



Levensduurtestopstelling

Wietse van Ooijen De

Haagse Hogeschool

Bewegingstechnologie

2020

Versie: 1.1

Contact informatie

28-10-2020, Gouda

Opleidingsinstantie: De Haagse Hogeschool:

Johanna westerdijkplein 75

2521 EH Den Haag

Opdracht gever: Laevo B.V.

Patrijsweg 30

2289 EX Rijswijk

Begeleider 1: Geronimo Dos Santos

Begeleider 2: Sandra Koens

Student: Wietse van Ooijen

Voorwoord

Deze scriptie gaat over het proces van ontwerpen en vervaardigen van een levensduur-testopstelling voor het Laevo V3 exoskelet. Deze scriptie wordt geschreven voor de opleiding bewegingstechnologie aan de Haagse Hogeschool.

Het maken van de testopstelling is gedaan in opdracht van Laevo B.V. dit is een bedrijf dat exoskeletten maakt. De opdracht is voortgekomen uit het feit dat Laevo B.V. bezig is met het ontwerpen van een nieuw exoskelet, dat een aantal nieuwe functies niet getest kunnen worden op de “oude” testopstellingen.

Tijdens het schrijven van deze scriptie is vrijwel alle kennis die vergaard is op de opleiding bewegingstechnologie in een maat gebruikt. Voor dit project is een kleine bewegingsanalyse gedaan op menselijke bewegingen, is nagedacht over hoe de geanalyseerde bewegingen gevangen konden worden in een mechanisch systeem en is het systeem ontworpen en vervaardigd.

Ik zou graag alle medewerkers van Laevo B.V. willen bedanken voor hun kennis en hulp tijdens mijn afstuderen. Ook wil ik de begeleidende docenten van de Haagse Hogeschool bedanken.

Samenvatting

Laevo B.V. is bezig met het ontwerpen en vervaardigen van een nieuwe exoskelet, de zogenaamde Laevo V3. Dit exoskelet heeft een aantal nieuwe functies die niet in de oude Laevo exoskeleten beschikbaar zijn. De nieuwe functies zijn:

- een vestje in plaats van het af steunen op de borst.
- De smart joints zitten aan een scharnier wat er voor zorgt dat de smart joint een hoek van 15° adductie (naar binnen) en 45° abductie kan maken (naar buiten).

Deze functies kunnen niet worden getest in de aanwezige testopstellingen. De hoofdvraag van dit project is daarom als volgt:

Ontwerp, construeer en valideer een mechanische levensduur-testopstelling voor het V3 Laevo exoskelet binnen het aangegeven budget.

Het proces is opgedeeld in een aantal fases: de analyse fase, de ontwerp fase en het vervaardigen. In deze samenvatting worden deze fases en hun conclusies beschreven.

De eerste fase van het project is de analyse fase noodzakelijk voor het definiëren van de juiste testopstelling. Eerst is een bewegingsanalyse gedaan naar de menselijke bukbeweging, zodat deze beweging gevangen kan worden in een mechanisch systeem. Aan de hand van deze bewegingsanalyse is de conclusie getrokken dat de machine een slag moet kunnen maken van 120° en dat de leg pads verstelbaar moeten zijn, zodat de leg pads van de Laevo een hoek van 15° adductie en 45° abductie kunnen maken.

De beweging gaat gemaakt worden met behulp van een elektromotor en een crank-rocker vierstangen systeem. Nadat bekend is hoe de beweging gevangen gaat worden in een mechanisch systeem kan er worden nagedacht over welke componenten, onderdelen en materialen hiervoor gebruikt gaan worden.

Aan de hand van de analyse en de eisen van Laevo B.V. is een pakket van eisen en wensen opgesteld waaraan de nieuwe testopstelling moet voldoen.

Nadat het pakket van eisen en wensen is opgesteld, kon er een begin gemaakt worden met ontwerpen. De testopstelling is opgedeeld in een aantal verschillende onderdelen en voor elk onderdeel zijn aparte schetsen gemaakt. De schetsen zijn beoordeeld aan het pakket van eisen en wensen, hoe makkelijk het te vervaardigen is met standaard profielen, de kosten en het uiteindelijke gebruiksgemak.

In het hoofdstuk elektronica wordt de motorregelaar besproken, hoe deze werkt en hoe deze moet worden aangesloten. Ook wordt in dit hoofdstuk besproken hoe de parameters van de regelaar kunnen worden aangepast.

In het hoofdstuk vervaardigen wordt het proces van het monteren van de onderdelen besproken. Tijdens het monteren hebben zich een aantal uitdagingen voorgedaan, deze uitdagingen zijn beschreven in het hoofdstuk evaluatie.

Inhoud

Contact informatie	2
Voorwoord	3
Samenvatting	4
2 Woordenlijst	7
3 Inleiding.....	7
4 Probleemstelling	9
Hoofd- en deelvragen	10
4.1.1 Analyse	10
4.1.2 Ontwerp	10
4.1.3 Ontwikkel	10
5 Analyse	11
5.1 Menselijke motoriek/ beweging	11
5.2 Conclusie bewegingsanalyse	16
5.3 Mechanisch systeem.....	17
5.3.1 Vier stangen mechanisme.....	19
5.3.2 Bevestiging Laevo.....	20
5.4 Conclusie mechanisch systeem.....	21
5.5 Componenten/ onderdelen	22
6 Eisen en wensen.....	23
6.1 Eisen	23
6.2 Wensen	23
7 Ontwerp	24
7.1 Schetsen	24
7.2 Berekeningen aan het frame	26
7.2.1 V-snaar wiel.....	27
7.2.2 Lagers	28
7.2.3 Aandrijving	28
7.2.4 Verbinding as	30
7.3 Opspannen van de v-snaar	32
7.4 Versteving van het frame	33
7.5 Eind ontwerp.....	33
7.6 BOM	34
7.7 Conclusie ontwerp	34
8 Elektronica	35
8.1 Parameters aanpassen.....	35

9	Vervaardigen.....	37
10	Evaluatie.....	39
11	Discussie.....	40
12	Conclusie	41
13	Aanbevelingen	42
14	Referenties.....	44
15	Bijlage.....	46
15.1	Script deflection calculation.....	46
15.2	Matlab script four bar linkage.....	51
15.3	Bill of materials	54
15.4	Datasheet ball bearing.....	55
15.5	Datasheet tensioner bearing	57
15.6	Datasheet motor regelaar.....	58
15.7	Datasheet elektromotor	58
15.8	2D tekening testopstelling	59

2 Woordenlijst

Smart joint: is het mechanisme waar energie in wordt opgeslagen tijdens het bukken en vrij gegeven tijdens het omhoog komen.

3 Inleiding

Laevo B.V is een bedrijf gevestigd in Rijswijk (Patrijsweg 30, 2289 EX Rijswijk). Laevo ontwikkelt passieve exoskeletten (de Laevo, zie figuur 1) voor het ondersteunen van de rug bij het verrichten van repeterende handelingen of het tillen van zware objecten.

Een exoskelet is een uitwendig skelet dat een gebruiker ondersteunt bij het uitvoeren van bewegingen. De Laevo exoskeletten (V1, V2 en V3) zijn passief, dit houdt in dat er geen motoren of actuatoren in het systeem aanwezig zijn.

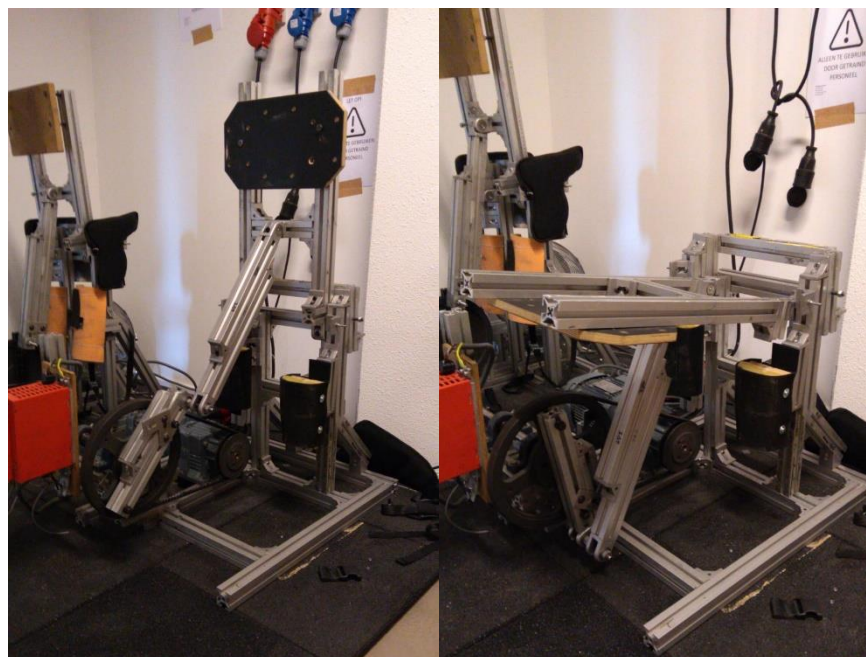
De Laevo exoskeletten werken door middel van gasveren die tijdens het bukken worden opgespannen en de opgeslagen energie vrijgeven tijdens het omhoog komen.

Laevo is op het moment bezig met het ontwikkelen van een nieuwe versie van het Laevo exoskelet de Laevo V3. Laevo voert onderzoek uit om te kijken of de Laevo V3 beter presteert dan de Laevo V2. De nieuw ontworpen onderdelen van de Laevo V3 zijn door het R&D team van Laevo berekend op verwachte belasting plus een veiligheidsmarge. Om te valideren of deze onderdelen daadwerkelijk de levensduur van 250.000 (of 3 jaar) buigingen halen heeft Laevo een levensduur test opstelling (zie figuur 2).



Figuur 1: het Laevo exoskelet.

De levensduur van de Laevo V3 wordt getest om te valideren dat de berekende levensduur gelijk is aan de werkelijke levensduur. Een andere reden is dat als de Laevo voorbij de levensduur is er meer kans is op breken, wat kan resulteren in schade of letsel aan de gebruiker. Als de Laevo zijn levensduur heeft bereikt wordt het aangeraden om deze terug te sturen voor het vervangen van de gasveren en eventueel andere beschadigde onderdelen.



Figuur 2: Oude tesopstelling.

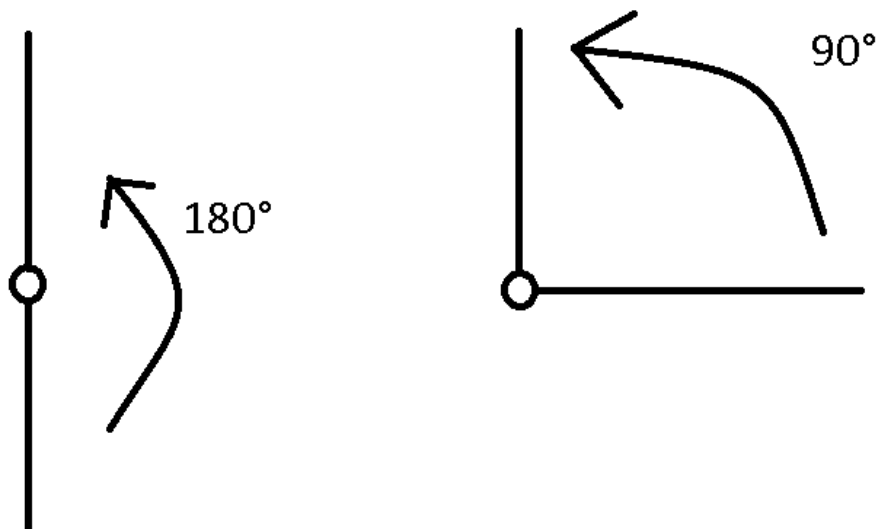
De Laevo V2 en de Laevo V3 hebben verschillende constructies, daarom kan de levensduur van de Laevo V3 niet worden getest met de huidige levensduur testopstelling. De Laevo V2 ondersteunt de gebruiker aan de voorkant zie figuur 1 en 5. De Laevo V3 heeft een vestje waar de gebruiker in hangt, zie figuur 4. In de huidige testopstelling worden de gel pads en de been pads gebruikt om de Laevo in te spannen in de levensduur testopstelling, dit is niet mogelijk voor de Laevo V3. Dit komt door het ontwerp van de Laevo V3.

Om dit probleem op te lossen is de volgende opdracht geformuleerd:

Ontwerp, construeer en valideer een mechanische levensduur-testopstelling voor het V3 Laevo exoskelet.

Het doel van de opdracht is:

Het ontwerpen en construeren van een duurtestmachine voor het Laevo V3 exoskelet. Waarbij een voorwaartse flexie beweging gevangen in een mechanisch systeem het belangrijkste is (figuur 3). Als de planning dit toelaat kunnen er elementen (lopen, zijwaarts bukken, sensoren) aan deze hoofdvraag worden toegevoegd. Het uiteindelijke doel is een volledig functionele machine om de in ontwikkeling zijnde V3 te duurtesten.



Figuur 3: flexie beweging.

4 Probleemstelling

De reden waarom er een nieuwe levensduur-testopstelling ontwikkeld moet worden is omdat de Laevo V3 niet op de huidige levensduur-testopstelling ast. De reden hiervoor is dat de Laevo V2 de gebruiker ondersteund doormiddel van gel pads op de borst. Zie figuur 2.

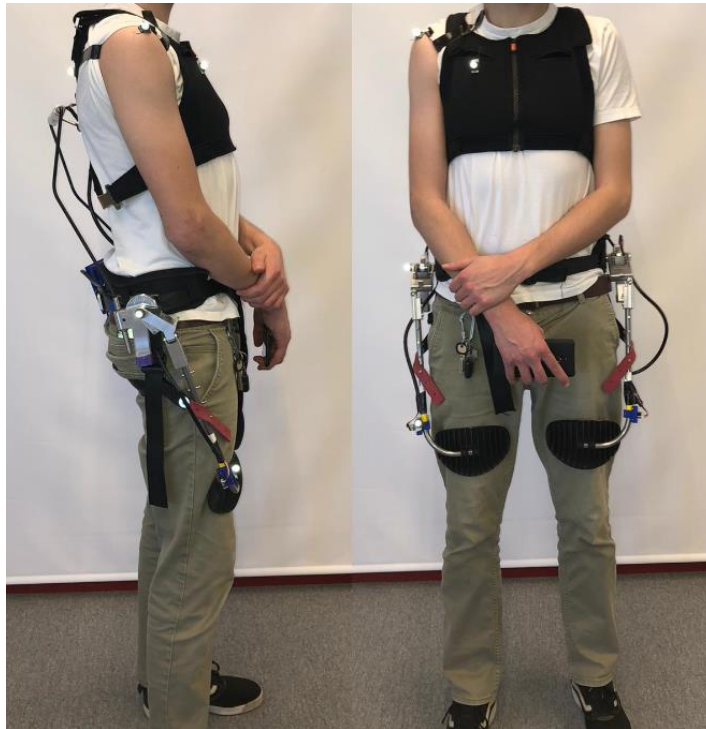
De Laevo V3 maakt gebruik van een vestje, waar de gebruiker als het ware in hangt. Zie figuur 4. Het verschil in de 2 systemen maakt dat de Laevo V3 niet getest kan worden met de huidige levensduur-testopstelling.

De huidige testopstelling zorgt ervoor dat de gasveren worden opgespannen en ontlast doormiddel van een elektromotor. Dit concept wordt gebruikt voor het nieuwe ontwerp, het verschil tussen het nieuwe en oude ontwerp zit alleen in de manier waarop de Laevo wordt ingespannen in het nieuwe ontwerp.

Delen van het ontwerp, aandrijving en frame van de bestaande levensduur testopstelling kunnen worden gebruikt voor de versie.



Figuur 5: Laevo V2.



Figuur 4: prototype Laevo V3.

Hoofd- en deelvragen

Voor elke van de verschillende fases (analyse, ontwerp en ontwikkel) worden hoofd- en deelvragen opgesteld om een duidelijk beeld te krijgen van wat er moet gebeuren.

4.1.1 Analyse

Hoofdvraag:

- Hoe kan de menselijke motoriek worden gevangen in een mechanisch systeem?

Deelvragen:

- Hoe kan een hoekverdraaiing worden gesimuleerd in een mechanisch systeem? (Prioriteit)
- Hoe kan lopen worden gesimuleerd in een mechanisch systeem? (Indien mogelijk)
- Hoe kan een zijwaartse hoekverdraaiing worden gesimuleerd in een mechanisch systeem? (Indien mogelijk)

Op basis van aanwezige antropometrische data het ontwerp optimaliseren op de Laevo gebruikersgroep en de specifieke onderdelen van het V3 exoskelet. Dit uiteraard in samenwerking met het R&D team van Laevo B.V.

4.1.2 Ontwerp

Hoofdvraag:

- Hoe ziet een machine die de levensduur van het Laevo V3 exoskelet test eruit?

Deelvragen:

- Welke specificaties moet het systeem hebben?
- Wat zijn de afmetingen waaraan het ontwerp moet voldoen?
- **Moet het systeem sensoren hebben? Zo ja welke sensoren?**
- Maakt het systeem gebruik van de aanwezige 400V elektromotor?
- Is het frame van het systeem opgebouwd uit aluminium profielen?

4.1.3 Ontwikkel

Hoofdvraag:

- Hoe wordt een machine die de levensduur van het Laevo V3 exoskelet test ontwikkelt?

Deelvragen:

- Is de levensduur van het systeem groter dan 10.000.000 cycli?

5 Analyse

Om de levensduur van de Laevo V3 in een relatief korte periode te kunnen testen moet er een mechanisch systeem ontworpen worden waarin de 250.000 bukbewegingen in periode van maximaal 2 weken kunnen worden uitgevoerd.

De analyse bestaat uit drie delen: menselijke motoriek/ beweging, mechanisch systeem en de componenten / onderdelen.

5.1 Menselijke motoriek/ beweging

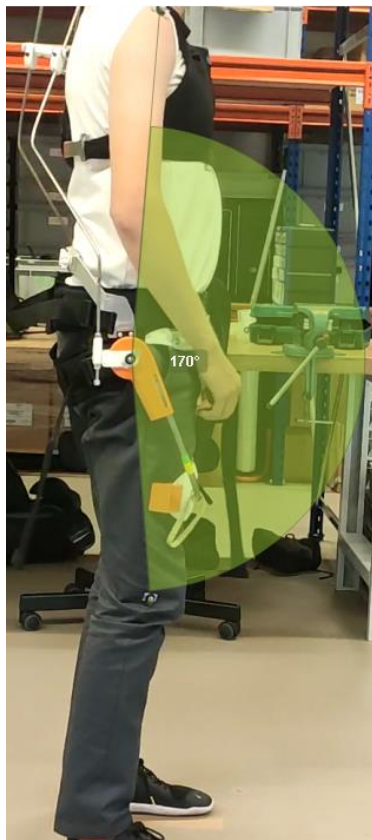
In dit (eerste) deel van de analyse wordt er onderzoek gedaan naar de benodigde flexie beweging. Om te bepalen welke hoek een gebruiker kan maken met de Laevo V3 is er een bewegingsanalyse gedaan van een squat beweging. De reden voor deze bewegingsanalyse is om te kijken of de gebruiker de Laevo over de hele slag gebruikt en om de restrictie van de Laevo in kaart te brengen.

