





# Forord

Denne rapporten er en masteroppgave utarbeidet ved Institutt for matematikk og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) våren 2015. Masteroppgaven utgjør 16 ukers arbeid og tilsvarer 30 + 30 studiepoeng.

Rapporten tar for seg utvikling av et autonomt verktøy for ugressbekjempelse tilpasset et pågående studentprosjekt ved NMBU omhandlende en autonom landbruksrobot.

Arbeidet startet med et to ukers opphold ved det føderale universitetet i Rio de Janeiro (UFRJ). Kompetansen ved universitetet bidro i startfasen til å definere problemstillinger og rettlede kommende oppgaver innen robotikk, mekanikk og styringssystemer.

Det er utført studier av utfordringer og løsninger innen ugressbekjempelse, behovsanalyser, samt rapportering av utviklingsprosessen fra konsept til prototyping.

Vi ønsker å rette en stor takk til vår veileder førsteamanuensis Pål Johan From for god faglig støtte og for å muliggjøre et helhetlig prosjekt med teori og praksis. I tillegg vil vi også takke avdelingsingeniør Gunnar Torp på verkstedet for god hjelp med prototyping og senioringeniør Tom Ringstad for disposisjon av elektronikklaboratorium.



## Sammendrag

Våren 2014 ble det av studenter ved NMBU utviklet og bygget en prototype av en autonom landbruksrobot. Målet var å utvikle en plattform for drift av utskiftbare verktøymoduler for automatisering av repetitive oppgaver i landbruket. Denne rapporten er et utspring av dette prosjekt og omhandler utvikling og prototyping av et verktøy for autonom ugressbekjempelse tilpasset landbruksroboten.

Det er utført studier av økologisk landbruk for å avdekke utfordringer og løsninger innen ikke-kjemisk ugressbekjempelse. Resultater fra dette arbeidet er videre benyttet til å generere konsepter egnet til automatisk fjerning av ugress i grønnsaksåkre. Basert på konseptutredninger er løsning med størst antatt potensiale valgt for videre utvikling.

Bekjempelsesmetoder benyttet i valgt konsept er en kombinasjon av skrapepinner og høyintensive lasere med overordnet elektronisk styring for muliggjøring av autonom drift. Konseptet er videre utviklet og designet i SolidWorks og endelig produkt er klargjort for prototyping ved innkjøp av standardkomponenter og produksjon av egenutviklede komponenter.

Det er bygget en fungerende modulbasert prototype med mikrokontrollerbasert drift tilpasset montering på autonom landbruksrobot. Verktøymodulen har 10 faste og 4 motoriserte skrapepinner for mekanisk arbeid, og én lasermodul med effekt på 3 W og med bølgelengde 445 nm. Laserstrålen kan fokuseres på en gitt koordinat i verktøyets avgrensede behandlingsområde. Verktøymodulen veier 13,1 kg, er 680 mm lang, 600 mm bred og 500 mm høy.

Det er utført testing av prototypens separate komponenter for å vurdere kompatibilitet med den autonome landbruksroboten. Ytterligere forsøk relevant for lasermodulens grad av bekjempelse ved ulike bestrålingsvinkel og dose er også gjennomført.

Det er funnet at landbruksroboten i kombinasjon med utviklet verktøy kan bidra til å redusere bruk av plantevernmidler i jordbruk.

Prosjektet har ved analyse og forsøk med laserteknologi styrket troen på at termisk bekjempelse av ugress med laser har en posisjon i fremtidig jordbruksteknologi.



# Abstract

During the spring of 2014 students at the Norwegian University of Life Sciences developed and build a prototype of an autonomously agricultural robot. The goal of this work was to develop a platform for interchangeable tool modules that could automate repetitive agricultural tasks. This report is built upon previous work within that field and documents the development and prototyping of a tool for autonomously controlling growth of weeds.

There have been conducted studies of organic farming to reveal challenges and solutions in non-chemical weed control. The results from this work generated concepts suitable for automatic removal of weeds in vegetable fields. Based on concept studies the solution with the greatest estimated potential is selected for further development.

Methods of weeds control used in the selected concept is a combination of harrow tools and high-intensity lasers with electronic control enabling automatic operation. The concept is developed and designed in SolidWorks and is made ready for prototyping by purchase of standard components and production of proprietary components.

It is built a functioning modular prototype adapted to the autonomously agricultural robot controlled with microcontroller technology. The module has 10 permanent and 4 motorized harrows for mechanical work, and one laser module with an output of 3 W and wavelength 445 nm. The laser beam can focus on a given coordinate in the modules limited treatment area. The module weighs 13,1 kg, is 680 mm long, 600 mm wide and 500 mm in height.

It is conducted testing of the prototype's separate components to evaluate compatibility with the autonomous agricultural robot. Further experiments relevant for the laser module's degree of controlling weeds at different irradiation angles and doses are also conducted.

It is found that the agricultural robot in combination with the developed tool can help to reduce the use of pesticides in crops.

The project has by analysis and experiments with laser technology strengthened the belief that the thermal controlling of weeds with laser has a position in future agricultural technology.

## Innholdsfortegnelse

1	Innledning .....	1
1.1	Bakgrunn .....	1
1.2	Innledning til jordbruk og ugressbekjempelse .....	2
1.3	Problemstilling .....	3
1.4	Løsninger på markedet .....	3
2	Prosjektplan .....	6
2.1	Prosjekt målsettinger .....	6
2.2	Begrensninger for arbeidet .....	6
3	Metodebeskrivelser .....	8
3.1	Terminologi og begreper .....	8
3.2	Metodebruk og løsningsverktøy .....	10
4	Produktspesifisering .....	12
4.1	Metriske grensespesifikasjoner .....	12
4.2	Tidligvurdering av brukspåkjenninger .....	14
	Andre kravspesifikasjoner .....	15
5	Metoder for ugressbekjempelse .....	17
5.1	Beskrivelse av potensielle metoder .....	17
5.2	Sammenligning og utvelgelse av metoder .....	23
5.3	Utvidet beskrivelse og utfordringer ved valgte metoder .....	25
5.3.1	Laser .....	25
5.3.2	Skrapepinner .....	27
5.4	Oppsummering av valgte metoder .....	28
6	Konseptgenerering .....	29
6.1	Løsningsalternativer .....	29
6.1.1	Laserteknologi .....	29
6.1.2	Styring av lasermodulens treffpunkt .....	31
6.1.3	Mekanisk styresystem for bevegelige skrapepinner .....	36
6.1.4	Gjenkjenningssystem for kulturvekster .....	40
6.2	Konseptalternativer .....	42
6.3	Valg av konsept .....	45
6.3.1	Valg av metodekombinasjon .....	45
6.3.2	Endelig konsept .....	46
7	Produktarkitektur og konseptdesign .....	49
7.1	Funksjonsbeskrivelse .....	49
7.2	Egenutviklede komponenter .....	54



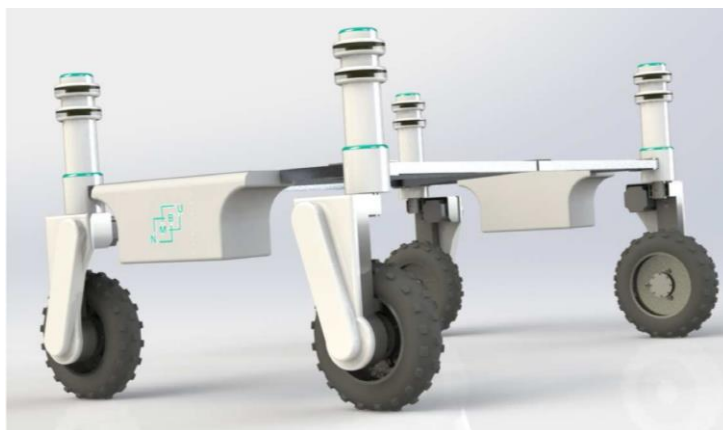
7.2.1	Bevegelige skrapepinner .....	54
7.2.2	Mekanikk for styring av laser .....	56
7.3	Modulisering og standardkomponenter .....	58
7.3.1	Laserstyring.....	58
7.3.2	Bevegelige skrapepinner .....	65
7.4	Sammenstilling.....	67
8	Utvikling av styringskomponenter.....	73
8.1	Overordnet styringselektronikk.....	73
8.2	Lasersensor for styring av skrapepinner .....	74
8.3	Styringselektronikk, laser .....	78
9	Prototyping og test .....	81
9.1	Målsettinger.....	81
9.2	Produksjon av komponenter .....	82
9.3	Sammenstilling.....	85
9.4	Beskrivelse av forsøk.....	86
9.4.1	Bestråling av ugressplanter.....	86
9.4.2	Forsøk med styring av lasermodul .....	88
9.4.3	Forsøk for å finne trekkraft .....	88
9.5	Gjennomføring og resultater.....	89
9.6	Kostnadsoverslag for prototype.....	92
10	Diskusjon .....	94
10.1	Konsept- og produktutvikling.....	94
10.2	Prototyping.....	95
10.3	Forsøk.....	98
11	Konklusjon .....	102
12	Referanser .....	103
13	Vedlegg .....	107



# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Høsten 2014 ble det av fem studenter ved NMBU utviklet og bygget en autonom landbruksrobot. Roboten skulle fungere som en plattform for drift av energieffektive verktøy med lavt behov for trekkraft. Dette kunne eksempelvis innebære verktøy for såing, sprøyting og innsamling av data. Prosjektet resulterte i en elektrisk drevet robot med 4 motoriserte roterbare hjul som vist i figur 1 [1].



*Figur 1 – Fremstilling av autonom landbruksrobot utviklet av studenter ved NMBU [1]*

Motivasjon for utvikling av en autonom landbrukstraktor ligger i problematikk relatert til jordpakking, høyt energiforbruk og generelt unødvendig og kostbar ressursbruk i dagens landbruk [2]. Fokus på økt effektivitet i moderne landbruk bidrar til tyngre maskiner, noe som i andre rekke gir lavere avling og økt behov for håndtering av sammenpakket jord. Tunge maskiner og repeterende arbeid kan gi skader på jordstrukturen som påvirker rotvekst, drenering, lufttilførsel og biologisk aktivitet. I tillegg fører jordpakking til økt energiforbruk da jorden blir tyngre å bearbeide.

Tradisjonelt jordbruk benytter et utvalg plantevernmidler for kontroll av ugress, sopp og insekter. Utstyret disse midlene spres i åkrer med er lite spesifikke, og bidrar til unødvendig spredning og ressursbruk. Stadig høyere press fra forbrukere og myndigheter øker også presset for å drive økologisk eller å redusere bruken av syntetiske plantevernmidler.

Med bakgrunn i NMBUs pågående utvikling av relevant teknologi og problematikken beskrevet er det interessant å utdype mulighetene for å utvikle et verktøy med formål om å redusere ressursbruken innen ugressbekjempelse.

## 1.2 Innledning til jordbruk og ugressbekjempelse

Jordbruk er en fellesbetegnelse som omfatter flere næringsgrener der foredling av jord om til kulturplanter eller beite er grunnlaget for virksomheten og er organisert i to grener:

- Åkerbruk - omfatter kultivering av jordbruksvekster som poteter, korn og fôrvekster.
- Hagebruk - omfatter kultivering av hagebruksvekster som grønnsaker, planter og blomster.

I Norge er rundt 3 % av landarealet dyrket mark. Det finnes i dag rundt 42 900 driftsenheter som drifter over 5 dekar jord. Av disse er rundt 2400 drevet økologisk [3].

Driften av jordbruket kan deles inn i to hovedkategorier: konvensjonelt jordbruk og økologisk jordbruk. Konvensjonelt jordbruket er uten begrensninger for bruk av blant annet kunstgjødsel og syntetiske plantevernmidler - i stor kontrast med det økologiske landbruket der all bruk av kunstgjødsel og syntetiske plantevernmidler er forbudt. Genmodifisert planter som har blitt svært utbredt i mange deler av verden er heller ikke lov i henhold til økologisk drift.

Den økologisk driften baserer seg på at alt skal være mest mulig naturlig og at økologisk balanse skal opprettholdes ved bruk av mest mulig lokale og fornybare ressurser. Hensynet til plantejordens struktur og fruktbarhet står i høysete. Fruktbarheten i plantejorden opprettholdes i stor grad ved å gjødsle med resirkulert, nedbrutt organisk materiale eller gjødsel fra husdyrproduksjon framfor bruk av kunstgjødsel [4].

Ugress i avling er et stort problem for de fleste bønder. I konvensjonelt jordbruk vil løsningen være å sprøyte med ulike sprøytemidler for å ta knekken på uønskede vekster. Alle plantevernmidler er giftig i svært ulik grad for mennesker og miljø, derfor gjøres det stadig arbeid innenfor plantevernforskning for å redusere bruken av giftige plantevernmidler. I det økologiske jordbruket er bruk av plantevernmidler for ugressfjerning ikke en mulighet, og det benyttes stort sett mekaniske løsninger som river eller kutter opp ugresset [5].

Omfanget av ugress og ulemper som medføres avhenger av hva som dyrkes. I en avling med korn kan man ha stor andel ugress uten at det går utover avlingen. Ved dyrking av f. eks. grønnsaker er det derimot ønskelig å fjerne mest mulig ugress. Dette skyldes at grønnsaksvekster ikke trives med konkurranse fra andre planter i vekstperioden. Konsekvensene av ufullstendig ugressfjerning vil være betydelig lavere avling og nedsatt kvalitet. I økologisk landbruk er ugress en større utfordring, og ekstra innsats for bekjempelse er helt nødvendig [6].

### 1.3 Problemstilling

Hvordan kan den autonome landbrukstraktoren benyttes for å redusere bruk av syntetiske plantevernmidler mot ugress i jordbruket?

### 1.4 Løsninger på markedet

Det er flere pågående forskningsprosjekter vedørende autonom ugressbekjempelse. Majoriteten består av halvautonome systemer beregnet for påmontering på tradisjonell traktor. De mest aktuelle løsningene gjennomgår. Kjemisk metode inkluderes da det er ønskelig å se i hvilke grad bruken kan reduseres.

Rent mekaniske metoder for bekjempelse av ugress er å foretrekke da bruken av plantevernmidler kan reduseres eller stoppes helt. Behandling skjer vanligvis av ugress i vekststadiet, da arbeid under jorden bør begrenses mest mulig grunnet høyt energiforbruk.

#### **Vitirover**

Dette er en autonom robot utviklet spesifikt for arbeid i vinranker. Roboten kjører í og utenfor planterader og kutter gress og andre ugressvarianter. GPS og sensorsystemer benyttes for å holde roboten i trygg avstand fra kulturplantene. Den er utstyrt med et solcellepanel for opplading av batteri som vist i figur 2 [7].



*Figur 2 – Vitirover, autonom robot for kutting av gress i vinranker [7]*

### **Robovator**

Dette er et halvautomatisk system som påmonteres en tradisjonell traktor. Verktøyet plasseres i bakkant av traktoren og er utstyrt med hydraulikkstyrte skrapepinner som river opp jordens øverste lag. Verktøyet er vist i figur 3. Når lukeredskapene nærmer seg en kulturplante, viker de ut til siden frem til planten er passert før redskapene igjen flyttes inn i planteraden.

Systemet benytter kameraer og bildegjenkjenning for styring av skrapepinner. Minimum avstand mellom plantene i raden er fem cm. Dette produktet er kun aktuelt for plantede kulturer, det vil si at radplanting og faste mellomrom benyttes [6].



*Figur 3 – Robovator består av moduler med bevegelige skrapepinner samt gåsefotskjær som kontinuerlig arbeider under jorden mellom planteradene [6]*

### **Kongskilde Vibro Crop Robotti**

Dette er en elektrisk drevet agrikulturell autonom robot egnet for drift av ulike verktøy, blant annet for såing og ugressbekjempelse. Roboten kombinerer GPS og lokal gjenkjenningsteknologi for navigering, og kan operere både helautomatisk og halvautomatisk.

For ugressbekjempelse er det utviklet et verktøy som mekanisk renser radene på et grønnsaksjorde med fast avstand mellom planterader. Verktøyet renser ikke arealet mellom hver plante i planteraden. Figur 4 viser roboten med påmontert verktøy for ugressbekjempelse.



*Figur 4 – Autonom robot med verktøy for mekanisk ugressbekjempelse [8]*

## Hortibot

Selv om den generelle bruken av plantevernmidler er omstridt er det mulig å oppnå gode resultater med selektiv sprøyting og følgelig redusere bruken betraktelig.

Hortibot er et prosjekt utviklet ved Universitetet i Aarhus. Påmontert en autonom landbruksrobot er et verktøy som ved hjelp av bildeprosessering gjenkjenner flere varianter ugress og presisjonsbehandler det aktuelle området med plantevernmidler. Roboten kan redusere bruken av disse midlene med opptil 75 prosent [9]. I figur 5 er fremparten av roboten utstyrt med presisjonsdyser som kan styres individuelt og sprøyte ønsket område.



*Figur 5 – Hortibot, autonom landbruksrobot med verktøy for selektiv sprøyting [9]*

## 2 Prosjektplan

### 2.1 Prosjektmålsettinger

Ettersom det er ønskelig å redusere bruken av plantevernmidler fokuseres prosjektet på økologisk jordbruk, der kun ikke-kjemiske bekjempelsesmetoder tillatt.

#### Hovedmål

Hovedmålet med prosjektet er å utvikle, dokumentere og teste et verktøy for å avdekke hvordan den autonome landbruksroboten kan brukes til ugressbekjempelse uten bruk av syntetiske plantevernmidler.

#### Delmål

- Kartlegging av eksisterende løsninger og behov innen ugressbekjempelse
- Utvelgelse av bekjempelsesmetoder kompatible med den autonome landbruksroboten
- Utvelgelse av konseptalternativ
- Utvikling og design av konsept
- Bygging av prototype
- Testing og identifisering av forbedringspotensialer

### 2.2 Begrensninger for arbeidet

Arbeidet med utviklingen av verktøyet fokuseres på produktets konseptuelle funksjon. Følgende aspekter vil inngå som begrensninger i oppgaven.

- **Utvikling og implementering av sensorer for gjenkjenning av ugress**  
Ved autonom ugressbekjempelse må det ved bruk av enkelte metoder benyttes utstyr som gjenkjenner ugress. Ved eventuelt behov for aktuell teknologi, vil det antas at relevant data er tilgjengelig for igangsettelse av autonom drift.
- **Automatisert festemekanisme mellom verktøy og landbruksrobot**  
For helautonom drift må utbygging av verktøy også være automatisert. Det vil antas i denne oppgaven at et slikt system er tilgjengelig.
- **Kommunikasjon mellom verktøy og landbruksrobot**  
Toveiskommunikasjon mellom verktøy og robot er nødvendig for overordnet kontroll av det helhetlige systemet.



- **Dimensjonering av struktur og mekaniske komponenter**  
Oppgavens hovedmål er å utvikle et konseptuelt verktøy for å avdekke om landbruksroboten kan benyttes til å bekjempe ugress og samtidig redusere bruken av syntetiske plantevernmidler. Det er derfor ikke hensiktsmessig å dimensjonere struktur eller andre mekaniske komponenter, såfremt det ikke er av avgjørende betydning for konsept.
- **Estetiske hensyn**  
Inkluderer deksler og andre komponenter. Dette har bakgrunn i prosjektets mål, der affektive kundebehov ikke inngår i en konseptuell utvikling.
- **Ekstern konsepttesting**  
Konsepttesting bør inngå i produktutviklingsprosesser for tidlig å avdekke feil eller mangler. For dette prosjektets omfang er det derimot mer passende å gjennomføre ekstern konsepttesting i neste del av det totale prosjektet. Det er mer presist og gir større utbytte med konsepttesting av eventuell prototype. Det er ønskelig med kvantitative data i en konsepttest, som bedre lar seg utføre på et senere punkt.

### 3 Metodebeskrivelser

#### 3.1 Terminologi og begreper

Tabell 1 – Beskrivelse av begreper brukt i oppgaven

Begrep	Beskrivelse
CNC	Computer Numerical Control er et datastyrt maskineringsverktøy for produksjon av deler [10]
Kulturplante	Fellesbetegnelse på planter som med hensikt dyrkes [6]
Injeksjonsstøpning	Produksjonsmetode som benytter flytende materiale injisert inn i en tilpasset form [10]
3D - printing	Produksjonsmetode som smelter lag på lag av materiale som utgjør en komponent [10]
CAD	Computer Aided Design. Teknisk tegning utført ved hjelp av datamaskinbasert programvare [10]
Arduino	Mikroprosessorbasert elektronikkplattform [11]
Halvleder	Er stoffer som i ren form ikke leder strøm, men som kan modifiseres til å lede strøm [12]
Doping, halvleder	Prosess der urenheter tilsettes halvledere for å oppnå visse egenskaper
Innebygget logisk krets	Elektronisk krets på en plate av silikon [13]
N/A	Forkortelse for «ikke relevant»
PWM	«Pulse Width Modulation» - en måte å styre firkantpulsers pulslengde [14]
Operasjonsforsterker	Er en elektrisk forsterker som brukes i analoge signalsystemer [15]
SSR	«Solid State Relay» - er en halvlederbasert relé uten bevegelige deler [16]
Arbeidssyklus	Er en definisjon på hvor stor del av en periodetid som er aktiv
Potentiometer	Variabel elektronisk resistor [17]
Cutoff-frekvens	Er grensefrekvensen der et systems flyt av energi er begrenset med en viss faktor [18]
Ettårig ugress	Overlever kun året det har spiret, men vokser raskt og kun gjennom frø [6]
Rotugress	Spirer på samme rot som året før. Har høyere motstandsdyktighet enn ettårig ugress [6]
Potentiometer	Justerbar elektronisk resistans [19]
IP-klassifisering	Angir grad av beskyttelse mot støv og vann i elektrisk utstyr [20].
ED <sub>90</sub>	Dose nødvendig for å bekjempe 90 % av målet

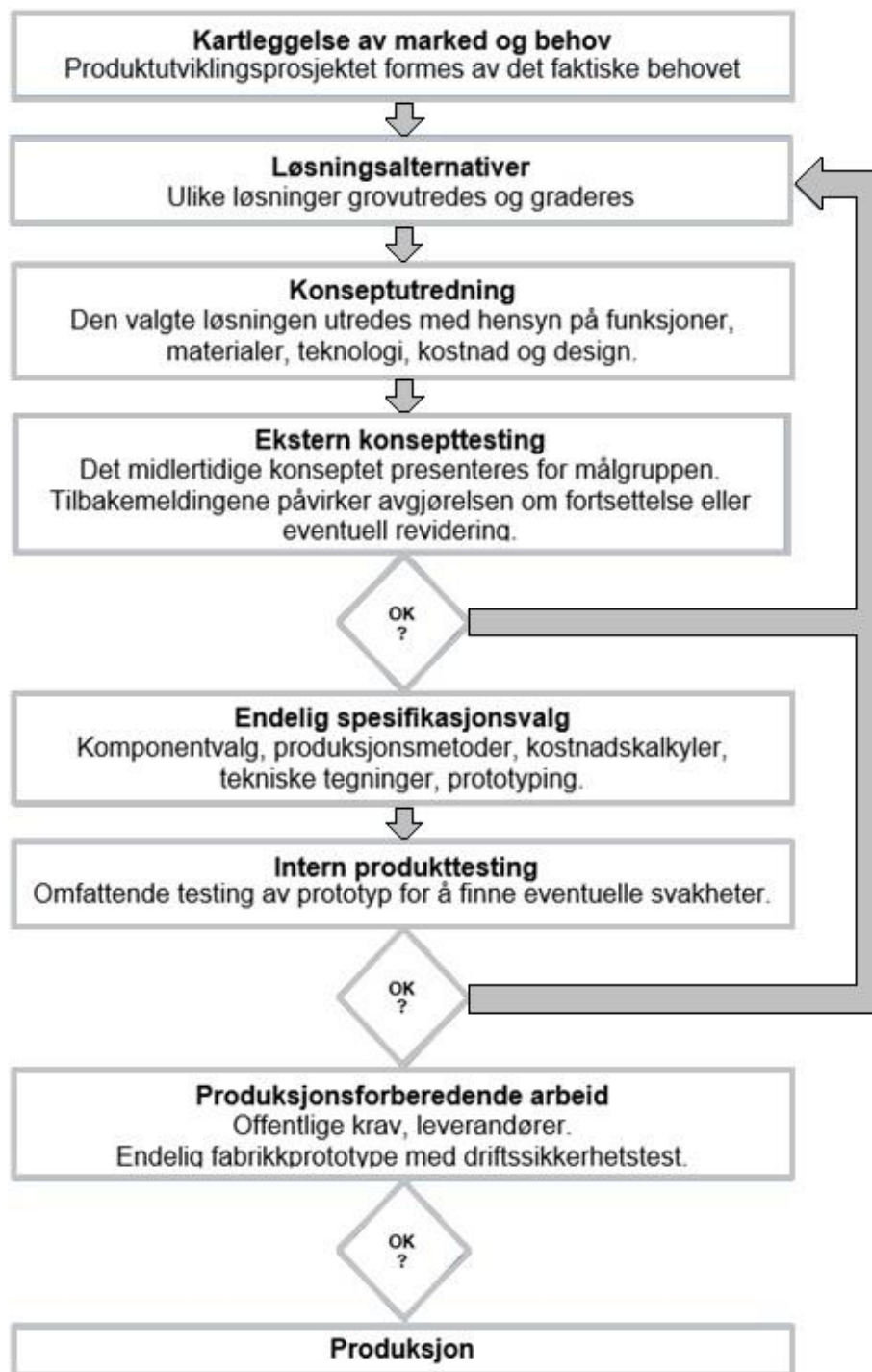
Tabell 2 – Symboler benyttet i oppgaven

<b>Notasjon</b>	<b>Beskrivelse</b>	<b>Benevning</b>
F	Kraft	N
M	Moment	Nm
t	Tid	s
P	Effekt	W
V	Fart	m/s
E	Energi	J
$\eta$	Virkningsgrad	-
$\omega_e$	Vinkelfrekvens motor	rad/s
$\xi$	Reduksjon, gir	-
R	Elektronisk resistans	$\Omega$
C	Elektronisk kapasitans	F
f	Frekvens	Hz

### 3.2 Metodebruk og løsningsverktøy

#### Produktutvikling

Det benyttes en systematisert produktutviklingsprosess i denne prosjektoppgaven. Teknikken beskriver anbefalt rekkefølge av prosjektets elementer og er itererende – betydende at prosessen evalueres ved gitte sjekkpunkter der det midlertidige arbeidet enten videreføres – eller at prosessen begynner fra et gitt startpunkt igjen [10]. Figur 6 beskriver en generell fremgangsmåte der alle elementer er ikke relevante i alle typer prosjekter.



Figur 6 – Illustrasjon av fremgangsmåte benyttet for en komplett produktutviklingsprosess

### **Pughs metode**

Pughs metode er en kvantitativ teknikk benyttet for å rangere potensielle løsninger for et problem. Teknikken gjennomføres ved å samle kriterier og løsningsalternativer i en seleksjonsmatrise. Hvert kriterium vektlegges med en prosentats basert på relevans og løsningsalternativene graderes individuelt. Endelig poengsum er summen av graderte poengsummer fra hvert kriterium.

Er et nyttig verktøy for oversiktlig representasjon av flere løsninger [10]. Pughs metode er benyttet i flere av utvelgesprosessene i denne prosjektrapporten.

### **Programvare benyttet**

- 3D-modellering: SolidWorks 2014-2015
- Tekstredigering: MS Word 2014
- Tallbehandling: MS Excel 2014
- Bilderedigering: Adobe Photoshop 2011 og MS Paint 2014
- Materialeegenskaper: EduPack 2014
- Koblingsskjemaverktøy: Scheme-it
- Blokkdiagramverktøy: Draw.io
- Programmering av mikrokontrollere: Arduino IDE 1.6.4

## 4 Produktspesifisering

Eksterne forhold relevant for utviklingen av verktøyet gjennomgås for å bestemme overordnede spesifikasjoner for verktøyet. Dette omfatter eksterne faktorer inkludert driftsutstyr, bruksområde og minimumskrav.

### 4.1 Metriske grensespesifikasjoner

Verktøyets eksterne metriske mål må være kompatible med omkringliggende forhold inkludert bruksområde, utstyr fra tredjepart og eksterne krav.

#### Autonom landbruksrobot

Verktøyet skal påmonteres den autonome landbruksroboten og må derfor være kompatibel med robotens mål.

Figur 7 viser aktuell landbruksrobot der tilgjengelig område for påmontering av verktøy er 1.0 m \* 1.3 m. Høyde fra ramme til underlag er 0,3 meter. Verktøyets maksimale yttermål må derfor ikke overstige disse verdiene.

Referansepunkt for videre arbeid med landbruksrobot og verktøy er vist i figur 7. X-retning er bevegelsesretningen til det komplette system.



Figur 7 – Autonom landbruksrobot utviklet ved NMBU. Skal benyttes som plattform for autonomt verktøy for ugressbekjempelse. X - retning er robotens kjøreretning [21]

Tabell 3 – Spesifikasjoner til autonom landbruksrobot [1]

Spesifikasjoner	Verdi
Bakkeklaring	300 mm
Bredde	1300 mm
Lengde	1000 mm
Maksimal trekkraft	1,32 kN

### Spesifisering av arbeidsområde

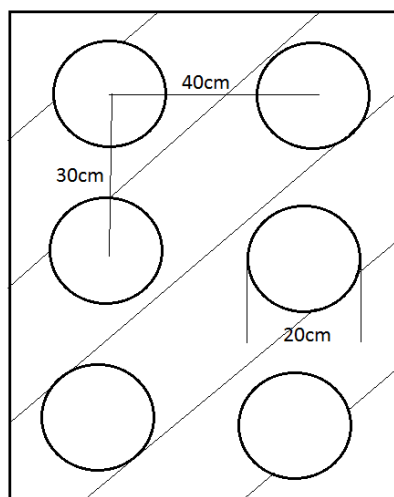
Det er stor variasjon mellom ulike kulturplanter og hvilket vekstmiljø som foretrekkes. Det er derfor viktig å tilpasse verktøyet til kulturplantens dimensjoner og omkringliggende forhold.

Tilveksten av ugress og ugressvariant varierer også mellom valg av kulturplante, og må tas hensyn til ved valg av metode for ugressbekjempelse.

Dyrking av korn forgår i dag ved at verktøy på traktorer dekker store arealer, slik at det kun er nødvendig med ett hjulsporpar for et spesifikt område. Da har man mulighet til å dyrke kornet tett og i noen grad tilfeldig plassert. Dette vanskeliggjør implementering av en landbruksrobot med mindre sveipeområde.

Grønnsaker dyrkes med en fast avstand mellom kulturplanter i planterader, og mellom planterader. Dette krever arbeid i alle områder ikke dekket av kulturplanter, og må derfor behandles mer omfattende enn ved dyrking av korn. Ettersom det er større behov for arbeidskraft i grønnsaksdyrking og at radavstanden muliggjør repeterende kjøring av landbrukstraktoren, fokuseres utviklingen av verktøyet kun mot bruk i sammenheng med dyrking av grønnsaker [6].

