



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2018 30 stp + 30 stp**

Fakultet for Realfag og Teknologi

Pål Johan From

# **Utvikling og design av mekanisk utstyr tilpasset landbruksroboten Thorvald**

The development and design of mechanical  
equipment for Thorvald – the NMBU agricultural  
robot

**Per Einar Henriksen og Anders Svenskerud Bækkedal**

Maskin, Prosess- og Produktutvikling

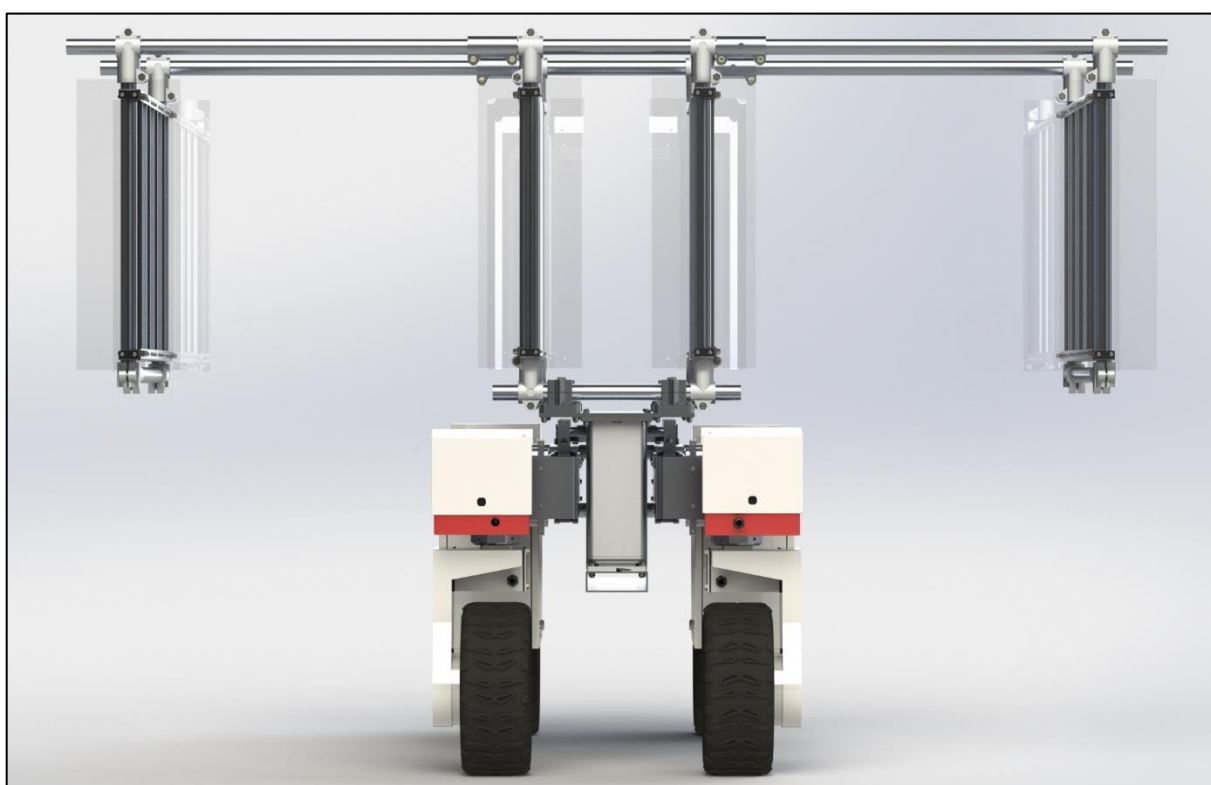
Fakultet for Realfag og Teknologi



# Utvikling og design av mekanisk utstyr tilpasset landbruksroboten Thorvald

Av

Per Einar Henriksen og Anders Svenskerud Bækkedal



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Masteroppgave – Maskin, Prosess- og Produktutvikling

Fakultet for Realfag og Teknologi (RealTek), NMBU

Våren 2018



## Forord

Denne masteroppgaven er resultatet av et samarbeidsprosjekt gjennomført våren 2018, som avsluttende del av masterstudiet maskin, prosess- og produktutvikling ved Norges Miljø og Biovitenskapelige Universitet (NMBU). Arbeidet har omhandlet utredning, utvikling og design av mekaniske innretninger til landbruksroboten Thorvald II.

Mye av motivasjonen bak valgt oppgave, så vel som valg av studie, ligger i vår interesse for teknologi og hvordan maskiner fungerer og samarbeider som del av større systemer. Problemstillingene tilknyttet dette prosjektet har passet oss godt, og vi sitter igjen med følelsen av at vi har hatt nytte av det vi har lært gjennom de siste årene. Etter å ha blitt introdusert for robotikkgruppen ved NMBU og deres arbeid, var vi ivrige etter å bidra med vår egen kunnskap inn i de pågående prosjektene. Vi har virkelig fått et innblikk i potensialet til robotplattformen og er spent på å følge med på den videre utviklingen. Vi er takknemlige for muligheten til å samarbeide med Saga Robotics og håper innholdet i rapporten er inspirerende for leseren og kan benyttes i den videre utviklingen av robotplattformen.

Prosjektet har vært arbeidskrevende, men samtidig meget lærerikt på mange måter. Vi har gjennom hele prosessen hatt god nytte av hverandres kvaliteter og det gode samarbeidet har gitt utspring til et mangfold av idéer og løsninger. Det at vi begge er oppvokst på gård har vært fordelaktig i form av den praktiske innsikten under problemløsningen i prosjektarbeidet.

I oppstartsfasen av prosjektet gjennomførte vi en felles tur til Rio de Janeiro i Brasil med de andre masterstudentene og resten av robotikkgruppen. Ved siden av å bli kjent med de andre, fikk vi en god introduksjon til Thorvald plattformen og potensielle faktorer vi burde ta hensyn til underveis i arbeidet.

Vi ønsker å rette en stor takk til vår hovedveileder, professor Pål Johan From, og vår biveileder, forsker Aruppillai Suthaparan, for god veiledning, inkludering og tilrettelegging underveis. Videre vil vi takke førsteamanuensis Geir Terjesen, senioringeniør Egil Stemsrud og overingeniør Henrik Folke Holmberg for hjelp og innspill vedrørende dimensjonering og beregning. Takk til førsteamanuensis Jan Kåre Bøe for veiledning rundt oppgavestruktur og innhold og overingeniør Gunnar Torp for informasjon og praktisk innsikt i produksjon og kostnader. Vi vil også takke Simen Myhre og Kristian Guren for informative befaringer i deres produksjonsfasiliteter og praktiske tips til løsninger. For faglige innspill og drøfting av løsninger ønsker vi å rette en takk til Thorvald-teamet, og spesielt maskiningeniør Øystein Tårnes Sund og Ph.D. stipendiat Lars Grimstad. I forbindelse med innhenting av produktinformasjon og priser er det flere parter som fortjener en takk og vi ønsker å trekke frem Linak Norge AS, Glamox AS, Gnist AS, Tingstad AS, ALANOD GmbH & Co. KG og Tibnor AS.

Ås, 14.05.2018

---

Per Einar Henriksen

---

Anders S Bækkedal



## Sammendrag

Som del av den pågående utviklingen innen autonome landbruksroboter ved Norges Miljø og Biovitenskapelige Universitet, har denne masteroppgaven tatt for seg utviklingen av to mekaniske innretninger tilpasset Thorvald II plattformen. Robotprosjektet ble opprettet i 2014, basert på et ønske om å innføre robotiserte kjøretøy som kan drive et effektivt presisjonsjordbruk uten ulempene tilknyttet jordpakking.

Hovedmålene for masterprosjektet har vært å utrede, utvikle og designe et mekanisk verktøyinnfestingssystem, og et multifunksjonelt verktøy som benytter ultrafiolette (UV) lyskvaliteter for bekjempelse av soppsykdommen meldugg i jordbær- og agurkkulturer dyrket i plasttunnel og veksthus.

Gjennom store deler av utrednings- og utviklingsprosessen har det blitt benyttet relevant produktutviklingsmetodikk for å komme frem til de presenterte løsningene. Utarbeidelsen av konsepter ble i høy grad systematisert ved bruk av Osbournes huskeliste (SCAMPERR). For seleksjon av ulike konsepter har løsningsalternativene blitt betraktet gjennom positive og negative egenskaper, og seleksjonen har blitt systematisert ved bruk av Pughs metode. Det ble fra oppstartsfasen lagt fokus på en integrert produktutviklingsprosess (IPD) gjennom involvering av fagpersoner for eksterne innspill, kostnadsestimering og ivaretagelse av produksjonsvennlighet. Digitale verktøy ble benyttet for 3D-modellering og styrkesimuleringer av konstruksjonene.

I prosjektets oppstartsfasen ble det gjennomført et litteraturstudie som omfattet UV-bestrålingens effekt på planter, tidligere arbeid utført på Thorvald plattformen, studie av eksisterende innfestingssystemer og metoder for dimensjonering. Videre ble prosjektplanleggingen utført for å kartlegge nødvendige arbeidsoppgaver og for å konkretisere prosjektmålene. Gjennom møter med oppdragsgiver og fagpersoner ble viktige produkttegenskaper identifisert, vurdert og systematisert i en produktspesifikasjon. Basert på denne ble konsepter utarbeidet og videre valgt, før forsøk ble utført for kartlegging av innstrålt effektfordeling fra UV-lyskilden. De utvalgte konseptene ble deretter videreutviklet, og valg av løsningsalternativer og komponenter ble gjort i henhold til produktspesifikasjonen og ønskede egenskaper som lav vekt, modularitet, enkelhet, robusthet og tilrettelegging for fremtidige autonome funksjoner. Dimensjonering ble gjennomført for kvalitetssikring av utvalgte komponenter, før den endelige produktarkitekturen ble fastsatt og designet. Avslutningsvis ble kostnader estimert, etterfulgt av en endelig vurdering av arbeidsprosess, måloppnåelse og resultat.

Prosjektet har resultert i design av et mekanisk innfestingssystem tilpasset Thorvald II plattformen som baserer seg på fire innfestingspunkter som kan justeres i høyde. Det har også blitt utviklet et justerbart og rørbasert UV-verktøy med lav vekt som kan tilpasses bestråling av jordbær- og agurkplanter i henholdsvis plasttunneler og veksthus.

Produktene antas å løse de tiltenkte oppgavene og hovedmålene ble i så måte ansett som løst. Videre arbeid for å ferdigstille produktene omhandler dimensjonering av det elektriske systemet og styringen av dette. I tillegg vil det være nødvendig å lage prototyper og gjennomføre testing i reelle forhold for å studere den dynamiske oppførselen til systemene. Det anbefales også å gjennomføre ytterligere forsøk for å optimere den innstrålte effektfordelingen fra UV-lyskilden.





## Abstract

As part of the ongoing development of autonomous agricultural robots at the Norwegian University of Life Sciences, this thesis has investigated practical solutions for the design of two mechanical devices adapted to the Thorvald II platform. The project was initially started in 2014, originating from the desire to introduce robotic vehicles that can execute efficient precision farming without the disadvantages associated with soil compaction.

The main objectives of the thesis have been to investigate, develop and design a mechanical device for tool attachment, as well as a multifunctional tool that uses ultraviolet (UV) light qualities for the treatment of fungal diseases such as powdery mildew, which occurs on strawberry and cucumber plant cultures.

Throughout the development process the use of product development methods have been useful in achieving the presented solutions. Osbourne's to-do list (SCAMPERR) was useful in systemizing the drafting of different concepts. The different concepts were evaluated by reviewing pros and cons, and the selections were systemized using Pugh's method. Throughout the project, focus was placed on conducting an integrated product development process (IPD) through professional involvement for external input, cost estimation and for guidance regarding production considerations. Software was used for computer aided design and finite element analysis.

A literature review was carried out in the initial phase of the project, covering the effects of UV radiation on plants, previous work performed on the Thorvald platform, a technological study of existing quick couplers and a review of relevant calculation methods. After a thorough assessment, the main objectives were defined, and the project planning was carried out for identification of the main tasks. Based on meetings with Saga Robotics and other professionals, key product characteristics were identified, evaluated, and systemized, resulting in a product specification. Based on this, different concepts were drafted and rated. Next, trials were conducted for mapping of irradiances from the UV source. Furthermore, the selected concepts were refined according to the product specification and highly rated properties such as weight, modularity, simplicity, durability, and facilitation for future autonomous functions. Calculations were carried out for quality assurance purposes, before the final design of the products were determined and modelled in 3D. Finally, costs were estimated, followed by a final review of the working process, the results, and the achievement of objectives.

The project has resulted in the design of a mechanical device for tool attachment adapted to the Thorvald II platform, with four attachment points that can be adjusted in height. Furthermore, an adjustable and lightweight UV tool has been designed for the purpose of radiation of strawberries and cucumbers in plastic tunnels and greenhouses respectively.

The products are expected to solve the intended tasks and the main goals were thus considered to be resolved. In order to finalize the products, future work remains, including dimensioning of the electrical system and the associated control system. Moreover, the prototypes must be constructed in order to study the dynamic behavior of the systems in real-life settings. Finally, it is recommended to conduct further trials for optimization of the radiated power distribution from the UV light sources.

# Innhold

<b>1. Introduksjon</b>	1
1.1 Bakgrunn	1
1.1.1 Thorvald-prosjektet	2
1.1.2 Verktøyinnfesting for Thorvald	3
1.1.3 UV-verktøy for Thorvald	4
1.2 Potensiale for fremtidens jordbruk	5
1.3 Oppdragsbeskrivelse	7
1.4 Problemstillinger og teknologiske flaskehals	7
1.4.1 Problemstillinger	7
1.4.2 Teknologiske flaskehals	8
<b>2. Prosjektplan</b>	9
2.1 Hovedmål	9
2.2 Delmål	9
2.3 Arbeidsplan og milepæler	9
2.4 Begrensninger	10
<b>3. Metodebeskrivelse</b>	12
3.1 Terminologi og begreper	12
3.1.1 Viktige begreper	12
3.1.2 Symboler og enheter	12
3.1.3 Beregningsformler	13
3.2 Metodebruk og løsningsverktøy	15
3.2.1 Integrert produktutvikling (IPD)	15
3.2.2 «Ni synsvinkler på et produkt»	16
3.2.3 Pughs metode	16
3.2.4 SCAMPERR (Osbornes huskeliste)	16
3.3 Programvare	17
3.4 Kvalitetssikring	17
3.4.1 Kilder	17
3.4.2 Eksterne undersøkelser	18
3.4.3 Beregninger og analyser	18
3.4.4 Forsøk	18
3.4.5 Forskrifter og standarder	18

3.5	Prosesstrinn	19
<b>4.</b>	<b>Teori og teknologiutredning</b>	<b>20</b>
4.1	Elektromagnetisk stråling	20
4.1.1	Ultrafiolett stråling	22
4.1.2	Refleksjon	23
4.1.3	UV-bestråling for bekjempelse av meldugg	25
4.2	Elektromotor	26
4.3	Materialer	28
4.3.1	Materialegenskaper	28
4.3.2	Metaller	29
4.3.3	Stål	30
4.3.4	Rustfritt stål	32
4.3.5	Aluminium	33
4.3.6	Korrosjon av metaller	34
4.4	Dimensjoneringsgrunnlag	34
4.4.1	Tillatt spenning og sikkerhet	35
4.4.2	Utmatting	36
4.4.3	Sveiseforbindelser	37
4.5	Teknologiutredning innfestingsmekanismer	38
4.5.1	Ett-trinns kobling	39
4.5.2	To-trinns kobling	40
4.5.3	Hurtigkobling for gravemaskin	41
<b>5.</b>	<b>Produktspesifisering</b>	<b>42</b>
5.1	Produktmålsetting	42
5.2	Rangering av viktige produktenskaper	42
5.2.1	Produktenskaper for verktøyinnfestingssystem	43
5.2.2	Produktenskaper for UV - verktøy	46
5.3	Metriske grensespesifikasjoner	50
5.3.1	Konfigurasjoner og eksisterende fysiske mål	50
5.3.2	Metriske grensespesifikasjoner for verktøyinnfestingssystem	52
5.3.3	Metriske grensespesifikasjoner for UV - verktøy	52
5.4	Regelverk og forskrifter	53
<b>6.</b>	<b>Konseptgenerering</b>	<b>55</b>

6.1 Verktøyinnfestingssystem _____	55
6.1.1 Tidligere arbeid _____	55
6.1.2 Eksisterende løsninger _____	55
6.1.3 Sammendrag av generelle vurderinger _____	56
6.1.4 Funksjonsalternativer, verktøyinnfestingssystem _____	57
6.1.5 Seleksjon av funksjonsalternativer _____	62
6.2 UV-verktøy _____	63
6.2.1 Tidligere arbeid _____	63
6.2.2 Eksisterende løsninger _____	64
6.2.3 Sammendrag av generelle vurderinger _____	64
6.2.4 Funksjonsalternativer, UV-verktøy _____	65
6.2.5 Seleksjon av funksjonsalternativer _____	68
<b>7. Forsøk: Kartlegging av UV-C effektfordeling _____</b>	<b>69</b>
7.1 Hensikt _____	69
7.2 Oppsett og metode _____	69
7.3 Forsøksresultater _____	72
7.4 Foreløpig diskusjon og konklusjon _____	73
<b>8. Videreutvikling og komponentseleksjon _____</b>	<b>75</b>
8.1 Videreutvikling av verktøyinnfestingssystem _____	75
8.1.1 Bæreramme _____	75
8.1.2 Braketter for innfesting til Thorvald-rammen _____	76
8.1.3 Høydejusteringsmekanisme _____	78
8.1.4 Hurtigfeste _____	81
8.1.5 Videreutviklingspotensiale med forslag alternative løsninger _____	82
8.2 Videreutvikling av UV-verktøy _____	83
8.2.1 Rammekonstruksjon med koblinger _____	83
8.2.2 Høydejustering _____	85
8.2.3 Lysmodul _____	87
8.2.4 Beskyttelsesplater _____	88
<b>9. Dimensjonering _____</b>	<b>89</b>
9.1 Beregningsgrunnlag _____	89
9.2 Dimensjonering av verktøyinnfestingssystem _____	90
9.2.1 Statiske krefter og momenter _____	90

9.2.2 Boltberegning i brakettene	90
9.2.3 Høydejusteringsmekanisme	93
9.3 Dimensjonering av UV-verktøy	101
9.3.1 UV-verktøy for jordbærkulturer	101
9.3.2 UV-verktøy for agurkkulturer	103
<b>10. Produktarkitektur og konseptdesign</b>	<b>104</b>
10.1 Produktarkitektur verktøyinnfestingssystem	104
10.1.1 Sammenstilling	104
10.1.2 Design av hovedelementer	106
10.1.3 Komponenter	107
10.2 Produktarkitektur UV-verktøy	108
10.2.1 Sammenstilling	108
10.2.2 Design av hovedelementer	110
10.2.3 Komponenter	111
10.2.4 Illustrasjon av funksjoner	112
<b>11. Produksjonskostnader</b>	<b>113</b>
11.1 Kostnadskalkyle for prototype	113
11.2 Kostnadskalkyle for småskala serieproduksjon, UV-verktøy	114
<b>12. Prosessevaluering og diskusjon</b>	<b>116</b>
12.1 Konseptutviklingsarbeidet og forbedringspotensialer	116
12.2 Designrevisjon, produksjon og kostnadsreduksjon	117
<b>13. Konklusjon</b>	<b>119</b>
13.1 Resultater	119
13.2 Anbefalinger	120
13.3 Videre arbeid	121
<b>14. Kilder</b>	<b>123</b>
<b>15. Vedlegg</b>	<b>127</b>

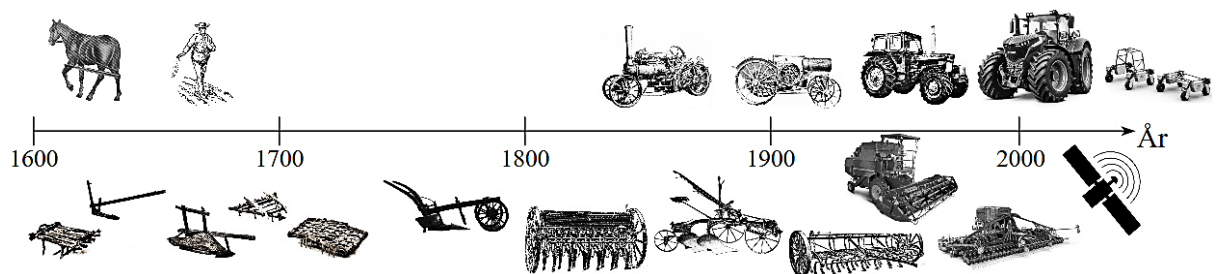


# 1. INTRODUKSJON

*Innledningsvis gis en generell bakgrunn for oppgaven fra et historisk perspektiv, inkludert tidligere arbeid relatert til robotplattformen Thorvald. Videre påpekes fremtidig potensiale for automatisering innen jordbruket, etterfulgt av en oppdragsbeskrivelse og aktuelle problemstillinger tilknyttet oppgaven.*

## 1.1 BAKGRUNN

Et av menneskehetens mest sentrale utfordringer gjennom tidene har vært tilgang til en stabil og bærekraftig matforsyning. Gjennom årtusener har mennesket ved prøving og feiling lært seg nye måter for å utnytte de tilgjengelige ressursene fra naturen. Med tiden har dette ført til en betydelig effektivisering av matproduksjonen. Jordbrukets opprinnelse kan sies å ha utspring fra Midtøsten, allerede ved slutten av den siste istiden, for om lag 10 000 – 12 000 år siden. Fra jordbrukets eldste fase finner man svedjebruket, omtalt som et av de tidligste driftsformene. Denne metoden gikk ut på at skog ble brent og hugget ned for å danne et næringsrikt grunnlag for dyrket mark. Ettersom næringen i jorda ble oppbrukt, var bonden nødt til å gi opp åkeren og flytte til et nytt sted for å gjenta ryddingsprosessen. I senere tid fant en ut at husdyravfall kunne brukes som gjødsel for å tilføre ny næring til åkeren. På den måten kunne en nå praktisere et stasjonært jordbruk, hvor samme åkerareal ble utnyttet over lengre tid. Sammenliknet med i dag var driften svært manuell og tidkrevende, med bruk av primitive håndredskap. En betydelig intensivering i jordbruket fant sted under jernalderen, spesielt i løpet av de første århundrene e.Kr. Grunnet store teknologiske framskritt innen utvinning av jern til jordbruksredskap, observerte man nå en betydelig økning av jordbruksarealet. I takt med en økende befolkning skjedde det med tiden stor faglig utvikling og nye plantearter spredte seg over landegrensene ettersom oppdagelsesreisende utforsket nytt land. Gjennom den industrielle revolusjonen kom nytt utstyr som igjen førte til et mer avansert jordbruk. Kravet til produktivitet fortsatte å øke og i løpet av 1900 – tallet så man store tekniske nyvinninger. Med innføring av traktorteknologi, moderne redskaper, kunstgjødsel og plantevernmidler skulle man sikre en kraftig økning i matproduksjonen med et avtagende behov for arbeidskraft. Mekaniseringen innen jordbruket førte til at arbeid som før i tiden krevde uker, nå kunne utføres på en dag [1].



*Figur 1.1: Tidslinjen illustrerer utviklingen av jordbruksredskap og maskiner i tidsperioden fra 1600-tallet til i dag.*

Dagens industrijordbruk krever stadig større maskiner og redskap for å svare til matbehovet fra en økende verdensbefolkning. Ettersom vekten på maskin og utstyr øker, vil også marktrykket som påføres underlaget øke. Jordpakking som følge tunge landbruksmaskiner utpekes som en

direkte kilde til reduserte avlinger. Forsøk fra grasmark i Norge viser en avlingsnedgang på 2 – 20 % på areal utsatt for traktorer med vekt mellom 1,8 – 3,3 tonn [2]. Nedgangen er spesielt stor dersom underlaget er vått, noe som er problematisk dersom vi får et fuktigere klima. NIBIO hevder at jordbruket stod for 8,4 % av klimagassutslippene, angitt i CO<sub>2</sub> ekvivalenter, fra norsk territorium i 2016 [3]. Tatt i betraktning at norsk jordbruk i dag er en av verdens mest klimasmarte matprodusenter, er det et stort potensial for videre utslippskutt internasjonalt. Innen mange sektorer jobbes det intenst med tiltak og utvikling av teknologi for å redusere klimagassutslipp. Til tross for mer energieffektive maskiner og fremskritt innen digitale løsninger og navigasjonssystemer for høyere presisjon, har det hittil skjedd forholdsvis lite innen mekanisk utvikling til landbruket. Prinsippene er grovt sett de samme selv om størrelsen har økt og teknologien har utviklet seg. Situasjonen slik den fremstår i dag, med utsikter om stadig befolkningsøkning, endring av klima og utfasing av fossile energikilder, krever nytenking og smarte teknologiske løsninger for å løfte jordbruket til en fremtidsrettet og bærekraftig næring.

### 1.1.1 THORVALD-PROSJEKTET

Professor Pål Johan From og fire masterstudenter startet i 2014 et prosjekt hvor de utviklet og bygget landbruksroboten Thorvald I. Prosjektet hadde utspring fra NMBU, og var basert på et tydelig behov fra norske matprodusenter. Bakgrunnen for initiativet var de ugunstige effektene tilknyttet den stadig økende bruken av store landbruksmaskiner for oppnåelse av høyere effektivitet i jordbruket. Målsetningene for prosjektet var å bygge en liten, sterk og elektrisk drevet robot som autonomt kunne utføre et bredt spekter av oppgaver relatert til jordbruk. Hensikten var at den på lang sikt skulle kunne ta over flere av oppgavene som i dag blir utført av de tradisjonelle og tunge landbruksmaskinene. Roboten ble utstyrt med sensorer og navigasjonssystemer for å kunne jobbe presist hele døgnet, med minimalt tilsyn fra mennesker. Prisen skulle være lav, noe som understøttet baktanken om at flere slike roboter måtte samarbeide for å opprettholde effektiviteten tilsvarende dagens maskiner.

Hovedfokuset i 2015 var videreutvikling og design av nye verktøy til robotplattformen. To år etter byggingen av Thorvald I, ble det i 2016 designet og bygget en ny modifisert versjon av roboten. Denne ble kalt Thorvald II, og var et resultat av arbeid utført i samarbeid med en ny gruppe masterstudenter. Basert på erfaringene fra den første versjonen, var det nå ønskelig å gjøre roboten enda mer modulær slik at den kan konfigureres for de ulike tiltenkte arbeidsoppgavene. Med det nye systemet er det altså mulig å benytte seg av basismoduler og standard håndverktøy for å lage versjoner av roboten slik man selv ønsker. En robot som eksempelvis er satt sammen for å kjøre utendørs med firehjulstrekk, kan enkelt rekonfigureres til innendørs bruk mellom smale rader i et veksthus. Med andre ord tilrettelegger dette systemet for fleksible robotmodifikasjoner med lav vekt, lav kost og høy kvalitet. Standardkonfigurasjonen er utstyrt med drift og individuell styring på alle fire hjul, den har en egenvekt på under 200 kg og har mulighet for nyttelast på opptil 200 kg [4].



Thorvald ble etter hvert involvert i prosjektene UV-Bær og UV-Bio, som er et samarbeid mellom flere bedrifter og forskningsinstitusjoner. Arbeidet har hittil gått ut på bekjempelse av plantesykdommer ved bruk av ultrafiolett stråling, i tillegg til undersøkelser tilknyttet effekten dette har på den biologiske bekjempelsen av skadedyr i veksthus og plasttunneler. For videre forskning og utvikling av Thorvald plattformen har det blitt mottatt finansiell støtte fra blant annet Innovasjon Norge, Norges forskningsråds FORNY-program og Innovate UK. Konseptet er i stadig utvikling og gjennom videre samarbeid mellom NMBU og universiteter i Brasil og i Lincoln, ser en på nye muligheter og anvendelser for det fremtidsrettede konseptet.



*Figur 1.2: Illustrasjon av ulike versjoner tilknyttet Thorvald II plattformen. [Saga Robotics]*

Sammenliknet med oppstartfasen av prosjektet, har Thorvald plattformen nå vokst seg betraktelig større. Med første salg i 2016, opprettelse av Saga Robotics som leverandør av robotplattformen og første kommersialiseringsprosjekt i 2017, er konseptet nå godt posisjonert i det internasjonale kappløpet om utviklingen av fremtidsrettet jordbruksteknologi. Masterprosjektene for våren 2018 omhandler utvikling av nye verktøy tilpasset Thorvald plattformen. Andreas Xepapadakis Isaksen og Nickolas Grelland jobber med graskutting mens undertegnende jobber med innfestingssystem for verktøy og ny versjon av UV-verktøy.

### 1.1.2 VERKTØYINNFESTING FOR THORVALD

Innfestingssystemer har vært en nødvendighet helt siden tiden da verktøy og redskap ble slept etter trekkdyr. Etter hvert som de første fungerende traktorene var en realitet brukte en enkle trekkroker for tilkobling av redskapene. Ettersom størrelsen på redskapen gikk opp, økte også vekten på traktorene blant annet for å oppnå tilstrekkelig kontakt med underlaget. På 1930-tallet introduserte Harry Fergusson et nytt revolusjonerende innfestingssystem for traktorer som sørget for at trekkraften ble konvertert til trykkraft på bakhjulene, noe som medførte et betydelig bedre grep til underlaget. Oppfinnelsen ble i senere tid standardisert internasjonalt og er i dag det vi kjenner som et 3-punktsfeste [5]. Med dagens mangfold av maskiner har det blitt innført en rekke ulike systemer for innfesting slik at tilkobling kan skje hurtig, sikkert og presist. Systemer for innfesting er diskutert mer inngående i kapittel 4.4.

Historien har vist at det er avgjørende med et standardisert system for innfesting på tvers av forskjellig redskap. Gitt at Thorvald-plattformen i fremtiden skal være kompatibel med ulike verktøy, er det et sentralt utviklingstrinn å innføre et slikt system. Hittil har det blitt gjort individuelle tilpasninger og modifikasjoner for innfesting av verktøy på Thorvald, og det er nå ønskelig å utvikle et standard system for enkel tilkobling. Designet av denne tilkoblingsplattformen bør tilrettelegge for at verktøy i fremtiden kan kobles av og på autonomt.

### 1.1.3 UV-VERKTØY FOR THORVALD

Det har gjennom flere år blitt forsket på muligheten for å erstatte kjemiske sprøytemidler med bruk av ultrafiolett stråling i den hensikt å motvirke bestemte plantesykdommer. Prosjektet UV-Bær hadde oppstart i begynnelsen av 2015, og hadde til hensikt å undersøke effekten av UV-B mot soppsykdommer i plasttunneler og veksthus. Mer spesifikt har forskningsgruppen ved bruk av UV-B og bestemte lyskvaliteter studert potensialet for bekjempelse av soppsykdommen meldugg. Forsøkene ble utført i forskjellige plantekulturer, eksempelvis agurk, tomat, jordbær, roser og kryddervekster. Resultater har vist at denne behandlingen har gitt like god eller bedre bekjempelse, sammenliknet med de tradisjonelle sprøytemidlene. En reduksjon av melduggangrep på mellom 70-90 % i forhold til ubehandlet plantekultur har blitt registrert etter eksponering for UV-B stråling [6] [7].



*Figur 1.3: Smal versjon av Thorvald II påmontert UV-bestrålingsverktøy under testing hos Norske Jordbær DA v/ Simen Myhre. [Saga Robotics]*



*Figur 1.4: Agurkplanter dyrket i veksthus hos Guren Gartneri AS. Skinnesystemet som roboten benytter er plassert mellom planteradene. [Kristian Guren]*

Arbeidet utført av den norske forskningsgruppen har fått internasjonal oppmerksomhet, og det observeres stor interesse for teknologiske løsninger som kan redusere bruken av kjemiske sprøytemidler. utfordringer forbundet med resistens, miljøbelastninger og dårlig effekt av sprøyting, kan forhåpentligvis erstattes med nye behandlingsmåter i fremtiden. Dette åpner muligheten for å ta i bruk mer produktive plantearter og dermed øke effektiviteten til produsentene. Ved siden av å oppnå en positiv miljøeffekt og reduserte sprøytekostnader kan man potensielt ha en større sikkerhet for vellykkede avlinger [6].

Thorvald har i løpet av prosjektperioden blitt brukt som verktøyplattform for UV-behandling. Hos Norske Jordbær DA har roboten autonomt kjørt mellom jordbærradene i plasttunnel med verktøy som justerer UV-lampene for ønsket dosering, illustrert i figur 1.3. Hos Guren Gartneri AS ble roboten tilpasset behandling av veksthusagurk, hvor den også her har tatt seg rundt autonomt ved bruk av et skinnesystem mellom radene, vist i figur 1.4. Det har altså blitt utviklet to forskjellige UV-verktøy som er tilpasset to forskjellige modifikasjoner av Thorvald. Disse verktøyene har hovedsakelig fungert som prototypeversjoner for å teste konseptet, og det er nå ønskelig å designe en oppdatert versjon basert på erfaringene fra de foregående variantene. Det

skal derfor sees på muligheten for å videreutvikle et multifunksjonelt UV-verktøy som kan fungere på tvers av ulike plantekulturer.

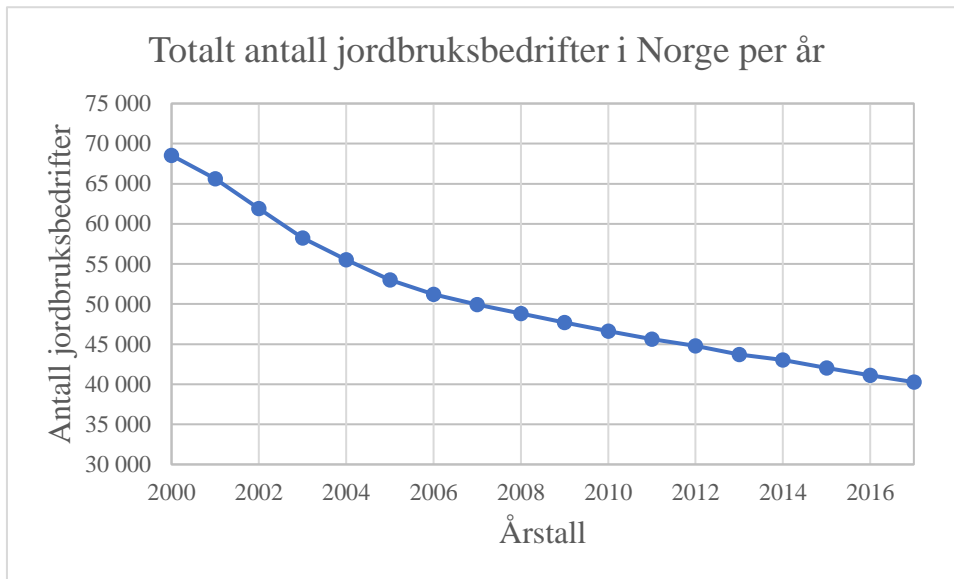
### 1.2 POTENSIALE FOR FREMTIDENS JORDBRUK

I dagens samfunn snakkes det mye om den fjerde industrielle revolusjon, også omtalt som Industri 4.0. Digitalisering og robotteknologi er et satsingsområde for mange næringer og en kan potensielt forvente store endringer dersom utviklingen fortsetter i samme hastighet som i dag. Det er mange indikatorer for at dette også bør omfatte måten vi skal produsere mat på i fremtiden.

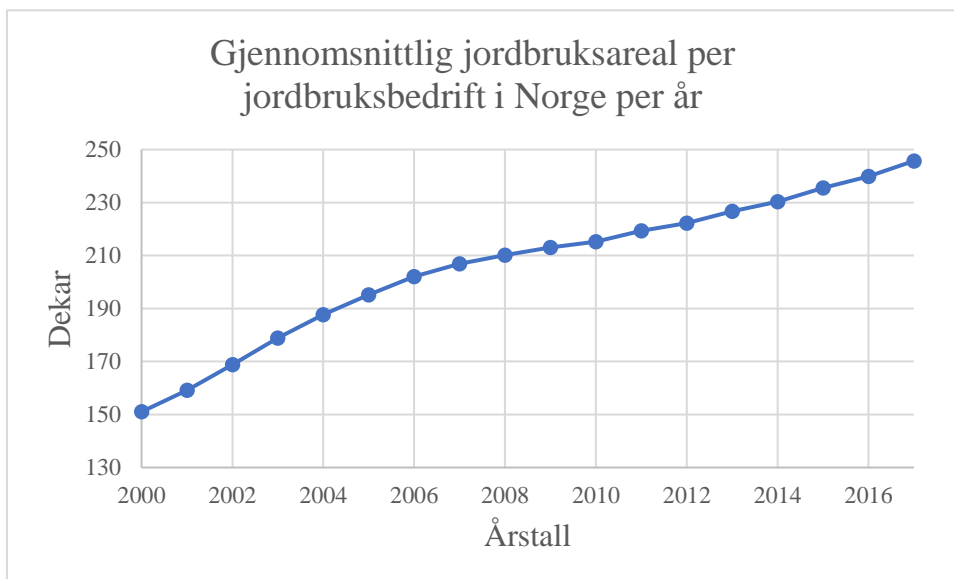
Det observeres i dag et markant skille mellom de som ønsker mer automatisering, og de som mener at dette vil medføre uheldige konsekvenser og færre jobber. Skeptikere kan argumentere for at det teknologiske løftet i jordbruket vil gjøre det vanskeligere for produsentene. Bøndene vil være nødt til å endre rutiner og opparbeide seg ny kompetanse. Avsidesliggende områder vil trenge oppgradert teknisk infrastruktur for å kunne drifte systemene og sikkerheten rundt innsamlet data må ivaretas. utfordringer tilknyttet lovverk, sikkerhet og standardiserte løsninger på tvers av ulike leverandører er definitivt sentrale temaer som bør løses i forkant av denne betydelige oppgraderingen [8].

For å opprettholde dagens produktivitet i jordbruket har bruken av kunstgjødsel og sprøytemidler spilt en svært sentral rolle. I 2013 ble 90 % av jordbruksarealet i Norge gjødslet minst én gang [9]. Tilførselen av plantenæring er essensiell for vekst, men tendenser av overforbruk har vist seg å være til belastning for miljøet i form av forurensende avrenning til grunnvann, bekker, elver og vassdrag. Dersom en ser bort ifra eng og beite, ble 94% av det konvensjonelt drevne jordbruksarealet i Norge i 2014 behandlet med kjemiske sprøytemidler minst én gang [10]. Tallene fra rapporten til SSB omfatter vekster som utgjør ca. 97 % av det totale konvensjonelt drevne jordbruksarealet i Norge i 2014. Med teknologien som nå er i fremmarsj, diskuteres økning av presisjonsjordbruk som en løsning for reduksjon av disse plantemidlene. Ved bruk av sensorer for overvåkning av avlinger, bildeanalyse, big data og autonome systemer kan jordbruksdriften i fremtiden optimaliseres og potensielt transformeres til en høyteknologisk næring.

Dersom en studerer utviklingen i jordbruket, ser en tydelige nasjonale og globale trender. Fellestrekkene er nedgang i antall jordbruksbedrifter med en økning i jordbruksareal per bedrift [11]. Figur 1.5 og 1.6 viser trendene i Norge [12] [13]. Statistikken underbygger dermed en utvikling som er i favør for automatisering av jordbruket i fremtiden. Dersom jordbruksbedriftene skal ha kapasitet til bearbeiding av et stadig økende areal, uten bruk av store maskiner, er en nødt til å ta i bruk nye metoder for å opprettholde produktiviteten.



Figur 1.5: Diagrammet viser utviklingen i antallet jordbruksbedrifter i Norge. Statistikken fra SSB omfatter data fra år 2000 til år 2017 og illustrerer en jevn nedgang.



Figur 1.6: Diagrammet viser utviklingen i gjennomsnittlig jordbruksareal per jordbruksbedrift i Norge. Statistikken fra SSB omfatter data fra år 2000 til år 2017 og illustrerer en jevn økning.

Det kan hevdes at det er på tide å se seg tilbake og hente inspirasjon fra jordbruket slik det ble utført for flere hundre år siden, med lette verktøy og individuell presisjonsbearbeiding. Forskjellen sammenliknet med datidens drift vil nå være et enormt løft innen effektivitet, kunnskap og presisjon, for å nevne noe. Det ligger et enormt potensiale i idéen om hvordan et titalls roboter kan samarbeide hele døgnet og sørge for at hver eneste kvadratmeter med dyrket mark får optimal behandling.

### 1.3 OPPDRAGSBESKRIVELSE

Hensikten med masterprosjektet er videreutvikling og design av et multifunksjonelt UV-verktøy, inkludert et tilhørende standardisert innfestingssystem for tilkobling av fremtidige verktøy på Thorvald II – plattformen. Dette omfatter utredning av produktalternativer, så vel som detaljert design, dimensjonering og valg av komponenter.

Innføringen av et standardisert verktøyfeste skal sørge for at fremtidige lette verktøy kan kobles til robotplattformen hurtig og presist. For at Thorvald II i fremtiden skal kunne operere autonomt, må løsningen tilrettelegge for dette. Det er mange essensielle faktorer som må tas hensyn til og disse vil beskrives gjennom rapporten. Thorvald II trenger på ingen måte å bli begrenset til det nye innfestingssystemet, da det i første omgang kan benyttes som en grunnplattform for videre utvikling. Løsningen må inneha en funksjon for tilkobling av verktøy fra både over- og undersiden. Det er i tillegg ønskelig med en løfteanordning for å heve verktøy opp fra underlaget ved transport. Det vil derfor være relevant å studere eksisterende løsninger som tilrettelegger for hurtig verktøybytte og løftemekanismer.

UV-verktøyet skal tilrettelegge for behandling av «table-top» jordbær i plasttunnel og agurk i veksthus. Under utviklingen skal ulike fagpersoner inkluderes for å ivareta et optimalt design med ønskede produktegenskaper. Det vil også være en stor fordel dersom prinsippet om modularitet ivaretas for å imøtekomme et allsidig bruksområde og tilrettelegge for større grad av serieproduserte komponenter. Produsentene som dyrker de aktuelle plantekulturene må involveres tidlig for innspill vedrørende produktspesifikasjoner. Hovedfokuset skal være det mekaniske og maskintekniske, da dette forløper seg som en produktutviklingsoppgave. Det er svært relevant å samarbeide med aktuelle forskningsmiljøer på NMBU som også er internasjonalt anerkjent innen UV-behandling av planter. Forsøk gjort i samarbeid med disse fagpersonene, samt resultater og essensielle designvalg skal presenteres gjennom rapporten.

Under utviklingen skal det være fokus på lav vekt og lav pris, men dette kan ikke gå på bekostning av robustheten og kvaliteten. Design og materialvalg må ta hensyn til antatte belastningssituasjoner og det skal tilstrebes enkelhet i løsningsalternativene. Det stilles store krav til tidsbruk, struktur og fremgang for å nå målene innen prosjektets varighet på om lag fire måneder. Det er ønskelig å klargjøre for prototyping innen denne tidsrammen.

### 1.4 PROBLEMSTILLINGER OG TEKNOLOGISKE FLASKEHALSER

For å utvikle et fornuftig og optimalt produkt er det hensiktsmessig å utarbeide en oversikt over problemstillinger og teknologiske flaskehalser. Dette gjør en oppmerksom på eventuelle utfordringer tilknyttet prosjektet og egenskaper produktene burde tilfredsstille.

#### 1.4.1 PROBLEMSTILLINGER

Problemstillingene presentert i tabell 1.1, kan betraktes som løsbare. Disse vil bli tatt spesielt hensyn til i den videre utviklingen av løsninger.

Tabell 1.1: Identifiserte problemstillinger for UV-verktøy og verktøyinnfesting.

Problemstillinger	Beskrivelse	
Implementering	Verktøyfeste	Implementering på dagens robotplattform uten å oppta for mye plass.
	UV-verktøy	Tilpasning for ulike produksjonsforhold.
Funksjon	Verktøyfeste	Utstyr skal kunne monteres og fastlåses enten over eller under roboten. Det kan i tillegg være nødvendig med en hevefunksjon.
	UV-verktøy	Modifikasjonsfunksjon for å tilfredsstille ulike plantekulturer og ulik størrelse gjennom vekstperioden.
Utforming	Verktøyfeste	Tilretteleggelse for fremtidig autonom tilkobling av verktøy.
	UV-verktøy	Utformingen bør sørge for optimal innstråling.
Konstruksjon	Verktøyfeste	Solid med overføring av krefter til rammekonstruksjonen.
	UV-verktøy	Stivhet i konstruksjonen og lav vekt

#### 1.4.2 TEKNOLOGISKE FLASKEHALSER

De teknologiske flaskehalsene kan, i motsetning til problemstillingene, føre til begrensninger for masterprosjektet, og føre til at ønskede egenskaper ikke blir oppfylt.

##### Verktøyinnfestingssystem:

- Sammenkobling av strøm og signaler må skje i samme operasjon som verktøypåkobling dersom det i fremtiden skal gå autonomt.
- Løftekapasitet kan begrenses av strømtilførselen til roboten.
- Dersom det i fremtiden skal tilkobles tunge bearbeidingsverktøy kan dagens rammekonstruksjon på Thorvald inneha for lav mekanisk styrke til å tåle belastningene.
- Tilgjengelig plass på roboten kan begrense potensiell løftehøyde.
- Robotens bæreevne og tilgjengelig trekraft kan begrense fremtidige tyngre verktøy.

##### UV-verktøy:

- UV-strålingen treffer kun de ytterste plantebladene slik at de indre plantedelene blir skjermet for innstrålingen.
- Utfordringer tilknyttet innstrålingen kan mest sannsynlig ikke løses med en mekanisk innretning eller en vifte da dette sprer plantesykdommen [14].
- Dimming av lysrør kan ikke erstatte avstandsregulering fordi dimmefunksjon kun kan gjøres med lysrør på 40W og lavere, ifølge Aruppillai Suthaparan.
- For store individuelle forskjeller i produksjonsanlegg kan gjøre verktøyet for komplekst dersom det skal kunne tilpasses alle forhold.
- Innstrålt energidose avhenger av kjørehastigheten til roboten.
- Egnede refleksjonsmaterialer som gir tilstrekkelig refleksjon av UV-stråler.

## 2. PROSJEKTPLAN

*Dette kapittelet definerer målsetningene ved prosjektet, uttrykt gjennom hovedmål og delmål. Videre presenteres sentrale milepæler og arbeidsplanen for prosjektet, etterfulgt av begrensninger for arbeidet.*

### 2.1 HOVEDMÅL

Med bakgrunn i oppdragsbeskrivelsen, ble det valgt et todelt hovedmål.

Å utrede, utvikle og designe:

- Et mekanisk innfestingssystem for verktøy tilpasset Thorvald II plattformen som tilrettelegger for fremtidig automatisk verktøybytte.
- Et multifunksjonelt verktøy som benytter ultrafiolette lyskvaliteter for bekjempelse av soppsykdommen meldugg i plantekulturene jordbær og agurk, som er tilpasset innfestingssystemet på Thorvald II plattformen

Alle trinn i prosjektarbeidet skal dokumenteres gjennom masterrapporten og legge til rette for tidligrealisering i form av en prototype.

### 2.2 DELMÅL

Delmålene har til hensikt å strukturere og gi en bedre oversikt over arbeidsoppgavene. Med grunnlag i hovedmålene ble det utarbeidet følgende delmål:

- Identifisere og sette seg inn i relevant litteratur, teori og eksisterende løsninger for innfestingsmekanismer, hurtigfester, UV – teknologi og Thorvald-plattform.
- Konkretisere prosjektmål, utarbeide prosjektplan og definere metodebruk.
- Definere produktspesifikasjoner og krav basert på teori og eksterne innspill.
- Gjennomføre konseptutvikling og konseptvalg basert på forsøk og evalueringskriterier.
- Utarbeide produktarkitektur, konseptdesign og valg av materialer og komponenter.
- Kostnadsestimering og planlegging av prototyping.
- Ferdigstille rapport og presentere arbeidet

### 2.3 ARBEIDSPLAN OG MILEPÆLER

Delmålene for prosjektet gjenspeiles i milepælene som videre fremgår i arbeidsplanen.

*Tabell 2.1: Datasatte milepæler. Milepælene er illustrert i tabell 2.2.*

Milepæl	Dato
Litteraturstudie og teori er fullført	01.03.2018
Produktspesifikasjon er komplett og oppstartsmøter er gjennomført	10.03.2018
Konseptvalg er utført	09.04.2018
Forsøk for optimal UV – innstråling er gjennomført	15.04.2018
Dimensjonering, materialvalg, design og modellering er ferdigstilt	20.04.2018
Ferdigstilling av masterprosjekt og innlevering av rapport	15.05.2018

## Prosjektplan

Tabell 2.2: Arbeidsplan for prosjektet med nummererte milepæler fra tabell 2.1.

Aktivitet	Måned														
	Januar			Februar			Mars			April			Mai		
<b>Innledende arbeid</b>															
Litteraturstudie															
Teori						1									
<b>Prosjektplanlegging</b>															
Prosjektplan															
Metodebruk															
<b>Produktspesifisering</b>															
Konseptutvikling															
Konseptgenerering															
Konseptvalg															
Forsøk															
<b>Produktarkitektur</b>															
Dimensjonering, materialer															
Design og modellering															
<b>Kostnadsestimering</b>															
<b>Leverer rapport</b>															
<b>Presentere arbeidet</b>															13. Juni

## 2.4 BEGRENSNINGER

Grunnet tidsrammen for masterprosjektet, er det nødvendig å sette konkrete begrensninger for arbeidet. Begrensningene tilknyttet de to ulike produktene er som følger:

Begrensninger for verktøyyinnfestingssystem:

- Det vil ikke utføres dynamiske beregninger eller simuleringer. Det vil kun bli tatt utgangspunkt i kontroll av de hardest belastede komponentene.
- Det vil ikke bli laget en fungerende prototype innen tidsrammen.
- Det vil ikke bli gjort endringer på dagens robotplattform i forbindelse med implementering av innfestingssystemet for verktøy.
- Det vil ikke utføres en livsløpsanalyse (LCA).
- Systemet skal ikke designes for serieproduksjon da det per i dag er i en prototypefase.
- Systemet vil ikke bli dimensjonert for tunge bearbeidingsverktøy.

Begrensninger for UV-verktøy:

- Design av elektriske kretser og styring tilknyttet produktene skal ikke utføres. Det vil ikke bli designet ekstra batteriinnkapslinger.



- Det vil ikke bli vektlagt å gjøre forskning på effekten UV-lys har på plantekulturer da det i stedet er fokus på utvikling av det mekaniske. Oppdaterte forskningsresultater vil bli benyttet for diskusjon rundt UV-strålingens effekt for sykdomsbekjempelse på planter.
- Det vil ikke bli gjort vurderinger vedrørende bruk av LED teknologi for bestråling.
- Det skal ikke utføres simuleringer eller matematisk modellering av stråling eller refleksjon.
- Det vil ikke bli gjort en frekvensanalyse for å studere svingninger i systemet.
- Det vil ikke vurderes andre plantekulturer enn jordbær og agurk.
- Det vil ikke utvikles en fungerende prototype innen tidsrammen.

### 3. METODEBESKRIVELSE

Metodebeskrivelsen tar for seg terminologi og beskrivelse av ulike produktutviklingsmetodikk benyttet i arbeidet. Det presenteres en systematisk oversikt over begreper, symboler og utvalgt formelverk, i tillegg til informasjon vedrørende relevante forskrifter og andre tekniske hjelpemidler.

#### 3.1 TERMINOLOGI OG BEGREPER

I dette delkapittelet blir viktige begreper, symboler, enheter og formler beskrevet.

##### 3.1.1 VIKTIGE BEGREPER

Viktige begreper benyttet i rapporten er presentert i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Beskrivelse av spesifikke begreper benyttet i rapporten.

Begrep	Beskrivelse
UV-verktøy	Verktøy som avgir ultrafiolett stråling
CAD	Computer Aided Design
FEM	Finite Element Method
Irradians	Innstrålingstettheten som angir styrken på elektromagnetisk stråling som treffer en overflate. Irradians er angitt med enhet $W/m^2$
Cheek plates	Forsterkningselementer benyttet for å styrke svake tverrsnitt. Elementene gir større kontaktflate og kan både sveises eller boltes fast.
CNC-maskin	En maskineringsmaskin som benytter databasert numerisk styring (Computer Numerical Control)
CANbus	Kommunikasjonsnettverk (Controller Area Network)
a-mål	Angir dimensjonerende tykkelse for en sveiseforbindelse
Hurtigfeste	Innfestingssystem som kan kobles til og fra hurtig
SF	Sikkerhetsfaktor benyttet i dimensjonering
Drivmodul	Spesifikk Thorvald II modul styrer og driver hjulene
Table-top jordbær	Jordbærplanter dyrket i kasser hevet opp fra underlaget

##### 3.1.2 SYMBOLER OG ENHETER

Symboler og tilhørende enheter brukt i rapporten vises i tabell 3.2.

Tabell 3.2: Oversikt over symboler brukt i rapporten med beskrivelse og SI-senhet.

Symbol	Beskrivelse	Enhet (SI)
$L, l$	Lengde	mm
$A$	Areal	$mm^2$
$A_s$	Boltareal	$mm^2$
$A_w$	Sveiseareal, basert på a-mål	$mm^2$
$F$	Kraft	N
$g$	Gravitasjonskonstant	N/kg

Tabell 3.2 (fortsettelse): Oversikt over symboler brukt i rapporten med beskrivelse og SI-senhet.

Symbol	Beskrivelse	Enhet (SI)
$V$	Skjærkraft	N
$V_{RES}$	Resultant av skjærkrefter	N
$M$	Moment	Nm
$\sigma$	Strek- og trykkspenning (normalspenning)	MPa
$\tau$	Skjærspenning	MPa
$U$	Elektrisk spenning	Volt
$W$	Tverrsnittsmodul (motstandsmoment)	mm <sup>3</sup>
$I$	Annet arealmoment	mm <sup>4</sup>
$\alpha, \theta$	Vinkelangivelser i grader (°)	-
$i$	Utvekslingsforhold	-
$r$	Radius	mm
$d$	Diameter	mm
$a$	a-mål for sveiseforbindelse	mm
$\sigma_w$	Ekvivalent spenning, sveis	MPa
$\Delta\sigma_w$	Ekvivalent spenningsvidde, sveis	MPa
$\Delta\sigma_{w,n}$	Nominell spenningsvidde, sveis	MPa
$\sigma_{\perp}$	Normalkomponent, strekk- og trykkspenning, sveis	MPa
$\tau_{\parallel}$	Parallellkomponent, skjærspenning, sveis	MPa
$\tau_{\perp}$	Normalkomponent, skjærspenning, sveis	MPa
$\Delta\sigma_D$	Utmattingsgrense	MPa
$\sigma_{till}$	Tillatt normalspenning	MPa
$\tau_{till}$	Tillatt skjærspenning	MPa
$f_u$	Bruddgrense	MPa
$f_y$	Flytegrense	MPa
$m$	Masse	kg

### 3.1.3 BEREGNINGSFORMLER

Fundamentalt formelverk benyttet for håndberegninger er sammenfattet i tabell 3.3.

Tabell 3.3: Fundamentale formler benyttet for håndberegninger i rapporten.

Formel	Beskrivelse	Indeks
$\sum M = 0$	Likevektbetraktning for momenter	(1)
$a = \sqrt{b^2 + c^2}$	Pythagoras	(2)
$\tan(\alpha) = \frac{\text{motstående katet}}{\text{hosliggende katet}}$	Tangens	(3)

$\cos(\alpha) = \frac{\text{hosliggende katet}}{\text{hypotenus}}$	Cosinus	(4)
--	---------	-----

Tabell 3.3 (fortsettelse): Fundamentale formler benyttet for håndberegninger i rapporten.

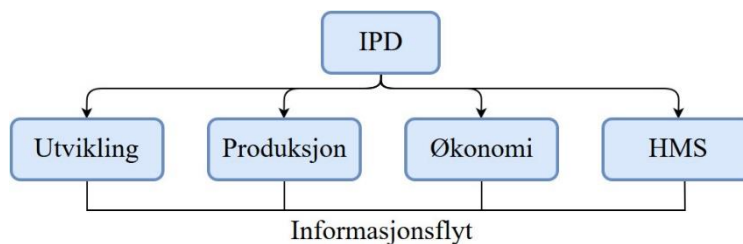
Formel	Beskrivelse	Indeks
$\sin(\alpha) = \frac{\text{motstående katet}}{\text{hypotenus}}$	Sinus	(5)
$\tau = \frac{V}{A} = \frac{F}{A}$	Skjærspenning	(6)
$\sigma_{till} = \frac{f_y}{SF}$	Tillatt normalspenning mot flyt	(7)
$\tau_{till} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot SF}$	Tillatt skjærspenning mot flyt	(8)
$i = \frac{\text{drivende komponent}}{\text{drevet komponent}}$	Utvekslingsforhold	(9)
$\sigma = \frac{F}{A}$	Normalspenning	(10)
$\tau_{\parallel} = \frac{F}{A}$	Parallellkomponent, skjærspenning, sveis	(11)
$\Delta\sigma_w = \sqrt{\Delta\sigma_{\perp}^2 + \Delta\tau_{\perp}^2 + 0,2\Delta\tau_{\parallel}^2}$	Ekvivalent spenningsvidde, sveis	(12)
$\sum F = 0$	Likevektbetraktning for krefter	(13)
$\sigma_b = \frac{M_b}{W}$	Bøyespenning	(14)
$EIy'' = -M(x)$	Macaulays likning	(15)
$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}$	Normalkomponent, skjær- og normalspenning, sveis	(16)
$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$	Ekvivalent (jevnførende) spenning, sveis	(17)

## 3.2 METODEBRUK OG LØSNINGSVERKTØY

I dette delkapittelet er det beskrevet fire relevante produktutviklingsmetoder. Integret produktutvikling (IPD) har kontinuerlig blitt benyttet for ivaretagelse av kvalitet og en målrettet produktutviklingsprosess. Metodikk for identifisering av designkrav har belyst sentrale egenskaper i utarbeidelsen av produktspesifikasjonen. Effektiv og systematisk konseptgenerering har blitt utført i henhold til Osbournes huskeliste, SCAMPERR, mens Pughs metode ble benyttet for sammenlikning og rangering av konseptalternativer.

### 3.2.1 INTEGRERT PRODUKTUTVIKLING (IPD)

Hensikten med IPD (Integrated Product Development) er å effektivisere, kvalitetssikre og systematisere utviklingsprosesser. Metodikkens essens omhandler informasjonsflyt mellom utvikling, produksjon, økonomi og HMS, som vist i figur 3.1. Den søker i tillegg å implementere et bredere perspektiv i utviklingsprosessen gjennom bruk av kunnskap fra ulike fagområder. Dette tilrettelegger for større tverrfaglighet og samspill, i tillegg til inkludering av kunder og fagmiljøer på et tidlig stadium. IPD kan med andre ord beskrives som en veiledning for strukturering av utviklingsarbeidet slik at essensielle faktorer ivaretas og gjøres i en fornuftig rekkefølge som del av en koordinert utviklingsprosess[15]. Det vil bli lagt fokus på denne metoden for å inkludere fagpersoner, oppdragsgiver, produsenter og potensielle kunder gjennom hele prosessen i den hensikt å utvikle et optimalt produkt.



Figur 3.1: Illustrasjon som viser hovedelementene i integrert produktutvikling.

Sentrale faktorer for integrert produktutvikling er listet punktvis nedenfor:

- Konkretisering av kundens behov.
- Planlegging og styring av produktutviklingsprosessen.
- Bruk av produktutviklingsgrupper og teamarbeid.
- Integrasjon av prosessdesign.
- Styring av prosjektkostnader fra starten.
- Involvering av leverandører og underleverandører tidlig i prosessen.
- Utvikling av robuste design.
- Integrasjon av CAD og simuleringer med relevant dataverktøy i utviklingsprosessen.
- Datasimuleringer av produktets egenskaper og fremstillingsprosessen.
- Generering av en mest mulig effektiv tilnærming til utviklingsarbeidet.
- Kontinuerlig forbedring av utviklingsprosessen.

### 3.2.2 «NI SYNSVINKLER PÅ ET PRODUKT»

Ved utvikling av et produkt som skal fungere i henhold til fremtidige krav er det viktig å utarbeide en produktspesifikasjon og sette konkrete designkrav allerede tidlig i utviklingsfasen. Metoden, utviklet av Mette Mo, søker å tilrettelegge for en helhetstenkning ved å betrakte et produkt ut fra ni synsvinkler, som vist i figur 3.2. Arbeidet kan i så måte deles inn i håndterbare arbeidspakker for å systematisere produktutviklingen og gjøre den målrettet [16]. Betrakningen av produktet fra disse ni synsvinklene kan bidra til et mer helhetlig og konkurransedyktig produkt, og vil i denne oppgaven bli benyttet for å gjøre grundige vurderinger av designmessige faktorer og for å utarbeide en tilpasset produktspesifikasjon.



Figur 3.2: Illustrasjon av ni forskjellige synsvinkler for å ivareta et helhetlig produkt.

### 3.2.3 PUGHS METODE

Stuart Pugh utviklet på 1980 tallet et løsningsverktøy for en systematisk og trinnvis seleksjon av idéer, konsepter og løsningsforslag. Metoden tilrettelegger for effektiv reduksjon av antallet løsninger slik at en kan gjøre grundige og riktige valg. Pughs metode benytter valgmatiser for sammenlikning av ulike løsninger opp mot relevante vurderingskriterier. De forskjellige løsningene vurderes mot hverandre ved at de gis en poengsum tilknyttet graden av tilfredsstillelse ovenfor de ulike vurderingskriteriene (+, 0, -). For en mer nøyaktig seleksjon kan kriteriene vektet ulikt basert på viktighetsgrad. De summerte poengene danner dermed grunnlaget for rangeringen av løsningene. Når løsningen med den høyeste poengsummen er identifisert kan rangeringen brukes for å sammenlikne fordeler og ulemper ved alternativene i den hensikt å forbedre den allerede valgte løsningen. Metoden vil i denne oppgaven bli benyttet for å gjøre gjennomtenkte og effektive rangeringer og den har fordelen av at valgt løsning blir avgjort objektivt ut ifra forhåndssatte evalueringskriterier [17] [18].

### 3.2.4 SCAMPERR (OSBORNES HUSKELISTE)

Osbornes huskeliste, SCAMPERR, er et effektivt verktøy for generering av løsninger ved utvikling av et nytt konsept, produkt eller en idé. Verktøyet er også svært effektivt for videreutvikling av alternative løsninger for et allerede eksisterende produkt. Metoden tilrettelegger for kreativitet og nytenking ved hjelp av huskelistens åtte kategorier. Ved å se produktet eller løsningen i sammenheng med de ulike punktene i huskelisten har man et godt

utgangspunkt for nye alternative løsninger [19]. Denne metoden vil i stor grad bli benyttet i konseptgenerering og videreutvikling av løsningsalternativer, fordi den gir en systematisk fremgangsmåte i utvikling og endring av løsningsalternativer. Huskelisten er som følger:

- **S**ubstitute (erstatte)
- **C**ombine (kombinere)
- **A**dapt (tilpasse)
- **M**odify (modifisere)
- **P**urpose/Put to other use (hensikt)
- **E**liminate (eliminere)
- **R**everse (reversere)
- **R**earrange (omorganisere)

### 3.3 PROGRAMVARE

Som hjelpeverktøy har det blitt brukt følgende dataprogrammer:

- Microsoft Word 2016 – Tekstbehandling
- Microsoft Excel 2016 – Beregninger, diagrammer og planlegging
- Microsoft PowerPoint 2016 – Presentasjonsverktøy
- Clavate Analytics, EndNote X8 – Referanser og kildebehandling
- SOLIDWORKS 2017/2018 Student versjon – CAD, FEM-analyse og rendering
- ANSYS Workbench R18.2 Academic – FEM-analyse
- ANSYS APDL R18.2 Academic – FEM-analyse
- Granta Design Limited, CES EduPack 2017 – Materialdatabase
- JGraph Ltd, Draw.io Desktop versjon 7.6.3 2017 – Figurer og prosessdiagrammer
- SigmaPlot 14.0 – Statistisk behandling og utarbeidelse av diagrammer

### 3.4 KVALITETSSIKRING

#### 3.4.1 KILDER

*Skriftlige kilder* benyttet i denne rapporten vil hovedsakelig bestå av oppdatert universitetslitteratur som kompendier og lærebøker. Det vil i tillegg bli benyttet nylig publiserte artikler med flere gjengitte kildehenvisninger. Dette gjelder spesielt for delene som omhandler bekjempelse av meldugg ved bruk av UV-bestråling. Det skal benyttes oppdatert og internasjonal forskning gjennom kontakt med forsker Aruppillai Suthaparan fra institutt for plantevitenskap (IPV) ved NMBU. Teorigrunnlag vedrørende dimensjonering, konstruksjon og mekanikk vil til dels være basert på litteratur fra førsteamanuensis Geir Terjesen fra fakultet for realfag og teknologi ved NMBU.

*Muntlige kilder* vil benyttes i forbindelse med kontakt opp mot fagpersoner som leverandører, produsenter, bønder, forskere og andre universitetsansatte. Det skal kontinuerlig gjennom hele prosjektet gjennomføres møter med ansatte på fakultet for realfag og teknologi ved NMBU for veiledning.

*Nettkilder* vil benyttes for å undersøke og opparbeide oversikt over relevant informasjon som forskning, teori, historie, produkter og eksisterende konsepter. Nettkilder vil også bli benyttet i anskaffelse av figurer og vil bli vurdert kritisk med tanke på troverdighet.

### 3.4.2 EKSTERNE UNDERSØKELSER

Konseptutviklingen vil foregå i samråd med forsknings- og fagmiljøet ved NMBU, Saga Robotics og delvis NIBIO. Løsningsalternativer skal vurderes, drøftes og velges til dels basert på kommunikasjon med potensielle kunder som Simen Myhre og Kristian Guren. I tillegg vil det undersøkes ferdigproduserte komponenter hos ulike firmaer nasjonalt og internasjonalt blant annet for ivaretagelse av kvalitet, standardisering og redusert utviklingstid. Samarbeidet og kommunikasjonen med de tidligere nevnte faggruppene er i henhold til IPD og gir produktene økt grad av pålitelighet og kvalitet.

### 3.4.3 BEREGNINGER OG ANALYSER

Førstemanuensis Geir Terjesen, senioringeniør Egil Stemsrud og overingeniør Henrik Folke Holmberg vil bli benyttet for rådgøring vedrørende beregninger og analyser. Digitale verktøy som Solidworks og ANSYS skal benyttes for beregninger tilknyttet konstruksjonene. Utvalgte analyser vil kontrolleres mot håndberegninger.

### 3.4.4 FORSØK

Forsøk skal bli planlagt, gjennomført, drøftet og vurdert i samarbeid med Arup Pillai Suthaparan. Samarbeidet vil derfor gi innholdet og forsøksresultatene en nødvendig pålitelighet og faglig tyngde.

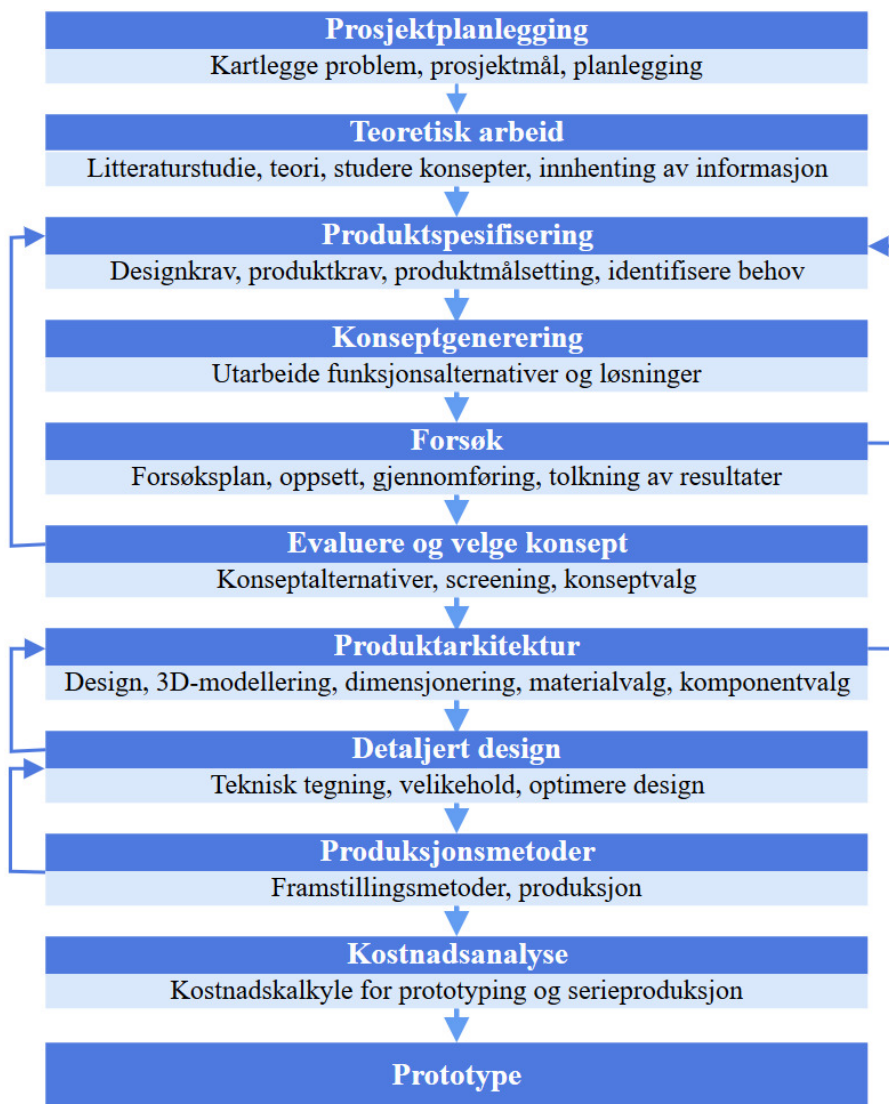
### 3.4.5 FORSKRIFTER OG STANDARDER

Før en eventuell kommersialisering må produktene være i henhold til lover, regler og relevante standarder. Regler knyttet til sikkerhetsutrustningen av produktene skal hentes fra Forskrift om maskiner. Elektriske komponenter har direkte krav til el-installasjon, og må være i henhold til Forskrift for elektriske lavspenningsinstallasjoner. ISO128 vil bli benyttet i forbindelse med teknisk tegning og Eurokode 9 (NS-EN 1999-1-1:2007) vil benyttes som veiledning ved dimensjonering. Direkte krav og egenskaper for å ivareta regelverk vil bli grundigere betraktet i kapittel 5.4.