Om accuraat de hoeken te meten zijn licht reflecterende markers gebruikt (B&L engineering 9.5mm sphere). Er zijn drie markers gebruikt tijdens deze metingen, op de schouder, heup en knie. De marker op de schouder is geplaatst in het midden van de laterale rand van het acromion. De marker op de heup is geplaatst op de top van de trochanter major van het femur. En de marker op de knie is geplaatst op de laterale epicondyl van het femur.

De marker op de trochanter major van het femur is een goede representatie van het draaipunt van de heup. Dit is ook de plek waar het draaipunt van de smartjoint moet zitten.

De plaatsing van deze markers kan de hoek tussen het torso en de benen van de persoon gemeten worden, dit is de hoek waar interesse naar is voor deze analyse.

Bukken met Laevo:

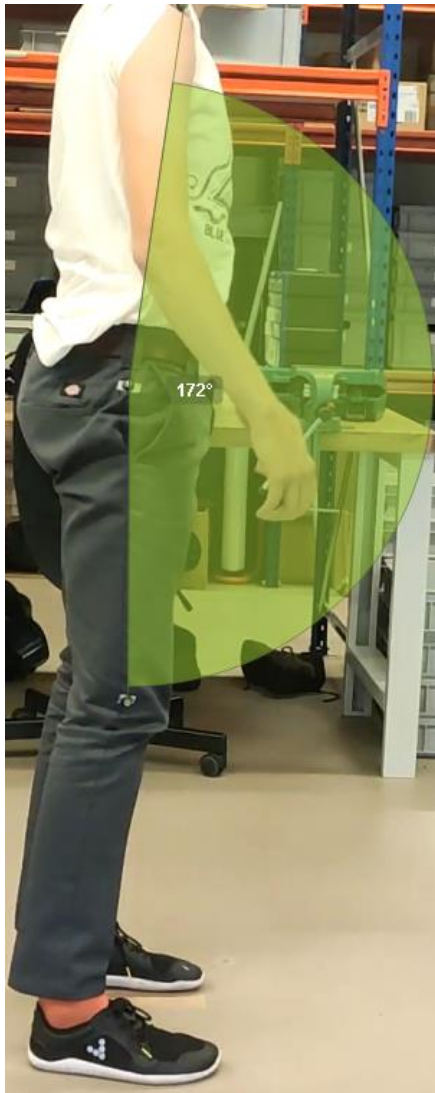


Figuur 6: Staan met Laevo



Figuur 7: Squat met Laevo.

Bukken zonder Laevo:



Figuur 9: Staan zonder Laevo.



Figuur 8: Squat zonder Laevo.

Resultaten van de meting:

Hoek met Laevo, figuren 6&7: $170^{\circ} - 55^{\circ} = 115^{\circ}$

Vergelijking 1: Hoekberekening met Laevo.

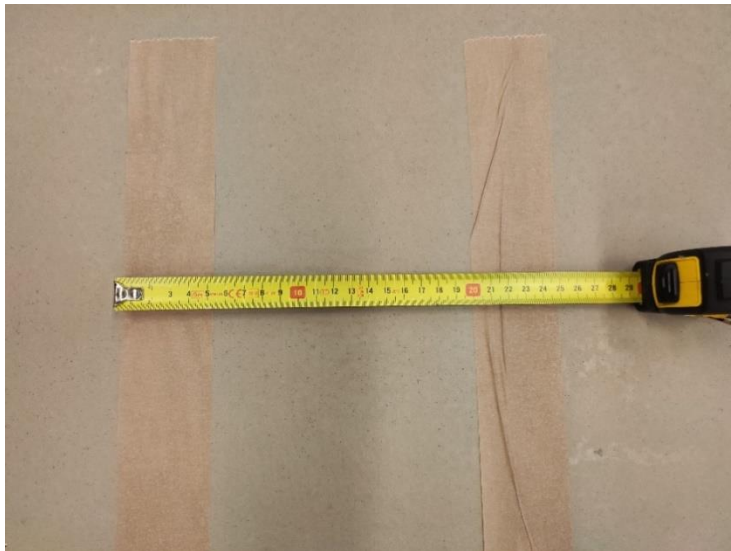
Hoek zonder Laevo figuur, figuren 8&9: $172^{\circ} - 52^{\circ} = 120^{\circ}$

Vergelijking 2: Hoek berekening zonder Laevo.

Deze de bovenstaande figuren en berekeningen is te zien dat er tijdens het bukken met de Laevo een kleine belemmering van 5° ondervonden wordt ten opzichte van zonder Laevo. De reden voor het meten met en zonder Laevo is om aan te tonen dat om de slag van de machine te bepalen, niet de maximale hoek die een persoon kan behalen tijdens het bukken gebruikt kan worden. Hierbij moet wel worden vermeld dat de meting met de Laevo gedaan is terwijl deze niet was ingeschakeld, dit houdt in dat de ondervonden belemmering, de belemmering van het frame van de Laevo is en niet van de veerkracht. Dit houdt in dat als de Laevo aan staat dat de belemmering groter wordt naarmate er meer naar het uiteinde van de bewegingsslag bewogen wordt.

De reden dat de Laevo uitgeschakeld was tijdens de test was dat dit een 3d geprinte versie van de nieuwe smartjoint was en daardoor niet belastbaar.

Vanuit Laevo wordt er klantenonderzoek gedaan voor feedback. Uit de feedback van de klanten komt ook naar voren dat de gebruikers tijdens het bukken een kleine limitatie van ondervonden. Om de restrictie van het bukken met de Laevo te vergelijken met het bukken zonder Laevo, zijn squats uitgevoerd met en zonder Laevo. Tijdens de metingen is de afstand tussen de benen gelijk gehouden, dit is gedaan door 2 stukken tape op een bekende afstand (25cm) van elkaar te plakken, zie figuur 10.



Figuur 10: afstand tussen voeten tijdens squatten.

Ook is er gekeken naar literatuur voor zijwaarts bukken. Er is gekeken naar literatuur en er is een beredenering gedaan.

Uit literatuur blijkt:

Uit Visser, Formanoy, Kuis, Duits, Doornbusch (2008) blijkt dat als een persoon meer dan 30 keer per uur bukt met het torso in een gedraaide positie van minimaal 20° of meer dat dit als belasting ervaren wordt wat het ziekteverzuim kan vergroten. Om deze reden moet de hoek voor het testen van het zijwaarts bukken minimaal 20 graden zijn.

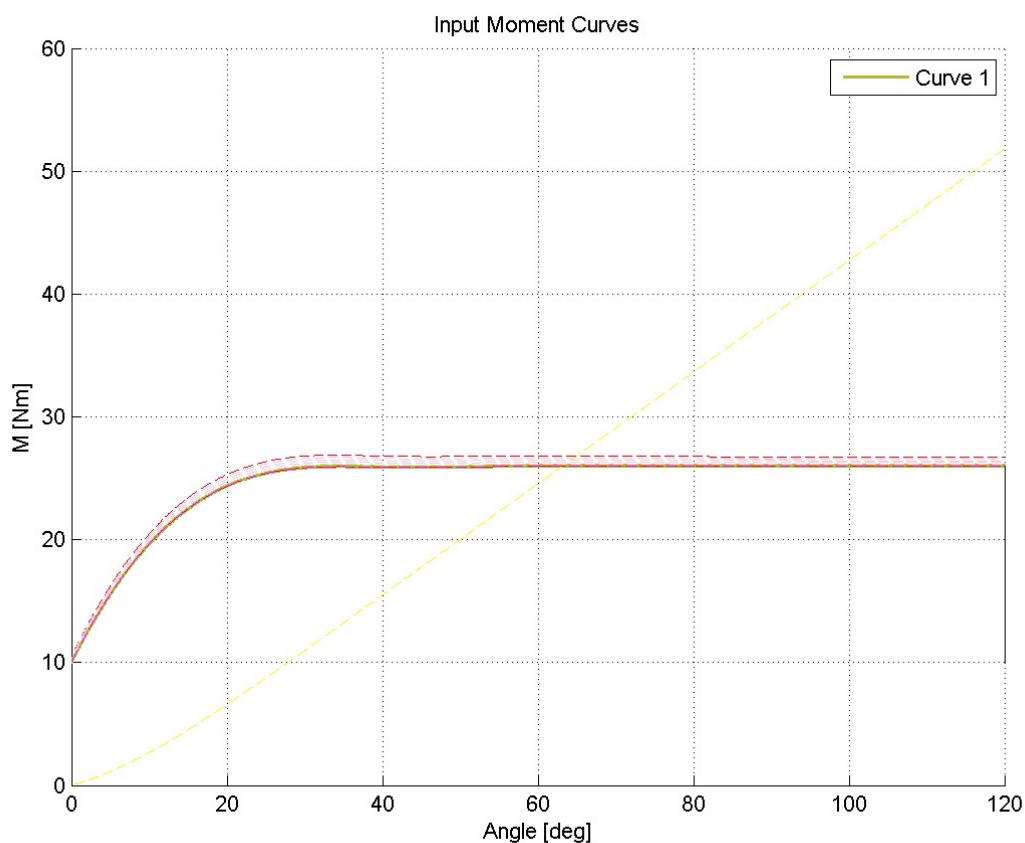
Een werknemer mag maximaal 23 kilo handmatig tillen met uitzondering van de bouw, daar mag handmatig maximaal 50 kilo getild worden. Deze waardes zijn gebaseerd op de NIOSH-methode. Dit zijn optimale til situaties, zodra de persoon gaat draaien met de torso ten opzichte van de heupen wordt het gewicht wat de persoon volgens de NIOSH-norm mag tillen aanzienlijk minder.

De berekening:

Omdat er uit de literatuur geen concrete waardes komen wordt er aan de hand van de eigenschappen van het systeem een berekening gedaan over de hoeken van de smart joint scharnieren moeten kunnen maken.

De Laevo heeft een maximale abductie hoek van Laevo 45° (naar buiten) en een maximale adductie hoek 15° (naar binnen). De waardes zijn verkregen van de ontwerper van de Laevo V3. Omdat het doel van een levensduur test is in het testen van de Laevo op haalbare bewegingsuitslagen moet de testopstelling maximaal 45° abductie en 15° adductie kunnen simuleren.

Van de Laevo is bekend dat de maximale uitslag van de smart joint 120° is. Ook is de veer karakteristiek bekend figuur 11, hierin is te zien dat de veer karakteristiek niet lineair is dit komt omdat er gebruik gemaakt wordt van een Cam profiel in de zo genoemde smartjoint van de Laevo. Als de smartjoint een hoek van 40° bereikt is deze op zijn maximale moment (26 Nm per smart joint, 52 Nm per Laevo).



Figuur 11: smartjoint karakteristiek.

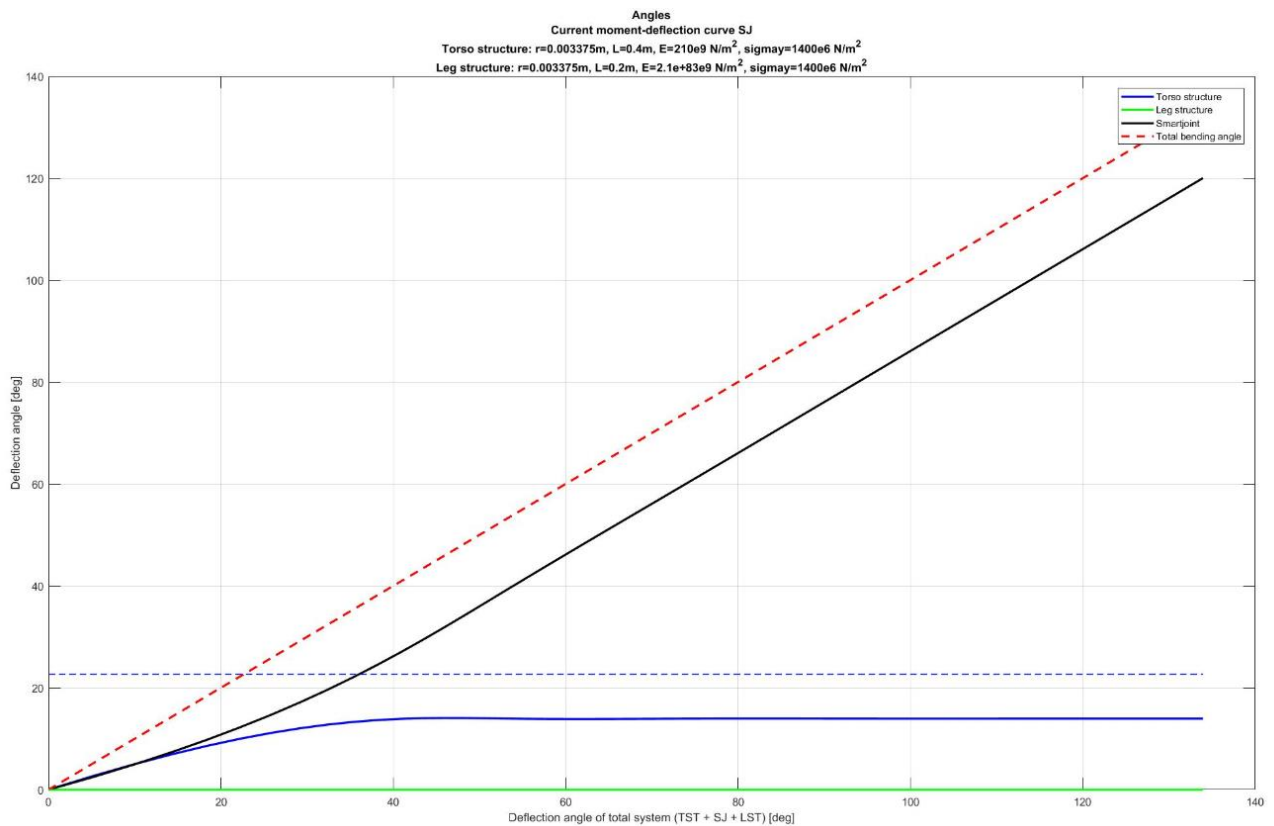
De speling van het vestje kan niet worden gemeten omdat er op het moment van schrijven (13-7-2020) geen werkend prototype van de nieuwste versie van de Laevo V3 aanwezig is waaraan dit getest kan worden. Er is gevraagd aan de ontwerper van het vestje een indicatie te geven van de speling, volgens de ontwerper is de speling ongeveer 10°.

De doorbuiging op de torso structuren van de Laevo V3 is berekend in Matlab, de Matlab code is toegevoegd in de bijlage. Het resultaat is te zien in figuur 12, 13 en 14. De figuren laten niet alleen de buiging van de Torso structuren zien maar ook de buiging van de smart joint.

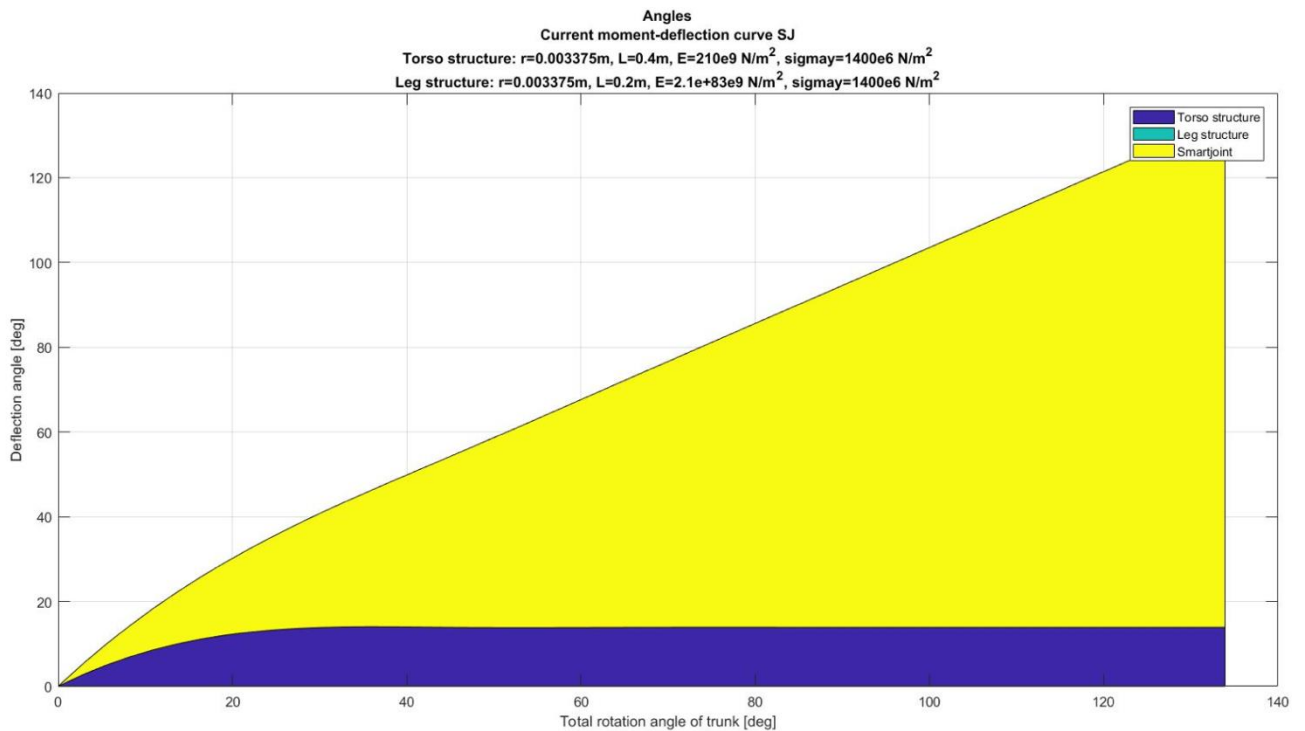
In het Matlab script worden de afmetingen van de structuren, leg pads en de veer karakteristiek van de gasveer van de Laevo en de eigenschappen van de materialen als variabelen gedefinieerd. De doorbuiging van de structuren is berekend met de volgende formule (een vergeet-me-nietje van mechanica): $\omega = \frac{Fl^2}{2EI}$. Het resultaat van deze formule is de doorbuiging in graden. Ook is in figuur 13 en 14 te zien in welke mate de structuren en de smartjoint bijdragen in de totale doorbuiging. De doorbuiging in de leg pad is niet meegenomen in deze berekeningen, daarom is deze in de grafieken te zien als oneindig stijf.

```
Torso Structure: maximum allowable deflection=22.6deg, current maximum deflection=14.1deg, percentage=62.1%
Leg Structure: maximum allowable deflection=0deg, current maximum deflection=0deg, percentage=62.1%
```

Figuur 12: Resultaat berekening structuur buiging.



Figuur 13: Berekende doorbuigen van structuren



Figuur 14: Berekende doorbuiging van structuren.

In de bovenstaande 2 figuren (13 en 14) is de verdeling van smart joint en structuur buiging geplot tegen een hoek verdraaiing.

De speling in het vestje is afhankelijk van het gewicht dat van de gebruiker van de Laevo draagt. Over deze speling in het vestje kan een aanname worden gedaan aan de hand van een eerder prototype van de Laevo V3. Ook is de ontwerper van het vestje gevraagd een indicatie te geven van de verwachte speling in het vestje.

