

TCD-HYPERSPECTRAL

Mobiel platform Hyperspectral

Abstract

Organisatie/Afdeling: NHL Stenden; Lectoraat Computer Vision & Data Science
Datum: 12/01/2026
Projectleider: Boaz Dijkstra, Taeke Hessel van Houten
Contactpersonen: Willem Dijkstra (willem.dijkstra@nhlstenden.com) , Fredrik Lautenbag (fredrik.lautenbag@nhlstenden.com)

Boaz Dijkstra en Taeke Hessel van Houten

Inhoud

1. Inleiding 5
2. Plan van aanpak 5
   2.1. Probleemdefinitie 6
   2.2. Scope 7
   2.3. Planning 8
   2.4. Projectorganisatie 9
   2.5. Rolverdeling 10
   2.6. Werkverdeling 11
   2.7. Risico´s 12
   2.8. Stakeholders analyse 14
      2.8.1. Primaire stakeholders 14
      2.8.2. Communicatiestrategie 15
      2.8.3. Conflictbeheer 16
   2.9. Samenwerkingsovereenkomst 17
3. Onderzoek/Analysefase 18
   3.1 Achtergrond onderzoek 19
   3.2 vrijheidsgraden definiëren 20
   3.3 Rug definitie 21
   3.4 Motivatie gekozen ontwikkelmethode 22
      3.4.1 Pakket van Eisen 24
      3.4.1 Functieboom 31
      3.4.2 Morfologisch overzicht 32
      3.4.3 Pugh Matrix 33
4. Ontwerpfase 34
   4.1 Conceptontwikkeling 34
      4.1.1 Concept haalbaarheid 34
      4.1.2 Concept snelheid 35
      4.1.3 Combinatie van thema's en invloed op conceptkeuze 35
   4.2 Gekozen eindconcept 36
   4.3 Ontwerpverantwoording 37
   4.4 Materiaal analyse 42
      4.4.1 Motivatie voor aluminium als hoofdmateriaal 42

4.4.2 Vergelijking aluminium vs. S235-staal 44
5. Realisatiefase 45
5.1 Sterkte- en FEM-berekeningen 45
5.1.1Test-omschrijving Scanplaat(W4-25-3-20011) 45
5.1.2 VLS geheel 45
5.1.3 FEM simulatie 48
5.1.4 Conclusie scanplaat 52
5.2 Test omschrijving frame 52
5.2.1 Handberekening 52
5.2.2 FEM-simulatie frame validatie 53
5.2.3 FEM-daadwekelijke situatie 55
5.2.4 Conclusie frame 56
5.3 2D werktekeningen 56
6. Testen & Validatie 57
6.1 Mechanische eisen validatie 57
6.2 Overige eisen validatie 60
6.3 conclusie testfase 61
7. Conclusies 62
8. Advies aan opdrachtgever 63
9. Competentiehoofdstuk 64
10. Reflectie 65
Bibliografie 66

Figuur 1 Stakeholders 6
Figuur 2 Planning NHL 8
Figuur 3 eigen planning 8
Figuur 4, Vrijheidsgraden scanopstelling (lampen, rotary scanner en camera als één) 20
Figuur 5, vrijheidsgraden hallogeenlampen (los van de rotary stage scanner en camera) 20
Figuur 6 rug opbouw volgens (KOUWENHOVEN, April 1966) 21
Figuur 7 Vrijheidsgraden scanopstelling (lampen, rotary scanner en camera als één geheel) 26
Figuur 8 vrijheidsgraden hallogeenlampen (los van de rotary stage scanner) 26
Figuur 9 vrijheidsgraden rotary scanner (los van de hallogeenlampen) 26
Figuur 10 Camera positie ten opzichte van de rug 27

Figuur 11 referentielijn scanoppervlak bovenaanzicht de referentielijn ligt parallel aan de rug met een afstand van 40cm vanaf het hart van de rug, verder is de lengte van het scanoppervlak in diezelfde richting 43cm haaks daartegen is de breedte van 43 cm. 28
Figuur 12 vooraanzicht scanoppervlak met hartlijn en de hoogte van het scanoppervlak is hierbij 1m 29
Figuur 13 zij aanzicht scanoppervlak met referentielijn 30
Figuur 14 Functie boom 31
Figuur 15 Morfologisch overzicht 32
Figuur 16 Pugh matrix 33
Figuur 17render kar 36
Figuur 18 render closeup scanopstelling 36
Figuur 19 render closeup laptopstand 36
Figuur 20 kaal frame 37
Figuur 21 boven frame 37
Figuur 22 exploded view boven frame 37
Figuur 23 Voorste subassemblage 38
Figuur 24 tussenstukken 38
Figuur 25 achterzijde 38
Figuur 26 laptopstand exploded view 39
Figuur 27 onderkant kar 39
Figuur 28 lampframe concept 1 40
Figuur 29 lampframe einde concept 40
Figuur 30 nivelleringsbasis closeup 41
Figuur 31 lier 41
Figuur 32 geleidersklemmen 41
Figuur 33 referentie driehoek 45
Figuur 34 VLS-geheel 46
Figuur 35 FEM-opzet 1 48
Figuur 36 FEM-opzet 2 48
Figuur 37 FEM-spanning-ALU 49
Figuur 38 FEM-vervorming-ALU 49
Figuur 39 FEM-spanning-S235 50
Figuur 40 FEM-vervorming-S235 50
Figuur 41 FEM-spanning-AISI 51
Figuur 42 FEM-vervorming-AISI 51
Figuur 43 FEM validatie frame opzet 53
Figuur 44 FEM validatie spanning frame 54
Figuur 45 FEM validatie vervorming frame 54
Figuur 46 FEM opzet frame 55
Figuur 47 FEM spanning frame 55
Figuur 48 FEM vervorming frame 56
Figuur 49 Laptop stand eis controle 57
Figuur 50 kofferbak eis controle 59

1. Inleiding

Dit TCD documenteert de aanpak en de uitgevoerde stappen binnen het project voor de mobiele hyperspectrale scanopstelling. De opdracht bestaat uit het mobiel maken van een bestaande scanopstelling van het lectoraat Computer Vision & Data Science (CV&DS). Het lectoraat is op zoek naar een oplossing om hyperspectrale scans sneller en efficiënter uit te voeren, zodat er meer data kan worden verzameld en verwerkt.

Het doel van het project is het realiseren van een ontwerp waarop het lectoraat verder kan voortbouwen. Daarnaast wordt het ontwerp getoetst aan de vooraf gestelde eisen.

2. Plan van aanpak

Aan het begin van het project wordt een plan van aanpak opgesteld om zowel voor de opdrachtgever als voor het projectteam duidelijk te maken wat binnen het project wordt aangepakt. In dit document worden verschillende onderdelen benoemd, waaronder de scope van het project. Het vaststellen van een scope is belangrijk om duidelijke grenzen te bepalen en te voorkomen dat het project te breed wordt uitgezet.

Daarnaast wordt aandacht besteed aan de stakeholders en de planning voor de projectperiode. De stakeholders worden geanalyseerd op hun invloed en betrokkenheid binnen het project. Hiermee wordt helder gemaakt welke rol iedere stakeholder vervult en bij wie belangrijke vragen kunnen worden uitgezet.

De planning geeft een inschatting van de werkzaamheden gedurende de projectperiode en geeft aan wanneer welke activiteiten worden uitgevoerd. Hierdoor kunnen eventuele interne deadlines worden vastgesteld en kan het project gestructureerd worden uitgevoerd.

2.1. Probleemdefinitie

Onze opdrachtgever is het lectoraat Computer Vision & Data Science (CV&DS).
het lectoraat Computer Vision & Data Science (CV&DS) valt onder de NHL Stenden en werkt samen met de volgende partners die hen financieel ondersteunen:



Figuur 1 Stakeholders

Het lectoraat richt zich op toegepast onderzoek naar het automatisch waarnemen en analyseren van visuele informatie, met name via videodata door beeldverwerkingsalgoritmen.
Zij combineren innovatieve technieken zoals deeplearning, hyper spectrale beeldvorming en hardware prototyping om concrete oplossingen te realiseren in samenwerking met het bedrijfsleven, studenten en docenten.

Het lectoraat doet momenteel een onderzoek naar het Y-virus in aardappelen en momenteel maakt men gebruik van een statische opstelling in het veld om deze data te verkrijgen.
Ze maken gebruik van een hyper spectrale camera om de aardappel plant te scannen, verder gebruiken ze hier hallogeen lampen bij zodat het hele lichtspectrum wordt toegepast in de scans. Deze opstelling is echter, mede door omvang en het grote aantal kabels, lastig te hanteren en te verplaatsen in het aardappelveld om efficiënt opnames te kunnen maken

Het lectoraat wil nu graag een oplossing voor dit statische systeem, aangezien het verplaatsen en verstellen van het statische systeem veel tijd kost heeft men besloten dat ze een mobiel systeem willen toepassen in het veld zodat de vergaring van data efficiënter verloopt.

In het kort is de opdracht voor Boaz Dijkstra en Taeke Hessel van Houten als volgt: “Ontwerp, bouw en test een gemakkelijk verplaatsbare opstelling die de aardappelplant afschermt van omgevingslicht, en waarbij de camera en belichting in hoogte en hoek verstelbaar zijn”.

2.2. Scope

Projectgrenzen zijn opgesteld op basis van de gestelde eisen, op basis van wat het lectoraat van ons verwacht en welke wensen eventueel van toepassing zijn.

Binnen scope:

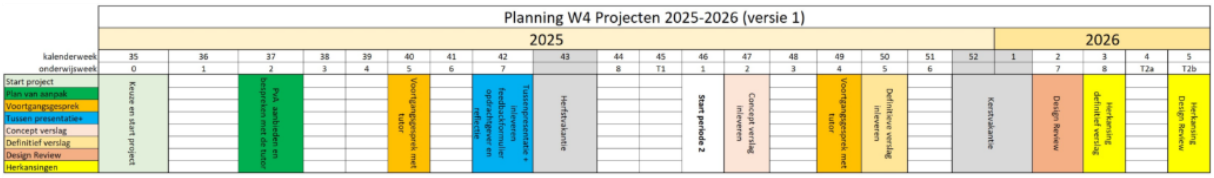
- De kar moet in een kofferbak passen van maximaal 600 liter inhoud.
- De hart-op-hart afstand tussen de wielen moet 75 cm ± 2 mm of 150 cm ± 2 mm zijn.
- De kar moet voorzien zijn van een montage voor een laptop tot 17 inch en 3 kg op 1000 mm ± 200 mm hoogte.
- De kar moet voldoen aan de eis dat de maximale relatieve rotatie tussen lamp en kar ≤ 0,5° ten gevolge van het gewicht van de
- De kar moet door één persoon voortgestuwd kunnen worden.
- De kar moet voorzien zijn van twee halogeenlampen (minimaal 8000 lumen volgens specificatie).
- De kar moet door één persoon geassembleerd kunnen worden in ≤ 20 minuten.
- De kar moet volledig geassembleerd kunnen worden zonder extern gereedschap.
- De camera moet in hoogte verstelbaar zijn en kantelbaar.
- De lampen moeten in hoogte verstelbaar zijn van 800–1500 mm en kantelbaar over ≥ 90°.
- Er moet een handleiding en ontwerpdocumentatie worden opgeleverd.
- Het prototype moet getest worden op bovengenoemde eisen.

Buiten scope:

- Ontwikkeling of levering van de laptop zelf.
- Ontwikkeling of levering van de camera zelf.
- Ontwikkeling van specialistische software of elektronica buiten de basisfunctionaliteit.
- Productie van de kar op grote schaal
- Ontwerp van externe transportmiddelen

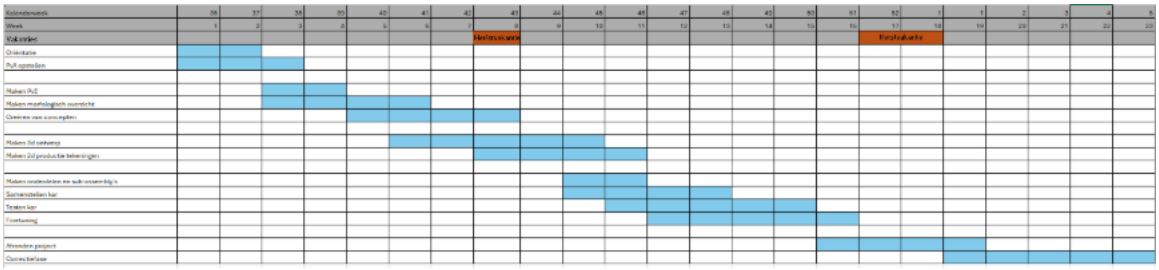
2.3. Planning

Algemene planning volgens de NHL Stenden.



Figuur 2 Planning NHL

NHL Stenden verwacht een aantal verslagen opgeleverd te krijgen volgens de planning, daarnaast zullen er ook gesprekken plaatsvinden binnen bepaalde weken om de voortgang van het project te overzien.



Figuur 3 eigen planning

2.4. Projectorganisatie

Communicatie opdrachtgever

De communicatie met de opdrachtgever vindt plaats via email. De gegevens van de opdrachtgever staan hieronder vermeld.

Naam	Fredrik Lautenbag
Afdeling	Lectoraat CSDS
Email	Fredrik.Lautenbag@NHLstenden.com
Telefoon	06 13504266

Onderlinge communicatie

De communicatie in de groep onderling vindt plaats in de daarvoor gecreëerde teams-omgeving. Ook zullen hier de projectbestanden worden opgeslagen. De gegevens van de groepsleden staan hieronder vermeld.

Voornaam	Achternaam	Email
Boaz	Dijkstra	boaz.dijkstra@student.nhlstenden.com
Taeke Hessel	van Houten	Taeke.van.houten1@student.nhlstenden.com

---

Vergaderfrequentie

De projectgroep zal 1 keer per week samenkomen voor de realisatie van het project. Dit zal plaatsvinden op de woensdagmiddag

Werkdag

De projectgroep zal minimaal 1 keer per week werken bij het lectoraat om voortgang aan het project te vorderen en eventuele vraagstukken te behandelen.

2.5. Rolverdeling

Boaz Dijkstra - Connector & Projectleider

- Aanspreekpunt voor het lectoraat en tutor Jelle Kazimier
- Bewaakt de planning en verdeelt de taken
- Stuurt de samenwerking aan en zorgt voor een goede communicatie
- Verantwoordelijk voor CAD-ontwerp en rapportage

Taeke Hessel van Houten -Analist & Engineer

- Verantwoordelijk voor sterkteberekeningen en FEM-analyses
- Bewaakt de technische haalbaarheid en maakbaarheid van het ontwerp
- Ontwikkelt en voert het test- en validatieplan uit
- Controleert en ondersteunt bij de documentatie van Boaz

Het Lectoraat - Opdrachtgever

- Levert de opdracht en de eisen/wensen voor het project
- Fungeert als eindgebruiker en beoordelaar van het resultaat

Jelle Kazimier - Tutor

- Begeleidt het projectteam tijdens het proces
- Ondersteunt bij het oplossen van knelpunten en bewaakt de leerdoelen
- Geeft feedback op voortgang en eindresultaat

2.6. Werkverdeling

Het werk zal zo veel mogelijk gelijk verdeeld worden tussen de studenten van het project. Dit omvat het onderzoeken, voorbereiding en eisen, ontwerpen, realiseren en verslagleggen.

Onderzoek
Boaz: Markt- en gebruikersonderzoek (welke oplossingen bestaan er al, gebruiksbehoeften inventariseren).
Taeke: Patentonderzoek en literatuurstudie (bestaande technieken, octrooien, vergelijkbare systemen).

Voorbereiding en eisen
Taeke: Stakeholdersanalyse, gebruikerseisen en praktische constraints ophalen.
Boaz: Inventarisatie eisen en wensen (PvE), technische specificaties verzamelen.
Samen: Definitief PvE opstellen.

Ontwerpen
Boaz: 3D CAD van verstelmechanismen, lampen, camera en laptop mount.
Taeke: 3D CAD van draagstructuur, 2D tekeningen, stabiliteit.
Samen: Integratiecheck, clashes oplossen

Realisatie
Boaz: Verstelmechanismen en afscherming.
Taeke: Frameconstructie, mechanische montage.
Samen: Eindassemblage + testen.

Verslagleggen
Boaz: Procesdocumentatie (PvA, reflectie, gebruikershandleiding).
Taeke: Technische documentatie (ontwerp, tekeningen, handleiding).
Samen: Eindpresentatie en oplevering.

2.7. Risico´s

Bij het project kunnen verschillende dingen fout gaan. Hiervoor is het handig om een risicoanalyse op te stellen. Een risicoanalyse zorgt voor een overzicht van mogelijke valkuilen en laat zien hoe wij daarmee om kunnen gaan. In dit project gaat de risicoanalyse over het proces, omdat de fysieke vorm van de oplossing nog niet bekend is. De risicoanalyse wordt opgesteld via de veelgebruikte Kinney & Wiruth-methode. Hierbij kijken we naar:

- W = waarschijnlijkheid van voorkomen
- B = De Blootstelling
- E = Het effect
- R = Het risico

Verschillende risico's toetsen we op deze factoren waarnaar we het bijbehorende risico kunnen bepalen met de formule R = W x B x E.

Tabel 1

Nr.	Omschrijving gevaarlijke situatie	Latent gevaar	W	B	E	R	Risico
1	Kwijtraken van bestanden	Vertraging van het proces	2	1	3	6	Licht, misschien
2	Mislukken van de scan	Vertraging van het proces	4	3	4	48	Mogelijk, aandacht
3	Ziekte binnen de projectgroep	Vertraging van het proces	4	2	3	24	Mogelijk, aandacht
4	Miscommunicatie met opdrachtgever	Vertraging van het proces	4	2	3	24	Mogelijk, aandacht
5	Vertraging in realisatieproces	Missen van opleverdatum	3	2	3	18	Licht, misschien
6	Onduidelijke rollen en verantwoordelijkheden binnen het projectteam	Vertraging van het proces	2	1	3	6	Licht, misschien
7	Slechte documentatie	Moeilijke overdracht	3	3	3	27	Mogelijk, aandacht

8	Falen van gerealiseerd prototype	Missen van opleverdatum	2	2	5	20	Licht, misschien

Tabel 2

Nr.	Plan van aanpak	W	B	E	R	Rest risico
1	Een Teams-groep met duidelijke bestandsindeling	1	1	3	6	Licht, misschien
2	Voldoende afstand tot mensen en een lage snelheid houden bij stappen waar de koffie veel beweegt.	2	3	4	48	Mogelijk, aandacht
3	Binnen het projectteam ieders werk duidelijk hebben	3	2	2	20	Mogelijk, aandacht
4	Voldoende vragen stellen en tussentijdse 'check-ups' met de opdrachtgever	2	2	3	24	Mogelijk, aandacht
5	Een efficiënt realisatieproces aanhouden	2	2	3	18	Licht, misschien
6	Rollen en taken aan het begin van het project verdelen en duidelijk maken	1	1	3	6	Licht, misschien
7	Voldoende tijd besteden aan het documenteren van onze bevindingen	2	3	3	27	Mogelijk, aandacht
8	Onderbouwde keuzes maken in het ontwerpproces van het prototype	2	2	3	18	Licht, misschien

2.8. Stakeholders analyse

In dit hoofdstuk wordt de stakeholdersanalyse behandeld, in een stakeholdersanalyse worden de belangrijkste belanghebbende partijen benoemd, en waar deze partijen belang bij zouden kunnen hebben.

- **Lectoraat (CS&DS)**

Het lectoraat is verantwoordelijk voor onderzoeken doen naar verscheidene onderwerpen rond het gebied van computer vision en dataverwerking. En dus ook voor de uiteindelijke waarborging van het product.