### 3.5 PROSESSTRINN

I figur 3.3 er det presentert en visuell fremstilling av stegene i utviklingsprosessen. Figuren viser at utviklingen er delt opp i trinn, hvor hvert trinn representerer hovedoppgavene i utrednings- og utviklingsarbeidet. Prosesstrinnene har til hensikt å gi en oversikt over en sammenhengende utviklingsprosess, og viser at man kontinuerlig er avhengig av å gå tilbake og betrakte enkelte trinn flere ganger ettersom endringer eller uforutsette utfordringer oppstår. Disse iterasjonsprosessene kan gjentas for å sikre kvaliteten på produktene og på den måten kan en si at mange av trinnene under er tett knyttet til hverandre.



Figur 3.3: Prosesstrinn for prosjektet med beskrivelser og henvisninger (piler) til nødvendige iterasjonsprosesser.

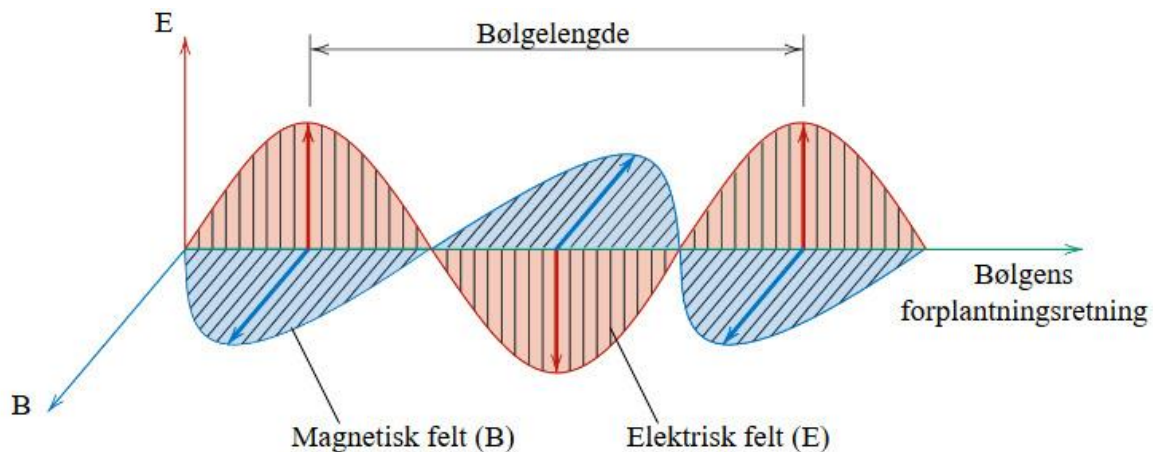
I henhold til IPD vil det kontinuerlig være kontakt med relevante personer og bedrifter for å sikre ønskede produkttegenskaper i utviklingen av produktene. Dette vil gi innsikt i både økonomiske og sikkerhetsmessige aspekter, så vel som faktorer tilknyttet produksjon og design. Som en ser i prosesstrinnene vil prosjektet ha en naturlig oppbygning og iterasjonsprosessene vil være nødvendig for å sikre kvaliteten.

## 4. TEORI OG TEKNOLOGIUTREDNING

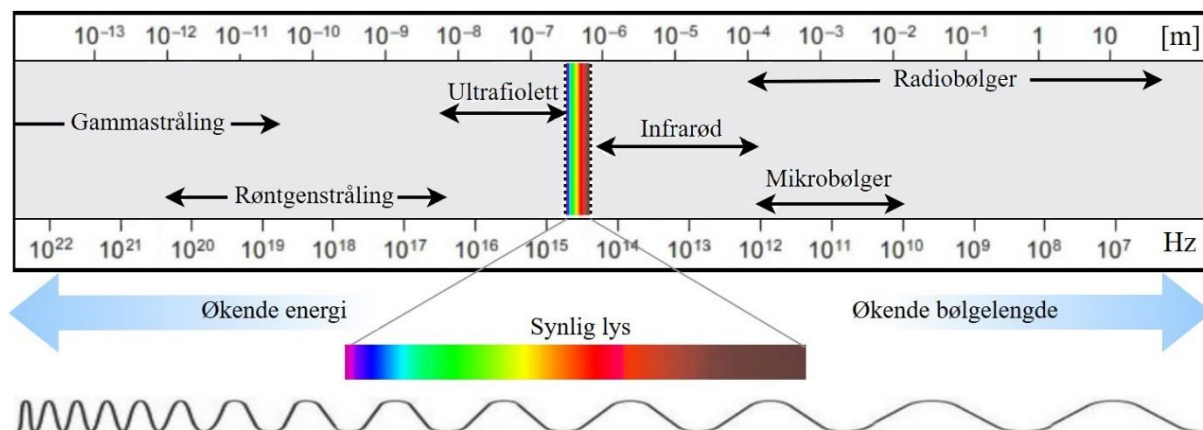
*Teorigrunnlaget som presenteres er knyttet opp mot relevante temaer og har til hensikt å danne et grunnlag for videre analyse gjennom oppgaven. Det vil i tillegg gis en grunnleggende innføring i eksisterende teknologi og løsninger som kan implementeres eller være til inspirasjon under produktutviklingen.*

### 4.1 ELEKTROMAGNETISK STRÅLING

Elektromagnetisk stråling er energi som beveger seg gjennom rommet i form av elektromagnetiske bølger. Bølgene kan bevege seg gjennom et materielt medium så vel som i vakuum og består av et elektrisk og et magnetisk felt som til enhver tid står vinkelrett på hverandre og vinkelrett på forplantningsretningen, som vist i figur 4.1. Hastigheten til disse bølgene avhenger av materialtypen som bølgen forplanter seg i, og er i vakuum lik lysets hastighet som er tilnærmet 300 000 km per sekund. Strålingen kan enten fremstilles kunstig, eller komme fra naturlige kilder som solen. Eksempler på elektromagnetisk stråling kan være lys som oppstår når en lyspære tennes eller wi-fi signalene som sendes fra en ruter. Det elektromagnetiske spekteret deles gjerne inn i syv ulike deler, avhengig av bølgelengde, frekvens og anvendelsesområde. De syv delene er illustrert i figur 4.2. Det menneskelige øyet kan kun oppfatte en avgrenset del av dette spekteret, omtalt som «synlig lys». Andre former som eksempelvis røntgenstråling og mikrobølger, er usynlig for menneskeøyet [20] [21].



*Figur 4.1: Illustrasjon av de elektriske og de magnetiske feltene i en elektromagnetisk bølge. Feltene er i fase, er vinkelrett på hverandre og på bølgens forplantningsretning [37].*



Figur 4.2: Det elektromagnetiske spekteret. Bølgelengde er angitt i den øverste tallrekke med enhet meter. Frekvens er angitt i nederste tallrekke med enhet hertz ( $s^{-1}$ ). Figuren gir en indikasjon på frekvenser og bølgelengder. Det finnes mange ulike definisjoner for de forskjellige strålingstypene. Verdier hentet fra [20].

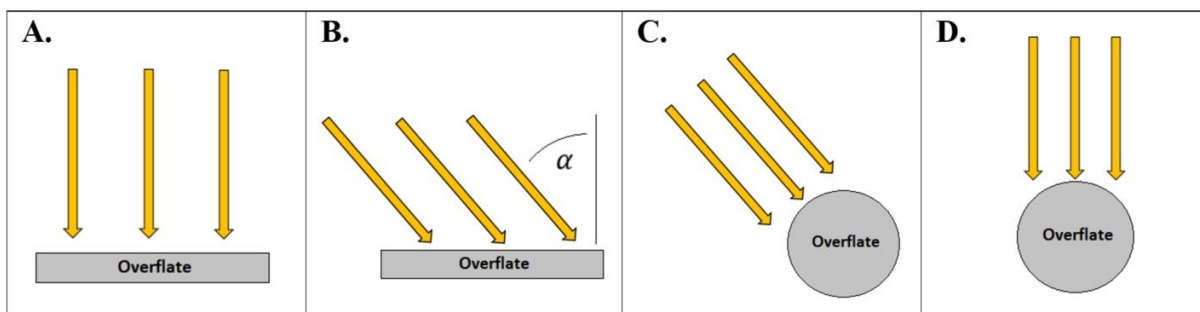
Elektromagnetisk stråling kan også betraktes som en strøm av partikler, kalt fotoner. En kan eksempelvis tenke på sollyset som en regnsky av fotoner med forskjellig frekvens. Hvert foton inneholder en bestemt mengde energi, kalt et kvant, som er proporsjonal med strålingstypens frekvens og invers av bølgelengden. Desto kortere bølgelengden er, desto høyere er energien tilknyttet fotonet. Dette er grunnen til at enkelte typer kortbølget stråling kan være skadelig for menneskekroppen [22].

Begrepene reflektert, absorbert og transmittert stråling, er sentrale for forståelse av oppførselen til elektromagnetisk stråling. En strålingskilde sender ut fotoner og dersom disse treffer en overflate, kan strålingen enten reflekteres, absorberes eller transmitteres. Ofte vil det skje en kombinasjon av disse. Refleksjon skjer dersom fotonene treffer partikler slik at de sendes tilbake i en ny retning. Dersom fotonene treffer et medium og tilfører energi, eksempelvis gjennom oppvarming eller fotosyntese, har strålingen blitt absorbert. Transmittert stråling forekommer i de tilfellene hvor fotonene passerer gjennom et medium. Summen av disse tre fenomenene tilsvarer alltid den utsendte strålingen [23].

Ved måling av elektromagnetisk stråling er det spesielt tre parametere som er avgjørende; bølgelengde, intensitet og strålingsretning. Ulike bølgelengder er som vist i figur 4.2. Intensiteten omhandler den innstrålte lysmengden som treffer en overflate. Dette kan måles som energi som treffer et bestemt areal og defineres som **irradians**, med enhet  $W/m^2$ . Den innstrålte lysmengden kan også måles som mengden av innstrålte kvanter og defineres da som **foton irradians**, med enhet  $mol/m^2/s$ . Begrepene er listet i tabell 4.1. Enheten mol refererer til antallet fotoner, hvor lysmengden 1 mol er lik Avogadros tall ( $6,02 \times 10^{23}$  fotoner). De to ulike mengdedefinisjonene, kvanter og energi, kan konverteres om hverandre dersom bølgelengden er kjent. Strålingsretningens vinkel i forhold til en overflate kan påvirke irradiansen. Dette gjelder spesielt dersom overflaten som bestråles er tilnærmet flat. Maksimal irradians oppnås når strålingen står vinkelrett på overflaten, men avtar med cosinus til vinkelen når innstrålingen ikke treffer vinkelrett, som vist i figur 4.3. Grunnen til dette er økningen av det projiserte strålingsarealet ettersom vinkelen endres. For tilnærmet kuleformede overflater vil ikke strålingsretningen spille noen rolle [22].

Tabell 4.1: Begreper og enheter for kvantifisering av lys.

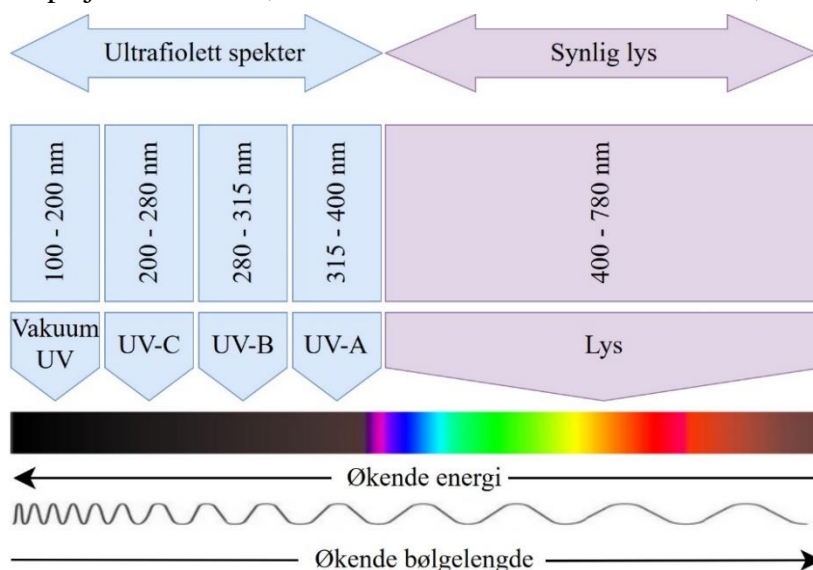
Kvantifiseringsbegrep	Benevnelse	Enhet
Energimengde	Irradians	$W/m^2$
Fotonmengde	Foton irradians	$mol/m^2/s$



Figur 4.3: Illustrasjonen viser flate og sfæriske overflater som bestråles likt. (A) og (D) mottar lik irradians. Når bestrålingen treffer overflatene med  $45^\circ$  fra normalen, vil (C) motta sammen mengde som (D), mens (B) vil motta samme mengde som (A) multiplisert med  $\cos(\alpha)$ . Irradiansen er altså proporsjonal med cosinus til innstrålingsvinkelen og derfor vil irradiansen på overflate (B) reduseres [22].

#### 4.1.1 ULTRAFIOLETT STRÅLING

Ultrafiolett (UV) lys utgjør en av de syv strålingstypene i det elektromagnetiske spekteret, og er etter ISO standard 21348 definert som stråling med bølgelengder mellom 100 – 400 nm [24]. UV lys kommer hovedsakelig fra solen eller fra menneskelagede UV lamper, og spiller en svært sentral rolle gjennom påvirkning av levende organismer. Det ultrafiolette lysspekteret deles som regel inn i 3 hovedtyper, angitt av bølgelengden. Som vist i figur 4.4, omtales disse som UV-A, UV-B og UV-C. Deler av det ultrafiolette spekteret som kommer fra solen filtreres gjennom ozonlaget i atmosfæren. Derfor utgjør UV strålingen fra solen kun om lag 5 % av den totale solenergien på jordoverflaten, hvor omtrent 95 % av dette er UV-A, 5 % er UV-B, mens



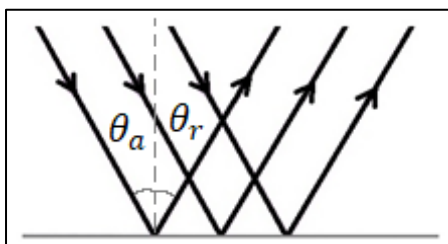
Figur 4.4: Illustrasjonen viser inndelingen av UV spekteret sammenliknet med synlig lys [75].

UV-C filtreres fullstendig [25]. UV-A er temmelig ufarlig og fører blant annet til produksjon av vitamin D og pigmentmørking på menneskehuden. UV-B utgjør en større fare da det kan være kreftfremkallende og føre til skade på molekylært nivå gjennom ødeleggelse av DNA. Den energirike UV-C strålingen er uheldig for menneskehuden og kommer som regel fra kunstig belysning som har til hensikt å drepe mikroorganismer som sopp og bakterier [26].

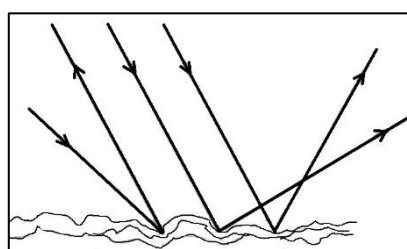
Sollys er en svært viktig energikilde for planter og er en sentral miljøfaktor for regulering av vekst og utvikling [27]. UV lyset kommer som en naturlig del av denne innstrålingen og det er gjennomført utallige studier som forsøker å svare på UV strålingens effekt på planter. I plantecellene er det blant annet DNA, proteiner og fotosyntese som hovedsakelig påvirkes av UV stråling [27]. Planter responderer naturligvis forskjellig avhengig av bølgelengde og irradians, og ulike plantesorter tolererer UV strålingen ulikt. Det kan ha alvorlige negative konsekvenser dersom plantene overeksponeres, mens det ved korrekt eksponering kan medføre økt avling og vekst for bestemte planter [28]. Resultater fra feltforsøk konkluderer med at UV-B stråling har lav hemmende effekt på plantevekst ( $< 20\%$ ) og at planten faktisk utvikler beskyttelsesmekanismer mot UV ved lav eksponering [27]. Selv om det i dag brukes små doser UV lys som supplement i veksthusbelysning for helårsdyrking, gjenstår det fremdeles forskning for å fullstendig forså effekten av UV lys på de ulike plantesortene.

#### 4.1.2 REFLEKSJON

Refleksjon er et fenomen som oppstår når en lysbølge treffer en overflate og reflekteres. Refleksjonen til en overflate er tett knyttet til strålingens bølgelengde. Det betyr at overflater som er gode reflektorer for synlig lys, ikke nødvendigvis er egnet for å reflektere andre bølgelengder. Graden av refleksjon varierer for ulike materialer og avhenger også av faktorer som blant annet overflatebehandlingen og ruheten i overflaten. Et eksempel på en overflatebehandling er det fluoriserende belegget som er dampet på innsiden av lysstoffrør brukt til belysning. Noe av lysstoffrørets effekt gir synlig lys mens en andel gir UV-lys. Grunnet den høye energien til fotonene fra lysstoffrøret er ca. 65 % av effekten levert ved bølgelengde 254 nm. Belegget på innsiden sørger for å absorbere disse UV-strålene og sende det ut som synlig lys [29] [30]. Ruheten i refleksjonsoverflaten avgjør retningen til de reflekterte strålene. En skiller ofte mellom diffus og speilende refleksjon (også kalt spekulær refleksjon), illustrert i figur 4.5 og 4.6. Diffus refleksjon skjer når overflaten er ujevn, noe som fører til en tilfeldig spredning av reflekterte stråler. Speilende eller spekulær refleksjon oppstår når overflaten er glatt, og eksempler på dette er høypolert glass eller metall. I dette tilfellet har refleksjonen en fast utgangsvinkel [21].

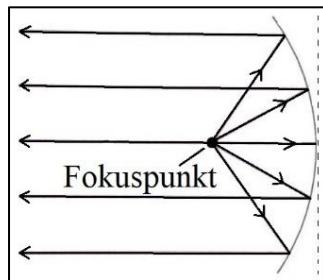


Figur 4.5: Speilende (spekulær) refleksjon grunnet glatt overflate.



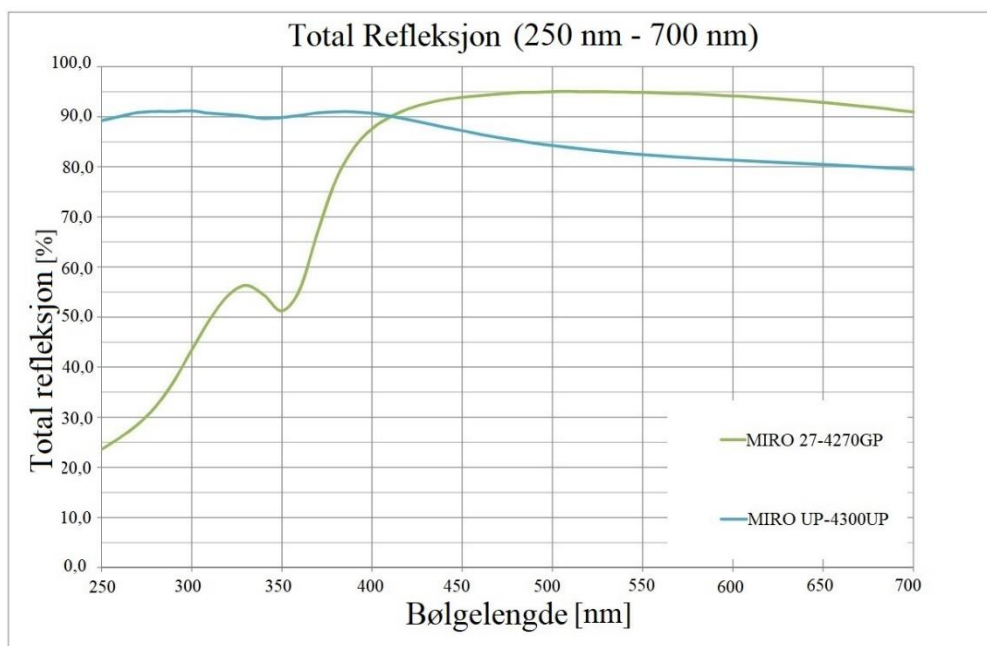
Figur 4.6: Diffus refleksjon grunnet ujevn og ru overflate.

Refleksjonsloven som omtaler refleksjon på glatte overflater sier at refleksjonsvinkelen,  $\theta_r$ , i forhold til normalaksen, er lik innfallsvinkelen,  $\theta_a$ , for alle bølgelengder og for alle materialer [21]. Dette er illustrert i figur 4.5 og gjelder for både plane og kurvede overflater. For kurvede overflater med fast radius vil alle reflekterte stråler treffe et felles punkt dersom de innkommende strålene er parallelle og orientert rett inn mot kurven, som illustrert i figur 4.7. Dette punktet kalles fokuspunktet. Lengden fra fokuspunktet til kurven kalles fokuslengden. Disse parameterne er meget relevante i plasseringen av lysstoffrøret i forhold til reflektoren for å få ønsket strålingsspredning.



Figur 4.7: Lysstråler fra fokuspunktet som reflekteres parallelt fra kurven.

For god refleksjon av UV-stråling kan polerte reflektorer i aluminium benyttes. Dersom aluminiumet ikke overflatebehandles vil det dannes et oksidlag som svekker refleksjonsevnen. Reflektorer i aluminium er ofte glanseloksert for å unngå denne oksidasjonen. Det er også utviklet spesialdesignede reflektormaterialer for å oppnå god refleksjon. Alanod GmbH & Co. KG, lokalisert i Tyskland, spesialiserer seg blant annet på reflektormaterialer og leverer en serie kalt MIRO som har svært gode refleksjonsegenskaper for UV-stråling. Disse er også velegnet for bruk i fuktige miljøer som i veksthus da de har høy korrosjonsmotstand. Diagrammet i figur 4.8 viser den prosentvise refleksjonsgraden for to utvalgte MIRO produkter ved bølgelengder mellom 250-700nm.



Figur 4.8: Diagrammet viser prosentvis refleksjonsgrad for to utvalgte MIRO kvaliteter [76].

#### 4.1.3 UV-BESTRÅLING FOR BEKJEMPELSE AV MELDUGG

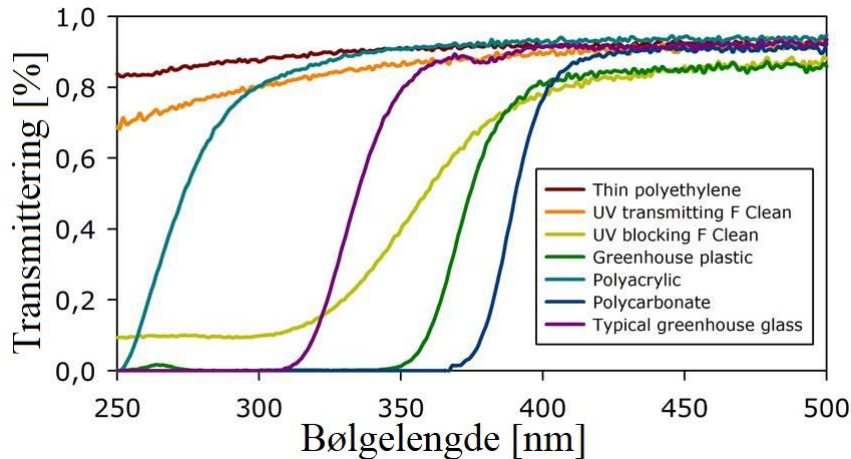
Meldugg er en soppsykdom som i dag utgjør en betydelig trussel mot en rekke ulike plantekulturer, noe som kan medføre stor økonomisk usikkerhet for produsentene. Soppsykdommen er et spesielt problem tilknyttet produksjon i veksthus og plasttunneler, sammenliknet med i utendørs produksjon. Grunnen til at meldugg er problematisk i disse produksjonssystemene er imidlertid uklar. Faktorer som høy relativ fuktighet og utilstrekkelig ventilasjon blir ofte nevnt som faktorer selv om det ikke ligger vitenskapelige bevis til grunn [6]. Tatt i betraktning at meldugg i økende grad er tilbøyelig for utvikling av resistens mot den intensiverte bruken av kjemiske sprøytemidler, gjør det spesielt vanskelig å kontrollere spredningen. Det har de siste årene vært stort fokus på forskning og utvikling av lysteknologi for å optimere kvaliteten på planteproduksjon. Bruk av spesifikke lyskvaliteter i kombinasjon med UV bestråling har vist seg svært lovende når det gjelder bekjempelse av meldugg i plantekulturer som eksempelvis jordbær og agurk. Resultater har vist signifikant nedgang i meldugg ved bruk av UV lys, sammenliknet med ubehandlede planter [14].

UV stråling kan potensielt ha en skadelig effekt på levende organismer. Det kan føre til både mutasjoner og ødeleggelse dersom det absorberes av organismens DNA. Dette avhenger imidlertid av lysets bølgelengde, irradians, bestrålingstid og type organisme som blir bestrålt. Mekanismer for å beskytte genmaterialet fra skadelige kilder som UV lys finnes hos alle levende organismer. Kort sagt har planter to lag med disse beskyttelsesmekanismene, mens meldugg kun har ett. Dette gjør meldugg mer sårbar enn planter når eksponert for UV lys. Forsøk viser at stråling med bølgelengde mellom 250-280 nm, gitt i lave doser, er effektivt for hindring av veksten til melduggsoppssporene [31]. Tester gjort på jordbærplanter har også vist at bestråling på nattetid er ideelt, og at planten er fleksibel når det gjelder bestrålingsintervaller, så lenge total dose er den samme. Resultater har vist en nedgang på over 90 % meldugg, sammenliknet med ubehandlede kontrollplanter [14]. Optimal dose innstrålt effekt varierer med de ulike plantekulturene, og det forskes fremdeles på hva som er det mest gunstige. Forsøk viser imidlertid at en intensitet på 3,6 W/m<sup>2</sup> gitt over en periode på 60 sekunder er en gunstig energidose. Selv om agurkplanten generelt sett har lavere tåleevne enn jordbærplanter når det gjelder UV-eksponering, er denne dosen gjeldende for begge plantekulturene for bekjempelse av meldugg [75]. Muligheter for regulering av den innstrålte effekten omfatter blant annet dimming, bruk av reflektorer og avstandsregulering. For beregning av innstrålt energidose kan formelen under benyttes. Intensiteten angis i W/m<sup>2</sup> og tiden i sekunder.

$$\text{Energidose} = \text{Intensitet} \cdot \text{Tid}$$

En viktig faktor for praktisk bruk av bestrålingen er at soppsporene eksponeres fullstendig for UV lyset. Plantebladene absorberer UV-B tilnærmet fullstendig og på den måten vil det ikke transmitteres lysstråler videre til de underliggende bladene. Dette fører til at tilslørte skyggeområder ikke blir bestrålt [14]. Dette problemet kan delvis løses med bruk av reflektorer og bevegelige bestrålingsverktøy slik at UV lyset har mulighet for å nå inn til planten fra ulike vinkler. En annen viktig faktor er fordelingen av den innstrålte effekten. Det er ønskelig at effektfordelingen på den bestrålte plantekulturen er så uniform som mulig. Dette kan være en utfordring da lysstoffrørens bestrålingsområde overlapper hverandre og gir topper med høyere effekt per areal enn andre områder.

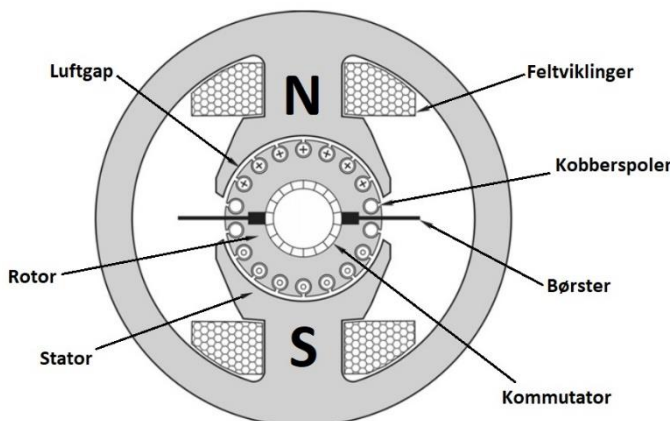
Grunnet UV-strålingens potensielle skadene effekt er det svært viktig å gjøre skjermingstiltak i tilfeller hvor eksponering er sannsynlig. Basert på den kjemiske sammensetningen til materialer har de ulik gjennomtrengningsevne for UV-stråling. Figur 4.9 illustrerer utvalgte materialers evne til å absorbere ulike bølgelengder.



Figur 4.9: De fargede grafene viser hvordan ulike materialer transmitterer elektromagnetisk stråling med bølgelengder mellom 250 nm og 500 nm. Y-aksen angir transmittering i prosent hvor 1,0 tilsvarer 100%, mens x-aksen angir bølgelengden [75].

## 4.2 ELEKTROMOTOR

En elektromotor er en maskin som produserer mekanisk energi ved bruk av elektrisk energi. Det er med andre ord en energiomformer. Uavhengig av type, har de aller fleste elektromotorer fundamentalt sett mye til felles. De baserer seg alle på de fysiske prinsippene gitt av elektromagnetisme [32]. Elektromotorer er i dag svært utbredt og brukes i en rekke ulike applikasjoner. De kommer i et stort utvalg størrelser og effekter og finnes i alt fra tung industri og kjøretøy til verktøy og leker. En skiller gjerne elektromotorer i to hovedkategorier ut ifra strømkilden som enten er vekselstrøm (AC) eller likestrøm (DC). Innen disse kategoriene finnes det igjen flere ulike typer, hvor noen eksempler er induksjonsmotor (AC), synkronmotor (AC), børstemotor (DC), børsteløs motor (DC) og stepper motor (DC).



Figur 4.10: Prinsippskisse av tverrsnitt av en børstet DC motor. Feltviklingene danner en elektromagnet med en nord- og en sørpol. Permanentmagneter brukes som regel i motorer med effekt fra noen få watt opp til noen få kilowatt. Elektromagneter (feltviklinger) er vanlig fra 100 watt og opp til de største motorene med effekt på flere megawatt. Utgående aksling befinner seg i senter av rotoren [32].



Tradisjonelt sett har AC motoren blitt anvendt aller mest i tyngre industrielle applikasjoner. Mye av grunnen til dette er enkel tilgang til trefase vekselstrøm i tillegg til motorens stabilitet og effektivitet. DC motoren er også mye brukt innen industri. Dens mulighet for å driftes fra batterier, gjør den spesielt gunstig for mobile applikasjoner innen eksempelvis robotikk og i kjøretøy. På samme måte som dagens AC motorer, kan den bevare høy effektivitet innen et bredt spekter av hastigheter og momenter [33]. Siden Thorvald plattformen baserer seg på mobile enheter utstyrt med batterier er det naturlig å utelukke bruk av AC motorer. Selv om DC motorens leverte effekt kan variere fra noen få mW til flere MW, er prinsippene og oppbygningen på tvers av ulike typer grovt sett den samme [32]. En DC motor består hovedsakelig av de to komponentene rotor og stator. Rotoren er festet til den utgående akslingen og er den roterende komponenten. Statoren er den statiske komponenten og er adskilt fra rotoren i form av et tynt luftlag, som vist i figur 4.10. Rotoren er utstyrt med et gitt antall strømførende ledninger (kobberspoler), mens statoren består av ett sett permanentmagneter eller elektromagneter. Det magnetiske feltet som produseres av statoren fører til en magnetisk indusert kraft på de strømførende ledningene i rotoren. Strømmens retning veksles kontinuerlig gjennom kommutatoren og børstene, noe som videre fører til en konstant rotasjonsbevegelse på rotoren. Rotasjonsmomentet på rotoren kommer som et resultat av de elektromagnetiske prinsippene som oppstår når en strømførende leder passerer et magnetfelt [21]. Dette oppsettet gjelder hovedsakelig for børstede DC motorer. Oppsettet ville vært motsatt for en børsteløs DC motor, i form av kobberspoler på statoren og permanentmagnet i rotor.

De ulike typene DC motorer har tradisjonelt blitt angitt som shunt, serie (series), separat eksitert (separately excited) eller kompond (compound) motorer. Disse benevnelsene indikerer den karakteristiske virkemåten til de ulike motortypene og hvordan de elektroniske kretsene er koblet. Prinsippet bak disse typene tilhører tiden før styringselektronikk ble introdusert. Relativt billige og lett tilgjengelige sensorer, motorkontrollere og digitale implementeringer for presisjonskontroll har i stor grad erstattet de ulike forgjengerne [32].

Det er i mange applikasjoner behov for lineær bevegelse og det kan derfor være anvendelig å benytte en lineær aktuator. Elektriske lineær aktuatorer kan være erstatning for hydrauliske eller pneumatiske systemer og er spesielt gunstig å benytte på en robot som allerede drives av elektrisitet. De leveres i dag med et bredt utvalg av tilleggsfunksjoner som blant annet programmerbare endebrytere, elektronisk lastovervåkning, digitale og analoge tilbakekoblinger og forskjellige innfestingsmuligheter. Lineær aktuatorens mekanisme kan drives av både AC og DC motorer, men i mobile applikasjoner vil det være mest hensiktsmessig med DC motorer grunnet drift fra batterier. Mekanismen, som ofte drives av en børsteløs DC motor, kan bestå av tannhjulsgir i ulike utvekslingsforhold eller reimer som driver en skrue. Det er rotasjonen av denne skruen om en fast mutter som fører til den lineære bevegelsen. Ved å variere stigningsvinkelen i gjengene vil en oppnå ulike lineære hastigheter. Med svært enkel installasjon og lav grad av vedlikehold har de kompakte lineær aktuatorene et stort bruksområde og kan benyttes for lineære så vel som roterende bevegelser [34].

## 4.3 MATERIALER

Dette delkapittelet tar for seg egenskaper tilknyttet ulike materialer relevant for det videre arbeidet. Videre introduseres teori vedrørende grunnlagsformler for styrkedimensjonering og utvalgte metallers egenskaper.

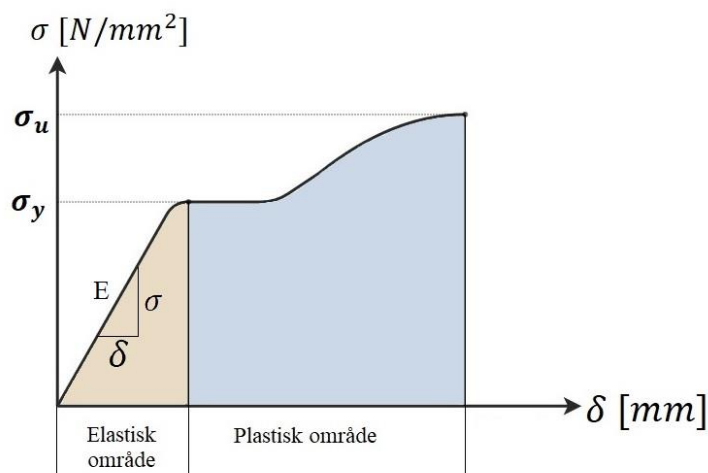
### 4.3.1 MATERIALEGENSKAPER

Materialers karakteristikk beskrives ofte gjennom deres ulike materialegenskaper. En skiller gjerne mellom metalliske materialer, mineralske materialer og organiske materialer [35]. Metalliske materialer kan være stål og aluminium. Mineralske materialer kan være stein, betong og glass, mens organiske materialer kan være tre, gummi og plast. De vanligste materialegenskapene brukt for å beskrive metalliske materialer er beskrevet under.

**Elastisitetsmodul (E):** Elastisitetsmodulen, også kalt Youngs modul, beskriver den lineære elastisiteten til et materiale. Med andre ord forteller den noe om forholdet mellom materialets fasthet, forlengelse og dets indre motstand mot elastisk deformasjon. I et spennings-tøyingsdiagram er E-modulen definert som forholdet mellom spenning og tøyning, og beskrives derfor av stigningen til den lineære kurven, som vist i figur 4.11. Eksempelvis vil duktile materialer kunne gjennomgå større tøyning før en oppnår plastisk deformasjon, sammenliknet med sprø materialer. E-modul har enhet  $N/mm^2$  (MPa)[36].

**Flytegrensen ( $\sigma_y$ ):** Betegnes  $\sigma_y, R_e, f_0$  eller  $f_y$ . Flytegrensen angir grensen for hvor mye et materiale kan belastes før permanent forlengelse inntreffer og plastisk deformasjon oppstår. Spenninger under denne grenseverdien kalles det elastiske området, og her vil et deformert materiale oppta den originale formen etter belastningen er fjernet [36]. Flytegrensen har enhet  $N/mm^2$  (MPa) og er illustrert i figur 4.11.

**Bruddgrense ( $\sigma_u$ ):** Også omtalt som strekkfasthet og betegnes  $\sigma_u, R_m$  eller  $f_u$ . Dersom et materiale belastes og utsettes for spenninger høyere enn flytegrensen vil det til slutt gå til brudd. Som vist i figur 4.11, angir bruddgrensen den absolutt største spenningen et materiale kan utsettes for før brudd oppstår [36].



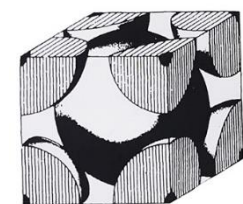
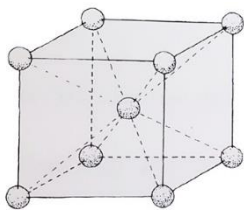
Figur 4.11: Spennings- tøyingsdiagram som illustrerer E-modul, flytegrense ( $\sigma_y$ ) og bruddgrense ( $\sigma_u$ ). x-aksen representerer tøyning ( $\delta$ ) og y-aksen spenning ( $\sigma$ ).

**Poissons tall ( $\nu$ ):** Poissons tall beskriver det matematiske forholdet for variasjon i materialets tverrsnitt ettersom materialet forlenges eller presses sammen. Dersom en ser for seg en sylindrisk stav, vil tverrsnittsarealet reduseres ved forlengelse og økes ved kompresjon, og det er denne tverrkontraksjonen som beskrives gjennom Poissons tall. Konstanten er gyldig innenfor det elastiske området fordi tøyningene er proporsjonale, og er uten enhet [36].

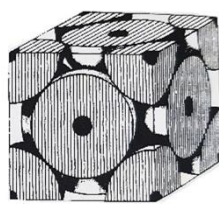
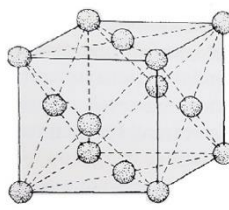
**Skjærmodulen ( $G$ ):** Skjærmodulen beskriver et materiales evne til å motstå skjærkrefter. Skjærmodulen defineres matematisk som forholdet mellom elastisitetsmodulen og Poissons tall,  $\nu$ . Skjærmodul har enhet  $N/mm^2$  (MPa), og angis ofte i GPa [36].

#### 4.3.2 METALLER

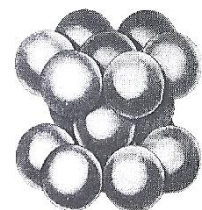
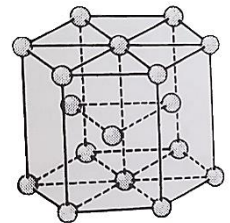
Metaller er en materialgruppe bestående av en eller flere metalliske grunnstoffer som eksempelvis jern eller kobber, og er ofte blandet med små mengder ikke-metalliske grunnstoffer som karbon eller nitrogen for å danne legeringer. Generelt sett har metalliske materialer egenskaper som gjør at de leder strøm og varme godt, og enkelte metaller innehar også ønskede magnetiske egenskaper. Dersom man betrakter metaller på atomnivå, kan de beskrives som en tettpakket gitterstruktur bestående av spesifikke atomer. De mekaniske egenskapene som følger av dette gjør at metaller kan være relativt sett sterke og stive, men også duktile i form av at de tåler betydelig deformasjon før brudd. Dette gjør metaller svært velegnet som konstruksjonsmaterialer [37]. De kjemiske, fysikalske og mekaniske egenskapene til metaller avhenger fullstendig av egenskapene til de enkelte atomene som utgjør strukturen. Disse egenskapene kan påvirkes av trykk og temperatur og er bestemmende for eksempelvis hardhet og flytegrense. Mønsteret som ligger til grunn for atomenes tredimensjonale tilordning kalles gitterstruktur og karakteriseres ofte basert på enhetscellen [35]. Enhetscellen søker å illustrere tilordningen til atomene og det finnes 14 mulige kombinasjoner innen de syv unike enhetscellene [38]. Atomenes pakningsgrad innad i enhetscellen er definert som volum opptatt av atomene dividert på totalt volum. De tre vanligste gitterstrukturene, og deres tilhørende enhetsceller er beskrevet under.



Figur 4.12: Kubisk romsentrert gitterstruktur (BCC) [35].



Figur 4.13: Kubisk flatesentrert gitterstruktur (FCC) [35].



Figur 4.14: Tettpakket heksagonal gitterstruktur (HCP) [35].

**Kubisk romsentrert struktur (BCC):** Består av atomer plassert i enhetscellens 8 hjørner og ett atom i senter, som vist i figur 4.12. Atomenes pakningsgrad i BCC-strukturen er 68 %. Denne pakningsgraden er relativt sett lav og det kreves derfor større kraft for atomplanglidning. Derfor er sprøhet et kjennetegn ved materialer med BCC-struktur. De har høy styrke og lavere duktilitet sammenliknet med FCC-struktur [39]. De absorberer altså skjærspenningene dårligere enn duktile strukturer og kan derfor kun deformeres en viss mengde før de går til brudd. Noen eksempler er jern (ved temperatur lavere enn 910 °C og høyere enn 1390 °C), krom og wolfram [38].

**Kubisk flatesentrert struktur (FCC):** Består av atomer plassert i alle 8 hjørner i enhetscellen og atomer sentrert i hver ytterflate, som vist i figur 4.13. Pakningsgraden for FCC-strukturen er 74 %, og siden dette er tettere enn for BCC-strukturen gir det større mulighet for glidning i atomplanene. I praksis betyr dette at strukturen tåler større plastisk deformasjon før den går til brudd. Derfor er materialer med FCC-struktur mer duktile [39]. Noen eksempler er jern (mellom 910 °C og 1390 °C), aluminium og kobber [38].

**Tettpakket heksagonal struktur (HCP):** Sammenlagt består HCP-strukturen av 6 atomer orientert som vist i figur 4.14. Pakningsgraden er den samme som for FCC-strukturer, altså 74% [38]. På grunn av den heksagonale orienteringen vil atomplanglidning foregå annerledes enn for de kubiske enhetscellene, noe som fører til at det kreves like stor eller større kraft for å oppnå glidning, sammenliknet med BCC-strukturen. Dette gjør HCP-strukturen mindre duktil enn FCC-strukturen selv om pakningsgraden er like tett [39]. Noen eksempler er titan, sink og magnesium.

Dersom man er ute etter materialstyrke er bruk av rene metaller uegnet for de fleste praktiske formål. Ved enkelte tilfeller kan det derimot være hensiktsmessig, eksempelvis ved bruk av kobber eller aluminium som elektriske ledere. For å oppnå forbedrede materialeegenskaper kan ulike metaller og grunnstoffer blandes. Dette omtales som legeringer og kan føre til forbedrede mekaniske, fysikalske og kjemiske egenskaper sammenliknet med hva hvert enkelt metall opprinnelig hadde. Det har blitt utviklet flere ulike metoder for å endre egenskapene til metaller ettersom nye behov har dukket opp. Herding i form av termiske bearbeidingsmetoder (kombinasjoner av oppvarmingsprosesser etterfulgt av spesifikke nedkjølingsprosesser) gir ulike mikrostrukturer som videre fører til metaller med ulike fasthetsegenskaper. Valsing er en annen metode og faller under kategorien deformasjonsstyrking. Økt materialkunnskap har bidratt til nye og smarte metaller utviklet for stadig nye applikasjoner. Ettersom det har blitt stilt større krav til konstruksjoners pålitelighet har behandlingsmetodene blitt forbedret og ført til konstruksjonsmetaller med stadig høyere fasthet, større seighet, bedre korrosjons- og sveiseegenskaper.

### 4.3.3 STÅL

Stål er det mest anvendte konstruksjonsmaterialet som eksisterer og er en legering bestående av jern med opptil 2,1 % karbon. Flere andre legeringselementer som eksempelvis mangan, silisium og aluminium tilsettes for ønskede materialeegenskaper. Grunnen til den utbredte bruken av stål i konstruksjonssammenheng kommer blant annet av jordklodens enorme jernressurser og stålproduktenes lave fremstillingskostnader og allsidighet [37]. De vanligste

typene stål omtales gjerne basert på karboninnholdet og kalles i så måte lav-, medium eller høykarbon stål. Videre forteller underklassene noe om hvilke legeringselementer som er blandet inn. Ettersom karboninnholdet økes oppnår man hardere og sterkere egenskaper, men dette går på bekostning av duktiliteten. Normale konstruksjonsstål har flytegrense rundt 235-460 MPa, mens høfaste stål kan tåle flytespenninger opp til 960 MPa [40]. I tabell 4.2 er det presentert en oversikt over materialeegenskaper for stål som er uavhengig av stål kvalitet og fasthetsklasse.

Tabell 4.2: Materialeegenskaper for stål som er uavhengig av stål kvalitet og fasthetsklasse [40].

Egenskaper	Tetthet, $\rho$ ( $kg/dm^3$ )	E-modul, $E$ ( $N/mm^2$ )	Skjærmodul, $G$ ( $N/mm^2$ )	Tverrkontraksjonstall, $\nu$
Stål	7,85	$2,1 \cdot 10^5$	$0,8 \cdot 10^5$	0,3

Konstruksjonsstål skal i dag spesifiseres etter Europeisk standard NS-EN 10025, hvor stålenes fasthet og kvalitet er gitt ved betegnelsen:

S XXX YY ZZ
S: konstruksjonsstål
XXX: fasthetsklasse (flytegrensen)
YY: stål kvalitet (slagseighet)
ZZ: leveringstilstand

Eksempel: S235 J0
S: konstruksjonsstål
235: flytegrense, $\sigma_y = 235 MPa$
J0: krever 27 joule for å slå av en standard prøvestav ved 0 °C

Slagseighet er et mål for hvor mye energi som trengs for å oppnå sprøbrudd i en prøvestav med en spesifikk geometri og kjerv. Slagseigheten angir med andre ord materialets evne til å motstå sprøbrudd og omtales ikke som en materialkonstant, men heller som en parameter da den avhenger av prøvestykkets og kjervens form. Det er også bevist gjennom forsøk at slagseigheten er avhengig av omslagstemperatur og materialets tykkelse. Tabell 4.3 viser et utdrag fra NS-EN 1993-1-1 som presenterer ulike fasthetsverdier for valsede stålprofiler med forskjellige tykkelse.

Tabell 4.3: Utdrag fra NS-EN 1993-1-1 som viser nominelle fasthetsverdier for valsede stålprofiler med ulik tykkelse [40].

Standard og stålsort	Nominell tykkelse av plateelement t mm			
	$t \leq 40 mm$		$40 mm < t \leq 80 mm$	
	$f_y (MPa)$	$f_u (MPa)$	$f_y (MPa)$	$f_u (MPa)$
<b>NS-EN 10025-2</b>				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 460	440	550	410	550

#### 4.3.4 RUSTFRITT STÅL

Stål med forbedret evne til å motstå korrosjon kalles rustfrie, og er legeringer som inneholder blant annet krom (Cr) og nikkel (Ni). Til tross for en høyere kostnad, kan slike stål være konkurransedyktige sett i et livsløpsperspektiv da de krever mindre overflatebehandling og vedlikehold. Det observeres derfor en økning i bruken av slike kvaliteter. Betegnelsen rustfritt er kun gjeldende for stål som inneholder mer enn 10,5 % Cr og maksimalt 1,2 % C. Inneholder stålet mer enn 12-13 % Cr, korroderer det ikke i luft eller ferskvann. Grunnen til denne motstanden mot korrosjon er den beskyttende hinnen av kromjernoksyd som dannes på overflaten. Dersom denne blandingen utsettes for sjøvann vil det likevel korrodere. I slike tilfeller må det velges kvaliteter bestående av spesielle kjemiske sammensetninger. Derfor kan bruken av begrepet rustfritt mistolkes ved at kvaliteten ikke nødvendigvis sikrer tilstrekkelig mot korrosjon. Rustfrie stål klassifiseres etter deres mikrostruktur på følgende måte [40].

**Austenittiske stål:** Kan benyttes i miljøer med høyt klorinnhold som eksempelvis i nærheten av sjøvann eller saltede veier. De har med andre ord høy korrosjonsmotstand, god formbarhet og er seige ved lave temperaturer. De er i tillegg lett sveisbare [40].

**Ferrittiske stål:** Har kun middels korrosjonsmotstand og kan være ugunstig å sveise, men har gode mekaniske egenskaper [40].

**Duplex-stål:** Har i mange tilfeller bedre egenskaper mot korrosjon og høyere materialfasthet sammenliknet med ferrittisk og austenittisk stål. Duplex-stål har også gode egenskaper tilknyttet sveising [40].

Dersom en sammenlikner sveiste forbindelser for henholdsvis rustfrie og vanlige konstruksjonsstål, ser en at de har nokså like utmattingsegenskaper. Ofte er årsaken til utmattingsbrudd feil i tilknytning sveisingen. Materialeegenskapene har altså mindre å si for utmatting enn selve sprekkgeometrien [40]. Tabell 4.4 viser et utvalg av rustfrie stål med tilhørende fasthetsegenskaper.

Tabell 4.4.: Utdrag fra NS-EN 10088 som viser nominelle verdier for flytegrense,  $f_y$  ( $\sigma_y$ ,  $R_e$ ) og strekkfasthet,  $f_u$  ( $\sigma_u$ ,  $R_m$ ) ved ulike tykkelser.

Type	Betegnelse	Produktform							
		Kaldvalset stripe		Varmvalset stripe		Varmvalset plate		Staver	
		Nominell tykkelse							
		$t \leq 6 \text{ mm}$		$t \leq 12 \text{ mm}$		$t \leq 75 \text{ mm}$		$t \leq 250 \text{ mm}$	
		$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$
Ferrittisk	1.4003	280	450	280	450	250	450	260	450
Austenittisk	1.4301	230	540	210	520	210	520	190	500
Duplex	1.4362	420	600	400	600	400	630	400	600

### 4.3.5 ALUMINIUM

Aluminium er et metall som har omtrent tre ganger lavere egenvekt og E-modul sammenliknet med stål. I tillegg til å ha en FCC-mikrostruktur som gir god duktilitet, også ved lave temperaturer, har aluminium god elektrisk og termisk ledningsevne. Aluminium har et tettstående oksydlag på overflaten som gir god motstand mot korrosjon, både i normalt og svakt surt miljø. Selv om utvinning og fremstilling av aluminium er svært energikrevende, er materialet veldig godt egnet for resirkulering. Sett i sammenheng med førstegangs fremstilling krever resirkuleringsprosessen derimot kun 6-8 % av energien [41]. Rent aluminium har lave mekaniske fasthetsegenskaper og det er derfor vanlig å styrke metallet gjennom innleggeringer, utfellingsherding og deformasjonsstyrking. De primære legeringselementene er kobber, magnesium, sink, mangan og silisium. Styrken i de fleste aluminiumslegeringer er som regel lavere enn for stålkalitetene og har strekkfastheter rundt 200-300 MPa. Spesielle legeringer kan derimot ha strekkfasthet opptil 700 MPa. Ulike aluminiumslegeringer har ulike egenskaper og kommer i kvaliteter som er både sveisbare og formbare. Elastisitetsmodulen varierer i lav grad mellom rent aluminium og aluminiumslegeringer [35]. Tabell 4.5 viser materialegenskaper ved rent aluminium.

Tabell 4.5: Materialelegenskaper for rent aluminium hentet fra NS-EN 1999-1-1:2007 (Eurokode 9).

Egenskaper	Tetthet, $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> )	E-modul, $E$ (MPa)	Skjærmodul, $G$ (MPa)	Tverrkontraksjonstall, $\nu$
Aluminium	2,7	$70 \cdot 10^3$	$27 \cdot 10^3$	0,3

Ettersom aluminiumslegeringer har blitt utviklet har bruksområdene økt betraktelig. Grunnet den lave egenvekten, har de ulike kvalitetene god spesifikk styrke sammenliknet med stål og er derfor gunstig å anvende i applikasjoner hvor vekt er sentral faktor. Eksempler på dette kan være innen kjøretøy- og romfartsindustri. Aluminiumslegeringer klassifiseres ofte basert på et firesifret tall, hvor hovedseriene er 1000-serie til 8000-serie. Påfølgende bokstav og tallkombinasjoner beskriver varme og/eller mekanisk behandling [37]. Tabell 4.6 angir fasthetsegenskaper for utvalgte aluminiumslegeringer.

Tabell 4.6: Utdrag fra NS-EN 1999-1-1:2007 (Eurokode 9) som viser fasthetsdata for utvalgte aluminiumslegeringer som er ulikt tilstandsbehandlet.

Aluminiumlegering	Tilstandsbetegnelse	Tykkelse	Flytegrense, $f_0$	Bruddgrense, $f_u$
EN-AW 5754	H24/H34 <sup>1)</sup>	$3 < t < 6\text{mm}$	160 MPa	240 MPa
EN-AW 6063	T6 <sup>2)</sup>	$t < 25\text{mm}$	200 MPa	245 MPa
EN-AW 6082	T651 <sup>3)</sup>	$12,5 < t < 100\text{mm}$	240 MPa	295 MPa

<sup>1)</sup> H24: Kaldherdet og delvis glødet. Dette reduserer styrken litt, men øker formbarheten.

H34: Kaldherdet og stabilisert. Forbedret formbarhet og varmebehandlet for å fjerne restspenninger.

<sup>2)</sup> T6: Innherdet og varmutherdet. Varmebehandling under høy temperatur frem til stabil tilstand.

<sup>3)</sup> T651: Innherdet, strekkrettet og varmutherdet.

#### 4.3.6 KORROSJON AV METALLER

Korrosjon kan defineres som angrep og videre ødeleggelse av metaller grunnet kjemiske og elektrokjemiske reaksjoner med gitte omgivelser. Korrosive miljø kan være luft, vannløsninger eller jord. Korrosjon er med andre ord en destruktiv prosess som går ut på at elektroner beveger seg fra et metall over til en mer stabil plass i omgivelsene [35]. En vanlig form for korrosjon er rusting av jern. For metallers vedkommende kalles denne korroderende reaksjonen som frigir elektroner en oksidasjonsprosess. Stedet hvor metallatomene utsettes for oksidasjon kalles anode. Elektronene som har forflyttet seg fra anoden som følge av oksidasjonen, må forflyttes til et nytt sted og denne reaksjonen kalles reduksjon. Stedet der reduksjonen skjer kalles katode. Oksidasjon og reduksjon kan skje langt fra hverandre, men prosessene avhenger av at elektronene som frigjøres ved oksidasjonen (anode), kan forflyttes til reduksjonsstedet (katode) via en metallisk leder [42].

Spenningsrekken rangerer metaller etter evnen de har til å gi fra seg elektroner. En grov tilnærming er at stoffene på venstre side av periodesystemet gir fra seg elektroner lettere. De metallene som har lett for å oksidere omtales som uedle metaller. Når to forskjellige metaller eller legeringer med ulik edelhet kommer i kontakt oppstår det en strøm av elektroner. Elektroner er negativt ladet og forflyttes fra metallet med lavest edelhet til det med høyest edelhet. Ved å plassere et lavt edelt metall som aluminium i kontakt med karbonstål, som er omgitt av en elektrolytt, oppstår galvanisk korrosjon. Aluminium vil bli konsumert til fordel for karbonstålet. Elektrolytten kan være sjøvann eller fuktig luft. Luften vi omgir oss i, er den største pådriveren for korrosjon. Korrosjon er spesielt kritisk i marine miljøer som inneholder saltvann. Korrosjon påvirkes av flere faktorer som temperatur, omgivelse og materialsammensetning. I tillegg vil materialer utsatt for plastiske deformasjoner være mer utsatt for korrosjon. Følgende tiltak kan gjøres for å redusere virkningen av galvanisk korrosjon [37]:

- I en konstruksjon bestående av to ulike metaller som er i kontakt med hverandre er det fordelaktig å velge to metaller som står nært i spenningsrekken.
- Unngå uheldig overflatestørrelse mellom anode og katode. Anodearealet bør være så stort som mulig.
- Om mulig, isoler de to metallene fra hverandre.
- Benytt katodisk beskyttelse som eksempelvis en offeranode.

#### 4.4 DIMENSJONERINGSGRUNNLAG

Ved maskintekniske styrkeberegninger er det som regel spenningsbetraktninger som er avgjørende for dimensjoneringen, men dette er ikke alltid tilfelle. Basert på ytre laster og påkjenninger, kombinert med maskindelens utforming og materialtype, kan en teoretisk finne opptredende spenninger i utsatte områder for deretter å sammenlikne disse verdiene med materialeegenskapene. I enkelte tilfeller kan det også være andre bestemmende faktorer som avgjør dimensjoneringen. Dette kan eksempelvis være absolutte krav til maksimale nedbøyninger, vridningsvinkler eller egenfrekvens [43]. Ved håndberegning og dimensjonering



av komponenter benyttes grunnlagsformlene tilhørende prinsippene beskrevet under. Disse omfatter spenningsbetraktninger.

**Normalspenning ( $\sigma_n$ ):** Spenning som oppstår når en kraft virker vinkelrett på et tverrsnitt. Kraftens intensitet fordelt på tverrsnittarealet definerer normalspenningen. Dersom kraften trekker på tverrsnittarealet oppstår strekkspenning, mens trykkspenning oppstår ved sammenpressing av materialet [36].

**Bøyenspenning ( $\sigma_b$ ):** Spenning i et tverrsnitt som oppstår når et bøyemoment påføres et legeme. Bøyemomentet vil fordele seg som trykkspenning på den ene siden av nøytralaksen og strekkspenning på den andre siden av nøytralaksen. Nøytralaksen definerer overgangen fra trykk- til strekkspenning [36].

**Skjærspenning ( $\tau$ ):** Skjærspenninger kan oppstå som følge av belastninger som torsjon, skjærkrefter og bøyemoment. Ved torsjon (vridning) og skjærkrefter (avskjæring) betrakter en som regel skjærspenningene i legemets tverrsnitt. Dersom en bjelke er utsatt for bøyning vil det også oppstå skjærspenninger langs bjelkens langsgående plan [36].

**Von Mises (ekvivalent spenning) ( $\sigma_e$ ):** Dersom man betrakter en endimensjonal spenningstilstand oppnår man flyt i materialet når spenningen passerer flytegrensen. For flerdimensjonale tilstander gir ikke dette tilstrekkelig informasjon. Derfor er det behov for en metode som omfatter hvilken kombinasjon av spenninger ( $\sigma, \tau$ ) som gir flyt. Von Mises hypotese stemmer bra med forsøk og sier at «flytning i en 3-D spenningstilstand inntreffer når den elastiske formendningsenergien er lik formendningsenergien i en 1-D tilstand» [40]. Formlene omfatter både 2-D og 3-D spenningstilstander. Kriteriet kan benyttes for å beregne den opptredende ekvivalente spenningen, som videre kan sammenliknes med grenseverdiene for det spesifikke materialet.

#### 4.4.1 TILLATT SPENNING OG SIKKERHET

Ved dimensjonering av maskinkonstruksjoner er det viktig å påse at de opptredende spenningene er innenfor hva konstruksjonen tåler. Det er mange faktorer som tilsier at det er hensiktsmessig å legge inn en viss grad av sikkerhet i beregningsgrunnlaget. Faktorer som feil i produksjon, unøyaktighet i sammenstilling, ukjente vibrasjoner, støt og svekkelse fra miljøpåkjenninger bør også legges til grunn for et robust design. Metoder for å ivareta dette kan være bruk av sikkerhetsfaktorer i beregningen eller dimensjonering basert på relevant standardverk.

Ofte er maskindelen og konstruksjonen i seg selv så avanserte at det blir for komplisert, ulønnsomt og tidskrevende å utføre nøyaktige spenningsberegninger. Det er i slike tilfeller hensiktsmessig å foreta forenklinger og tilnærmelser. Dette krever innsikt og erfaring, og ofte benyttes sikkerhetsfaktorer og metoder som er vel utprøvd og testet. Sikkerhetsfaktoren avhenger i stor grad av duktiliteten til materialet, bruksområde og om det utsettes for dynamiske påkjenninger i form av eksempelvis utsvingene last, noe som videre kan føre til utmattingsbrudd. Vanligvis benyttes sikkerhetsfaktorer mellom 1-2,5 for hvilende laster og seige materialer, men den kan heves betraktelig ved spesifikke tilfeller [43]. Tillatt spenning mot flyt kan bestemmes ut ifra formelen under.

$$\text{Tillatt spenning } (\sigma_{\text{till}}) = \frac{\text{Flytegrense } (R_e)}{\text{Sikkerhetsfaktor}(SF)}$$

#### 4.4.2 UTMATTING

En maskindel utsatt for dynamisk belastning kan etter tid oppleve dannelse og vekst av sprekker. Dette omtales som utmatting. Vanligvis inntreffer et potensielt utmattingsbrudd etter svært mange belastningsvekslinger ved en tilfeldig spenning som kan være langt lavere enn materialets fasthetsverdi. Initierting av bruddet skjer vanligvis grunnet overflatefeil eller ytre miljøpåkjenninger, men kan også initieres under overflaten. Antallet vekslinger maskindelen utsettes for omtales gjerne som sykler. Komponentens levetid i antall sykler,  $N_{\text{tot}}$ , kan uttrykkes ved følgende uttrykk, hvor  $N_i$  er antall sykler for sprekkinitierring og  $N_p$  er antall sykler for å drive sprekken til brudd [44].

$$N_{\text{tot}} = N_i + N_p$$

For en prøvestav går om lag 90 % av tiden til sprekkinitierring, mens de resterende 10 % går til å drive sprekken til brudd. Ved utmattingsberegninger kan man benytte ulike metoder og designfilosofier for å oppnå ønsket resultat. Nedenfor er det beskrevet fire normale tilnærminger.

**Uendelig levetid (Infinite Life Design):** Denne metoden tar utgangspunkt i at alle utmattingsbelastninger må være lavere enn materialets utmattingsgrense. Dette medfører en stor sikkerhet mot utmattingsbrudd. Konstruksjoner må i så måte beskyttes mot ugunstige miljøpåvirkninger. Tankegangen er i stor grad benyttet for tunge og kostbare konstruksjoner [44].

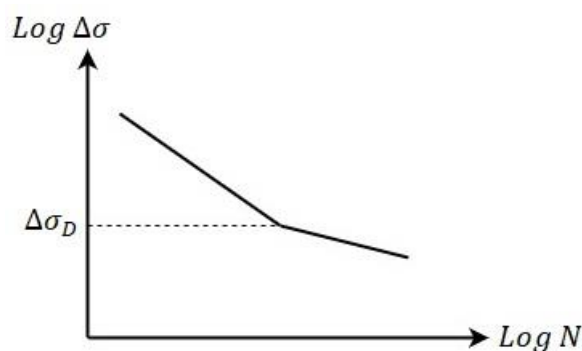
**Sikker levetid (Safe Life):** Denne tilnærmingen sørger for at konstruksjonen dimensjoneres for en ønsket levetid med lav risiko for utmattingsbrudd. Standardverkets designkurver angir en sikkerhet på 97,5 % mot utmattingsbrudd. I tillegg til dette benyttes eksempelvis lastfaktorer for en konservativ betraktning, noe som gir en ekstra sikkerhet for levetiden til konstruksjonen. Når den estimerte levetiden er oppnådd kan konstruksjonen enten kasseres eller oppgraderes i form av utbedringer for å få en ny levetid [44].

**Bruddsikker levetid (Fail Safe):** Metoden kan kun benyttes på statisk ubestemte strukturer og medfører en signifikant sannsynlighet for utmattingsbrudd i en komponent. Sannsynligheten er derimot veldig lav for at hele konstruksjonen går til brudd, da prinsippet ved metoden går ut på en omfordeling av krefter dersom én komponent går til brudd. Dette forutsetter rutiner for kontroll, deteksjon og vedlikehold [44].

**Skadetolererende metode (Damage Tolerant Design):** Denne metoden tillater og antar at det er sprekker i konstruksjonen. Grunnen til dette er at konstruksjonen skal inneha egenskaper som gjør at den kan fungere selv om sprekkdannelse er initiert. Det er en fordel å bruke seige materialer som tåler sprekkutvikling før det utvikles sprøbrudd. Ved hjelp av inspeksjon med NDT metoder (Non Destructive Testing) kan man ved bruk av bruddmekanikk avgjøre eventuelle tiltak for å unngå et ustabil brudd. På grunnlag av inspeksjonen skal man kunne anslå videre inspeksjonsintervaller [44].

Utmattingsberegninger utføres som regel med utgangspunkt i S-N kurver. Dette er dobbeltlogaritmiske kurver som er utarbeidet basert på spesifikke utmattingsforsøk. Grunnet meget stor spredning i antall lastvekslinger før brudd, representerer S-N kurven regresjonslinjen for middelverdiene av disse forsøkene. S-N kurver for ulike scenarier og materialer er angitt i standardverk sammen med tilhørende metoder for beregningen.

Første steg i beregningen går ut på å indentifisere opptredende spenninger i det aktuelle undersøkelsesområdet. Verdien kan eventuelt korrigeres ved å multiplisere med faktorer avhengig av forventede belastninger og basert på miljøet komponentene befinner seg i. Neste steg vil være å sammenlikne de opptredende spenningene med utmattingsgrensen ( $\Delta\sigma_D$ ) for det spesifikke tilfellet. Dersom vekslingene har konstant spenningsvidde og den er lavere enn utmattingsgrensen, vil ikke belastningen føre til utmattingskade. I tilfellene hvor det er varierende spenningsvidder, må levetiden beregnes dersom kun én av viddene er høyere enn utmattingsgrensen. Figur 4.15 eksemplifiserer oppsettet til en S-N kurve.

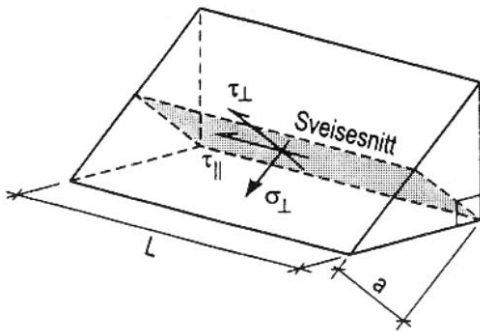


Figur 4.15: S-N kurvens knekkpunkt er angitt som utmattingsgrensen ( $\Delta\sigma_D$ ). y-aksen representerer spenningsvidden, mens x-aksen angir antall vekslinger. Vanligvis består diagrammet av mange kurver, med tilhørende data angitt i en tabell.

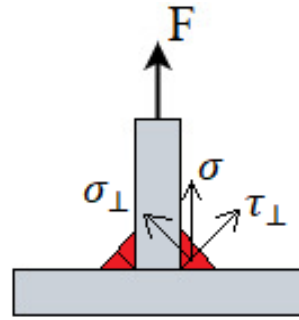
#### 4.4.3 SVEISEFORBINDELSER

Sveising er en utbredt metode for sammenføyning av metaller. Elektrisk energi benyttes for smelting av metallene og det benyttes flere ulike metoder som eksempelvis TIG-sveising (Tungsten Inert Gas), MIG-sveising (Metal Inert Gas) og sveising med elektrode. I tillegg til at sveiseforbindelser utgjør en betydelig kjerv, vil den varmepåvirkede sonen (HAZ) føre til reduserte mekaniske egenskaper. Sprekkdannelse vil derfor lettere kunne initieres fra sveiste forbindelser og er spesielt aktuelt ved gjentakende dynamiske belastninger.