Figur 8 illustrerer et utsnitt av en grønnsaksåker der det skraverte området er utsatt for ugressvekst og sirkler er kulturvekster. Påskrevet er også maksimumsavstander mellom kulturplanter og plantediameter. Disse verdiene er viktig for å bestemme verktøyets behandlingsområde. Verktøyet må være i stand til å behandle hele det skraverte området i figuren.



Figur 8 – Dimensjoner av og mellom kulturplanter. Maksimumsavstanden mellom kulturplanter er i og mellom planterader hhv. 30 cm og 40 cm. Maksimal dimensjon på kulturplante er satt til 20 cm

### **Dimensjoner av kulturplanter**

Kulturplanters dimensjoner varierer mellom 0\*0 cm til 20\*20 cm (diameter \* høyde) som illustrert i figur 8. Dette inkluderer blant annet salater, kålvarianter, gulrot og beten [6].

### **Planteplassering**

Maksimal avstand mellom planterader er 40 cm og 30 cm mellom plantene i planteraden.

## **4.2 Tidligvurdering av brukspåkjenninger**

Det gjennomføres en helhetsvurdering av brukspåkjenninger for å avdekke potensielle problemer på et tidlig stadium vedrørende konsept- og komponentutvikling. Dette benyttes i et senere tidspunkt til å verifisere at alle komponenter er egnet for bruk i verktøyet.

### **Vibrasjon**

Vibrasjon av ulik grad vil til enhver tid utøves på landbruksroboten og verktøyet. Nivået avhenger av kjøretøyets hastighet og jordoverflatens struktur. Komponenter sensitive for vibrasjon kan ikke velges.

### **Trykkbelastning og bøyemomenter**

Produktet må dimensjoneres tilstrekkelig for jevne belastninger påført ved montering, drift eller andre tilfeller. Dimensjonering inngår ikke i denne prosjektrapporten. Det må likevel tas likevel hensyn ved å identifisere kritiske områder og velge komponenter på bakgrunn av forventet belastning.

### **Slag og støt**

Uønskede plutselige påkjenninger kan oppstå ved uhell, feilbruk eller uegnede omgivelser. Design av verktøy må gjøres på bakgrunn av innledende analyse av kraftfordeling ved eventuelle slag eller støt.

### **Fuktighet**

Komponenter ikke beregnet for kontakt med vann kan likevel utsettes for vannsprut eller høyere luftfuktighet i kortere perioder. Riktig IP-klasse for ulike komponenter må vurderes.

### **Variierende temperaturer**

Alle komponenter er utsatt for varierende temperatur generert av interne og eksterne årsaker. Dette kan blant annet forårsake kondens og endring av materialegenskaper.

### **Passive faktorer**

Støv, jord, sand og andre faste partikler kan trenge inn i komponenter og utgjøre ytterligere brukspåkjenning for bevegelige deler eller elektronikk. Riktig IP-klasse for komponenter må vurderes.



## **Andre kravspesifikasjoner**

Når mulig fastsettes spesifikke kravspesifikasjoner. I andre tilfeller utføres en grovvurdering for å utelukke svake konsepter og løsninger. Alle krav i dette delkapittelet må tilfredsstilles for utvikling av en maskin i henhold til prosjektmålsettingen.

### **Modulbasert**

Verktøyet skal være modulbasert – det vil si at flere identiske verktøy skal kunne sammenkobles. Dette øker produktets fleksibilitet da verktøyet kan tilpasses hvert enkelt bruksområde, bidrar til lavere utvikling- og produksjonskostnad og letter håndtering.

Det settes krav ved modulisering at sammenkobling ikke bidrar til overlapping eller dødsoner av behandlingsområder. Det er derfor nødvendig at hver modul kan behandle underliggende område helt ut til modulens kant.

### **Effektivt behandlingsområde**

Verktøyet må utformes slik samme område ikke behandles flere ganger.

### **Vekt**

Verktøymodulens vekt må være lavere enn landbruksrobotens maksimal nyttelast på 150 kg [21].

### **Energiforbruk**

Komponenter og funksjonsmetoder som inngår og benyttes i verktøyet må velges på bakgrunn av totalt energiforbruk. Aspekter som må tas hensyn til innebærer: friksjon mellom redskap og jord, styringselektronikk, elektromekanisk utstyr og virkningsgrad på ikke-mekaniske metoder.

### **Minimum driftssyklus**

Verktøyets interne komponenter er ikke alle i maksimal aktivitet til enhver tid. Dette er en naturlig konsekvens av landbruksrobotens nødvendige bevegelser inkludert radskifte, snuoperasjoner og eventuelle start-stopp-prosedyrer. Det er utover naturlige avbrytelser krav til at alle komponenter tåler minimum driftssyklus på 70%.

### **Hastighet**

Landbruksrobotens maksimale hastighet er 1 m/s. Det vil være hensiktsmessig med et verktøy som kan arbeide i denne hastigheten, men realistisk hastighet begrenses til halvparten.

### **Kostnad**

Tas hensyn til på et overordnet nivå, der verktøyets kostnad ikke må overgå nytteverdien. Nytteverdi utledes ikke i denne oppgaven.

### **Vedlikehold**

Verktøyet skal utvikles for å ideelt sett være vedlikeholdsfritt.

### **Driftssikkerhet**

Komponenter som inngår i verktøyet må alle holde et minimumskrav til driftssikkerhet basert på levetidsberegninger, eksterne godkjenninger og annet tilgjengelig materiell.

### **Sikkerhet**

Ettersom verktøyet skal påmonteres en autonom landbruksrobot og arbeide uten tilsyn, er det påkrevet at metoden benyttet for ugressbekjempelse ikke utgjør fare for omgivelsene i henhold til maskinforskriften [22].

### **Matsikkerhet**

Produktet skal benyttes ved produksjon av næringsmidler og omfatter derfor matloven [23] og regulering EC no. 1935/2004 som omhandler materialer og produkter ment for kontakt eller indirekte kontakt med mat. I praksis betyr dette at det kan være nødvendig å bruk materialer som ikke utgjør fare for forgiftning. Dette gjelder i tillegg materialer benyttet ved produksjon og eventuelle rester.

Produktet kan være i kontakt med mat, det må derfor vurderes om produksjonen må skje i henhold til GMP (Good Manufacturing Practice) beskrevet i EC no. 2023/2006 [24].

### **Korrosjon**

Verktøyet operer utendørs og med følgelig korroderende miljø. Utsatte komponenter må derfor være av korrosjonsbestandige materialer. Ved eventuell prototyping tas det mindre hensyn ved valg av materialer.

## 5 Metoder for ugressbekjempelse

Dette kapittelet utleder potensielle teknologier, utfordringer og løsninger innen ugressbekjempelse. Målet er å identifisere metoder med best potensiale for autonom drift.

### 5.1 Beskrivelse av potensielle metoder

Det er en rekke metoder for ugressbekjempelse på markedet. Her beskrives metoder som fra et grovperspektiv tilfredsstillende beskrevet i kapittel fire. Kun termiske og mekaniske metoder vurderes.

Alle verktøy som er tenkt påmontert en landbruksrobot må designes med hensyn på robotens begrensninger. Innen bekjempelse av ugress er energikrevende metoder i utstrakt bruk. Ettersom landbruksroboten har begrenset med kraft og batterikapasitet, kan kun metoder som bearbeider jorden minst mulig vurderes. Metodene beskrevet under arbeider derfor kun i jordens øverste lag og vil følgelig kun være nyttig mot ettårig ugress. For at disse metodene skal være av nytte må det derfor utføres grundig jordarbeid for fjerne rotgress på et tidligere stadium [6].

Fra gjennomgang av artikkel om plantevern og plantehelse i økologisk landbruk av Bioforsk [6] vurderes følgende metoder:

- Termisk bekjempelse med laser
- Roterende børste
- Skrapepinner
- Gåsefotskjær
- Flamming

#### Laser

Oppvarming av ugressets stamme skader cellene og hemmer videre vekst. Dette kan utføres ved bruk av en høyintensitets laser med bølgelengde som absorberes i ugresset som vist i figur 9. Laser kan benyttes til bekjempelse av ugress både i og utenfor planterader, og kan derfor være et fullgodt alternativ som verktøy.



Figur 9 – Bestråling av ugressets stamme med et håndholdt laserredskap [25]

Bruk av laser krever bildegjenkjenningsutstyr for differensiering av planter og kan i noen tilfeller også være avhengig av eksternt elektronisk ekstrautstyr. Laser er kun effektiv hvis ugressets bestråles på korrekt plassering, og er derfor avhengig av et nøyaktig mekanisk styringssystem [25].

#### *Beregning av energiforbruk*

Det er ønskelig å finne energiforbruk ved isolert bruk av laser for bekjempelse av ugress. Dette gir sammenligningsgrunnlag ved vurdering av andre bekjempelsesmetoder. Ved beregning tas det ikke hensyn til energiforbruk for bevegelse av laserstråle eller landbruksrobot til riktig treffpunkt.

Tabell 4 – Relevante data for beregning av energiforbruk ved bekjempelse av ugress med laser [25]

Egenskap	Verdi
ED <sub>90</sub> , snittverdi ugress [25]	2,2 J
Antall ugressplanter [6] <sup>1</sup>	150/m <sup>2</sup>
Virkningsgrad, lasermodul	20 %

<sup>1</sup> Antall ugressplanter per m<sup>2</sup> kan variere kraftig [26]

$$E_{tot} = \frac{\text{antall planter} \cdot \text{verdi ED}_{90}}{\text{Virkningsgrad}} \quad (1)$$

$$E_{tot} = \frac{150 \cdot 2,2}{0,2} = 1650 \text{ J/m}^2$$

Fra ligning 1 beregnes forventet energiforbruk per kvadratmeter ved isolert bruk av laser mot ugress.

Metoden er energieffektiv, nøyaktig og krever lite vedlikehold. Kostnad er derimot relativ høy og noe begrenset behandlingshastighet må beregnes per laserstråle. Det bør tas hensyn til sikkerhetsaspekter innen brann og personskade [6].

#### **Børste**

Roterende børster benyttes i dag for rensing av ugress mellom planteradene. Børsten opererer kun i det øverste jordlaget, og sveiper effektivt i radene mellom plantene. Børsten river i stykker ugress, og berører ikke nyttevekstens areal. Noen varianter børster hele jordets areal, og kan derfor kun benyttes nå kulturplanten er motstandsdyktig nok til å ikke ødelegges av børsten.

Børster anvendes ikke for rensing mellom plantene i planteraden, og er derfor ikke et fullverdig alternativ. Det kan i midlertidig kombineres med andre metoder. I figur 10 er bruk av børster demonstrert i en grønnsaksåker.

*Teoretisk energiforbruk*

Grovvurdering av energiforbruk benyttes ved sammenligning med andre metoder. Det tas ikke hensyn til drift av landbruksrobot eller nødvendig trekkraft grunnet friksjon mellom børste og jord.

Tabell 5 – Relevante spesifikasjoner for en elektrisk børstemodul [27]

Egenskap	Verdi
Motoreffekt	200 W
Diameter, børste	300 mm
Behandlingsareal, børste	0,071 m <sup>2</sup>
Antatt behandlingshastighet	0,93 m/s

$$E_{tot} = \frac{1}{\frac{A_{børste}}{V_{robot}} \cdot d_{børste}} \cdot P_{motor} \quad (2)$$

$$E_{tot} = \frac{1}{\frac{0,071}{0,93} \cdot 0,3} \cdot 200 = 909 J$$

Fra ligning 2 beregnes forventet energiforbruk per kvadratmeter ved isolert bruk av børste mot ugress. Motoreffekten er valgt på bakgrunn av forskning på drift av børste med elektromotor [27].

Bruk av børste fjerner 45-90 % av ettårig ugress i tidlig vekststadium ved arbeidsdybde på 15 mm. Høyest effektivitet oppnås når behandlingshastighet er 2 km/h [27].

Lav fleksibilitet er en utfordring ved metoden. Dette har spesielt innvirkning ved spesialtilpasning av utstyr, noe som kan begrense autonom drift. Metoden er energieffektiv, rimelig og hurtig, men lav fleksibilitet er utfordrende [6].



Figur 10 – Roterende børste i arbeid mellom planteradene [6]

### **Skrapepinner**

Skrapepinner er metallprofiler som slepes langs jordet, og som jobber et par cm under jordoverflaten. Ved fast montering er det omtrent 5 cm mellom hver pinne [6]. Disse skraper opp røtter og ødelegger ugress. Skrapepinner anses som en av de rimeligste verktøyene mot ugress mellom planteradene og har like god effekt på ugress som andre mekaniske verktøy [6]. Metoden kan kun benyttes når kulturveksten er godt etablert og det generelt er lite ugress. Figur 11 viser et skrapepinneredskap arbeide i et jorde med lav ugress tetthet.



*Figur 11 – Skrapepinner med fjæring som arbeider mellom planteradene [6]*

Fastmonterte skrapepinner sveiper kun over arealet mellom planteradene, men kan på grunn av verktøyets begrensede størrelse tilpasses til sveip mellom plantene i planteraden. Dette krever et automatisert system for gjenkjenning av nyttevekster.

Ved automatisert bruk kan antall pinner reduseres ved å benytte en motor til å sveipe pinnene også på tvers av traktorens kjøreretning. Med denne fremgangsmåten er det mulig at pinnene dekker hele arealet utsatt for ugress.

Løsningen er svært effektiv mot ugress, fleksibel og har lavt energiforbruk. Finjustering av pinner kan derimot være aktuelt [6].

### **Gåsefotskjær**

Gåsefotskjær er en innretning bestående av et flatt metallblad som skjærer jorden horisontalt mellom planteradene. Skjæret opererer noen centimeter under jordoverflaten og drar med seg røtter. Brukes helst i kombinasjon med andre metoder, da skjæret løsner sammenpakket jord og øker den effektiviteten av andre metoder. Det finnes en rekke ulike varianter som avbildet i figur 12.

Metoden er å foretrekke da den er effektivt mot flere typer ugress inkludert rotgress og er fleksibel og rimelig i bruk. Energiforbruket kan derimot være høyt og avhenger av blant annet jordsmonn, jordfuktighet og klimatiske forhold. Gåsefotskjær kan kun benyttes mellom planteradene.



*Figur 12 – Gåsefotskjær for påmontering ugressverktøy [6]*

### **Flamming**

Flamming er en teknikk der ettårige ugress bekjempes ved oppvarming til kokepunktet av et gassbluss. Flamming benyttes i stor grad i tidsperioden etter såing, men før oppspiring av kulturveksten. Dette kan utføres da ugress ofte vokser raskere enn kulturveksten. Figur 13 viser et flammeverktøy påmontert en håndassistert vogn.



*Figur 13 – Blåselamper påmontert en ramme for flamming av ugress mellom planterader [6]*

Flamming kan også gjennomføres mellom plantene i planteraden etter spiring. Det må da enten benyttes håndholdt flamme eller automatiserte løsninger. Dette kalles selektiv flaming og reduserer energiforbruket betraktelig sammenlignet med bred flaming som dekker hele jordarealet. Bred flaming kan kun gjennomføres før kulturveksten er spiret.

Grunnet problemer med underkjøling av gassflasker ved kondensering må det enten benyttes et separat kondensasjonskammer eller kontinuerlig oppvarming av gassflasker.

Fjernstyring kan være problematisk da det er viktig å ha kontroll på gassblusset til enhver tid. Håndtering av kontinuerlig gasstilførsel må derfor utredes ytterligere.

Flaming krever 4 – 6 kg propangass per hektar ved bredflaming av hele plantearealet [6].

Metoden er effektiv og fleksibel med tanke på mulighet for selektiv flaming, men er energikrevende og kostbar og må overvåkes på grunn av faren for branntilløp [6].



## 5.2 Sammenligning og utvalgelse av metoder

Ingen av metodene for ugressbekjempelse beskrevet over kan antas å være komplette løsninger beregnet både for bruk i og utenfor planteraden. Det bør derfor vurderes å benytte en kombinasjonsløsning, der man utnytter potensialet til to eller flere metoder.

Det er utarbeidet seleksjonsmatriser vist i tabell 6 og 7 for å vurdere metodene for ugressbekjempelse mot nødvendige kravspesifikasjoner beskrevet i kapittel 4. Kravspesifikasjoner vektlegges individuelt med hensyn på relevans og rangeres deretter med poeng fra 1 – 5, der 5 er antatt høyeste potensial.

Metodene med høyest poengsum fra seleksjonsmatrisen benyttes videre i arbeidet for å finne konseptalternativet med størst potensial.

Kun løsninger kompatible med alle kravspesifikasjoner vurderes som potensielle løsninger i konseptgenereringen.

*Tabell 6 – Seleksjonsmatrise for gradering av laser, børste og skrapepinner som potensielle metoder etter gitte kravspesifikasjoner*

Kriterier	Vekting	Laser		Børste		Skrapepinner	
		Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng
Modulbasert	15 %	5	0,75	4	0,6	5	0,75
Robusthet	5 %	4	0,2	4	0,2	4	0,2
Behandlings- område	10 %	5	0,5	2	0,2	3	0,3
Effektivitet	8 %	3	0,24	4	0,32	5	0,4
Vekt	10 %	5	0,5	3	0,3	4	0,4
Energiforbruk	15 %	5	0,75	4	0,6	4	0,6
Min. arbeidssyklus	5 %	4	0,2	5	0,25	5	0,25
Hastighet	5 %	2	0,1	3	0,15	5	0,25
Kostnad	6 %	2	0,12	4	0,24	5	0,3
Vedlikehold	6 %	4	0,24	2	0,12	4	0,24
Driftssikkerhet	5 %	5	0,25	3	0,15	4	0,2
Sikkerhet	10 %	2	0,2	4	0,4	4	0,4
<b>Sum</b>	<b>100 %</b>		<b>4,05</b>		<b>3,53</b>		<b>4,29</b>

Tabell 7 – Seleksjonsmatrise for gradering av gåsefotskjær og flemming som potensielle metoder etter gitte kravspesifikasjoner

Kriterier	Vekting	Gåsefotskjær		Flemming	
		Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng
Modulbasert	15 %	5	0,45	2	0,3
Robusthet	5 %	5	0,25	3	0,15
Behandlingsområde	10 %	2	0,2	3	0,3
Effektivitet	8 %	3	0,24	4	0,24
Vekt	10 %	2	0,2	2	0,2
Energiforbruk	15 %	1	0,15	2	0,3
Min. arbeidssyklus	5 %	5	0,25	3	0,15
Hastighet	5 %	5	0,25	4	0,2
Kostnad	6 %	4	0,24	3	0,18
Vedlikehold	6 %	4	0,24	3	0,18
Driftssikkerhet	5 %	4	0,20	3	0,15
Sikkerhet	10 %	5	0,5	2	0,2
<b>Sum</b>	<b>100 %</b>		<b>3,17</b>		<b>2,55</b>

I tabell 6 og 7 rangeres laser og skrapepinner omtrent like høyt. Begge metoder inngår derfor i konseptgenereringen i kapittel 6.

### 5.3 Utvidet beskrivelse og utfordringer ved valgte metoder

For at metodene beskrevet i delkapittel 5.1 skal kunne arbeide autonomt må eksternt utstyr implementeres sammen med det utførende verktøyet. Her inngår typisk mekaniske og elektroniske komponenter. Her avdekkes potensielle utfordringer for igangsettelse av effektiv autonom drift av hver metode.

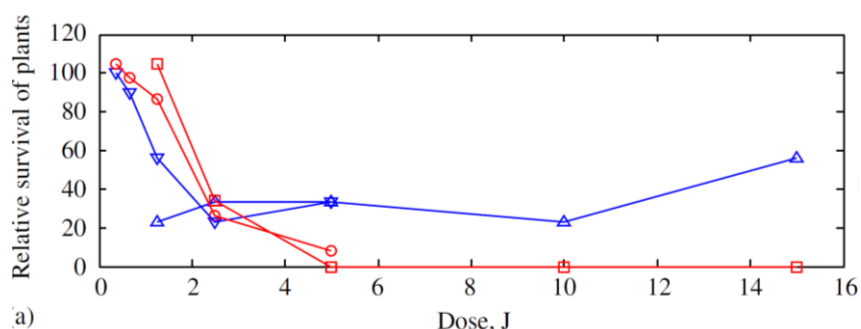
#### 5.3.1 Laser

For å identifisere potensielle utfordringer ved bruk av laser i ugressbekjempelse gjennomgås relevante aspekter ved metoden.

##### Laserens totale effektivitet

Effektivitet av laser for bruk i ugressbekjempelse avhenger av bølgelengde, treffpunkt, eksponeringstid, diameter på laserstråle, avstand fra lasermodul til treffpunkt og utgangseffekt [25]. Graden av bekjempelse vil også variere kraftig fra art til art da sensitiviteten mot varme, bestemmelse av korrekt bestrålningspunkt, absorpsjonsspekter og masse varierer. Figur 14 viser sammenhengen mellom relativ overlevelse og dose ved bestråling av en 5W 532 nm laser med ulike strålediameterer, og viser et vippepunkt i vekstrate ved doser over 2.2 J.

Andre faktorer som påvirker effektivitet er maksimal arbeidssyklus, avvik i bølgelengde, ustabil utgangseffekt og lokale forhold ved bestråling.

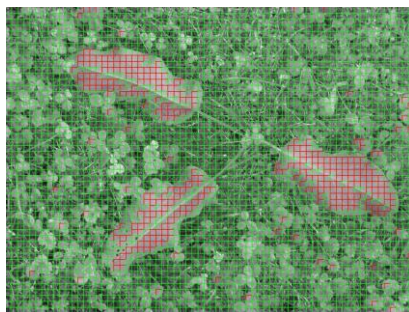


Figur 14 – Relativ overlevelse av artene *Stellaria media* og *Tripleurospermum* ved bestråling av en 5W 532nm laser på bakgrunn av strålediameter. ▽, 0-9mm for *S. media*; △, 1-8mm for *S. media*. ○, 0-9mm for *T. inodorum*; □, 1-8mm for *T. inodorum* [25]

##### Bildebehandling

Ugress vokser i samme område som kulturvekster. Det må derfor benyttes utstyr som gjenkjenner ugress og tilegner uønskede vekster en koordinat. Informasjonen benyttes så videre til å styre laserstrålen til ønsket bestrålningspunkt.

Det er ikke tilstrekkelig å kun bestemme omkringliggende konturer av ugreset. For å effektivt begrense vekst må laserstrålens energi fokuseres i ugresetts hovedstilk [25]. I praksis vil dette være en utfordrende oppgave grunnet store lokale variasjoner fra plante til plante. Eksempelvis har man lite kontroll over stilkens vinkel under bladene i topp.



Figur 15 – Bildebehandling av åker for gjenkjenning av ugress [25]

Teknikker som benyttes til å skille ugress fra kulturplanter inkluderer blant annet analyse av absorpsjonsspekter, konturgjenkjenning og ultralyd. Implementering av et fungerende system er avgjørende for autonom drift. Figur 15 viser et fotografi oppdelt i ruter. Ved fargegjenkjenning i hver rute, kan et mønster dannes. Bildebehandling inngår som en av begrensingene i denne rapporten, og vil derfor ikke tas hensyn til i videre arbeid.

### **Styringsteknologi**

Teknologien krever nøyaktighet styring av lasermodul eller et system for styring av laserstråle, slik at kun ugressets stamme bestråles. Lasermodul kan derfor påmonteres et mekanisk system for å oppnå rett bestrålingsvinkel og treffpunkt. Alternativt kan lasermodul fastmonteres og et mekanisk styrt speil styre stråle.

Valg av bestrålingsvinkel påvirker behandlingens effektivitet, da sannsynligheten for å bestråle korrekt punkt varierer sammenlignet ved vinkelrett bestråling ovenfra. Det er ikke fra litteratur kjent om det er mest hensiktsmessig å bestråle ugress vinkelrett ovenfra eller fra siden.

Mekanisk styring kan bidra til å redusere verktøyets behandlingshastighet grunnet lav hastighet, og må derfor vurderes helhetlig.

### **Behandlingshastighet**

Det kan være 100-200 ugressplanter per kvadratmeter i en grønnsaksåker [6]. Selv om det ikke er nødvendig eller ønskelig å fjerne alt ugress, kan det være meget tidkrevende å bestråle også en lavere andel av dette. Ettersom det er fra figur 14 er nødvendig med minimum 2.2 J for å bekjempe én plante, må alternativer for å øke behandlingshastigheten vurderes. Antall lasermoduler, begrensning av areal lasermodul må behandle og lasermodulens egenskaper er faktorer som inngår.

### **Sikkerhet**

Høy energitetthet i laserstråle kan utgjøre fare for mennesker, og risiko for branntilløp under bruk.

Det er begrenset litteratur som diskuterer spesifikt problemstillingen vedrørende brann, men bruk av gassbrennere som bekjempelsesmetode er derimot utbredt og omfatter samme problemstilling. Det er meget få rapporterte hendelser om brann ved bruk av gassbrennere – informasjon som inngår i evaluering av brannsikkerhet ved bruk av laser.

### **Eksternt utstyr**

Lasermoduler krever i varierende grad eksternt utstyr for å operere. Dette omfatter i hovedsak strømforsyninger og kjøleanordninger. Gjennomgang av potensielle lasermoduler- og teknologier må derfor gjøres på et tidlig stadium i produktutviklingsprosessen for å utelukke problemer med kompatibilitet mot den autonome landbruksroboten eller resterende verktøy.

### **5.3.2 Skrapepinner**

Skrapepinner er meget effektive og har god virkning mot ugress. Metoden er derimot beregnet for fastmontering og er derfor mindre fleksibel med tanke på maksimering av behandlingsareal. Den reduserte fleksibilitet reduserer også brukspotensialet til metoden, og må derfor vurderes videre [6].

Skrapepinner kan enten være fastmonterte og dekke et spesifisert område, eller være bevegelige for å dekke ulike områder i kjøreretningen til landbruksroboten.

#### **Faste skrapepinner**

Skrapepinner fastmonteres på en ramme med spesifikk innbyrdes avstand som vist i figur 16. Pinnenes bevegelse i jorden følger traktorens bevegelsesretning og kan ikke styres i ytterligere grad av operatøren. Denne metoden kan derfor kun benyttes i områder uten kulturvekster.

Som beskrevet i kravspesifikasjonene i delkapittel 4.1 må det endelige verktøyet kunne behandle hele arealet ikke dekket av kulturplanter. Faste skrapepinner vil alene ikke kunne gjøre dette, og vil derfor kun fungere som en delmetode.

En metode baseres på bevegelige skrapepinner som kontinuerlig tilpasses til åkeren og kulturplantenes størrelse. Denne metode krever ytterligere utstyr inkludert sensorsystemer og elektromekanikk.



*Figur 16 – Skrapepinneverktøy med fast innbyrdes avstand påmontert en tradisjonell traktor [6]*

### **Bevegelige skrapepinner**

Benyttes for å øke det effektive areal som kan behandles av skrapepinner. Eksterne systemer må gjenkjenne kulturvekster og tilpasse skrapepinnene til optimale posisjoner. Systemet er sårbart i den form at det er stort skadepotensiale ved feilbruk, eller hvis systemer ikke fungerer optimalt.

Ved bruk av denne metoden er det for å maksimere behandlingshastigheten ønskelig at landbruksroboten er i kontinuerlig bevegelse, uten å stoppe for hver plante. Det kreves derfor at mekanismen for de bevegelige skrapepinnen er rask nok til å ikke ødelegge kulturplanter.

Tilsvarende maskiner som i dag finnes på markedet benytter hydrauliske løsninger for styring av skrapepinner. Dette bidrar til meget god responstid, noe som er nødvendig for denne type behandlingsmetode.

Undersøkelser gjennomført viser noe begrenset utvalg av elektroniske komponenter tilpasset denne bruken. Det må derfor bekreftes at tilgjengelige komponenter er kompatible med kriterier satt til i delkapittel 5.2 med ekstra vekt på hastighet, arbeidssyklus og responstid.

## **5.4 Oppsummering av valgte metoder**

Det er fra gjennomgang av valgte metoder identifisert fire hovedutfordringer som må løses i videre konseptarbeid. Disse inkluderer:

1. Hva slags lasermodul kan benyttes?
2. Hvilke systemer kan benyttes for at laserstrålen skal treffe ønsket koordinat?
3. Hva er det mest optimale systemet for mekanisk styring av skrapepinner?
4. Hvilke krav stilles til et gjenkjenningssystem av kulturplanter og hvordan bør det utformes?

## 6 Konseptgenerering

Fra utvelgelse av potensielle metoder i kapittel 5 skal det genereres konseptforslag. Dette er ulike kombinasjoner av teknologi med potensiale til å løse definert problemstilling.

### 6.1 Løsningsalternativer

Fra delkapittel 5.4 må følgende utfordringer løses:

1. Valg av laserteknologi som dekker krav beskrevet
2. Styring av laserens treffpunkt
3. Mekanisk styresystem av bevegelige skrapepinner
4. Gjenkjenningssystem for kulturvekster

Potensielle teknologier gjennomgås i kommende delkapitler og rangeres i seleksjonsmatriser for å avdekke antatt potensiale.

#### 6.1.1 Laserteknologi

Laserstråler kan genereres med ulike teknologier. De mest aktuelle gjennomgås for vurdering av potensiale.

##### Halvlederlaser

Består av halvlederdiodes som pumpes elektronisk og som ved rekombinasjon av elektroner og hull spontant emitterer lys med bølgelengde tilsvarende båndgapet [28].

Metoden er rimelig, har lang levetid, er vekt- og plasseffektiv, robust og krever lite tillegg utstyr unntatt noen hensyn til kjøling. Virkningsgrad er omtrent 20% [29].

##### Solid-state laser

Produseres laserlys ved at et krystallinsk materiale dopes for å oppnå nødvendige energitilstander for eksitering av lys. Bølgelengder ligger typisk i det infrarøde området, men kan varieres [28].

Metoden kan levere høy effekt, men er kostbar, trenger omfattende kjøling og er avhengig av eksternt elektronisk utstyr. Metodens virkningsgrad er omtrent 40 % [29].

##### Gasslaser

Produserer laserlys ved å kjøre elektrisk strøm gjennom et gassrør for eksitering av fotoner [28]. Bølgelengde ligger typisk i det infrarøde området og benyttet gass er vanligvis CO<sub>2</sub> eller helium/neon.

Metoden har jevn bølgelengde, mulighet for høy utgangseffekt og har god levetid. Det er derimot en kostbar, plasskrevende og sensitiv metode som kreve

væskekjøling av vakuumbør med tilhørende kjøleanordning. Virkningsgraden er høy og ligger rundt 30 % [29].

### Rangering av laserteknologier

Tabell 8 – Seleksjonsmatrise for valg av laserteknologi. Hvert kriterium er vektet med en prosentvis sats og deretter rangert fra 1 – 5, der 5 er best.