5.2 Conclusie bewegingsanalyse

Uit de analyse is gekomen dat het bukken met de Laevo een belemmering geeft aan de gebruiker zie figuur 6&7, 8&9 met de bij behorende berekeningen 1 en 2. Er zijn testen gedaan om de belemmering te ondervinden door te bukken met en zonder Laevo. Ook is er aan de sales afdeling van Laevo gevraagd naar bevindingen van gebruikers van de Laevo, de gebruikers van de Laevo geven ook aan een belemmering te ondervinden tijdens het gebruik. Deze belemmering is niet groot $< 10^\circ$. De testopstelling moet 120° kunnen flecteren ten opzichte van de begin positie. De leg pad steunen moeten versteld kunnen worden in hoeken van -15° (adductie) tot -45° (abductie).

De flexie die plaats vindt in de structuren is maximaal 14° . Ook is er geconstateerd dat de structuur gaat buigen voor dat de smart joint gaat buigen.

5.3 Mechanisch systeem

In dit deel van de analyse gaat er onderzoek gedaan worden naar hoe de beweging die gekozen is in het eerste deel van de analyse gevangen kan worden in een mechanisch systeem.

Er wordt gekeken naar hoe de beweging er mechanisch uit ziet en hoe dit behaald gaat worden, daarom hangt dit deel van de analyse nauw samen met het volgende deel van de analyse (componenten/ onderdelen).

In het vorige deel van de analyse is vastgesteld dat een menselijke buk beweging met de Laevo bijna gelijk is aan de uiterste bewegingsslag van de smart joint (120°). Het is echter zo dat voor dat de smart joint gaat bewegen eerst de torso structuren vervormen, ook kan de gebruiker de stof van het vestje uittrekken wat ervoor zorgt dat de totale flexie licht tussen 130° en 145° .

Om de levensduur van de Laevo te verifiëren is het belangrijk om de smart joint over een zo lang mogelijke slag tot 120 graden te testen. De reden hiervoor is dat de opdrachtgever is een slag van 120° wil. Ook is het zo dat naarmate de slag groter, ook het moment groter wordt. Hierbij moet opgelet worden dat de smartjoint niet tegen de eindstop aan schiet met een grote snelheid omdat dit kan resulteren in het beschadigen en/of breken van de eindstop. Als de eindstop breekt dan resulteert dit in het vastlopen van de smart joint. Dit is ook geen goede representatie van de werkelijkheid aangezien een persoon die een bukbeweging maakt aan het einde van de bukbeweging afremt.

Om ervoor te zorgen dat tijdens het testen de smartjoint niet in de eindstop schiet wordt er gekozen om de levensduur testopstelling een slag te laten maken van 120° . De torso structuren van de Laevo maximaal 14° buigen tijdens het inveren van de Laevo. En het vestje geeft de gebruiker maximaal 10° speling, dit is afhankelijk van het gewicht van de gebruiker. Als de 14° van de buiging van de torso structuren en de maximaal 10° speling van het vestje van de 120 wordt afgetrokken dan kan de smartjoint getest worden over een range van: 96° .

Buiten dat de Laevo getest moet worden op voorwaarts bukken moet deze ook getest worden op zijwaarts bukken omdat dit een belasting geeft op het scharnier waarmee de smart joint vastzit aan de heupbeugel dan voorwaarts bukken.

De smart joint van de Laevo V3 zit met scharnieren vast aan de “heup beugel” (figuur 15). Dit scharnier zorgt ervoor dat de smart joint een hoek kan maken van -15° tot $+45^\circ$ vanaf de neutrale stand (-15° tot 0° adductie en 0° tot 45° abductie). Om deze redenen is ervoor gekozen om de hoek waarover de Laevo getest kan worden 60° te maken. -15° tot $+45^\circ$.

Om het zijwaarts buigen mechanisch te simuleren moet het torso gedraaid kunnen worden ten opzichte van de plek waar de leg pads op rusten of vice versa.

De flexie range van 96° en zijwaartse range van 60° ($+45^\circ$ tot -15°) is voorgelegd aan Laevo B.V.. Laevo B.V. is akkoord gegaan met dat de testopstelling de Laevo test over een flexie range van 96° en een zijwaartse range van 60° .

De kracht benodigd voor het buigen van het exoskelet in een hoek groter dan 40° is 26 Nm per smartjoint (Figuur 11). Een Laevo heeft 2 smartjoints, om een Laevo verder dan 40 graden te buigen is een kracht nodig van 52 Nm.



Figuur 15:
Scharnier smart
joint

Om op de kosten van het project te besparen wordt er gekeken of de aanwezige elektromotor voldoende vermogen heeft om het systeem aan te kunnen drijven. De eigenschappen van de motor worden hier kort weergegeven tabel 1, een link naar het datasheet is te vinden in de bijlage.

280 – 1400 rpm $\wedge$ 3 x 380 – 500 V (400 V)



Type	P _n [kW]	M _n [Nm]	M _a /M _n f > 5 Hz	n _n [rpm]	I _{n1} [A]	cos φ	J _{mot}		M _{Bmax} [Nm]	m ¹⁾ [kg]	m ²⁾ [kg]
							[10 ⁻⁴ kgm ²] without brake	[10 ⁻⁴ kgm ²] with brake			
DRE80M4 /../MM07	0.75	5.1	1.5	1400	1.9	0.99	21.5	23	10	16.4	19.4
DRE90M4 /../MM11	1.1	7.5	1.5	1400	2.4	0.99	35.5	40	20	20.5	25.1
DRE90L4 /../MM15	1.5	10.2	1.5	1400	3.5	0.99	43.5	48.5	20	23.6	28.1
DRE100M4 /../MM22	2.2	15	1.5	1400	5.0	0.99	56	62	28	29.2	35.2
DRE100LC4 /../MM30	3.0	20.5	1.5	1400	6.7	0.99	90	96	40	34.2	40.2
DRE132S4 /../MM40	4.0	27.3	1.5	1400	7.3	0.99	190	195	55	47.9	56.9

Tabel 1: Eigenschappen elektromotor.

De rood omcirkelde rij in de tabel in tabel 1 is de elektromotor die Laevo op voorraad heeft. Zoals te zien heeft deze motor een vermogen van 0.75kW of 750W. Als er gekeken wordt naar de oppervlakte onder de veer karakteristiek in figuur 11, is te zien dat dit 50 Joule is. Er zitten 2 smart joints in een Laevo zitten betekent dit dat om de smart joints volledig te buigen er 100 Joule aan energie nodig is. Er is bekend dat voor dat de smartjoints gaan bewegen, eerst de structuren buigen moet die energie worden meegenomen in een veiligheidsmarge. In het datasheet van de elektromotor is te vinden dat de motor een vermogen heeft van 750 Watt, dit is meer dan voldoende om de smart joints te kunnen buigen inclusief een veiligheidsmarge van 100%.

De huidige levensduur testopstelling draait op een snelheid van 20 omwentelingen per minuut. Dit toerental is geselecteerd om 2 redenen, 1: als de testopstelling te snel draait, worden de smart joints te warm en dit is geen goede representatie van de werkelijke levensduur. Reden 2 is dat als de frequentie van de motor te snel is, worden de veren in de Laevo op een niet reële snelheid opgespannen en dat geen goede representatie is van een werkelijke buiging.

Het koppel dat wordt afgegeven als de motor draait met een frequentie van 20 omwentelingen per minuut is: P = vermogen in Watt (750W/0.75kW), T = koppel in Nm, ω = hoeksnelheid in omwentelingen per seconde.

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{750}{2 \cdot \pi \cdot 20 / 60} = 358 Nm$$

Vergelijking 3: Berekening koppel elektromotor

De frequentie van de motor kan worden geregeld door een motor regelaar en de overbrengingsverhouding tussen het drijvende en gedreven v-snaar schijf. Verderop in dit hoofdstuk wordt besproken waarom de diameter van het gedreven wiel vast staat op 355mm. Er is een drijvende v-snaar schijf aanwezig van 190mm. Dit is een overbrengingsverhouding van: $i = \frac{D2}{D1} = \frac{35}{19} = 1.84$.

De volgende eigenschappen van de elektromotor zijn bekend:

Eigenschap	Waarde
Vermogen	750W
Snelheid drijvend wiel	20 omw/min
Overbrengingsverhouding	1.84
Koppel @ 20 omw/min	358Nm

Tabel 2: Eigenschappen elektromotor.

Met deze kennis kan het toerental van het gedreven wiel berekend worden:

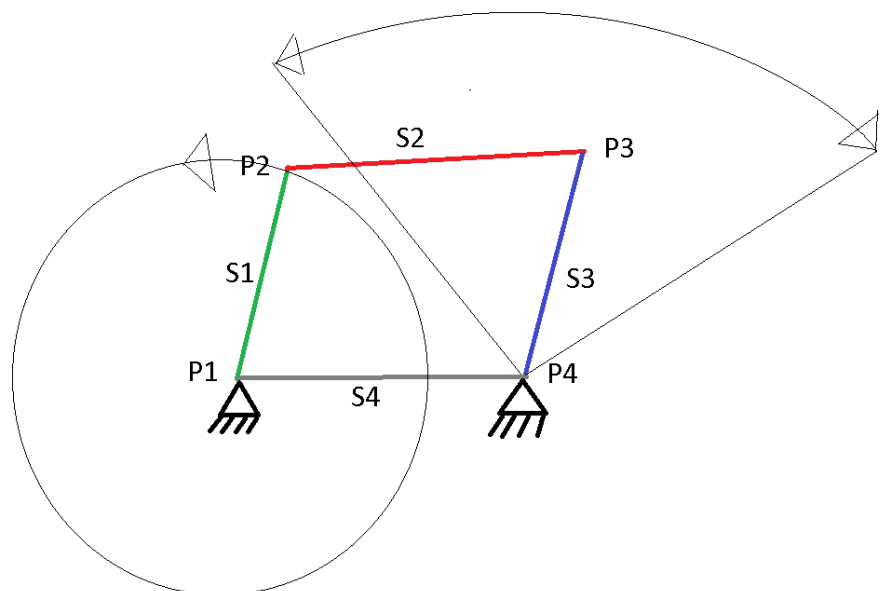
$$n_2 = \frac{n_1}{i} = \frac{20}{1.84} = 10.87 \text{ omw/min}$$

Om de beweging van de elektromotor om te zetten naar een beweging in het systeem is een overbrenging nodig. Omdat de beweging een kleine afstand moet overbrengen is het niet mogelijk een tandwielaandrijving te gebruiken. Ook is het gewenst dat op het moment dat het systeem vastloopt, de overbrenging gaat slippen om schade aan het systeem te voorkomen. Om deze reden zijn een ketting overbrenging en een tandriem niet ideaal voor de situatie. Uit de huidige situatie blijkt dat een v-snaar de beste oplossing is voor het probleem zonder sensoren toe te moeten voegen om het systeem stop te zetten als er iets misgaat. Dit is omdat een v-snaar overbrenging meer grip heeft dan een riemoverbrenging maar toch de mogelijkheid heeft te slippen als de belasting te groot wordt.

5.3.1 Vier stangen mechanisme

Om het systeem te laten bewegen wordt een vierstangenmechanisme gebruikt (figuur 16). Het systeem werkt volgens een crank-rocker mechanisme wat inhoudt dat structuur S1 360 graden draait (crank), dit veroorzaakt een heen en weer gaande (rocker) beweging van structuur S3. De bewegingsuitslag van S3 wordt bepaald door de verhouding van de lengtes tussen de structuren zie vergelijking 4.

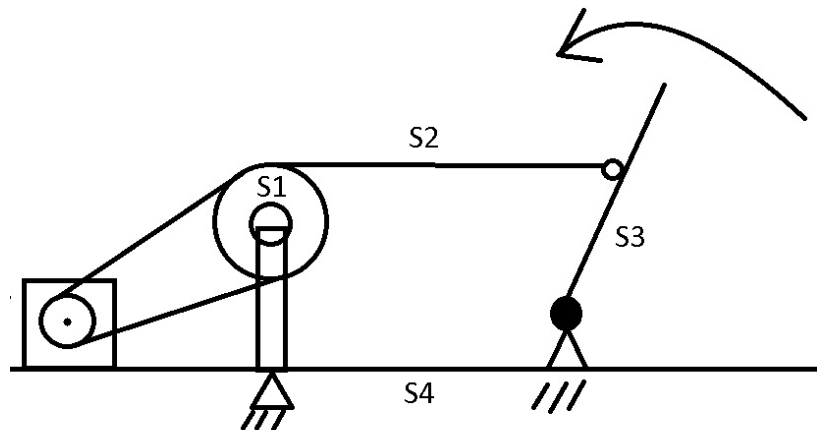
Hoe het vierstangenmechanisme zich vertaalt naar de machine is als volgt: Structuur S1 is de straal van het gedreven wiel van de elektromotor (figuur 16). Structuur S3 is waar de Laevo op gemonteerd wordt omdat dit het heen en weer gaande deel van het systeem is, de leg pads van de Laevo moeten aan de "wereld" worden vastgemaakt zodat deze een tegen moment kunnen leveren aan het moment dat het 4 stangen mechanisme creëert.



Figuur 16: crank-rocker vier stangen mechanisme.

S2 is een staaf die het gedreven wiel van de elektromotor met verbindt met structuur S3. S4 is de afstand tussen get gedreven wiel en S3.

Om de gewenste bewegingsuitslag te bepalen is een Matlab model gemaakt om te simuleren welke bewegingsuitslag de machine maakt met structuren van bepaalde lengtes. Ook laat het model de hoek en de hoeksnelheid zien over de tijd.



Figuur 17: schets testopstelling

the minimum angle is:
15.9928

the maximum angle is:
139.4489

the total angle is:
123.4560

In figuur 18 zijn resultaten te zien van het Matlab model te zien met structuren van de volgende lengtes: S1 = 177.5mm, S2 = 420mm, S3 = 250mm en S4 = 469mm. Voor een crank-rocker vierstangen mechanisme geldt:

$$S1 + S2 \leq S3 + S4.$$

Vergelijking 4: vergelijking crank-rocker vier stangen mechanisme

Figuur 18: resultaat Matlab script.

Dit betekent dat S1 + S2 kleiner moest zijn dan de som van S3 en S4 anders loopt het systeem vast.

5.3.2 Bevestiging Laevo

De Laevo V3 heeft 3 contactpunten met de gebruiker: zoals bekend is draagt de gebruiker een vestje (geel, figuur 19), een heup band (blauw, figuur 19) en zogenoemde leg pads (rood, figuur 19). De levensduur testmachine heeft 3 gelijke contactpunten nodig om de Laevo te ondersteunen.

Om het schuiven van het vestje op het contactpunt zo veel mogelijk te voorkomen moet het contactpunt de vorm hebben van een menselijk torso. Niet alleen vanwege het vestje aan de voorkant maar ook omdat aan de achterkant een profiel zit dat convex om de thoracale wervels gevormd is (figuur 20). Het vestje is als test op een torso pop gemonteerd om te kijken of dit een valide optie is voor het monteren (figuur 22), Het voordeel van een torso is dat het vestje makkelijk te monteren is op de machine. Het nadeel is dat het monteren van het torso op de machine.

Er zou ook een torso gemaakt kunnen worden van glasvezel en epoxy, het voordeel hiervan is dat deze naar een gewenste vorm en er montage punten in gemaakt kunnen worden. De nadelen hier van zijn de kosten en de tijd benodigd om het te fabriceren.



Figuur 19: bevestigingspunten Laevo.



Figuur 20: Vest van de Laevo V3.

De heup structuur die rust bij de gebruiker op de Crista iliaca (de bovenste rand van het bekken). Voor het af steunen van de heup structuur is slechts een rand nodig. Voor een betere bevestiging met de gebruiker heeft de Laevo “hip pads” figuur 21. Deze hip pads zitten op de gluteus maximus van de gebruiker en hip pads zitten aan de voorkant vast met een sluiting.

Om het heup structuur vast te maken is er een convexe vorm nodig om de hip pads grip te geven.

Ook is het belangrijk dat de heup structuur bij het scharnierende punt in de testopstelling zit. Dit omdat het scharnierende punt in de testopstelling een representatie van de heup. Voor een optimale werking van de Laevo moet de smartjoint op deze “as” gemonteerd worden.



Figuur 21: Heupbeugel van de Laevo.

Zoals eerder vastgesteld komt de rotatie tijdens het bukken met de Laevo vanuit de benen, om deze reden is er gekozen om de contactpunten van de leg pads verstelbaar te maken. Deze punten moeten niet verbonden zijn met het bewegende deel van de machine anders kunnen de structuren en de gasveren in de smartjoint geen energie opslaan. De reden dat de contactpunten van de leg pads verstelbaar worden gemaakt is om het zijwaarts bukken met de Laevo te kunnen simuleren.



Figuur 22: Vest van de Laevo op torso.

5.4 Conclusie mechanisch systeem

Uit dit hoofdstuk zijn de volgende punten gekomen:

- De aanwezige elektromotor heeft voldoende vermogen om het systeem te kunnen bewegen.
- De overbrengingsverhouding tussen de elektromotor en het gedreven v-snaar wiel is bepaald.
- De werking van het vierstangen mechanisme is besproken en de maten van het 4 stangen mechanisme zijn berekend.
- De punten waar de Laevo moet worden vastgemaakt op het systeem zijn besproken.
- De bewegingen van het systeem zijn besproken en goedgekeurd door het bedrijf.

5.5 Componenten/ onderdelen

Als er bekend is hoe de beweging mechanisch gemaakt kan worden, gaat er worden onderzocht naar welke componenten/ onderdelen er gebruikt moeten gaan worden om de beweging te kunnen maken.

Voor er een ontwerp/schets gemaakt kan worden is het belangrijk om te weten welke onderdelen/ componenten er verwerkt moeten worden in het ontwerp. Om overzicht te behouden tijdens het zoeken van onderdelen wordt er naar de volgende punten gekeken:

- De aandrijving.
- Het frame.
- Bevestiging voor de Laevo.

De aandrijving

De aandrijving die gebruikt gaat worden tijdens dit project is een: SEW-eurodrive R27DRE80M4 0.75kW. Als overbrenging gaat een v-snaar gebruikt worden. Met behulp van het Matlab model (zie bijlage: Matlab script four bar linkage) is de straal van het gedreven wiel van de elektromotor berekend, de straal is 177.5mm en de diameter is 355mm.

De lengte van de v snaar wordt berekend tijdens het maken van het ontwerp. Welk type v-snaar er gebruikt gaat worden is afhankelijk van de lengte.

De v-snaar poelie die aanwezig is voor het drijvende wiel, is een poelie met SPA-profiel en een diameter van 190mm. Voor de gedreven poelie is een wiel nodig met een diameter van 355mm. Het is belangrijk dat beide poelies hetzelfde profiel hebben. Als de poelies een SPA-profiel hebben kunnen deze werken met zowel een SPA als XPA v-snaar. De v-snaar moet ook een SPA of XPA-profiel hebben. De SPA of XPA is een gestandaardiseerde maat voor de breedte van de v-snaar wielen en de v-snaar.

Het frame

Het frame wordt opgebouwd uit profielen van het merk Aluxprofielen. Deze profielen zijn makkelijk met elkaar te verbinden met verschillende bevestigingsmethodes. Ook hebben deze profielen een grote hoeveelheid accessoires die makkelijk gemonteerd kunnen worden.

Eigenschappen van 40x40 profielen zijn: I_x en $I_y = 72604mm^4$, W_x en $W_y = 3630.20mm^3$. Met deze waarden plus de elasticiteitsmodules ($70\text{ Gpa} = 70000\text{ Mpa} = 70000\text{ N/mm}^2$) van het materiaal: en aw-6060 t66.