Ved valg av sveising som sammenføyingsmetode er det viktig å påse at metallkvaliteten er sveisbar. Ulike aluminiumkvaliteter har eksempelvis forskjellige egenskaper når det gjelder sveisbarhet. Det finnes ulike sveisetyper avhengig av geometriske forhold. Kilsveis er en utbredt sveisetype og er benyttet i dette prosjektet. Når kilsveiser skal dimensjoneres refereres alle spenningene til sveisesnittet, som illustrert i figur 4.16 [40]. Med utgangspunkt i dette planet virker de ulike spenningskomponentene i forskjellige retninger. Dimensjonering av sveis utføres ofte basert på standardverk, men forståelse av de grunnleggende spenningskomponentene er allikevel sentralt.



Figur 4.16: Kilsveis med illustrert sveisesnitt, a-mål og påsatte spenningskomponenter [40].



Figur 4.17: Sveis illustrert i rødt med påsatte spenningskomponenter som kommer av kraften,  $F$ . Vinkelen mellom vektorene er angitt som  $a$ .

Grunnet symmetri vil normalkomponenten til normalspenningen ( $\sigma_{\perp}$ ) være i samme størrelsesorden som normalkomponenten til skjærspenningen ( $\tau_{\perp}$ ). Sveisens spenningsareal tar utgangspunkt i  $a$ -målet ( $A_w = a \cdot l$ ). Uttrykkene for de to spenningskomponentene blir:

$$\cos(\alpha) = \frac{\sigma}{\sigma_{\perp}} = \frac{\sigma}{\tau_{\perp}} \rightarrow \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \cos(45) \cdot \sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Ved belastningssituasjoner som, i tillegg til disse to spenningskomponentene, medfører parallellkomponenten av skjærspenningen, sammenfattes alle komponenter for beregning av jevnførende spenning i sveis:

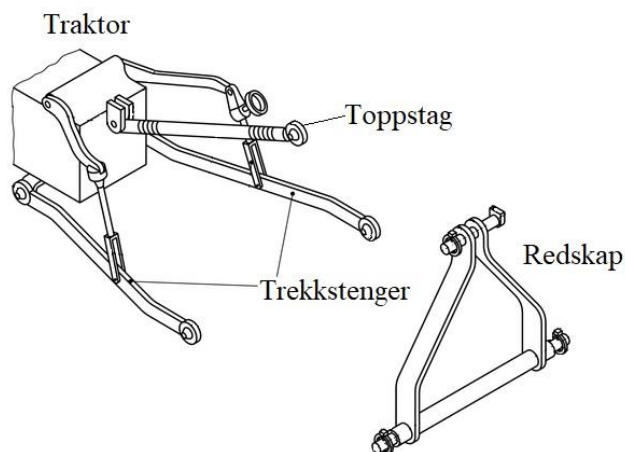
$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (17)$$

Valg av sikkerhetsfaktor ( $SF$ ) for sveisedimensjonering avhenger av belastningstilfellet. Normale verdier er:  $SF = 2,0 - 2,5$ . Dersom konstruksjonen kan utgjøre fare for liv og helse må sikkerheten økes, men dersom konstruksjonen er utsatt for rolig virkende belastning kan verdier helt ned til  $SF = 1,5$  benyttes. Dette er imidlertid den absolutt laveste verdien som burde benyttes [45]. Bruk av sikkerhetsfaktorer er nærmere beskrevet i standardverket.

## 4.5 TEKNOLOGIUTREDNING: INNFESTINGSMEKANISMER

Festemekanismer mellom maskiner og redskaper finnes i mange ulike utforminger og det har opp gjennom årene blitt benyttet et flertall forskjellige prinsipper. Dette delkapittelet søker å ta for seg noen få utvalgte typer i den hensikt å illustrere godt fungerende prinsipper som kan være til inspirasjon. I landbrukssammenheng, så vel som i industri og entreprenørvirksomhet, er det en rekke applikasjoner hvor det er behov for å overføre mekanisk energi fra en maskin, gjennom et festepunkt og videre ut til et redskap. Flere av innfestingssystemene i dag baserer seg på manuelle prinsipper, selv om mange har blitt utviklet for å kunne fjernstyres gjennom blant

annet hydraulikk eller elektronikk. Tilleggsfunksjoner som kraftoverføring og manuell tilkobling av hydraulikksystemer og elektrisitet har gjort at det er nødvendig med en operatør for å fullføre sammenkoblingen. De studerte konstruksjonene er solide, fungerende og godt utprøvd, noe som er avgjørende faktorer for at nokså gamle systemer fremdeles brukes i dag. I takt med moderniseringen har det oppstått nye krav og retningslinjer for å ivareta faktorer som sikkerhet i drift, avlastning for operatør og ikke minst hurtighet ved redskapsbytte.



*Figur 4.18: Prinsippskisse av et tre-punkt feste monteret på traktor. Toppstaget og to trekkestenger utgjør de tre festepunktene som festes til redskapen [46].*

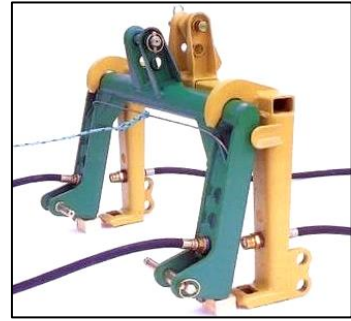
Da traktoren ble innført baserte man seg på sleperedskap med innfesting via ett-punkt koblinger. Videre kom tre-punkt koblingen og bruk av hydraulikk for heve- og senkeoperasjoner. Dette medførte fordeler i form av bedre grep mot underlaget for traktoren og høyere grad av kontroll og styringsmuligheter for redskapen. Tre-punkt systemet, vist i figur 4.18, benyttes i dag av de fleste traktorprodusenter og er internasjonalt standardisert (ISO 730:2009 og ISO 8759-1:1998) [46] [47]. Standardene tar blant annet utgangspunkt i ulike kategorier som viser til maksimum drakraft for tre-punkt systemet [48]. I landbrukssammenheng har det i de senere år blitt brukt både ett-, to-, tre-, og fire-punkt koblinger. Tilkoblingen i seg selv baserer seg ofte på bruk av koblingsbolter sikret med orepinner, og det har skjedd et mangfold av skader i rygg, fingre og føtter ved bruk av disse. Innføringen og den økte bruken av hurtigkoblinger har derfor vært gunstig da disse gjør selve tilkoblingen sikrere og mer komfortabel for operatøren. Basert på funksjonsprinsipp, kan disse hurtigkoblingene deles inn i ett-trinns og to-trinns koblinger [49].

#### 4.5.1 ETT-TRINNS KOBLING

Ett-trinns koblinger i landbruket tilrettelegger for redskapsbytte uten at operatøren trenger å flytte seg fra fører sete. To velkjente hurtigkoblinger for traktorer er HMV, utviklet av Hordaland mekaniske verksted (HMR), og Triangel hurtigkobling, utviklet av Lyng Triangel. Felles for begge systemene er at hurtigfestet består av én del som er permanent koblet på tre-punkt festet på traktoren, mens den andre delen er festet permanent til redskapet.

**HMV**

Hurtigfestet baserer seg på en firkantramme med like mål som redskapsrammen SMS (Svensk Maskin Standard) for frontlastere. Ved å benytte fire festepunkter er systemet svært stabilt og inneholder stor styrke. Systemet har en utforming som gir godt tilsyn og god plass for tilkobling av kraftoverføringsaksel. Traktordelen av hurtigfestet kobles til redskapsdelen som vist i figur 4.19, og festes ved en låsemekanisme som manuelt må utløses ved å dra i en snor for frikobling. Systemet består av få deler, kan bestilles i ulike versjoner og har mulighet for automatisk tilkobling av hydraulikkslanger [50].



Figur 4.19: HMV hurtigfeste med traktordel illustrert i grønt, og redskapsdel i gult [50].

**Triangel hurtigfeste**

Triangel hurtigfeste er standardisert (ISO 11001-2) som europeisk standard for tre-punktmonterte redskaper. A-ramme prinsippet er stabilt og innehar stor styrke. Traktordelen av triangelet plasseres inni redskapsdelen og låses ved løft. Triangelformen, vist i figur 4.20 gjør hurtigkoblingen svært koblingsvennlig og den er uavhengig av et flatt underlag ved påmontering. Låsemekanismen kan utløses manuelt, men systemet kommer også med hydraulisk operert lås. Systemet kan benyttes både bak og fremme på traktoren [51].



Figur 4.20: Lyng triangel traktordel med hydraulisk låsmekanisme [51].

**Andre**

Ålø er en av verdens største leverandører av frontlastere. Deres varemerker Quicke og Trima tilbyr flere forskjellige innfestingstyper. De mest brukte typene er Euro, SMS og Quicke koblinger, illustrert i figur 4.21. Koblingene baserer seg hovedsakelig på en firkantramme, nokså likt HMV, men med ulike avstander og størrelser på festekrokene [52].



Figur 4.21: Tre ulike redskapskoblinger for frontskuffer. Fra venstre mot høyre: EURO, Ålø og SMS [77].

**4.5.2 TO-TRINNS KOBLING**

To-trinns koblinger baserer seg på tre-punkt festet og tar utgangspunkt i at en først kobler redskaper til de to trekkstengene, illustrert i figur 4.22, og deretter til toppstaget. Både trekkstenger og toppstag kan i dette tilfellet være utstyrt med faghakekoblinger. Traktorens faghakekobling er utformet for å romme en kule. Kulen er bindeleddet mellom faghakekoblingen og redskapet, og har et hull i senter som benyttes til fastlåsing med låsebolten. Dette er illustrert i figur 4.23.



Figur 4.22: De to trekkstengene er utstyrt med fanghakekoblinger på enden. De U-formede koblingene gir rom for kulen som skal låses fast.



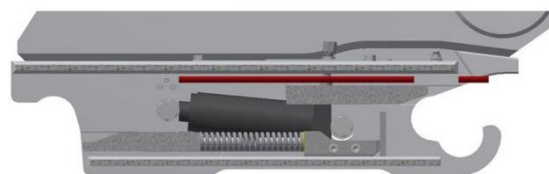
Figur 4.23: Fanghakekobling med påmontert redskap. Kulen er fastlåst til trekkarm med låsetapp og har en gjennomgående bolt som fester den til redskapen.

### 4.5.3 HURTIGKOBLING FOR GRAVEMASKIN

Det finnes flere skandinaviske produsenter av hurtigkoblinger for gravemaskiner, blant annet SMP Parts, Gjerstad, ABL Construction Equipment og Klepp Mek. Hurtigkoblingene er konstruert for å tåle svært høye belastninger og for å unngå slark. Gravemaskinens redskap er kort fortalt utstyrt med to solide akslinger. Disse festes til hurtigkoblingen på gravemaskinen og låses ved hjelp av en solid låsemekanisme. Figur 4.24 viser en HardLock hurtigkobling fra SMP. Den bakre akselen låses med en låsekile som skyves horisontalt ut av hurtigfestet, vist i figur 4.25. Samtidig låses den fremre akslingen ved at en eksentrert vender, utformet som en avlang krok, roterer rundt akslingen. Bevegelsene utføres ved hjelp av en dobbeltvirkende sylinder med høyt hydraulisk arbeidstrykk. Gravemaskiner har mange frihetsgrader, noe som gjør den meget anvendelig i tilkoblingen til ulike redskap [53] [54].



Figur 4.24: SMP HardLock hurtigfeste. Figuren viser fremre lås hvor den eksentrisk roterende delen låser fremre aksel. Låsekilen som låser bakakselen befinner seg på motstående side [53].



Figur 4.25: Hurtigfeste fra Gjerstad. Den bakre låsekilen er illustrert i mørkegrått nede på venstre side. Aktuatoren er plassert i senter og den fremre låsen er vist til høyre i figuren [54].

Teorien presentert i dette kapittelet danner grunnlaget for den videre utrednings- og utviklingsprosessen. Teknologiutredningen omfatter kun et utvalg av eksisterende prinsipper for sammenkobling, og ble benyttet som inspirasjon i utviklingen av verktøynnfestingssystem. Neste kapittel presenterer sentrale spesifikasjoner satt for den videre utviklingen og er basert på kundebehov, innspill fra oppdragsgiver og informasjon innhentet fra eksterne fagpersoner.

## 5. PRODUKTSPEISIFISERING

*Dette kapitlet vil innledningsvis redegjøre for målsettingene tilknyttet produktene. Viktige produktegenskaper rangeres og beskrives for å danne et rammeverk for de overordnede kravene, som igjen påvirker produktenes funksjon og utforming. Metriske grensespesifikasjoner fastsettes som et utgangspunkt for design. Avslutningsvis spesifiseres relevant regelverk aktuelt for utviklingen av produktene.*

### 5.1 PRODUKTMÅLSETTING

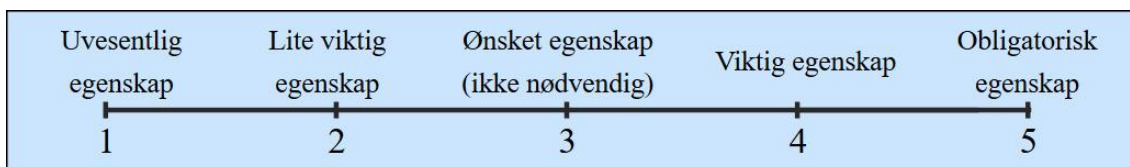
Hovedmålene for prosjektet er todelt, som beskrevet i kapittel 2.1. Det presenteres derfor to separate produktmålsettinger.

Hovedmålet for **verktøyinnfestingssystemet** er å danne en felles monteringsplattform for fremtidige lettvekts verktøy tilpasset Thorvald II. Innfestingssystemet skal tilrettelegge for fremtidig automatisk verktøymontering. Konstruksjonen må inneha en løftefunksjon for transportering av verktøy og samtidig ha mulighet for plassering av verktøy på over- og undersiden av festebraketten uten å oppta betydelig plass for verktøyene.

Hovedmålet for **UV-verktøyet** er å bidra til større grad av automatisering ved bekjempelse av soppsykdommen meldugg. Verktøyet som utvikles skal kunne monteres på Thorvald II plattformen og tilrettelegge for UV-bestråling på plantekulturene jordbær og agurk dyrket i henholdsvis plasttunneler og veksthus. Verktøyet må derfor inneha nødvendige justeringsmuligheter for tilpasning til plantekultur og ønsket funksjon.

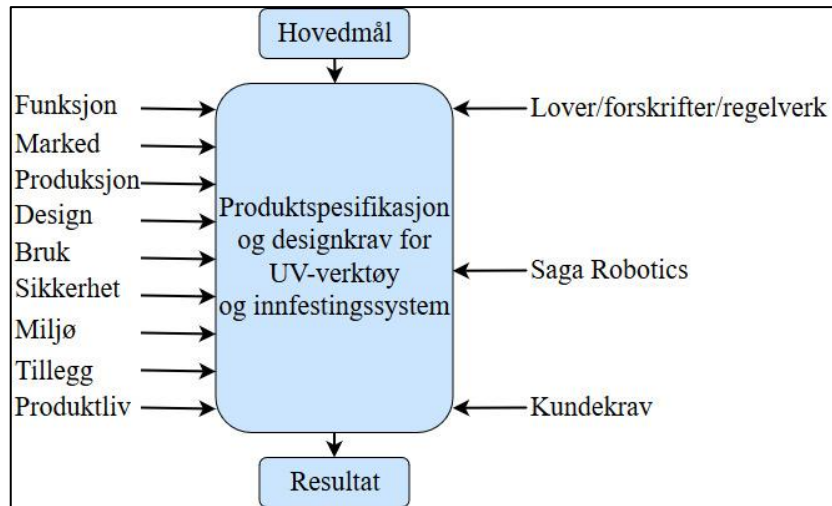
### 5.2 RANGERING AV VIKTIGE PRODUKTEGENSKAPER

Et helhetlig og robust resultat avhenger av en grundig designprosess som tar hensyn til flere faktorer. Inkludering av de «ni synsvinklne på et produkt», som beskrevet i kapittel 3.2.2, tilrettelegger for en bred synsvinkel ved betraktning designmessige faktorer. I tillegg til dette er en nødt til å inkludere ønsker og krav fra kunder og oppdragsgiver, samt forskrifter og relevant regelverk som berører produktet. Dette kapitlet søker å presentere en systematisk oversikt over de mest sentrale produktegenskapene, som videre er vektlagt ut ifra en skala fra 1-5 poeng, som beskrevet i figur 5.1. Produktegenskapene er direkte knyttet til design og systematiseres etter kategoriene illustrert i figur 5.2.



Figur 5.1: Poengskala fra 1-5 som beskriver viktighetsgrad av de mest sentrale produktegenskapene.





Figur 5.2: Faktorer avgjørende for utvikling av produktspesifikasjon for UV-verktøy og innfestingssystem.

### 5.2.1 PRODUKTEGENSKAPER FOR VERKTØYINNFESTINGSSYSTEM

Dette delkapittelet tar for seg produkttegenskaper tilknyttet innfestingssystem for verktøy på Thorvald II plattformen. De beskrevne egenskapene er rangert og benyttet videre i konsept- og komponentvalg i kapittel 6 og 8. Krav fra potensielle kunder, oppdragsgiver og regelverk er inkludert i de følgende kategoriene.

#### **Funksjon:**

*Løftefunksjon:* Innfestingssystemet må inneholde en hev- og senk funksjon for verktøy påmontert standardversjonen av Thorvald II. Det bør være kompakt og innkapslet for sikkerhet.

*Universelt:* Innfestingssystemets hurtigfeste skal kunne benyttes på alle eksisterende Thorvald modifikasjoner. Fremtidige verktøy som varierer i størrelse og utforming må ha tilstrekkelig plass både på over-, under- og innersiden av rammekonstruksjonen til standardversjonen av Thorvald II.

*Stabilitet:* Verktøyets innfestingspunkt bør tilrettelegge for at verktøyet holdes stabilt under drift. Innfestingen bør derfor baseres på flere innfestingspunkt eller større anleggsflater slik at fremtidige verktøy har en stabil innfestingsplattform.

*Automatisk:* Selve hurtigfestet skal tilrettelegge for fremtidig automatisk verktøytilkobling. Den må i så måte utformes slik at sammenkoblingskomponentene er selvposisjonierende. Dette avhenger av robotens fremtidige posisjoneringssystem og nøyaktighetsgraden dette har.

#### **Marked:**

*Modulbasert:* Innfestingssystemet må ivareta det modulbaserte prinsippet som Thorvald II plattformen baserer seg på. Det kan i så måte monteres på roboten som en egen modul.

*Pris:* Utvikling, testing og produksjon av valgt konsept må være konkurransedyktig prismessig. Dette varierer med blant annet kompleksitet, antall deler, bruk av standardkomponenter, reduserte utviklingskostnader og produksjonsmetoder.

### **Produksjon:**

*Kompleksitet:* Produktet skal bestå av et nødvendig antall komponenter for å tilfredsstille funksjonskrav. Det er likevel svært viktig at designet gjenspeiler enkelhet og om mulig bruk av ferdigproduserte standardkomponenter.

*Produksjonsvennlighet:* Design må tilrettelegge for produksjonsvennlighet ved bruk av standardkomponenter og symmetrisk utforming av deler som kan benyttes flere steder eller ha flere funksjoner.

### **Design:**

*Plassutnyttelse:* Design må tilrettelegge for at innfestingssystemet ikke opptar essensiell plass for potensielle verktøy. Det er ønskelig at mesteparten av området på innsiden av rammekonstruksjonen til Thorvald II har plass til verktøy, både i side, bredde og høyde.

*Vekt:* Lav vekt er gunstig med tanke på energibruk og jordpakking ved drift. Valg av materialtype, kvalitet og design er derfor viktig for å holde vekten lav.

*Eстетisk utseende:* Angir om konstruksjonens ytre design er estetisk, elegant og innbydende.

### **Bruk:**

*Robusthet:* Innfestingssystemets evne til å operere innendørs og utendørs og tåle de påkjenninger dette medfører. Materialvalg må gjøres for å unngå korrosjon og vedlikehold.

### **Sikkerhet:**

*Sikkerhet:* Innfestingssystemets utforming med hensyn til sikkerhet i henhold til maskinforskriften. Utformingen må sørge for en form for skjerming for å begrense tilgang til bevegelige deler som kan føre til klemskade.

### **Miljø:**

*Miljøhensyn:* Miljøbelastende faktorer ved framstilling, produksjon, bruk og resirkulering skal være lave. Dette gjenspeiles i materialvalg, holdbarhet og transport ved produksjon.

### **Tillegg:**

*Videreutviklingspotensial:* Design bør tilrettelegge for at fremtidige innretninger kan implementeres på innfestingssystemet. Dette kan være automatisk hurtigkobling av strøm- og signalkabler eller integrering av ekstra batterikapasitet plassert på konstruksjonen for verktøy som krever høy effekt. Manuelle løsninger kan uten store modifikasjoner erstattes med elektriske automatiserte komponenter som elektromotorer.

### **Produktliv:**

*Driftssikkerhet:* Pålitelige mekanismer og konstruksjon som tåler belastning over tid. Enkeltkomponenter skal kunne byttes ut dersom det oppstår defekter.

Tabell 5.1: Vektlagte produkttegenskaper for verktøyinnfestingssystem med begrunnelse.

	Produktegenskap	Verdi	Begrunnelse
<b>Funksjon</b>	Løftefunksjon	4	Fordel ved transportetapper til og fra arbeidsområde. Fleksibel posisjonering ved montering av verktøy.
	Universelt	4	En standardisert plattform for verktøyinnfesting på tvers av ulike robotversjoner er essensielt. Viktig å gi rom for fremtidige verktøy med ulik utforming.
	Låsefunksjon	3	Fremtidige verktøy kan ha innebygget flytfunksjon for å følge terrenget slik at eventuelle krefter fra verktøyet, ved kjøring i variert terreng, unngås. Fokus per nå er lette verktøy, og låsefunksjon er derfor ikke en svært nødvendig egenskap.
	Automatisk	5	Hensikten med Thorvald plattformen er at den skal operere autonomt, og det er derfor viktig å legge til rette for fremtidig automatisk verktøytilkobling via et hurtigfeste.
<b>Marked</b>	Modulbasert	4	Et modulbasert prinsipp gjør plattformen svært brukervennlig og det bør tilstrebes å bevare dette ved å utvikle verktøyinnfestingen som en egen modul.
	Pris	4	Robotplattformen skal være konkurransedyktig i forhold til dagens alternativer, og et gjennomgående fokus på lav pris er svært viktig.
<b>Produksjon</b>	Kompleksitet	5	Det er stort fokus på enkelhet i utforming og mekanismer. Det må tilstrebes å holde antall deler lavt, gitt god funksjonalitet.
	Produksjonsvennlighet	4	Det er viktig å tilrettelegge for enkle produksjons- og tilvirkningsmetoder. Bruk av standardkomponenter som krever lite maskinering ivaretar dette.
<b>Design</b>	Plassutnyttelse	4	Det er essensielt at produktet ikke opptar betydelig plass for potensielle verktøy. Tilstrekkelig rom for verktøy innenfor rammekonstruksjonen til roboten, så vel som rom i høyde, er en viktig faktor å påse.
	Vekt	4	Det er ønskelig med lav vekt for å ivareta høy løfte- og bæreevne, men dette kan ikke gå på bekostning av robustheten til konstruksjonen.
	Estetisk utseende	2	Estetisk og innbydende ytre design er en lavt vektet egenskap for jordbruksutstyr.

Tabell 5.1 (fortsettelse): Vektlagte egenskaper for verktøyinnfestingssystem med begrunnelse.

	Produktegenskap	Verdi	Begrunnelse
<b>Bruk</b>	Robusthet	5	Det er ønskelig at produktet tåler miljøpåkjenninger fra utendørs- og innendørs bruk. Materialvalg og design bør tilrettelegge for dette.
<b>Sikkerhet</b>	Sikkerhet	4	Det er viktig å ivareta sikkerhet ved utviklingen av produktet ved å betrakte regelverk og forskrifter. Bevegelige deler bør skjermes.
<b>Miljø</b>	Miljøhensyn	3	Det er ønskelig å ta hensyn til miljøbelastende faktorer ved framstilling, produksjon, bruk og resirkulering.
<b>Tillegg</b>	Videreutviklingspotensial	3	Det er en fordel at utformingen gjør det mulig å implementere fremtidige innretninger/utvidelser.
<b>Produktliv</b>	Driftssikkerhet	4	Det er viktig at produktet gjennom dets livsløp tåler antatte påkjenninger og enkelt kan repareres dersom defekter oppstår.

Vektingen av egenskapene viser at det er svært viktig å ivareta lav kompleksitet i utforming av verktøyinnfestingen. Det er også svært relevant å fokusere på robusthet og tilrettelegging for automatisk tilkobling av verktøy via et hurtigfeste. Dette baserer seg blant annet på tilbakemeldinger fra Saga Robotics.

### 5.2.2 PRODUKTEGENSKAPER FOR UV - VERKTØY

Dette delkapittelet presenterer de viktigste egenskapene relatert til utviklingen av UV-verktøy for plantekulturene jordbær og agurk. Egenskapene er rangert og benyttet videre i konsept- og komponentvalg i kapittel 6 og 8. Krav fra potensielle kunder, oppdragsgiver og regelverk er inkludert i de følgende kategoriene.

#### Funksjon

*Lysfordeling:* For å oppnå ønsket egenskap om bekjempelse av plantesykdom ved bruk av UV bestråling, må det tilstrebes en funksjon som tilrettelegger for ønsket lysfordeling. Fordelingen av den innstrålte effekten avhenger av korrekt avstand mellom lysrør, korrekt avstand mellom planter i forhold til lysrør og bruk av reflektorer for fordeling av strålingen. Det er også avgjørende at bestrålingskilden orienteres på en slik måte at soppsporene eksponeres

tilstrekkelig. Bestråling fra oversiden fører til at underliggende deler av planten ikke bestråles. Bestrålingstid reguleres med fremdriftshastigheten til Thorvald.

*Modulbasert:* For at verktøyet skal kunne tilpasses ulike plantekulturer basert på lik grunnplattform må det være en funksjon som sørger for at man ved bruk av moduler kan sette sammen ønsket verktøy.

*Justerbar:* UV-verktøyet skal til en viss grad kunne tilpasses ulike driftsløsninger og må derfor ha mulighet for manuell eller automatisk justering for tilpasning av individuelle behov i ulike veksthus eller plasttunneler. Denne funksjonen ønskes i form av enten bredde-, dybde- eller høydejustering, eller kombinasjoner av disse.

*Tilkoblingsfunksjon:* Verktøyet skal basere seg på innfesting til Thorvald via en brakett for hurtig innfesting.

### **Marked:**

*Pris:* Kostnader tilknyttet utvikling, testing og produksjon skal holdes lave, slik at produktet er konkurransedyktig i markedet. Produksjonskostnader skal kunne reduseres ved masseproduksjon.

### **Produksjon:**

*Kompleksitet:* Det er ønskelig at kompleksiteten til UV-verktøyet holdes lav. Bruk av standardkomponenter, et lavt antall deler og ferdigproduserte enheter fører til lavere kompleksitet.

*Produksjonsvennlighet:* Design og valg av konstruksjonselementer må tilrettelegge for produksjonsvennlighet. Utforming som gjør at enkeltkomponenter kan brukes flere steder og speilvendt bør tilstrebes. Produksjonsmetoder som medfører lavest mulig kostnad er ønskelig.

### **Design:**

*Vekt:* Vekten av UV verktøyet skal holdes lav grunnet et potensielt høyt tyngdepunkt, noe som kan føre til vibrasjoner og utmattingsbrudd ved for høy vekt. Verktøyet må designes på en måte som gir lav vekt samtidig som konstruksjonen innehar tilstrekkelig styrke og stivhet. Material- og profilvalg bør derfor basere seg på dette.

*Estetisk design:* Angir hvorvidt et estetisk og innbydende design er nødvendig og om dette kan gå på bekostning av andre egenskaper.

### **Bruk:**

*Vedlikehold:* UV verktøyet skal kunne settes sammen og demonteres relativt hurtig, tilpasset aktuell plantekultur. Festemetoder skal være robuste og tåle angitt bruk uten noen form for spesifikt vedlikehold. Utforming skal tilrettelegge for renslighet i form av at verktøyet ikke blir tilskitnet ved bruk.

*Robusthet:* Verktøyet må være robust i forhold til miljøet den opererer i. Design, materialvalg og løsninger må velges slik at verktøyet, med elektriske komponenter, tåler fuktige og støvete omgivelser i tillegg til at det er bestandig mot UV lys.

### Sikkerhet:

*Sikkerhet:* Endelig konsept må inneha sikkerhetsfunksjoner som beskytter personer mot eksponering av UV lys. Det kan også være fornuftig med mekanisk beskyttelse av lysrør slik at sannsynligheten for skade på disse minimeres.

### Miljø:

*Miljøhensyn:* Miljøbelastende faktorer ved framstilling, produksjon, bruk og resirkulering skal være lave. Dette gjenspeiles i materialvalg, produksjonsmetoder, holdbarhet og transport.

### Tillegg:

*Videreutviklingspotensial:* Design bør tilrettelegge for at fremtidige modifikasjoner kan gjøres gjennom eksempelvis oppgraderte versjoner. Dette kan innebære mulighet for tilpasning til flere plantekulturer eller systemer som kontinuerlig regulerer avstand til plante for ønsket innstråling dersom plantekulturen varierer i størrelse. Manuelle løsninger kan uten store modifikasjoner erstattes med elektriske automatiserte komponenter som elektromotorer.

### Produktliv:

*Driftssikkerhet:* Pålitelige mekanismer og konstruksjon som tåler belastning over tid. Enkeltkomponenter skal kunne byttes ut dersom det oppstår defekter.

Tabell 5.2: Vektlagte produktegenskaper for UV-verktøy med begrunnelse.

	Produktenskap	Verdi	Begrunnelse
Funksjon	Lysfordeling	4	Det er viktig at UV-verktøyet sørger for en korrekt lysinnstråling.
	Modulbasert	3	Et modulbasert konsept vil gjøre verktøyet fleksibelt for bruker, og er en ønsket egenskap.
	Justerbar	4	Justeringsmuligheter for tilpasning til ulike produksjonsfasiliteter gjør verktøyet allsidig og er en svært brukervennlig egenskap.
	Tilkoblingsfunksjon	5	Det er avgjørende at verktøyet er tilpasset innfestingssystemet på robotplattformen.
Marked	Pris	4	For et konkurransedyktig produkt må prisen holdes lav, gitt at ønsket funksjonalitet er oppnådd.
Produksjon	Kompleksitet	4	Fokus på enkelhet ved utarbeidelse av design er viktig. Lav kompleksitet er med på å holde prisen og antall deler lav.
	Produksjonsvennlighet	4	For å holde kostnad lav i produksjon må design og bruk av standardelementer legge til rette for dette. Ved masseproduksjon kan deler redesignes og andre produksjonsmetoder kan benyttes.

Tabell 5.2 (fortsettelse): Vektlagte produkttegenskaper for UV-verktøy med begrunnelse.

	Produktegenskap	Verdi	Begrunnelse
<b>Design</b>	Vekt	4	Det er viktig å fokusere på så lav vekt som mulig for å unngå vibrasjoner og svaing ved drift.
	Estetisk design	2	Et ytre estetisk design vektlegges lavt da det er funksjonaliteten som er sentralt å fokusere på ved utvikling av behandlingsverktøyet, ikke utseende.
<b>Bruk</b>	Vedlikehold	3	Det er ønskelig å legge til rette for lav grad av vedlikehold og enkel modifisering. Dette avhenger i stor grad av testing og tilbakemelding etter bruk og må betraktes mer langsiktig.
	Robusthet	5	Det er essensielt for funksjonalitet at verktøyet tåler påkjenningene fra miljøet det opererer i.
<b>Sikkerhet</b>	Sikkerhet	4	Ved bruk av UV-lys er det viktig å ivareta sikkerhet ved bruk, da strålingen kan være skadelig for mennesker. Sikkerhetsfunksjoner for beskyttelse av lysrigg er ønskelig.
<b>Miljø</b>	Miljøhensyn	3	Det er ønskelig å ta hensyn til miljøbelastende faktorer ved framstilling, produksjon, bruk og resirkulering.
<b>Tillegg</b>	Videreutviklingspotensial	3	Det er en fordel å tilrettelegge for at manuelle justeringsmuligheter kan automatiseres i fremtiden. Det bør være mulig å oppgradere konseptet i fremtiden basert på utarbeidet resultat.
<b>Produktliv</b>	Driftssikkerhet	4	Verktøyet skal kunne driftes kontinuerlig over lang tid og det er viktig at det tåler antatte påkjenninger over tid. Standardkomponenter skal enkelt kunne byttes ut ved eventuelle defekter.

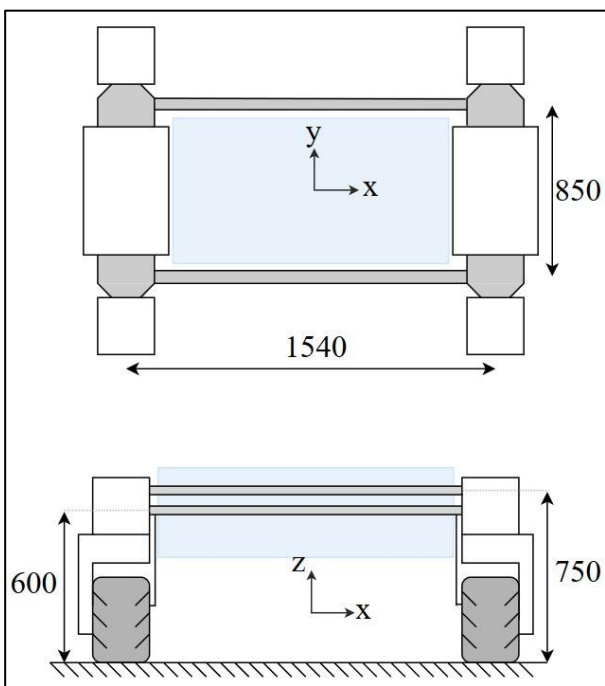
Vektleggingen av produkttegenskaper for UV-verktøyet viser at det er svært viktig å fokusere på robusthet, i tillegg til at verktøyet må basere seg på et standard innfestingssystem. Det er sentralt å fokusere på et justerbart, fleksibelt og driftssikkert verktøy med lav vekt, lav pris og lav kompleksitet. Verktøyet skal tilrettelegge for optimale bestrålingsforhold som er basert på oppdatert forskning. Vektingen baserer seg blant annet på tilbakemeldinger og ønsker fra Saga Robotics og potensielle kunder.

### 5.3 METRISKE GRENSESPESIFIKASJONER

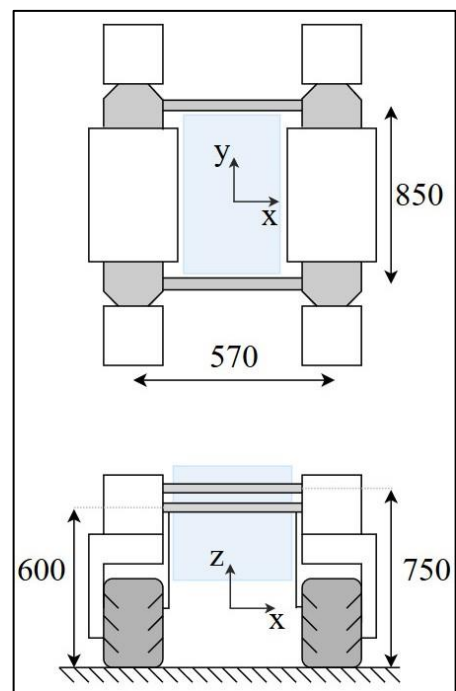
Som utgangspunkt for design ble det konkretisert metriske grensespesifikasjoner for verktøyinnfesting og UV-verktøy. I tabell 5.3 og 5.4 er det angitt grenseverdier og gjennomsnittsverdi som et antatt ideelt variasjonsområde for fysiske mål. Grenseverdiene baserer seg på fysiske begrensninger og mål fra eksisterende produksjonsfasiliteter, samt informasjon hentet fra produsenter. De metriske grensespesifikasjonene ble videre sett i sammenheng med de høyt vektlagte produktgenskapene ved utarbeidelse av design.

#### 5.3.1 KONFIGURASJONER OG EKSISTERENDE FYSISKE MÅL

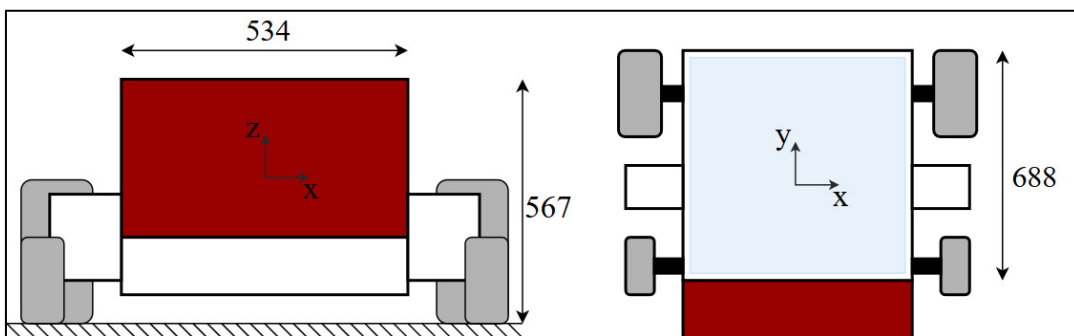
De eksisterende fysiske målene som danner utgangspunktet for grensespesifikasjonene er presentert i figurene under.



Figur 5.3: Målsatt standardversjon av Thorvald II. Lyseblått område illustrerer tilgjengelig plass for verktøyinnfesting. Mål i mm.



Figur 5.4: Målsatt smal versjon av Thorvald II. Lyseblått område illustrerer tilgjengelig plass for verktøyinnfesting. Mål i mm.



Figur 5.5: Målsatt drivhusversjon av Thorvald II. Lyseblått område på høyre figur illustrerer tilgjengelig plass for verktøyinnfesting. Mål i mm.

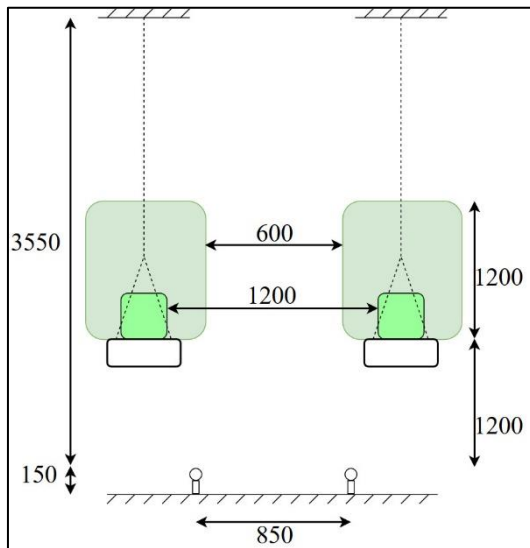




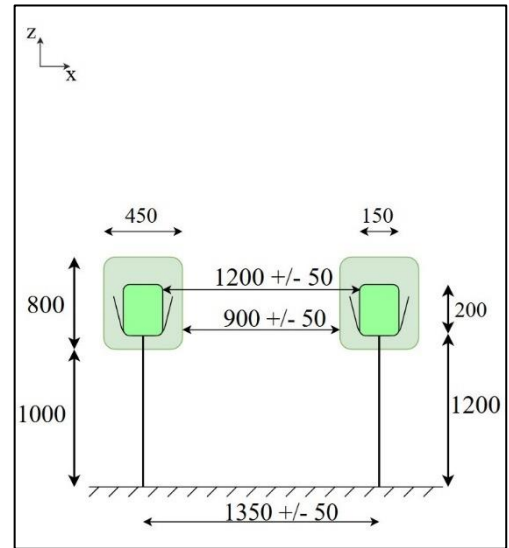
Figur 5.6: Produksjonsfasiliteter for agurkplanter i veksthus hos Kristian Guren. Skinnesystemet som roboten beveger seg på er vist mellom de to planteradene. [Kristian Guren]



Figur 5.7: Produksjonsfasiliteter for jordbær i plasttunnel hos Simen Myhre. En smalt modifisert Thorvald kan bevege seg i området mellom planteradene. [Simen Myhre]

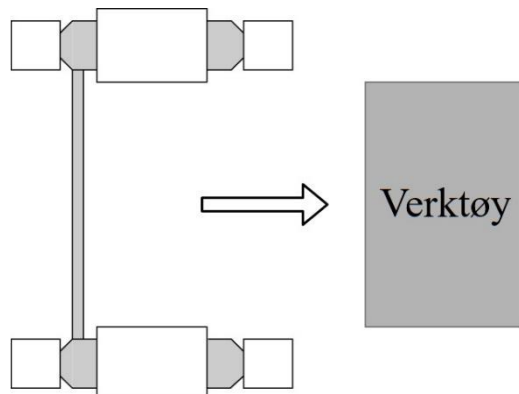


Figur 5.8: Mål i mm. Målsatt illustrasjon av produksjonsfasiliteter for agurk hos Kristian Guren. De grønne fargeområdene illustrerer plantealderen. Sterkt grønfarget område angir størrelsen til agurkplanten når den er liten og tidlig i vekstfasen. Svakere grønfarget område angir ønsket bestrålt område for en fullvoksen plante. Målene vil variere noe i forhold til sort, dyrkningsteknikk og veksthusstype. Angitte mål er brukt som utgangspunkt.



Figur 5.9: Mål i mm. Målsatt illustrasjon av table-top produksjonsfasiliteter for jordbær hos Simen Myhre. Jordbærplantene kan enten stå på bord fra underlaget, eller henge fra taket. Grønne fargeområder illustrerer størrelsesforskjell grunnet plantealder. Sterk grønnfarge angir små jordbærplanter som er tidlig i vekstfasen. Svakere grønnfarge angir størrelsen for en fullvoksen plante. Målene varierer noe ut ifra type plasttunnel, dyrkningsteknikk og sort. Angitte mål er brukt som utgangspunkt.

Når Thorvald skal bære verktøy antas det en konfigurasjon med en åpen ramme. Det betyr at den fremre rammen på roboten er fjernet slik at den kan kjøre inn mot verktøyet og festes, som illustrert i figur 5.10. Det er videre antatt at de ulike fremtidige verktøy oppbevares på en egen konstruksjon som tilrettelegger for at roboten lettvisst kan kjøre inn for å montere verktøy.



Figur 5.10: Thorvald konfigurert med åpen ramme for montering av verktøy.

### 5.3.2 METRISKE GRENSESPESIFIKASJONER FOR VERKTØYINNFESTINGSSYSTEM

Konstruksjonen som utgjør verktøyinnfestingen skal kunne benyttes på standardversjonen av Thorvald II, modifisert i ulike bredder. Selve innfestingsbraketten som befinner seg på denne konstruksjonen skal også kunne monteres til veksthusversjonen som baserer seg på fremdrift via skinner. Parameterne høyde, lengde og bredde utgjør variasjonen for verktøyinnfestingens opptatte volum innenfor robotens rammekonstruksjon. Metriske grenseverdier for verktøyfeste er presentert i tabell 5.3.

Tabell 5.3: Metriske grensespesifikasjoner for verktøyinnfesting, beskrevet av enhet, minimumsmål, gjennomsnittsmål og maksimumsmål. Målene

Verktøyfeste				
Beskrivelse	Enhet (SI)	Minimum	Gjennomsnitt	Maksimum
Høyde (z)	mm	100	300	500
Lengde (y)	mm	688	819	950
Bredde (x)	mm	534	1067	1600
Egenvekt	Kg	10	30	50
Bærende vekt	Kg	0	100	200
Løftekapasitet	Kg	0	100	200
Løftehøyde	mm	100	200	300

### 5.3.3 METRISKE GRENSESPESIFIKASJONER FOR UV - VERKTØY

UV – verktøyet skal kunne benyttes på en standardversjon som er smalt modifisert i tillegg til veksthusversjonen som går på skinner. Montering av verktøyet skal være basert på verktøyinnfestingssystemet slik at dette kan gjøres hurtig og automatisk i fremtiden. Metriske grenseverdier for UV-verktøyet er presentert i tabell 5.4.

Tabell 5.4: *Metriske grensespesifikasjoner for UV-verktøy, beskrevet av enhet, minimumsmål, gjennomsnittsmål og maksimumsmål. Metriske spesifikasjoner for jordbærkultur og agurkkultur er hentet fra henholdsvis Simen Myhre og Kristian Guren. Utvalgte mål er illustrert i figur 5.8 og 5.9. Bredde, høyde og lengde angir variasjonen for verktøyets opptatte volum.*

UV-verktøy				
Beskrivelse	Enhet (SI)	Minimum	Gjennomsnitt	Maksimum
Lysrør effekt	W	60	90	120
Verktøyhøyde (z)	mm	200	700	1200
Verktøybredde (x)	mm	20	635	1250
Verktøylengde (y)	mm	70	100	130
Total egenvekt	Kg	10	105	200
UV-verktøy for jordbærkultur				
Bestrålingshøyde (z)	mm	200	500	800
Høydejustering (z)	mm	0	200	400
Innstrålt energi	J/m <sup>2</sup>	216	216	216
Avstand fra plante (x)	mm	425	525	625
UV-verktøy for agurkkultur				
Bestrålingshøyde (z)	mm	200	700	1200
Innstrålt energi	J/m <sup>2</sup>	216	216	216
Avstand fra plante (x)	mm	300	450	600
Lengdejustering (y)	mm	10	505	1000

## 5.4 REGELVERK OG FORSKRIFTER

Som del av produktspesifiseringen ble det antatt relevant å inkludere lover og regler som berører utviklingen og design av både UV-verktøy og verktøyinnfestingen. Krav og føringer fra forskrift om maskiner, elektriske lavspenningsinstallasjoner (NEK400), strålevernloven og produsentforskriften er undersøkt for innhenting av informasjon. Både UV-verktøyet og innfestingssystemet ble ansett som maskiner da begge inneholder bevegelige deler.

### Forskrift om maskiner

Maskinforskriften gjelder for konstruksjon, bygging og omsetning av blant annet maskiner. Forskriften bidrar til å sørge for at det gjennomføres risikovurderinger for å fastslå krav til vern mot fare for liv og helse som knyttes til den aktuelle maskinen. Etter vedlegg 1, nr. 1.1.2 *skal maskiner blant annet være konstruert og utformet slik at de kan fungere, innstilles og vedlikeholdes uten at personer utsettes for risiko.* Det vil derfor være nødvendig å skjerme enkelte bevegelige deler for å forhindre eventuell klemfare. Det stilles også krav til mekanisk styrke. Gjennom vedlegg 1, nr. 4.1.2.3, påpekes det at *maskiner skal være konstruert og bygget slik at det ikke oppstår svikt som følge av materialtretthet eller slitasje ved den bruken den er bestemt for.* Dette må blant annet ivaretas gjennom dimensjonering og simuleringer. Etter vedlegg 1, nr. 1.7.3, *skal maskiner ha merking som er tydelig og varig.* Merkingen skal blant annet inneholde produsentens firmanavn, maskinens betegnelse og CE-merking [55].

Sistnevnte må i dette prosjektet ivaretas ved å benytte seg av komponenter som kommer med CE-merking. Ved ferdigstilling av produktene og ved eventuelle salg er det viktig å undersøke disse føringene nærmere. De nevnte krav og føringer representerer kun et utvalg av hva som kan være nødvendig å påse i utviklingen av produktene.

### **Elektriske lavspenningsinstallasjoner (NEK400)**

NEK400 er, i henhold til Standard Norge, et henvisningsgrunnlag til forskrift om elektriske lavspenningsanlegg og har til formål å bidra til sikkerhet og funksjon for elektriske lavspenningsinstallasjoner [56]. Da produktene med høy sannsynlighet vil utsettes for fuktig klima, er det nødvendig å påse tilstrekkelig kapslingsgrad for de elektriske komponentene. *Med kapslingsgrad forstås i hvilken grad elektrisk utstyr er beskyttet mot berøring og ytre påvirkninger som støv, fuktighet og liknende* [57]. Det vil være hensiktsmessig å benytte komponenter med klassifisering fra det gjeldende regelverket som følger IP-systemet (International Protection). For antatte miljømessige påkjenninger vil IP66 og IP67 være tilstrekkelig.

### **Lov om strålevern og bruk av stråling (Strålevernloven)**

Formålet med denne loven er blant annet å *forebygge skadelige virkninger av stråling på menneskers helse*. Loven inkluderer også ultrafiolett stråling og påpeker at det kan stilles krav til skjermingstiltak, merking av strålingskilder og opplysning om anvendelse og håndtering. Dette er i høy grad relevant for UV-verktøyet og det må derfor implementeres skjerminger.

### **Forskrift om konstruksjon, utforming og fremstilling av arbeidsutstyr og kjemikalier (Produsentforskriften)**

Denne forskriften omhandler, blant andre temaer, også maskiner som frembringer helsefarlig stråling. Etter § 2-23, *skal maskiner isoleres og være slik innrettet at de ikke kan forårsake skade på liv og helse når de brukes riktig*. Maskinen skal også ha *hensiktsmessig varselskilt*. Dette er faktorer som må ivaretas før ferdigstilling av UV-verktøyet gjennom skjerming og varselskilt.

Med utgangspunkt i produktspesifikasjonen kom det tydelig frem at gjennomgående ønskede egenskaper for både UV-verktøy og innfestingssystem er lav vekt, lav kompleksitet, modularitet, robusthet og tilretteleggelse for fremtidige autonome funksjoner. Fra teknologiutredningen ble det indentifisert at det var sentralt å fokusere på utvikling av et felles innfestingssystem som kan benyttes på tvers av ulike robotversjoner. Basert på kontakten med produsentene Simen Myhre og Kristian Guren, ble det tatt utgangspunkt i deres produksjonsfasiliteter for de metriske grensespesifikasjonene. Det ble også fattet enighet om ønskede justeringsmuligheter på UV-verktøyene for å tilpasse individuelle produksjonsforhold. Etter besøk hos Simen Myhre ble det bestemt at UV-verktøyet må bestråle hver rad fullstendig fra begge sider når roboten kjører én radlengde. Grunnen for dette var for å inkludere radene nærmest veggene i plasttunnelen, da roboten ikke har plass til å kjøre på yttersiden av ytterste rad. Andre faktorer som ble ansett som sentrale i den videre utviklingen var sikkerhetstiltak som skjerming av bevegelige mekanismer og skjerming for å hindre mennesker fra å bli eksponert for UV-C strålingen.

## 6. KONSEPTGENERERING

I dette kapittelet presenteres et utvalg av forskjellige funksjonsalternativer for innfestingssystemet og UV-verktøyet. Disse ulike konseptene søker å imøtekomme produktspesifikasjonen og danner grunnlaget for videre seleksjon og konseptvalg. Funksjonsalternativene er skissert og beskrevet gjennom fordeler og ulemper. Innledningsvis sammenfattes tidligere arbeid, eksisterende løsninger og generelle vurderinger gjort underveis.

### 6.1 VERKTØYINNFESTINGSSYSTEM

Verktøyinnfestingssystemet omfatter konstruksjonen som muliggjør tilkobling av verktøy til Thorvald II plattformen. Det ble tatt utgangspunkt i et system tilpasset standardversjonen av Thorvald II, men som også består av komponenter slik at et hurtigfeste kan kobles til de andre robotmodifikasjonene.


#### 6.1.1 TIDLIGERE ARBEID

Det har i tidligere masteroppgaver blitt gjort noen generelle vurderinger om hvordan verktøy potensielt kan forbindes til rammekonstruksjonen på Thorvald. I 2015 foreslo Fredrik Blomberg en trekantet ramme plassert innenfor rammekonstruksjonen til Thorvald I. Det ble tatt utgangspunkt i en åpen U-formet Thorvald-ramme. Verktøyet er ment å ta opp strekk- og trykkrefter og skal holde Thorvald-rammen sammen ved å omslutte åpningen. Ulike verktøy skal dermed kunne festes til denne trekantrammen [58]. I 2016 beskrev Øystein Tårnes Sund to forslag for montering av verktøy på Thorvald II. Ett forslag baserte seg på justering av høyden til roboten ved å benytte fleksibiliteten til demperne. På den måten kunne man utnytte slaglengden til demperne for å heve eller senke roboten. Monteringen skulle foregå i nedre posisjon, og roboten skulle heves etter tilkoblingen slik at verktøyet fastlåses. Et annet forslag baserte seg på en ramme som opptar rommet innenfor rammekonstruksjonen til Thorvald II. Rammeforslaget innehar en funksjon hvor hjul entrer skinner. Dette krever videre utvikling av en låsefunksjon for å holde verktøyet fast [59].



#### 6.1.2 EKSISTERENDE LØSNINGER

Tabell 6.1 presenterer en oversikt over løsninger ved et utvalg eksisterende konsepter.

Tabell 6.1: Illustrasjon og beskrivelse av eksisterende konsepter med deres tilhørende innfestingssystemer.

	<p><b>ROBOTTI (AGROINTELLI)</b></p> <p>Autonom redskapsplattform med de samme kapabiliteter som en liten traktor. Verktøy kobles til plattformen via et tre-punkt feste. Løftekapasitet er 1000 kg og egenvekt uten verktøy er 1000 kg. Plattformen er stor, leveres med bredde opptil 4,6 meter og er basert på en åpen ramme (U-form). Roboten drives av en dieselmotor med 24,8 hestekrefter [60].</p>
---	---

Tabell 6.1 (forts.): Illustrasjon og beskrivelse av eksisterende konsepter med deres tilhørende innfestingssystemer.

	<p><b>Weeding Robot (Naïo Technologies)</b>                  Autonom bearbeidingsrobot for grønnsakskulturer. Roboten har tilkoblingsmulighet for forskjellige verktøy som er plassert på undersiden. Plattformen er elektrisk og tilrettelegger for heving og senkning av verktøyene. Det er også mulighet for automatisk sideveis justering av verktøyene. Verktøyinnfestingen baserer seg på lette verktøy [61].</p>
	<p><b>ANATIS (Carré)</b>                  Autonom bearbeidingsrobot for grønnsakskulturer. Tilkobling av verktøy skjer via et tre-punkt feste i bakkant av roboten. Verktøy kan også heves og senkes. Sporvidden kan justeres mellom 1,45-2,05 meter. Roboten veier 800 kg og driftes av elektriske batterier [62].</p>

### 6.1.3 SAMMENDRAG AV GENERELLE VURDERINGER

Under utviklingen av løsningsalternativer for verktøyinnfestingen ble det tatt utgangspunkt i dagens robotplattform og dens kapasiteter. Spesifikke fremtidige verktøy er imidlertid ukjent, og det ble bestemt at verktøyfestet skulle basere seg på lette verktøy. Ved bruk av tyngre verktøy ble det tatt utgangspunkt i at de er selvbærende i form av egne hjul mot underlaget. Det har også blitt bestemt at selve verktøyinnfestingen med dens mekanismer skal være rigid og at ulike verktøy i fremtiden derfor har egen flytfunksjon for eksempelvis å kunne følge ulendt terreng.

Det har blitt studert et mangfold eksisterende løsninger for innfestingssystemer i den hensikt å få inspirasjon. Det ble ansett som sentralt å finne en løsning som kan brukes på tvers av de ulike robotversjonene. Dette kan eksempelvis løses ved bruk av et felles hurtigfeste. For standardversjonen til Thorvald II har det vært ønskelig å ivareta plass for verktøy innenfor rammekonstruksjonen.

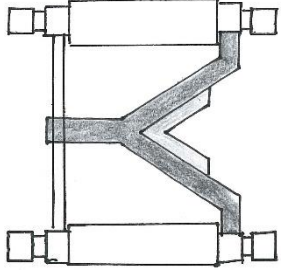

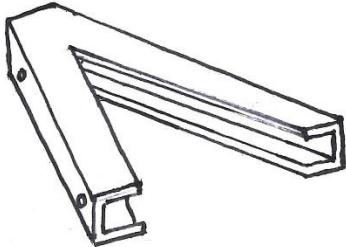
Det ble tidlig bestemt at det kan være svært hensiktsmessig med en justeringsmulighet i høyde. Denne funksjonen kan eksempelvis benyttes ved påmontering av verktøy for å gjøre posisjoneringen lettere. Det kan også benyttes for å heve verktøy under transporteringsetapper hvor roboten kjører fra sin egen stasjon og ut til arbeidsområdet. Det ble antatt at egen finjustering i høyde i fremtiden er implementert på verktøyet. Som illustrert i kapittel 5.3.1, er det tatt utgangspunkt i at verktøy er plassert i en egen lagringsstasjon som gjør det lett med av- og påmontering.

### 6.1.4 FUNKSJONSALTERNATIVER, VERKTØYINNFESTINGSSYSTEM

En systematisk oversikt over de ulike funksjonsalternativene er her presentert slik de fremgikk i utviklingen. De skisserte og beskrevne alternativene er blant annet basert på produktspesifikasjonen, samt ønsker og krav fra produsenter og Saga Robotics. Alternativene under tar for seg hovedoppsett, mens mer detaljerte alternativer for valgt løsning er gjennomgått i kapittel 8. Systemet ble overordnet inndelt i bæreramme, høydejustering og hurtigfeste.

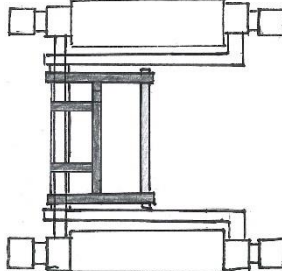
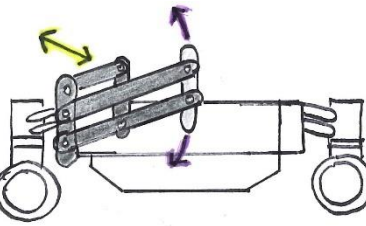
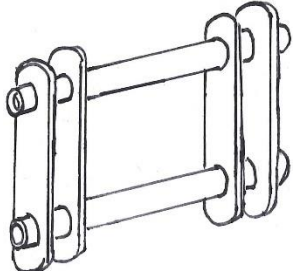
#### Funksjonsalternativ A

Enkel og robust løsning som baserer seg på et hurtigfeste (A.3) festet til en statisk ramme som vist i figur A.1. Hurtigfestet er inspirert av Lyng sin triangelkobling og fungerer ved at et motstående triangel føres inn i A-formen (selvsentrerende). Verktøy kan potensielt plasseres over og under rammen. Løsningen forutsetter at verktøy innehar egen heve og senk funksjon.

<p><b>A.1</b></p> 	<p><b>A.2</b></p> 	<p><b>A.3</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Fordeler</b></p>		<p style="text-align: center;"><b>Ulemper</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Lav pris grunnet lav kompleksitet</li> <li>+ Bruk av standard profiler</li> <li>+ Hurtigfestet kan brukes på andre roboter</li> <li>+ Krever lav grad av nøyaktighet under posisjonering ved verktøypåkobling</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ingen hevefunksjon</li> <li>- Rammen opptar verdifull plass</li> <li>- Rammen må justeres ved endring av bredden til roboten (sporvidden)</li> </ul>

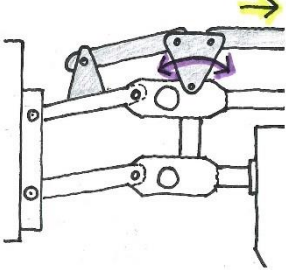
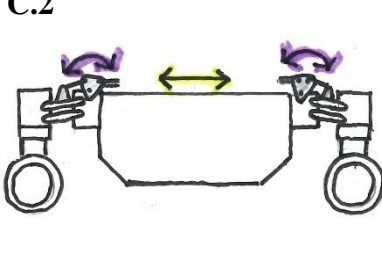
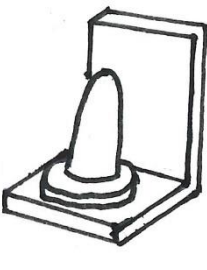
#### Funksjonsalternativ B

Parallelstaggprinsipp som benytter en lineær aktuator for justering i høyde, illustrert i gult (B.2). Hurtigfeste er inspirert av HMR hurtigkobling og hekter verktøyets motstående kroker til rørprofilene illustrert i figur B.3. Krever middels grad av nøyaktighet under posisjonering ved verktøypåkobling. Bevegelsen til hurtigfestet er illustrert i lilla.

<p><b>B.1</b></p> 	<p><b>B.2</b></p> 	<p><b>B.3</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Fordeler</b></p>		<p style="text-align: center;"><b>Ulemper</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ God høydejustering</li> <li>+ Solid mekanisme som er godt utprøvd</li> <li>+ Gir middels god plass til verktøy</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Høy belastning på Thorvald-rammen</li> <li>- Aktuator må tåle høy statisk belastning</li> <li>- Dårlig vektfordeling ved hevet verktøy</li> <li>- Lite tilpasningsdyktig</li> </ul>

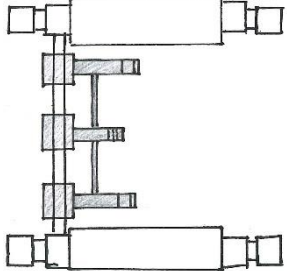
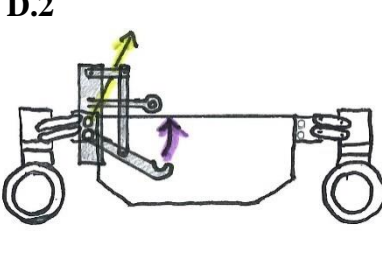
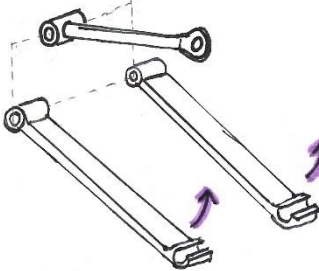
### Funksjonsalternativ C

En lineærbevegelse, illustrert i gult, skaper rotasjon i parallellstengene (lilla) som forbinder Thorvald-rammen med drivmodulen. Bevegelsen fører til at hele roboten kan justeres i høyde og dermed kan løfte seg selv og verktøyet. Selve innfestingen baserer seg på fire koniske tapper (C.3) montert til robotens fire hjørner, som kan låses fast med låsebolter. En kunne også benyttet et skinnesystem som en alternativ løsning for tilkobling av verktøy

<p><b>C.1</b></p> 	<p><b>C.2</b></p> 	<p><b>C.3</b></p> 
Fordeler		Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Svært god plass til verktøy i høyde, bredde og lengde</li> <li>+ Lav vekt</li> <li>+ Lav pris grunnet lav kompleksitet</li> <li>+ Stabil løsning da festepunktene er nært hjørnene</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Begrenset mulighet for høydejustering (kan modifiseres for å bedres)</li> <li>- Aktuator må tåle kontinuerlig høy belastning</li> <li>- Tilrettelegger ikke for universalt festesystem på tvers av robotversjoner</li> </ul>	

### Funksjonsalternativ D

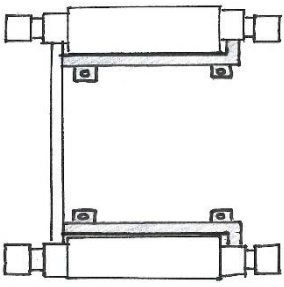
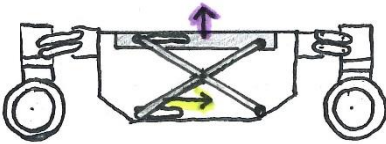
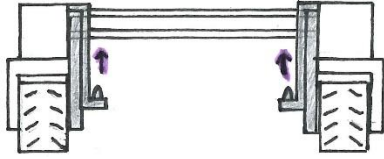
Trekkarmsprinsipp inspirert av tre-punkt feste brukt på traktorer. Verktøy kobles til to trekkarmer og ett toppstag, via fanghaker. Trekkarmene kan justeres i høyde ved bruk av en lineær aktuator, illustrert i gult. Bevegelsen til trekkarmene er illustrert i lilla. Toppstaget er festet til et ledd og følger løftebevegelsen.

<p><b>D.1</b></p> 	<p><b>D.2</b></p> 	<p><b>D.3</b></p> 
Fordeler		Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Gir middels god plass til verktøy i bredde og høyde</li> <li>+ Solid prinsipp som er godt utprøvd</li> <li>+ Middels kompleksitet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dårlig tilrettelagt for enkel/automatisk påkobling av verktøy</li> <li>- Høy belastning konsentrert på den ene Thorvald-rammen</li> <li>- Dårlig vektfordeling ved hevet verktøy</li> <li>- Tilrettelegger ikke for universalt innfestesystem på tvers av robotversjoner</li> </ul>	



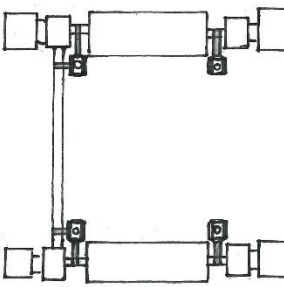
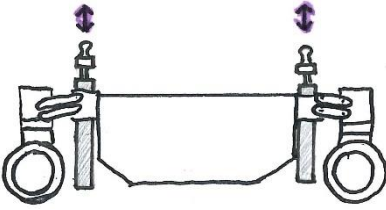

### Funksjonsalternativ E

Løsningen tar utgangspunkt i å utvide batterikassen for å gi rom til en smal løftmekanisme. Løfteprinsippet til en sakselift eller en elektrisk vindusheis i bil er gode alternativer til en slik mekanisme. Verktøyfestet baserer seg på koniske tapper som føres inn i verktøyet ved heving og låses fast. Roboten kan i så måte kjøre inn mot verktøyet i senket posisjon og deretter heve tappene for å feste seg. Innfestingspunktene er illustrert nokså lavt, men kan også plasseres høyere. En lineær bevegelse, illustrert i gult, vil heve løftmekanismen som videre er direkte koblet til tappene. Dermed løftes innfestingspunktene som illustrert med lilla i figur E.3.

<p><b>E.1</b></p> 	<p><b>E.2</b></p> 	<p><b>E.3</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Fordeler</b></p>		<p style="text-align: center;"><b>Ulemper</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Kompakt løsning som gir god plass til verktøy i bredde, lengde og høyde</li> <li>+ Solid prinsipp som overfører krefter til robotens rammekonstruksjon</li> <li>+ Nokså god høydejustering</li> <li>+ Kan benyttes ved ulike breddevariasjoner</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tilrettelegger ikke for universalt festesystem på tvers av robotversjoner</li> <li>- Kan medføre mange deler og høy kompleksitet</li> <li>- Kan medføre dårlig kraftoverføring til ramme.</li> </ul>

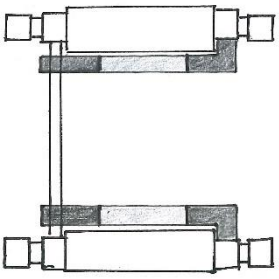
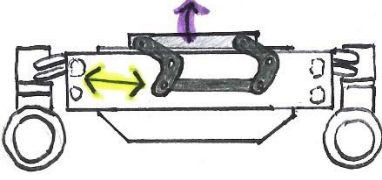
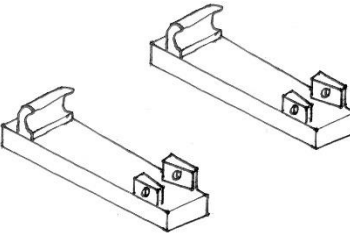
### Funksjonsalternativ F

Denne løsningen tar også utgangspunkt i fire festepunkter montert fast i robotens fire hjørner. Innfestingspunktene baserer seg på samme system som hengerfestet på biler. Festepunktene kan justeres i høyde ved bruk av løftesøyler. Skruen illustrert i F.3, vil ved rotasjonsbevegelse kunne heves og senkes. Slike løsninger finnes i verkstedhaller for å heve eksempelvis biler. Innfestingssystemet medfører relativt enkel verktøypåkobling.