Kriterier	Vekting	Halvlederlaser		Solid-state laser		Gasslaser	
		Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng
Modulbasert	10 %	5	0,5	2	0,2	2	0,2
Ekstrautstyr	10 %	5	0,5	2	0,2	2	0,2
Plasseffektivitet	20 %	5	1	2	0,4	1	0,2
Virkningsgrad	5 %	2	0,1	4	0,4	4	0,2
Vekt	5 %	5	0,2	4	0,2	2	0,1
Min. arbeidssyklus	10 %	4	0,4	4	0,4	5	0,5
Fleksibilitet	10 %	5	0,5	3	0,3	2	0,2
Kostnad	20 %	5	1	2	0,4	2	0,4
Vedlikehold	5 %	5	0,25	4	0,2	3	0,15
Driftssikkerhet	5 %	4	0,2	4	0,2	2	0,1
<b>Sum</b>	<b>100 %</b>	<b>4,65</b>		<b>2,9</b>		<b>2,25</b>	

Generering av laserstråler basert på halvlederteknologi er fra tabell 8 løsning med størst potensiale. Det store avviket i poengsummer mellom løsningene begrenser nødvendigheten av ytterligere vurdering.



### 6.1.2 Styring av lasermodulens treffpunkt

Et system for mekanisk styring av lasermodul er nødvendig for bestråle ugress innen et gitt areal. Systemet må kunne styre laserstrålen slik at et gitt XY - koordinat kan bestråles.

Det må benyttes elektromekaniske systemer for styring av laserstråle, slik at et overordnet kontrollsystem kan til enhver tid kontrollere laserens posisjon og status.

Det effektive sveipeområdet på bakkeplan dekker et gitt areal. Lasermodul må være i stand til å kunne bestråle alle planter i dette området.

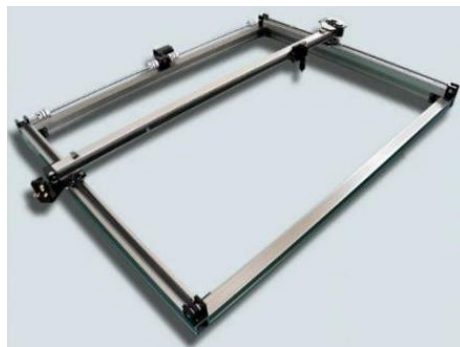
Følgende løsninger er vurdert:

#### **XY - ramme**

I underkant av verktøyet plasseres en XY - ramme som illustrert i figur 17. Denne styrer lasermodul til koordinat levert av sensor. Dette system har mulighet til å bestråle vinkelrett på ugresset, og kan derfor levere energi meget nøyaktig – gitt at robotens presisjon er høy.

Det er derimot ikke nok å kun vite midtpunktet til ugresset da stammen ikke nødvendigvis er midtplassert. Det må derfor gjennomføres en bildegjenkjenning av ugresset, der stammens plassering beregnes.

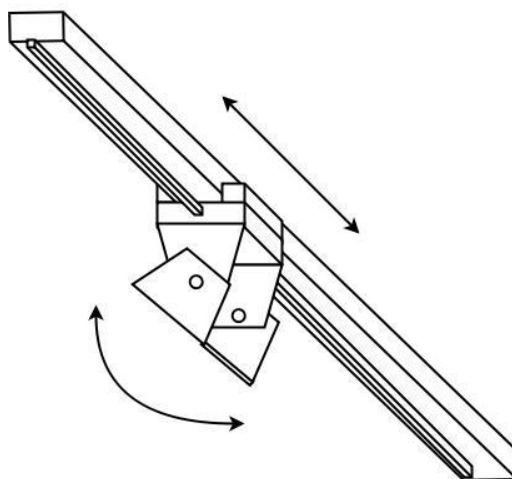
Metoden er presis og stabil, men er treg og plasskrevende og krever system for bestemmelse av riktig treffpunkt



*Figur 17 – En todelt ramme for betjening av enhver XY - koordinat innenfor rammens kanter [29]*

### Ramme med påmontert tilt

Denne løsningen består av en tiltfunksjon påmontert en ramme. Rammen sørger for bevegelse i kjøreretningen og tilt benyttes kun til tverrgående retning, som vist i figur 18. Denne løsningen er ikke i stand til å bestråle majoriteten av ugress vinkelrett ovenfra, og det kreves derfor at vinkel på tilt beregnes ut fra koordinater gitt fra sensorer.



Figur 18 – En løsning for styring av lasermodul bestående av en ramme og tiltfunksjon

Et potensielt problem er høydeforskjellen på vekstpunktet til ugresset. Uten informasjon om høyde til ugresset er man ikke i stand til å nøyaktig beregne punktet for bestråling. Det er derfor en mulighet for at laserstrålen kun treffer jord eller annen måte ikke bestråler ugresset tilstrekkelig.

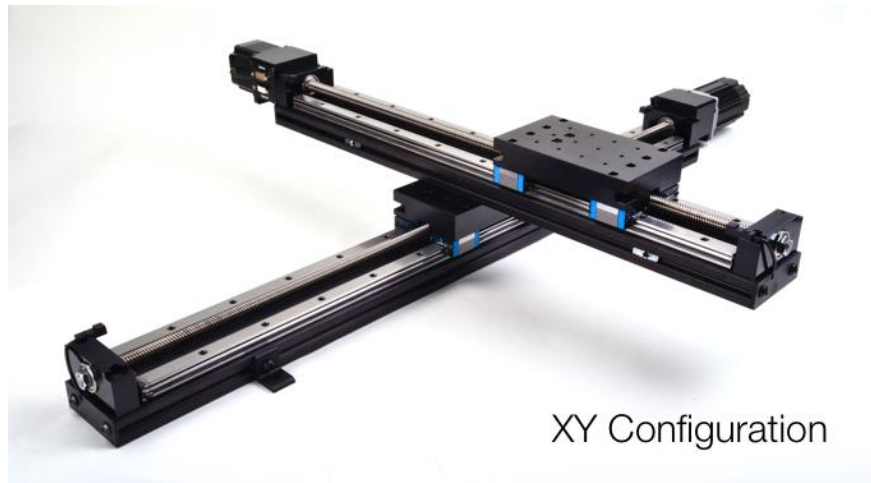
Vinkelen som oppnås ved bruk av tilt kan derimot også bidra til å løse problemet ved bruk av XY - robot som er bestemmelse av stammepunkt. Vinkelen oppnådd ved bruk av tilt kan være nok til å øke sannsynligheten for at stammen bestråles, og at ugresset dør.

Metoden er plasseffektiv, rimelig, rask og har stort arbeidsområde, men det kan være usikkerhetsmomenter vedrørende treffsikkerhet og overlevelsesrate ved ugressplanter.

### **Y - ramme påmontert X - ramme**

I forsøk på å begrense XY - rammens størrelse samtidig med å bestråle ugress vinkelrett ovenfra, kan det brukes en løsning bestående av en X - ramme påmontert en Y - ramme som illustrert i figur 19.

Løsningen er mindre plasskrevende og rimeligere, men kan være utsatt for deformasjoner i festebraketten mellom rammene grunnet lavere stabilitet.



*Figur 19 – XY - konfigurert ramme for vinkelrett bestråling på ugress [30]*

### **Parallellrobot**

Lasermodul påmonteres tre eller flere armer fungerende som en parallellrobot, se figur 20. Armene er stasjonært montert og muliggjør bevegelse i flere frihetsgrader. Dette alternativet er raskt, men er utsatt for ytre påkjenninger og eksponerer lasermodul for sprut og slag.



*Figur 20 – Parallellrobot bestående av tre eller flere armer koblet til stasjonært montert elektromekanikk [31]*

**Rangering av teknologier for styring av lasermodulens treffpunkt**

Tabell 9 – Seleksjonsmatrise for gradering av løsningsalternativer for styring av lasermodul

Kriterier	Vekting	XY-ramme		Ramme påmontert tilt	
		Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng
Modulbasert	10 %	3	0,3	4	0,4
Nødvendig ekstrautstyr	10 %	3	0,3	4	0,4
Hastighet	10 %	3	0,3	4	0,4
Plasseffektivitet	15 %	2	0,3	4	0,6
Presisjon	10 %	5	0,5	3	0,3
Vekt	5 %	3	0,15	4	0,2
Stabilitet	10 %	5	0,5	4	0,4
Fleksibilitet	10 %	3	0,3	4	0,4
Kostnad	5 %	2	0,1	4	0,2
Vedlikehold	5 %	4	0,2	4	0,2
Driftssikkerhet	10 %	4	0,4	5	0,5
<b>Sum</b>	<b>100 %</b>	<b>3,35</b>		<b>4</b>	

Tabell 9 fortsetter

Kriterier	Vekting	Y-ramme påmontert X-ramme		Parallellrobot	
		Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng
Modulbasert	10 %	3	0,3	4	0,4
Nødvendig ekstrautstyr	10 %	3	0,3	3	0,3
Hastighet	10 %	3	0,3	5	0,5
Plasseffektivitet	15 %	3	0,45	2	0,3
Presisjon	10 %	5	0,5	4	0,4
Vekt	5 %	4	0,2	4	0,2
Stabilitet	10 %	2	0,2	3	0,3
Fleksibilitet	10 %	3	0,3	2	0,2
Kostnad	5 %	3	0,15	4	0,2
Vedlikehold	5 %	4	0,2	4	0,2
Driftssikkerhet	10 %	3	0,3	4	0,4
<b>Sum</b>	<b>100 %</b>	<b>3,2</b>		<b>3,4</b>	

Tabell 9 viser at det kun er mindre forskjeller mellom graderingen av de ulike løsningene, men ettersom løsningen bestående av ramme og tilt er gradert høyest må ulike teknologier for tilt vurderes.

Tabell 10 gjennomgår potensielle teknologier for tilt av lasermodul.

Tabell 10 – Seleksjonsmatrise for gradering av teknologier for tilt av lasermodul

Kriterier	Vekting	Servomotor		Steppermotor	
		Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng
Nødvendig ekstrautstyr	10 %	5	0,5	3	0,3
Hastighet	10 %	4	0,4	5	0,5
Plasseffektivitet	20 %	5	1	3	0,6
Presisjon	20 %	3	0,6	5	1
Vekt	5 %	5	0,25	3	0,15
Fleksibilitet	10 %	4	0,4	3	0,3
Kostnad	5 %	5	0,25	4	0,2
Driftssikkerhet	20 %	4	0,8	3	0,6
<b>Sum</b>	<b>100 %</b>		<b>4,2</b>		<b>3,75</b>

Det kommer frem at bruk av servomotor er mer hensiktsmessig enn steppermotor fra tabell 10, differansen i poengsum er derimot liten.

### 6.1.3 Mekanisk styresystem for bevegelige skrapepinner

Poenget med bruk av bevegelige skrapepinner er å maksimere behandlingsområdet ved å muliggjøre arbeid både i og utenfor planteraden. Som innledningsvis beskrevet i kapittel 5 er skrapepinner en meget kostnadsbesparende og effektiv teknologi som bør brukes hvis mulig.

Potensielle konseptløsninger for bevegelse av skrapepinner illustrert i nedenfor.

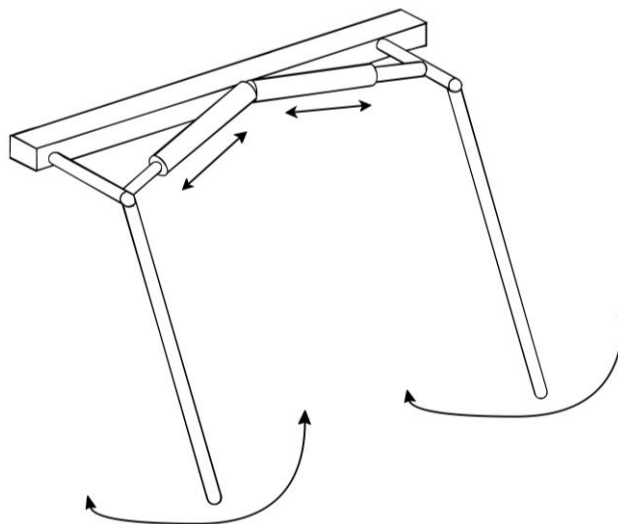
#### Lineær forskyvning ved bruk av lineæraktuator

Denne metoden er enkel i bruk, da det kreves lite tilleggsutstyr for drift. Utover ramme for innfestning av skrapepinner er kun ekstern styringselektronikk nødvendig.

Aktuatorer består av et metallstag som kan styres i en lineær bevegelse. Som illustrert i figur 21 vil det derfor være nødvendig å benytte én aktuator for hver retning skrapepinner skal bevegges. Aktuatorer er slitesterke, har få bevegelige deler og kan levere stor kraft.

Det må tas hensyn til aktuatorens lengde, da total lengde av komponenter typisk vil være 30% lenger enn maksimal forskyvning. Dette stiller krav til romslighet i verktøyet.

Motor innebygget i lineæraktuatorer er avhengig av et girsystem for å levere jevn bevegelse og tilstrekkelig kraft. Dette gir stort varmetap i innesluttet del av aktuator, som betyr i praksis at maksimal driftssyklus begrenses til 10 - 30%. Maksimal hastighet varierer fra 50-100mm/s [32].

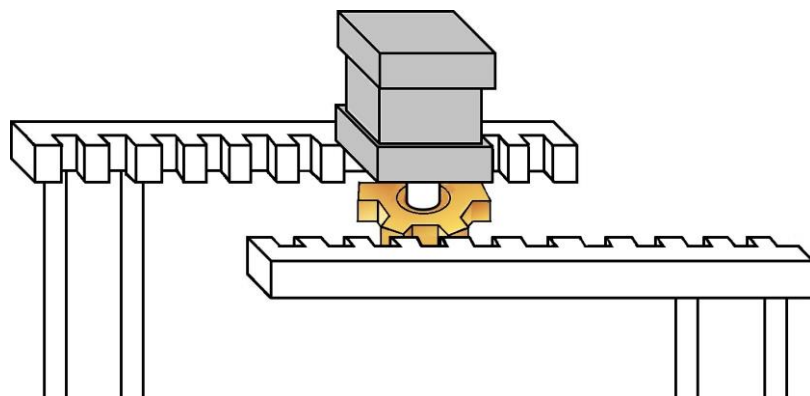


Figur 21 – Bruk av lineæraktuator for forskyvning av skrapepinner. Aktuatorer er illustrert i øvre del av figur for bevegelse i to retninger.

### Lineær forskyvning av skrapepinner ved bruk av steppermotor

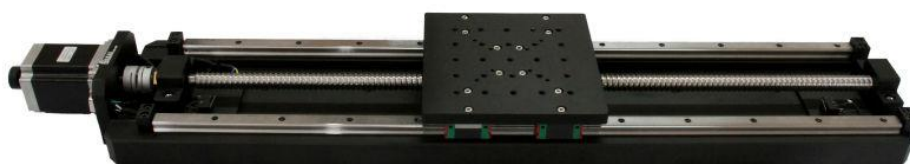
En steppermotor er en elektrisk motor der én omdreining oppdeles i et antall identiske steg. Dette gir god posisjonskontroll som bidrar til nøyaktig plassering av skrapepinner.

Som illustrert i figur 22 krever et mekanisk system basert på steppermotor mer tilleggsutstyr sammenlignet med lineæraktuator, da kun roterende bevegelse oppnås. Tilleggsutstyr for å oppnå lineær bevegelse vil typisk bestå av et tannhjulsystem, der kraft overføres fra steppermotor til et tannhjul montert i en tannhjulramme.



Figur 22 – Styringskonsept basert på omgjøring av roterende bevegelse fra steppermotor til lineær med et tannhjul- og tannstangsystem.

Alternativt kan steppermotorakselen påmonteres en gjenget stang med påmontert vogn. Steppermotor er da stasjonær og vogn er hindret i å rotere og tillates kun bevegelse i én retning som vist i figur 23.

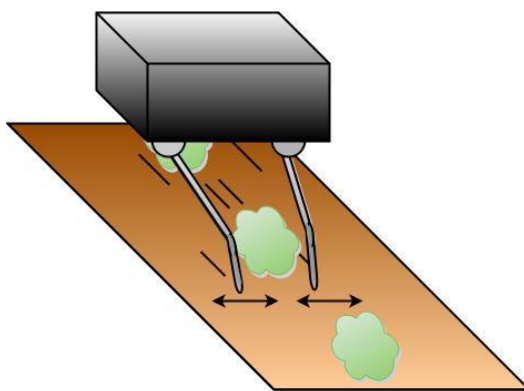


Figur 23 – Lineærstang med steppermotor for nøyaktig bevegelse i én akse [33].

### Lineær forskyvning av skrapepinner ved bruk av hydraulikk

Bruk av hydraulikk for å forskyve skrapepinnene er en metode inspirert av verktøyet Robovator tidligere beskrevet i delkapittel 1.2. Hydrauliske systemer er svært raske og kraftige noe som muliggjør utvikling av et system der skrapepinner kan arbeide i og utenfor planteraden. Et gjenkjenningssystem for kulturplantene må da implementeres slik at pinnene kan flyttes inn og ut av raden mellom hver kulturplante uten å ødelegge dem.

Metoden krever plasskrevende ekstrautstyr, har lav virkningsgrad på 50-70 % og kostbar [34]. Figur 24 viser et hydraulisk system der hydraulikkmotorer plassert innenfor beskyttelsesdeksler styrer skrapepinnene. Ekstrautstyr er sentrert på landbruksrobot.



Figur 24 – Hydraulisk styring av skrapepinner for bevegelse inn og ut av planterader



**Rangering av mekaniske systemer for bevegelige skrapepinner**

Tabell 11 – Seleksjonsmatrise for valg av mekanisk styringssystem

Kriterier	Vekting	Lineæraktuator		Steppermotor		Hydraulikk	
		Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng
Modulbasert	15 %	4	0,6	4	0,6	1	0,15
Robusthet	10 %	4	0,4	4	0,4	5	0,5
Behandlings- område	5 %	4	0,2	4	0,2	5	0,25
Vekt	10 %	4	0,4	3	0,3	1	0,1
Min. arbeidssyklus	20 %	1	0,2	5	1	5	1
Hastighet	15 %	1	0,15	4	0,6	5	0,75
Kostnad	5 %	3	0,15	4	0,2	1	0,05
Vedlikehold	10 %	4	0,4	4	0,4	2	0,2
Drifts- sikkerhet	10 %	4	0,4	4	0,4	4	0,4
<b>Sum</b>	<b>100 %</b>	<b>2,9</b>		<b>4,1</b>		<b>3,4</b>	

Fra tabell 11 rangeres lineæraktuator meget lavt i forhold til maksimal arbeidssyklus og hastighet. Dette er avgjørende kriterier for valg i videre produktutvikling.

### 6.1.4 Gjenkjenningssystem for kulturvekster

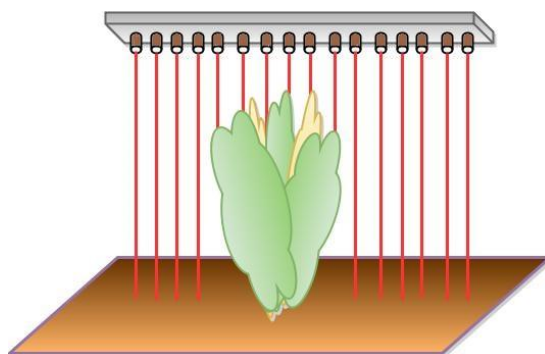
Sensorens oppgave er å bestemme kulturplanters bredde, slik at skrapepinner plasseres riktig og lasermodulers effektive behandlingsområde reduseres. Sensor må analysere alle planter og overføre data til styringssystem for skrapepinner, slik at kulturplanter ikke skades. Følgende alternativer for sensorsystemer er vurdert:

#### Ultralydsensor

Ultralyd kan gi informasjon om obstruksjoners fysiske omfang. Dette kan benyttes til å avdekke plassering av kulturplanters kanter. Metoden er rimelig og krever lite ekstrautstyr, men er kjent for å ha problemer med intern interferens og lav nøyaktighet [35].

#### Frekvensmodulert laserrekke

Kulturplanters potensielle maksimalbredde dekkes av et antall laserpunkt med unik frekvens som vist i figur 25. En sensor kun følsom for aktuelle frekvenser reflektert fra kulturplanter avgjør størrelse, ved at kun stråler som treffer planter reflekteres. Denne metoden kan utvides til å måle distanse mellom lasermodul og kulturplanter for ytterligere nøyaktighet.



*Figur 25 – For å bestemme kulturplanters maksimale diameter kan lasere benyttes. En sensor gjenkjenner reflektert lys og beregner plantens størrelse*

#### Bildebehandling

Kulturplanters potensielle maksimalområde fotograferes og analyseres for å avdekke bredde. Bildebehandling er ressurskrevende i form av nødvendig utvikling innen analyse av planter, men er nøyaktig og fleksibel [36]. Det bør tas hensyn til eventuell prosesseringstid krevet av sensoren.

## Rangering av gjenkjenningssystemer for kulturvekster

Tabell 12 viser en antatt fordel ved valg av frekvensmodulert laserrekke. Av tilgjengelige teknologier er denne mest aktuell for prototyping grunnet begrenset behov for programvare.

Tabell 12 – Seleksjonsmatrise for valg av gjenkjenningssystem

Kriterier	Vekting	Ultralyd		Frekvensmodulert laserrekke		Bildebehandling	
		Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng
Modulbasert	10 %	2	0,2	4	0,4	5	0,5
Ekstrautstyr	10 %	4	0,4	4	0,4	4	0,4
Presisjon	20 %	2	0,4	4	0,8	4	0,8
Behandlings- tid	20 %	4	0,8	5	1	2	0,4
Fleksibilitet	10 %	3	0,3	4	0,4	4	0,4
Kostnad	10 %	4	0,4	5	0,5	2	0,2
Vedlikehold	5%	5	0,25	4	0,2	3	0,15
Drifts- sikkerhet	15 %	3	0,45	4	0,6	3	0,45
<b>Sum</b>	<b>100 %</b>		<b>3,2</b>		<b>4,3</b>		<b>3,3</b>

## 6.2 Konseptalternativer

Ved å kombinere de høyest rangerte løsningsalternativene i delkapittel 6.1 er tre konsepter generert:

- Faste og bevegelige skrapepinner
- Laser og faste skrapepinner
- Laser, faste- og bevegelige skrapepinner

Det er valgt å kombinere to metoder i utvalgte konseptalternativer for å avdekke hvordan dette påvirker bekjempelse av ugress.

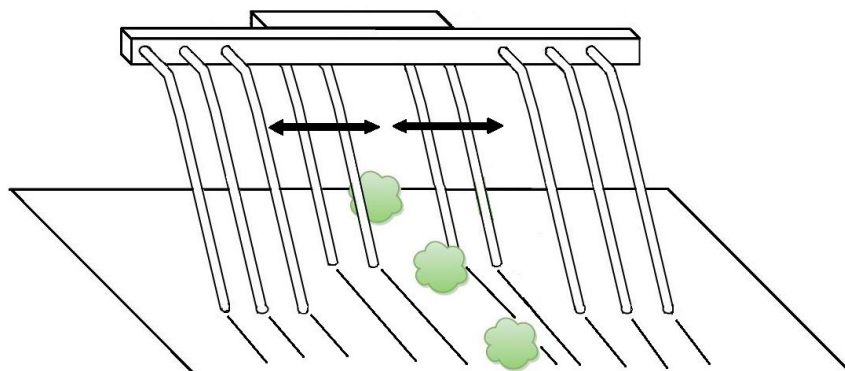
### Faste og bevegelige skrapepinner

Faste skrapepinner behandler området mellom planteradene og bevegelige skrapepinner området mellom plantene i planteraden som vist i figur 26.

Utstrakt bruk av skrapepinner gjør verktøyet både effektivt mot ugress og fleksibelt. De bevegelige skrapepinnene krever høy hastighet inn og ut av planterader i drift. Dette stiller store krav til mekaniske komponenter for styring, noe som kan redusere energieffektiviteten.

Konseptet er avhengig av sensorer for gjenkjenning av kulturplanters posisjon og størrelse. Denne informasjonen brukes til å flytte skrapepinner til korrekt posisjon i forhold til landbruksrobot og kulturplanter. Individuell gjenkjenning av ugress er ikke nødvendig.

Konseptet åpner for arbeid ved kontinuerlig drift av landbruksrobot. Dette øker behandlingshastighet, men krever kontrollsystemer som avbryter arbeidet dersom avvik i behandlingsområde detekteres.



Figur 26 – Verktøy med faste og bevegelige skrapepinner. Sensor for bevegelige skrapepinner illustreres i forkant.

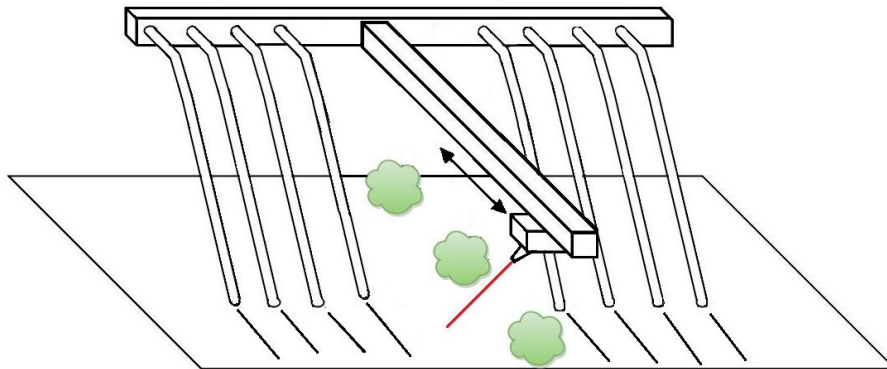
### Laser og faste skrapepinner

Faste skrapepinner behandler området mellom planteradene og laser behandler området mellom plantene i planteraden.

Dette konseptet har få bevegelige deler utsatt for eksterne krefter, noe som øker robustheten. Effektiviteten kan derimot være noe lav, da lasermodulens effektive behandlingsområde er stort sammenlignet med areal for skrapepinner. Figur 27 viser konseptets sammenstilling.

Konseptet er avhengig av sensorer for gjenkjenning og posisjonering av individuelle ugressplanter i behandlingsområdet mellom de faste skrapepinnene. Koordinater må sendes til et mekanisk styresystem for transport av lasermodul til riktig posisjon.

Det må antas at landbruksroboten må starte og stoppe for at tilstrekkelig antall ugressplanter skal bekjempes av verktøyets lasermodul. Dette er også et krav for å sikre verktøyets stabilitet og følgelig treffsikkerheten til lasermodulen.



Figur 27 – Verktøy med faste skrapepinner og lasermodul

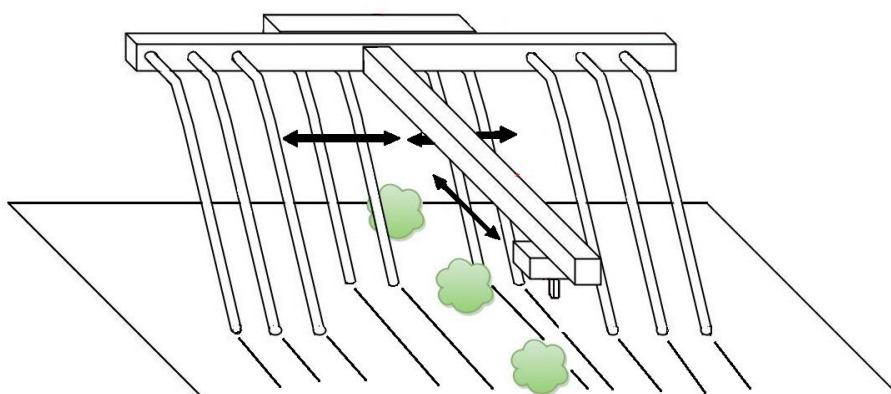
### Laser og faste og bevegelige skrapepinner

For å minimere behandlingsområdet til laseren kan en kombinasjon av faste og bevegelige skrapepinner benyttes. Faste pinner behandler området mellom planteraden, bevegelige tilpasses etter kulturveksten diameter og laser behandler området ikke pinner dekker som vist i figur 28.

Konseptet kombinerer fordeler fra ulike metoder, noe som bidrar til høy arbeidshastighet ved autonom drift. Det har derimot flere bevegelige som kompliserer og fordyrer utvikling.

Sensorer for gjenkjenning og posisjonering av ugressplanter er påkrevet for styring av lasermodul til korrekt posisjon. Det er i tillegg nødvendig med sensor for gjenkjenning av kulturplanters posisjon og diameter.

Det må antas at konseptalternativet ikke i alle tilfeller kan arbeide i kontinuerlig drift grunnet påkrevet stabilitet og treffsikkerhet. Kravet til start- og stoppfunksjon er likevel noe lavere enn foregående alternativ da mindre areal må behandles av lasermodul.



Figur 28 – Verktøy med faste, bevegelige - skrapepinner og lasermodul

### 6.3 Valg av konsept

Fra gjennomgangen av metoder i delkapittel 5.1 og løsningsalternativene i delkapittel 6.2 har ett konsept blitt valgt for videre utvikling.

#### 6.3.1 Valg av metodekombinasjon

Utvelgelse av kombinasjon av metoder ble gjort på bakgrunn av seleksjonsmatrise i tabell 13 som viser en marginal fordel ved valg av konsept som kombinerer faste og bevegelige skrapepinner med laser.

Tabell 13 – Seleksjonsmatrise for valg av kombinasjon av metoder

Kriterier	Vekting	Laser og bevegelige skrapepinner		Laser og faste skrapepinner		Laser og faste og bevegelige skrapepinner	
		Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng	Poeng	Vektet poeng
Modulbasert	10 %	4	0,4	4	0,4	4	0,4
Robusthet	5 %	3	0,15	4	0,2	3	0,15
Behandlings-område	10 %	4	0,4	3	0,3	5	0,5
Effektivitet	15 %	4	0,6	3	0,45	5	0,75
Vekt	5 %	4	0,2	4	0,2	4	0,2
Energiforbruk	15 %	3	0,45	4	0,6	3	0,45
Min. arbeidssyklus	10 %	4	0,4	4	0,4	4	0,4
Hastighet	10 %	4	0,4	3	0,3	4	0,4
Kostnad	5 %	3	0,15	3	0,15	3	0,15
Vedlikehold	5 %	3	0,15	4	0,2	3	0,15
Driftssikkerhet	5 %	3	0,15	4	0,2	3	0,15
Sikkerhet	5 %	4	0,2	4	0,2	4	0,2
<b>Sum</b>	<b>100 %</b>	<b>3,65</b>		<b>3,6</b>		<b>3,9</b>	

### 6.3.2 Endelig konsept

#### Valg av løsningsalternativer

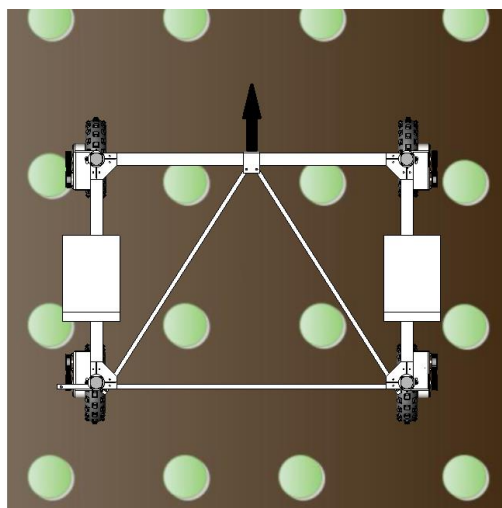
Seleksjonsmatrisene i delkapittel 6.1 rangerer potensielle løsningsalternativer, og det er på bakgrunn av dette valgt løsninger compatible med valgt metodekombinasjon. Tabell 14 oppsummerer delløsninger i endelig konsept.