- **Gebruikers**

Dit zijn de mannen die het veld werk doen voor het lectoraat (CSDS), zij zullen het product toepassen in het werkveld. Zij willen gebruik maken van het product om hun werk efficiënter te maken.

- **Projectteam**

Het projectteam is verantwoordelijk voor het bedenken, ontwikkelen en implementeren van de automatiseringsoplossing. Zij hebben direct invloed op hoe het systeem eruitziet en functioneert.

- **Opleiding/opleider**

De opleiding/opleider houdt zich bezig met het begeleiden van de studenten door kritische vragen te stellen over het proces hierbij helpen zij aan een beter leerproces waaraan de studenten dieper op hen proces in kunnen gaan.

2.8.1. Primaire stakeholders

Primaire stakeholders (Tabel 1) zijn belanghebbende partijen die direct betrokken zijn bij het project. Hun belangen beïnvloeden de uitkomst van het project direct. Primaire stakeholders hebben veel invloed op de besluiten in het project.

Primaire stakeholders:

Tabel 3 stakeholders

Lectoraat (CS&DS)	Belangen: Efficiënter proces in het werkveld, levert meer data voor onderzoek.
	Invloed: Hoog, Betrokken bij het leveren van technische data en eisen aan het product en verdere toekomstige plannen.
Gebruikers	Belangen: Sneller werk proces, een eenvoudiger systeem om op te zetten.
	Invloed: Hoog, Direct betrokken bij gebruik en leren van het systeem, hun input is cruciaal.

Projectteam	Belangen: Succesvolle oplevering van het project, werkende en stabiele oplossing, positieve feedback van eindgebruikers, leerervaring en projectresultaat behalen.
	Invloed: Hoog, Ontwikkelt en implementeert de oplossing, veel invloed op resultaat.
Opleiding/opleider	Belangen: leerervaringen delen, controle op bereik van leerdoelen, kritisch oog leveren, studenten laten nadenken.
	Invloed: Gemiddeld, Betrokken bij het leerproces van de studenten, levert een ervaren oog op gebied van projectmanagement.

2.8.2. Communicatiestrategie

Een goede communicatie is belangrijk. Vandaar deze communicatiestrategie waarin we de manieren van de communicatie per stakeholder weergeven.

- **Lectoraat (CSDS)**

Het Lectoraat wil graag weten welke stappen wij ondernemen voor het ontwerpen van ons product, zij willen een kwalitatieve uitstraling terugzien. Hiervoor gaan wij elke week met hen in gesprek om te controleren hetgeen wat wij leveren aan hun verwachtingen voldoet.

- **Gebruikers**

De gebruikers maken gebruik van ons product in het werkveld, zij hebben belang bij een eenvoudig systeem waarbij men niet veel handeling nodig heeft om het systeem op te bouwen, om dit te bereiken zullen we ook in overleg gaan met hen zodra we de ontwerpfase bereiken.

- **Projectteam**

Het projectteam ontwikkelt en implementeert de automatiseringsoplossing. Binnen het team is goede communicatie essentieel om het project op tijd en volgens plan af te ronden. Dit gebeurt door regelmatig overleg (bijvoorbeeld wekelijkse meetings), het delen van voortgangsrapportages en het bijhouden van duidelijke documentatie.

- **Opleiding/opleider**

De Opleiding/opleider wil graag weten welke stappen wij ondernemen en hoe we deze eventueel kunnen verbeteren door een kritische blik te geven op het proces, zij willen dat de studenten nuttige leerdoelen bereiken aan het einde van dit project.

2.8.3. Conflictbeheer

Lectoraat (CSDS)

- Mogelijk conflict: Lectoraat vindt het systeem niet naar behoren qua uiterlijk of structuur.
- Strategie om te voorkomen: Lectoraat vroeg betrekken bij het ontwerpproces en feedback verwerken in de oplossing.

Gebruikers

- Mogelijk conflict: Ontevredenheid over gebruiksvriendelijkheid.
- Strategie om te voorkomen: Gebruikersonderzoeken uitvoeren, een duidelijke instructie handleiding maken, en het systeem testen in een proefperiode.

Projectteam

- Mogelijk conflict: Onenigheid binnen het team over de technische keuzes of prioriteiten in het project.
- Strategie om te voorkomen: Regelmatige teamvergaderingen, heldere taakverdeling en documentatie van besluiten zodat iedereen dezelfde richting volgt.

Opleiding/opleider

- Mogelijk conflict: Onenigheid over de ondernomen proces stappen.
- Strategie om te voorkomen: Sterke onderbouwing leveren over waarom bepaalde stappen zijn ondernomen.

Door het uitvoeren van een stakeholdersanalyse en conflictbeheerplan kunnen de ontwerpers van de automatiseringsoplossing de belangen van alle partijen meenemen en zo de kans op misverstanden en vertragingen minimaliseren.

2.9. Samenwerkingsovereenkomst

Projecttitel: Hyperspectral
Studiejaar/ Vak: WTB W4-Projecten 2025-2026
Projectduur: 23 weken

Partijen:

- Boaz Dijkstra, 5216737
- Taeke Hessel van Houten, 4713613

Doel van de samenwerking

De partijen werken samen aan het bovengenoemde project met als doel een gezamenlijk resultaat op te leveren conform de eisen van de opleiding/opdrachtgever.

Rolverdeling

De rolverdeling is vastgesteld zoals weergegeven in de rolverdelingstabel.

Taken en verantwoordelijkheden

1. Ieder teamlid levert zijn/haar taken tijdig en kwalitatief goed aan.
2. Beide teamleden controleren elkaars werk waar mogelijk om fouten te voorkomen.
3. Afwijkingen in planning of kwaliteit worden direct besproken.

Communicatie & vergaderingen

1. Er wordt minimaal 1 keer per week overleg gevoerd.
2. Belangrijke besluiten worden gezamenlijk genomen.
3. Notities of besluiten worden vastgelegd in een gedeeld document.

Conflictbemiddeling

Indien meningsverschillen niet in goed overleg worden opgelost, wordt dit besproken met de begeleidend docent/opdrachtgever.

Ondertekening

Met de ondertekening van deze overeenkomst verklaren partijen zich te houden aan de afspraken.

Naam	Handtekening	Datum
Boaz Dijkstra	Boaz	1-10-2025
Taeke Hessel van Houten	Taeke	1-10-2025

3. Onderzoek/Analysefase

Zodra er een duidelijk beeld is van wat er verwacht wordt, kan de onderzoeksfase beginnen. In deze fase wordt onderzocht welke eisen volgens de opdrachtgever van toepassing zijn, en deze worden opgesteld volgens de SMART-methode. Het formuleren van deze eisen brengt ook aanvullende vragen met zich mee, waarvoor gerichte onderzoeken worden uitgevoerd om deze vragen te beantwoorden en te onderbouwen.

Na het opstellen van het programma van eisen kan worden gestart met het ontwikkelen van een functieboom. Alle functies waaraan het ontwerp moet voldoen worden geanalyseerd en onderverdeeld in hoofd- en deelfuncties.

Op basis van de functieboom wordt vervolgens een morfologisch overzicht opgesteld, waarin mogelijke oplossingen per functie worden verkend. Daarnaast worden drie thema's toegepast om richting te geven aan de conceptvorming. Tot slot worden de concepten vergeleken met behulp van een Pugh-matrix. Uiteindelijk wordt één concept geselecteerd om verder uit te werken in de ontwerpfase.

3.1 Achtergrond onderzoek

De aanleiding van ons project komt vanuit een ander lopend project van het lectoraat. Om meer inzicht te krijgen in waar we een ontwerp voor aan het maken zijn en of er vraagstukken zijn te vinden die relateren aan ons project.

Om dit onderzoek te doen hebben we gevraagd aan de opdrachtgever of er enige data is die relevant zou kunnen zijn aan ons project, ze hebben vervolgens een paper aangeleverd: Visual Prompt and Reference-guided plant health detection and classification (Dev, 2025).

De paper gaat in op de scans die worden uitgevoerd voor het project, hierbij word benoemd dat er onderzoek wordt gedaan naar het herkennen van het Y-virus in aardappelplanten in het veld en dat het lectoraat het proces van het herkennen van dit virus wil verbeteren door gebruik te maken van hyperspectrale camera's.
In de paper werd aangegeven dat er wat complicaties zijn voor de scans die ze moeten maken, waar ze met de huidige opstelling ook last van hebben:

"Detecting PVY-infected leaves in dense, complex environments poses unique challenges. Occlusions, diverse backgrounds, and high multi-class variability, which arise from healthy and infected leaves at different infection stages, along with extraneous elements such as dirt, plant stems, and foreign objects, complicate accurate identification." (Dev, 2025)

Hieruit kunnen we halen dat een aantal van deze complicaties ook van toepassing zijn op ons project, we moeten ervoor zorgen dat het scanoppervlak niet beïnvloedt wordt door onderdelen van het ontwerp, verder moeten we er ook opletten dat het ontwerp zonwerend en weersbestendig is.

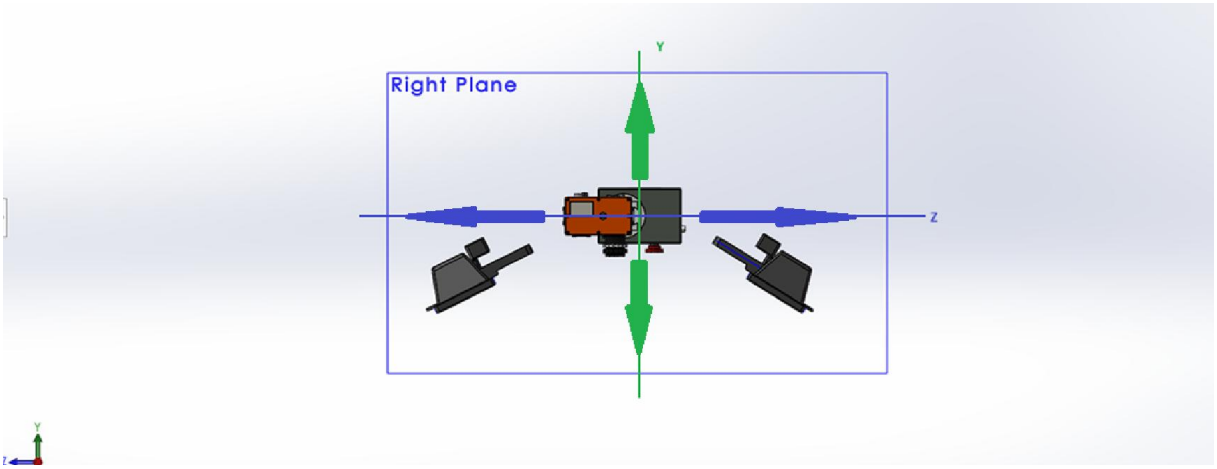
Verder wordt er ook veel dataverwerking benoemd dit betekent dat er ook ruimte moet komen voor een monitor/laptop om de data in te kunnen zien. Dit hebben we besproken met de opdrachtgever en hij was het eens met deze conclusies verder vulde hij aan dat er ook gelet moet worden op de bekabeling van de verscheidene apparaten die moeten worden aangesloten waaronder een laptop.

3.2 vrijheidsgraden definiëren

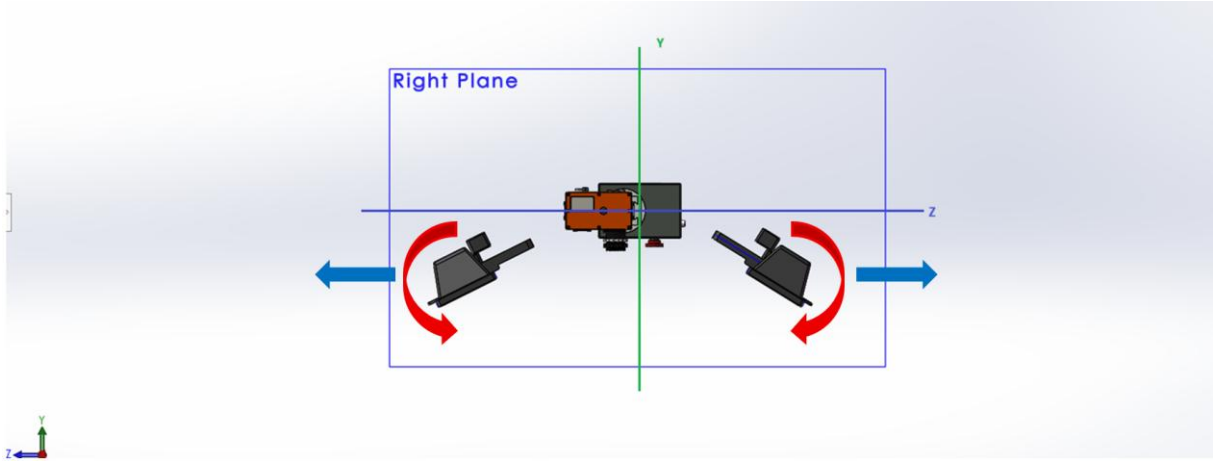
De vrijheidsgraden van de scanopstelling zijn vastgelegd in onderstaande tabel en in het bijbehorende Solidworks-model. Deze vrijheidsgraden zijn opgesteld op basis van de functionele bewegingen die noodzakelijk zijn voor een volledige en reproduceerbare scan. Alleen de assen en bewegingen die daadwerkelijk bijdragen aan positionering of uitlijnnauwkeurigheid zijn als eis gedefinieerd. Voor parameters die in de tabel met een '–' zijn aangeduid, worden geen eisen gesteld aan verstelbaarheid en toleranties.

Onderdeel	Referentie afbeelding	X	Y	Z	X'	Y'	Z'
Verstelbaarheid scanopstelling	1	-	700mm	1000mm	-	-	-
Tolerantie scanopstelling	1	-	20mm	20mm	-	-	-
Verstelbaarheid lampen	2	-	-	500mm	90°	-	-
Tolerantie hallogeenlampen	2	-	-	10mm	5°	-	-

Tabel 4, Vrijheidsgraden



Figuur 4, Vrijheidsgraden scanopstelling (lampen, rotary scanner en camera als één)



Figuur 5, vrijheidsgraden hallogeenlampen (los van de rotary stage scanner en camera)

3.3 Rug definitie

Het is voor het ontwerp van belang dat we weten op wat voor grond we werken en vanzelfsprekend is dit op landbouwgrond aangezien er aardappelplanten gescand moeten worden. Landbouwgrond is opgebouwd uit ruggen in principe zijn dit rijen over de landgrond waar aardappelplanten in verdeeld worden, dit is bewust voor de aardappelplant toegepast om het gewas makkelijker te potten maar ook om hun omgeving te bevorderen.

Het probleem is natuurlijk dat wij graag met een mobiel platform langs deze ruggen gaan rijden. Dus we hebben onze opdrachtgever benaderd of zei met specifieke ruggen werken en of daar ook eventuele meetbare data voor is. Zij hebben ons het volgende document aangeleverd 368468. Uit de data volgt drie verschillende type ruggen, de opdrachtgever informeerde dat de ontwerp gebaseerd moet worden op het grootste formaat rug.

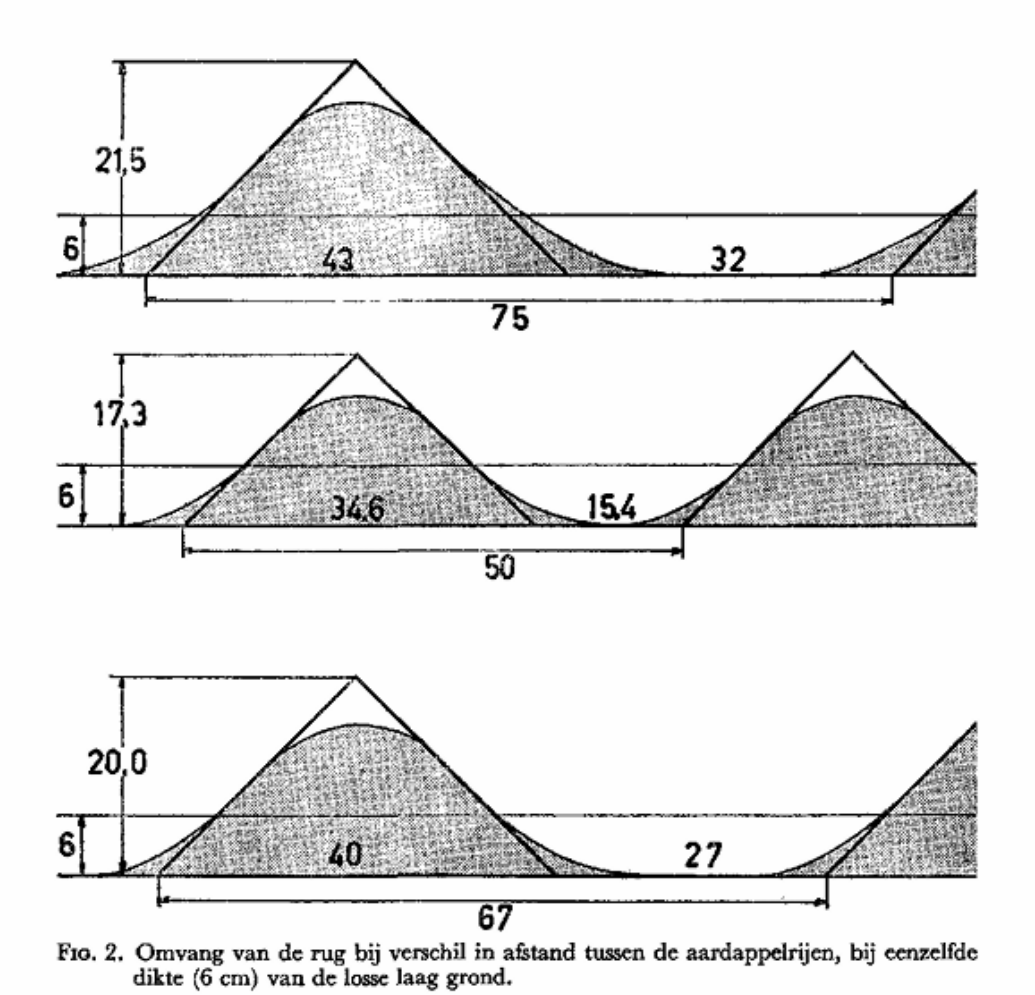


Fig. 2. Omvang van de rug bij verschil in afstand tussen de aardappelrijen, bij eenzelfde dikte (6 cm) van de losse laag grond.

Figuur 6 rug opbouw volgens (KOUWENHOVEN, April 1966)

Met deze data bepalen we de breedte van het ontwerp zodat waarin de wielen van het ontwerp precies in de geulen vallen van de ruggen zodat de ruggen niet geschaad worden tijdens gebruik van het ontwerp.

3.4 Motivatie gekozen ontwikkelmethode

Voor dit project is gekozen voor een systematische en methodische ontwerpaanpak die aansluit bij de complexiteit van de opdracht.
De te ontwikkelen mobiele hyperspectrale scanopstelling moet voldoen aan een groot aantal technische, gebruiksgerichte en ergonomische eisen. Om deze eisen op een gestructureerde wijze te vertalen naar een haalbaar en reproduceerbaar ontwerp, is gekozen voor een ontwikkelmethode bestaande uit:

1. Functieanalyse (Functieboom)
2. Oplossing analyse (Morfologisch schema)
3. Conceptvergelijking (Pugh-matrix)

De motivatie voor deze methode is als volgt:

Functieboom

De functieboom vormt de basis voor de rest van het ontwerpproces.
De opdracht bevat veel onderling afhankelijke technische functies:

1. lichtafscherming
2. hoogteverstelling
3. stabiliteit op ongelijke landbouwgrond
4. kabelmanagement
5. scanbereik
6. montage en transporteerbaarheid

Het expliciet uitschrijven van hoofd- en deelfuncties voorkomt dat belangrijke functies worden vergeten en maakt aannemelijk dat het uiteindelijke ontwerp volledig aansluit op de eisen van het lectoraat. De gekozen functies worden gebaseerd op de gestelde eisen in het plan van eisen.