<p><b>F.1</b></p> 	<p><b>F.2</b></p> 	<p><b>F.3</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Fordeler</b></p>		<p style="text-align: center;"><b>Ulemper</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Kompakt løsning som gir god plass til verktøy i bredde, lengde og høyde</li> <li>+ Solid prinsipp som overfører krefter til robotens rammekonstruksjon</li> <li>+ God høydejustering og lav vekt</li> <li>+ Godt utprøvd og kraftig hevemekanisme</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tilrettelegger ikke for universalt festesystem på tvers av robotversjoner</li> <li>- Verktøyet må inneha en funksjon for å løse ut innfestingen ved avkobling</li> <li>- Løftesøylene krever stor plass i høyde</li> </ul>

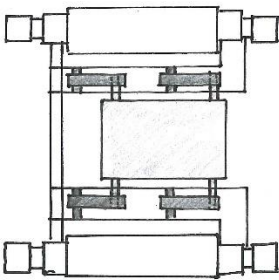
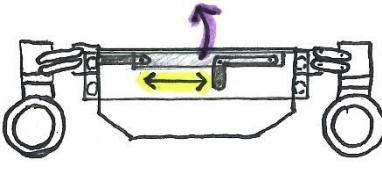
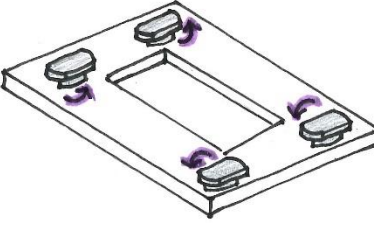
### Funksjonsalternativ G

To L-formede rammer er festet i tilknytning til robotens fire hjørnepunkter. Rammene inneholder individuelle løftemekanismer for å kunne heve verktøyet. Ved bruk av lineær bevegelse, illustrert i gult, vil selve hurtigfestet, illustrert i lysegrått, heves opp og ned. Roboten kan modifiseres i ulike bredder og rammen med tilhørende hurtigfeste vil være upåvirket. Det foreslåtte hurtigfestet (G.3) blir festet til verktøyet ved at et rør treffer den bakre kloen. Videre entres en kloss mellom de to eksisterende brakettene og en låsebolt holder det hele fast.

<p><b>G.1</b></p> 	<p><b>G.2</b></p> 	<p><b>G.3</b></p> 
Fordeler		Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Kompakt løsning som gir god plass til verktøy i bredde, lengde og høyde</li> <li>+ Solid prinsipp som overfører krefter til robotens rammekonstruksjon</li> <li>+ Kan benyttes ved ulike breddevariasjoner</li> <li>+ Hurtigfestet kan benyttes på andre robotversjoner</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kan innebære mange deler og føre til middels høy kompleksitet</li> <li>- Kan medføre høy pris</li> <li>- Økt høydejustering vil føre til en større utforming av hele systemet</li> </ul>	

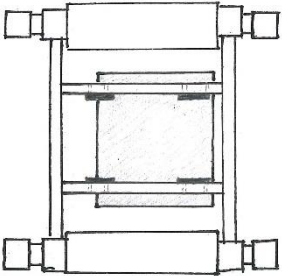
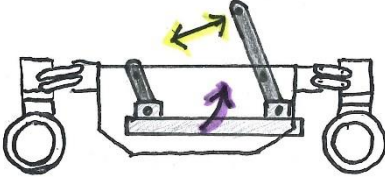
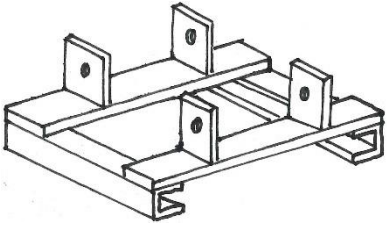
### Funksjonsalternativ H

Løftemekanismen er også her innebygget i to L-formede profiler og kan heves ved lineær bevegelse, illustrert i gult. Hurtigfestet er plassert i senter av roboten sett ovenfra (H.1), og heves som vist i lilla (H.2). Selve innfestingen baserer seg på fire rektangelformede hoder som entres tilsvarende åpninger i verktøyet og roteres 90 ° for fastlåsing. Det samme prinsippet benyttes for fastlåsing av containere på lastebilplan. Selve hurtigfestet kan orienteres opp, som vist i H.3, eller pekende ned dersom verktøy skal plasseres under.

<p><b>H.1</b></p> 	<p><b>H.2</b></p> 	<p><b>H.3</b></p> 
Fordeler		Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Hurtigfestet kan benyttes på andre robotversjoner</li> <li>+ Stabil konstruksjon som overfører krefter til robotens rammekonstruksjon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kompleks løsning med mange deler</li> <li>- Opptar verdifull plass for verktøy</li> <li>- Dårlig tilkoblingsmulighet for verktøy plassert på undersiden</li> </ul>	

### Funksjonsalternativ I

Løsningen innebærer en ramme som låser av den åpne U-formen til roboten. Verktøyrammen har to bjelker som strekker seg til bakkant av robotrammen. Selve hurtigfestet er plassert i senter, på et høydenivå nedenfor verktøyrammen og består av to skinner. Den motstående verktøydelen vil entre inn i disse to skinnene som låses fast med låsebolter. Ved hjelp av en lineær bevegelse, illustrert i gult, vil hurtigfestet kunne heves og senkes. Verktøy som ønskes festet til oversiden av roboten må monteres manuelt til verktøyrammen.

<p><b>I.1</b></p> 	<p><b>I.2</b></p> 	<p><b>I.3</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Fordeler</b></p>		<p style="text-align: center;"><b>Ulemper</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Nokså enkelt prinsipp for høydejustering</li> <li>+ Lav pris grunnet lav kompleksitet</li> <li>+ Høyt videreutviklingspotensial</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Opptar verdifull plass for verktøyet</li> <li>- Legger ikke til rette for fremtidig automatisk tilkobling av verktøy fra oversiden</li> </ul>

### 6.1.5 SELEKSJON AV FUNKSJONSALTERNATIVER

Med bakgrunn i produktegenskapene presentert i kapittel 5.2.1, samt problemstillingene identifisert i kapittel 1.4.1, ble funksjonsalternativene vurdert og rangert. Seleksjonen i tabell 6.2 er basert på Pughs metode og tar hensyn til vektleggingen av tidligere presenterte egenskaper.

Tabell 6.2: Konseptscreening for hovedoppsett av verktøyinnfesting. Funksjonsalternativene ble gitt +1 dersom de tilfredsstillter egenskapen godt, 0 gitt hvis de delvis tilfredsstillter og -1 hvis de ikke tilfredsstillter. Poengene er summert i bunn av tabellen.

Egenskap	Vektfaktor	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Løftefunksjon	4	-1	+1	0	+1	+1	+1	+1	+1	0
Universelt	4	0	-1	+1	-1	0	0	+1	+1	-1
Stabilitet	3	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Automatisk	5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	0
Modulbasert	4	0	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0	-1
Pris	4	+1	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	0
Kompleksitet	5	+1	+1	0	+1	0	0	0	-1	+1
Produksjonsvennlighet	4	0	0	+1	0	-1	+1	-1	-1	+1
Plassutnyttelse	4	-1	-1	+1	0	+1	+1	+1	-1	-1
Vekt	4	-1	0	+1	0	0	0	0	-1	0
Estetisk utseende	2	0	-1	0	-1	0	0	0	0	-1
Robusthet	5	+1	+1	-1	+1	0	-1	+1	+1	+1
Sikkerhet	4	0	-1	0	-1	+1	+1	+1	+1	0
Miljøhensyn	3	+1	0	-1	0	0	-1	0	-1	0
Videreutviklingspotensial	3	-1	-1	0	-1	0	0	0	0	+1
Driftssikkerhet	4	+1	+1	-1	+1	0	+1	+1	0	+1
Antall (+)		6	6	6	5	6	8	9	6	6
Antall (-)		5	6	5	5	2	3	2	6	4
Sum, vektet (+)		26	26	24	21	24	28	33	25	24
Sum, vektet (-)		18	21	20	19	8	12	8	24	14
Sum, vektet totalt		8	5	4	2	16	16	25	1	10

Alternativ A, B, D, H og I opptar verdifull plass innenfor robotens ramme og siden dette ugunstig med tanke på verktøyplass, er disse løsningene i nedre sjikt og har lav score. Alternativ C kan medføre at aktuatorene utsettes for støt og belastninger, noe som er uheldig. Løsningen gir heller ikke god løftehøyde. Selv om alternativ E og F er nokså gode alternativer og innehar innfestingspunkter som kan benyttes på andre robotversjoner, vil avstanden mellom punktene være annerledes, noe som er uønsket. Alternativ G imøtekommer mange egenskaper og scorer høyt fordi den kombinerer et kompakt design som gir god plass for verktøy, et hurtigfeste som kan benyttes på flere robotversjoner og et antatt robust og driftssikkert design.

**Valgt løsningsalternativ: G**

## 6.2 UV-VERKTØY

UV-verktøyet omfatter en justerbar konstruksjon som kan tilpasses både jordbær- og agurkkulturer. Påkoblingen til Thorvald II vil ta utgangspunkt i det parallelt utviklede innfestingssystemet.

### 6.2.1 TIDLIGERE ARBEID

Det er tidligere utviklet 3 ulike prototyper av UV-verktøyet som er testet i eksisterende produksjonsfasiliteter. To av disse er testet på jordbær i plasttunneler hos Simen Myhre i Sylling, mens én har bestrålt agurkplanter i drivhus hos Kristian Guren på Rygge.

**Simen Myhre:** Begge versjonene var påmontert en smalt modifisert Thorvald II. Utformingen til bestrålingsverktøyet var også i begge tilfeller halvsirkelformet og behandlet table-top jordbær. Prototypeversjon 1, vist i figur 6.1, var statisk, nokså tung og ment for initiale forsøk. Versjon 2, vist i figur 6.2 var bygget opp av standard ekstruderte aluminiumsprofiler og hadde mulighet for bevegelse opp, ned og sideveis. Bevegelsen sideveis ble aldri benyttet, ifølge Saga Robotics. Høydejusteringen baserte seg på regulering ved hjelp av sensorer og en lineæraktuator festet til rammen på Thorvald II. Denne versjonen var lettere og benyttet 60 W lysrør orientert langs med jordbærradene.

Utfordringer og ulemper med de tidligere versjonene var at det halvsirkelformede lysrørappsettet hovedsakelig bestrålte plantene fra toppen. Dette medførte begrenset innstråling til underliggende blader da strålingen ikke transmitteres gjennom planteblader. Lysrørene var også montert i lysrørholdere som ikke var ment for fuktige omgivelser og utendørs bruk. Orienteringen av lysrørene medførte også ujevn innstråling over plantene. Oppsettet la ikke til rette for bestråling av planter hengende fra taket.

**Kristian Guren:** Verktøyet, vist i figur 6.3, var montert på den lille veksthusversjonen av Thorvald som går på skinner. Lysstativet var utformet som et rektangulært seil bestående av firkantprofiler, uten justeringsmuligheter i høyde eller lengde. Konstruksjonen var boltet fast til en ramme på roboten og utformet slik at den blokkerte noe av innstrålingen. Lysrørene var vertikalt orientert og på den måten vil alle bestrålte områder motta effektoppverdiene fra innstrålingen. Verktøyet var utstyrt med beskyttelsesplater på hver ende for å unngå skadelig UV eksponering. Ulempen tilknyttet denne versjonen var den tunge og store konstruksjonen. Det var heller ingen justeringsmuligheter for individuell tilpasning. Utenom dette har verktøyet tilfredsstillt behovet.



Figur 6.1: Den første versjonen av UV-verktøyet under testing i plasttunnel hos Simen Myhre. [Saga Robotics]





Figur 6.2: Den andre versjonen av UV-verktøyet under testing i plasttunnel hos Simen Myhre. [Saga Robotics]



Figur 6.3: UV-verktøyet under testing på agurkplanter hos Kristian Guren. [Saga Robotics]

## 6.2.2 EKSISTERENDE LØSNINGER

Tabell 6.3: Illustrasjon og beskrivelse av eksisterende konsepter for UV-bestråling.

	<p><b>Clean Light™</b> Clean Light leverer teknologiske løsninger for UV-behandling av plantekulturer i veksthus og i utendørs hagebruk. Systemene kan leveres komplette og tilpasset ulike fasiliteter. Dette er et komplett automatisert system, men det kan også tilrettelegges for manuell operasjon. Systemet monteres permanent i veksthuset og har blitt brukt til blant annet roser, jordbær, hodekål, agurk og tomat [63].</p>
	<p><b>Clean Light™</b> Clean Light leverer også modulbaserte verktøy som kan kobles til traktorer for bestråling av grønnsakskulturer som gror utendørs. Verktøyet kan justeres i høyde slik som alle andre verktøy som er påmontert tre-punkt festet bak på traktoren[63].</p>

## 6.2.3 SAMMENDRAG AV GENERELLE VURDERINGER

Inspirasjon og utredningsarbeid har blitt gjort i samråd med potensielle brukere av UV-verktøyet, Saga Robotics og fagpersoner. Tidligere erfaringer og oppdatert forskning er også lagt til grunn under utviklingen av løsningsalternativer.

I møte med forsker Nina Johansen (NIBIO), forsker og professor Arne Stensvand (NIBIO og NMBU), forsker Aruppillai Suthaparan (NMBU) og professor Pål Johan From (NMBU) var det enighet om bruk av UV-C lysrør med effekt 60 W. Dette gjør at behandlingen blir mer fleksibel enn ved bruk av UV-B, da avstanden fra bestrålingspunkt til plantekultur ikke trenger å reguleres like hyppig [75]. Bruk av beskyttelsesdeksel og vertikal orientering av lysrør har også blitt diskutert med Aruppillai Suthaparan og ble ansett som to viktige faktorer i designet.

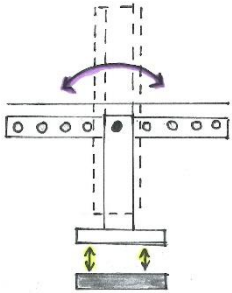
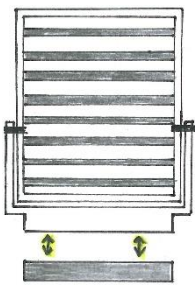
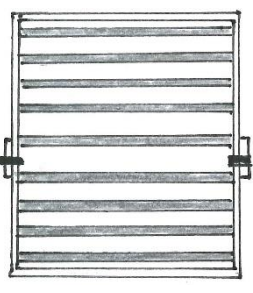
I møte med produsentene Simen Myhre og Kristian Guren har løsninger, design og praktisk anvendelse blitt diskutert. Det ble etter rådføring med Simen Myhre hentet inspirasjon fra sprøyteredskaper som brukes til kjemisk behandling av table-top jordbær. Redskapet har vertikale bommer som sørger for god innsprøyting fra sidene. Tilbakemeldingene har vært preget av et ønske om enkelhet og fleksibilitet i design av verktøyet. Det har blitt vurdert både en mekanisk innretning og en vifteløsning for bedre innstråling til kjernen av plantene, men dette vil ifølge forsøk utført av Aruppillai Suthaparan, føre til spredning av soppsporer [14]. Basert på at det er to ulike roboter som brukes til behandling av jordbær og agurk, må verktøyinnfestingens hurtigfeste kunne monteres på begge versjonene.

## 6.2.4 FUNKSJONSALTERNATIVER, UV-VERKTØY

Funksjonsalternativene som har fremkommet under utviklingsarbeidet er her presentert systematisk. Alternativene er beskrevet, skissert og vurdert basert på fordeler og ulemper. Følgende alternativer tar for seg ulike utforminger for hovedoppsett av UV-verktøyet, mens mer detaljerte alternativer for valgt løsning er gjennomgått i kapittel 7.

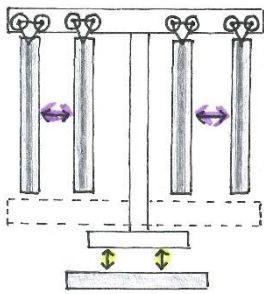
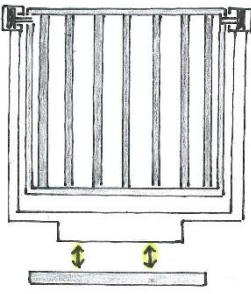
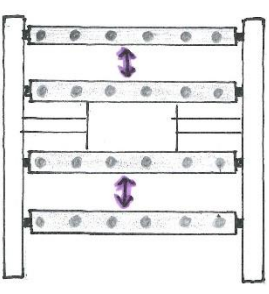
### Funksjonsalternativ a

Enkel løsning som baserer seg på et lysstativ som er hengslet i senter. Funksjonen vil dermed være relativt lik som for midthengslede vinduer. Dersom den roteres horisontalt til en T-form kommer bestrålingen fra oversiden og ned på plantene (a.1). Dersom den er orientert vertikalt (a.2) kommer strålingen fra siden, som illustrert i stiplet i figur a.1. Denne justeringen er tiltenkt å gjøres manuelt, men den kan også automatiseres ved å benytte en aktuator. Justering i høyde vil utføres med aktuatorer (gult). Lysstativet vil ha mulighet for å låses fast i ønsket posisjon.

<p><b>a.1</b></p> 	<p><b>a.2</b></p> 	<p><b>a.3</b></p> 
Fordeler		Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Driftssikkert prinsipp</li> <li>+ Lav kompleksitet</li> <li>+ Fleksibel i form av valgmulighet for bestråling fra side eller topp</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kan ikke bestråle yttersiden av ytterste rad i plasttunnelen</li> <li>- Bestråling kun fra side eller topp kan begrense effekten av behandlingen (begrenset geometrisk tilpasning)</li> </ul>

### Funksjonsalternativ b

Fire lysstativ henger ned fra en tverrgående ramme og kan justeres manuelt i bredde da de er koblet til hjul, vist i b.1. Lysrørene står vertikalt og hele systemet kan justeres i høyde med aktuator i bunn, illustrert med gul pil. Rammen kan vendes 180° for å kunne brukes på jordbærplanter plassert i kasser som henger fra tak, vist i stiplede linjer (b.1).

<p><b>b.1</b></p> 	<p><b>b.2</b></p> 	<p><b>b.3</b></p> 
Fordeler		Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ God innstråling for jordbærkultur</li> <li>+ Lav vekt og enkel i bruk</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Komplekst med mange deler</li> <li>- Dårlig tilpasset for ulike plantekulturer</li> </ul>

### Funksjonsalternativ c

Løsningen tar utgangspunkt i bruk av rektangulære lysmoduler som kan festes til en ramme. Lysmodulene kan derfra justeres individuelt. Nederste modul kan justeres sideveis med en aktuator (c.1), midterste modul kan justeres ut i en vinkel med en aktuator, mens øverste modul justeres manuelt i en gitt vinkel ved at en teleskopstang låses med en bolt. Enkeltmoduler kan eventuelt fjernes og en kan oppnå fullstendig rett form, som vist i c.2 og c.3. Kurvet form kan oppnås som vist på høyre side i c.1. Hele systemet kan justeres i høyde med aktuator i bunn.

<p><b>c.1</b></p>	<p><b>c.2</b></p>	<p><b>c.3</b></p>
Fordeler		Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Gode justeringsmuligheter for tilpasning til ulike plantekulturer</li> <li>+ Produksjonsvennlig med bruk av like moduler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Komplekst og dyrt alternativ grunnet mange aktuatorer</li> <li>- Nokså høy vekt</li> </ul>	

### Funksjonsalternativ d

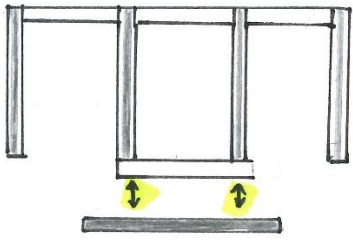
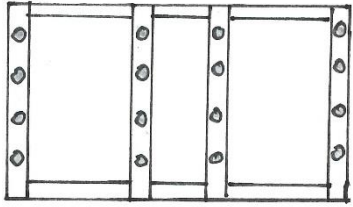
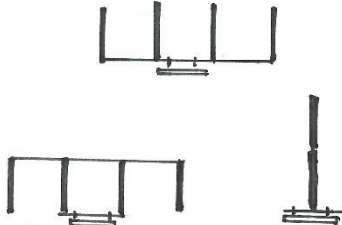
Løsningen baserer seg på at hvert enkelt lysrør kan justeres individuelt i høyde for å tilpasses formen til plantekulturen. Rammen som består av de justerbare lysrørene er hengslet i senter og kan roteres slik som et midthengslet vindu. På den måten kan dette alternativet brukes til både jordbær- og agurkkulturer. Figur d.1 og d.2 sees forfra, med verktøyet orientert i henholdsvis horisontal og vertikal stilling. Figur d.3 viser et horisontalt orientert verktøy sett inn fra siden med lysrør justert i tre forskjellige høyder. Hele rammen kan vendes 180° for å kunne brukes på jordbærplanter plassert i kasser som henger fra tak, vist i stiplede linjer (d.1).

<p><b>d.1</b></p>	<p><b>d.2</b></p>	<p><b>d.3</b></p>
Fordeler		Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Gode justeringsmuligheter for tilpasning til ulike plantekulturer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meget kompleks løsning med mange deler som også er bevegelige</li> <li>- Nokså høy vekt</li> <li>- Dyrt alternativ</li> </ul>	



### Funksjonsalternativ e

Fleksibel løsning som enkelt kan tilpasses ulike plantekulturer. Ved å benytte rørprofiler og enkle forbindelser i knutepunktene kan verktøyet raskt bygges til ønsket form for deretter å operere automatisk. «Byggesettet» består av rektangelformede lysmoduler som festes til rammen bestående av rørprofiler. Alternativet medfører at planter kan bestråles fra topp og side. Hele systemet kan justeres i høyde ved bruk av aktuatorer. Et alternativ modifisert for table-top jordbær er vist i d.1. Den samme løsningen er vist ovenfra i d.2. Figur d.3 viser ulike modifikasjoner som kan oppnås ved bruk av dette systemet.

<p><b>d.1</b></p> 	<p><b>d.2</b></p> 	<p><b>d.3</b></p> 
<b>Fordeler</b>		<b>Ulemper</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Svært gode justeringsmuligheter for tilpasning til ulike plantekulturer</li> <li>+ Stiv konstruksjon med lav vekt</li> <li>+ Produksjonsvennlig design</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kan medføre at bruker må foreta manuelle justeringer for å tilpasse verktøyet</li> </ul>

### 6.2.5 SELEKSJON AV FUNKSJONSALTERNATIVER

Med bakgrunn i produktegenskapene presentert i kapittel 5.2.1, samt problemstillingene identifisert i kapittel 1.4.1, ble funksjonsalternativene vurdert og rangert. Seleksjonen i tabell 6.4 er basert på Pughs metode og tar hensyn til vektleggingen av tidligere presenterte egenskaper. Enkelte egenskaper er tilfredsstillt av alle alternativene, men er allikevel inkludert.

Tabell 6.4: Konseptscreening for hovedoppsett for UV-verktøy. Funksjonsalternativene ble gitt +1 dersom de tilfredsstillt egenskapen godt, 0 gitt hvis de delvis tilfredsstillt og -1 hvis de ikke tilfredsstillt. Poengene er summert i bunn av tabellen.

Egenskap	Vektfaktor	a	b	c	d	e
Lysfordeling	4	-1	+1	+1	+1	+1
Modulbasert	3	-1	0	+1	0	+1
Justerbar	4	-1	0	+1	0	0
Tilkoblingsfunksjon	5	+1	+1	+1	+1	+1
Pris	4	+1	0	-1	-1	0
Kompleksitet	4	+1	-1	-1	-1	0
Produksjonsvennlighet	4	0	-1	-1	-1	0
Vekt	4	+1	0	-1	0	+1
Estetisk design	2	0	0	0	0	-1
Vedlikehold	3	+1	0	-1	-1	0
Robusthet	5	+1	+1	+1	+1	+1
Sikkerhet	4	0	0	+1	-1	0
Miljøhensyn	3	+1	0	-1	0	0
Videreutviklingspotensial	3	0	+1	+1	+1	+1
Driftssikkerhet	4	+1	0	-1	0	0
Antall (+)		8	4	7	4	6
Antall (-)		3	2	8	5	1
Sum, vektet (+)		32	17	28	17	24
Sum, vektet (-)		11	8	30	19	2
Sum, vektet totalt		21	9	-2	-2	22

Alternativ a baserer seg på et meget enkelt prinsipp og scorer derfor høyt da dette gjennomgående er ønskelig. Den innehar allikevel ikke ønskede egenskaper for å bestråle plantene tilstrekkelig. Dette løses i høyere grad i alternativ b, men løsningen er kompleks og består av mange deler. Alternativ c innebærer fire aktuatorer i tillegg til manuell justering. Den består også av mange deler, og selv om den medfører svært god bestråling, ble den ansett som en kompleks og dyr løsning. Det samme gjelder for alternativ d, som består av svært mange bevegelige deler. Løsningsalternativ e scorer godt på mange egenskaper da den er enkel, gir god innstråling til plantekulturen og er svært fleksibel i form av justeringsmuligheter. Disse justeringene er manuelle, men kan i fremtiden erstattes med automatiske løsninger dersom det viser seg nødvendig. Løsningen benytter seg av standardkomponenter og har derfor lav kostnad.

**Valgt løsningsalternativ: e**

## 7. FORSØK: KARTLEGGING AV UV-C EFFEKTFORDELING

*Forsøk ble utført for å registrere lysinnstråling fra UV-lysstoffrør. Innledningsvis beskrives hensikten med forsøkene etterfulgt av oppsett og metode. Videre presenteres resultatene gjennom grafiske fremstillinger før de diskuteres. Konklusjonen vil avslutningsvis presentere verdien av de innsamlede dataene sett i sammenheng med den videre utviklingen.*

### 7.1 HENSIKT

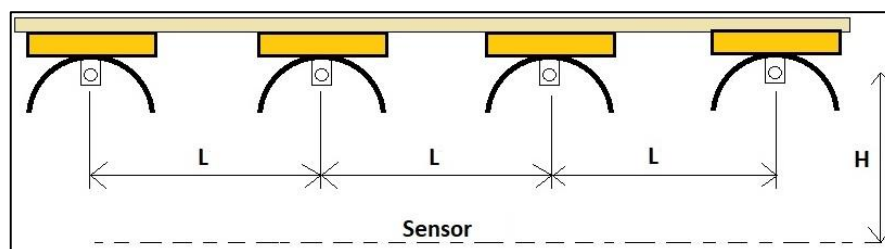
Hensikten med forsøkene er å kartlegge hvordan den innstrålte effekten fra UV lyskilden fordeler seg på en flate ved en gitt avstand mellom bestrålingskilden og flaten. Ved å variere avstanden mellom lysstoffrørene er det ønskelig å bestemme den ideelle lengden som gir den ønskede jevne fordelingen av lysintensitet. Det er også ønskelig å studere hvordan bruk av reflektorer kan bidra til en jevnere lysfordeling med økt intensitet, sammenliknet med fravær av reflektorer.

Testmål:

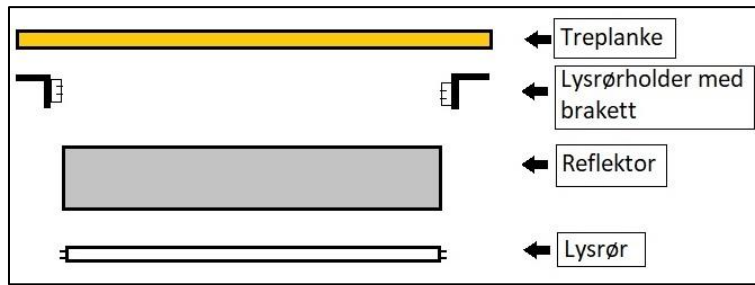
Å få en indikasjon på fysiske mål for å utarbeide designet til lysmodulene som skal monteres til UV-verktøyet. Resultatene fra kartleggingen av den innstrålte effektfordelingen skal benyttes til å avgjøre avstanden mellom lysstoffrørene, og i så måte bestemme de ytre fysiske målene til lysmodulen.

### 7.2 OPPSETT OG METODE

Forsøkene ble utført på Senter for klimaregulert planteforskning (SKP) ved NMBU og fant sted i romtempererte (20 °C), isolerte og miljøkontrollerte kammer med hvite vegger. Forsker Aruppillai Suthaparan ved IPV bistod med veiledning i forkant, under og etter gjennomføringen. Testplattformen, utviklet og bygget av undertegnede, bestod av en trekonstruksjon med tilkoblede braketter for innfesting av lysstoffrør. Den ble også laget for å kunne romme reflektorer. Lysstoffrørene (low pressure mercury fluorescent tubes, 60W, 60cm, UV-C 254 nm, LightTech, Dunakeszi, Hungary) med tilhørende ballast, og sensor (Optronic model 756, portable UV-visible spectroradiometer, Optronic Laboratories, Orlando, FL, USA) med tilhørende programvare ble lånt av Aruppillai Suthaparan. Sensoren ble brukt for å måle spektral sammensetning og irradians fra lyskilden.



*Figur 7.1: Testplattformens oppsett med indikert lengde mellom de fire lysstoffrørene og høyde fra lysstoffrør til sensor.*



Figur 7.2: Sammensetning av testplattform med treplanker, maskinerte braketter for innfesting av lysrørholdere, reflektor og lysrør.

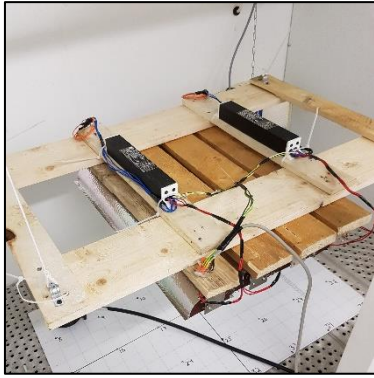
Testplattformen ble montert slik at avstand mellom lysstoffrør og sensor var 40 cm. Etter anbefaling fra Aruppillai Suthaparan, ble det valgt å benytte fire lysstoffrør. Oppsettet er illustrert i figur 7.1 og 7.2. I forkant av forsøket ble det tegnet et rutenett med kvadrater på 15cm\*15cm på en rektangulær plate. Hvert krysningsspunkt i rutenettet markerer plasseringen av sensoren, som vist i figur 7.3, og senter av platen ble plassert under senter av testplattformen. Sensoren ble innledningsvis kalibrert etter en oppstartsperiode på 6 minutter for å sikre valid data. Hvert forsøk ble utført to ganger og bestod av 35 målinger fordelt på platen med rutenett for å kartlegge den innstrålte effekten og fordelingen av denne. Sensoren ble flyttet manuelt mellom hver måling. Det ble totalt utført fire forskjellige forsøk med oppsett som vist i tabell 7.1.



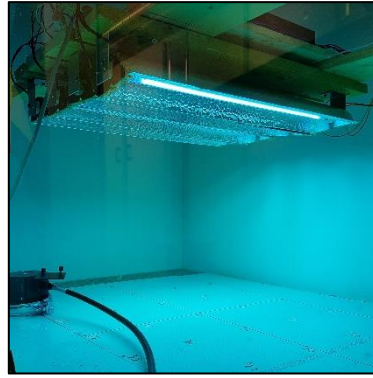
Figur 7.3: Illustrasjon av platen med påtegnet rutenett. De 35 krysningsspunktene mellom de 15\*15cm kvadratene, illustrert i rødt, angir plasseringen av sensoren gjennom hvert forsøk.

Tabell 7.1: Fysiske mål og oppsett for de fire forsøkene.

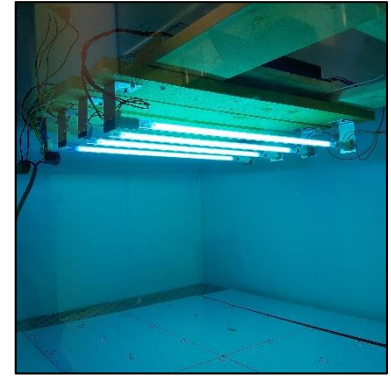
Nr.	Navn	Med/uten reflektor	Avstand rør-rør (L)	Høyde (H)	Repetisjoner
1	10RF+	Med reflektor	10 cm	40 cm	2
2	10RF-	Uten reflektor	10 cm	40 cm	2
3	20RF+	Med reflektor	20 cm	40 cm	2
4	20RF-	Uten reflektor	20 cm	40 cm	2



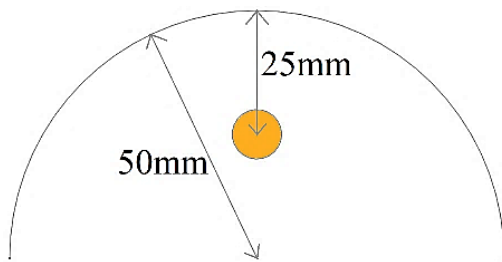
Figur 7.4: Testplattform plassert i bestrålingskammer før forsøk.



Figur 7.5: Pågående forsøk med reflektor. Sensoren er plassert på rutenett-platen.



Figur 7.6: Pågående forsøk uten bruk av reflektorer.



Figur 7.7: Fysiske mål for reflektoren bestemt i samarbeid med Aruppillai Suthaparan. Gul sirkel illustrerer lysstoffrøret.



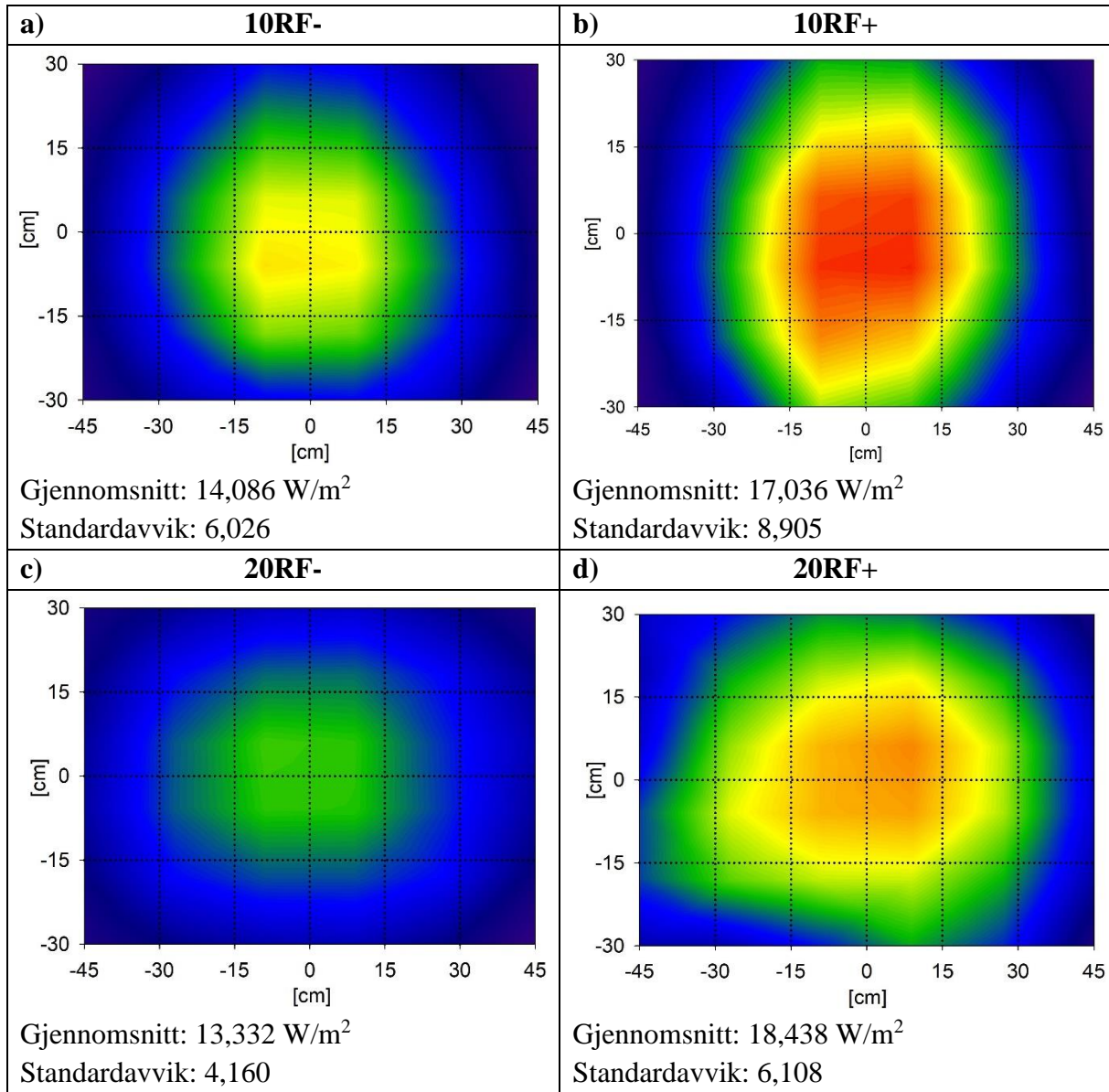
Figur 7.8: Reflektor benyttet i forsøkene. Som bildet viser, er overflaten hamret. Materialet er MIRO 9.

Utformingen av selve reflektoren ble bestemt i samarbeid med Aruppillai Suthaparan, og er illustrert i figur 7.7. Plasseringen av lysstoffrøret i fokuspunktet ble antatt å gi en god spredning av UV-strålene. Reflektormaterialet er aluminiumbasert og av typen MIRO 9, levert av det tyske firmaet Alanod GmbH & Co. KG. Tykkelsen på platene er 0,4 mm og materialkvaliteten har opprinnelig en glatt overflate som gir spekulær refleksjon. Platene har i etterkant blitt hamret for å gjenskape egenskapene tilknyttet diffus refleksjon. Overflaten til reflektoren er illustrert i figur 7.8. Reflektormaterialet skal derfor gi en svært god spredning av lysstrålene. Reflektorene ble formet av undertegnede, gjennom valsing og knekking.

Resultatene ble eksportert fra sensorens programvare til Microsoft Excel og deretter importert til Sigmaplot for databehandling. Plotting av resultater ble gjort med utgangspunkt i gjennomsnittsverdien til de to målingene som ble utført for hvert forsøk.

### 7.3 FORSØKSRESULTATER

Resultatene fra forsøkene er presentert som konturplott og er illustrert i figur 7.9.



Figur 7.9: Fordelingen av innstrålt effekt på flaten, illustrert som konturplott. Avstanden fra lyskilden til målingsflaten var 40 cm. Data benyttet for plottingen baserer seg på gjennomsnittsverdier av to målinger og har enhet W/m<sup>2</sup>. De ulike fargekodene har verdier som vist i figuren. Grunnleggende statistiske data ble anskaffet i Sigmaplot.



## 7.4 FORELØPIG DISKUSJON OG KONKLUSJON

Gjennomføringen av forsøkene ble utført under kontrollerte forhold og i henhold til instruksjoner fra Arupillai Suthaparan. I etterkant av forsøkene ble det testet om de hvite veggene i forsøkskammeret hadde innvirkning på resultatene. Ved å orientere sensoren mot veggen i tillegg til å skjerme den ovenfra ble det målt svært lave verdier ( $0,305 \text{ W/m}^2$ ), noe som tilsier at refleksjon fra veggene hadde liten påvirkning på resultatene. Grunnet den manuelle justeringen av sensoren under forsøkene kan det være små avvik fra rutenettet benyttet for å kartlegge dataene. Det kunne blitt utført mer enn to målinger per forsøk, men da variasjonen mellom de to målingene innad i hver serie var svært lav ble dette vurdert som unødvendig. Andre feilkilder ble vurdert som usannsynlige og de registrerte dataene ble i så måte ansett som presise.

Resultatene viste en markant økning av den innstrålte effekten ved bruk av reflektorer. Basert på gjennomsnittsverdiene var økningen av effekt  $20,94\%$  og  $38,3\%$  for henholdsvis  $10 \text{ cm}$  og  $20 \text{ cm}$  avstand mellom lysstoffrørene når reflektorer ble benyttet. Ved å studere standardavvikene ble det også observert en jevnere effektfordeling ved økning av bredden mellom lysstoffrørene. Disse funnene bekreftet antagelsene gjort i forkant av forsøkene og ga derfor en pekepinn på fysiske mål og utforming av lysmodulene.

Basert på resultatene ble det for jordbærkulturer valgt å benytte oppsettet bestående av reflektorer og  $20 \text{ cm}$  avstand mellom lysrørene (20RF+). Grunnet geometriske begrensninger og vekthensyn ble det valgt å ikke teste for bredder mellom lysrør lenger enn  $20 \text{ cm}$ . Basert på agurkplantenes toleranse for UV-bestråling i tillegg til geometriske hensyn, ble det valgt å benytte oppsettet uten reflektorer og med  $20 \text{ cm}$  avstand mellom lysrørene (20RF-) for agurkkulturer.

For å kunne avgjøre om den kartlagte effektfordelingen er tilstrekkelig god bør det utføres forsøk på planter for å studere effekten dette har. Det bør også utføres flere forsøk for å kartlegge optimal effektfordeling ved å variere antallet og avstanden mellom lysrør. Det kan også utføres matematisk modellering for å optimere reflektorutformingen til ønsket fordeling. Basert på forsøkene kan det ikke med sikkerhet trekkes en konklusjon om at oppsettet for 20RF+ og 20RF- er de mest gunstige for bekjempelse av meldugg og ivaretagelse av plantekulturen. Resultatene viser imidlertid at disse gir en mer ønskelig effektfordeling enn 10RF+ og 10RF-.

For å kunne anbefale optimal kjørehastighet ble følgende beregninger utført. For jordbær- og agurkkulturer ble det antatt å ta utgangspunkt i området med høyest intensitet for beregning av bestrålingstiden. Denne verdien er gjennomsnittet av de 9 punktene nærmest senterpunktet (18) på rutenettet, illustrert i figur 7.3. For jordbærkulturer er denne gjennomsnittlige intensitetsverdien lik  $26,5 \text{ W/m}^2$ . Beregningen er basert på teorien og formelen presentert i kapittel 4.1.3:

$$\text{Ønsket energidose} = 3,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 60\text{s} = 216 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

Basert på ønsket energidose kan bestrålingstiden beregnes:

$$26,5 \frac{W}{m^2} * tid = 216 \frac{J}{m^2}$$

$$tid = \mathbf{8,15 s}$$

Bredden av lysmodulen ble 0,8 meter og Thorvalds hastighet for kjøring i jordbærkulturer kunne beregnes til:

$$v = \frac{0,8m}{8,15s} = 0,098 \frac{m}{s} = \mathbf{9,8 \frac{cm}{s}}$$

For agurkkulturer er gjennomsnittsverdien for intensitet i de 9 senterpunktene lik 16,8 W/m<sup>2</sup>.

$$16,8 \frac{W}{m^2} * tid = 216 \frac{J}{m^2}$$

$$tid = \mathbf{12,86 s}$$

Bredden av lysmodulen var også her 0,8 meter og Thorvalds hastighet for kjøring i agurkkulturer kunne beregnes til:

$$v_{agurk} = \frac{0,8m}{12,86s} = 0,062 \frac{m}{s} = \mathbf{6,2 \frac{cm}{s}}$$

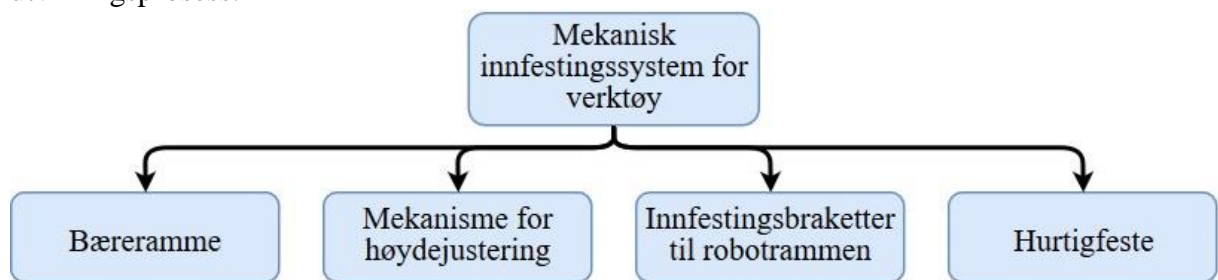


## 8. VIDEREUTVIKLING OG KOMPONENTSELEKSJON

*Dette kapitlet tar for seg videreutviklingen av de utvalgte løsningsalternativene for verktøyinnfestingen og UV-verktøyet presentert i kapittel 6. Konseptene deles inn i underkomponenter for å gjøre grundige vurderinger og valg. De ulike alternativene diskuteres og velges med bakgrunn i ønskede produktgenskaper.*

### 8.1 VIDEREUTVIKLING AV VERKTØYINNFESTINGSSYSTEM

Basert på valgt hovedkonsept i kapittel 6 ble det sett nærmere på alternative løsninger for å imøtekomme ønskede funksjoner. Utvalgte løsninger er presentert i de følgende kapitlene. Som illustrert i figur 8.1, ble konseptet delt inn i underkategorier for å utføre en systematisk utviklingsprosess.

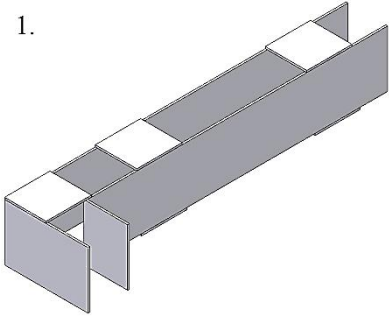
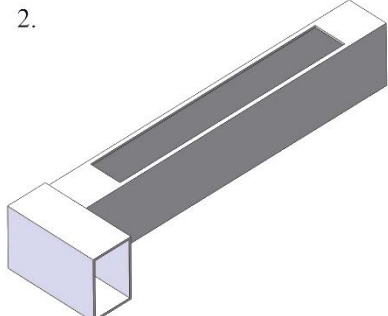
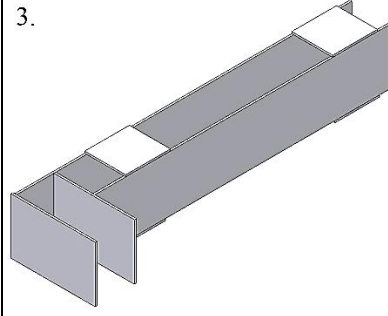


Figur 8.1: Inndeling av underkategorier for det mekaniske innfestingssystemet for verktøy.

#### 8.1.1 BÆRERAMME

Bærerammen er konstruksjonen som forbinder hurtigfestet til robotrammen. Som diskutert i kapittel 5.4, har den også til hensikt å skjerme løftemekanismen som vil befinne seg på innsiden for å imøtekomme maskinforskriften. Etter rådføring med førsteamanuensis Geir Terjesen ble det antatt fornuftig å benytte avstivere i lengderetning, som illustrert i figur 8.2, for å oppnå torsjonsstivhet. Grunnet en platekonstruksjon med nokså tynne vegger var det hensiktsmessig å benytte cheek plates for å oppnå en bredere anleggsflate for gjennomgående akslinger brukt i løftemekanismen. Bredden til bærerammen ble minimert basert på komponentene på innsiden.

#### Løsningsalternativer

<p>1.</p> 	<p>2.</p> 	<p>3.</p> 
<p>To plater som er knekt til L-former med påsveiste avstivere.</p>	<p>Firkantprofiler med utsparrade områder som er sveist sammen for å danne bærerammen.</p>	<p>Fire plater, hvorav to lange og to korte, som er sveiset sammen. Avstivere er sveiset til rammen.</p>

Figur 8.2: Tre utvalgte løsningsalternativer for bærerammen.

Blant alle løsningsforslag for bæreramme var de tre utvalgte løsningene de mest rasjonelle. Alternativ 1 har lavest vekt, sammenføres via bolter og er lett å produsere. Alternativ 2 medfører lastbærende sveiser og avhenger av standard profilstørrelser. For å oppnå en kompakt ramme kan dette være ugunstig da ønsket bredde ikke finnes i standard profilstørrelse. Alternativ 3 vil også bestå av lastbærende sveiser, noe som er ugunstig med tanke på dynamisk belastning. Den varmepåvirkede sonen rundt sveisen vil ha redusert kapasitet og kan derfor føre til brudd. Med dette lagt til grunn ble alternativ 1 antatt som den mest ideelle løsningen da den ikke innebærer sveising, har lav vekt, har en konstruksjon med potensiell høy styrke og samtidig er produksjonsvennlig.

### Valgt løsningsalternativ: 1

#### Materialer

Fra produktspesifikasjonen er vekt og robusthet viktige faktorer som har innvirkning på materialvalget for innfestingssystemet. Robotplattformen vil mest sannsynlig utsettes for fuktig miljø og verktøysystemet må derfor bestå av materialer som tåler dette. Det må også ha evnen til å tåle antatte påkjenninger. Aluminium, nærmere beskrevet i kapittel 4.3.5, ble derfor valgt på grunnlag av relativt sett lav vekt, god spesifikk styrke og ønskede korrosjonsegenskaper. Aluminiumskvaliteten EN AW 5754 er optimal i situasjoner hvor styrke og formbarhet er viktig. Den er også korrosjonsbestandig og sveisbar. Materialdata finnes i kapittel 4.3.5.

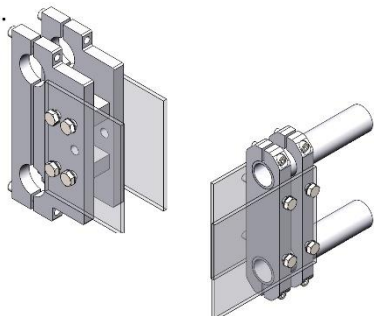
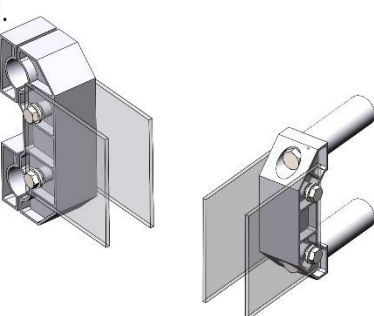
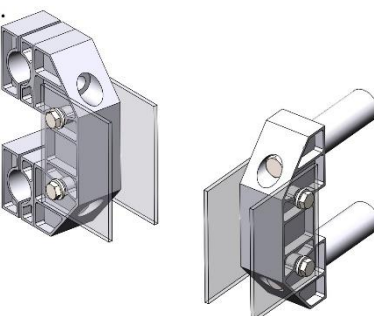
### Aluminiumslegering EN-AW 5754 H24/H34 (AlMg3)

#### Produksjon

Aluminium er lett å forme og kan varm- og kaldvales til svært tynne folier om nødvendig. Bærerammen kan produseres med utgangspunkt i valsede aluminiumsplater som er varmebehandlet og legert for ønskede mekaniske egenskaper. Platen kan sages med både sirkulær- og båndsg, men det mest gunstige vil være vannskjæring. Vannskjæring kan med trygghet utføres på aluminiumsplaten som er 5mm, da denne teknikken kan benyttes på tykkelser opp til 250mm [64]. Dette er spesielt gunstig da det ikke varmer platen og lager varmepåvirkede soner med redusert mekanisk styrke. Platene kan videre knekkes med 90° vinkel. Valgt aluminiumslegering er herdet slik at den tåler en bøyingsradius på minimum  $2,5 \cdot t$ . Med en platetykkelse på 5mm, må bøyingsradiusen være minimum 12,5mm. Det er svært viktig å overholde angitt bøyeradius dersom materialet ikke skal varmebehandles i etterkant [65].

### 8.1.2 BRAKETTER FOR INNFESTING TIL THORVALD-RAMMEN

Brakettene utgjør overføringspunktet fra bærerammen til rammen på Thorvald. Brakettene må derfor basere seg på innfesting til to sirkulære rørprofiler plassert over hverandre, slik som på Thorvald-rammen. Brakettene til baksiden av roboten må utformes annerledes enn de på fremsiden grunnet vinkelen de har i forhold til orienteringen på rørene. Dette er illustrert i figur 8.3. Brakettene blir videre festet til bærerammen med gjennomgående bolter.

<p>1.</p> 	<p>2.</p> 	<p>3.</p> 
<p>Brakettene er platebasert og strammes til hverandre med bolter. Bakre brakett (venstre) har et mellomliggende avstandsstykke med gjennomgående bolter for feste til bæreramme. Fremre brakett (høyre) består av to plater og er festet med bolter til bærerammen.</p>	<p>Brakettene er maskinert for lav vekt. Bakre brakett (venstre) består av tre deler. De to ytterste delene skrues fast til delen som er festet til bærerammen via to gjengede hull per del. Fremre brakett (høyre) skrues fast til rørene og til bærerammen som vist i figuren.</p>	<p>Brakettene er utsparrert for lav vekt. Bakre brakett (venstre) består av 5 deler. Delene som omslutter rørene kobles sammen ved at de boltes fast til delen som er festet til bærerammen. Fremre brakett (høyre) skrues fast til rørene og til bærerammen som illustrert.</p>

Figur 8.3: Tre utvalgte løsninger for brakettene som kobler bærerammen til Thorvald-rammen.

De tre utvalgte løsningene skrues eller boltes sammen for å danne friksjonskoblinger til rørprofilene som utgjør rammekonstruksjonen på Thorvald. Alternativ 1 er produksjonsvennlig ved at den er platebasert og har i tillegg lav vekt. Alternativ 2 må enten støpes eller maskineres og vil være et bedre alternativ ved masseproduksjon, da den kan være dyr å produsere for en prototype. Det samme gjelder alternativ 3. Alternativ 3 består også av flere deler og er større enn de to andre. Alternativ 1 ble valgt på grunnlag av produksjonsvennlighet og lavere pris. Ved masseproduksjon kan de to andre alternativene vurderes mer inngående.

**Valgt løsningsalternativ: 1**

**Materialer**

Dagens koblingsbraketter på Thorvald II er produsert i aluminium og har fungert bra. For å ivareta lav vekt, motstand mot korrosjon og høy spesifikk styrke, ble aluminium valgt som materiale for brakettene. EN AW-6082 kan bearbeides og er et utmerket valg for strukturelle komponenter da den har høy mekanisk styrke. Materialdata for valgt legering finnes i kapittel 4.3.5.

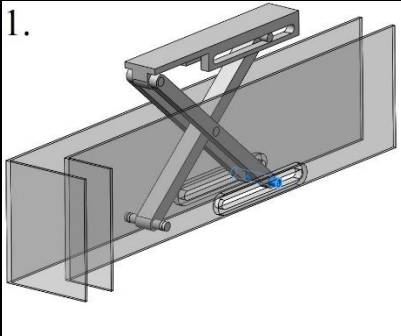
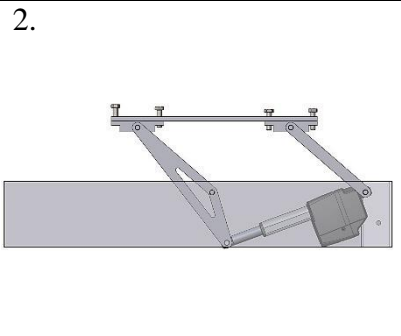
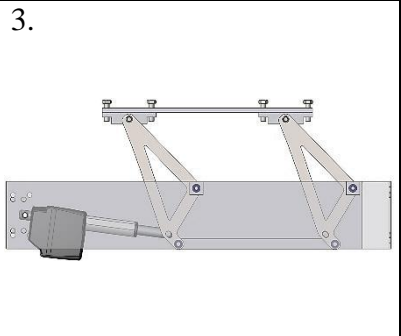
**Aluminiumslegering EN-AW-6082 T651 (Al Si1MgMn)**

**Produksjon**

Valgt løsning tar utgangspunkt i valsede plater med tykkelse på 12 mm, 15mm og 20 mm og kan derfor skjæres med vannskjæring, laserskjæring eller sages med både sirkulær- og båndsgag. Avstandsstykket må freses med utgangspunkt fra en kube.

### 8.1.3 HØYDEJUSTERINGSMEKANISME

Høydejusteringsmekanismen befinner seg på innsiden av bærerammen og er koblet til undersiden av hurtigfestet. Ved å utnytte lineær bevegelse fra en elektrisk aktuator vil mekanismen justere hurtigfestet i høyderetning. Etter tilbakemelding fra Saga Robotics var det ønskelig med en smal konfigurasjon for å ivareta plass innenfor Thorvald-rammen.

<p>1.</p> 	<p>2.</p> 	<p>3.</p> 
<p>Sakseliftprinsipp som justeres i høyde ved bruk av en lineær aktuator (ikke illustrert). Justeres vertikalt. Aktuatoren ville vært festet til bolten illustrert i blått. Hurtigfestet ville vært plassert oppå liften.</p>	<p>To paralelle armer heves ved bruk av en lineær aktuator. Aktuatoren justerer den ene armen, mens den andre støtter løftet ved å følge bevegelsen. Lengde mellom hurtigfeste og aksel festet til bæreramme gir løftehøyden.</p>	<p>To paralelle armer sørger for justering i høyde ved lineær bevegelse fra aktuatoren. De to armene er koblet parallelt slik at begge bidrar til løftingen. Lengde mellom hurtigfeste og aksel festet til bæreramme gir løftehøyden.</p>

Figur 8.4: Tre utvalgte løsningsalternativer for høydejusteringsmekanisme.

Av vurderte løsninger for justering i høyde var de tre utvalgte alternativene de mest kompakte og funksjonelle. Alternativ 1 er fordelaktig grunnet enkelhet i produksjon, men er begrenset grunnet geometrien. Det kreves meget stor skyvekraft fra aktuatoren dersom liftprinsippet har en lav utgangsposisjon. Dette er et resultat av momentarmene. Den må derfor starte i en utgangsposisjon hvor løftermene allerede er hevet. Dette gir lav løftehøyde gitt dimensjonene til bærerammen. Alternativ 2 medfører god løftehøyde, men gir stor belastning på den ene løftearmen. Alternativ 3 fordeler belastningen fornuftig og gir en stiv konstruksjon, og ble derfor ansett som det mest fornuftige alternativet.

**Valgt løsningsalternativ: 3**

#### Geometrisk vurdering

Det ble antatt fornuftig å designe løftemekanismen slik at hurtigfestet er plassert i lengdesenter av roboten når den er i arbeidsposisjon (nedre posisjon), da den vil operere i denne stillingen mesteparten av tiden. På den måten vil belastningen fra verktøyet fordeles likt til alle fire hjul dersom det henger fra hurtigfestet. Ved å feste bakenden av motoren til bakre del av bærerammen kan man benytte den bakre braketten for innfestingen. Dermed unngås en gjennomgående aksling som må festes til platene i bærerammen. Det ble også gjort en geometrisk vurdering for å tilpasse vinkler og utforming av løftearmen til aktuatorens slaglengde og bevegelsesbane. Basert på slaglengden til aktuatoren ble plasseringen av

akslingene som løftearmene roterer om bestemt. Geometrien til løftearmene ble bestemt av banen som aktuatoren vil følge ettersom den skyves ut eller trekkes inn, gitt aktuatorens festepunkt i bakre innfestingsbrakett. Hurtigfestet befinner seg i lengdesenter i nedre prosisjon.

### Materialer

Løftemekanismen skal være så smal som mulig slik at bærerammen ikke opptar stor plass. Den skal samtidig inneha god styrke for å overføre krefter fra verktøy til resten av rammekonstruksjonen. For å tåle et potensielt fuktig miljø, i tillegg til å tilfredsstille de foregående faktorene, ble det bestemt å benytte rustfritt stål. På den måten kan delene i mekanismen holdes smale og fremdeles inneha gode mekaniske egenskaper. Etter konsultasjon med Tibnor AS, ble det bestemt at EN 1.4301 (AISI 304) var en passende kvalitet. Materialdata er presentert i kapittel 4.3.4.

**Rustfritt stål EN 1.4301 (AISI 304)**

### Produksjon

Med utgangspunkt i valsede plater i valgt kvalitet kan ønsket form skjæres til med eksempelvis båndsg, sirkelsag, vannskjæring eller laserskjæring. Mellomliggende avstivere kan videre sveises mellom de platebaserte løftearmene.

### Lineær aktuator med tilbehør

Løftemekanismen baserer seg på justering i høyde ved å benytte en lineær bevegelse. Grunnet lineær aktuatorens enkelhet og funksjon, som beskrevet i kapittel 4.2, ble denne løsningen valgt. Etter anbefaling fra Saga Robotics ble det tatt kontakt med Linak Norge AS for rådføring vedrørende valg av type lineær aktuator og tilbehør. Med utgangspunkt i valgt løftemeanisme og antatte belastninger presentert i kapittel 5.3.2, må lineær aktuatoren ha en skyvekraft på minimum 1771,35 N. Beregninger tilknyttet kreftene aktuatoren utsettes for er presentert i kapittel 9.2.3. Basert på dette ble lineær aktuatoren LA25 fra Linak ansett som et passende alternativ for den ønskede applikasjonen. Det ble valgt endestykker med sirkulære hull for innfesting til resten av systemet. Spesifikasjoner for aktuatoren er angitt i tabell 8.1 [66].

Tabell 8.1: Spesifikasjoner for valgt lineær aktuator (LA25, Linak).

Beskrivelse	Spesifikasjon
Skyv- og trekkraft (maksimum)	2500 N
Selvlåsende kraft	2500 N
Statisk sikkerhetsfaktor	2,0
Motor	Permanentmagnet, børstet 24 V DC
Hastighet (full belastning - ubelastet)	2,6 mm/s - 3,2 mm/s
Slaglengde	150 mm +/- 2mm
Vekt	1,7 kg
Innkapslingsmateriale	Aluminium
Beskyttelsesgrad	IP66 (utendørs bruk)

Motoren har angitt merkespenning på 24V, mens spenningen fra batteriene på robotplattformen er 48V. Det ble derfor valgt å benytte en DC-DC transformator. Spesifikasjoner er angitt i tabell 8.2 [67].

Tabell 8.2: Spesifikasjoner for DC-DC transformator (Mean Well, RSD-100C-24).

Beskrivelse	Spesifikasjon
Nominell effekt	100,8 W
Inngangsspenning	33,6 – 62,4 V DC
Utgangsspenning	24 V DC
Merkestrøm	4,2 Ampere
Fysisk mål (L*B*H)	161*68*36 mm

Valg av styringsenhet for motoren ble gjort i samråd med Saga Robotics. Det er allerede benyttet motorkontrollere fra Roboteq på Thorvald, og basert på gode erfaringer med disse falt det naturlig å velge et produkt fra Roboteq. Basert på de oppgitte spesifikasjonene til motoren ble det valgt en motorkontroller av typen Roboteq SCD2130. Denne er svært kompakt og kan drive to DC motorer enten individuelt eller felles. Den er egnet for mobile robotikkapplikasjoner og innehar sikkerhetsfunksjoner for å ivareta pålitelighet. Med CANbus og analoge inngangsporter er det velegnet for det eksisterende systemet på Thorvald plattformen. Spesifikasjoner er angitt i tabell 8.3 [68].

Tabell 8.3: Spesifikasjoner for motorkontroller (Roboteq, SDC2130).

Beskrivelse	Spesifikasjon
Motor type	Børstet DC
Maks spenning	30 V
Maks strøm per kanal	20 Ampere
Vekt	100 g
Fysiske mål (L*B*H)	70*70*20 mm



Figur 8.5: LA25 lineær aktuator fra Linak [66].



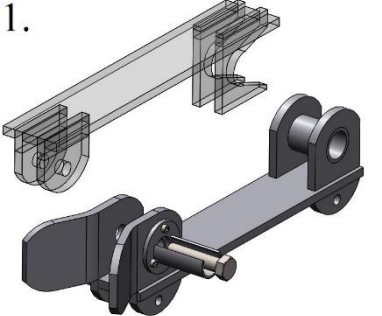
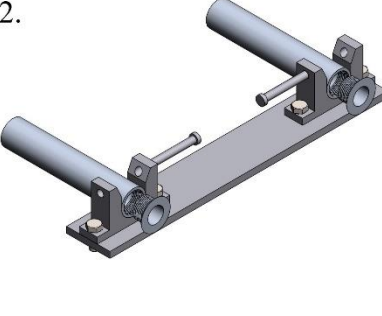
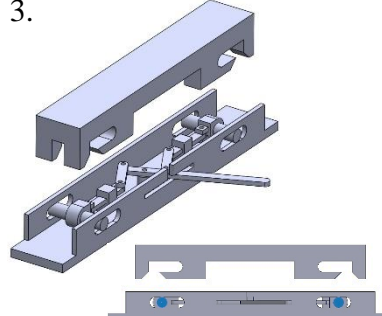
Figur 8.6: RSD 100C-24 transformator fra Mean Well [67].



Figur 8.7: SDC2130 motorkontroller fra Roboteq [68].

### 8.1.4 HURTIGFESTE

Hurtigfestet er plassert på oversiden av bærerammen og er festet til høydejusteringsmekanismen. Det vil befinne seg ett hurtigfeste på venstre bæreramme og ett på høyre bæreramme som vist i funksjonsalternativ G i kapittel 6.1.4. Illustrasjonene i figur 8.8 viser kun hurtigfestet på den ene siden, da det vil være likt på andre siden. Selve hurtigfestet skal også kunne benyttes på andre robotversjoner i Thorvald flåten. I utviklingen av alternativer var det viktig å tilrettelegge for at innfestingen kan skje autonomt i fremtiden.

		
<p>Robotdelen av hurtigfestet (nederst) består av en aksling i front og braketter med låsebolt bak. Robotdelen kan i så måte heves opp og føres rett inn mot verktøydelen og låses. Akslingen er omsluttet av fanghaken og brakettene er fastlåst.</p>	<p>Robotdelen består av to fanghaker som kan låses med gjennomgådene bolter som illustrert. Verktøydelen består kun av to rør som føres ned i fanghakene og låses fast. På enden av rørene er det sentrerings-stykker som fører rørene i rett posisjon</p>	<p>Robotdelen består av en mekanisme som kan sidejustere to bolter (illustrert i blått). Robotdelen heves opp i verktøydelen slik at boltene entrer sporet. Deretter trekkes boltene sammen for å låse verktøyet fast.</p>

Figur 8.8: Tre utvalgte løsningsalternativer for hurtigfestet som forbinder verktøy med bæreramme.

Alternativ 1 er fleksibelt med tanke på at robot- og verktøydelen enkelt kan entre hverandre. Dette er fordelaktig for fremtidig autonom tilkobling da posisjoneringen blir enklere. Låsefunksjonen til dette alternativet kan være komplisert å automatisere med bruk av en aktuator. Alternativ 2 er fleksibelt på samme måte som alternativ 1, med en låsefunksjon som enkelt kan utføres av to små lineærmotorer som skyver boltene ut og inn. Alternativ 3 er robust og fleksibel, men er også mer kompleks enn de andre grunnet mange deler. Låsefunksjonen kan nokså lett automatiseres. Basert på faktorer som produksjonsvennlighet, lav kompleksitet, automatiseringsmulighet og enkel posisjonering ansees alternativ 2 som mest tilfredsstillende.

**Valgt løsningsalternativ: 2**

#### Materialer

Hurtigfestet består av nokså massive komponenter som gjør den solid. For å bevare en lav vekt og gode korrosjonsegenskaper ble det derfor valgt å benytte aluminium også her. EN AW-6063 ble anbefalt av Tibnor AS som en passende kvalitet da den kan maskineres og har god styrke. Kvaliteten leveres også i rørprofiler. Materialdata finnes i kapittel 4.3.5.

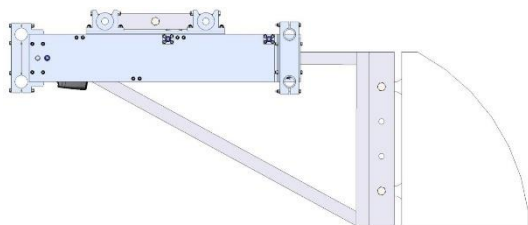
**Aluminiumslegering EN AW-6063 T6 (AlMg0,7Si)**

## Produksjon

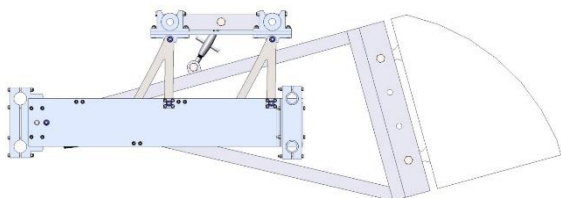
Konstruksjonen som utgjør hurtigfestet baserer seg på enkle prinsipper og det er mulig å benytte standardkomponenter i produksjonen. Aluminiumrør kjøpes ferdig ekstrudert og kan skjæres med både sirkulær- og båndsag, eller vannskjæres til ønsket lengde. Fanghakene må maskineres i en CNC-maskin og føringshakene kan enten dreies eller CNC-freses. Låsebolter kan kjøpes ferdig eller eventuelt dreies. Den underliggende platen kan kjøpes ferdig valset og skjæres på samme måte som rørene.

### 8.1.5 VIDEREUTVIKLINGSPOTENSIALE MED FORSLAG ALTERNATIVE LØSNINGER

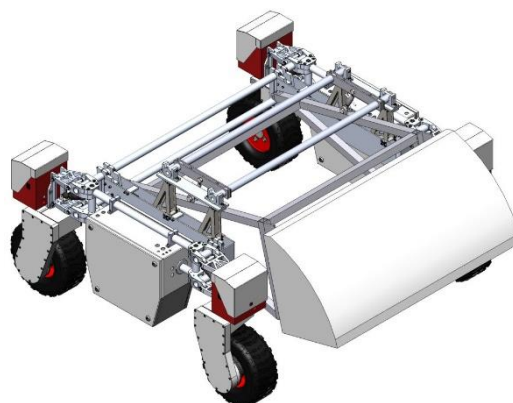
De utvalgte løsningene er valgt slik at det skal være mulig å videreutvikle konseptet ved å implementere alternative løsninger. Et utarbeidet forslag gikk ut på at verktøyet festes med bolter gjennom de bakre brakettene via to trekkstenger som overfører krefter til rammen. Høydejusteringen fungerer ved at verktøyet er koblet til hurtigfestet via to løftestenger. Verktøyet vil dermed vippes opp og ned om de to bakre innfestingspunktene. Presentert løsning er kun ment som et potensielt prinsipp, og blir ikke betraktet i grundighet gjennom rapporten.



Figur 8.9: Nedre posisjon. Trekkstenger står skråtilt. Verktøyet er kun ment for illustrasjon.