Tabell 14 – Valgte delløsninger i endelig konsept

Delløsning	Valgt delløsning
Laserteknologi	Halvlederbasert lasermodul
Styring av lasermodulens treffpunkt	Ramme med påmontert tilt
Tiltfunksjon	Servomotor
Gjenkjenningssystem for kulturvekster	Frekvensmodulert laserrekke
Styresystem for bevegelige skrapepinner	Lineær forskyvning ved bruk av steppermotor

#### Virkemåte

Verktøyet fastmonteres på den autonome landbruksroboten som flytter verktøyet langs radene i åkeren som vist i figur 29.

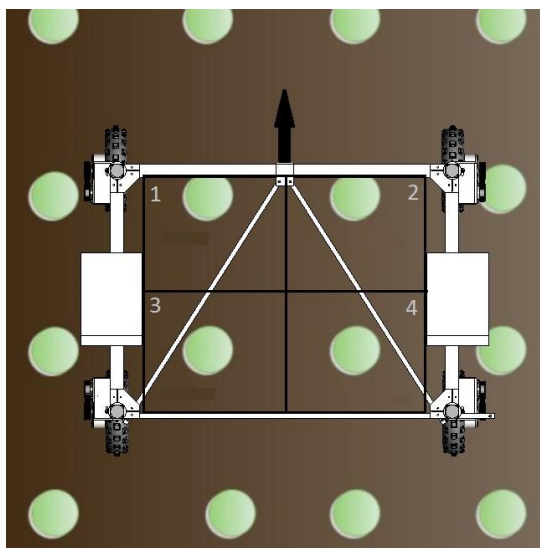


Figur 29 – Illustrasjon ovenfra av landbruksrobot i en åker med planterader illustrert ved grønne sirkler

Det er valgt at hver modul skal behandle én planterad og to halve mellomrom – én på hver side av planteraden. Dette begrenser overlappet til minimum og gir god fleksibilitet vedrørende sammenkobling av moduler.



Figur 30 viser et verktøy bestående av fire moduler som behandler to planterader og de respektive mellomrommene. Hver modul har et behandlingsområde som dekker 500\*650 mm, henholdsvis bredderetning og lengderetning.

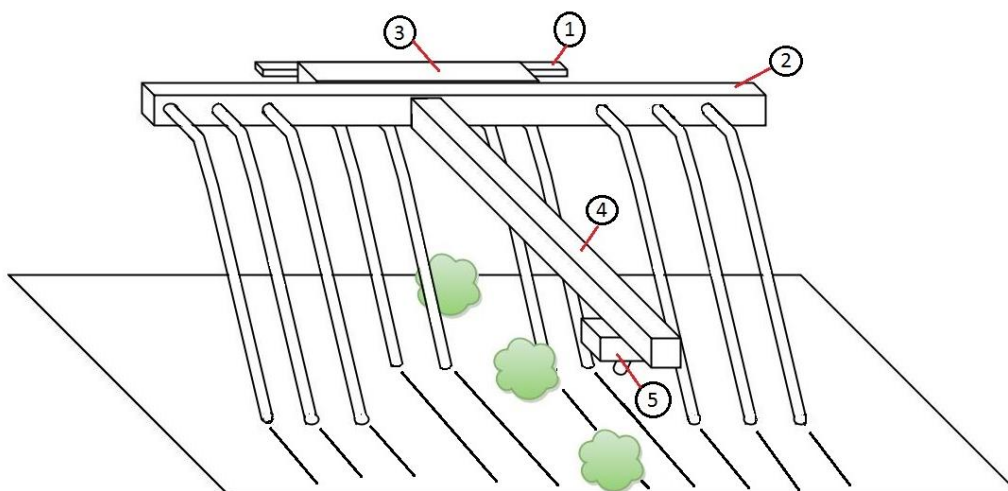


Figur 30 – Landbruksroboten som behandler to planterader med fire verktøymoduler

### Komponentplassering

Som vist i figur 31 består verktøyet av seks hovedkomponenter som inkluderer:

1. Sensor for bevegelige skrapepinner
2. Faste skrapepinner
3. Bevegelige skrapepinner
4. Mekanisk styringssystem for laser
5. Lasermodul



Figur 31 – Endelig konseptalternativ med nummererte komponenter

### Rekkefølge ved behandling og kjøremønster

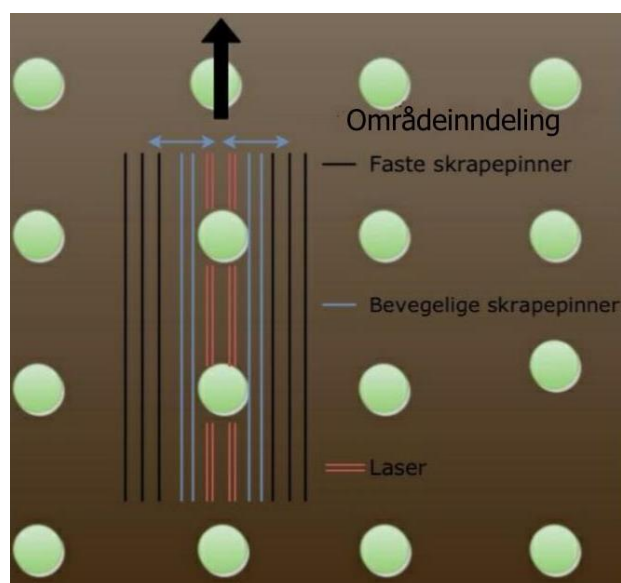
Ved påbegynnelse av arbeid midtstilles landbruksroboten ved enden av en planterad og kjører med jevn hastighet i retning planterad. Sensor for bevegelige skrapepinner (1) registrerer når kulturplanten passerer og måler diameteren. Denne informasjonen sendes til det mekaniske styringssystemet for bevegelige skrapepinner (3) som justerer skrapepinnene helt inntil kulturplantens ytterkanter. Landbruksroboten kjører med denne konfigurasjonen frem til neste kulturplante der skrapepinnene igjen justeres. Bildegjenkjenningssystemet har på dette tidspunktet analysert det ubehandlede arealet mellom kulturplantene og har generert koordinater for hver ugressplante. Det mekaniske styringssystemet for laser (4) sender lasermodulen (5) til de bestemte koordinater og bestråler ugress ett av gangen. Landbruksroboten kjører én meter av gangen og stanser for gjennomføring av laserbehandling. Når arealet er ferdigbehandlet starter syklusen på nytt for behandling av neste meter med kulturplanter og tilhørende behandlingsareal.

### Argumentasjon for valgt konsept

Basert på tidligere forskning ved bruk av laser til ugressbekjempelse er det klart at metoden er tidkrevende [25]. Det er derfor ønskelig å begrense bruken av laser mest mulig til fordel for skrapepinner.

Variasjonsbredden til kulturveksten varierer fra 2 centimeter rett etter såing til 25 centimeter fullt utvokst. Dette betyr at området som må bestråles ved bruk av permanent posisjonerte skrapepinner er 25 centimeter bredt. Dette bidrar til at et unødvendig stort sveipområde må dekkes med laser, og senker følgelig hastigheten til verktøyet.

Ved å analysere kulturplantens bredde og implementere en automatisert løsning for forskyvning av skrapepinnene, kan man innskrenke det effektive området lasere må dekke – noe som bidrar til økt mulig hastighet på verktøy. Dette er illustrert i figur 32.



Figur 32 – Viser forslag på implementering av bevegelige skrapepinner og redusert behov for laserbekjempelse. Pil angir behandlingsretning

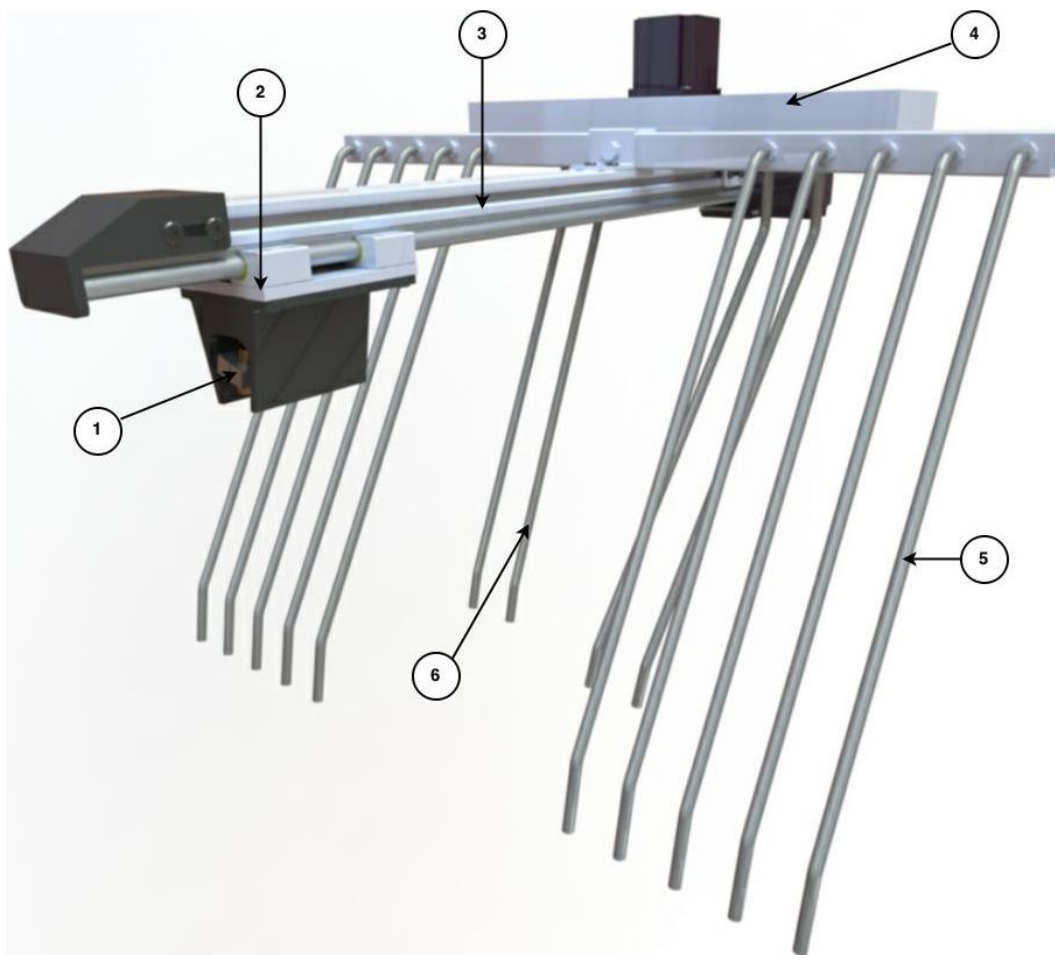
## 7 Produktarkitektur og konseptdesign

På bakgrunn av tidligere valgt konsept utvikles design og mekanikk til et endelig produkt. Parallelt med denne prosessen er hensyn tatt til valg av standardkomponenter og modulisering.

### 7.1 Funksjonsbeskrivelse

Verktøyets endelige funksjoner og virkemåte til komponenter gjennomgås. Figur 33 viser endelig sammenstilling av verktøyet. Komponenter som inngår er:

1. Lasermodul
2. Vogn for bevegelse av lasermodul
3. Skinnesystem for bevegelse av vogn
4. Modul for bevegelige skrapepinner med påmontert sensor
5. Fastmonterte skrapepinner
6. Bevegelige skrapepinner



Figur 33 – Endelig sammenstilling av verktøy med forklaring av hver modul

Verktøyet er designet med en kombinasjon av egenutviklede og innkjøpte komponenter. Første delkapittel omhandler egenutviklede komponenter.

#### Modul for bevegelige skrapepinner (4)

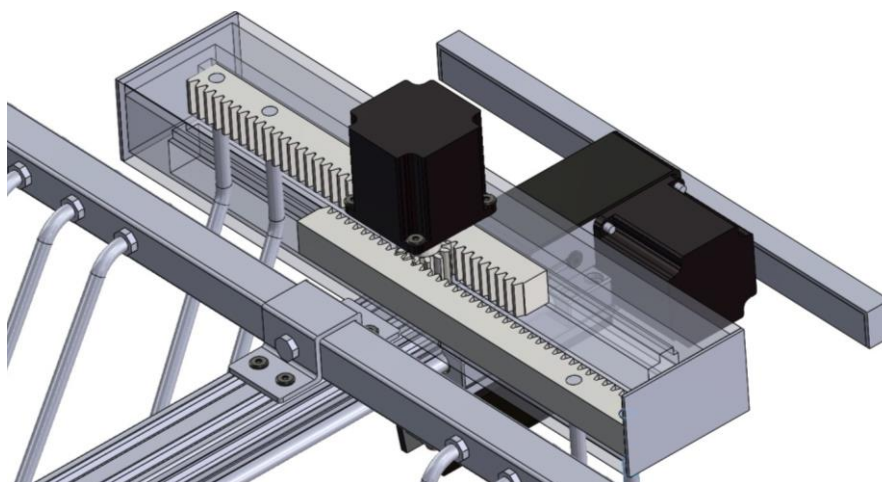
For å effektivisere ugressbekjempelse ved bruk av skrapepinner må pinnene skrape så nærme kulturvekster som mulig uten å ødelegge dem.

For å unngå arbeid med manuell avstandsinnstilling av faste skrapepinner etter hvert som kulturvekstene vokser, er det utviklet en innretning som automatisk flytter skrapepinner inntil kulturplanten fra begge sider.

Pinnenes lineære bevegelse styres av en steppermotor påmontert i topp av innretningen som vist i figur 34. Motoren er tilkoppelt et tannhjul som korresponderer med to tannstenger som overfører dreiebevegelsen til en lineær bevegelse i to retninger.

Bevegelsen er lik i begge retninger, så for å sikre lik avstand til kulturplanten er det viktig at verktøyets midtpunkt er i samsvar med kulturplantens midtpunkt.

Hver tannstang er fra undersiden tilkoppelt to skrapepinner. Sammen kan de bevegelige skrapepinnene dekke det totale kulturvekstområdet på 250 mm, som tilsvarer gapet mellom de faste skrapepinnene. Avstanden mellom de bevegelige pinnene kan stilles inn fra 0 til 250 mm etter størrelse på kulturplante som illustrert i figur 35.



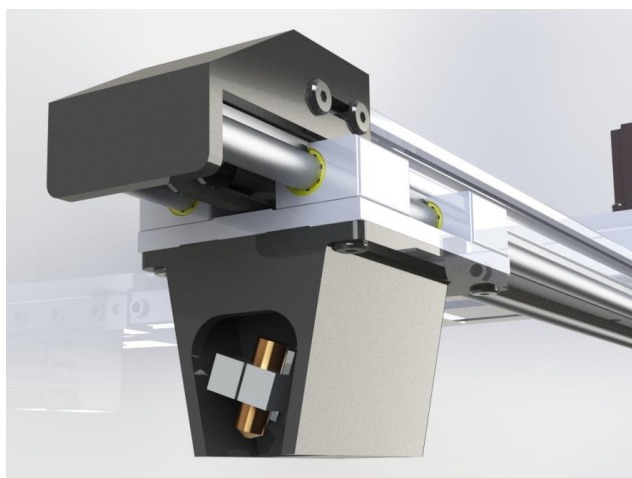
Figur 34 – Innblikk i modulen for bevegelige skrapepinner. Steppermotoren styrer to tannstenger tilkoppelt fire skrapepinner i underkant.



Figur 35 – Skrapepinnenes innerste (t.v.) og ytterste (t.h.) posisjon

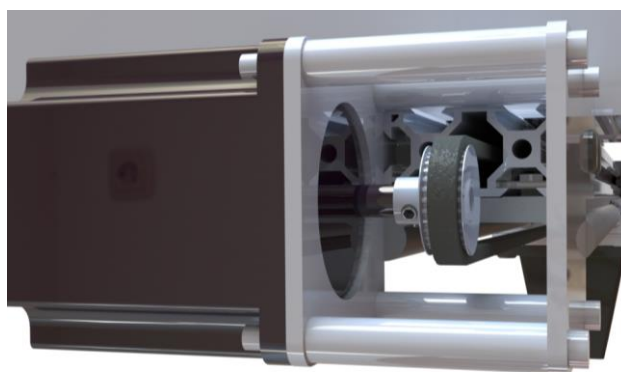
### Mekanikk for styring av rettlinjert bevegelse av lasermodul

Ved bevegelse av lasermodul i verktøyets kjøreretning benyttes et skinne- og vognsystem som vist i figur 36.



Figur 36 – Vognen i underkant er påmontert en skinne for rettlinjert bevegelse

Vogn lasermodul påmonteres styres av en steppermotor via en tannrem som figur 37 illustrerer. Steppermotor plasseres i den ene enden av skinne og et tannhjul benyttes for drift av tannrem.



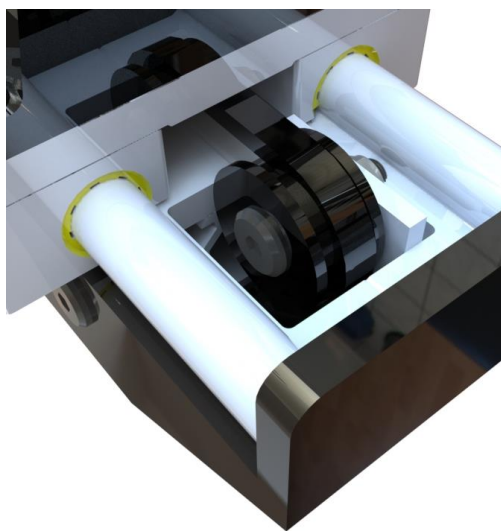
Figur 37 – I enden av skinnesystemet drifter steppermotor (t.v.) et tannhjul påkoblet en tannrem (t.h.)

I henhold til dimensjoneringskriteriene oppgitt er arbeidsområdet til laseren 500 mm i kjøreretning. For å kunne posisjonere lasermodul i hele arbeidsområdet er det nødvendig med en forlengelse av kjøreskinnen tilsvarende lengden av vogn. Valgt vogn er 100 mm lang, og tilsvarer følgelig nødvendig forlengelse. Total lengde av skinnesystem er 600 mm.

Flere produsenter tilbyr modulbaserte tannremdrevne skinnesystemer. I midlertidig er samtlige utstyrt med eksternt trinsehjul for tannrem som er plassert i andre enden av steppermotoren. Dette designet begrenser vognens arbeidsområde i aktuell ende av skinnen – dvs. at vognen ikke kan flyttes helt til enden av skinnen.

Ettersom verktøyet er modulbasert må to eller flere moduler kunne sammenkobles – uten gap mellom moduler. Et eventuelt gap vil bidra til at områder ikke blir behandlet.

For å forhindre områder som ikke laserne kan nå i sammenstillingspunkt, må vogner ha minst mulig avstand mellom hverandre. Dette er løst ved å integrere tannremmens tilbakeførende trinsehjul i et ekstrudert område i endene av skinne som vist i figur 38. Dette gjør at man kan kjøre vognen helt til verktøyets ytterkant.



*Figur 38 – Figuren viser trinsehjulet plassert i en ekstrudert del av skinnens ende. Dette muliggjør maksimal utnyttelse av skinnens lengde.*

Bredden til skinnen er satt til 40 mm, dette gir tilstrekkelig rom for montering av trinsehjul uten at hjulet forstyrrer bevegelsen til vognen.

Skinnen er montert på en aluminiumprofil som er systemets tilkoplingsplattform. Profilets design gjør det mulig å enkelt kople på elementer på alle profilets overflater. I tillegg til å være systemets tilkoplingsplattform fungerer profilets gjennomgående og lukkede tunnel som en beskytter for tannremmen ved at dette under tilbakeføringen glir friksjonsfritt på innsiden av profilet.

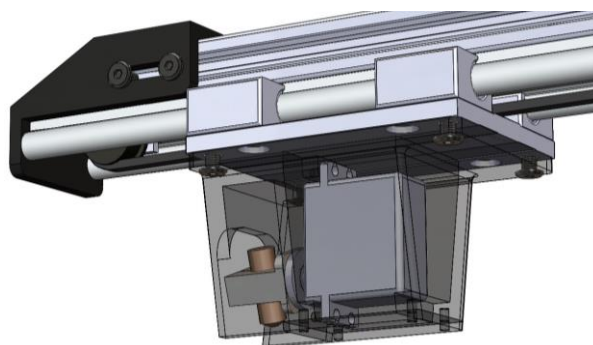


### Mekanikk for tilt av lasermodul

For vinkling av lasermodul benyttes en servomotor. Denne plasseres i et servohus for beskyttelse og stabilitet, se figur 39.

Servohusets montering på skinnevogn gjør at lasermodul er posisjonert i ytterkant av vognen, noe som maksimerer arbeidsområdet.

Lasermodul er også plassert i servohus og er et sikkerhetshensyn for å begrense rotasjonsbevegelse og uønsket bestråling.



Figur 39 – I underkant av figuren vises her gjennomsiktig servohus med servomotor montert på innsiden. Lasermodul er tilkoblet venstre side av servomotor.

### Faste skrapepinner

Oppgaven til de faste skrapepinnene er å rive opp ugresset mellom planterader. Skrapepinnene er fastmontert på en 600 mm lang kvadratisk hulprofil av rustfritt stål. For at skrapepinnene skal fungere optimalt skal avstanden mellom pinnene være omtrent 50 mm [6]. Den valgte pinneavstanden for verktøyet er på 40 mm. Det er totalt 10 faste skrapepinner - 5 på hver side, noe som gir et midtstilt gap på 250 mm som skal gi rom for planteraden som vist i figur 40.

Ved montering føres pinnene inn i gjennomgående horisontale hull i profilet og skrues fast med mutter og sprengskive. Løsningen gir enkel utskiftning og eventuell reparasjon.

For å redusere vridemoment som oppstår i skrapepinner under drift er pinnene vinklet til 60° fra det horisontale festeprofilet. Området av skrapepinnene som er nedsenket i jord er vinklet slik at de tilnærmet er vinkelrett på bakke.



Figur 40 – Sammenstilling og vinkling av faste skrapepinner. Kulturplanter passerer i midten av verktøyet uten å bli påvirket.

## 7.2 Egenutviklede komponenter

Egenutviklede komponenter utgjør en stor del av prosjektet. Her inngår forklaring og design av komponenter som inngår i verktøyets ulike moduler

### 7.2.1 Bevegelige skrapepinner

#### Sammenstillingsboks

Hulprofil av aluminium tilpasses for å holde sammen interne komponenter. Avlange hull vist i figur 41 er åpning for skrapepinner festet innad for lineær bevegelse.



*Figur 41 – Ekstern sammenstillingsboks for montering av komponenter tilknyttet bevegelige skrapepinner*

#### Sammenstillingsanordning

Intern komponent for korrekt plassering av tannstenger og tannhjul. Komponenten plasseres på innsiden av sammenstillingsboks vist ovenfor. Komponenten har kompleks geometri som vist i figur 42 og kan derfor produseres med 3D-printer.



*Figur 42 – Komponent for sammenstilling av interne komponenter tilknyttet bevegelige skrapepinner*



### **Hulprofil for montering av komponenter til lasersensor**

Lasersensor består av lasermoduler og sensorkomponenter som må plasseres korrekt i forhold til verktøyet. Et tilpasset hulprofil av aluminium som vist i figur 43 brukes til montering av disse komponentene.



*Figur 43 – Hulprofil for montering av lasere og sensorkomponenter*

### **Skrapepinne for bevegelig bruk**

Figur 44 viser skrapepinne for bevegelig bruk. Pinnene er laget av 8mm rundprofiler av rustfritt stål. En av endene gjenges for montering og profilet bøyes.

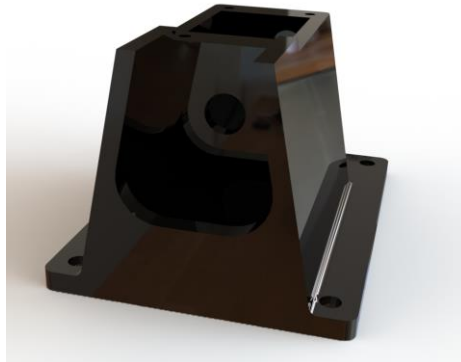


*Figur 44 – Skrapepinne tilpasset sideveis bevegelse*

## 7.2.2 Mekanikk for styring av laser

### Servohus

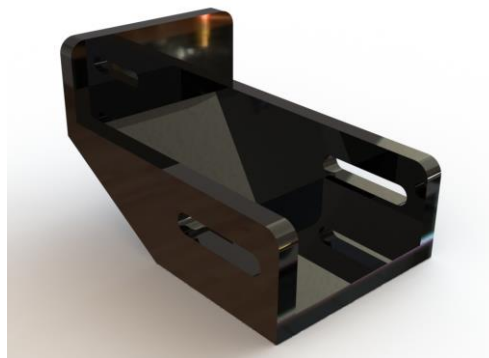
Figur 45 viser komponent som huser og beskytter servomotor. I henhold til EN 60825 – «Safety of laser products» er det påbudt med mekanisk beskyttelse rundt lasermodul for å unngå ukontrollert bestråling [37]. Det utvikles derfor en beskyttelsesanordning som begrenser maksimal tilt av servomotor til 25 grader. Komponent 3D-printes i plast.



Figur 45 – Servohus for montering av lasermodul og servomotor

### Endebeskytter for bevegelig vogn

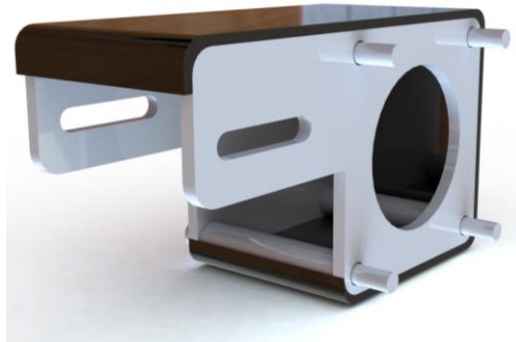
Endebeskytter som vist i figur 46 påmonteres skinne i ende for å unngå avsporing av vogn og ytterligere skader. I tillegg beskytter den det tilbakeførende trinsehjulet som er lokalisert i samme ende av skinne. Komponent 3D-printes i plast.



Figur 46 – Plastkomponent tilpasset skinne for beskyttelse av ende og stans av vogn samt trinsehjul

### **Brakett for steppermotor**

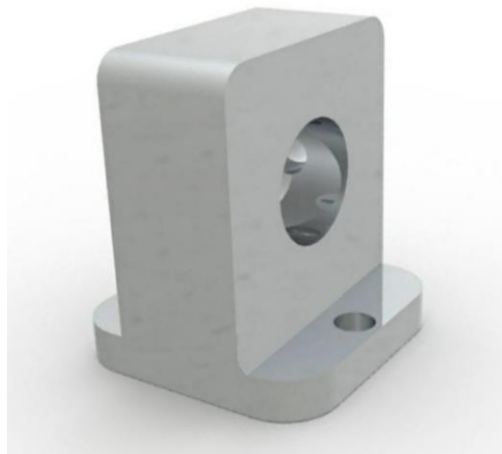
I enden av rammemodul plasseres steppermotor. Denne monteres med to braketter som vist i figur 47. Braketter er av rustfritt stål og CNC benyttes ved produksjon. For å beskytte tannhjul tilkopleet steppermotor mot urenheter, er braketter innkapslet med deksler av plast.



*Figur 47 – Brakett for montering av servomotor*

### **Brakett for montering og kjøling av lasermodul**

For montering av lasermodul til servomotor brukes en brakett tilpasset begge komponenter. Brakett som er illustrert i figur 48 skal i tillegg fungere som kjøleribbe for lasermodul og må derfor ha høy varmeledningsevne. Brakett er derfor ekstrudert av aluminium. For å øke varmeledningsevnen ytterligere er det i kontaktflaten mellom lasermodul og brakett påført kjølepasta.



*Figur 48 – Brakett av aluminium for montering og kjøling av lasermodul. Lasermodul fastspennes med skruer inn fra side.*

## 7.3 Modulisering og standardkomponenter

Komponenter nødvendig for gjennomføring av design og mekanikk utviklet i forrige delkapittel beskrives her.

### 7.3.1 Laserstyring

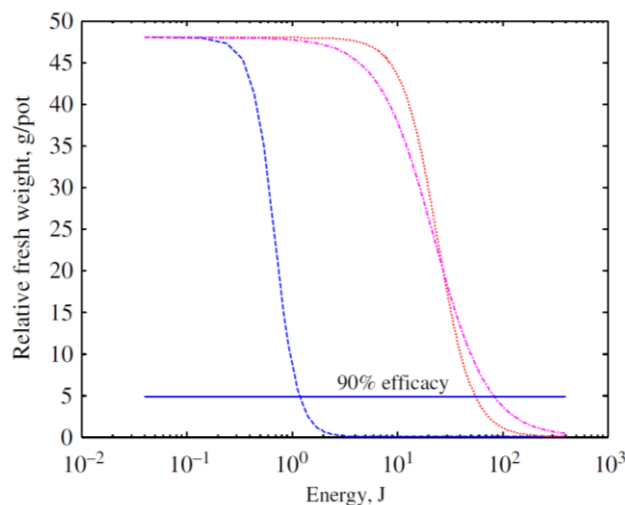
#### Valg av lasermodul

Laserens oppgave er å varme opp ugressets stamme til over 90° C. Ved denne temperaturen ødelegges plantens cellevegger, og plantens vekst begrenses eller stoppes helt.

Det er kritisk at riktig energimengde opptas av planten. Dette avhenger av laserens bølgelengde, eksponeringstid, strålens diameter og effekt. Data for valg av laser til prototypen baseres på en forskningsrapport fra Aalborg Universitet – «The Effect of Laser Treatment as a Weed Control Method» [25].

#### Valg av effekt

Lasermodulens effekt velges blant annet på bakgrunn av dose nødvendig for å oppnå tilstrekkelig bekjempelse. Det er vist at energiforbruk ved bruk av en laser på 90 W sammenlignet med en laser på 5 W er langt høyere. Det er følgelig interessant å se om laser med lavere effekt kan benyttes.



Figur 49 – Sammenhengen mellom dose og respons ved bruk av ulike lasere og strålediameter. Blå stiplet linje angir laser på 5 W, 532 nm og 0,9 mm strålediameter. Lilla og oransje linje angir laser på 90 W, 810 nm og henholdsvis strålediameter 1,2 og 2,4 mm [25]

I dose-responskurven i figur 49 kommer det klart frem at lasere med lavere effekt kan være hensiktsmessig å benytte.

