst i skråningen. Når hjulene mister marktrykket vil også evnen til å overføre hjulrotasjonen til underlaget bli borte. Kjøretøyets evne til å forflytte seg blir dårligere. Det er derfor ønskelig at kjøretøyet alltid forblir i vannrett posisjon, mens hjulene følger underlaget. Autonome kjøretøyer tilpasset ulendt terreng har ofte motorer som tilpasser hjulene til underlaget.



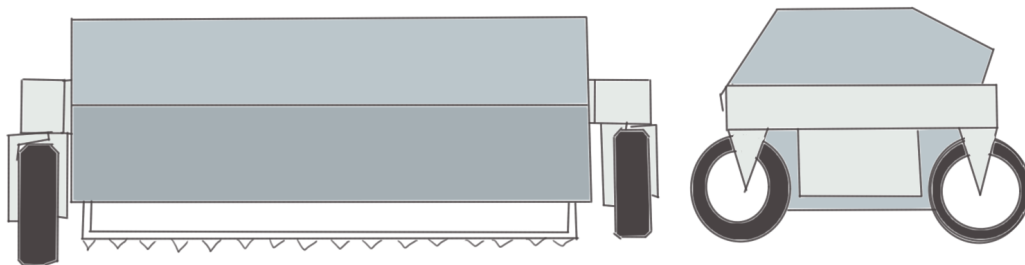
Figur 10: Robot fra NASA som skal ta borreprøver på en måne. Til høyre illustrasjon av bevegelige hjulsett. [111]

## 3.2 Designprosess

### 3.2.1 Ulike versjoner

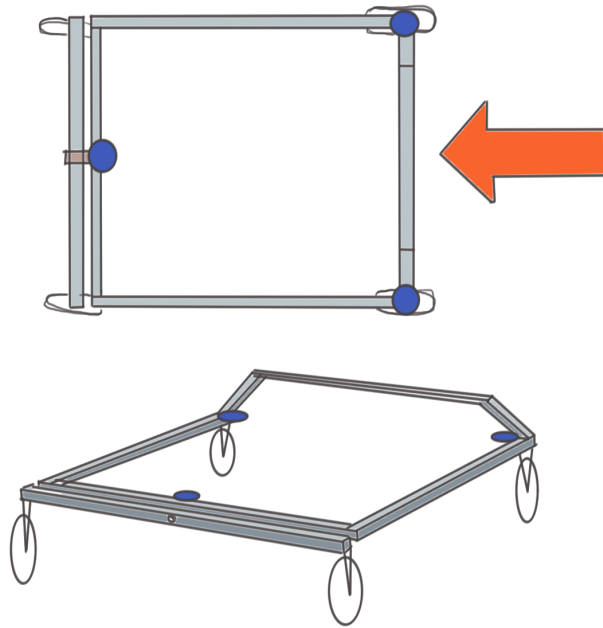
Oppdragsgiverne hadde noen tanker og ønsker før arbeidet startet. Den autonome landbruksmaskinen skal være modulbasert, ha lav vekt og være drevet av elektriske motorer. En robot over en viss størrelse vil kunne utgjøre fare for liv og helse. Ved å redusere størrelsen på vårt prosjekt er det enklere å ivareta sikkerheten. Derfor ble det satt en begrensning på størrelse og vekt. Størrelsen som ble besluttet samt at energien skulle komme fra batterier, medførte begrensinger på bruksområdene for prototypen. Landbruksmaskinen skal i testfasen så frø, gjødsle og sprøyte gift. Arbeidsoppgaver som kan utføres uten bruk av store krefter. Landbruksmaskinen må forflytte seg og spre massene som skal ut på jorden, ikke løfte og vende på jorda som for eksempel ved pløying.

De første idéene var basert på flate moduler som festes på verktøyene. Én modul inneholdt alt av sensorer og datakraft, mens resten av modulene kun trengte motorer, batterier og motorstyringer. Modulene hadde et roterende festepunkt så de kunne bevege seg og alltid ha hjul i kontakt med underlaget. Problemet med denne modellen var at modulenhetene ikke kunne forflytte seg på egenhånd og alle verktøy måtte ha en bærende konstruksjon. Det er mer hensiktsmessig om en enhet kan være bærende og ha alle påkrevde delene, da vil resten av modulene blir rimeligere og enklere.



Figur 11: Tidlig idéskisse. En separat robot på hver side av såmaskinen.

Neste versjon har flyttet det bevegelige leddet fra siden av verktøyet til selve landbruksmaskinen. Maskinen har egen bærende ramme og det er mulighet for montasje av sensorer og energi reservoar. I midten er det ledig plass for plassering av verktøy. Landbruksmaskinen kan rygge inn i en stasjon hvor verktøyene er lagret og ta de med ut i felt. Verktøyet festes i de tre blå punktene som vist på figuren under.



Figur 12: Versjon nummer to. Oransje pil indikerer verktøyets montasjeretning.

Videre utvikling av konseptet skjedde ved å frigjøre plass bak på landbruksmaskinen. Bøylen bak ble flyttet fremover og hevet for å gjøre rammen stivere. Sirkulære rør ble valgt fordi rør er mest motstandsdyktig for torsjonspenninger.



Figur 13: Konsept med vippepunkt for bedre fremdriftsegenskaper.

Alle hjulene har driv. Når begge framhjulene gir fullt pådrag gir det et moment på  $180\text{Nm}$ , en strekkraft på  $1,2\text{kN}$  og kraften av halvparten av vekten av hele maskinen med verktøyet i vippeleddet. Vippepunktet viste seg å være et kritisk punkt i rammekonstruksjonen. For å ta opp momentet ble det lagt til to rør fra toppen av rammen ned på yttersiden av vippepunktet. Da blir leddet opplagret på begge sider i stedet for å kun være opplagret i en ende av akslingen. Vippepunktakslingen og opplagringene kan da reduseres i størrelse.

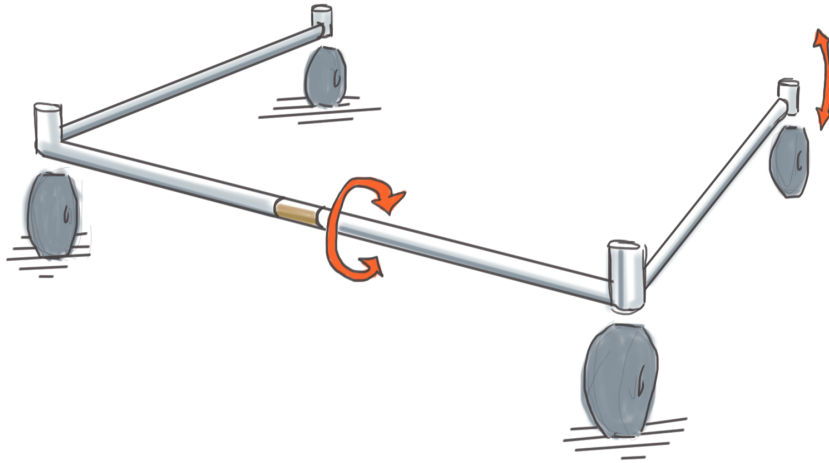
Når bakhjulene står parallelt med framrammen og det blir gitt fullt gasspådrag vil rammen oppleve 90 Nm i torsjonsmoment. Intensjonen er at verktøyet som plasseres inn i rammen skal være med å ta opp vridningen som opptrer. Alt verktøy må derfor ha en form for bjelke med fastsatte spesifikasjoner. Det stiller også krav til hvordan verktøyet er montert i rammen. Festene må klare å ta opp vridninger og strekk/trykk krefter.

Materialvalget i denne versjonen var bruk av stål i alle delene. Skulle man bygge en fagverkskonstruksjon med aluminium uten å sveise, ville det krevd mange skjøter. Konsekvensen av materialvalget og kompleksiteten til konstruksjonen medførte at roboten ble tyngre enn spesifikasjonene. Fordelen med å bruke stål var at det er enkelt å bygge og endre.



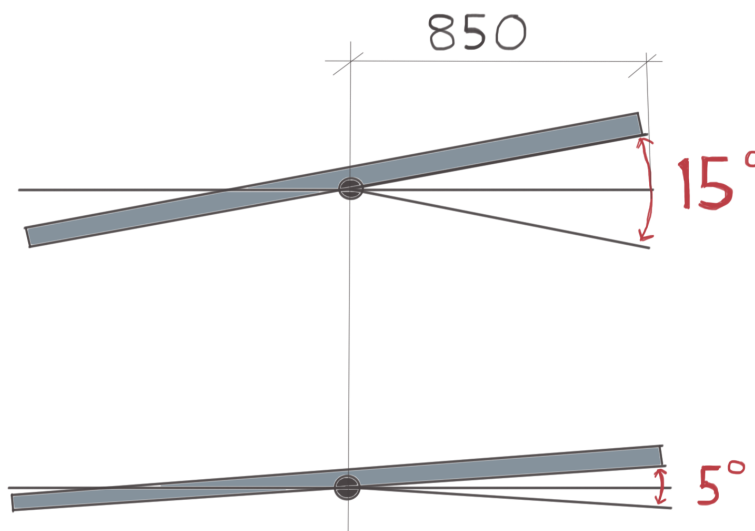
Figur 14: Forbedret rammekonstruksjon konstruert av stålrør.

Overgangen mellom rammen foran som holder framhjulene, er et kritisk punkt. Reaksjonskreftene som fremdriftsmotorene overfører til underlaget, tas opp i festepunktene til framrammen. Nedenfor er det beskrevet et alternativ som eliminerer en slik oppdelt konstruksjon. Et rotasjonsledd med lager er plassert sammen med festepunktet for verktøyet midt i frambjelken. Løsningen ble forkastet på grunn av kompleksiteten i rotasjonsleddet. I tillegg til at leddet skal ha en solid konstruksjon må det også være enkelt å produsere samt ha lav vekt. Reaksjonskreftene fra fremdriftsmotorene må fortsatt tas opp i leddet selv om leddet er relokalisert, noe som fører til grove dimensjoner på kulelager og akslinger inne i rotasjonsleddet.



Figur 15: Når et hjul mister kontakt med bakken vil rammen rotere om rotasjonsleddet og hjulet vil følge underlaget.

Rammen må ha en viss bevegelighet for å sikre at alle hjulene skal ha kontakt med underlaget. Hvor stor denne bevegeligheten må være avhenger av bruksområdet til maskinen. I starten var tanken at landbruksmaskinen måtte ha 15 grader vanding på bjelken som holder framhjulene. Det gir en total vanding på 227,8 millimeter på framhjulene.



Figur 16: Vinkel på frambjelke når hjulene beveges vertikalt og rotasjonspunktet er midt på bjelken.

$$Vandring_{(grader)} = \tan(vinkel) * \frac{L}{2}$$

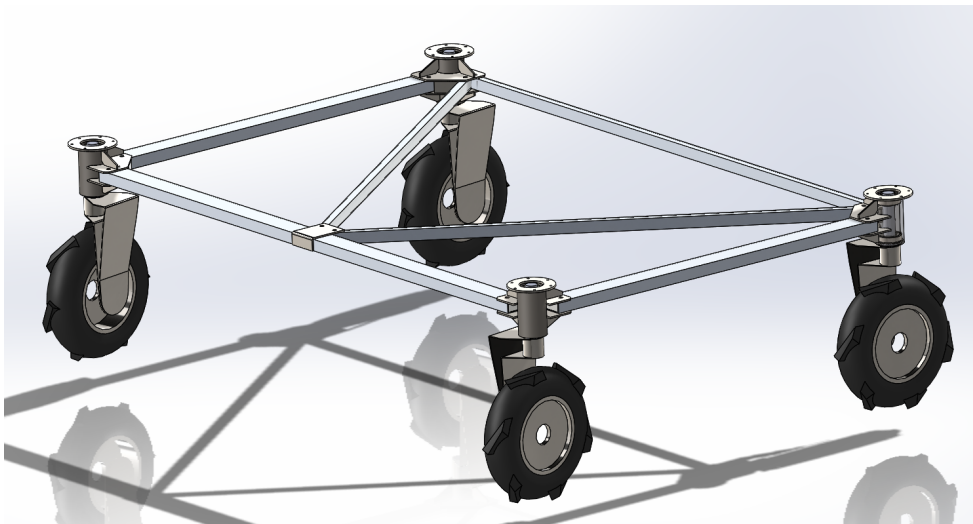
$$Vandring_{(15^\circ)} = \tan(15^\circ) * 850 = 227.8 \text{ mm}$$

$$Vandring_{(5^\circ)} = \tan(5^\circ) * 850 = 74 \text{ mm}$$

Ligning 3-1

Landbruksmaskinen skal bevege seg på et jorde som er klargjort for såing, gjødsling eller sprøyting. Det vil si at jorden er planert og flatt uten store ujevnheter i terrenget. Maskinen er 1700 ganger 1100 millimeter i grunnflate som gir et areal på 1,9 m<sup>2</sup> som maskinen dekker av gangen. Vurderingen ble at en vandring på mindre enn 100 millimeter vil være tilstrekkelig for å sikre kontakten mellom drivhjulene og underlaget. BoniRob er en landbruksrobot laget av AMAZONEN-WERKE sammen med Osnabrück University of Applied Sciences og Robert Bosch GmbH. Denne landbruksroboten har ingen fjæring eller vertikal bevegelse av hjulene. Avgjørelsen til prosjektgruppen ble ut fra erfaringen fra Tyskland å tillate minimal vandring på hjulene.

Vippeledet mellom rammen og bjelken som framhjulene festet til, er et kritisk punkt som krever mange deler og øker kompleksiteten til konstruksjonen. Ved å konstruere en ramme som tillater bevegelse, kan vippeledet fjernes og fortsatt ha bevegelse på hjulene i høyderetning. Konstruksjonsmaterialet går fra stål til aluminium for å rammen mest mulig myk. Alle avstivere tas vekk.



Figur 17: Ideskisse av rammekonstruksjon.

Ved å redusere antall elementer i konstruksjonen og bytte fra stål til aluminium ble også vekten redusert, noe som er et av kravene. Vekten fra rammen vektfordeling er jevnt fordelt på alle hjulene. Vekten av verktøyet fordeles tilsvarende siden massesenteret til verktøyet er i midten av rammen. Halvparten av vekten på verktøyet hviler på frambjelken mens resterende del hviler på hvert sitt bakhjul.

Den trekantformede rammen til verktøyet skal være opplagret med kuleledd. Det gjør rammene bevegelige i forhold til hverandre. Konstruksjonen blir da mykere enn om alle rørelementene skulle vært låst fast sammen. Festene til verktøyrammen skal være fastmontert på roboten. Festene kan være ringer i verktøyrammen og bevegelige kroker på robotrammen. Samme prinsipp som koblingen mellom traktorhengere og traktorer.





Et nøkkelfunksjon som gjentar seg i nesten alle ideene er at framme på roboten skal det være en rett bjelke hvor det kan monteres sensorer. For å redusere kostnader på systemet som en helhet er det fordelaktig at alle sensorer er montert på roboten, ikke på verktøyene. Sensorene som leser jordet og vekstene må være vendt ned mot bakken og fordelt utover hele bredden av roboten.

### 3.2.2 Materialvalg

Et krav til maskinen er at den skal ha lav vekt. Tidlig i designprosessen ble aluminium et godt materialalternativ for rammen. Aluminium har tilsvarende styrke som stål, men kun en tredel av tettheten. Roboten skal bevege seg i terrenget og dette medfører bevegelser i rammekonstruksjonen. For å unngå spenningskonsentrasjoner må alle sammenføyninger kunne bevege seg. Hvis delene skal sveises må de i en herdeovn for å beholde styrken eller områdene ved sveisepunktene må designes slik at spenningene ikke er så store. Dette setter krav til konstruksjonsverkstedet og tilgjengelig verktøy samt til kompleksiteten av rammen.

For å sikre fleksibiliteten til rammen må den bestå av et mykt materiale. Derfor er det valgt aluminium i rørprofilene mellom kulelagerhusene i hvert hjørne. I firkantrør er det 6060 T6 aluminium, en type som lagerføres. I hvert hjørne er det et rør hvor kulelagrene er montert og en aksling som overfører moment fra servomotorer til hjulene. Kulelagerhuset kan ikke deformeres så kulelagrene ikke lenger passer og blir derfor laget av automatstål 11SMnPb30+C. Akslingen blir utsatt for større krefter og fremstilles av samme automatstålet. Plater og firkantrør blir produsert i St355J2 stål for høy styrke.

Deler som blir produsert i stål, trenger korrosjonsbeskyttelse. Delene må først og fremst designes så fuktigheten renner vekk. Oppsamling av vann er en de viktigste årsakene til korrosjon. Platen som beskytter fremdriftsgiret er forsynt med hull så oppsamlet vann kan unnslippe. I tillegg blir delene dekket av et beskyttende malingslag. På rent metall påføres først en grunning som motvirker korrosjon, deretter påføres farge og fuktbeskyttelse. I dette prosjektet blir det brukt Bengalakk til grunning og overflatelakk. Bengalakk er av fabrikatet Jøtul. Dette er lakk for hobbyprosjekter ikke for masseproduserte deler. Ved elektrolytisk pålagte metallbelegg eller termiske påført maling får man en mer robust beskyttelse av overflatene. Aluminium kan elokseres for å få et tykkere oksidsjikt som gjør overflaten hardere og mer motstandsdyktig mot korrosjon.

### 3.3 Kalkulasjoner og simulering

Etter kvasistatisk beregningsmetode brukes det en kjøretøyfaktor (KF) for å kompensere for dynamiske krefter som forekommer ved kjøring. Ved lett underlag settes denne faktoren til 2. Tyngden på kjøretøyet multipliseres med 2 for videre beregninger av kjøretøyet. Ved tunge terrenggående kjøretøyer må denne faktoren nødvendigvis økes til 4 for at den skal tilsvare belastningen konstruksjonen blir utsatt for under kjøring [9].

Landbruksmaskinen veier maks 300 kg med last. Finner den vertikale kraften i hvert hjul  $F_L$ :

$$F_L = \frac{m * g * KF}{4} \quad \text{Ligning 3-2}$$

$$F_L = \frac{300 \text{ kg} * 10 \text{ m/s}^2 * 2}{4} = 1.5 \text{ kN}$$

$$F_L = 1.5 \text{ kN}$$

Belastingen fra vekten av maskinen pr hjul blir den totale massen med kjøretøyfaktoren delt på fire hjul. Det blir 1,5 kN pr hjul.

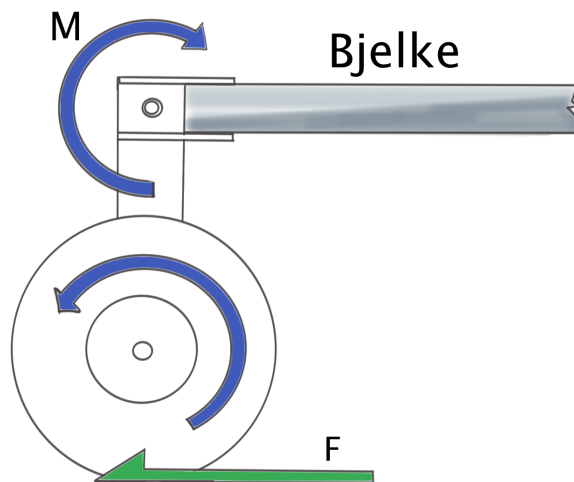
Motormomentet er 1,6 Nm. Girkassen har en utveksling på 1:60. Medberegnet tap i giret er det 90Nm moment på utgående aksling av giret:

$$M_{aksling} = M_{motor} * Utveksling * Effektivitet \quad \text{Ligning 3-3}$$

$$M_{aksling} = 1.6 \text{ Nm} * 60 * 0.94 = 90 \text{ Nm}$$

### 3.3.1 Aluminiumsrørene med påkjenninger fra fremdriftsmotorer

Tversnittet på valgt aluminiumsrør er 60x30x2.5 mm. Det gir et tverrsnittsareal på 425 mm<sup>2</sup> og et annet arealmoment om svak akse 63385.4 mm<sup>4</sup>. Avstanden fra nøytralaksen til ytterkant på profilet er halvparten av høyden, 15 mm.



Figur 18: Beregningsfigur

Ved fullt pådrag fra motoren gir det et moment (M) på 90Nm. Dette momentet motvirkes av et like stort reaksjonsmoment i innfestningen av bjelkeelementet.

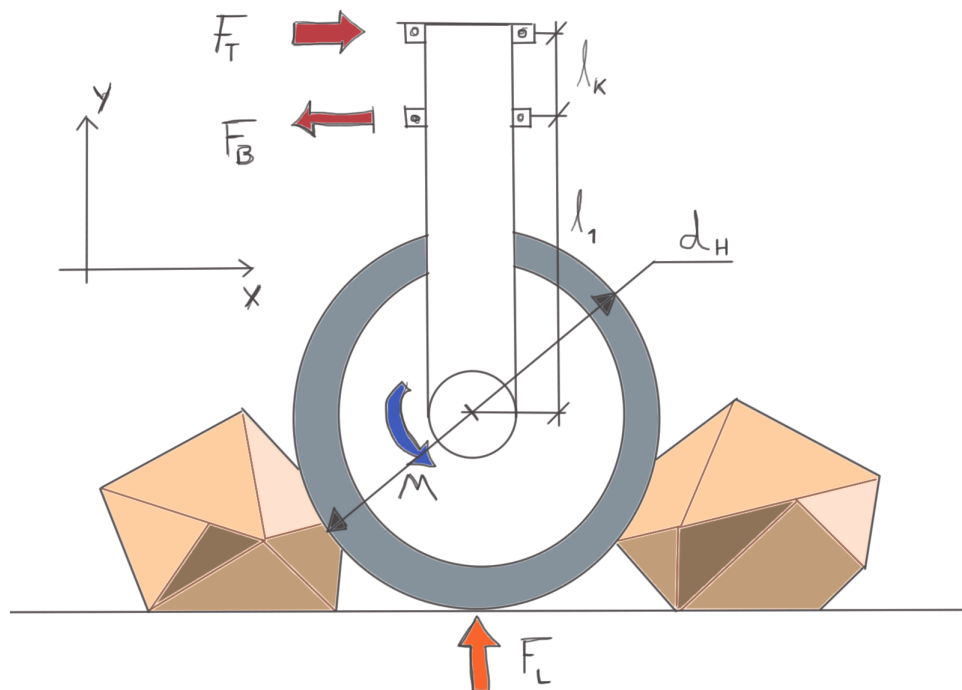
$$F = \frac{M_{motor}}{r_{hjul}} = \frac{90Nm}{200mm} = 450N \quad \text{Ligning 3-4}$$

$$\sigma_{al.rør} = \frac{M_{motor}}{W} + \frac{F}{A} = \frac{90Nm * 15mm}{63385.4mm^4} + \frac{450N}{425mm^2} = 22.4MPa \quad \text{Ligning 3-5}$$

### 3.3.2 Kulelagerhus med påkjenninger fra fremdriftsmotorer

Case 1:

Hjulet blir låst fast.



Figur 19: Hjulet kan for eksempel sitte fast mellom to steiner. Hjulet er låst og kan ikke beveges.

$F_L$  blir tatt opp i det nederste kulelageret  $F_{By}$ . Momentet  $M$  holdes igjen av kraftparet  $F_{Tx}$  og  $F_{Bx}$ . Kun avstanden mellom kraftparet avgjør størrelsen på kreftene. Lengden  $l_k$  mellom kulelagrene er satt til 110 millimeter.

$$F_{Tx} = -F_{Bx} = \frac{M}{l_k} \quad \text{Ligning 3-6}$$

$$F_{Tx} = -F_{Bx} = \frac{90\,000\,Nmm}{110mm} = 820N$$

Case 2:

I case 2 er hjulet fritt og roboten kan bevege seg. Dimensjonerende faktor er friksjonen mellom hjulet og underlaget. Motoren kan tilføre moment til hjulet, men hjulet vil slippe i forhold til underlaget når hvilefriksjonen overskrides. Derfor er friksjonen mellom hjul og underlag avgjørende for kreftene i kulelagrene.

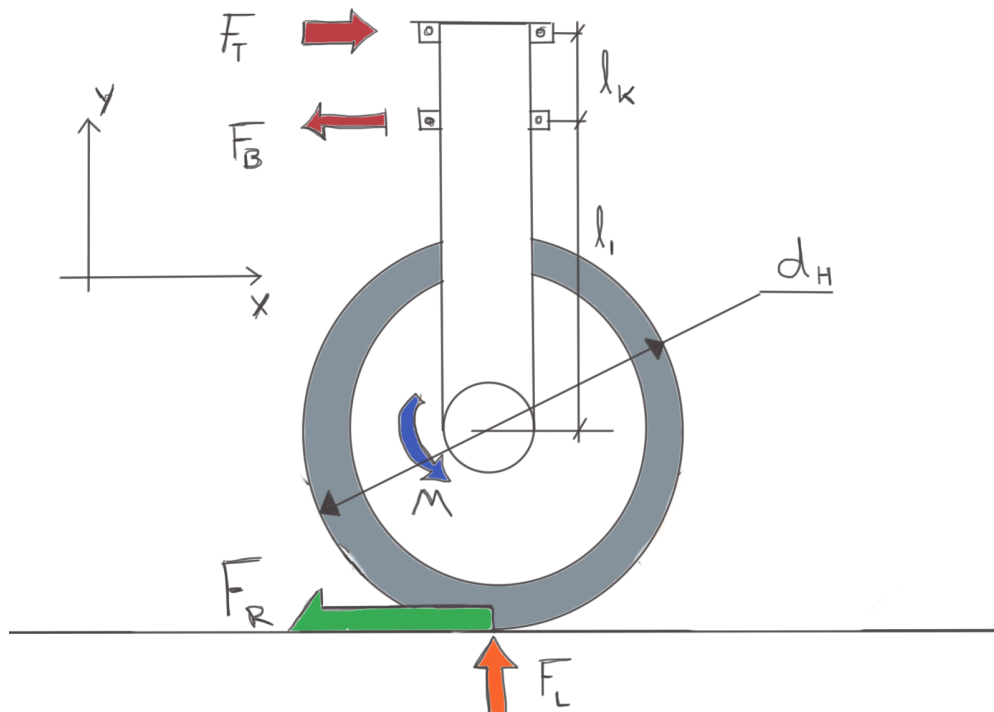
$$F_R = N * \mu = F_L * \mu \quad \text{Ligning 3-7}$$

$$F_R = 1500N * 0.8 = 1200N$$

1.2kN friksjonskraft gir et motormoment på

$$M_{motor} = \frac{d_H}{2} * F_R = \frac{400mm}{2} * 1200N = 240Nm \quad \text{Ligning 3-8}$$

Motoren med giret klarer maksimalt å gi et moment på 90 Nm ved vanlig drift, men kan i kortere perioder gi et større moment. Ved kortvarig bremsing av hjulene og dobbel last kan maskinen utsettes for en friksjonskraft på 1200 N per hjul.



Figur 20: Vekten av roboten og friksjonskoeffisienten er avgjørende for kreftene.



Nullpunkt settes i det nederste kulelageret. Det gir en momentlikning:

$$\Sigma M_{F_B} = 0 \quad \text{Ligning 3-9}$$

$$F_{Tx} * l_K + F_R * (l_1 + \frac{d_H}{2}) = 0$$

$$F_{Tx} = \frac{(l_1 + \frac{d_H}{2})}{l_K} = \frac{1.2kN * (360mm + \frac{400mm}{2})}{110mm} = 6109N$$

$$F_{Tx} = 6109N$$

Radiell kraft på øverste kulelager er 6109N. For å finne kraften på nedre kulelager brukes summen av kreftene er null.

$$\Sigma F_x = 0$$

Ligning 3-10

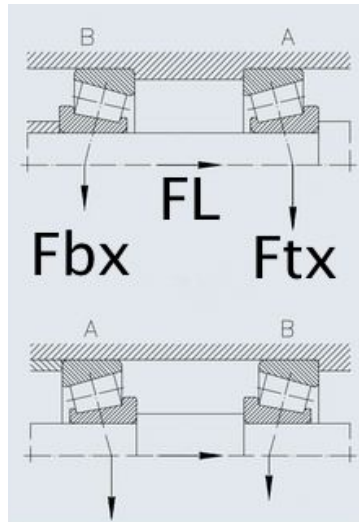
$$F_{Bx} - F_{Tx} - F_R = 0$$

$$F_{Bx} = 6109N + 1200N = 7309N$$

$$F_{Bx} = 7309N$$

### 3.3.3 Valg av kulelager

Kulelageret må ta opp både radielle og aksielle krefter. En type lager som kan gjøre dette er skråstilte rullelager, også kalt koniske rullelager. På engelsk heter rullelageret tapered roller bearing. Rullelageret har skråstilte ruller som tar opp krefter vinkelrett på rullene. Krefter som påføres i radiell retning blir dekomponert i aksiell og en radiell retning. For å beregne kreftene rullelageret kan tåle brukes ekvivalent dynamisk last. Leverandøren av lageret kommer med eget formelverk om hvordan lasten kalkuleres. Den ekvivalente lasten sjekkes mot tillatt last for lageret. Koniske rullelager brukes i hjullagre i biler, styrelager i sykler og motorsykler for å nevne noen eksempler.



Figur 21: Konisk rullelager og oppsett av rullelager i par for å utjevne opptrædende aksialkrefter. [112][113]

Formlene er hentet fra [www.nskamericas.com](http://www.nskamericas.com) og deres beregningsmodell. Formlene er omgjort så navngivningen på kreftene er lik kreftene som det opereres med i oppgaven. Verdiene X og Y er vinkelfaktorer som finnes i tabeller for hvert enkelt rullelager.

$$F_L + \frac{0,6}{Y} * F_{Tx} \geq \frac{0,6}{Y} * F_{Bx} \quad \text{Ligning 3-11}$$

$$1500N + \frac{0,6}{1,6} * 6109N \geq \frac{0,6}{1,6} * 7309N$$

$$3791N \geq 2741N$$

$$P_{ekvivalent B} = XF_{Bx} + (F_L + \frac{0,6}{Y} * F_{Tx}) \quad \text{Ligning 3-12}$$

$$P_{ekvivalent B} = 0,9 * 7309N + 1,6 * (1500N + \frac{0,6}{1,6} * 6109N)$$

$$P_{ekvivalent B} = 12643N$$

$$P_{ekvivalent T} = F_{Tx} \quad \text{Ligning 3-13}$$

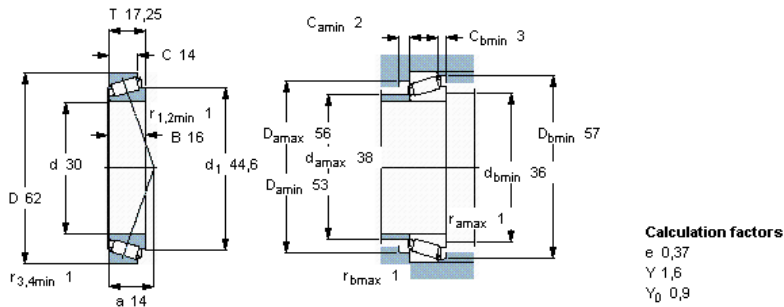
$$P_{ekvivalent T} = 6109N$$

Prøver kulelager SKF 30206.



Tapered roller bearings, single row

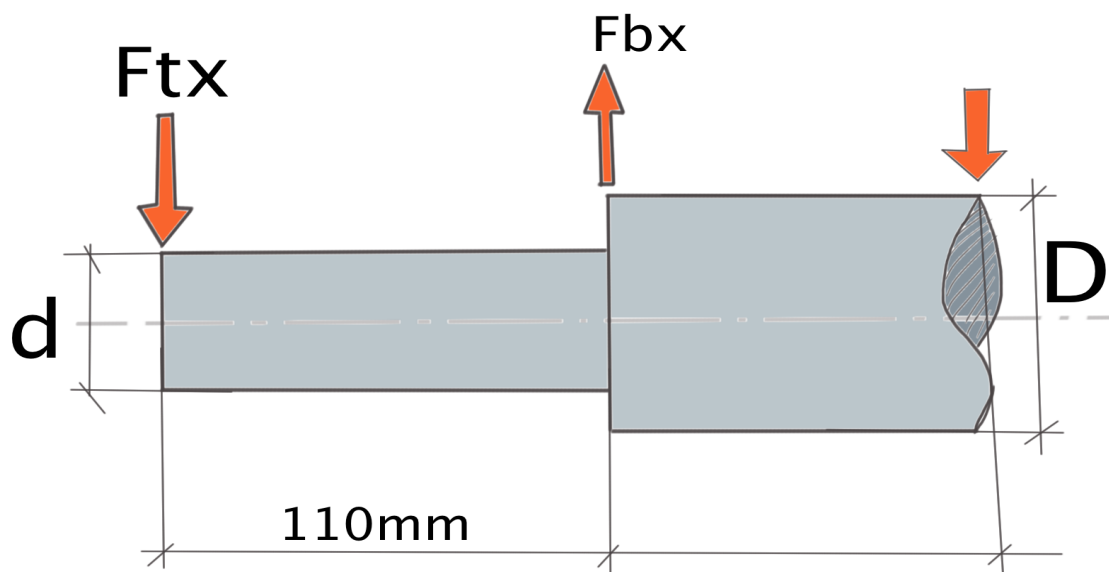
| Principal dimensions |    |       | Basic load ratings |              | Speed ratings   |                | Designation                          |
|----------------------|----|-------|--------------------|--------------|-----------------|----------------|--------------------------------------|
| d                    | D  | T     | dynamic<br>C       | static<br>C0 | Reference speed | Limiting speed |                                      |
| mm                   |    |       | kN                 |              | r/min           |                |                                      |
| 30                   | 62 | 17,25 | 40,2               | 44           | 8500            | 11000          | * SKF Explorer bearing<br>30206 J2/Q |



Figur 22: Dimensjoner, anbefalte belastinger og illustrasjoner av kulelager fra SKF. [114]

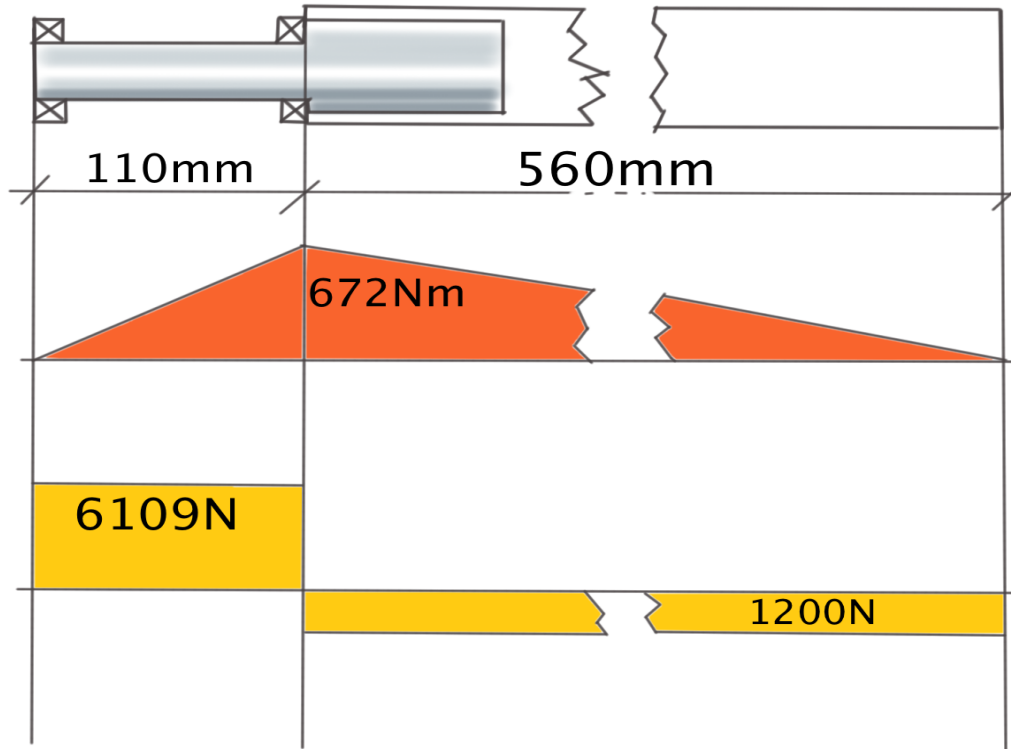
$$\text{Sikkerhetsfaktor} = \frac{\text{Basic load limit}}{P_{\text{ekvivalent B}}} = \frac{40200N}{12643N} = 3,2 \quad \text{Ligning 3-14}$$

3.3.4 Aksling mellom servogir og underarm



Figur 23: Beregningsfigur for aksling.  $d=30$  millimeter og  $D=48$  millimeter.

Skjærkraften i øvre del av akslingen er lik  $F_{tx} = 6109\text{N}$ . Skjærkraften i den tykke delen av akslingen er lik  $F_r = 1200\text{N}$ . Differansen mellom skjærkreftene  $F_{bx} = 7309\text{N}$ . Momentet er maksimalt 110 millimeter fra toppen, der det nedre kulelageret er plassert. Maksimalt moment er skjærkraften multiplisert med lengden som blir  $672\text{Nm}$ .



Figur 24: Skjærkraft (gul farge) og momentdiagram (oransje farge) for aksling.

Fra forrige beregningseksempel er det case 2 som gir største spenninger. Kulelageret som er valgt her en indre diameter på 30 millimeter. Største opptredende spenning bli som følger:

$$\sigma_{maks} = \sigma_{bøyning} + \sigma_{trykk}$$

Ligning 3-15

$$\frac{M_{maks}}{W_{aksling}} + \frac{F_L}{A_{aksel}} = \frac{F_{tx} * 110\text{mm}}{\frac{\pi * D^3}{32}} + \frac{F_L}{\frac{\pi * D^2}{4}}$$

$$\frac{6109\text{N} * 110\text{mm}}{\frac{\pi * 30^3}{32}} + \frac{1500\text{N}}{\frac{\pi * 30^2}{4}} = 256\text{MPa}$$



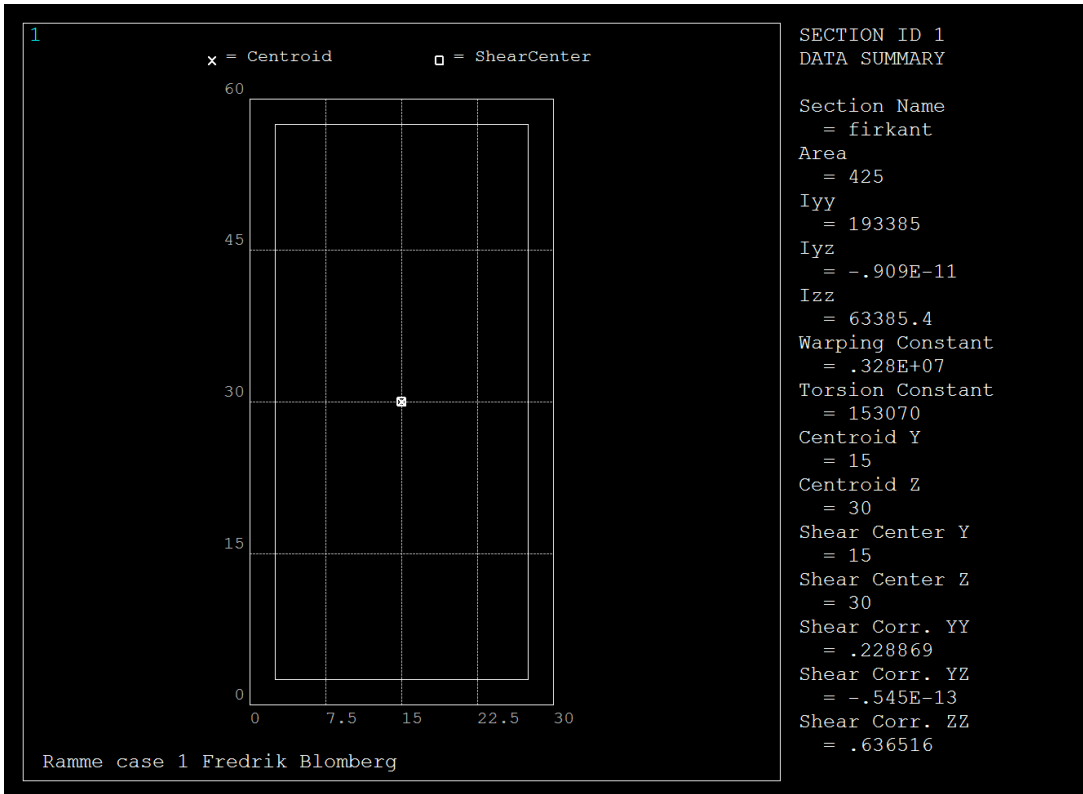


Sikkerhet mot flyt

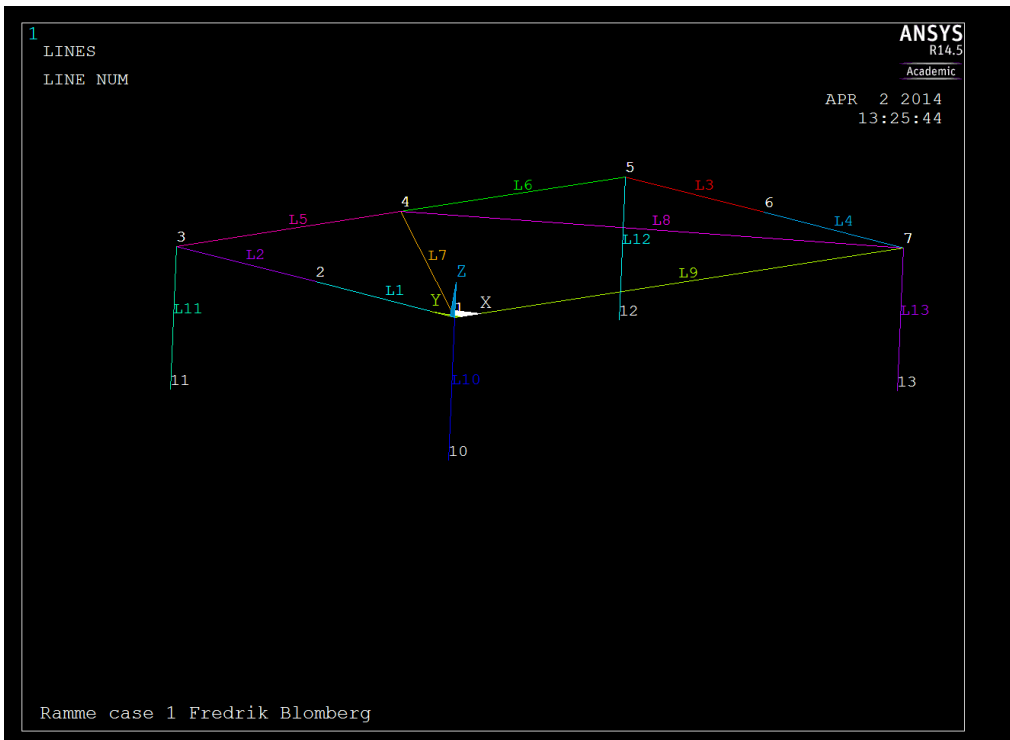
$$Sikkerhetsfaktor = \frac{\sigma_y}{\sigma_{maks}} = \frac{355MPa}{256MPa} = 1.4 \quad \text{Ligning 3-16}$$

### 3.3.5 Beregninger og simuleringer av rammen under bruk

Simulering er foretatt i programmet ANSYS 14.5 APDL for å finne dimensjon på aluminiumsrør. Det er benyttet en forenklet modell hvor kulelagerhusene er fjernet. Modellen er bygget opp av nøkkelpunkter (keypoints) i rommet og linjer trukket mellom dem. Vekten av motorer, hjul, verktøy, batterier osv simuleres ved at krefter påføres i nøkkelpunktene. Profilene på bjelkene er linket til linjene. For å orientere linjene i ønsket retning er det laget tre nøkkelpunktene langt unna som elementene kan orienteres etter. Elementstørrelsen er bestemt slik at hver bjelke deles i 20 like store elementer. Beina på rammen er satt til et helt stivt solid element for ikke å påvirke resultatene. Materialdata som er brukt er elastisitetsmodulus på 68 900 MPa for aluminiumen og 1 000 000 000 MPa for beina. Poissonstallet er satt til 0,3. For å kontrollere om rammen holder og har tilstrekkelig nedbøyning, er det i ulike caser fjernet opplagringen i et av hjørnene. Ved å lese av total nedbøyning og Von Mises spenningene er det gjort en vurdering om tverrsnittet kan godtas.



Figur 25: Tverrsnittet på valgt profil.



Figur 26: Nummering av linjer og nøkkelpunktene i modellen.

Massene til de ulike delene er hentet fra Solid Works. Hver del er konfigurert med riktig materiale, ut i fra volumet på delen beregner programmet massen til hver enkel del. Det er



lagt til 20 % på hver underarmssammenstilling for å kompensere for skruer, sveiser og kulelager. Massen til kabler, motorstyringer og datamaskin er et overslag, ikke eksakte verdier.

Tabell 6: Oversikt over massene til komponentene og hvor de er plassert i modellen til landbruksmaskinen.

| Hva                                     | Antall | Masse               | Keypoint   | Total masse   |
|---|--------|---------------------|------------|---------------|
| <b>Underarm sammenstilling</b>          | 4      | 10 kg + 20% = 12 kg | 1, 3, 5, 7 | 48 kg         |
| <b>Fremdriftsmotor</b>                  | 4      | 3.5 kg              | 1, 3, 5, 7 | 14 kg         |
| <b>Fremdriftsgir</b>                    | 4      | 5 kg                | 1, 3, 5, 7 | 20 kg         |
| <b>Servomotor</b>                       | 4      | 1 kg                | 1, 3, 5, 7 | 4 kg          |
| <b>Servogir</b>                         | 4      | 1.5 kg              | 1, 3, 5, 7 | 6 kg          |
| <b>Batteri</b>                          | 2      | 18 kg               | 2, 6       | 36 kg         |
| <b>Aluminiumsrør korte</b>              | 2      | 1.1 kg              | 2, 6       | 2.2 kg        |
| <b>Aluminiumsrør lang</b>               | 1      | 1.8 kg              | 4          | 1.8 kg        |
| <b>Hjul</b>                             | 4      | 2.5 kg              | 1, 3, 5, 7 | 10 kg         |
| <b>Kabler, motorstyring, datamaskin</b> | -      | 9 kg                | *2, 4, 6   | 9 kg          |
| <b>Verktøy</b>                          | 1      | 150 kg              | **1, 4, 7  | 150 kg        |
| <b>SUM</b>                              |        |                     |            | <b>301 kg</b> |

\* Total masse fordelt likt på gitte keypoints.

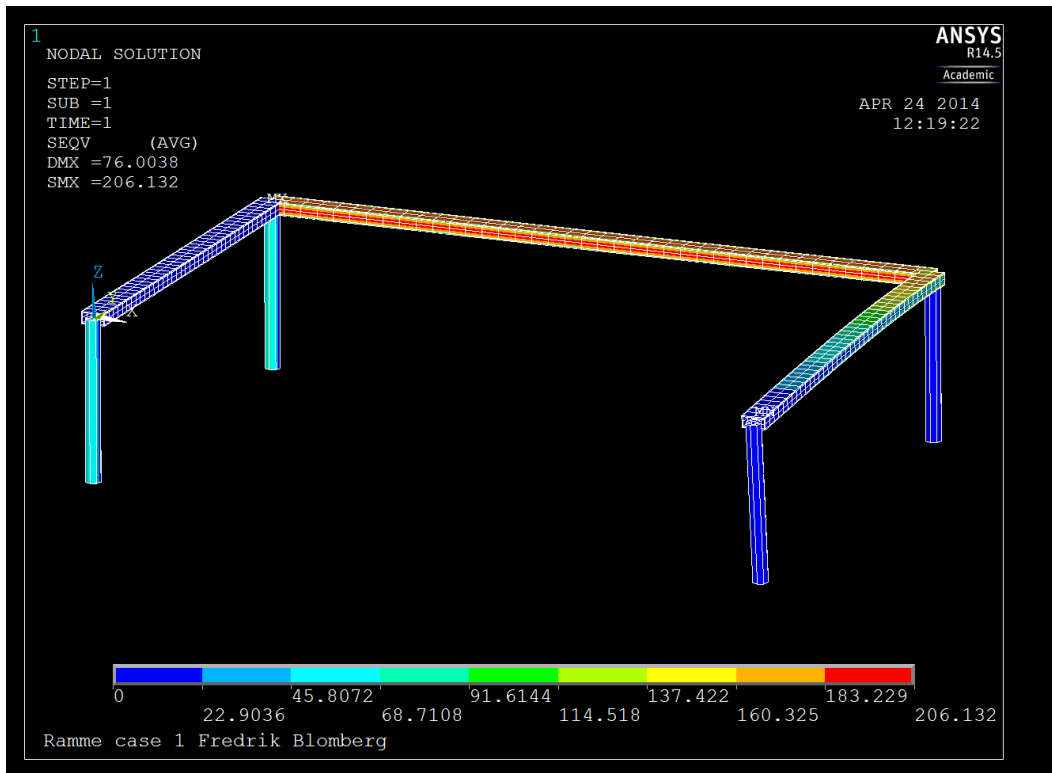
\*\* 75 kg i keypoint 4 og 37.5 kg i keypoint 1 og 4.

Det er i alt gjort 4 simuleringer. For å kompensere for at kjøretøyet beveger seg er alle laster ganget opp med kjøretøysfaktoren som er 2. Det vil si at alle massene blir doblet.

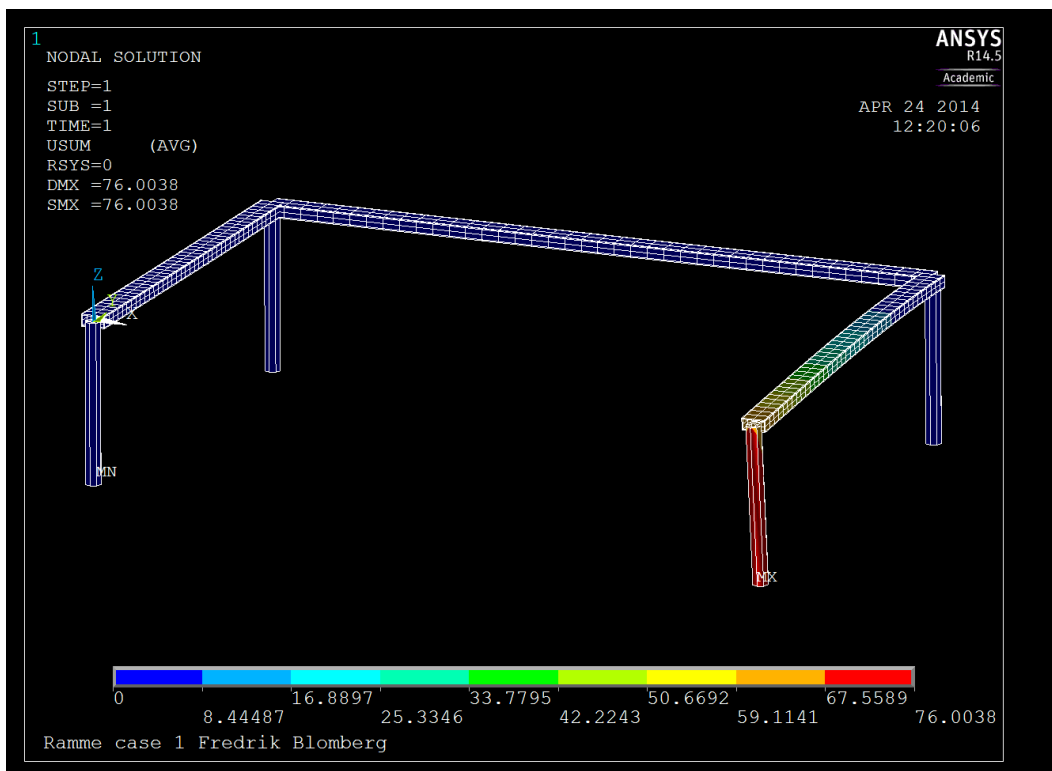
Belastningstilfellene er som følger:

1. Ramme uten verktøy og et bakhjul uten kontakt med underlaget
2. Ramme uten verktøy og et framhjul uten kontakt med underlaget
3. Ramme med verktøy og et bakhjul uten kontakt med underlaget
4. Ramme med verktøy og et framhjul uten kontakt med underlaget

### Belastningstilfelle 1

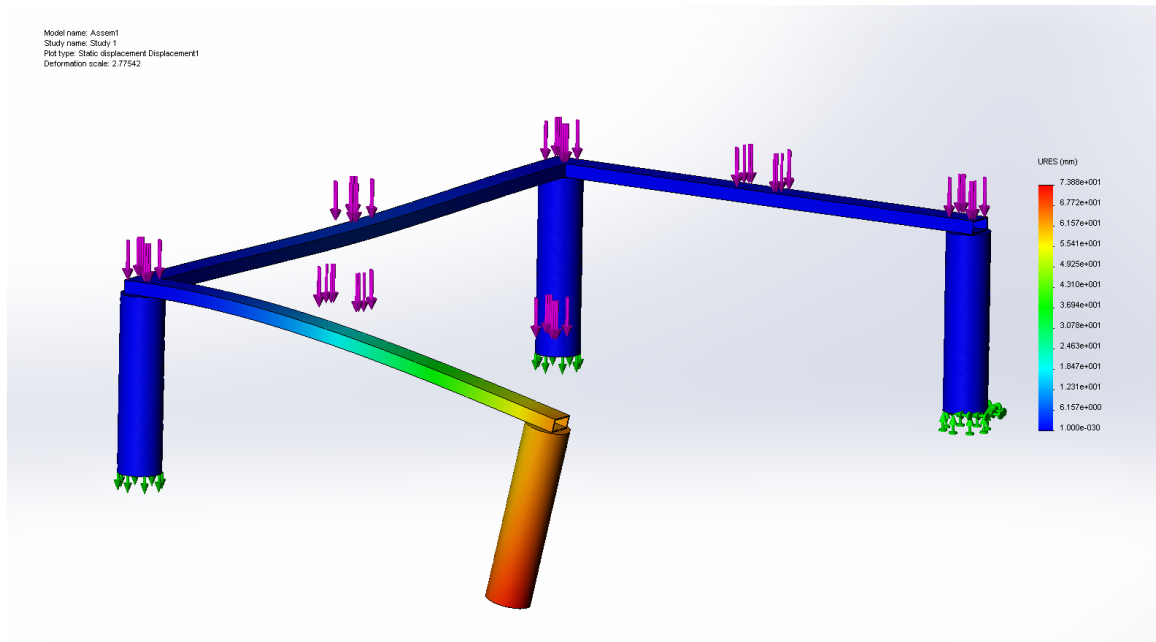


Figur 27: Spenningen i rammen uten verktøyramme. De røde feltene er kun i ytterkant av profilene på grunn av torsjon.

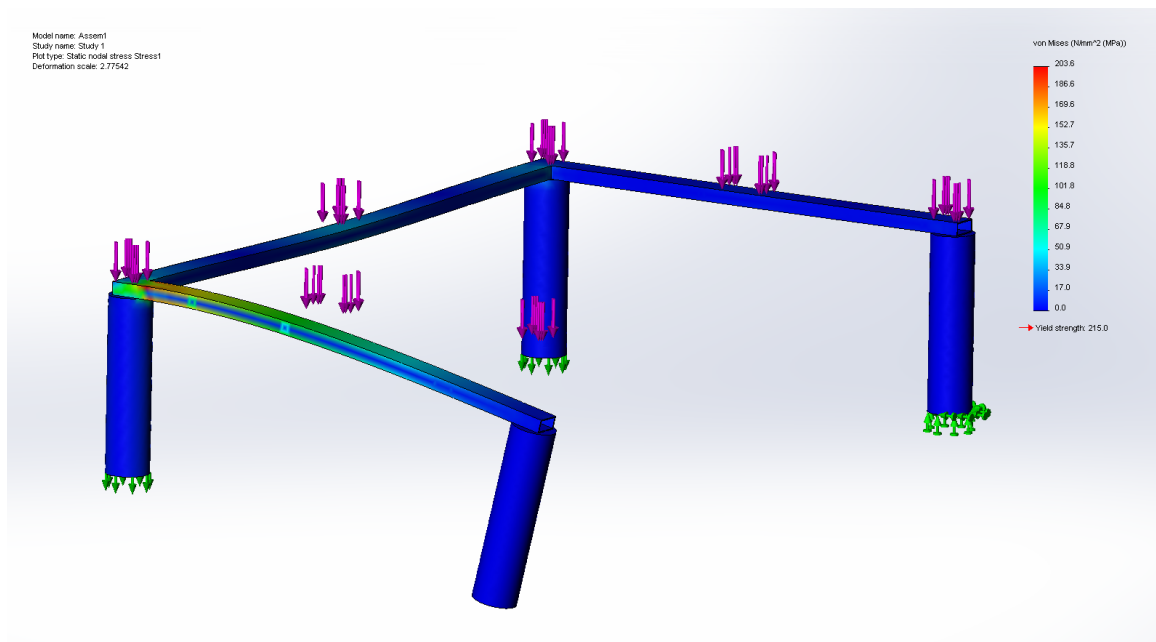


Figur 28: Nedbøyning i belastningstilfelle 1 fra ANSYS 14.0 APDL. Nedbøyning i enden av bjelken er 76 millimeter.

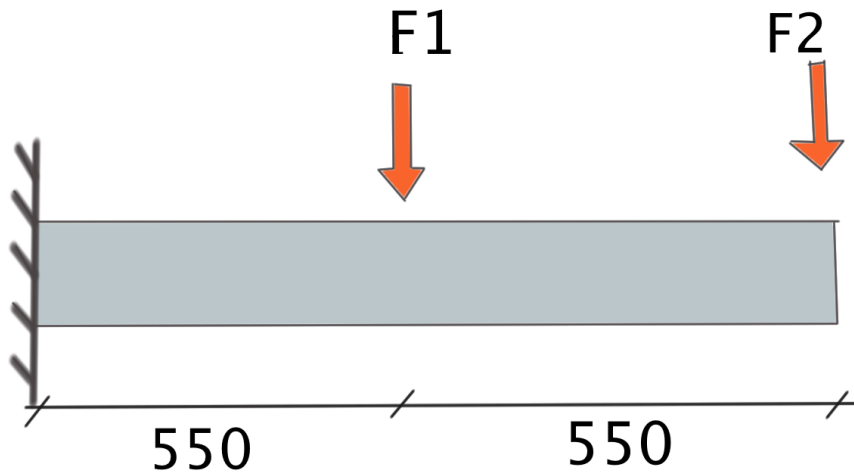
For å verifisere resultatene fra ANSYS ble det gjort en ekstra simulering av beregningstilfelle 1 i SolidWorks Student Edition 2013 Simulation.



Figur 29: Nedbøyning i belastningstilfelle 1 simulert i SolidWorks Simulation 2013. Maksimal nedbøyning i bjelken er omtrent 62 millimeter (oransje område).



Figur 30: Spenninger i belastningstilfelle 1 simulert i SolidWorks Simulation 2013 Student Edition. Maks opprettede Von Mises spenning er 203,6 MPa



Figur 31: Beregningsfigur for nedbøyning i de korteste aluminiumsprofilene.

Manuelle beregninger:

F1 er 442N kraft i nøkkelpunkt 2 og 6. F2 er 510N kraft i nøkkelpunkt 1 og 7. Først flyttes F1 til samme posisjon med F2.

$$M_1 = M_2 \quad \text{Ligning 3-17}$$

$$F1 * 550 = x * 1100$$

$$x = \frac{442N * 550}{1100} = 221N$$

Nedbøyningen i røret:

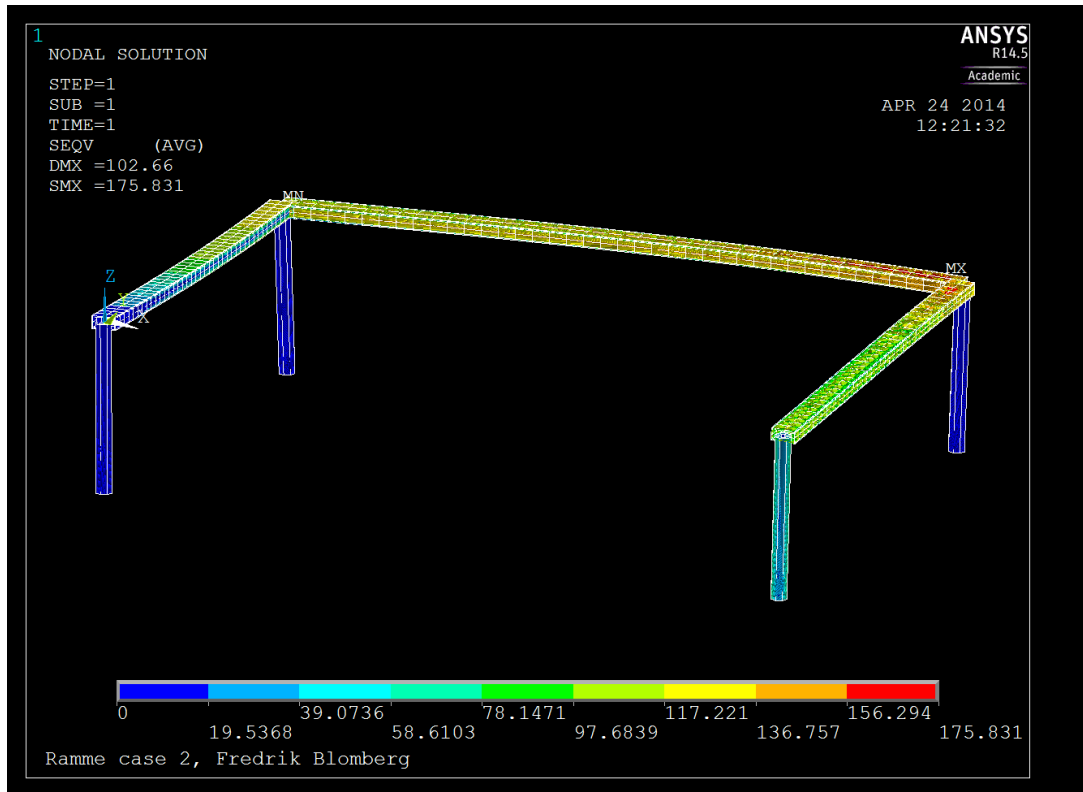
$$y = \frac{F * l^3}{3 * E * I} \quad \text{Ligning 3-18}$$

$$y = \frac{(221N + 510N) * (1100mm)^3}{3 * 68900MPa * \frac{60mm * 30mm^3 - 55mm * 25mm^3}{12}} = 74.3mm$$

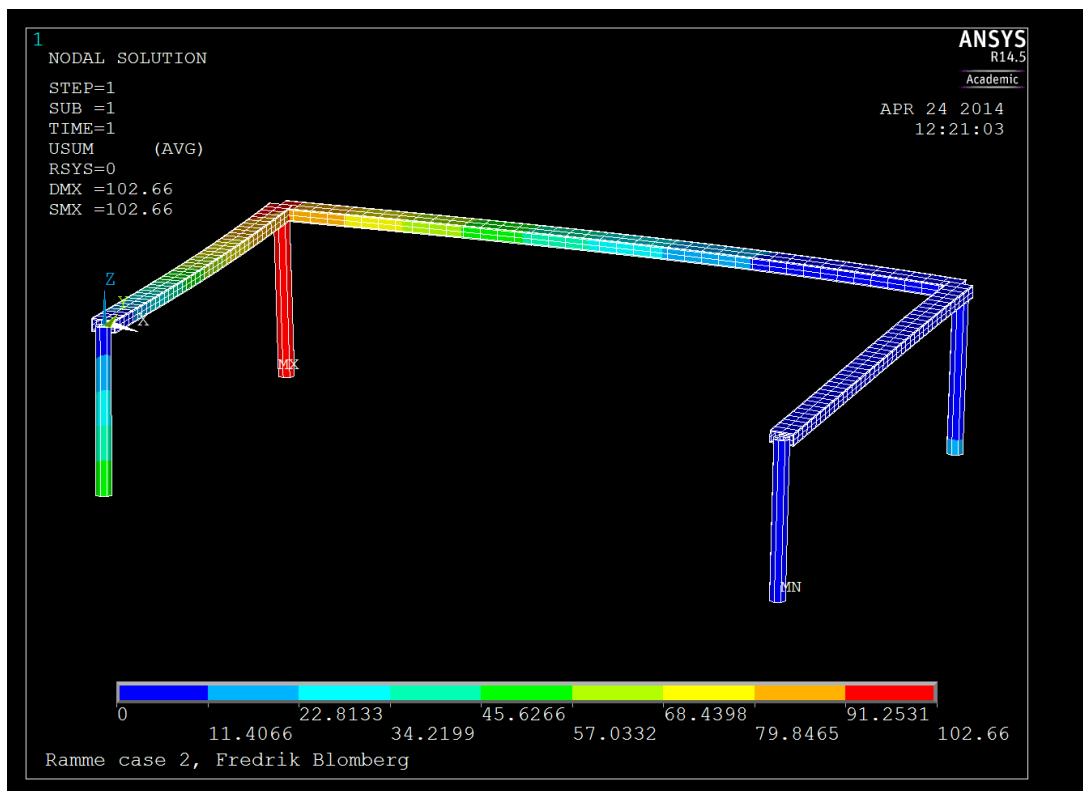
Spenning i røret:

$$\sigma_{bøye} = \frac{M}{I} * y = \frac{(221N + 510N) * 1100mm * 15mm}{63385.4mm^4} = 190.3MPa \quad \text{Ligning 3-19}$$

## Belastingstilfelle 2



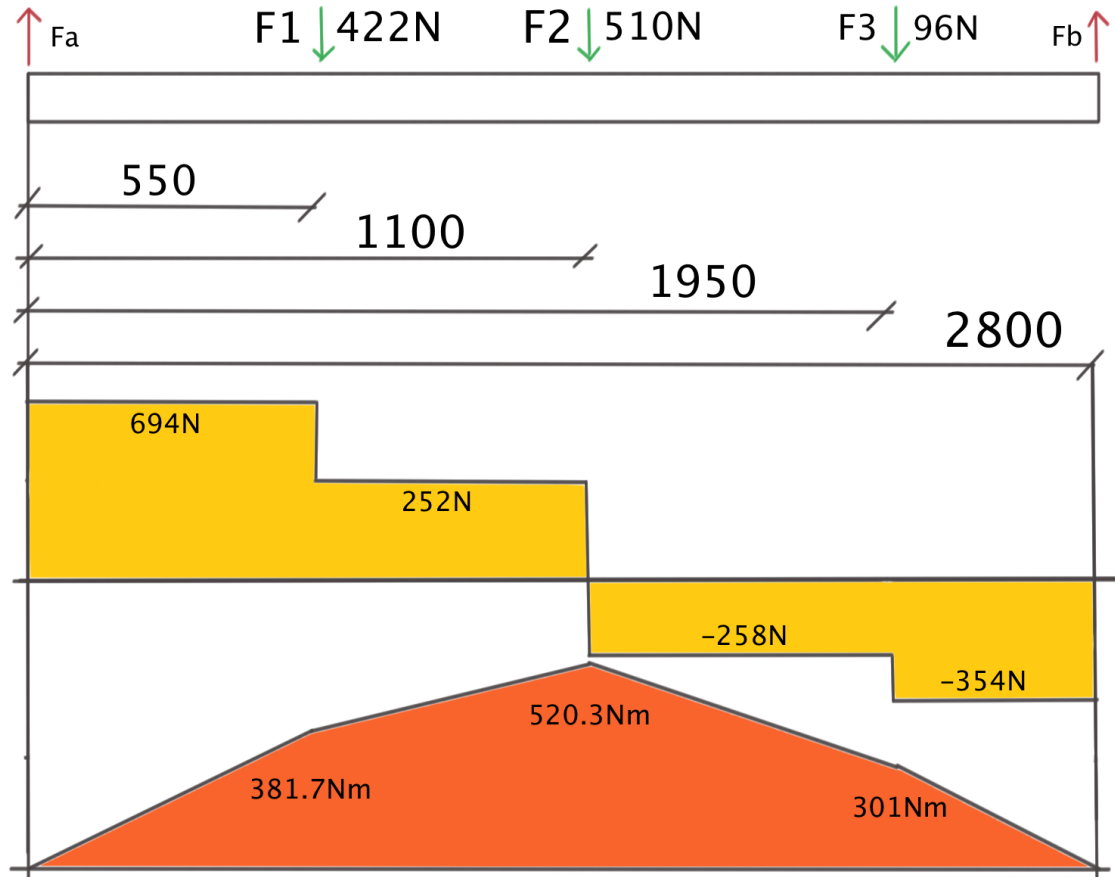
Figur 32: Spenninger i rammen ved belastningstilfelle 2, uten verktøy og et framhjul uten kontakt med underlaget.



Figur 33: Nedbøyning i belastningstilfelle 2. Maksimal nedbøyning er 102.7 mm.

Manuelle beregninger:

Forenklet ved å se på to av tre rørelementer som en rett bjelke.



Figur 34: Beregningsmodell med moment og skjærkraftsdiagram.

$$\Sigma M = 0$$

Ligning 3-20

$$F_b = \frac{442N * 0.55m + 510N * 1.1m + 96 * 1.95m}{2.8m} = 354N$$

$$\Sigma F_y = 0$$

Ligning 3-21

$$F_a = 442N + 510N + 96N - 354N = 694N$$

Beregninger for moment- og skjærkraftdiagram:

$$0 \text{ m} < x_1 < 0.55\text{m}$$

Skjærkraft er den samme som opplagringen i a.

Momentet:





$$M(x_1) = Fa * x = 694N * x \quad \text{Ligning 3-22}$$

$$M(0.55m) = 694N * 0.55m = 381.7Nm$$

$0.55 \text{ m} < x_2 > 1.1\text{m}$

Skjærkraft:

$$F(x_2) = Fa - F_1 \quad \text{Ligning 3-23}$$

$$F(x_2) = Fa - 442N = 694N - 442N = 252N$$

Momentet:

$$M(x_2) = Fa * x - F_1 * (x - l_1) \quad \text{Ligning 3-24}$$

$$M(x_2) = 694 * x - 442N * (x - 0.55m) = 252N * x + 243.1Nm$$

$$M(1.1m) = 252N * 1.1m + 243.1Nm = 520.3Nm$$

$1.1 \text{ m} < x_3 > 1.95 \text{ m}$

Skjærkraft:

$$F(x_3) = Fa - F_1 - F_2 \quad \text{Ligning 3-25}$$

$$F(x_3) = 694 - 442N - 510N = -258N$$

Momentet:

$$M(x_3) = Fa * x - F_1 * (x - l_1) - F_2 * (x - l_2) \quad \text{Ligning 3-26}$$

$$M(x_3) = 694 * x - 442N * (x - 0.55m) - 510N * (x - 1.1m)$$

$$M(1.95m) = -258N * 1.95m + 804.2Nm = 301Nm$$

Nedbøyning beregnet med Macaulay funksjoner [10].



$$EIy'' = M(x)$$

Ligning 3-27

$$EIy'' = -694 \langle x \rangle^1 + 442 \langle x - 550 \rangle^1 + 510 \langle x - 1100 \rangle^1 + 96 \langle x - 1950 \rangle^1$$

$$EIy' = -374 \langle x \rangle^2 + 221 \langle x - 550 \rangle^2 + 255 \langle x - 1100 \rangle^2 + 48 \langle x - 1950 \rangle^2 + C_1$$

$$EIy = -115.7 \langle x \rangle^3 + 73.7 \langle x - 550 \rangle^3 + 85 \langle x - 1100 \rangle^3 + 16 \langle x - 1950 \rangle^3 + C_1 \langle x \rangle^1 + C_2$$

Når  $x = 0$  er  $y = 0$  medfører at  $C_2 = 0$

Når  $x = 2800$  er  $y = 0$

$$0 = -115.7 * 2800^3 + 73.7 * 2250^3 + 85 * 1700^3 + 16 * 850^3 + C_1 * 2800$$

$$C_1 = \frac{2.54 * 10^{12} - 8.4 * 10^{11} - 4.18 * 10^{11} - 9.8 * 10^9}{2800} = 454357142.9$$

Den elastiske linjes likning og utregning for nedbøyningen. Nedbøyning innsatt lengden 1100 mm fra opplagringen på venstre side. Elastisitetsmodulusen for aluminium er satt til 68 900 MPa og annet arealmoment til profilet er 63385.4 mm<sup>4</sup>. Videre fra likning 3-27:

$$EIy = -115.7 \langle x \rangle^3 + 73.7 \langle x - 550 \rangle^3 + 85 \langle x - 1100 \rangle^3 + 16 \langle x - 1950 \rangle^3 + 454357142.9 \langle x \rangle^1 \quad \text{Ligning 3-28}$$

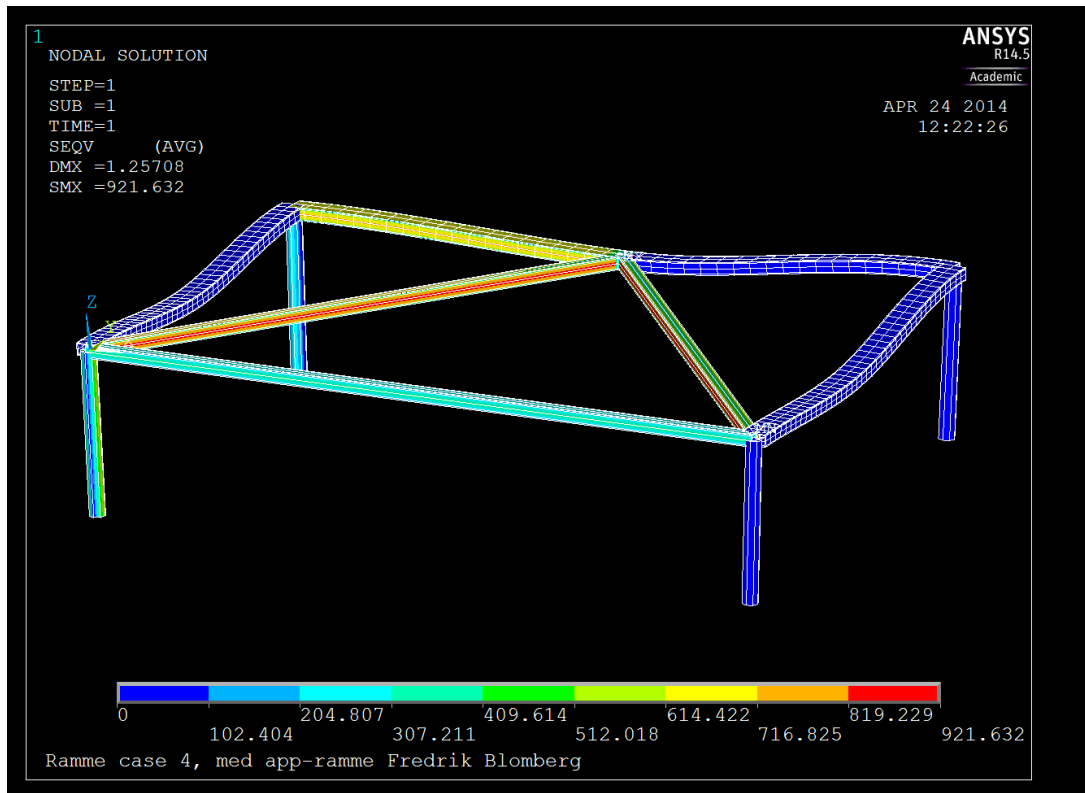
$$y(1100) = \frac{1}{EI} * -115.7 * 1100^3 + 73.7 * 550^3 + 454357142.9 * 1100$$

$$y = 82\text{mm}$$

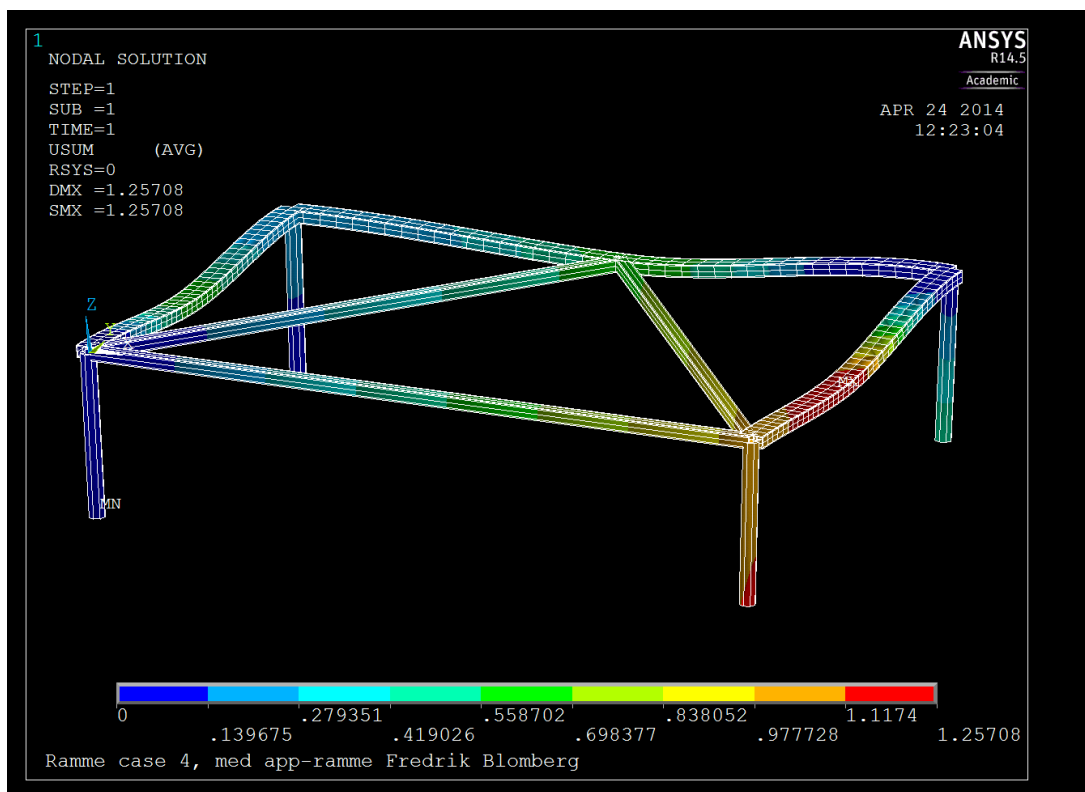
Spenningsberegninger:

$$\sigma_{bøye} = \frac{M}{I} * y = \frac{520.3\text{Nm} * 1100 * 15\text{mm}}{63385.4\text{mm}^4} = 135.4\text{MPa} \quad \text{Ligning 3-29}$$

### Belastingstilfelle 3

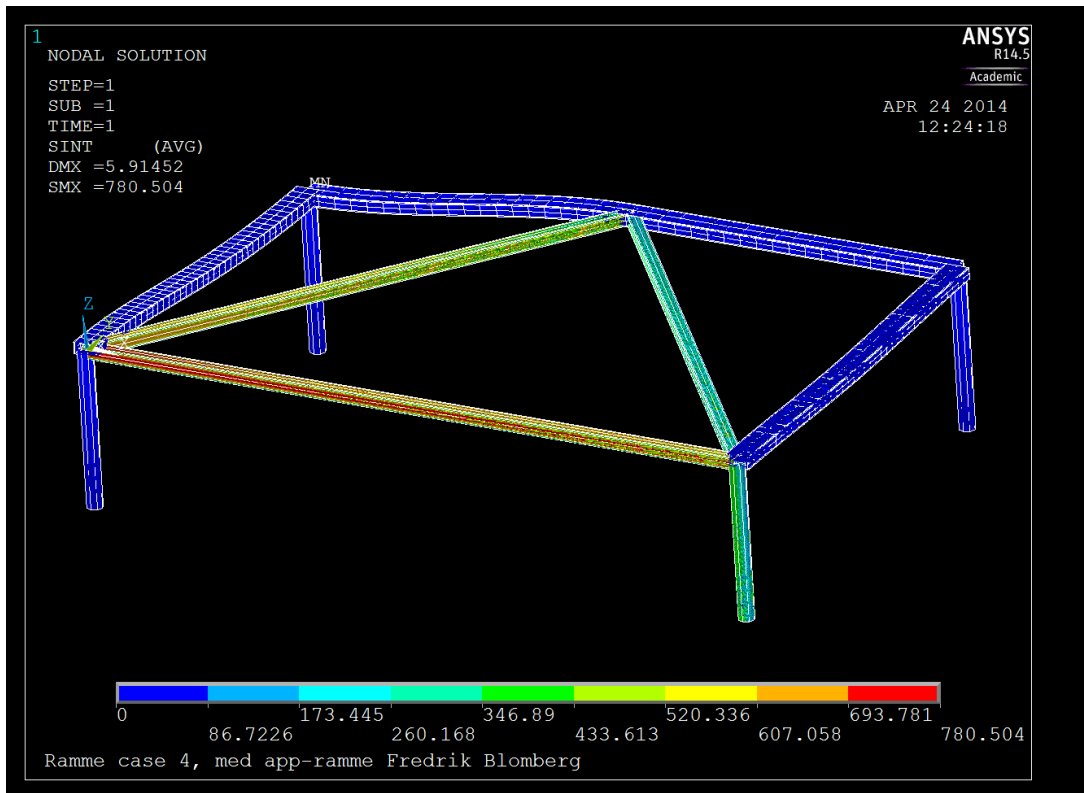


Figur 35: Spenninger i rammen ved belastningstilfelle 3, med verktøy og et bakhjul uten kontakt med underlaget.

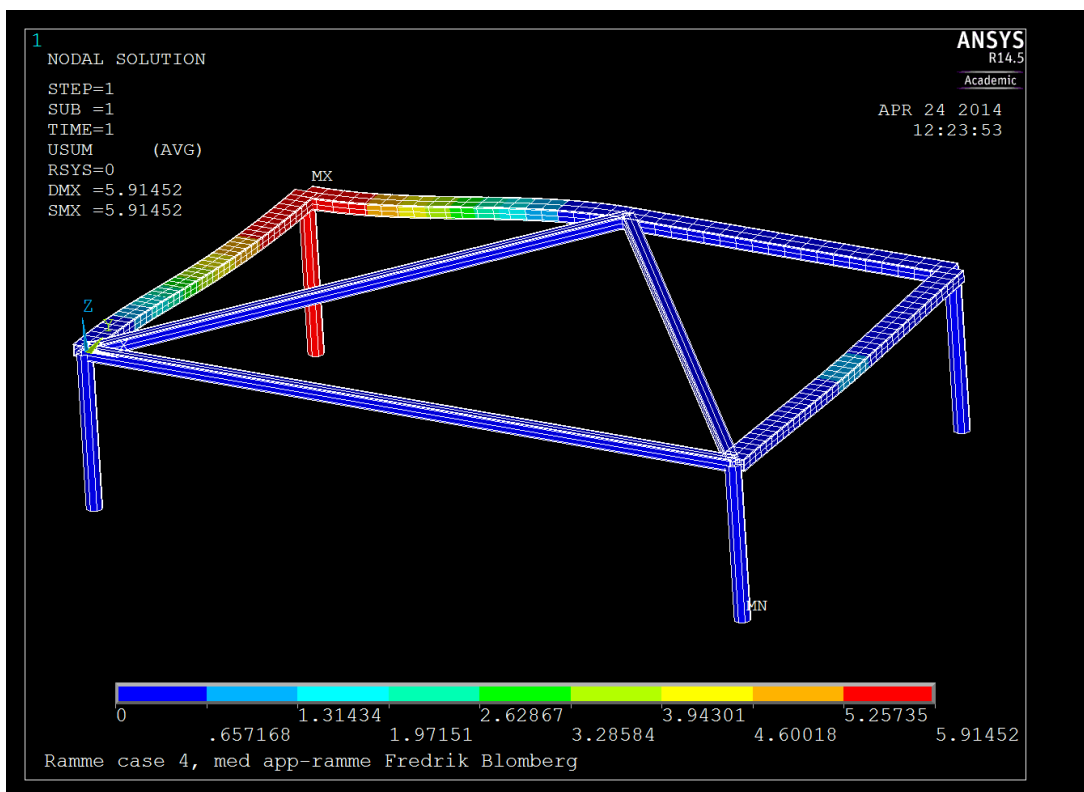


Figur 36: Nedbøyning i rammen ved belastningstilfelle 3, med verktøy og et bakhjul uten kontakt med underlaget.

### Belastingstilfelle 4



Figur 37: Spenning i rammen ved belastningstilfelle 4, med verktøy og et framhjul uten kontakt med underlaget.



Figur 38: Nedbøyning i rammen ved belastningstilfelle 4, med verktøy og et framhjul uten kontakt med underlaget.



Tabell 7: Oversikt over resultatene fra beregninger og simuleringer.

| Belastningstilfelle              | 1                 |           | 2                 |           | 3                 |           | 4                 |           |
|----------------------------------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| <b>ANSYS 14.0</b>                | 206               | 76        | 175.8             | 102.7     | 921.6             | 1.26      | 780               | 5.9       |
| <b>SolidWorks<br/>SIMULATION</b> | 203               | 62        | -                 | -         | -                 | -         | -                 | -         |
| <b>Manuelle<br/>berenginger</b>  | 190.3             | 74.3      | 135.4             | 82        | -                 | -         | -                 | -         |
|                                  | $\sigma$<br>(MPa) | y<br>(mm) | $\sigma$<br>(MPa) | y<br>(mm) | $\sigma$<br>(MPa) | y<br>(mm) | $\sigma$<br>(MPa) | y<br>(mm) |

### 3.4 Produktarkitektur

Vedlagt er arbeidstegninger for alle delene som inngår i hele konstruksjonen.

#### 3.4.1 Kulelagerhussammenstilling

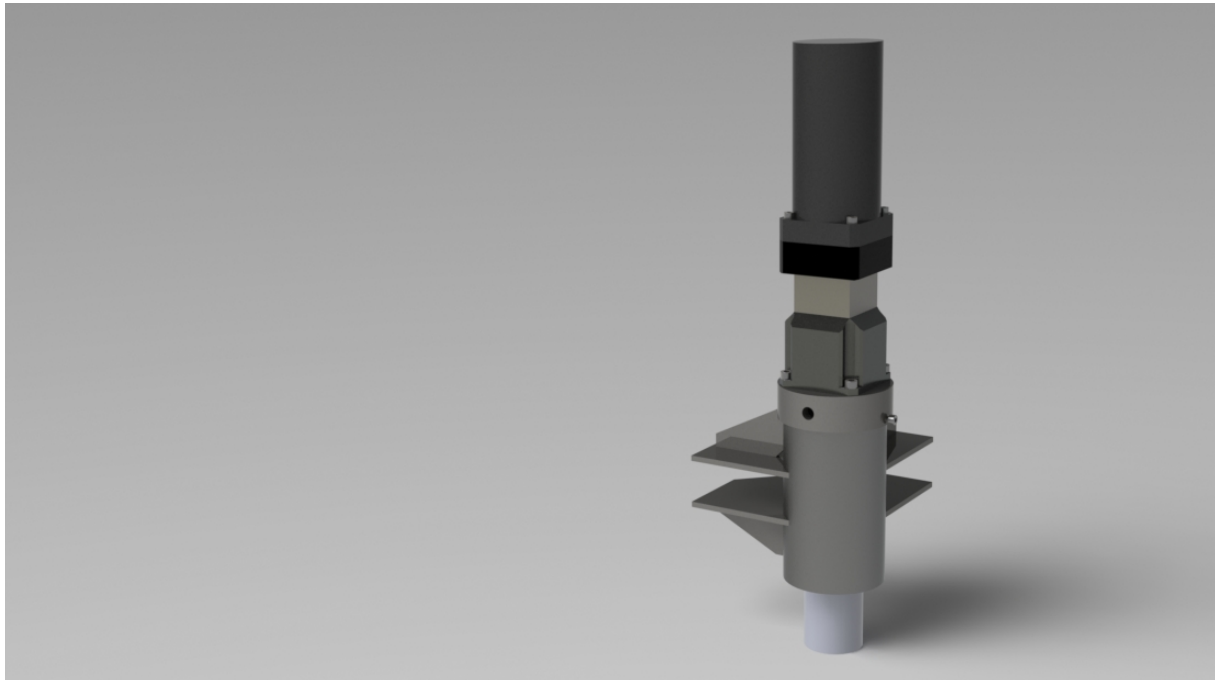
Et av kravene var at samtlige hjul skulle kunne roteres om sin egen akse så landbruksmaskinen har god manøvreringsevne. Over hvert hjul må det da være et roterende ledd med tilhørende motor. Anordningen som gjør slike bevegelser mulig, består av kulelagerhus, aksling og kulelager. I hvert hjørne er det et kulelagerhus. For å feste kulelagerhuset sammen med rammen benyttes stålplater som limes sammen med aluminiumprofilene. Etter anbefaling fra verkstedet er veggtykkelsen satt til 9 millimeter for ikke å påvirke nøyaktigheten til kulelagerpasningen fra varmen laget av sveisene. SKF sin hjemmeside anbefaler presspasningen N7, men erfaring tilsier at det er tilstrekkelig å bruke toleranse på H12. Kulelagrene holdes på plass av låseringer.



Figur 39: Eksplosjonstegning kulelager sammenstillingen.

Sammensatt ser kulelagerhuset med servomotorer ut som angitt på figuren under. Hullet i delen som holder servogiret fast med kulelagerhuset, har et hull for å stramme til en

settskrue. Settskruen overfører rotasjonskreftene fra servogiret til akslingen når hjulet svinges.



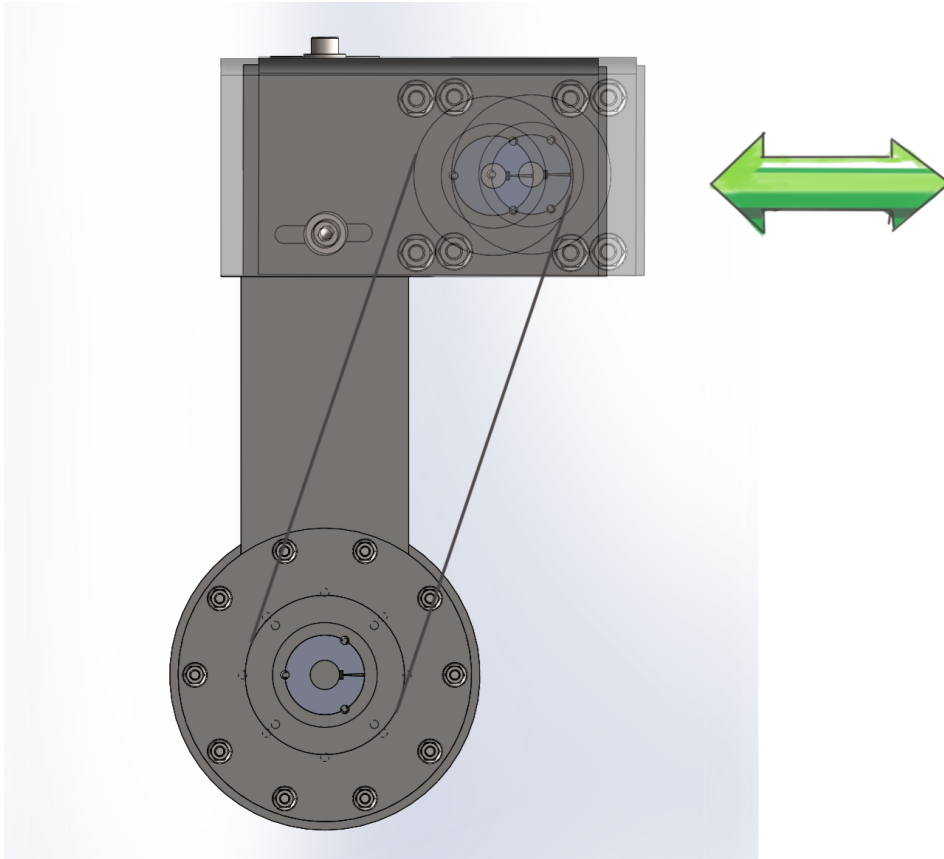
Figur 40: Kulelagerhussammenstilling med servomotor og gir. Hullet i monteringsdelen til servogiret gir mulighet til å stramme settskruen i akslingen.

### 3.4.2 Underarmssammenstilling

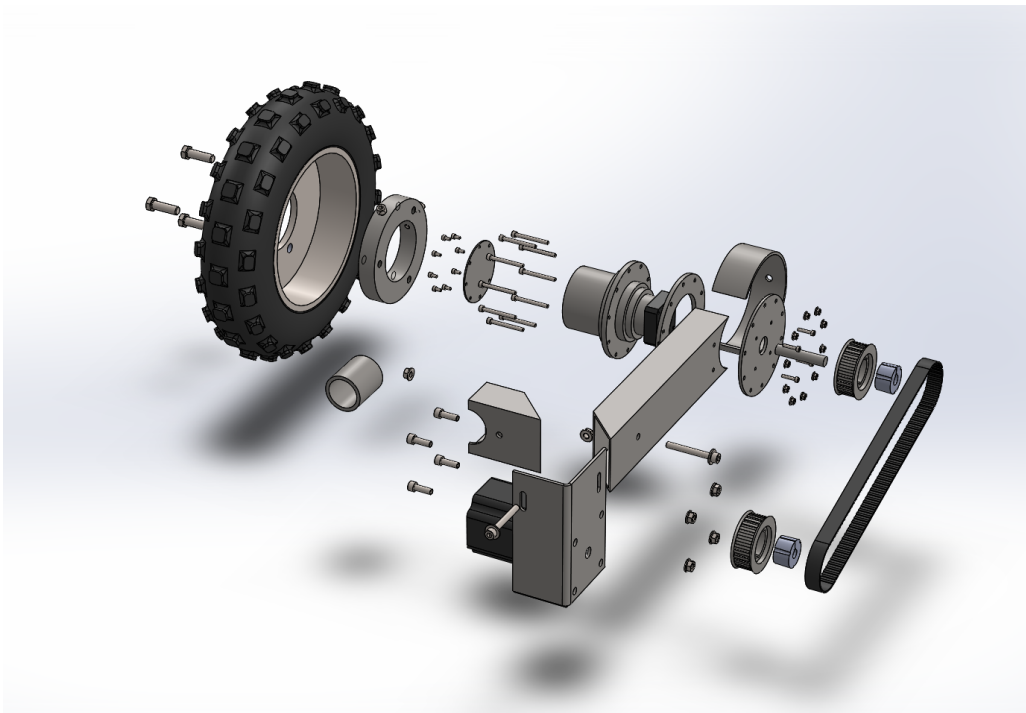
Underarmsammenstillingen består i hovedsak av to firkantrør med giret i bunnen og feste til kulelagerhuset i toppen. Det er valgt å bruke et system der giret og fremdriftsmotoren er to separate enheter. Overføringen av kreftene fra motoren til giret skjer via tannreim. Tannreim er valgt fordi det er ønskelig å ha kontroll over rotasjonen til hjulene. I motoren er det innebygget posisjonssensorer som kan benyttes til overvåking av posisjonen til hjulene. Motoren er plassert på en regulerbar vinkel slik at beltet kan spennes til anbefalt verdi. Ved å bruke reimoverføring kan utvekslingen mellom motoren og giret forandres enkelt ved å endre tannhjulstørrelsen.

Alle delene som inngår i sammenstillingen er fremstilt av ST355 stål. Rørene og festeplatene til giret blir sveiset sammen. Motorfestet skrues fast til resten av konstruksjonen.

Felgene passet ikke rett på giret. Felgene må bygges om med utvidet hull i senter og nye skruehull måtte bores. Hjulet monteres på en ring som igjen er klemst fast på giret. Ved å bruke en slik festing kan hjulet flyttes aksielt på giret.



Figur 41: Justerbart motorfeste for reimstrammingsmulighet. Riktig forstramming av tannreimen er viktig for optimal virkningsgrad.



Figur 42: Eksplosjonstegning av underarmssammenstillingen.



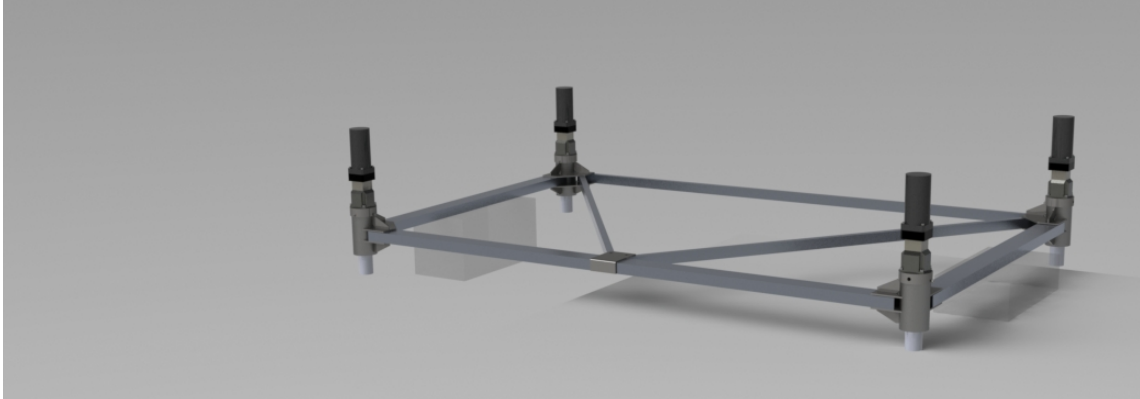


Figur 43: Rendrert sammenstillingstegning.

### 3.4.3 Rammesammenstilling

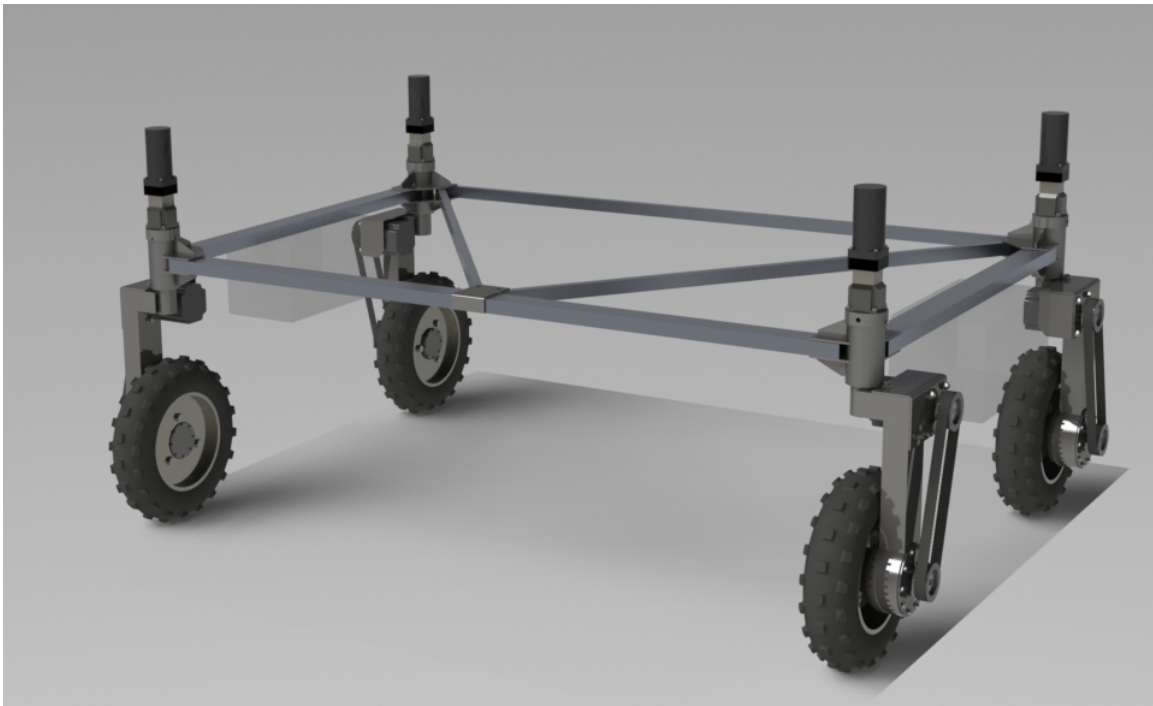


Figur 44: Sammenstilling av kulelagerhus og underarm.



Figur 45: Komplette ramme med verktøyramme. Underarmsammenstillingen monteres på akslingene som stikker ut.

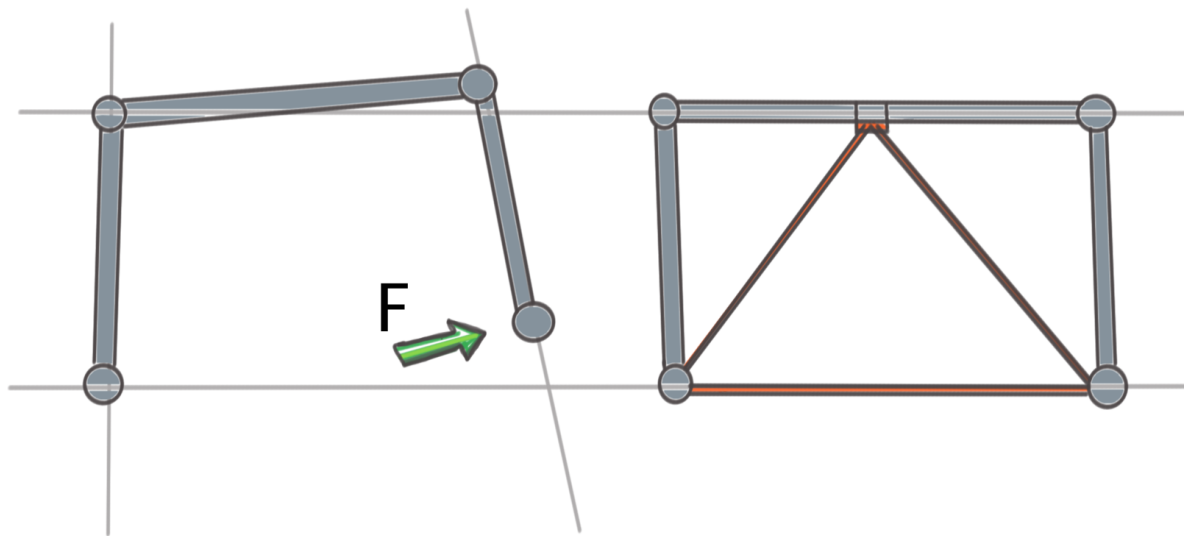
Alle rammelementer, motorer, gir og hjul er modellert. Motorstyringer, batterier og kabler er ikke tegnet inn i modellen. Videre arbeid i prosjektet er å montere sensorer og datastyringer. Det er mye åpne plasser hvor slike komponenter kan plasseres.



Figur 46: Rendrert modell av hele roboten. Batteriene gjort gjennomsiktige.

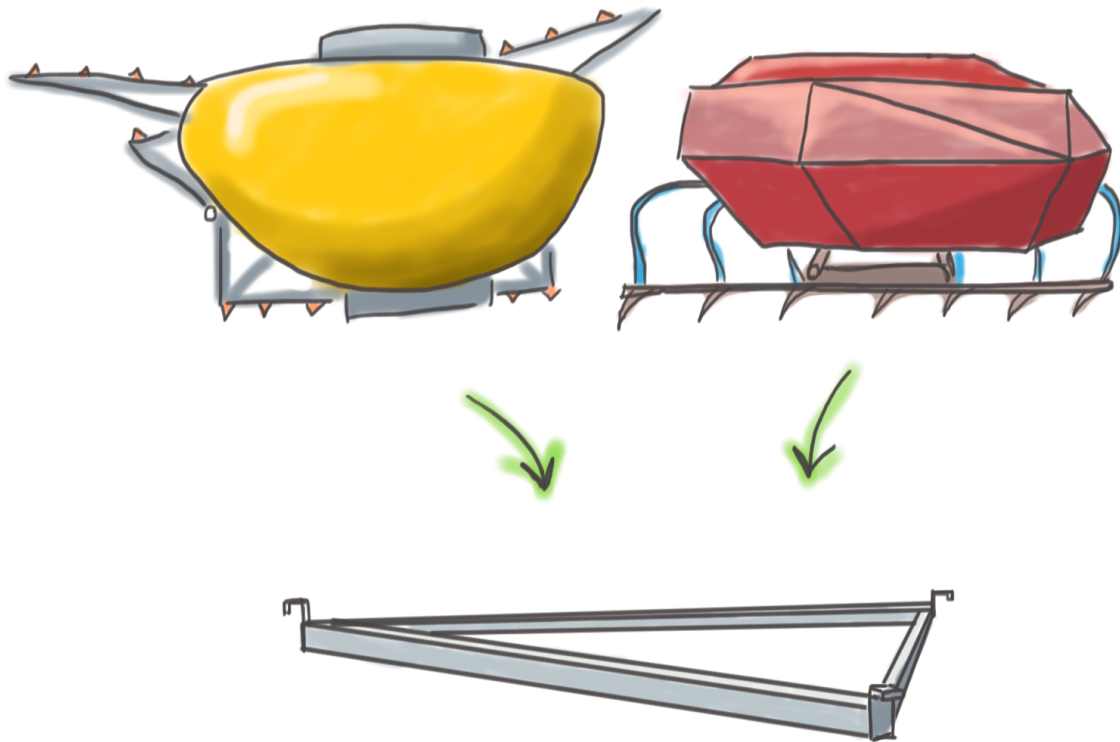
## 4 Verktøydesign og oppbevaringsstasjon

Konstruksjonen til landbruksmaskinen anses å være komplett når verktøyet er montert. Verktøyet skal holde rammen sammen og ha forhåndsdefinerte mekaniske spesifikasjoner. Rammen har svakheter i hjørnene hvor kulelagerhusene festes til aluminiumsrørene. I et tenkt scenario hvor bakhjulene gir pådrag vinkelrett ut til siden, enten i hver sin retning eller hvis et av bakhjulene sitter fast, vil sammenføyningen mellom kulelagerhuset og aluminiumsrøret deformeres eller gå til brudd. Alt som verktøy som monteres i rammen må derfor ha muligheten til å ta opp krefter som angitt på figuren under. Trekantformen skal kun ta opp strekk og trykkrefter, ikke momenter. Derfor kan festene mellom landbruksmaskinen og verktøyet være enkle kroker.



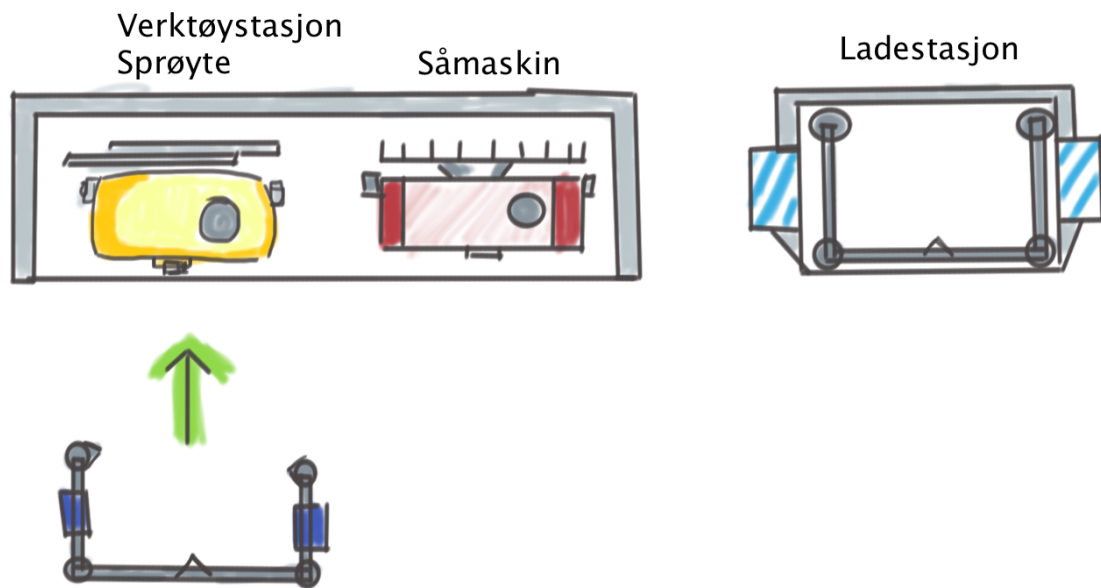
Figur 47: Effekten av forsterkning av rammen.

Ulike applikasjoner kan enkelt monteres på en standardisert verktøyramme. Alternativt kan applikasjonen ha en egen spesialbygget ramme om det er nødvendig. Både sprøyteverktøy og verktøy til såing kan passe på en standard ramme.



Figur 48: Både såmaskin og sprøyte har samme rammekonstruksjon i bunn.

For at hele systemet med både verktøy og robot skal være helt autonomt, er det planlagt å lage en stasjon der verktøyene oppbevares. Stasjonen kan være et flatt betongdekke med holdere for verktøyene. Roboten kan da lett rygge inn i verktøystasjonen og hente ut den aktuelle redskapen. For å skjerme utstyret for vær og vind kan det monteres tak over eller verktøystasjonen kan plasseres inne i en låve. Landbruksmaskinen skal ha de fleste sensorer selv, men det kan være nødvendig med enkel form for kommunikasjon mellom verktøystasjonen og roboten for at systemet fungere optimalt. Løsningen vil minimere muligheten for feil.



Figur 49: Verktøystasjon og ladestasjon for robot. Roboten rygger inn i stasjonen og henter verktøy.

Dagens batterikapasitet er ikke tilstrekkelig for at roboten kan utføre sine arbeidsoppgaver uten å bytte batteripakke underveis. Det må etableres en løsning der roboten selv kan bytte sine batterier og deretter fortsette sine arbeidsoppgaver. Derfor må landbruksmaskinen ha en form for batteristasjon hvor tomme batterier lades og hvor roboten automatisk bytter til nye batterier. En slik batteristasjon må være i nærheten av arbeidsområdet til roboten. Det blir mindre hensiktsmessig om roboten må bruke energi på å forflytte seg til en batteristasjon som er plassert langt unna hver gang roboten går tom for strøm. En mulighet er å lage en mobil stasjon som kan plasseres ut på jorden hvor roboten arbeider. Batteristasjonen flyttes av større maskiner, for eksempel traktor med frontlaster. Energiforsyningen til batteristasjonen kan drives av aggregater eller av eksisterende strømnnett. Brukes strømnettet må det legges til rette for strømuttak ved jordene, noe som kan være kostbart.

Roboten har en begrenset lasteevne og må av den grunn etterfylle forbruksmateriell. Etterfylling er en utfordring fordi det medgår tid og batterikapasitet å forsyne maskinen med frø, gjødsel og annet langt borte fra arbeidsområdet. Traktorer som er i bruk har mye større lasteevne som gir lenger etterfyllingsintervaller. For å forenkle arbeidet til bonden kan batteristasjonen kombineres med en etterfyllingsstasjon. Bonden må med slik løsning kun etterfylle en stasjon med forbruksmateriell.



## 5 Byggeprosess

Prototypen av roboten blir produsert på verkstedet på NMBU. Vi valgte dette verkstedet fordi det er lokalisert på skolen og det har en meget rimelig interntimepris. Vi har videre gode relasjonen til arbeiderne på verkstedet. Deres leverandører av materialer er Ruukki. Ved bestilling av kulelagre, sikringsringer, tannhjul, reimer og lim er firmaet TESS benyttet. Begge bedriftene har rammeavtaler med NMBU.

### 5.1 Kostnader

Tabell 8: Kostnader, budsjett og resultat av produksjonen. Timeantall er et estimat da produksjonen ikke var ferdig ved trykking av oppgaven.

| Hva                                      | NOK  | Ant | SUM             | Budsjett        |                  |
|--|------|-----|-----------------|-----------------|------------------|
| Timepris verksted                        | 250  | 250 | 62500           | 25000           |                  |
| Kulelager,<br>tannhjul, reimer<br>og lim | 3600 | -   | 3600            | 0               |                  |
| Materialer                               | 6115 | -   | 6115            | 3000            | Avvik            |
| <b>SUM</b>                               |      |     | <b>72215 kr</b> | <b>28000 kr</b> | <b>-44215 kr</b> |

## 5.2 Bilder av produksjonen og sammenstillingen



Figur 50: Delen som er spent fast i stikka er ringen som fester servogiret. Her freses skruerullene til monteringskruene. Foto Fredrik Blomberg.



Figur 51: Delene blir punktsveiset sammen for å se om sammenstillingen passer. Når samtlige deler passer sammen kan delene helstveises. Her er underarmen avbildet. Foto Fredrik Blomberg.



Figur 52: Motorfestevinkelen. Foto Fredrik Blomberg.



Figur 53: Senterhullet i felgen måtte utvides. Felgen på bildet mangler nye skruehull for skrueene som fester felgen til låseringen. Foto Fredrik Blomberg.

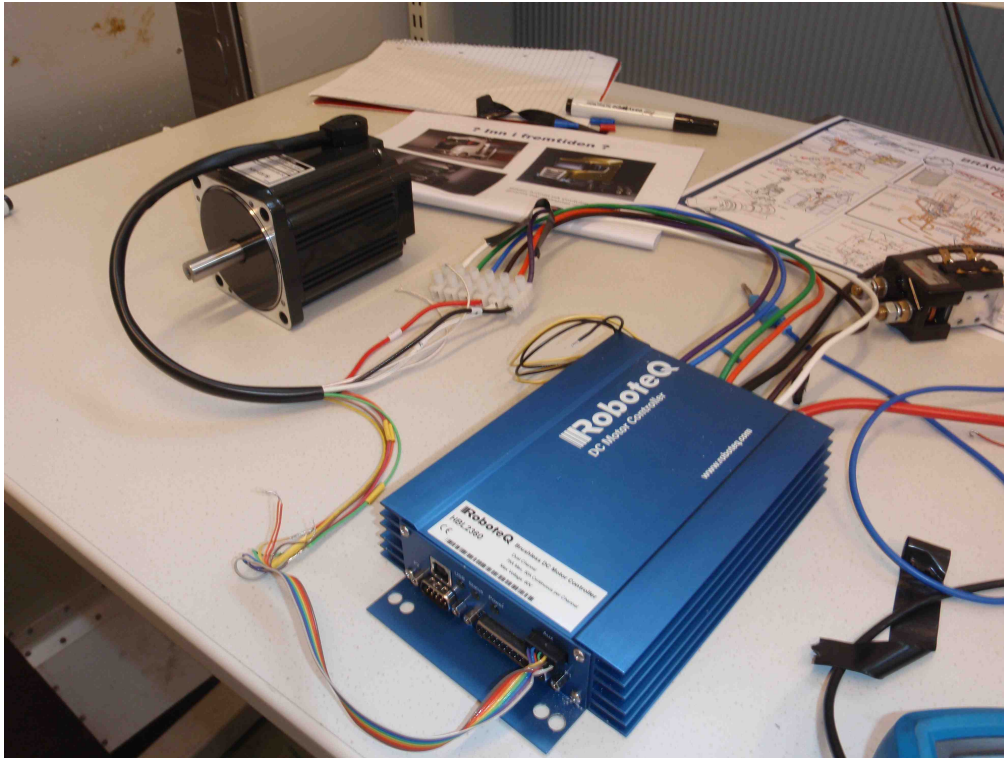




Figur 54: De fire kulelagerhusene med påsveiset plater. Foto Fredrik Blomberg.



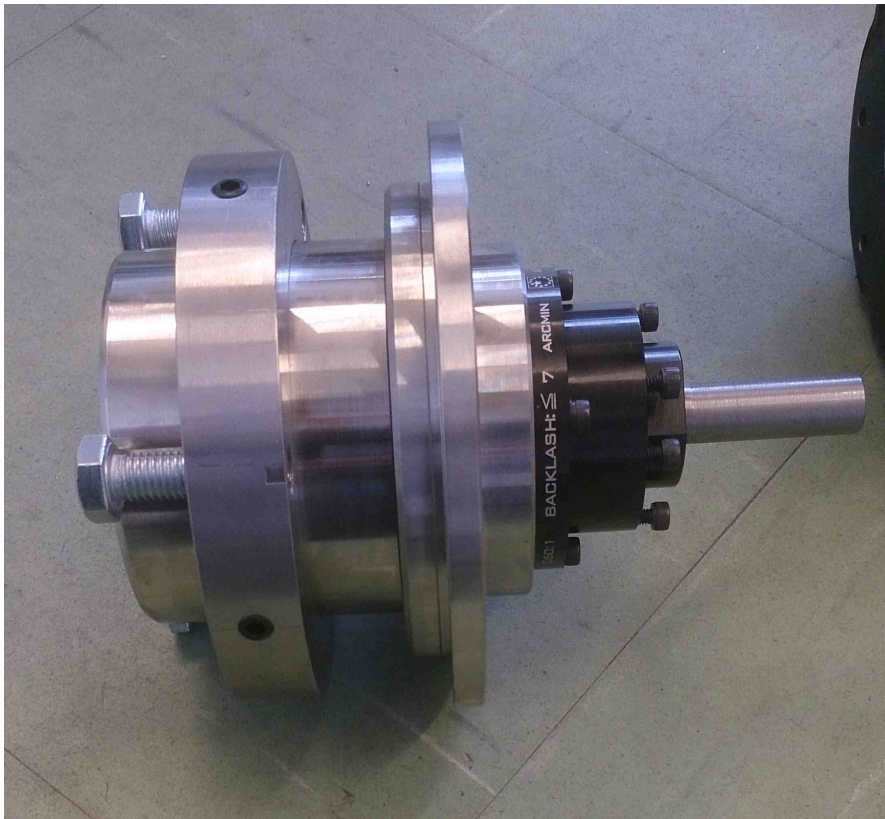
Figur 55: Akslingen mellom servogiret og underarmen. Foto Fredrik Blomberg.



Figur 56: Testing av fremdriftsmotorer og motorstyringer. Det oppstå utfordringer med signalene fra sensorene i motoren til motorstyringen når motoren skulle reversere rotasjonsbevegelsen. Foto Fredrik Blomberg.



Figur 57: Batteriet som ble kjøpt fra et firmaet Golden Motors fra Kina. I et av batteriene var ledningene feilkoblet. Når batteriet ble koblet til laderen lignet det en kortslutning. Koblingsfeilen førte til at polene i laderen brant bort i løpet av sekunder. Foto Fredrik Blomberg.



Figur 58: Fremdriftsgiret med festering for felg. Tannremshjulet monteres på akslingen som stikker ut til høyre. Foto Lars Grimstad.



Figur 59: Montering av komponenter. Foto Lars Grimstad.



Figur 60: Montering av servomotor og gir. Foto Lars Grimstad.



### 5.3 Erfaringer

De første utfordringene ved byggeprosessen var hvilke materialer som var tilgjengelig. Da jeg tegnet rammen i SolidWorks brukte jeg profiler som fantes på Ruukki sine hjemmesider. Men det viste seg at de ikke lagerførte samtlige profiler som var beskrevet på hjemmesiden. Underarmskonstruksjonen ble grovere bygget enn først tegnet. Firkantprofilet ble byttet fra 70x50x2.5 til 80x50x4 noe som førte til overdimensjonering og unødvendig økning av vekten. I en prototype som denne er slike tilpasninger noe som man må regne med. Det er ikke nødvendig å bruke mye tid og ressurser på å finne riktige deler, da det ikke er avgjørende for prosjektets ferdigstilling.

Andre utfordring var limingen av aluminiumprofilene til stålplatene på kulelagerhuset. Ingen på verkstedet hadde noen erfaring med hvor stort mellomrom som trengtes for limet. På tegningene satt jeg mellom 1 til 1.5 millimeter klaring til limet. Dette viste seg å være unødvendig stor klaring. Mellomrommet ble justert ned til 0.5 millimeter.

Når fremdriftsgirene kom avvek de fra arbeidstegningen jeg fikk tilsendt i forkant. Underarmssammenstillingen er laget ut i fra tegningene av giret, ikke fra fysiske mål målt på giret. Forskjellen fra tegningene og giret som vi mottok var festebraketten mellom giret og motoren. Braketten varierer avhengig av motoren som skal monteres rett på giret. Alle delene var produsert da giret ankom og giret passet ikke. Ved å fjerne hele motorfeste fra giret, fikk vi montert det. Det ble ikke lenger mulig å skru fast giret fra begge sider.

I de første kravspesifikasjonene jeg fikk tildelt skulle rullediameteren på hjulene være 325-350 millimeter. Underveis i prosjektet fant vi passende hjul, men hjuldiameteren var på 400 millimeter. Avstanden mellom hjulet og fremdriftsmotoren ble da for liten. Lenden på beltene og rørelementene i underarmsammenstillingen måtte forlenges etter at de var produsert.





## 6 Kommersialisering

Dette prosjektet har begynt utviklingen av en prototype av landbruksmaskinen. Prototypen er ikke klar for masseproduksjon. Videre i prosjektet må de elektriske systemene utvikles så landbruksmaskinen blir helt autonom. Rammen er ikke testet, men bare simulert belastninger og den kan derfor oppføre seg annerledes ved fysisk testing. Endringer av designet kan være nødvendig for at rammen skal fungere optimalt. Sammenstillingen av underarmen har ikke blitt optimalisert med tanke på vekt og styrke. Det antas at konstruksjonen er overdimensjonert og unødvendig tung.

Landbruksmaskinen mangler festeanordning for verktøyene. Festene må utvikles og implementeres i landbruksmaskinen før maskinen er klar til testing og godkjenning.

Ethvert produkt som skal ut i et marked må ha en design som virker tiltrekkende for kunden. Autonome landbruksmaskinen kan gi fordeler i landbruket, men det avhenger av at bønder faktisk velger å benytte seg av slike produkter. Viser det seg at maskinen har et marked vil det raskt komme flere konkurrerende aktører. Maskiner må derfor skille seg ut både teknologisk og designmessig for å vinne markedsandeler. For å beholde kunder må det opprettes tilbud som ivaretar vedlikeholdet av solgte maskiner. Slitedeler må byttes ut ved gitte intervaller så det må være mulig å få kjøpt nye deler. Kunder som avhenger av produksjonsmaskineri kan være mer opptatt av service enn innkjøpskostnader. Det kan bli meget kostbart at maskiner stanser produksjonen på grunn av mangel på vedlikehold.

Ved masseproduksjon må en tenke på hva som er den mest hensiktsmessige metoden for produksjon. For eksempel vil bruk av fresing være en uegnet metode ved masseproduksjon fordi fresing tar lang tid og lager mye spon av materialene og sponene kan ikke brukes videre. Fresing blir derfor uforholdsmessig kostbart. Hver del i en konstruksjon må produseres rimeligst mulig og med lavest mulig forbruk av materialer og arbeidstimer. Design og materialvalg på delene kan derfor måtte endres for å være tilpasset optimaliserte produksjonslinjer. En rimelig metode for å produsere deler er støpning. Alle delene i prototypen er konstruert så de skal være enkle å produsere i et mekanisk verksted. Skal delene støpes må de tegnes om så de egner seg i en støpeform. Hvis deler skal sveises må det lages sveisejigger. Delene plasseres enkelt i jiggen og sveiseren trenger kun fokusere på sveisejobben. Deler som sveises kan egne seg for automatisert produksjon. Det er mulig å bruke robotarmer (manipulatorer) med fastmontert sveiseverktøy. Å bruke automatiserte produksjonslinjer er kostnadseffektiv, nøyaktig og hurtig. Ulempen er at slikt produksjonsutstyr er dyrt i innkjøp og krever høy kompetanse av brukeren.

Salgsprisen for et produkt vil bli betydelig lavere enn kostnadene for å fremstille prototypen. Utviklingskostnadene skal bare utgiftsføres én gang og fordeles på samtlige produserte enheter. Ved masseproduksjon er det materialkostnader og produksjonskostnader som har størst innvirkning på salgsprisen til leverandørene. Hvordan produktet distribueres og hvilke salgskanaler som blir benyttet, influerer også utsalgsprisen.



En viktig gjenstående arbeidsoppgave er å gjøre roboten sikker for mennesker, dyr og utstyr. Alle maskiner omfattes av maskinforskriften som setter klare betingelser rundt menneske maskin forholdet. En maskin skal på ingen måte skade et menneske, verken på lang sikt eller ved uhell. Eksempler på sikkerhetstiltak er nødstoppbrytere som er lett tilgjengelige og god ergonomi som forhindrer slitasje på menneskekroppen over tid. Landbruksmaskinen veier fullastet 300 kg og har en toppfart på 5 km/t. Det gjør maskinen farlig ved sammenstøt med mennesker.





## 7 Konklusjon

### 7.1 Resultater og anbefalinger

#### Konseptet

Det er fremstilt en enkel og lett ramme til en autonom landbruksmaskin som kan brukes til såing, gjødsling og sprøyting. Rammen er konstruert myk så hjulene kan følge underlaget uten bruk av bevegelige ledd.

#### Designprosessen

I starten av prosjektet ble det arrangert en lærerik tur til Brasil hvor vi fikk se og lære om automatiserte maskiner. Turen kunne vi ikke vært foruten.

Prosess rundt utviklingen av rammen har vært krevende. De første utfordringene var relatert til å finne ut hvordan problemene med jordpakking best skulle løses. Utvikle et konsept som lar seg praktisk gjennomføre. Når gruppen ble enige om endelige ideer og konsepter var neste steg å modellere en konkret maskin i Solid Works. Modelleringen av rammen har vært en dynamisk prosess fra starten av prosjektet til innleveringen av denne masteroppgaven. Når det konstrueres maskiner vil designet alltid kunne forbedres. Det har vært en kontinuerlig prosess å tenke ut og tegne om roboten så den blir best mulig.

#### Kulelager

Kulelagrene er overdimensjonerte. Det skyldes at akslingen som sitter inne i lagrene må ha den dimensjonen den har. Om akslingen må forbli uendret kan det finnes lagre som har lik innerdiameter, men med mindre ytterdiameter. Da kan også kulelagerhuset reduseres i størrelse. En mulighet er å benytte et vinkelkontaktkulelager. De tåler mindre krefter, men kan være robuste nok til denne maskinen.

#### Aksling mellom kulelager og underarmsammenstilling

Sikkerheten mot flyt er beregnet til 1,4, noe som er lite. Men i beregningene er det lagt inn en belastningsfaktor på 2. Ved gjennomsnittlig belastning er akslingen mer en sterk nok. I situasjoner der hjulene blir utsatt for slag, er akslingen tilstrekkelig dimensjonert.

#### Simuleringer og beregninger

##### Belastningstilfelle 1

Jeg gjorde en simulering i SolidWorks Simulation. Jeg fikk ikke nedbøyninger i nærheten av hva manuelle beregninger og simuleringer i ANSYS gav. Derfor valgte jeg å ikke bruke SolidWorks videre i de neste belastningstilfellene. Resultatene fra de to andre beregningene er like og derfor anses som sannsynlige resultater. De manuelle beregningene tar ikke høyde for torsjonen i frambjelken og avviker derfor fra simuleringen.

##### Belastingstilfelle 2

Forenklet metode benyttet til den manuelle beregningen skiller seg fra simuleringen fordi beregningen ikke tar høyde for torsjonene i rørene. Beregningene ser på røret som en rett bjelke, ikke som et rør med vinkel etter 1100 millimeter. Nedbøyningsresultatene fra begge



beregningsmetodene avviker minimalt og anses som sannsynlige resultater. Spenningen blir større i simuleringen fordi den kalkulerer med torsjonene.

#### Belastingstilfelle 3 og 4

Simuleringen av rammen med verktøyramme montert. Jeg klarte ikke å konstruere momentfrie ledd i overgangene mellom rammene. Når et hjul mister kontakten med underlaget og presses nedover, vil verktøyrammen bidra til å forhindre deformasjonen. Ved momentfrie ledd vil verktøyrammen kun ta opp krefter fra strekk og trykk. I simuleringen blir verktøyrammen utsatt for vesentlige momenter. Derfor er spenningene så høye og nedbøyningene så små. Simuleringene er mer en bekreftelse på at verktøyrammen ikke skal monteres fast enn en simulering på hvordan konstruksjonen vil oppføre seg når et hjul henger i lufta.

## 7.2 Videre arbeid

Etter at alle delene var produsert fant jeg ut at kulelageret trenger en aksiell forspenning. Ved kun å holde kulelagrene på plass med sikringsringer oppnår man ingen forspenning. Det må derfor lages gjenger på akslingen som fører fra servogiret og ned til underarmen så en strammering kan klemme kulelagrene til rette forspenning. SKF anbefaler forspenningskraft på  $0,02 C$ , hvor  $C$  er dynamisk maksimal last. På det aktuelle kulelageret som er brukt er tillatt dynamisk kraft  $40,2 \text{ kN}$  som gir en forspenningskraft på  $804 \text{ N}$ . I prototypen er ikke dette et problem, men kulelagrene er ikke montert korrekt og kan redusere levetiden på lagrene. Se vedlegg for illustrasjon.

Når roboten blir ferdig sammenstilt og kjørbart, kan det utføres tester av rammen. Ved å sette på strekklapper på ulike rammeelementene kan man beregne opptredende spenninger. Roboten må gjøre de arbeidsoppgavene den skal på det underlaget den er konstruert for. I en simuleringssituasjon er det vanskelig å lage eksakte modeller av virkelige situasjoner.

Design og konstruere festemekanismene til verktøyene så roboten selv har muligheten til å bytte batterier og verktøy.

Utvikle batteri- og verktøystasjon hvor roboten automatisk kan bytte verktøy og batterier. Batteristasjonen bør være en egen modul som kan utplasseres nært arbeidsområdet til roboten. Verktøyene har begrenset plass til forbruksmidler, det være seg frø, gjødsel eller sprøytemidler, og de må kunne etterfylle ved behov. Utrede videre mulighetene for å operere med en kombinert lade- og etterfyllingsstasjon.

Batteripakkene er plassert lett tilgjengelig så de enkelt kan byttes. Braketter for å holde batteriene på plass mangler og et system der batterienes strømkabler enkelt kan kobles fra, er heller ikke utviklet.

## 8 Referanser

### Bøker

3. Terjesen, G., *Strekkklapper*. 2013: IMT/UMB.
6. Ashby, M.F. and K. Johnson, *Materials and design: the art and science of material selection in product design*. 2014, Oxford: Elsevier Science ; Butterworth-Heinemann. 389 s. : ill.
7. Solheim, O. and J. Andersen, *Materiallære*. 2005, Oslo: Gyldendal undervisning. 182 ss : ill.
8. Andersen, J., *Produksjonsteknikk: Vg2 produksjons- og industriteknikk*. 2009, Oslo: Gyldendal undervisning. 352 s. : ill. ; 30 cm.
10. Gere, J.M., *Mechanics of materials*. 8th ed., SI ed. ed. 2013, Stamford, Conn: Cengage learning.

### Artikler

2. S.Bennedsen, B., *Selkørende robotter godsker og sprøyter*. Den faglige baggrund, 2009.

### Personlig meddelelse

9. Terjesen, G., F. blomberg, Editor. 2014.

### Internettkilder

1. 14.03.14]; Valtra spesifikasjoner]. Available from: <http://valtra.no/products/tractors/2350.asp>.
4. 10.03.14]; LEGO fakta]. Available from: <http://education.lego.com/en-us/about-us/lego-education-worldwide/making-lego-bricks>.
5. [cited 2014 01.04]; Hele norges nettbutikk]. Available from: <https://www.komplett.no/makerbot-replicator-2-3d-printer/805952>.

### Figurer

100. Aluminiumsramme automasjon (12.02.14):  
[http://www.aluflex.no/ElemImage/Orig/Linjarmodulsapplikasjon%20med%20lindech%20moduler%20480x360\(1\).jpg](http://www.aluflex.no/ElemImage/Orig/Linjarmodulsapplikasjon%20med%20lindech%20moduler%20480x360(1).jpg)  
[http://www.aluflex.no/ElemImage/item\\_fileexchange-3-web\(1\)\\_390.jpg](http://www.aluflex.no/ElemImage/item_fileexchange-3-web(1)_390.jpg)
101. Motorsykelramme (08.02.14): [http://www.husqvarna-motorcycles.com/uploads/tx\\_ktmproduct/subframe\\_enduro\\_04.png](http://www.husqvarna-motorcycles.com/uploads/tx_ktmproduct/subframe_enduro_04.png)
102. Egg (10.03.2014): <http://mobile-cuisine.com/wp-content/uploads/2013/06/egg.jpg>
103. Kajakk(10.04.2014): <http://lakeannalife.com/images/glideblue.jpg>
104. Fagverkbilde (07.03.14): <http://motoroids.com/wp-content/uploads/2013/10/2014-KTM-RC390-stripped.jpg>
105. Fuglbein snitt (10.03.14): [http://sixdays.org/articles/dinosaurs-evolved-to-birds/Hollow%20Bones%20-%20Vulture%20Wing%20Bone\\_t.jpg](http://sixdays.org/articles/dinosaurs-evolved-to-birds/Hollow%20Bones%20-%20Vulture%20Wing%20Bone_t.jpg)
106. Stålbjelke (10.03.14): <http://www.recoore.com/hardware/images/detailed/1/Steel-I-Beam.jpg>
107. Bambusrør (10.03.14):  
[http://www.guaduabamboo.com/images/splitting\\_bamboo\\_6.jpg](http://www.guaduabamboo.com/images/splitting_bamboo_6.jpg)



108. Sandwich konstruksjon (10.03.14):  
<http://content.answcdn.com/main/content/img/McGrawHill/Aviation/f0563-02.gif>
109. Hodeskalle sandwich(10.03.14):  
[http://cnx.org/content/m46281/latest/621\\_Anatomy\\_of\\_a\\_Flat\\_Bone.jpg](http://cnx.org/content/m46281/latest/621_Anatomy_of_a_Flat_Bone.jpg)
110. Friksjon (18.02.14): <http://dev.physicslab.org/img/9fc9dd3b-8fb5-42a7-a187-cbbb9917397c.gif>
111. Nasa robot(30.04.14):  
[http://www.nasa.gov/images/content/214575main\\_robot\\_rover\\_small.jpg](http://www.nasa.gov/images/content/214575main_robot_rover_small.jpg)
112. Konisk rullelager (10.03.14): [http://www.omtbearing.com/wp-content/uploads/2011/03/IMG\\_05.jpeg](http://www.omtbearing.com/wp-content/uploads/2011/03/IMG_05.jpeg)
113. Rullelagerberegningformer (25.03.14):  
[http://www.nskamericas.com/cps/rde/xbcr/na\\_en/Selection\\_of\\_Bearing\\_Size.pdf](http://www.nskamericas.com/cps/rde/xbcr/na_en/Selection_of_Bearing_Size.pdf)
114. SKFkulelager (24.03.14): <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/roller-bearings/tapered-roller-bearings/single-row/index.html?prodid=1310000206>
115. NMBU logo (08.02.14): [http://www.lifesciences.no/img\\_cache/half/18336.jpg](http://www.lifesciences.no/img_cache/half/18336.jpg)



## 9 Vedlegg

- Refleksjonsnotat
- Arbeidstegninger 26 stk
- ANSYS APDL script. 4stk tekstdokumenter
- Materialdata automatstål
- Forslag til endring av design av aksling. Forspenningsdel.



## Refleksjonsnotat

Gjennom studietiden har jeg hatt et mål om å konstruere en fysisk modell i løpet av perioden masteroppgaven skulle skrives. Om ikke annet har jeg nådd dette målet. I de siste semestrene har en ny verden av teknologi åpnet seg for meg. Sammenhengen mellom maskin og automasjon. NMBU tilbyr til dags dato bare innføringsemner om automasjon. Masteroppgaven har vært en mulighet til å lære mer om forholdet mellom styringsteknikker, motorstyringer og robotteknologi.

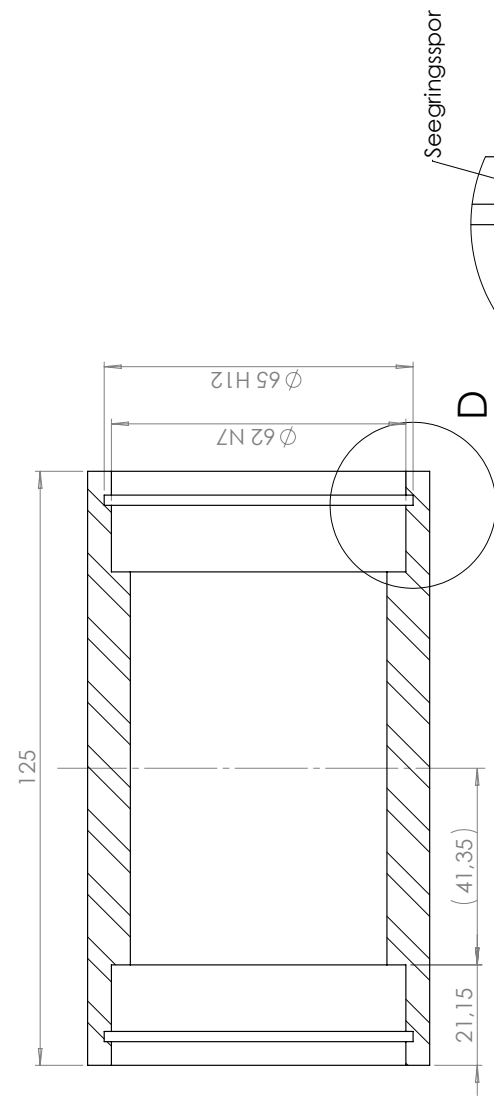
Jeg har fra januar til mai tenkt ut, diskutert, konstruert og dokumentert arbeidet bak produksjonen av en ramme. Arbeidet har både vært i gruppe og alene på lesesalen. Det er brukt mye dataverktøy for å nå målet, alt fra informasjonsinnhenting til simuleringer av modeller.

Masterarbeidet mitt er en av flere oppgaver som er gjort i forbindelse med et forskningsprosjekt. Vi valgte å skrive oppgavene uavhengige av hverandre, men jeg har vært avhengig av valg de andre har gjort. For eksempel ble ikke hjulene kjøpt inn før siste måneden, etter at deler var produsert. Det har derfor vært nødvendig å gjøre om mitt arbeidet flere ganger noe som er tidskrevende.

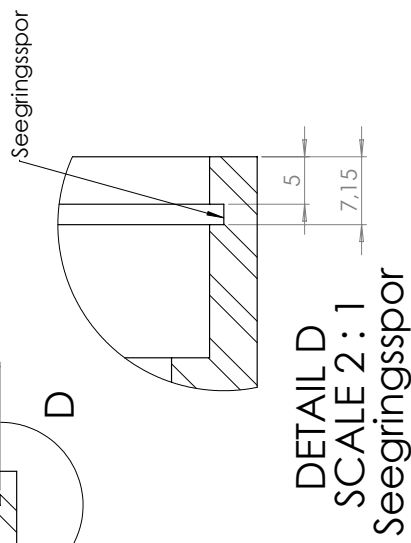
Alt i alt er jeg fornøyd med oppgaveskrivingen og ikke minst konstruksjonen vi har bygget. Oppgaven ble ferdig i tide og rammen ble produsert.

Skulle jeg gjort alt arbeidet på nytt, ville jeg startet tidligere med tegningen av rammen og skrivingen av teorikapittelet. Ideer kommer ikke løpende og gode ideer dukker som regel opp når det er for sent. Så selve konseptet kunne ikke fremskyndes, men mye annet på oppgaven kunne vært skrevet ved et tidligere tidspunkt.

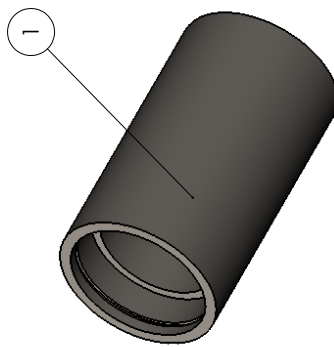
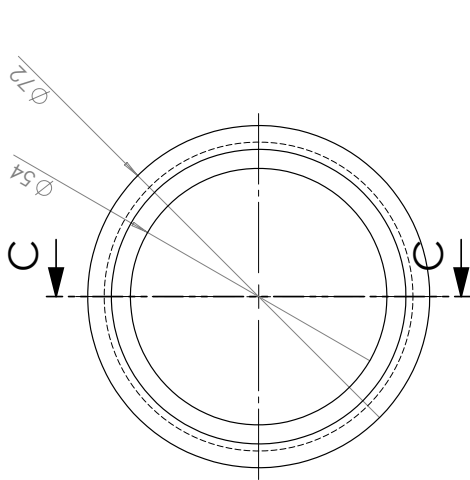
|                                 |   |              |                                       |               |
|---------------------------------|---|--------------|---------------------------------------|---------------|
| 1                               | 1 | Kulelagerhus | AISI 1010<br>Steel, hot<br>rolled bar | 1500          |
| Pos./Ant./Tittel/benevning/dim. |   | Materiale    | Vekt                                  | Art. nr./ref. |



SECTION C-C



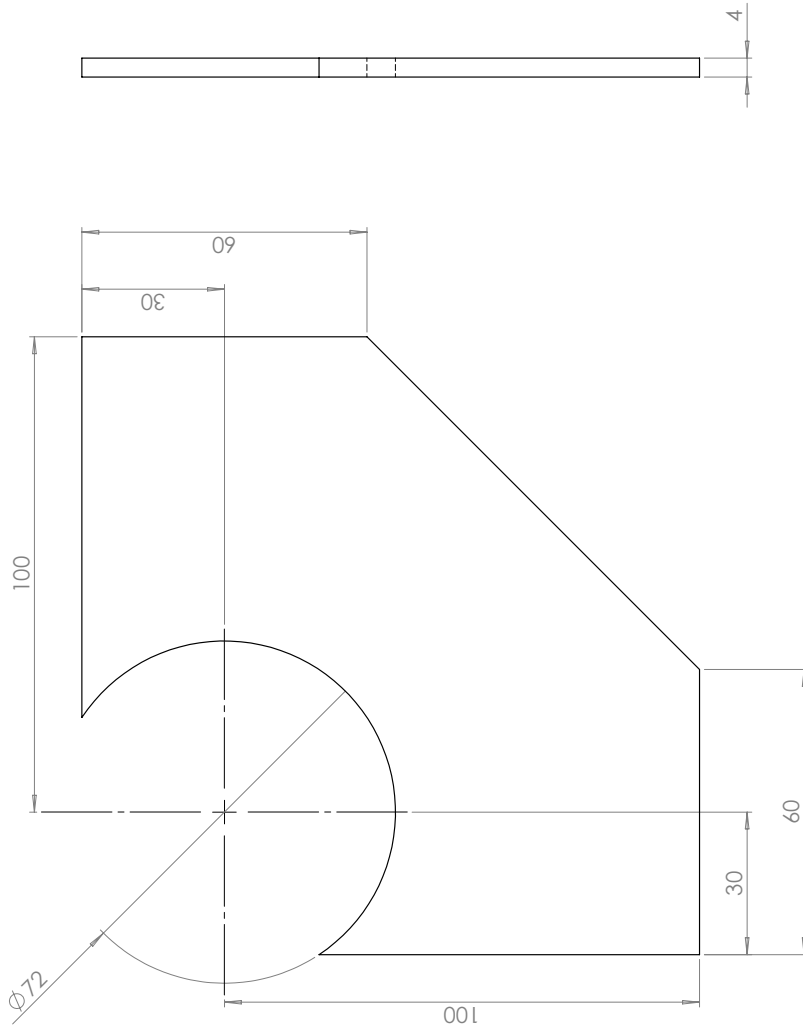
DETAIL D  
SCALE 2 : 1  
Seegringspor



Skala 1:2

|              |             |                 |   |            |       |                 |                  |            |            |  |  |
|--------------|-------------|-----------------|---|------------|-------|-----------------|------------------|------------|------------|--|--|
| Dato:        | 2. mai 2014 | Konstr./Tegner: | Fredrik Blomberg                          | Målestokk: | 1:1   | Konstr./Tegner: | Fredrik Blomberg | Målestokk: | 1:1        | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |  |
| T.klasse     |             | Beskr.          | 0,5-3                                     | >3-6       | >6-30 | >30-120         | >120-400         | >400-1000  | >1000-2000 | >2000-4000                                     |  |
| f            | fin         | +0,05           | +0,1                                      | +0,15      | +0,2  | +0,3            | +0,5             | +0,8       | +1,2       | +2   |  |
| m            | middles     | +0,1            | +0,2                                      | +0,3       | +0,5  | +0,8            | +1,2             | +2         | +3         | +4   |  |
| c            | grov        | +0,2            | +0,3                                      | +0,5       | +0,8  | +1,2            | +2,5             | +4         | +6         | +8   |  |
| v            | meget grov  | -               | +0,5                                      | +1         | +1,5  | +2,5            | +4               | +6         | +8         | +8   |  |
| Toleranse:   |             | c               | Materiale AISI 1010 Steel, hot rolled bar |            |       |                 |                  |            |            |  |  |
| Kulelagerhus |             | Tegn.nr         |   | A 3        |       | Ark             |                  | /          |            | /  |  |

|           |                       |                |          |               |
|-----------|-----------------------|----------------|----------|---------------|
| 1         | 1                     | Festeplate_ror | AISI 304 | 341           |
| Pos./Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale      | Vekt     | Art. nr./ref. |

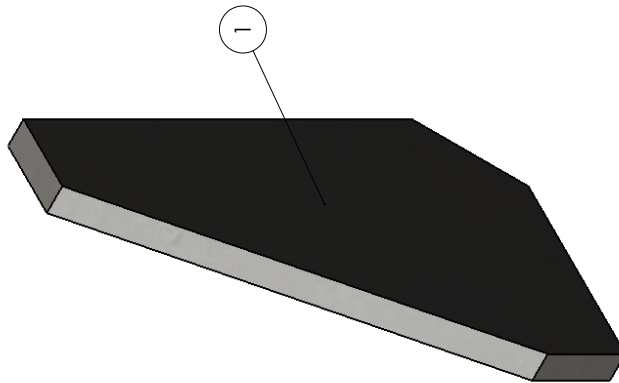
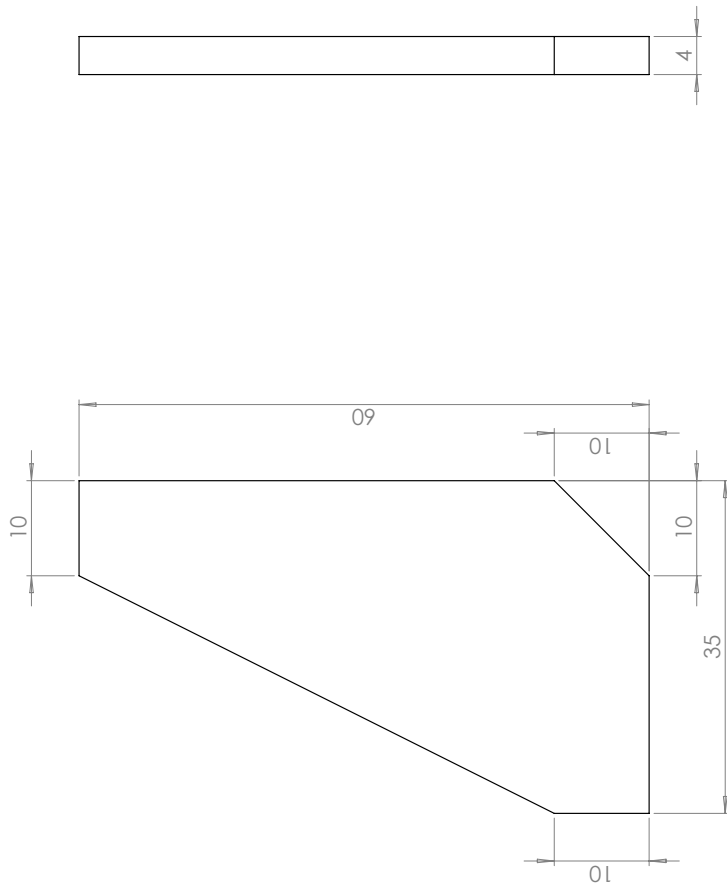


Skala 1:2

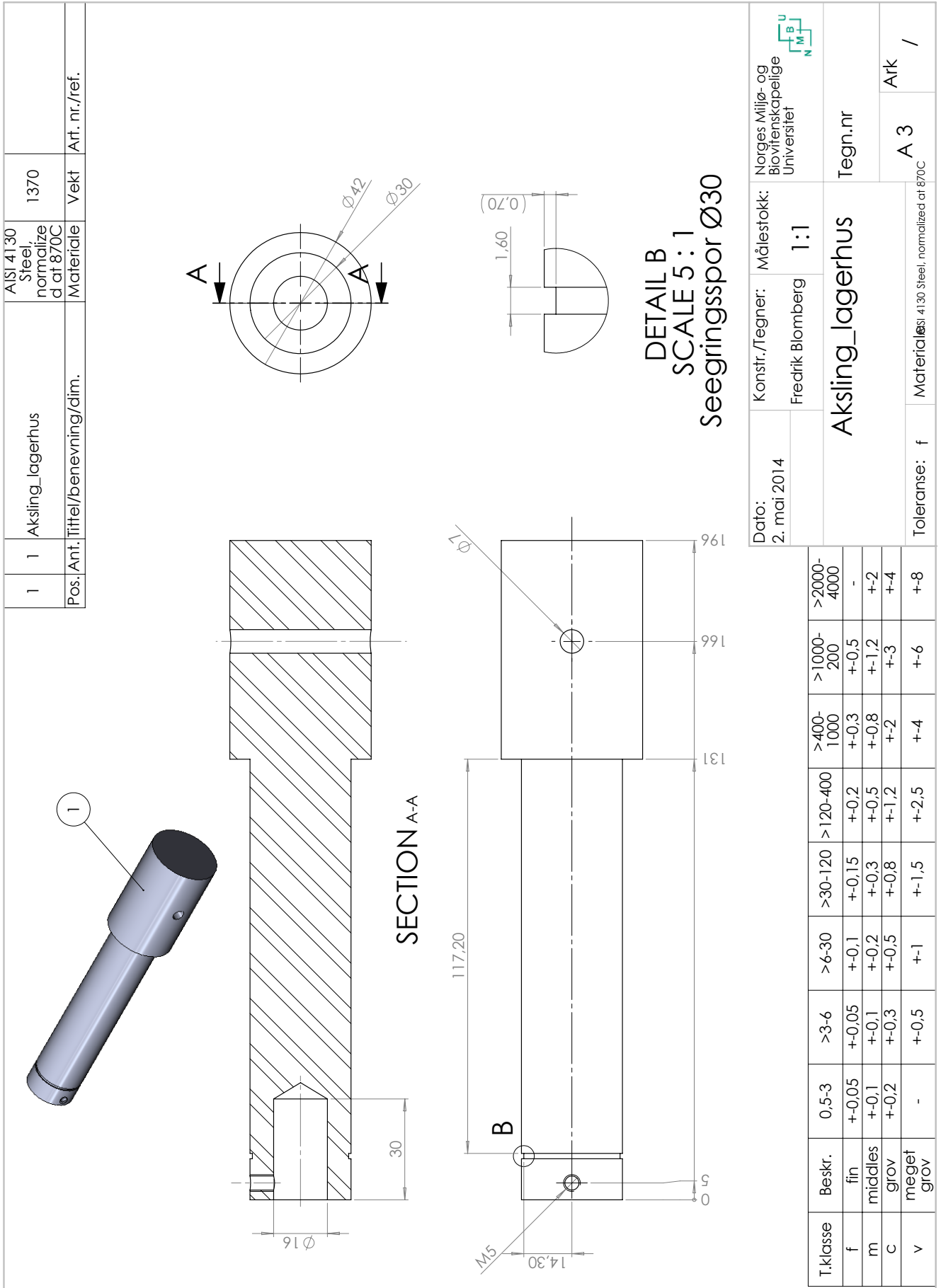
|                |                  |            |            |            |
|----------------|------------------|------------|------------|------------|
| Dato:          | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Tegn.nr    |            |
| 2. mai 2014    | Fredrik Blomberg | 1:1        | A 3 /      |            |
| Festeplate_ror |                  |            | Ark /      |            |
| Toleranse: C   |                  |            | AISI 304   |            |
| T.klasse       | Beskr.           | 0,5-3      | >1000-4000 | >2000-4000 |
| f              | fin              | +0,05      | >1000-200  | +          |
| m              | middles          | +0,1       | +0,3       | +0,5       |
| c              | grov             | +0,2       | +0,8       | +1,2       |
| v              | meget grov       | -          | +2         | +4         |
|                |                  |            | +3         | +4         |
|                |                  |            | +4         | +8         |



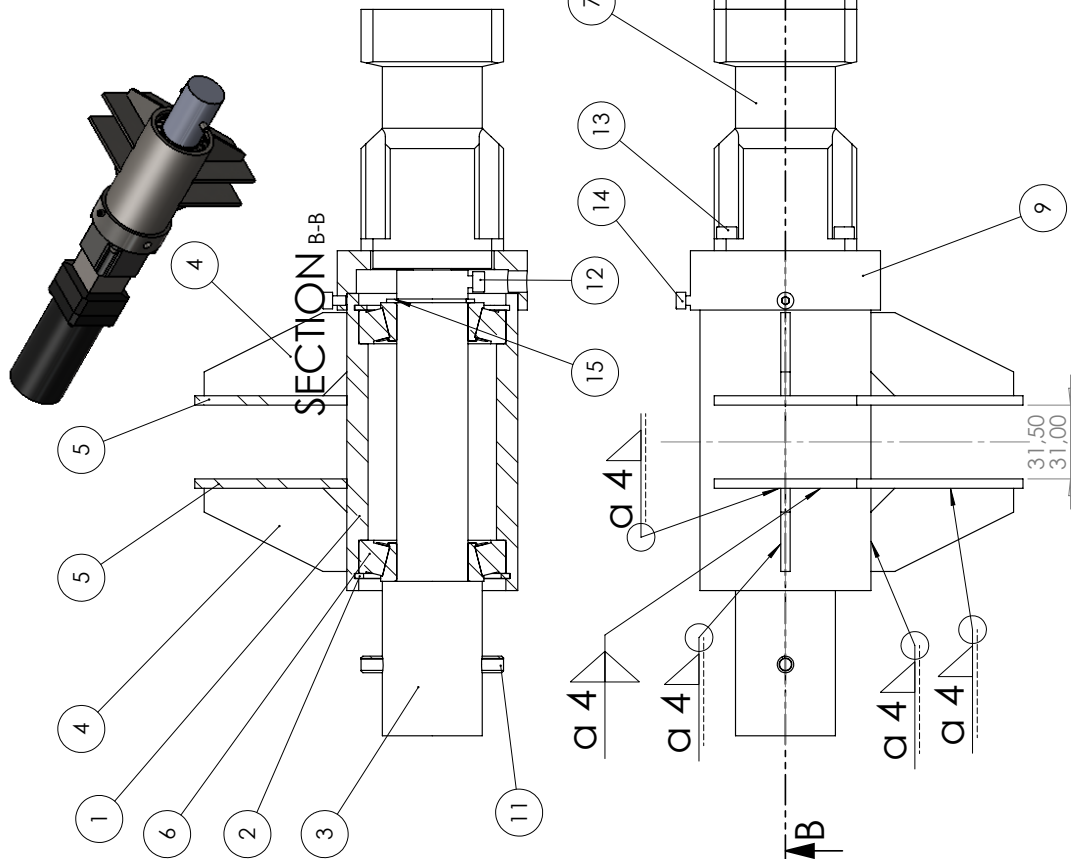
|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Støttevinkel          | AISI 304  | 46            |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



|              |            |                     |            |  |         |          |           |            |            |
|--------------|------------|---------------------|------------|--|---------|----------|-----------|------------|------------|
| Dato:        |            | Konstr./Tegner:     | Målestokk: | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |         |          |           |            |            |
| 2. mai 2014  |            | Fredrik Blomberg    | 2:1        | Tegn.nr  |         |          |           |            |            |
|              |            | <b>Støttevinkel</b> |            | A 3  |         |          |           |            |            |
|              |            |                     |            | Ark /  |         |          |           |            |            |
| Toleranse: C |            | Materiale           |            | AISI 304                                       |         |          |           |            |            |
| T.klasse     | Beskr.     | 0,5-3               | >3-6       | >6-30  | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
| f            | fin        | +0,05               | +0,05      | +0,1   | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5       | -          |
| m            | middles    | +0,1                | +0,1       | +0,2   | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c            | grov       | +0,2                | +0,3       | +0,5   | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v            | meget grov | -                   | +0,5       | +1   | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |



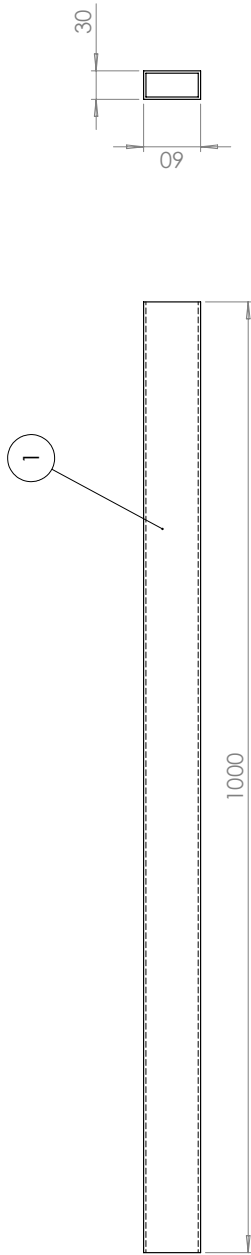
|           |   |                            |   |      |               |
|-----------|---|----------------------------|---|------|---------------|
| 15        | 1 | Circlip DIN 471 - 30 x 1.5 |   |      |               |
| 14        | 2 | ISO 4762 M4 x 6 --- 6N     |   |      |               |
| 13        | 4 | ISO 4762 M5 x 16 --- 16N   |   |      |               |
| 12        | 1 | ISO 4762 M5 x 12 --- 12N   |   |      |               |
| 11        | 1 | Press_sikring              | AISI 304                                      | 9    |               |
| 9         | 1 | Servogirfestering          | AISI 304                                      | 374  |               |
| 8         | 1 | Servomotor                 | AISI 304                                      | 3051 |               |
| 7         | 1 | Servogir                   | AISI 304                                      | 2473 |               |
| 6         | 2 | SKF - 30206 - 16,DE,NC, 16 |   |      |               |
| 5         | 2 | Festeplate_ror             | AISI 304                                      | 341  |               |
| 4         | 4 | Støttevinkel               | AISI 304                                      | 46   |               |
| 3         | 1 | Aksling_lagerhus           | AISI 4130<br>Steel,<br>normalize<br>d at 870C | 1370 |               |
| 2         | 2 | Truarc N5000-244 - S2.44   |   |      |               |
| 1         | 1 | Kulelagerhus               | AISI 1010<br>Steel, hot<br>rolled bar         | 1500 |               |
| Pos./Ant. |   | Titel/benevning/dim.       | Materiale                                     | Vekt | Art. nr./ref. |



|                                |                  |            |  |
|--------------------------------|------------------|------------|--|
| Dato:                          | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Norges Miljø- og<br>Biovitenskapelige<br>Universitet |
| 2. mai 2014                    | Fredrik Blomberg | 1:2        |  |
| <b>Kulelagersammenstilling</b> |                  |            |  |
| eggn.nr                        |                  |            |  |
| Toleranse: c                   |                  | Material   |  |
| A 3                            |                  | Ark /      |  |

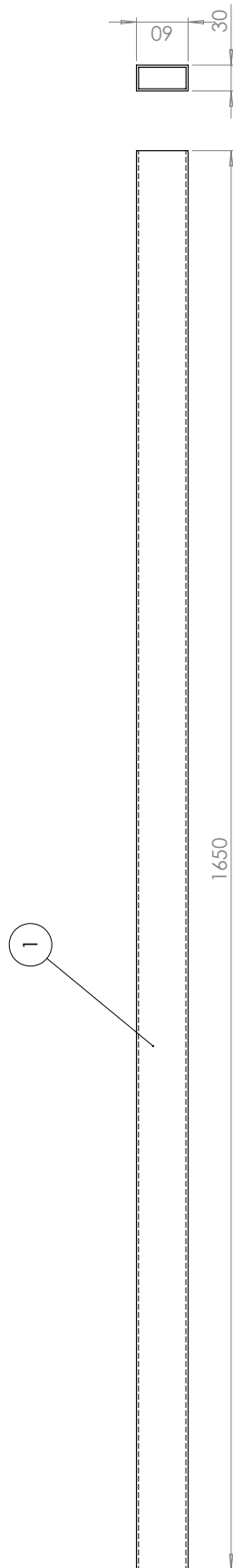
| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6 | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,1 | +0,15 | +0,2    | +0,3     | +0,5      | +0,8       | +1,2       |
| m        | middles    | +0,1  | +0,2 | +0,3  | +0,5    | +0,8     | +1,2      | +2         | +4         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3 | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +4         | +8         |
| v        | meget grov | -     | +0,5 | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | F_ror_60x30x2,5_1100  | 6063-16   | 1148          |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



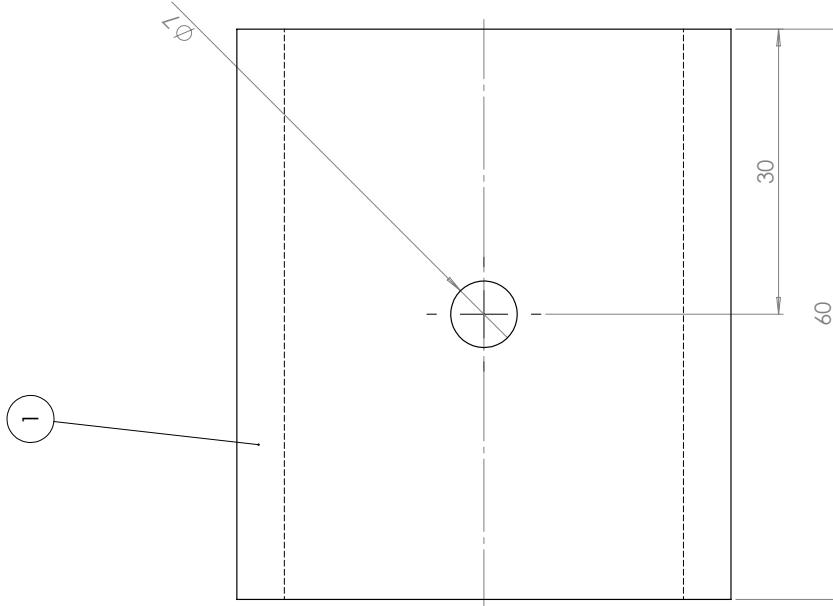
|             |            |                      |            |  |         |          |           |           |            |
|-------------|------------|----------------------|------------|--|---------|----------|-----------|-----------|------------|
| Dato:       |            | Konstr./Tegner:      | Målestokk: | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |         |          |           |           |            |
| 2. mai 2014 |            | Fredrik Blomberg     | 1:5        | Universitetet                                  |         |          |           |           |            |
|             |            | F_ror_60x30x2,5_1100 |            | Tegn.nr  |         |          |           |           |            |
|             |            |                      |            | A 3  |         |          |           |           |            |
|             |            |                      |            | /  |         |          |           |           |            |
| Toleranse:  |            | C                    | Materiale  | 6063-16  |         |          |           |           |            |
| T.klasse    | Beskr.     | 0,5-3                | >3-6       | >6-30  | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-200 | >2000-4000 |
| f           | fin        | +0,05                | +0,1       | +0,1   | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5      | -          |
| m           | middles    | +0,1                 | +0,2       | +0,2   | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2      | +2         |
| c           | grov       | +0,2                 | +0,3       | +0,5   | +0,8    | +1,2     | +2        | +3        | +4         |
| v           | meget grov | -                    | +0,5       | +1   | +1,5    | +2,5     | +4        | +6        | +8         |

|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | F_ror_60x30x2,5_1700  | 6063-16   | 1893          |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



|              |            |                  |       |            |         |  |           |            |            |
|--------------|------------|------------------|-------|------------|---------|--|-----------|------------|------------|
| Dato:        |            | Konstr./Tegner:  |       | Målestokk: |         | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |           |            |            |
| 2. mai 2014  |            | Fredrik Blomberg |       | 1:5        |         | F_ror_60x30x2,5_1700 Tegn.nr                   |           |            |            |
|              |            |                  |       |            |         | A 3 Ark /                                      |           |            |            |
| Toleranse: C |            | Material         |       | 6063-16    |         |  |           |            |            |
| T.klasse     | Beskr.     | 0,5-3            | >3-6  | >6-30      | >30-120 | >120-400                                       | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
| f            | fin        | +0,05            | +0,05 | +0,1       | +0,15   | +0,2   | +0,3      | +0,5       | -          |
| m            | middle     | +0,1             | +0,1  | +0,2       | +0,3    | +0,5   | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c            | grov       | +0,2             | +0,3  | +0,5       | +0,8    | +1,2   | +2        | +3         | +4         |
| v            | meget grov | -                | +0,5  | +1         | +1,5    | +2,5   | +4        | +6         | +8         |

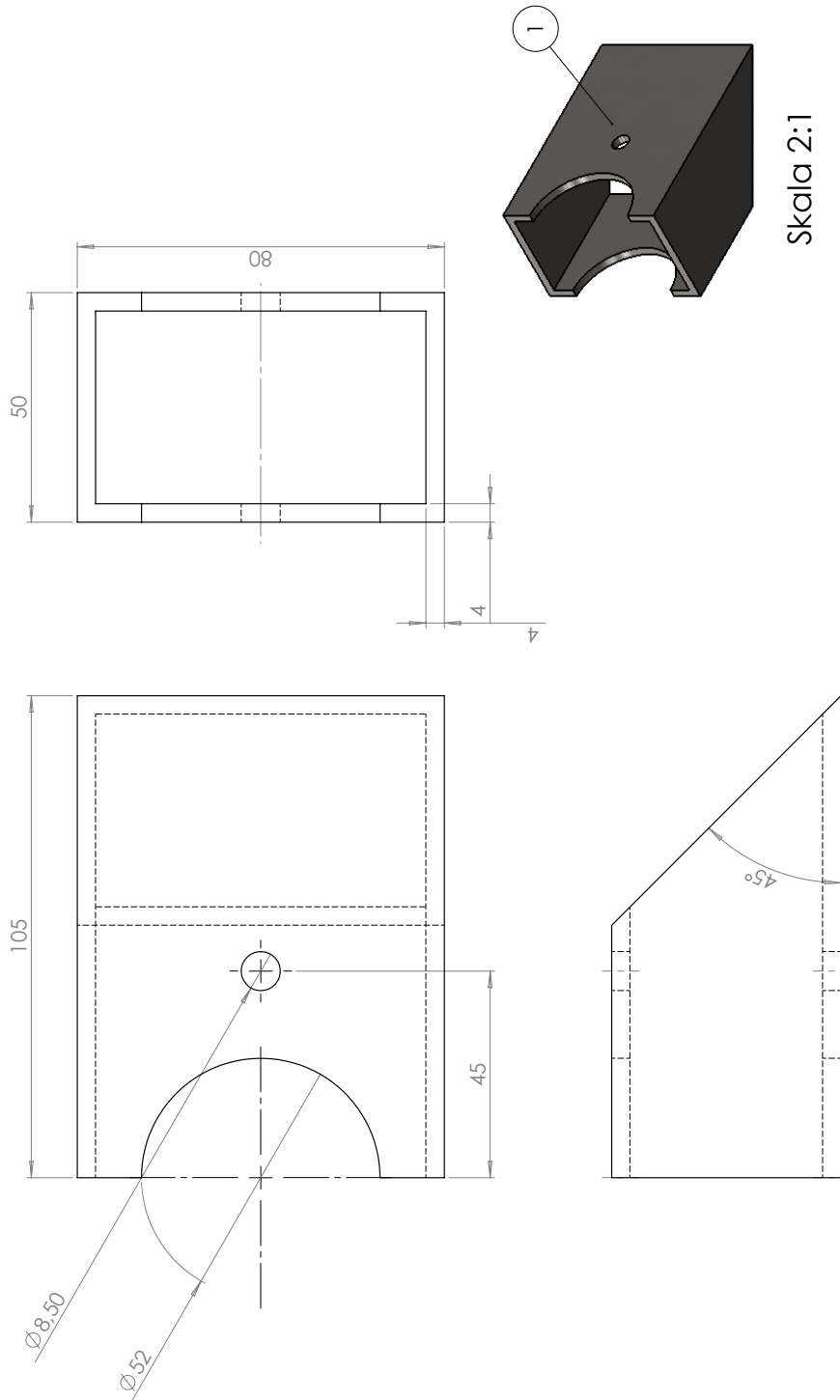
|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Sylinderhylse_arm     | AISI 304  | 351           |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



|                   |                  |            |  |
|-------------------|------------------|------------|--|
| Dato:             | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |
| 2. mai 2014       | Fredrik Blomberg | 2:1        |  |
| Sylinderhylse_arm |                  |            | Tegn.nr  |
| Toleranse: f      | Materiale        | A 3 Ark /  |  |
|                   |                  | AISI 304   |  |

| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6 | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,1 | +0,15 | +0,2    | +0,3     | +0,5      | -          | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,2 | +0,3  | +0,5    | +0,8     | +1,2      | +2         | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3 | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5 | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

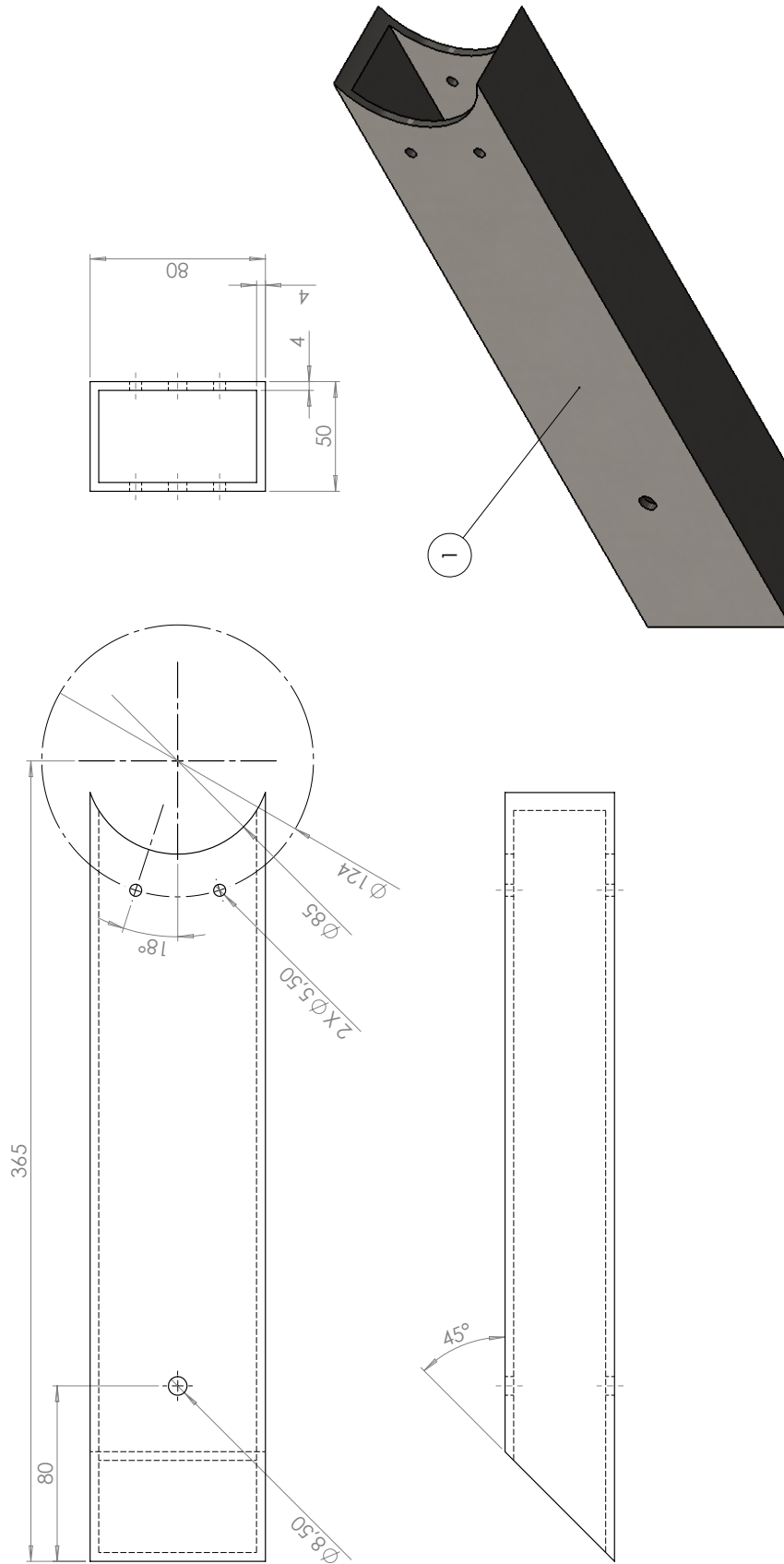
|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Ror_55_topp           | AISI 304  | 553           |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



Skala 2:1

|              |                  |            |  |       |         |          |           |            |            |
|--------------|------------------|------------|--|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| Dato:        | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |       |         |          |           |            |            |
| 2. mai 2014  | Fredrik Blomberg | 1:1        | Tegn.nr  |       |         |          |           |            |            |
| Ror_55_topp  |                  |            | A 3  | Ark / |         |          |           |            |            |
| Toleranse: C |                  |            | AISI 304                                       |       |         |          |           |            |            |
| T.klasse     | Beskr.           | 0,5-3      | >3-6   | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
| f            | fin              | +0,05      | +0,05  | +0,1  | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5       | -          |
| m            | middles          | +0,1       | +0,1   | +0,2  | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c            | grov             | +0,2       | +0,3   | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v            | meget grov       | -          | +0,5   | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

|           |                       |             |           |               |
|-----------|-----------------------|-------------|-----------|---------------|
| 1         | 1                     | Ror_55_nede | AIISI 304 | 2419          |
| Pos./Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale   | Vekt      | Art. nr./ref. |

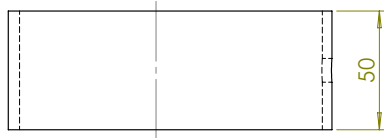
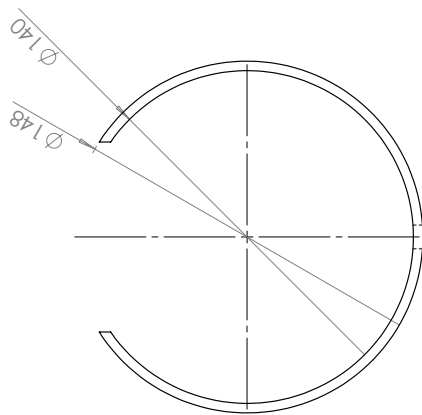


|                    |                  |            |         |
|--------------------|------------------|------------|---------|
| Dato:              | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Tegn.nr |
| 2. mai 2014        | Fredrik Blomberg | 1:2        |         |
| Ror_55_nede        |                  |            | A 3     |
| Material: C        |                  |            |         |
| Toleranse: C       |                  |            | /       |
| Material: AISI 304 |                  |            |         |

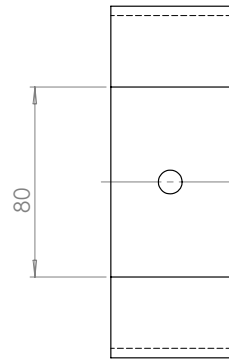
| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6 | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,1 | +0,15 | +0,2    | +0,3     | +0,5      | -          | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,2 | +0,3  | +0,5    | +0,8     | +1,2      | +2         | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3 | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +3        | +4         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5 | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |



|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Forsterkelsesring     | AISI 304  | 586           |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |

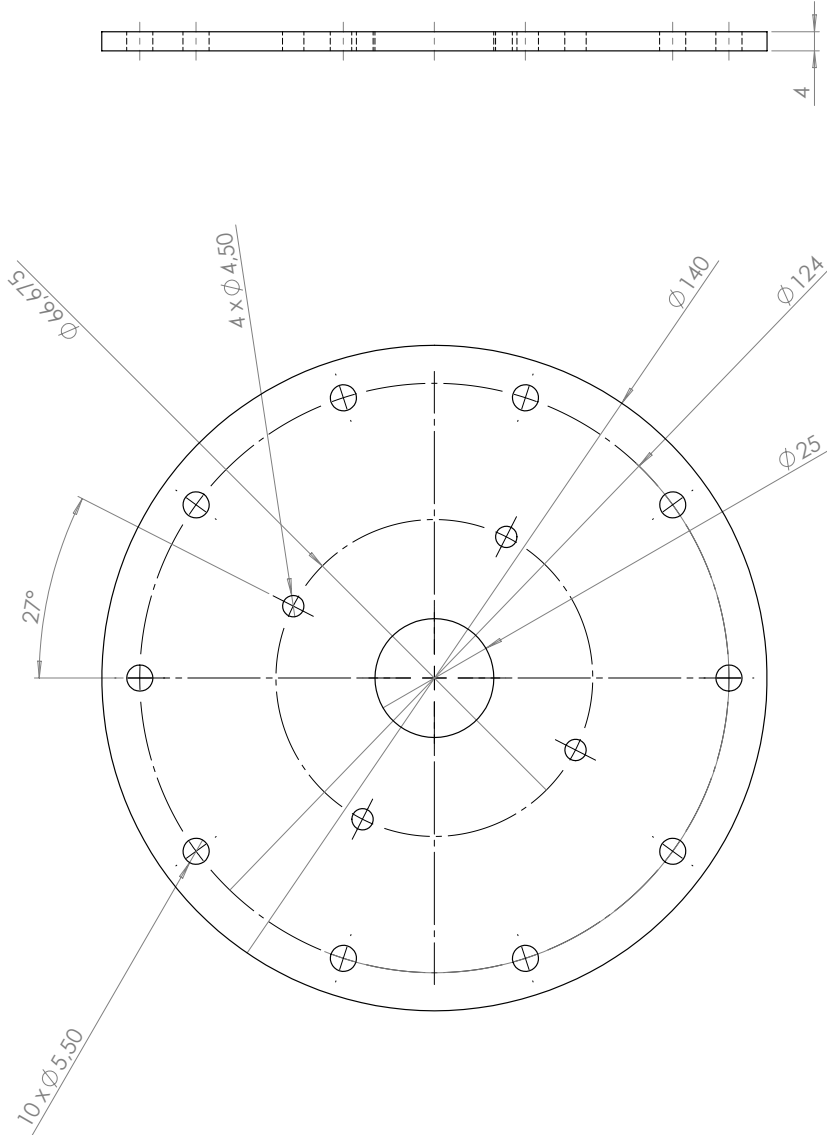


Lages av en 4 mm plate. Rulles til sirkulær form.



|                   |            |                  |       |            |          |  |            |            |  |
|-------------------|------------|------------------|-------|------------|----------|--|------------|------------|--|
| Dato:             |            | Konstr./Tegner:  |       | Målestokk: |          | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |            |            |  |
| 2. mai 2014       |            | Fredrik Blomberg |       | 1:2        |          | Tegn.nr  |            |            |  |
| Forsterkelsesring |            |                  |       | AISI 304   |          | A 3  |            |            |  |
|                   |            |                  |       |            |          | Ark /  |            |            |  |
| T.klasse          | Beskr.     | >3-6             | >6-30 | >30-120    | >120-400 | >400-1000                                      | >1000-2000 | >2000-4000 |  |
| f                 | fin        | +0,05            | +0,1  | +0,15      | +0,2     | +0,3   | +0,5       | -          |  |
| m                 | middles    | +0,1             | +0,2  | +0,3       | +0,5     | +0,8   | +1,2       | +2         |  |
| c                 | grov       | +0,2             | +0,5  | +0,8       | +1,2     | +2   | +3         | +4         |  |
| v                 | meget grov | -                | +1    | +1,5       | +2,5     | +4   | +6         | +8         |  |
| Toleranse: C      |            | Material         |       | Material   |          | Material                                       |            | Material   |  |

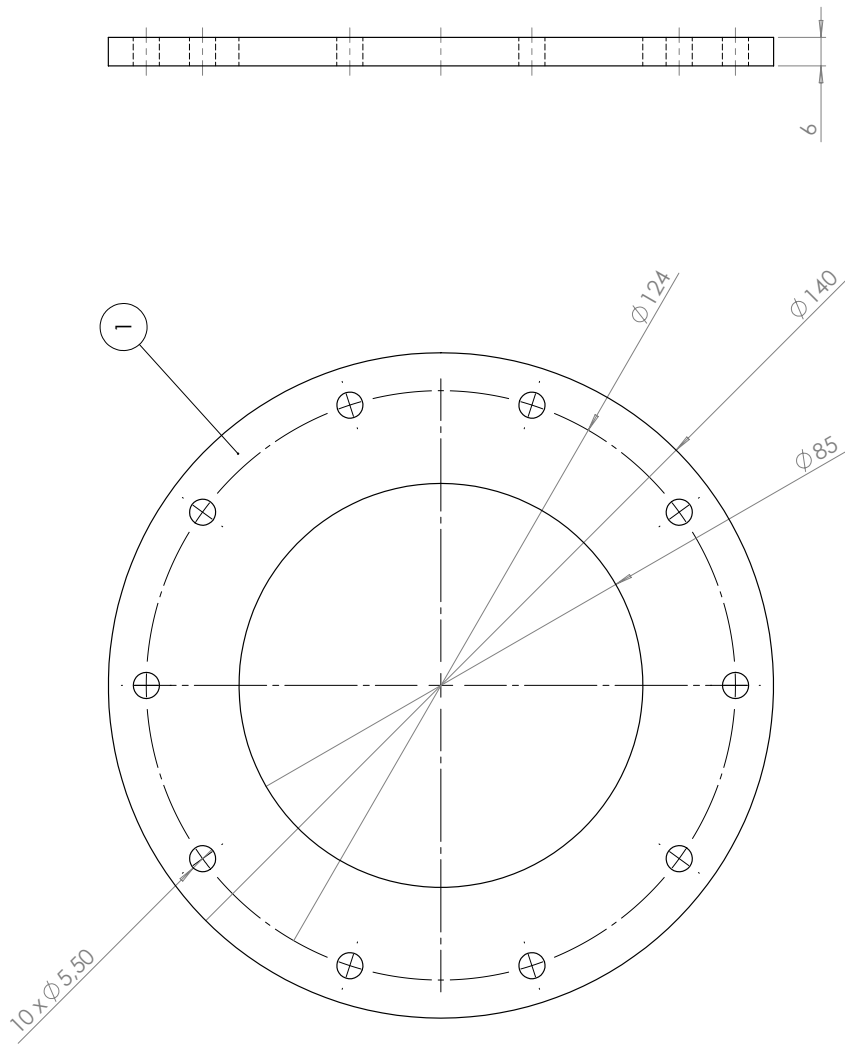
|      |      |                        |           |               |
|------|------|------------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Girfestering_Motorside | AISI 304  | 467           |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim.  | Materiale | Vekt          |
|      |      |                        |           | Art. nr./ref. |



|                               |                  |            |  |
|-------------------------------|------------------|------------|--|
| Dato:                         | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |
| 2. mai 2014                   | Fredrik Blomberg | 1:1        |  |
| <b>Girfestering_Motorside</b> |                  |            | Tegn.nr  |
|                               |                  |            |  |
| Toleranse:                    |                  | Materiale  | AISI 304                                       |
| m                             |                  |            | /  |

| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6 | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,1 | +0,15 | +0,2    | +0,3     | +0,5      | -          | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,2 | +0,3  | +0,5    | +0,8     | +1,2      | +2         | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3 | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +3        | +4         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5 | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

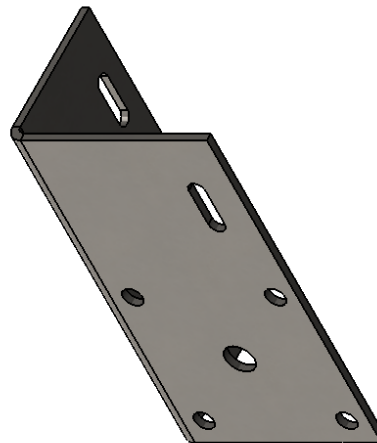
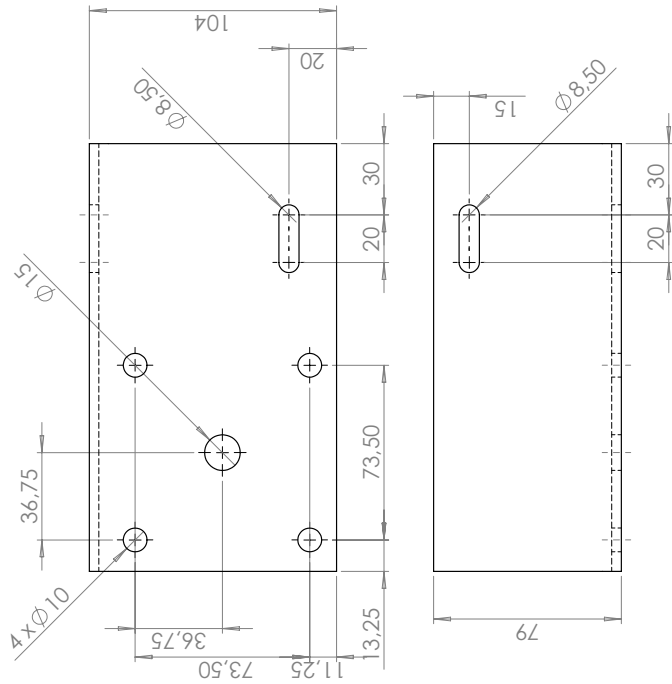
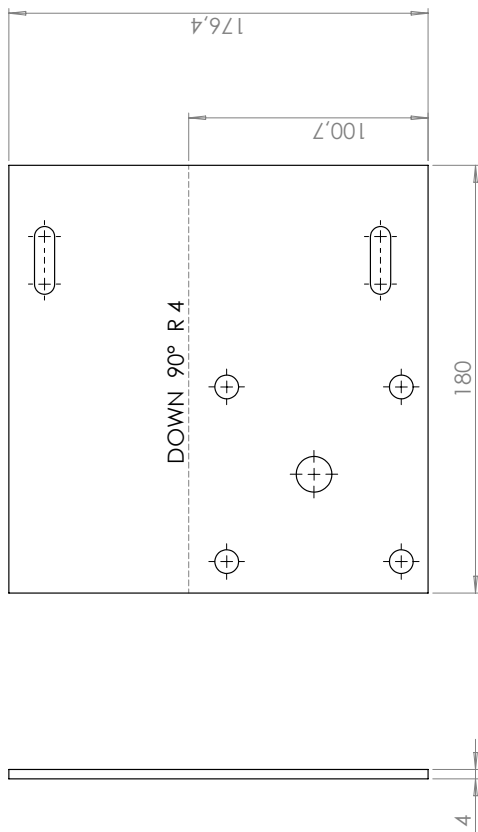
|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Girfestering_hjulsida | AISI 304  | 455           |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



|                       |                  |            |  |
|-----------------------|------------------|------------|--|
| Dato:                 | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Norges Miljø- og<br>Biovitenskapelige<br>Universitet |
| 2. mai 2014           | Fredrik Blomberg | 1:1        |  |
| Girfestering_hjulsida |                  |            | Tegn.nr  |
| Toleranse: m          |                  |            | Ark /  |
| Materialie            |                  |            | A 3  |
|                       |                  |            | AISI 304   |

|          |            |       |       |       |         |          |           |           |            |
|----------|------------|-------|-------|-------|---------|----------|-----------|-----------|------------|
| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6  | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-200 | >2000-4000 |
| f        | fin        | +0,05 | +0,05 | +0,1  | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5      | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,1  | +0,2  | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2      | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3  | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3        | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5  | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6        | +8         |

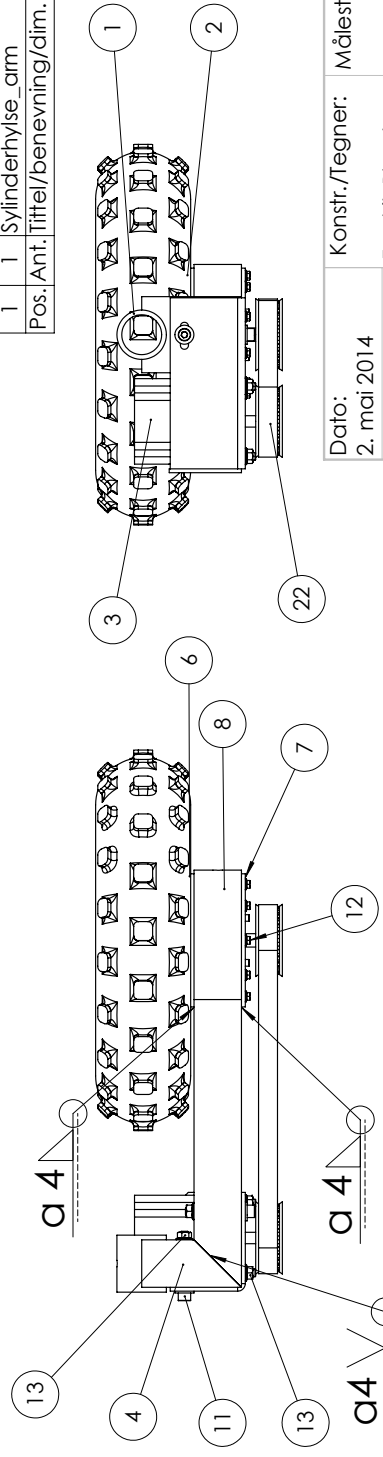
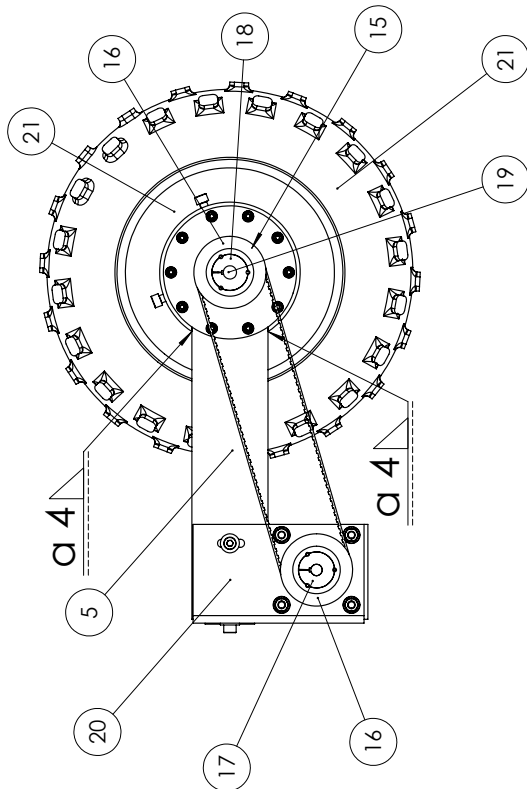
|           |                       |            |          |               |
|-----------|-----------------------|------------|----------|---------------|
| 1         | 1                     | Motorfeste | AISI 304 | 986           |
| Pos./Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale  | Vekt     | Art. nr./ref. |



|               |                  |            |          |  |
|---------------|------------------|------------|----------|--|
| Dato:         | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Tegn.nr  |  |
| 2. mai 2014   | Fredrik Blomberg | 1:2        | A 3      |  |
| Motorfeste    |                  |            | Ark /    |  |
| Toleranse: xx |                  |            | AISI 304 |  |

|          |            |       |      |       |         |          |           |            |            |
|----------|------------|-------|------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6 | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
| f        | fin        | +0,05 | +0,1 | +0,15 | +0,2    | +0,3     | +0,5      | +0,5       | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,2 | +0,3  | +0,5    | +0,8     | +1,2      | +1,2       | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3 | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5 | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

|      |      |  |                                  |
|------|------|--|----------------------------------|
| 27   | 3    | ISO 4762 M10 x 35 --- 35N              |                                  |
| 26   | 2    | ISO 4762 M8 x 35 --- 35N               |                                  |
| 25   | 8    | ISO 4762 M4 x 8 --- 8N                 |                                  |
| 24   | 1    | Lokk_girkasse                          | AISI 304 95                      |
| 23   | 1    | Hjulfesting                            | AISI 304 997                     |
| 22   | 1    | Belte                                  | AISI 304 333                     |
| 21   | 1    | Traktorhjul                            | Air 8                            |
| 20   | 1    | Motorfeste_venstre                     |                                  |
| 19   | 1    | Aksling_tannreimshjul                  | AISI 304 86                      |
| 18   | 1    | TB1108-14                              | 20                               |
| 17   | 1    | TB1108-12                              | 21                               |
| 16   | 2    | PHP_28-8M_20TB                         | AISI 304 581                     |
| 15   | 4    | ISO 4762 M4 x 20 --- 20N               |                                  |
| 14   | 2    | ISO 10669-8.8-N                        |                                  |
| 13   | 6    | Hexagon Flange Nut ISO - 4161 - M8 - N |                                  |
| 12   | 10   | Hexagon Flange Nut ISO - 4161 - M5 - C |                                  |
| 8    | 1    | Forsterkelsesring                      | AISI 304 586                     |
| 7    | 1    | Girfesting_Motorside                   | AISI 304 467                     |
| 6    | 1    | Girfesting_hjulside                    | AISI 304 455                     |
| 5    | 1    | Ror_55_nede                            | AISI 304 2419                    |
| 4    | 1    | Ror_55_topp                            | AISI 304 553                     |
| 3    | 1    | BL821_motor                            | AISI 1045 Steel, cold drawn 6388 |
| 2    | 1    | AL110-P2-60                            | AISI 304 4300                    |
| 1    | 1    | Sylinderhylse_arm                      | AISI 304 351                     |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim.                  | Materiale Vekt                   |



|              |             |                 |                  |            |     |  |  |
|--------------|-------------|-----------------|------------------|------------|-----|--|--|
| Dato:        | 2. mai 2014 | Konstr./Tegner: | Fredrik Blomberg | Målestokk: | 1:5 | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |  |
| U_arm        |             |                 |                  |            |     | Tegn.nr  |  |
| Toleranse: C |             |                 |                  |            |     | Ark /  |  |
| Materialer   |             |                 |                  |            |     | A 3  |  |

| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6 | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,1 | +0,1  | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5       | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,2 | +0,2  | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3 | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5 | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