Bevestiging van de Laevo

Voor het bevestigen van de Laevo zijn 3 contactpunten nodig die ervoor zorgen dat de Laevo tijdens het testen zo stabiel mogelijk blijft. Een andere reden waarom de Laevo op de 3 contactpunten bevestigd moet worden is omdat op de huidige situatie de Laevo V2 aan de testopstelling wordt vastgemaakt. Dit geeft als resultaat dat alleen de structuren en de smartjoints getest worden. Door de Laevo op 3 punten vast te maken wordt de Laevo in het geheel getest.

6 Eisen en wensen

Aan de hand van de analyse en de eisen van Laevo B.V. is het pakket van eisen en wensen opgesteld. Dit pakket van eisen en wensen is besproken met en goedgekeurd door het R & D team van Laevo.

6.1 Eisen

- Testopstelling kan de Laevo een Flexie beweging laten maken van 120°
- Levensduur van de machine: > 10.000.000 cycli
- Voldoet aan de ARBO-normen

Algemeen

- o Geen gevaar voor bekneeld raken.
 - o Geen gevaar vastraken.
 - o Geen gevaar voor (af)snijden.
 - o Geen gevaar voor opgesloten raken.
 - o Geen gevaar voor elektrische schok.
 - o Geen gevaar voor lawaai.
-
- Kosten binnen het budget (€1000)
 - Teller voor het aantal buigingen
 - Voor de Laevo V3
 - o Ruimte voor rug structuren
 - o Vestje kan vastgezet worden
 - Frame bestaat uit standaard profielen
 - Gebruik van de aanwezige elektromotor
 - o De elektromotor heeft een minimaal vermogen van 200W.
 - Zijwaarts bukken moet kunnen worden gesimuleerd
 - o Het zijwaarts bukken wordt gesimuleerd door verstelbare leg pad steunen.
 - o Verstelbaar over een hoek van 60° (+ 45° en – 15°).

6.2 Wensen

- Kan gebruikt worden voor de Laevo V2.58
- Sensoren
 - o Sensoren voor het detecteren van de kracht op de leg pad steunen en het torso
 - o Sensoren voor het detecteren van een kapot onderdeel om de machine te stoppen
- Lopen kan worden gesimuleerd.
- De testopstelling moet passen in een oppervlakte van 1 bij 2m.

7 Ontwerp

Aan de hand van het pakket van eisen en wensen kan er begonnen worden met het ontwerpen van de testopstelling. Voor het ontwerp moet er aan een aantal punten aandacht worden besteed:

- Schetsen
- Berekeningen aan het frame
-

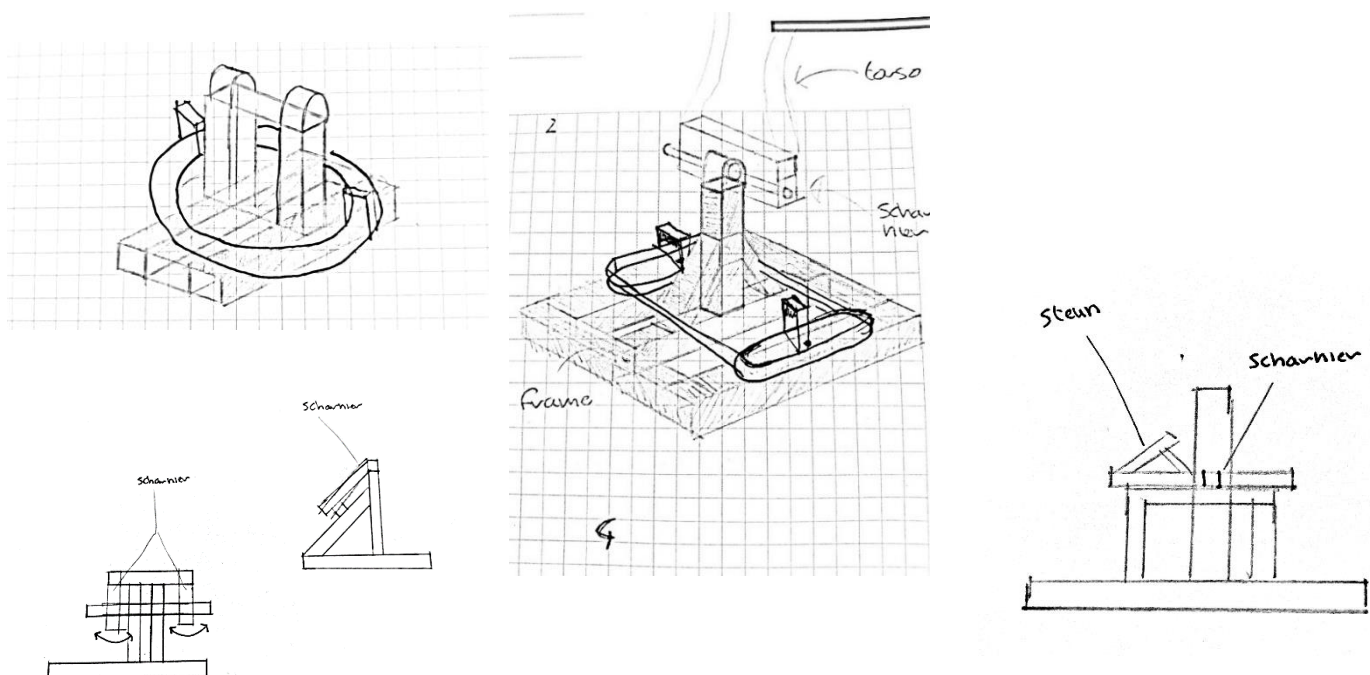
7.1 Schetsen

Nu er bekend is hoe het systeem wordt aangedreven, op welke contactpunten de Laevo moet worden vastgemaakt op het systeem, welke hoeken de leg pads moet kunnen maken om de krachten tijdens het zijwaarts bukken te kunnen simuleren kan er begonnen worden met het ontwerpen van het systeem dat aan deze eisen voldoet.

Een van de eisen van de testopstelling zijn de afmetingen. De testopstelling moeten in een oppervlakte van 1 bij 2m passen omdat de ruimte waar de testopstelling geplaatst wordt niet groot is en daar meerdere levensduur testopstellingen staan. Het is uiteraard belangrijk dat dit niet ten kosten gaat van de stabiliteit en sterkte van de opstelling.

Er moeten schetsen gemaakt worden voor verschillende onderdelen van het frame: de leg pad steunen, deze moeten een minimale hoek kunnen aannemen van -15° 'adductie' (naar binnen) en maximale 45° 'abductie' (naar buiten)

Er zijn een aantal ideeën geschetst voor de leg pad steunen. De schetsen worden beoordeeld op de hoeveelheid materiaal dat nodig is en het gebruiksgemak. Als de schetsen op deze argumenten beoordeeld worden, komt schets 2 als beste naar boven omdat deze het minste materiaal nodig heeft en het makkelijk in gebruik is. Een ander voordeel van schets 2 is dat de leg pad steunen los van elkaar veresteld kunnen worden wat betekend dat de scharnieren van de smartjoints op verschillende manieren belast kunnen worden.



Figuur 23: Schetsen leg pad steunen.

Aan het begin van de opdracht is een van de oude testopstelling aangepast zodat deze te gebruiken is met een oude versie van Laevo die geüpgraded kan worden met een vest. Het resultaat hiervan is te zien in figuur 24. Hiervoor is een plastic torso gebruikt, onder het torso zijn 2 verticale profielen geplaatst ter versteviging.

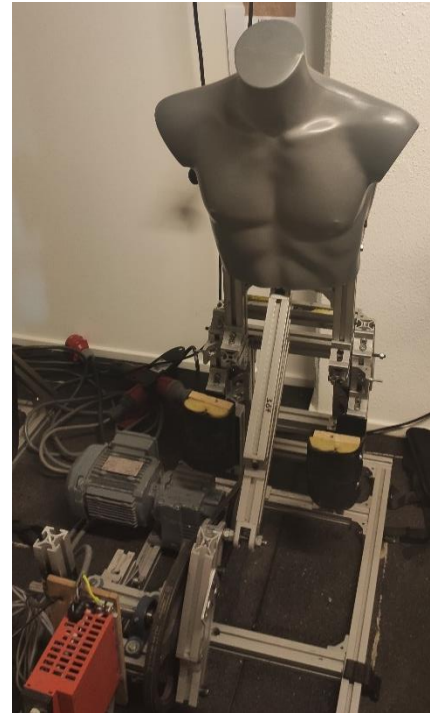
Deze manier van het bevestigen van de Laevo aan de testopstelling heeft een aantal voordelen:

- Het vest wordt belast zoals deze in de werkelijkheid belast gaat worden.
- Het is torso is goedkoop.
- Het torso is makkelijk te bevestigen op de machine.

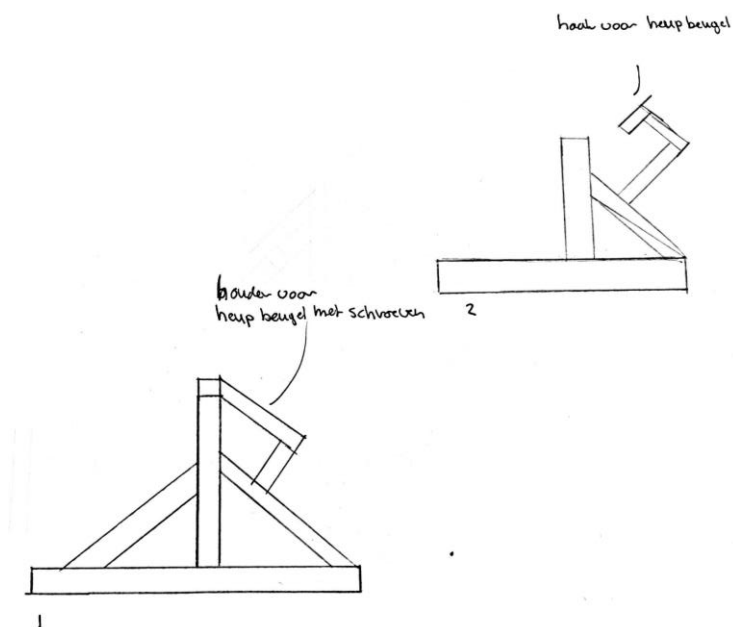
Het gebruik van een torso al is toegepast op de huidige testopstelling, de conclusie van deze "upgrade" aan de aanwezige testopstelling is dat dit goed werkt. Dit concept gaat ook gebruikt worden op de nieuwe testopstelling.

Als de heupbeugel bevestigd is op de testopstelling is het belangrijk dat de as van de smart joint gelijk ligt met de as van de testopstelling, als dit niet het geval is wordt de as van de smart joint schuin belast, dit is niet hoe de Laevo in de werkelijkheid belast wordt.

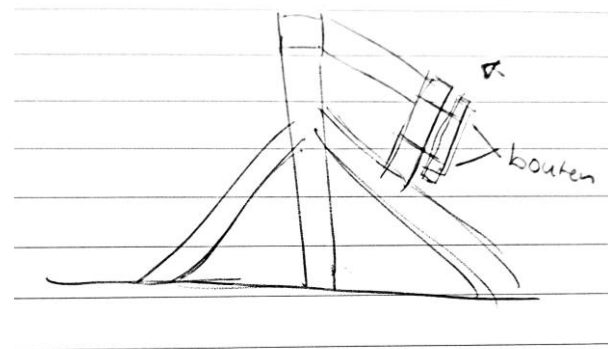
Er is besproken hoe de leg pads en het vestje van de Laevo gemonteerd gaan worden op de testopstelling. Het laatste punt waar de Laevo gemonteerd moet worden is de heup beugel. Voor de heupbeugel mount zijn schetsen gemaakt.



Figuur 24: Torso op "oude" testopstelling.



Figuur 26: Schetsen heupbeugel.



Figuur 25: Heupbeugel schets

Er wordt voor optie 3 gekozen omdat bij dit concept de heupbeugel van de Laevo wordt vastgezet met itemprofielen en bouten, van alle concepten is dit de sterkste verbinding. Voor dit concept zijn in vergelijking met concept 1 slechts 2 extra stukken profiel nodig.

Voor het frame is het belangrijk dat de structuren van de Laevo nergens tegen aan kunnen stoten of achter kunnen blijven haken wat voor schade aan de Laevo of de testopstelling kan zorgen.

Dit kan echter niet bij de nieuwe testopstelling omdat hierdoor geen abductie en adductie gesimuleerd kan worden omdat deze onderdelen niet kunnen bewegen.

Om deze redenen is er gekozen om het frame een T-vorm te geven aan deze T-vorm kunnen structuren worden bevestigd die ab en adductie kunnen simuleren. Verder heeft een T-constructie weinig materiaal nodig, het T-frame wordt ondersteund door profielen onder hoek van 45°.

7.2 Berekeningen aan het frame

Aan de hand van de schetsen is een nieuwe testopstelling ontworpen. De testopstelling moet niet bezwijken onder de krachten die op het systeem komen te staan. Om deze reden wordt doormiddel van berekeningen gekeken of de testopstelling de krachten kan weerstaan.

De profielen die gekozen zijn voor dit project hebben de volgende eigenschappen:

Mechanische specificaties			
Materiaal	EN 572-3		EN-AW 6063 T66
Conditie	EN 515		T66
Rp0,2	[N/mm²]		>= 200
Rm	[N/mm²]		>= 245
A	[%]		>= 8
A 50	[%]		>= 6
Hardheid	[HB]		>= 80
Technische specificaties			
Oppervlakte doorsnee		[mm²]	477,60
Omvang buitencontour		mm	337,80
Zwaartepunt	X	[mm]	19,99
	Y	[mm]	19,99
Traagheidsmoment			
2. graad horizontaal	IX	[mm⁴]	72604,00
2. graad verticaal	IY	[mm⁴]	72604,00
Weerstandsmoment	WX max	[mm³]	3630,20
	WX min	[mm³]	3630,20
	WY max	[mm³]	3630,20
	WY min	[mm³]	3630,20
Nominaal - Gewicht (ca. +/-)	KG	[kg/m]	1,294

Figuur 27: Eigenschappen van aluminium 40x40mm profielen van Aluxprofielen

De profielen kunnen belast worden tot 200 N/mm².

7.2.1 V-snaar wiel

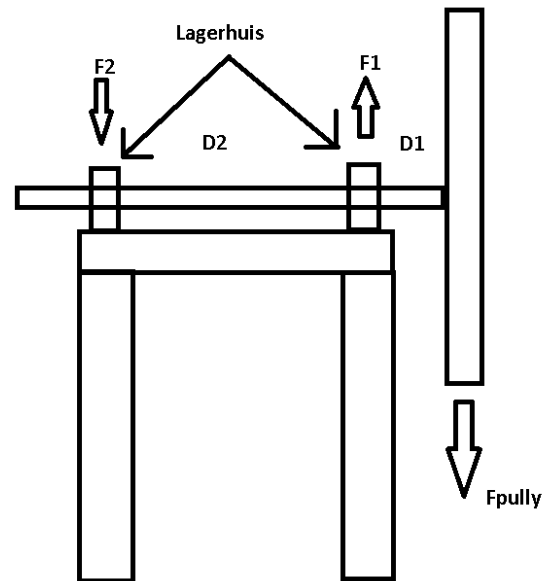
De gedreven v-snaar schijf heeft een gewicht van 5.4 KG. Het v-snaar wiel wordt op een verhoging geplaatst. Een schets van de situatie:

Het materiaal van de as is X5CrNi18-10 (1.4301) stainless steel dit materiaal heeft een treksterkte van 600 tot 850 N/mm² voor assen met een diameter van 16mm tot 40mm. Dit is de uiterste treksterkte, de as is dynamisch belastbaar tot 190 N/mm².

Omdat deze op een verhoging komt worden de maten van de verhoging berekend om er zeker van te zijn dat dit onderdeel niet kapotgaat.

Er worden berekeningen gemaakt om te kijken of de as niet door buigt en of de bouten waarmee de lager huizen en profielen niet plastisch vervormen/breken.

Voor deze berekening moet worden meegenomen dat op een moment in tijd de 208N die op de v-snaar staat naar beneden gericht is, daarom wordt met deze kracht gerekend. D1 = 35mm, D2 = 120mm.



Figuur 28: gedreven v-snaar wiel frame.

$$F_z = 5.47 * 9.81 = 53.66N$$

$$F_{tot} = 208 + 53.66 = 261.66N$$

$$F_2 * 120 = F_{tot} * 35$$

$$F_2 = \frac{261.66 * 35}{120} = 76.3175N$$

De bovenstaande berekening toont de kracht die nodig is om het lager huis op de plaats te houden. Als ervan uit wordt gegaan dat de lager huizen en het frame oneindig stijf zijn dat betekent dat de kracht op de as 261.66N is en het moment is $261.66 * 35 = 9158.1 \text{ Nmm} = 9.158 \text{ Nm}$.

Als de kracht verdeeld wordt over de oppervlakte van de as wordt de belasting van de as in N/mm² berekend. De oppervlakte wordt berekend door: $\frac{\pi}{4} 20^2 = 314.16 \text{ mm}^2$ als de kracht op de as gedeeld wordt door de oppervlakte wordt de kracht per mm² berekend: $\frac{261.66}{314.16} = 0.83 \text{ N/mm}^2$. Er is dus genoeg veiligheidsmarge.

7.2.2 Lagers

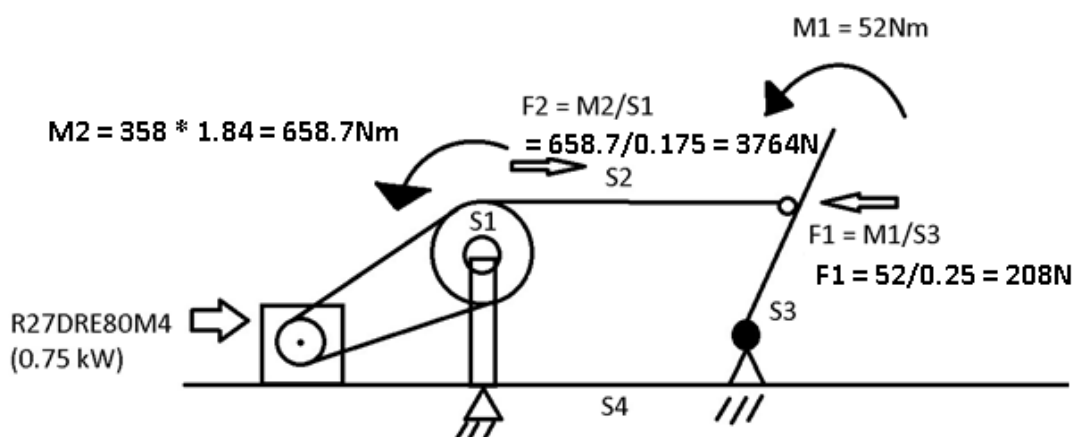
De lagers waarmee de v-snaar wielen worden gemonteerd zijn span lagers van SKF. Deze lagers hebben een klemschroef waarmee de as vastgezet kan worden. De klemschroef is de reden dat voor dit type lager gekozen is.