### *Bølgelengde*

Mest mulig av lasermodulens energi må tas opp i planter. Det er derfor ønskelig å benytte en laser med komplementærfargen til planter. Det er derimot også mulig å bruke andre bølgelengder, gitt at den ikke er lik plantens farge.

Resultater fra tilgjengelig rapport beskriver laser med bølgelengde 532 nm og 810 nm der det er indikasjon på bedre absorpsjon ved 532 nm. Videre anbefales det i rapportens konklusjon at effektiviteten kan forbedres ved riktig valg av bølgelengde.

### *Strålediameter*

På bakgrunn av data fra relevant forskningsrapport kommer det frem at valg av strålediameter er av lite betydning ved bruk av laser i lavere effektspenn under 5 W.

### *Avstand mellom laser og kulturplante*

Lasermodulens ytre dimensjoner må muliggjøre fleksibel montering. Dette er nødvendig da det er ukjent hva optimal avstand mellom lasermodul og ugressplante er.

### *Eksponeringstid*

Nødvendig eksponeringstid avhenger av en rekke faktorer som tidligere beskrevet. Lasermodulen bør derimot ha en maksimal arbeidssyklus over 30 % for å hindre lav effektivitet ved drift.

### *Kompatibilitet*

Laseren skal påmonteres en tiltmekanisme på en X - ramme. Vekt og størrelse må derfor tas hensyn til for å muliggjøre nøyaktig bevegelse.

## Valgt løsning

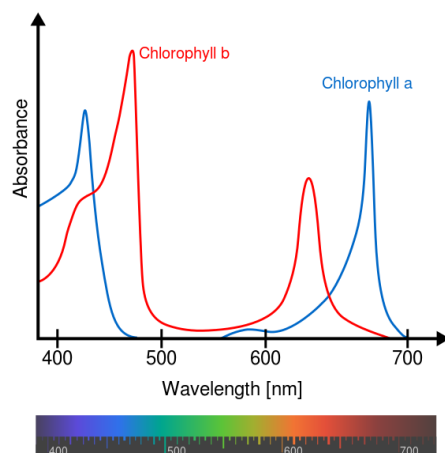
Nichia NDB7875 445 nm, 9 mm, 3W [38]



Figur 50: Innkjøpt Nichia NDB7875 lasermodul påmontert brakett av aluminium

Figur 50 viser valgt løsning som er en modul bestående av laserdiode, laserdriver, kjøleribbe og linse. Av ekstern elektronikk kreves strømforsyning med konstant spenning og strøm. Modulen avbildet har en påmontert kjøleribbe av kobber, men for å øke maksimal arbeidssyklus er det hensiktsmessig å bruke en brakettanordning av aluminium som også fungerer som kjøleribbe.

På bakgrunn av tilgjengelige absorpsjonsspekter av klorofyll vist i figur 51 ses det at maksimal absorpsjonsbølglengde er 430 nm og 460 nm for henholdsvis klorofyll a og klorofyll b. På bakgrunn av dette og tilgjengelige komponenter velges lasermodulens bølglengde til 445 nm. Ytterligere spesifikasjoner for lasermodul er vist i tabell 15.



Figur 51 – Grafen viser absorpsjonsmønster for klorofyll a og b [39]

Tabell 15 – Spesifikasjoner, Nichia NDB7875 lasermodul [38]

Spesifikasjoner	Verdi
Utgangseffekt	3 W
Bølglengde	445 nm
Driftsspenning	6-9 V
Maksimalt strømforbruk	2,3 A
Maksimal arbeidssyklus	75 %
Pris	NOK 1500,-

### Servomotor for tilt av laser

Valgt løsning krever en servomotor for tilt av lasermodulen ved bestråling på tvers av kjøreretning.

Følgende krav til servomotor stilles:

- Kompatibel med Arduino mikrokontroller
- Sprut- og fuktsikker
- Minimum 90 deg spennvidde
- Tilstrekkelig moment for tilt av lasermodul

Valgt servomotor er illustrert i figur 52 med spesifikasjoner vist i tabell 16.

Tabell 16 – Spesifikasjoner, servomotor Hitec HS-422 [40]

Spesifikasjoner	Verdi
Variant	Hitec HS-422
Modulering	Analog
Moment	4.1 kg-cm
Spenning	6 V
Hastighet	0.16 sek/60°
Spennvidde	180°
Pris	NOK 140,-



Figur 52 – Servomotor for tilt av laser [40]

### Transport av lasermodul

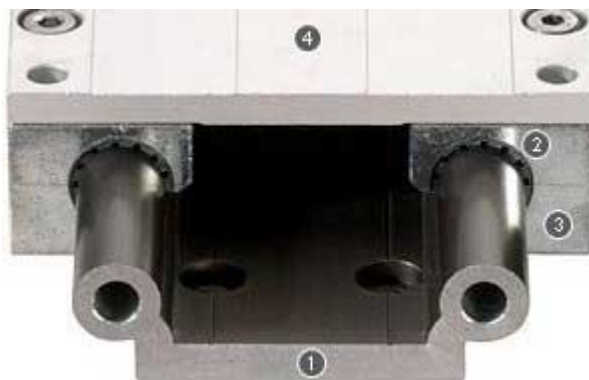
Lasermodul må forflyttes i landbruksrobotens kjøreretning for å dekke arbeidsområdet spesifisert. Følgende krav stilles til transportsystemet:

- Hurtig fremkommelighet
- Tilstrekkelig stabilitet for lasermodul
- God holdbarhet
- Minimalt vedlikehold
- God håndtering av arbeid i skittent miljø
- Stabil/glatt kjøring
- Enkel sammenstilling

#### *Valgt løsning*

Transportering av lasermodul foregår ved hjelp av en vogn montert på en skinne avbildet i figur 53. Skinne og vogn kommer fra produsenten Igus spesialisert på lineær bevegelse ved bruk av glidelagre og tilpassede skinner.

Valgte produkt kommer fra Igus's DryLin® W serie og består av en ferdig montert vogn (4) med fire glidelagerhus (3) som er tilpasset en dobbelskinne laget av anodisert aluminium (1) - noe som gjør montering enkelt [41]. Glidelagrene er smørefrie og trenger derfor minimalt vedlikehold. Fraværet av smøring gjør systemet motstandsdyktig mot skitt og møkk, men samtidig opprettholdes lav friksjon.



Figur 53 – Tverrsnitt av valgt vogn- og skinneresystem [41]



### Tannrem

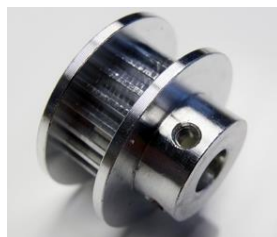
Det er avgjørende å ha kontroll over lasermodulens plassering på rammen. Derfor benyttes en tannrem, illustrert i figur 54, med spesifikk tannavstand, slik at antall omdreininger steppermotor utfører alltid tilsvarer en gitt lengde for vogn- og lasermodul. Tannremmen er beregnet for bruk i høyhastighetsapplikasjoner med tung last.



Figur 54 – Tannrem for kontrollering av lasermodul påmontert vogn [42]

### Tannhjul for tilkobling av tannrem

Figur 55 viser valgt tannhjul som er tilpasset tannremmens tannavstand og valgt steppermotor.



Figur 55 – Tannhjul for drift av tannrem [43]

### Trinsehjul for tilbakeføring av tannrem

Figur 56 viser valgt trinsehjul. Hjulets innmat består av to kulelagre som sikrer jevn rotasjon selv med store krefter påført. Trinsehjulet er kompatibelt med tannremmen.



Figur 56 – Trinsehjul for tilbakeføring av tannrem [44].

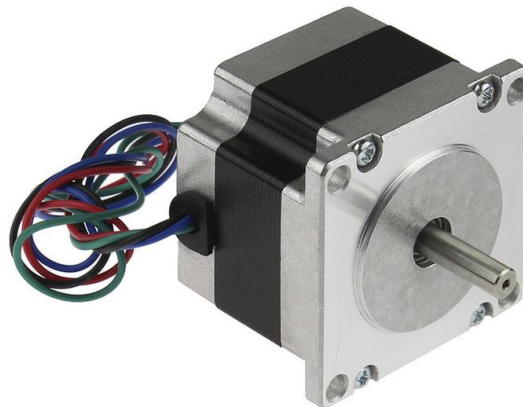
### Steppermotor for styring av vogn påmontert laser

Figur 57 viser steppermotor valgt for styring av vogn langs skinnesystemet. Tabell 17 viser motorens spesifikasjoner. Steppermotor er tilpasset bruk av Arduino som styringssystem.

Det er nødvendig med ekstern driver for drift.

Tabell 17 – Spesifikasjoner, steppermotor Mercury [45]

Spesifikasjoner	Verdi
Variant	Mercury
Stegvinkel	1.8° ± 5 %
Moment	90 N-cm
Spenning	12 V
Strømforbruk	0,33 A
Hastighet	0,16 sek/60°
Vekt	0.20 Kg
Pris	NOK 120,-



Figur 57 – Steppermotor for styring av lasermodul i X - retning [45]

### 7.3.2 Bevegelige skrapepinner

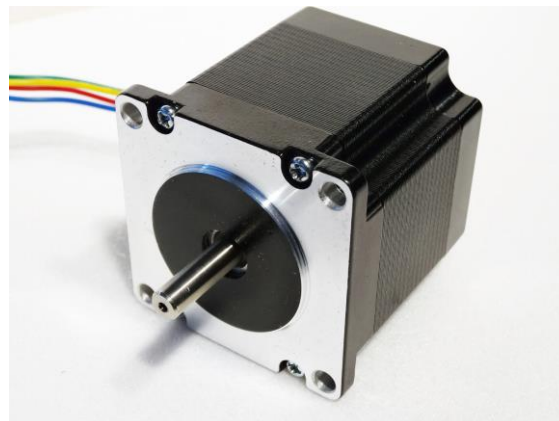
#### Steppermotor for styring av bevegelige skrapepinner

Bestemmelse av steppermotorens spesifikasjoner deriblant maksimalt merkemoment som vist i tabell 18 gjøres på bakgrunn av tilgjengelige komponenter og kostnad. Valgt komponent som avbildet i figur 58 er anvendelig steppermotor tilpasset bruk av mikrokontrollerbasert styring.

Det er nødvendig med ekstern driver for drift.

Tabell 18 – Spesifikasjoner, Nema 23 [46]

Spesifikasjoner	Verdi
Variant	Nema 23
Stegvinkel	1.8° ± 5 %
Moment	124 N-cm
Spenning	3.0 V
Strømforbruk	2.8 A
Vekt	0.70 Kg
Pris	NOK 200,-

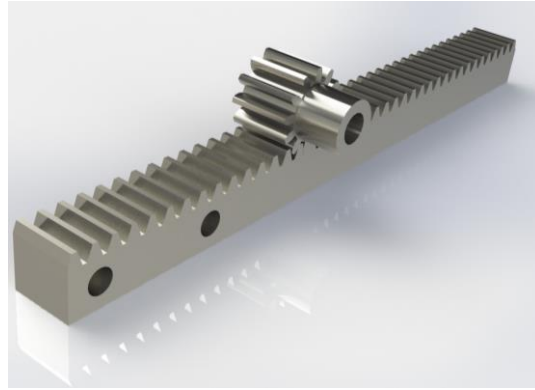


Figur 58 – Steppermotor for styring av skrapepinner [46]

### **Tannstenger og tannhjul for lineær bevegelse**

Figur 59 illustrerer tannstang og tannhjul produsert av mekanikkprodusenten Mekanex. Komponentene er laget av stål.

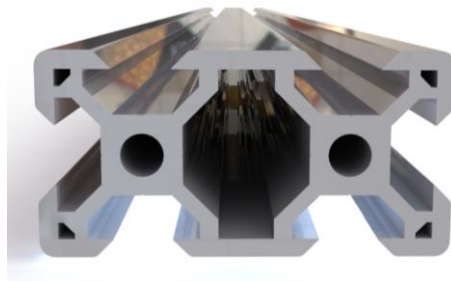
Tannstangens dimensjoner ble valgt med hensyn på å muliggjøre tilkobling av skrapepinner. Dette var avgjørende ved bestemmelse av bredde og dybde.



*Figur 59 – Interne komponenter i modul for bevegelige skrapepinner ansvarlig for lineær bevegelse*

### **Ramme for tilkobling**

Aluminiumprofil av høy kvalitet som gir stabilitet, beskyttelse og gode tilkoblingsmuligheter for verktøyets andre komponenter. Rammens profil er illustrert i figur 60.



*Figur 60 – Profil av aluminium for påmontering av andre komponenter i verktøy*

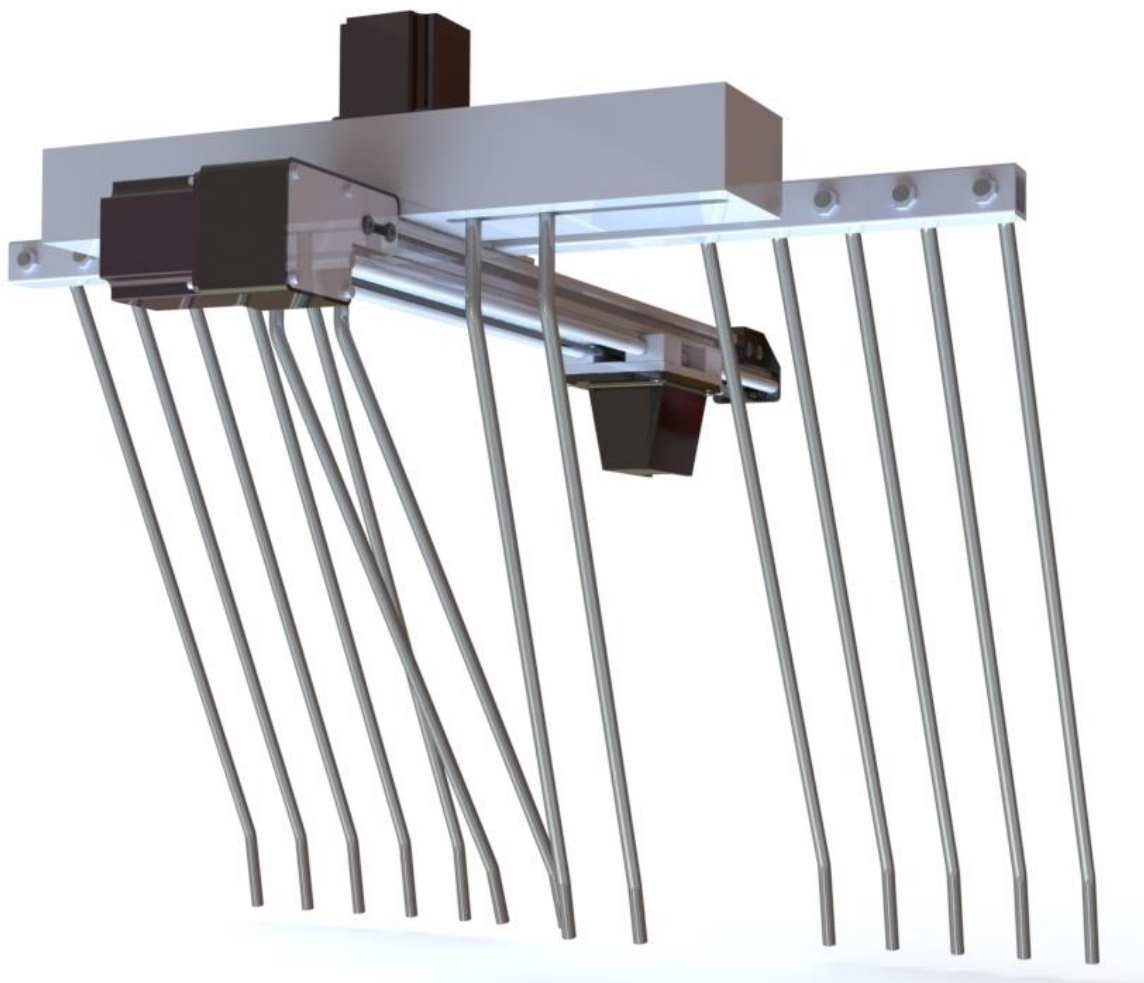
## 7.4 Sammenstilling

Komponenter beskrevet og illustrert tidligere i kapitlet sammenstilles til endelig produkt. Modell vises fra flere vinkler for å illustrere ulike funksjoner.

### Endelig sammenstilling

Mekanisk sammenstilt verktøy modul er illustrert i figur 61. Elektroniske komponenter inkludert sensor for bevegelige skrapepinner er ikke inkludert i sammenstillingen.

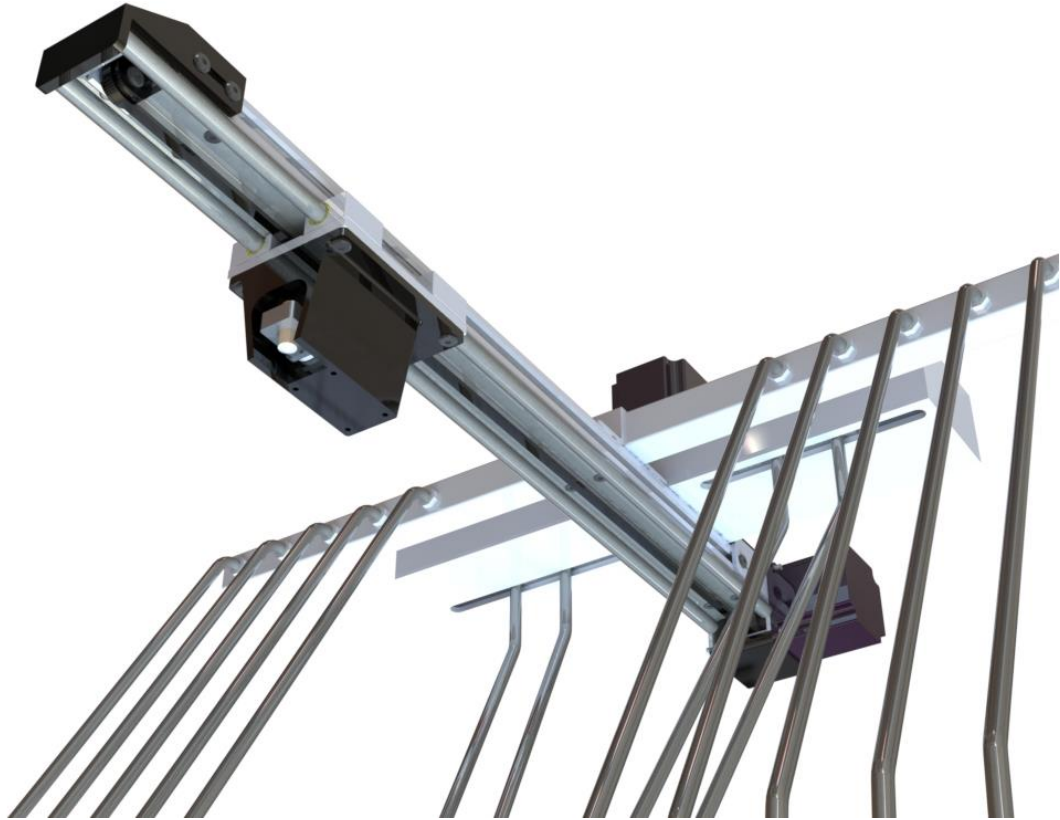
Sammenstillingen viser konseptuell virkning og er uten braketter for intern montering av komponenter og tilkobling til landbruksrobot.



*Figur 61 – Endelig sammenstilling av verktøy for autonom ugressbekjempelse. Sammenstillingen viser interne komponenter uten beskyttelsesdeksler*

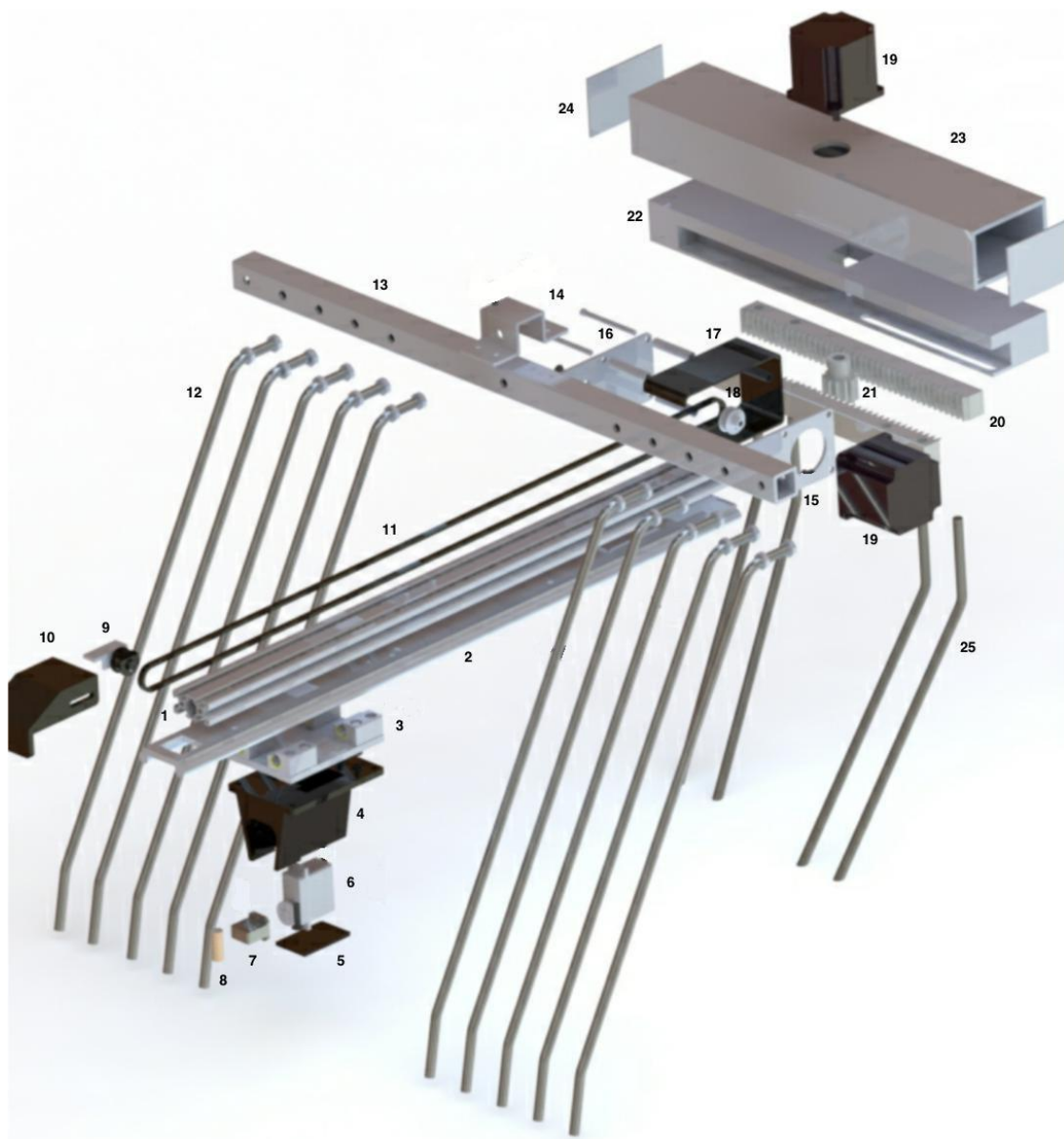
### Nærbilde fra undersiden

Arbeidsområde er i underkant av verktøymodulen. For å unngå unødvendig eksponering laserlys vil relevante komponenter kun være synlig fra undersiden, som vist i figur 62.



Figur 62 – Illustrasjon av verktøyets underside der ulike komponenter kommer bedre frem

## Ekspljosjonstegning av verktøy



Figur 63 - Ekspljosjonstegning av verktøy modul



Tabell 19 beskriver nummererte komponenter i figur 63.

Tabell 19 - Nummererte komponenter i sammenstilt verktøy modul

Nummer	Komponent	Nummer	Komponent
1	Tilkoplingsramme [47]	14	Festebrakett
2	Skinne [48]	15	Brakett for steppermotor
3	Vogn [48]	16	Brakett for steppermotor
4	Servohus	17	Tannhjulbeskytter
5	Servohus lokk	18	Tannhjul for tannrem [47]
6	Servo	19	Steppermotor
7	Brakett for lasermodul	20	Tannstang [49]
8	Lasermodul	21	Tannhjul [49]
9	Trinsehjul	22	Sammenstillingsanordning
10	Endebeskytter	23	Sammenstillingsboks
11	Tannrem	24	Lokk til sammenstillingsboks
12	Faste skrapepinner	25	Bevegelige skrapepinner
13	Tilkoplingsstag for pinner		

### Modulsammenstilling

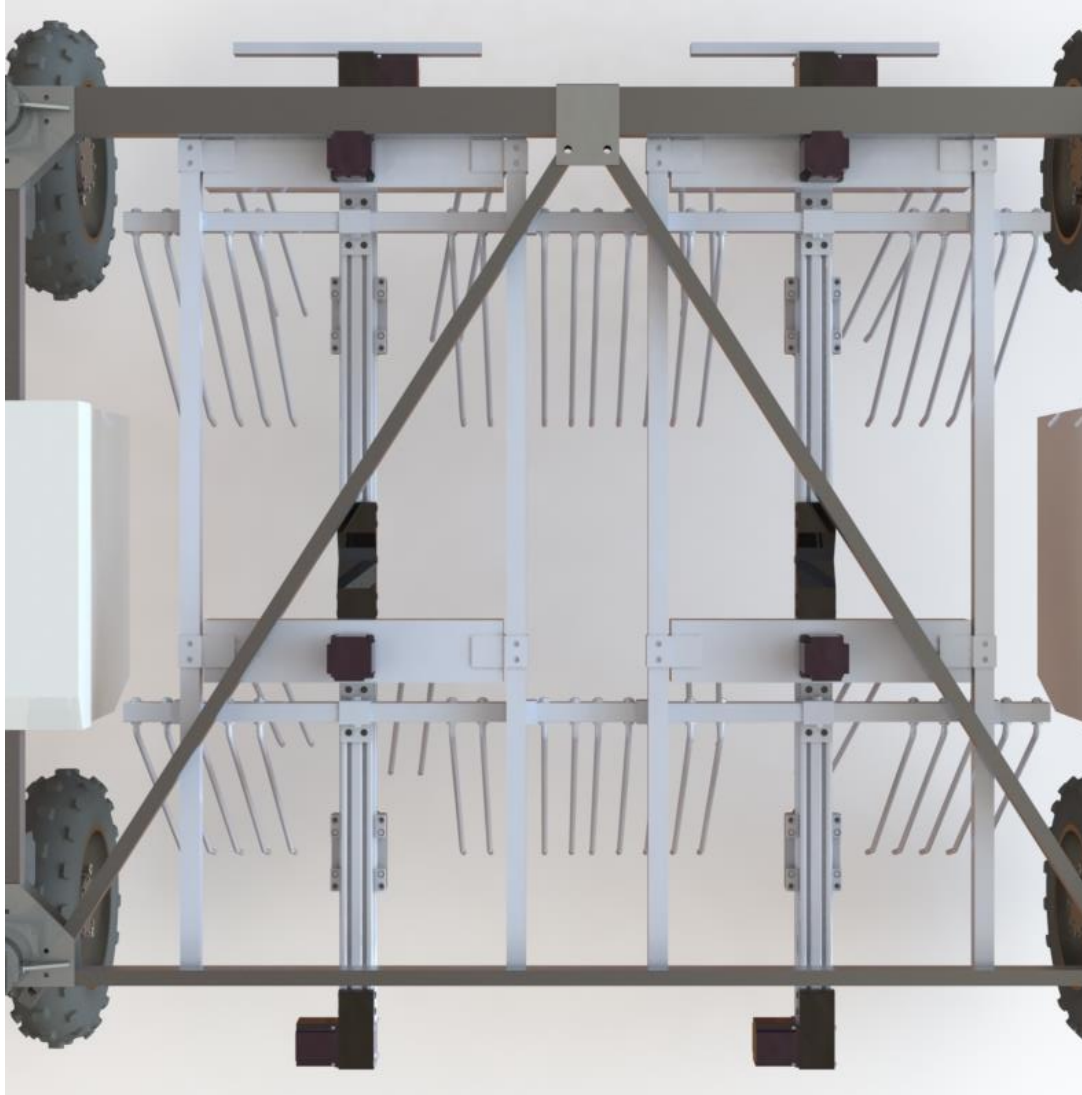
Modell fra tidligere arbeid innen den autonome landbruksroboten er benyttet for å simulere montering av fire verktøy moduler som vist i figur 64 [21].



Figur 64 – Fire verktøy moduler påmontert den autonome landbruksroboten

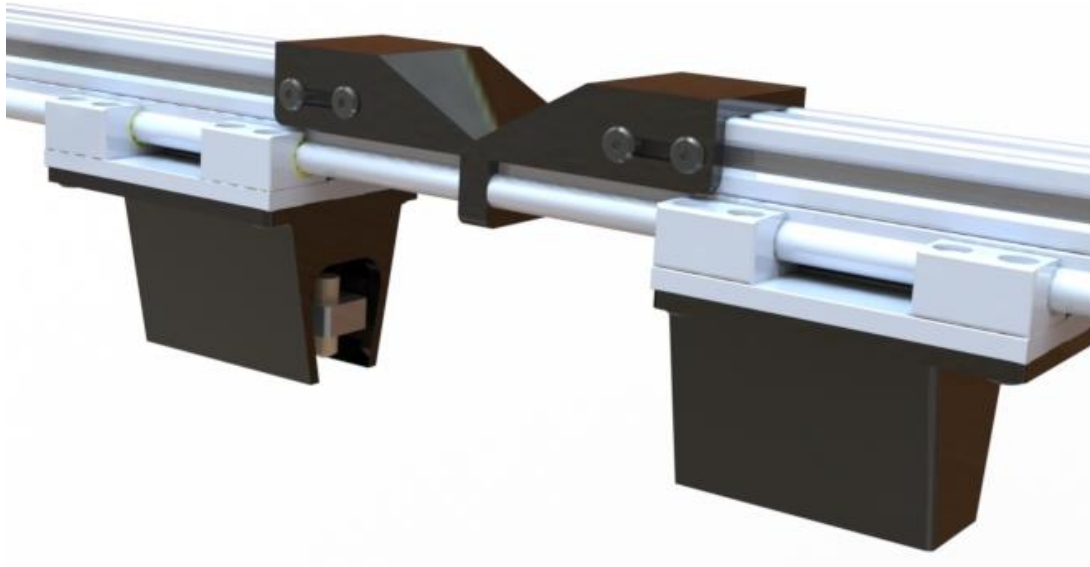


Figur 65 viser sammenstilling av fire verktøymoduler på den autonome landbruksroboten. Det vil i denne konfigurasjonen kun være behov for to sett lasersensorer for bestemmelse av kulturplantenes diameter. Disse sensorene er plassert i forkant av robotens kjøreretning og sender informasjon om kulturplantens diameter til hver sin verktøykolonne.