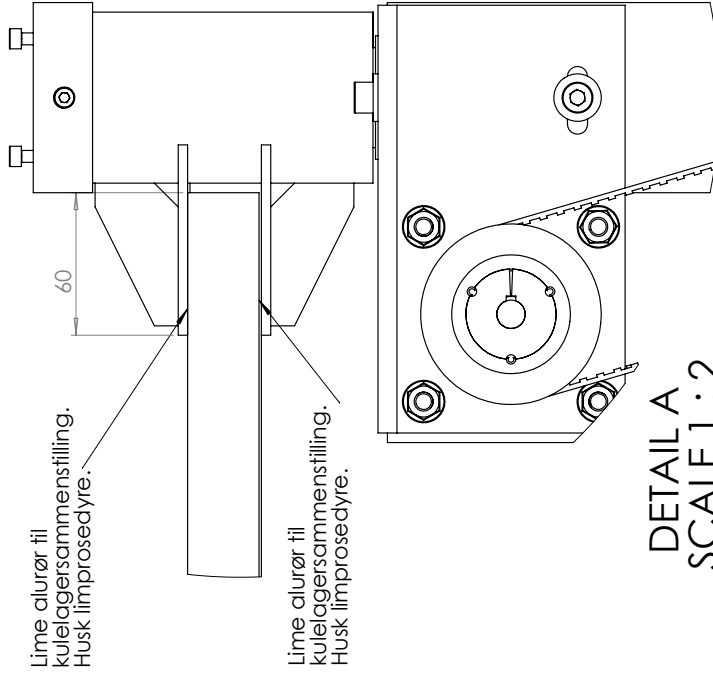
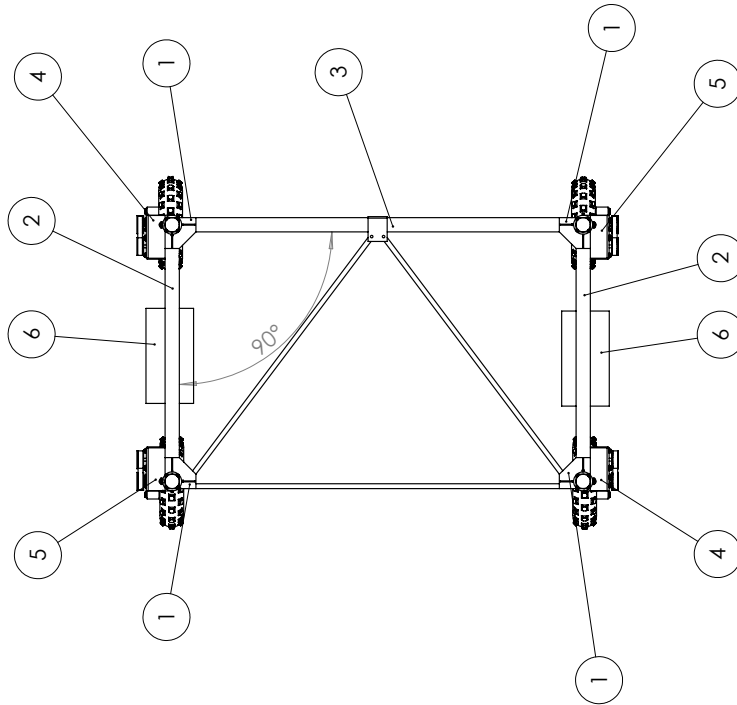
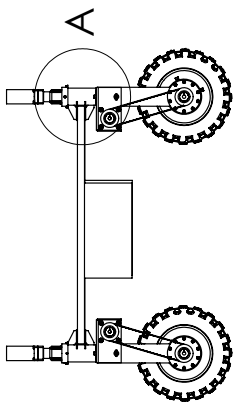
|      |      |  |                                      |      |
|------|------|--|--------------------------------------|------|
| 27   | 3    | ISO 4762 M10 x 35 --- 35N              |                                      |      |
| 26   | 2    | ISO 4762 M8 x 35 --- 35N               |                                      |      |
| 25   | 8    | ISO 4762 M4 x 8 --- 8N                 |                                      |      |
| 24   | 1    | Lokk_girkasse                          | AISI 304                             | 95   |
| 23   | 1    | Hjulfestering                          | AISI 304                             | 997  |
| 22   | 1    | Belte                                  | AISI 304                             | 333  |
| 21   | 1    | Traktorhjul                            | Air                                  | 8    |
| 20   | 1    | Motorfeste_venstre                     |                                      |      |
| 19   | 1    | Aksling_tannreimshjul                  | AISI 304                             | 86   |
| 18   | 1    | TB1108-14                              |                                      | 20   |
| 17   | 1    | TB1108-12                              |                                      | 21   |
| 16   | 2    | PHP_28-8M_20TB                         |                                      |      |
| 15   | 4    | ISO 4762 M4 x 20 --- 20N               | AISI 304                             | 581  |
| 14   | 2    | ISO 10669-8.8-N                        |                                      |      |
| 13   | 6    | Hexagon Flange Nut ISO - 4161 - M8 - N |                                      |      |
| 12   | 10   | Hexagon Flange Nut ISO - 4161 - M5 - C |                                      |      |
| 11   | 2    | ISO 4762 M8 x 65 --- 28N               |                                      |      |
| 10   | 4    | ISO 4762 M8 x 25 --- 25C               |                                      |      |
| 9    | 10   | ISO 4762 M5 x 75 --- 22C               |                                      |      |
| 8    | 1    | Fosterkjesing                          | AISI 304                             | 586  |
| 7    | 1    | Girfestering_Motorside                 | AISI 304                             | 467  |
| 6    | 1    | Girfestering_hjulsid                   | AISI 304                             | 455  |
| 5    | 1    | Ror_55_nede                            | AISI 304                             | 2419 |
| 4    | 1    | Ror_55_topp                            | AISI 304                             | 553  |
| 3    | 1    | BL821_motor                            | AISI 1045<br>Steel,<br>cold<br>drawn | 6388 |
| 2    | 1    | AL110-P2-60                            | AISI 304                             | 4300 |
| 1    | 1    | Sylinderhylse_arm                      | AISI 304                             | 351  |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim.                  | Materiale                            | Vekt |



|              |             |                 |                   |            |     |  |
|--------------|-------------|-----------------|-------------------|------------|-----|--|
| Dato:        | 2. mai 2014 | Konstr./Tegner: | Frederik Blomberg | Målestokk: | 1:2 | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |
| U_arm        |             |                 |                   |            |     | Tegn.nr  |
| Toleranse: C |             |                 |                   |            |     | Ark /  |
| Materiale    |             |                 |                   |            |     | A 3 /  |

| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6  | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|-------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,15 | +0,1  | +0,2    | +0,3     | +0,3      | +0,5       | -          |
| m        | middle     | +0,1  | +0,3  | +0,2  | +0,5    | +0,8     | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3  | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5  | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

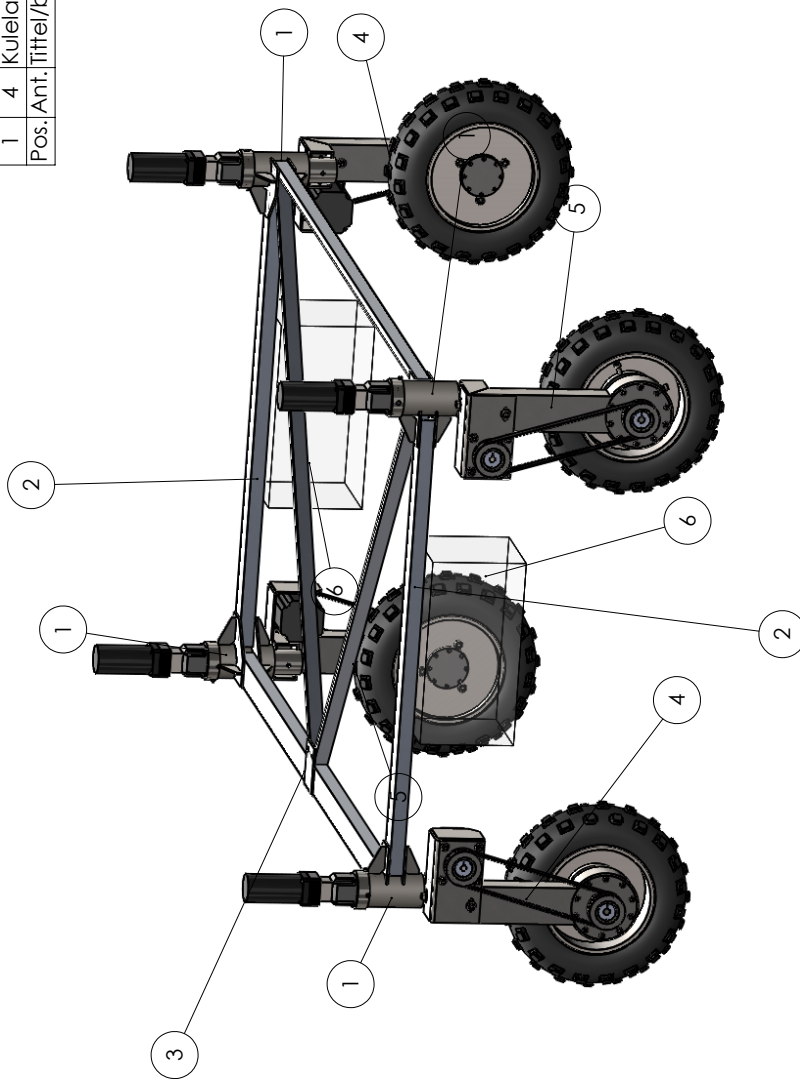
|                                 |   |                         |          |      |
|---------------------------------|---|-------------------------|----------|------|
| 9                               | 2 | F_for_30x20x2_skrac     | 6063-T6  | 643  |
| 8                               | 1 | F_for_30x20x2_1700      | 6063-T6  | 817  |
| 7                               | 1 | Feste_verktoy           | AISI 304 | 333  |
| 6                               | 2 | Batterier               | Air      | 18   |
| 5                               | 2 | U_arm                   |          |      |
| 4                               | 2 | U_arm_hoyre             |          |      |
| 3                               | 1 | F_for_60x30x2.5_1700    | 6063-T6  | 1893 |
| 2                               | 2 | F_for_60x30x2.5_1100    | 6063-T6  | 1148 |
| 1                               | 4 | Kulelagersammenstilling |          |      |
| Pos. Ant. Tittel/benevning/dim. |   | Materiale               |          | Vekt |



|                            |                  |            |  |
|----------------------------|------------------|------------|--|
| Dato:                      | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |
| 2. mai 2014                | Fredrik Blomberg | 1:20       |  |
| <b>Rammesammenstilling</b> |                  |            |  |
| Toleranse: C               |                  | Materiale  | Ark /  |

| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6  | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|-------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,05 | +0,1  | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5       | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,1  | +0,2  | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3  | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5  | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

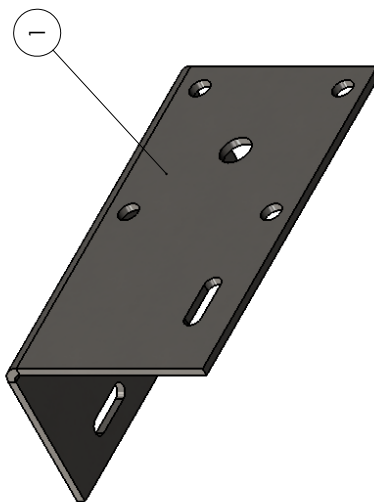
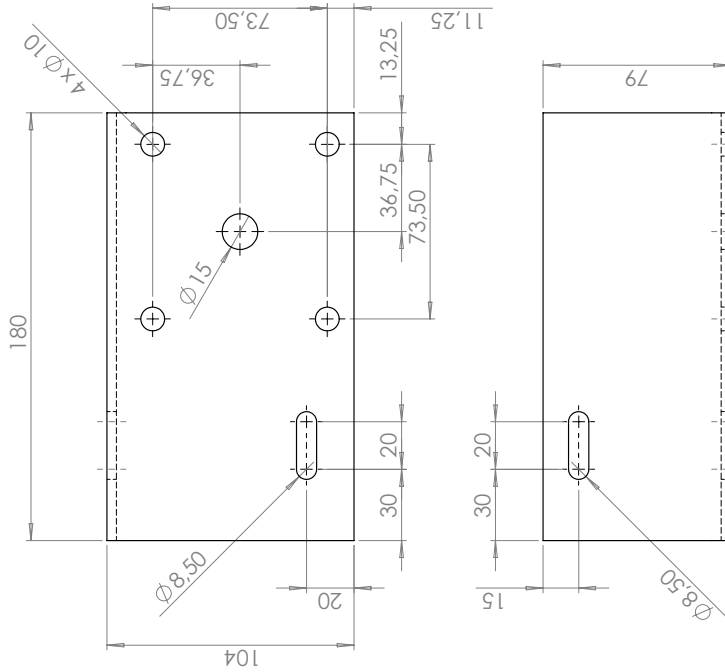
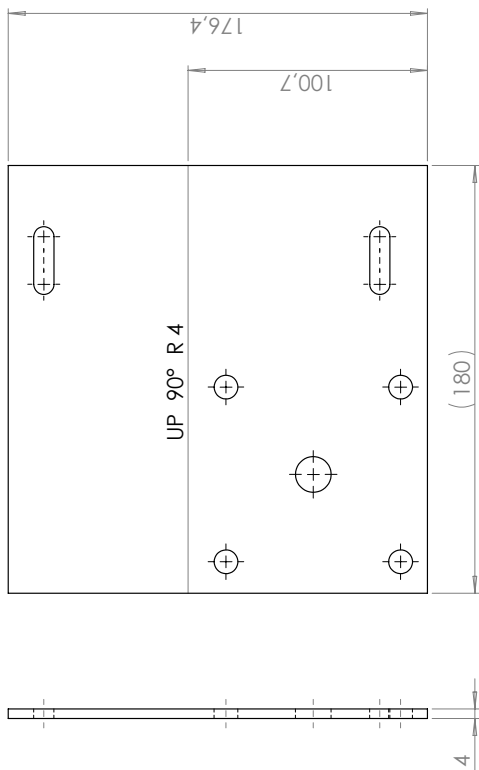
|      |      |                         |          |      |
|------|------|-------------------------|----------|------|
| 9    | 2    | F_for_30x20x2_skrad     | 6063-T6  | 643  |
| 8    | 1    | F_for_30x20x2_1700      | 6063-T6  | 817  |
| 7    | 1    | Feste_verktoy           | AISI 304 | 333  |
| 6    | 2    | Batterier               | Air      | 18   |
| 5    | 2    | U_arm                   |          |      |
| 4    | 2    | U_arm_hoyre             |          |      |
| 3    | 1    | F_for_60x30x2,5_1700    | 6063-T6  | 1893 |
| 2    | 2    | F_for_60x30x2,5_1100    | 6063-T6  | 1148 |
| 1    | 4    | Kulelagersammenstilling |          |      |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim.   |          | Vekt |



|                            |            |                                     |                    |  |            |
|----------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------|--|------------|
| Dato:<br>2. mai 2014       |            | Konstr./Tegner:<br>Fredrik Blomberg | Målestokk:<br>1:10 | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |            |
| <b>Rammesammenstilling</b> |            |                                     |                    | Tegn.nr  |            |
| T.klasse                   | Beskr.     | >3-6                                | >6-30              | >30-120  | >120-400   |
| f                          | fin        | +0,05                               | +0,1               | +0,15  | +0,2       |
| m                          | middles    | +0,1                                | +0,2               | +0,3   | +0,5       |
| c                          | grov       | +0,2                                | +0,5               | +0,8   | +1,2       |
| v                          | meget grov | -                                   | +1                 | +1,5   | +2,5       |
|                            |            | >1000-200                           | >400-1000          | >1000-2000                                     | >2000-4000 |
|                            |            | +0,5                                | +0,3               | +0,5   | -          |
|                            |            | +1,2                                | +0,8               | +1,2   | +2         |
|                            |            | +3                                  | +2                 | +3   | +4         |
|                            |            | +6                                  | +4                 | +6   | +8         |
| Toleranse:                 | C          | Materiale                           |                    | A 3 Ark /                                      |            |



|      |      |                       |           |      |               |
|------|------|-----------------------|-----------|------|---------------|
| 1    | 1    | Motorfeste_hoyre      | AISI 1020 | 974  |               |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt | Art. nr./ref. |

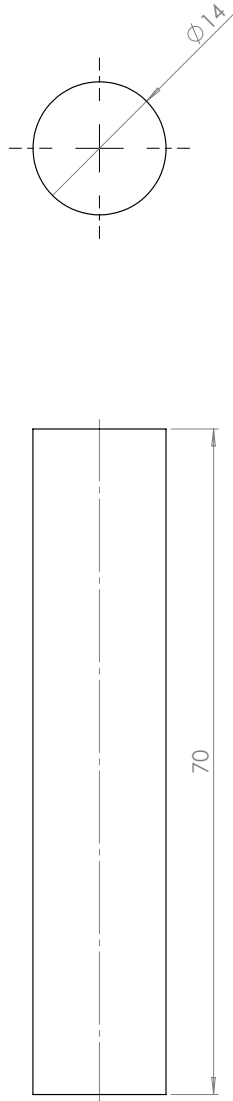


Antall: 2 stk lik denne tegningen og 2 stk knekt andre veien.

|                  |                  |            |          |       |         |          |           |            |            |
|------------------|------------------|------------|----------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| Dato:            | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Tegn.nr  |       |         |          |           |            |            |
| 2. mai 2014      | Fredrik Blomberg | 1:2        | A 3      |       |         |          |           |            |            |
| Motorfeste_hoyre |                  |            | Ark /    |       |         |          |           |            |            |
| Toleranse: m     |                  |            | AISI 304 |       |         |          |           |            |            |
| T.klasse         | Beskr.           | 0,5-3      | >3-6     | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
| f                | fin              | +0,05      | +0,05    | +0,1  | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5       | -          |
| m                | middles          | +0,1       | +0,1     | +0,2  | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c                | grov             | +0,2       | +0,3     | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v                | meget grov       | -          | +0,5     | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

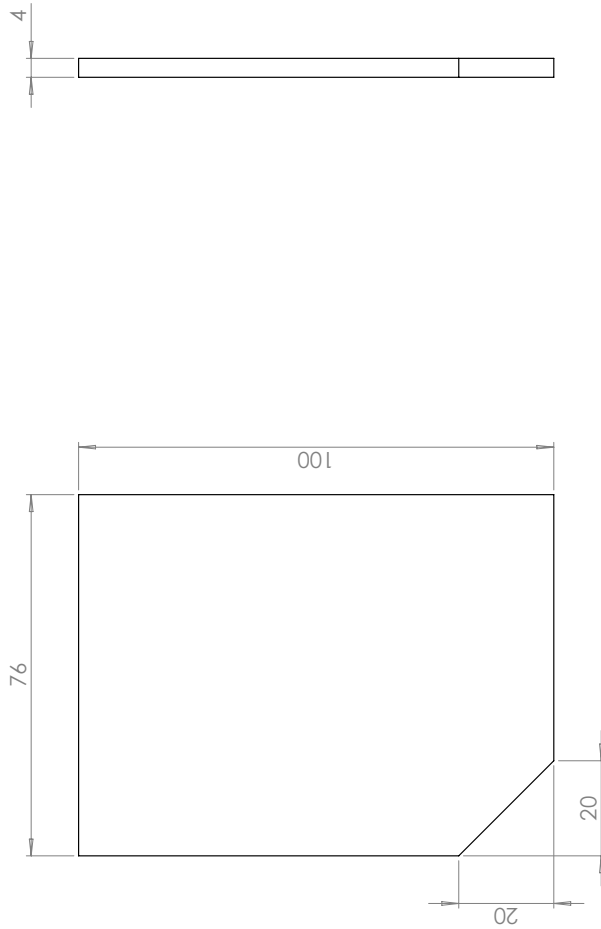
Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet

|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Aksling_tannreimshjul | AISI 304  | 86            |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



|                       |                  |            |  |  |
|-----------------------|------------------|------------|--|--|
| Dato:                 | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |  |
| 2. mai 2014           | Fredrik Blomberg | 2:1        | Universitetet                                  |  |
| Aksling_tannreimshjul |                  |            | Tegn.nr  |  |
| T.klasse              | Beskr.           | >2000-4000 | A 3  |  |
| f                     | fin              | +0,5       | /  |  |
| m                     | middles          | +1,2       |  |  |
| c                     | grov             | +2         |  |  |
| v                     | meget grov       | +4         |  |  |
|                       |                  | +8         |  |  |
|                       |                  | +6         |  |  |
|                       |                  | +4         |  |  |
|                       |                  | +2,5       |  |  |
|                       |                  | +1,5       |  |  |
|                       |                  | +1         |  |  |
|                       |                  | +0,5       |  |  |
|                       |                  | -          |  |  |
|                       |                  | +0,2       |  |  |
|                       |                  | +0,1       |  |  |
|                       |                  | +0,1       |  |  |
|                       |                  | +0,15      |  |  |
|                       |                  | +0,2       |  |  |
|                       |                  | +0,3       |  |  |
|                       |                  | +0,5       |  |  |
|                       |                  | +0,8       |  |  |
|                       |                  | +1,2       |  |  |
|                       |                  | +1,5       |  |  |
|                       |                  | +2         |  |  |
|                       |                  | +2,5       |  |  |
|                       |                  | +3         |  |  |
|                       |                  | +4         |  |  |
|                       |                  | +6         |  |  |
|                       |                  | +8         |  |  |
|                       |                  |            | Toleranse: f Materiale                         |  |
|                       |                  |            | AISI 304                                       |  |

|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Motorfeste_endeplate  | AISI 1020 | 234           |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |

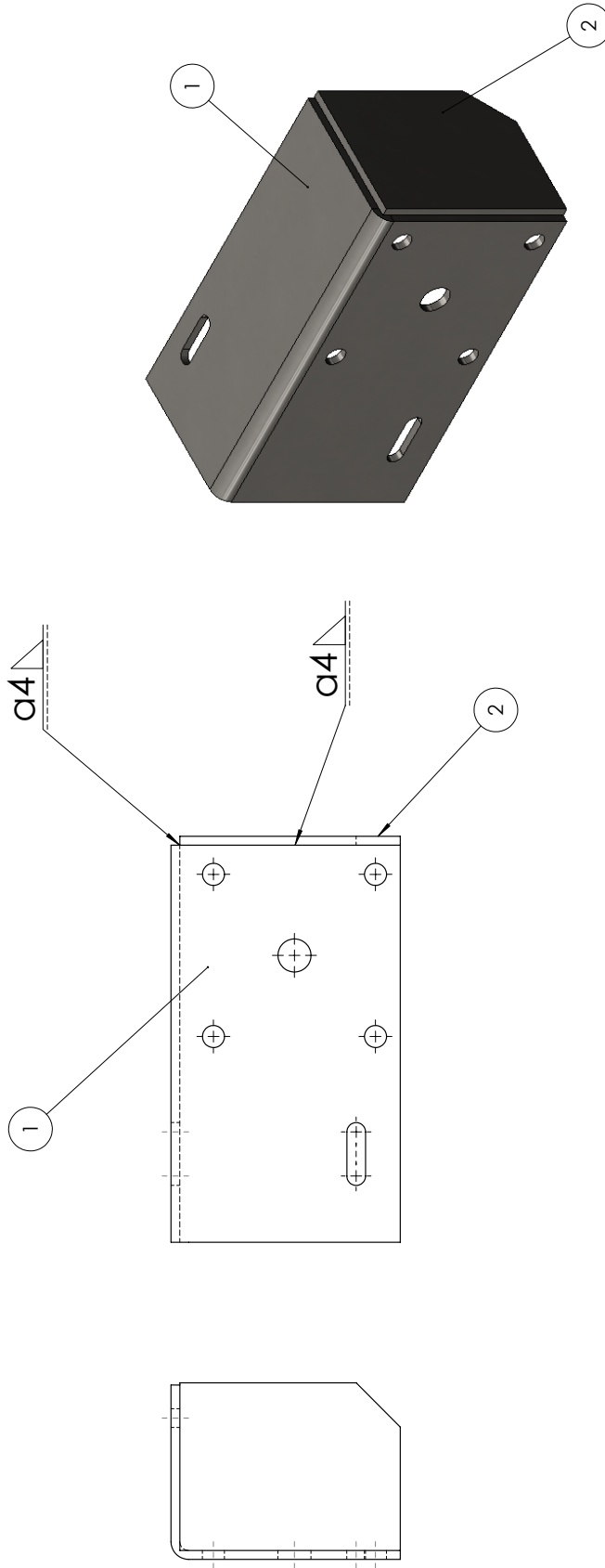


|                             |  |                  |  |            |  |  |
|-----------------------------|--|------------------|--|------------|--|--|
| Dato:                       |  | Konstr./Tegner:  |  | Målestokk: | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |  |
| 2. mai 2014                 |  | Fredrik Blomberg |  | 1:1        |  |  |
| <b>Motorfeste_endeplate</b> |  |                  |  |            |  |  |
| Toleranse: c                |  |                  |  |            |  |  |
| AISI 1020                   |  |                  |  |            |  |  |
| <b>Motorfeste_endeplate</b> |  |                  |  |            |  |  |
| Ark /                       |  |                  |  |            |  |  |
| A 3                         |  |                  |  |            |  |  |

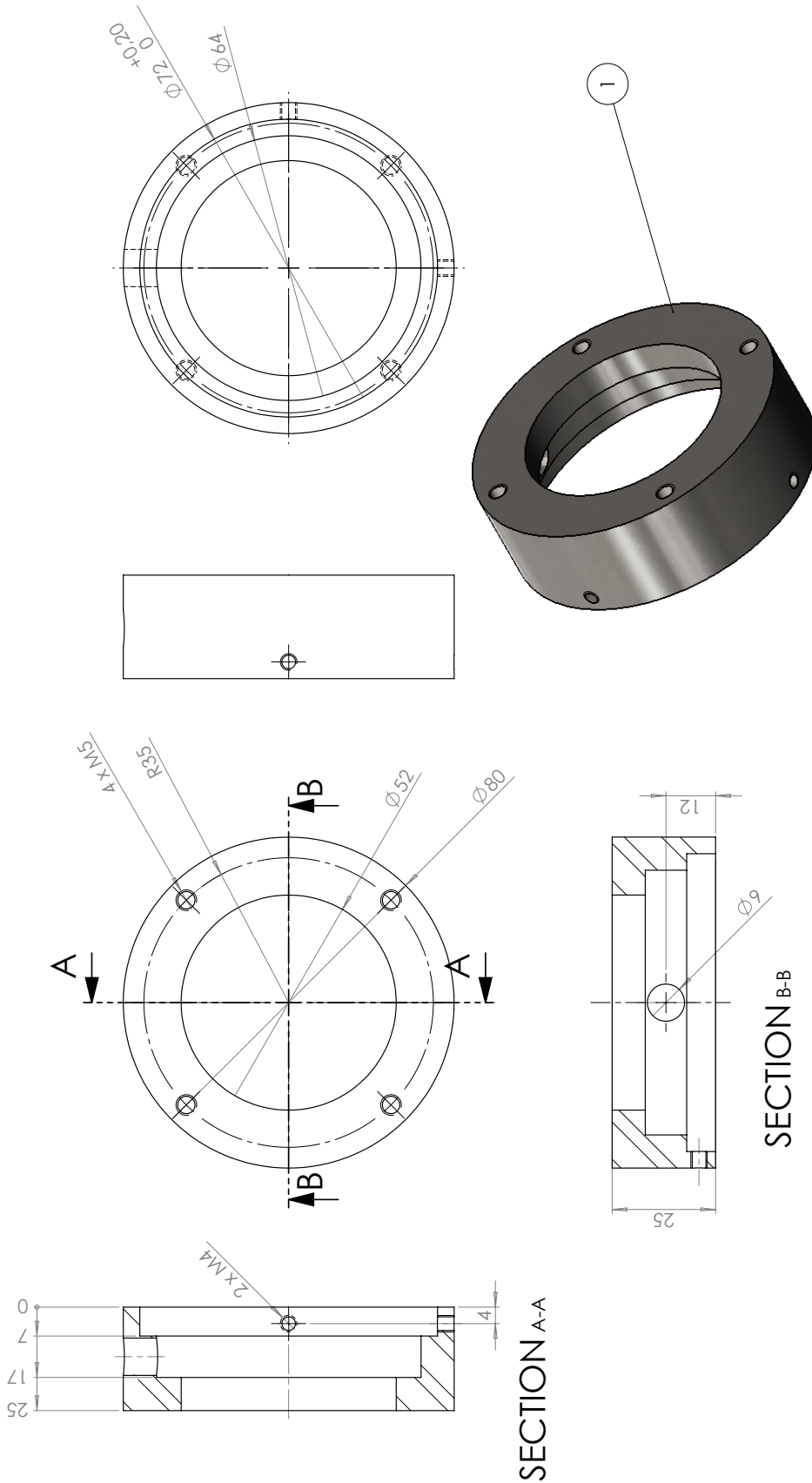
| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6  | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|-------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,05 | +0,1  | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5       | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,2  | +0,2  | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3  | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5  | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

|           |   |                       |           |               |
|-----------|---|-----------------------|-----------|---------------|
| 2         | 1 | Motorfeste_endeplate  | AISI 1020 | 234           |
| 1         | 1 | Motorfeste_hoyre      | AISI 1020 | 974           |
| Pos. Ant. |   | Tittel/benevning/dim. |           | Art. nr./ref. |
|           |   |                       | Materiale | Vekt          |



|                  |            |                  |       |              |         |  |            |            |
|------------------|------------|------------------|-------|--------------|---------|--|------------|------------|
| Dato:            |            | Konstr./Tegner:  |       | Målestokk:   |         | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |            |            |
| 2. mai 2014      |            | Fredrik Blomberg |       | 1:2          |         | Tegn.nr  |            |            |
| Motorfeste_hoyre |            |                  |       | Toleranse: c |         | Ark  |            |            |
|                  |            |                  |       |              |         | A 3 /  |            |            |
| T.klasse         | Beskr.     | 0,5-3            | >3-6  | >6-30        | >30-120 | >400-1000                                      | >1000-2000 | >2000-4000 |
| f                | fin        | +0,05            | +0,05 | +0,1         | +0,15   | +0,3   | +0,5       | -          |
| m                | middles    | +0,1             | +0,1  | +0,2         | +0,3    | +0,8   | +1,2       | +2         |
| c                | grov       | +0,2             | +0,3  | +0,5         | +0,8    | +2   | +3         | +4         |
| v                | meget grov | -                | +0,5  | +1           | +1,5    | +4   | +6         | +8         |