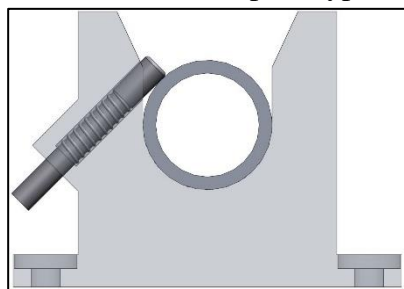


Figur 8.10: Øvre posisjon. Løftestang er illustrert mellom løftearmene, under hurtigfestet.

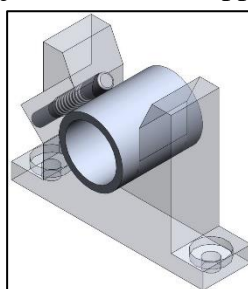


Figur 8.11: Alternativ løsning i hevet posisjon montert på Thorvald. Den illustrerte verktøytformingen får en løftehøyde på 0,45 m.

Det ble også vurdert alternative løsninger for låsingsmekanismen i hurtigfestet. Med inspirasjon fra eksisterende fanghaker, ble det utviklet et liknende forslag som med enkelhet kan automatiseres. Ved at en tapp skyves inn med skrå vinkel fra siden, vil rørene holdes på plass. Det ble utviklet en prototype med en fjærbelastet låsetapp for å studere prinsippet nærmere.



Figur 8.12: Fjærbelastet låsingsmekanisme for fastholdning av rørprofil i hurtigfestet. Fanghaken er illustrativt gjort transparent.



Figur 8.13: Oversiktsbilde av den potensielle løsningen. Fanghaken er gjort transparent.

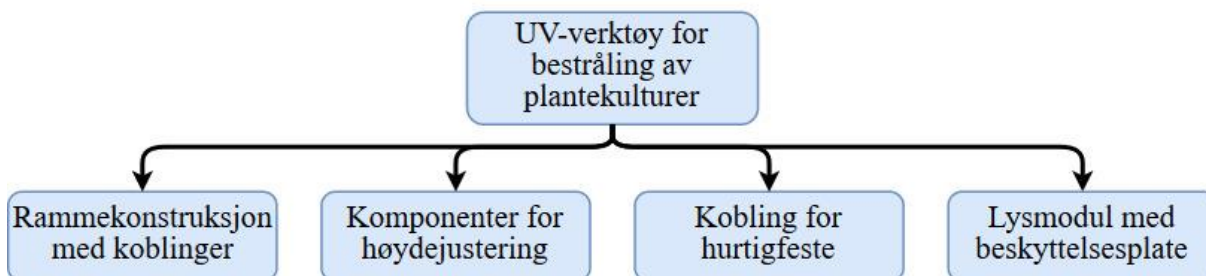


Figur 8.14: Prototype som illustrerer prinsippet. Fanghaken er laget i treverk. Låsetappen står i låst posisjon slik at røret står fast.



## 8.2 VIDEREUTVIKLING AV UV-VERKTØY

Basert på det utvalgte hovedkonseptet fra kapittel 6 ble det sett nærmere på alternative løsninger for å imøtekomme ønskede funksjoner. Løsningsalternativene som er presentert ble ansett som de mest hensiktsmessige. Som illustrert i figur 8.15, ble UV-verktøyet delt inn i underkategorier for å betrakte hver del i grundighet.



Figur 8.15: Inndeling av underkategorier for utviklingen av UV-verktøyet.

### 8.2.1 RAMMEKONSTRUKSJON MED KOBLINGER

Rammen utgjør konstruksjonen som bærer lysmodulene og er ment å kunne tilpasses ulike produksjonsforhold. Konstruksjonen baserer seg på bruk av profiler med ønskede lengder som kobles sammen. Rammekonstruksjonen er koblet til roboten via et hurtigfeste. For jordbærkulturer vil rammen kunne tilrettelegge for bestråling fra begge sider av raden, og om ønskelig fra oversiden. For agurkkulturer vil rammen være utformet som et seil som beveger seg mellom radene. Etter samtaler med Kristian Guren var det ønskelig å kunne justere rammen manuelt i lengderetning slik at enden av agurkraden kunne bli bestrålt. Grunnen til dette er at skinnene som roboten kjører på er kortere enn radlengden. Under utviklingen var det fokus på å designe en lett og stiv konstruksjon som tåler det potensielt fuktige miljøet den opererer i.

#### Løsningsalternativer

<p>1.</p> 	<p>2.</p> 	<p>3.</p> 
<p>Med utgangspunkt i firkantprofiler festet sammen med bolter er alternativet relativt enkelt. Det er behov for avstivningsdeler ved bolteforbindelsene for å oppnå en slarkfri konstruksjon.</p>	<p>Alternativet baserer seg på bruk av rørprofiler som er festet sammen med koblinger. Alternativer for koblinger er friksjonskobling og standard rørdeler (union).</p>	<p>Ekstruderte standardprofiler som kan leveres i et mangfold av utforminger. Det kan benyttes et stort utvalg av fungerende standard-koblinger med dette systemet [69].</p>

Figur 8.10: Tre utvalgte alternativer for profiler og koblinger i knutepunkt.

Alternativ 1 krever firkantprofiler og bolter i tillegg til ekstra avstivningsdeler for å sikre en rigid konstruksjon uten slark. Alternativ 2 er produksjonsvennlig med bruk av standardkomponenter og samtidig enkel og rask å sette sammen. Med bruk av friksjonskoblinger vil en også kunne variere avstander mellom lysmoduler for individuell tilpasning ved å løsne og stramme til koblingene i ønsket punkt. Alternativ 3 er robust og har stor styrke, men kan medføre unødvendig høy vekt, noe som er en kritisk faktor for denne konstruksjonen. Med bruk av ferdige løsninger kunne systemet derimot vært fleksibelt for endringer i fremtiden. Alternativ 2 ble derfor ansett som den mest hensiktsmessige løsningen grunnet et stort utvalg av enkle koblinger som kan benyttes, lav vekt og bruk av rørprofiler som allerede er brukt på rammekonstruksjonen til Thorvald. Det ble også vurdert å benytte lineærlager tilpasset rørprofilene for enkel justering i side, men dette krever en låsmekanisme.

**Valgt løsningsalternativ: 2 (med friksjonskopling)**

**Illustrasjoner av sammensatte rammekonstruksjoner**



Figur 8.11: Rammekonstruksjon med påmonterte lysmoduler for bestråling av table-top jordbær stående fra underlaget. Bruk av friksjonskoblinger gjør det mulig med individuelle justeringsmuligheter.



Figur 8.12: Rammekonstruksjon med påmonterte lysmoduler for bestråling av jordbærplanter hengende fra taket. Bruk av friksjonskoblinger gir justeringsmuligheter.



Figur 8.13: Rammekonstruksjon med påmontert lysmodul for bestråling av agurkplanter. Med friksjonskoblinger kan rammen justeres i lengde (vist med piler).

**Materiale**

For å holde vekten lav ble det ansett som hensiktsmessig å velge aluminium som materiale for rammekonstruksjonen. EN AW-6063 har høy mekanisk styrke og leveres i rørprofiler. Det ble også vurdert rustfritt stål som innehar høy stivhet og styrke, men grunnet høy vekt ble dette nedprioritert. Materialdata for aluminiumslegeringen er presentert i kapittel 4.3.5.

**Aluminiumslegering EN AW-6063 T6 (AlMg0,7Si)**

**Produksjon**

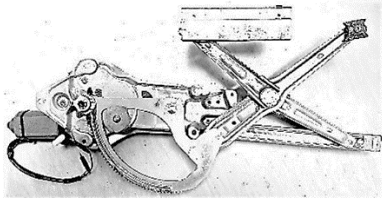


Valgt løsningsalternativ tar utgangspunkt i standard ekstruderte aluminiumprofiler og kan skjæres i ønsket lengde med båndsgag, sirkelsag, vannskjæring eller laserskjæring. Koblingene

er standardkomponenter og kan kjøpes ferdig produsert. Det kan i tillegg designes eller kjøpes endestykker for å tette igjen røråpningene slik at det ikke samler seg avfall inni rørene.

### 8.2.2 HØYDEJUSTERING

Basert på kontakt med produsenter ble det konkludert med at det kun er nødvendig med høydejustering på verktøy for jordbærkulturer. Høydejustering ble derfor ikke implementert på verktøy for agurkkulturer. Etter nærmere undersøkelse og kontakt med jordbærprodusent Simen Myhre ble det avgjort at nødvendig høydejustering var 200mm, grunnet variasjoner i underlaget. På grunn av bestråling fra siden er det ikke lenger nødvendig med kontinuerlig høyderegulering tilpasset plantehøyden, slik som på de tidligere versjonene av UV-verktøyet. Under utviklingen av denne løsningen var det fokus på å lage et stabilt system som støtter konstruksjonen. Grunnet rammekonstruksjonens høye tyngdepunkt ble det antatt at den kunne utsettes for potensielle vibrasjoner eller svaing, noe som er uønsket. Dette er imidlertid faktorer som er vanskelig å predikere uten videre testing av verktøyet i reelle produksjonsforhold.

#### Løsningsalternativer

<p>1.</p> 	<p>2.</p> 	<p>3.</p> 
<p>Sakseliftprinsipp som drives av en roterende skrue via et snekkegir. Mekanismen benyttes for drift av elektriske vindusheiser i biler. Den gir vertikalt løft i tillegg til at den er smal og lett. Mekanismen er selvlåsende.</p>	<p>Løftebukkprinsipp bestående av en motor som driver en kuleskrue. Dette er samme prinsipp som kan finnes i lineær aktuatorer og den gir et lineært vertikalt løft. Mekanismen er selvlåsende og kan løfte tunge laster.</p>	<p>Løftesøylen benytter seg av teleskoppriippet hvor de tre delene i figuren kan justeres i forhold til hverandre. Den er konstruert for å tåle moment som resultat av sideveis krefter. Høydejusteringen kommer av en elektrisk motor som driver et kjede koblet til et tannhjulsdrev [70].</p>

Figur 8.14: Tre utvalgte løsningsalternativer som drivmekanisme for høydejustering av UV-verktøy.

Alternativ 1 vil kreve to mekanismer for å kunne utføre stabile løft. Det ville i tillegg være behov for mekanisk støtte, for eksempel via skinner eller glidespor, for å ivareta sideveis støtte. Alternativ 2 er en solid løftemekanisme, men vil også kreve denne mekaniske støtten med mindre en benytter seg av flere løftebukker. I tillegg vil den oppta stor plass i høyde for å kunne oppnå ønsket løftehøyde. Alternativ 3 er i motsetning nokså kompakt da teleskoppriippet utnyttes. Grunnet styrken til dette alternativet, både aksielt og sideveis, vil det mest sannsynlig

**Valgt løsningsalternativ: 3**

ikke være behov for støttende spor dersom det benyttes to løftesøyler. Basert på at den også har innebygget posisjonssensorering, er kompakt og er enkel å implementere i systemet, ble alternativ 3 valgt.

### Valgt aktuator med tilbehør

Det ble tatt kontakt med Linak Norge AS for rådgøring vedrørende valg av type lineær aktuator og tilbehør. Basert på belastningssituasjon og bruksområde ble løftesøylen BL1 fra Linak valgt. Den kan leveres med slaglengder fra 200-400mm og har en dynamisk kapslingsgrad lik IP66. Linak leverer også et utvalg av passende lineære aktuatorer som ble vurdert, men dette vil kreve støttemekanismer for stabile løft. Løftesøylen kan nokså enkelt implementeres i systemet da den har innebygget endestoppbrytere og sensorer for posisjonering. Spesifikasjoner for løftesøylen er angitt i tabell 8.4 [70].

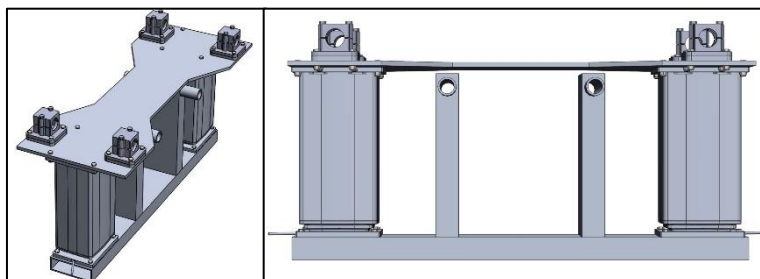
Tabell 8.4: Utvalgte spesifikasjoner for valgt løftesøyle (BL1, Linak).

Beskrivelse	Spesifikasjon
Skyv- og trekraft (maksimum)	2000 N
Selvlåsende kraft	2000 N
Sikkerhetsfaktor	>2,5
Motor	Permanentmagnet, børstet 24 V DC
Hastighet (full belastning - ubelastet)	9 mm/s – 10 mm/s
Slaglengde	400 mm
Vekt	9,8 kg
Innkapslingsmateriale	Aluminium
Beskyttelsesgrad	IP66 (utendørs bruk)
Statisk bøyemoment	500 Nm

Basert på spesifikasjonene kan den samme motorkontrolleren (Roboteq SCD2130) benyttes for denne løftesøylen som for lineær aktuatoren valgt i kapittel 8.1.3. Spenningen fra batteriene på robotplattformen er 48V og må derfor transformeres ned grunnet motorens merkespenning som er angitt til 24V. Spesifikasjonene for valgt DC-DC transformator er angitt i tabell 8.5 [71].

Tabell 8.5: Spesifikasjoner for DC-DC transformator (Mean Well, RSD-300C-24).

Beskrivelse	Spesifikasjon
Nominell effekt	300 W
Inngangsspenning	33,6 – 62,4 V DC
Utgangsspenning	24 V DC
Merkestrøm	12,5 Ampere
Fysisk mål (L*B*H)	216*97*40 mm

**Illustrasjon av valgt løsning (høydejusterbar tilkoblingsplattform)**

*Figur 8.15: To løftesøyler sørger for justering i høyde. Rammekonstruksjonen (aluminium) for UV-verktøyet festes til friksjonskoblingene på oversiden, mens hurtigkoblingen festes i de underliggende rørene.*

**8.2.3 LYSMODUL**

Lysmodulen er konstruksjonen bestående av lysstoffrørene, rammen som omslutter lysstoffrørene, lysrørholderne og eventuelle reflektorer. De fysiske målene for modulen ble bestemt basert på forsøk presentert i kapittel 7. Valg av reflektorutforming og materiale er nærmere beskrevet i kapittel 7.2. Den samme lysmodulen skal kunne benyttes til ulike rammekonfigurasjoner og er i så måte produksjonsvennlig. For et endelig produkt ble det ansett som essensielt at den har raske og sikre tilkoblinger til resten av systemet. På den måten kan brukeren raskt sette sammen «byggesettet» til ønsket form og koble til lysmodulene før bruk. Løsningen tilrettelegger for enkel montering og utskifting av lysstoffrør da disse kan skiftes individuelt uten å demontere hele modulen. I utviklingen var det høyt fokus på å holde vekten lav for å ivareta en stabil konstruksjon, i tillegg til å sikre robustheten for å tåle miljømessige påkjenninger.

**Lysrørholdere**

For å ivareta sikkerhet og funksjon for elektriske komponenter, som beskrevet i kapittel 5.4, ble det ansett som hensiktsmessig å benytte lysrørholdere som er godkjent for fuktige miljøer. Det ble derfor valgt vannresistente lysrørholdere med kapslingsgrad IP67.

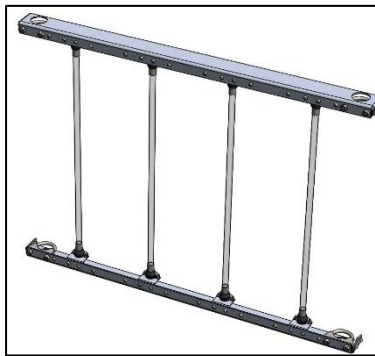
**Materialer**

For å sikre lav vekt, korrosjonsmotstand og stivhet ble det valgt å benytte aluminium. Dette er også gunstig med tanke på slitasje som kan oppstå ved av- og påmontering av utskiftbare deler som eksempelvis reflektorer og ved utskifting av lysstoffrør. Det ble også vurdert andre materialer som polyetylen (PE), nylon, polykarbonat (PC) og karbonfiber, men disse ble antatt å medføre dyrere produksjonskostnader. Grunnen til dette er formen på endestykkene til lysmodulen som har vinkelrette bend. Denne formen kan lett knekkes med bruk av aluminium og ville eksempelvis medført støpning ved bruk av polymer materialer.

**Aluminiumslegering EN-AW-5754 H24/H34 (AlMg3)**

**Produksjon**

Endestykkene på lysmodulen er platebasert og kan knekkes 90 ° til ønsket form. Hullene kan bores eller skjæres, og konstruksjonen settes sammen med bruk av bolter. Friksjonsklammene som fester lysmodulen til rammekonstruksjonen kan kjøpes ferdig i aluminium.



Figur 8.16: Sammensatt lysmodul uten reflektorer. Modulen tres på rammekonstruksjonen og festes med friksjonsklammer.

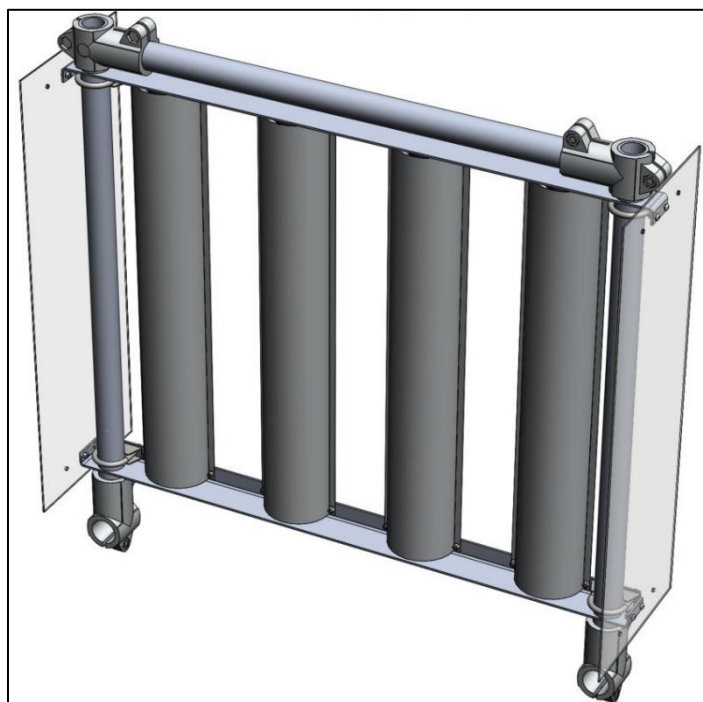


Figur 8.17: Sammensatt lysmodul med reflektorer. Reflektorene boltes fast individuelt og kan dermed enkelt monteres av og på.

#### 8.2.4 BESKYTTELSESPlater

For å imøtekomme krav om sikkerhet diskutert i kapittel 5.4 var det viktig å implementere beskyttelsesplater for å hindre at mennesker eksponeres for UV-stråler. Basert på informasjonen gitt i figur 4.9 i kapittel 4.1.3 ble det valgt plater av polykarbonat. Disse platene blokkerer UV-stråling med bølgelengder opp til 385nm fullstendig [72]. Synlig lys kan dermed transmitteres gjennom den gjennomsiktige platen for å kunne kontrollere driften. Astrup leverer ønsket kvalitet i plater med tykkelse 2mm. Platene kan skjæres til ønsket rektangulær form og hull kan bores for fastbolting av platen.

**Polykarbonat (PC), LEXAN EXELL D Sheet, F-2500**



Figur 8.18: Lysmodul med påmonterte beskyttelsesplater av polykarbonat montert på endene for blokkering av UV-stråler.

## 9. DIMENSJONERING

*Dimensjoneringskapittelet beskriver fremgangsmetoder, vurderinger og antagelser gjort i forbindelse med beregning og simulering av UV-verktøy og verktøyfestet. Konstruksjonenes mest utsatte områder blir kontrollert mot antatte belastninger for å sikre kvalitet og robusthet.*

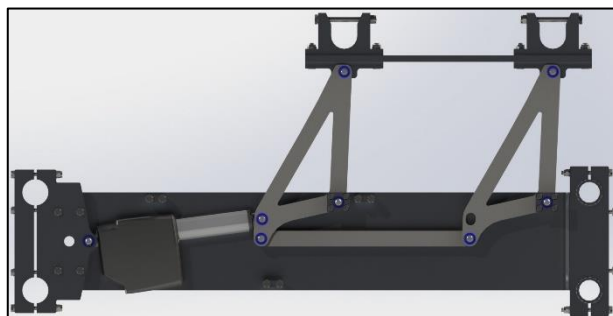
### 9.1 BEREGNINGSGRUNNLAG

I dimensjoneringen ble det tatt utgangspunkt i en verktøylast på totalt 200 kg. Dette tilsvarer en last på 100 kg per side av roboten med 50 kg per innfestingspunkt på hurtigfestet. Det ble videre antatt statiske belastningsscenarioer.

Materialeegenskaper benyttet i beregningene er hentet fra kapittel 4.3.4 og 4.3.5, som omhandler henholdsvis rustfritt stål og aluminium. Teori og formelverk for håndberegninger er hentet fra lærebøker og kompendier.

Følgende beregninger er utført for å kontrollere sikkerheten til konstruksjonene:

- Analyse utført i Solidworks for å innhente statiske krefter og momenter som virker på innfestingsbrakettene som forbinder bærerammen og robotens rammekonstruksjon.
- Boltberegning for å kontrollere sikkerheten til boltene som forbinder bæreramme og brakett. Brakettene er illustrert i figur 9.1, under.
- Geometriske betraktninger for å innhente data om løftekapasitet og utvekslingsforhold i løftemekanismen. Løftemekanismen er illustrert i figur 9,1, under.
- Kontroll mot utrivningsbrudd i platene av rustfritt stål som utgjør løftearmene, og en generell spenningsanalyse i ANSYS for å kontrollere jevnførende spenning i løftearmer.
- Spennings- og deformasjonsanalyse av løftearmer ved sideveis belastning utført i Solidworks.
- Valg av foringer for roterende ledd. Foringer er illustrert i blått i figur 9,1, under.
- Kontroll av sveiseforbindelser i løftearmene.
- Kontroll mot utmattingsbrudd i sveiseforbindelsene til løftearmene.
- Kontroll av skjærkrefter, momenter, nedbøyning og jevnførende spenning i aluminiumrørene som bærer UV-verktøyet for jordbærkulturer.
- Kontroll av sveis i løfteplattformen som justerer UV-verktøy for jordbærkulturer i høyde.
- Spesifisering av tiltrekningsmoment og maksimale vridningsmoment på friksjonsklemmer som forbinder rammen for UV-verktøy for agurkkulturer.

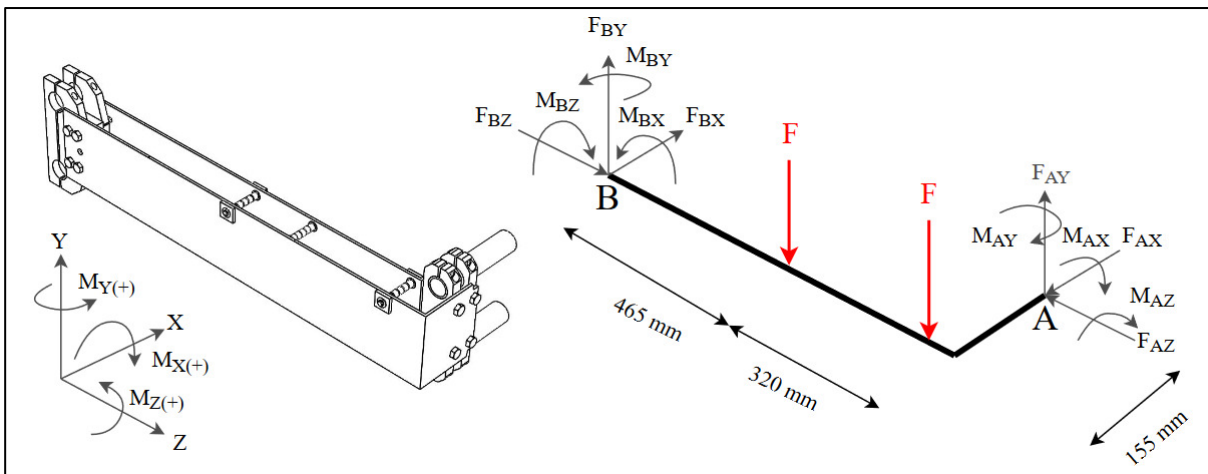


*Figur 9.1: Illustrasjon av løftemekanismen på innsiden av bærerammen, med braketter i endene.*

## 9.2 DIMENSJONERING AV VERKTØYINNFESTINGSSYSTEM

### 9.2.1 STATISKE KREFTER OG MOMENTER

Bærerammen ble antatt fast innspennt til rammekonstruksjonen på Thorvald via brakettene i punktene A og B, illustrert i figur 9.2. Denne betraktningen medførte et statisk ubestemt system. Det ble derfor ansett som hensiktsmessig å utføre en datasimulering for anskaffelse av opplagringsdata i punktene A og B. Det ble laget en forenklet modell i Solidworks hvor bærerammen ble erstattet med en kvadratisk og rørformet profil for å kunne sammenlikne resultatene. De opptredende opplagringskreftene i de forenklede simuleringene resulterte dermed i en tilnærming av den reelle situasjonen. I en reell situasjon kunne innfestingspunktene blitt ansett som fleksible grunnet fleksibiliteten i rammekonstruksjonen på Thorvald, og antagelsen om fast innspenning var derfor konservativ. Belastningsdataene (vedlegg B2 og B3) er oppsummert i tabell 9.1, hvor  $A_1$  og  $B_1$  gjelder for rørprofil og  $A_2$  og  $B_2$  gjelder firkantprofil.



Figur 9.2: Illustrasjon av bærerammen omgjort til en forenklet modell med henvisninger til krefter og momenter som virker i opplagringspunktene A og B. Belastningen er påsatt opplagringen til løftearmene og er illustrert i rødt. Mål i mm.

Tabell 9.1: Opplagringsdata for punktene A og B fra forenklet simulering utført i Solidworks.  $A_1$  og  $B_1$ : rørprofil,  $A_2$  og  $B_2$ : kvadratisk profil. Positive retninger er angitt i figur 9.2. Data markert i rødt ble ansett som så lave at de ble neglisjert.

Punkt	$M_X$ (Nm)	$M_Y$ (Nm)	$M_Z$ (Nm)	$F_X$ (N)	$F_Y$ (N)	$F_Z$ (N)
$A_1$	30,9	1,34	-103	-3,57	711	-4,97
$B_1$	-68,5	0,973	-12,9	3,59	270	4,83
$A_2$	20,9	0,872	-97,8	-3,62	691	-7,26
$B_2$	-71,2	0,949	-9,35	3,61	290	7,24

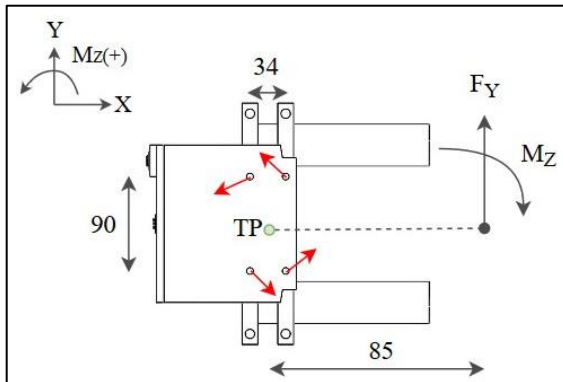
### 9.2.2 BOLTBEREGNING I BRAKETTENE

Basert på opplagringsdata innhentet i kapittel 9.2.1, var det ønskelig å kontrollere bolteforbindelsen i braketten som er bindeleddet mellom rammekonstruksjonen på Thorvald og bærerammen for verktøyfestet. Forbindelsen består av fire gjennomgående bolter med størrelse

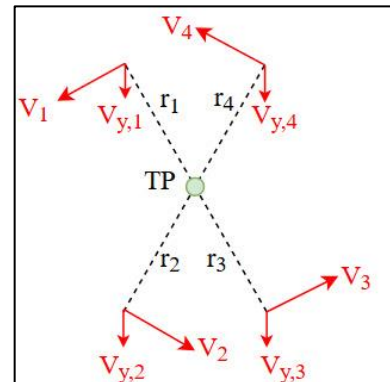


M6. De høyeste verdiene ble observert i punkt  $A_1$ , og det ble derfor valgt å dimensjonere etter dataene innhentet for dette punktet. Grunnet symmetri er avstanden fra tyngdepunktet (TP) til boltene lik ( $r_1 = r_2 = r_3 = r_4$ ). For bøyepåkjente braketter som denne er det ønskelig å beregne resultantkraften på den hardest belastede boltene ved å anta at:

- Braketten er stiv
- Reaksjonskreftene ( $V$ ) oppstår som kraftpar om TP grunnet bøyemoment
- Skjærkreftene ( $V$ ) fra den ytre kraften ( $F$ ) fordeles seg jevnt på alle boltene



Figur 9.3: Illustrasjon av opplagringspunkt A med påsatte reaksjonskrefter og relevante mål i mm.



Figur 9.4: Reaksjonskrefter fra bøyemoment ( $M_Z$ ) og skjærkrefter fra vertikal kraft ( $F_Y$ ).

Fra figur 9.4 ser en at bolt 1 og 2 er de høyest belastede boltene. Reaksjonskreftene ( $V$ ) fra bøyemomentet virker normalt på aksene fra TP til bolt og er like store ( $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$ ). En momentbetraktning i TP gir uttrykket for  $V_1$ :

$$\begin{aligned} \sum M_{TP} &= 0 & (1) \\ F_Y \cdot l - M_Z + V_1 \cdot r_1 + V_2 \cdot r_2 + V_3 \cdot r_3 + V_4 \cdot r_4 &= 0 \\ V_1 &= \frac{M_Z - F_Y \cdot l}{4 \cdot r} \end{aligned}$$

Finner avstanden  $r$  ved å betrakte geometrien innenfor de fire boltene:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

$$r = \sqrt{(17\text{mm})^2 + (45\text{mm})^2} = 48,1\text{mm}$$

$$V_1 = \frac{(103 \cdot 10^3)\text{Nmm} - 711\text{N} \cdot 85\text{mm}}{4 \cdot 48,1\text{mm}} = 221,2 \text{ N}$$

Skjærkreftene fra den vertikale kraften  $F_Y$  fordeles likt på alle boltene:

$$V_{y,1} = \frac{F_Y}{4} = \frac{711\text{N}}{4} = 177,8 \text{ N}$$

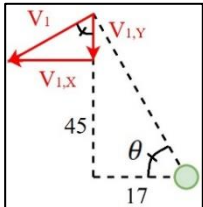
Når  $V_1$  er kjent kan denne dekomponeres og betraktes sammen med  $V_{y,1}$  for å beregne resultantkraften  $V_{RES}$ . Finner først relevante vinkler:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{45\text{mm}}{17\text{mm}}\right) = 69,3^\circ \quad (3)$$

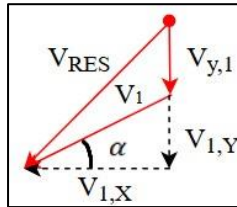
$$\alpha = 180^\circ - 90^\circ - 69,3^\circ = 20,7^\circ$$

$$V_{1,X} = V_1 \cdot \cos \alpha = 221,2\text{N} \cdot \cos(20,7^\circ) = \mathbf{206,9\text{N}} \quad (4)$$

$$V_{1,Y} = V_1 \cdot \sin(\alpha) = 221,2\text{N} \cdot \sin(20,7^\circ) = \mathbf{78,2\text{N}} \quad (5)$$



Figur 9.5:  
Geometrisk  
betraktning for  
å finne x- og y-  
komponent fra  
 $V_1$ .



Figur 9.6:  
Geometrisk  
betraktning for å  
finne resultatant av  
skjærkraften,  
 $V_{RES}$ .

$$V_{RES} = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2} \quad (2)$$

$$V_{RES} = \sqrt{V_{1,X}^2 + (V_{1,Y} + V_{y,1})^2} = \sqrt{(206,9\text{N})^2 + (78,2\text{N} + 177,8\text{N})^2} = \mathbf{329,2\text{N}}$$

Det ble tatt utgangspunkt i at gjenget område ikke er belastet. Dermed benyttes den fulle diameteren på 6mm i utregningen. Beregner opptredende skjærspenning i bolt 1:

$$\tau_1 = \frac{V_{RES}}{A_S} = \frac{329,2\text{N}}{20,1\text{mm}^2} = \mathbf{16,4\text{MPa}} \quad (6)$$

Beregner tillatte spenninger basert på fasthetsklasse 8.8 ( $\sigma_y = 640\text{MPa}$ ) og kontrollerer om skjærspenningen i M6 bolten er innenfor kravet ( $\tau_{till}$ ):

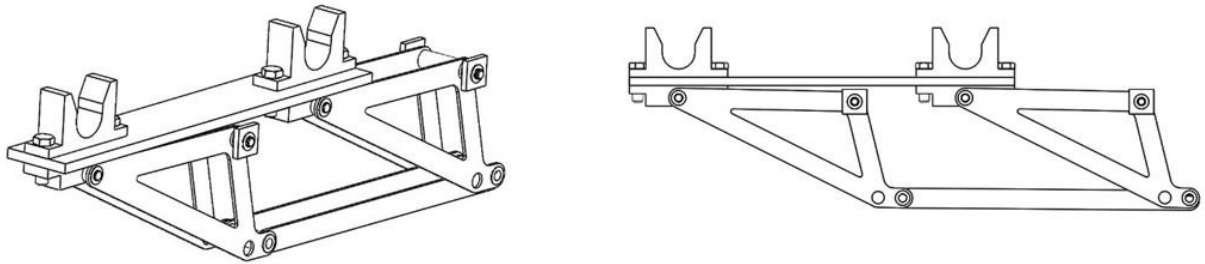
$$\sigma_{till} = \frac{f_y}{SF} = \frac{640\text{MPa}}{1,5} = 426,7\text{MPa} \quad (7)$$

$$\tau_{till} = \frac{\sigma_{till}}{\sqrt{3}} = \frac{426,7\text{MPa}}{\sqrt{3}} = 246,3\text{MPa} \quad (8)$$

$$\tau_1 \ll \tau_{till}$$

Opptredende skjærspenning er godt innenfor kravet og det kan med stor sikkerhet benyttes M6 bolter med fasthetsklasse 8.8. Basert på den lave spenningen ble det ansett som unødvendig å utføre beregninger som implementerer momentet om x-aksen. Dette momentet ville medført strekkspenning i boltene. Denne strekkspenningen lagt sammen med spenningen fra forspenningskraften kunne vært kontrollert mot tillat spenning ( $\sigma_{till}$ ), men den antas å være langt innenfor kravet. Tekniske tabeller fra Tingstad angir bruddlast på 16,1 kN for M6 bolter med fasthetsklasse 8.8, basert på strekkprøver [73]. Dette er langt over opptredende krefter for dette systemet.

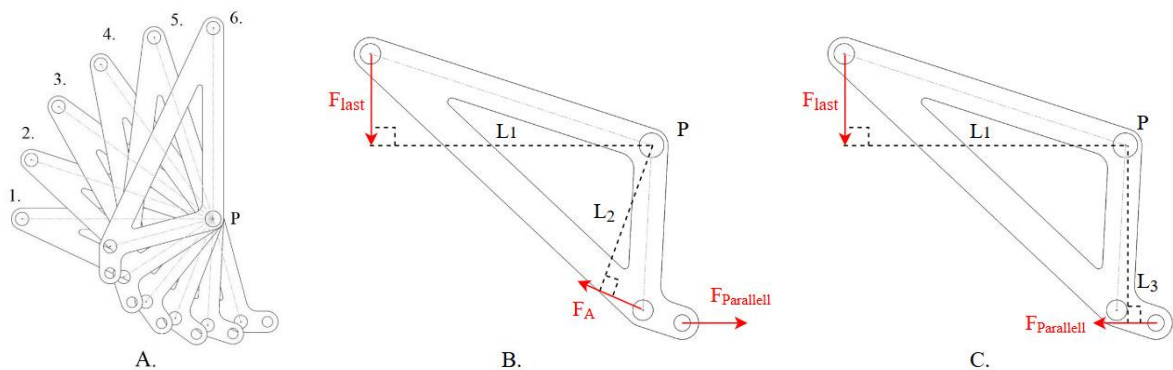
### 9.2.3 HØYDEJUSTERINGSMEKANISME



Figur 9.7: Illustrasjoner av høydejusteringsmekanismen som befinner seg på innsiden av bærerammen. Hurtigfestet med fanghaker er påmontert på toppen.

#### Løftekapasitet og kraftbilde

Løftearmene ble dimensjonert for å tåle antatte belastninger og designet slik at de passer overens med lineær aktuatoren. Geometrien til løftearmene ble studert i detalj for å finne ut hvordan kreftene fordeler seg ettersom armene løftes fra bunn- til topposisjon. Løfteoperasjonen ble delt inn i seks trinn med tilhørende verdier som presentert i figur 9.8. Relevante lengder og vinkler ble hentet fra modellen i Solidworks. Hensikten med beregningen av disse verdiene var for videre spenningsanalyse og for å kontrollere nødvendig trekraft for aktuatoren.



Figur 9.8: A: Løfteoperasjonen fra bunn til topp er inndelt i seks nummererte trinn for å danne et bilde av hvordan krefter og momenter varierer med posisjonen. B: Kraftbilde med tilhørende momentarmene i en vilkårlig posisjon for den fremre løftearmen. C: Kraftbilde med tilhørende momentarmene i en vilkårlig posisjon for den bakre løftearmen. Løftearmene er forbundet med et parallellstag.

Utvekslingen basert på momentarmene kan beregnes med følgende formel.

$$i = \frac{L_{drivende}}{L_{drevet}} \quad (9)$$

Ved å benytte momentlikningen under kan  $F_A$  beregnes for systemet i figur 9.8B.

$$F_A \cdot L_2 = F_L \cdot L_1 + F_{Parallel} \cdot L_3$$

Ved å benytte likningen under, kan  $F_{Parallel}$  beregnes for systemet i figur 9.8C.

$$F_{Parallel} = \frac{F_L}{i}$$

Tabell 9.2: Vinkler, lengder og utvekslingsforhold for fremre løftearm (B).

Beskrivelse	Posisjon 1	Posisjon 2	Posisjon 3	Posisjon 4	Posisjon 5	Posisjon 6
Vinkel (°)	0°	18°	36°	54°	72°	90°
L1 (mm)	200	190,21	162,80	117,56	61,80	0
L2 (mm)	110,72	119,33	117,2	100,83	67,24	18,39
Utteksling, $i$	0,55	0,63	0,72	0,86	1,09	-

Tabell 9.3: Vinkler, lengder og utvekslingsforhold for bakre løftearm (C).

Beskrivelse	Posisjon 1	Posisjon 2	Posisjon 3	Posisjon 4	Posisjon 5	Posisjon 6
Vinkel (°)	0°	18°	36°	54°	72°	90°
L1 (mm)	200	190,21	162,80	117,56	61,80	0
L3 (mm)	115,91	129,11	129,66	117,53	93,89	61,06
Utteksling, $i$	0,58	0,68	0,80	1,00	1,52	-

Tabell 9.4: Opptrædende krefter fra aktuator og parallellstag som funksjon av kreftene fra lasten.

Beskrivelse	Posisjon 1	Posisjon 2	Posisjon 3	Posisjon 4	Posisjon 5	Posisjon 6
Vinkel (°)	0	18	36	54	72	90
$F_{LAST}$ (N)	490,50	490,50	490,50	490,50	490,50	-
$F_{Parallell}$ (N)	845,68	721,32	613,13	490,50	322,69	-
$F_{Aktuator}$ (N)	1771,35	1562,29	996,89	980,87	980,75	-

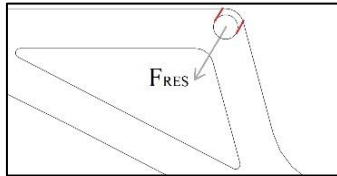
Basert på resultatene i tabell 9.2, 9.3 og 9.4 ble de høyeste kreftene observert i nedre løfteposisjon der utvekslingen er størst. Denne posisjonen medfører en aktuatorkraft på 1771,35 N. Dette er innenfor trekraften til valgt lineær aktuator som har kapasitet på 2500 N.

### Kontroll mot utrivning og brudd i grunnmateriale, løftearm

På grunn av løftearmenes tynne platebaserte utforming ble det ansett som fornuftig å kontrollere mot utrivning og brudd i grunnmaterialet ved de mest utsatte områdene. Kapasiteten mot utrivning er bestemt ved å kontrollere skjærspenningene i det skjærpåkjente arealet ( $A_{nV}$ ) mot flytegrensen ( $R_e$ ). Kapasiteten mot brudd i grunnmaterialet er bestemt ved å kontrollere normalspenningene mot flytegransen. I tabell 4.4 i kapittel 4.3.4, er flytegrensen for materialet (rustfritt stål EN 1.4301) i løftearmene angitt som 230 MPa. Basert på kreftene presentert i tabell 9.4, ble resultantkraften som virker i punktet P beregnet. Den største resultantkraften virker på den bakre armen, har en størrelse på 977,6 N og en vinkel i forhold til horisontalplanet på 59,89°, som illustrert i figur 9.9. Grunnlagsdata for utregning av netto skjærareal ( $A_{nV}$ ) og netto areal utsatt for normalspenning ( $A_{netto}$ ), ble hentet fra Solidworks. Tillatte spenninger:

$$\sigma_{till} = \frac{f_y}{1,5} = \frac{230MPa}{1,5} = 153,3 MPa \quad (7)$$

$$\tau_{till} = \frac{\sigma_{till}}{\sqrt{3}} = \frac{153,3MPa}{\sqrt{3}} = 88,5 MPa \quad (8)$$

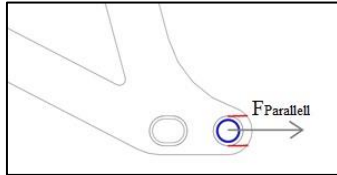


Figur 9.9: Utrivning markert i rødt.

Rotasjonspunktet til løftearm:

$$\tau = \frac{F_{RES}}{A_{nV}} = \frac{977,6N}{2 \text{ plater} \cdot (2 \cdot 9mm \cdot 2mm)} = \mathbf{13,6 MPa} \quad (6)$$

$$\tau \ll \tau_{till} \quad \mathbf{OK!}$$

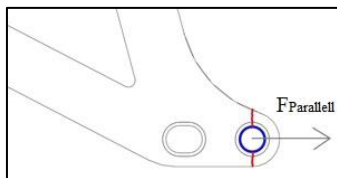


Figur 9.10: Utrivning markert i rødt.

Innfestingspunkt for parallelstag:

$$\tau = \frac{F_{Parallell}}{A_{nV}} = \frac{845,68N}{2 \text{ plater} \cdot (2 \cdot 10,39mm \cdot 2mm)} = \mathbf{10,2 MPa}$$

$$\tau \ll \tau_{till} \quad \mathbf{OK!}$$



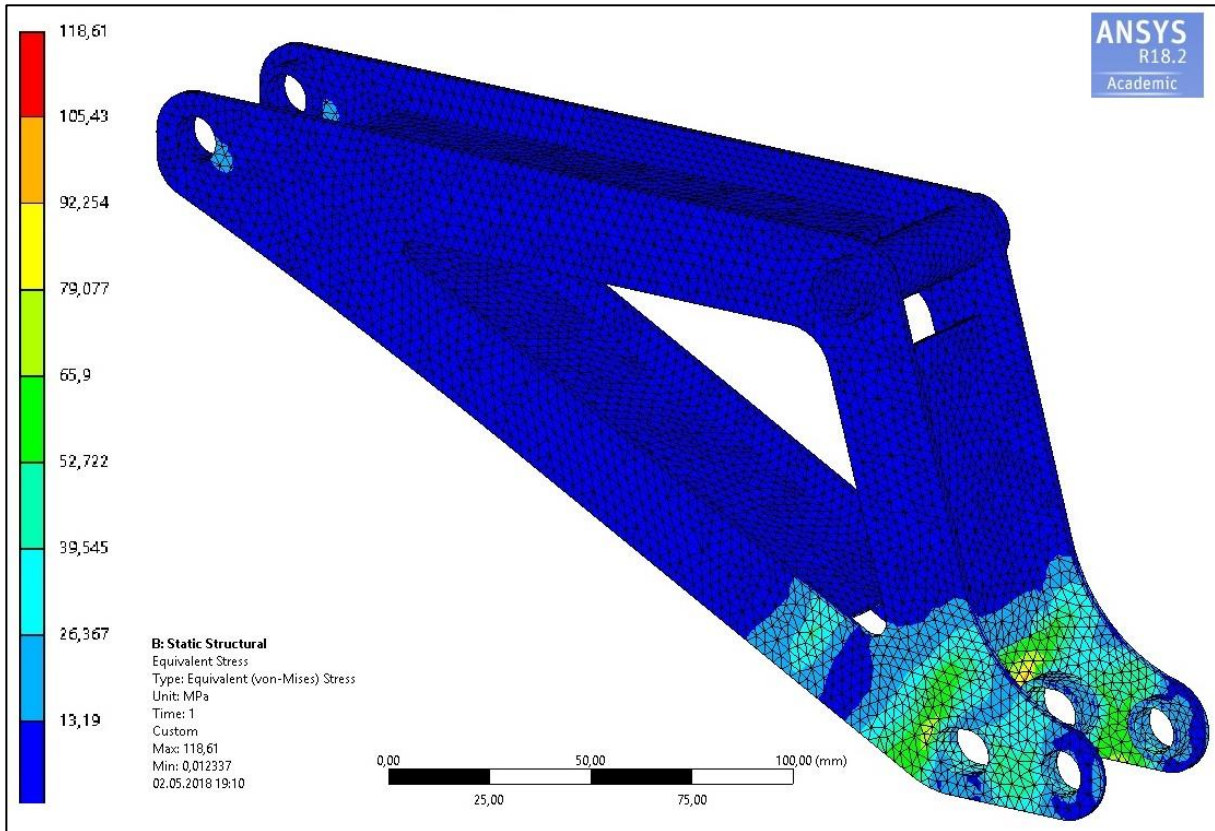
Figur 9.11: Brudd markert i rødt.

$$\sigma = \frac{F_{Parallell}}{A_{netto}} = \frac{845,68N}{50,84mm^2} = \mathbf{16,63 MPa}$$

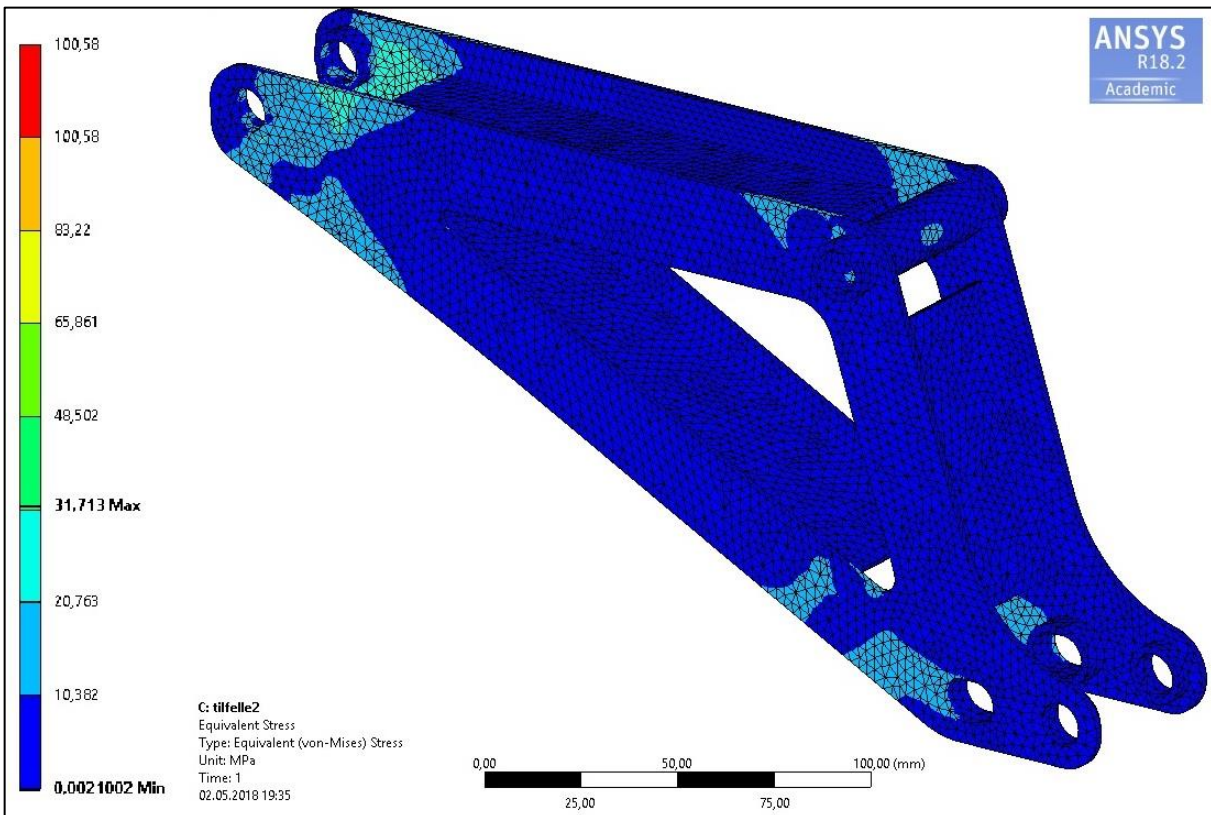
$$\sigma \ll \sigma_{till} \quad \mathbf{OK!}$$

Kontrollberegningene tok utgangspunkt i posisjon 1, illustrert i figur 9.8A, hvor de høyeste kreftene oppstod. Opptredende normal- og skjærspenninger er langt under tillatte spenninger, selv med sikkerhetsfaktor på 1,5. Basert på dette ble det ansett som unødvendig å undersøke andre scenarier. Selv om kraften som virker i punktet der aktuatoren er festet er den høyeste, er det svært lite sannsynlig med utrivning eller brudd grunnet den omsluttende geometrien. De foregående håndberegningene baserte seg på at alle krefter blir tatt opp i platene. De inkluderte ikke forsterkningshylsene som er påsveiset i tilknytning til hullene. Beregningene er i så måte konservative. Sveising medfører reduserte mekaniske egenskaper i den varmepåvirkede sonen, og den konservative vurderingen ble derfor ansett som fornuftig.

Løftearmen ble videre kontrollert med en FEM-analyse i ANSYS. Fremre løftearm ble kontrollert da denne var den hardest belastede. For å få realistiske data ble det utført to separate simuleringer. Simulering 1 ble fast opplagret i innfestingspunktet for hurtigfestet, og punktet P ble opplagret slik at det kunne rotere om akslingen. Dette ble gjort for å få nøyaktige resultater i undersøkelsesområdet rundt aktuatorfestet og parallelstagfestet. Kraftene som ble påført var  $F_A$  og  $F_{Parallell}$ . Simulering 2 ble fast opplagret i aktuatorfestet og punktet P ble opplagret slik at det kunne rotere om akslingen. I dette tilfellet ble kun  $F_{Last}$  påført for å studere området rundt innfestingen til hurtigfestet. Simuleringene bekreftet antagelsene om lave opptredende spenninger. Maksimal Von Mises spenning fant sted i området tilknyttet aktuatorfestet og ble beregnet til 118,61 MPa. Dette er godt under flytegrensen, og har en sikkerhet mot flyt på om lag 1,9. Maksimal deformasjon fant sted i tilknytning til området rundt parallelstagfestet og ble beregnet til 0,17 mm. Spenningsplott er illustrert i figur 9.12 og 9.13. Oppsett, mesh og innstillinger for simuleringen finnes i vedlegg B4.



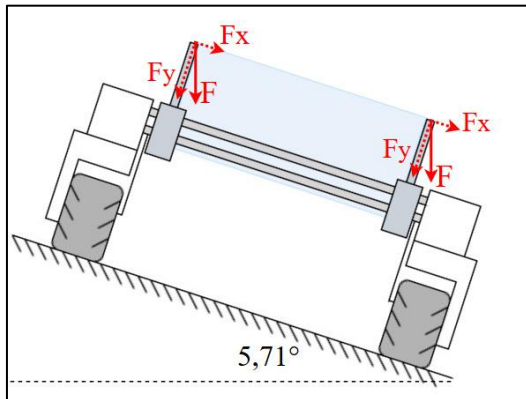
Figur 9.12: Spenningsplott for simulering 1, belastet med  $F_A$  og  $F_{PARALLELL}$ . Spenningskonsentrasjonene observeres i tilknytning til aktuatorfestet med maksimal verdi på 118,61 MPa.



Figur 9.13: Spenningsplott for simulering 2, belastet med  $F_{LAST}$ . Det observeres svært lave spenninger. De høyeste opprettede spenningene er i tilknytning til innfestingspunktet for hurtigfestet, med maksimal verdi på 31,7 MPa.

### Kontroll av løftearmen ved sideveis belastning

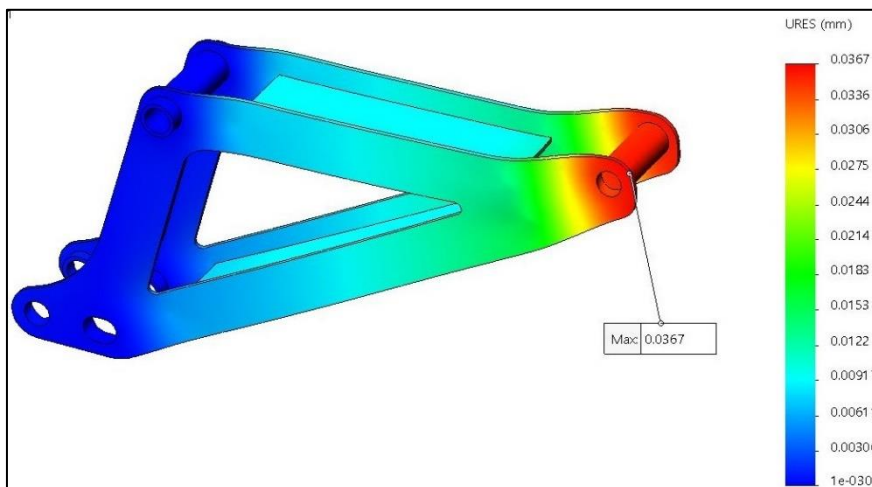
Dersom roboten under en transportetappe kjører i en helning, vil det oppstå et bøyemoment på løftearmene. Et antatt belastningsscenario vil derfor være bøyemomentet som påføres løftearmene som resultat av verktøyets masse (200 kg) ved kjøring i en helning. Det ble antatt et scenario hvor roboten kjører på langs i en stigning på 10 % (5,71°), som illustrert i figur 9.14. Basert på resultatene, presentert i tabell 9.5, tåler løftearmene belastningen med god margin og ble derfor ansett som sikker for en statisk belastningssituasjon. Håndberegninger og oppsett for FEM-analyse finnes i vedlegg A3.



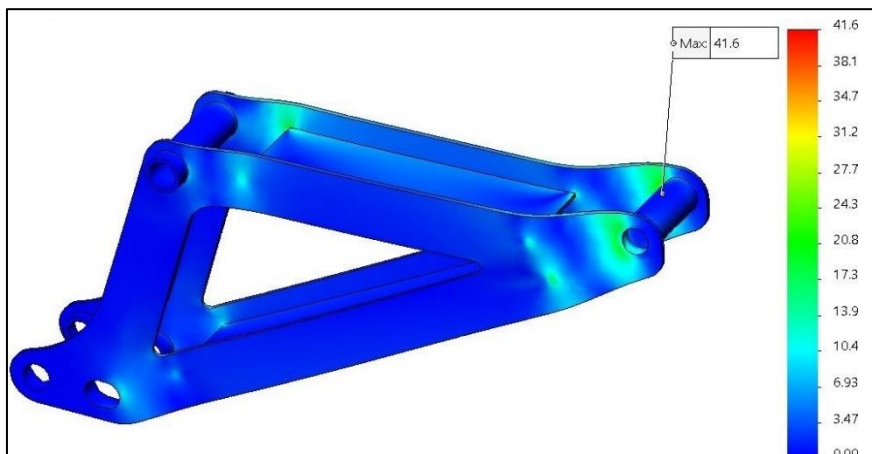
Figur 9.14: Verktøyfestet hevet til øvre posisjon under transport ved kjøring i en helning på 10% (5,71°).

Tabell 9.5: Resultater fra FEM-analysen og fra håndberegninger.

$F$	490,5 N
$F_x$	48,8 N
$F_y$	488,1 N
$\sigma_{VON MISES}$	41,6 MPa
Deformasjon	0,0367 mm



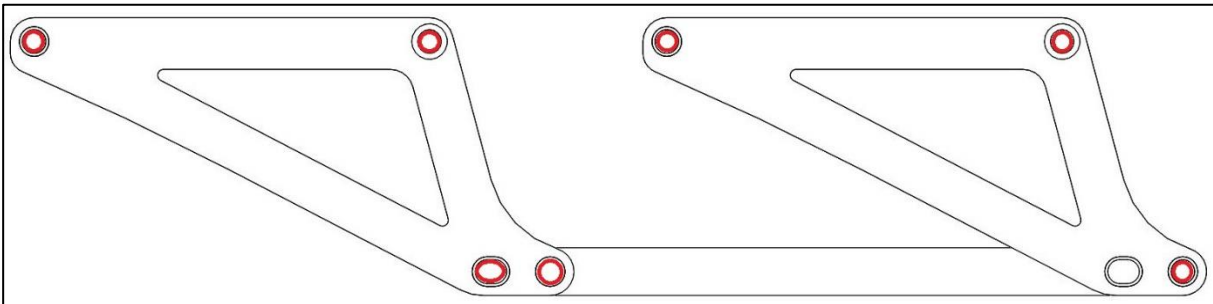
Figur 9.15: Deformasjonsplott basert på antatt belastning fra verktøy på 200 kg ved kjøring i en helning på 10 %. Høyeste verdi for deformasjon er 0,036 mm. Dette vil ikke medføre at løftearmen kiles fast i bærerammen da den er designet med en klaring på 8,5 mm.



Figur 9.16: Spenningsplott basert på antatt belastning fra verktøy på 200 kg ved kjøring i en helning på 10%. Høyeste Von-Mises spenning ble observert til 41.6 MPa. Dette er langt under flytegrensen på 230 MPa (EN 1.4301), og konstruksjonen ble ansett som sikker.

### Valg av foringer

Løftemekanismen består av mange roterende ledd og det var derfor hensiktsmessig å velge foringer slik at forbindelsene ikke slites unødvendig. Det var også ønskelig å adskille deler av konstruksjonen for å unngå galvanisk korrosjon mellom rustfritt stål og aluminium. SKF Norge AS leverer glassfiberforsterkede foringer laget av termoplast som inneholder polytetrafluoreten (PTFE polyamid). Denne serien er korrosjonsresistent og vedlikeholdsfri, og ble antatt som et fornuftig valg for foringer da den er ment for moderat belastning. For å bevare enkelhet i montering ble det valgt å benytte PTFE polyamid foringer på alle steder i konstruksjonen der det er nødvendig. Figur 9.17 illustrerer alle rotasjonspunktene i løftemekanismen som hadde behov for foringer.



Figur 9.17: Alle punkter markert i rødt illustrerer områder hvor det ble valgt å plassere foringer.

PTFE polyamid foringene er spesifisert til å tåle en dynamisk spenning på 40 MPa. Ved å ta utgangspunkt i den høyeste kraften ( $F_{Aktuator}$ ) på løftemekanismen kan kravet kontrolleres.

$$\sigma = \frac{F_{Aktuator}}{A_{Foring}} = \frac{1771,35N}{2 \text{ foringer} \cdot (12mm \cdot 12mm)} = 6,2 \text{ MPa} \quad (10)$$

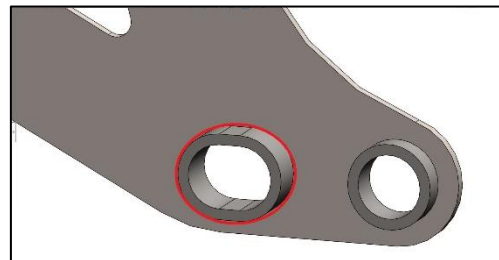
Opptredende spenning i foringen er langt under kravet og kan med stor trygghet benyttes.

### Kontroll av sveiseforbindelse på løftearm

Det var ønskelig å dimensjonere for tilstrekkelig a-mål rundt forsterkningshylsene illustrert i figur 9.18. Dimensjoneringen tok utgangspunkt i hylsen rundt aktuatorfestet som var utsatt for den største strekkraften. Selv om formen til hylsen egentlig er oval, ble den antatt sirkulær i beregningene. Dette var en konservativ vurdering da sveisearealet i virkeligheten hadde vært større enn i dimensjoneringen. En annen konservativ tilnærming gikk ut på strekkraften fra aktuatoren ble tatt opp som skjærspenning ( $\tau_{||}$ ) i kilsveisen rundt hylsen. Tillatte spenninger ble definert fra flytegrensen:

$$\sigma_{tillat} = \frac{f_y}{2,0} = \frac{230MPa}{2,0} = 115 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\tau_{tillat} = \frac{\sigma_{tillat}}{\sqrt{3}} = 66,4 \text{ MPa} \quad (8)$$



Figur 9.18: Forsterkningshylsen fastsveist til løftearmen. Sveis markert i rødt.



Skjærspenningen i sveisen ble beregnet med formel 11:

$$\tau_{||} = \frac{F}{A} \quad (11)$$

$\tau_{||}$  = Skjærspenning (parallell komponent) i sveis

$F$  = Kraft fra aktuator

$A$  = Arealet rundt sveisen =  $\pi \cdot d \cdot a$

For bestemmelse av a-mål ble det tatt utgangspunkt i at det ikke anbefales a-mål større enn 0,7 multiplisert med platetykkelsen [74]. Dette ble også kontrollert med ansatte på verkstedet ved NMBU for å få et praktisk innblikk, og ble der ansett som en fornuftig antagelse. Valgt a-mål for kilsveisen ble derfor satt til  $0,7 \cdot 2\text{mm} = 1,4\text{mm}$ . Videre ble det antatt et sveisemetall med fasthetsegenskaper likt grunnmaterialet (rustfritt stål EN 1.4301). Den opptredende strekkraften per sveis ble:

$$F_{\text{per sveis}} = \frac{F_{\text{aktuator}}}{2} = \frac{1771,35\text{N}}{2} = 885,68\text{N}$$

$$\tau_{||} = \frac{885,68\text{N}}{\pi \cdot 18\text{mm} \cdot 1,4\text{mm}} = \mathbf{11,19\text{ MPa}}$$

$$\tau_{||} \ll \tau_{\text{tillatt}}$$

Opptredende skjærspenning var godt under den tillatte spenningen og sveisen med a-mål på 1,4 mm ble derfor ansett som driftssikker.

### Utmatting i sveis

Sveisen i løftearmen ble kontrollert mot utmattingsbrudd etter DNVGL-RP-C203. For å ivareta eventuelle rykk og støt i mekanismen ble nominell spenning multiplisert med faktoren 1,5. Dersom spenningsvidden er lavere enn den aktuelle utmattingsgrensen ble det tatt utgangspunkt i at det ikke er nødvendig å utføre en Miner-Palmgren utmattingsberegning for å estimere levetid, som beskrevet i kapittel 4.4.2. Det ble utført utmattingsberegninger for to ulike scenarioer.

**Scenario 1:** Det ble konservativt antatt sveisen er lastbærende. For lastbærende kilsveiser kan utmattingsprekker initieres fra sveisen rot og gjennom sveisen. Verdien for  $\tau_{||}$  på 11,19 MPa ble benyttet som opptredende skjærspenning. Nominell spenningsvidde ble beregnet med følgende formel, hentet fra standarden (DNVGL-RP-C203):

$$\Delta\sigma_w = \sqrt{\Delta\sigma_{\perp}^2 + \Delta\tau_{\perp}^2 + 0,2\Delta\tau_{||}^2} \quad (12)$$

$$\Delta\sigma_{w,n,1} = \sqrt{0,2\Delta\tau_{||}^2} = \sqrt{0,2 \cdot 11,19^2} = \mathbf{5,0\text{ MPa}}$$

Korrigerer av nominell spenningsvidde med faktoren 1,5:

$$\Delta\sigma_{w,1} = 1,5 \cdot 5,0 \text{ MPa} = \mathbf{7,5 \text{ MPa}}$$

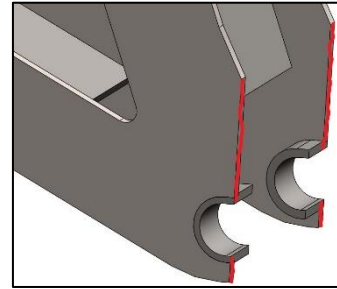
Fra DNVGL-RP-C203, appendix A, ble det valgt tabell A8, «case 2» og kurve W3. Utmattingsgrensen ( $\Delta\sigma_D$ ) ved  $1 \cdot 10^7$  sykler er:

$$\Delta\sigma_D = \mathbf{21,05 \text{ MPa}}$$

$$\Delta\sigma_{w,1} < \Delta\sigma_D$$

Fordi korrigerert spenningsvidde er lavere enn utmattingsgrensen ble det konkludert med svært lav fare for sprekkvekst fra sveiseroten.

**Scenario 2:** Det ble kontrollert mot utmattingsbrudd med utgangspunkt i den svekkede varmpåvirkede sonen i tilknytning til sveisen. Fra spenningsplottet i ANSYS ble de høyeste spenningene observert i tilknytning til området rundt aktuatorfestet og det ble derfor ansett som fornuftig å kontrollere dette området mot utmattingsbrudd. Sprekkdannelse kan eksempelvis initieres dersom overflaten i hullet er grov. Det effektive arealet som blir utsatt for vekslende spenning ble hentet fra Solidworks og er  $A_{netto} = 64,11 \text{ mm}^2$ . Beregner nominell spenningsvidde.



Figur 9.19: Potensielt utmattingsbrudd er illustrert i rødt, normalt på aktuatorkraften.

$$\sigma_{n,2} = \frac{F_{Aktuator}}{2 \cdot A_{strek}} = \frac{1771,35 \text{ N}}{2 \cdot 64,11 \text{ mm}^2} = \mathbf{13,81 \text{ MPa}} \quad (10)$$

Korrigerer av nominell spenningsvidde med faktoren for å ta hensyn til eventuelle støt og slag ved dynamisk belastning 1,5:

$$\Delta\sigma_2 = 1,5 \cdot 13,81 \text{ MPa} = \mathbf{20,7 \text{ MPa}}$$

Fra DNVGL-RP-C203, appendix A, ble det valgt tabell A2, «case 1» og kurve C1. Utmattingsgrensen ( $\Delta\sigma_D$ ) ved  $1 \cdot 10^7$  sykler er:

$$\Delta\sigma_D = \mathbf{65,50 \text{ MPa}}$$

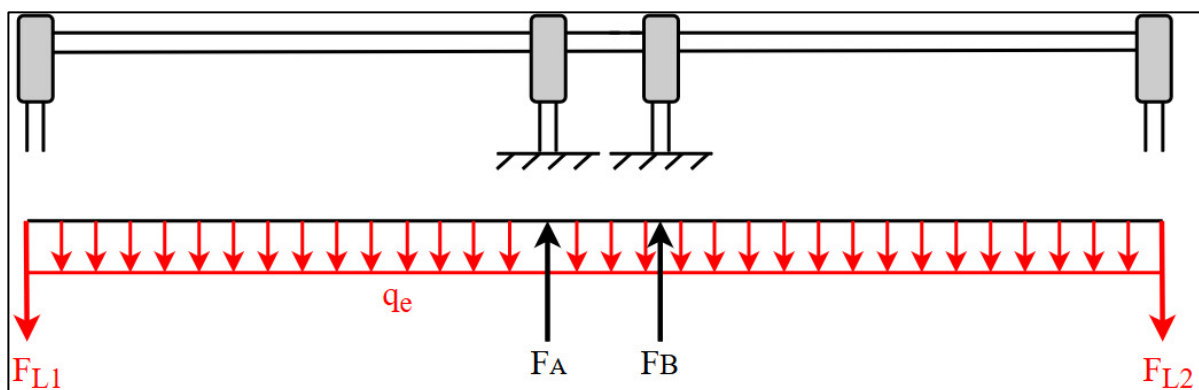
$$\Delta\sigma_2 < \Delta\sigma_D$$

Den korrigererte spenningsvidden er lavere enn utmattingsgrensen og det ble derfor antatt svært lav sannsynlighet for utmattingsbrudd i aktuatorfestet på løftearmen.