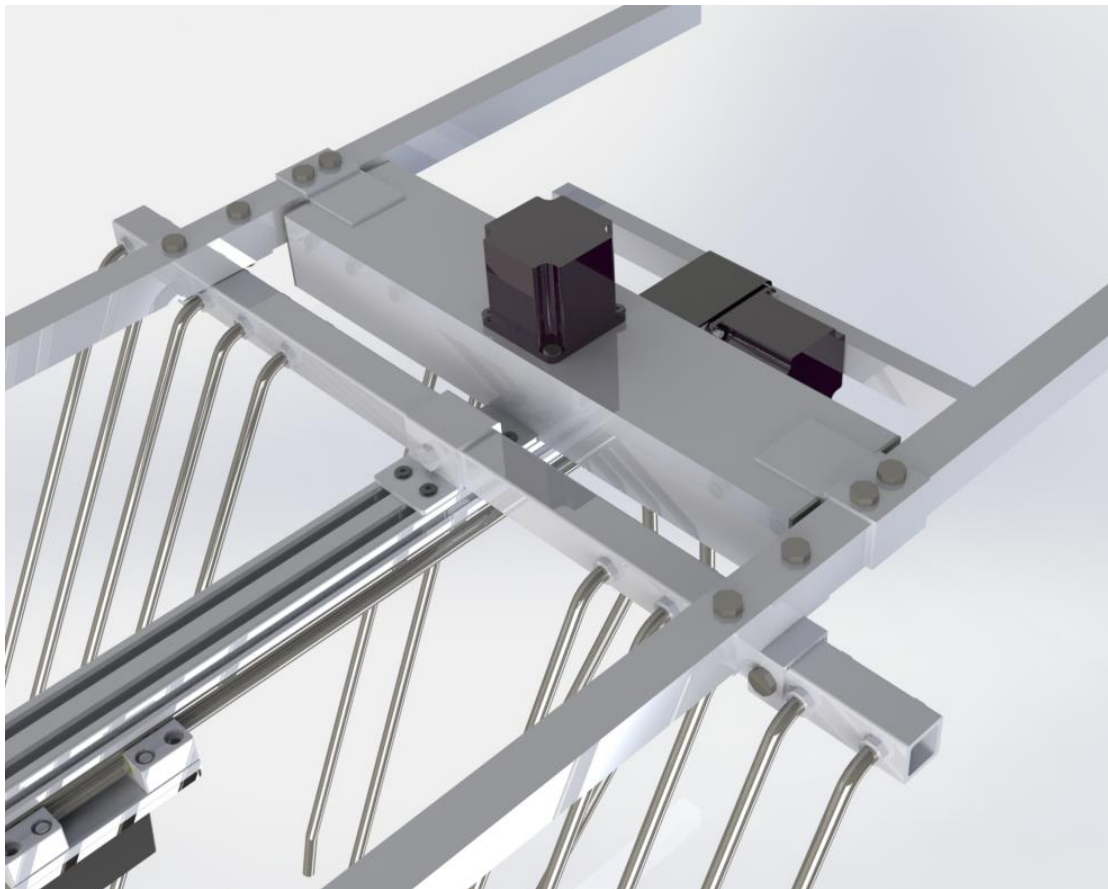
*Figur 65 – Landbruksrobot sett ovenfra påmontert fire verktøymoduler*

Under sammenstilling er de to bakerste transportsjennene for lasermodulene motsatt plasserte i forhold til de to forreste skjennene, dette er for å minimere lasernes dødsone ved sammenkoblingspunktet, se figur 66. Skrapepinneradene er likt plassert i forhold til kjøreretningen og vil arbeide i samme område, dette gjøres for å sikre god bearbeiding av jorden som vil øke sjansen for at ugresset blir revet opp.



*Figur 66 – Fremstilling av to verktøymodulers sammenstillingspunkt*

Figur 67 illustrerer sammenstillingsløsning for prototype hvor det er brukt tverrgående stålprofiler. Stålprofilene skal gi stabilitet til verktøyet og gjøre monteringen til landbruksroboten enklere.



*Figur 67 – For endelig prototype benyttes tverrgående stålprofiler for sammenstilling av komponenter*

## 8 Utvikling av styringskomponenter

Systemer for styring av laser og skrapepinner samt gjenkjenning av kulturplanter utvikles med mikrokontrollerbasert teknologi.

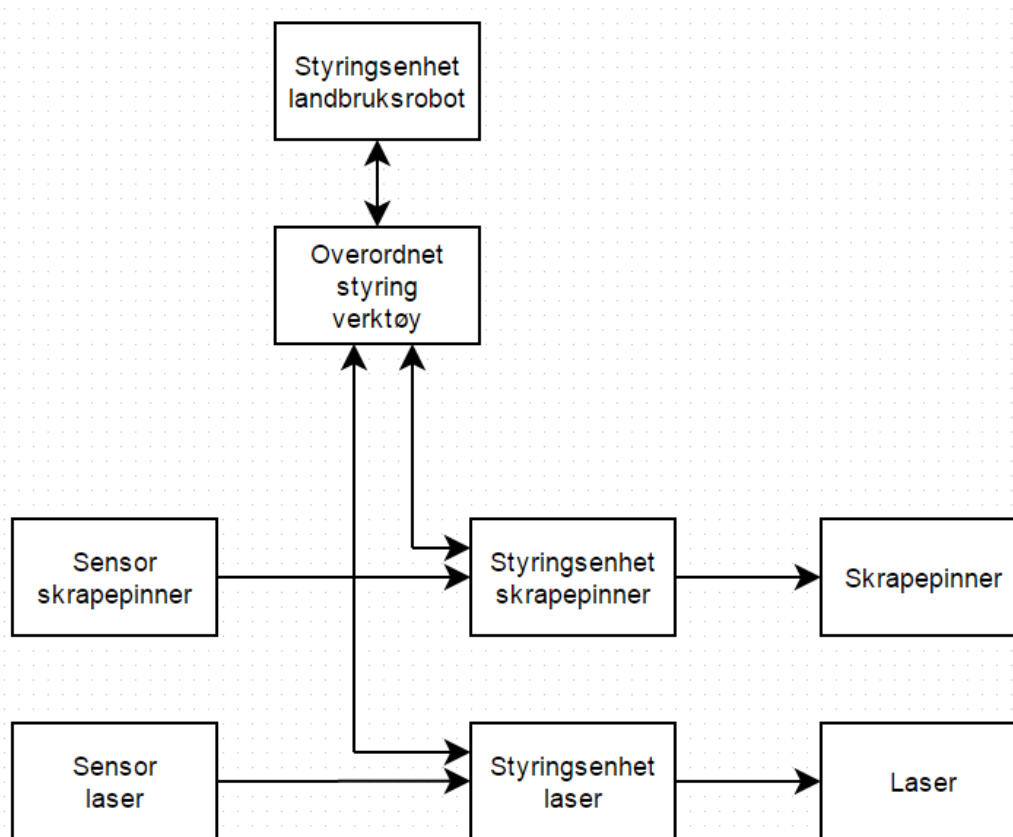
### 8.1 Overordnet styringselektronikk

Det totale styringssystemet er firedelt:

1. Landbruksrobot: fremdrift og kommunikasjon med verktøy
2. Verktøy: overordnet styring av underenheter
3. Skrapepinner: dedikert enhet som styrer sensor og mekanikk
4. Laser: dedikert enhet som styrer sensor, laser og mekanikk

Av det totale styringssystemet utvikles sensor for skrapepinner og styringssystemer for skrapepinner og laser. Innbyrdes kommunikasjon mellom blokkene som utgjøre det totale systemet utvikles ikke.

Ved sømløs drift av komplett landbruksrobot med verktøyet påmontert må alle komponenter i diagrammet under utvikles og virke som beskrevet i blokkdiagrammet i figur 68. Verktøyet skal kun arbeide i spesifikke områder av åkeren og må følgelig få kommandoer basert globale og lokale forhold.



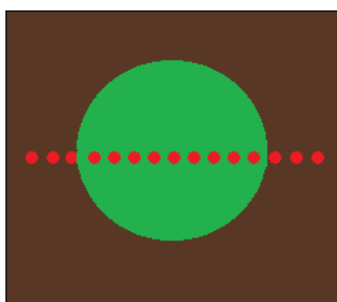
Figur 68 – Blokkdiagram av det totale styringssystemets innbyrdes kommunikasjon

## 8.2 Lasersensor for styring av skrapepinner

Sensorens oppgave er å bestemme kulturplantens ytterkanter. Fra egenscreeningen i kapittel seks ble en lasersensor funnet som beste alternativ. Etersom sensorer av denne typen må spesialtilpasses, egenutvikles sensoren.

### Virkemåte

Kulturplanters maksimale vekstområde i bredderetning belyses av et visst antall lasere med fast innbyrdes avstand. Hver enkelt laser har en spesifikk frekvens, noe som muliggjør gjenkjenning av frekvenser når planter reflekterer laserlyset. Figur 69 viser maksimalt vekstområde belyst av 15 lasere. Sensorens tre lasere på hver ytterkant treffer jord, og angir derfor plantens størst bredde til de respektive lasers ytterste kant.



Figur 69 – Grønn sirkel representerer kulturplante bestrålt av lasere for bestemmelse av diameter

### Grensespesifikasjoner

Maksimalt vekstområde for kulturplanten er 20cm i diameter. Sensoren utvikles derfor med en brennvidde på 30cm for å dekke eventuelle uregelmessigheter.

### Signalbehandling og I/O

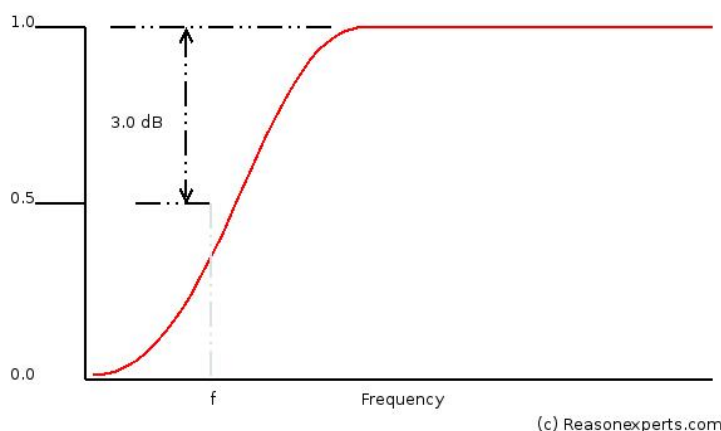
Det benyttes et system basert på Arduino for signalbehandling. Denne plattformen er kompatibel med styringssystemet for resten av verktøyet.

Systemet utvikles slik at hver laserposisjon har en spesifikk spenning som representerer en posisjon for mekanisk styring av skrapepinner.

Laserner arbeider på samme bærefrekvens og benytter faseforskyvede PWM-signaler. Det er med andre ord en lineær sammenheng mellom antall reflekterte laserstråler og spenning.

En spesifikk bærefrekvens benyttes for å skille laserlyset fra andre lyskilder og forstyrrelser. Det antas at sensor ikke eksponeres for andre høyfrekvente lyskilder, og det settes derfor en bærefrekvens på 40 kHz for PWM.

For å filtrere laserens bærefrekvens fra støy benyttes et førsteordens høypassfilter med sammenheng mellom frekvens og signalspenning som vist i figur 70. Filteret bestående av én resistor og én kondensator vil fungere både som filter for kontinuerlig lys og blinkende lys under et satt frekvensintervall [18].



Figur 70 – Sammenheng mellom frekvens og signalspenning ut fra høypassfilteret [18]

Det antas at høyfrekvent optisk støy ikke er tilstedeværende i en åker. På dette grunnlaget benyttes innledningsvis førsteordens filter. For å begrense innkommende støy i større grad kan høyere ordens høypass- og båndpassfiltre benyttes.

### Komponenter med kommentarer

- *Laser (L1 – L10)*  
Det er ønskelig med mest mulig refleksjon av laserlyset fra kulturplanten. Det velges derfor lasere med bølglengde 532 nm tilsvarende refleksjonsmønsteret til planter. Effekten velges på bakgrunn av tilgjengelig komponenter og er satt til 5 mW. Modulene krever 5 volt, det må derfor benyttes en ekstern strømforsyning.
- *Fotosensor (D1, D2)*  
Sensoren velges på bakgrunn av sensitivitet mot reflektert bølglengde. Det benyttes en TEPT4400 – fototransistor med toppsensitivitet på 570 nm [50]. I serie med fototransistorene er et høypassfilter plassert. I tillegg til å filtrere ut lave frekvenser, slipper det også kun gjennom alternerende lys – det vil si at kontinuerlig lys fra blant annet dagslys ikke registreres.
- *Mikrokontroller (EB1)*  
Arduino Uno. Styrer digitale og analoge innganger og utganger. Uno er valgt på grunn av evne til å levere nok strøm til laserdiodene, slik at ytterligere forsterker er unødvendig.

- *Operasjonsforsterker (U1)*  
Benyttes for å forsterke signal etter filter. En ua741-operasjonsforsterker er koblet som spenningsforsterker med eksternt potentiometer for justering av forsterkning.
- *Driver, steppermotor (EB2)*  
Steppermotorer over en viss størrelse kan ikke drives direkte av mikrokontroller, og krever derfor en ekstern driver. Det er valgt å bruke modulen Big easyDriver fra SparkFun [51].
- *Resistanser i filterkrets (R2 og R4)*  
Kondensatorverdien settes til 5nF. Cutoff-frekvens settes til 30kHz for å sikre at ønskede signaler oppfanges av sensor. Beregning av korrekt resistansverdi er utført fra formel 1 som viser sammenhengen mellom frekvens, resistans og kapasitans i et førsteordens høypassfilter [52]

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 30000 \cdot 5 \cdot 10^{-9}} = 1061 \Omega$$

Det er ønskelig å kunne variere ønsket cutoff-frekvens til filteret. En variabel resistor (R4) settes derfor i serie med R2. Verdien til potentiometeret settes til 510  $\Omega$ .

På bakgrunn av dette velges potensiometer R2 ved å subtrahere ideell verdi med midtpunktverdien til R4 som gitt under

$$R_2 = 1061 - \frac{510}{2} = 806 \Omega$$

Potentiometer settes til 820  $\Omega$ .

Resistanser velges etter E24 standard tabellverdier, og settes til 1.1 k $\Omega$  [53].

### **Potensielle problemer med nåværende sensorsystem**

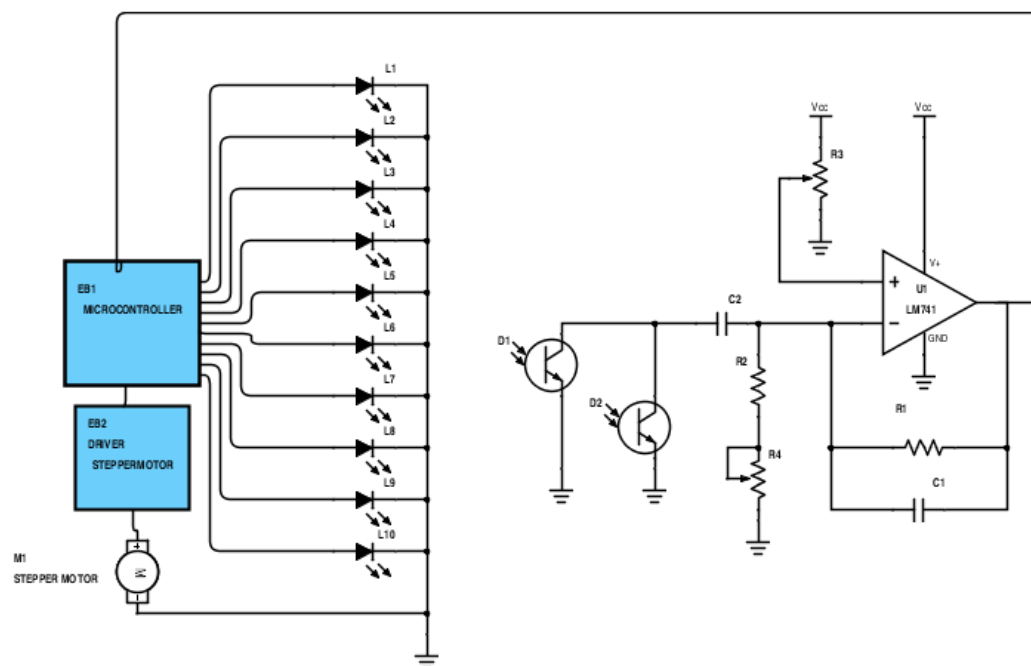
Det vil alltid være andre gjenstander i bestrålingsfeltet til laserne som kan oppfattes som en kulturplante. Ettersom kulturplanters vekstform ikke er jevn sett ovenfra og rundt frøpunkt, må informasjon om største bredde detektert avgjøre posisjonen av skrapepinner. Feilaktig informasjon grunnet løse blader, steiner og lignende vil derfor i verste fall redusere sveipeområdet til skrapepinnene.

Dette problemet kan begrenses ved å forkaste ikke-sammenhengende informasjon, det vil si signal fra en laserstråle lenger enn én posisjon vekk fra andre.

## Koblingsskjema og beskrivelse

Signalstyrken fra fototransistorene er meget lav. For å benytte det filtrerte signalet videre må det derfor forsterkes ved bruk av en operasjonsforsterker. Signalet ut fra forsterkeren er likerettet og kobles til en analog inngang på mikrokontrolleren.

For økt kontroll på signalstyrken av innkommende frekvenser benyttes et potensiometer for justering av cutoff-frekvensen til høypassfilteret. Koblingsskjemaet som knytter programvare og maskinvare er vist i figur 71.



Figur 71 – Koblingsskjema for lasersensor for styring av skrapepinner

## Notat til utviklet programvare

Det er mekaniske begrensninger i systemet for bevegelige skrapepinner. Dette må tas hensyn til i programvaren, slik at maksimal bevegelse ikke overskrides og steppermotor og ytterligere systemer skades. Utviklet kode er i vedlegg A.

### Styring av skrapepinner med steppermotor

Det er ingen innebygget feedbackrets i steppermotorer for å bestemme rotorens posisjon. Dette må derfor implementeres i mikrokontrollerens kode. Koden har til enhver tid oversikt over hvor mange steg motoren har gjennomført. Dette fungerer som en virtuell feedback som muliggjør posisjonering av skrapepinnene.

Området som omfatter maksimal potensiell diameter av kulturplanten belyses av Pulse Width modulerte laserstråler. Det benyttes 10 laserdioder der hver av laserne er påslått 5 % av et gitt tidsspenn. Det er avgjørende at lasernes modulerte pulser kontinuerlig er faseforskyvet, slik at pulsene emitteres etter hverandre. Refleksjon av alle laserne vil utgjøre maksimal signalstyrke som er  $V_{maks}/2$ .

### 8.3 Styringselektronikk, laser

Det benyttes separate sensorsystemer for bestemmelse av lasersystemets og skrapepinnenens korrekte posisjon. Styringssystemene er modulbasert, og utvikles derfor på separate mikrokontrollere. Kommunikasjon mellom styringssystemer implementeres ikke. Dette må tas hensyn til for å begrense risiko for bestråling av utsatte kroppsdeler.

#### Krav for styringselektronikk, laser

Bruk av lasere i klasse 4 omfattes av standard EN 60825 – «Safety of laser products» og det er etter påbud fra Statens Strålevern (SSV) følgende krav til styring [54]:

- Synlig eller hørbar indikator som viser at laseren er påslått
- Nødstop
- Nøkkkelbryter

Styringselektronikken skal minimere sannsynligheten for skadevirkninger av laseren. Kravene fremmet av SSV må derfor implementeres.

#### Komponenter med beskrivelse:

- *SSR (RY1)*  
Solid State Relay – ikke-mekanisk rele for styring av strøm til laserverktøyet
- *Strømbegrenser (Constant source)*  
Laserverktøyet har ingen innebygget strømbegrenser, og må derfor motta strøm fra en kontrollert kilde med jevn strøm og spenning. Dette er en ekstern kretskortenheter som justeres med potensiometer. For lasereneheten valgt må strømbegrenseren forhåndsinnstilles til å levere maksimalt 2.3 A ved 9 V.
- *Sikring (S1)*  
Benyttes for å begrense skader ved komponentfeil og/eller feilbruk. Basert på tabell 18 velges sikring på 6 A.

Tabell 20 – Strømforbruk for laserenhet og tilhørende elektronikk

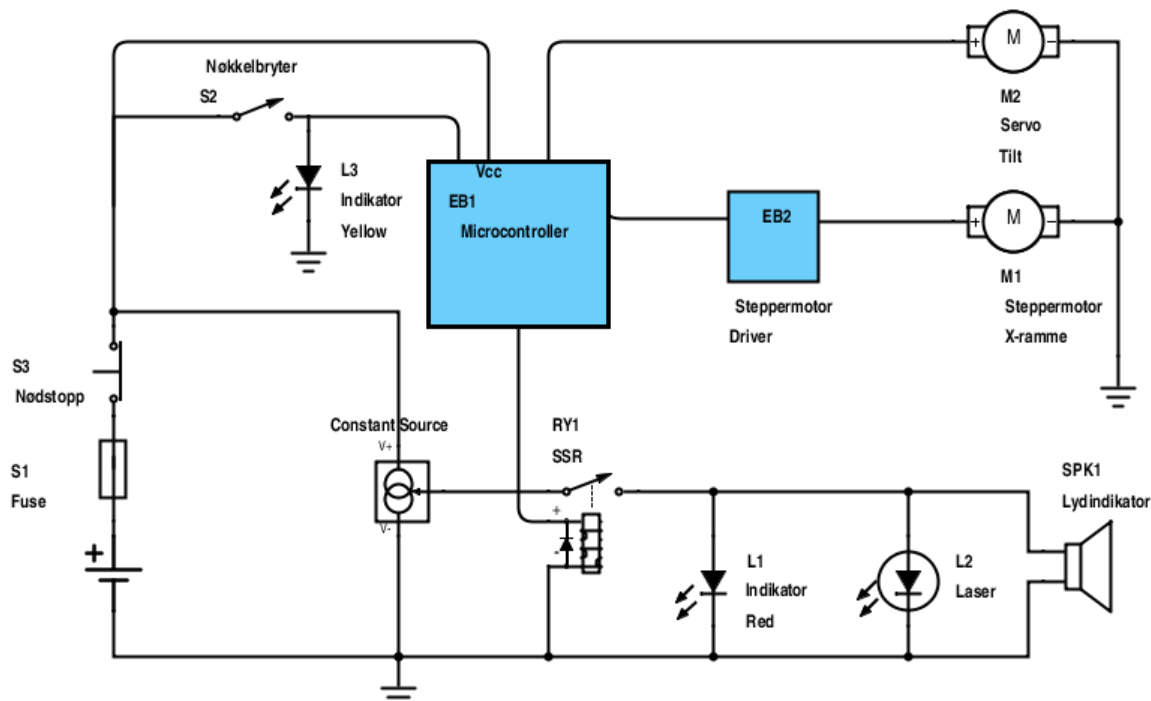
Komponent	Strømforbruk [A]
Mikrokontroller	N/A
Steppermotor og driver	2
Servo	0.15
Laserenhet og konstant strømkilde	3
Indikatorer	N/A
<b>Sum</b>	<b>5.15</b>



- *Nødstoppbryter (S3)*  
Overstyrer hele systemet ved å bryte strømtilførselen. Systemet må omstartes etter en nødstopp.
- *Nøkkelbryter (S2)*  
Sikkerhetsanordning for å unngå uautorisert bruk. Signalet fra mikrokontrolleren til SSR er kontrollert av nøkkelbryteren, slik at laseren ikke kan benyttes uten korrekt posisjon på nøkkelbryteren.
- *Mikrokontroller (EB1)*  
Arduino Uno. Styrer digitale og analoge innganger og utganger.
- *Steppermotor (M1)*  
Benyttes for å bevege laserverktøyet i x-retning
- *Driver, steppermotor (EB2)*  
Steppermotorer over en viss størrelse kan ikke drives direkte av mikrokontroller, og krever derfor en ekstern driver. Det er valgt å bruke modulen easyDriver fra SparkFun [55].
- *Servomotor (M2)*  
For tilt av laserverktøyet for ytterligere én frihetsgrad benyttes servomotor med maksimal tiltvinkel på 180 grader. Servoen har en feedbackkrets som muliggjør kontinuerlig overvåkning av laserens posisjon.
- *Indikatorer (L1, L3, SPK1)*  
For indikasjon av påslått laserverktøy benyttes lyd- og lysindikatorer.
- *Trådløs kommunikasjon (ikke inntegnet)*  
Kretskort variant HC-05 benyttes for trådløs kommunikasjon mellom mikrokontroller og smarttelefon. Modulen benytter Bluetooth-teknologi og bruker et seriellinterface [56].

## Koblingskjema

Det utvikles separat styringselektronikk for styring av lasermodul. Figur 72 viser koblingene mellom ulike komponenter sentrert rundt en mikrokontroller. Det er utviklet programvare for styring av komponenter.



Figur 72 – Koblingskjema for styringselektronikk til laserverktøyet

## Notat til utviklet programvare

Sensor for gjenkjenning av ugress utledes ikke i denne oppgaven. Programvare for styring av laser vil derfor utvikles for manuell styring av laserens posisjon og status. Utviklet kode er i vedlegg B.

Ved videre utvikling av programvare kan sensor implementeres og automatisk styring av mekanisk system igangsettes.

## Interface med bruker

Kontroll av lasermodul og koordinat for bestråling kan styres på to måter. Enten ved forhåndsprogrammering av ønsket bane – eller direktekontrollering fra en smarttelefon ved bruk av trådløs dataoverføring.

For kontrollering fra en smarttelefon benyttes det et tredjepartsprogram med støtte for kommunikasjon gjennom den trådløse plattformen Bluetooth. Det er mulig å kontrollere spesifikk posisjon til steppermotor, servomotor og laserstatus enten via koordinater – eller virtuelle analoge potensiometer.

## 9 Prototyping og test

Prototyping anses som nødvendig for å begrense antall usikkerhetsmomenter vedrørende bruk av laser i landbrukssammenheng. Dette kapitlet dokumenterer bygging og forsøk, og konkluderer med relevante resultater og foreslår forbedringspotensialer.

### 9.1 Målsettinger

Det er mange usikkerhetsmomenter det utviklede verktøyet besitter. Det er derfor ønskelig å gjennomføre prototyping i en tidlig fase for å avdekke potensielle problemer. Følgende arbeid skal gjennomføres.

#### **Systemet som en helhet**

Det er ønskelig å utnytte landbruksroboten styrker og begrense svakhetene. På bakgrunn av dette har utviklingen vært fokusert på en kombinasjonsløsning mellom ulike verktøy. Prototyping skal gi informasjon om hvordan teknologiene arbeider sammen, og hva som eventuelt må endres.

#### **Laser**

Bruken av laser i ugressbekjempelse er lite utbredt og det er derfor begrenset med forskningsdata på dette feltet. Ved å implementere denne teknologien på verktøyet vil det på lang sikt gi informasjon om hvordan best mulig utnytte potensielle styrker.

For å øke kompetansen på dette feltet skal det gjennomføres kontrollerte forsøk med laser og ugressplanter.

#### **Utvikling av sensorsystem**

Sensorsystemet som benyttes for å bestemme kulturplantenes diameter er spesialutviklet for dette prosjektet, og testing av teorien er derfor nødvendig. Samkjøringen mellom sensor og det resterende verktøy er også en utfordrende del som innebærer praktisk arbeid.

#### **Bestemme verktøyets robusthet**

Verktøyet skal arbeide i et støvete og fuktig miljø. Dette kan gi mange tidligere ukjente problemstillinger som kan endre mindre eller større deler av verktøyet.

## 9.2 Produksjon av komponenter

### Bevegelige skrapepinner

Det mekaniske systemet for styring av bevegelige skrapepinner ble innlemmet i en aluminiumprofil for økt stabilitet og mulighet for sammenkobling til andre komponenter. Profilet ble bearbeidet for installering av intern mekanikk som vist i figur 73.



Figur 73 – Bearbeidet aluminiumprofil for installering av mekanikk

Omgjøring fra roterende bevegelse i steppermotor til lineær bevegelse ble gjennomført ved bruk av tannstenger som vist i figur under. Hovedkomponentene vist i hvit plast i figur 74 ble 3D-printet og skrudd sammen med plater av aluminium.



Figur 74 – Tannstenger, 3D-printede rammer og sammenstillingsplater av aluminium i redskap for bevegelige skrapepinner

Ved komplett sammenstilling av intern mekanikk kan steppermotor påmonteres med tannhjul som passer tannstenger vist i figur 75.



Figur 75 – Intern mekanikk klar for påmontering av steppermotor

Modulen kan nå plasseres i maksimal indre og ytre posisjon som vist i figur 76 og 77 under.



Figur 76 – Innerste posisjon for skrapepinner. Representeres ved gjenget hull i tannstangen.



Figur 77 – Ytterste posisjon for skrapepinner

### Lasersensor

Det benyttes aluminiumramme for å holde lasermoduler i riktig posisjon. Figur 78 viser sammenstilling av lasermoduler i ramme. Det er viktig at lasermodulene kan justeres for at data fra sensor er nøyaktig.



Figur 78 – Sammenstilling av lasere i ramme av aluminium

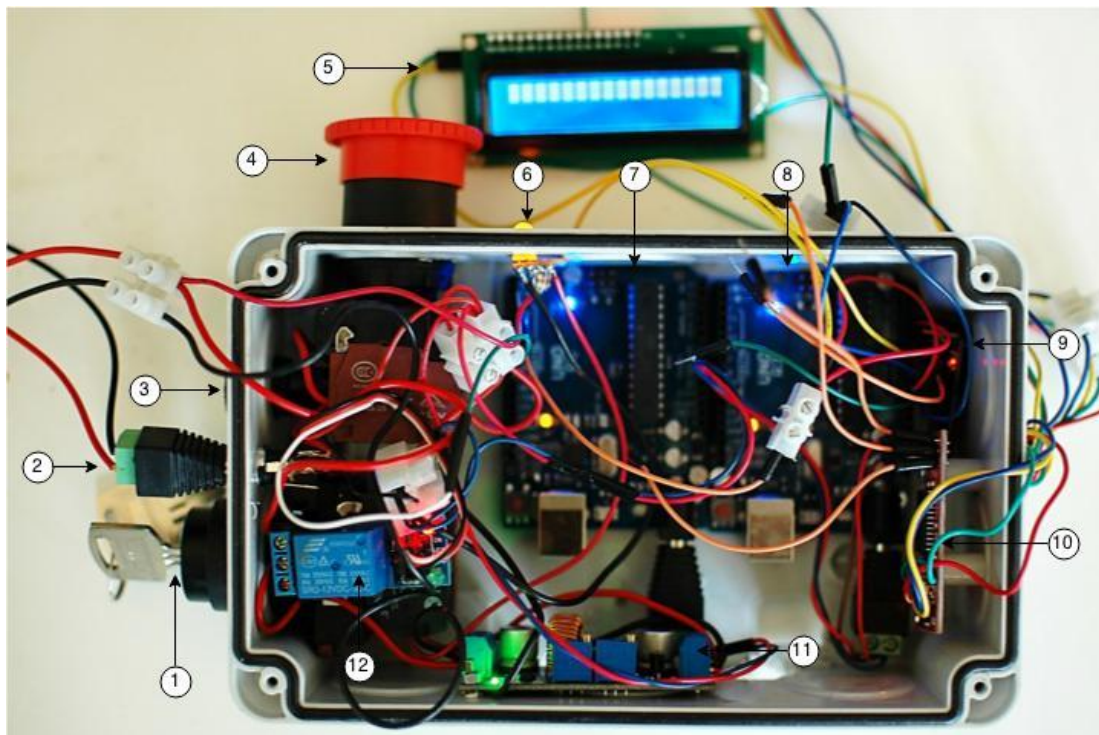
Figur 79 viser undersiden av lasersensoren med hull for laserstråler og sensormoduler. Innbyrdes avstand mellom lasermoduler tilsvarer maksimal oppløsning på sensormodulen i drift. For å stabilisere lasermodulene er det laget et deksel av aluminium som omslutter sensormodulen.