De levensduur L_{10} van het lager kan berekend worden met de volgende formule: $L_{10} = (C/P)^p = (12700/261.66)^3 = 115209$ De levensduur L_{10} is de levensduur van het lager met een 10% faalkans uitgedrukt in 10^6 omwentelingen. Ook wordt er uitgegaan van de maximale kracht op het lager.

In de verbinding van het torso frame zitten kogellagers. De volgende levensduur berekend: $L_{10} = (C/P)^p = (5400/117.72)^3 = 96523$

7.2.3 Aandrijving

Door het vier stangenmodel zijn de maten bekend om de nodige bewegingsuitslag te halen. Nu kan er gekeken worden of de huidige motor en de maten genoeg moment kunnen leveren om de Laevo te buigen.



Figuur 29: Berekende krachten en momenten.

Het koppel van de elektromotor is berekend in het vorige hoofdstuk: 358 Nm zie vergelijking 1. Ook is de overbrengingsverhouding berekend op basis van de diameter van de 2 poelies zie berekening X. met deze gegevens kan het moment om het gedreven wiel berekend worden: $T_2 = T_1 * i = 358 * 1.84 = 658.7 \text{ Nm}$.

De kracht nodig om de Laevo te buigen in het huidige maten is: $F_1 = \frac{M_1}{S_3} = \frac{52}{0.3} = 173 \text{ N}$. Het moment en de diameter van het gedreven wiel is bekend, hiermee kan de kracht berekend worden waarmee er vanaf de linker kant aan structuur S2 getrokken wordt: $F_2 = \frac{M_2}{S_1} = \frac{658.7}{0.175} = 3764 \text{ N}$. Hieruit kan worden opgemaakt dat er met de huidige situatie genoeg kracht is om de Laevo te buigen. Er moet wel rekening mee worden gehouden dat in de bovenstaande berekeningen geen rekening is gehouden met slip van de v-snaar. Om slip te voorkomen is een extra v-snaar wiel aangebracht om de v-snaar mee op te spannen wat ervoor zorgt dat slip verminderd wordt. Over het opspannen van de v-snaar wordt later meer informatie gegeven.

Voor het bepalen van de v-snaar moeten een aantal berekeningen worden gedaan. Eerst wordt er een inschatting gedaan worden van de hart afstand tussen de 2 v-snaar wielen, met deze indicatie kan een lengte van de v-snaar berekend worden, omdat een v-snaar geleverd wordt in verschillende gestandaardiseerde maten, wordt er gekeken naar welke gestandaardiseerde lengte het kleinste verschil heeft met de berekende waarde. Als een v-snaar gekozen is wordt een nieuwe hart afstand berekend naar de lengte van de v-snaar.

Als indicatie van de hartafstand worden de diameters van beide v-snaar poelies bij elkaar opgeteld: $h_v = 190 + 355 = 545\text{mm}/54\text{cm}$. Omdat de v-snaar opgespannen moet worden wordt er bij deze berekende waarde een extra marge bij opgeteld.

Voor hart afstand tussen de drijvende en de gedreven poelie wordt een aanname gedaan. De lengte van de v-snaar wordt berekend met de aanname die gedaan is. De berekende waarde wordt vergeleken met dichtstbijzijnde gestandaardiseerde lengte van verkrijgbare v-snaren: variabelen voor deze formule: $D_w = 350\text{mm}$, $d_w = 190\text{mm}$, $h_v = 585\text{mm}$.

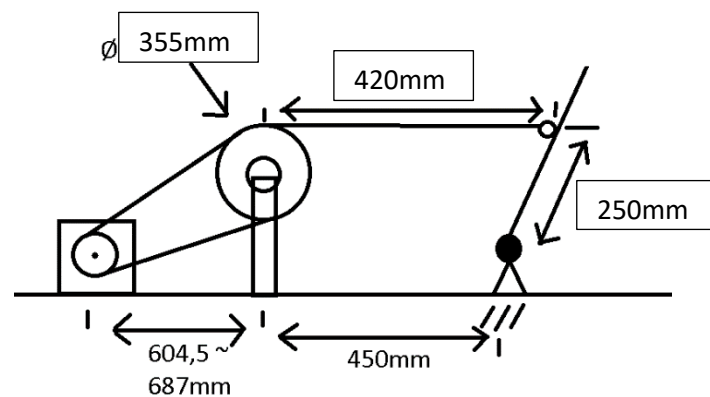
$$l_b = 2 * h_v + 1.57 * (D_w + d_w) + \frac{(D_w - d_w)^2}{4 * h_v}$$

$$l_b = 2 * 585 + 1.57 * (355 + 190) + \frac{(355 - 190)^2}{4 * 586} = 2037\text{mm}$$

Nu de berekende lengte van de v-snaar bekend is, kan er worden gekeken naar de dichtstbijzijnde gestandaardiseerde waarde. De dichtstbijzijnde lengte is: 2000mm. Nu de lengte van de v-snaar bekend is kan de uiteindelijke hartafstand tussen de 2 v-snaar wielen bepaald worden:

$$h_{kort} = h_v + \frac{l - l_b}{2} = 585 + \frac{2000 - 2037}{2} = 566.5\text{mm}$$

Nu de maten van het vier stangenmechanisme en de hart afstand van tussen het drijvende en gedreven wiel bekend zijn (zie figuur 30) en bekend is dat de SEW R27DRE80M4 voldoende vermogen heeft om het systeem met Laevo te buigen kan er aan de hand van de gemaakte schetsen een ontwerp gemaakt worden. Het ontwerp gaat in Onshape gemodelleerd worden.



Figuur 30: Ontwerp met maten.

De elektromotor moet worden vastgezet op de profielen, dit wordt gedaan doormiddel van bouten en inschuifmoeren in de volgende berekeningen wordt gekeken welke sterkte klasse de bouten moeten hebben. Er is bekend dat de bouten die gebruikt gaan worden M8 bouten zijn omdat dit de grootste maat is van de inschuifmoeren.

Om de trekkracht op de bout te berekenen wordt de volgende bewegingsvergelijking opgesteld:

$$F_{snaar} * L_1 = F_t * L_2 * 2$$

$$F_t = \frac{F_{snaar} * L_1}{L_2 * 2} = \frac{208 * 90}{110 * 2} = 85N$$

De motor zit bevestigd met 4 bouten 2 waar een trekkracht op komt en 2 waar een druk kracht op te staan. De berekende 85N is de trekkracht de elke bout moet kunnen opnemen. Op basis van deze kracht kan bevestigingsmateriaal gezocht worden. Er moet wel rekening mee worden gehouden dat de bouten dynamisch belast worden omdat de richting van de trek en drukkracht veranderd gedurende het draaien van de motor, hiervoor moet een veiligheidsmarge in acht worden genomen.

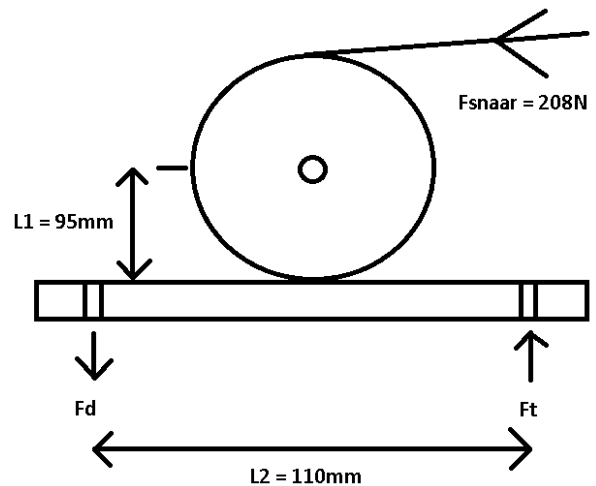
De motor staat op een verhoging, deze verhoging wordt op dezelfde manier op trek en druk en druk belast als de balk waar de motor op bevestigd is. De benodigde trekkracht om het motor frame op de plaats te houden is afgeleid uit de volgende vergelijking:

$$F_{snaar} * D_1 = F_t * L_1 * 2$$

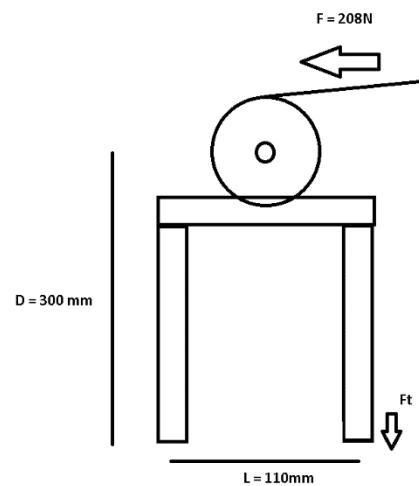
$$F_t = \frac{F_{snaar} * L_1}{L_2 * 2} = \frac{208 * 300}{110 * 2} = 283.6N$$

7.2.4 Verbinding as

De verbinding tussen de trekkende en duwende stang en het v-snaar wiel van de testopstelling moet niet breken onder de druk en trekkracht. De kracht die door deze stang gaat is 208N voor berekening zie figuur 32.

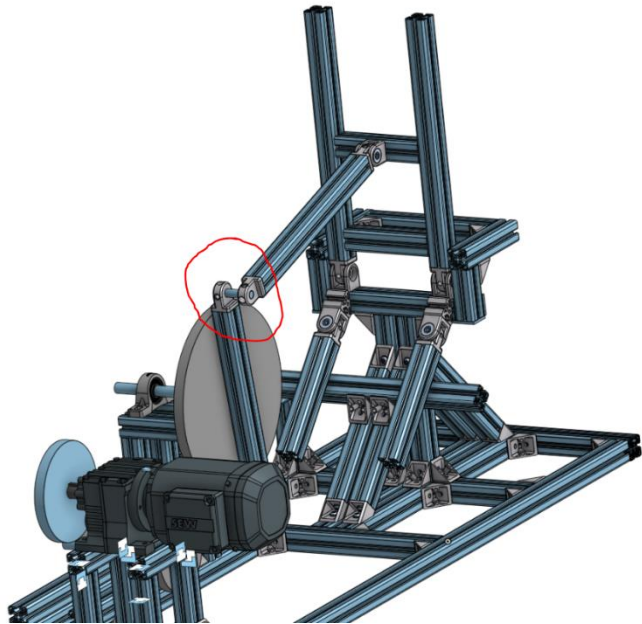


Figuur 31: Krachten op de elektromotor



Figuur 32: Krachten op het motor frame.

De normaalspanning kan worden berekend met de volgende formule: $\sigma = \frac{F}{A}$. Deze verbinding kan gemaakt worden door een bout of door een as. Beide verbindingmanieren hebben hun voor- en nadelen. Het voordeel van het gebruik van een bout is dat deze makkelijk te bevestigen is doormiddel van het schroefdraad, dit is ook het nadeel ervan. Het schroefdraad zal gaan slijten op de contactpunten. Omdat de levensduur van de machine voorop staat gaat er gekozen worden voor het gebruik van een as. Er worden een aantal berekeningen gemaakt om te kijken welke krachten de as moet kunnen absorberen, aan de hand van deze berekeningen kan het materiaal voor de as gekozen worden.



Figuur 33: As tussen het v-snaar wiel en het torso frame.

Normaalspanning:

$$A = \frac{\pi}{4} * 12^2 = 113 \text{ mm}^2$$

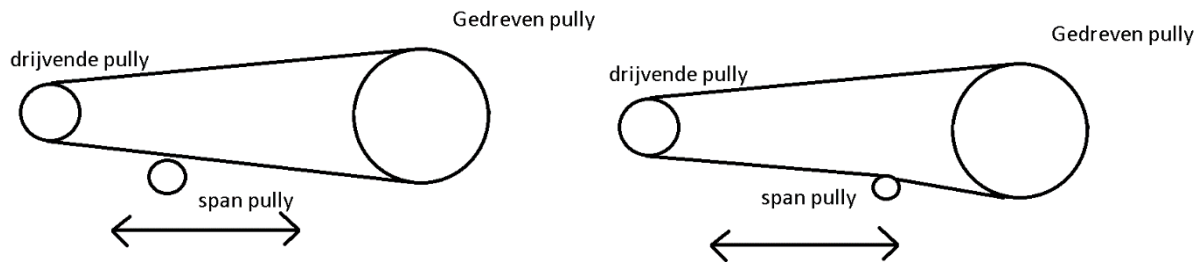
$$G = \frac{F}{A} = \frac{208}{113} = 1.84 \text{ N/mm}^2$$

Buigspanning:

$$I = \frac{\pi * 12^4}{4} = 65144 \text{ mm}^4$$
$$\sigma_b = \frac{m_b * y}{I} = \frac{7072 * 6}{65144} = 0.65 \text{ N/mm}^2$$

7.3 Opspannen van de v-snaar

Met de huidige levensduur testopstelling doet zich een probleem voor waarbij als er Laevo's getest worden met hogedruk gasveren (140/180 bar) de v-snaar kan gaan slippen op de v-snaar wielen. Dit komt omdat bij de huidige opstelling geen manier om makkelijk de v-snaar op te spannen. Met het nieuwe ontwerp is hiermee wel rekening gehouden. In figuur 34 is aangegeven aan hoe dit toegepast gaat worden. Er wordt gebruik gemaakt van een 3^{de} v-snaar wiel, deze is over horizontale afstand te verplaatsen langs de v-snaar. Een van de eisen is dat het drijvende en gedreven wiel op een gelijke hoogte zitten met hartafstand. Als de span wiel meer naar het

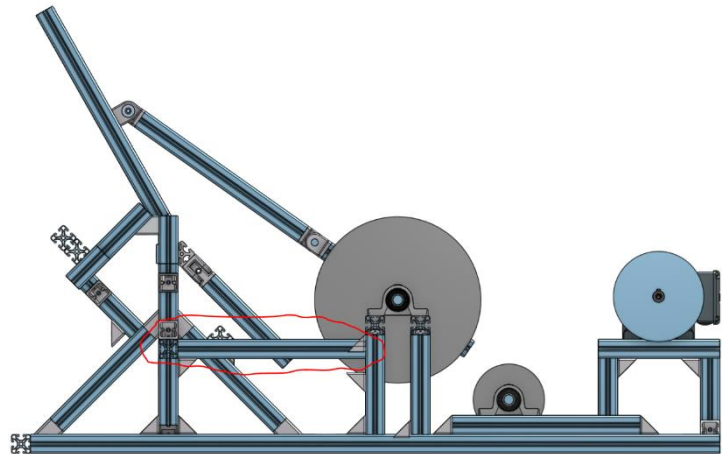


Figuur 34: Manier opspannen van de v-snaar

7.4 Verstevinging van het frame

Uit ervaringen van de oude testopstellingen blijkt dat er in het frame tussen de gedreven v-snaar wiel en het torso waar de Laevo op vastgemaakt wordt een versteving gemaakt moet worden tegen het “vouwen” van het frame. Het “vouwen” van het frame in de oude opstelling gebeurt tijdens het opspannen van de gasveren van de Laevo.

Om dit tegen te gaan wordt er een profiel aangebracht tussen het frame van de v-snaar wiel en de standaard van de bewegende stang. Zie figuur 35.

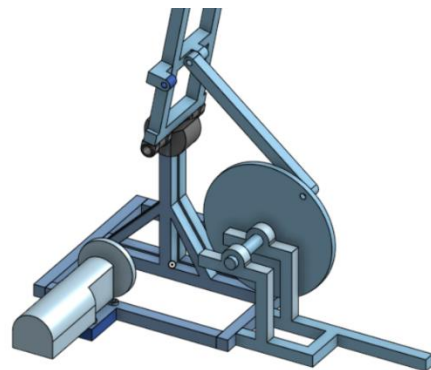


Figuur 35: Ontwerp van het nieuwe frame met versteving

7.5 Eind ontwerp

Er zijn 2 versies gemaakt van hetzelfde ontwerp. De eerste versie is gemaakt om alle maten in beeld te krijgen. Ook Kunnen in Onshape zogenaamde “revolute” mate worden gemaakt, dit zijn mates die kunnen draaien. Met behulp van deze revolute mate kan in Onshape de werking van het systeem gesimuleerd worden.

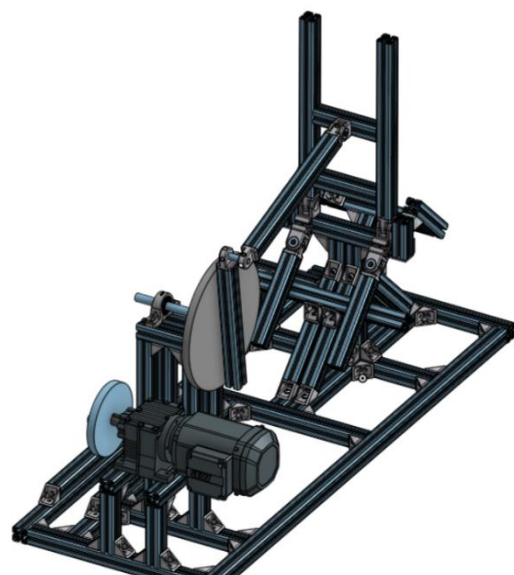
In de eerste versie (figuur 36) zijn geen geïmporteerde bestanden en componenten gebruikt. De eerste versie was voor het testen om te kijken of de slag van 120° daadwerkelijk behaald wordt.



Figuur 36: Eerste versie ontwerp.

Aan de hand van het “schets” ontwerp zijn in de 2^{de} versie (figuur 37) van bijna alle benodigde componenten de 3D bestanden geïmporteerd. Onderdelen die niet geïmporteerd zijn in het 2^{de} ontwerp zijn: de v-snaar wielen en de assen, de assen voor de v-snaar wielen worden op maat gemaakt, dit zijn geen standaard onderdelen. Van de v-snaar wielen waren geen 3D bestanden te verkrijgen van de leverancier. Hier voor zijn place holders gebruikt.

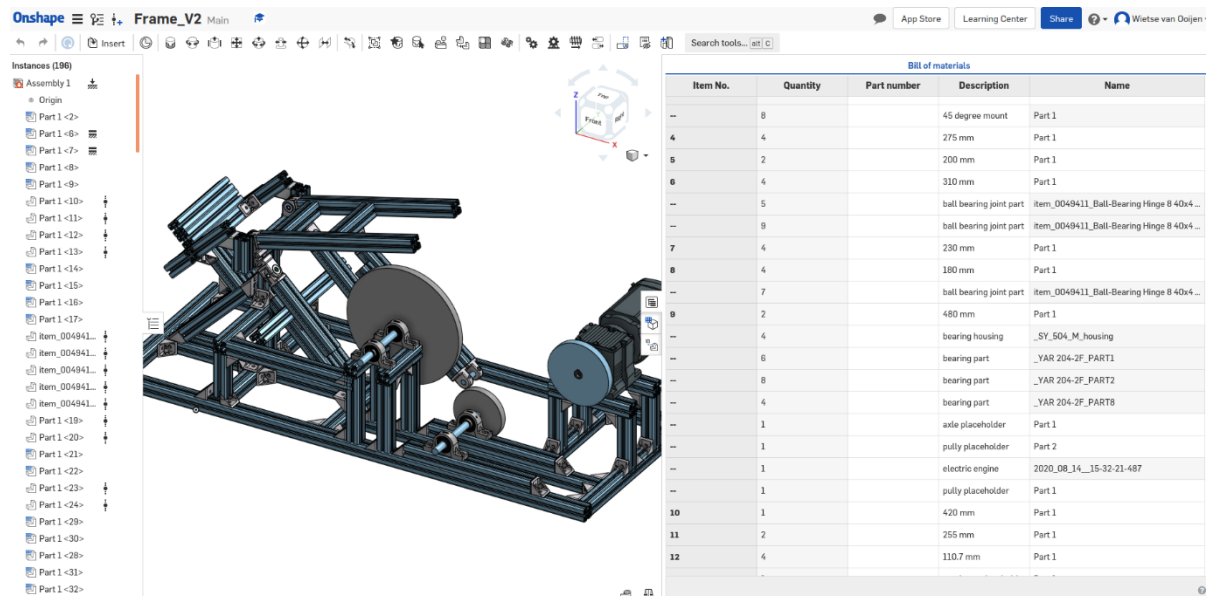
Het voordeel van het gebruik van geïmporteerde componenten is dat in combinatie met BOM functie van Onshape is dat er makkelijk een bill of materials gemaakt kan worden.