## 9.3 DIMENSJONERING AV UV-VERKTØY

### 9.3.1 UV-VERKTØY FOR JORDBÆRKULTURER

På grunn av UV-verktøyets store bredde ble det vurdert som relevant å undersøke skjærkrefter, momenter, nedbøyning og Von Mises spenning i rørene som bærer konstruksjonen. Grunnet verktøyets justeringsmulighet ble det valgt å undersøke modifikasjonen med størst bredde for å analysere systemet når det er hardest belastet. Denne situasjonen er illustrert i figur 9.20. Det ble benyttet estimerte verdier på 10 kg for massen som virker fra lysmodulene ( $F_{L1}, F_{L2}$ ), dvs. 5 kg per aluminiumrør.

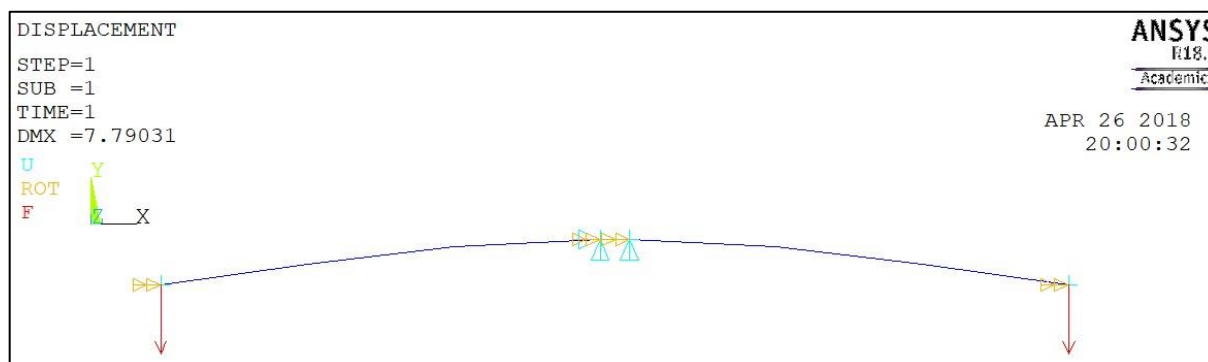


Figur 9.20: Utsnitt av rammekonstruksjonen som benyttes til table-top jordbær. Jevnt fordelt last og krefter er illustrert i nedre del av figuren.  $F_L$ : Lastkraft,  $F_A$  og  $F_B$ : opplagingskrefter.

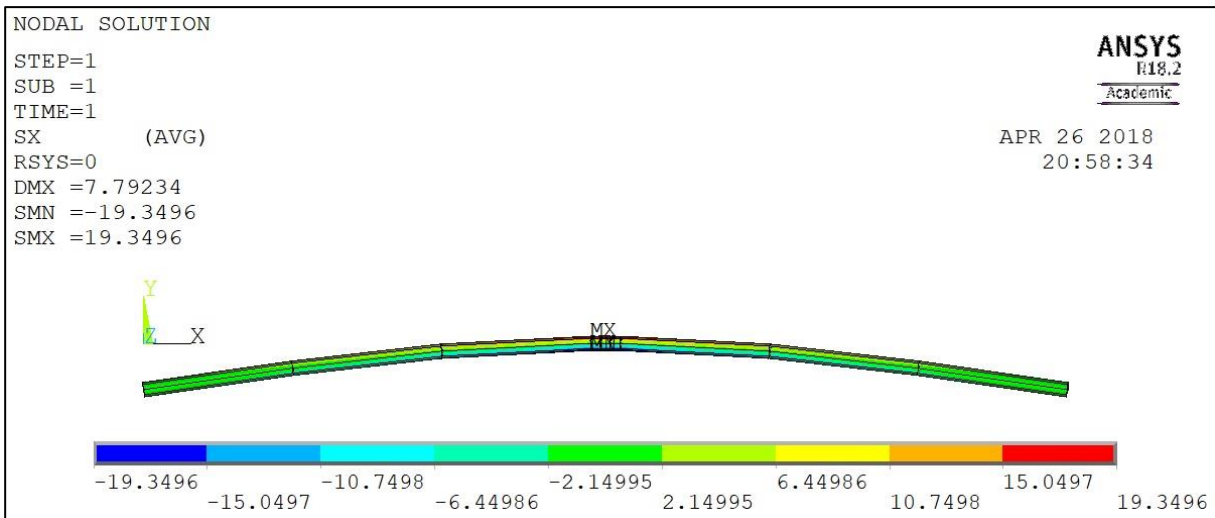
Det ble utført simuleringer i ANSYS APDL for innhenting av relevante data. Verdiene ble også kontrollert mot håndberegninger, og ble ansett som troverdige da de stemmer meget godt overens. Data som mål og vekt ble hentet fra modell i Solidworks. Resultatene er presentert i tabell 9.6, mens utregninger, oppsett og innstillinger finnes i vedlegg B1.

Tabell 9.6: Resultater fra simulering (ANSYS APDL) og håndberegninger utført på rammekonstruksjonen for UV-verktøy benyttet for jordbærkulturer.

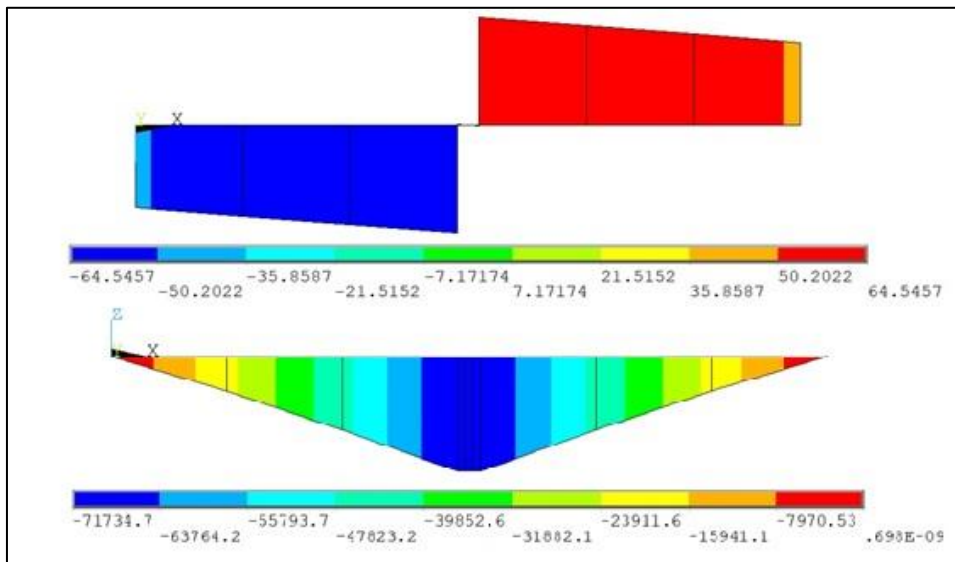
Resultat	Nedbøyning (mm)	Skjærkraft (N)	Moment (Nm)	Spenning (MPa)
ANSYS APDL	7,79	64,54	71,73	19,35
Håndberegning	7,74	64,1	71,17	19,19



Figur 9.21: Simulering av nedbøyning for de øvre rørene som bærer lysmodulene. Maksimal nedbøyning finner sted på endene og ble beregnet til 7,79mm.



Figur 9.22: Simulering av Von Mises spenninger i rørene som bærer lysmodulene. Maksimal spenning finner sted ved opplagringene som strekk i overkant av røret, og ble beregnet til 19,35 MPa.

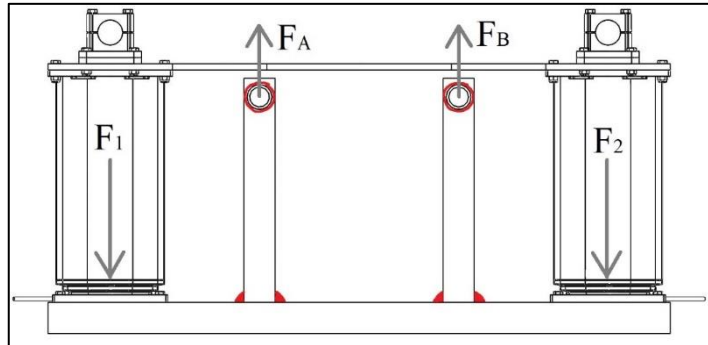


Figur 9.23: Skjærkraftdiagram og momentdiagram for røret med tilhørende verdier. Skjærkraftdiagrammet er illustrert øverst og er angitt i N. Momentdiagrammet er plassert nederst og er angitt i Nmm. Maksverdier er presentert i tabell 9.6.

Beregningene og simuleringene angir kun et estimat av den reelle situasjonen. Resultatene presenterer nokså lave verdier sammenliknet med fasthetsverdiene for aluminiumslegeringen, og det ble derfor konkludert med at konstruksjonen innehar statisk styrke for å kunne tåle antatte belastninger. Maksimal opptredende spenning i røret var 19,35 MPa, noe som er svært lavt sammenliknet med flytegrensen på 200 MPa for aluminiumrøret. Det ble ikke utført dynamiske analyser, selv om dette kan være relevant. Analyser og tester for å studere svingninger i systemet kunne gitt data for å studere den dynamiske oppførselen til verktøyet ettersom det beveger seg gjennom jordbærradene. Aluminiumrørets nedbøyning på 7,8 mm ved statisk belastning er akseptabel og medfører ikke redusert funksjonalitet for verktøyet.

### Kontroll av sveis i løfteplattform

Løfteplattformen består av to løftesøyler forbundet med en plate i topp og en rektangulær aluminiumprofil i bunn. To rektangulære aluminiumprofiler er sveiset til bunnprofilen som vist i figur 9.24. Til disse profilene er det videre påsveiset to aluminiumrør som er innfestingspunktet til hurtigfestet. Løftesøylene påfører vertikale krefter på enden av bunnprofilen, mens de påsveisete rørene bærer hele konstruksjonen. Det ble derfor antatt hensiktsmessig å dimensjonere de lastbærende sveiseforbindelsene for å kontrollere at de tåler belastningen.



Figur 9.24: Løfteplattformens sveiseforbindelser er illustrert i rødt, og krefter i grått.

Dimensjoneringen baserer seg på NS-EN 1999-1-1:2007 (Eurokode 9) og finnes i vedlegg A2. Resultatene fra den statiske beregningen, presentert i tabell 9.7, viser svært lave opptredende spenninger, og sveiseforbindelsene ble derfor ansett som trygge.

Tabell 9.7: Resultater fra håndberegninger for kontroll av sveiseforbindelser på løfteplattform.

Undersøkellesområde	$\sigma_w$ (opptredende spenning)	$\sigma_{tillatt}$
Sveiseforbindelse rektangulærprofil	8 MPa	100 MPa
Undersøkellesområde	$\tau_{\parallel}$ (opptredende spenning)	$\tau_{tillatt}$
Sveiseforbindelse rørprofil	0,63 MPa	72,17 MPa

### 9.3.2 UV-VERKTØY FOR AGURKKULTURER

Friksjonskoblingene som holder UV-verktøyet sammen er illustrert i figur 9.25. Forspenningskraften til M10 boltene skaper en friksjonskraft mellom rør og kobling slik at de ikke roterer i forhold til hverandre. Det er svært uheldig dersom koblingene sitter løst slik at bestrålingsstativet velter. En tenkt situasjon kan også være at noen ved et uhell lener seg mot stativet. Rose Krieger er leverandør av friksjonsklemmene og oppgir nøyaktige spesifikasjoner for momentbelastning og tiltrekningsmoment. Begge er angitt med tiltrekningsmoment på 50 Nm. Maksimalt rotasjonsmoment for krysskoblingen er 43 Nm. Maksimalt rotasjonsmoment for vinkelkoblingen er 104 Nm.

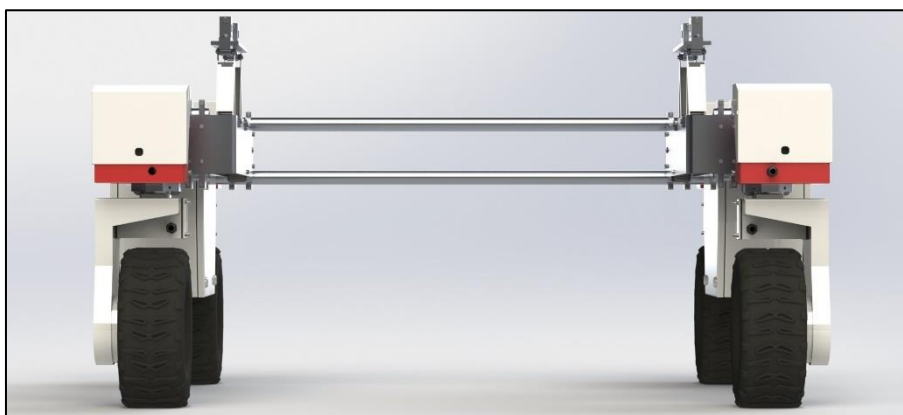


Figur 9.25: UV-verktøy for agurk. Venstre: krysskobling. Høyre: vinkelkobling.

## 10. PRODUKTARKITEKTUR OG KONSEPTDESIGN

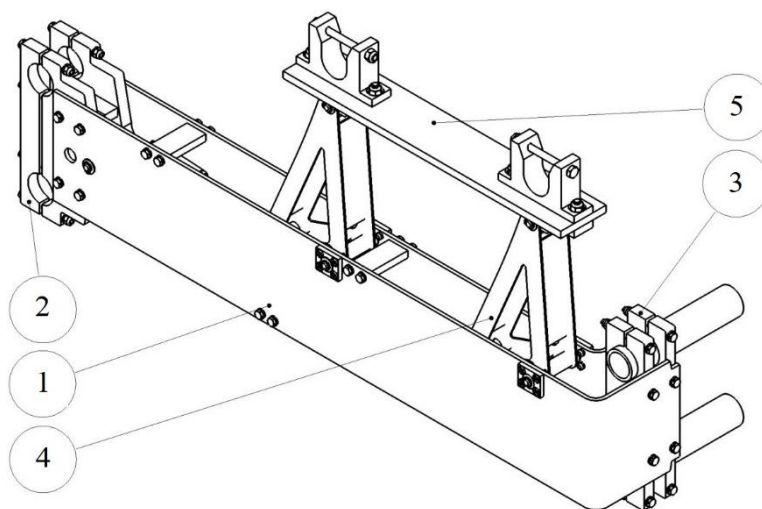
I dette kapitlet presenteres produktarkitekturen for verktøyinnfestingen og UV-verktøyet. Innledningsvis gis en oversikt over sammenstillingen med henvisning til hovedelementene. Videre er konseptdesignet illustrert og beskrevet trinnvis gjennom hovedelementer, komponenter og standardkomponenter.

### 10.1 PRODUKTARKITEKTUR VERKTØYINNFESTINGSSYSTEM



Figur 10.1: Illustrasjon av påmontert verktøyinnfestingssystem på Thorvald II.

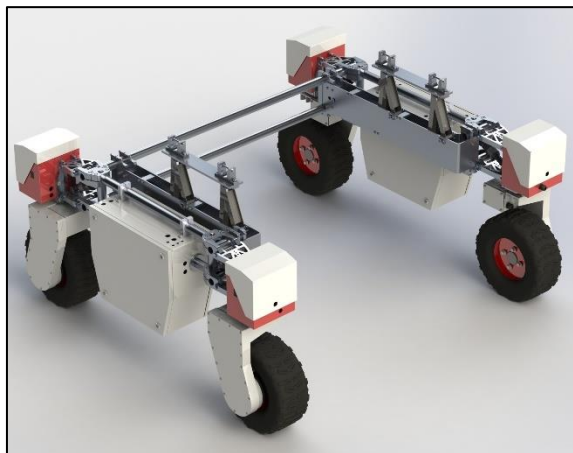
#### 10.1.1 SAMMENSTILLING



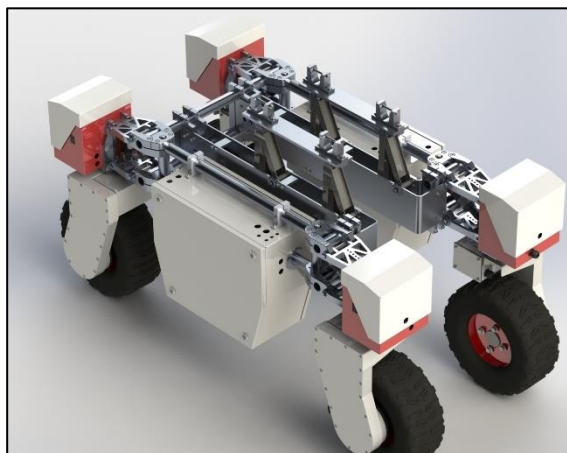
Figur 10.2: Sammenstillingsfigur av verktøyinnfestingssystem med nummererte hovedelementer.

Tabell 10.1: Nummerert oversikt over hovedelementer illustrert i figur 10.2, med navn og beskrivelse.

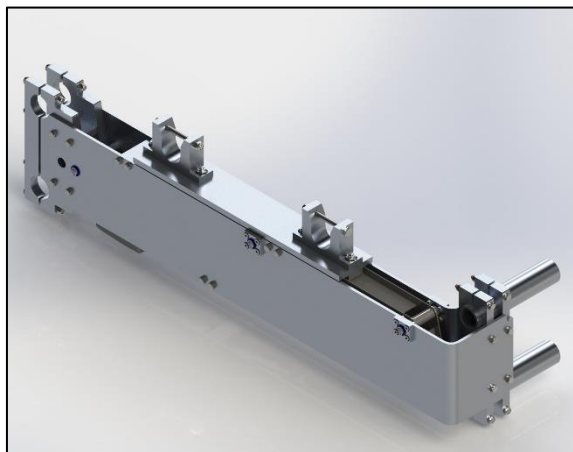
Nummer	Hovedelement	Beskrivelse
1	Bæreramme	Bærende rammekonstruksjon bestående av to knekte plater
2	Bakre brakett	Forbindelse mellom bakre robotramme og bæreramme
3	Fremre brakett	Forbindelse mellom fremre festepunkt på robot og bæreramme
4	Løftmekanisme	Mekanisme bestående av løftearmer og parallellstag
5	Hurtigfeste	Selvsentrerende innfestingspunkt mellom verktøy og robot



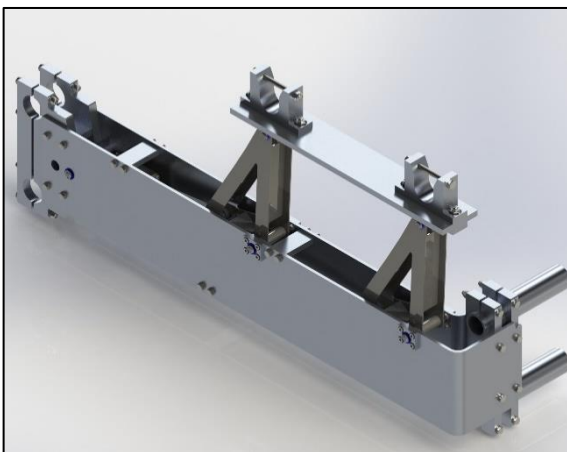
Figur 10.3: Standardversjon av Thorvald II med montert verktøyinnfesting på begge sider. Hurtigfestet befinner seg i hevet posisjon.



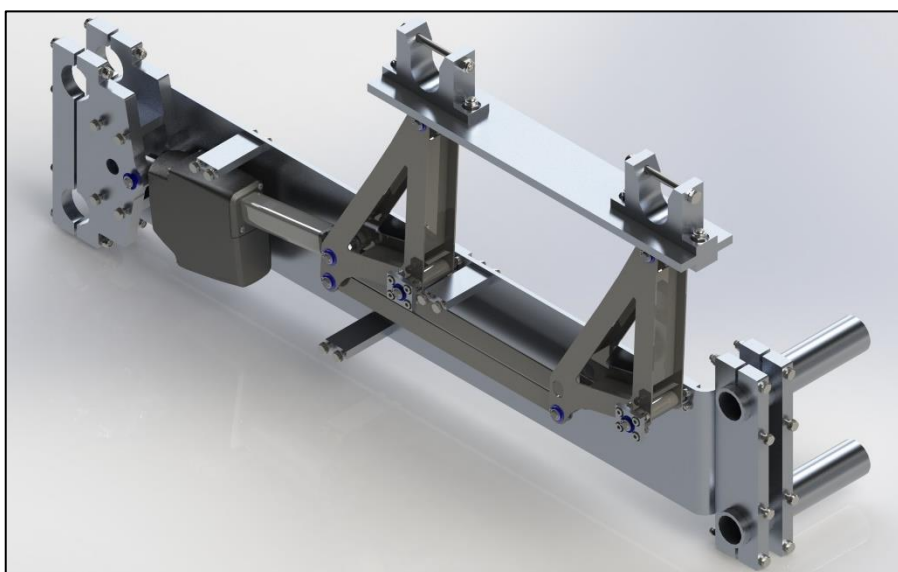
Figur 10.4: Smalt modifisert versjon av Thorvald II med fastmontert verktøyinnfesting på begge sider. Hurtigfestet er hevet.



Figur 10.5: Illustrasjon av verktøyinnfestingen som befinner seg på den ene siden. Hurtigfestet er i nedre posisjon.

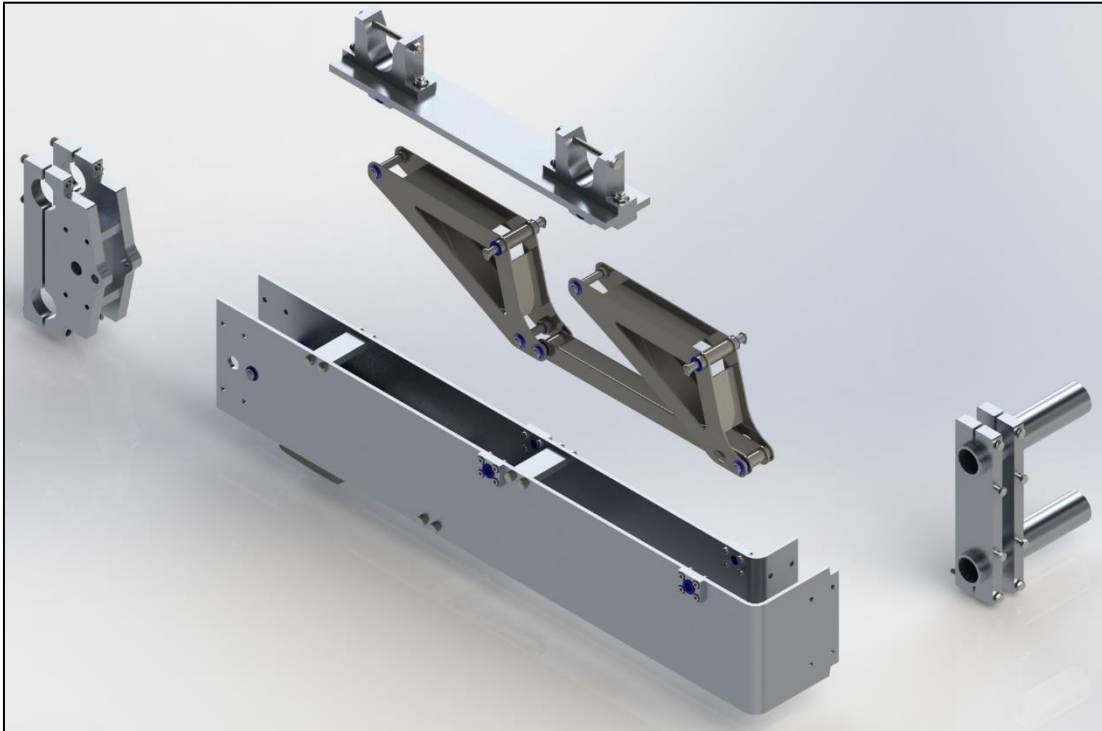


Figur 10.6: Illustrasjon av verktøyinnfestingen. Hurtigfestet er hevet 200 mm til øvre posisjon.

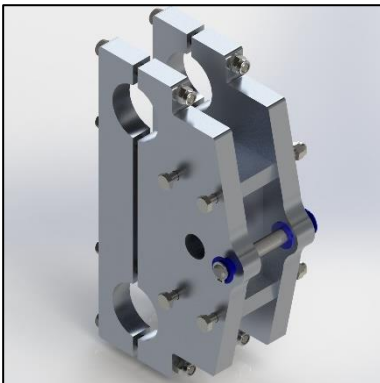


Figur 10.7: Utsnitt av verktøyinnfestingssystem for å illustrere indre komponenter. Lineær aktuatoren er festet til bakre brakett og til bakre løftearm. Skyvekraft overføres via parallelstaget til fremre løftearm.

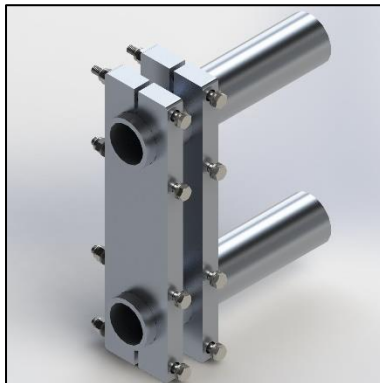
### 10.1.2 DESIGN AV HOVEDELEMENTER



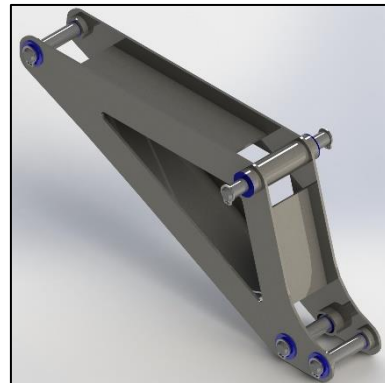
Figur 10.8: Eksplosjonstegning som viser mekaniske hovedelementer i verktøyinnfestings-systemet. Elektrisk aktuator er ikke illustrert i figuren.



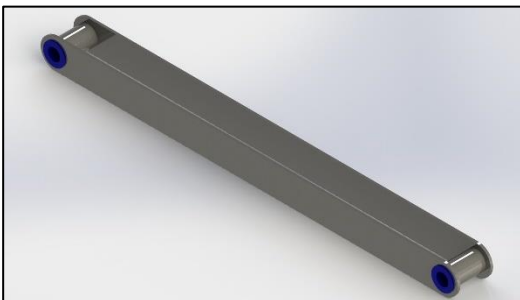
Figur 10.9: Bakre brakett er festepunktet mellom robotens bakre ramme og bærerammen til verktøyinnfestingssystemet.



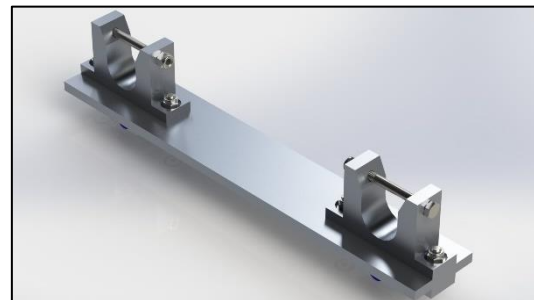
Figur 10.10: Fremre brakett er forbindelsen mellom robotens fremre innfestingspunkt og bærerammens fremre del.



Figur 10.11: Løftearmen er plassert på innsiden av bærerammen. Den er platebasert og sveist for ønsket utforming.



Figur 10.12: Parallellstaket forbinder de to løftearmene og overfører skyvekraft fra den fremre til den bakre løftearmen.

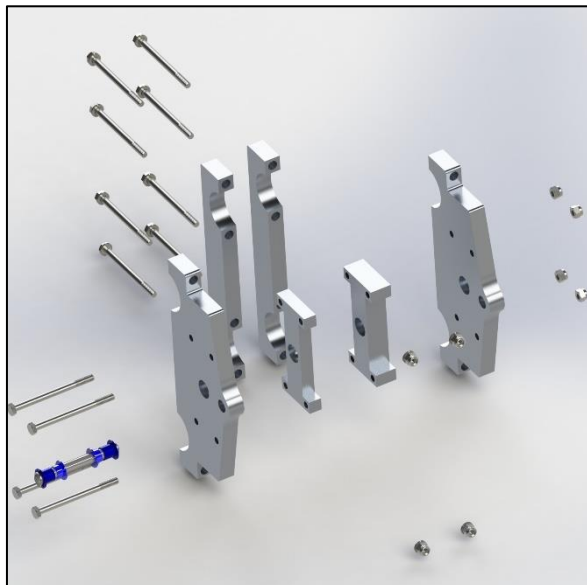


Figur 10.13: Hurtigfestet er innfestingspunktet mellom verktøy og innfestingssystem, og består av to fanghaker per side



### 10.1.3 KOMPONENTER

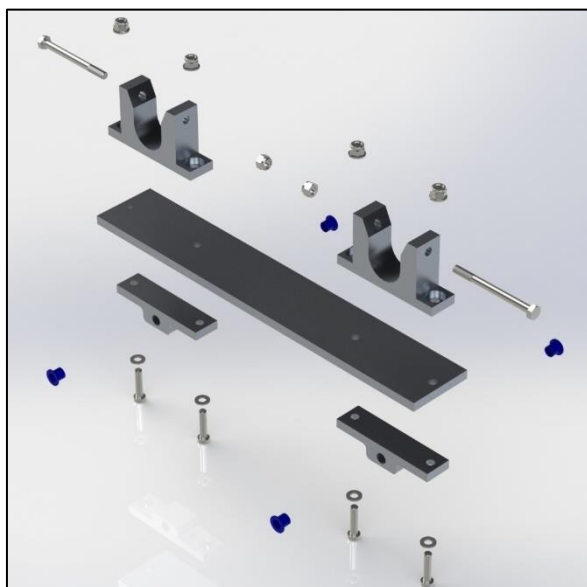
Basert på konstruksjonens omfattende antall deler, er det her illustrert eksplosjonstegninger.



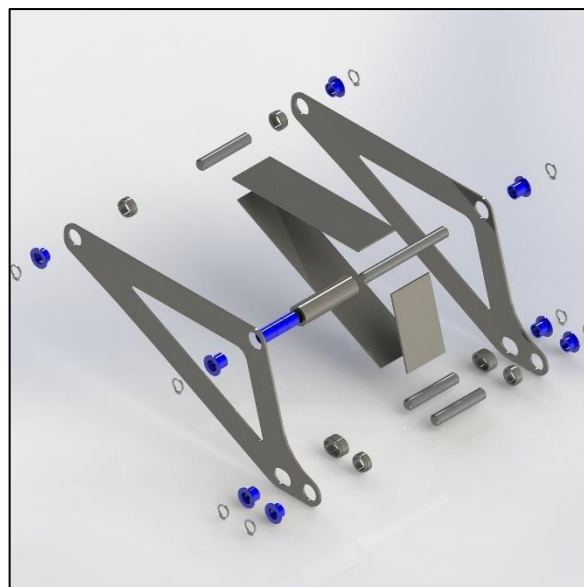
Figur 10.14: Eksplosjonstegningen viser komponentene som utgjør den bakre braketten. Braketten omslutter robotens rørbaserte ramme, hvor rørene har diameter 40 mm. Boltestørrelse er M6 og det er benyttet låsemuttere og skiver. Foringer er illustrert i blått og finnes på akslingen som er festet til lineær aktuatoren.



Figur 10.15: Eksplosjonstegningen viser komponentene som utgjør fremre brakett. Rørprofilene har diameter 40 mm og festes til robotens fremre hjørnepunkter. Braketten festes til bærerammen via fire M6 bolter. Friksjonskoblingen strammes med to M6 bolter øverst og nederst som illustrert i figuren.



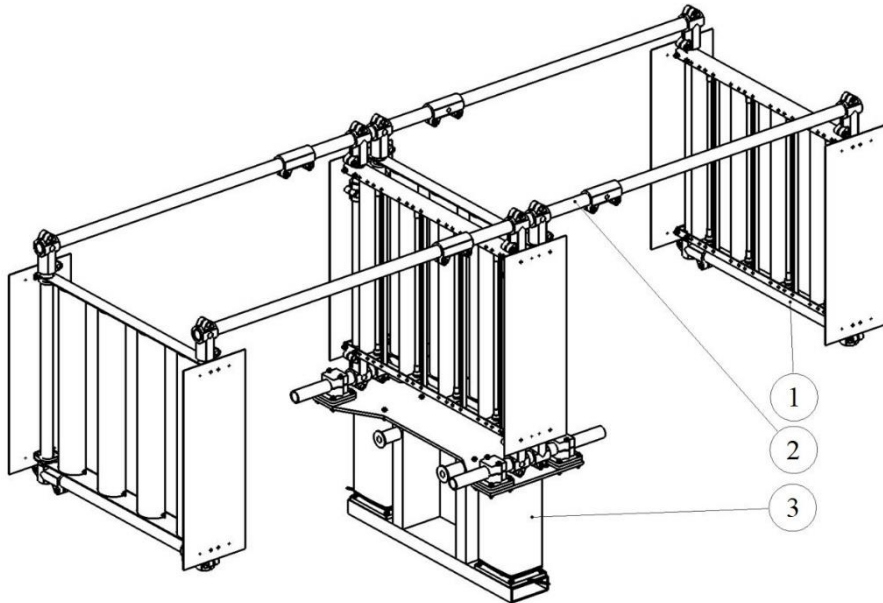
Figur 10.16: Eksplosjonstegningen illustrerer komponentene som utgjør hurtigfestet. Verktøydelenes rør plasseres i de to fanghakene og låses med låsebolter. På undersiden vises festebrakettene som forbinder hurtigfestet med løftearmene. Bolter har størrelse M8 og det er benyttet skiver og låse-muttere. Foringer er illustrert i blått og benyttes på akslingen som forbinder hurtigfeste og løftearm.



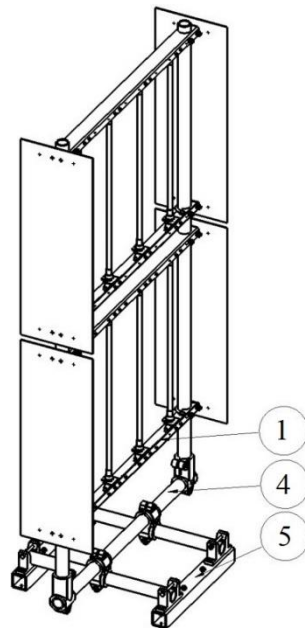
Figur 10.17: Eksplosjonstegningen illustrerer komponentene som utgjør løftearmen. Den er platebasert og sammenføres via sveising. Forsterkningshylsene sveises også fast. Hylser er illustrert i blått og fungerer som glidelager i for akslingene som roterer ettersom mekanismen heves opp og ned. Bakre og fremre løftearm har lik utforming.

## 10.2 PRODUKTARKITEKTUR UV-VERKTØY

### 10.2.1 SAMMENSTILLING



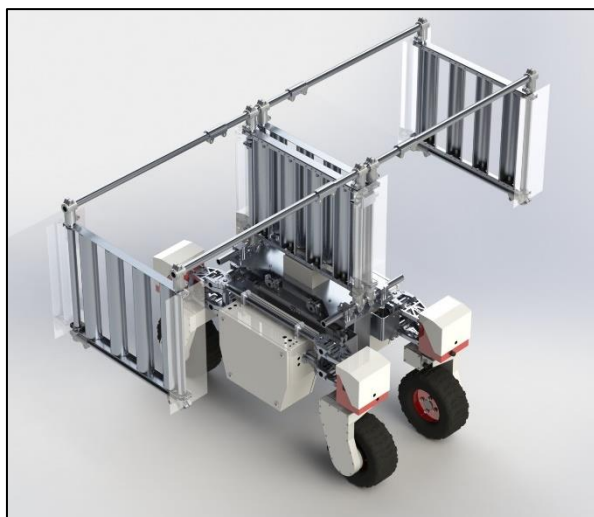
Figur 10.18: Sammenstillingsfigur av UV-verktøy for bestråling av jordbærkulturer med nummererte hovedelementer.



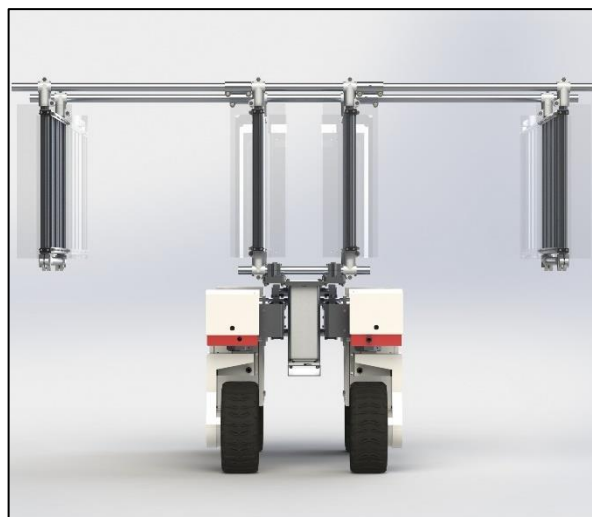
Figur 10.19: Sammenstillingsfigur av UV-verktøy for bestråling av agurkkulturer med nummererte hovedelementer.

Tabell 10.2: Nummerert oversikt over hovedelementer illustrert i figur 10.16 og 10.17.

Nummer	Hovedelement	Beskrivelse
1	Lysmodul	Modulen er lik på tvers av UV-verktøyene
2	Rammekonstruksjon, jordbær	Ramme som bærer lysmoduler, jordbærversjon
3	Løfteplattform	Høydejustering av UV-verktøy for jordbær
4	Rammekonstruksjon, agurk	Ramme som bærer lysmoduler, agurkversjon
5	Plattform for hurtigfeste	Innfestingsplattform for agurkversjon



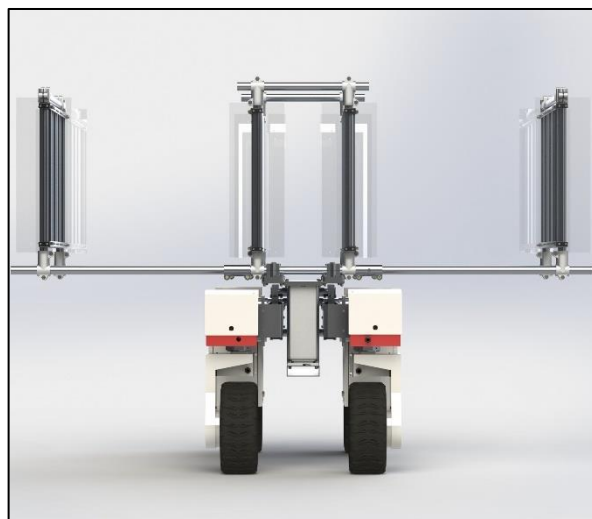
Figur 10.20: UV-verktøy for table-top jordbær. Oppsettet er tilpasset store planter og har derfor den bredeste avstanden mellom lysmodulene.



Figur 10.21: UV-verktøy for table-top jordbær. Oppsettet er tilpasset små planter og har derfor en smal avstand mellom lysmodulene.



Figur 10.22: UV-verktøy for jordbærplanter som vokser i kasser hengende fra taket. Oppsettet er modifisert for bred avstand mellom lys og plante.



Figur 10.23: UV-verktøy for jordbærplanter som vokser i kasser hengende fra taket. Oppsettet er smalt modifisert for bestråling av små planter.



Figur 10.24: Illustrasjon av UV-verktøy. Løfteplattformen, bestående av en konstruksjon som bærer løftesøylene, har innfestingspunkter som festes til hurtigfestet. Rammekonstruksjonen som bærer lysmodulene er videre festet til løfteplattformen via friksjonskoblinger.



Figur 10.25: UV-verktøy for agurkkulturer påmontert veksthusrobot. Roboten beveger seg på skinner.



Figur 10.26: UV-verktøy for agurkkulturer med lysmoduler påmontert veksthusrobot.

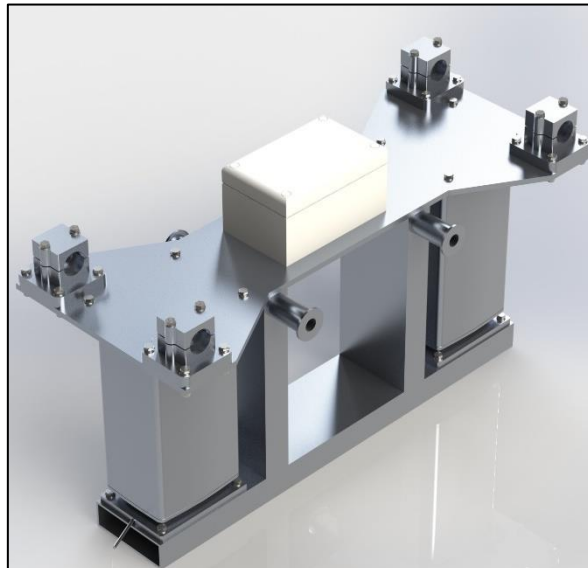


Figur 10.27: UV-verktøy for agurkkulturer montert til veksthusrobot via hurtigfestet.

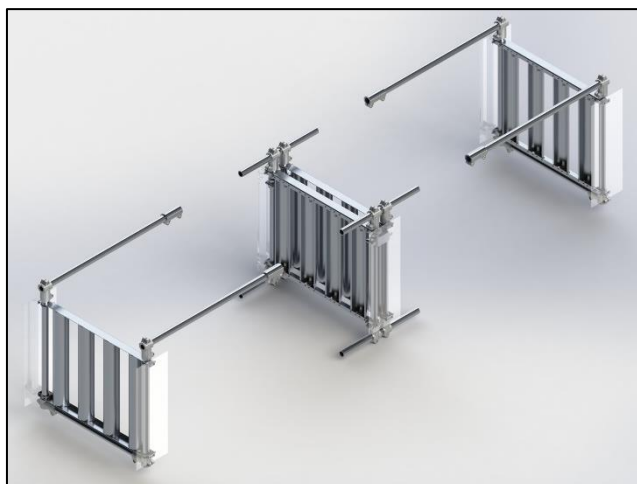
## 10.2.2 DESIGN AV HOVEDELEMENTER



Figur 10.28: Lysmodul med transparente beskyttelsesplater av polykarbonat festet til hver ende. Lysmodulen har påmonterte reflektorer for hvert av de fire lysstoffrørene. Lysrørholderne har kapslingsgrad IP67. Lysstoffrørenes ballast er plassert i egne innkapslinger.



Figur 10.29: Løfteplattform for høydejustering av UV-verktøy for jordbærkulturer. Konstruksjonen består av rektangulærprofiler, to løftesøyler, innfestingspunkter for hurtigfestet og friksjonskoblinger for fastspenning av rammen som bærer lysmodulene. Koblingsboksen er kun for illustrasjon.



Figur 10.30: Rammekonstruksjonen til UV-verktøy for jordbærkulturer. Lysmoduler er inkludert i figuren. Aluminiumrørene kobles sammen via friksjonskoblingene



Figur 10.31: Rammen til UV-verktøy for agurk-kulturer er illustrert i senter. Hurtigfestet er i bunn og lysmoduler øverst.

### 10.2.3 KOMPONENTER



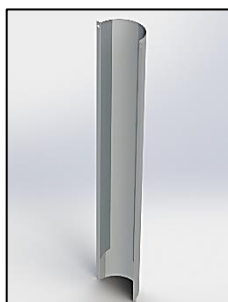
Figur 10.32: Illustrasjon av lysstoffrør med påmonterte lysrørholdere.



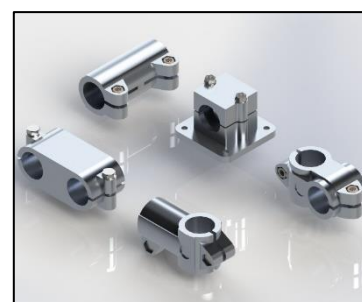
Figur 10.33: Eksplosjonsfigur av lysmodul.



Figur 10.34: Illustrasjon av lysrørholder.



Figur 10.35: Illustrasjon av reflektor.

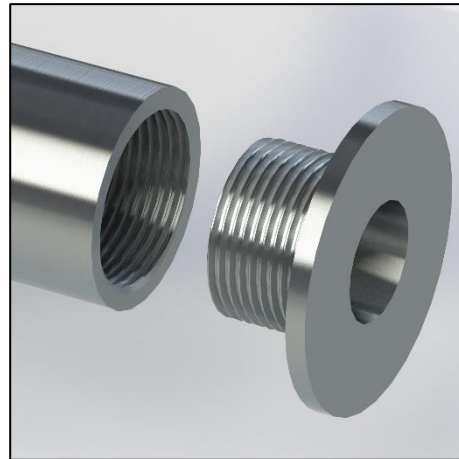


Figur 10.36: Friksjonskoblinger benyttet for sammenkobling av rammekonstruksjonen for UV-verktøyene. CAD:Rose+Krieger

## 10.2.4 ILLUSTRASJON AV FUNKSJONER



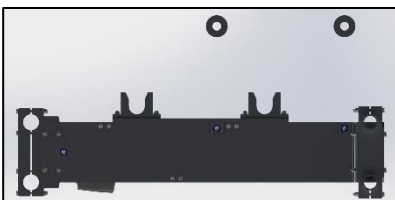
Figur 10.37: Faghakekoblingene med fastmontert verktøydel. Utformingen tilrettelegger for selvsentrering og låses fast med låsebolt. Fastlåsing kan i fremtiden automatiseres ved bruk av aktuatorer eller solenoider.



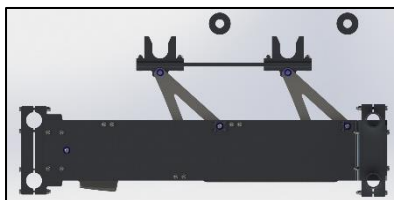
Figur 10.38: På enden av rørene som utgjør verktøydelen av hurtigkoblingen vil det skrues fast endekopper. Disse sørger for fastholdning sideveis og har en konisk utforming som hjelper for den selvsentrerende funksjonen.



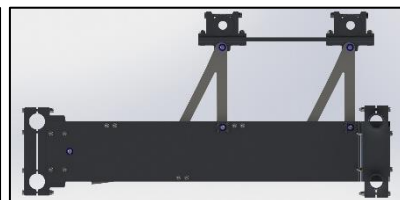
Figur 10.39: Prototype i 1:1 format for å studere løsningen. Bredden er vilkårlig og ikke i henhold til spesifikasjoner.



Figur 10.40: Steg 1 av innfestingsprosedyren. Roboten kjører inn mot verktøyets festepunkter, illustrert som to rør. Hurtigfestet befinner seg i nedre posisjon.



Figur 10.41: Steg 2: hurtigfestet heves, gitt at roboten har posisjonert seg i korrekt posisjon. Høydejusteringsmekanismen drives av en lineær aktuator som befinner seg på innsiden av bærerammen.



Figur 10.42: Steg 3: hurtigfestet befinner seg i øvre posisjon. Rørene som utgjør verktøydelen av hurtigfestet er sentrert i faghakene og fastlåses med bruk av låsebolter. Roboten kan deretter kjøre tilbake og senke mekanismen.

## 11. PRODUKSJONSKOSTNADER

*Dette kapitlet betrakter kostnadene tilknyttet produksjon av prototyper og småskala serieproduksjon. Kostnadskalkylene presenterer et grovt estimat for å danne et bilde av de potensielle utgiftene. Dette er en viktig post i en produktutviklingsprosess, da god planlegging reduserer den økonomiske risikoen.*

For estimering av kostnader tilknyttet prosjektet ble det tatt kontakt med aktuelle leverandører og fagpersoner. Produksjons- og maskineringskostnader ble estimert i samarbeid med overingeniør Gunnar Torp fra verkstedet på NMBU. Tekniske tegninger ble laget og sendt til produksjonssjef Kristian Jakobsen fra Gnist Industriservice AS for priser tilknyttet skjæring av alle delene. Priskataloger fra Norsk Stål AS og Astrup AS ble benyttet for grovestimering av materialkostnader, i tillegg til kontakt med produksjef Mikael Nielsen fra Tibnor AS. Utgifter for innkjøpte ferdigkomponenter som eksempelvis elektriske motorer, refleksjonsmateriale og friksjonsklemmer ble innhentet fra de aktuelle leverandørene.

Generelt sett er enhetsprisen ved prototyping høyere enn ved serieproduksjon. Dette er en naturlig konsekvens av engangsinnkjøp, produksjonsmetoder og arbeidstimer tilknyttet prototyping. Metoder for sammenføring og produksjon av en prototype gir nokså frie tøyler, da det som regel ikke produseres mer enn én enhet.

Dersom de aktuelle komponentene skulle serieproduseres ville engangskostnadene blitt fordelt på antallet enheter og enhetsprisen ville dermed blitt lavere. For produktene utviklet i dette masterprosjektet ble det antatt at det ikke vil selges store antall, da det gjenstår kvalitetssikrende arbeid som eksempelvis testing før produktene kan selges kommersielt. Dette begrenser potensielle produksjonsmetoder som er egnet for serieproduksjon og dermed utformingen av enkelte komponenter. Det ble likevel antatt lavere kostnader forbundet med innkjøp av store kvantum og ved produksjon av mer enn én enhet. Dette som var realistisk å se for seg i denne sammenheng. Basert på samtalene med fagpersonene ville kostandene tilknyttet produksjon av to eller flere enheter gått betraktelig ned, sammenliknet med produksjon av kun én enhet.

De følgende kostnadskalkylene baserer seg på estimer og presenterer kun hovedpostene. Prisene ble innhentet i tidsrommet 01.03.18-01.05.18. Detaljerte kalkyler finnes i vedlegg C.

### 11.1 KOSTNADSKALKYLE FOR PROTOTYPE

#### **Kostnadskalkyle for prototype, verktøyinnfestingssystem**

*Tabell 11.1: Sammendrag med delsummer fra estimert kostnadskalkyle for prototype, verktøyinnfestingssystem.*

Hovedpost	Timer	Pris, NOK	Sum, NOK
Konseptutvikling	900	550	495 000
Arbeidskostnader, prototyping	-	-	13 223
Material- og komponentkostnad	-	-	17 013
<b>Totalkostnad for prototype, verktøyinnfestingssystem</b>			<b>525 236</b>

### Kostnadskalkyle for prototype, UV-verktøy, jordbærkultur

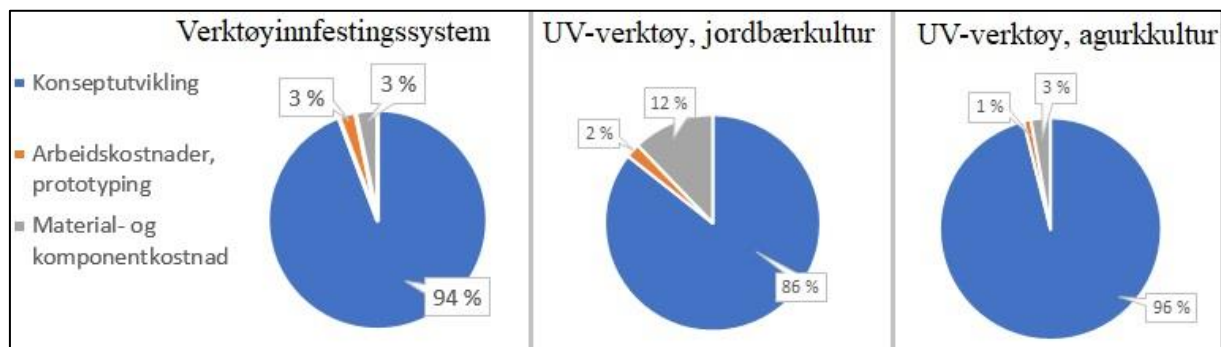
Tabell 11.2: Sammendrag med delsummer fra estimert kostnadskalkyle for prototype, UV-verktøy for jordbærkulturer.

Hovedpost	Timer	Pris, NOK	Sum, NOK
Konseptutvikling	450	550	247 500
Arbeidskostnader, prototyping	-	-	6 170
Material- og komponentkostnad	-	-	36 840
<b>Totalt kostnad for prototype, UV-verktøy (jordbær)</b>			<b>290 510</b>

### Kostnadskalkyle for prototype, UV-verktøy, agurkkultur

Tabell 11.3: Sammendrag med delsummer fra estimert kostnadskalkyle for prototype, UV-verktøy for agurkkulturer

Hovedpost	Timer	Pris, NOK	Sum, NOK
Konseptutvikling	450	550	247 500
Arbeidskostnader, prototyping	-	-	2 790
Material- og komponentkostnad	-	-	7 315
<b>Totalt kostnad for prototype, UV-verktøy (agurk)</b>			<b>257 605</b>



Figur 11.1: Sektordiagrammene illustrerer grovinndelingen av kostnadene for prototyping av de tre produktene, angitt per enhet. Det observeres at utviklingskostnadene utgjør den absolutt største andelen. Grunnet et stort antall komponenter på UV-verktøy for jordbær, har denne nokså høye materialkostnader.

## 11.2 KOSTNADSKALKYLE FOR SMÅSKALA SERIEPRODUKSJON, UV-VERKTØY

For den småskala serieproduksjonen ble det antatt maksimalt 30 produserte enheter. Det ble tatt utgangspunkt i de samme produksjonsmetodene, da antallet enheter fortsatt er nokså lavt. Ved større serieproduksjon kunne det blitt vurdert andre produksjonsmetoder som eksempelvis støpning for å redusere enhetskostnadene. Kalkylene omfattet kun UV-verktøyene og ikke verktøyinnfestingen. Grunnen for dette var at sistnevnte er på et prototypet stadium og må testes videre før eventuell produksjon, mens UV-verktøyene mest sannsynlig kan benyttes slik de er.

De følgende kostnadskalkylene baserer seg på estimater og presenterer kun hovedpostene. Prisene ble innhentet i tidsrommet 01.03.18-01.05.18. Detaljerte kalkyler finnes i vedlegg C.



### Kostnadskalkyle for småskala serieproduksjon, UV-verktøy, jordbærkultur

Tabell 11.4: Sammendrag med delsummer fra estimert kostnadskalkyle for småskala serieproduksjon av UV-verktøy for jordbærkulturer.

Hovedpost	Timer	Pris, NOK	Sum, NOK
Konseptutvikling	450	550	247 500
Arbeidskostnader, per enhet	-	-	5 245
Material- og komponentkostnad, per enhet	-	-	29 296
<b>Totalkostnad, første enhet, UV-verktøy (jordbær)</b>			<b>282 041</b>

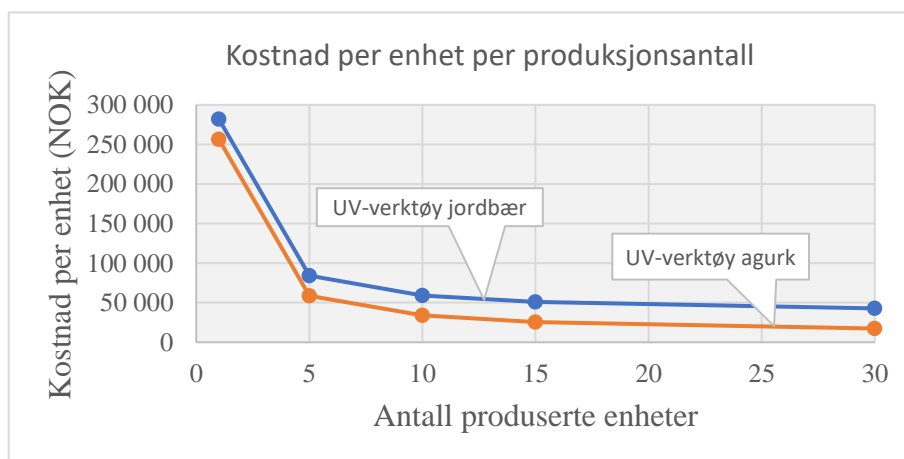
### Kostnadskalkyle for småskala serieproduksjon, UV-verktøy, agurkkultur

Tabell 11.5: Sammendrag med delsummer fra estimert kostnadskalkyle for småskala serieproduksjon av UV-verktøy for agurkkulturer.

Hovedpost	Timer	Pris, NOK	Sum, NOK
Konseptutvikling	450	550	247 500
Arbeidskostnader, per enhet	-	-	2 060
Material- og komponentkostnad, per enhet	-	-	7 033
<b>Totalkostnad, første enhet, UV-verktøy (agurk)</b>			<b>256 593</b>

Tabell 11.6: Kostnad per enhet dersom småskala serieproduksjon på 5,10, 15 eller 30 enheter.

Kostnad	Antall produserte enheter				
	1	5	10	15	30
<b>UV-verktøy jordbær</b>					
Utviklingskostnader	247 500	247 500	247 500	247 500	247 500
Enhetskostnader	34 540	172 705	345 400	518 100	1 036 200
<b>Kostnad per enhet</b>	<b>282 040</b>	<b>84 041</b>	<b>59 290</b>	<b>51 040</b>	<b>42 790</b>
<b>UV-verktøy agurk</b>					
Utviklingskostnader	247 500	247 500	247 500	247 500	247 500
Enhetskostnader	9 093	45 465	90 930	136 395	272 790
<b>Kostnad per enhet</b>	<b>256 593</b>	<b>58 593</b>	<b>33 843</b>	<b>25 593</b>	<b>17 343</b>



Figur 11.2: Prisutvikling per enhet dersom antallet produserte enheter øker.

## 12. PROSESSEVALUERING OG DISKUSJON

*Dette kapittelet tar for seg evaluering og diskusjon av konseptutviklingsarbeidet og foreslår spesifikke forbedringspotensialer. Videre diskuteres forholdene rundt arbeidet ved å betrakte design, produksjon og kostnader.*

### 12.1 KONSEPTUTVIKLINGSARBEIDET OG FORBEDRINGSPOTENSIALER

Utviklingsarbeidet har i stor grad vært avhengig av den eksisterende robotplattformen og de tilhørende kapasitetene. Derfor ble det innledningsvis brukt tid til å opparbeide seg en helhetlig forståelse av tidligere arbeid og eksisterende funksjoner. Den innledende møtevirksomheten, samt oppstartsturen til Brasil, var av stor verdi for å få et innblikk i tidligere erfaringer, og hvilke fokusområder som burde prioriteres. Den kontinuerlige kontakten med de andre masterstudentene og eksterne har vist seg svært nyttig i form av identifisering og verifisering av essensielle faktorer under utviklingen. Dette gjenspeiles blant annet gjennom jevnlig veiledning fra forsker Aruppillai Suthaparan, praktiske innspill fra produsenter, møter med Saga Robotics og rådføring med faglige ansatte ved NMBU. Fokus på en integrert produktutviklingsprosess (IPD) har i så måte vært verdifullt da prosjektet har berørt nye og ukjente fagfelt.

Etter utarbeidelse av en grundig produktspesifikasjon ble det brukt lang tid på generering av konsepter. Dette resulterte i en omfattende mengde løsningsforslag, hvorav kun et utvalg er presentert i denne rapporten. De ulike konseptalternativene ble systematisk utviklet, til dels ved å benytte Osbournes huskeliste (SCAMPERR) og delvis ved betraktning av eksisterende løsninger for inspirasjon. Utviklingsprosessen har vært utfordrende og det har tidvis vært vanskelig å tilfredsstillende de ulike ønsker som har kommet frem. Noe av grunnen til dette er knyttet til usikkerheten om hva som er tiltenkte fremtidige verktøy og hvilke kapasiteter som vil være nødvendig i fremtiden. For å løse dette har vi derfor gjort antagelser og satt begrensninger, noe som har resultert i løsningsforslag vi mener tilfredsstillende mange ønskelige faktorer. Verktøyinnfestingen er eksempelvis dimensjonert for lette verktøy og det ble gjort antagelser om at tunge jordbearbeidingsredskap ikke er prioritert for nåværende robotplattform.

Rangering av viktige produktegenskaper og løsningsalternativer ble hovedsakelig gjort av undertegnede, basert på opparbeidet kunnskap, men også med innspill fra potensielle kunder og Saga Robotics. Rangeringen ble systematisert ved bruk av Pughs metode og baserer seg derfor ikke på vitenskapelig funn eller forsøk.

Utrednings- og utviklingsprosessen har utartet seg med en oppbygning som illustrert i prosess-trinnene i kapittel 3.5. Iterasjonsprosesser som omhandler endringer i design har vært nødvendig ettersom ferdigkomponenter har blitt valgt. Det var ønskelig å ferdigstille en prototype innen tidsrammen for prosjektet, men dette ble begrenset av tidsmessige årsaker. Det har derfor ikke blitt utført forsøk for verifisering og testing av funksjonene til produktene.

Konseptutviklingsarbeidet har vært en god læringsprosess og i etterkant påpekes følgende forbedringspotensialer:

- Det ble utført forsøk for å kartlegge den innstrålte effekten fra UV-lysmodule. Dette ble gjennomført for å identifisere optimal utforming på selve lysmodulen. Forsøkene burde,

som planlagt, blitt gjennomført tidligere i prosessen da enkelte designaktiviteter ble forsinket som følge av tilgang på forsøkslokaler. Metoden ble kvalitetssikret gjennom veiledning fra Aruppillai Suthaparan og utførelse av forsøkene ble gjort med grundighet. Innhentet data ble derfor ansett som troverdig, men det burde blitt utført et mer omfattende forsøk for å teste flere variabler. På den måten kunne utformingen blitt optimalisert i større grad enn det den ble. Dataene dannet ikke grunnlag for å trekke en vitenskapelig konklusjon, men ga derimot en god pekepinn på hva som kan være ønskelig utforming.

- På grunn av oppgavens omfang og tidsrammen for prosjektet ble det valgt å ikke gjennomføre analyser for å studere den dynamiske oppførselen til systemet.
- Driftssikkerhet og fremtidig autonomt verktøybytte ble angitt som høyt vektlagte produkttegenskaper for verktøyinnfestingen. Basert på arbeidet kan ikke dette garanteres med sikkerhet, da det burde ha blitt utført tester for å kvalitetssikre disse egenskapene.
- Pris er rangert som en viktig faktor for UV-verktøyene og det kunne blitt sammenliknet kostnader tilknyttet konkurrerende bekjempelsesmetoder for å se på konkurransedyktighet.
- Eksisterende forskning benyttet som teoretisk grunnlag for UV-bestråling og effekten dette har på planter, ble ansett som troverdig. Vi har tilegnet oss en bred og grunnleggende kunnskap som ikke kommer frem i rapporten, men som har vært nyttig i arbeidet. Selv om hovedfokus i oppgaven var det mekaniske, kunne det blitt beskrevet mer inngående rundt det plantebiologiske og bestrålingsmetoder for bekjempelse av plantesykdommer.

## 12.2 DESIGNREVISJON, PRODUKSJON OG KOSTNADSREDUKSJON

Dimensjoneringen har basert seg på forenklete modeller og gikk ut på undersøkelser av de mest kritiske områdene for antatte belastningsscenarioer. Beregningene er kvalitetssikret ved sammenlikning av datasimulering mot håndberegning, bruk av standarder og i form av veiledning fra ansatte ved NMBU. Antatte statiske belastningssituasjoner ga svært lave opptredende spenninger, og selv med bruk av sikkerhetsfaktorer for å ta hensyn til potensielle støt og dynamiske belastninger, var disse spenningsene godt innenfor de tillatte. Det var derfor unødvendig å gjøre endringer i design som følge av beregningene.

Verktøyinnfestingssystemet ble utformet så kompakt som mulig med stort fokus på besparelse av vekt. Mange komponenter er platebasert og i så måte produksjonsvennlige for prototyping. Det var vanskelig å forutsi grad av nøyaktighet for posisjonering av roboten. Derfor kan det ikke med sikkerhet hevdes at hurtigfestets selvsentrerende utforming er tilstrekkelig for fremtidig autonomt verktøybytte. Dette bør i så måte verifiseres gjennom testing.

UV-verktøyene har tatt utgangspunkt i bruk av lysstoffrør da dette ble anbefalt av fagpersoner. Rammekonstruksjonen for UV-verktøy som benyttes på jordbærkulturer er nokså stor, men antas samtidig å ha god funksjonalitet da designet ble bestemt i samarbeid med kompetente fagpersoner. Verktøyene består av komponenter som har god kapslingsgrad og er tilrettelagt for at ledninger kan føres i rørene som utgjør rammen. Samtidig som verktøyene er designet for å tåle miljømessige påkjenninger, er de preget av enkelhet, noe som ble identifisert som en viktig produkttegenskap.

Følgende punkter påpeker forbedringspotensialer innen design, produksjon og kostnader:

- Verktøyinnfestingen baserer seg på mange platebaserte komponenter som med fordel kan redesignes for raskere sammenstilling. Dette krever andre produksjonsmetoder.
- Løftemekanismen som hever hurtigfestet består av rustfritt stål, men andre materialer bør også vurderes for vektbesparelse, på grunn av de lave påkjenningene. Ved bruk av aluminium reduseres eksempelvis behovet for det galvaniske skillet.
- Produktspesifikasjonen tar utgangspunkt i antatte belastninger og dersom verktøyinnfestingssystemet i fremtiden skal oppskaleres til tyngre verktøy, må systemet dimensjoneres på nytt.
- Verktøyinnfestingen er designet for å oppta så lite plass som mulig innenfor rammekonstruksjonen på Thorvald. Dersom det ikke er tilstrekkelig plass for verktøy kan bredden til roboten økes. Verktøyinnfestingen følger robotens breddekonfigurasjon. Økning av robotens lengde kan gi økt løftehøyde ved modifisering av hevemekanismen.
- Robotens posisjoneringsnøyaktighet ved verktøybytte foreløpig er ukjent, og det er derfor vanskelig å anslå graden av selvsentrering på hurtigfestet. Dersom posisjoneringsnøyaktigheten er utilfredsstillende må utformingen av fanghakene modifiseres slik at de gir bedre selvsentrering. Det samme gjelder endekoppene som er plassert på enden av aluminiumrørene.
- Det kan vurderes pneumatisk eller hydraulisk aktivering i stedet for elektrisk. Det ble tatt utgangspunkt i elektrisitet grunnet eksisterende batterier på Thorvald. Dersom kontinuerlig aktivering viser seg ugunstig for de elektriske aktuatorene, bør nevnte forslag undersøkes.
- For å redusere vekt på UV-verktøy kan ikke-metalliske materialer som eksempelvis karbonfiber vurderes. Dette gjelder hovedsakelig rammen som omslutter lysmodulen. Det må i så fall kontrolleres at disse materialene er UV-bestandige.
- Høydejusteringsplattformen for UV-verktøy tiltenkt jordbærkulturer er stor og medfører høy vekt. Det var fokus på utvikling av en stabil mekanisme som skulle tåle dynamisk belastning. Løsningen kan revurderes for å lage en mer kompakt og lett plattform.
- Det ble ikke implementert en mekanisk beskyttelse på fremsiden av lysmodulen. Dersom det ved tester viser seg å være fornuftig å skjerme lysstoffrørene, kan dette lages.
- Beregnede deformasjoner i aluminiumrammen til UV-verktøy for jordbærkulturer er svært lav. En dynamisk lastsituasjon kan potensielt føre til større nedbøyning. Det kan i så fall implementeres avstivere i konstruksjonen.
- Et behov for økt batterikapasitet kan oppstå og det må i så fall designes innkapslinger for batteriene. Dette var en begrensning for oppgaven, og ble derfor ikke implementert.
- Reflektorutformingen kan revurderes for å optimere ønsket refleksjon. Dette kan eksempelvis gjøres ved flere forsøk eller ved matematisk modellering og simulering.
- Høydejusteringsmekanismen i verktøyinnfestingen kan være overflødig på UV-verktøy for jordbærkulturer da verktøyet har egen høydejustering. Det kan derfor utvikles et statisk festesystem innenfor bærerammen uten aktuatorer. Dette vil redusere prisen betraktelig.
- Ved produksjon av et større antall produkter kan enkelte deler støpes. Dette vil mest sannsynlig redusere fremstillingstid og kostnader.
- Kostnadskalkylene presenterer kun et estimat. Ved kommersialisering av produktene må det utføres en mer nøyaktig kostnadsundersøkelse.

## 13. KONKLUSJON

*Dette kapittelet søker å konkludere prosjektarbeidet. Konklusjonen knyttes til grad av måloppnåelse for prosjektmål, produktmål og testmål. Videre presenteres resultatene punktvis, etterfulgt av anbefalinger til videre arbeid.*

Masterprosjektet har resultert i designet av et mekanisk verktøyinnfestingssystem og et multifunksjonelt UV-verktøy for bestråling av plantekulturene jordbær og agurk, tilpasset Thorvald II plattformen. Produktene er klare for tidligrealisering gjennom produksjon av prototyper som videre kan være utgangspunkt for testing og videreutvikling. Arbeidsprosessen, så vel som utrednings- og utviklingsarbeidet, er grundig dokumentert i rapporten.

Forskjellige løsningsalternativer har blitt evaluert, og valg har blitt utført i henhold til ønskede produkttegnegenskaper som lav vekt, lav kompleksitet, modularitet, robusthet og tilretteleggelse for fremtidige autonome funksjoner. Forsøk har blitt utført for å studere UV-strålingens effektfordeling, hvor resultatene ble benyttet til å avgjøre spesifikke fysiske mål på UV-verktøyet.

Utvalgte komponenter har blitt dimensjonert og kontrollert for belastninger i henhold til produktspesifikasjonen. Konstruksjonene ble ansett som svært driftssikre for de antatte statiske belastningssituasjonene, men de bør i fremtiden kontrolleres for dynamiske påkjenninger. De endelige løsningsforslagene har blitt beskrevet gjennom funksjon, materialvalg og produksjon. Alle endelige produkt er 3D modellert i detalj og tekniske tegninger er utarbeidet og målsatt. Verktøyinnfestingssystemet kan justeres i høyde, det gir god plass for potensielle verktøy og det tilrettelegger for fremtidig automatisk verktøybytte ved at det lettvingt kan implementeres løsninger for automatisk fastlåsing. UV-verktøyet kan justeres for individuelle produksjonsforhold og består av en rørformet ramme med påmonterte lysmoduler som bestråler plantekulturene fra siden. Hovedmålene for prosjektet ble i så måte ansett som oppnådd.