Figur 79 – Underside av lasersensor med laserpekere og sensormoduler

## Styringssystemer

All elektronikk er samlet i én koblingsboks for å lette drift og eventuell feilsøking. Figur 80 viser sammenstillingen av alle komponenter, og er ytterligere beskrevet under. Det benyttes en koblingsboks med beskyttelsesgrad IP65. Alle eksterne komponenter har samme klassifisering. Dette kan i økt grad muliggjøre test med verktøymodulen. Mikrokontrollere benyttet har et brukersnitt som muliggjør enkel sammenkobling av komponenter ved å bruke en løsning uten behov for lodding.



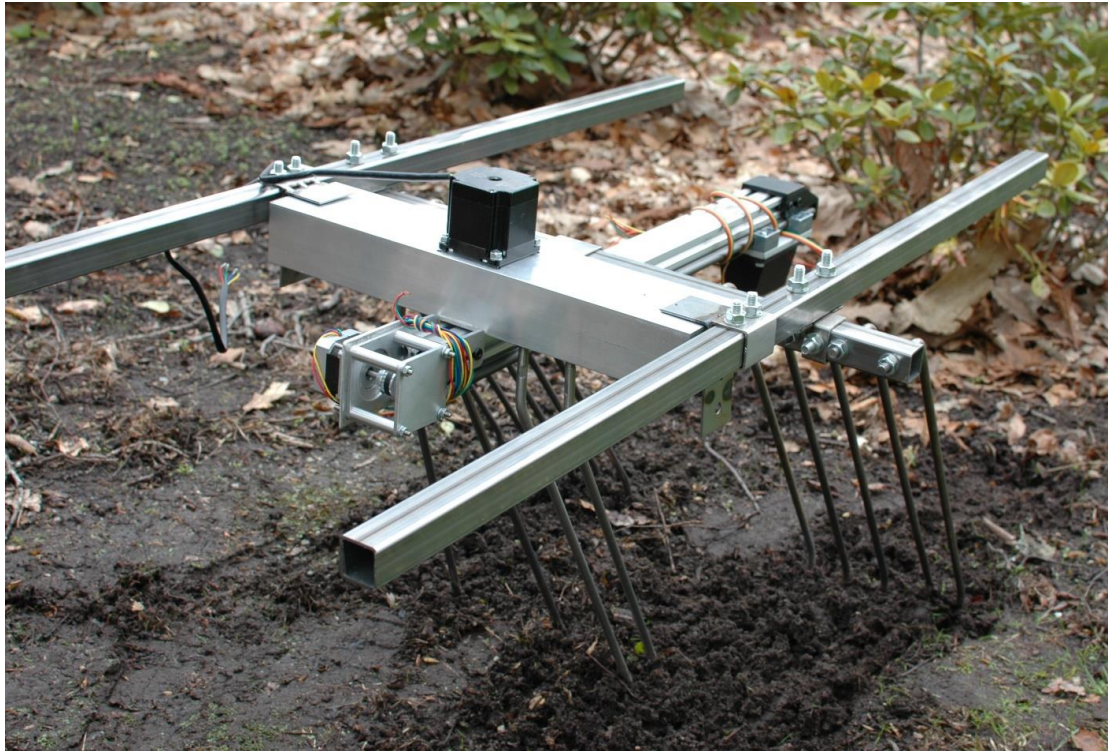
Figur 80 – Komplette styringssystem for alle funksjoner til det utviklede verktøy

1. Nøkkelskifter for overstyring av strømforsyning til lasermodul (11)
2. Inngang. 12 V likespenning
3. Sikring
4. Nødstoppskifter
5. Display, LCD
6. Indikatorlys for lasermodul
7. Mikrokontroller for bevegelige skrapepinner
8. Mikrokontroller for styring av lasermodul
9. Trådløs kommunikasjonsmodul
10. Driver for steppermotor, lasermodul
11. Strømforsyning for lasermodul, 8,8 V, 2,2 A
12. Relémodul for lasermodul



### 9.3 Sammenstilling

Endelig sammenstilling av utviklede og innkjøpte komponenter gjennomgås. Figur 81 viser endelig sammenstilling av én verktøymodul under arbeid i jord. Styringselektronikk og lasersensor er ikke tilkoblet på dette tidspunkt.



*Figur 81 – Sammenstilling av verktøymodul uten styringselektronikk*

## 9.4 Beskrivelse av forsøk

Det er utført testing av prototype for å identifisere forbedringspotensialer og reell funksjonalitet.

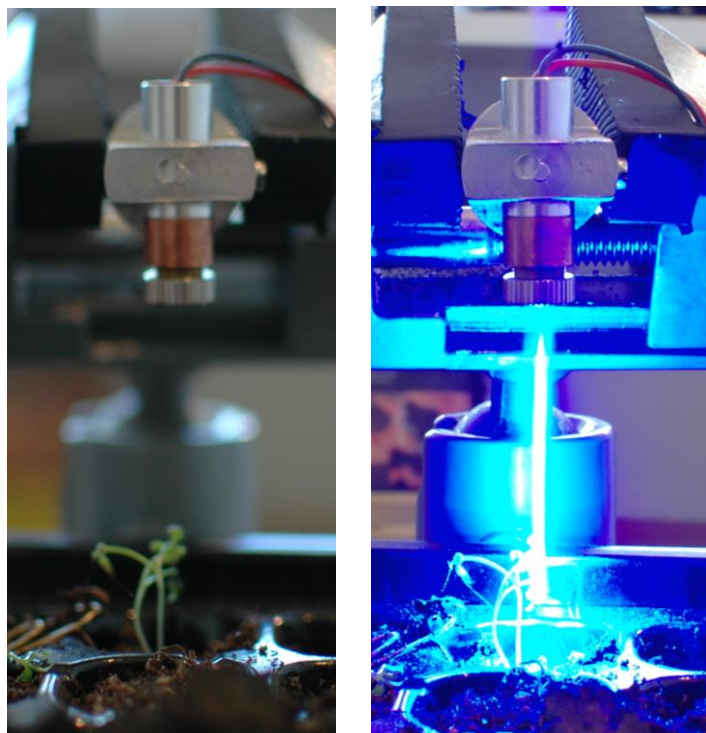
### 9.4.1 Bestråling av ugressplanter

Grunnet mangel på litteratur er noen usikkerhetsmomenter vedrørende bekjempelse av ugress med laser fortsatt ubesvart. Det er derfor ønskelig å gjennomføre kontrollerte forsøk for å avdekke effekten på ugress av valgt løsning.

#### Problemstilling og metode

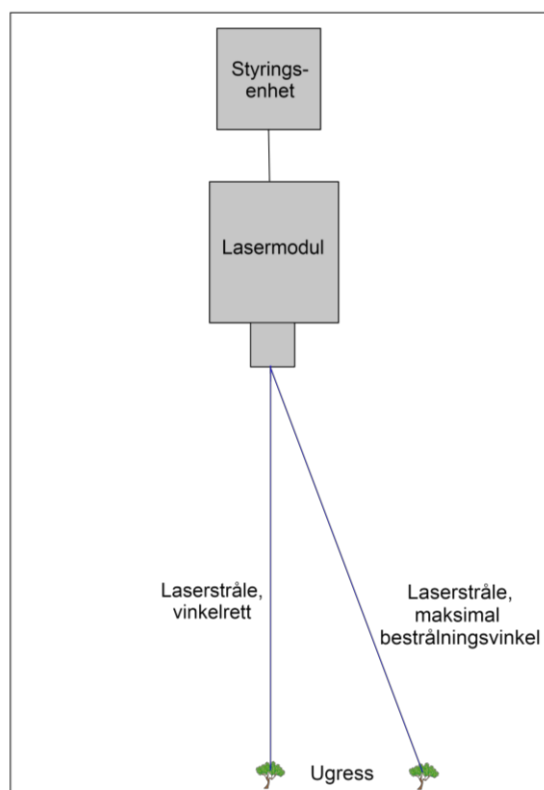
Det er ønskelig å finne ut i hvilken grad bestrålingsvinkel påvirker plantevekst.

Det ble plantet 350 frø av den hurtigvoksende, ugresslikende plantevarianten *Lepidium sativum* (karse). Det ble brukt plantejord tilsatt fullgjødsel og et innendørs drivhus ble benyttet. Ønskelig plantehøyde var 20 mm. Dette ble oppnådd etter fem dager, og bestråling med valgt lasermodul Nichia NDB7875 445 nm ble gjennomført 27. april 2015. Laserens effekt under forsøk var 2.4 W, vinkelrett avstand mellom lasermodul og plante ved ideell plantehøyde var 200 mm og strålediameter var ved treffpunkt var 5mm. Plantene ble bestrålt vinkelrett ovenfra som vist i figur 82, samt med verktøyets maksimale bestrålingsvinkel på 20° som i figur 83. Hver kombinasjon ble testet med to ulike eksponeringstider for ulike doser.



Figur 82 – Lasermodul montert i brakett og klargjort for vinkelrett bestråling (t.v.). Figur til høyre viser lasermodul Nichia NDB7875 bestråle en plante





Figur 83 – Skjematisk oppsett av forsøk som illustrerer ugressets ytterpunkter og maksimal bestrålingsvinkel

Bestråling ble gjennomført ved å benytte fastmontert lasermodul og et håndholdt verktøy. Dette bidro til mindre risting på lasermodul og korrekt bestrålingsvinkel. Tabell 21 viser ulike forsøksgrupper uten en ikke-bestrålt referansegruppe.

Tabell 21 – Kombinasjon av bestrålingsvinkler og eksponeringstider benyttet i eksperimentet

Bestrålingsvinkel [°]	Eksponeringstid [ms]	Energi [J]
0	0	0
	1000	2,4
	1500	3,6
20	0	0
	1000	2,4
	1500	3,6

Alle frø ble jevnt fordelt i fem ulike beholdere. Fire av beholderne ble benyttet til bestråling og én som referanse der ingen planter ble bestrålt. Etter bestråling ble plantene plassert i like vekstforhold og innhøstet 10 dager senere for registrering av vekt og antall overlevende planter.

Det ble benyttet en gramvekt med oppløsning 0,01 g for veiing av overlevende planter.

Det ble benyttet en mikrokontroller for styring av lasermodulen. Dette muliggjorde nøyaktig eksponeringstid.

#### 9.4.2 Forsøk med styring av lasermodul

Den sammensatte løsningen med servomotor og et vogn- og skinneresystem for bevegelse av lasermodul er lite utprøvd, og begrenset litteratur er tilgjengelig. Det var derfor nødvendig å gjennomføre forsøk for å avdekke spesifikasjoner relevante for det endelige produktet.

##### Måling av maksimal hastighet

Steppermotorer kan ved høye hastigheter være utsatt for intern forsinkelse. Dette nedsetter motorens nøyaktighet, og må derfor unngås.

For å måle graden av slip ble det først gjort kontrollmålinger med lav hastighet og fastsatt kjøreavstand. Det ble skrevet et program som flyttet vognen frem og tilbake en fastsatt lengde, og avvik fra start- og stopposisjoner ble logget. Steppermotorens hastighet ble gradvis øket helt til et observerbart avvik ble funnet.

##### Måling av lasertreffpunktets oppløsning

Det ble skrevet et program der laseren bestrålte gitte koordinater med minste innbyrdes avstand mulig – gitt av begrensninger i mekaniske komponenter. Avstandene mellom treffpunkter ble logget og det aritmetiske gjennomsnittet av verdiene ble regnet ut.

##### Måling av lasertreffpunktets nøyaktighet

Det var ønskelig å finne maksimalt avvik fra tidligere funnet oppløsning, for å danne et mer realistisk bilde av maskinens oppløsning. Data fra tidligere forsøk ble analysert og høyeste avvik ble satt til maksimalt avvik.

#### 9.4.3 Forsøk for å finne trekraft

For å kunne beregne effektforbruk ved drift av skrapepinner utføres det forsøk i jord.

Komplett verktøy plasseres i fuktig torvjord. Det vil kun gjøres forsøk i fuktig torvjord, og gjennomsnittlige verdier av jordmotstand vil derfor ikke tas hensyn til.

En vertikal kraft påføres i overkant av verktøymodulen for at skrapepinnene er korrekt nedsenket i jorden under hele forsøket. Dette simulerer kraften den autonome landbruksroboten yter på verktøyet mot jorden.

Nødvendige trekraft for rettlinjert bevegelse av verktøyet ble funnet ved bruk av en kraftmåler. Verktøymodulen driftssimuleres i jord ved konstant hastighet á 1 m/s

## 9.5 Gjennomføring og resultater

### Bevegelige skrapepinner

Kun målinger av vekt og strømforbruk er gjennomført som vist i tabell 22.

Tabell 22 – Spesifikasjoner av modul for bevegelige skrapepinner

Bekrivelse	Resultater
Strømforbruk	2,8 A
Modulvekt	2,2 kg
Elektronikk	Ingen avvik

### Bevegelse av lasermodul

Resultater fra forsøk i delkapittel 9.4.2 og modulens spesifikasjoner er beskrevet i tabell 13.

Tabell 23 – Resultater fra forsøk med drift av bevegelig lasermodul

Bekrivelse	Resultater
Hastighet	0.14 m/s
Maksimalt avvik <sup>1</sup>	2,3 mm
Maksimal motstand ved drift	3 N
Maksimal arbeidsområde	500 mm
Maksimal arbeidssyklus	95 %
Strømforbruk	0,5 A
Elektronikk	Ingen avvik
Modulvekt	1,2 kg

<sup>1</sup> Angir prosentvis aritmetisk gjennomsnitt av avvik mellom ønsket posisjon og reell posisjon [X, Y], vedlegg C

### Lasermodul

Lasermodulens resultater fra forsøk er beskrevet i tabell 24. Dette er rent driftsmessige forsøk for å avdekke faktorer ikke beskrevet i datablad.

Tabell 24 – Resultater fra isolerte forsøk med lasermodul Nichia NDB7875

Bekrivelse	Resultater
Driftstemperatur <sup>1</sup>	75° C
Maksimal arbeidssyklus <sup>2</sup>	80 %

<sup>1</sup> Ved maksimal arbeidssyklus

<sup>2</sup> Angir forhold mellom maksimal driftstemperatur og driftstid [38]

### Komplett verktøy

Verktøyets spesifikasjoner er vist i tabell 25. Dette omfatter forsøk med det endelige verktøy i drift og omfatter verdier som brukes videre i prosjektet.

Tabell 25 – Resultater fra forsøk med endelig verktøy i drift

Beskrivelse	Resultater
Dimensjoner	600 * 680 * 500
Modulvekt	13,1 kg
Nødvendig trekkraft per modul <sup>1</sup>	100 N
Plattform, elektronikk	Ingen avvik
Effektforbruk, standby	61 W
Effektforbruk, drift	90 W
Driftsspenning	12 V
Brukergrensesnitt	Smarttelefon

<sup>1</sup> Ved konstant hastighet á 1 m/s

### Bestråling av ugressplanter

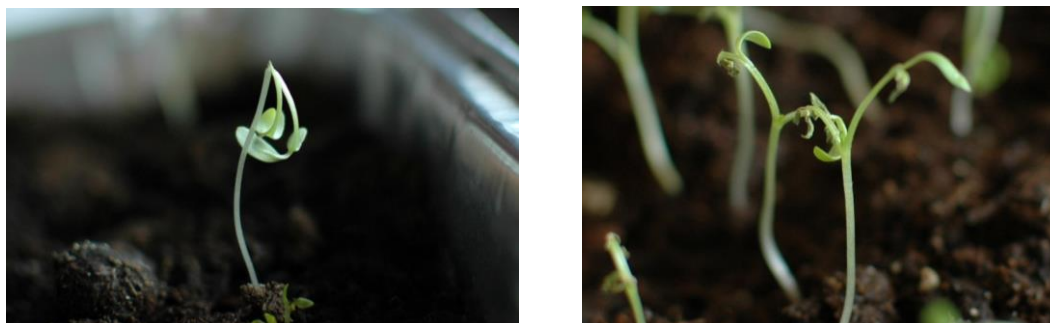
Tabell 26 viser data fra forsøk med bestråling av ugressplanter som beskrevet i delkapittel 9.4.1. Data omhandler fem forsøk med ulik eksponeringstid og bestrålingsvinkel. Målet med forsøket var å finne en sammenheng mellom bestrålingsvinkel og dødelighet.

Tabell 26 – Resultater fra forsøk med bestråling av ugressplanter

Eksponeringstid/ Bestrålingsvinkel	1000 ms, 70°	1000 ms, 90°	1500 ms, 70°	1500 ms, 90°	Ikke bestrålt
Antall spiret	67	70	64	62	45
Prosentvis bekjempelse	25,4 %	24,3 %	78 %	48,4 %	0 <sup>1</sup>
Gjennomsnittlig vekt, overlevende	0,130 g	0,126 g	0,096 g	0,15 g	0,24 g

<sup>1</sup> Alle spirede planter i referansegruppen overlevde frem til tidspunkt for forsøk

Det ble identifisert to ulike typer skader laseren påførte ugressplantene. Den ene varianten som vist i figur 84 er karakterisert ved at hovedstilk er knekt. Legg merke til at bladene ikke er skadet.



Figur 84 – Akutt virkning av bestråling av ugressplante var i enkelte tilfeller knekt hovedstilk (t.v.). Jevnere fordelt stråling ga deformerte blader (t.h.)

Den andre skadevarianten observert hadde minimal skade på stilk, men et større område av plantens blader var skadet.

Det er ikke innsamlet spesifikk data vedrørende grad av dødelighet ved de ulike skadevariantene, men observasjon tyder på at knukket stilk begrenser vekst i størst grad. Under gjennomføring av forsøk ble det observert at vinklet bestråling muligens økte sannsynligheten for å treffe stilk – noe som også er forståelig, da bladene i mindre grad beskytter stilken.

## 9.6 Kostnadsoverslag for prototype

Kostnadsoverslaget i tabell 27 er todelt. Reelle kostnader påløpt prototyping er illustrert i venstre kolonne og grovestimering av produksjonskostnad i høyre. For prototyping er kun materialkostnader inkludert. Arbeidstimer anses ikke som relevant da det er utfordrende å skille mellom opplæring og reelt arbeid. Grovestimat av produksjonskostnader inkluderer kun materialkostnad og antatt arbeidskostnad. Kostnad som tilkommer ytterligere utvikling inkluderes ikke. Enkelte komponenter benyttet ved prototyping er ikke egnet til bruk i et masseprodusert verktøy. Det er derfor enkelte avvik i komponentkostnader. Estimert produksjonskostnad inkluderes med hensikt om å i fremtidig arbeid identifisere eventuelle markedsfordeler basert på produksjonskostnad.

Tabell 27 – Kostnadsoverslag for prototype

<b>Mekanikk og sensor for bevegelige skrapepinner</b>	<b>Sum, NOK</b>	<b>Sum, NOK</b>
	Prototype	Produksjon
Mikrokontroller	65,-	52,-
Lasermoduler	271,-	220,-
Sensormoduler	226,-	185,-
Integrerte kretser	7,-	5,-
Steppermotor	120,-	90,-
Driver for steppermotor	115,-	92,-
Tannstenger	500,-	200,-
Tannhjul	300,-	100,-
Skrapepinner	200,-	150,-
Sammenstillingsanordning	150,-	100,-
Sammenstillingsboks	80,-	50,-
Braketter	100,-	70,-
Monteringsmateriell	50,-	40,-
Arbeidskostnad – 2 timer à 400,-		800,-
<i>Delsum, bevegelige skrapepinner</i>	<i>2184,-</i>	<i>2154,-</i>
<b>Styring av lasermodul</b>	<b>Sum, NOK</b>	<b>Sum, NOK</b>
Mikrokontroller	65,-	52,-
Lasermodul	1500,-	2500,-
Servomotor	140,-	100,-
Steppermotor	200,-	500,-
Driver for steppermotor	174,-	200,-
Strømforsyning, lasermodul	30,-	100,-
Trådløs transceiver	30,-	50,-
Display	15,-	15,-
Nødstoppbryter	35,-	30,-
Nøkkelpbryter	55,-	50,-
Koblingsboks	55,-	100,-
Tannrem	154,-	100,-

Tabell 17 fortsetter

Tannhjul	50,-	30,-
Skinne og vogn	1118,-	800,-
Skruer	115,-	50,-
Rammestruktur for festing av skinne	125,-	100,-
Overføringshjul	125,-	80,-
Skrapepinner	1000,-	500,-
Servohus	35,-	15,-
Tilkoblingsstang	80,-	45,-
Endebeskytter	30,-	20,-
Tannhjulbeskytter	30,-	20,-
Braketter	200,-	150,-
Overflatebehandling	100,-	50,-
Arbeidskost- 3 timer à 400,-		1200,-
Ledninger	50,-	80,-
<i>Delsum, styring av laser</i>	<i>5715,-</i>	<i>6937,-</i>
<b>Endelig sammenstilling og forberedelse</b>	<b>Sum, NOK</b>	<b>Sum, NOK</b>
Arbeidskost, sammenstilling – 2 timer à 400,-		800,-
Chassis med monteringsmateriell		900,-
Arbeidskost, FAT – 1 time à 400,-		400,-
Vedlegg, innpakning og annet tilbehør		500,-
<i>Delsum, endelig sammenstilling og forberedelse</i>	<i>0,-</i>	<i>2600,-</i>
<b>Totalkostnad</b>	<b>7899,-</b>	<b>11691,-</b>

## 10 Diskusjon

Produktutviklingsprosessens elementer og resultater gjennomgås for å definere videre arbeid og forbedringspotensialer.

### 10.1 Konsept- og produktutvikling

#### Valg av bekjempelsesmetoder

Det er en rekke hensyn som må tas av en bonde ved valg av bekjempelsesmetode. Dette skyldes store variasjoner mellom jordbruk. Disse faktorene kan gjøre store utslag på effekten ved bruk av ulike bekjempelsesmetoder. Faktorer som typisk må tas hensyn til er klima, jordtype, lokale topologiske forhold, biologisk mangfold i jord og grad av steiner og andre hindringer [6]. Praktiske konsekvenser av disse faktorene kan blant annet være ulike tidspunkter ideelt for igangsetting av ugressverktøy og ulikt antall nødvendig behandling – der sistnevnte har stor innvirkning på totalt energiforbruk.

Det kan tolkes at optimale metoder vil variere mellom ulike jordbruk. Resultater funnet i denne delen av prosjektet må derfor vurderes individuelt.

#### Valg av laser som bekjempelsesmetode

Det var en omfattende oppgave å finne et konsept som fjerner ugress med minimal eller ingen bruk av syntetiske plantevernmidler – som i tillegg også tilfredsstilte krav satt av den autonome landbruksroboten. Det er derimot funnet at laser isolert sett er en potensiell metode for bekjempelse av ugress. Det er forutsatt at et system for gjenkjenning og posisjonering av ugress er implementert. Det er i samsvar med andre tilgjengelige forskningsresultater [25].

Det viste seg tidlig at mangel på dokumentasjon innen bruk av laser mot ugress krevde i tillegg store arbeidsmengder. Begrenset antall leverandører gjorde at valg av lasermodul ble gjort på bakgrunn av tilgjengelige komponenter i vår prisklasse. Det bør derfor gjennomføres ytterligere forsøk med lasermoduler for å finne optimal løsning.

#### Posisjonering av laserstråle

Det er ukjent hvordan ugress bør bestråles for å oppnå best ugress-effekt. Dette påvirket valg av utstyr for plassere lasermodulen i riktig bestrålingsposisjon. Det måtte derfor tas en beslutning basert på antagelser om hvordan laserenergi påvirket planter. Det ble derfor valgt en løsning der allerede kjente kravspesifikasjoner innen kostnad, driftssikkerhet, vekt og materialer var avgjørende faktorer for valg av system. Uavhengig av usikkerheten vedrørende plassering av lasermodul ble valgt løsning vurdert som mest hensiktsmessig i forhold til bestrålingsavstand mellom plante og lasermodul, stabilitet og mulighet for korrekt posisjonering.



### **Styring av bevegelige skrapepinner**

Det var utfordrende å finne komponenter for lineær styring av skrapepinner med tilstrekkelig kraft, arbeidssyklus, hastighet og effektivitet i forhold til kravspesifikasjonene til den autonome landbruksroboten. Valgt metode er derfor en lite benyttet løsning spesialtilpasset formålet. Usikkerhetsmomenter i forhold til utviklet verktøy inkluderer derfor intern friksjon, jordmotstand for skrapepinner og steppermotorens egenskaper i varierende forhold. Dette gjorde beregninger på systemet utfordrende og følgelig ble valg av steppermotor gjort på bakgrunn av tilgjengelige komponenter og kostnad. Hensyn til reelt arbeid i jord ble derfor ikke tatt.

### **Generelt design av skrapepinner**

Utviklet løsning er kun konseptuell, det er derfor ikke tatt hensyn til korrekt utforming av skrapepinner. Ved videre utvikling og testing må det for skrapepinner inkluderes fjæring, større mulighet for justering og valg av korrosjonsbestandige materialer.

### **Valg av sensormodul for bevegelige skrapepinner**

Det var ønskelig å utarbeide en fungerende løsning tilpasset tidligere utviklet system for bevegelige skrapepinner. Begrenset antall ferdigutviklede løsninger og høy kostnad motiverte til å selv utvikle et rimelig sensorsystem. På tross av lav kostnad ved utviklet system er det rimelig å anta at sensoren må arbeides videre med for å garantere sikker drift. Potensielle utfordringer kan være interferens med annet utstyr, lav oppløsning, lav behandlingstid og ukjente objekter i åker.

## **10.2 Prototyping**

### **Valg av komponenter til prototyping**

Prototyping var en viktig del av produktutviklingsprosessen grunnet begrenset tilgang på data for tilsvarende produkter. Data og erfaringer tilegnet i prototyping bør derimot etterprøves for å avdekke eventuelle avvik.

Avvik i resultater er sannsynlig grunnet til dels begrenset vurderingsgrunnlag ved valg av enkelte komponenter. Dette gjelder i hovedsakelig for lasermoduler og sensorkomponenter i sensor for bevegelige skrapepinner, mekanikk og steppermotor for styring av bevegelige skrapepinner.

Det måtte tas spesielt hensyn til noen aspekter ved innkjøp av komponenter. Dette var meget tidkrevende av følgende årsaker:

- Valg av produsenter måtte nøye vurderes
- Kompatibilitet mellom ulike komponenter og utstyr var nødvendig
- Leveringstid
- Begrenset produktinformasjon og datablader fra enkelt produsenter forsinket flere prosesser

### **Produksjon av prototype**

Avgjørelsen om å gjennomføre all prototypebygging på egenhånd ble tatt på grunnlag av komplisert sammenstilling av komponenter fra mange leverandører. Høy nøyaktighet og spesialtilpasning av komponenter var helt nødvendig for å utvikle en fungerende prototype. Dette resulterte i at all produksjon av spesialkomponenter også ble gjennomført på egenhånd.

Arbeidet var mer tidkrevende enn forventet, da sammenstilling og styring av roterende mekanikk viste seg å være meget krevende.

Det måtte parallelt med fremstilling av mekanikk utvikles styringselektronikk, grunnet kontinuerlig tilpasning på elektromekaniske systemer. Dette innbefattet både maskinvare og programvare. Etersom dette ikke er vårt hovedfagfelt gikk det mye tid til å tilegne tilstrekkelig kunnskap for utvikling av en fungerende løsning.

Kompatibiliteten mellom innkjøpte komponenter var ikke alltid som beskrevet i datablader. Det måtte av det grunn produseres spesialkomponenter.

Basert på gjennomført arbeid er det klart at verkstedets ressurser kunne vært utnyttet bedre for å spare tid.

### **Modul for bevegelige skrapepinner**

Modulen var delvis vellykket med enkelte unntak. Friksjon mellom tannstenger og sammenstillingsboks var for høy, noe som resulterte i krevende forhold for steppermotor. Dette ga ujevn bevegelse og overbelastning og ødeleggelse av motordriver. Begrenset testing har derfor blitt gjennomført. Det bør derfor vurderes andre løsninger for sammenstilling av interne komponenter i modulen.

Arbeidet med å finne kompatible komponenter som dekket kravspesifikasjonene til modulen for bevegelige skrapepinner viste seg å være vanskelig. Spesielt problematisk var utstyr nødvendig for tilstrekkelig drift av steppermotor. Dette kombinert med usikkerhetsmomentene tidligere beskrevet knyttet til andre komponenter, gjorde igangsettelse av modulen vanskelig.

Bruk av steppermotor til dette formålet bør derfor revurderes. Eventuelt kan annet utstyr som senker kraften utøvet på steppermotor implementeres.

### **Utvikling av programvare og elektronikk**

Styringsenheter fungerer som tiltenkt og programvare utviklet for styring av bevegelige skrapepinner og av lasermodul er stabile.

Maskinvare er sammensatt av innkjøpte og egenutviklede komponenter og er et enkelt styringssystem for autonom drift av verktøy.

Omfattende testing av elektronikk er nødvendig for å avdekke alle problemer. Det bør derfor gjennomføres ytterligere testing av alle verktøyets funksjoner.

Elektronikk er bygget ved hjelp av prototypeverktøy som letter fysisk sammenkobling av elektroniske komponenter. Ulempen med dette systemet er risiko for dårlig kontakt og eventuell kortslutning.

Utvikling av sensor for skrapepinner er gjort på bakgrunn av analog teknologi som senker produksjonskostnader og likevel gir tilstrekkelig data. Det er derimot viktig å utføre forsøk med sensormodulen for å avdekke eventuelle unntakstilfeller.

## 10.3 Forsøk

### Gjennomføring av forsøk med laser

Forsøk med ugressplanter var ønskelig å gjennomføre grunnet usikkerhet vedrørende effekt av ulike bestrålingsvinkler og tilført dose. Formålet var ikke å analysere alle aspekter ved bruk av laser som bekjempelsesmetode, men å se etter observerbare forskjeller for å rettlede videre arbeid. På bakgrunn av tilgjengelig forskningsrapport om bestråling av ugress med laser ble eksponeringstid valgt [25] Nøyaktigheten av valgte eksponeringstider i forsøket bør vurderes.