Morfologisch schema

Na het bepalen van alle functies worden meerdere oplossingsrichtingen per functie opgesteld.
Het morfologisch schema is gekozen omdat:

1. het creatieve ontwerpruimte vergroot
2. het een gestructureerde manier biedt om alternatieven te genereren
3. het combineert mogelijke oplossingen zonder tunnelvisie
4. het projectteam in staat is onafhankelijk deeloplossingen te combineren

Voor een multidisciplinair project als dit (mechanica, optica, ergonomie, veldgebruik) is een morfologische benadering essentieel om integrale keuzes te kunnen maken.

Pugh-matrix

De Pugh-matrix wordt gebruikt om concepten objectief te vergelijken op basis van:

1. Prioriteiten van de opdrachtgever
2. Technische haalbaarheid
3. Gebruiksgemak in het veld
4. Montagemogelijkheden
5. Stabiliteit en robuustheid

Dit voorkomt subjectieve keuzes.
De bestaande opstelling wordt gebruikt als referentie, zodat nieuwe concepten consistent beoordeeld worden.
De Pugh-matrix is hiermee de meest valide methode om een eindconcept te selecteren dat aantoonbaar het beste voldoet aan de gestelde eisen.

3.4.1 Pakket van Eisen

Nadat we een aantal onderzoeken hebben toegepast kunnen we een aantal eisen benoemen en SMART noteren. We hebben een basis kunnen leggen met de scope alleen nu worden de eisen gedetailleerd beschreven.

Mechanische eisen:

1. Er moet een laptop tot 17 inch en 3 kg gemonteerd kunnen worden op een hoogte van minimaal 100 cm vanaf onderkant rug.
2. Maximale relatieve rotatie tussen rotary stage scanner en kar ≤ 1° bij belasting van eigen gewicht. (zie tabel 1.1 – Tolerantie rotary scanner).
3. De scanopstelling moet zijn voorzien van twee halogeenlampen van het type Brennenstuhl 1171380, FX10/17 Specim camera en de RS10 Rotary stage scanner.
4. De RS10 Rotary stage scanner met de FS10-17 Specim camera erop gemonteerd moet de ruimte hebben om tijdens het scannen een slag van 160° kunnen maken. Deze slag moet loodrecht op de lengterichting van de rug gemaakt kunnen worden. (Zie figuur 9 en 10)
5. De constructie mag het scanoppervlak niet hinderen tijdens het scannen. Het scanoppervlak is een volume van 80cm x 43cm x 100cm (LxBxH) en ligt met het hart van de lens op het hart van het scanoppervlak die vervolgens op het hart van de rug ligt(zie figuren 11, 12 en 13). Het scanoppervlak wordt gehinderd als de scan door invloed van de constructie onbruikbaar is.
6. De kar mag de planten niet raken binnen de breedte van de onderkant rug (43 cm) en binnen een hoogte van 70 cm boven de rug van een aardappelveld.
7. De cameralens moet een minimale afstand van 30cm bedragen tegenover de bovenkant van de rug en de aardappelplant.
8. De kar moet in een kofferbak passen van minimaal 105 cm x101 cm x 56 cm, gepakt in losse onderdelen.
9. De kar moet door één persoon voortbewogen kunnen worden op vlak terrein helling ≤ 5° met een duwkracht ≤ 200 N (volgens NEN-1005-3:2008). En bij een terrein met een vlakheid van +/- 5 cm over $1m^2$ (exclusief de ruggen).
10. De kar valt niet om door windsnelheden tot 5 m/s.

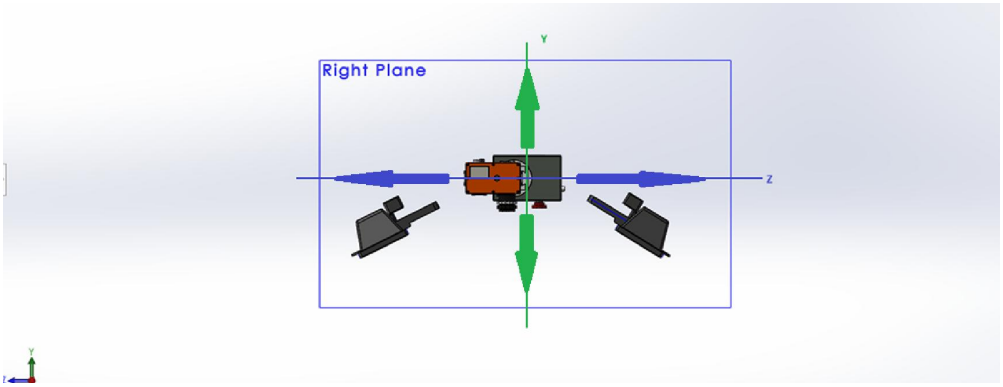
Overige eisen:

1. De kar moet door een relevant geïnformeerd persoon te assembleren zijn in ≤ 25 minuten.
2. De kar moet door een relevant geïnformeerd persoon te opereren zijn.
3. De kar wordt voorzien van een gebruiksaanwijzing voor het opbouwen, en gebruiken van de kar.
4. De kar is voorzien van een CE-keurmerk voor de mechanische constructie.
5. De kar moet voorzien zijn van een lichtbescherming die minimaal 99% van het directe en sterk gereflecteerde zonlicht blokkeert op het scan oppervlak.
6. De kar moet voorzien zijn van een weerafscherming die voldoet aan IP 02 (verticale waterdruppels onder een hoek van 15 graden).
7. Maximaal gewicht van de losse onderdelen < 10kg.
8. Kar moet te monteren zijn met klein handgereedschap.
9. Kabels moeten het scanoppervlak niet hinderen.
10. Kabels moeten niet op (fysieke) spanning komen te staan.
11. De kar moet een minimale levensduur hebben van 100 gebruiksuren zonder functieverlies.
12. Materialen moeten vorm- en functiebehoud tonen gedurende de gehele levensduur.
13. De scanopstelling wordt gepositioneerd volgens figuur 10 over de ruggen.
14. De kar moet kunnen draaien zodat deze van een rug naar de ander rug kan verplaatsen in 1 duwende beweging.

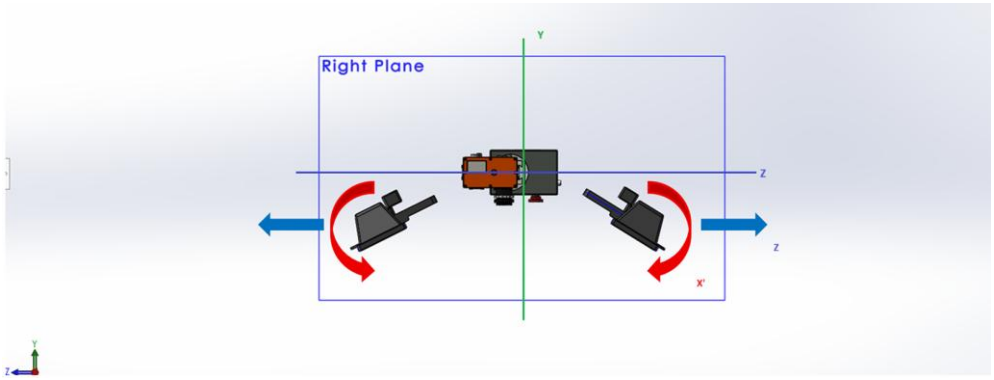
De eisen over de minimale vrijheidsgraden van componenten in de constructie wordt in de volgende tabel gedefinieerd.
De X, Y en Z assen weergeven de translatie richtingen en de X', Y' en Z' weergeven de rotatie om de respectievelijke as. De translatie- en rotatie assen zijn ook weergegeven in de referentie afbeeldingen.

Onderdeel	Referentie figuur	X	Y	Z	X'	Y'	Z'
Verstelbaarheid scanopstelling	1.1	-	1000mm	-	-	-	-
Tolerantie scanopstelling	1.1	-	10mm	-	-	-	-
Verstelbaarheid lampen	2.1	-	-	500mm	90°	-	-
Tolerantie lampen	2.1	-	-	5mm	2.5°	-	-
Verstelbaarheid rotary scanner	3.1	-	-	-	15°	15°	15°
Tolerantie rotary scanner	3.1	-	-	-	1°	1°	1°

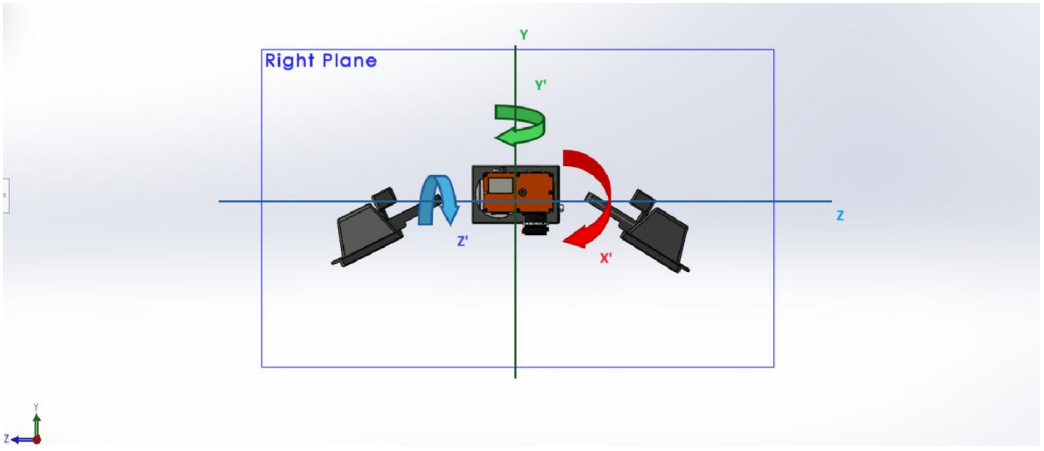
Tabel 5.1, vrijheidsgraden



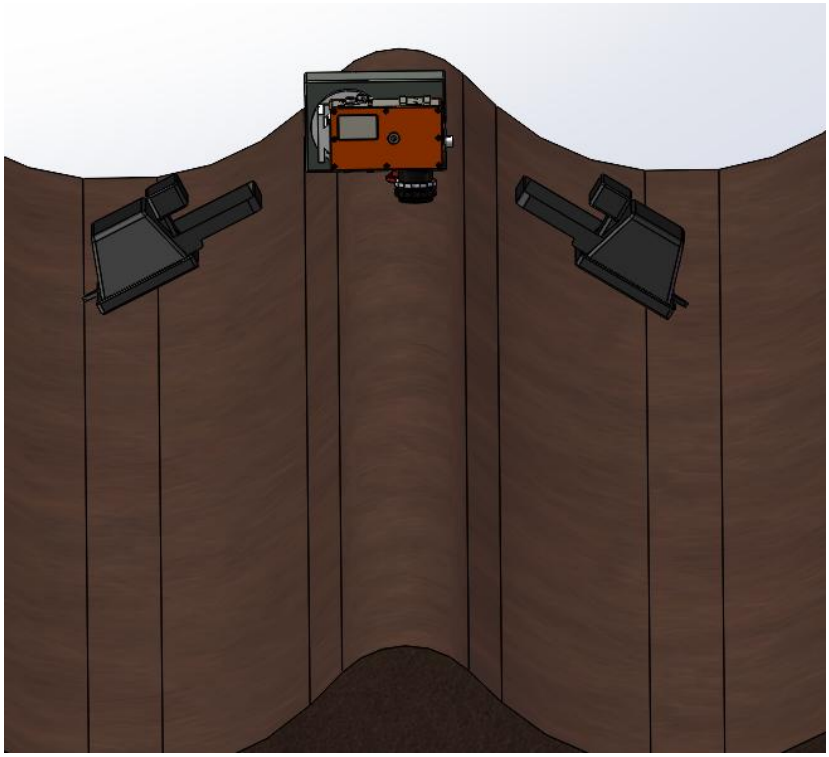
Figuur 7 Vrijheidsgraden scanopstelling (lampen, rotary scanner en camera als één geheel)



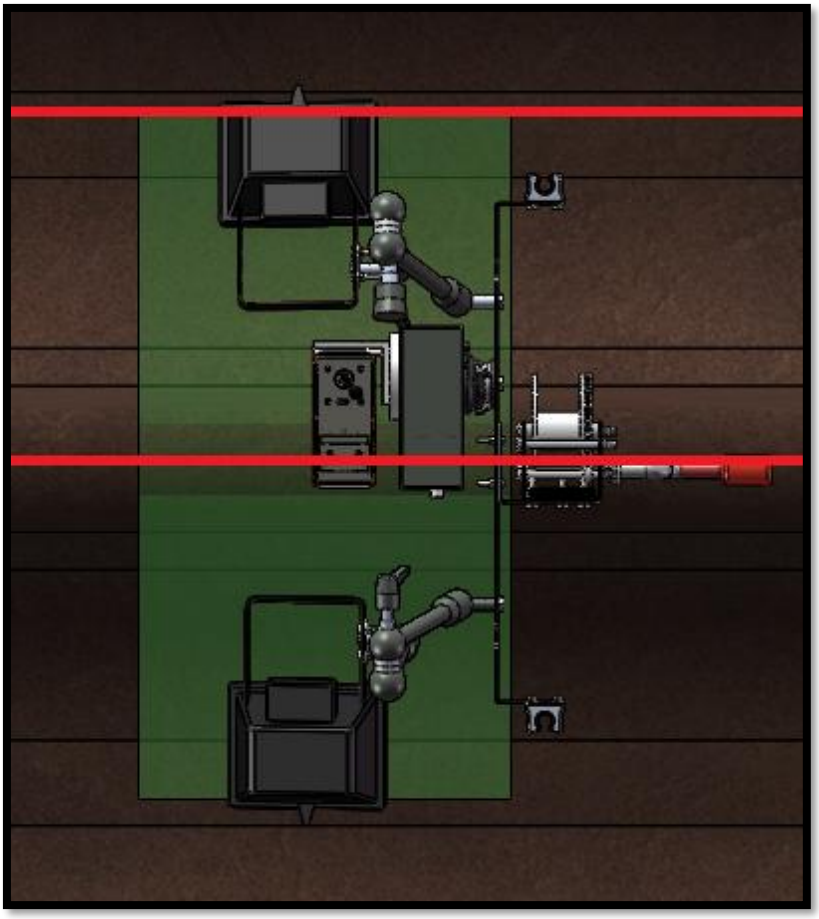
Figuur 8 vrijheidsgraden hallogeenlampen (los van de rotary stage scanner)



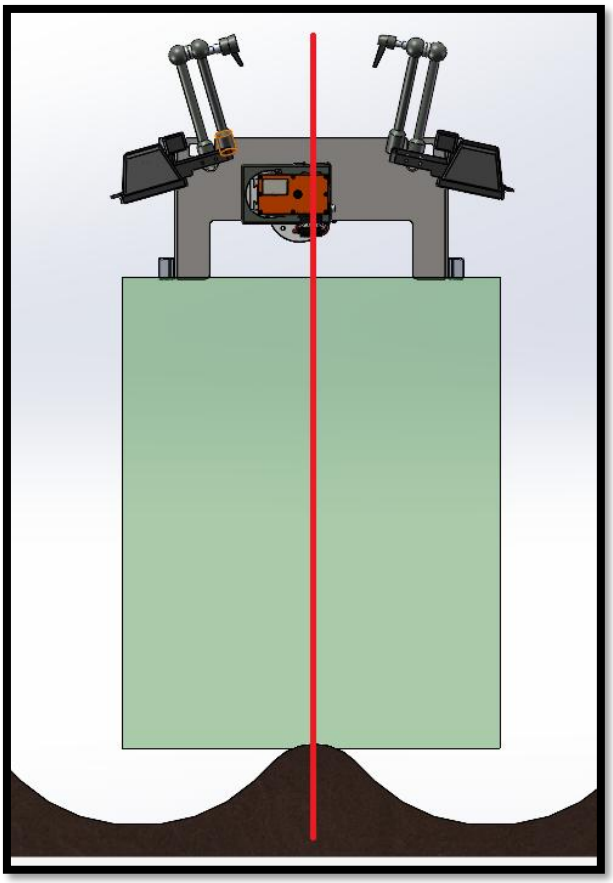
Figuur 9 vrijheidsgraden rotary scanner (los van de hallogeenlampen)



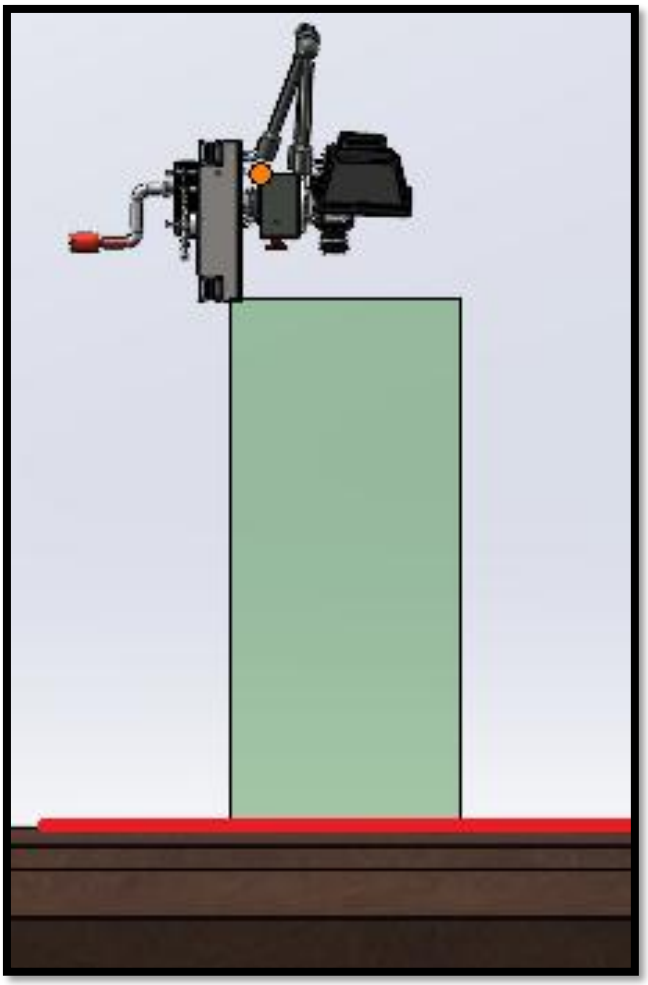
Figuur 10 Camera positie ten opzichte van de rug



Figuur 11 referentielijn scanoppervlak bovenaanzicht de referentielijn ligt parallel aan de rug met een afstand van 40cm vanaf het hart van de rug, verder is de lengte van het scanoppervlak in diezelfde richting 43cm haaks daartegen is de breedte van 43 cm.



Figuur 12 vooraanzicht scanoppervlak met hartlijn en de hoogte van het scanoppervlak is hierbij 1m



Figuur 13 zij aanzicht scanoppervlak met referentielijn

Wensen:

1. Ingebouwde Bluetti-accu.
2. Lampen mee laten bewegen met de camera.
3. Assemblage moet zonder extern gereedschap mogelijk zijn.
4. Er wordt gebruik gemaakt van coating om de kar onderdelen te beschermen tegen roest, corrosie etc.
5. Gebruik van duurzaam materiaal. (Bijvoorbeeld Aluminium)

Opmerkingen over de wensen:

De wens van het inbouwen van de Bluetti-accu wordt niet gerealiseerd binnen ons project. De accu zal een grote impact hebben op de constructie waardoor de kar instabiel wordt of te groot wordt om in een kofferbak te passen.