### 13.1 RESULTATER

#### **Verktøyinnfestingssystem**

- Verktøyinnfestingssystemet danner en felles monteringsplattform for lettvekts verktøy tilpasset Thorvald II plattformen. Selve hurtigfestet kan benyttes på tvers av ulike robotmodifikasjoner. Systemet innebærer en høydejusteringsmekanisme som kan løfte verktøy med vekt 200 kg i en høyde på minimum 200 mm opp fra underlaget. Innfestingspunktene følger bredden til roboten, og med utgangspunkt i robotens standard-modifikasjon gir systemet rom for en verktøybredde på 1134 mm innenfor robotens ramme.
- Systemet består av totalt 58 deler (én side, ikke inkludert bolter, muttere skiver, foringer eller seegerringer), med 1 stk. lineær aktuator fra Linak AS per side. Konstruksjonsmaterialer er aluminium (EN-AW 5754, EN-AW 6063, EN-AW 6082) og rustfritt stål (EN 1.4301). Hele systemet, med festesystem på begge sider, veier totalt 24,91 kg.
- Estimert kostnad for prototype, inkludert konseptutviklingsarbeid, er 525 236 NOK. Sett bort ifra utviklingskostnader er kostnadene estimert til 30 246 NOK.

### UV-verktøy

- Bestrålingsverktøyet er modulerbart og kan tilpasses både agurk- og jordbærkulturer. Rammekonstruksjonen er preget av lav vekt da den består av aluminiumrør (EN AW-6063) koblet sammen med ferdigproduserte friksjonsklemmer, og den står i stil med den rørbaserte rammen til Thorvald. Lysmoduler kobles til rammekonstruksjonen på verktøyet med samme type friksjonskoblinger.
- Lysmodulen veier 3,2 kg, består av 4 lysstoffrør (60W, 600 mm, UV-C 254 nm) og er omsluttet av en egen aluminiumramme. Lysrørholderne har kapslingsgrad IP67. Reflektorer laget av MIRO 9 kan monteres. Beskyttelsesplater av polykarbonat (Lexan Exell D, F2500) monteres på enden for blokkering av UV-C stråler, slik at mennesker ikke eksponeres for strålingen. Ved bestråling vil lysrørene være orientert vertikalt. Dette er gunstig med tanke på at effekttoppen treffer alle planter ettersom roboten beveger seg.
- Jordbærversjonen veier 39 kg og består av egen høydejusteringsplattform (20 kg) med 2 stk. løftesøyler fra Linak AS. Rammekonstruksjonen bærer totalt 4 lysmoduler (16 lysstoffrør) med reflektorer. Lysmodulene kan justeres individuelt for tilpasning av plantestørrelse, produksjonsforhold. Verktøyet er tilpasset standardversjonen av Thorvald med smal modifikasjon, og tilrettelegger for god melduggbekjempelse da UV-bestrålingen treffer plantekulturen fra siden.
- Agurkversjonen veier totalt 14,4 kg og er ikke designet for høydejustering. Det benyttes totalt 2 lysmoduler (8 lysstoffrør) uten reflektorer. Rammen kan justeres i lengde og høyde for individuell tilpasning til produksjonsforhold. Verktøyet befinner seg midt mellom agurkradene og er tilpasset veksthusversjonen av Thorvald som beveger seg på skinner.
- Forsøk utført for kartlegging av innstrålt effekt viste at bruk av reflektorer, var mest gunstig for effektfordelingen. Det ble registrert en effektøkning på 20,94% og 38,3% for henholdsvis 10 cm og 20 cm avstand mellom lysstoffrørene når reflektorer ble benyttet. Det ble valgt å benytte reflektorer på UV-verktøy for jordbærkulturer, men ikke på UV-verktøyet for agurkkulturer. Anbefalt kjørehastighet for behandling av jordbærplanter er 9,8 cm/s, og for agurkplanter 6,2 cm/s.

### 13.2 ANBEFALINGER

Anbefalingene er gitt på grunnlag av opparbeidet kompetanse og kan være pekepinner for hva som burde gjøres ved en eventuell videreføring av prosjektet. Anbefalingene er ikke nødvendige for å ferdigstille produktene i seg selv, men burde likevel betraktes for ferdigstilling av et komplett automatisert system.

- Det kan med fordel gjøres vurderinger om å slå sammen batterikassen med verktøy-innfestingssystemet for plassbesparelse.
- Det bør vurderes automatiske løsninger for låsing av hurtigfestet. Utviklet løsning legger til rette for at det kan implementeres små lineær aktuatorer eller solenoider for aktivering av låsebolten.
- Løftemekanismen som befinner seg på innsiden av bærerammen kan vurderes å produseres i aluminium i stedet for rustfritt stål. Den må i så fall dimensjoneres på nytt.
- Det bør utvikles en funksjon som sørger for automatisk kobling av strøm og signal ved verktøymontering.

- Ved masseproduksjon kan det vurderes redesign av spesifikke komponenter. Brakettene som fester bærerammen til rammekonstruksjonen på Thorvald kan med fordel støpes. Bærerammen kan også støpes ferdig med avstivere.
- Videreutvikling gjennom design av nye tilleggsfunksjoner til verktøyinnfestingssystemet kan vurderes for tilpasning av potensielle nye verktøy. Forslag er gitt i kapittel 8.1.5.
- For UV-verktøyet utviklet for jordbærkulturer kan det vurderes lineære lagre for sideveis justering av lysmodulene, i stedet for dagens løsning som baserer seg på friksjonskoblinger. Lineær lagrene må i så fall kobles til en drivkilde som også holder lysmodulene fast.
- Det bør sees nærmere på bruk av LED teknologi som erstatning for lysstoffrør. Dette er foreløpig begrenset av dagens teknologi og pris, men vil mest sannsynlig være høyaktuelt i fremtiden.
- UV-verktøyene kan potensielt kobles opp mot et overordnet sensorsystem som måler ulike lyskvaliteter fra dagslyset, luftkvalitet og andre essensielle faktorer som påvirker den aktuelle plantekulturen. Dersom Thorvald kan prosessere denne informasjonen kan roboten selv avgjøre korrekte bestrålingsintervaller og bestrålingsdose.
- Det anbefales å utvikle en standard oppbevaringsramme for fremtidige verktøy som legger til rette for effektivt verktøybytte. Thorvald kan i så måte kjøre inn mot oppbevaringsrammen og koble seg til verktøyet eller sette det fra seg.
- Det bør utføres studier som ser nærmere på sensorer for posisjonering av roboten under verktøybytte og drift. For verktøybytte må dette i så fall sees i sammenheng med en potensiell oppbevaringsramme for verktøy. For generell drift bør det velges sensorer som kan regulere UV-verktøyene i forhold til plantestørrelse og produksjonsforhold.
- Dersom vekten av de utviklede produktene blir ansett som for høye, bør det vurderes nye og lette materialer. Det kan for eksempel sees nærmere på bruk av plastbaserte materialer.

### 13.3 VIDERE ARBEID

Videre arbeid tar for seg utviklingstrinn som må fullføres før produktene kan ferdigstilles, og er basert på begrensningene satt for arbeidet. Eventuelle endringer og metoder for å oppnå ønskede produktetegenskaper er også inkludert, selv om de i utgangspunktet ikke var planlagt som en del av oppgaven.

- Utforming av dimensjonering av elektriske kretser og implementering og programmering av aktuatorer og styringssystem. Dette innebærer også vurderinger og beregning tilknyttet batterikapasitet og drift av lysstoffrørene som benytter AC. Det er i så måte nødvendig med en DC-AC omformer. Innkapslingsbokser for elektronikk må også vurderes.
- Testing i reelle produksjonsforhold for å studere den dynamiske oppførselen til produktene, eksempelvis for fleksibilitet i robotens ramme med påmontert verktøyinnfestingssystem. Innhentet data kan benyttes for potensielle endringer eller oppgraderinger.
- Design av batterimoduler dersom det skal implementeres flere batterier i tilknytning til verktøyene.
- Funksjonstesting av hurtigfestet sett i sammenheng med robotens posisjoneringsmuligheter og grad av nøyaktighet.

- Dersom det blir ansett som nødvendig etter testing, kan det utvikles en mekanisk beskyttelse for lysmodulene. Dette kan eksempelvis være et nettingformet beskyttelsesdeksel, slik at bestrålingen ikke begrenses i betydelig grad.
- Det bør utføres flere forsøk for kartlegging av innstrålt effekt fra lysmodul for å optimere ønsket om så jevn fordeling av effekt som mulig. Det kan eksempelvis gjøres forsøk med tre lysstoffrør og 30 cm avstand mellom lysstoffrørene. Andre reflektorutforminger kan også vurderes.
- Dynamiske simuleringer av systemene for å studere svingninger og frekvenser kan være hensiktsmessig for å optimere designet.
- Utvikling av prototyper vil være nødvendig for å kunne gjennomføre tester.
- Det vil være fordelaktig å utarbeide en mer nøyaktig kostnads kalkyle ved ferdigstilling av endelige produkter. Dette kan i så måte sammenliknes med konkurrerende løsninger.



## 14. KILDER

- [1] P. E. Kaland, "Kulturlandskapets historie," *Naturen*, vol. 132, no. 4, pp. 146-164, 2008.
- [2] O. Synnes and S. Øpstad, "Jordpakking, jorda si toleevne, verknad av overskriding," *Grønn kunnskap*, vol. 9, no. 4, pp. 151-159, 2005.
- [3] SSB. (2017, 19.02.2018). *Utslipp av klimagasser*. Available: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/klimagassn/aar-endelige>
- [4] P. J. From and L. Grimstad, "Thorvald II - a Modular and Re-configurable Agricultural Robot," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 4588-4593, 2017.
- [5] TractorData. (09.02.18). *Three-Point Hitch*. Available: <http://www.tractordata.com/articles/technical/threepoint.html>
- [6] Prosjektgruppe(UV-Bær), "Prosjektbeskrivelse: UV-B mot soppsjukdommer i plasttunneler og veksthus (UV-Bær)," p. 10.
- [7] Prosjektgruppe(UV-Bær), "Framdriftsrapport 243732 - UV-B mot soppsjukdommer i plasttunneler og veksthus (UV-Bær)," p. 15.
- [8] 365FarmNet, "Agriculture 4.0 – ensuring connectivity of agricultural equipment," Accessed on: 13.02.18 Available: [http://www.landtechnik-anschlussfahigen.com/Whitepaper\\_Agriculture4.0\\_January2017.pdf](http://www.landtechnik-anschlussfahigen.com/Whitepaper_Agriculture4.0_January2017.pdf)
- [9] G. I. Gundersen and J. Haldal, "Bruk av gjødselressurser i jordbruket 2013. Metodebeskrivelse og resultater fra en utvalgsbasert undersøkelse," in "Rapporter 2015/24," 07.12.2016 2016, Available: <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/artikler-og-publikasjoner/bruk-av-gjodselressurser-i-jordbruket-2013#content>.
- [10] P. A. Aarstad and B. Bjørlo, "Bruk av plantevernmidler i jordbruket i 2014," in "Rapporter 2016," SSB.no2016, Available: <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/artikler-og-publikasjoner/bruk-av-plantevernmidler-i-jordbruket-i-2014#content>.
- [11] Eurostat, "Farm structure statistics," Accessed on: 19.04.18 Available: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Farm\\_structure\\_statistics#Further\\_Eurostat\\_information](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Farm_structure_statistics#Further_Eurostat_information)
- [12] SSB. (2018, 19.04.18). *Jordbruksbedrifter etter storleiken på jordbruksareal i drift og fylke*. Available: <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/statistikker/stjord/aar/2018-03-21?fane=tabell&sort=nummer&tabell=343883>
- [13] SSB. (2018, 19.04.18). *Jordbruksareal per jordbruksbedrift, etter fylke*. Available: <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/statistikker/stjord/aar/2018-03-21?fane=tabell&sort=nummer&tabell=343882>
- [14] A. Suthaparan, K. A. Solhaug, N. Bjugstad, H. R. Gislerød, D. M. Gadoury, and A. Stensvand, "Suppression of Powdery Mildews by UV-B: Application Frequency and Timing, Dose, Reflectance, and Automation," *The American Phytopathological Society*, vol. 100, no. 8, pp. 1643-1650, 2016.
- [15] J. K. Bøe, "Konsept- og produktrealisering. Temahefte 1 og 2: Industriell økologi og produktplanlegging," 2014.
- [16] M. M. Jakobsen, *Produktutvikling*. Oslo: Fortuna Forlag, 2009.
- [17] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product design and development*, 5 ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [18] S. Pugh, *Total design : integrated methods for successful product engineering*. Wokingham: Addison-Wesley, 1991.

- [19] M. K. Demetrikopoulos, M. K. Demetrikopoulos, and J. L. Pecore, *Interplay of Creativity and Giftedness in Science*: SensePublishers : Imprint: SensePublishers, 2016. [Online]. Available.
- [20] P. A. Tipler and G. Mosca, *Physics for Scientists and Engineers*, 6 ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2008.
- [21] H. D. Young and R. A. Freedman, *Sears & Zemansky's University Physics, with modern physics*, 14 ed. United Kingdom: Pearson Education Limited, 2016.
- [22] L. Taiz and E. Zeiger, *Plant Physiology*, 4 ed. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc., 2006.
- [23] H. H.J., Sensing by Electromagnetic Radiation. In: Heege H. (eds) *Precision in Crop Farming*, 1 ed. Netherlands: Springer, Dordrecht, 2013. [Online]. Available.
- [24] S. E. Technologies. (2004, 23.02.18). *ISO 21348 Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories*. Available: [http://www.spacewx.com/pdf/SET\\_21348\\_2004.pdf](http://www.spacewx.com/pdf/SET_21348_2004.pdf)
- [25] B. Secretan-Lauby, "UV Radiation," in *Encyclopedia of Cancer*, M. Schwab, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 3866-3869.
- [26] S. I. Ahmad, *Ultraviolet Light in Human Health, Diseases and Environment*: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2017. [Online]. Available.
- [27] G. M. Nawkar, P. Maibam, J. H. Park, Vaidurya Pratap Sahi, S. Y. Lee, and C. H. Kang, "UV-Induced Cell Death in Plants " *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 14, no. 1, pp. 1608-1628, 2013.
- [28] A. Brazaitytė *et al.*, "Effect of supplemental UV-A irradiation in solid-state lighting on the growth and phytochemical content of microgreens," *International Agrophysics*, vol. 29, no. 1, pp. 13-22, 2015.
- [29] P. Sansoni, P. Sansoni, L. Mercatelli, and A. Farini, *Sustainable Indoor Lighting*: Springer London : Imprint: Springer, 2015. [Online]. Available.
- [30] P. Heyerdahl, "FYS230. Elektroteknikk. Laboratorieøvelse nr. 7 - Lysrør," 2016.
- [31] A. Suthaparan, R. Pathak, K. A. Solhaug, and H. R. Gislerød, "Wavelength dependent recovery of UV-mediated damage: Tying up the loose ends of optical based powdery mildew management " *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*, vol. 178, pp. 631-640, 2018.
- [32] A. Hughes and B. Drury, *Electric Motors and Drives - Fundamentals Types and Applications*, 4 ed. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- [33] T. Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*, 6th ed. ed. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall, 2006.
- [34] P. Sandin, *Robot mechanisms and mechanical devices illustrated*. McGraw Hill Professional, 2003.
- [35] A. Almar-Næss, *Metalliske materialer: struktur og egenskaper*, 4 ed. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag, 2003.
- [36] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 9. ed. Pearson Education South Asia Pte Ltd, 2013.
- [37] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering : an introduction*, 7 ed. New York: Wiley, 2007.
- [38] H. Johansen. (2010, 11.04.18). *Materiallære - metaller - for ingeniører: Krystall struktur*. Available: [http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/2.%20struktur/Materiallaere-IM-2-Krystall%20struktur%20\(IM+TDL\)-10.pdf](http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/2.%20struktur/Materiallaere-IM-2-Krystall%20struktur%20(IM+TDL)-10.pdf)
- [39] D. R. Askeland, P. P. Fulay, and W. J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*, 6 ed. Cengage Learning, 2010.
- [40] P. K. Larsen, *Dimensjonering av stålkonstruksjoner*, 2 ed. Akademika forlag, 2013.
- [41] C. Schmitz, *Handbook of Aluminium Recycling*. Tyskland: Vulkan Verlag, 2006.

- [42] R. G. Corneliussen, Korrosjon og korrosjonsvern, materialteknikk, 3 ed. Oslo: Universitetsforlaget, 1984. [Online]. Available.
- [43] J. S. Aspen, *Maskindeler 1*. Oslo: Universitetsforlaget, 1968.
- [44] G. Terjesen, *Grunnleggende om utmatting i metaller*. Ås: Realtek, NMBU, 2017.
- [45] H. Johansen. (2012, 12.04.18). *Styrkeberegning: sveiseforbindelser - statistisk*. Available: [http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Skriftserien/SB\\_Sveiseforbindelser-Statisk\\_2012\\_nr.3.pdf](http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Skriftserien/SB_Sveiseforbindelser-Statisk_2012_nr.3.pdf)
- [46] *ISO 730:2009. Agricultural wheeled tractors -- Rear-mounted three-point linkage -- Categories 1N, 1, 2N, 2, 3N, 3, 4N and 4*, 2009.
- [47] *ISO 8759-1:1998. Agricultural wheeled tractors -- Front-mounted equipment -- Part 1: Power take-off and three-point linkage*, 1998.
- [48] A. K. Srivastava, C. E. Goering, R. P. Rohrbach, and D. R. Buckmaster, *Engineering Principles of Agricultural Machines 2ed*. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 2006.
- [49] B. Bjerga, *Landbruksmaskiner*. Oslo: Landbruksforlaget, 1995.
- [50] H. Voss. (2018, 14.04.18). *HMV Hurtigkobling*. Available: <http://hmr-voss.no/>
- [51] LyngTriangel. (2018, 15.04.18). Available: <https://lyng-triangel.no/>
- [52] Ålø. (2018, 16.03.2018). *Products & Brands*. Available: <http://www.alo.se/Intl/Pages/productsoverview.ept>
- [53] SMP-Parts-AS. (2018, 15.04.18). Available: <http://www.smpparts.com/no>
- [54] G. AS. (2018, 15.04.18). Available: <http://www.gjerstad.com/>
- [55] Lovdata. (2014, 20.04.2018). *Forskrift om maskiner*. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-05-20-544>
- [56] S. Norge. (2018, 20.04.2018). *NEK 400:2014*. Available: [http://www.standard.no/fagomrader/elektrofag/elektro/nek-400\\_2014/](http://www.standard.no/fagomrader/elektrofag/elektro/nek-400_2014/)
- [57] J. E. Ormbostad, *FEL Montørhåndboka, NEK400:2006*. Elforlaget, 2006.
- [58] F. Blomberg, "Rammekonstruksjon til autonom landbruksmaskin," Master, Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT), Norges Miljø- og biovitenskapelige Universitet, Ås, 2015.
- [59] Ø. T. Sund, "Chassis Modular Design and Electrical Layout for the NMBU Agricultural Robot Project " Master, Mathematical Sciences and Technology Norwegian University of Life Sciences, Ås, 2016.
- [60] Agrointelli. (2018, 12.04.2018). *ROBOTTI a powerful tool to increase agricultural productivity*. Available: <http://www.agrointelli.com/robotti-diesel.html#rob.diesel>
- [61] NaoTechnologies. (12.04.2018). *LARGE-SCALE VEGETABLE WEEDING ROBOT*. Available: <https://www.nao-technologies.com/en/agricultural-equipment/large-scale-vegetable-weeding-robot/>
- [62] Carre. (12.04.2018). *ANATIS*. Available: <http://www.carre.fr/en/crop-maintenance/weeding-robot/61-anatis.html>
- [63] CleanLight. (12.04.2018). *CleanLight Horticulture UV crop protection*. Available: <https://cleanlightglastuinbouw.nl/gewasbescherming/?lang=en>
- [64] A. Næss. (2009, 12.04.18). *vannskjæring - teknikk*. Available: [https://snl.no/vannskj%C3%A6ring - teknikk](https://snl.no/vannskj%C3%A6ring_-_teknikk)
- [65] MarineAluminum, *Aluminum in the marine environment*. Haugesund: Marine Aliminum Group, p. 96.
- [66] Linak. (2018, 25.04.2018). *Linear Aktuator LA25*. Available: <http://www.linak.no/produkter/linear-actuators.aspx?product=LA25>
- [67] MeanWell. (2018, 25.04.2018). *100W Railway Single Output DC-DC Converter, RSD-100 series*. Available: <http://www.mouser.com/ds/2/260/RSD-100-SPEC-806255.pdf>

- [68] Roboteq. (2018, 26.04.2018). *SDC2130*. Available: <https://www.roboteq.com/index.php/component/virtuemart/279/sdc2130-detail?Itemid=970>
- [69] RoseKrieger. (25.04.2018). *Profile Technology, BLOCAN*. Available: [https://www.rk-rose-krieger.com/fileadmin/catalogue/profiltechnik/bl\\_aluprofilsystem\\_en.pdf](https://www.rk-rose-krieger.com/fileadmin/catalogue/profiltechnik/bl_aluprofilsystem_en.pdf)
- [70] Linak. (2018, 20.04.2018). *Lifting Column BLI, Data sheet*. Available: <https://cdn.linak.com/-/media/files/data-sheet-source/en/lifting-column-bli-data-sheet-eng.ashx>
- [71] MeanWell. (2018, 20.04.2018). *RSD 300-series*. Available: [https://www.elfadistrelec.no/Web/Downloads/t/ds/rsd-300\\_eng\\_tds.pdf](https://www.elfadistrelec.no/Web/Downloads/t/ds/rsd-300_eng_tds.pdf)
- [72] Astrup. (2018, 20.04.18). *PC*. Available: <http://www.astrup.no/Materialer-Produkter/Materialer/Plast-Standard/PC>
- [73] Tingstad. (01.05.18). *Teknisk informasjon, Kapittel 4, Merking og fasthetsklasser*. Available: [http://www.tingstad.no/upload\\_images/A780CD33521044F59352DF00C91AC1E1.pdf](http://www.tingstad.no/upload_images/A780CD33521044F59352DF00C91AC1E1.pdf)
- [74] G. Dahlvig, S. Christensen, and G. Strømsnes, *Konstruksjonselementer*, 2. utg. ed. (Konstruksjonselement och maskinbyggnad). Ås: Yrkesopplæring, 1991.

### Personlige meddelelser

[75]

Forsker, Aruppillai Suthaparan

Institutt for Plantevitenskap ved Fakultet for Biovitenskap, NMBU

UV-bestråling og effekten dette har på planter

Korrespondanse: muntlig, e-post

[76]

Area Sales Manager Eastern Europe/ Scandinavia, Knut Seeling

ALANOD GmbH & Co. KG

Reflektormateriale, MIRO 9

Korrespondanse: telefon, e-post

[77]

Produktansvarlig, Per Kristian Holøs

Ålø Norge AS

Informasjon om hurtigkoblinger

Korrespondanse: e-post

## 15. VEDLEGG

A: Dimensjonering

B: FEM-analyse

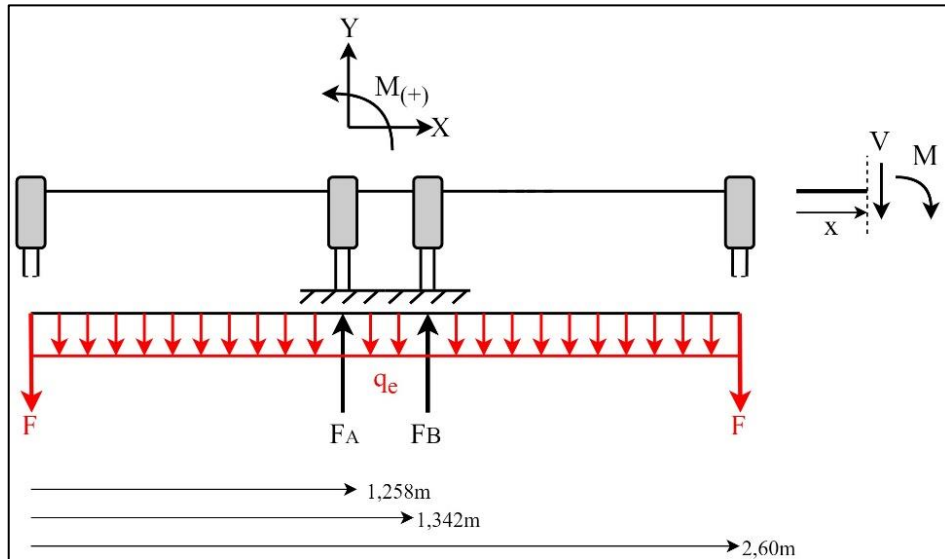
C: Kostnads kalkyle

D: Komponentoversikt

E: Teknisk tegning

## Vedlegg A1

### Statiske krefter, momenter og kontroll av nedbøyning



#### Dimensjonerende vekt:

I dimensjoneringen ble vekten satt til 10 kg. I en to-dimensjonal analyse velges symmetri slik at vekten på 10 kg fordeles på hver av de tversgående rørene. Dette tilsvarer en masse på 5 kg per aluminiumrør.

$$F = \frac{G_{LM}}{2} = \frac{98,10N}{2} = 49,05 N$$

Bjelkeprofil:

$$q_e = 1,22 \frac{kg}{m} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 11,97 \frac{N}{m}$$

#### Opplagringskrefter:

Benytter en likevektsbetraktning og bestemmer krefter i y retning. Positiv retning er opp. Opplagringskreftene er kalt  $F_A$  og  $F_B$ .

$$\sum F_Y = 0 \quad (13)$$

$$-F + F_A + F_B - F + q_e \cdot l = 0$$

$$F_A = F_B$$

$$F_A = F_B = \frac{1}{2} (2 \cdot F + q_e \cdot l) = \frac{1}{2} \left( 2 \cdot 49,05N + 11,97 \frac{N}{m} \cdot 2,6m \right) = \mathbf{64,61N}$$

**Skjærkraft:** Bruker snittmetoden og tar en likevektbetraktning ved ulike x-verdier. Positiv retning er opp.

$$\sum V = 0 \quad (13)$$

$$0 \geq x:$$

$$-F - V = 0$$

$$V = -F$$

$$V = -49,05N$$

$$0 < x < 1,258m:$$

$$-F - q_e \cdot x - V = 0$$

$$V = -F - q_e \cdot x$$

$$V = -49,05N - 11,97 \frac{N}{m} \cdot 1,258m = -64,10N$$

$$0 < x \leq 1,258m:$$

$$-F - q_e \cdot x + F_A - V = 0$$

$$V = -F - q_e \cdot x + F_A$$

$$V = -49,05N - 11,97 \frac{N}{m} \cdot 1,258m + 64,61 = 0,50 N$$

$$1,258m < x < 1,342m:$$

$$-F - q_e \cdot x + F_A - V = 0$$

$$V = -F - q_e \cdot x + F_A$$

$$V = -49,05N - 11,97 \frac{N}{m} \cdot 1,342m + 64,61 = -0,50 N$$

$$1,258m < x \leq 1,342m:$$

$$-F - q_e \cdot x + F_A + F_B - V = 0$$

$$V = -F - q_e \cdot x + F_A + F_B$$

$$V = -49,05N - 11,97 \frac{N}{m} \cdot 1,342m + 64,61 + 64,61 = \mathbf{64,10 N}$$

$$1,342m < x < 2,60m:$$

$$-F - q_e \cdot x + F_A + F_B - V = 0$$

$$V = -F - q_e \cdot x + F_A + F_B$$

$$V = -49,05N - 11,97 \frac{N}{m} \cdot 2,60m + 64,61 + 64,61 = 49,05 N$$

$$1,342m < x \leq 2,60m:$$

$$-F - q_e \cdot x + F_A + F_B - V = 0$$

$$V = -F - q_e \cdot x + F_A + F_B$$

$$V = -49,05N - 11,97 \frac{N}{m} \cdot 2,60m + 64,61 + 64,61 - 49,05N = 0 N$$

**Moment:** Bruker snittmetoden og tar en likevektbetraktning av momenter. Positivt moment er definert med klokken.

$$\sum M = 0 \quad (1)$$

$0 \geq x$ :

$$M = 0$$

$x \leq 1,258m$ :

$$+F \cdot x + q_e \frac{x^2}{2} - M = 0$$

$$M = +F \cdot x + q_e \frac{x^2}{2}$$

$$M = 49,05N \cdot 1,258m + 11,97 \frac{N}{m} \cdot \frac{(1,258m)^2}{2} = 71,17Nm$$

$1,258m < x \leq 1,342m$ :

$$+F \cdot x + q_e \frac{x^2}{2} - F_A(x - 1,258) - M = 0$$

$$M = +F \cdot x + q_e \frac{x^2}{2} - F_A(x - 1,258)$$

$$M = 49,05N \cdot 1,342m + 11,97 \frac{N}{m} \cdot \frac{(1,342m)^2}{2} - 64,61N(1,342m - 1,258m) = 71,17Nm$$

$1,342m < x \leq 2,60m$ :

$$+F \cdot x + q_e \frac{x^2}{2} - F_A(x - 1,258) - F_B(x - 1,342) - M = 0$$

$$M = +F \cdot x + q_e \frac{x^2}{2} - F_A(x - 1,258) - F_B(x - 1,342)$$

$$M = 49,05N \cdot 2,6m + 11,97 \frac{N}{m} \cdot \frac{2,6m^2}{2} - 64,61N(2,6m - 1,258m) - 64,61N(2,6m - 1,342) = 0$$

**Bøyespennning i tverrsnittet:** For å bestemme størst spenning brukes største bøyemoment M, identifisert over, og tverrsnittmodulen W som gir størst avstand fra nøytralaksen.

$$\sigma_b = \frac{M}{W} \quad (14)$$

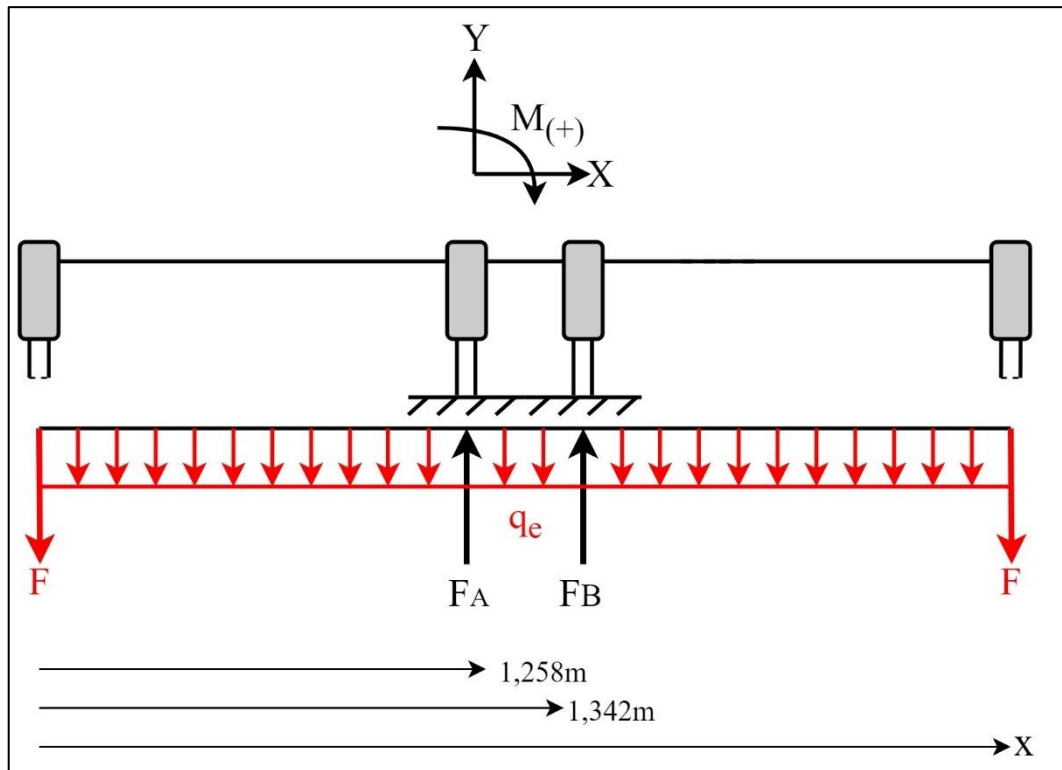
$$\sigma_B = \frac{71,17N \cdot 10^3mm}{3709,59 mm^3} = 19,19 MPa$$

Resultat	Nedbøyning (mm)	Skjærkraft (N)	Moment (Nm)	Spennning (MPa)
Håndberegning	7,74	64,1	71,17	19,19

**Kontroll av nedbøyninger i tverrsnittet:**

Kontroll av nedbøyningen benyttes metoden Macauleys regnemetode for elastisk linje.





**Likningen for den elastiske likningen, gitt av uttrykket [1]:**

$$EIy'' = -M(x) \quad (15)$$

Hvor:

$E$  = Elastisitetsmodulen til materialet

$I$  = Annet arialmoment

$M(x)$  = Bøyemoment ved ulike lengder av  $x$ .

Momentlikningen blir derfor:

$$M(x) = -F\langle x \rangle^1 - \frac{q_e \langle x \rangle^2}{2} + F_A \langle x - 1,258 \rangle^1 + F_B \langle x - 1,342 \rangle^1$$

**Vinkel  $y'$ , gitt av uttrykket (utledet fra formel 15):**

$$EIy' = - \int M(x)$$

Utrykk for vinkel er derfor gitt av:

$$EIy' = \frac{F}{2} \langle x \rangle^2 + \frac{q_e}{6} \langle x \rangle^3 - \frac{F_A}{2} \langle x - 1,258 \rangle^2 - \frac{F_B}{2} \langle x - 1,342 \rangle^2 + C_1$$

**Nedbøyningen  $y$ , gitt av uttrykket (utledet fra formel 15):**

$$EIy = - \iint M(x)$$

Utrykk for nedbøyning er derfor gitt av:

$$EIy = \frac{F}{6} \langle x \rangle^3 + \frac{q_e}{24} \langle x \rangle^4 - \frac{F_A}{6} \langle x - 1,258 \rangle^3 - \frac{F_B}{6} \langle x - 1,342 \rangle^3 + C_1 \cdot x + C_2$$

### Integrasjons konstanter

Bestemmer integrasjonskonstantene  $C_1$  og  $C_2$  med å bruke følgende to randbetingelser.

- Randbetingelse 1: nedbøyningen  $y = 0$  når  $x = 1,258$  m.
- Randbetingelse 2: Nedbøyningen  $y = 0$  når  $x = 1,342$  m.
- Metoden inkluderer ikke ledd som blir null eller negative.

Randbetingelse 1:

$$0 = \frac{49,05}{6} \langle 1,258 \rangle^3 + \frac{11,97}{24} \langle 1,258 \rangle^4 + C_1 1,258 + C_2$$

$$C_2 = -17,524 - 1,258 C_1$$

Randbetingelse 2:

$$0 = \frac{49,05}{6} \langle 1,342 \rangle^3 + \frac{11,97}{24} \langle 1,342 \rangle^4 + \frac{64,61}{6} \langle 1,342 - 1,258 \rangle^3 + C_1 1,342 + C_2$$

$$C_2 = -21,381 - 1,342 C_1$$

Setter (1) lik (2) og bestemmer integrasjonskonstantene

$$-17,524 - 1,258 C_1 = -21,381 - 1,342 C_1$$

$$C_1 = -45,91$$

$$C_2 = 40,23$$

### Størst nedbøyning

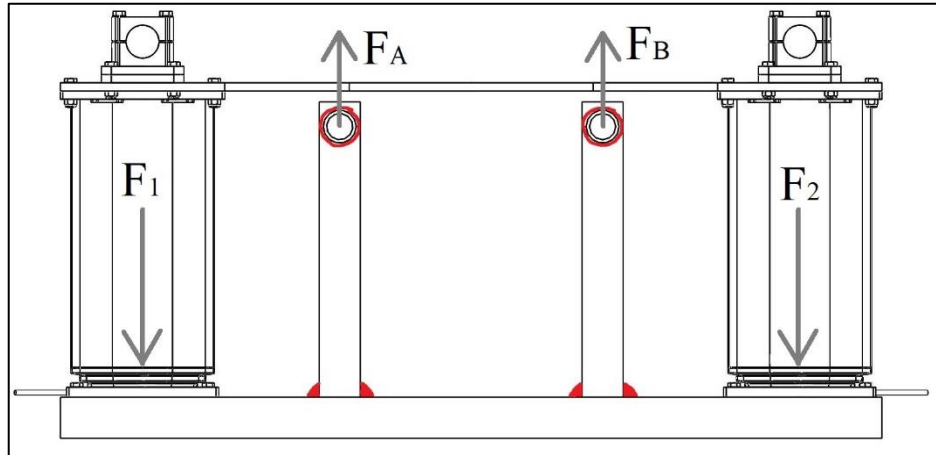
Det er av størst interesse og undersøke nedbøyningen i avstanden lengst fra opplagringskraften. Det er derfor valgt punktet  $x = 0$ .

$$EIy = C_2$$

$$y = \frac{C_2}{EI} = \frac{40,23N \cdot 10^9 mm}{70000 MPa \cdot 74191,85 mm^4} = \mathbf{7,74 mm}$$

## Vedlegg A2

### Dimensjonering av sveis i løfteplattform (UV-verktøy, jordbær)



Dimensjoneringen baserer seg på NS-EN 1999-1-1:2007 (Eurokode 9) og følgende dimensjoneringsparametere ble lagt til grunn.

- Aluminiumprofiler med mål 150x50x4mm (dette tilrettelegger for enkel fastbolting av løftesøylene til bunnprofilen).
- Aluminiumslegering 6082 T6:  $f_{u,haz} = 185MPa$  (benytter korrigert verdi for bruddgrensen da fasthetsverdier for grunnmaterialet reduseres på grunn av varmepåvirket sone (HAZ)).  $\sigma_{till} = f_{o,haz} = 125MPa$
- Antar at sveisemetall har samme bruddgrense som grunnmateriale.  $f_w = 185MPa$
- Faktoren  $\gamma_{MW} = 1,25$  er hentet fra tabell 8,1 (Recommended partial factors for joints)
- Egenvekten til det totale systemet (rammekonstruksjon, lysmodul med tilbehør og løfteplattform) er forhåndsregnet fra Solidworks.  $m_{tot} = 59 kg$ . For å inkludere vekt fra ledninger, strømforsyning, ballast o.l. ble det konservativt valgt å multiplisere egenvekten med 1,1.  $m_{tot,korrigert} = 59 kg \cdot 1,1 \approx 65 kg$ .

Beregner  $F_1$  og  $F_2$ :

$$F_1 = F_2 = \frac{1}{2} \cdot G_{tot} = \frac{1}{2} \cdot (m_{tot} \cdot g) = \frac{1}{2} \cdot \left(65kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 318,8 N$$

Opplagringskreftene  $F_A$  og  $F_B$  beregnes (løfteplattformen er symmetrisk):

$$\sum F_y = 0 \quad (13)$$

$$-F_1 + F_A + F_B - F_2 = 0$$

$$F_A = F_B = \frac{1}{2} (F_1 + F_2) = \frac{1}{2} (318,8N + 318,8N) = 318,8N$$

Det høyeste bøyemomentet i firkantprofilene oppstår i senter (antar et løftesøylene er plassert midt under punktene hvor rammen er festet til løfteplattformen):

$$M_{bøyy} = F_1 \cdot l_1 = 318,8N \cdot 240mm = 76\,518 Nmm$$

Tverrsnittsmodulem ( $W_x$ ) til profilet kan beregnes ved følgende formel [2]:

$$W_x = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$$

$$H = 50\text{mm}, B = 150\text{mm}, h = 42\text{mm}, b = 142\text{mm}$$

$$W_x = \frac{(150\text{mm}) \cdot (50\text{mm})^3 - (142\text{mm}) \cdot (42\text{mm})^3}{6 \cdot 50\text{mm}} = 27431,68 \text{ mm}^3$$

Bøyespenningen i profilet kan beregnes med følgende formel [1]:

$$\sigma_b = \frac{M}{W_x}$$

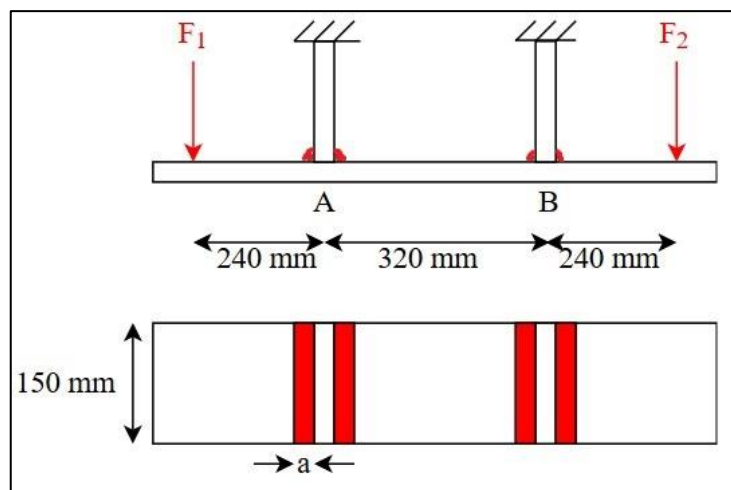
$$\sigma_b = \frac{76\,518 \text{ Nmm}}{27431,68 \text{ mm}^3} = 2,78 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{tillat}} = 125 \text{ MPa} \gg \sigma_b$$

### Dimensjonering av sveis til rektangulærprofil:

Grunnet symmetri utføres beregningen kun for den ene forbindelsen. Sveisens a-mål settes til 2mm for å kontrollere mot dimensjonerings-kriteriet. Sveisearealet beregnes til:

$$A_w = 2 \cdot (2\text{mm} \cdot 150\text{mm}) = 600\text{mm}^2$$



Sveisens tverrsnittsmodulem ( $W_w$ ) kan beregnes med følgende formel [2]:

$$W = \frac{b}{6H} (H^3 - h^3)$$

$$H = 50 + 2a = 50\text{mm} + 2 \cdot 2\text{mm} = 54\text{mm}$$

$$h = 50\text{mm}, b = 150\text{mm}$$

$$W_w = \frac{150\text{mm}}{6 \cdot 54\text{mm}} ((54\text{mm})^3 - (50\text{mm})^3) = 15029,62\text{mm}^3$$

Berenger normalspenning og bøyepening:

$$\sigma_n = \frac{F_1}{A_w} = \frac{318,8\text{N}}{600\text{mm}^2} = 0,53\text{ MPa}$$

$$\sigma_b = \frac{M}{W_w} = \frac{76\,518\text{ Nmm}}{15029,62\text{mm}^3} = 5,1\text{ MPa}$$

Dekomponerer normal- og bøyepening til opprettede spenninger i sveisen ( $\tau_{\parallel} = 0$ ):

$$\sigma_{\perp,n} = \tau_{\perp,n} = \frac{\sigma_n}{\sqrt{2}} = \frac{0,53\text{ MPa}}{\sqrt{2}} = 0,37\text{ MPa} \quad (16)$$

$$\sigma_{\perp,b} = \tau_{\perp,b} = \frac{\sigma_b}{\sqrt{2}} = \frac{5,1\text{ MPa}}{\sqrt{2}} = 3,6\text{ MPa} \quad (16)$$

Kontrollerer mot dimensjoneringskriteriet [3]:

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (17)$$

$$\sigma_w = \sqrt{(0,37\text{MPa} + 3,6\text{MPa})^2 + 3 \cdot (0,37\text{MPa} + 3,6\text{MPa})^2} = \mathbf{8,0\text{MPa}}$$

$$\frac{f_w}{\gamma_{Mw}} = \frac{125\text{MPa}}{1,25} = \mathbf{100\text{MPa}}$$

$$\sigma_w \ll \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

### Dimensjonering av sveis rundt rør:

Grunnet symmetri betraktes kun det ene røret. Det antas konservativt at spenningene tas opp som skjærspenning i sveisen.

$$A_{w,rør} = 2 \cdot (\pi \cdot D_{rør} \cdot a) = 2 \cdot \pi \cdot 40\text{mm} \cdot 2\text{mm} = 502,7\text{ mm}^2$$

Beregner skjærspenningen i sveisen:

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_A}{2 \cdot A_{w,rør}} = \frac{318,8\text{N}}{2 \cdot \pi \cdot 40\text{mm} \cdot 2\text{mm}} = \mathbf{0,63\text{ MPa}} \quad (11)$$

$$\tau_{tillat} = \frac{f_{o,haz}}{\sqrt{3}} = \frac{125\text{MPa}}{\sqrt{3}} = \mathbf{72,17\text{MPa}}$$

$$\tau_{\parallel} \ll \tau_{tillat}$$

### Vedlegg A3

#### Kontroll av løftearmer ved sideveis belastning

Ved en vinkel på 10% bestemmes vinkel  $\theta$ :

$$\tan \theta = \left( \frac{\text{høyde}}{\text{lengde}} \right) = \left( \frac{10 \text{ m}}{100 \text{ m}} \right)$$

$$\theta = \tan^{-1}(0,1) = 5,71^\circ$$

Verktøyvekt er 200 kg totalt. Fordelt på to høydemekanismer blir det 100 kg per side:

$$F = \frac{m_{\text{verktøy}} \cdot g}{2} = \frac{100 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2} = 490,50 \text{ N}$$

Kraftkomponenter i ulike retninger:

$$F_x = F \cdot \sin \theta = 490,50 \text{ N} \cdot \sin(5,71^\circ) = 48,80 \text{ N}$$

$$F_y = F \cdot \cos \theta = 490,50 \text{ N} \cdot \cos(5,71^\circ) = 488,06 \text{ N}$$

## Vedlegg B1

### FEM-analyse: Kontroll av nedbøyning UV-verktøy (jordbær)

Nedbøyninger er kontrollert med dataprogrammet ANSYS APDL 18.2. Analysen tar utgangspunkt i en to-dimensjonal situasjon hvor halve vekten av lysmodulen er benyttet per side. Dimensjoneringen tar utgangspunkt i en «worst case» situasjon. Det ble vurdert fire ulike situasjoner i dimensjoneringen av nedbøyninger og disse er presentert i tabellen under. Velger situasjon 1 der massen har lengst momentarm. (vedlagt fil: SMuten).

*Utvalgte belastningssituasjoner for UV-verktøy (jordbær).*

Situasjon	Beskrivelse	Momentarm
1.	Voksen plante, montert oppe.	1258 mm
2.	Voksen plante, montert nede.	1098 mm
3.	Liten plante, montert oppe.	942 mm
4.	Liten plante, montert nede.	942 mm

### Keypoints med punktlaster:

*Keypoints (KP) angitt i et x-y koordinatsystem. Egenvekt for profiler er medberegnet.*

Keypoint (KP)	x [mm]	y [mm]	Påført punktlast
1	0	0	10 kg
2	1258	0	
3	1342	0	
4	2600	0	10 kg
5	1300	-1000	

### Fastholdninger:

Fastholdninger ble valgt for å simulere den reelle situasjonen. KP 2 og forhindret forskyvninger i x og y retning, KP 3 er forhindret mot forskyvninger i y retning. Analysen benytter tredimensjonale elementer og det ble foretatt en to-aksial spenningsanalyse. Alle KP er derfor forhindret for forskyvninger i z retning i tillegg til rotasjon om x akse.

### Bjelkeprofil, mesh og materialvalg:

Det er valgt å bruke et standard bjelkeprofil med sirkulær form, tilsvarende valgt aluminiumsprofil. Bjelkeprofilet er representert som linjer fra KP 1 til KP 4, og gitt elementstørrelse 3. Dette gir totalt 9 elementer. Røret er meshet med elementtypen «beam188», egnet for moderat tykke bjelkeprofiler og benytter Timoshenkos bjelketeori [4]. Når elementene inneholde skjærdeformasjon blir resultatet noe forskjellig fra håndberegninger. Ytre radius på røret ble endret til 20.005 mm for at arealet og annet arealmoment skulle bli korrekt. Elastisitetsmodul for aluminium ble satt til 7,0e5 MPa og Poissons tall lik 0,3.

*Resultater fra FEM-analysen.*

Resultat	Nedbøyning (mm)	Skjærkraft (N)	Moment (Nm)	Spenning (MPa)
ANSYS APDL	7,79	64,54	71,73	19,35

## Vedlegg B2

### Bestemmelse av opplagringskrefter, bæreramme – DEL 1: firkantprofil

Analysen kartlegger opplagringskrefter og momenter for brakettene som er festepunktet mellom robotrammen og bærerammen på verktøyfestet. Solidworks 17/18 ble benyttet. (Vedlagt fil: Boltfirkant)

#### Geometri:


Modellen i analysen er forenklet da det kun er interessant å bestemme opplagringskrefter. I analysen blir spenninger og deformasjoner i bjelkens tverrsnitt sett bort fra. Tverrsnitt ble satt til 72x72 millimeter og 5 millimeter tykkelse. Lengden av bjelken er 850 millimeter og bredden av profilet er henholdsvis 191 millimeter regnet i senter av knutepunktet.

#### Analysetype:

I analysen er statisk og det er benyttet (SOLVER).

#### Materialet:

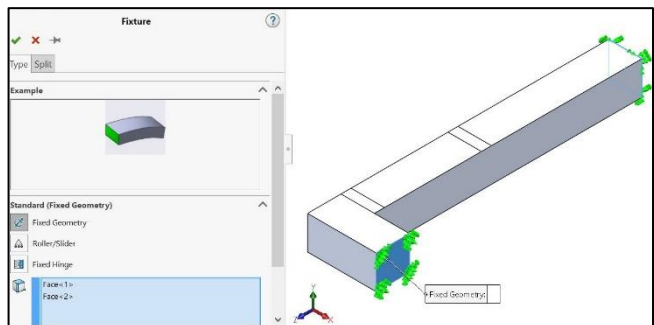
I analysen er det valgt materialet aluminium 6063 T6. Materialet har flytegrense på 215 MPa, bruddgrense på 240 MPa. Poisson tall 0,33 og 69 000 MPa.



Property	Value	Units
Elastic Modulus	69000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Shear Modulus	25800	N/mm <sup>2</sup>
Mass Density	2700	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	240	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength	215	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	2.34e-005	/K
Thermal Conductivity	209	W/(m·K)
Specific Heat	900	J/(kg·K)

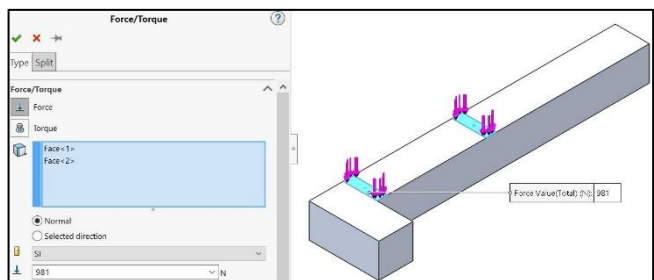
#### Fastholdninger:

Analysen består av fastholdninger i begge ender, ved hjelp av «fixed geomtry» som forhindrer bevegelse i tre akser (x, y og z). Fastholdningen vil ta opp krefter og momenter i alle tre akser.



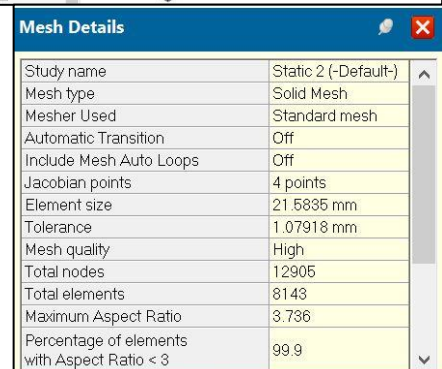
#### Krefter:

Profilet er påført to krefter. Kraftene er påført på et område begrenset av en «split line». Avstandene til kreftenes angrepspunkt er 465 millimeter og 785 millimeter påført en splitline. Dette representerer derfor stedet hvor vekten av verktøyet påføres verktøyfestet. Påført kraft er 981 N som representerer 100 kg.



#### Mesh:

Det er valgt å bruke standard mesh i analysen hvor størrelsen på elementene er 21,5885 millimeter. Antall noder er 12905 og antall elementer er 8143.



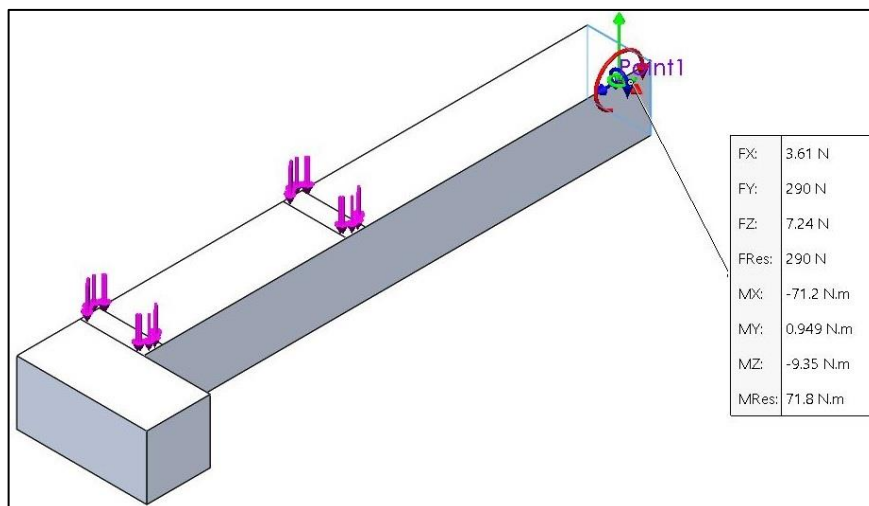
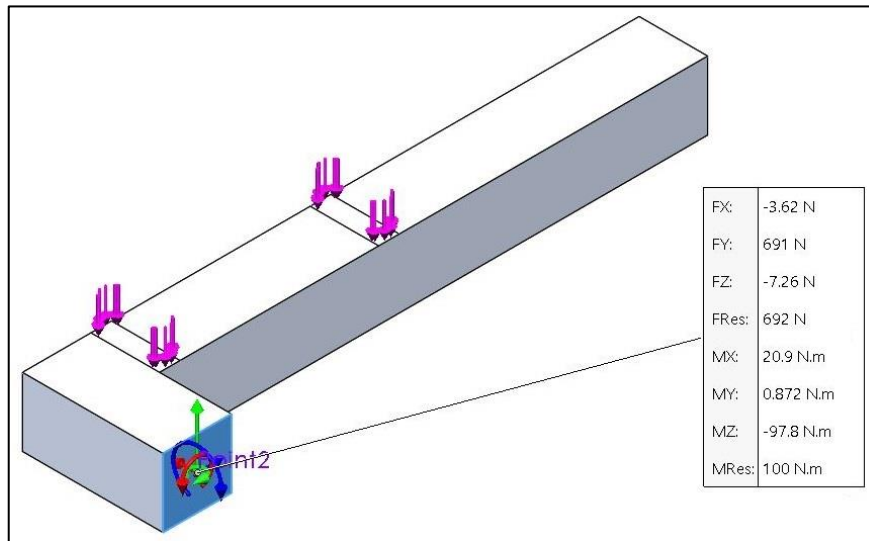
Property	Value
Study name	Static 2 (-Default-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	21.5835 mm
Tolerance	1.07918 mm
Mesh quality	High
Total nodes	12905
Total elements	8143
Maximum Aspect Ratio	3.736
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	99.9



## Resultater:

Opplagringskreftene gjelder for to referansepunkter (sentrert i firkantprofilen). Resultatene fra analysen er presentert under. Punkt A2 er fremre feste (nærmeste innfestingspunkt i figurene over), punkt B2 er bakre innfestingspunkt.

Punkt	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fres (N)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)	Mres (Nm)
A2	-3,62	691	-7,26	692	20,9	0,872	-97,8	100
B2	3,61	290	7,24	290	-71,2	0,949	-9,35	71,8



## Vedlegg B3

### Bestemmelse av opplagringskrefter, bæreramme – DEL 2: sirkulær profil

Analysen kartlegger opplagringskrefter og momenter for brakettene som er festepunktet mellom robotrammen og bærerammen på verktøyfestet. Solidworks 17/18 ble benyttet. (Vedlagt fil: Boltrund).

#### Geometri:

Modellen i analysen er forenklet da det kun er interessant å bestemme opplagringskrefter. I analysen blir spenninger og deformasjoner i bjelkens tverrsnitt sett bort fra. Profilen er modellert som et sirkulært tverrsnitt med utvendig diameter på 72 millimeter og veggtykkelse 5 millimeter. Røret har lengden 850 millimeter og bredde er 191 millimeter regnet i fra senter av knutepunktet.

#### Analysetype:

Analysen er statisk og det er benyttet «FEEPlus» solver.

#### Materialet:

I analysen er det valgt materialet aluminium 6063 T6. Materialet har flytegrense på 215 MPa, bruddgrense på 240 MPa. Poisson tall 0,33 og 69 000 MPa.

#### Fastholdninger:

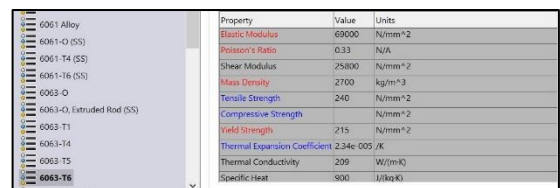
Analysen består av fastholdninger i begge ender, ved hjelp av «fixed geomtry» som forhindrer bevegelse i tre akser (x, y og z). Fastholdningen vil ta opp krefter og momenter i alle tre akser.

#### Krefter:

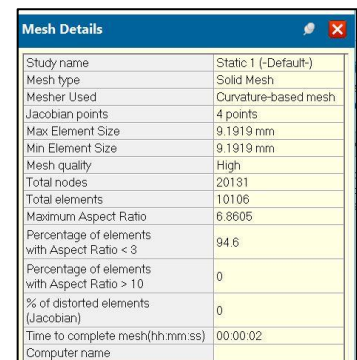
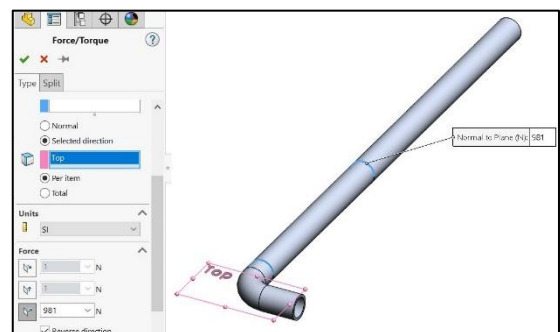
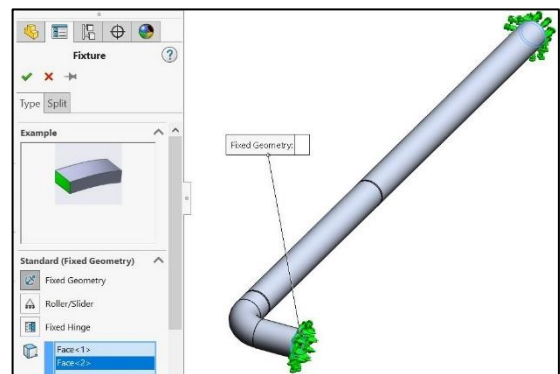
Profilen er påført to krefter. Kraftene er påført på et område begrenset av en «split line». Lengder til kreftenes angrepspunkt er 465 millimeter og 785 millimeter. Dette representerer derfor stedet hvor vekten av verktøyet påføres verktøyfestet. Påført kraft er 981 N som representerer 100 kg.

#### Mesh:

Det ble valgt å bruke «curvature mesh» i analysen. Størrelsen på elementene er 9,1919 millimeter. Antall noder er 20131 og antall elementer er 10106.



Property	Value	Units
Elastic Modulus	69000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Shear Modulus	25800	N/mm <sup>2</sup>
Mass Density	2700	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	240	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength	215	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	2.34e-005	K
Thermal Conductivity	205	W/m/K
Specific Heat	900	J/kg/K

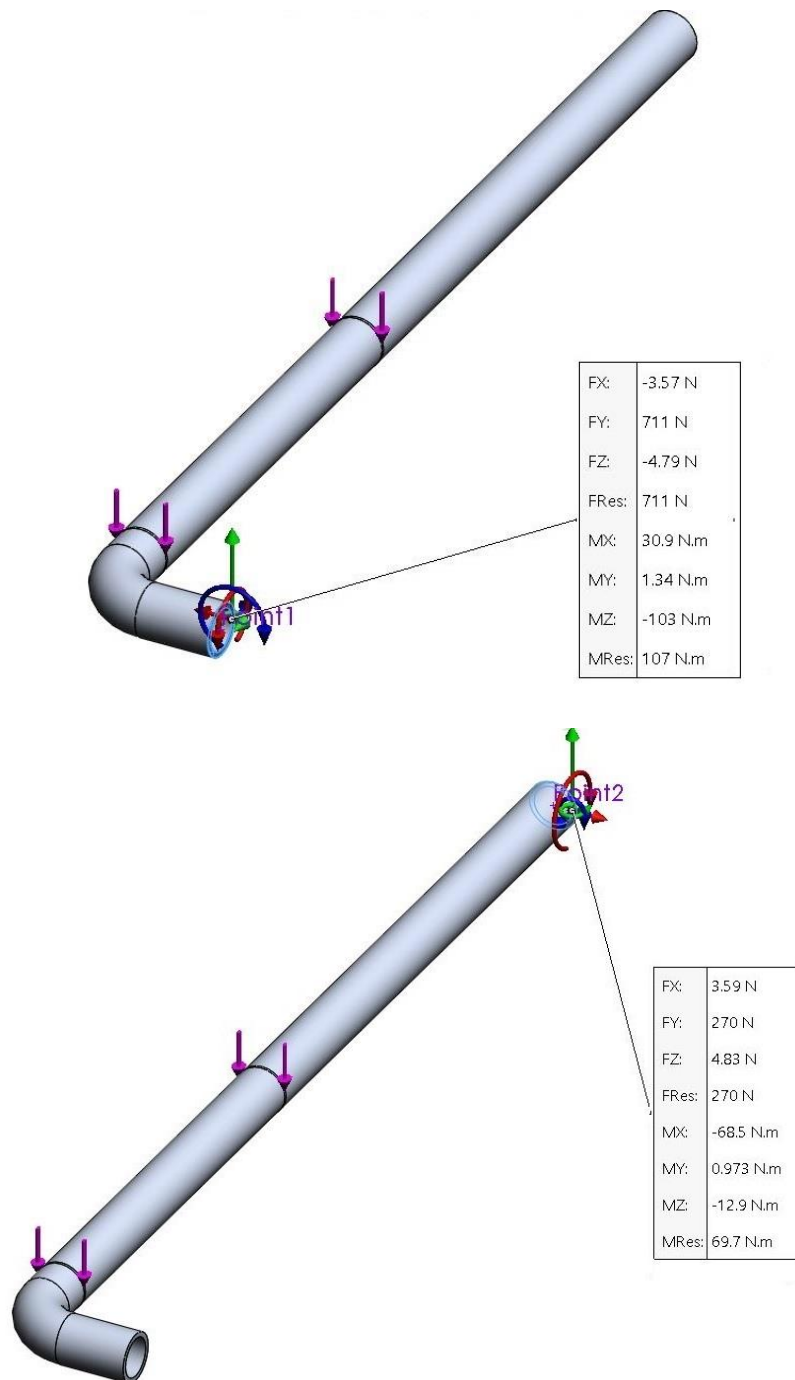


Mesh Details	
Study name	Static 1 (-Default-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature-based mesh
Jacobian points	4 points
Max Element Size	9.1919 mm
Min Element Size	9.1919 mm
Mesh quality	High
Total nodes	20131
Total elements	10106
Maximum Aspect Ratio	6.8605
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	94.6
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:02
Computer name	

### Resultater:

Opplagringskreftene gjelder for to referansepunkter (sentrert i firkantprofilen). Resultatene fra analysen er presentert under. Punkt A1 er fremre feste (nærmeste innfestingspunkt i figurene over), punkt B1 er bakre innfestingspunkt.

Punkt	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fres (N)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)	Mres (Nm)
A1	-3,57	711	-4,97	711	30,9	1,34	-103	107
B1	3,59	270	4,83	270	-68,5	0,973	-12,9	69,7



## **Vedlegg B4**

### **Spenninger i løftemekanisme – vertikalt belastet (Nede og øvre)**

ANSYS Workbench ble benyttet for en «Static Structural» analyse for å betrakte opptredende spenninger i løftemekanismen. Analysen består av to forskjellige tilfeller.

- Det første tilfelle betraktes nedre knutepunkt med belastninger fra aktuator og heisemekanisme er påført, her er knutepunkt oppe holdt fast og blir derfor sett bort fra.
- Det andre tilfelle blir knutepunktet mellom hurtigfestet og heisemekanismen betraktet, her er knutepunktet i kontakt med aktuatoren holdt fast og derfor blir sett bort fra. (Vedlagt fil: «Analyse vippemekanisme nede» og «Analyse vippemekanisme oppe»).

#### **Geometri:**

Analysen tar utgangspunkt i en forenklet modell, som i virkeligheten består av sammensveiste plater. Modellen i analysen tar utgangspunkt i én støpt konstruksjon.

#### **Material:**

I begge tilfeller er det valgt rustfritt stål, EN 1.4301 (AISI 304) med flytegrense 230 MPa og bruddgrense 540 MPa.

#### **Mesh:**

I analysen er for begge analyser valgt å bruke følgende mesh for hele modellen:

- "Patch Conforming method": Tetrahedrons. Metoden algoritmen "Patch Conforming".
- "Body Sizing": Elementstørrelser på 3mm.
- Antall noder: 76779
- Antall elementer: 38076
- Mesh min: 7,626
- Mesh max: 0,999

#### **Fastholdninger:**

Det er benyttet tre forskjellige fastholdninger i tilfelle en og to, nærmere beskrevet under:

Tilfelle 1 (Oppe):

- "Fixed support": Påført i to kontaktflater mellom bolt og heisemekanisme. Fastholdningen er påført en "split line" og virker derfor kun på én del av den ovale hylsen.
- "Remote displacement": Påført en sylindrisk flate om rotasjonspunktet. Her tillates ikke bevegelses om aksene i x, y og z. I tillegg er aksene x og y forhindre rotasjon. Denne fastholdningen tillat kun rotasjon om z og representerer derfor bevegelsesmønter til heisemekanismen.

Tilfelle 2 (Nede)

- "Fixed support": Påført i to kontaktflater mellom bolt og hurtigfestet. Denne er påført en "split line", og virker derfor kun i nedre del av boltehullet.
- "Remote displacement". Denne er lik tilfelle 1 (oppe).

**Last:**

I analysen ble modellen utsatt for forskjellige krefter i tilfelle en og to. Plassering og størrelse av krefter er beskrevet under:

Tilfelle 1 (Oppe):

- Kraften fra verktøy på 200 kg påført heisemekanismen fordeles likt på hver modell. Kraften på 490,50 N, fordeles likt på to flater (split line) i boltehullet.

Tilfelle 2 (Nede):

- Trekkraften på 1772 N fra aktuatoren fordelt likt i et definert området (split line) inne i de ovale boltehullene. Kraften er påført med en vinkel på 7,69 grader.
- Kraften på 846 N fra parallellstaget er likt fordelt på to flater (split line) i de bakre boltehullene.

**Resultater:**

FEM-analysen viser følgende resultat av analysen av tilfelle en og to:

Tilfelle 1 (nede): Største Van Mises spenning 31,175 MPa. Minste sikkerhetsfaktor 7,24. Største deformasjon 0,06038 millimeter.

Tilfelle 2 (oppe): Største Van Mises spenning 118,61 MPa. Minste sikkerhetsfaktor 1,81. Største deformasjon 0,17 millimeter.

## **Vedlegg B5**

### **Spenninger i løftemekanisme - skråbelastning**

I denne analysen undersøkes tilfellet hvor løftearmene på verktøynnfestningen er hevet og kjører i en helning på 10 grader. Analysen handler hovedsakelig om å kartlegge deformasjoner og spenninger i løftearmene. Analysen ble utført med Solidworks 17/18. (vedlagt fil: Sideveis)

#### **Geometri:**

Analysen tar utgangspunkt i en forenklet modell. I virkeligheten består løftearmene av sammensveiste plater, mens modellen i analysen tar utgangspunkt i én støpt konstruksjon.

#### **Materialet:**

Valgt materiale er rustfritt stål, EN 1.4301. Materialet har flytegrense på 230 MPa, bruddgrense på 540 MPa (platetykkelse < 6mm). Poisson tall er 0,3 og E-modulen er 190 000 MPa.

#### **Analysetype:**

Det ble valgt en h-adaptiv analyse, med målenøyaktighet på 98%. Analysen består av 3 iterasjoner.

#### **Fastholdninger:**

Det er brukt tre forskjellige fastholdninger.