Figuur 37: Eindontwerp gemaakt in Onshape.

7.6 BOM

Nu de hele constructie is doorgerekend kan er een BOM (bill of materials) gemaakt worden. In de assembly mode van Onshape is een BOM-functie aanwezig (zie figuur 38) deze functie geeft weer hoeveel en welke onderdelen gebruikt zijn. Omdat In het ontwerp bijna alle onderdelen zijn geïmporteerd wordt er door deze functie bijna een complete bill of materials gemaakt.



The screenshot displays the Onshape software interface. On the left, a 3D assembly model of a mechanical system is shown, featuring a motor, pulleys, and a frame. The central panel shows the 'Bill of materials' table, which lists the components and their quantities. The right panel shows the 'Instances' list, which includes the assembly and its sub-components.

Item No.	Quantity	Part number	Description	Name
1	8		45 degree mount	Part1
2	4		275 mm	Part1
3	2		200 mm	Part1
4	4		310 mm	Part1
5	5		ball bearing joint part	item_0049411_Ball-Bearing Hinge 8 40x4 ...
6	8		ball bearing joint part	item_0049411_Ball-Bearing Hinge 8 40x4 ...
7	4		230 mm	Part1
8	4		180 mm	Part1
9	7		ball bearing joint part	item_0049411_Ball-Bearing Hinge 8 40x4 ...
10	2		480 mm	Part1
11	4		bearing housing	_SY_504_M_housing
12	6		bearing part	_YAR 204-2F_PART1
13	8		bearing part	_YAR 204-2F_PART2
14	4		bearing part	_YAR 204-2F_PART8
15	1		axle placeholder	Part1
16	1		pully placeholder	Part2
17	1		electric engine	2020_08_14_15-32-21-487
18	1		pully placeholder	Part1
19	1		420 mm	Part1
20	2		255 mm	Part1
21	4		110.7 mm	Part1

Figuur 38: BOM-functie in Onshape

De onderdelen die niet geïmporteerd konden worden en het bevestigingsmateriaal moet handmatig worden toegevoegd aan de BOM. Aan de hand van de bill of materials kunnen de onderdelen worden besteld. Een verbeteringspunt om mee te nemen naar een volgend project is het inplannen van leveringstijd, daar heb ik in de planning voor dit project geen rekening mee gehouden.

De totale bill of materials is te vinden in de bijlage

7.7 Conclusie ontwerp

In het ontwerp is de vorm van de machine bepaald aan de hand van de schetsen, zijn de onderdelen gekozen en is de machine in 3d uitgewerkt. Ook zijn de onderdelen berekend op de krachten die door machine geleverd gaan worden om na te gaan of alle onderdelen sterk genoeg zijn.

8 Elektronica

Een van de eisen vanuit Laevo was dat er gekeken ging worden of het mogelijk was de aanwezige elektromotor en bijbehorende controller te gebruiken. Dit is besproken in het hoofdstuk componenten/ onderdelen

Een andere eis was dat er een noodstop knop op de testopstelling gemonteerd wordt, In het datasheet van de motorcontroller (bijlage datasheet motor regelaar) staat schematisch weergegeven hoe een noodstop kan worden aangesloten figuur 39.

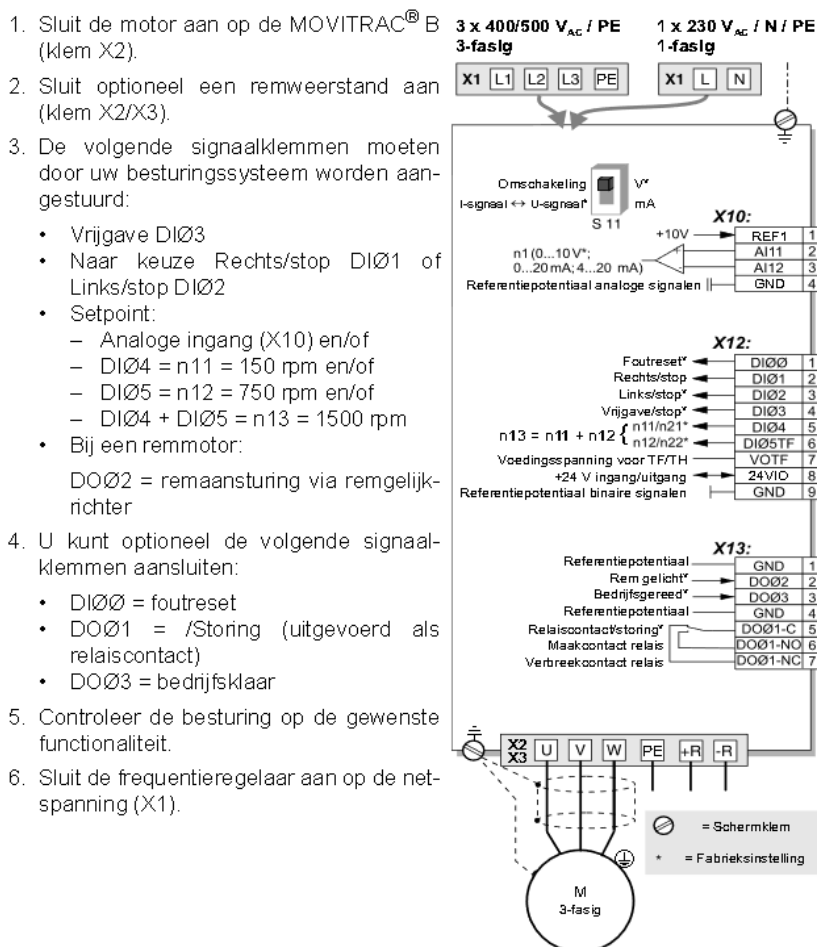
De noodknop moet worden aangesloten op pin 2 en 4. Dit komt overeen met DIO1 en 3 op de motorcontroller. Een noodstop een "normally closed" knop, dit houdt in dat er een stroomkring is zo lang de knop niet is ingedrukt. Als de knop wordt ingedrukt dan wordt de stroomkring verbroken. Om het systeem te stoppen moet er een "0" op pin 2 en 4 gezet worden, dit komt overeen met het verbreken van de stroomkring.

Ook zit er op de controller een 24 Volt pin deze kan gebruikt worden om de noodknop op aan te sluiten. Om het aansluiten van de elektronica makkelijk te maken is er een aansluitschema gemaakt in KiCad.

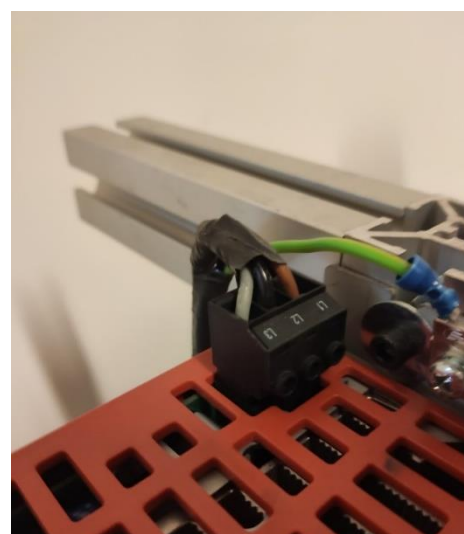
De motorcontroller wordt aangesloten op krachtstroom (400 V) met 3 fase draad (L1, L2 en L3) en een ground (GND, green/yellow) (zie figuur 40). De motor wordt via een gelijke 4 aardige kabel aangesloten op de elektromotor, deze is geconfigureerd in een ster formatie.

8.1 Parameters aanpassen

Voor de huidige situatie is parameter 122 aangepast, deze parameter bepaald de draairichting van de elektromotor. Het aanpassen van deze parameters wordt kort besproken in het verslag en kan uitgebreid worden gevonden in de handleiding van de motorregelaar (zie link naar datasheet in bijlage).



Figuur 39: Aansluitingen motor regelaar



Figuur 40: Connector motor regelaar aan krachtstroom.

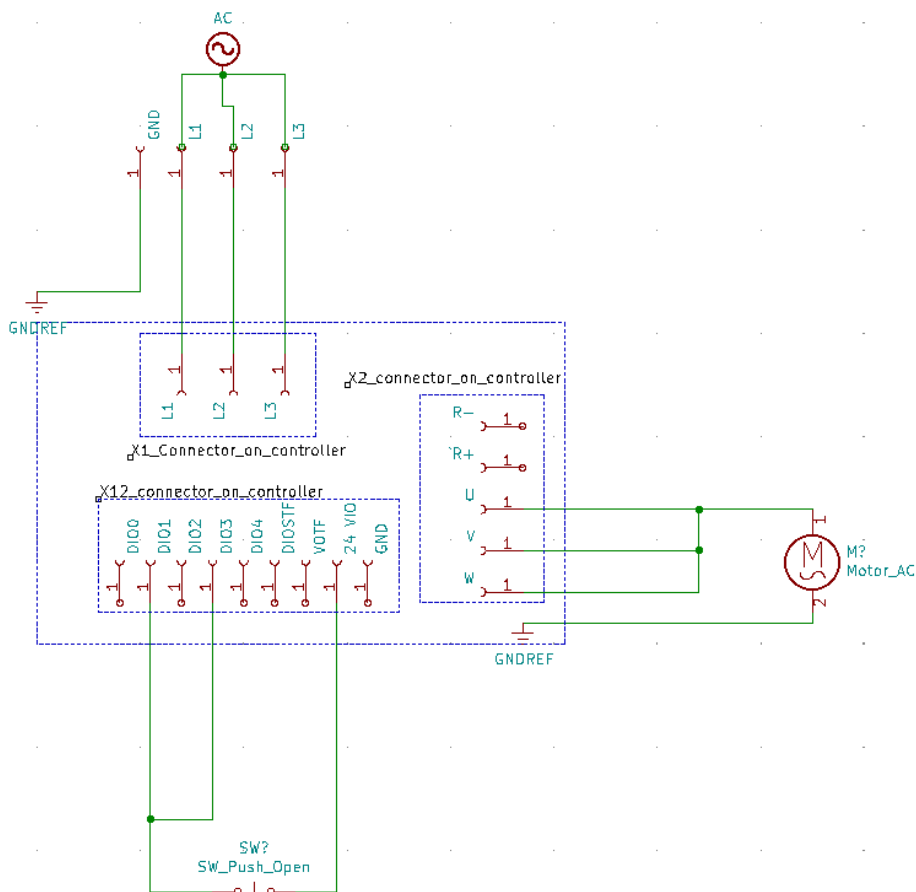
Als de motor regelaar wordt aangesloten brand de led bij de roze cirkel. Dan moet er op de terug (gele) knop worden gedrukt. Dan kan met de down (groene) en de up (blauwe) knoppen naar de licht groene Par led genavigeerd worden. Dan kan met de enter (rode) knop naar het Par menu worden genavigeerd.

In het Par menu kunnen met de up en down toetsen door de verschillende parameters worden gescrold. Zoals eerder vermeld kan met de parameter 122 de draairichting van de motor worden aangepast, als deze parameter op 0 wordt gezet dan draait de motor rechts om. Als deze op 1 gezet wordt draait de motor links om.

Op het moment staat de parameter 800 op short, dit houdt in dat er een aantal parameters verborgen staan. Door deze parameter op long te zetten wordt een groot aantal extra parameters zichtbaar. Bijvoorbeeld de 802 parameter waarmee de regelaar teruggezet kan worden naar fabrieksinstellingen.



Figuur 41: Display van de motor regelaar



Figuur 42: Aansluitschema van motor regelaar

9 Vervaardigen

Voor het vervaardigen van de testopstelling zijn 2D tekeningen gemaakt en is een laptop met Onshape gebruikt. Omdat het frame opgebouwd is uit standaard profielen, was het opbouwen van het frame een relatief makkelijke taak.

Voor de rest van de assemblage waren nagenoeg geen mechanische bewerkingen nodig, de enige bewerkingen waren het tappen van schroefdraad in een aantal profielen en het boren en tappen van schroefdraad in het v-snaar wiel. De reden waarom er gaten geboord en getapt moesten worden in het v-snaar wiel is zodat er een profiel op het v-snaar wiel gemonteerd kan worden.

Ook moesten er een aantal gaten geboord worden in de profielen die de heupbeugel vastzetten.

De lagers moesten in de lager huizen worden geplaatst dit is te zien in figuur 43,44 en 45. Hiervoor wordt het lager horizontaal in lager huis geplaatst figuur 44, vervolgens wordt een as gebruikt om het lager recht in het lager huis te trekken figuur 45.

De profielen worden aan elkaar bevestigd doormiddel van inschuifmoeren (M8) en M8 x M16 bouten om het los trillen van deze bouten te voorkomen is Loctite 222 gebruikt, deze Loctite kan worden losgehaald om aanpassingen te maken aan het systeem.

Nadat de profielen, de lagers en de v-snaar wielen gemonteerd zijn, is als laatste de torso op de testopstelling gemonteerd. Om de torso op het frame te monteren moet de torso aan de onderkant worden open gezaagd. Omdat op de bestaande testopstellingen een torso gemonteerd is, is bekend dat de onderste 15 cm van de torso moet worden afgezaagd. Dit is niet alleen bekend uit het aanpassen van de oude testopstellingen maar ook uit het ontwerp.

Na het zagen moeten er een 4-tal gaten worden geboord in de voorkant van de torso op een afstand van 220 mm zodat de bouten in de en de inschuifmoeren uitlijnen met de onderliggende profielen. De torso is vastgezet met 2x M8x16 en 2x M8x25 en 4 M8 sluitringen.

Tijdens het vervaardigen zijn een aantal problemen aan het licht gekomen: Voorafgaand aan het bestellen van de onderdelen is in de voorraad van Laevo gekeken welke materialen aanwezig waren zodat deze niet overbodig besteld zouden worden. Toen de profielen gearriveerd waren, bleek dat de aanwezige inschuifmoeren niet passend waren in de bestelde profielen.

Een ander probleem waartegen aan is gelopen tijdens het vervaardigen van de machine is dat er tijdens het bestellen van de profielen een aantal profielen van een verkeerde maat besteld zijn en dat er een aantal benodigde profielen niet besteld waren.



Figuur 43: plaatsen stap 1.



Figuur 44: Plaatsen lager stap 2



Figuur 45: Plaatsen lager stap 3.

Bij Laevo was profiel van een gelijke maat (40x40mm) aanwezig wat op maat gezaagd kon worden voor de missende onderdelen. De profielen die niet op de goede maat besteld waren hebben ervoor gezorgd dat er een aantal aanpassingen gedaan moesten worden aan de machine om de benodigde slag van 120° te behalen.

In figuur 46 is een blauwe lijn te zien, dit zijn de profielen die 4 cm te lang besteld zijn. Dit bleek echter niet nadelig te zijn om de volgende reden: in figuur 47 is te zien dat er weinig ruimte is tussen het torso en het v-snaar wiel. In deze situatie maakt de machine een slag van 108° dat is 12° minder dan zou moeten.

Om een slag van 120° te behalen zijn er een klein aantal aanpassingen gedaan aan het frame om de slag van 120° te halen. De aanpassingen zijn: Het frame waar het torso op bevestigd is, is 3 cm richting het v-snaar wiel verplaatst. Ook zijn er extra gaten geboord in het profiel dat op het v-snaar wiel bevestigd zijn.

Het verplaatsen van de het torso frame resulteerde in een grotere slag. Echter had het niet alleen positieve resultaten, door deze aanpassing maakte de terugkerende slag een grotere versnelling. Hier voor zijn een aantal redenen:

- De Laevo wordt geeft in de terugkerende slag de opgeslagen energie vrij.
- In het laatste deel van de terugkerende slag valt het torso frame mee met de zwaartekracht.
- Met een CW (clockwise) draaiende elektromotor vindt aan het einde van de rotatie een grote versnelling.



Figuur 46: assemblage testopstelling.



Figuur 47: Testopstelling geassembleerd.

Door deze grote versnelling aan het einde van de slag van de testopstelling krijgt de as tussen het torso en het v-snaar wiel een grote belasting, dit is niet ideaal voor de levensduur van de machine. Als de draairichting van de motor wordt aangepast heeft dat als resultaat dat de grote versnelling aan het begin van de slag plaats vindt in plaats van aan het einde. Een ander voordeel van het aanpassen van de draairichting is dat de gasveer in de Laevo snel wordt opgespannen, dit is een accuratere representatie van een buk beweging dan het langzaam opspannen van de gasveer.

Het aanpassen van de draairichting is besproken in het hoofdstuk: elektronica.

De motor regelaar was zo goed als gemonteerd op de ground kabels na, om deze te kunnen monteren moesten er kabelschoenen en een krimp tang besteld worden.

De leg pad houders zijn tijdens het vervaardigen anders gemaakt dan in het ontwerp bedacht was. In het ontwerp zaten de leg pads vast aan het torso frame en zouden rusten op een horizontale balk aan het torso frame. Tijdens het vervaardigen zijn de leg pad steunen alleen gemonteerd aan de horizontale balk.

10 Evaluatie

Het systeem is in verschillende fasen getest. Eerst zijn alle onderdelen los van elkaar getest. Zo is eerst de elektromotor aan de motor regelaar aangesloten om te kijken of deze werkte. Nadat het frame gemonteerd was, is aan het v-snaar wiel gedraaid om te kijken of de slag gemaakt kon worden zonder hinder.

Nadat alle onderdelen los van elkaar getest zijn, zijn de motor en het v-snaar wiel getest zonder het torso frame met het v-snaar wiel te verbinden. Dit is zonder problemen verlopen.

Vervolgens is het torso frame aangesloten op het v-snaar wiel en heeft de machine voor het eerst gedraaid zonder problemen. Nadat de machine heeft gedraaid zonder Laevo, is er een Laevo in het systeem geplaatst om de eerste echte test te doen.

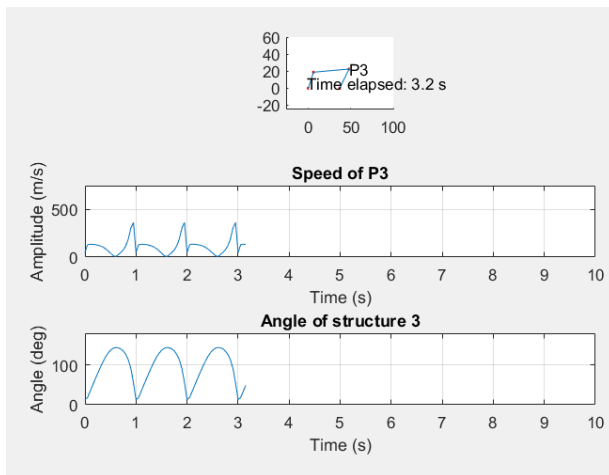
Bij de eerste echte test behaalde de testopstelling een slag van 120° en konden de leg pad steunen zodanig versteld worden dat de leg pads van de Laevo een hoek van 45° abductie en 15° adductie konden maken. Bij de eerste test draaide de elektromotor in een clockwise direction (CW) in het vorige hoofdstuk in besproken en onderbouwd waarom dit niet optimaal is voor het systeem en waarom dit een minder accurate representatie is van de werkelijkheid. Aan de hand van deze test is de rotatie richting van de elektromotor aangepast. In het vorige hoofdstuk is de draairichting van de machine besproken en onderbouwd.