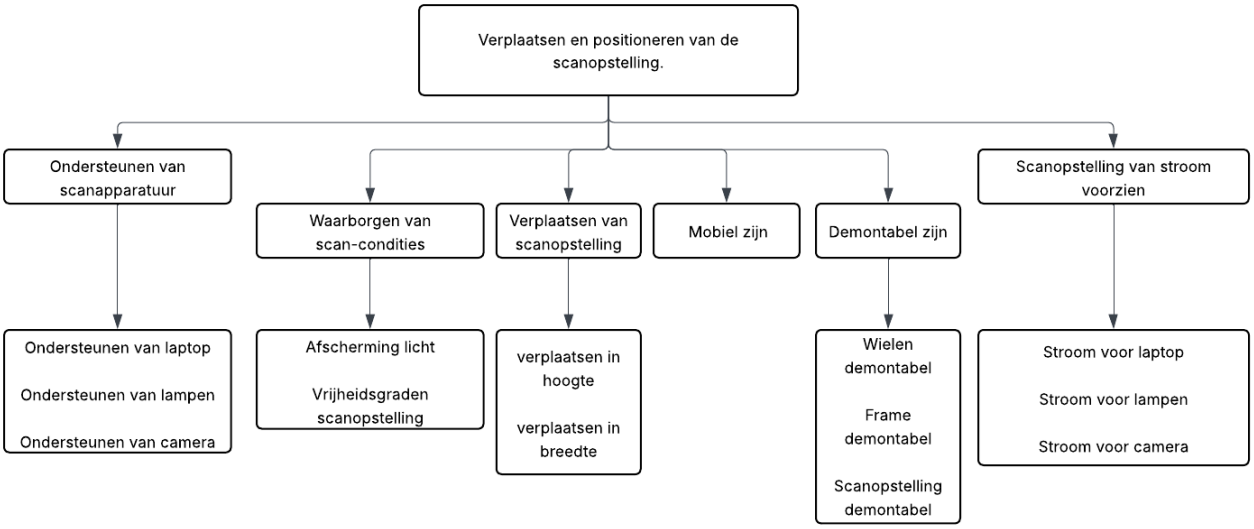
Na overleg met de opdrachtgever is vastgesteld dat de compactheid belangrijker is dan de inbouw van de accu.

De windbescherming, meebewegende lampen en monteerbaarheid zullen meegenomen worden in het ontwerp als wens.

3.4.1 Functieboom

m het ontwerp op een gestructureerde manier te ontwikkelen, wordt gebruikgemaakt van een functieboom. Deze functieboom beschrijft alle functies die de mobiele hyperspectrale scanopstelling moet kunnen vervullen. De functieboom vormt daarmee het fundament voor de ontwerpfase. Vanuit deze hiërarchische functieanalyse kunnen oplossingsrichtingen systematisch worden onderzocht en beoordeeld in het morfologisch overzicht en de Pugh-matrix.

De functieboom is opgebouwd uit één hoofdfunctie, meerdere subfuncties en ondersteunende functies. De hoofdfunctie beschrijft het primaire doel van het systeem. De subfuncties verduidelijken welke afzonderlijke functies noodzakelijk zijn om de hoofdfunctie te kunnen vervullen. Deze functies zijn direct afgeleid uit het Programma van Eisen en de probleemdefinitie.



Figuur 14 Functie boom

3.4.2 Morfologisch overzicht

Thema's:	Kleur
Haalbaarheid ontwerp	
Snelheid	
Gebruiksvriendelijk	

Morfologisch Overzicht

Functie	1	2	3	4	5	6
Ondersteuning van laptop	Vast platform	scharnierend platform	platform met gelede arm			
ondersteunen van lampen:	gelede arm	vaste verbinding	katrol	telescopisch		
Lamp positioneren	gelede arm	schuifend	Scharnierend			
ondersteunen van camera:	gelede arm	vaste verbinding	katrol	telescopisch		
Draaiplatform positioneren	gelede arm	scharnierend				
afsherming licht:	Zeildoek	plaat				
verbinding afsherming licht:	opklikbaar	Haken	Bout verbinding			
vrijheidsgraden scanopstelling:	gelede arm	tandheugel	Cilinder			
Scanopstelling verplaatsing in hoogte:	Katrol systeem	Tandheugel	Cilinder			
Scanopstelling verplaatsing in breedte:	tandheugel	Cilinder	Met de hand			
mobiliteit:	wiel	rupsband				
demontabiliteit wielen:	Bout verbinding	klik verbinding				
demontabiliteit frame:	Bout verbinding	klik verbinding				
demontabiliteit scanopstelling:	Bout verbinding	klik verbinding	sterknop			

Figuur 15 Morfologisch overzicht

Voor het morfologisch overzicht hebben we de functies uit de functieboom toegepast en onderverdeeld aan de Y-as en voor elke functie hebben we minimaal 2 oplossingen toegepast.

Hierna hebben we de thema's opgesteld en voor elk thema een oplossing gekozen per functie. De thema's zijn als volgt:

1. **Haalbaarheid ontwerp.** Dit is gebaseerd op de inschatting van haalbare oplossingen.
2. **Snelheid.** Bij snelheid letten we op de montage snelheid van het ontwerp, ofwel welke oplossingen vergen het minste tijd om in elkaar te zetten en mee te werken in het werkveld.
3. **Gebruiksvriendelijkheid.** Hiervoor zijn de oplossingen gekozen die het opereren van het ontwerp zo ideaal mogelijk maken.

3.4.3 Pugh Matrix

Criteria	Gewicht	Referentieconcept	Haalbaarheid	Snelheid	Gebruiksvriendelij
Gewicht	2	0	-1	-2	-1
Stabiliteit	5	0	2	0	1
Montagegemak	4	0	1	2	1
Gebruiksvriendelijkheid	3	0	1	1	2
Snelheid scannen	5	0	1	1	1
Haalbaarheid	3	0	2	0	1
Totaal			6	2	5
Criteria gewicht			26	12	21

Figuur 16 Pugh matrix

De keuzes zijn vervolgens onderverdeeld in een Pugh matrix. Er zijn een aantal criteria opgesteld en deze hebben een bepaald gewicht gebaseerd op de prioriteiten van de opdrachtgever.
De referentie is hierbij de al bestaande opstelling en wordt gezien als de nulmeting, aan de hand van de nulmeting krijgen de concepten bepaalde scores.

Uit deze Pugh matrix blijkt dat het concept haalbaarheid de meeste punten scoort dit betekent dat dit concept verder uitgewerkt gaat worden in dit project.

4. Ontwerpfase

De opdrachtgever heeft aangeduid dat hij graag 2 verschillende concepten uitgewerkt wilt hebben rond de thema's van het morfologisch overzicht/Pugh-matrix. De keuze is gevallen om naast een concept te ontwikkelen voor het thema van haalbaarheid ook een concept te ontwikkelen rond het thema van snelheid.

Nadat deze concepten zijn uitgewerkt wil de opdrachtgever hierover evalueren en vergelijken welk mogelijkheden er tot beschikking zijn. Uiteindelijk worden de concepten samengesmolten tot 1 concept om verder aan te werken als eindconcept.

4.1 Conceptontwikkeling

In de conceptontwikkelingsfase is gewerkt met drie geformuleerde thema's uit het morfologisch schema: haalbaarheid, snelheid en gebruiksvriendelijkheid. Tijdens dit project bleken de thema's haalbaarheid en snelheid het meest bepalend voor een succesvolle uitvoering, vanwege de beperkte projectduur, de eisen van het lectoraat en de noodzaak om binnen de opleverdatum een functioneel prototype te realiseren.

Hieronder wordt uiteengezet hoe deze thema's zijn toegepast en welke invloed zij hadden op de conceptkeuze.

4.1.1 Concept haalbaarheid

Het thema *haalbaarheid* richt zich op de vraag of een concept binnen de beschikbare tijd, middelen en technische eisen realiseerbaar is. Hierbij zijn de volgende criteria gehanteerd:

1. **Technische maakbaarheid**
   Kan het gekozen mechanische ontwerp daadwerkelijk gemaakt worden binnen de productiefaciliteiten die beschikbaar zijn kijk naar 3D-printen, laswerk, aluminiumprofielen en standaard hardware.

2. **Complexiteit van onderdelen**
   Hoeveel unieke onderdelen zijn er nodig? Kunnen bestaande componenten worden hergebruikt of aangepast?

3. **Tijdsbesteding en bouwvolgorde**
   Past de realisatie binnen de 23 projectweken, mét voldoende tijd voor testen en bijsturen?

Bij de beoordeling van haalbaarheid viel op dat sommige concepten uit het morfologisch overzicht te complex waren om binnen de tijd te realiseren.
De haalbare concepten bleken die met:

1. Eenvoudige verstellingen op basis van standaard aluminiumprofielen

2. Minimale laskoppelingen

Dit heeft direct geleid tot het versterken van een concept dat bestaat uit:
een starre, modulaire frameconstructie, eenvoudige hoogteregeling en een minimalistisch afschermingssysteem.

4.1.2 Concept snelheid

Het thema snelheid verwijst naar twee vormen van snelheid:

A. Snelheid van montage in het veld

De kar moet binnen ≤ 25 minuten geassembleerd kunnen worden door één relevant geïnformeerd persoon.
Daarom werd geprioriteerd:

1. Minimaal aantal unieke montagemomenten
2. Lichtgewicht componenten (< 10 kg)
3. Modulaire bouw waarbij delen eenvoudig klikbaar, schuifbaar of losneembaar zijn

Concepten met complexe scharnierconstructies of veel afstelbereiken scoorden laag op dit thema.

Het haalbaarheidsscenario scoorde hier opvallend goed omdat eenvoudige, modulaire frames sneller op te bouwen zijn dan varianten met veel verstelpunten.

B. Snelheid van werken in het veld

Daarnaast moet de kar tijdens gebruik efficiënt kunnen worden voortbewogen en ingesteld.
Daarbij golden de eisen:

1. Voortbeweegkracht ≤ 200 N
2. Snelle afstelling van hoogte en kanteling

Ook hier scoorden concepten met rechtlijnige bewegingen en eenvoudige draaipunten beter dan complexere concepten.

4.1.3 Combinatie van thema's en invloed op conceptkeuze

Tijdens de Pugh-matrix analyse bleek dat het haalbaarheidsthema het meest dominante criterium was. Dit thema leverde het stabielste en meest reproduceerbaarste concept op.
Het snelheidsthema fungeerde als optimalisatiefactor binnen de haalbare opties.

Daarom is het winnende concept gebaseerd op:

1. Een modulair frame met beperkte scharnierpunten.
2. Gestandaardiseerde profielen.
3. Snelle verbindingsmechanismen.
4. Eenvoudige lineaire verstellingen voor camera en lampen.
5. Minimale complexiteit van het afschermingssysteem.
6. Herbruikbare componenten waar mogelijk.

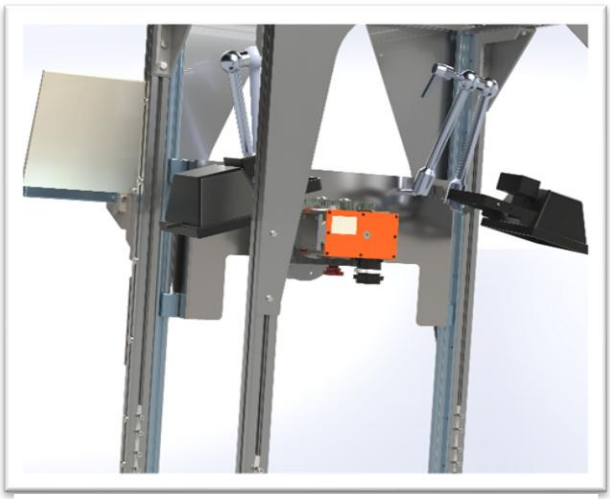
4.2 Gekozen eindconcept

Het gekozen eindontwerp is een verrijdbare scanopstelling voor het dynamisch positioneren en in hoogte verstellen van een scanopstelling voor het maken van hyperspectrale beelden van aardappelplanten. De constructie is bedoeld voor handmatig gebruik en is ontworpen om regelmatig te worden opgebouwd en afgebroken.



Figuur 17render kar

De kar bestaat uit een aluminium frame opgebouwd uit ISB-profielen, verbonden met boutverbindingen. Aan de voorzijde is de kar voorzien van twee bokwielen en aan de achterzijde van twee zwenkwielen met rem. Binnen het frame is een roestvaststalen montageplaat aangebracht waarop de scanopstelling is bevestigd.

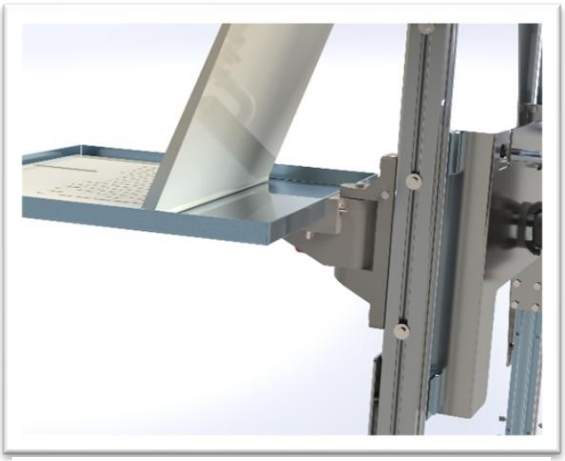


Figuur 18 render closeup scanopstelling

Deze plaat is lineair geleid via lager-blokken op ondersteunde ronde geleiderails, waardoor verticale verplaatsing mogelijk is. De plaat is zodanig ontworpen dat deze buiten het zichtveld van de camera blijft. De verlichting is met gelede armen aan het frame gemonteerd.

Tussen de rotary stage en de montageplaat is een nivelleringsbasis geplaatst, die een verstelling tot ±15 graden in alle richtingen mogelijk maakt. De montageplaat met scanopstelling wordt in hoogte versteld met behulp van een dubbelwerkende lier, zodat planten van verschillende hoogtes kunnen worden gescand.

Aan het frame is ook een scharnierend laptopplatform bevestigd. Dit platform is met bouten en T-sleufmoeren aan het frame gemonteerd, uitgevoerd in gezet aluminium. Het scharnier van het platform is gemaakt uit PLA.



Figuur 19 render closeup laptopstand

4.3 Ontwerpverantwoording

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste ontwerpkeuzes van het eindconcept onderbouwd. Per onderdeel wordt toegelicht waarom specifieke constructieve oplossingen, componenten en materialen zijn toegepast, en hoe deze keuzes bijdragen aan het voldoen aan de gestelde eisen en randvoorwaarden. De verantwoording is gebaseerd op functionele overwegingen, maakbaarheid, betrouwbaarheid en gebruik in de beoogde toepassing.

Frame



Figuur 20 kaal frame

Het frame van de verrijdbare scanopstelling is opgebouwd uit aluminium ISB-profielen. Deze profielen bieden grote vrijheid in montagemogelijkheden, hebben een hoge stijfheid bij lage massa en zijn corrosiebestendig (corrosieklasse C2) zoals gespecificeerd in het PVE.

De bovenzijde van het frame bestaat uit vijf subassemblages. Deze opdeling is gekozen om de montagesnelheid te verhogen en transport in een personenauto mogelijk te maken. De maximale afmetingen per subassemblage zijn 105 × 101 × 56 cm. Elke subassemblage kan eenmalig apart worden opgebouwd en vervolgens snel aan de rest van het frame worden gekoppeld.



Figuur 21 boven frame

Voor- en zij-subassemblages worden verbonden door twee tussenstukken van aluminium ISB-profielen, voorzien van heavy-duty 90° profielverbinders om de hoekbelasting door de lengte van het bovendeel op te vangen. Door deze robuuste hoekverbindingen blijft het frame stabiel tijdens dynamische bewegingen over oneffen terrein.

Het frame is als volgt opgedeeld, de voor en zij subassemblages worden met elkaar verbonden door de twee tussen stukken zoals te zien op figuur 22.



Figuur 22 exploded view boven frame

Voorzijde

De voorste subassemblage, zoals te zien in figuur 23 heeft ook een platform om een laptop te ondersteunen. Deze zit op de voorste omdat de de scanopstelling daar ook zit, zo kan de operator de scanopstelling afstellen en tegelijk het beeld ervan zien op de laptop. De aluminium ISB-profielen staan in een ondersteboven U-vorm om de aardappelplanten in het veld niet te raken en om geleiding te bieden aan de scanopstelling.



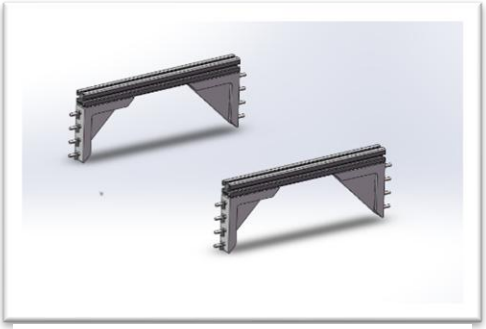
Figuur 23 Voorste subassemblage

Aan de verticale profielen zit een ondersteunde ronde lineaire geleide rail van aluminium. Deze manier van ondersteunen wordt onder het kopje "*Geleiding van de scanopstelling"* verder toegelicht. De rail zit door middel van bouten aan het profiel gemonteerd. De ISB-profielen zijn aan elkaar verbonden door twee aluminium platen die met een bout- en T-sleuf verbinding aan elkaar zijn gemonteerd. De platen dienen ook als ondersteuning voor het frame, omdat de kar door een aardappelveld moet rijden kan het frame aan de onderzijde niet ondersteund worden, vandaar het u profiel. de platen helpen om het frame te verstijven.

De platen bieden ruimte voor montage van het laptopplatform aan beide kanten. Aan de bovenzijde van zit een haak gemonteerd door middel van een bout en t-sleuf, de haak biedt een verankering voor de lier die eronder zit.

Tussenstukken

De tussenstukken bestaan ook uit aluminium ISB-profielen en hebben aan beide kanten een aluminium heavy duty 90° profiel verbinder. De functie van de tussenstukken is om de voor- en achterzijde van het bovenste deel van het frame met elkaar te verbinden. Deze verbinder is gekozen omdat er door de lengte van het frame veel druk komt op de verbinding in de hoek.



Figuur 24 tussenstukken

Achterzijde

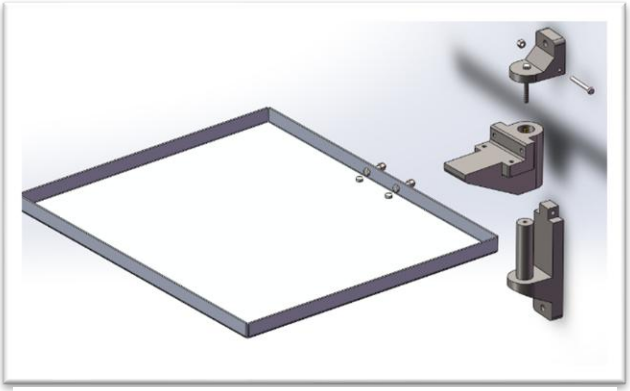
De achterzijde is vergelijkbaar met de voorzijde, maar zonder railing, haak en extra verbindingsplaten voor het laptopplatform. Dezelfde constructieve keuzes zijn toegepast voor stijfheid en stabiliteit.



Figuur 25 achterzijde

Het laptop platform

Het laptopplatform is scharnierend bevestigd aan het frame, zodat het kan worden gedraaid om verblinding door zonlicht te voorkomen. Het platform is gemaakt van gezet aluminium voor stijfheid en anti-slip, terwijl het scharnier van PLA (3D-geprint) is vervaardigd om ontwerpvrijheid te behouden zonder complexe constructie. Het scharnier is bevestigd met een bout- en T-sleufverbinding, zodat de hoogte van het platform kan worden aangepast.