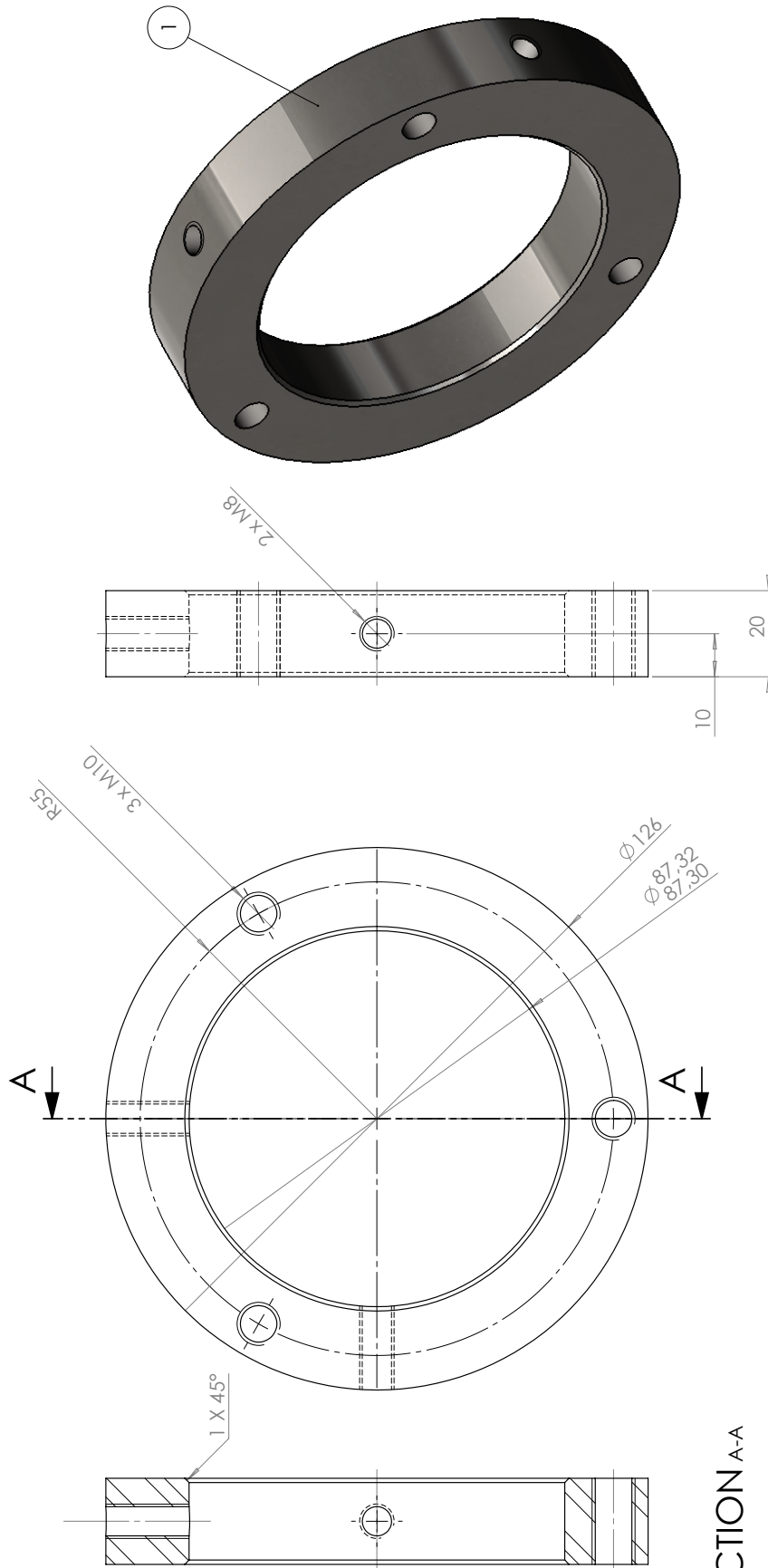
|      |      |                       |           |      |               |
|------|------|-----------------------|-----------|------|---------------|
| 1    | 1    | Servogirfestering     | AISI 304  | 374  |               |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt | Art. nr./ref. |



|                   |                  |            |         |
|-------------------|------------------|------------|---------|
| Dato:             | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Tegn.nr |
| 2. mai 2014       | Fredrik Blomberg | 1:1        |         |
| Servogirfestering |                  |            | A 3     |
| Toleranse: m      |                  |            |         |
| Materiale         |                  |            | Ark /   |
| AISI 304          |                  |            |         |

| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6  | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|-------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,05 | +0,1  | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5       | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,2  | +0,2  | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3  | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5  | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Hjulfesting           | AISI 304  | 997           |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



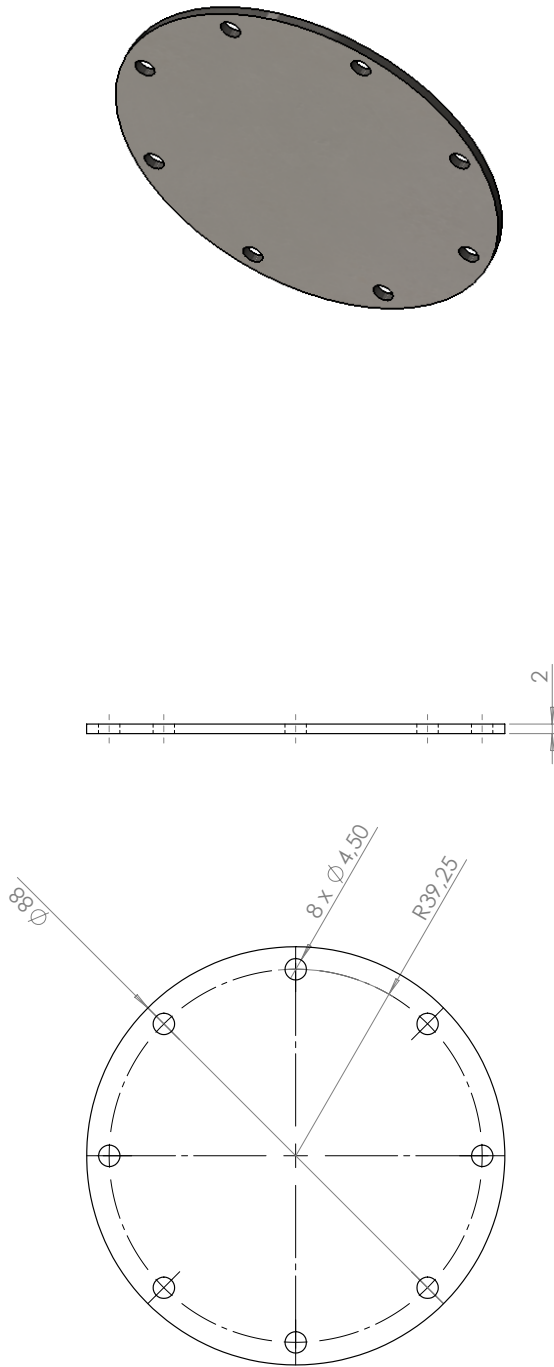
SECTION A-A

|             |  |                  |  |            |  |  |  |
|-------------|--|------------------|--|------------|--|--|--|
| Dato:       |  | Konstr./Tegner:  |  | Målestokk: |  | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |  |
| 2. mai 2014 |  | Fredrik Blomberg |  | 1:1        |  | Tegn.nr  |  |
|             |  | Hjulfesting      |  |            |  | Ark /  |  |
|             |  | Toleranse: m     |  | Material   |  | A 3  |  |
|             |  |                  |  | AISI 304   |  | /  |  |

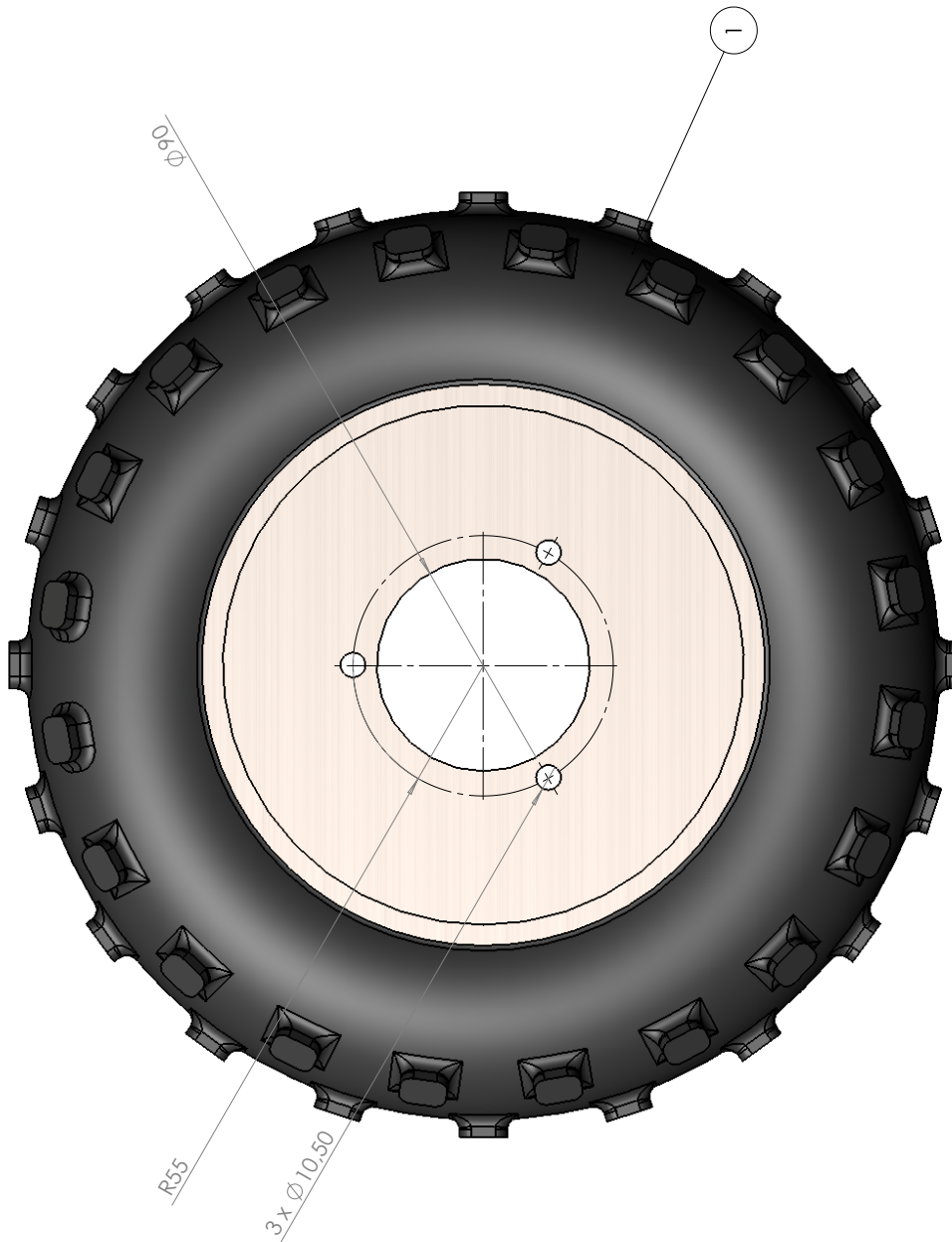
| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6  | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|-------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,05 | +0,1  | +0,15   | +0,2     | +0,3      | +0,5       | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,1  | +0,2  | +0,3    | +0,5     | +0,8      | +1,2       | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3  | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +2        | +3         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5  | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |

|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Lokk_girkasse         | AISI 304  | 95            |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



|             |            |                  |      |                      |      |  |      |
|-------------|------------|------------------|------|----------------------|------|--|------|
| Dato:       |            | Konstr./Tegner:  |      | Målestokk:           |      | Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet |      |
| 2. mai 2014 |            | Fredrik Blomberg |      | 1:1                  |      | Tegn.nr  |      |
|             |            |                  |      | <b>Lokk_girkasse</b> |      |  |      |
|             |            |                  |      | A 3                  |      |  |      |
|             |            |                  |      | /                    |      |  |      |
| T.klasse    |            | Beskr.           |      | Toleranse: c         |      | Materiale                                      |      |
|             |            |                  |      | c                    |      | AISI 304                                       |      |
| f           | 0,5-3      | +0,05            | +0,1 | +0,2                 | +0,3 | +0,5   | +0,8 |
| m           | >3-6       | +0,05            | +0,1 | +0,2                 | +0,3 | +0,5   | +0,8 |
| c           | >6-30      | +0,1             | +0,2 | +0,3                 | +0,5 | +0,8   | +1,2 |
| v           | >30-120    | +0,15            | +0,3 | +0,5                 | +0,8 | +1,2   | +2   |
|             | >120-400   | +0,2             | +0,5 | +0,8                 | +1,2 | +2   | +4   |
|             | >400-1000  | +0,3             | +0,8 | +1,2                 | +2   | +4   | +6   |
|             | >1000-2000 | +0,5             | +1,2 | +2                   | +4   | +6   | +8   |
|             | >2000-4000 | -                | -    | -                    | -    | -  | -    |

|      |      |                       |           |               |
|------|------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1    | 1    | Traktorhjul           | Air       | 8             |
| Pos. | Ant. | Tittel/benevning/dim. | Materiale | Vekt          |
|      |      |                       |           | Art. nr./ref. |



|             |                  |            |         |  |
|-------------|------------------|------------|---------|--|
| Dato:       | Konstr./Tegner:  | Målestokk: | Tegn.nr |  |
| 2. mai 2014 | Fredrik Blomberg | 1:2        | A 3     |  |
|             | Traktorhjul      |            | Ark /   |  |
|             | Toleranse:       | m          | Air     |  |

| T.klasse | Beskr.     | 0,5-3 | >3-6 | >6-30 | >30-120 | >120-400 | >400-1000 | >1000-2000 | >2000-4000 |
|----------|------------|-------|------|-------|---------|----------|-----------|------------|------------|
| f        | fin        | +0,05 | +0,1 | +0,15 | +0,2    | +0,3     | +0,5      | -          | -          |
| m        | middles    | +0,1  | +0,2 | +0,3  | +0,5    | +0,8     | +1,2      | +2         | +2         |
| c        | grov       | +0,2  | +0,3 | +0,5  | +0,8    | +1,2     | +3        | +4         | +4         |
| v        | meget grov | -     | +0,5 | +1    | +1,5    | +2,5     | +4        | +6         | +8         |





```
!-----*****-----
!Ramme beregning i ANSYS APDL. Case 1. Et bakhjul i lufta, resten i
kontakt med bakken. Uten app-ramme.
!-----*****-----
!Header:
finish
/clear,all
/title, Ramme case 1 Fredrik Blomberg
!-----
!      Data input
!-----
/prep7
ET,1,BEAM188          ! Element type 1 Firkantror
ET,2,BEAM188          ! Element type 2 Ror
ET,3,BEAM188          ! Element stivt

MP,EX,1,68900         !Materialdata alu
MP,GXY,1,25.8e9
MP,PRXY,1,0.33

MP,EX,3,1e9          !Materialdata arm
MP,GXY,3,1e9
MP,GXZ,3,1e9
MP,PRXY,3,0.3

!-----
!      Variabels
!-----

SECTYPE, 1, BEAM, HREC, firkant, ,
SECDATA, 30, 60, 2.5, 2.5, 2.5, 2.5          !Hoyde,bredde,tykkelse
SECTYPE, 2, BEAM, CTUBE, ror, ,
SECDATA, 13,16,          !Innerradius,ytterradius
SECTYPE, 3, BEAM, CTUBE, ror, ,
SECDATA, 10,20,          !Stivt element, Innerradius,ytterradius

!-----
!      Geometr(y/ies) Keypoints, lines
!-----
/prep7

K, 1, 0, 0,0
K, 2, 0, 550,0
K, 3, 0,1100,0
K, 4, 850,1100,0
K, 5,1700,1100,0
K, 6,1700, 550,0
K, 7,1700, 0,0

K, 10, 0, 0,-400
K, 11, 0,1100,-400
K, 12,1700,1100,-400
K, 13,1700, 0,-400

K,100, 1e4, 0,0      ! Point for orientation x
K,101, 0, 1e4,0     ! Point for orientation y

L,1,2                !1-6 Robotramme
L,2,3
L,5,6
```



```
L,6,7
L,3,4
L,4,5

L,1,4          !7-9 Verktøy ramme
L,4,7
L,1,7

L,1,10         !10-13 Linjer fra ramme til bakken
L,3,11
L,5,12
L,7,13

!-----
!      Mesh
!-----
ESIZE,,20

LSEL,s,,,1,4
LATT,1,,1,,100,,1
LMESH,ALL

LSEL,s,,,5,6      ! Velger rammelinjer og legger paa firkantror
LATT,1,,1,,101,,1
LMESH,ALL

ESIZE,,1

LSEL,s,,,10,13    ! Velger linjer fra ramme
LATT,3,,3,,,,3
LMESH,ALL

!LSEL,s,,,7,9      ! Select L4 to L6
!TYPE,2
!MAT,1
!SECNUM,2
!LMESH,all

/eshape,1
eplot

!-----
!      DOF
!-----
/solu

DK,10,ALL
DK,11,UZ,,,,UX,UY
DK,12,UZ
FK,1,FZ,-(255*2)
FK,2,FZ,-(221*2)
FK,3,FZ,-(255*2)
FK,4,FZ,-(48*2)
FK,5,FZ,-(255*2)
FK,6,FZ,-(221*2)
FK,7,FZ,-(255*2)

!-----
/solu
SOLVE
```



```
!-----*****-----
!Ramme beregning i ANSYS APDL. Case 2. Et framhjul i lufta, resten i
kontakt med bakken. Uten app-ramme.
!-----*****-----
!Header:
finish
/clear,all
/title, Ramme case 2, Fredrik Blomberg
!-----
!   Data input
!-----
/prep7

ET,1,BEAM188      ! Element type 1 Firkantror
ET,2,BEAM188      ! Element type 2 Ror
ET,3,BEAM188      ! Element stivt

MP,EX,1,68900      !Materialdata alu
MP,GXY,1,25.8e6
MP,PRXY,1,0.33

MP,EX,3,1e9        !Materialdata arm
MP,GXY,3,1e9
MP,GXZ,3,1e9
MP,PRXY,3,0.3

!-----
!   Variabels
!-----

SECTYPE, 1, BEAM, HREC, firkant, ,
SECDATA, 30, 60, 2.5, 2.5, 2.5, 2.5      !Hoyde,bredde,tykkelse
SECTYPE, 2, BEAM, CTUBE, ror, ,
SECDATA, 13,16,      !Innerradius,ytterradius
SECTYPE, 3, BEAM, CTUBE, ror, ,
SECDATA, 10,20,      !Stivt element, Innerradius,ytterradius

!-----
!   Geometr(y/ies) Keypoints, lines
!-----
/prep7

K, 1, 0, 0,0
K, 2, 0, 550,0
K, 3, 0,1100,0
K, 4, 850,1100,0
K, 5,1700,1100,0
K, 6,1700, 550,0
K, 7,1700, 0,0

K, 10, 0, 0,-400
K, 11, 0,1100,-400
K, 12,1700,1100,-400
K, 13,1700, 0,-400

K,100, 1e4, 0,0      ! Point for orientation x
K,101, 0, 1e4,0      ! Point for orientation y

L,1,2      !1-6 Robotramme
```



```
L,2,3
L,5,6
L,6,7
L,3,4
L,4,5

L,1,4          !7-9 Verktoy ramme
L,4,7
L,1,7

L,1,10         !10-13 Linjer fra ramme til bakken
L,3,11
L,5,12
L,7,13

!-----
!      Mesh
!-----
ESIZE,,20

LSEL,s,,,1,4
LATT,1,,1,,100,,1
LMESH,all

LSEL,s,,,5,6   ! Velger rammelinjer og legger paa firkantror
LATT,1,,1,,101,,1
LMESH,all

ESIZE,,1

LSEL,s,,,10,13 ! Velger linjer fra ramme
LATT,3,,3,,,,3
LMESH,all

!LSEL,s,,,7,9   ! Select L4 to L6
!TYPE,2
!MAT,1
!SECNUM,2
!LMESH,all

/eshape,1
eplot
!-----
!      DOF
!-----
/solu

DK,13,all
DK,12,UZ
DK,10,UZ
FK,1,FZ,-(255*2)
FK,2,FZ,-(221*2)
FK,3,FZ,-(255*2)
FK,4,FZ,-(48*2)
FK,5,FZ,-(255*2)
FK,6,FZ,-(221*2)
FK,7,FZ,-(255*2)
!-----
/solu
SOLVE
```



```
!-----*****-----
!Ramme beregning i ANSYS APDL. Case 3. Et bakhjul i lufta, resten i
kontakt med bakken. Med app-ramme.
!-----*****-----
!Header:
finish
/clear,all
/title, Ramme case 4, med app-ramme Fredrik Blomberg
!-----
!      Data input
!-----
/prep7

ET,1,BEAM188          ! Element type 1 Firkantror
ET,2,BEAM188          ! Element type 2 Ror
ET,3,BEAM188          ! Element stivt

MP,EX,1,68900         !Materialdata alu
MP,GXY,1,1e9
MP,GXZ,1,1e9
MP,PRXY,1,0.3
MP,EX,3,1e9          !Materialdata arm
MP,GXY,3,1e9
MP,GXZ,3,1e9
MP,PRXY,3,0.3

!-----
!      Variabels
!-----

SECTYPE, 1, BEAM, HREC, firkant, ,
SECDATA, 30, 60, 2.5, 2.5, 2.5, 2.5          !Hoyde,bredde,tykkelse
SECTYPE, 2, BEAM, HREC, appramme, ,
SECDATA, 30, 30, 3, 3, 3, 3          !Innerradius,ytterradius
SECTYPE, 3, BEAM, CTUBE, ror, ,
SECDATA, 10,20,          !Stivt element, Innerradius,ytterradius

!-----
!      Geometr(y/ies) Keypoints, lines
!-----
/prep7

K, 1, 0, 0,0
K, 2, 0, 550,0
K, 3, 0,1100,0
K, 4, 850,1100,0
K, 5,1700,1100,0
K, 6,1700, 550,0
K, 7,1700, 0,0

K, 10, 0, 0,-400
K, 11, 0,1100,-400
K, 12,1700,1100,-400
K, 13,1700, 0,-400

K,100, 1e4, 0,0          ! Point for orientation x
K,101, 0, 1e4,0          ! Point for orientation y

L,1,2          !1-6 Robotramme
L,2,3
L,5,6
```



```
L,6,7
L,3,4
L,4,5

L,1,4          !7-9 Verktøy ramme
L,4,7
L,1,7

L,1,10         !10-13 Linjer fra ramme til bakken
L,3,11
L,5,12
L,7,13

!-----
!      Mesh
!-----
ESIZE,,20

LSEL,s,,,1,4
LATT,1,,1,,100,,1
LMESH,all

LSEL,s,,,5,6      ! Velger rammelinjer og legger paa firkantror
LATT,1,,1,,101,,1
LMESH,all

ESIZE,,1

LSEL,s,,,10,13    ! Velger linjer fra ramme
LATT,3,,3,,,,3
LMESH,all

LSEL,s,,,7,9      ! Select L4 to L6
TYPE,2
MAT,1
SECNUM,2
LMESH,all

/eshape,1
epplot

!-----
!      DOF
!-----
/solu

DK,10,ALL
DK,11,UZ,,,,UX,UY
DK,12,UZ
FK,1,FZ,-(630*2)
FK,2,FZ,-(221*2)
FK,3,FZ,-(255*2)
FK,4,FZ,-(798*2)
FK,5,FZ,-(255*2)
FK,6,FZ,-(221*2)
FK,7,FZ,-(630*2)

!-----
/solu
SOLVE
```



```
!-----*****-----
!Ramme beregning i ANSYS APDL. Case 4. Et framhjul i lufta, resten i
kontakt med bakken. Med app-ramme.
!-----*****-----
!Header:
finish
/clear,all
/title, Ramme case 4, med app-ramme Fredrik Blomberg
!-----
!      Data input
!-----
/prep7

ET,1,BEAM188          ! Element type 1 Firkantror
ET,2,BEAM188          ! Element type 2 Ror
ET,3,BEAM188          ! Element stivt

MP,EX,1,68900          !Materialdata alu
MP,GXY,1,1e9
MP,GXZ,1,1e9
MP,PRXY,1,0.3

MP,EX,3,1e9           !Materialdata arm
MP,GXY,3,1e9
MP,GXZ,3,1e9
MP,PRXY,3,0.3

!-----
!      Variabels
!-----

SECTYPE, 1, BEAM, HREC, firkant, ,
SECDATA, 30, 60, 2.5, 2.5, 2.5, 2.5          !Hoyde,bredde,tykkelse
SECTYPE, 2, BEAM, HREC, appramme, ,
SECDATA, 30, 30, 3, 3, 3, 3          !Innerradius,ytterradius
SECTYPE, 3, BEAM, CTUBE, ror, ,
SECDATA, 10,20,          !Stivt element, Innerradius,ytterradius

!-----
!      Geometr(y/ies) Keypoints, lines
!-----
/prep7

K, 1, 0, 0,0
K, 2, 0, 550,0
K, 3, 0,1100,0
K, 4, 850,1100,0
K, 5,1700,1100,0
K, 6,1700, 550,0
K, 7,1700, 0,0
K, 10, 0, 0,-400
K, 11, 0,1100,-400
K, 12,1700,1100,-400
K, 13,1700, 0,-400

K,100, 1e4, 0,0          ! Point for orientation x
K,101, 0, 1e4,0          ! Point for orientation y

L,1,2          !1-6 Robotramme
L,2,3
```



```
L,5,6
L,6,7
L,3,4
L,4,5

L,1,4          !7-9 Verktoy ramme
L,4,7
L,1,7

L,1,10         !10-13 Linjer fra ramme til bakken
L,3,11
L,5,12
L,7,13

!-----
!      Mesh
!-----
ESIZE,,20

LSEL,s,,,1,4
LATT,1,,1,,100,,1
LMESH,all

LSEL,s,,,5,6          ! Velger rammelinjer og legger paa firkantror
LATT,1,,1,,101,,1
LMESH,all

ESIZE,,1

LSEL,s,,,10,13       ! Velger linjer fra ramme
LATT,3,,3,,,,3
LMESH,all

LSEL,s,,,7,9         ! Select L4 to L6
TYPE,2
MAT,1
SECNUM,2
LMESH,all

/eshape,1
eplot
!-----
!      DOF
!-----
/solu

DK,13,all
DK,12,UZ
DK,10,UZ
FK,1,FZ,-(630*2)
FK,2,FZ,-(221*2)
FK,3,FZ,-(255*2)
FK,4,FZ,-(798*2)
FK,5,FZ,-(255*2)
FK,6,FZ,-(221*2)
FK,7,FZ,-(630*2)

!-----
/solu
SOLVE
```





Rammekonstruksjon for autonom landbruksmaskin

**BOXHOLM STÅL**  
Providing special steel solutions



KVALITETSINTYG SS-EM10204-2.2  
TEST REPORT  
WERKZEUGNIS

Datum/Data  
101005

Kund nr/Cust. No/Best.- Nr  
12181

Materialspecifikation/Product description/Materialspezifikation  
1100020  
20 Runt 11SMnPb30+C  
Automatstål 11SMnPb30+C tol. h9  
3000 +100/-0

Kjøper/Buyer/Besteller  
Ruukki Norge AS  
Professor Birkelands vel 21  
Postboks 140, Furuset  
NO-1001 OSLO  
NORGE

Vårt ordrenr/Our order No/  
Unsere Auftrags-Nr  
0322476 1 5

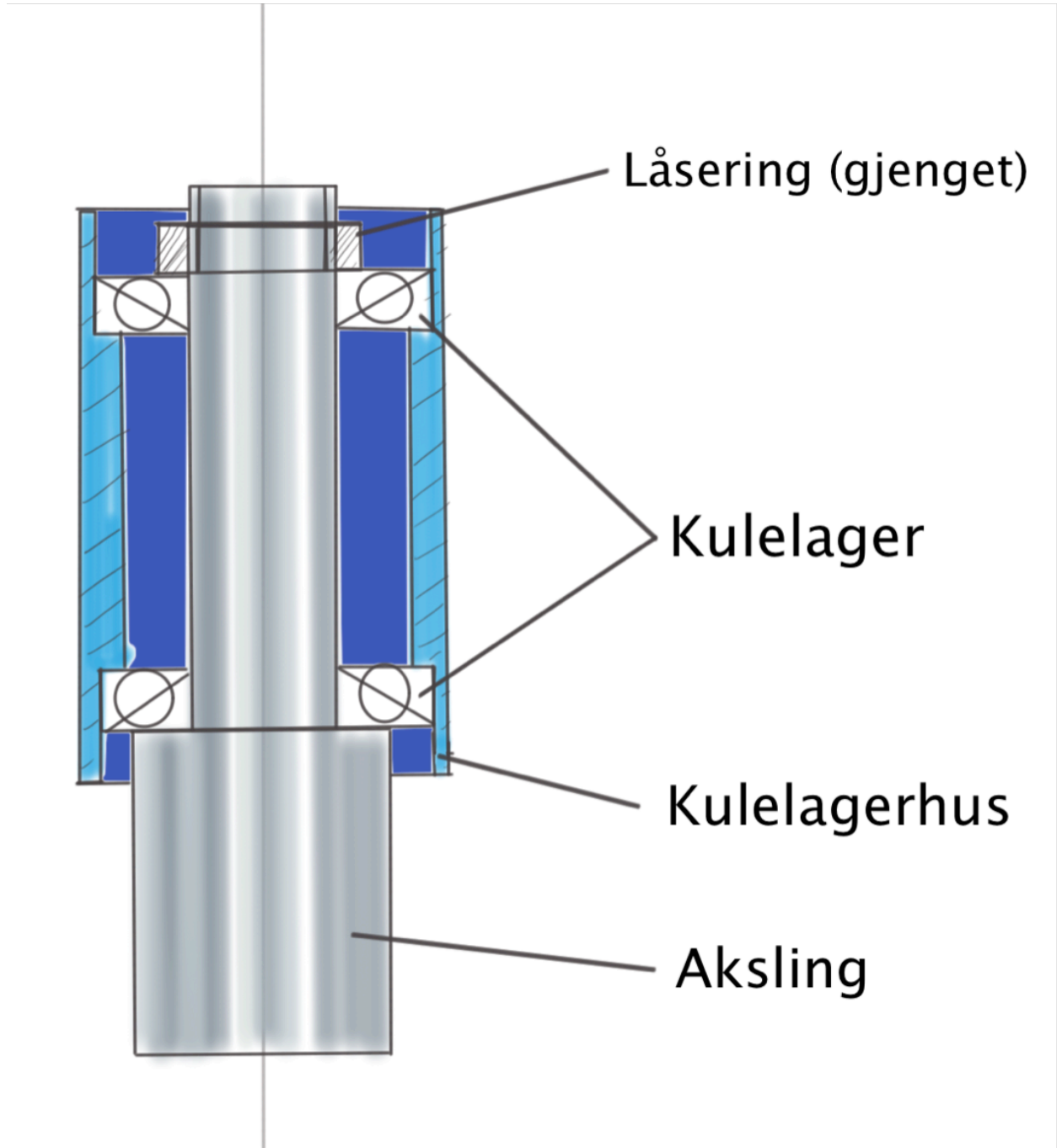
Faktura nr/Invoice No/  
Rechnungs-Nr  
499991

Ert ordrenr/Your order No/  
Ihrer Auftrags-Nr  
Y4662

Leveransdatum/Data of delivery/  
Lieferdatum  
101005

| Batch nr<br>Batch No<br>Los Nr                                       | Kvantitet<br>Quantity<br>Liefermenge                           | Märke<br>Marking<br>Kennzeichnung                           |   |   |       |      |  |  |  |  |  |
|--|--|---|---|---|-------|------|--|--|--|--|--|
| 406EA01  | 1023 KG  |   |   |   |       |      |  |  |  |  |  |
| Kjemisk sammensetning/Chemical composition/Chemische Zusammensetzung |  |   |   |   |       |      |  |  |  |  |  |
| Batch nr<br>Batch No<br>Los Nr                                       | % C  | % Si  | % Mn  | % P                                       | % S   | % Pb |  |  |  |  |  |
| 406EA01  | 0,07   | 0,02  | 1,25  | 0,058                                     | 0,330 | 0,23 |  |  |  |  |  |
| Batch nr<br>Batch No<br>Los Nr                                       | Förlängn.-gräns<br>Proof strength<br>Dehngrenze<br>Rp0,2 N/mm2 | Brötkgräns<br>Tensile strength<br>Zugfestigkeit<br>Rm N/mm2 | Förlängning<br>Elongation<br>Bruchdehnung<br>A5 % | Hårdhet<br>Hardness<br>Härte<br>HBS 5/750 |       |      |  |  |  |  |  |
|  | 490  | 580   | 12  | 180                                       |       |      |  |  |  |  |  |
| Övrigt/Miscellaneous/Sonstiges                                       |  |   |   |   |       |      |  |  |  |  |  |
| Cast no E01103984  |  |   |   |   |       |      |  |  |  |  |  |
| Boxholm Stål AB - Kvalitetsavdelningen                               |  |   |   |   |       |      |  |  |  |  |  |

|                             |                    |                      |                  |                            |                             |
|-----------------------------|--------------------|----------------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Postadress/Address          | Telefon/Telephone  | Org.nr/Reg. no       | Bankgiro Sverige | IBAN nr/IBAN no            | Styrelsens säta/Reg. office |
| Boxholm Stål AB             | + 46 (0)142 551 00 | 556252-7019          | 626-3446         | SE511200000013471108882    | Boxholm                     |
| Box 1                       | Telefax            | Momsreg.nr/V.A.T. no | Plusgiro         | SWIFT-adress/SWIFT-address |                             |
| SE-590 10 BOXHOLM<br>SWEDEN | + 46 (0)142 519 88 | SE556252701901       | 72 04 36-5       | DABASESX                   |                             |





Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
67 23 00 00  
[www.nmbu.no](http://www.nmbu.no)