Ook is er op het frame een teller gemonteerd en is op het v-snaar wiel een magneet geplaatst. De teller is nodig om het aantal bukbewegingen te tellen zodat er gekeken worden of de Laevo het gewenste aantal bukbewegingen mee gaat.

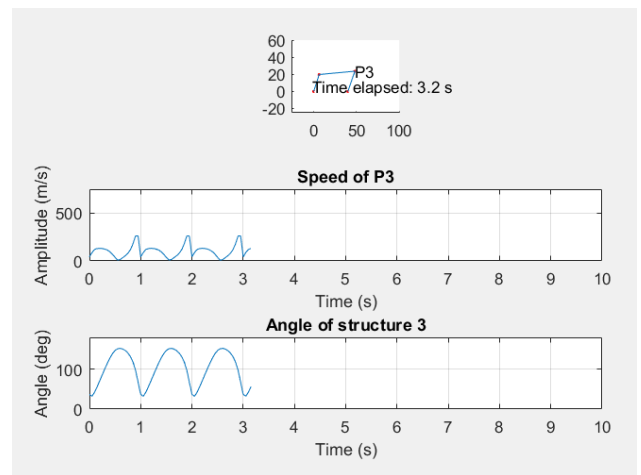
Door het verlengen van de kabels van en naar de motor en de motor regelaar kan deze buiten de ruimte worden gezet waar de testopstelling staat, hierdoor wordt aan alle algemene ARBO-normen voldaan.

De totale kosten van het project zijn uitgekomen op: €770,81 hiermee is binnen het aangegeven budget gebleven.

Ook zoals besproken in het vorige hoofdstuk zijn er testen gedaan met het verstellen van het torso frame ten opzichte het v-snaar wiel. Er is met deze afstand gevarieerd omdat zoals besproken in het vorige hoofdstuk bepaalde profielen te lang geleverd waren en hier door de berekende hoek van 120° niet haalbaar was met de huidige opstelling. Na met deze afstand gevarieerd te hebben is de afstand van het profiel op het v-snaar wiel met 1 cm opgeschoven en is de positie van het torso frame met 5cm opgeschoven, het verschil in snelheid tussen de originele en nieuwe positie is te zien in figuur 49 en 48 figuur 49 is de originele positie en figuur 48 de nieuwe positie.



Figuur 49: Hoek en hoeksnelheid originele positie.



Figuur 48:hoek en hoek snelheid aangepaste positie.

Het zijwaarts bukken van de Laevo is in bepaalde posities getest, met name de adductie (leg pads naar binnen gericht) stand in getest. Deze test verliep zonder problemen. Ook is de abductie stand getest (leg pads naar buiten) deze stand kon echter niet in het geheel getest worden omdat het scharnier wat ervoor zorgt dat de smartjoint van de Laevo kan ab en adduceren gemonteerd zit met een binnen zeskant bout, deze bout komt tijdens het testen tegen andere bouten aan. Dit is gemeld aan het R&D-team van Laevo.

11 Discussie

Voor dit project is een levensduur testopstelling ontworpen en gefabriceerd. Na het vervaardigen van de testopstelling is deze getoetst aan het pakket van eisen en wensen. Aan de hand van deze toetsing kan worden vastgesteld dat het voor over bukken van 120° en het zijwaarts bukken van -15° tot $+45^\circ$ met de Laevo V3 getest kan worden.

Een vraag van Laevo B.V. was of er gekeken kon worden om ook het simuleren van het lopen te verwerken in deze testopstelling. Er is echter tijdig bij Laevo B.V. aangegeven dat het simuleren van het lopen makkelijker in een aparte testopstelling verwerkt kon worden.

Voor dit project is gebruik gemaakt van de aanwezige elektromotor nadat er berekend was of deze voldoende vermogen had om de testopstelling aan te drijven. Verder zijn er ook een aantal aanwezige profielen gebruikt om de testopstelling te vervaardigen en binnen het budget te blijven. Echter is een groot deel van de profielen besteld.

Om aan de ARBO-normen te voldoen zijn de kabels van en naar de motor en de motor regelaar verlengd. Dit is gedaan zodat de motor regelaar buiten de ruimte geplaatst kon worden waar de testopstelling staat. Hierdoor is de gebruiker veilig tijdens het gebruik van de testopstelling.

Een probleem dat zich heeft voorgedaan tijdens dit project is dat tijdens het bestellen van de profielen een aantal profielen niet zijn besteld. Dit heeft als resultaat gehad er profielen die aanwezig waren bij Laevo op maat gezaagd hebben moeten worden. Ook zijn er een aantal profielen te lang zijn besteld wat ervoor heeft gezorgd dat de slag van 120° niet gehaald werd. Om deze situatie op te lossen is er geschoven met het torso frame om de slag te kunnen halen en de snelheid van de slag terug te brengen.

Een ander probleem dat zich heeft voorgedaan bij de eerste “lange duur test” waarbij de testopstelling de hele nacht heeft aangestaan is het volgende: de v-snaar is van het span wiel gelopen. Dit is veroorzaakt door de bout waarmee de as tussen het v-snaar wiel en de trekkende/duwende staaf vastzit. Deze situatie is verholpen door toevoegen van een aantal sluit ringen om de afstand tussen de uitstekende bout en de v-snaar te vergroten.

12 Conclusie

Tijdens dit project is het antwoord gezocht op de volgende vraag:

Ontwerp, construeer en valideer een mechanische levensduur-testopstelling voor het V3 Laevo exoskelet binnen het aangegeven budget.

Aan de hand van de analyse is er duidelijk geworden welke bewegingen de testopstelling moest kunnen maken en hoe deze beweging gevangen kon worden in een mechanisch systeem.

In de ontwerpfase van dit project is doormiddel van het maken en beoordelen van schetsen de vorm van de machine bekend geworden. Nadat de vorm van de machine is voortgekomen uit de schetsen is deze doorgerekend en in 3d uitgewerkt in Onshape.

Aan de hand van het uiteindelijke ontwerp zijn alle benodigde onderdelen besteld en is de machine geassembleerd.

Aan de hand van de evaluatie en het ontwerp kan worden geconcludeerd dat de vervaardigde testopstelling aan de eisen voldoet. Zo kan de testopstelling een buk beweging simuleren van 120° en dat de leg pads belast kunnen worden zoals tijdens het zijwaarts bukken.

Het gestelde budget voor dit project is niet overschreden. En de testopstelling voldoet aan de ARBO-normen. Helaas konden niet alle wensen in het ontwerp meegenomen worden. Zo kan bijvoorbeeld de testopstelling geen lopen simuleren en zitten er geen sensoren op.

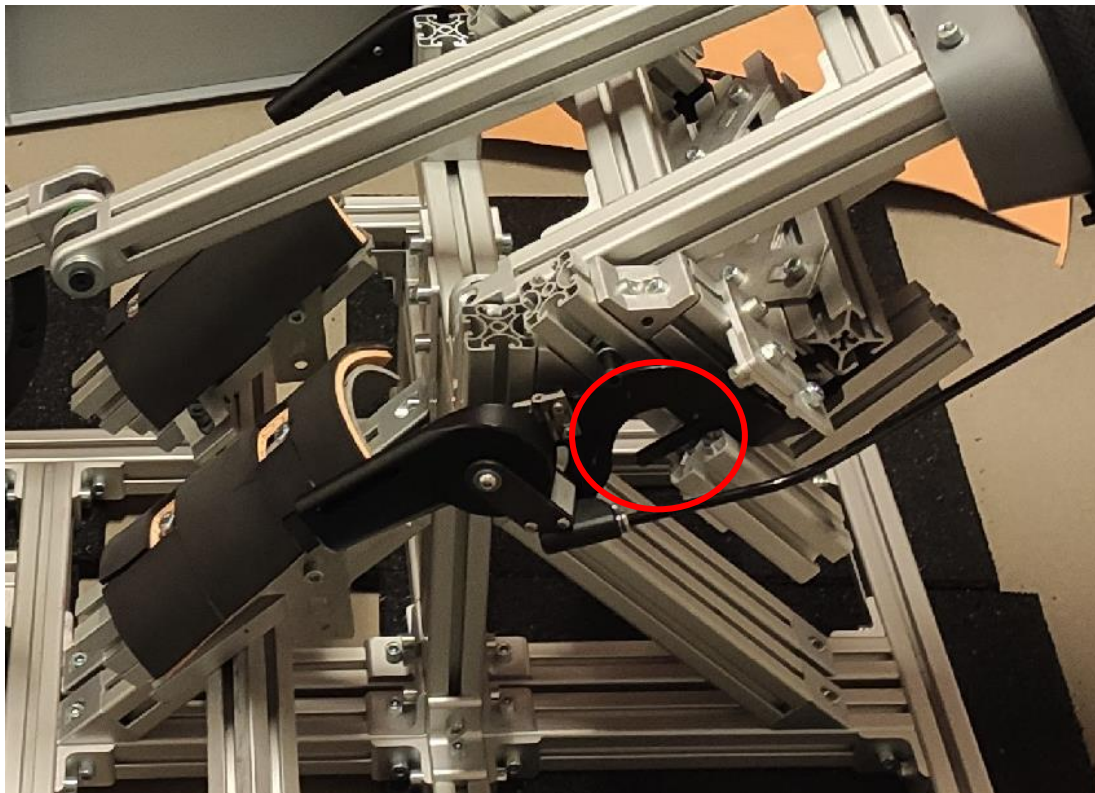
13 Aanbevelingen

De eerste aanbeveling die gedaan wordt aan de hand van dit project is te kijken naar de parameters van de motor controller. Volgens de documentatie kan de noodstop worden aangesloten op de pinnen: DIO2, DIO3 en de 24V pin (DIO8) voor het stoppen van de motor in een counter clockwise direction (CCW). En op DIO1, DIO3 en 24V (DIO8) voor het stoppen van de motor in een clockwise (CW) direction.

Er is getest met het stoppen van de motor in een CW direction, dit verliep zonder problemen. Echter toen de draairichting van de motor is omgedraaid en de noodstop op de correcte pinnen aan de motor regelaar zijn aangesloten om de CCW direction te stoppen heeft dit geen resultaat gehad. Zoals besproken in het hoofdstuk elektronica moet om de noodstop te laten werken de DIO1 en DIO3 voor CW en DIO2 en DIO3 voor CCW op 0 gezet worden.

Mijn aanbeveling is hiernaar te kijken om het systeem veiliger te maken. Een andere manier om het systeem veiliger te maken is om de kabels van de motor naar de motor regelaar en de kabels van de motor regelaar naar het stopcontact te verlengen zodat de motor regelaar buiten het duurtest hok kan worden geplaatst. Voor het aansluiten van de langere kabels kan het hoofdstuk elektronica geraadpleegd worden.

Een ander punt waarnaar gekeken kan worden is het monteren van de heupbeugel, om specifieker te zijn het punt op figuur 50. In het ontwerp is geen rekening gehouden met het naar buiten buigen van de heup beugel omcirkeld punt op figuur 50. Dit is opgelost doormidden van een bout die de heupbeugel verhindert naar buiten te bewegen, dit is echter niet een ideale oplossing voor deze situatie. Het buigen van de heupbeugel op punt x komt voornamelijk voor bij sterkere gasveren (140/180 bar). Dit kan worden opgelost doormiddel van een extra profiel of een zeskant bout in plaats van een Inbus bout.



Figuur 50: Bout tegen het buigen van heupbeugel

Een andere aanbeveling is te kijken naar het frame, in een ideale situatie wordt de veer opgespannen het moment dat het torso naar bededen beweegt en ontspannen het moment dat het torso naar boven beweegt. Het probleem waar tegenaan gelopen is tijdens het ontwerpen en waarom het systeem niet deze vorm gekregen heeft, heeft een aantal redenen:

- Er kon geen manier bedacht worden dat het torso frame aan het einde van de slag niet gehinderd zou worden door de trekkende stang tussen het v-snaar wiel en de torso.
- Gedurende de slag kwam de torso tegen het v-snaar wiel aan. Om dit op te lossen zou er een langere as geplaatst kunnen worden tussen het v-snaar wiel en het trekkende/duwende profiel. Dit heeft als resultaat dat er geen contact is tussen het torso en het v-snaar wiel maar er komen wel veel krachten op de as.
- Er is aan gedacht om het v-snaar wiel meer richting de poten van het torso frame te verplaatsten, dit had echter als resultaat dat de gewenste slag van 120 graden niet gehaald kon worden.

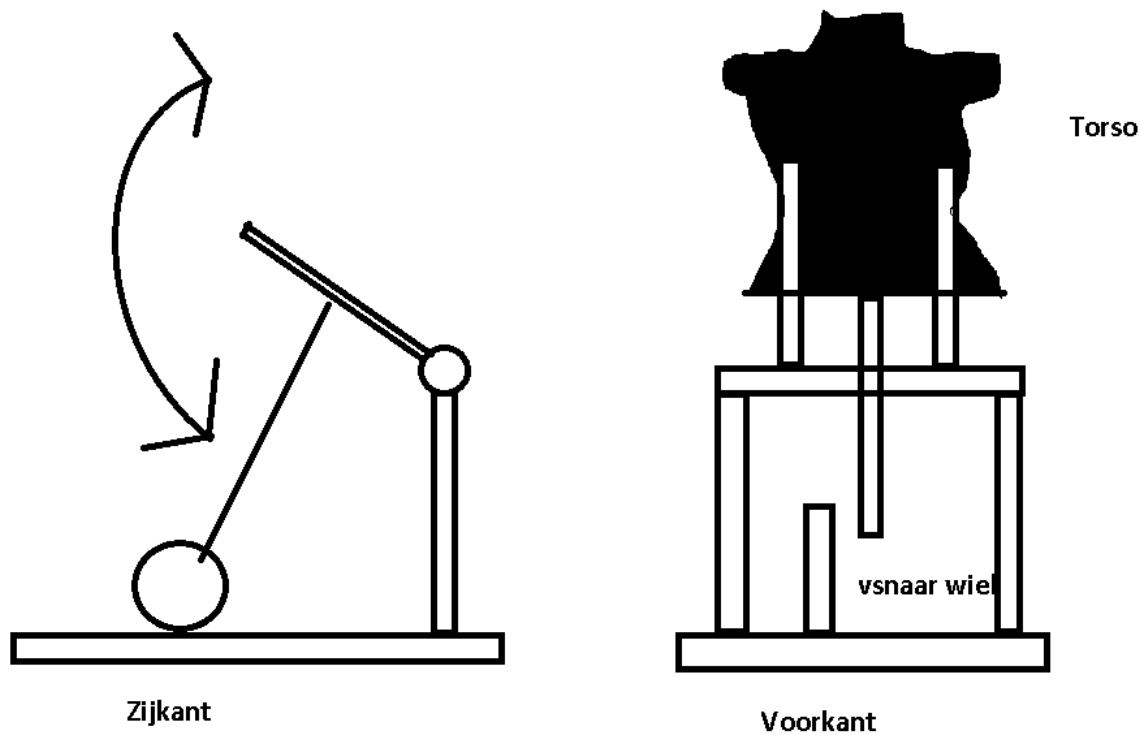
Het voordeel van een systeem zoals afgebeeld in figuur 51 zou zijn dat er op de as tussen het v-snaarwiel en het trekkende/duwende profiel aanzienlijk minder “schokkende” belasting. Om dichterbij deze situatie te kunnen komen kan er gekeken worden naar hoeveel het v-snaar wiel verkleind zou kunnen worden om meer ruimte te creëren. Dit zou kunnen omdat de zwaartekracht in dat geval mee zou werken aan het opspannen van de gasveren in de Laevo.

Tijdens het bestellen van de v-snaar was er geen v-snaar beschikbaar in de benodigde maat met tanden deze zou besteld kunnen worden om slip extra tegen te gaan.

Ook zou er gewerkt kunnen worden aan een manier om 2 Laevo's tegelijkertijd in te spannen op het systeem in tegengestelde richting, zodat wanneer een Laevo wordt opgespannen de andere Laevo ontspant.

Een aantal toevoegingen die gedaan kunnen worden aan de huidige versie van het ontwerp zijn:

- De mogelijkheid om het lopen te simuleren.
- Het toevoegen van sensoren voor het meten van krachten en eventueel een automatische noodstop
- Het toevoegen van sensoren onder de leg pads van de Laevo om te zien hoeveel kracht er op de smartjoint staat.
- Het toevoegen van een sensor in het torso om waar te nemen hoeveel kracht er aan de borst kan van het torso zit



Figuur 51: aanbeveling frame vorm.

14 Referenties

FNV. (2011, 13 juni). *NIOSH-methode*. Geraadpleegd op 29 juli 2020, van

<https://www.arbobondgenoten.nl/arbothem/lichblst/lift.htm>

Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. (z.d.). *Hoeveel mag een werknemer tillen?* Geraadpleegd op 30 juli 2020, van

<https://www.arboportaal.nl/onderwerpen/tillen-en-dragen/vraag-en-antwoord/hoeveel-mag-een-werknemer-tillen>

Visser, B., Formanoy, M., Kuis, Y., Duits, W., & Doornbusch, J. (2008, april).

D_Werkhouding 1WERKHOUDING.