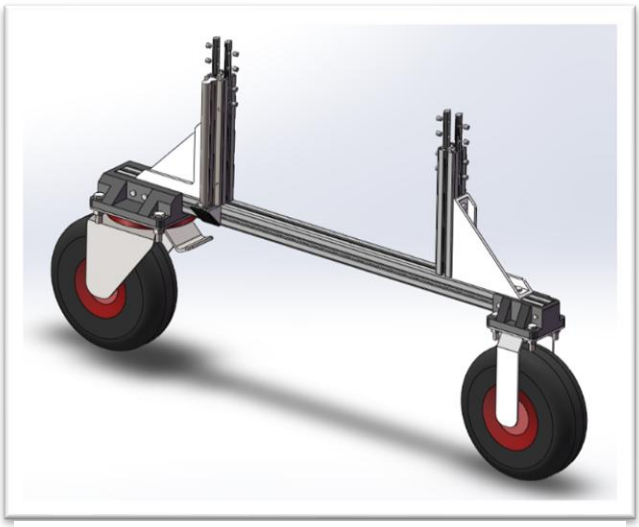


Figuur 26 laptopstand exploded view

De onderzijde

De onderzijde van de constructie verbindt en verstevigt de bovenzijde van het frame. Aan de achterzijde zijn zwenkwielen toegepast om de kar bestuurbaar te maken, terwijl aan de voorzijde bokwielen zijn geplaatst voor richtingsstabiliteit tijdens het verplaatsen.

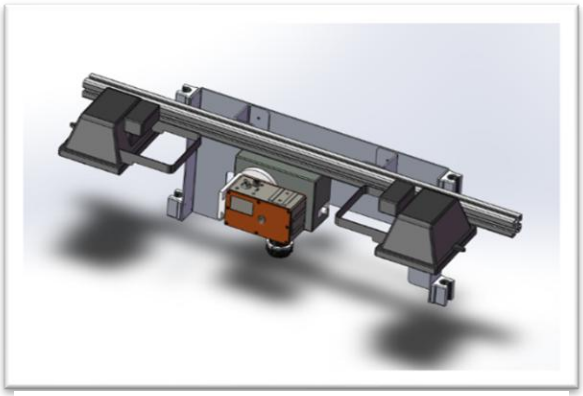
De wielen zijn met bouten bevestigd aan een 3D-geprint tussenstuk, dat op vervolgens met een bout- en T-sleufverbinding aan het frame is gemonteerd. Deze opzet maakt het mogelijk om de wielen snel te monteren en demonteren. De wielen zijn demonteerbaar om te voldoen aan de maximale afmetingseisen zoals vastgelegd in het PVE.



Figuur 27 onderkant kar

Er is gekozen voor rubberen luchtbanden, omdat de kar wordt gebruikt op losse en oneffen ondergrond. Dit verbetert de rolweerstand en het rijcomfort en vermindert de belasting op het frame en de scanopstelling.

Verbinding van de lampen aan het frame

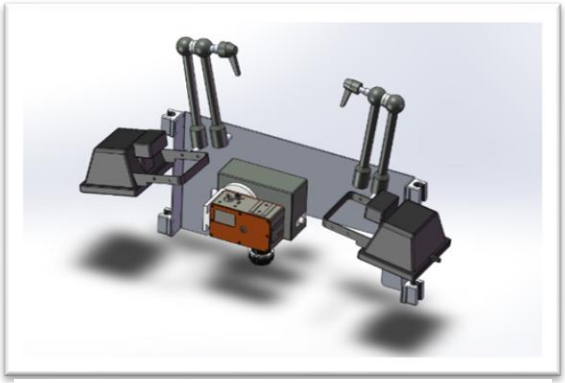


Figuur 28 lampframe concept 1

Voor het verbinden van de lampen aan het frame zijn twee concepten opgesteld. Het eerste concept is afkomstig uit het ontwerp dat is gebaseerd op snelheid, het tweede concept is gebaseerd op haalbaarheid.

Het eerste concept, zoals weergegeven in figuur 278, maakt gebruik van een aluminium profiel. De lampen worden hierbij met behulp van een klem vastgehouden, waarbij de klem in het aluminium profiel wordt geplaatst. Deze klem is eenvoudig verschuifbaar en kan snel worden vastgezet door één bout of hendel aan te draaien. In dit systeem hebben de lampen wel alle vrijheidsgraden zoals gespecificeerd in het PvE.

Het voordeel van dit concept is dat zowel de montage als het verstellen van de lampen snel kan worden uitgevoerd. Het nadeel is dat de instelvrijheid van de lampen beperkt is.

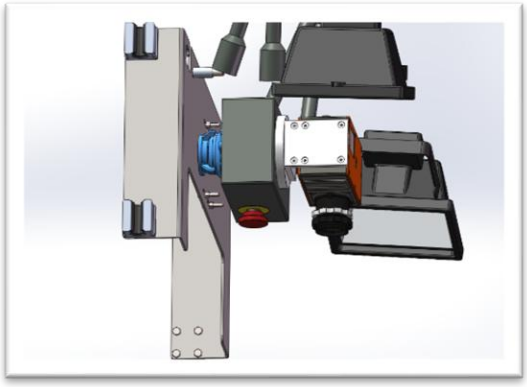


Figuur 29 lampframe einde concept

Het tweede concept, gebaseerd op haalbaarheid, maakt gebruik van gelede armen om de lampen aan het frame te koppelen. Hierbij worden dezelfde gelede armen toegepast die eerder in het ontwerp zijn gebruikt. De gelede armen zijn aan beide zijden voorzien van een M10-aansluiting. Aan de ene zijde worden de armen aan het frame vast gebout en aan de andere zijde zit een aansluiting op de lampen. Het voordeel van dit concept is de grote vrijheid waarmee de lampen gepositioneerd kunnen worden, met het feit dat de gelede armen al beschikbaar zijn. Het nadeel is dat de gelede armen bij gebruik telkens gemonteerd en gedemonteerd moeten worden en dat de verstelsnelheid langzamer is. Uiteindelijk is ervoor gekozen om verder te gaan met het concept met gelede armen. De reden hiervoor is dat nog niet volledig zeker is hoe de planten optimaal belicht moeten worden. Onjuiste belichting van de planten vormt een groter risico dan het voordeel van een snellere montage.

Verbinding van de camera en rotary stage scanner aan het frame

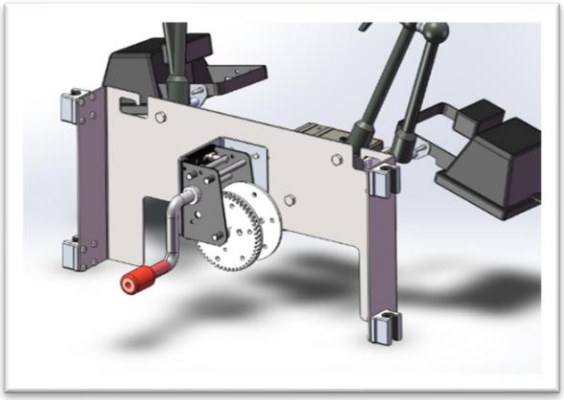
Tussen de montageplaat en de rotary stage scanner is, zoals weergegeven in figuur X (blauw gemarkeerd), een nivelleringsbasis geplaatst. Deze basis heeft vrijheidsgraden van ±15° en een draagvermogen van 15 kg. De keuze voor deze component is gemaakt om oneffenheden in de ondergrond en kleine uitlijnfouten in de constructie te compenseren. Hierdoor kan de lens van de camera altijd parallel aan het scanoppervlak worden ingesteld, wat essentieel is voor de meetnauwkeurigheid van de hyperspectrale opnamen.



Figuur 30 nivelleringsbasis

Hoogteverstelling van het frame

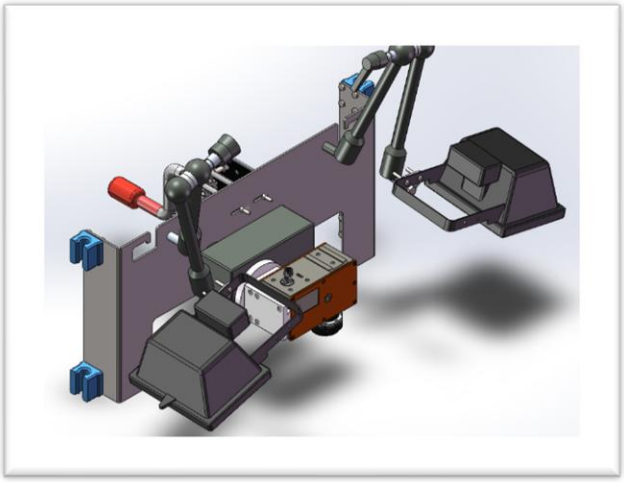
De hoogteverstelling van de scanopstelling wordt gerealiseerd met een dubbelwerkende lier die aan de achterzijde van de montageplaat is bevestigd en aan de bovenzijde van het frame is verankerd. Voor een lier is gekozen omdat hiermee zowel omhoog als omlaag verstellen gecontroleerd en eenvoudig mogelijk is, zonder complexe aandrijving. Daarnaast wordt de kracht verticaal en centraal op de montageplaat aangebracht. Hierdoor worden excentrische belastingen en mogelijke doorbuiging van de plaat en de scanopstelling voorkomen, wat de structurele betrouwbaarheid en uitlijning ten goede komt.



Figuur 31 lier

Geleiding van het frame

Voor de geleiding van de montageplaat is gekozen voor vier lineaire kogellagerblokken, zoals weergegeven in figuur X (blauw gemarkeerd), die lopen op ondersteunde ronde lineaire geleiderails geïntegreerd in het frame. De keuze voor een ondersteunde rail is gemaakt omdat over een relatief grote lengte wordt verplaatst en de ondersteuning doorbuiging van de rail voorkomt. Daarnaast is bewust gekozen voor ronde geleidingen in plaats van profielgeleidingen. Door het gewicht van de scanopstelling ontstaat een buigend moment op de montageplaat. De combinatie van ronde rails en lineaire kogellagers kan dit moment goed opnemen, terwijl de wrijving laag blijft. Dit zorgt voor een soepele en stabiele verticale verplaatsing van de scanopstelling.



Figuur 32 geleidersklemmen

4.4 Materiaal analyse

Voor de constructie van de mobiele hyperspectrale scanopstelling is gekozen om de hoofddraagstructuur te vervaardigen uit aluminiumprofielen. In dit hoofdstuk worden deze materiaalkeuze en de maakbaarheidsaspecten onderbouwd. Er wordt ook een vergelijking gemaakt met het alternatieve materiaal S235 constructiestaal, dat veel voorkomt in frameconstructies maar voor dit project minder geschikt bleek.

4.4.1 Motivatie voor aluminium als hoofdmateriaal

1. Laag gewicht

Een van de belangrijkste eisen binnen het project is dat de kar:

- Door één persoon verplaatst moet kunnen worden met een duwkracht ≤ 200 N,
- Moet bestaan uit losse onderdelen < 10 kg,
- Snel monteer baar moet zijn (≤ 25 min).

Aluminium heeft een dichtheid van:

- Aluminium: 2700 kg/m^3
- S235-staal: 7850 kg/m^3

Dit betekent dat staal ongeveer 2,9× zo zwaar is als aluminium.

Voor een frame van ± 1 meter profiel zou dat betekenen:

Tabel 6 materiaal gewicht

Materiaal	Gewicht frame (indicatie)
Aluminium 30×30 profiel	~2.5kg
Staal 30×30 koker	~7.1kg

Een stalen frame zou direct meerdere projecteisen schenden te zwaar, slecht tilbaar en een hogere benodigde duwkracht. Aluminium voldoet beter aan de ergonomische en gebruikseisen.

2. Corrosiebestendigheid

Het systeem wordt gebruikt:

1. In vochtige buitentoepassingen
2. In landbouwgrond
3. Onder wisselende weersomstandigheden

Voordelen aluminium:

- Vormt een natuurlijke oxidelaag (Al_2O_3) die roestvorming voorkomt

- Vereist géén coating
- Behoudt zijn uiterlijk en functie langdurig
- Geschikt voor IP-02 eisen

Nadelen staal (S235):

- Moet gecoat, gegalvaniseerd of gepoeder-coat worden
- Kans op beschadiging d.m.v. roestvorming
- Onderhoud intensiever

In buitentoepassingen is aluminium daarom veruit de betere keuze.

3. Voldoende sterkte voor de toepassing

Hoewel S235 een hogere treksterkte heeft (235 MPa versus 70–110 MPa voor aluminium 6000-serie), is dit niet nodig voor deze toepassing.

Belastingen in het project:

- Gewicht camera + rotary stage (4kg)
- Halogeenlampen (1.2kg per stuk)
- Armen (1,83 kg)
- Laptop (3 kg)
- Afschermingsmaterialen (6 kg)
- Krachten van duwen en trillingen

De constructie is voornamelijk belast door:

- Lichte buigbelastingen
- Lage torsie
- Verticale belasting < 15 kg totaal

Aluminiumprofielen bieden méér dan genoeg stijfheid en sterkte voor deze belasting, zeker in combinatie met:

- Het modulaire karkarakter
- De relatief korte overspanningen

Daarom is aluminium sterk genoeg.

4.4.2 Vergelijking aluminium vs. S235-staal

Materiaalvergelijkingstabel

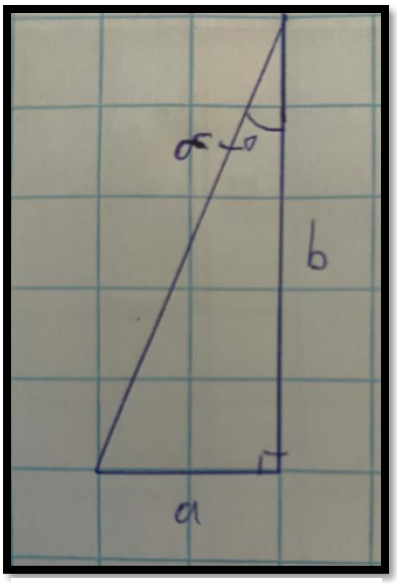
Tabel 7 materiaal vergelijking

Eigenschap	***Aluminium 6060/6061***	***S235 staal***	***Relevantie voor project***
Dichtheid	2700 kg/m^3	7850 kg/m^3	Aluminium 70% lichter essentieel voor draagbaarheid
Treksterkte	70–110 MPa	235 MPa	Staal sterker, maar sterkteoverschot niet nodig
Elasticiteitsmodulus (stijfheid)	~70 GPa	~210 GPa	Staal 3× stijver, maar door lichte belasting is aluminium voldoende
Corrosiebestendigheid	Zeer goed	Slecht d.m.v. roest	Aluminium beter in buitengebruik
Maakbaarheid	Zaagbaar, boorbaar, licht	Zwaar, soms lassen nodig	Aluminium makkelijker te bewerken zonder zware tools
Onderhoud	Nihil	Vereist coating/bescherming	Aluminium is onderhoudsarm
Montage	Eenvoudig met profielsysteem	Zwaarder dus lastiger	Montage binnen 25 min kan alleen goed met aluminium

5. Realisatiefase

5.1 Sterkte- en FEM-berekeningen

Als onderdeel van de realisatiefase zijn sterkte- en FEM-berekeningen uitgevoerd om te verifiëren of het ontwerp voldoet aan de gestelde eisen op het gebied van stijfheid en sterkte. Met deze berekeningen is gecontroleerd of de gekozen constructie en materiaalkeuzes de verwachte belastingen veilig kunnen opnemen en of ongewenste vervormingen binnen acceptabele grenzen blijven. In het PVE is vastgesteld dat de maximale vervorming 1 graad mag zijn tegenover de lengte van het onderdeel dat vervormt.



Figuur 33 referentie driehoek

Om de hoeken te controleren van de testen wordt de bovenstaande driehoek toegepast met de volgende variabelen:

- a = de lengte van de vervorming uit de FEM-simulaties
- b = de totale lengte vanaf het bovenvlak/lijn van het model tot de aanbrengingspunt van de krachten
- α = de berekende hoek

5.1.1Test-omschrijving Scanplaat(W4-25-3-20011)

Deze test wordt toegepast om te controleren of de getekende plaat genoeg ondersteuning biedt om de scanopstelling te kunnen dragen en om te controleren of deze niet te veel vervormd.

De plaat is verbonden met 2 gelede armen die elke een hallogeen lamp hebben bevestigd aan de uiteinden. Verder is de camera en rotarystage bevestigd aan de plaat in lijn met elkaar en de lier is bevestigd aan het achter oppervlak van de plaat.

Verder wordt er een veiligheidsfactor toegepast tussen de 1.1 en 1.5.

Vervolgens zijn dit de stappen die zijn ondernomen:

- Er wordt een VLS toegepast om de krachten te bepalen die van toepassing zijn.
- Krachten worden in een FEM-simulatie aangebracht en berekend.
- Controle op gebied van spanning en vervorming uit FEM-resultaat.
- Conclusie trekken.

5.1.2 VLS geheel

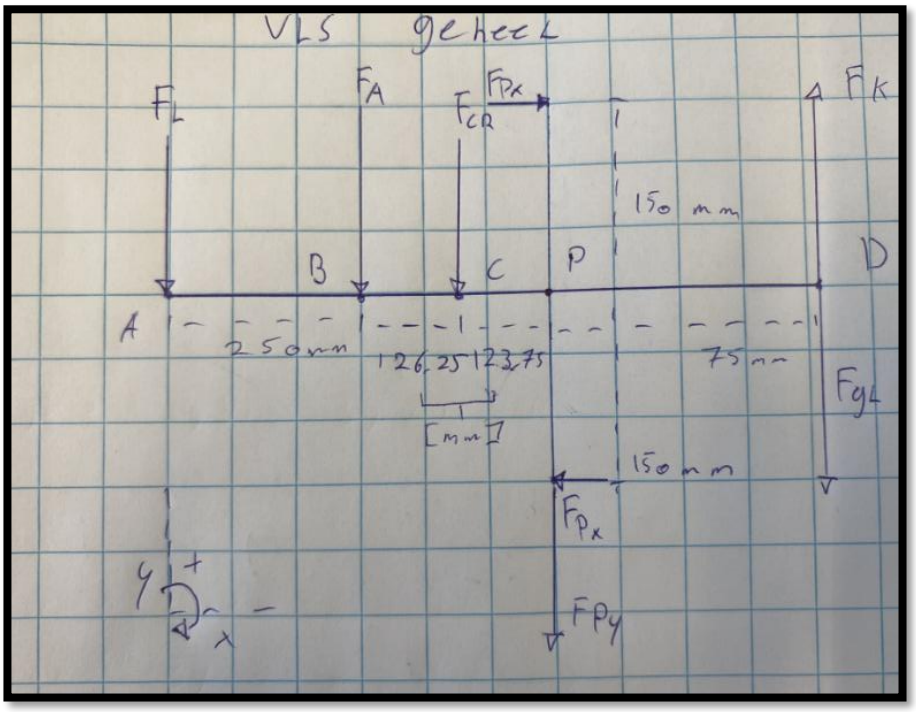
Om te bepalen welke krachten er overgaan naar de klemmen van de plaat is er een VLS getekend van het geheel. Het VLS betreft de hele opstelling inclusief de kabelkracht van de lier.

Gegevens:

- Massa van de plaat = 1,3[kg]
- Massa van de lier + verbindingsplaat = 4[kg]

- Afstand lier tot plaat = 75[mm]
- Afstand klemmen tot midden plaat = 150[mm]
- Afstand lamp tot plaat = 500[mm]
- Afstand zwaartepunt arm = 250[mm]
- Afstand camera en rotarystage = 123,75[mm]
- Kracht lamp (FL)= 2*11,77[N]
- Kracht arm (FA)= 2*17,95[N]
- Kracht camera en rotarystage(FCR)= 39,24[N]

De afstanden zijn ten opzichte van punt P het midden punt van de plaat.