Fra resultatene i delkapittel 9.5 ses det en nedgang i total plantemasse og økning av dødelighet ved sammenligning av de bestrålte og ikke-bestrålte forsøksgruppene. Dette kan være en indikasjon på at tilføring av laserenergi hemmer plantevekst.

Ved tolkning av data må det tas hensyn til usikkerheter, avvik og varians. Dette gjelder i hovedsak forsøksgruppen bestrålt i 1500 ms vinkelrett ovenfra. Denne gruppen hadde langt høyere overlevelsesrate og gjenværende plantemasse enn tilsvarende forsøk ved 70° bestrålingsvinkel.

For å kunne sammenligne data i mellom forsøksgruppene var det viktig at bestrålingsdosene lå på vippepunktet mellom overlevelse og død. Ved fullstendig overlevelse eller bekjempelse hadde det ikke vært mulig å tolke dataene.

Gjennomsnittlig grad av bekjempelse for alle bestrålte forsøksgrupper ved eksponeringstid 1000 ms var 25 %, mens det ved 1500 ms var 63 %. Dette viser en ikke-lineær sammenheng mellom tilført dose og bekjempelsesgrad og er en indikasjon på at tilført dose er i grenseområdet av hva ugressplantene tåler. Det kan derfor i ytterligere grad antas at tilført laserenergi er skyld i redusert plantemasse.

Ved sammenligning av reduksjon i plantemasse med hensyn på bestrålingsvinkel ble det i alle forsøksgrupper funnet at intern variasjonsbredde i plantemasse overskred den gjennomsnittlige differansen mellom forsøksgruppene. På bakgrunn av dette kan det ikke med sikkerhet antas at bestrålingsvinkel påvirker bekjempelsesgrad. Det må derfor gjøres flere forsøk for å finne en eventuell sammenheng.

Et bestemt antall ugressplanter ble plantet i et antall beholdere. Det er derfor naturlig å anta at omkringliggende faktorer inkludert sollys, temperatur, jordfuktighet, jordsammensetning og innbyrdes planteavstand var forskjellig under forsøkets periode.

Bestråling ble gjort med et håndholdt redskap for korrekt bestrålingsvinkel. Treffpunkt ble bestemt med øyemål. Det kan derfor antas at avvik i bestrålingsdose vil forekomme.

Graden av ugressbekjempelse varierer mellom plantearter. Valgt plante for forsøk vil derfor være avgjørende i tolkning av resultater.

### Forsøk med å finne verktøyets nøyaktighet

Fullstendig prototype ble testet for å finne lasertreffpunktets nøyaktighet som beskrevet i vedlegg C. Steppermotorens nøyaktighet i X-retning var ikke mulig å bestemme.

Det viser seg at servomotorer har en praktisk oppløsning på 1 grad. Ved avstand på 250 mm mellom lasermodul og grunnflate tilsvarer dette 5,5 mm. Fra planter benyttet i forsøk beskrevet i delkapittel 9.5 ble gjennomsnittlig tykkelse av stamme funnet til å være 0,9 mm. Hvis det antas at halve stammen må bestråles for å oppnå tilstrekkelig effekt og at laserstrålens diameter er 2mm – kan dette medføre at laserstrålen bommer.

Det ble i tillegg funnet avvik i y-retning på opptil 2,3 mm som beskrevet i vedlegg C. Dette betyr at laserstrålen senterpunkt i verste scenario kan bomme med 3,9 mm.

Det må derfor vurderes om en annen løsning for tilt av lasermodul fungerer bedre til dette formålet. Det kunne eksempelvis blitt brukt en steppermotor som har bedre oppløsning.

### Endelig prototype

Spesifikasjoner av bygget prototype i delkapittel 9.5 er i henhold til kravspesifikasjonene beskrevet i kapittel 4.

Verktøyet veier 13,1 kg. Ved parallell bruk av fire moduler gir dette en totalvekt på 52,4 kg. Maksimal nyttelast for autonom landbruksrobot er 150 kg.

Det er ønskelig å knytte utviklet verktøy modul til landbruksroboten for å vurdere resultatet. Data fra utviklet landbruksrobot er beskrevet i tabell 28. Ved beregninger antas det at totalvekt av 4 moduler er 150 kg. Det kan på bakgrunn av dette brukes data utviklet i tidligere arbeid.

Tabell 28 – Relevante data fra landbruksrobot [1]

Egenskap	Verdi
Maksimal trekkraft	1,32 kN
Nødvendig fremdriftskraft, robot	182 N
Reduksjon i girsystem	60
Mekanisk effektivitet, girsystem	0,94
Effektivitet, remdrift	0,95
Radius, hjul	0,1875 m
Batterikapasitet	2880 Wh
Motorturtall, merke	3000 rpm
Fremdriftshastighet, 5 % slip	3,36 m/s

Nødvendig fremdriftskraft for å drifte den autonome landbruksroboten alene er 182 N. Forsøksresultatene i delkapittel 9.5 viste at nødvendig trekraft for verktøymodulen under kjøring var 100 N.

Total nødvendig fremdriftskraft ved påmontering av 4 verktøymoduler er summen av

$$182 + 100 \cdot 4 = 582 \text{ N}$$

Nødvendig dreiemoment gitt av alle robotens 4 motorer ved er gitt ved ligning 3

$$M_{tot} = \frac{F_{tot} \cdot r}{\xi \cdot \eta_t} \quad (3)$$

$$M_{tot} = \frac{582 \cdot 0,1875}{60 \cdot (0,893)}$$

$$M_{tot} = 2,036 \text{ Nm}$$

Der  $F_{tot}$  er total nødvendig fremdriftskraft for roboten,  $r$  er bothjulenes radius,  $\xi$  er den overordnede reduksjonen til giret benyttet i roboten og  $\eta_t$  er girets mekaniske effektivitet [1].

Totalt effektforbruk er gitt i ligning 4

$$P_{tot} = \frac{M_{tot} \cdot \omega_e}{\eta_m} \quad (4)$$

$$= \frac{2,036 \cdot \left(\frac{3000 \cdot 2\pi}{30}\right)}{0,86}$$

$$P_{robot} = 1487,51 \text{ W}$$

Der  $\omega_e$  er vinkelhastigheten til hjulet og  $\eta_m$  er virkningsgraden til motorene [1].

Effektforbruk av verktøymodul beskrevet i delkapittel 9.5 inkluderes for å finne robotens totale operasjonstid

$$P_{tot} = P_{robot} + 4 \cdot P_{verktøy} \quad (5)$$

$$P_{tot} = 1487,51 + 4 \cdot 90 = 1847,51 \text{ W}$$

Robotens totale operasjonstid er gitt ved

$$E = P_{tot} \cdot t \quad (6)$$

$$t = \frac{E}{P_{tot}} = \frac{2880 \text{ Wh}}{1847,51}$$

$$t = 1.558 \text{ h}$$

Der E er total energi mengde i batteripakken montert i roboten, og er satt til 2880 Wh [1].

Robotens rekkevidde

$$\begin{aligned} x &= V \cdot t & (7) \\ &= 3,36 \cdot 1,558 \\ x &= 5,2 \text{ km} \end{aligned}$$

Der hastighet V er beregnet fra motorens merketurtall [1].

Areal landbruksrobot kan behandle

$$\begin{aligned} A &= x \cdot 2 \cdot b_{\text{modul}} \\ A &= 5,2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0,6 = 6240 \text{ m}^2 = 6,24 \text{ dekar} \end{aligned}$$

Der  $b_{\text{modul}}$  er den effektive bredden av én modul som vist i vedlegg D.

Robotens totale rekkevidde uten ekstraustyr som krever økt trekkraft er 41,4 km [1]. Ved påmontering av 4 av de utviklede verktøymoduler vil det med gitt batterikapasitet være en drastisk reduksjon av robotens totale rekkevidde. Det er tydelig at ytelse for et eventuelt endelig produkt må være høyere enn beregnet for nåværende kombinasjon. Det er mange faktorer som innvirker der batterikapasitet og nødvendig trekkraft er største bidragsyttere.

Det ble gjort begrenset antall forsøk med verktøymodulen for å avdekke nødvendig trekkraft. Det er derfor riktig å anta at det i realiteten vil være svært ulik jordmotstand som vil ha innvirkning på nødvendig trekkraft og rekkevidde.

Det kan antas at nødvendig trekkraft for bakre verktøyrekke er noe lavere enn fremre da skrapepinnene arbeider omtrent i samme spor. Dette vil ha innvirkning på robotens rekkevidde.

Det er i tidligere arbeid med landbruksroboten gjort antagelser innen blant annet jordmotstand og grad av hjulspinn i jord. Kombinasjonen av antagelser kan gi store variasjoner i beregnet rekkevidde og bør tas hensyn til ved mer spesifikke beregninger.

## 11 Konklusjon

### Vurdering

Det var ønskelig å finne ut hvordan den autonome landbruksroboten utviklet ved NMBU kunne brukes til å redusere bruken av plantevernmidler i jordbruk.

For å besvare problemstillingen ble det benyttet en systematisk produktutviklingsprosess som resulterte i dokumentering, utvikling og testing av en fullskala prototype for ugressbekjempelse tilpasset den autonome landbruksroboten.

Det er funnet at landbruksroboten kan bidra til å redusere bruk av plantevernmidler ved å implementere et verktøy basert på veldokumenterte samt utradisjonelle teknologier i jordbrukssammenheng.

Utviklet verktøy kombinerer skrapepinner for mekanisk rensing og laser for termisk bekjempelse. Verktøyet er elektromekanisk styrt og har et mikrokontrollerbasert system som koordinerer komponenter for autonom drift.

Prosjektet har ved analyse og forsøk med laserteknologi styrket troen på at termisk bekjempelse av ugress med laser har en posisjon i fremtidig jordbruksteknologi.

Landbruksrobotens effektive behandlingsområde ved parallell drift av 4 verktøymoduler er funnet til å være 6,24 dekar. Resultatet tyder på at videre utvikling av verktøy og landbruksrobot bør fokuseres på arbeid for å øke total rekkevidde ved drift av verktøy.

### Videre arbeid

- Styrkeberegninger for å begrense materialbruk
- Implementering av utstyr for gjenkjenning av ugress
- Ytterligere forsøk med bestråling av ugressplanter
- Videreutvikling av intern programvare
- Utvikling av programvare for kommunikasjon mellom verktøy og autonom landbruksrobot
- Utvikling av brakett for påmontering av verktøy til autonom landbruksrobot
- Estetiske betraktninger
- Arbeid med økt implementering av standardkomponenter
- Utføre reelle forsøk med verktøymodul påmontert autonom landbruksrobot
- Revurdere konseptuelt design av modul for bevegelige skrapepinner



## 12 Referanser

- [1] F. Meltzer, «Fremdrift og energiforbruk for autonom landbruksrobot,» NMBU, Ås, 2014.
- [2] «Bærekraftig landbruk,» *FOKUS*, vol. 5, nr. 3, p. 80, 2010.
- [3] «Jordbruk i Norge,» SNL, [Internett]. Available: [https://snl.no/Jordbruk\\_i\\_Norge](https://snl.no/Jordbruk_i_Norge). [Funnet Mars 2015].
- [4] «Økologisk jordbruk,» SNL, [Internett]. Available: [https://snl.no/%C3%B8kologisk\\_jordbruk](https://snl.no/%C3%B8kologisk_jordbruk). [Funnet Mars 2015].
- [5] «Plantevernmidler,» SNL, [Internett]. Available: <https://snl.no/plantevernmidler>. [Funnet 18 Mars 2015].
- [6] «Plantevern og plantehelse i økologisk landbruk,» *BioForsk*, vol. 3, nr. 10, p. 158, 2008.
- [7] «Vitirover,» 5 Februar 2015. [Internett]. Available: <http://www.vitirover.com/fr/>.
- [8] «Vibro Crop Robotti,» Kongskilde, [Internett]. Available: <http://www.kongskilde.com/da/sv-SE/News/Year%202013/09-09-2013%20-%20New%20automated%20agricultural%20platform%20-%20Kongskilde%20Vibro%20Crop%20Robotti>. [Funnet 5 04 2015].
- [9] «Hortibot,» [Internett]. Available: <http://hortibot.com/>. [Funnet 5 Februar 2015].
- [10] J. K. Bøe, «Konsept- og produktutvikling. Kompendium i emnet TIP300.,» Ås, Norges miljø og biovitenskapelige universitet, 2014, p. 238.
- [11] «Arduino,» [Internett]. Available: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc). [Funnet 10 Februar 2015].
- [12] «Halvleder,» Store Norske Leksikon, [Internett]. Available: <https://snl.no/halvledere>. [Funnet 10 Februar 2015].
- [13] «Logisk krets,» Store Norske Leksikon, [Internett]. Available: [https://snl.no/logisk\\_krets](https://snl.no/logisk_krets). [Funnet 10 Februar 2015].
- [14] «PWM,» Arduino, [Internett]. Available: <http://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>. [Funnet 02 Mars 2015].
- [15] «Operasjonsforsterker,» Store Norske Leksikon, [Internett]. Available: <https://snl.no/operasjonsforsterker>. [Funnet 3 Mars 2015].
- [16] «SSR,» All about circuits, [Internett]. Available: [http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_4/chpt\\_5/5.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_4/chpt_5/5.html). [Funnet 8 Mars 2015].
- [17] «Potentiometer,» Arduino, [Internett]. Available: <http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Potentiometer>. [Funnet 15 Februar 2015].
- [18] «Cutoff\_frequency,» Wikipedia, [Internett]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Cutoff\\_frequency](http://en.wikipedia.org/wiki/Cutoff_frequency). [Funnet 5 April 2015].
- [19] «Potensiometer,» SNL, [Internett]. Available: 2.
- [20] «Kapslingsgrad,» SNL, [Internett]. Available: <https://snl.no/kapslingsgrad>. [Funnet 1 Mars 2015].

- [21] L. Grimstad, «Powertrain, Steering and Control Components for the NMBU Agricultural Mobile Robotic Platform,» Norwegian University of Life Sciences, Ås, 2014.
- [22] «Maskinforskriften,» Lovdata, [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-05-20-544>. [Funnet 2 Mars 2015].
- [23] «Matloven,» Lovdata, [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2003-12-19-124>. [Funnet 4 Februar 2015].
- [24] «GMP,» Eur-lex, [Internett]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1430821619347&uri=CELEX:32006R2023>. [Funnet 9 Mars 2015].
- [25] T. Bak, S. K. Mathiassen, S. Christensen og P. Kudsk, «The Effect of Laser Treatment as a Weed Control Method,» *Biosystems Engineering*, vol. 2006.08.010, pp. 497-505, 2006.
- [26] «Plantevern og plantehelse i økologisk landbruk, Bind 3 – Korn, oljevekster og kjernebelgvekster,» *FOKUS*, vol. 4, nr. 4, p. 199, 2009.
- [27] M. T. B. Ahmad, «Development of an Automated Mechanical Intra-Row Weeder for Vegetable Crops,» Iowa State University, Iowa, 2012.
- [28] «Laser,» Store Norske Leksikon, [Internett]. Available: [https://snl.no/laser%2Fintens\\_lyskilde](https://snl.no/laser%2Fintens_lyskilde). [Funnet 10 April 2015].
- [29] «Ebay,» [Internett]. Available: [http://i.ebayimg.com/00/s/NjAwWDYwMA==/\\$KGrHqRHJBwFCQ3Y9tVqBQm\(0g2bNQ~~60\\_57.JPG](http://i.ebayimg.com/00/s/NjAwWDYwMA==/$KGrHqRHJBwFCQ3Y9tVqBQm(0g2bNQ~~60_57.JPG). [Funnet 9 Mars 2015].
- [30] «Slide Linear Stage,» Newmark Systems, [Internett]. Available: <http://www.newmarksystems.com/images/D-Slide-linear-stage-5.png>. [Funnet 18 Mars 2015].
- [31] «Parallellrobot,» Direct Industry, [Internett]. Available: <http://www.directindustry.com/prod/adept-technology/parallel-robot-industrial-6076-568274.html>. [Funnet 26 Mars 2015].
- [32] «Linear Actuators,» Linak, [Internett]. Available: <http://www.linak.com/>. [Funnet 9 April 2015].
- [33] «Linear stage Stepper,» [Internett]. Available: [http://i00.i.aliimg.com/img/pb/371/858/610/610858371\\_595.jpg](http://i00.i.aliimg.com/img/pb/371/858/610/610858371_595.jpg). [Funnet 15 Mars 2015].
- [34] «Hydraulikk og hydraulisk kraftoverføring,» NDLA, [Internett]. Available: <http://ndla.no/nb/node/58059>. [Funnet 01 Februar 2015].
- [35] «Sensor types,» Label Sensors, [Internett]. Available: <http://www.labelsensors.com/choose/labelSensorTypes.html>. [Funnet 16 April 2015].
- [36] «Image Processing,» Engineers garage, [Internett]. Available: <http://www.engineersgarage.com/articles/image-processing-tutorial-applications#>. [Funnet 22 April 2015].

- [37] «Forskrift om strålevern og bruk av stråling,» Lovdata, [Internett]. Available: [https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-10-29-1380#KAPITTEL\\_5](https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-10-29-1380#KAPITTEL_5). [Funnet 20 April 2015].
- [38] «Nichia,» Nichia NDB7875, [Internett]. Available: <http://www.nichia.co.jp/en/product/laser.html>. [Funnet 16 Februar 2015].
- [39] «Light Absorption for Photosynthesis,» Hyperphysics, [Internett]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/biology/ligabs.html>. [Funnet 10 Mars 2015].
- [40] «Servo - Hitec HS-422,» Sparkfun, [Internett]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/11884>. [Funnet 3 Mars 2015].
- [41] «DryLin® W guide carriage,» Igus, [Internett]. Available: [http://www.igus.eu/wpck/2004/DryLin\\_W\\_Fuehrungsschlitten\\_montiert](http://www.igus.eu/wpck/2004/DryLin_W_Fuehrungsschlitten_montiert). [Funnet 11 Mars 2015].
- [42] «Timing Belt GT3,» Openbuilds part store, [Internett]. Available: <http://openbuildspartstore.com/gt3-timing-belt-by-the-foot/>. [Funnet 11 Mars 2015].
- [43] «GT3 Aluminum Timing Pulley,» Openbuilds Partstore, [Internett]. Available: <http://openbuildspartstore.com/gt3-aluminum-timing-pulley-20-tooth/>. [Funnet 11 Mars 2015].
- [44] «Smooth Idler Wheel,» Inventables, [Internett]. Available: <https://www.inventables.com/technologies/smooth-idler-wheel-kit>. [Funnet 26 Mars 2015].
- [45] «Stepper Motor with Cable,» Sparkfun, [Internett]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/9238>. [Funnet 18 Februar 2015].
- [46] «Nema 23 Stepper Motor,» Openbuildspartstore, [Internett]. Available: <http://openbuildspartstore.com/nema-23-stepper-motor/>. [Funnet 11 Mars 2015].
- [47] «Solidworksfiler Openbuilds,» Openbuilds, [Internett]. Available: <http://www.openbuilds.com/resources/solidworks-v2013-parts-files-updated-4-27-2014.38/>.
- [48] «Solidworksfiler Igus,» Igus, [Internett]. Available: [www.igus-cad.com/Default.aspx](http://www.igus-cad.com/Default.aspx). [Funnet Mars 2015].
- [49] «Solidworks filer Mekanex,» Mekanex, [Internett]. Available: <http://www.solidcomponents.com/company/default.aspSCC=SCCBC24SB&VisualID=40120&lang=46>. [Funnet Mars 2015].
- [50] «TEPT4400,» Vishay, [Internett]. Available: <http://www.vishay.com/docs/81341/tept4400.pdf>. [Funnet 19 Mars 2015].
- [51] «Big Easy Driver,» SparkFun, [Internett]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/12859>. [Funnet 22 Februar 2015].
- [52] «High Pass Filter,» H-Physics, [Internett]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/filcap.html>. [Funnet 2 Mars 2015].

- [53] «Resistor values,» Logwell, [Internett]. Available: [http://www.logwell.com/tech/components/resistor\\_values.html](http://www.logwell.com/tech/components/resistor_values.html). [Funnet 26 April 2015].
- [54] «Laser og lys,» Statens Strålevern, [Internett]. Available: <http://www.nrpa.no/laser-og-lys>. [Funnet 2 April 2015].
- [55] «EasyDriver - Stepper Motor Driver,» Sparkfun, [Internett]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/12779>. [Funnet 10 Ferbruar 2015].
- [56] «HC-05,» electronica60norte, [Internett]. Available: <http://www.electronica60norte.com/mwfls/pdf/newBluetooth.pdf>. [Funnet 25 Mars 2015].

## 13 Vedlegg

**Vedlegg A - Utviklet kode for styring av bevegelige skrapepinner**

**Vedlegg B - Utviklet kode for styring av lasermodul**

**Vedlegg C - Forsøk for å finne lasermodulens avvik**

**Vedlegg D - Konstruksjonstegning av sammensatt verktøymodul**

## Vedlegg A – Utviklet kode for styring av bevegelige skrapepinner

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
int sensorPin = A0;
int sensorValue = 0;
int Distance = 0;

void setup() {
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  digitalWrite(10, HIGH); // Slår lasermoduler på
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(9, LOW);
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.print("Sensor #NMBU2015");
  delay(3000);
}
void loop() {
  lcd.clear();
  sensorValue = analogRead(sensorPin);
  sensorValue = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 1000);

  // sammenligner sensorverdien med posisjonen til skrapepinnene
  if (sensorValue >= Distance)
  {
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(9, LOW);
    Distance = Distance + 1;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1, 0);
    lcd.print("Posisjon: ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(sensorValue);
  }
  else
  {
    digitalWrite(8, HIGH);
    digitalWrite(9, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(9, LOW);
    Distance = Distance - 1;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1, 0);
    lcd.print("Posisjon: ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(sensorValue);
  }
}
```

## Vedlegg B – Utviklet kode for styring av lasermodul

```

#define START_CMD_CHAR '*'
#define END_CMD_CHAR '#'
#define DIV_CMD_CHAR '|'
#define CMD_DIGITALWRITE 10
#define CMD_ANALOGWRITE 11
#define CMD_TEXT 12
#define CMD_READ_ARDUDROID 13
#define MAX_COMMAND 20 // max command number i kode. Bruke for feilsjekking.
#define MIN_COMMAND 10 // minimum command number code. Brukes for feilsjekking.
#define IN_STRING_LENGTH 40
#define MAX_ANALOGWRITE 255
#define PIN_HIGH 3
#define PIN_LOW 2

#include <Servo.h>
#include <math.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Avstand mellom verktøy og underlag
float avst = 200; // [mm]

// Ønskede posisjoner servomotor
float pos1 = 0; // [mm]
float pos2 = 200; // [mm]
float servo1 = ((atan((pos1)/avst))*180)/3.14;
float servo2 = ((atan((pos2)/avst))*180)/3.14;

float xx = 0; // [mm]
const float pi = 3.14;

// Bluetooth
String inText;

int Distance = 0; // Antall steg med steppermotor
int sensorValue = 0;
int Servopos = 90; // Setter servomotoren til 90 grader
// Set the LCD address to 0x27 for a 16 chars and 2 line display
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
Servo myservo;

void setup() {

  lcd.begin(); // LCD
  lcd.backlight(); // Slår på bakgrunsbelysning
  lcd.print("LASER #NMBU2015");
  delay(2000);

  Serial.begin(9600); // starter seriellkommunikasjon, hastighet 9600bps
  Serial.flush();

  myservo.attach(10); // kobler servo til utgang 10
  pinMode(10, OUTPUT);
  digitalWrite(10, HIGH);

  pinMode(8, OUTPUT); // Utgang 8 hovedlaser
  pinMode(9, OUTPUT); // Utgang 9 dummy-laser
  pinMode(2, OUTPUT); // Retning, steppermotor
  pinMode(3, OUTPUT); // Kontroll, steppermotor
  digitalWrite(2, LOW);
  digitalWrite(3, LOW);
}

void loop()
{
  Serial.flush();
  int ard_command = 0;
  int pin_num = 0;
  int pin_value = 0;

  lcd.clear();

  char get_char = ' '; //read serial

  // venter på innkommende data
  if (Serial.available() < 1) return; // hvis seriell er tom, returner til loop().

```

```

// analyserer innkommende kommando flag
get_char = Serial.read();
if (get_char != START_CMD_CHAR) return; // returner til loop() hvis ingen flag

// analyserer innkommende kommandotype
ard_command = Serial.parseInt(); // leser kommandoen

// analyserer innkommende #pin og value
pin_num = Serial.parseInt(); // leser pinnenummer
pin_value = Serial.parseInt(); // leser av verdien

// digitalWrite data fra telefon
if (ard_command == CMD_DIGITALWRITE){
  if (pin_value == PIN_LOW) pin_value = LOW;
  else if (pin_value == PIN_HIGH) pin_value = HIGH;
  else return; // feil i verdi. return
  set_digitalwrite( pin_num, pin_value);
  return; // returnerer fra fra start av loop
}
// Her kommer analogWrite data FRA telefon
if (ard_command == CMD_ANALOGWRITE) {
  analogWrite( pin_num, pin_value );

  // Styring av steppermotor
  sensorValue = analogRead(pin_num);
  sensorValue = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 8000);
  if (sensorValue >= Distance)
  {
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(3, LOW);
    Distance = Distance + 1;
  }
  else
  {
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(3, LOW);
    Distance = Distance - 1;
  }

  // Styring av servomotor
  Servopos = analogRead(A1);
  Servopos = map(Servopos, 0, 1023, 73, 107);
  myservo.write(Servopos);
  return; // Ferdig. Returner til loop();
}
}
// Bluetooth-styring av digitale porter FRA telefon
void set_digitalwrite(int pin_num, int pin_value)
{
  switch (pin_num) {
  case 13:
    pinMode(13, OUTPUT);
    digitalWrite(13, pin_value);
    // kode
    break;
  case 12:
    pinMode(12, OUTPUT);
    digitalWrite(12, pin_value);
    // kode
    break;
  case 9:
    pinMode(9, OUTPUT);
    digitalWrite(9, pin_value);
    lcd.print("Dummy ON");
    // kode
    break;
  case 8:
    pinMode(8, OUTPUT);
    digitalWrite(8, pin_value);
    lcd.print("Laser ON");
    break;
  }
}
}

```



### Vedlegg C - Forsøk for å finne lasermodulens avvik

Et tilfeldig punkt i verktøyets behandlingsområde bestråles og koordinat avleses. Lasermodul flyttes til motsatt ende av behandlingsområde, for så å flyttes tilbake til opprinnelig koordinat. Koordinat avleses og sammenlignes med opprinnelig koordinat.

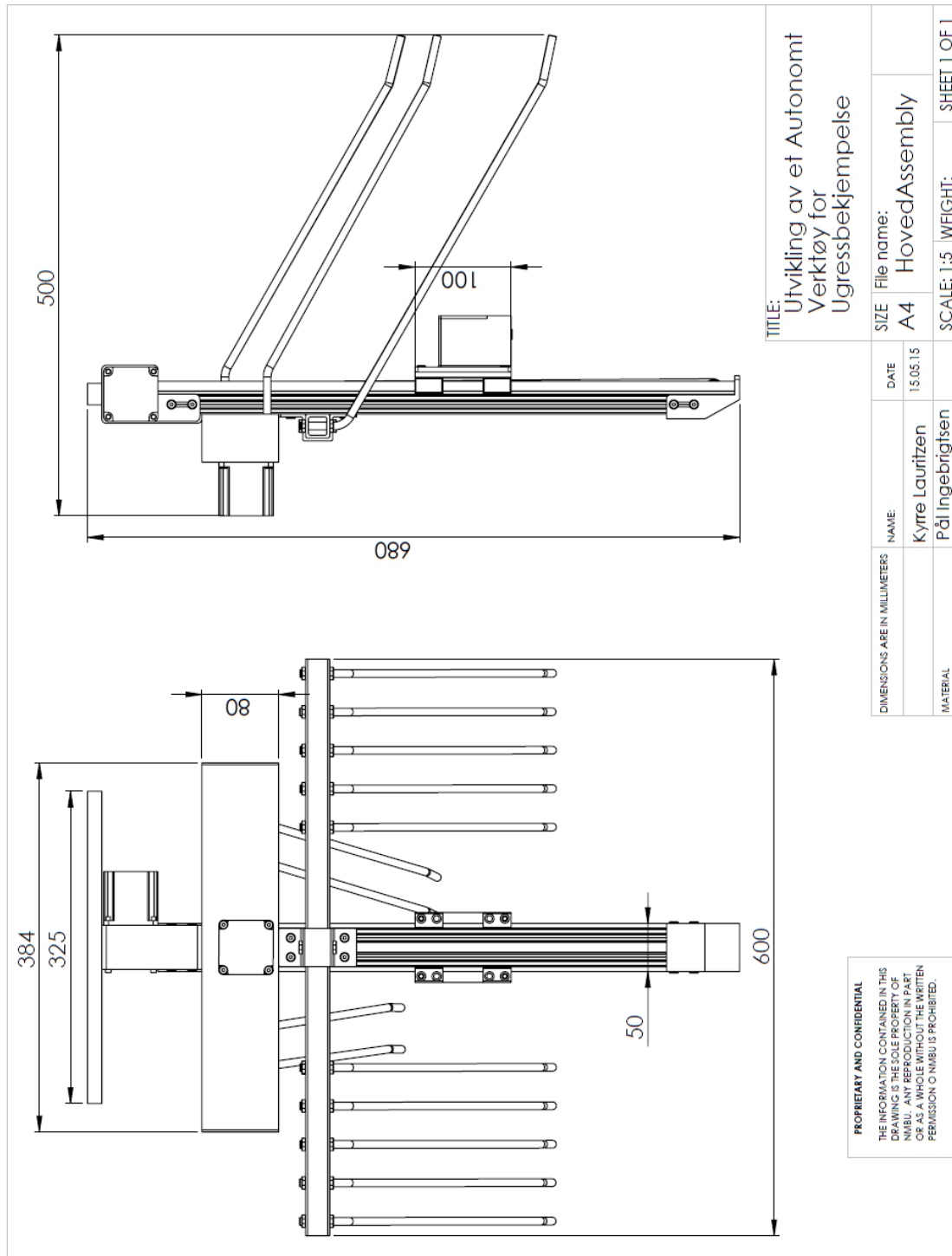
Et millimeterpapir er fastmontert i verktøyets behandlingsområde. Ved bestråling markeres stråles midtpunkt på papiret.

Det var ikke mulig med tilgjengelige utstyr å finne avvik mellom fastsatte koordinater i verktøyets X-retning.

Resultater	Resultater
5,5	5,0
5,5	6,2
4,9	5,0
6,0	6,0
6,1	5,8
5,9	5,8
6,0	7,0
6,0	5,2
5,5	6,0
6,1	4,9
6,0	5,0
6,0	7,2
5,1	6,0
5,8	6,5
5,0	6,0
6,1	5,2
	5,0

Maksimalt avvik: 2,3 mm

## Vedlegg D – Konstruksjonsteining av sammensatt verktøymodul







Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

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