[http://www.arbokennisnet.nl/images/dynamic/Dossiers/Fysieke_belasting/D_Werkhouding.p
df](http://www.arbokennisnet.nl/images/dynamic/Dossiers/Fysieke_belasting/D_Werkhouding.pdf)

15 Bijlage

15.1 Script deflection calculation

```
% This file calculates the angle of deflection, moment and stored
potential
% energy of the SmartJoint (SJ), torso structure (TST) and leg
structure (LST) in the Laevo.
% The SJ, LST and the LST are modelled as one rotational spring and
a two
% bending beams in series. Therefore, the moment that is exerted on
the SJ is equal to
% the moment exerted on the TST, LST and to the total exerted
moment. However,
% the deflection (and therefore the energy storage) of the SJ, TST
and LST are
% not equal, since their stiffness differs.

% The deflection of the system is divided into two phases. In the
first
% phase, only the structures deflect since the SJ has a initial
tension which
% has to become first before the SJ starts deflecting (this initial
tension
% can be set to user preference by specifying the moment-deflection
curve
% of the SJ). In the first phase, only the structure stores
potential
% energy (since the SJ does not deflect). In the second phase, the
% structures and the SJ deflect simultaneously. In this phase, the
amount of deflection of
% the structures is determined by the moment-deflection curve of the
SJ.

% It is assumed that during bending, the upper legs do not rotate.
Since
% the LST deflects, the SJ rotates with this deflection angle, which
% contributes (similar to the deflection of the TST) to the total
bending
% angle of the torso.
% In other words: the introduction of a flexible LST introduces
either a
% rotation of the upper legs if the SJ is fixed to the human body
(squat bending)
% or a rotation of the SJ (if the legs do not rotate), since the LST
deflects.

% WARNING: the deflection (and thus the stored potential energy) of
the TST
% and LST are based on the linear beam theory, in which the
shortening of
% the TST and LST during bending is not taken into account.
Therefore, this model is only
% valid for small deflection angles of the TST and LST.

clc
```

```

clear all
close all

%% Structure dimensions
% Properties of TST and LST: \\disks\Laevo\development\Fatigue in
CrSi spring structures\CrSi properties

rTST=0.003375; % [m] radius of TST
LTST=0.40; % [m] length of TST
ETST=210e9; % [N/m^2] Youngs modulus of TST
sigmaTST=1400e6; % [N/m^2] yield stress of TST

LLST=0.2; % [m] length of LST
rLST=rTST; % [m] radius of LST
ELST=210e9; % [N/m^2] Youngs modulus of LST
sigmaLST=1400e6; % [N/m^2] yield stress of LST

ITST=pi*rTST^4/4; % [m^4] Planar moment of inertia of TST
ILST=pi*rLST^4/4; % [m^4] Planar moment of inertia of LST

%% Range of bending of SJ
PhiSJstart=0; % [deg] LOCAL angle (w.r.t.) the deflection of the SJ
from which the SJ starts rotating
PhiSJend=120; % [deg] LOCAL angle (w.r.t.) the deflection of the SJ
from which the SJ ends rotating
numberOfStepsPhase2=50; % number of steps in Phase 2
PhiSJ=deg2rad(linspace(PhiSJstart,PhiSJend,numberOfStepsPhase2)); %
[rad] LOCAL angle (w.r.t.) the deflection of the SJ

%% Moment curve of SJ
% 1. Current moment-deflection curve Laevo
PhiSJtemp=deg2rad(linspace(PhiSJstart,PhiSJend,7)); % [rad] LOCAL
angle (w.r.t.) the deflection of the SJ
TempVar = rad2deg(PhiSJtemp);
MSJtemp=[0 24 26 26 26 26 26]; % [Nm] moment-deflection curve of SJ
MSJ=spline(PhiSJtemp,MSJtemp,PhiSJ); % [Nm] moment-deflection curve
of SJ
name='Current moment-deflection curve SJ';

% 2. New scaled moment-deflection curve Laevo
% PhiSJtemp=deg2rad(linspace(PhiSJstart,PhiSJend,7)); % [rad] LOCAL
angle (w.r.t.) the deflection of the SJ
% MSJtemp=[5 22.5 24 21 19.5 18.5 18]; % [Nm] moment-deflection
curve of SJ
% MSJ=spline(PhiSJtemp,MSJtemp,PhiSJ); % [Nm] moment-deflection
curve of SJ
% name='Scaled Laevo moment-deflection curve SJ';

% 3. New sinusoidal moment-deflection curve
% MSJ=20*sin(PhiSJ)+6; % [Nm] moment profile of SJ
% M0=MSJ(1); % [Nm] initial tension in SJ
% name='Sinusoidal moment-deflection curve SJ';

% 4. Custom moment-deflection curve
% MSJ=20*sin(PhiSJ)+6; % [Nm] moment profile of SJ
% M0=MSJ(1); % [Nm] initial tension in SJ

```

```

% name='Custom moment-deflection curve SJ';

%% Deflection angles
numberOfStepsPhase1=5; % number of steps in phase 1 (can be small
because everything is linear w.r.t. the angle in phase 1)
startPhase1=0; % [rad] starting angle of phase 1

angleTSTPhase2=MSJ*LTST/(2*ETST*ITST); % [rad] angles of TST in
phase 2
endTSTPhase1=angleTSTPhase2(1); % [rad] final angle of phase 1 of
TST
angleTSTPhase1=linspace(startPhase1, endTSTPhase1,
numberOfStepsPhase1); % [rad] angles in phase 1 of TST

angleLSTPhase2=MSJ*LLST/(2*ELST*ILST); % [rad] angles of LST in
phase 2
endLSTPhase1=angleLSTPhase2(1); % [rad] final angle of phase 1 of
LST
angleLSTPhase1=linspace(startPhase1, endLSTPhase1,
numberOfStepsPhase1); % [rad] angles in phase 1 of LST

endPhase1=endTSTPhase1+endLSTPhase1; % [rad] total deflection of
torso at the end of phase 1, only TST and LST are deflecting
anglePhase1=linspace(startPhase1, endPhase1, numberOfStepsPhase1); %
[rad] angles in phase 1

angleSJPhase1=zeros(1, numberOfStepsPhase1); % [rad] angle of SJ in
phase 1 (equal to zero because in phase 1 only the TST and LST
deflect)
startPhase2=endPhase1; % [rad] starting angle of phase 2
endPhase2=deg2rad(PhiSJend)+angleLSTPhase2(end)+angleTSTPhase2(end);
% [rad] final angle of phase 2
anglePhase2=linspace(startPhase2, endPhase2, numberOfStepsPhase2); %
[rad] angles in phase 2

%% Phase 1: structure bending
% SJ
MSJPhase1=zeros(1, numberOfStepsPhase1); % [Nm] moment of SJ in
phase 1 (equal to zero because in phase 1 only the TST and LST
deflect)
USJPhase1=zeros(1, numberOfStepsPhase1); % [J] stored potential
energy in SJ in phase 1

% TST
MTSTPhase1=2*ETST*ITST/LTST*angleTSTPhase1; % [Nm] moment of TST in
phase 1
UTSTPhase1=cumtrapz(angleTSTPhase1, MTSTPhase1); % [J] stored
potential energy in TST in phase 1

% LST
MLSTPhase1=2*ELST*ILST/LLST*angleLSTPhase1; % [Nm] moment of LST in
phase 1
ULSTPhase1=cumtrapz(angleLSTPhase1, MLSTPhase1); % [J] stored
potential energy in LST in phase 1

%% Phase 2: structure and SJ bending

```

```

% SJ
MSJPhase2=MSJ; % [Nm] moment of SJ in phase 2
USJPhase2=cumtrapz(PhiSJ, MSJPhase2); % [J] stored potential energy
in SJ in phase 2

% TST
MTSTPhase2=2*ETST*ITST/LTST*angleTSTPhase2; % [Nm] moment of TST in
phase 2
UTSTPhase2=cumtrapz(angleTSTPhase2, MTSTPhase2)+UTSTPhase1(end); %
[J] stored potential energy in TST in phase 2, additional term
because of deflection in phase 1

% LST
MLSTPhase2=2*ELST*ILST/LLST*angleLSTPhase2; % [Nm] moment of LST in
phase 2
ULSTPhase2=cumtrapz(angleLSTPhase2, MLSTPhase2)+ULSTPhase1(end); %
[J] stored potential energy in LST in phase 2, additional term
because of deflection in phase 1

%% Phase 1 + phase 2
% Angles
angleTotPhase1=angleSJPhase1+angleTSTPhase1+angleLSTPhase1; % [rad]
total angle of deflection of system in phase 1 (= angle between end
of TST and end of LST)
angleTotPhase2=PhiSJ+angleTSTPhase2+angleLSTPhase2; % [rad] total
angle of deflection of system in phase 2 (= angle between end of TST
and end of LST)

% Moments
MTotPhase1=MTSTPhase1; % [Nm] total moment exerted by system in
phase 1 (= moment ST = moment SJ, because springs are in series)
MTotPhase2=MTSTPhase2; % [Nm] total moment exerted by system in
phase 2 (= moment ST = moment SJ, because springs are in series)

% Stored potential energy
UTotPhase1=USJPhase1+UTSTPhase1+ULSTPhase1; % [Nm] total potential
energy stored by system in phase 1
UTotPhase2=USJPhase2+UTSTPhase2+ULSTPhase2; % [Nm] total potential
energy stored by system in phase 1

%% Maximum allowable deflection angle of TST and LST
angleTSTfailure=sigmaTST*LTST/(2*ETST*rTST); % [rad] maximum
deflection angle of TST
angleLSTfailure=sigmaLST*LLST/(2*ELST*rLST); % [rad] maximum
deflection angle of LST

% Warnings
if max(angleTSTPhase2)> angleTSTfailure
    disp(['! Maximum allowable bending angle TST is exceeded: max.
allowable=' num2str(rad2deg(angleTSTfailure)) 'deg, current='
num2str(rad2deg(max(angleTSTPhase2))) 'deg'])
else
    disp(['Torso Structure: maximum allowable deflection='
num2str(round(rad2deg(angleTSTfailure),1)) 'deg, current maximum
deflection=' num2str(round(rad2deg(max(angleTSTPhase2)),1)) 'deg,

```

```

percentage='
num2str(round(max(angleTSTPhase2)/angleTSTfailure*100,1)) '%'
end

if max(angleLSTPhase2)> angleLSTfailure
    disp(['! Maximum allowable bending angle LST is exceeded: max.
allowable=' num2str(rad2deg(angleLSTfailure)) 'deg, current='
num2str(rad2deg(max(angleLSTPhase2))) 'deg'])
else
    disp(['Leg Structure: maximum allowable deflection='
num2str(round(rad2deg(angleLSTfailure),1)) 'deg, current maximum
deflection=' num2str(round(rad2deg(max(angleLSTPhase2)),1)) 'deg,
percentage='
num2str(round(max(angleLSTPhase2)/angleLSTfailure*100,1)) '%'
end

%% Percentages of energy storage
energypercentageTSTPhase1=UTSTPhase1./UTotPhase1*100;
energypercentageLSTPhase1=ULSTPhase1./UTotPhase1*100;
energypercentageSJPhase1=USJPhase1./UTotPhase1*100;
energypercentageTSTPhase2=UTSTPhase2./UTotPhase2*100;
energypercentageLSTPhase2=ULSTPhase2./UTotPhase2*100;
energypercentageSJPhase2=USJPhase2./UTotPhase2*100;

%% Plotting the results
ETSTplot=ETST/1e9; % removing all the zeros for in the title of the
plots (just to be neat)
ELSTplot=ELST/1e9; % removing all the zeros for in the title of the
plots (just to be neat)

% Plotting angles
figure
plot(rad2deg(angleTotPhase1), rad2deg(angleTSTPhase1), 'b',
'Linewidth', 2) % angle of TST in phase 1
grid on
hold on
plot(rad2deg(angleTotPhase1), rad2deg(angleLSTPhase1), 'g',
'Linewidth', 2) % angle of LST in phase 1
plot(rad2deg(angleTotPhase1), rad2deg(angleSJPhase1), 'k',
'Linewidth', 2) % angle of SJ in phase 1
plot(rad2deg(angleTotPhase1), rad2deg(angleTotPhase1), 'r--',
'Linewidth', 2) % total angle in phase 1
plot(rad2deg(angleTotPhase2), rad2deg(angleTSTPhase2), 'b',
'Linewidth', 2) % angle of TST in phase 2
plot(rad2deg(angleTotPhase2), rad2deg(angleLSTPhase2), 'g',
'Linewidth', 2) % angle of LST in phase 2
plot(rad2deg(angleTotPhase2), rad2deg(PhiSJ), 'k', 'Linewidth', 2) %
angle of SJ in phase 2
plot(rad2deg(angleTotPhase2), rad2deg(angleTotPhase2), 'r--',
'Linewidth', 2) % total angle in phase 2
plot(rad2deg([angleTotPhase1 angleTotPhase2(2:end)]), ones(1,
numberOfStepsPhase1+numberOfStepsPhase2-1)*rad2deg(angleTSTfailure),
'b--', 'Linewidth', 1) % maximum deflection angle LST

```



```

plot(rad2deg([angleTotPhase1 angleTotPhase2(2:end)]), ones(1,
numberOfStepsPhase1+numberOfStepsPhase2-1)*rad2deg(angleLSTfailure),
'g--', 'Linewidth', 1) % maximum deflection angle LST
%xline(rad2deg(angleTotPhase1(end)), '--'); % vertical line at end
of phase 1
xlabel('Deflection angle of total system (TST + SJ + LST) [deg]')
ylabel('Deflection angle [deg]')
xlim([0 140])
ylim([0 140])
title({'Angles'; name; ['Torso structure: r=' num2str(rTST) 'm, L='
num2str(LTST) 'm, E=' num2str(ETST/1e9) 'e9 N/m^2, sigmay='
num2str(sigmaTST/1e6) 'e6 N/m^2']; ['Leg structure: r='
num2str(rLST) 'm, L=' num2str(LLST) 'm, E=' num2str(ELST/1e9) 'e9
N/m^2, sigmay=' num2str(sigmaLST/1e6) 'e6 N/m^2']})
legend('Torso structure', 'Leg structure', 'Smartjoint', 'Total
bending angle')

```

15.2 Matlab script four bar linkage

```

clc
clear all
close all

% Structure lengths
A = 18.75;
B = 42;
C = 25;
D = 37;

% set a time for the simulation ( current is one rotation)
t = 0:0.05:3.2;

% variable for speed
ang_speed = (2*pi*60)/60; % (rad/s)
theta = ang_speed*t;

% locations of the grounded points
P1 = [0;0];
P4 = D*[1;0];

% Angle of the electro motor
P2 = A*[cos(theta); sin(theta)];

% Imaginary line to calculate the position of the structure that
supports
% the torso // put explanation in report
E = sqrt(A^2 + D^2 - 2*A*D*cos(theta));
alfa = asin(A*sin(theta)./E);
beta = acos((E.^2 + C^2 - B^2)./(2*E*C));

% coordinates of the 3rd point
P3 = [D - C*cos(alfa+beta); C*sin(alfa+beta)];

% Angle of structure 3
Angle = rad2deg(acos((P3(1,:)-D)/C));
tempAng = [min(Angle),max(Angle)];

```

```

disp('the minimum angle is: '); disp(tempAng(1));
disp('the maximum angle is: '); disp(tempAng(2));
disp('the total angle is: '); disp(diff(tempAng));

P3_x = P3(1,:);
P3_y = P3(2,:);

P3_vx = diff(P3_x)./diff(t);
P3_vy = diff(P3_y)./diff(t);

P3_v = sqrt(P3_vx.^2 + P3_vy.^2);

% create new figure for the graphs separate
for i=1:length(t)

    ani = subplot(3,1,1);
    P1_circle = viscircles(P1',0.05);
    P2_circle = viscircles(P2(:,i)',0.05);
    P3_circle = viscircles(P3(:,i)',0.05);
    P4_circle = viscircles(P4',0.05);

    A_bar = line([P1(1) P2(1,i)], [P1(2) P2(2,i)]);
    B_bar = line([P2(1,i) P3(1,i)], [P2(2,i) P3(2,i)]);
    C_bar = line([P3(1,i) P4(1)], [P3(2,i) P4(2)]);

    axis(ani, 'equal');
    set(gca, 'XLim', [-25 100], 'YLim', [-25 60]);

    str1 = 'P3';
    str2 = ['Time elapsed: ' num2str(t(i)) ' s'];
    P3_text = text(P3(1,i), P3(2,i)+0.4, str1);
    Time = text(-2, 6, str2);
    pause(0.005);

    if i<length(t)
        delete(P1_circle);
        delete(P2_circle);
        delete(P3_circle);
        delete(P4_circle);
        delete(A_bar);
        delete(B_bar);
        delete(C_bar);
        delete(P3_text);
        delete(Time);

    vel = subplot(3,1,2);
    plot(vel, t(1:i), P3_v(1:i));
    set(vel, 'XLim', [0 10], 'YLim', [0 750]);
    xlabel(vel, 'Time (s)');
    ylabel(vel, 'Amplitude (m/s)');
    title(vel, 'Speed of P3');
    grid on;

    Ang = subplot(3,1,3);
    plot(Ang, t(1:i), Angle(1:i));
    set(Ang, 'XLim', [0 10], 'YLim', [0 180]);

```

```
    xlabel(Ang, 'Time (s)');  
    ylabel(Ang, 'Angle (deg)');  
    title(Ang, 'Angle of structure 3');  
    grid on  
end  
end
```

54

[illegible]



6001-Z

SKF Explorer

Deep groove ball bearings

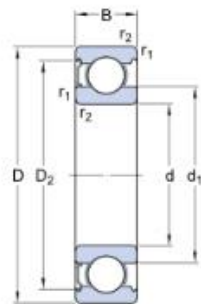
Bearing data

[Tolerances](#),
Normal [metric], P6, P5, Normal [inch],
[Radial internal clearance](#),
Matched bearing pairs, Stainless steel
d < 10 mm, Other bearings

Bearing interfaces

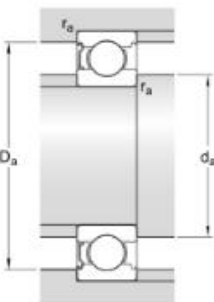
[Seat tolerances for standard conditions](#),
[Tolerances and resultant fits](#)

Technical specification



DIMENSIONS

d	12 mm
D	28 mm
B	8 mm
d ₁	≈ 17 mm
D ₂	≈ 24.72 mm
r _{1,2}	min. 0.3 mm



ABUTMENT DIMENSIONS

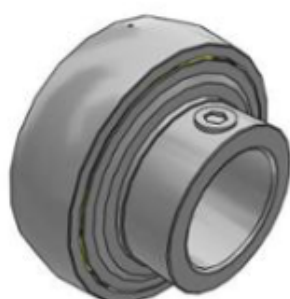
d _a	min. 14 mm
d _a	max. 16.9 mm
D _a	max. 26 mm
r _a	max. 0.3 mm

CALCULATION DATA

Basic dynamic load rating	C	5.4 kN
Basic static load rating	C_0	2.36 kN
Fatigue load limit	P_u	0.1 kN
Reference speed		60000 r/min
Limiting speed		38000 r/min
Calculation factor	k_Y	0.025
Calculation factor	f_D	13

MASS

Mass bearing	0.022 kg
--------------	----------



YAR 204-2F

Popular item

Insert bearings

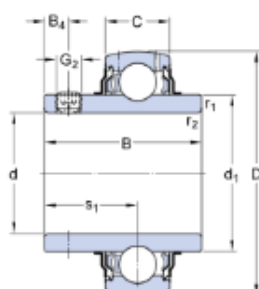
Bearing data

[Tolerances,](#)
[table 1, table 2,](#)
[Radial internal clearance,](#)
[Standard inner ring, Other bearings](#)

Design considerations

[Shaft tolerances](#)

Technical specification



DIMENSIONS

d	20 mm
D	47 mm
B	31 mm
C	14 mm
d ₁	= 28.2 mm
B ₄	4.5 mm
r _{1,2}	min. 0.6 mm
s ₁	18.3 mm

CALCULATION DATA

Basic dynamic load rating	C	12.7 kN
Basic static load rating	C ₀	6.55 kN
Fatigue load limit	P _u	0.28 kN
Limiting speed ¹⁾		8500 r/min
Calculation factor	f ₀	13

MASS

Mass bearing	0.15 kg
--------------	---------

MOUNTING INFORMATION

Thread grub screw	G ₂	M6x0.75
Hexagonal key size for grub screw	N	3 mm
Recommended tightening torque for grub screw		4 N·m

ASSOCIATED PRODUCTS

Rubber seating ring		RIS 204
---------------------	--	---------

15.6 Datasheet motor regelaar

<https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/16964888.pdf>

15.7 Datasheet elektromotor

<https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/19290411.pdf>

15.8 2D tekening testopstelling