Figuur 34 VLS-geheel

De krachten voor de lier worden verticaal aangenomen, de krachten rond de klemmen van de plaat zijn horizontaal aangenomen voor de momenten tegen te werken die op de plaat werken. Een aantal krachten zijn dus nog onbekend en moeten worden opgelost deze krachten zijn:

FPy = kracht van de massa van de plaat

FPx = reactiekrachten van de klemmen op het moment van de plaat

FK= Kabelkracht

Fgl = kracht van de massa van de lier

FL = kracht van de lamp

FA = kracht van de arm

Fcr = de kracht van de camera en rotarystage

Om de krachten om te rekenen van massa naar newton wordt de volgende formule gebruikt:

$$F = m * g$$

Waarbij g gelijk is aan de valversnelling van 9,81 [m/s], vervolgens passen we dit toe voor FL, FA, Fcr, FPy, Fgl:

$$FL = 1{,}2 * 9{,}81 = 11{,}77[N]$$

$$FA = 1{,}83 * 9{,}81 = 17{,}95[N]$$

$$Fcr = 4 * 9{,}81 = 39{,}24[N]$$

$$FPy = 1{,}3 * 9{,}81 = 12{,}75[N]$$

$$Fgl = 4 * 9{,}81 = 39{,}24[N]$$

Vervolgens wordt deze kracht toegepast in het VLS en de volgende kernbetrekkingen toegepast:

$$\sum Fy = 0$$

$$\sum Fx = 0$$

$$\sum Mp = 0$$

Met deze kernbetrekkingen lossen we op voor FK en FPx:

$$\sum Fy = 0: 2 * 11{,}77 - 2 * 17{,}95 - 39{,}24 - 12{,}75 - 39{,}24 + FK = 0$$

$$FK = 150{,}67[N]$$

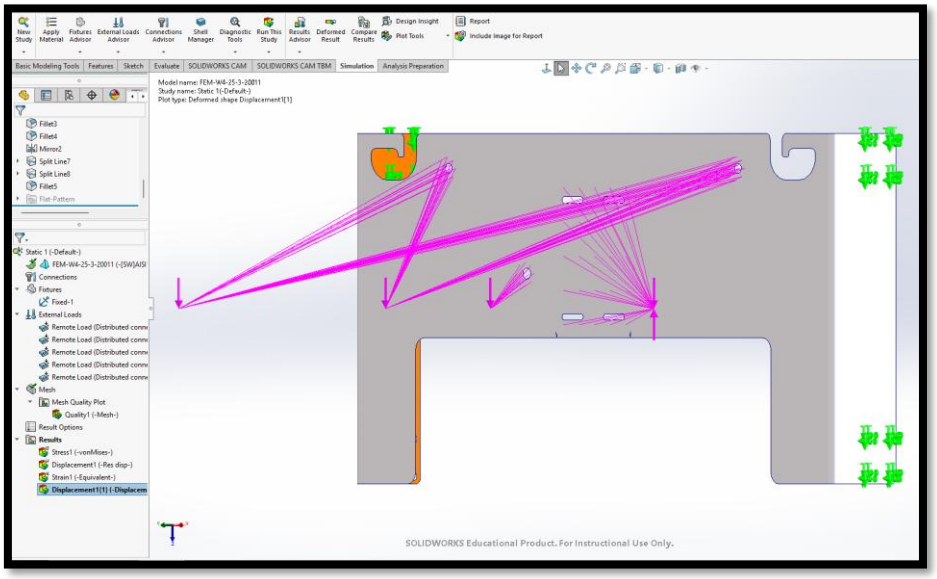
$$\sum Mp = 0: 2 * FPx * 0{,}15 - 2 * 11{,}77 * 0{,}5 - 2 * 17{,}95 * 0{,}25 - 39{,}24 * 0{,}123 - 150{,}67 * 0{,}075 + 39{,}24 * 0{,}075 = 0$$

$$FPx = 113{,}09[N]$$

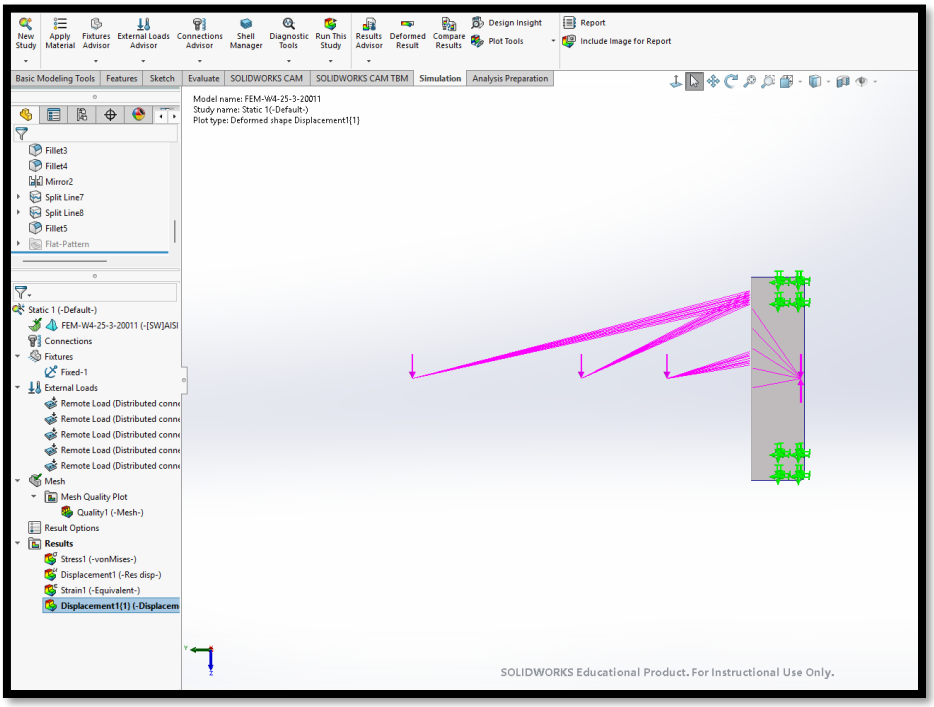
Nu alle krachten bepaald zijn kan de FEM-simulatie worden toegepast.

5.1.3 FEM simulatie

Nu we alle gegevens hebben verzameld kunnen we deze toepassen in Solidworks FEM simulatie.



Figuur 35 FEM-opzet 1

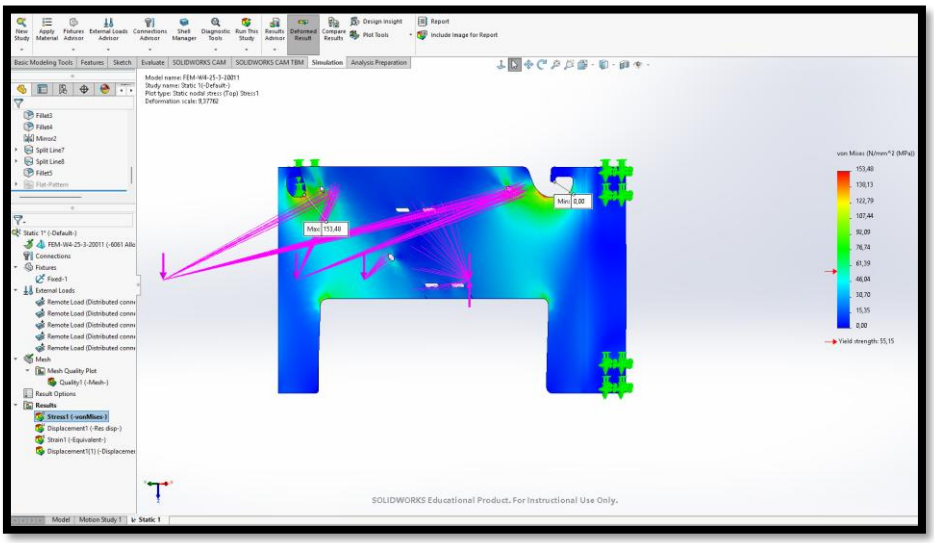


Figuur 36 FEM-opzet 2

Door fixtures toe te passen in de boutgaten simuleren we de inklemming van de plaat, verder is ervoor gekozen om remote loads aan te brengen in de simulatie. De remote loads gebruiken dezelfde afstanden en krachten als gebruikt in het VLS van het geheel. Remote loads zorgen ervoor dat de momenten van de krachten worden meegenomen in de simulatie. Er is met een split line op

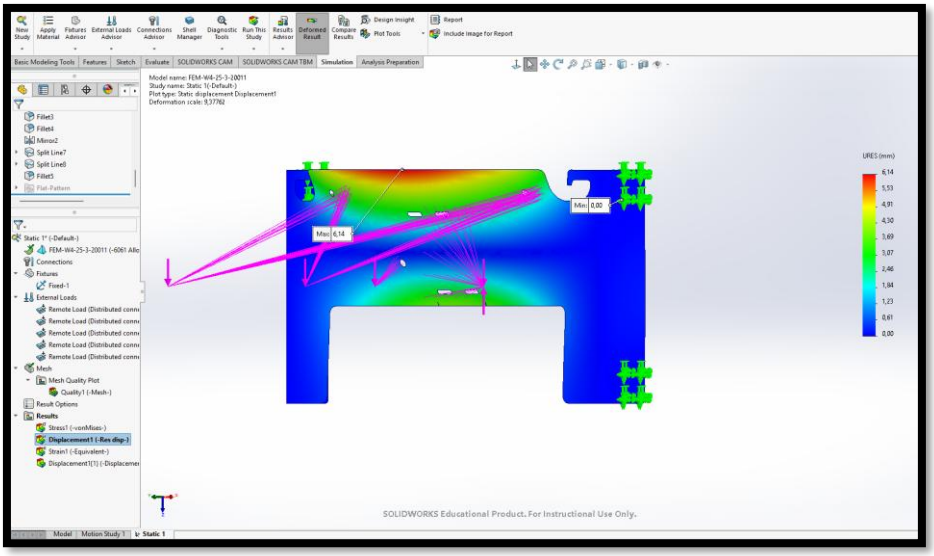
het de plaat steeds het gebied gemaakt waarop het moment aangrijpt om een realistischer beeld van de spanningsverdeling in de plaat te krijgen

Simulatie 6061 aluminium alloy



Figuur 37 FEM-spanning-ALU

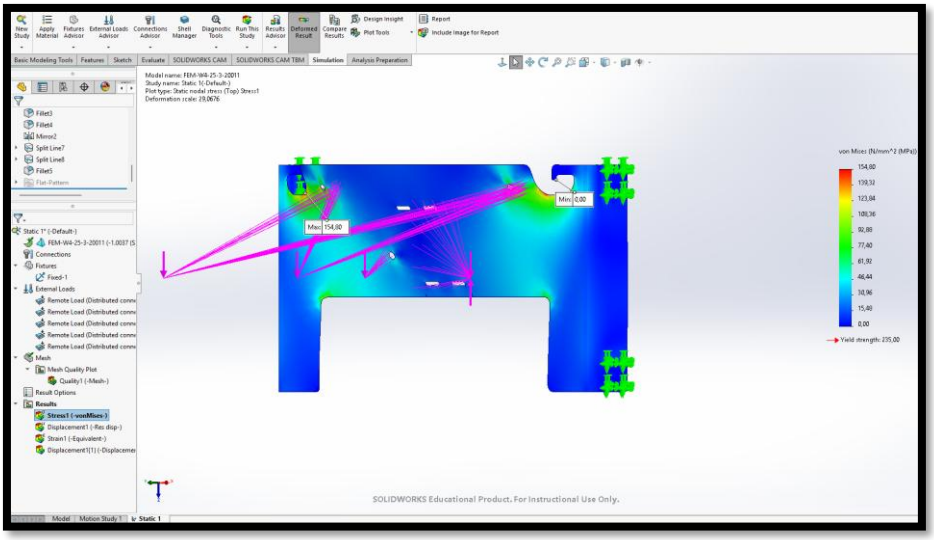
Resultaten van de spanning simulatie geeft aan dat het materiaal onder de spanning veel zal bezwijken, de maximale optredende spanning is 153,48[MPa] en valt ruim boven de maximale toelaatbare spanning van 55,15[MPa] dit materiaal is dus niet geschikt voor deze spanningen.



Figuur 38 FEM-vervorming-ALU

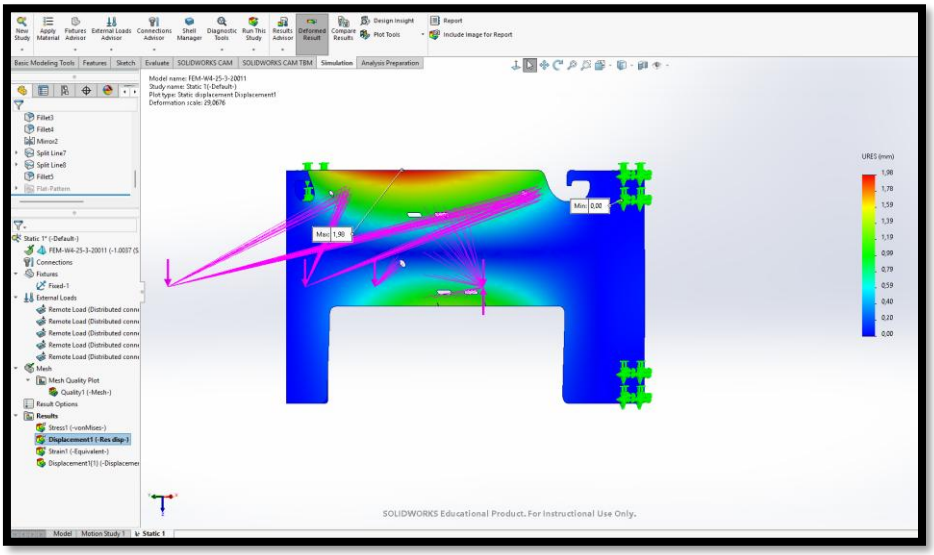
De resultaten van de FEM-simulatie ten opzichte van vervorming geeft ons een ander beeld. De maximale vervorming is hier 6,14[mm] en geeft ons een hoek vervorming van 2,34 graden dit is over de gestelde eis van ± 1 graad. Hierdoor zal dit materiaal ook niet voldoen voor deze plaat.

Simulatie S235 staal



Figuur 39 FEM-spanning-S235

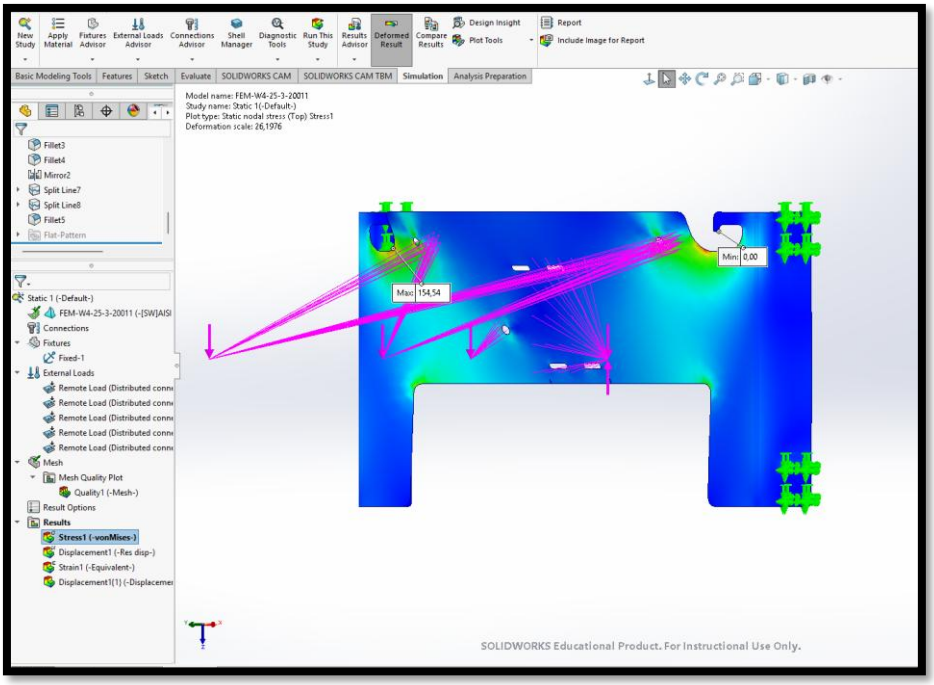
De spanningen voor S235 zijn makkelijk te dragen ten opzichte van het aluminium met een maximale spanning van 154,80[MPa] en de 235[MPa] maximale toelaatbare spanning is dit geen probleem, de veiligheidsfactor bedraagt 1.51.



Figuur 40 FEM-vervorming-S235

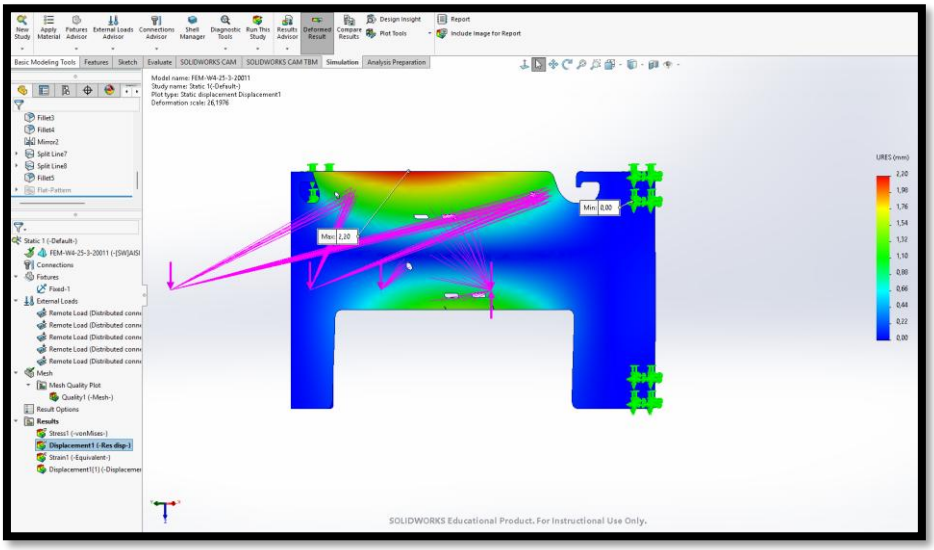
Vervorming van het materiaal is enorm kleiner geworden in vergelijking met aluminium. De maximale vervorming is bij S235 namelijk 1,98[mm] dit geeft ons een hoek van 0,75 graden waardoor dit materiaal voldoet aan de eisen.

Simulatie AISI 304 RVS



Figuur 41 FEM-spanning-AISI

Evenals het aluminium is de spanning geen probleem met een maximale spanning van 154,54[MPa] ten opzichte van de maximale toelaatbare spanning van 206,81[MPa] dit geeft een veiligheidsfactor van 1,34.



Figuur 42 FEM-vervorming-AISI

De vervorming bij AISI 304 is net wat meer dan bij S235 namelijk 2,20[mm] tegenover 1,35[mm]. Maar voor de speling van ± 1 graad valt dit daar nog onder met een hoek van 0,84 graden.

5.1.4 Conclusie scanplaat

De scanplaat kan niet worden gemaakt van aluminium het materiaal is te zwak om de spanningen en de vervorming te kunnen dragen.

De scanplaat kan gebruikt worden met de materialen S235 of AISI 304 beide materialen voldoen aan de eisen. Het verschil tussen beide materialen is dat S235 niet corrosie bestendig is en daarom kiezen we ervoor om deze plaat te maken van AISI 304. Dit materiaal heeft soortgelijke eigenschappen als S235, maar is wel corrosie bestendig.

5.2 Test omschrijving frame

De kar wordt toegepast in een vrij ongunstig oppervlak, dus we testen het frame op de vervorming en spanningen die kunnen worden toegepast door de ongunstige ondervloer. Er wordt gecontroleerd aan de hand van de eis dat de hoek van de vervorming maximaal 1 graad mag zijn. De kracht die wordt toegepast is aangenomen van 100[N] aan beide poten.

De test wordt dus uitgevoerd ter controle van de vervorming en sterkte van het frame. Verder wordt er een veiligheidsfactor toegepast tussen de 1.1 en 1.5.

Vervolgens zijn dit de stappen die zijn ondernomen:

- Er wordt een handberekening toegepast voor de vervorming onder de 100[N]
- Krachten worden in een FEM-simulatie aangebracht en berekend.
- Controle op gebied van spanning en vervorming uit FEM-resultaat.
- Conclusie trekken.

5.2.1 Handberekening

Voor het berekenen van de vervorming van de verticale balk wordt er aangenomen dat dit onder een inklemming bevindt met een los uiteinde. Dit houdt in dat de volgende formule toegepast kan worden:

$$\delta = \frac{F * L^3}{3 * E * I}$$

Het materiaal dat is toegepast voor deze berekeningen is aluminium alloy 6061.

Gegevens:

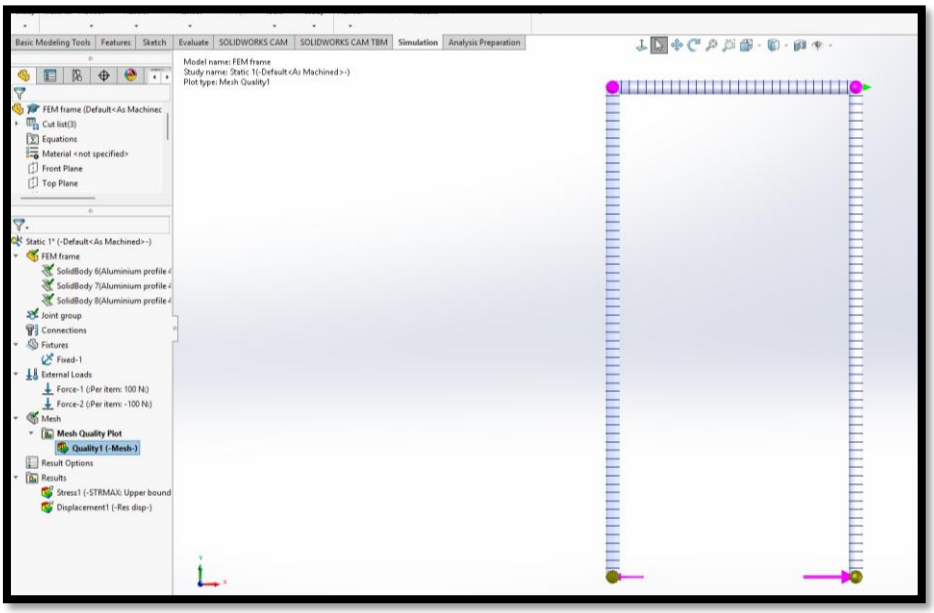
5 F = 100[N]
6 L = 1457[mm]
7 E = 69*10^3 [MPa]
8 I = 5,6*10^5 [MPa]

Nu de gegevens bepaald zijn kunnen we ze toepassen in de formule als volgt en wordt de vervorming(δ) berekend:

$$\delta = \frac{100 * 1457^3}{3 * 69 * 10^3 * 5{,}6 * 10^5} = 2{,}67[mm]$$

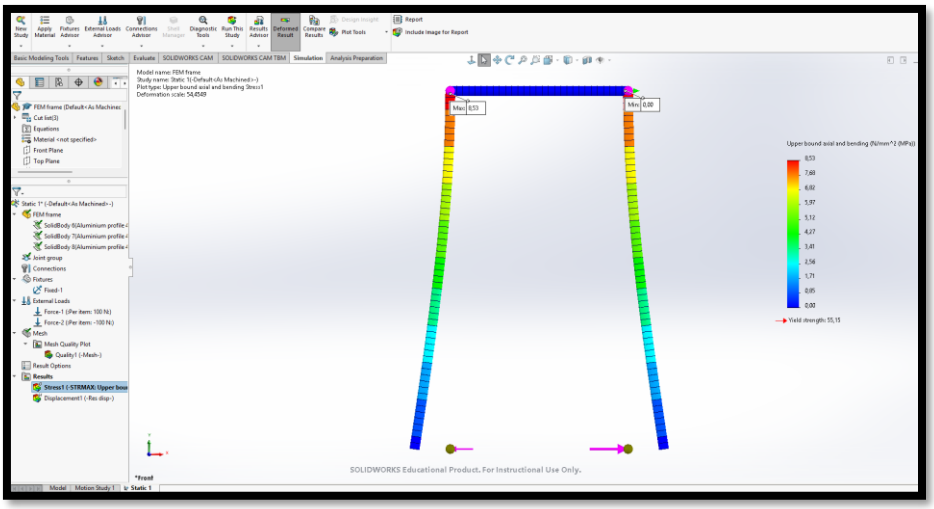
5.2.2 FEM-simulatie frame validatie

Met de handberekening is bepaald dat de vervorming 2,67[mm] zal zijn, hier wordt rekening mee gehouden in de simulatie als de waarde gelijk of in dicht in de buurt zit van de handberekening wordt dit gezien als een valide simulatie.



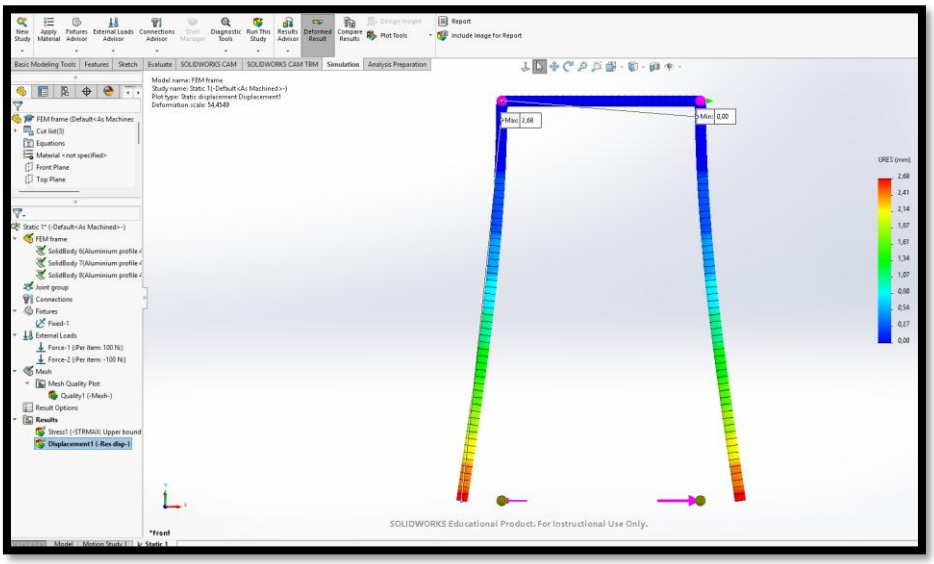
Figuur 43 FEM validatie frame opzet

De balken zijn aangenomen als beams voor de simulatie, verder worden beide verticale beams ingeklemd bij de roze joints. De beams hebben een vaste verbinding met elkaar de onderste uiteinden zijn los, bij de joints van deze uiteinden worden de krachten van 100[N] aangebracht met de richtingen naar buiten. Verder zijn de beams gemaakt van aluminium alloy 6061.



Figuur 44 FEM validatie spanning frame

De spanning simulatie van het frame weergeeft een maximale spanning van 8,53 [MPa] dit is ruim onder de toelaatbare spanning van aluminium namelijk 55,15[MPa]. Voor de spanning voldoet het frame. De veiligheidsfactor is 6,39 ruim boven de gestelde 1,1-1,5 range.

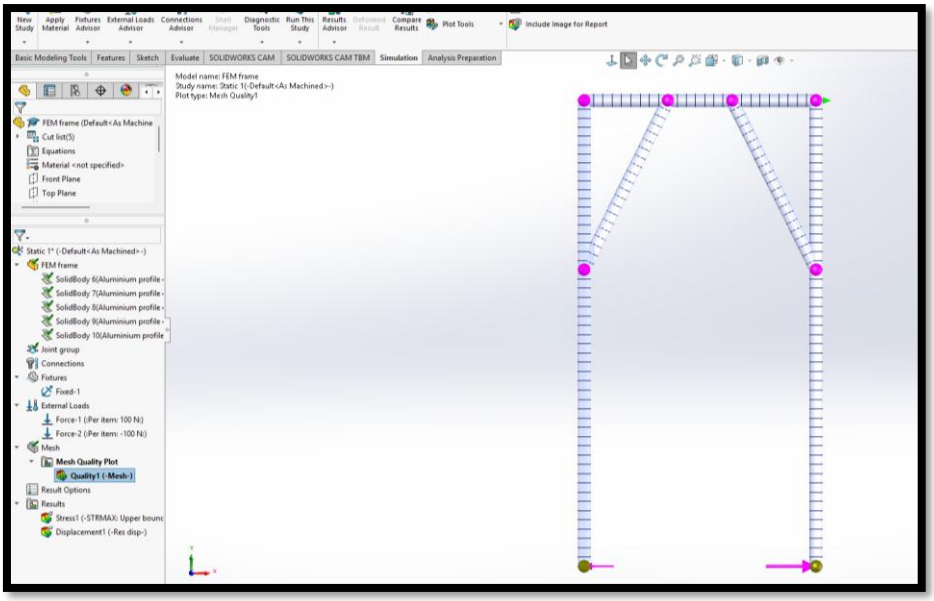


Figuur 45 FEM validatie vervorming frame

De vervorming simulatie van het frame geeft een maximale doorbuiging van 2,68[mm] dit komt in de buurt van de handberekening en dus voldoet deze simulatie, verder controle op de hoek van deze doorbuiging moet onder 1 graad blijven. De vervorming van 2,68[mm] ten opzichte van een lengte van 1457[mm] geeft een hoek van 0,11 graden dit zit ruim onder de 1 graad en zal dus voldoen aan de eisen. Met deze simulatie is gevalideerd dat de FEM-simulatie betrouwbaar zal zijn.

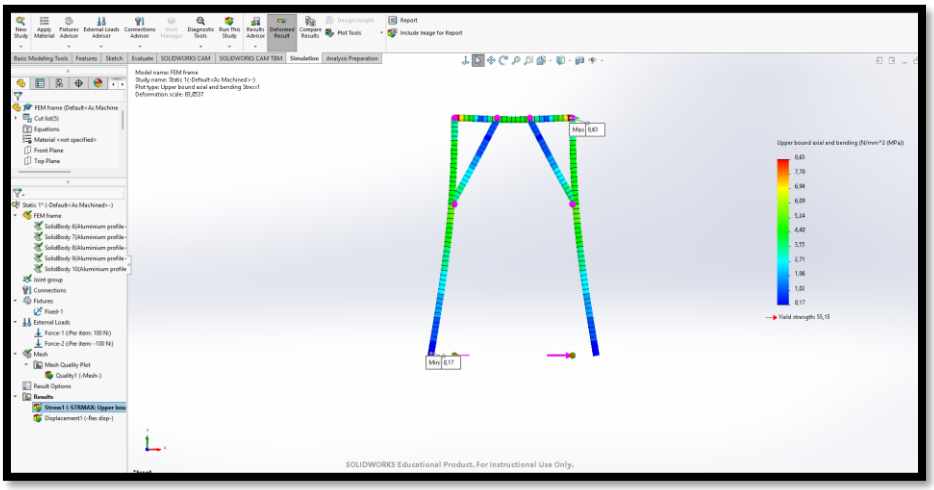
5.2.3 FEM-daadwekelijke situatie

Het frame heeft een extra versterking en verbinding op een hoogte van 902[mm] vanaf het laagste punt, dit veranderd de spanningen en doorbuigingen die worden toegepast er wordt dus een nieuwe FEM-simulatie uitgevoerd.



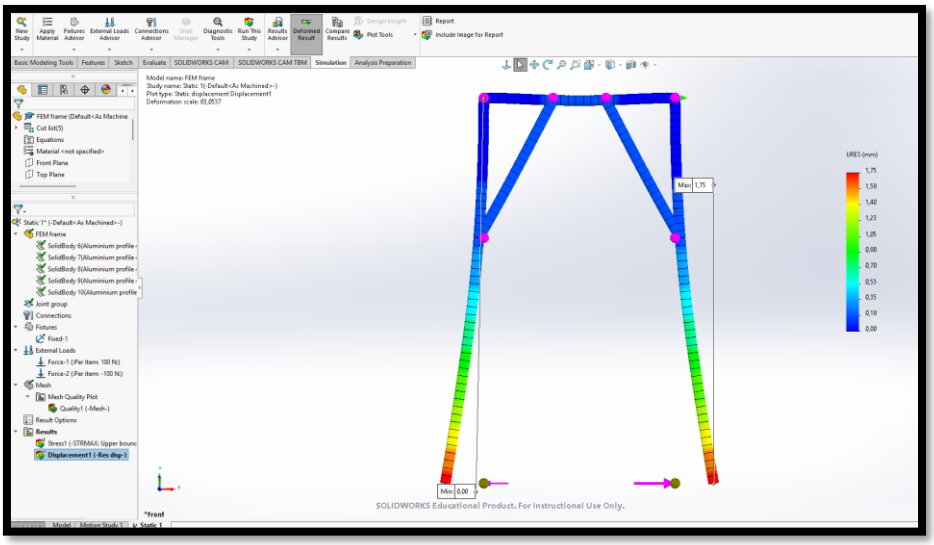
Figuur 46 FEM opzet frame

De krachten en verbinding zijn hetzelfde opgesteld als bij het validerende frame, verder zijn er joints toegevoegd voor de extra versterking.



Figuur 47 FEM spanning frame

De spanningssimulatie geeft de volgende waarden, er is een maximale spanning van 8,63[MPa] ruim onder de toelaatbare spanning van 55,15[MPa] en verder geeft dit een veiligheidsfactor van 6,39. Dit voldoet aan de range van 1.1-1.5.



Figuur 48 FEM vervorming frame

De vervormingssimulatie weergeeft de maximale vervorming van 1,75[mm], als we vervolgens de driehoek toepassen om de hoek te bepalen komt er een hoek van 0,06 graden ofwel het frame zal het scannen amper beïnvloeden als het belast word met 100[N].

5.2.4 Conclusie frame

Het materiaal gebruikt voor het frame is voldoende sterk om de spanningen en vervormingen op te vangen. De hoek blijft onder de 1 graad zoals gesteld in het plan van eisen bij een kracht van 100[N]. Dus het frame voldoet aan alle eisen en zal niet bezwijken onder spanning of vervorming.

5.3 2D werktekeningen

Nadat het conceptontwerp is afgerond en inhoudelijk is gecontroleerd op haalbaarheid en naleving van het Programma van Eisen, is het ontwerp verder uitgewerkt tot een detailniveau dat geschikt is voor realisatie. Voor alle maakdelen zijn gedetailleerde werktekeningen opgesteld, waarin afmetingen, materiaalkeuze en verbindingstechnieken zijn vastgelegd.
Voor de koopdelen zijn de relevante hoofdafmetingen, montagepunten en eventuele noodzakelijke bewerkingen gespecificeerd.

Deze werktekeningen vormen de basis voor de realisatiefase en waarborgen een reproduceerbare en consistente uitvoering van het ontwerp. Alle bijbehorende tekeningen zijn gebundeld en opgenomen als bijlagen bij dit document.

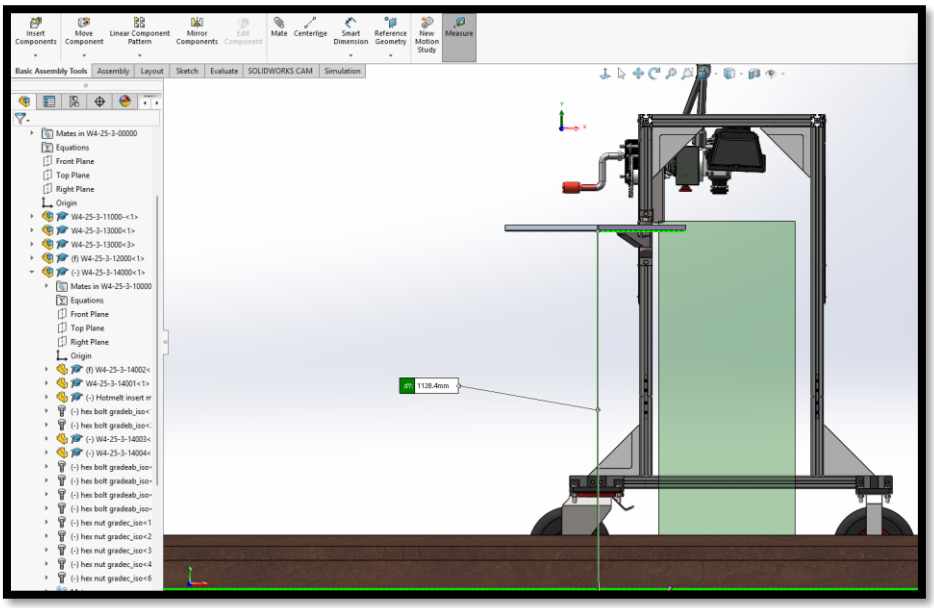
6. Testen & Validatie

Het ontwerp wordt niet fysiek gerealiseerd dit betekent dat sommige eisen van het PvE niet getest zijn. De eisen worden in stappen bij langs gelopen en worden onderbouwd of deze zijn gevalideerd, deze validatie is dus gebaseerd op de FEM-simulaties en het 3D-model.

6.1 Mechanische eisen validatie

Het ontwerp wordt getest aan de opgestelde mechanische eisen waar mogelijk:

Er moet een laptop tot 17 inch en 3 kg gemonteerd kunnen worden op een hoogte van minimaal 100 cm vanaf onderkant rug.



Figuur 49 Laptop stand eis controle

Er is een laptop montage platform toegevoegd aan het ontwerp, deze is verstelbaar langs de verticale balk en kan op een hoogte van 100cm of meer vanaf onderkant rug geplaatst worden. Hierdoor voldoet het ontwerp aan deze eis.

Maximale relatieve rotatie tussen rotary stage scanner en kar ≤ 1° bij belasting van eigen gewicht. (Zie tabel 1.1 – Tolerantie rotary scanner).

De FEM-simulaties in hoofdstuk 5 geven weer dat de kar aan deze eis voldoet, het frame buigt en de scanplaat blijft met de vervorming in ongunstige situaties onder de 1 graad bij belasting van eigen gewicht en extra kracht door ondervloer. De maximale graden van de kar is 0,11 graden bij een kracht van 100[N] en de scanopstelling vervormd maximaal met een hoek van 0,84 graden het ontwerp voldoet dus aan deze eis.

De scanopstelling moet zijn voorzien van twee halogeenlampen van het type Brennenstuhl 1171380, FS10/17 Specim camera en de RS10 Rotary stage scanner.

Tijdens de ontwerpfase zijn deze onderdelen meegenomen in het ontwerp, het ontwerp voldoet aan deze eis.

De RS10 Rotary stage scanner met de FS10-17 Specim camera erop gemonteerd moet de ruimte hebben om tijdens het scannen een slag van 160° kunnen maken. Deze slag moet loodrecht op de lengterichting van de rug gemaakt kunnen worden. (Zie figuur 3.1 en 4.1)

De RS10 heeft genoeg ruimte om de slag van 160 graden te kunnen maken, het ontwerp voldoet aan deze eis.

De constructie mag het scanoppervlak niet hinderen tijdens het scannen. Het scanoppervlak is een volume van 80cm x 43cm x 100cm (LxBxH) en ligt met het hart van de lens op het hart van het scanoppervlak die vervolgens op het hart van de rug ligt(zie figuren 5.1, 6.1 en 7.1). Het scanoppervlak wordt gehinderd als de scan door invloed van de constructie onbruikbaar is.

Er is samen met de opdrachtgever nauwkeurig gekeken naar de hindering die de constructie zou kunnen leveren, er is met behulp van een dummy van het scanvolume geconstateerd dat de constructie het scanoppervlak niet hindert en dus voldoet het ontwerp aan deze eis.

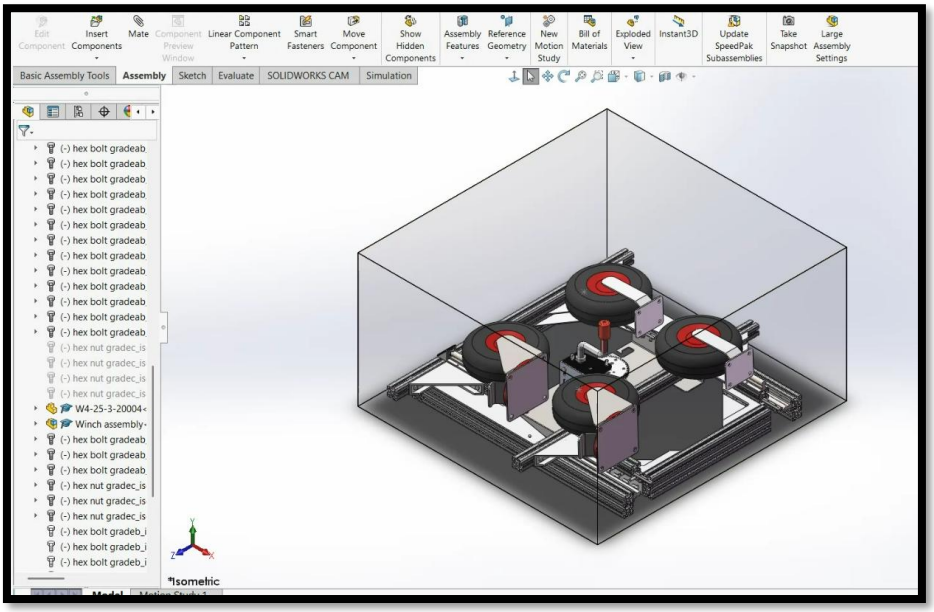
De kar mag de planten niet raken binnen de breedte van de onderkant rug (43 cm) en binnen een hoogte van 70 cm boven de rug van een aardappelveld.

De afmetingen van de kar en de omgekeerde U-vorm voorkomen dat de betreffende planten geraakt/beschadigd gaan worden, Hierdoor voldoet het ontwerp aan deze eis.

De cameralens moet een minimale afstand van 30cm bedragen tegenover de bovenkant van de rug en de aardappelplant.

De camera kan van bovenkant rug naar een hoogte van 108cm, de planten zullen 70 ± 5cm groot worden ten opzichte van de bovenkant rug. De lengte van 108cm houdt in dat er altijd een ruimte bestaat van meer dan 30 cm tussen de lens en het te scannen oppervlak dit houdt in dat het ontwerp voldoet aan deze eis.

De kar moet in een kofferbak passen van minimaal 105 cm x101 cm x 56 cm, gepakt in losse onderdelen.



Figuur 50 kofferbak eis controle

Het frame van de kar is verdeeld in de losse onderdelen er is een ruimtelijk beeld geschetst van de afmetingen van de kofferbak. Het is zichtbaar dat er genoeg ruimte is en meer om de constructie te kunnen opbergen en verplaatsen. Het ontwerp voldoet aan deze eis.

De kar moet door één persoon voortbewogen kunnen worden op vlak terrein helling ≤ 5° met een duwkracht ≤ 200 N (volgens NEN-1005-3:2008). En bij een terrein met een vlakheid van +/- 5 cm over 1m² (exclusief de ruggen).

Deze eis is nog niet toetsbaar aangezien er geen fysiek prototype ontwikkeld is om deze eis te kunnen testen. De gehele kar weegt met alle apparatuur weegt ongeveer 40 kg, hieruit is de verwachting dat de duwkracht minder 200 N zal zijn.

De kar valt niet om door windsnelheden tot 5 m/s.

Deze eis is nog niet toetsbaar aangezien er geen fysiek prototype ontwikkeld is om deze eis te kunnen testen.

6.2 Overige eisen validatie

De kar moet door een relevant geïnformeerd persoon te assembleren zijn in ≤ 25 minuten.

Deze eis is nog niet toetsbaar aangezien er geen fysiek prototype ontwikkeld is om deze eis te kunnen testen.

De kar moet door een relevant geïnformeerd persoon te opereren zijn.

Deze eis is nog niet toetsbaar aangezien er geen fysiek prototype ontwikkeld is om deze eis te kunnen testen.

De kar wordt voorzien van een gebruiksaanwijzing voor het opbouwen, en gebruiken van de kar.

De kar moet voorzien zijn van een lichtbescherming die minimaal 99% van het directe en sterk gereflecteerde zonlicht blokkeert op het scan oppervlak.

De kar wordt voorzien van een bouwzeil die het scanoppervlak beschermd tegen zonlicht en blokkeert 99% van het zonlicht. Deze eis is nog niet toetsbaar vanwege geen fysiek prototype.

De kar moet voorzien zijn van een weerafscherming die voldoet aan IP 02 (verticale waterdruppels onder een hoek van 15 graden).

De mechanische constructie van de kar exclusief het meetapparatuur is bestand tegen weer en wind van een IP 02 waarde.

Maximaal gewicht van de losse onderdelen < 10kg.

Alle losse onderdelen van het ontwerp zijn niet zwaarder dan 10kg. Het ontwerp voldoet aan deze eis.

Kar moet te monteren zijn met klein handgereedschap.

Alle verbindings- en gebruiksmethoden in het ontwerp hebben rekening gehouden met deze eis. De kar voldoet aan deze eis.

Kabels moeten het scanoppervlak niet hinderen.

Dankzij kabelgoten in het ontwerp lopen er geen kabels langs het scanoppervlak, het ontwerp voldoet aan deze eis.

Kabels moeten niet op (fysieke) spanning komen te staan.

Deze eis is nog niet fysiek toetsbaar, maar er is genoeg ruimte in het ontwerp om de kabels niet op spanning te hoeven zetten.

De kar moet een minimale levensduur hebben van 100 gebruiksuren zonder functieverlies.

Deze eis is nog niet toetsbaar.

Materialen moeten vorm- en functiebehoud tonen gedurende de gehele levensduur.

Deze eis is nog niet toetsbaar.

De scanopstelling wordt gepositioneerd volgens figuur 4 over de ruggen.

Het ontwerp voldoet aan deze eis.

De kar moet kunnen draaien zodat deze van een rug naar de ander rug kan verplaatsen in 1 duwende beweging.

De kar is voorzien van zwenkwielen hierdoor kan de kar verplaatsen naar andere ruggen in het veld. Het ontwerp voldoet aan deze eis.

De kar is voorzien van een CE-keurmerk voor de mechanische constructie.

Aan de eis dat de kar is voorzien van een CE-keurmerk voor de mechanische constructie is niet voldaan. Het project heeft meer tijd dan gepland in beslag genomen in de ontwerpfase, voornamelijk doordat het Programma van Eisen meerdere keren moest worden aangescherpt. Hierdoor schoof de planning steeds op en bleef er onvoldoende tijd over om het volledige CE-keurmerktraject af te ronden.

6.3 conclusie testfase

Het ontwerp voldoet aan de eisen die tot nu toe zijn getest. Voor het volledig verifiëren van alle eisen is echter extra tijd nodig en zal een fysiek prototype moeten worden gerealiseerd, aangezien sommige eisen alleen experimenteel kunnen worden afgetoetst.

7. Conclusies

In dit project is een mobiele hyperspectrale scanopstelling ontworpen voor het lectoraat Computer Vision & Data Science van NHL Stenden, met als doel het efficiënter uitvoeren van hyperspectrale metingen in het veld. De bestaande statische opstelling voldeed niet aan de praktische eisen voor veldgebruik, wat de noodzaak voor een mobiel, verstelbaar en robuust systeem benadrukte.

Het project heeft geresulteerd in een volledig uitgewerkt ontwerp van een verrijdbare scanopstelling. De kar is zodanig ontworpen dat deze voldoet aan alle eisen uit het Programma van Eisen, met uitzondering van de eisen die uitsluitend door middel van fysieke testen gevalideerd kunnen worden, zoals duwkracht, stabiliteit bij windsnelheden en montage- en gebruikstijd in de praktijk. Voor alle overige eisen is aantoonbaar onderbouwd dat hieraan wordt voldaan door middel van berekeningen, FEM-analyses en verificatie in het 3D-model.

Het complete ontwerp is uitgewerkt in SolidWorks en omvat zowel het volledige 3D-model als de bijbehorende 2D-tekeningen die nodig zijn om de kar daadwerkelijk te produceren. Hiermee is het ontwerp niet alleen conceptueel, maar ook direct realiseerbaar. Daarnaast is een gebruikershandleiding opgesteld voor het opbouwen en bedienen van de kar, zodat het systeem overdraagbaar en inzetbaar is voor eindgebruikers binnen het lectoraat.

Op constructief niveau is het ontwerp gevalideerd met handberekeningen en FEM-simulaties. Kritische onderdelen zoals het frame en de scanplaat zijn doorgerekend op sterkte en vervorming, waarbij materiaalkeuzes zijn aangepast om binnen de gestelde toleranties te blijven. Hiermee is geborgd dat de relatieve rotatie tussen camera, scanopstelling en frame binnen de toegestane grenzen blijft en de meetnauwkeurigheid van de hyperspectrale scans niet wordt beïnvloed.

Samenvattend is een complete, technisch onderbouwde en uitvoerbare mobiele hyperspectrale scanopstelling ontwikkeld. Het projectresultaat biedt het lectoraat een direct toepasbaar ontwerp dat gereed is voor fysieke realisatie en praktijkvalidatie, en vormt daarmee een solide basis voor verdere inzet en doorontwikkeling in toekomstig onderzoek.

8. Advies aan opdrachtgever

Op basis van de uitgevoerde analyses, het uitgewerkte ontwerp en de validatie in dit project wordt geadviseerd om over te gaan tot de fysieke realisatie van de ontworpen mobiele hyperspectrale scanopstelling. Het ontwerp is volledig uitgewerkt in SolidWorks, voorzien van productieklare 2D-tekeningen en een gebruikershandleiding. Daarmee is het ontwerp gereed om zonder aanvullende ontwerpfases te worden gebouwd.

Het wordt nadrukkelijk geadviseerd om na realisatie een praktijkvalidatie uit te voeren in het veld. Een aantal eisen kan uitsluitend fysiek worden getoetst, waaronder de benodigde duwkracht bij gebruik op landbouwgrond, de stabiliteit bij windsnelheden tot 5 m/s, de daadwerkelijke montagetijd en de ergonomie tijdens gebruik. Deze testen zijn essentieel om de aannames uit de ontwerpfase te bevestigen en eventuele optimalisaties door te voeren.

Tijdens de bouw wordt aanbevolen om de materiaalkeuzes exact te volgen zoals vastgelegd in de tekeningen. In het bijzonder is het belangrijk dat de scanplaat wordt uitgevoerd in AISI 304 roestvast staal en niet in aluminium, aangezien uit de FEM-analyses is gebleken dat aluminium in deze toepassing onvoldoende stijfheid biedt. Afwijken van deze keuze kan direct invloed hebben op meetnauwkeurigheid en levensduur van de opstelling.

Voor toekomstige doorontwikkeling wordt aanbevolen om te onderzoeken of een geïntegreerde energievoorziening, zoals een accu, alsnog haalbaar is zonder concessies te doen aan stabiliteit en transporteerbaarheid. Ook kan worden gekeken naar verdere optimalisatie van montage- en afsteltijd, bijvoorbeeld door meer gereedschap loze verbindingen toe te passen.

Tot slot wordt geadviseerd om het ontwerp en de documentatie te borgen binnen het lectoraat, zodat de kar reproduceerbaar is en eenvoudig kan worden aangepast voor andere onderzoeksdoeleinden of gewastypen. Het huidige ontwerp vormt hiervoor een solide en technisch onderbouwde basis.

9. Competentiehoofdstuk

Analyseren – 3: Wij hebben het probleem en de context van de opdracht helder geanalyseerd. De eisen, randvoorwaarden en risico's zijn volledig in kaart gebracht en onderbouwd met onderzoek, berekeningen en FEM-analyses. Ontwerpkeuzes zijn consequent technisch gemotiveerd. Hiermee is deze competentie op een goed niveau aangetoond.

Ontwerpen – 3: Wij hebben een volledig en integraal ontwerp ontwikkeld dat voldoet aan de gestelde eisen. Het ontwerp is uitgewerkt in een compleet 3D-model, voorzien van productieklare 2D-tekeningen, en een handleiding. Dit laat zien dat wij het ontwerpproces beheersen van concept tot realiseerbaar eindproduct.

Realiseren – 2: Wij hebben alle voorbereidingen getroffen voor fysieke realisatie, waaronder detaillering, materiaalkeuze en maakbaarheid. De daadwerkelijke bouw en fysieke tests zijn niet uitgevoerd binnen dit project, waardoor deze competentie voldoende maar niet volledig is aangetoond.

Beheren – 2: Wij hebben rekening gehouden met veiligheid, levensduur, onderhoud en overdraagbaarheid van het ontwerp. Dit is vastgelegd in de documentatie. Praktijkervaring met beheer en langdurig gebruik ontbreekt, waardoor de competentie op een voldoende niveau blijft.

Managen – 2: Wij hebben het project gestructureerd uitgevoerd met een duidelijke planning, rolverdeling en afstemming met de opdrachtgever. De scope is bewaakt en de afgesproken resultaten zijn opgeleverd. Omdat het project in een klein team is uitgevoerd, is deze competentie voldoende aangetoond.

Adviseren – 3: Wij hebben de opdrachtgever voorzien van een helder en onderbouwd advies over realisatie, testen en mogelijke doorontwikkeling. Het advies is technisch inhoudelijk sterk, realistisch en direct toepasbaar, wat deze competentie op een goed niveau plaatst.

Onderzoeken – 3: Wij hebben relevante literatuur geraadpleegd, technische analyses uitgevoerd en simulaties ingezet om ontwerpkeuzes te onderbouwen. Resultaten zijn correct geïnterpreteerd en vertaald naar concrete ontwerpbeslissingen. Hiermee is de onderzoek competentie goed aangetoond.

Professionaliseren – 2: Wij hebben professioneel gewerkt door gestructureerd te documenteren, keuzes te verantwoorden en beperkingen van het project expliciet te benoemen. Reflectie op persoonlijke en professionele ontwikkeling is aanwezig, maar beperkt in diepgang, waardoor deze competentie als voldoende wordt beoordeeld.

10. Reflectie

Zelfreflectie Boaz Dijkstra

Tijdens dit project heb ik me voornamelijk gericht op de ontwikkeling van het 3D-model, de functieanalyse, FEM-analyses en het schrijven van de gebruikershandleiding. Dit waren taken die goed aansloten bij mijn interesse in systematisch ontwerpen en praktische documentatie. Het opbouwen van het volledige 3D-model in SolidWorks gaf me inzicht in de complexiteit van een modulaire, mobiele constructie en hoe je ontwerpkeuzes moet onderbouwen vanuit zowel technische als gebruikerseisen.

Ik merkte dat ik me soms te veel verloor in de details van het ontwerp, waardoor de planning onder druk kwam te staan. Het PvE moest verschillende keren worden aangescherpt en dat zorgde voor vertraging in de ontwerpfase. Hierdoor is bijvoorbeeld het CE-keurmerk niet meer uitgewerkt, wat een belangrijk onderdeel van de oplevering had moeten zijn. Ik realiseer me dat ik in toekomstige projecten scherper moet zijn op het bewaken van de planning en tijdiger moet communiceren als er vertraging dreigt. Het is belangrijk om de opdrachtgever beter te informeren over de gevolgen van uitloop, zodat verwachtingen beter kunnen worden bijgesteld.

Wat betreft het HBO Engineering-domein heb ik vooral gewerkt aan de competenties Ontwerpen en Adviseren. Het uitwerken van een volledig 3D-model en een bijbehorende handleiding sluit aan bij de ontwerpgerichte en praktische insteek van de opleiding. Tegelijkertijd heb ik geleerd dat Beheren en Managen minstens zo belangrijk zijn voor een succesvol project.

Ik ben trots op het feit dat we een volledig uitgewerkt en realiseerbaar ontwerp hebben opgeleverd, inclusief FEM-analyses die het ontwerp verdedigen en een duidelijke montage- en gebruiks instructies. Dit maakt het resultaat direct toepasbaar voor het lectoraat. Toch neem ik mee dat ik in de toekomst beter moet anticiperen op vertragingen en deze pro-actiever moet bespreken met zowel mijn team als de opdrachtgever.

Zelfreflectie Taeke Hessel van Houten

Het project begon voor mij en Boaz al wat verwarrend, we wilden iets te snel beginnen met ontwerpen en verloren daarom onze visie op een sterk plan van eisen, dit hebben we snel weer recht gezet en hebben een plan van eisen kunnen opstellen in de eerste paar weken van het project.

Vanaf dat punt hebben hebben we elke week nieuwe eisen en wensen moeten toepassen aan ons plan van eisen dit heeft uiteindelijk te ver doorgelopen en heeft ons belemmerd in het ontwerpen en realiseren van een fysiek product. Dit hebben we vastgelegd met onze begeleider en opdrachtgevers de conclusie hierbij blijft dat we eerder de knoop hadden moeten doorhakken en opzoek moesten naar een middenweg. Onze begeleider heeft ons duidelijk gemaakt dat in deze situaties vaak de opleverdata van een product enorm kan opschuiven, maar aangezien er voor ons als student een vaste deadline stond hadden we deze vrijheid niet.

Ik heb hiervan geleerd dat je niet altijd de opdrachtgever alles kan geven wat hij wenst en verder ben ik meer bewust geworden wat voor impact deze situaties kan hebben op de planning en om dit verder te voorkomen zal ik eerder actie moeten ondernemen als er een soortgelijke situatie zou optreden.

Nadat we hebben vastgesteld met de opdrachtgever wat we nog kunnen aanleveren zijn we als groep hier direct op ingegaan, we hebben een 3D ontwerp kunnen ontwikkelen en we hebben FEM-simulaties kunnen toepassen, daarnaast zijn er uiteindelijk ook 2D werktekeningen ontwikkeld zodat na afronding van het project de opdrachtgevers de optie hebben om het ontwerp daadwerkelijk te realiseren.

Daarnaast heb ik veel mogen leren over het achterliggend project van het aardappelvirus ik heb hier veel onderzoek naar mogen doen, zodat er rekening wordt gehouden tussen ons project en wat de mensen in het werkveld doen.

Bibliografie

Dev, A. (2025). *Visual Prompt and Refernce-guided plant health Detection and Classification for precision Agriculture.* Leeuwarden.

Imaonline. (2024). *Wegingsmethodiek*. Opgehaald van Imaonline: https://www.imaonline.nl/sites/default/files/faq/files/wegingsmethodiek-van-kinneyw.pdf

KOUWENHOVEN, R. I. (April 1966). *Ruggen-opbouw bij aardappelen op klei en zavelgrond*. Amsterdam: Uitgave der N.V. Nederlandsche Kali-Import Maatschappij Amsterdam.

Projectmanagementsite. (2025). *Projectmanagementsite*. Opgehaald van Projectmanagementsite: https://projectmanagementsite.nl/stakeholdersanalyse/

Science, L. C. (2025). *Opdracht W4 project 2025-2026 - hyperspectral.pdf* . Opgehaald van Opdracht W4 project: https://blackboard.nhlstenden.com/ultra/courses/_34876_1/outline/file/_6085858_1

Stenden, N. (sd). *NHL Stenden onderzoek lectoraten*. Opgehaald van NHL Stenden: https://www.nhlstenden.com/onderzoek/lectoraten/computer-vision-data-science