- Vippemekanismen forhindres mot sideveis bevegelse. Fastholdningen "advanced fixtures on flat faces" er valgt på vippemekanismens kontaktflate med innsiden av verktøynnfestningsrammen. Fastholdningen forhindrer vippemekanismen bevegelse sideveis.
- Løftemekanismens rotasjonspunkt: Fastholdningen "advanced fixtures on circular faces" er valgt på innsiden av rotasjonspunktet til løftemekanismen. Dette tilsvarer den gjennomgående bolten som konstruksjonen roterer om. Fastholdningen tillater kun rotasjon om z-aksen.
- Løftemekanismens festepunkt til lineær aktuatoren: Fastholdningen «fixed geometry» er valgt i punktene hvor aktuatoren festes til løftemekanismen. Fastholdningen tar opp krefter og momenter i aksene x, y og z.

#### **Krefter:**

Det er påført to ulike krefter.

- Den første kraften er påført en «split line» og har en retning normalt på et plan i boltehullet, hvor hurtigfestet er tilkoblet. Størrelsen på kraften er 488 N.
- Den andre kraften er påført en «split line» på utsiden av vippemekanismen. Størrelsen på kraften er 49 N. Det er valgt påføre kraften på denne geometrien for å være konservativ og hvor en antar en «worst case» situasjon. Selv om kraften i virkeligheten også ville blitt påført på en innsveist hylse inne i vippemekanismen vil analysen gi en ønsket estimering.

#### **Resultater:**

FEM-analysen viser at det etter 3 iterasjoner oppnås ønsket mål om maksimal resultant deformasjon. Største deformasjon er 0,0367 mm på enden av vippemekanismen. Størst spenning i tverrsnittet er 41,6 MPa. Antall noder: 45753. Antall elementer: 24047. Mesh størrelse: 5.5599 mm. Mesh kvalitet: High.

## Vedlegg C - Kostnadskalkyler

**Konseptutvikling:** Totale kostnader tilknyttet konseptutviklingsarbeid. Det ble antatt at 50 % av tiden gikk til utvikling av verktøyinnfesting og 50 % til UV-verktøyene.

Konseptutvikling	Timer	Pris	Sum [NOK]
Utredningsarbeid	300	550 NOK	165 000
Dimensjonering og design	585	550 NOK	321 750
3D fremstillinger	300	550 NOK	165 000
Teknisk tegning	15	550 NOK	8250
Prosjektrapport	700	550 NOK	385000
<b>Totalt, konseptutvikling</b>	<b>1800</b>		<b>990000</b>

**Prototype:** Kostnadskalkyle for UV-verktøy for jordbærkulturer

Materialer og komponenter	Kvantum	Pris	Sum [NOK]
Aluminiumrør, Ø40x4mm EN-AW 6063 T6	19,7 kg	77,2 NOK/kg	1520,9
Aluminiumplate, t=1,5mm EN-AW 6082 T651	0,5 kg	96,2 NOK/kg	48,1
Aluminiumplate, t=3mm EN-AW 6082 T651	4 kg	96,2 NOK/kg	384,8
Aluminiumprofil(150x50x4mm) EN-AW 6082 T6	6,5 kg	77,2 NOK/kg	501,8
Aluminiumplate, t=10mm EN-AW 6082 T651	7,9 kg	96,2 NOK/kg	760
Bolt, rund Ø60	0,9 kg	88,2 NOK/kg	79,4
MIRO 9 (A=0,1126 mm <sup>2</sup> /reflektor)	16	88,5 EUR/m <sup>2</sup>	1594
Polykarbonat (PC) 700x250x2mm Exell-D	8	289,80 NOK/m <sup>2</sup>	405,7
Lysrørholder Arcadia T5 Ultra seal	8	16,9 GBP	1352
Eksosklemme Ø40	16	34,90 NOK	558,4
Linak BL1 200 mm (løftesøyle)	2	4400 NOK	8800
Roboteq SDC2160	1	250 USD	2500
DC-DC transformator, RSD-300C-24	1	1135 NOK	1135
Kapslingsbokser IP67	1	2000 NOK	2000
Skruer og skiver	-	1000 NOK	1000
Lysrør UVC 60W	16	16,50 EUR	2640
Ballast UVC	8	72 EUR	5760
Rose+Krieger Angle clamp (W)	16	209,75 NOK	3356
Rose+Krieger Sleeve clamps (M)	4	289,31 NOK	1157,2
Rose+Krieger Parallell clamps (P)	2	193,20 NOK	386,4
Rose+krieger Flange clamps (FKR)	4	225,20 NOK	900,8
<b>Delsum, material- og komponentkostnad for UV-verktøy (jordbær)</b>			<b>36 840</b>

**Prototype:** Kostnadskalkyle for UV-verktøy for agurkkulturer

Materialer og komponenter	Kvantum	Pris	Sum [NOK]
Aluminiumrør, Ø40x4mm EN-AW 6063 T6	5,9 kg	77,2 NOK/kg	455,5
Aluminiumplate, t=1,5mm EN-AW 6082 T651	0,17 kg	96,2 NOK/kg	16,4
Aluminiumplate, t=3mm EN-AW 6082 T651	2 kg	96,2 NOK/kg	192,4
60W UVC	8	16,50 EUR	1320
Ballast UVC	4	72 EUR	2880
Lysrørholder Arcadia T5 Ultra seal (2 stk)	4	16,9 GBP	676
Eksosklemme Ø40	8	34,90 NOK	279,2
Rose+krieger Solid clamp (W)	2	209,75 NOK	419,5
Rose+krieger 2 Angle clamp (K)	2	209,75NOK	419,5
Polykarbonat (PC) 700x250x2mm Exell-D	2	289,80 NOK/m <sup>2</sup>	101,4
Skruer og mutter M5 (socket button head)	80 skruer 80 mutter	182,07 NOK / 50 190,71 NOK /100	364,1 190,7
<b>Delsum, material- og komponentkostnad for UV-verktøy (agurk)</b>			<b>7315</b>

**Prototype:** Kostnadskalkyle for verktøynnfestingssystem

Materialer og komponenter	Kvantum	Pris	Sum [NOK]
Aluminiumsplate, t=5mm EN-AW 5754	7,4 kg	75,2 NOK/kg	556,5
Aluminiumsplate, t= 6mm EN-AW 6082 T651	0,08 kg	69,2 NOK/kg	5,5
Aluminiumsplate, t=10mm EN-AW 6082 T651	1,9 kg	69,2 NOK/kg	131,5
Aluminiumsplate, t=12mm EN-AW 6082 T651	0,18 kg	69,2 NOK/kg	12,5
Aluminiumsplate, t=15mm EN-AW 6082 T651	4,6 kg	69,2 NOK/kg	318,3
Aluminiumplate, t=20 mm EN-AW 6082 T651	0,3 kg	69,2 NOK/kg	20,8
Aluminiumskinne 70x30mm EN-AW 6063 T6	1,6 kg	96,2 NOK/kg	154,0
Rustfri stålplate, t=2 mm EN 1.4301	3,4 kg	48,1 NOK/kg	163,5
Bolt, rund Ø16, EN 1.4301	0,4 kg	67,05 NOK/kg	26,8
Bolt, rund Ø30, EN 1.4301	0,03 kg	67,05 NOK/kg	2,0
Aksling m/seegeringspor	16 stk.	10,66 EUR	1705,6
Skruer, mutter, skiver og seegeringer	-	1000 NOK	1000



SKF PPMF 101212	30	60	1800
SKF PPM 101210	6	60	360
Linak LA25, 150mm slag	2	3820 NOK	7640
Roboteq, SDC2160	1	250 USD	2500
DC-DC transformator, RSD-100C-24	1	616 NOK	616
<b>Delsum, material- og komponentkostnad for verktøyinnfestingssystem</b>			<b>17013</b>

**Prototype:** Kostnadskalkyle for UV-verktøy jordbærkulturer

Aktivitet	Timer	Pris	Sum [NOK]
Skjære plater	-	-	2400
Knekking av plater	1,1	650	715
Kappe rør	0,5	650	325
Valsing av reflektorer	1,2	650	780
Elektrisk tilkobling	1,5	650	975
Montering	1,5	650	975
<b>Delsum, arbeids- og fremstillingskostnader, UV-verktøy (jordbær)</b>			<b>6170</b>

**Prototype:** Kostnadskalkyle for UV-verktøy agurkkulturer

Aktivitet	Timer	Pris	Sum [NOK]
Skjære plater	-	-	1100
Knekking av plater	1,1	650	715
Kappe rør	0,5	650	325
Elektrisk tilkobling	0,5	650	325
Montering	0,5	650	325
<b>Delsum, arbeids- og fremstillingskostnader, UV-verktøy (agurk)</b>			<b>2790</b>

**Prototype:** Kostnadskalkyle for verktøyinnfestingssystem

Aktivitet	Timer	Pris	Sum [NOK]
Skjære profiler	-	-	7000
Platearbeid	0,75	650	488
Sveisearbeid	1	650	650
Dreining	0,5	650	325
Fresing	5	650	3250
CNC-fres	0,83	650	540
Elektrisk tilkobling	0,5	650	325
Montering	1	650	650
<b>Delsum, arbeids- og fremstillingskostnader, verktøyinnfestingssystem</b>			<b>13 223</b>

**Småskala serieproduksjon: Kostnadskalkyle for UV-verktøy for jordbærkulturer**

Materialer og komponenter	Kvantum	Pris	Sum [NOK]
Aluminiumrør, Ø40x4mm EN-AW 6063 T6	19,7 kg	54,04 NOK/kg	1064,6
Aluminiumplate, t=1,5mm EN-AW 6082 T651	0,5 kg	67,34 NOK/kg	33,7
Aluminiumplate, t=3mm EN-AW 6082 T651	4 kg	67,34 NOK/kg	269,4
Aluminiumprofil(150x50x4mm) EN-AW 6082 T6	6,5 kg	54,04 NOK/kg	351,3
Aluminiumplate, t=10mm EN-AW 6082 T651	7,9 kg	67,34 NOK/kg	532
Bolt, rund Ø60	0,9 kg	61,74 NOK/kg	55,6
MIRO 9 (A=0,1126 mm <sup>2</sup> /reflektor)	16	61,95 EUR/m <sup>2</sup>	1116
Polykarbonat (PC) 700x250x2mm Exell-D	8	202,86 NOK/m <sup>2</sup>	284
Lysrørholder Arcadia T5 Ultra seal	8	16,9 GBP	1352
Eksosklemme Ø40	16	34,90 NOK	558,4
Linak BL1 200 mm (løftesøyle)	2	1715 NOK	3430
Roboteq SDC2160	1	250 USD	2500
DC-DC transformator, RSD-300C-24	1	1109 NOK	1109
Kaplisngsbokser (IP67)	1	1800 NOK	1800
Skruer og skiver	-	1000 NOK	1000
Lysrør UVC 60W	16	16,50 EUR	2640
Ballast UVC	8	72 EUR	5760
Rose+Krieger Angle clamp (W)	16	196,69 NOK	3147
Rose+Krieger Sleeve clamps (M)	4	271,27 NOK	1085
Rose+Krieger Parallell clamps (P)	2	181,14 NOK	363
Rose+krieger Flange clamps (FKR)	4	211,24 NOK	845
<b>Delsum, material- og komponentkostnad per UV-verktøy (jordbær)</b>			<b>29 296</b>

**Småskala serieproduksjon: Kostnadskalkyle for UV-verktøy jordbærkulturer**

Aktivitet	Timer	Pris	Sum [NOK]
Skjære plater	-	-	1800
Knekking av plater	1,1	650	715
Kappe rør	0,5	650	325
Valsing av reflektorer	1,2	650	780
Elektrisk tilkobling	1,5	650	975
Montering	1,0	650	650
<b>Delsum, arbeids- og fremstillingskostnader, UV-verktøy (jordbær)</b>			<b>5 245</b>

**Småskala serieproduksjon: Kostnadskalkyle for UV-verktøy for agurkkulturer**

Materialer og komponenter	Kvantum	Pris	Sum [NOK]
Aluminiumrør, Ø40x4mm EN-AW 6063 T6	5,9 kg	54 NOK/kg	318,6
Aluminiumplate, t=1,5mm EN-AW 6082 T651	0,17 kg	67,3 NOK/kg	11,4
Aluminiumplate, t=3mm EN-AW 6082 T651	2 kg	67,3 NOK/kg	134,6
60W UVC	8	16,50 EUR	1320
Ballast UVC	4	72 EUR	2880
Lysrørholder Arcadia T5 Ultra seal (2 stk)	4	16,9 GBP	676
Eksosklemme Ø40	8	34,90 NOK	279,2
Rose+krieger Solid clamp (W)	2	196,69 NOK	393,4
Rose+krieger 2 Angle clamp (K)	2	196,69 NOK	393,4
Polykarbonat (PC) 700x250x2mm Exell-D	2	202,86 NOK/m <sup>2</sup>	71
Skruer og mutter M5 (socket button head)	80 skruer 80 mutter	182,07 NOK / 50 190,71 NOK / 100	364,1 190,7
<b>Delsum, material- og komponentkostnad for UV-verktøy (agurk)</b>			<b>7 033</b>

**Småskala serieproduksjon: Kostnadskalkyle for UV-verktøy agurkkulturer**

Aktivitet	Timer	Pris	Sum [NOK]
Skjære plater	-	-	500
Knekking av plater	1,1	650	715
Kappe rør	0,5	650	325
Elektrisk tilkobling	0,5	650	325
Montering	0,3	650	195
<b>Delsum, arbeids- og fremstillingskostnader, UV-verktøy (agurk)</b>			<b>2 060</b>

## Antagelser:

- Kvantumsrabatt på 30% for materialer ved småskala serieproduksjon.
- Omregningsfaktor fra EUR, USA og GBP til NOK ble satt til 10 for grovestimat.
- Frakt er inkludert i prisene.
- Pris for skruer, muttere, skiver o.l. ble antatt for grovestimat.
- Timespris for utviklingsarbeid ble satt til 550 NOK.
- 50 % av utviklingstiden gikk med til verktøyinnfesting, 25 % til UV-verktøy for jordbær og 25 % til UV-verktøy for agurk.
- Kostnad per enhet ble beregnet med følgende formel:

$$\text{Kostnd per enhet} = \frac{\text{Utviklingskostnad} + \text{Enhetskostnad}}{\text{Antall produserte enheter}}$$

## Vedlegg D – Komponentoversikt

Generelt:

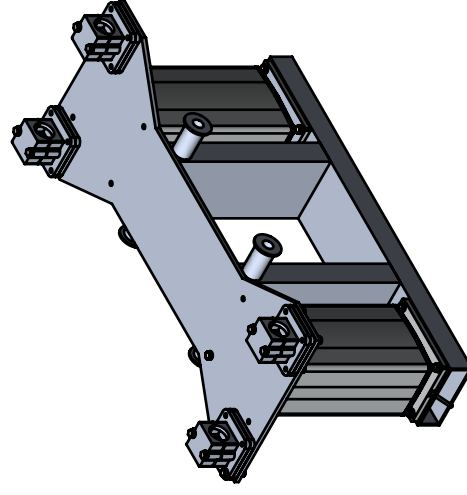
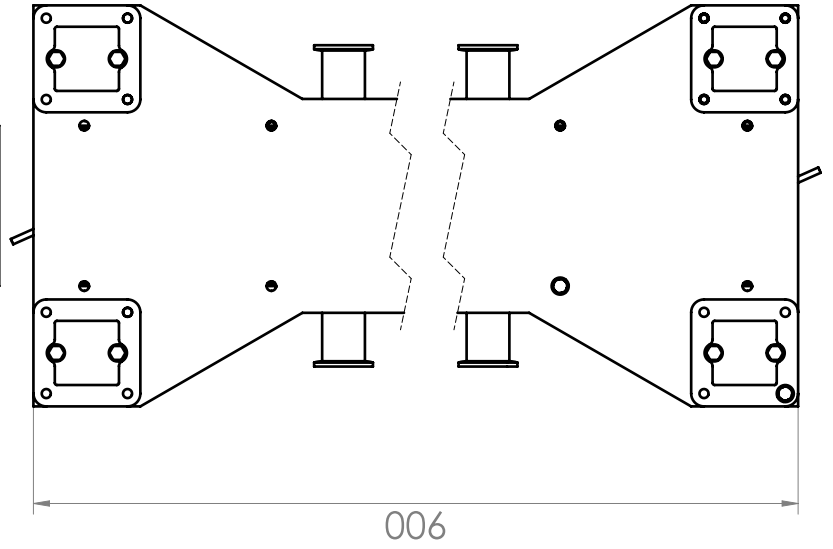
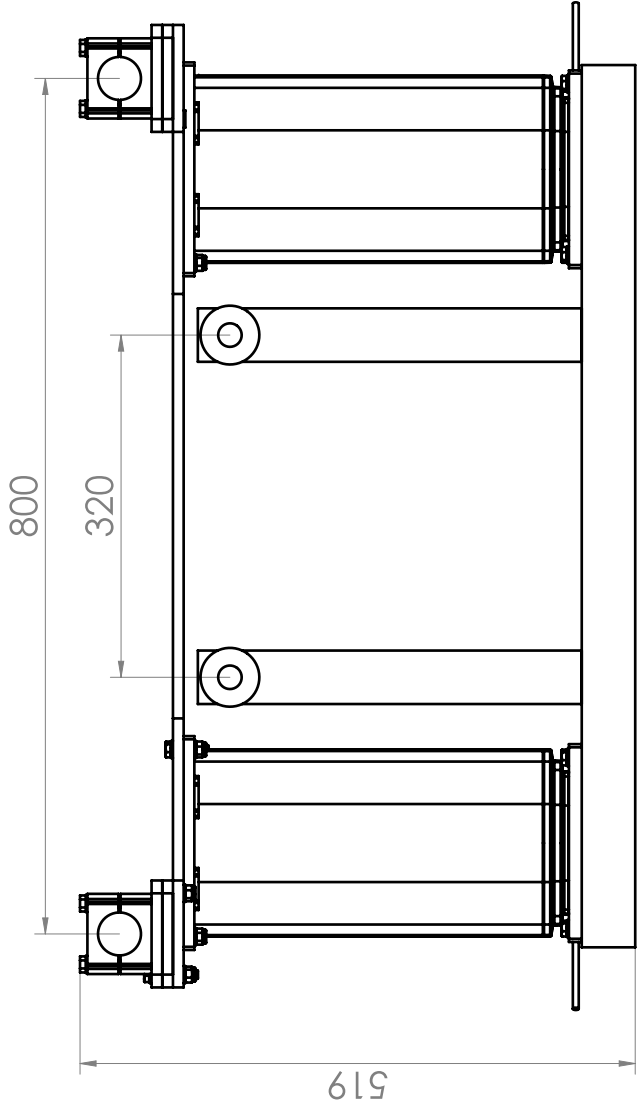
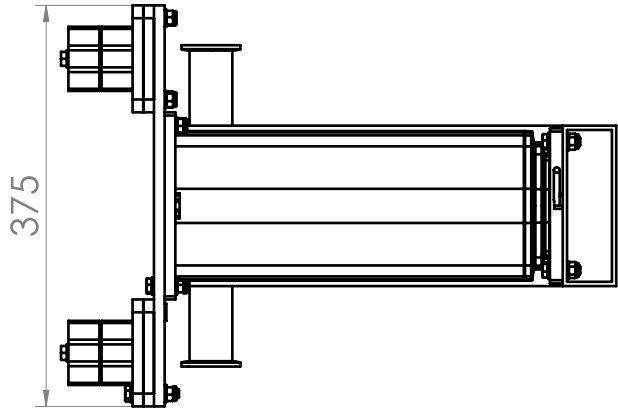
Betegnelse	Beskrivelse
SR	Saga Robotics
VI	Verktøyinnfestning
UV	UV verktøy

Verktøyinnfestning:

Komponent	Beskrivelse
SA-VI-01	Bæreramme (ytre, høyre - 5 mm)
SA-VI-02	Bæreramme (indre, høyre - 5 mm)
SA-VI-03	Brakett bak (15 mm)
SA-VI-04	Spacer bak (12 mm)
SA-VI-05	Spacer bak (20 mm)
SA-VI-06	Avstivere (10 mm)
SA-VI-07	Lås brakett bak (15 mm)
SA-VI-08	Brakett fremme (15 mm)
SA-VI-09	Cheekplate (6 mm)
SA-VI-10	Plate hurtigfeste (10 mm)
SA-VI-11	Hurtigfeste overdel (30 mm)
SA-VI-12	Hurtigfeste underdel (30 mm)
SA-VI-13	Heisemekanisme sideplate (2 mm)
SA-VI-14	Parallellplate (2 mm)
SA-VI-15	Rørstuss Ø16 rør (rotasjonspunkt)
SA-VI-16	Rørstuss Ø16 (forsterkning)
SA-VI-17	Rørstuss Ø40 (oval forsterkning)
SA-VI-18	Rørstuss Ø16 (parallell)
SA-VI-19	Avstiverplate (topp -2 mm)
SA-VI-20	Avstiverplate (bak - 2 mm)
SA-VI-21	Avstiverplate (skrå - 2 mm)
SA-VI-22	Aksling Ø10 (92 mm)
SA-VI-23	Aksling Ø10 (55mm)
SA-VI-24	Aksling Ø10 (82mm)
SA-VI-25	Ø40 tilkoblingsrør til ramme
SA-VI-26	Bæreramme (ytre - venstre)
SA-VI-27	Bæreramme (indre – venstre)
PPM 101212	SKF foring (uten flens)
PPMF 101212	SKF foring (med flens)
DIN 125 M5	Rustfri skive
DIN 125 M6	Rustfri skive
DIN 125 M8	Rustfri skive
DIN 471 M10	Seegering M10
DIN EN 24014 M6 - 80	Skruer (brakett)
DIN EN 24014 M6 - 85	Skruer (bæreramme)
DIN EN 24014 M8 - 90	Skruer (lås hurtigfestet)
DIN EN 24014 M8 - 45	Skruer (hurtigfestet)
ISO 10511 M5 - 12	Umbrako skruer (cheekplate)
DIN EN ISO 7040 M5	Låsemutter (5 mm)
DIN EN ISO 7040 M6	Låsemutter (6 mm)
DIN EN ISO 7040 M8	Låsemutter (8 mm)
DIN471 M10	Seegering M10

## UV verktøy:

Komponent	Beskrivelse
SR-UV-01	Lysmodul (Plate 1 - 3 mm)
SR-UV-02	Lysmodul (Plate 2 - 1,5 mm)
SR-UV-03	Lysmodul (Plate 3 - 1,5 mm)
SR-UV-04	Beskyttelsesplate (EXELL-D - 2 mm)
SR-UV-05	Reflektor (Miro9 - 0,4mm)
SR-UV-06	Løfteplattform del 1 (Underdel - 150x50x4)
SR-UV-07	Løfteplattform del 2 (Stående - 150x50x4)
SR-UV-08	Løfteplattform del 3 (topplate - 10mm)
SR-UV-09	Løfteplattform del 4 (Spacer - 10 mm)
SR-UV-10	Lysrør UV-C (60W - T5)
SR-UV-11	Lysrørholder (IP67 - T5)
SR-UV-12	Eksosklemme Ø40
SR-UV-13	Lås hurtigfeste
SR-UV-14	Rørtettinger Ø40
SR-UV-15	Ø40 aluminiumsrør (Vertikal - KG)
SR-UV-16	Ø40 aluminiumsrør (Horisontal - KG)
SR-UV-17	Ø40 aluminiumsrør (Tilkobling hurtigfeste - KG)
SR-UV-18	Ø40 aluminiumsrør (Horisontalt, sidemodul - SM)
SR-UV-19	Ø40 aluminiumsrør (Vertikalt, sidemodul - SM)
SR-UV-20	Ø40 aluminiumsrør (Forbindelse mellom moduler - SM)
SR-UV-21	Ø40 aluminiumsrør (Vertikalt, midtmodul - SM)
SR-UV-22	Ø40 aluminiumsrør (Horisontalt, midtmodul - SM)
FRK40	Rose+Krieger (Flenskobling)
W40	Rose+Krieger (90 vinkel)
K40	Rose+Krieger (90 vinkel med forlengelse)
P40	Rose+Krieger (Parallell)
M40	Rose+Krieger (Skjøt)
BL1	Linak - løftesøyle
DIN EN 24017 M8 30	Skrue (30 mm)
DIN EN 24017 M8 35	Skrue (35 mm)
DIN EN 24017 M8 40	Skrue (40 mm)
DIN EN 24017 M8 45	Skrue (45 mm)
DIN 125 M5	Rustfri skive (5mm)
DIN 125 M8	Rustfri skive (8 mm)
ISO 7380 M3x12	Umbrako skrue (5mm)
DIN EN ISO 7040 M5	Låsemutter (5mm)
DIN EN ISO 7040 M8	Låsemutter (8mm)



Dato: 10.05.18

Konstr./Tegnet:

Projeksjon:

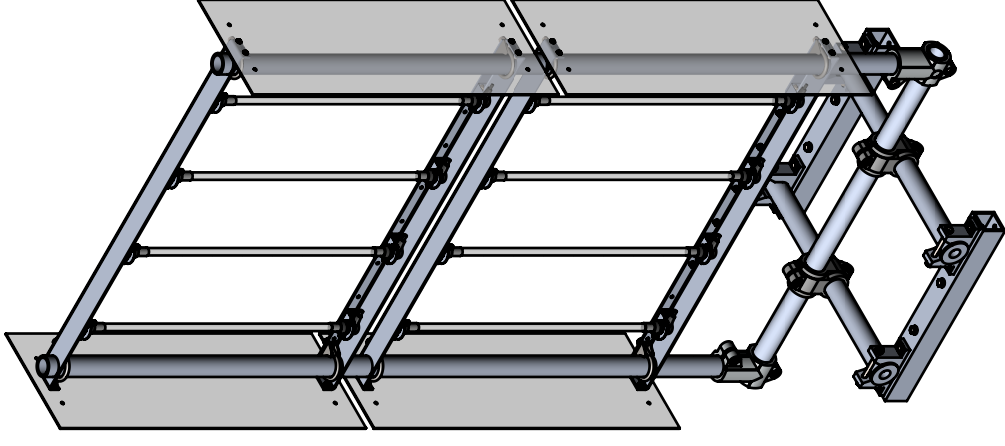
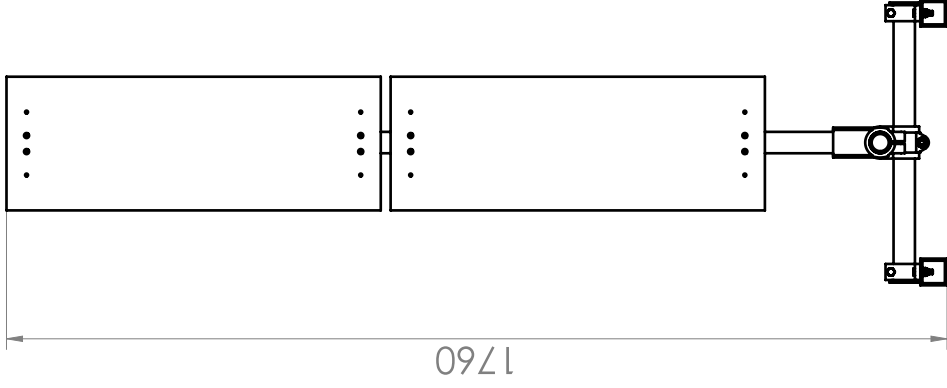
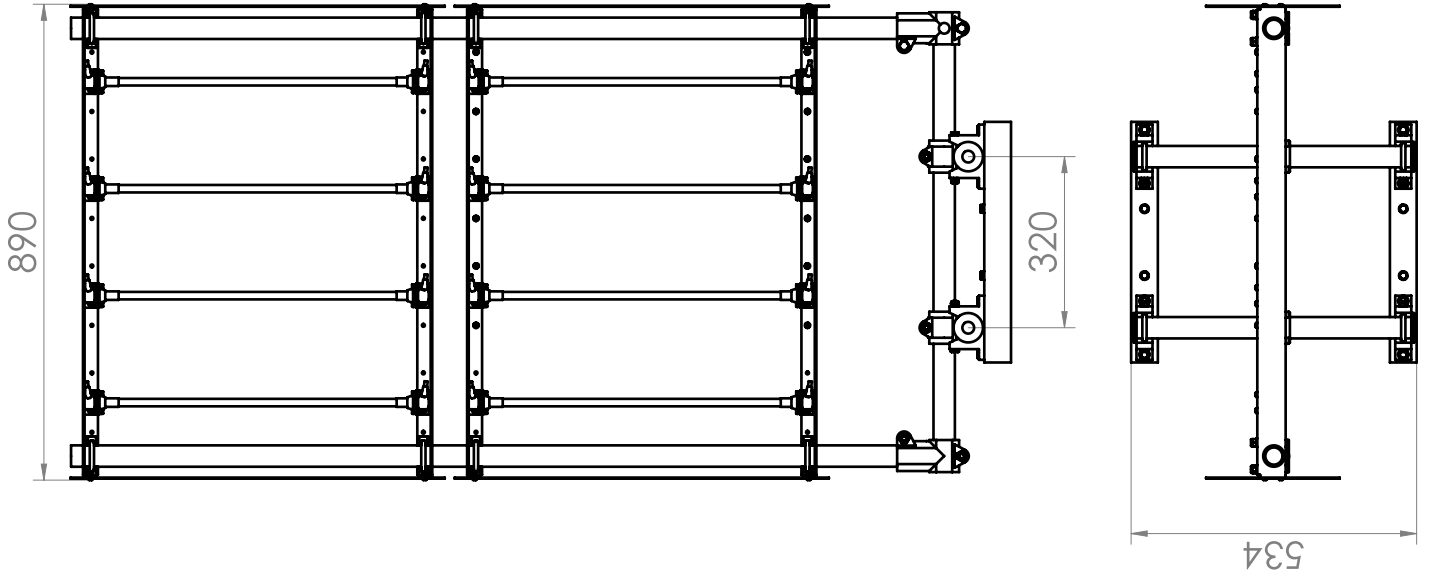
Målestokk:

Format: A3

1:5

NMBU

Sammenstilling løfteplattform



Dato: 10.05.18

Konstr./Tegnet:

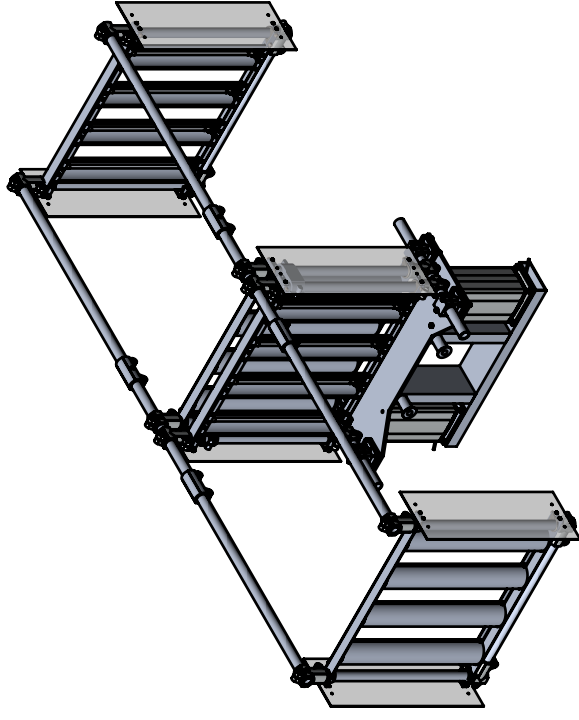
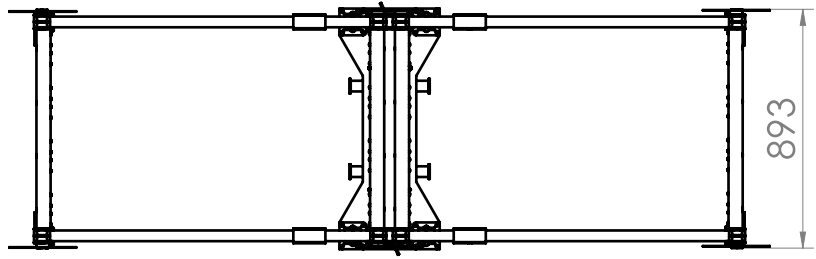
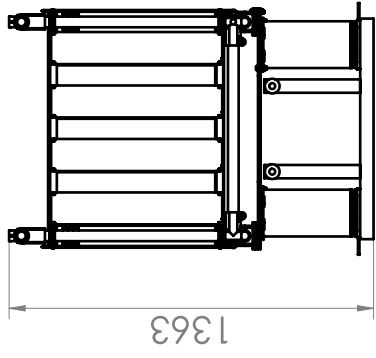
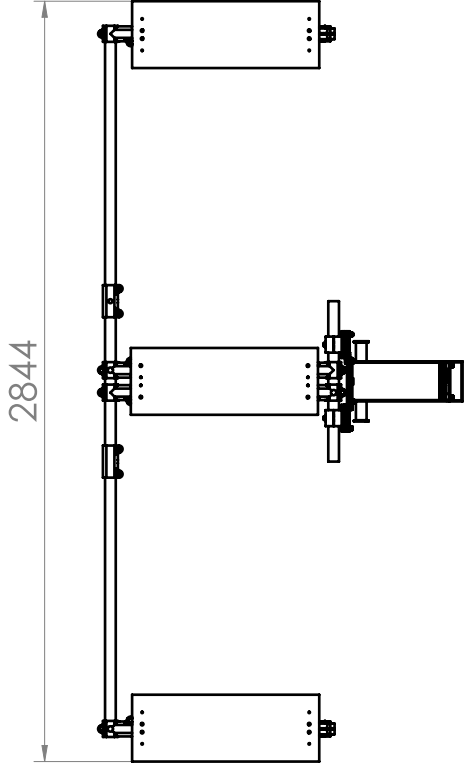
Projeksjon:

Målestokk: 1:10



NMBU

Sammenstilling KG



Dato: 10.05.18

Format: A3

Konstr./Tegnet:

Projeksjon:



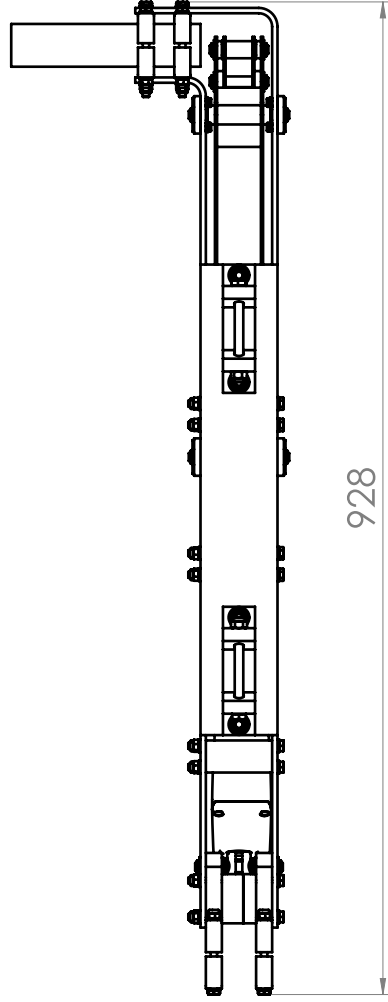
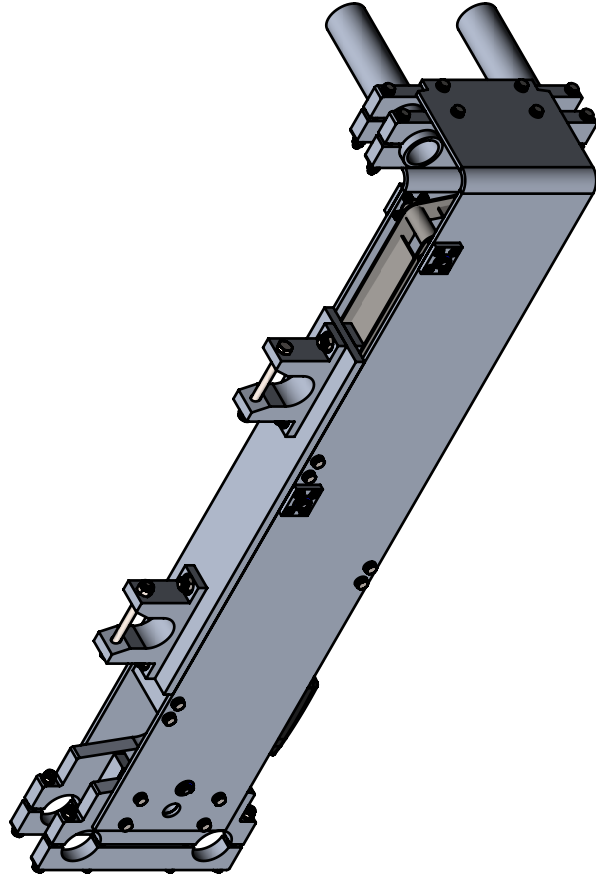
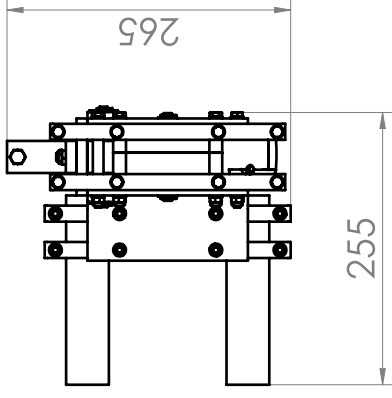
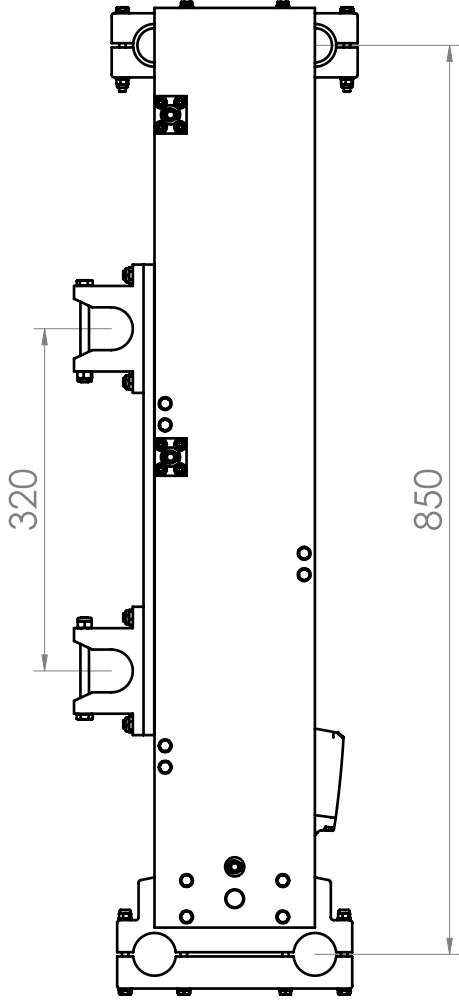
Målestokk:

1:20

NMBU

Sammenstilling SM





Dato: 10.05.18

Konstr./Tegnet:

Projeksjon:

Målestokk:

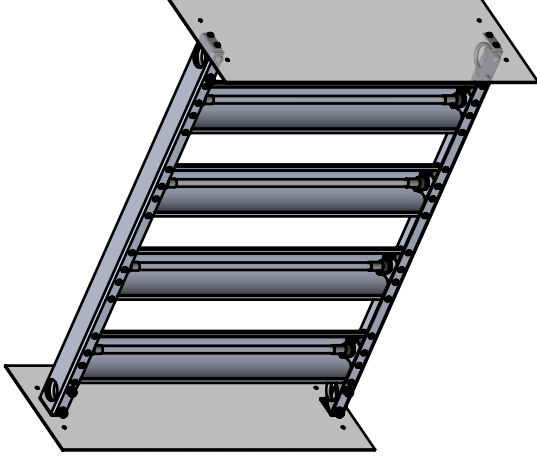
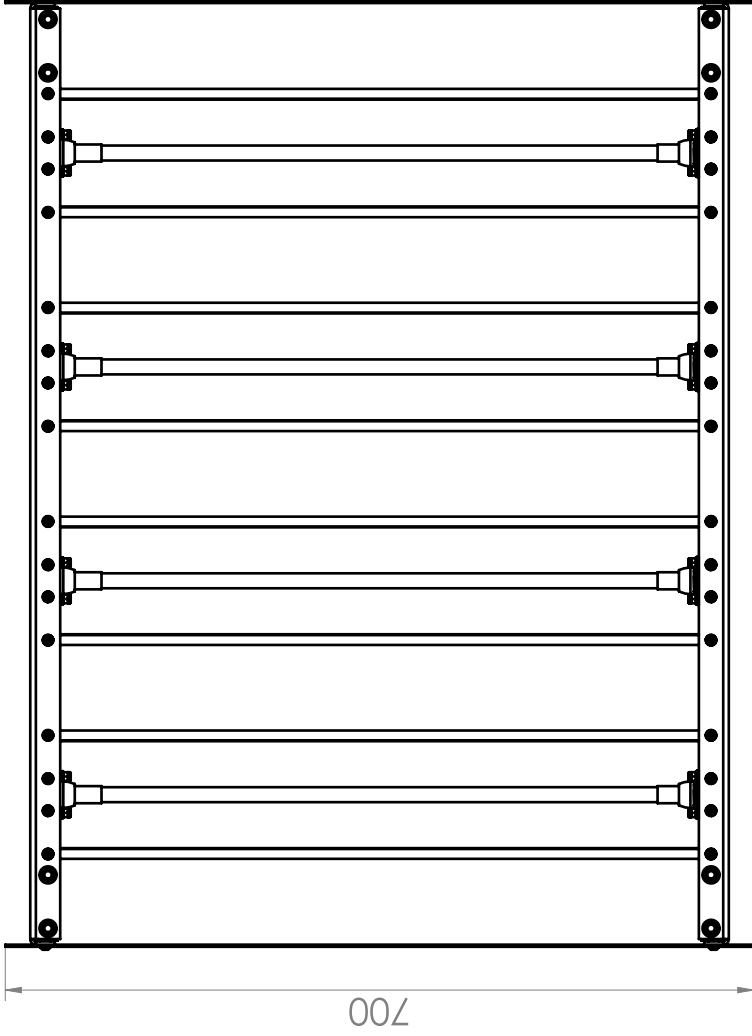


1:5

Format: A3

NMBU

Sammenstilling verktøyinnfestning



Dato: 10.05.18

Format: A3

Konstr./Tegnet:

Projeksjon:

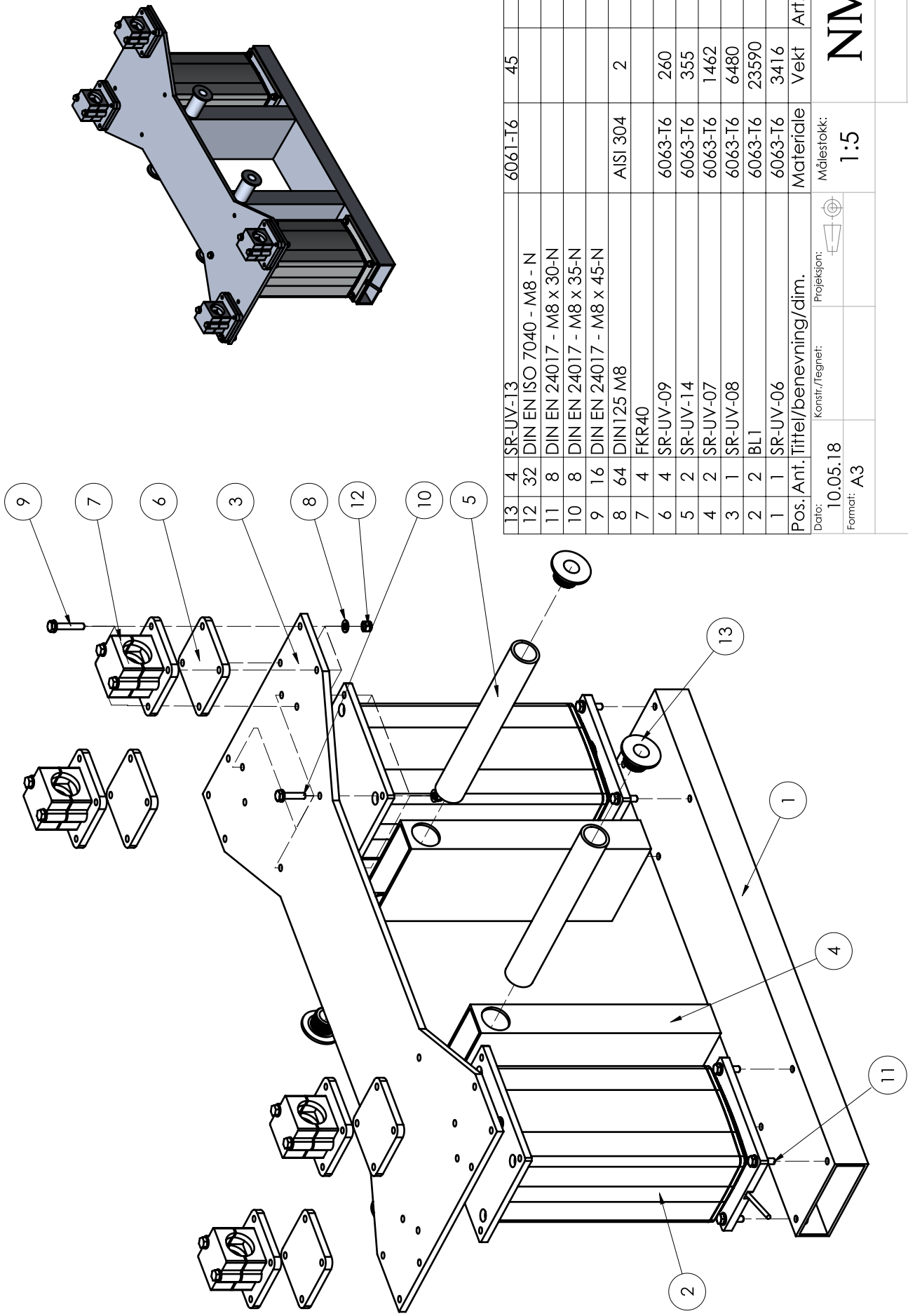


Målestokk:

1:5

NMBU

Sammenstilling lysmodul

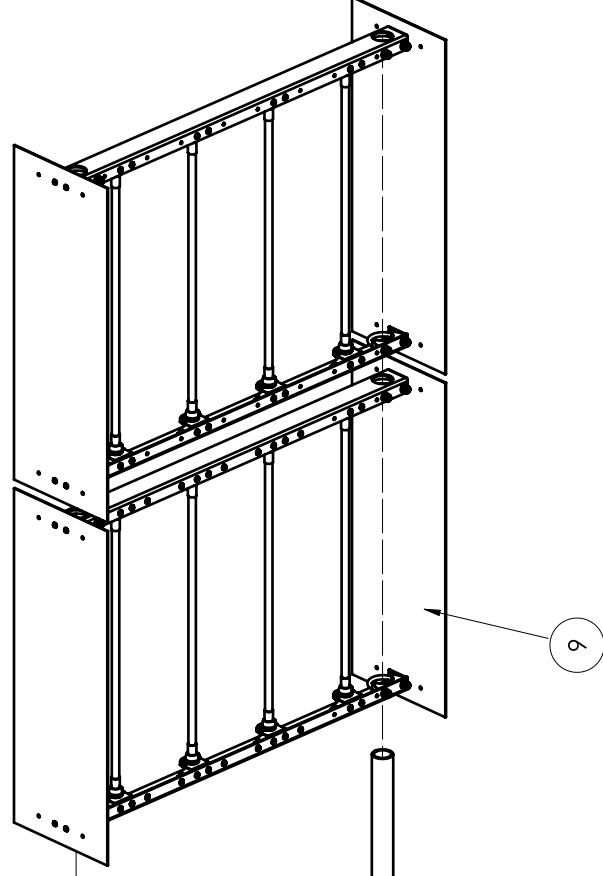


13	4	SR-UV-13	6061-T6	45
12	32	DIN EN ISO 7040 - M8 - N		
11	8	DIN EN 24017 - M8 x 30-N		
10	8	DIN EN 24017 - M8 x 35-N		
9	16	DIN EN 24017 - M8 x 45-N		
8	64	DIN125 M8	AISI 304	2
7	4	FKR40		
6	4	SR-UV-09	6063-T6	260
5	2	SR-UV-14	6063-T6	355
4	2	SR-UV-07	6063-T6	1462
3	1	SR-UV-08	6063-T6	6480
2	2	BL1	6063-T6	23590
1	1	SR-UV-06	6063-T6	3416
Pos./Ant.		Tittel/benevning/dim.	Materiale	Vekt
Art.				Art. nr./ref.

Date: 10.05.18  
 Format: A3  
 Konstr./tegn:   
 Prosjeksjon:   
 Målestokk: 1:5

**NMBU**

Løfteplattform eksplodert

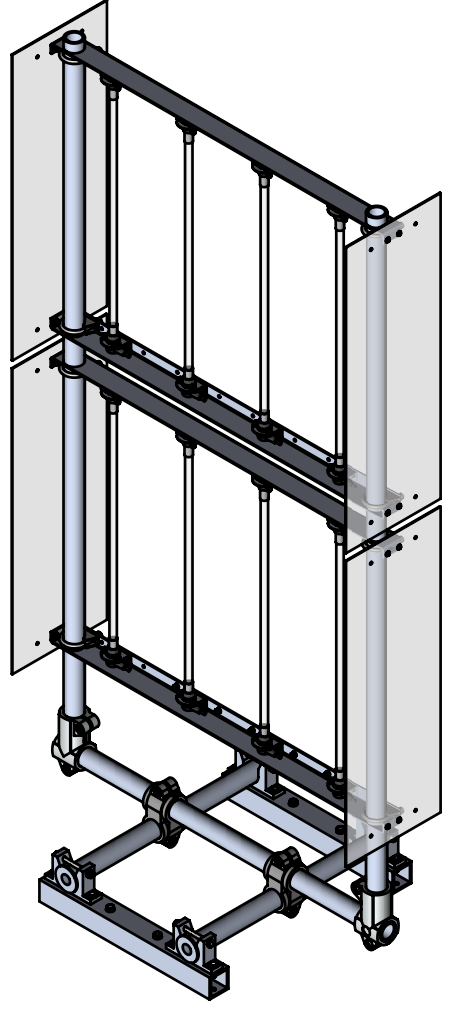


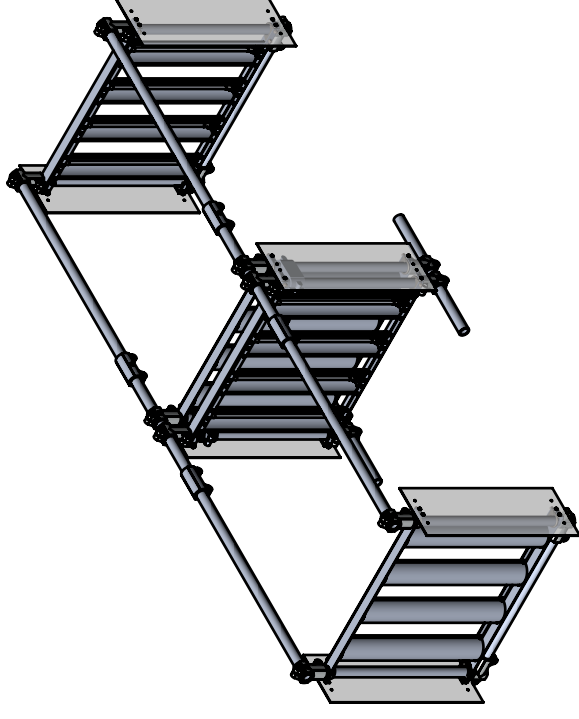
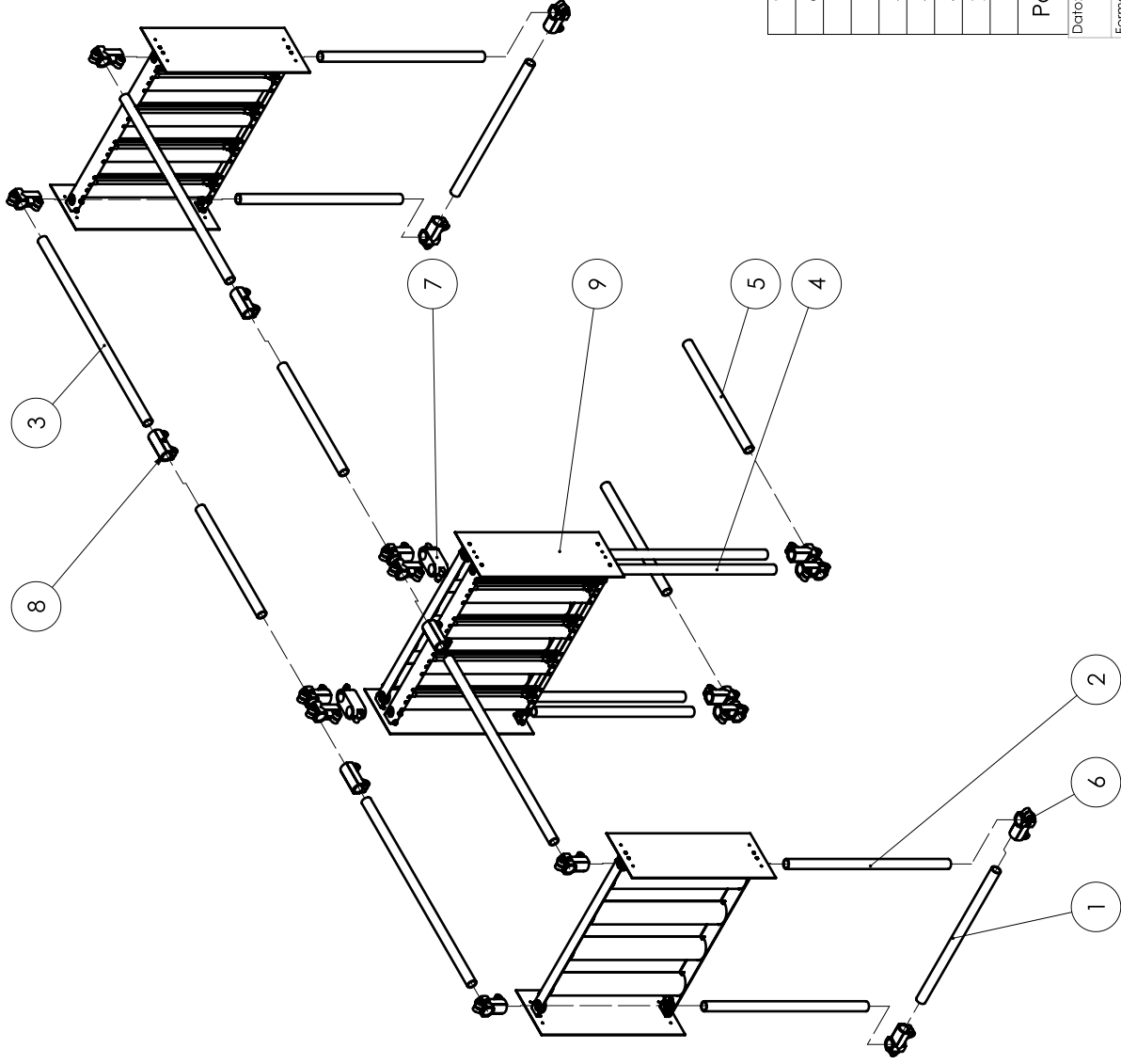
10	4	40x40x4	6063 T6		
9	2	Lysmodul			
8	4	DIN EN 24017 - M8x30	AISI 304		
7	4	DIN125 - M8	AISI 304		
6	2	K40	Alu		
5	2	W40	Alu		
4	4	SR-UV-13	6063 T6		
3	2	SR-UV-17	6063 T6		
2	2	SR-UV-16	6063 T6		
1	2	SR-UV-15	6063 T6		
Pos. Ant.		Tittel/benevning/clim	Materiale	Vekt	Art.nr./ref.

Date: 10.05.18  
 Konstr./tegner:  
 Prosjeksjon:  
 Målestokk: 1:10  
 Format: A3

**NMBU**

Sammenstilling KG





Pos.	Ant.	Tittel/benevning/dim	Materiale	Vekt	Art.nr./ref.
9	4	Lysmodul			
8	4	M40	6063 T6		
7	2	P40	6063 T6		
6	16	K40	6063 T6		
5	4	SR-UV-22	6063 T6		
4	4	SR-UV-21	6063 T6		
3	4	SR-UV-20	6063 T6		
2	4	SR-UV-19	6063 T6		
1	4	SR-UV-18	6063 T6		

Date: 10.05.18 Format: A3		Konstr./Tegnet:		Prosjeksjon:		Målestokk: 1:20	
				Materiale		Vekt	
				Art.nr./ref.		<b>NMBU</b>	

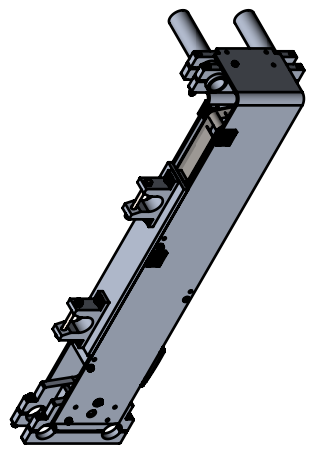
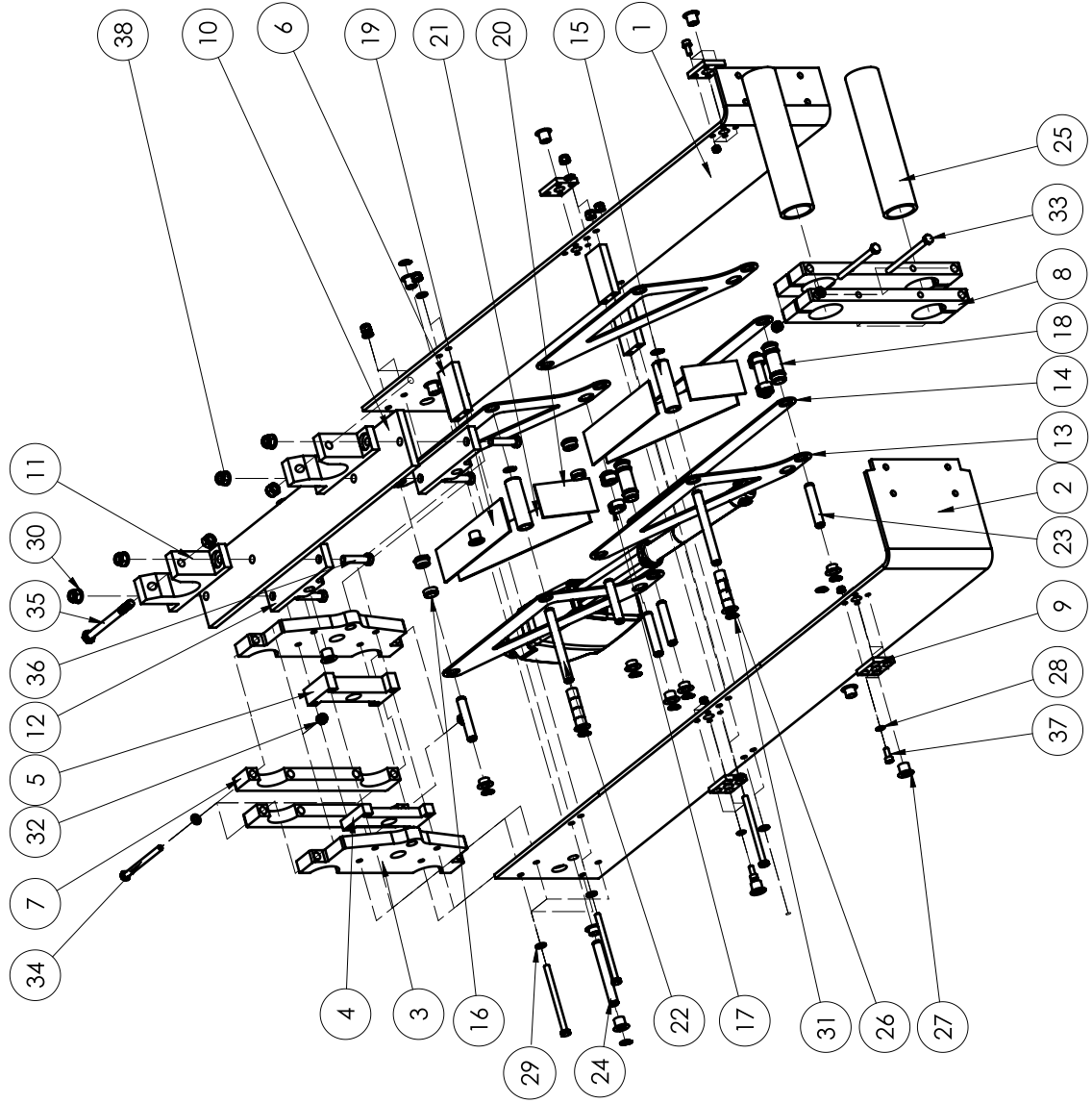
Sammenstilling SM eksplodert

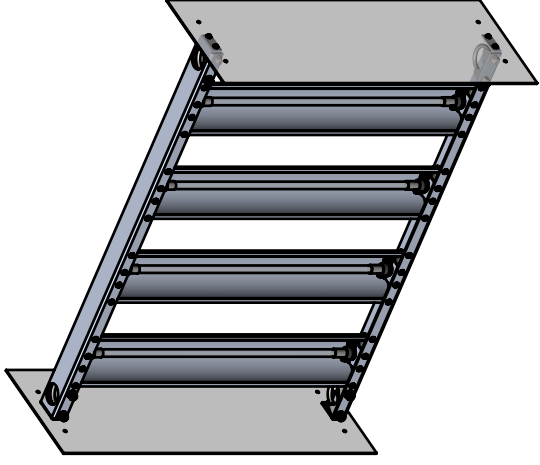
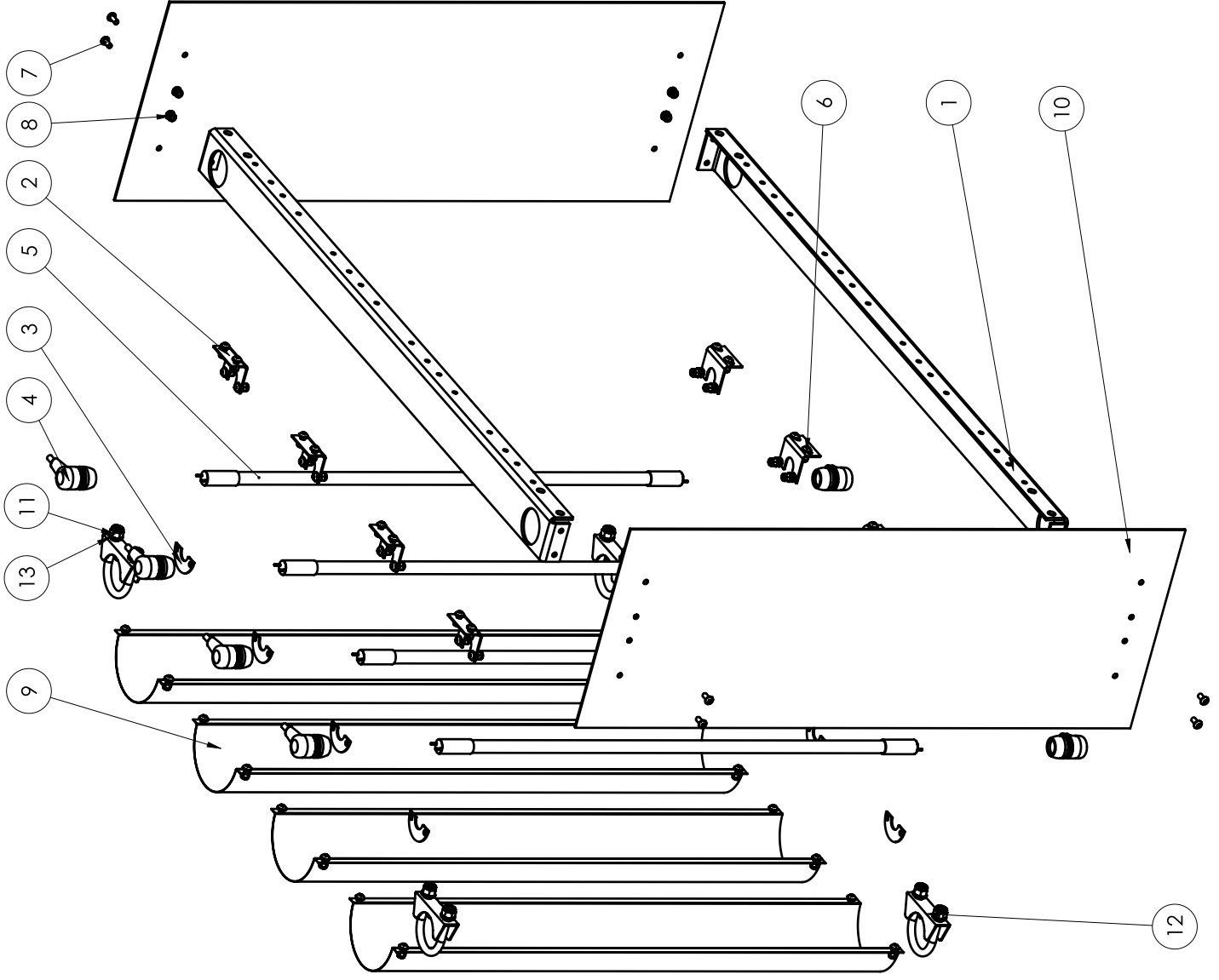
Pos.	Ant.	Tittel/benevning/dim.	Materiale	Vekt	Art.nr./ref.
38	6	DIN EN ISO 7040 M8			
37	16	ISO 10511 M5.12	AISI 304		
36	4	DIN EN 24014 M8 45	AISI 304		
35	2	DIN EN 24014 M8 90	AISI 304		
34	18	DIN EN 24014 M6 85	AISI 304		
33	8	DIN EN 24014 M6 80	AISI 304		
32	24	DIN EN ISO 7040 M6	AISI 304		
31	18	DIN471 M10	AISI 304		
30	8	DIN125 M8	AISI 304		
29	48	DIN125 M6	AISI 304		
28	16	DIN125 M5	AISI 304		
27	32	PPMF 101212			
26	6	PPM 101212			
25	2	SR-VI-25	6063		
24	1	SR-VI-24	6063		
23	5	SR-VI-23			
22	2	SR-VI-22			
21	2	SR-VI-21			
20	2	SR-VI-20	AISI 304		
19	2	SR-VI-19	AISI 304		
18	4	SR-VI-18	AISI 304		
17	2	SR-VI-17	AISI 304		
16	8	SR-VI-16	AISI 304		
15	2	SR-VI-15	AISI 304		
14	2	SR-VI-14	AISI 304		
13	4	SR-VI-13	AISI 304		
12	2	SR-VI-12	6063		
11	2	SR-VI-11	6082		
10	1	SR-VI-10	6082		
9	4	SR-VI-09	6063		
8	2	SR-VI-08	6063		
7	2	SR-VI-07	6063		
6	3	SR-VI-06	6063		
5	1	SR-VI-05	6063		
4	1	SR-VI-04	6063		
3	2	SR-VI-03	6063		
2	1	SR-VI-02	5754		
1	1	SR-VI-01	5754		

Dato:	10.05.18	Konstr./Tegnet:		Projeksjon:		Målestokk:	1:6
Format:	A3						

NMBU

Sammenstilling verktøynnfestning  
eksplodert





Pos	Ant.	Tittel/benevning/dim	Materiale	Vekt	Art.nr./ref.
13	8	DIN125 M8	AISI 304	2	
12	4	SR-UV-12	AISI 304	38	
11	8	ISO 7040-M8-N	AISI 304	374	
10	2	SR-UV-04	ABS PC	374	
9	4	SR-UV-05	6063-T6	122	
8	56	ISO 7041-M5-N	AISI 304		
7	56	ISO 7380 - M5 x 12 - 12N	AISI 304	0	
6	104	DIN125 - M5	AISI 304	0	
5	4	SR-UV-10	Glass	54	
4	8	SR-UV-11	Rubber	14	
3	8	SR-UV-03	6063-T6	3	
2	8	SR-UV-02	6063-T6	8	
1	2	SR-UV-01	6063-T6	530	
Pos	Ant.	Tittel/benevning/dim	Materiale	Vekt	Art.nr./ref.

Dato: 10.05.18  
Konstr./Tegnet:

Format: A3

Projeksjon:



Målestokk:

1:5

NMBU

Sammenstilling lysmodul ekspodert

## **Kilder (vedlegg)**

- [1] R. Hibbeler, Mechanics of Materials, 9th Edition, Pearson Education, 2013.
- [2] J. Johannessen, Tekniske tabeller, J.W. Cappelens Forlag A/S, 2013.
- [3] S. Norge, NS-EN 1999-1-1:2007 (Eurokode 9).
- [4] «4.188 BEAM188 3-D Linear Finite Strain Beam,» ANSYS, [Internett]. Available: [http://www.ansys.stuba.sk/html/elem\\_55/chapter4/ES4-188.htm](http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-188.htm).







**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway