Balans door variatie

Compensatie van een variabele massa bij mensen met Duchenne.

Afstudeerscriptie
Milos Benistant 09037604
Thijs Hartveld 09025413
Opleiding Bewegingstechnologie,
Haagse Hogeschool
Flextension

Maart 2013 – Juni 2013

Balans door variatie

Compensatie van een variabele massa bij mensen met Duchenne.

Afstudeerscriptie
Milos Benistant 09037604
Thijs Hartveld 09025413
Opleiding Bewegingstechnologie,
Haagse Hogeschool
Flextension
Jorine Koopman
Aad Lagerberg
Gerard Dunning (Extern)

Maart 2013 – Juni 2013

Voorwoord

Voor u ligt onze afstudeerscriptie ‘Balans door variatie’. Een afstudeerscriptie naar het balanceren van de massa van de eigen arm, met of zonder een gebruiksvoorwerp bij mensen met Duchenne. De afstudeerscriptie is geschreven in het kader van ons afstuderen aan de opleiding Bewegingstechnologie, aan de Haagse Hogeschool.

Het onderzoek naar het balanceren van de massa van de eigen arm, met of zonder gebruiksvoorwerp, heeft in de periode van maart 2013 tot en met juni 2013 plaats gevonden. De opdracht komt voort uit Flextension, een foundation die armortheses ontwikkeld voor mensen met Duchenne. Onze begeleider van Flextension was Gerard Dunning. Wij willen Gerard hartelijk bedanken voor alle ondersteuning tijdens dit project, met name de ondersteuning bij het rekenen aan balanssystemen.

Verder willen wij een aantal docenten van de opleiding bedanken voor de ondersteuning tijdens het hele proces. Als eerst, onze hoofdbegeleidster Jorine Koopman, die ons tot het eind heeft gemotiveerd om tot een zo goed mogelijk eindresultaat neer te zetten. Verder willen we haar bedanken voor alle tijd waarin zorgvuldig met ons de feedback van de geschreven stukken is door genomen. Ook willen wij Aad Lagerberg bedanken, voor alle feedback die hij gegeven heeft op de geschreven stukken en suggesties voor verduidelijking van de scriptie. Tot slot willen wij Robert Mcmeikan en Kas Peters hartelijk bedanken, voor ondersteuning bij de vervaardiging van de modellen.

Den Haag, juni 2013

Milos Benistant & Thijs Hartveld

Samenvatting

In dit project wordt een zwaartekrachtcompensator ontworpen, voor mensen met de spierziekte van Duchenne. Het doel van deze afstudeeropdracht, is het ontwerpen van een zwaartekrachtcompensator die een variabele massa (massa eigen arm en massa gebruiksvoorwerp) kan compenseren. De zwaartekrachtcompensator moet onder de kleren gedragen kunnen worden. Een dergelijke zwaartekrachtcompensator ontwerpen is moeilijk. Om deze redenen is alleen gekeken naar zuiver flexie en extensie van de elleboog in een sagittaal vlak. Hierbij staat de bovenarm vast. De werkelijke situatie is versimpeld. De zwaartekrachtcompensator compenseert een massa over een ROM van 110° (15° - 125°).

Om een constructie in balans te houden moet er voor gezorgd worden dat de som van de kinetische energie en de potentiële energie in elke situatie constant is. In deze afstudeeropdracht wordt gebruikt gemaakt van een principe genaamd basic gravity equilibrator. In dit systeem wordt gebruik gemaakt van de variabele:

- a, verticale afstand van veer tot draaipunt;
- k, de veerconstante;
- r, de afstand van veeraanhechting op de balansarm tot het draaipunt.

Een basic gravity equilibrator is in balans als wordt voldaan aan de formule $mgL = akr$. Als de massa (m) veranderd, dan veranderd het product van mgL. akr moet gelijk zijn aan mgL. Dus moet één van de variabele a, k of r aangepast worden om de verandering van m te compenseren.

Gebleken is dat een mechanische constructie onmogelijk kan werken. Dit komt neer op een simpele natuurwet, die stelt dat de totale hoeveelheid energie in een constructie te allen tijden constant blijft. Wanneer de massa toeneemt, neemt het product van mgL toe en wordt er energie aan de constructie toegevoegd. Vanaf dit moment heerst er een onbalans en moet er energie worden toegevoegd aan het product van akr. Om dit weer constant te maken aan mgL.

In het eindontwerp wordt een zelf ontwikkeld idee aangeboden, waarbij twee drukveren een virtuele veer nabootsen. Deze twee drukveren staan onder een hoek, zodat de kracht van de drukveren kunnen worden ontbonden in horizontale en verticale componenten. De veren hebben in horizontale richting geen effect op het systeem, waardoor alleen de verticale componenten nog een invloed hebben op de balans van het systeem. De som van de twee verticale componenten, van de twee drukveren, vormen de virtuele veer. Wanneer de massa kleiner wordt zal de hoek tussen de veren vergroot worden. Bij een vergroting van de hoek wordt de verticale component kleiner en de horizontale component groter. Hierdoor wordt de k van de virtuele veer kleiner en is het systeem weer in balans. Het product van akr verkleind totdat deze weer gelijk is aan het product van mgL.

Het eindontwerp is een zwaartekrachtcompensator die een variabele massa kan compenseren over een ROM van 110° (15° - 125°).

Inhoudsopgave

Voorwoord 2

Samenvatting 3

Inhoudsopgave 4

Inleiding 6

1. Analysefase 8

1.1. Het ziektebeeld Duchenne 8

1.2. Bestaande armortheses 8

1.3. Dagelijkse activiteiten en Range of motion 11

1.4. Compensatiekracht 12

1.4.1. Massa eigen arm 12

1.4.2. Massa gebruiksvoorwerp 12

1.5. Basic gravity equilibrator 13

1.5.1. Rekenvoorbeeld basic gravity equilibrator 15

1.6. Variabele kracht 16

1.7. Conventionele veren 16

1.8. Systeemeisen 17

1.8.1. Ruimte onder kleding 17

1.8.2. Veiligheid en gebruiksvriendelijkheid 18

1.8.3. Massa zwaartekrachtcompensator 18

1.8.4. Positie zwaartekrachtcompensator 18

2. Conclusies analysefase 20

2.1. Systeeminformatie 20

2.1.1. Basic gravity equiliberator 21

2.1.2. Variabele kracht 21

2.1.3. Conventionele veren 21

3. Ontwerpfase 22

3.1. Mechanisch concept 22

3.1.1. Evaluatie mechanisch concept 23

3.2. Introductie elektrische elementen 25

3.2.1. Energieleverancier 25

3.2.2. Energiezuinig 26

3.2.3. Massadetectie 27

3.3. Herziene eisen en wensen 28

3.4. Elektrische concepten 29

3.4.1. Concept 1 29

3.4.2. Concept 2 30
3.4.3. Concept 3 32
3.5. Evaluatie elektrische concepten 34
3.5.1. Toelichting 34
3.5.1.1. Concept 1 34
3.5.1.2. Concept 2 35
3.5.1.3. Concept 3 35
3.6. Gekozen concept 35
4. Optimalisatie 36
4.1. Optimalisatie virtuele veer 36
4.2. Eindconcept 39
5. Testfase 41
5.1. Testen 42
6. Discussie 43
7. Aanbevelingen 46
7.1. Bevestiging orthese 46
7.2. Remsysteem eindontwerp 46
7.3. Voeding elektrische componenten 47
7.4. Hoogteverschil 48
7.5. Breedte zwaartekrachtcompensator 48
8. Conclusie 49
Literatuurlijst 50
Bijlage 52
Bijlage I: Veerberekeningen 52
Bijlage II: Sterkteberekeningen 55
Wrijving berekeningen 55
Schuifspanning 55
Stuikspanning 56
Buigspanning 57
Buigspanning remas 57
Buigspanning rotatieas 58
Bijlage III: Formuleblad 60
Bijlage IV Bouwtekeningen 61

Inleiding

De opdracht voor dit afstudeerproject is afkomstig van de stichting Flextension. Flextension is een organisatie waarin verschillende universiteiten in Nederland (TU Delft, UMC St. Radboud, VU medisch centrum en Universiteit Twente) en een internationale patiëntenbelangenvereniging (Duchenne Parent Project) samenwerken. De stichting stelt zich tot doel om nieuwe hulpmiddelen te ontwerpen die de kwaliteit van leven van patiënten met Duchenne kunnen verbeteren
Dit afstudeerproject is een onderdeel van een langer lopend project A(bility)-Gear. Het doel van het A(bility)-Gear project is het ontwikkelen van een onopvallend, lichaamsgebonden hulpmiddel dat onder de kleding gedragen kan worden en het onafhankelijke functioneren van de arm ondersteunt tijdens belangrijke dagelijkse activiteiten (een zogenaamde zwaartekrachtcompensator).
Het werkingsprincipe van de beoogde zwaartekrachtcompensator is gebaseerd op de basic gravity equilibrator beschreven in onderzoeken van Agrawal & Agrawal, French & Widden en Schenk, Guest & Herder (Agrawal & Agrawal, 2005; French & Widden, 2000; J. Herder, 1998; Lin, Shieh, & Chen, 2013; Schenk, Guest, & Herder, 2007). Deze balanceersystemen kunnen een constante massa balanceren in elke gewenste hoek. Deze balanceersystemen kunnen zonder moeite van hoekstand veranderen. Hulpmiddelen die gebaseerd zijn op dergelijke statische balanceersystemen zijn over het algemeen afgesteund op de rolstoel of omgeving.
Het einddoel van het A-Gear project is om een aantal op het lichaam gedragen compensatoren te ontwerpen en te vervaardigen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in drie soorten orthesen. Een passieve, een actieve en een motion controlled orthese. Bij een passieve orthese wordt de massa van de eigen arm ondersteund. Bij een actieve orthese zal, buiten het ondersteunen van de arm, ook een moment worden geleverd in de gewenste bewegingsrichting. Bij een motion controlled orthese moet worden gedacht aan een exoskelet dat aangestuurd wordt door resterende signalen van het lichaam (bijv. EMG,ECG of EEG).

Dit afstudeerproject zet een eerste stap naar de actieve compensator. In dit project zal de compensator afgesteund worden op het lichaam van de gebruiker. Er zal worden gewerkt aan het kracht-leverend (compensator) systeem en niet aan de inklemming van de arm of de ophanging aan het lichaam. Het ontwerpen en vervaardigen van een mechanische zwaartekracht compensator die automatisch variabele krachten compenseert in alle hoekstanden is erg uitdagend. Daarom is gekozen voor een simpele startsituatie. Hierin wordt het te ondersteunen vlak als zuiver verticaal verondersteld. Daarbij zal alleen in het sagittale vlak bewogen worden. Het gewricht dat zal worden ondersteund is de elleboog en de bewegingen zullen zuiver flexie en extensie zijn. De werkelijke situatie is natuurlijk vele malen gecompliceerder. Indien blijkt dat een actieve armorthese mechanisch niet haalbaar is, door de grootte van het systeem of technische redenen, zal een energiezuinig ontwerp aangeleverd worden, met kleine elektrische elementen.
In deze afstudeeropdracht zal een ontwerp worden aangeleverd van een balanceersysteem, voor in een actieve armorthese, dat een variabele externe kracht plus de massa van de eigen arm kan compenseren in het sagittale vlak bij het uitvoeren van zuiver flexie en extensie. Van dit balanceersysteem zal een model worden vervaardigd die de werkingsprincipes laat zien van het ontwerp.

Flextension heeft een aantal randvoorwaarden verbonden aan dit project:

- De zwaartekrachtcompensator moet klein blijven, zodat het onder de kleding kan worden gedragen;
- De zwaartekrachtcompensator moet over de gekozen vrijheidsgraad een variabele massa kunnen compenseren;
- De zwaartekrachtcompensator moet over dezelfde vrijheidsgraad, als waarover wordt gecompenseerd, door gebruik van de eigen spierkracht vrijwillig kunnen worden bewogen;
- De zwaartekrachtcompensator reguleert automatisch de compensatiekracht ten gevolge van de belasting;
- Het geluid dat de zwaartekrachtcompensator maakt moet verwaarloosbaar zijn.

1. Analysefase

In de analysefase is in de literatuur gezocht naar het ziektebeeld Duchenne. Verder is gekeken naar dagelijkse activiteiten (ADLs) en het belang van flexie en extensie. De range of motion (ROM) van flexie en extensie tijdens ADLs is onderzocht om zo de ROM van de zwaartekrachtcompensator te bepalen. Vervolgens is gekeken naar bestaande armortheses om een beeld te schetsen van bestaande armortheses. Ook is gekeken naar de grootte van de massa die de compensator moet compenseren. Denk hierbij aan de massa van de eigen onderarm en de massa van een gebruiksvoorwerp. Tot slot is gekeken naar het werkingsprincipe van balanssystemen en oplossingen om variabele massa's te compenseren.

1.1. Het ziektebeeld Duchenne

Het ziektebeeld van Duchenne wordt gekenmerkt door progressieve spierdystrofie. Duchenne komt voornamelijk voor bij het mannelijke geslacht door een afwijking in het X-chromosoon. 1 op de 3500 jongens wordt geboren met het ziektebeeld Duchenne. Bij meisjes komt Duchenne niet vaak voor doordat de afwijking in het X-chromosoom door het andere X-chromosoom wordt gecompenseerd, doch is het mogelijk dat ook meisjes het ziektebeeld van Duchenne hebben. De symptomen van Duchenne worden geconstateerd tijdens kindertijd. Vanaf het vierde tot vijfde levensjaar is te zien dat kinderen met Duchenne minder beweeglijk zijn dan andere kinderen van hun leeftijd. Opstaan, staan op de bal van de voet en springen gaan moeilijk. Als het twaalfde levensjaar is bereikt zijn de meeste Duchenne patiënten gebonden aan een rolstoel. Dit komt doordat er te weinig spierkracht aanwezig is om de totale lichaamsmassa te ondersteunen. De spierkracht in de bovenste extremiteit is net als in de onderste extremiteit afgenomen. Taken waarbij de arm tegen de zwaartekracht in wordt bewogen zijn lastig. Rond het twintigste levensjaar is de totale spierkracht dermate aangetast dat het adembewegingsapparaat hieronder lijdt, waardoor mensen met Duchenne gebonden zijn aan ademhalingsapparatuur. 90% van de Duchenne patiënten overlijdt als gevolg van falen van het adembewegingsapparaat (Bartels et al., 2011; Bradley & Parsons, 1998; Cornu, Goubel, & Fardeau, 2001; Lue et al., 2006; Lue, Lin, Chen, & Lu, 2009; McDonald & Abresch, 1995; Tyler, 2003).

1.2. Bestaande armortheses

Een marktonderzoek is gestart naar bestaande armortheses. In de bacheloropdracht van Bijvank (Bijvank, 2010) is eenzelfde marktonderzoek gedaan. In het onderzoek van Bijvank wordt onderscheidt gemaakt in vier soorten armortheses.

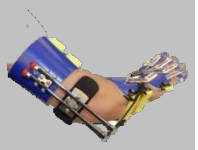
- Armondersteuningen
    - 'Een armondersteuning is een apparaat welke de arm ondersteunt. De gebruiker moet zelf de benodigde spierkracht leveren om de arm te kunnen bewegen'.
- Ortheses
    - 'Ortheses zijn uitwendig gedragen hulpmiddelen ter correctie van standsafwijkingen of abnormale beweeglijkheid van gewrichten of de wervelkolom'.

- Momentaanbrengers
    - ‘Momentaanbrengers zijn een soort ortheses. Het verschil is echter dat deze ortheses een moment rond de elleboog aanbrengen. Dit kan zijn om bepaalde bewegingen te beperken of om andere bewegingen juist toe te laten’.
- Exoskelet
    - ‘Een exoskelet is een uitwendig skelet dat ter bescherming dient van het lichaam. Een robotisch exoskelet verbetert het fysieke kunnen van de mens’.

Tabel 1.1 is een overzicht van het marktonderzoek van Bijvank, hier zijn voor- en nadelen met betrekking tot deze afstudeeropdracht aan toegevoegd. Tabel 1.1 laat zien dat de bestaande armortheses niet voldoen aan de eisen die worden gesteld aan de te ontwikkelen zwaartekrachtcompensator. Zo beperken sommige ortheses bewegingen en/of worden de ortheses niet mechanisch maar elektronisch aangestuurd.
Verder worden ortheses vaak op de rolstoel gemonteerd en zijn de ortheses groot en opzichtig. Flextension is juist innovatief door ortheses te ontwikkelen die onder de kleding gedragen kunnen worden en buiten de rolstoel.

Tabel 1.1: overzicht marktonderzoek Bijvank. Naam en beschrijving van Bijvank (2010). Voor- en nadelen met betrekking tot deze afstudeeropdracht.

Soort	Naam	Beschrijving	Voordelen	Nadelen	
Armondersteuning	Armon	Een ondersteuning met veercompensatie-mechanisme. Het veersysteem compenseert de massa van de arm.	Compensatie arm mechanisch; Veilig; Gebruiksvriendelijk.	Vast aan rolstoel; Groot en opzichtig.	
	Freebal	Gewichtsonder-steuning voor revalidatie-doeleinden. Compenseert massa van de arm.	Compensatie arm mechanisch; Niet complex in gebruik; Grote bewegingsvrijheid.	Groot en opzichtig; Niet mobiel.	
	Darwing	Dynamische armondersteuning voor mensen die wel een grijpfunctie hebben maar minimale spierkracht in de arm.	Volledige compensatie in alle bewegingsrichtingen.	Elektrisch aangestuurd; Groot en opzichtig.	

	WREX	WREX (Wilmington Robotic Exoskeleton) verhoogt bewegingsmogelijkheid van de bovenste extremiteit.	Mechanische ondersteuning.	Niet onder de kleren te dragen.	
Ortheses	DeRoyal post op elbow brace	Voor mensen die een elleboogcorrigerende operatie hebben ondergaan. De brace biedt weerstand in gewenste hoek.	Mechanisch systeem; Biedt weerstand tegen externe krachten; Houdt arm vast in gewenste hoek.	Beperkt arm in bewegen.	
	Progress Elbow Hinge Splint	Brace laat bepaalde bewegingsvrijheid toe. Met vast draaien van schroeven kan ook geen bewegingsvrijheid worden gerealiseerd.	Mechanisch systeem; Houdt arm vast in gewenste hoek.	Eenmaal vast gezet geen bewegelijkheid in vrijheidsgraad.	
	Saeboreach	Bewegen van hand resulteert in het extenderen en flecteren van de elleboog.	Mechanisch systeem; Vrijheid in bewegen.	Energie opgewekt door lichaam.	
	Wilmer	Ondersteunt arm naar flexie d.m.v. een instelbare veer. Elleboog kan worden gestrekt d.m.v. zwaartekracht.	Mechanisch systeem; Compact.	Geen volledige ondersteuning in beschikbare ROM.	
Moment-aanbrengers	ADA flex solutions elbow extension orthosis	Actieve behandeling van elleboogflexie contractuur door constante extensiekracht.	Mechanisch systeem.	Arm wordt in een richting gedwongen.	
	Comfy spring loaded goniometer elbow orthosis	Ondersteunt draaiingen en ondersteunt de arm in een gewenste positie.	Mechanisch systeem.	Ondersteunt geen variabele externe kracht	
Exoskelet	HAL-5	HAL (Hybrid Assitive Limb) stuurt het lichaam aan met overgebleven signalen.	Grote kracht-vergroting	Groot en opzichtig; Beweging elektronisch aangestuurd.	

Inflatable exoskeleton	Opblaasbaar exoskelet waar de functie van spieren wordt overgenomen door het samenpersen van lucht. Met sensoren bij elleboog en pols kunnen de spieren worden gecontroleerd.	Grote kracht-vergroting	Groot en opzichtig; Beweging elektronisch aangestuurd.	

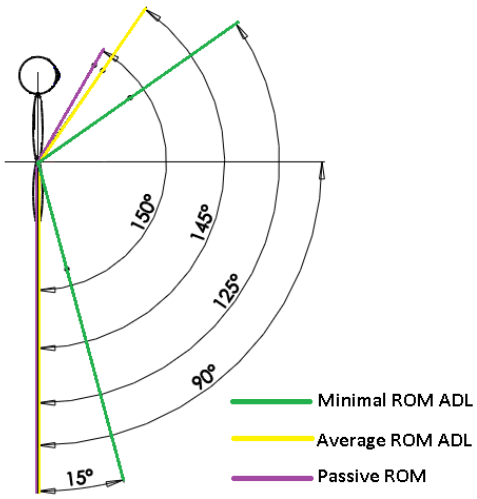
1.3. Dagelijkse activiteiten en Range of motion

Dagelijkse activiteiten (ADLs) zijn belangrijke taken om zelfstandig te kunnen leven. Voorbeelden van ADLs zijn eten, drinken, het kammen van de haren, perineale zorg, telefoneren en lezen. Tijdens deze afstudeeropdracht worden ADLs waarbij voorwerpen naar het hoofd worden gebracht als primaire ADLs beschouwd. In afbeelding 1.1 zijn een aantal van deze ADLs weergegeven.

Afbeelding 1.1: ADLs voorwerpen naar hoofd voor- en zijaanzicht.
A = Drinken; B = Eten; C = Haren kammen; D = Tandenpoetsen; E = Telefoneren.

Bij het onderzoeken van de ROM van de elleboog is gekeken hoeveel graden nodig zijn voor het uitvoeren van ADLs. Aan de hand hiervan wordt het bereik van de zwaartekrachtcompensator bepaald. De compensator zal binnen deze ROM de massa van de eigen arm en gebruiksvoorwerp ondersteunen.

In afbeelding 1.2 zijn alle gevonden ROM waardes gecombineerd tot één ROM van de elleboog (Aizawa et al., 2010; Andel, Wolterbeek, Doorenbosch, Veeger, & Harlaar, 2008; Morrey, Askew, & Chao, 1981; Murray & Johnson, 2004; Petuskey, Bagley, Abdala, James, & Rab, 2007; Pieniazek, Chwala, Szczechowicz, & Pelczar-Pieniazek, 2007; Rosen,



Afbeelding 1.2: Range Of Motion (ROM) elleboog. Activity of Daily Living (ADL).

Perry, Manning, Burns, & Hannaford, 2005; Sheikhzadeh, Yoon, Pinto, & Kwon, 2008).
In afbeelding 1.2 (pag. 11) wordt onderscheidt gemaakt tussen Passive ROM, Average ROM ADL en Minimal ROM ADL. Passive ROM is de maximale ROM van de elleboog. De Average ROM ADL is de gemiddelde ROM van de elleboog die gebruikt wordt tijdens ADLs (145°, 0°-145°). Dit geldt ook voor de Minimal ROM ADL (110°, 15°-125°) alleen is dit het minimale bereik. De behandelde ROMs zijn niet specifiek bepaald voor Duchenne patiënten. Duchenne patiënten zijn in hun bewegingen beperkt en kunnen niet dezelfde Average ROM bewerkstelligen als gezonde personen. Dit komt niet doordat de Passive ROM kleiner is maar omdat de nog aanwezige spierkracht niet voldoende is om de elleboog over de gehele ROM te bewegen. Toch moeten de Duchenne patiënten net als gezonde personen ADLs uitvoeren. Het is dus van belang dat de Minimal ROM bij het uitvoeren van de ADLs kan worden uitgevoerd. Daarom is gekozen om de zwaartekrachtcompensator de kracht te laten compenseren voor een ROM van 110°, van 15° tot 125°.

1.4. Compensatiekracht

De zwaartekrachtcompensator zal een kracht moeten leveren om de massa van de eigen arm en een eventueel gebruiksvoorwerp te compenseren.

1.4.1. Massa eigen arm

De massa van de eigen arm moet ondersteund worden door de zwaartekrachtcompensator, omdat Duchenne patiënten onvoldoende spierkracht hebben om hun eigen arm op te tillen. Door de massa van de arm te ondersteunen zal de mobiliteit toenemen.
In het onderzoek van McDonald & Abresch (McDonald & Abresch, 1995) is o.a. het gewicht van Duchenne patiënten onderzocht. Hieruit blijkt dat de gemiddelde massa van een Duchenne patiënt tussen de tien en twintig jaar rond de 50kg ligt. Voor P5 ligt het rond de 42kg en voor P95 84kg. In de reader van Broeren (Broeren, 2011) wordt het lichaam verdeeld in gewichtpercentages per lichaamsdeel. Het gewichtspercentage van één onderarm voor mannen bedraagt 1.9%. Dit resulteert in een gemiddeld massa van 0.95kg van de onderarm, voor P5 zal dit 0.8kg zijn en voor P95 1.6kg. In de berekeningen zal uit worden gegaan van de gemiddelde massa van 1kg. Dit gewicht zal ook gebruikt worden bij het vervaardigen van een prototype.

1.4.2. Massa gebruiksvoorwerp

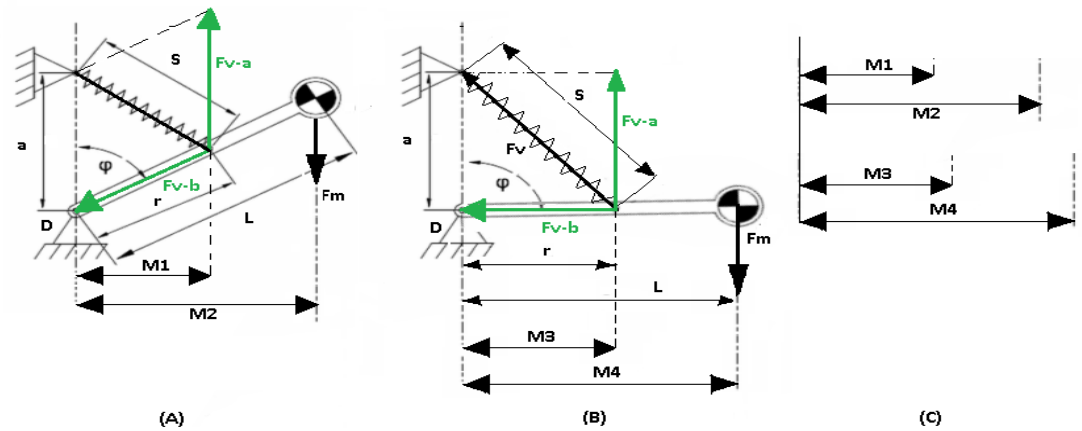
In het dagelijks leven wordt de arm voornamelijk bewogen om voorwerpen te verplaatsen. Hierom is het van belang niet alleen de massa van de arm maar ook de massa van een gebruiksvoorwerp te ondersteunen.
Voor het kiezen van de maximale massa van het gebruiksvoorwerp wordt gekeken naar voorwerpen die frequent gebruikt worden tijdens ADLs. Primaire ADLs die Duchenne patiënten uitvoeren zijn eten en drinken. Hierbij zal een volle drinkbeker het zwaarst zijn wat opgetild zal worden. Het inschenken van een glas drinken zal over het algemeen gedaan worden door een verzorger of ouder hierom wordt een massa van 1kg te groot geacht.

In het onderzoek van Florence (Florence et al., 1984) worden klinische testen bij Duchenne patiënten geëvalueerd. Bij één van de klinische testen moet een massa van 0.5kg boven ooghoogte worden geplaatst. Indien dit succesvol wordt gedaan wordt de spierkracht voor Duchenne patiënten als normaal beschouwd voor het uitvoeren van ADLs. Daarom zal de zwaartekrachtcompensator een massa van 0 tot 0.5kg ondersteunen.

1.5. Basic gravity equilibrator

De basis voor veel zwaartekracht compensatie systemen is het systeem weergegeven in afbeelding 1.3a. Het basis balanceersysteem zoals weergegeven in afbeelding 1.3a wordt behandeld in het onderzoek van Herder, Barents, Schenk, Van Dorsser & Wisse (Herder, Barents, Schenk, Van Dorsser, & Wisse, 2007). Dit systeem balanceert de massa m door middel van een zero-free-length spring, zie intermezzo 1.1. (pag. 14) De kracht Fv, geleverd door de veer, kan worden ontbonden in twee componenten Fv-a en Fv-b. Hierbij wordt component Fv-b steeds gekozen in de richting van het draaipunt en component Fv-a wordt steeds verticaal gekozen. Component Fv-a is het deel van de veerkracht dat wel een moment levert in draaipunt D. Component Fv-b levert geen moment in draaipunt D, omdat de kracht door het draaipunt loopt. Hierdoor heeft component Fv-b geen effect op de balans van het systeem.

De hoek φ kan veranderd worden zonder dat de balans verloren gaat, doordat component Fv-a niet verandert van grootte en richting, zie afbeelding 1.3. Wat wel verandert, is de momentsarm M2. Deze is maximaal wanneer φ in 90° staat en wordt kleiner wanneer φ groter of kleiner is dan 90°. Hierdoor wordt het moment in draaipunt D, ten gevolge van de zwaartekracht op de massa (Fm), afhankelijk van de hoekstandsverandering groter of kleiner, zie afbeelding 1.3c. De momentsarm van Fv-a varieert op identieke wijze met de hoek. Aangezien Fm, net als Fv-a, constant blijft kunnen (bij een juiste verhouding tussen a, r en de veerconstante (k)) de momenten ten gevolge van Fv-a en Fm in elke hoekstand in evenwicht zijn. Uiteraard moet de verhouding tussen a, r, de veerconstante (k) en de massa en afstand L eenmalig op elkaar worden afgestemd. Bij een wijziging van de massa zal ook de benodigde Fv-a wijzigen. Een belangrijke voorwaarde voor het functioneren van het bovenstaande mechanisme is dat de kracht in de veer proportioneel is aan de lengte van de veer. De veerkracht moet nul zijn als de massa zich recht boven D bevindt.

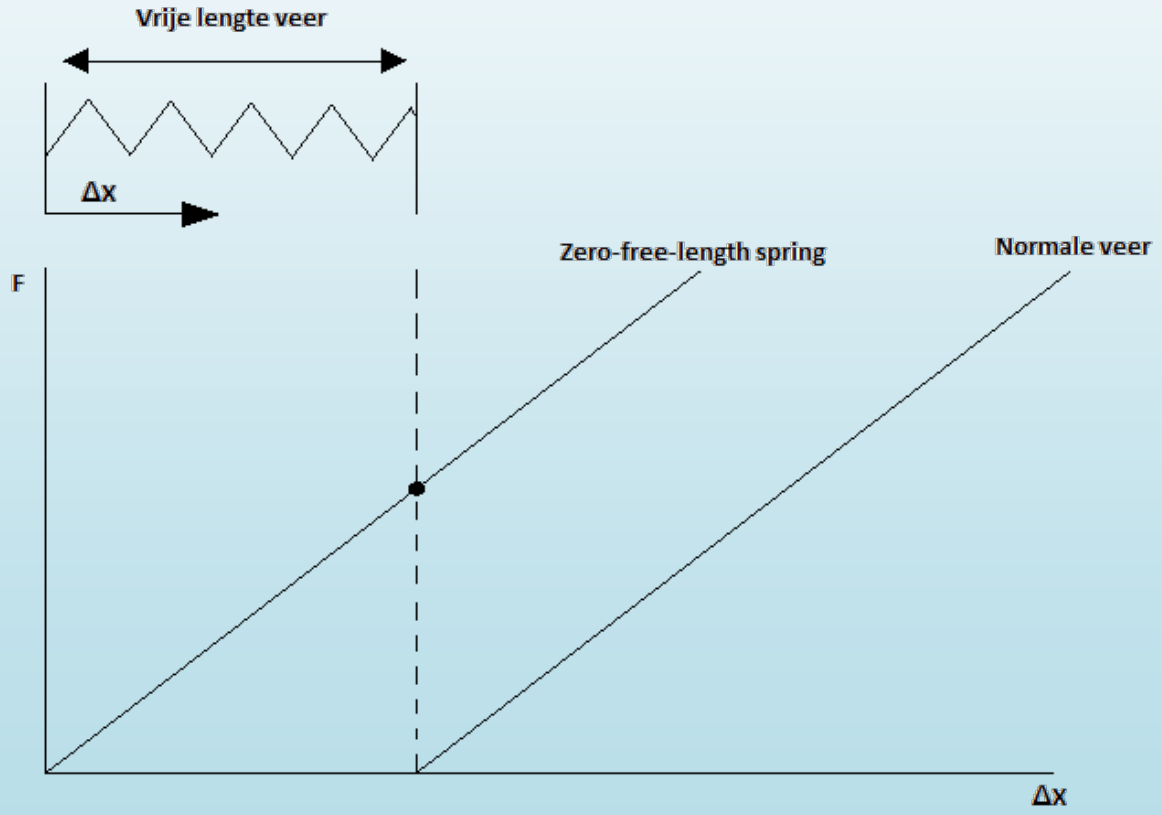


Afbeelding 1.3a: static balancer (Herder et al., 2007).
Afbeelding 1.3b: static balancer φ 90° (Herder et al., 2007).
Afbeelding 1.3c: toename momentsarm
a = afstand draaipunt tot ophangpunt veer;
D = draaipunt;
r = afstand draaipunt tot ophangpunt veer aan arm;
L = afstand draaipunt tot middelpunt massa;
s = lengte veer;
m = massa;
φ = hoek arm met verticaal om draaipunt D;
Fv = veerkracht;
Fv-a = ontbonden veerkracht Fv in Y-richting;
Fv-b = ontbonden veerkracht Fv in X-richting;
M1 = momentsarm component Fv-a afbeelding 1.3a;
M2 = momentsarm massa afbeelding 1.3a;
M3 = momentsarm M1 afbeelding 1.3b, bij hoekverdraaiing φ.
M4 = momentsarm M2 afbeelding 1.3b, bij hoekverdraaiing φ.

In de onderzoeken van Agrawal & Agrawal, French & Widden, Herder, Lin, Shieh & Chen en Schek Guest & Herder (Agrawal & Agrawal, 2005; French & Widden, 2000; Herder, 1998; Lin, Shieh, & Chen, 2013; Schenk, Guest & Herder, 2007) wordt ook gebruik gemaakt van veren/zero free length springs om het systemen in balans te houden.

Intermezzo 1.1.
Zero-free-length springs

Een zero-free-length spring is een veer waarbij de vrije lengte 0 is, zie grafiek 1.1I. Hierdoor is de trekkracht van de veer proportioneel aan de lengte van de veer i.p.v. de uitrekking. De vrije lengte van de veer is de lengte waarbij er een trekkracht is van 0N. Een zero-free-length spring levert een kracht van 0N wanneer de lengte van de zero-free-length spring 0 is. In theorie is dit mogelijk, maar in de praktijk zal de zero-free-length spring nooit een lengte 0 hebben.
In normale veer, met een rustlengte van 10cm, is de geleverde kracht 0N bij een lengte van 10cm. De toename van de kracht is afhankelijk van de veerconstante. De kracht loopt vervolgens proportioneel aan de uitrekkin op. Hierdoor is bij een normale veer de kracht proportioneel aan de uitrekking. Bij een zero-free-length spring begint de veer kracht te leveren vanaf een bepaalde kracht. Bijvoorbeeld een kracht van 10N bij een rustlengte van 10cm. De toename van de kracht hangt af van de veerconstante. Hierdoor is de kracht van een zero-free-length spring niet proportioneel aan de uitrekking maar aan de lengte. Zero-free-length springs zijn niet direct beschikbaar en lastig te vervaardigen (Herder et al., 2007).



Grafiek 1.1I: krachtverloop zero-free-length spring tegenover een normale veer. De kracht van de zero-free-length spring begint niet bij 0N, een normale veer doet dit wel. Resultaat kracht van een zero-free-length spring proportioneel aan zijn lengte, kracht van de normale veer proportioneel aan de uitrekking. Beide veren hebben, in dit voorbeeld, dezelfde veerconstante.

1.5.1. Rekenvoorbeeld basic gravity equilibrator

In het onderzoek van Herder (Herder et al., 2007) wordt het systeem weergegeven in afbeelding 1.3 (pag. 13) doorgerekend met energie. Energieberekeningen zijn goed bruikbaar voor complexere systemen. Het doorrekenen van het systeem met momenten wordt lastiger naarmate het systeem complexer wordt.

De potentiële energie van het systeem (U_p) is gelijk aan de som van de potentiele energie van de massa (U_m) en de energie opgeslagen in de veer (U_s), zie formule 1.

$$U_p = U_m + U_s = mgLcos\varphi + \frac{1}{2}ks^2 \qquad (1)$$

Waarbij:

$$s = \sqrt{a^2 + r^2 - 2arcos\varphi} \qquad (2)$$

Hier is m de massa van de belasting, g de gravitatie, L de lengte van draaipunt tot middelpunt van de massa, k de veerconstante en s de lengte van de veer. Het systeem is pas in evenwicht wanneer aan formule 3 wordt voldaan. Wanneer aan formule 3 wordt voldaan wordt automatisch aan formule 4 en 5 voldaan. Formule 3 is de gedifferentieerde functie van formule 1.

$$\frac{\partial U_p}{\partial \varphi} = -mgLsin\varphi + akrsin\varphi = 0 \qquad (3)$$

Formule 3 wordt omgeschreven tot formule 4. Als het systeem in elke hoek in balans wil zijn moet het voldoen aan de formule 4. Voldoet het systeem aan formule 4 dan is het systeem in welke opstelling dan ook in balans. Uit formule 4 blijkt ook dat de hoek van het systeem er niet meer toe doet, aangezien sin φ aan beide kanten kan worden weggestreept.

$$-mgLsin\varphi + akrsin\varphi = 0$$
$$mgLsin\varphi = akrsin\varphi$$
$$mgL = akr \qquad (4)$$

Uit formule 4 volgt formule 5 als gevolg van een constante gravitatie die op de massa staat.

$$F_m = \frac{akr}{L} \qquad (5)$$

Om deze theorie te bewijzen zal het systeem een keer worden doorgerekend. Het systeem zal worden benaderd vanaf formule 5. De veerconstante (k) zal variabel zijn en worden uitgerekend. Voor F_m = 60N, a = 100mm, r = 50mm, L = 100mm, g = 10m/s^2 en φ = 45°. De gebruikte variabelen zijn niet gebaseerd op de werkelijkheid.

$$60 = \frac{100k50}{100}$$
$$60 = 50k$$
$$k = 1.2N/mm$$

Nu k bekend is zijn alle variabele bekend. Nu kan er worden gekeken of het systeem in balans is. Dit wordt gedaan door alle variabele in formule 4 in te vullen. Indien mgL gelijk is aan akr, is het systeem in balans. Zoals verwacht is het systeem in balans in elke hoek.

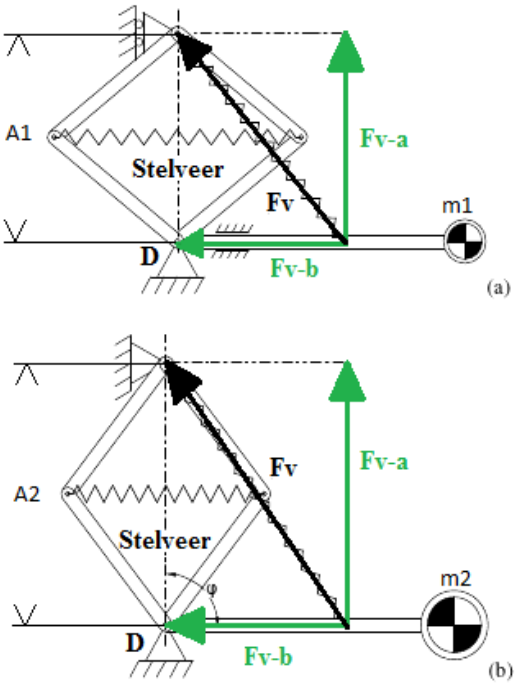
$$mgL = akr$$
$$6 \times 10 \times 100 = 100 \times 1.2 \times 50$$
$$6000 = 6000$$

Indien de massa veranderd zullen de variabele a, k, r en L ook moeten veranderen om dit systeem in balans te houden. Een oplossing voor een variabele massa wordt gegeven in H1.6. Variabele kracht.

1.6. Variabele kracht

Zoals in H1.5. Basic gravity equilibrator (pag. 13) is uitgelegd, kan een constante massa worden gebalanceerd met behulp van veren. Tijdens deze afstudeeropdracht wordt echter gekeken naar het balanceren van een arm in twee situaties. Een situatie waar wel gebruik wordt gemaakt van een gebruiksvoorwerp en een situatie waar geen gebruik wordt gemaakt van een gebruiksvoorwerp. Hier is dus geen sprake van een constante kracht en daarom moet gekeken worden naar een manier om de compensatiekracht te variëren. In afbeelding 1.4 wordt een voorbeeld gegeven van een systeem waarbij de compensatiekracht kan variëren. De veerkracht Fv is nogmaals ontbonden in Fv-a en Fv-b. Waarbij Fv-a wel een moment kan leveren om het draaipunt D. Een van de dingen die meteen opvalt is de toevoeging van de tweede veer, de stelveer. Deze stelveer is een zero-free-length spring en oefent een trekkracht uit op het parallellogram. Met behulp van deze trekkracht kan de afstand A1 (afbeelding 1.4a) worden vergroot tot de afstand A2 (afbeelding 1.4b), waardoor een grotere massa gebalanceerd kan worden.

Doch heeft dit systeem een probleem t.o.v. de gewenste zwaartekrachtcompensator. De stelveer van dit systeem moet, zoals de naam al zegt, worden ingesteld. Dit houdt in dat het systeem moet worden gelockt, zodat de juiste afstand voor A kan worden ingesteld. Het systeem reageert dus niet automatisch op een toename van de massa.



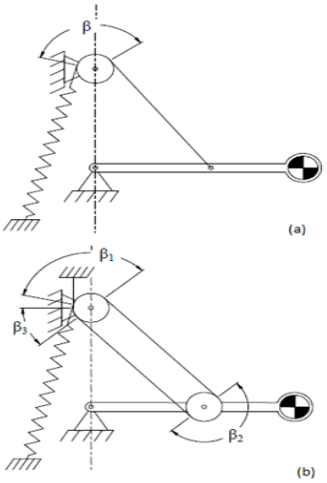
Afbeelding 1.4a: positie 1, systeem met variabele compensatiekracht (Herder et al., 2007).
Afbeelding 1.4b: positie 2, systeem met variabele compensatiekracht (Herder et al., 2007).

1.7. Conventionele veren

Voor de balanceersystemen wordt gebruik gemaakt van zero-free-length springs. Deze veren zijn in de praktijk lastig te verkrijgen. Daarom is gekeken naar hoe conventionele veren opgehangen kunnen worden, zodat deze zich hetzelfde gedragen als zero-free-length springs (Herder et al., 2007).

In afbeelding 1.5a (pag. 17) is een theoretische oplossing weergegeven, waarbij een conventionele veer met een touw om een katrol is gespannen. Zo krijgt de conventionele veer dezelfde eigenschappen als een zero-free-length spring.

Dit komt doordat de ophanging in afbeelding 1.5a de veer zodanig voorspant dat bij het moment van eerste uitrekking de veer direct kracht begint te leveren.
Er wordt een balanceerfout in het systeem geïntroduceerd. Dit komt door het veranderen van de oprolhoek β (afbeelding 1.5a). Wanneer hoek β verandert dan is de lengte van het touw niet altijd precies proportioneel aan de veeruitrekking en dus de te leveren kracht, waardoor de conventionele veer zich niet meer gedraagt als een zero-free-length spring.
Deze balanceerfout kan verholpen worden door meerdere katrollen zo op te hangen dat de oprolhoek altijd gelijk blijft (afbeelding 1.5b). Hoek β_1 en β_3 samen, zijn gelijk aan β_2. De kracht is nu weer proportioneel aan de lengte van het touw.



Afbeelding 1.5a: conventionele veer als zero-free-length spring met balanceerfout (Herder et al., 2007).
Afbeelding 1.5b: conventionele veer als zero-free-length spring zonder balanceerfout (Herder et al., 2007).

1.8. Systeemeisen

Een randvoorwaarde van Flextension is dat de zwaartekrachtcompensator onopvallend/klein moet zijn, zodat de compensator onder de kleding kan worden gedragen. Dit brengt nogal wat problemen met zich mee. Zo mag de zwaartekrachtcompensator niet ver van het lichaam af zitten, omdat deze anders door de kleding heen te zien is. De zwaartekrachtcompensator zal niet groter zijn dan de radius van de mouw. Indien dit wel het geval is zal de zwaartekrachtcompensator door de kleding heen te zien zijn. Uitstekende delen moeten ook zoveel mogelijk worden vermeden.
Verder mogen er geen scherpe randen of gevaarlijk uitstekende delen aan de zwaartekrachtcompensator zitten. Dit zou kunnen leiden tot kleerscheuren en/of lichamelijke verwondingen. Daarbij moet de gebruiker, van de uiteindelijke armorthese, zich kunnen omkleden zonder dat kleding aan de armorthese blijven hangen.
Een andere randvoorwaarde van de opdrachtgever is dat de uiteindelijke armorthese niet aan de rolstoel mag vast zitten, dit staat weer in verband met de eerder genoemde randvoorwaarde dat de compensator onopvallend moet zijn, zodat de armorthese onder de kleding kan worden gedragen. Dit betekent dat de massa van de zwaartekrachtcompensator niet kan worden overgebracht naar de rolstoel maar naar de gebruiker.
De zwaartekrachtcompensator moet dus een kleine massa hebben, zodat het dragen van de uiteindelijke armorthese de gebruiker niet overbelast en/of belemmert in het bewegen.
Tot slot kan de positionering van de zwaartekrachtcompensator een struikelblok zijn. Buiten de eerder genoemde problemen dat de zwaartekrachtcompensator dicht bij het lichaam moet zitten, moet de compensator zo gepositioneerd worden dat het de gebruiker niet belemmert tijdens het uitvoeren van ADLs. Zoals bijvoorbeeld het gebruiken van hun rolstoel waarvan Duchenne patiënten, vanaf ongeveer het tiende levensjaar, aan zijn gebonden.

1.8.1. Ruimte onder kleding

In tabel 1.2 (pag. 18) is de afstand van kleding tot huid te zien voor mannen (Smidts, n.d.-a). Gemiddeld is de afstand van kleding tot huid 3.8cm.

Bij het onder de kleding dragen van de zwaartekrachtcompensator, wordt het dragen van kleding die één confectiemaat groter is dan de eigen maat als redelijk beschouwd. Het dragen van nog grotere kleding wordt als onnodig beschouwd.
Bij het dragen van één confectie maat te grote kleding, wordt de diameter van de mouw 0.5cm groter, zie tabel 1.3. Dit levert een gemiddelde afstand tussen kleding en huid op van 4.3cm. Als maximale breedte maat voor de compensator wordt 4cm genomen dit om de compensator onopvallend te houden.

Tabel 1.2: afstand kleding tot huid (Smidts, n.d.-a).

	Shirt (cm)	Gilet (cm)	Spencer (cm)	Jack (cm)	Hemd (cm)	Gemiddeld (cm)
Armgatdiameter	4-6	1-2	2-3	4-6	4-6	3.8

Tabel 1.3: armsgatdiameter per confectiemaat (Smidts, n.d.-a).

Confectiemaat	**44**	**46**	**48**	**50**	**52**	**54**	**56**	**58**	**60**
Armsgatdiameter (cm)	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14

1.8.2. Veiligheid en gebruiksvriendelijkheid

De zwaartekrachtcompensator mag geen scherpe randen en gevaarlijk uitstekende delen hebben. De zwaartekrachtcompensator mag de kleding niet scheuren en mag geen verwondingen veroorzaken. Verder mag de kleding van de gebruiker niet blijven haken aan de compensator tijdens het omkleden.

1.8.3. Massa zwaartekrachtcompensator

Zoals vermeld is zal de massa van de zwaartekrachtcompensator worden overgebracht op de gebruiker. Daarom is het van belang de compensator zo licht mogelijk te houden. Voorbeelden van lichtgewicht ortheses zijn de Wilmer ortheses (Wilmer Elleboog Orthese (WEO), Wilmer Draag Orthese (WDO), Wilmer Strek Orthese (WSO). De WEO heeft een massa van 155gr, de WDO heeft een massa van 250gr en de WSO heeft, net als de WEO, een massa van 155gr. De zwaartekrachtcompensator die in de uiteindelijke armorthese komt moet ook een lichtgewicht orthese worden. Hierom is gekozen om een vergelijkbaar massa als maximale massa voor de compensator te nemen. Omdat dit nog een prototype is, is gekozen om de maximale massa iets groter te nemen om wat vrijheid te hebben in materiaalkeuze. Het prototype van de zwaartekrachtcompensator zal een maximale massa hebben van 300gr. Het uiteindelijke product moet in de gewichtsklasse liggen van de Wilmer ortheses.

1.8.4. Positie zwaartekrachtcompensator

De exacte locatie van de zwaartekrachtcompensator ten opzichte van de arm is belangrijk voor het ontwerpproces. Om er achter te komen welke positie het handigst is, zijn Duchnenne patiënten geobserveerd en geïnterviewd tijdens een Duchenne congres.

Tijdens deze dag is meegelopen met het kinderprogramma bij Naturalis (Leiden), waar circa dertig kinderen met Duchenne aan hebben meegedaan. Tijdens het kinderprogramma is geobserveerd en is met kinderen gesproken.
Opmerkelijk is de grote mate van diversiteit in hulpmiddelen in gebruik bij de kinderen. Zo had de één een volledig elektrische rolstoel en de ander een loopfiets. Wat opviel met betrekking tot het project is dat de onderkant van de elleboog vermeden moet worden omdat deze veel gebruikt wordt als steun. Als hier een cup of een deel van de orthese zou zitten dan wordt de tastzin van de elleboog benadeeld. Verder is de ophanging van de zwaartekrachtcompensator aan de mediale zijde ook niet wenselijk. Aan de mediale kant van de bovenarm zal de compensator snel gaan schuren/drukken tegen de romp.

2. Conclusies analysefase

Randvoorwaarden Flextension:

1. De zwaartekrachtcompensator moet klein blijven, zodat het onder de kleding kan worden gedragen;
2. De zwaartekrachtcompensator moet over de gekozen vrijheidsgraad een externe kracht kunnen compenseren;
3. De zwaartekrachtcompensator moet over dezelfde vrijheidsgraad, als waarover wordt gecompenseerd, vrijwillig kunnen worden bewogen;
4. De zwaartekrachtcompensator reguleert automatisch de compensatiekracht ten gevolgen van de belasting;
5. Het geluid dat de zwaartekrachtcompensator maakt moet verwaarloosbaar zijn.

Programma van eisen en wensen:

Eisen:

1. Flexie/extensie van de elleboog wordt gecompenseerd De zwaartekrachtcompensator compenseert flexie/extensie van de elleboog over een ROM van 110°, van 15° tot 120° (H1.1. Dagelijkse activiteiten en Range of motion);
2. Te compenseren massa is 1kg met een variabele massa tot 1.5kg (de zwaartekrachtcompensator compenseert altijd de gemiddelde massa van de eigen arm (1kg))(H1.3. Compensatiekracht);
    - Gemiddelde massa van 1kg voor de eigen arm (H1.3.1. Massa eigen arm);
    - Massa gebruiksvoorwerp 0 tot 0.5kg (H1.3.2. Massa gebruiksvoorwerp);
3. De maximale breedte van de zwaartekrachtcompensator is 4cm (H1.8.1. Ruimte onder kleding);
4. Geen scherpe randen en gevaarlijk uitstekende delen aan de zwaartekrachtcompensator (H1.8.2. Veiligheid en gebruiksvriendelijkheid);
5. Geen hinder ondervinden van de zwaartekrachtcompensator tijdens het omkleden (H1.8.2. Veiligheid en gebruiksvriendelijkheid);
6. De maximale massa van de zwaartekrachtcompensator bedraagt 300gr (H1.8.3. Massa zwaartekrachtcompensator);
7. Constructie niet aan de onderkant van de elleboog.

Wensen:

1. Zelfregulerende kracht detectie;
2. Zelfregulerende compensatiekracht verandering;
3. Geen beweging van de arm tijdens bijstellen.

2.1. Systeeminformatie

Tijdens de analyse is gekeken naar verschillende balanceersystemen. Uit deze onderzoeken komen geen eisen of wensen voort maar wel mogelijke mechanische oplossingen. In dit hoofdstuk worden de uitkomsten van de systeemonderzoeken beschreven.

2.1.1. Basic gravity equiliberator

In dit onderzoek is inzicht verkregen in balanceersystemen. Hoe deze werken en hoe er mogelijke aanpassingen aan gedaan kunnen worden. Het systeem is in balans wanneer een juiste verhouding tussen de veerconstante (k), verticale afstand van veer tot draaipunt (a), de afstand van de aanhechting van de veer tot draaipunt (r) en de lengte van de momentsarm (L).
Dit zijn echter constante elementen. Het geen betekent dat wanneer de massa toeneemt, het systeem niet meer in balans is. Tenzij een van de constante elementen variabel wordt gemaakt, zoals bijvoorbeeld de verticale afstand van het draaipunt tot de veer.

2.1.2. Variabele kracht

Zoals vermeld in H1.5. Basis gravity equilibrator (pag. 13) kan het basis balanssysteem geen variabele kracht leveren doordat de veerconstante, de verticale afstand van veer tot draaipunt, de afstand van de aanhechting van de veer tot draaipunt en de momentsarm niet variabel zijn. In H1.6. Variabele kracht (pag. 16) wordt een oplossing gegeven door de verticale afstand van veer tot draaipunt variabel te maken. Een nadeel is echter dat het systeem niet automatisch reageert op een verandering van massa. Het systeem moet worden gelockt voordat de compensatiekracht kan worden veranderd.

2.1.3. Conventionele veren

Voor balanceersystemen wordt in de literatuur voornamelijk van zero-free-length springs gebruik gemaakt. Zero-free-length springs zijn lastig te vervaardigen. In de literatuur worden oplossingen gegeven om conventionele veren zo op te hangen dat de conventionele veer dezelfde eigenschappen krijgt als een zero-free-length spring, beschreven in H1.7. Conventionele veren (pag. 16). Door een katrol toe te voegen en de veer om deze katrol te spannen, middels een touw, zal een conventionele veer zich gedragen als een zero-free-length spring (afbeelding 1.5a, pag. 17). Deze oplossing geeft echter een balanceerfout doordat de oprolhoek van de katrol verandert. Door een extra katrol toe te voegen en de veer om beide katrollen te spannen wordt dit probleem opgelost, zie ook afbeelding 1.5b (pag. 17).

3. Ontwerpfase

In de ontwerpfase is één mechanisch concept en zijn drie elektrische concepten ontwikkeld. Het ideale concept voldoet aan de eisen:

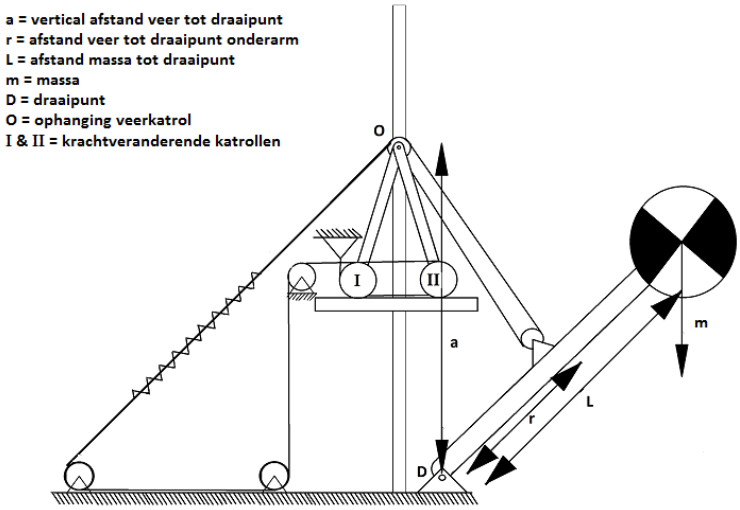
- Compensatie over een ROM van 110° (15° - 120°);
- Compensatie van een massa van 1 tot 1.5kg.
- Zelfregulerende detectie van vergroting of verkleining van de massa;
- Zelfregulerende bijstelling van de compensatiekracht;
- Geen beweging van de arm als gevolg van verschil in kracht tussen compensatiekracht en de te balanceren massa.

Het is onmogelijk gebleken om variabelen a, k en r mechanisch te veranderen zonder daarbij de balans te verstoren tussen de verhouding $mgL = akr$. De elektrische concepten zijn bedacht op basis van de basic gravity equilibrator waarin variabelen a, k en r elektrisch worden aangepast. Verder is op basis van de elektrische concepten een eindconcept gekozen. Dit eindconcept zal in de volgende fase verder geoptimaliseerd worden.

3.1. Mechanisch concept

Zoals besproken in de analysefase kan een variabele massa worden gebalanceerd, wanneer één van de eerder besproken componenten variabel wordt. De eerder genoemde componenten zijn:

- De verticale afstand van veer tot draaipunt (a);
- De afstand van veer aanhechting op de arm tot draaipunt (r);
- De veerconstante (k).



Afbeelding 3.1: mechanisch concept. Reactiekracht in O verandert afstand tussen katrollen I en II waardoor de kracht op de veer vergroot/verkleind.

In afbeelding 3.1 is het mechanische concept te zien. Het idee van het mechanische concept is om k te veranderen, door de voorspanning op de veer te vergroten. Later is gebleken dat dit niet mogelijk is. De voorspanning wordt vergroot door het toepassen van een katrolsysteem (katrol I en II) te zien in afbeelding 3.1. Wanneer de massa vergroot, zal de reactiekracht groter worden in punt *O*. Doordat de reactiekracht groter wordt, zal het katrolsysteem omlaag worden geduwd. Hierdoor wordt het touw tussen de katrollen I en II opgespannen. Met het opspannen van het touw wordt de veer opgespannen, met als gevolg een hogere voorspanning in de veer. Met deze hogere voorspanning kan vervolgens een grotere massa worden gebalanceerd.

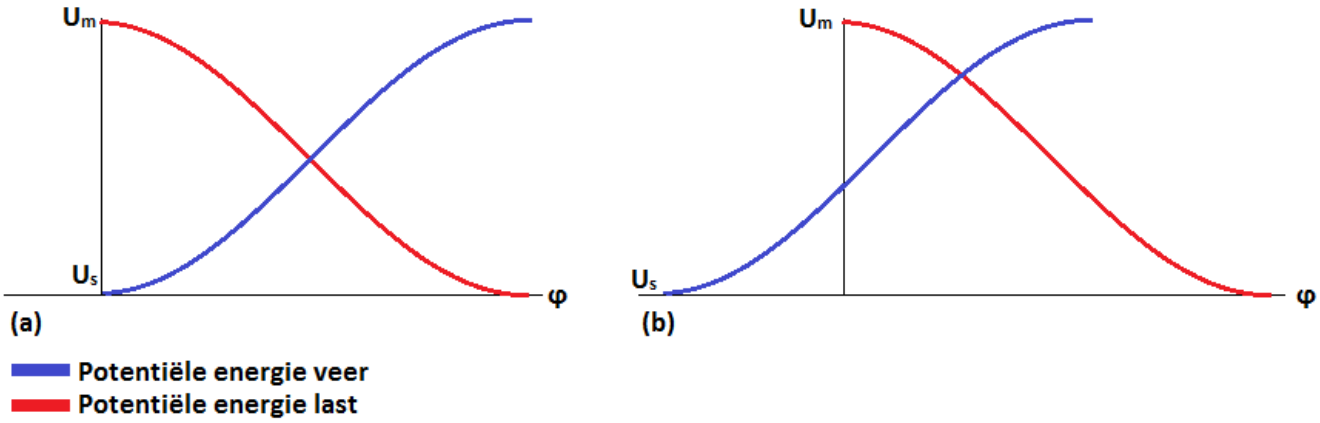
3.1.1. Evaluatie mechanisch concept

Bij het testen van het model van concept 1 is gebleken dat het model niet werkt naar wens. Dit heeft twee redenen. De eerste is dat de rollende elementen (I en II in afbeelding 3.1, pag. 22) niet rollen ten gevolgen van een grotere massa. De tweede reden is dat het balans wordt verstoord tussen de verhouding $mgL = akr$, beschreven in H1.5.1. Rekenvoorbeeld basic gravity equilibrator (pag. 14). De katrol boven de rollende elementen zou naar beneden moeten bewegen, waardoor de rollende elementen uit elkaar worden gedrukt en de balanceerkracht groter wordt.

De rollende elementen worden echter geklemd tussen het draad en de oplegging, wat als gevolg heeft dat de wielen blijven staan, waardoor de balanceerkracht niet automatisch wordt aangepast.

Deze te grote kracht kan wel overwonnen worden door de veer handmatig een grotere voorspanning te geven maar niet door het katrol naar beneden te drukken.

Verder is het zo dat verandering in de voorspanning een balansverlies met zich meebrengt, waardoor niet over de gehele ROM kan worden gebalanceerd. In grafiek 3.1a geeft de lijn (U_s) het gedrag van een zero-free-length spring in een balanssysteem weer. De rode lijn (U_m) is het gedrag van de last. In de grafiek is goed te zien dat voor elke φ U_s en U_m gepaard toe- en afnemen. Wanneer de voorspanning op de veer verandert, schuift U_s op over de X-as, zie afbeelding 1.3b. Dit zorgt ervoor dat de som van U_p ($U_p = U_m + U_s$) niet meer voor elke φ constant is, waardoor de balans is verstoord.



Grafiek 3.1a: basic gravity equilibrator, waar de potentiële energie van de veer (U_s) en de massa (U_m) gepaard toe- en afnemen.
Grafiek 3.1b: basic gravity equilibrator waarbij de veer is voorgespannen. De potentiële energie van de veer (U_s) loopt niet meer gepaard met de potentiële energie van de massa (U_m), wat tot een balansverstoring leidt.

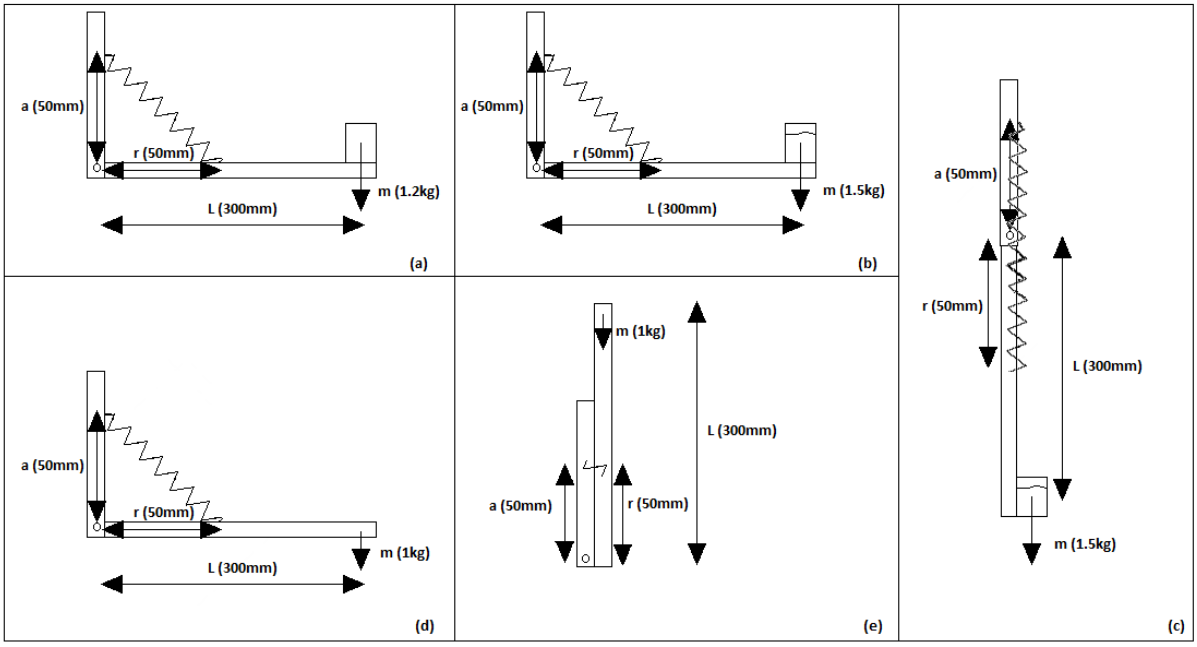
Door de voorspanning van de veer te veranderen, wordt ook niet meer voldaan aan formule 4, waardoor het balanceersysteem niet meer in balans is.

$$mgL = akr \qquad (4)$$

Wat bij concept 1 eigenlijk gebeurd is dat de massa (m) groter wordt, waardoor het product van mgL groter wordt. Dit wordt in concept 1 vreemd genoeg opgevangen door de verticale afstand van veer tot draaipunt (a) kleiner te maken. Het product akr wordt dus kleiner. Dit balansverlies zou opgevangen moeten worden doordat de veer wordt voorgespannen met behulp van de besproken rollende elementen. Maar zoals grafiek 3.1 weergeeft, zorgt een veranderde voorspanning voor een verstoring in het balanssysteem.

De wet van behoud van energie stelt dat de energie in een systeem te allen tijde constant blijft. Hierbij kan het voorkomen dat het systeem energie omzet in een andere vorm van energie. Denk aan kinetische energie, die wordt omgezet in warmte energie. Het mechanische concept voldoet niet aan deze wet.

Bij gebruik van de basic gravity equilibrator, waarbij m 1.2kg is (lege drinkbeker en massa eigen arm), g 9.81m/s^2, L is 300mm, a is 50 mm, r is 50mm dan moet k 1.41N/mm^2 zijn ($mgL = akr$), zie afbeelding 3.2a. De massa van de arm wordt gecompenseerd en het systeem is in balans. Nu wordt de drinkbeker gevuld, waardoor de massa 0.3kg groter wordt, zie afbeelding 3.2b. De m wordt dan in totaal 1.5kg. Hierdoor wordt het product van mgL $(1.5 \times 9.81 \times 300 = 4414.5)$ groter. In afbeelding 3.2b blijven de afstanden a en r en veerconstante k hetzelfde. Het product van akr $(50 \times 50 \times 1.41 = 3525)$ verandert dus niet. Het systeem is nu niet meer in balans, omdat het product van mgL groter is dan het product van akr (4414.5 > 3525). Dit heeft als gevolg dat de arm naar beneden zal vallen totdat de arm maximaal geëxtendeerd is, zie afbeelding 3.2c.
Wanneer de drinkbeker wordt weggehaald zal de totale massa kleiner worden, m is nu 1kg, zie afbeelding 3.2d. De variabele a, k en r zijn nog steeds hetzelfde gebleven. Het product van mgL $(1 \times 9.81 \times 300 = 2943)$ is nu kleiner geworden. Het product van mgL is nu zelfs kleiner dan het product van akr (2943 < 3525). Dit heeft als gevolg dat de arm naar een maximaal geflecteerde positie wordt getrokken, doordat het product van de veer (akr) groter is dan het product van de massa (mgL), zie ook afbeelding 3.2e.



Afbeelding 3.2a: basic gravity equilibrator in balans. k = 1.41N/mm^2;
Afbeelding 3.2b: basic gravity equilibrator met een te grote massa. k = 1.41N/mm^2;
Afbeelding 3.2c: basic gravity equilibrator met een te grote massa geëxtendeerde positie. k = 1.41N/mm^2;
Afbeelding 3.2d: basic gravity equilibrator met een te kleine massa. k = 1.41N/mm^2;
Afbeelding 3.2e: basic gravity equilibrator met een te kleine massa geflecteerde positie. k = 1.41N/mm^2.

Door het veranderen van de massa verandert ook de som van U_m en U_s, U_p. De energie in het systeem blijft dus niet meer onder alle omstandigheden constant. Er wordt geen energie omgezet in een andere energie, er wordt juist energie aan het systeem toegevoegd of verwijderd. Om deze verandering in energie te compenseren moet het product van akr veranderen om weer constant te zijn met het product van mgL, waardoor de formule $mgL = akr$ weer opgaat.
In het mechanische concept verandert de massa dus, waardoor dus ook de totale energie in het systeem verandert en niet constant blijft.

Door de voorspanning van de veer te veranderen wordt een verandering van de massa niet opgevangen, aangezien a kleiner wordt wanneer de massa verandert en k en r hetzelfde blijven. Door de voorspanning te vergroten wordt alleen maar de balans verstoord. Wanneer energie aan het product mgL wordt toegevoegd moet ook energie aan het product van akr toegevoegd worden. Het toevoegen van energie aan het product van akr kan niet mechanisch c.q. automatisch. Het toevoegen van energie moet dus gebeuren met een energiebron. Bij het veranderen van de componenten a, k en r moet de veer de eigenschapen van een zero-free-length spring behouden blijven. Indien dit niet het geval is zal het balans verstoren en U_s opschuiven.

3.2. Introductie elektrische elementen

Zoals besproken in H3.1.1. Evaluatie mechanisch concept (pag. 23), zal een energieverschil overwonnen moeten worden om ervoor te zorgen dat het systeem weer in balans is. Om dit te bewerkstelligen moet energie worden toegevoegd aan het systeem. Dit is mogelijk met bijvoorbeeld elektromotoren, actuatoren etc. Oplossingen zijn bekend om een afstand binnen een constructie energiezuinig te veranderen. Bij basic gravity equilibrators zou dit toegepast kunnen worden om de variabelen a, k en r energiezuinig te veranderden.

3.2.1. Energieleverancier

Om de toe- of afname van energie te compenseren moet een energieleverancier worden gebruikt, zoals elektromotoren en actuatoren. Met behulp van de energieleverancier kunnen de variabelen a, k en r veranderd worden. Door a, k en r te veranderen kan de verandering van het product van mgL worden gecompenseerd.

Aangezien de armorthese onder de kleding gedragen moet worden zal de energieleverancier klein en compact moeten zijn. Daarbij moet de energieleverancier werken op een accu of op batterijen e.d. zodat de gebruiker niet een grote en zware energiebron meezeult tijdens het gebruik van de orthese.

Een overzicht van elektromotoren en actuatoren wordt gegeven in tabel 3.1. Deze elektromotoren en actuatoren zijn uitgekozen op grootte, gewicht, toerental, maximaal draaimoment, vermogen en spanning.

Tabel 3.1: overzicht elektromotoren en actuatoren.

	Merk	**Afmetingen (l x b x h) (mm)**	**Massa (gr)**	**Toerental (omw/ min)**	**Max. draai-moment (Ncm)**	**Vermogen (Watt)**	**Nominale Spanning (V/DC)**	**Afbeelding**
Elektro-motoren	Elektro-motor XTrain 1215	$15 \times 12 \times 10$	Niet ge-geven	12440	3.3	0.42	9 – 14	
	Motraxx Elektro-motor X10 Speed-creator	$29 \times 20 \times 15$	23	40000	1.7	30	12	

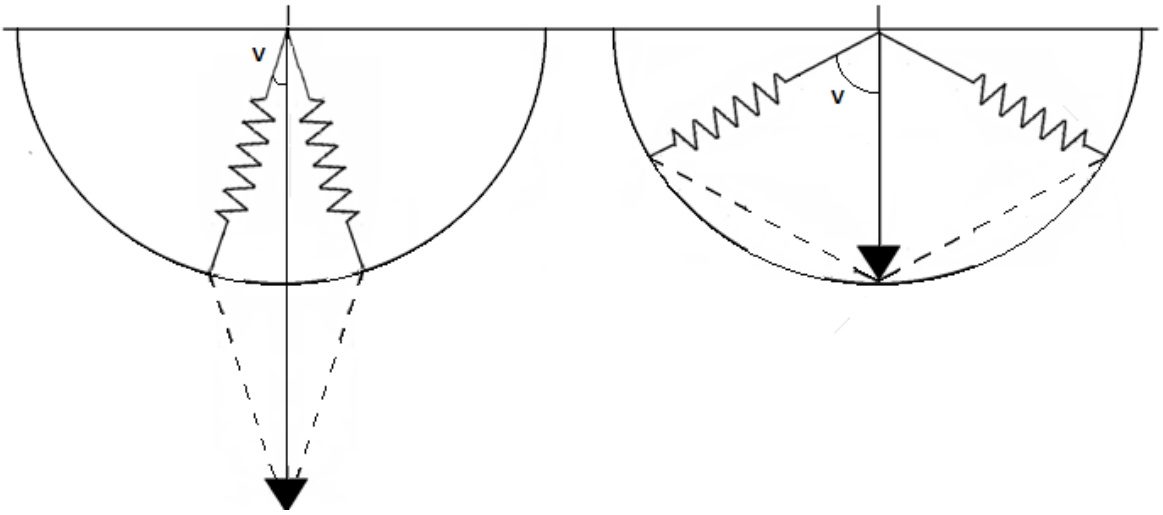
	Motraxx Tuning-motor "X-Slot 283 Tuning"	$36 \times 25 \times 19$	38	5890	1.47	8.9	12
	Merk	**Afmetingen (l x b x h) (mm)**	**Massa (gr)**	**Max. verlening (mm)**	**Max. belasting (N)**	**Spanning (V)**	**Afbeelding**
Actuatoren	L12 10mm 100:1 Linear Actuator	$70 \times 15 \times 18$	28	10	80	5 – 6	
	L12 10mm 210:1 Linear Actuator	$70 \times 15 \times 18$	28	10	150	5 – 6	
	L12 30mm 100:1 Linear Actuator	$90 \times 15 \times 18$	34	30	80	12	
	L12 30mm 210:1 Linear Actuator	$90 \times 15 \times 18$	34	30	150	12	

3.2.2. Energiezuinig

Om ervoor te zorgen dat een balans kan worden behouden terwijl de te balanceren massa verschillende groottes kan hebben, moet de configuratie van het systeem veranderen. Eén van de variabelen a, k of r zal moeten veranderden, hier is een energiebron voor nodig.

Om een zo klein mogelijke elektromotor of actuator, die deze verplaatsing tot stand brengt, te gebruiken, is het gunstig om de constructie voor energiezuinig te vervaardigen. D.m.v. een hefboomconstructie kan de te leveren kracht verlaagd worden. Hierdoor wordt niet minder energie verbruikt omdat de arbeid niet verandert, maar kan wel gebruik gemaakt worden van een kleinere actuator. Daarnaast kan de kracht die door een veersysteem kan worden geleverd op een energiezuinige manier worden veranderd.

Dit veersysteem is gebaseerd op het virtual spring principe beschreven in een onderzoek van Herder, Barents, Wisse & Dorsser (Herder, Barents, Wisse & Dorsser, 2011) en vervolgens met eigen inzicht doorontwikkeld. Twee zero-free-length springs onder een hoek simuleren één veerkracht. De twee zero-free-length springs verdraaien zo dat hoek V wel verandert, maar de lengte van de zero-free-length springs niet, zie afbeelding 3.2 (pag. 27). Omdat de veren niet verlengen of verkorten, is geen energie nodig voor de verplaatsing van de veren en zou alleen wrijving moeten worden overwonnen. Op deze manier kan de kracht die de twee veren samen leveren op een energiezuinige manier worden vergroot of verkleind, waardoor het product van akr vergroot of verkleint. Door de hoek V tussen de veren te veranderen, zal de variabele k van de virtuele veer, veranderen.



Afbeelding 3.2: energiezuinige oplossing voor verandering van de veerconstante (k). Door één zero-free-length spring te vervangen door twee zero-free-length springs kan een de virtuele kracht van één zero-free-length-spring worden nagebootst. Door de twee zero-free-length springs een cirkelbeweging te laten volgen kan de compensatiekracht van de virtuele zero-free-length spring, indien wrijving wordt verwaarloosd, energievrij bewegen over de cirkelbaan.

3.2.3. Massadetectie

Wanneer de massa vergroot of verkleind, zal de compensatiekracht groter of kleiner moeten worden. Als dit niet gebeurt, zal de compensatiekracht of te groot zijn waardoor de arm naar de maximaal geflecteerde positie wordt gebracht, of te klein zijn waardoor de arm naar de maximaal geëxtendeerde positie wordt gebracht. Twee manieren om te voorkomen dat de arm naar de uiterste posities verplaatst zijn:

- De arm op slot zetten;
- De arm op slot zetten met een kleine speling.

De arm moet op slot gezet worden, voordat een nieuwe massa wordt gebalanceerd. De nieuwe massa kan vervolgens gemeten worden in het stijve gewricht. Dit zou kunnen door een krachtsensor of andere digitale sensoren.

Als er een lichte speling wordt toegelaten, zal de arm op de rem nog bewegen. Wanneer de compensatiekracht te groot is voor de nieuwe, massa dan zal de arm het bovenste deel raken van de rem. Vervolgens zitten er twee sensors op het onderste en bovenste deel van de rem. Wanneer de arm de bovenste sensor aanraakt zal de compensatiekracht kleiner moeten worden gemaakt en wanneer de arm de onderste sensor raakt zal de compensatiekracht groter moeten worden gemaakt. Op deze manier kan aan de hand van de compensatiekracht zelf worden gemeten of er weer een balans is of niet.

In de concepten zal gebruik gemaakt worden van een rem waarin beweging van de arm nog mogelijk is. Hierdoor zal het systeem de compensatiekracht niet digitaal instellen maar door een combinatie van mechanische en elektrische componenten.

3.3. Herziene eisen en wensen

Hier de herziene eisen en wensen, aangevuld met eisen en wensen voor elektrische elementen.

Randvoorwaarden Flextension:

1. De zwaartekrachtcompensator moet klein blijven, zodat het onder de kleding kan worden gedragen;
2. De zwaartekrachtcompensator moet over de gekozen vrijheidsgraad een externe kracht kunnen compenseren;
3. De zwaartekrachtcompensator moet over dezelfde vrijheidsgraad, als waarover wordt gecompenseerd, vrijwillig kunnen worden bewogen;
4. De zwaartekrachtcompensator reguleert automatisch de compensatiekracht ten gevolgen van de belasting;
5. Het geluid dat de zwaartekrachtcompensator maakt moet verwaarloosbaar zijn.

Programma van eisen en wensen:

Eisen:

1. Flexie/extensie van de elleboog wordt gecompenseerd De zwaartekrachtcompensator compenseert flexie/extensie van de elleboog over een ROM van 110°, van 15° tot 120° (H1.1. Dagelijkse activiteiten en Range of motion);
2. Te compenseren massa is 1kg met een variabele massa tot 1.5kg (de zwaartekrachtcompensator compenseert altijd de gemiddelde massa van de eigen arm (1kg))(H1.3. Compensatiekracht);
    - Gemiddelde massa van 1kg voor de eigen arm (H1.3.1. Massa eigen arm);
    - Massa gebruiksvoorwerp 0 tot 0.5kg (H1.3.2. Massa gebruiksvoorwerp);
3. De maximale breedte van de zwaartekrachtcompensator is 4cm (H1.8.1. Ruimte onder kleding);
4. Geen scherpe randen en gevaarlijk uitstekende delen aan de zwaartekrachtcompensator (H1.8.2. Veiligheid en gebruiksvriendelijkheid);
5. Geen hinder ondervinden van de zwaartekrachtcompensator tijdens het omkleden (H1.8.2. Veiligheid en gebruiksvriendelijkheid);
6. De maximale massa van de zwaartekrachtcompensator bedraagt 300gr (H1.8.3. Massa zwaartekrachtcompensator);
7. Constructie niet aan de onderkant van de elleboog;

Wensen:

1. Zelfregulerende kracht detectie;
2. Zelfregulerende compensatiekracht verandering;
3. Geen beweging van de arm tijdens bijstellen.

Aangevulde eisen:

8. Compensatiekracht energiezuinig aanpassen;
9. Maximale benodigde spanning 12V;
10. In vijf handelingen moet de compensatiekracht aangepast zijn;
11. Geen warme onderdelen tegen de huid;
12. Bij het vergroten van de massa zal de arm maximaal 1.5cm verplaatsen in verticale richting;
13. Het systeem moet vast te zetten zijn in de gehele ROM.

Aangevullende wensen:

4. Energiebron zo klein mogelijk houden;
5. Lage warmte generatie.

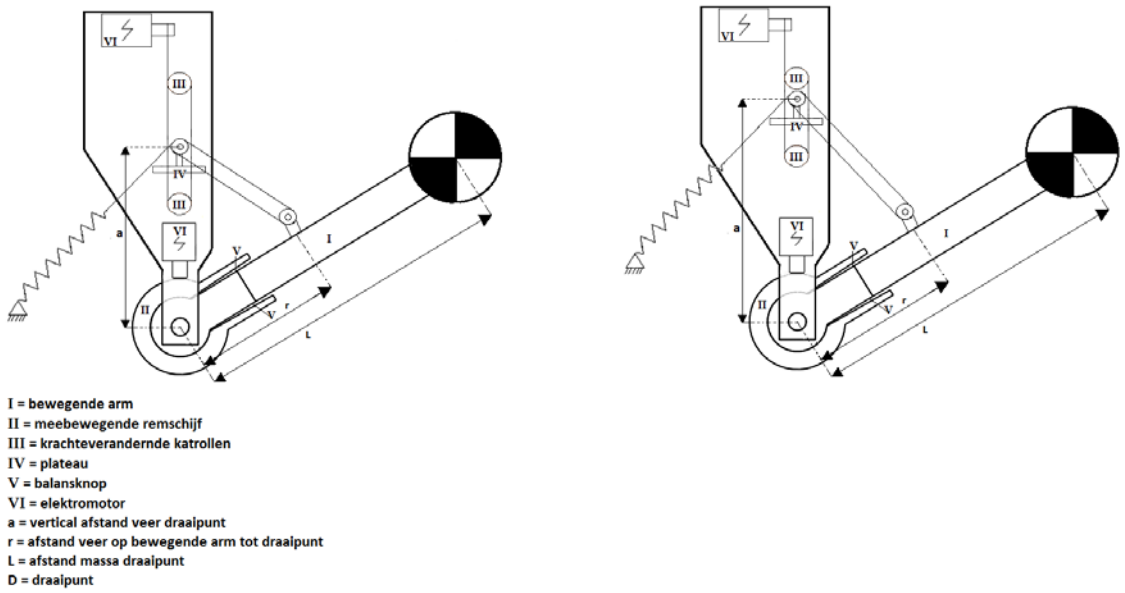
3.4. Elektrische concepten

In de volgende hoofdstukken worden de concepten besproken waar een elektrisch component in is verwerkt.

3.4.1. Concept 1

In afbeelding 3.3 wordt concept 1 weergegeven. Dit concept heeft een vrije arm (I) die beweegt in een meebewegende remschijf (II). Er is een kleine speling tussen de vrije arm en de remschijf, ook wanneer de rem geactiveerd is. De gebruiker zet het systeem zelf op de rem door op een knop op de vrije arm te drukken. Indien het systeem op de rem staat en de belasting op het systeem veranderd, zorgt de juiste verschuiving van afstand a ervoor dat het systeem weer in balans is. Bij het toenemen van de massa zal afstand a moeten toenemen en vice versa. Wanneer de gebruiker een massa wil balanceren, zal de compensator de volgende stappen ondernemen:

- De gebruiker pakt een gebruiksvoorwerp vast;
- De gebruiker drukt op de remknop;
- De rem activeert;
- Nieuwe massa wordt gedetecteerd;
- Kracht wordt aangepast;
- Balans in het systeem;
- De rem deactiveert;
- Vrij bewegen.



Afbeelding 3.3: elektrisch concept 1. Met behulp van twee elektromotoren kan de balansarm worden vast gezet en de balanceerkracht aangepast worden

Werking rem

Bij het drukken op de remknop, draait de onderste elektromotor een as tegen de meebewegende remschijf aan. De remschijf staat nu vast. Als het balans terug is, dan wordt er nogmaals op de remknop gedrukt en kan er weer vrij worden bewogen.

Massa detectie

Bij een verandering van de massa zal de vrije arm bewegen. Bij een toename van de massa zal de vrije arm tegen de onderste bek van de remschijf komen, bij een afname van de massa tegen de bovenste bek van de remschijf. Boven en onder zijn drukknoppen geplaatst.

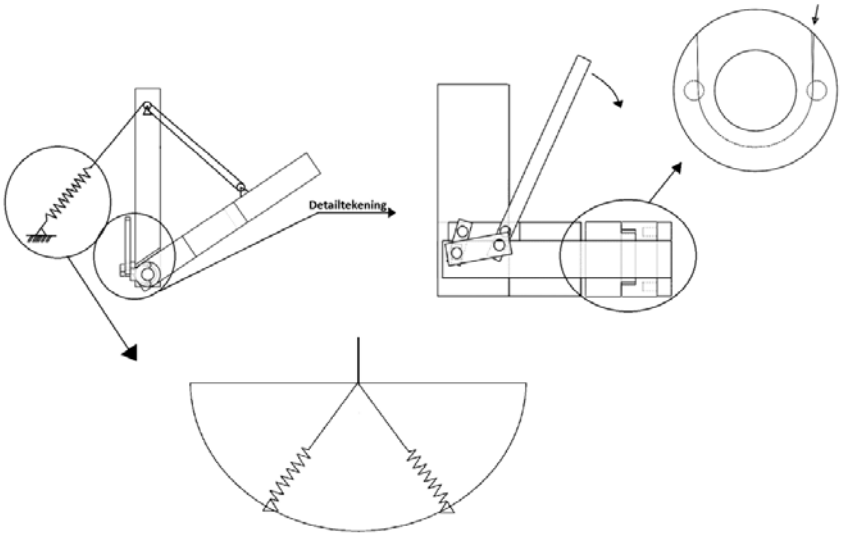
Balans in het systeem

Wordt de onderste drukknop ingedrukt, dan stijgt het plateau en dus afstand a. Wordt de bovenste drukknop ingedrukt, dan daalt het plateau en dus afstand a. De veer verplaatst, in verticale richting, net zoveel als het plateau. Door deze verplaatsing behoudt de veer de eigenschappen van een zero-free-length spring.

3.4.2. Concept 2

In afbeelding 3.5 is concept 2 te zien. Dit concept heeft, net als concept 1, een vrije arm die beweegt in een meebewegende rem. De gebruiker zet het systeem zelf op de rem door op een knop op de vrije arm te drukken. Om de een verandering in massa te compenseren, is gebruik gemaakt van de energiezuinige veerconstructie. Bij het toenemen van de massa zal de hoek tussen de veren kleiner worden, bij het afnemen van de massa zal de hoek tussen de veren groter worden (zie H3.3.2 Energiezuinig , pag. 26). Wanneer de gebruiker een massa wil balanceren, zal de compensator de volgende stappen ondernemen:

- De gebruiker pakt een gebruiksvoorwerp vast;
- De gebruiker drukt op de remknop;
- De rem activeert;
- Nieuwe massa wordt gedetecteerd;
- Kracht wordt aangepast;
- Balans in het systeem;
- De rem deactiveert;
- Vrij bewegen.



Afbeelding 3.5: elektrisch concept 2. Door de hendel naar beneden te verplaatsen zal de rem beweging van de arm vast zetten. Met behulp van de twee zero-free-length springs kan de compensatiekracht aangepast worden

Werking rem

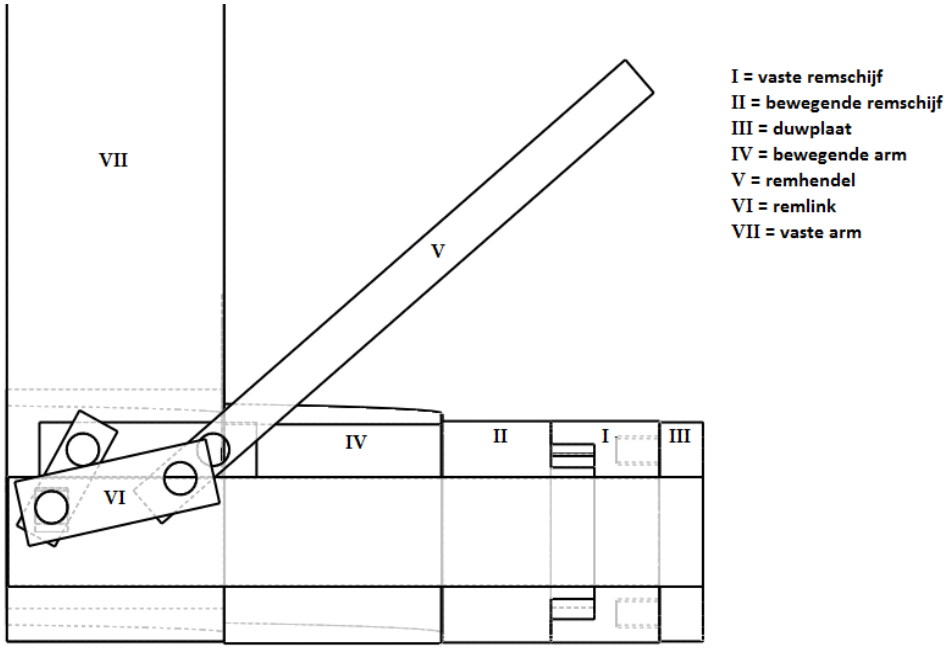
De rem wordt geactiveerd door de remhendel (V) naar beneden te duwen. De duwplaat (III) duwt, via de remlinken (VI), de remschijven tegen de bewegende arm (IV). Nu zitten de vaste (I) en bewegende (II) remschijf in elkaar geduwd. Tussen de vaste en bewegende remschijf is een kleine speling. De bewegende arm kan vrij bewegen binnen deze speling (afbeelding 3.5, pag. 30 en 3.6).

Massa detectie

Bij een verandering van de massa zal de vrije arm bewegen binnen de speling. Bij een toename van de massa, zal de bewegende arm tegen de onderkant van de sleuf van de vaste remschijf komen. Bij een afname van de massa, komt de bewegende arm tegen de bovenkant van de sleuf van de vaste remschijf. Boven en onder in de sleuf zijn drukknoppen geplaatst.

Balans in het systeem

Wordt de onderste drukknop ingedrukt, dan wordt de hoek tussen de veren kleiner. Hierdoor neemt de k van de virtuele veer toe. Wordt de bovenste drukknop ingedrukt, dan wordt de hoek tussen de veren groter. De k van de virtuele veer neemt dan af. Door verandering van k zal het product van akr veranderen totdat het weer gelijk is aan het product van mgL. Als dit het geval is dan is het systeem weer in balans.

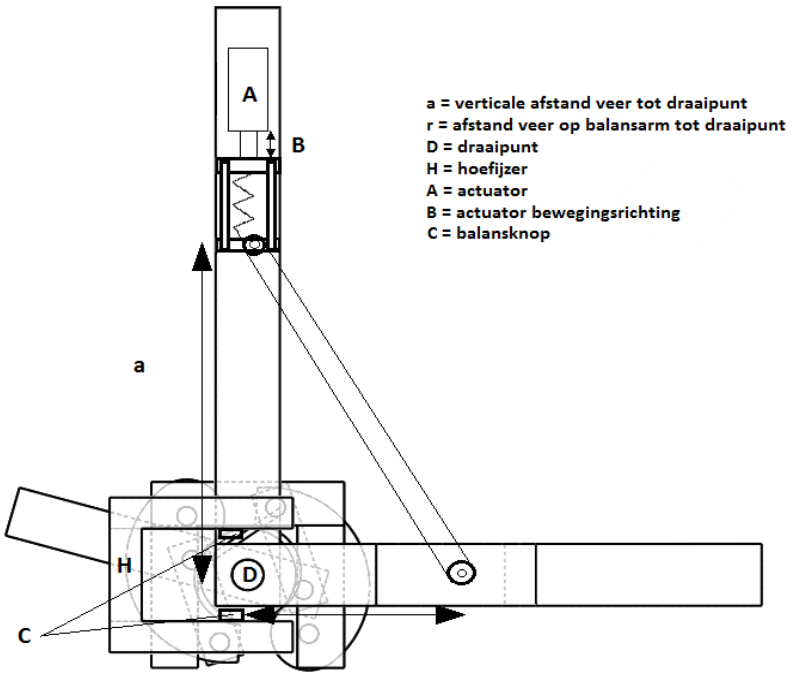


Afbeelding 3.6: remsysteem concept 2. Door remhendel (V) naar beneden te duwen duwt, via de remlink (VI), de duwplaat (III) de vaste remschijf (I) en de bewegende remschijf (II) tegen de bewegende arm (IV) aan.

3.4.3. Concept 3

In afbeelding 3.7 is concept 3 te zien. Net als concept 1 en 2, maakt concept 3 ook gebruik van een vrije arm die beweegt in een meebewegende rem. De gebruiker activeert de rem van het systeem, door aan de hendel van de rem te trekken. De rem is gebaseerd op een trommelrem. Om een verandering van de massa te compenseren, wordt afstand a veranderd. De veer wordt simultaan met afstand a verplaatst. Afstand a wordt verplaatst door schroefdraad, vergelijkbaar met een bankschroef. Wanneer de gebruiker een massa wil balanceren, zal de compensator de volgende stappen ondernemen:

- De gebruiker pakt een gebruiksvoorwerp vast;
- De gebruiker drukt op de remknop;
- De rem activeert;
- Nieuwe massa wordt gedetecteerd;
- Kracht wordt aangepast;
- Balans in het systeem;
- De rem deactiveert;
- Vrij bewegen.



Afbeelding 3.7: elektrisch concept 3. Het hoefijzer beweegt constant mee met de onderarm. Als het systeem geremd wordt heeft de onderarm een kleine speling in het hoefijzer waardoor de compensatiekracht aangepast kan worden.

Werking rem

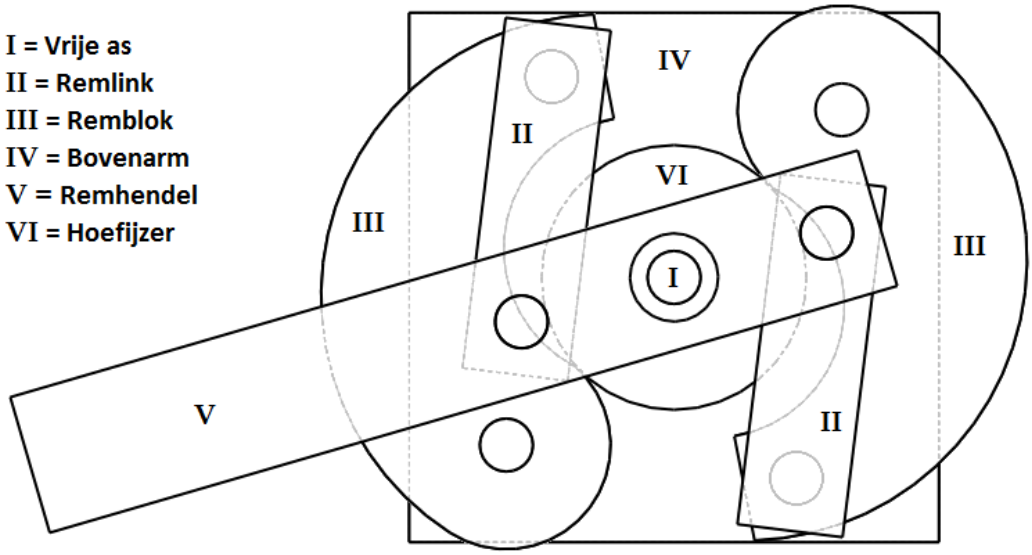
De rem wordt geactiveerd door de remhendel (V) omhoog te verplaatsen. De remlinken (II) zullen de remblokken (III) tegen het hoefijzer (VI in afbeelding 3.8, pag. 33, H in afbeelding 3.7) aan drukken. Het hoefijzer staat nu vast op de bovenarm (IV). De bewegende arm kan nog bewegen binnen het hoefijzer.

Massa detectie

Bij een verandering van de massa zal de bewegende arm bewegen binnen het hoefijzer. Bij een toename van de massa, zal de bewegende arm tegen de onderkant van het hoefijzer komen. Bij een afname van de massa, komt de bewegende arm tegen de bovenkant van het hoefijzer. Boven en onder in de sleuf zijn drukknoppen geplaatst.

Balans in het systeem

Wanneer de onderste drukknop ingedrukt wordt, dan wordt afstand a groter. Het plateau, waar de katrol vastzit, wordt omhoog verplaatst. De elektromotor draait het schroefdraad, waardoor simultaan de veer en de afstand a vergroten. Als de bovenste drukknop ingedrukt wordt, dan verplaatst de elektromotor het plateau naar beneden. Hierdoor wordt afstand a kleiner. Door verandering van a zal het product van akr veranderen totdat het weer gelijk is aan het product van mgL. Als dit het geval is dan is het systeem weer in balans.



Afbeelding 3.8: remprincipe concept 3. Door de remhendel (V) naar boven te duwen verplaatsen, via de remlinken (II), de remblokken (III) tegen het hoefijzer (IV). De onderarm kan nog bewegen over de vrije as (I), die bij beweging tegen het vaste hoefijzer aankomt. Het contact met het hoefijzer resulteert in een verandering in compensatiekracht.

3.5. Evaluatie elektrische concepten

Alle concepten voldoen aan de hiervoor gestelde eisen, wensen en randvoorwaarden. In de tabel 3.2 zijn alleen de eisen, wensen en randvoorwaarden te zien waarin verschillend wordt gepresteerd door de concepten.

In dit overzicht is per concept te zien hoe goed iedere eis, wens en randvoorwaarde wordt behaald. Dit wordt getoond door punten toe te kennen per eis, wens en randvoorwaarde, waarbij 1 = zeer slecht en 4 = zeer goed. Alle concepten zijn besproken met de opdrachtgever. Alle opmerkingen van deze besprekingen zijn meegenomen in de puntenverdeling.

Tabel 3.2: puntverdeling per concept per eis, wens en randvoorwaarde.

Eis	**Concept 1**	**Concept 2**	**Concept 3**
Maximale breedte compensator is 4cm	4	1	2
Geen scherpe randen en gevaarlijk uitstekende delen	4	2	2
Geen hinder tijdens omkleden	4	3	4
Maximale massa compensator 300gr	4	2	3
Compensatiekracht energiezuinig aanpassen	1	4	2
Maximaal benodigde spanning 12V	2	3	2
Geen warme onderdelen tegen huid	3	4	3
Totaal eisen	22	19	18
Wensen	**Concept 1**	**Concept 2**	**Concept 3**
Energiebron zo klein mogelijk	3	4	3
Lage warmte generatie	3	4	3
Totaal wensen	6	8	6
Randvoorwaarden	**Concept 1**	**Concept 2**	**Concept 3**
Compensator klein, gedragen onder kleding	4	2	3
Verwaarloosbaar geluid	3	4	3
Totaal randvoorwaarde	7	6	6
	Concept 1	**Concept 2**	**Concept 3**
Totaal eisen	22	19	18
Totaal wensen	6	8	6
Totaal randvoorwaarde	7	6	6
Totaal	35	33	30

3.5.1. Toelichting

Hieronder zullen alle voor- en nadelen per concept kort worden besproken.

3.5.1.1. Concept 1

Bij het toekennen van de punten is gebleken dat concept 1 het beste concept is van de drie. Concept 1 heeft in tegenstelling tot de andere concepten weinig verbindingen waarin wrijvingsverliezen op kunnen treden. Daarbij is concept 1 met de twee ringen die in elkaar bewegen zeer compact, wat resulteert in een smal concept dat makkelijk onder de kleding gedragen kan worden en licht van gewicht kan zijn. Doch heeft concept 1 ook minpunten, zoals de directe verbinding van de as van de elektromotor op de remschijf.

De te compenseren 1 tot 1.5kg wordt tegengehouden door wrijving van de as van de elektromotor op de remschijf. Hiervoor moet een kleine elektromotor hard werken, wat als nadeel kan hebben dat de accu snel leeg kan zijn. Verder is vergroten en verkleinen van afstand a door de elektromotor niet energiezuinig, ondanks de krachtvergrotende –verkleinende katrollen. Hiervoor kan beter het principe van concept 2 worden toegepast, waarbij twee zero-free-length springs één virtuele zero-free-length spring nabootsen.
Doordat het systeem niet energiezuinig is kan het ook zijn dat er meer warmte wordt gegenereerd door de elektromotor in vergelijking met concept 2, maar de warme onderdelen zullen niet tegen de huid komen. Doordat dit systeem op wrijving remt, kan het voorkomen dat de meebewegende rem remt met ongewenst geluid.
Totaal heeft concept 1 - 35 punten

3.5.1.2. Concept 2

Concept 2 heeft als grootste pluspunt het compenseren van een variabele massa door het gebruik van twee zero-free-length springs die één virtuele zero-free-length spring nabootsten. Met dit principe hoeft eigenlijk alleen de wrijving van de veerverplaatsing overwonnen te worden om het product van akr te vergroten/verkleinen. Dit kan worden bewerkstelligd door een klein vermogen van een elektromotor. Dit brengt meer voordelen met zich mee zoals een lage warmtegeneratie en een verwaarloosbaar geluid van de elektromotor. Nadelig zijn echter de vele verbindingen om het systeem op de rem te zetten. In deze verbindingen kunnen wrijvingsverliezen optreden. Daarbij is het systeem ook nog breed waardoor het onhandig kan zijn tijdens het omkleden en lastig onder de kleding te dragen is. Dit systeem is, zoals eerder gezegd, breed omdat kan leiden tot een constante kracht die aan de zijkant naar beneden trekt.
Totaal heeft concept 2 - 33 punten

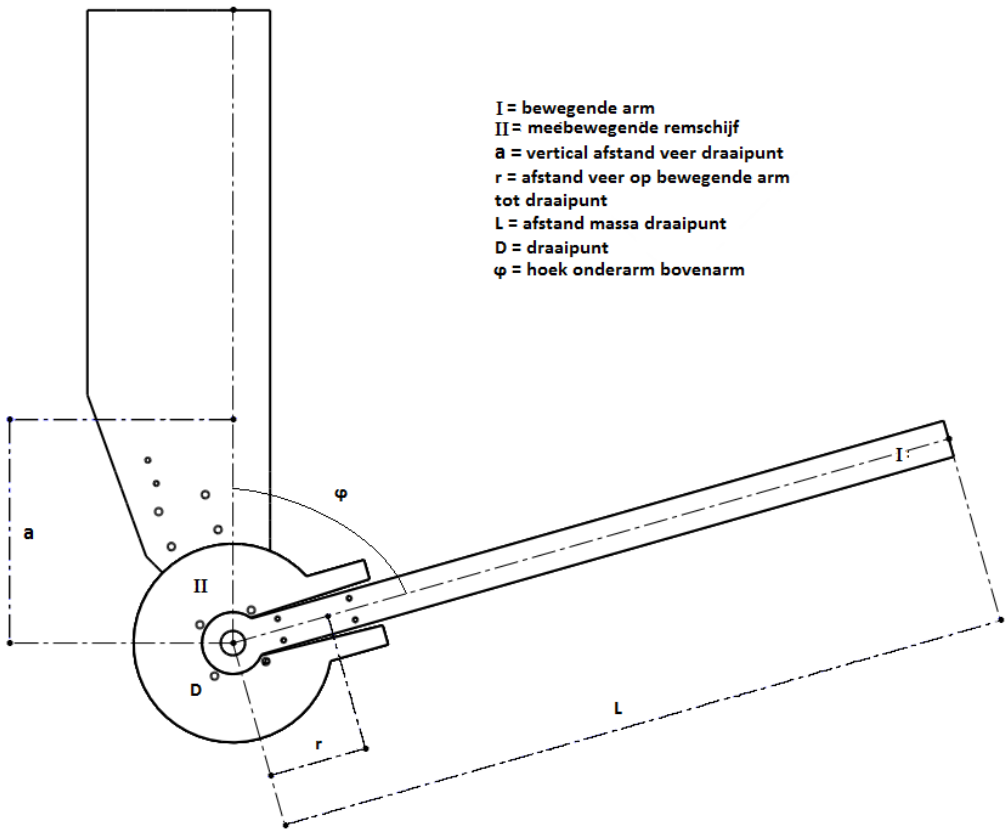
3.5.1.3. Concept 3

Het laatste concept heeft het minste aantal punten ontvangen. Ondanks dat concept 3 compacter is dan concept 2 is het nog steeds onhandig onder de kleding. Daarbij heeft het remsysteem net als bij concept 2 veel verbindingen. Verder is het vergroten van het product van akr niet energiezuinig. De afstand van a wordt zonder enige krachtvergrotend element verplaatst. Wanneer de afstand a groot moet zijn, wordt de elektromotor zwaar belast. Hierbij zal het systeem warmer worden en meer geluid produceren dan concept 2.
Totaal heeft concept 3 - 30 punten

3.6. Gekozen concept

Op basis van de eisen, wensen en randvoorwaarden is gekozen om een combinatie te maken van concept 1 en concept 2. Het remsysteem van concept 1 heeft weinig verbindingen en is compact, dit is gewenst onder de kleding. Van concept 2 wordt het krachtvergrotende element om het product van akr te vergroten/verkleinen gebruikt. Dit is de energiezuinigste manier om het product van akr te veranderen als reactie op een verandering van de massa.

4. Optimalisatie

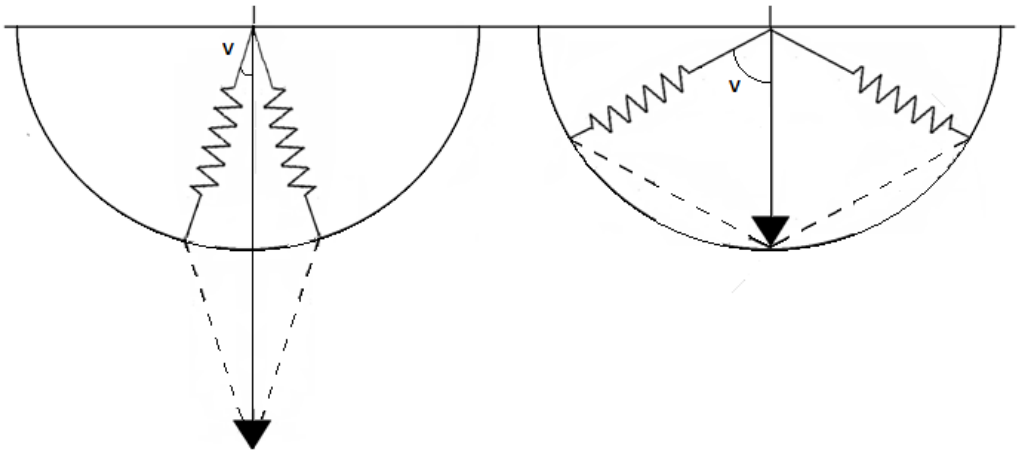


Afbeelding 4.1: schematische weergave eindontwerp.
a = 70mm; r = 20mm; L = 300mm; m = 1 tot 1.5kg.

Zoals in het voorgaande hoofdstuk is besproken zal het eindontwerp bestaan uit een samenvoeging van concept 1 en 2. In afbeelding 4.1 is een schematische weergave te zien van het eindontwerp. Hier staan de hoofdmaten in zoals er in dit hoofdstuk mee gerekend word. In dit hoofdstuk wordt de optimalisatie van het eindontwerp beschreven. Hieronder valt de optimalisatie van de virtuele veer en de materialisatie hiervan. Daarnaast zullen de sterkteberekeningen worden beschreven. Tot slot worden hier de 3D tekeningen van het eindontwerp weergegeven.

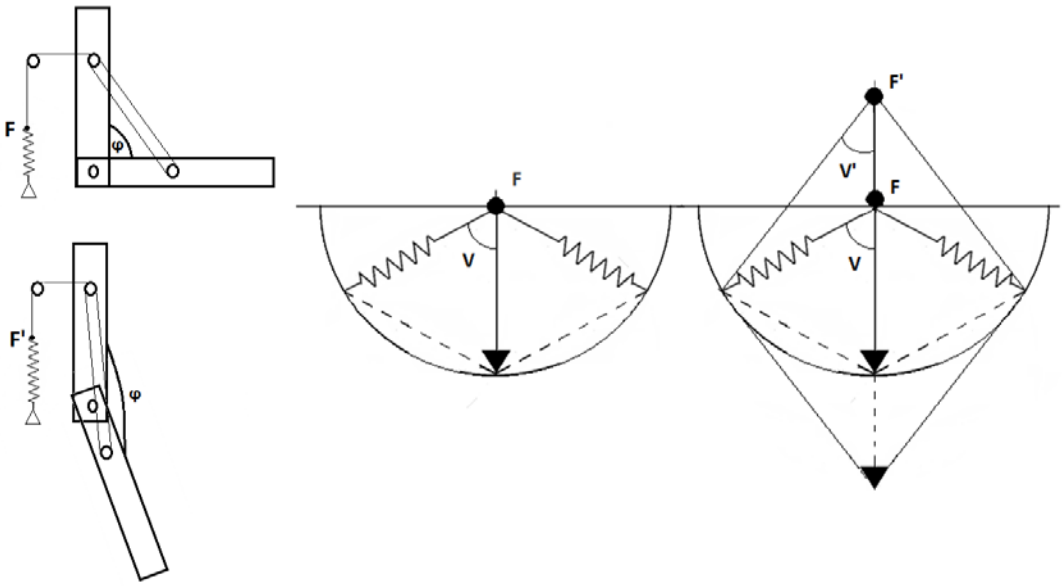
4.1. Optimalisatie virtuele veer

De kracht die de virtuele veer levert wordt, zoals eerder uitgelegd, kleiner wanneer hoek V groter wordt, zie afbeelding 4.2 (pag. 36). Dit komt doordat de verticale component van de virtuele veer kleiner wordt. Door de hoekverdraaiing van V verandert de variabele k waardoor het product van akr verandert. Wanneer het product van akr verandert kan een verandering van het product van mgL gecompenseerd worden. In het product van mgL verandert alleen de massa, m.



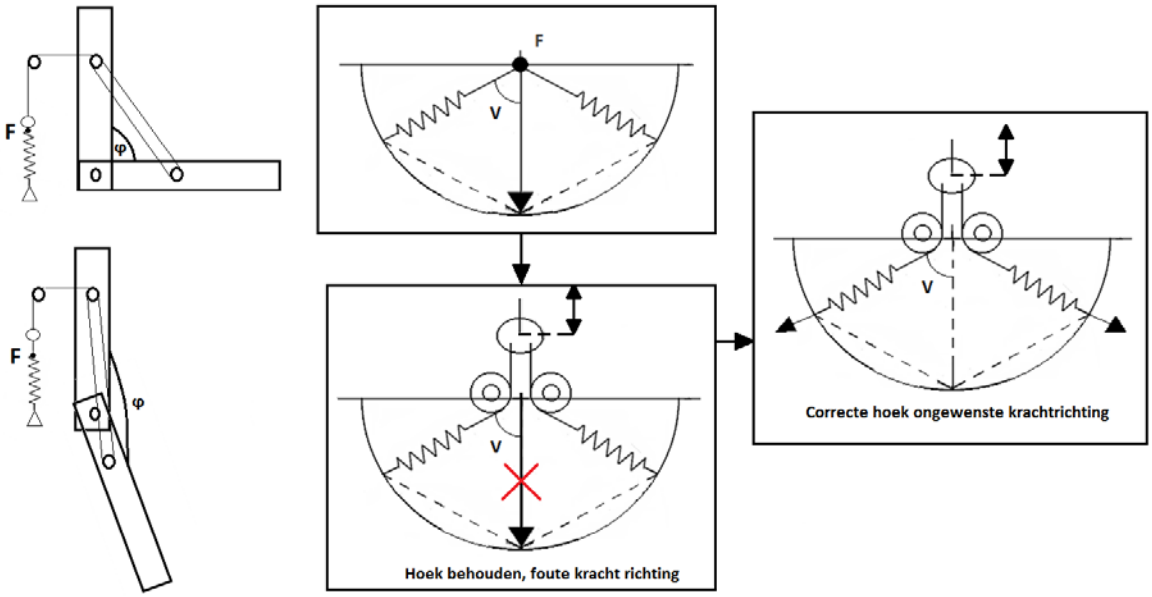
Afbeelding 4.2: verdraaiing van hoek V vergroot de verticale kracht van de virtuele veer.

In de constructie, waarbij twee trekveren onder een hoek met elkaar aan een punt verbonden zijn (afbeelding 4.2), zal bij een uitrekking van beide veren, een te grote vergroting van kracht plaats vinden. De kracht wordt niet alleen vergroot door de uitrekking van de veren, maar ook door het kleiner worden van de hoek tussen beide veren, zie afbeelding 4.3. Het kleiner worden van hoek V komt, doordat punt F naar punt F' verplaatst, bij het groter worden van de hoek tussen boven- en onderarm, hoek φ. De veren leveren een te grote kracht, waardoor een balansverstoring optreedt (H3.1.1. Evaluatie mechanisch concept, pag. 23).



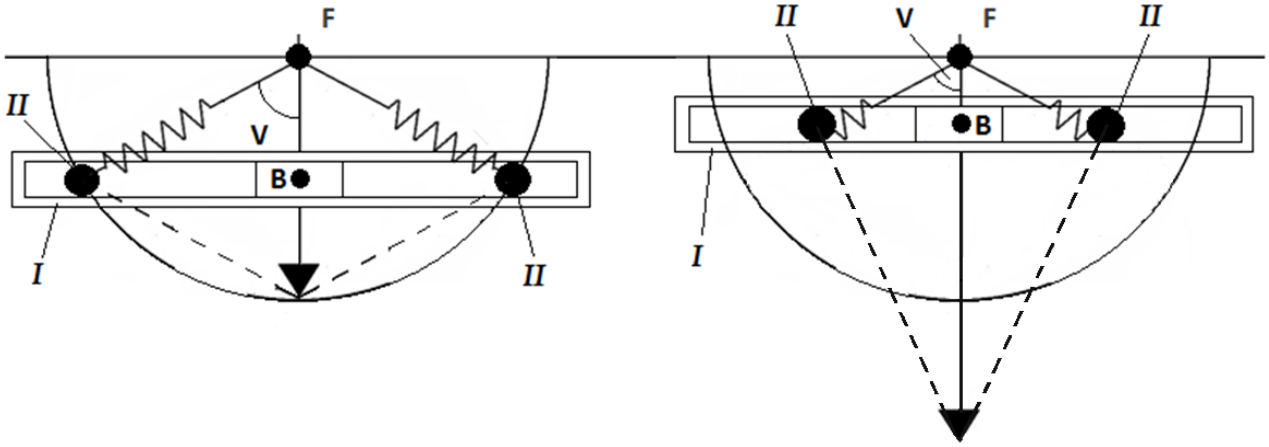
Afbeelding 4.3: hoekverdraaiing van φ, zorgt voor verplaatsing van punt F, naar punt F. Dit heeft als gevolg dat hoek V verdraait tot hoek V. De kracht die de virtuele veer levert wordt onbedoeld groter, waardoor een balansverstoring optreedt.

Om hoek V te waarborgen, kunnen twee katrollen geplaatst worden bij de veren, zie afbeelding 4.4 (pag. 38). Om beide katrollen wordt een touw gespannen, waardoor de veren onder dezelfde hoek uitrekken. Het nadeel van de katrollen is echter dat de krachtrichting niet meer correct is. De kracht van de veren is gelijk aan de spankracht in het touw, waardoor de veren schuin trekken en niet meer zuiver verticaal. De horizontale component gaat nu ook een rol spelen.



Afbeelding 4.4: door katrollen te plaatsen kan hoek V worden gewaarborgd. Door hoek V met katrollen vast te zetten is de krachtrichting niet meer zuiver verticaal. De horizontale component speelt een rol en de veren trekken schuin.

De oplossing voor dit probleem wordt gegeven in afbeelding 4.5. Hier blijft hoek V hetzelfde en is de kracht op het systeem zuiver verticaal. Er wordt gebruik gemaakt van drukveren i.p.v. trekveren. Punt F is star, waardoor hoek V bij indrukking niet verdraait. De horizontale component heeft geen effect meer op de constructie, door het gebruik van de parallelplaat. Als aan punt B wordt getrokken, worden de drukveren ingedrukt, doordat de parallelplaat omhoog beweegt. Voor het eindontwerp moet gebruik gemaakt worden van twee identieke drukveren.



Afbeelding 4.5: virtuele veer nagebootst met drukveren. Doorpunt B te verhogen zal de parallelplaat (*I*) de bevestigingspunten (*II*) omhoog duwen. De bevestigingspunten kunnen vrij bewegen in de parallelplaat waardoor de horizontale kracht van de veren wegvalt en de som van de twee verticale componenten vormen weer een virtuele veer. Wanneer de drukveren ingedrukt zijn, zal de resultante kracht groter zijn.

De drukveren moeten een kracht kunnen leveren van 46.07N, een veerconstante van 1.61N/mm^2 en een indrukking van 43.87mm. Om 1kg te compenseren, moeten de drukveren onder een hoek van 49.16° staan t.o.v. de verticaal. Om een massa van 1.5kg te compenseren, staan de veren t.o.v. de verticaal onder 10°. Dit is dus een hoekverdraaiing van 39.16°. De berekeningen hiervan zijn terug te lezen in bijlage I: Veerberekeningen (pag. 52).

4.2. Eindconcept

Het eindconcept is te zien in afbeelding 4.6 (pag. 40). Het eindconcept maakt gebruik van twee meebewegende remschijven (I), die gepaard met de vrije arm (II) bewegen. Een ring is geplaatst tussen de remschijven, om de remschijven van elkaar te houden. Het touw kan nu zonder enige problemen van katrol naar katrol worden gespannen. De vrije arm zit gesloten tussen de remschijven en de ring die de twee remschijven van elkaar houdt. De vrije arm kan bewegen binnen de remschijven, er is sprake van een kleine speling tussen de vrije arm en de remschijven. Vlakbij de as wordt de vrije arm verstevigd door een verdikking. In deze verdikking is een katrol geplaatst (afstand r).

Op de plaat van de bovenarm (III) is de rem (IV) en de virtuele veer (V) constructie geplaatst. De rem wordt geactiveerd door de gebruiker, middels een knop. Wanneer deze remknop wordt ingedrukt, zal een signaal gegeven worden aan de mini-actuator (L12 10mm 210:1 Linear Actuator, H3.2.1. Energieleverancier, pag. 25) (VIII). De actuator duwt dan tegen de remhendel (VI) aan, waarna vervolgens de rempin (VII) tegen de twee remschijven wordt gedrukt. De remschijven komen nu stil te staan. Het bewegen van de arm is dan alleen mogelijk in de kleine speling, tussen de vrije arm en de bek van de remschijven.

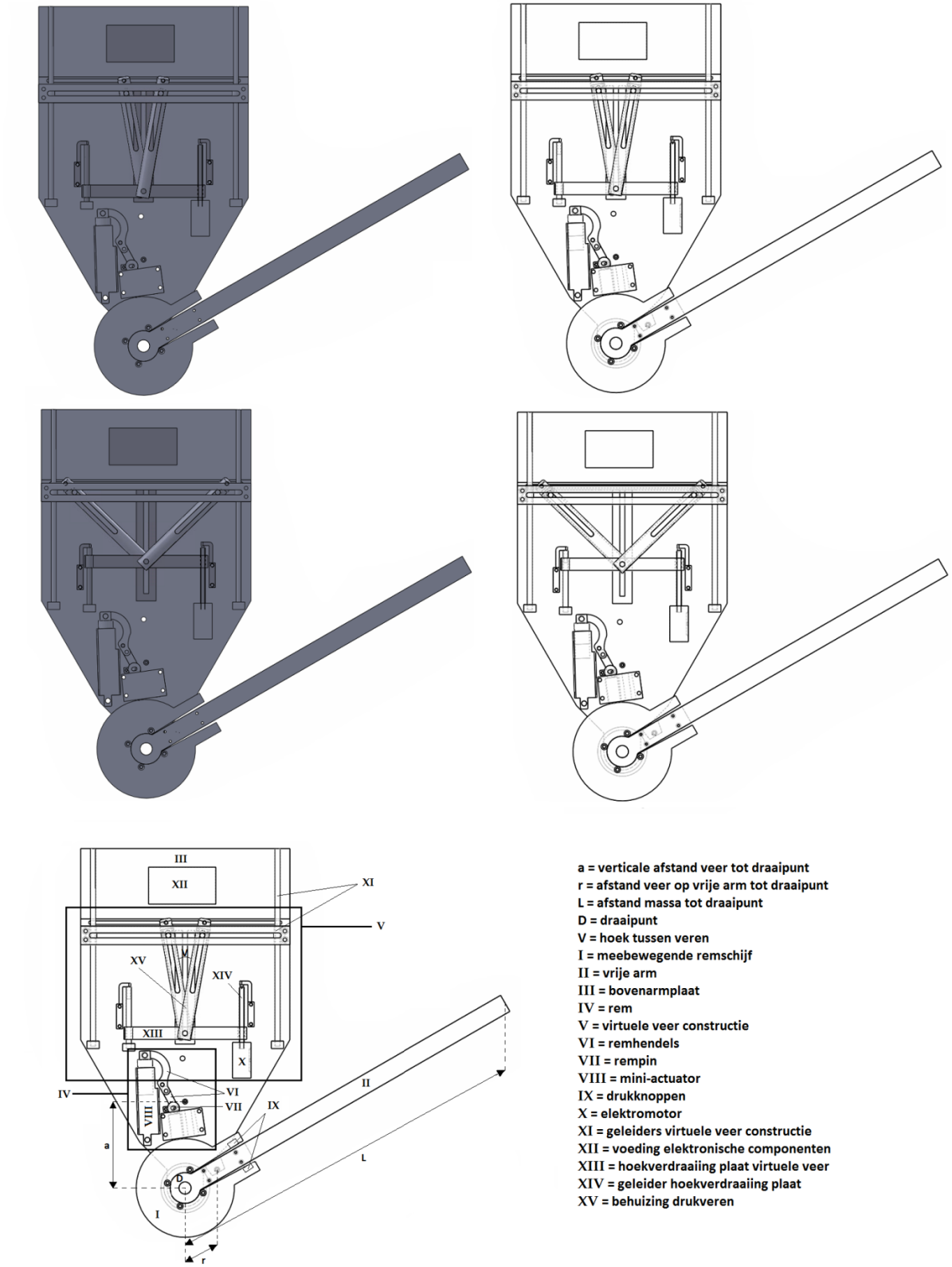
Als de gebruiker een voorwerp beet pakt, moet de rem worden geactiveerd. De belasting op het systeem zal toenemen, omdat de totale massa van het systeem is toegenomen. Het product van mgL wordt groter. Dit wordt in het eindconcept opgevangen door de virtuele veer constructie (V), beschreven in H4.1 Optimalisatie virtuele veer (pag. 36). Hierbij wordt de k van de virtuele veer veranderd, door de hoek (hoek V) waarin de twee drukveren staan te verdraaien. Indien de hoek tussen de twee veren kleiner wordt, wordt de compensatiekracht groter. De k van de virtuele veer wordt dan groter.

De verdraaiing van de hoek wordt bewerkstelligd door drukknoppen (IX) in de remschijven. Wanneer de massa groter wordt, zal de vrije arm dalen. Het product van mgL is dan groter dan het product van akr. De vrije arm zal uiteindelijk tegen het onderste deel van de twee remschijven aan komen. Hier wordt een drukknop geplaatst. Als de onderste drukknop ingedrukt wordt zal een signaal worden gegeven aan de elektromotor (Motraxx Elektro-motor X10 Speed-creator, H3.2.1. Energieleverancier, pag.25) (X). De hoek wordt dan bij een te grote massa verkleind, waardoor de k, dus het product van akr, groter wordt. De vrije arm zal dan omhoog worden bewogen, totdat de drukknop niet meer ingedrukt wordt. De elektromotor stopt dan met draaien en met de nieuwe hoek V kan weer vrij worden bewogen. De veren worden tijdens de verdraaiing geleid door geleiders (XI, XIV, XV). Op deze manier verdraaien de beide veren gepaard. Tot slot zal de gebruiker de rem van het systeem deactiveren door nogmaals op de knop te drukken.

Wanneer de gebruiker nu het gebruiksvoorwerp neerzet, zal de totale massa op het systeem afnemen en dus wordt het product mgL kleiner. Het product van akr moet dan ook kleiner worden. De gebruiker drukt de remknop in die de actuator het signaal geeft om te remmen. Nu laat de gebruiker het voorwerp los. Het product van akr is groter dan het product van mgL. De vrije arm zal omhoog bewegen en tegen het bovenste deel van de remschijven drukken. Ook hier zit een drukknop. Deze drukknop geeft een signaal naar de elektromotor van de veerconstructie en geeft de

opdracht de hoek tussen de veren te vergroten. Door het vergroten van de hoek wordt de k van de virtuele veer kleiner en dus het product van akr.

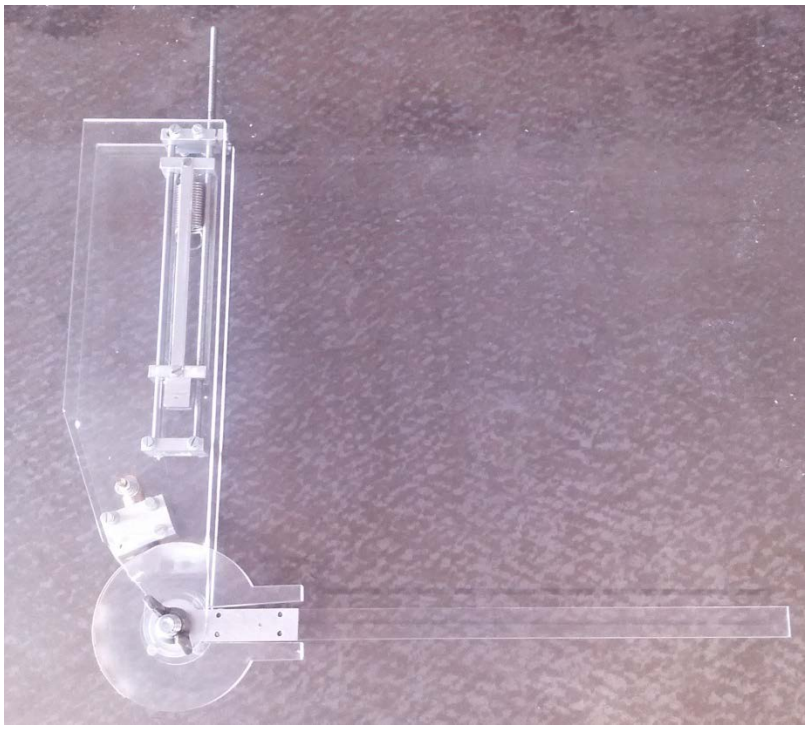
De vrije arm zal dalen, totdat de bovenste drukknop niet meer wordt ingedrukt. Het balans is nu weer hersteld. De gebruiker kan de rem weer deactiveren.



Afbeelding 4.6: eindconcept zwaartekrachtcompensator. a = 70mm, r = 20mm, L = 300mm, m = 1kg tot 1.5kg en V = variabel van 10° tot 49.16°.

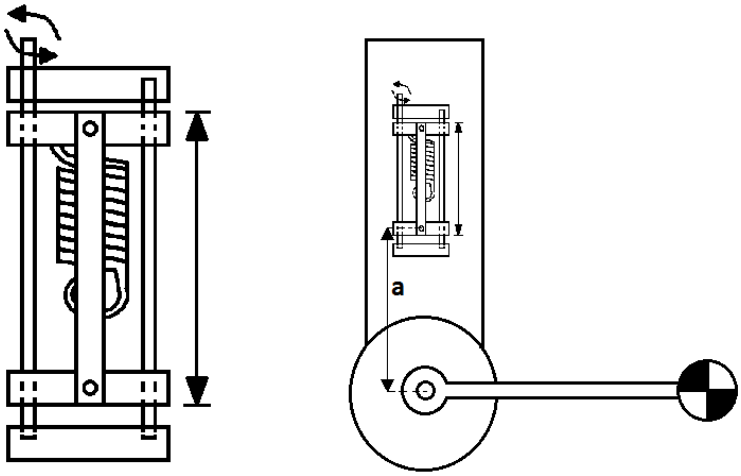
5. Testfase

Van het eindontwerp is een testmodel gemaakt die de werking van de rem laat zien en het opnieuw balanceren van de massa. Ten opzichte van het eindontwerp zijn een aantal onderdelen uit ander materiaal vervaardigd en is de virtuele veer constructie vervangen. De meebewegende remschijven, de onderarm, tussenring en de bovenarm platen zijn van acryl gemaakt, i.p.v. aluminium. De kans deed zich voor om deze onderdelen te lasersnijden. Hiermee is tijd bespaard. Het testmodel is te zien in afbeelding 5.1.



Afbeelding 5.1: het testmodel, gemaakt van acryl en aluminium.

Het testmodel bevat niet de constructie waarbij gebruik wordt gemaakt van het virtuele veer principe. Hier is voor gekozen omdat deze constructie zeer nauwkeurig en nagenoeg wrijvingsloos moet worden vervaardigd. In plaats daarvan is ervoor gekozen afstand a variabel te maken. Dit is gedaan door één veer en de katrol gelijktijdig te laten bewegen over een schroefdraad, zie afbeelding 5.2. Met behulp van een geleider kan er, d.m.v. rotatie van de schroefdraad, omhoog en omlaag worden bewogen. Met deze constructie kan het opnieuw zoeken van balans worden nagebootst.



Afbeelding 5.2: verenkar, gebaseerd op de bankschroef. Draai aan de as met schroefdraad en de verenkar zal verplaatsen. Verplaatst de verenkar, dan verplaatst afstand a, waardoor het product van akr kan veranderen.

Het testmodel remt wel hetzelfde als het eindontwerp. Een rempin wordt tegen beide remschijven geduwd, waarbij de remschijven stil komen te staan en de vrije arm nog kan bewegen binnen de twee remschijven. De rempin moet de remschijven remmen tot een maximale belasting van 1.5kg.

5.1. Testen

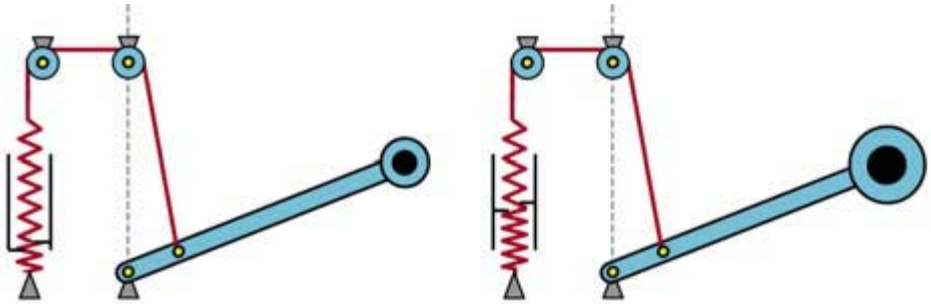
Bij het in elkaar zetten van het model is het gebruikte draad (ijzergaren)meerdere malen geknapt. De stress op het draad is te groot gebleken. Het ijzergaren is vervangen door visdraad, maar ook het visdraad is geknapt. Met geen beschikking tot goed draad, is het opnieuw vinden van balans niet getest.

Het remsysteem van de compensator is wel getest. De remschijven zijn vastgezet en vervolgens belast. De rand van de remschijven zijn voorzien van schuurpapier, omdat acryl een te glad oppervlak is om te remmen met rubber. Op het uiteinde van de vrije arm is een massa van 0.4kg, 0.8 en 1.3kg gehangen. De remschijven hebben niet bewogen, bij alle drie de belastingen.

De remschijven en de rempin kunnen een massa van 1.3kg remmen. De rem in het systeem werkt dus naar behoren. Er is niet tot 1.5kg belast, omdat de vrije arm, die ook van acryl is gemaakt, bij 1.3kg is er gestopt met testen, omdat de vrije arm al gevaarlijk doorboog.

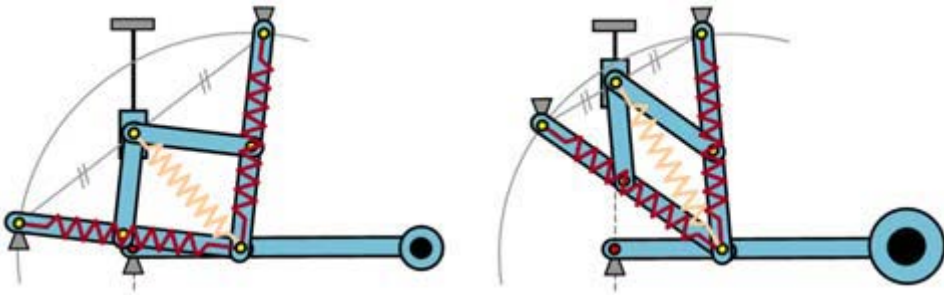
6. Discussie

In de literatuur worden pogingen gedaan om basic gravity equilibrators om te bouwen naar balanceersystemen, die variabele massa's kunnen compenseren. Een goed voorbeeld hiervan is het onderzoek van Herder (Herder et al., 2007). Dit onderzoek beschrijft hoe de variabele a en r aangepast kunnen worden om te voldoen aan de eis $mgL = akr$. De ontwerpen beschreven in dit onderzoek zijn allemaal mechanisch. Het grootste nadeel van de ontwerpen in het onderzoek, is dat de afstanden a en r alleen aangepast kunnen worden in één positie. Hierbij moet het systeem handmatig geremd worden en moeten de afstanden a en r ook handmatig verplaats worden. In hetzelfde onderzoek wordt wel een prototype beschreven die wel mechanisch de kracht aan kan passen. Dit wordt gedaan door afstand a te vergroten. Het prototype is echter te groot om onder de kleren te dragen en kan maar in één positie de compensatiekracht aanpassen.
In een ander onderzoek van Herder (Herder et al., 2011) wordt een ontwerp gegeven om k aan te passen. De k wordt aangepast door het aantal actieve windingen van de veer te veranderen, zie afbeelding 6.1. Een groot voordeel is dat de afstanden a en r hetzelfde kunnen blijven. Ook zou de verhouding van akr in elke willekeurige positie aangepast worden. De actieve windingen van de veer aanpassen is alleen een lastige opgave. Het systeem moet namelijk zeer nauwkeurig het juiste aantal actieve windingen aanpassen. Anders kan een specifieke massa niet worden gebalanceerd. Verder is dit niet een energiezuinige manier om de verhouding van akr te veranderen.



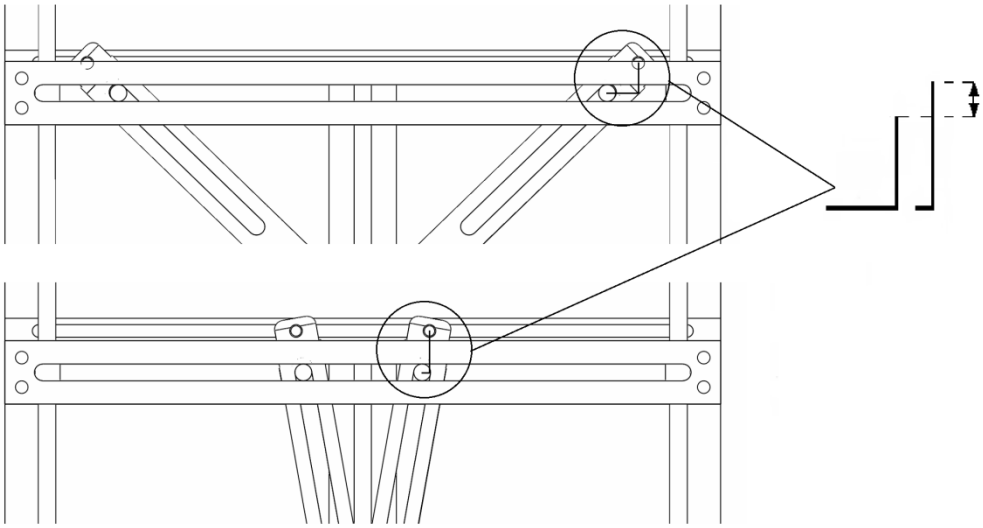
Afbeelding 6.1: actieve windingen van de veer aanpassen om zo de k van de veer aan te passen (Herder et al., 2007).

In hetzelfde onderzoek wordt ook een ontwerp gegeven van een virtuele veer. Hierbij zijn twee veren op een pantograaf geplaatst, zie afbeelding 6.2. Die veren samen vormen een virtuele veer. In deze constructie wordt, door de veerverdraaiing, virtueel afstand a veranderd. Het grootste voordeel is dat de afstand a energiezuinig kan worden verplaatst, door alleen de hoek te verdraaien.



Afbeelding 6.2: virtuele veer waarbij afstand a virtueel wordt veranderd (Herder et al., 2011).

In het ontwerp, beschreven in deze afstudeeropdracht, wordt een oplossing gegeven voor deze problemen. De verhouding van akr kan mechanisch niet in elke positie worden aangepast, zonder hulp van een energiebron. Daarom zijn elektrische elementen verwerkt in het eindontwerp. Het eindontwerp maakt gebruik van twee meebewegende remschijven, waarin een vrije arm kan bewegen. Door een actuator kan de meebewegende remschijf in elke positie geremd worden. Dit is een verbetering t.o.v. de ontwerpen die besproken worden in de literatuur, waar bijna alle systemen in maar één positie de verhouding van akr kunnen aanpassen.
De virtuele veerconstructie in het eindontwerp is vernieuwend. Het idee komt voort uit het onderzoek over de virtuele veer van Herder (Herder et al., 2011). In het onderzoek van Herder wordt virtueel a veranderd. In het eindontwerp wordt de k van de virtuele veer aangepast. k aanpassen is over het algemeen lastig en niet energiezuinig. In het eindontwerp wordt de k van de virtuele veer aangepast door een hoekverdraaiing. Hierbij moet alleen de wrijving worden overwonnen. Het eindontwerp maakt gebruik van een energiezuinige manier om de k van akr te veranderen.
Toch moet opgemerkt worden dat de veerconstructie één klein nadeel heeft. Als de veren verdraaid moeten worden, zal het touw, bij een toename van de massa, ongewenst stijgen. Bij een afname van de massa, zal het touw dalen, zie ook afbeelding 6.3. Dit heeft als gevolg dat de totale ROM van de compensator iets veranderd. De verplaatsing van het touw is klein (2.7mm). De totale ROM zal dan 8% verliezen van zijn totale ROM. Een oplossing hiervoor is te lezen in H7.4 Hoogteverschil (pag. 48).



Afbeelding 6.3: hoogteverschil bij verdraaiing van de drukveren.

De drukveren moeten een indrukking van 43.87mm hebben. Dit heeft als resultaat dat de drukveren vrij lang zijn. Eén drukveer staat, bij een maximale massa van 1.5kg, onder een hoek van 10° t.o.v. de verticaal. Bij de minimale massa van 1kg, staat de drukveer onder een hoek van 49.16°. Omdat de veren vrij lang zijn en omdat de veren verdraaid moeten worden, valt het eindontwerp nogal breed uit, 17cm. Dit is eigenlijk te breed voor onder de kleren.
Toch is het verstandig om de virtuele veer constructie te gebruiken, voornamelijk omdat het een zeer energiezuinige oplossing is voor het veranderen van het product van akr.

De rem wordt door de actuator geactiveerd. Deze duwt tegen de remhendels, waardoor de rempin tegen de remschijven wordt geduwd. De actuator duwt de remhendels voorbij het draaipunt. Dit heeft als gevolg dat de remschijven de rempin vaster duwen. De rem is dus energiezuinig, omdat de actuator niet aan hoeft te blijven tijdens het remmen.

Tijdens de afstudeeropdracht zijn vele ideeën praktisch uitgewerkt. Een goed voorbeeld hiervan is het mechanische concept. Door het maken van het mechanisch concept is gebleken, dat de voorspanning van de veer vergroten leidt tot een balansverstoring. Bij het evalueren van het mechanische concept blijkt, dat het mechanische concept ook theoretisch tot een balansverstoring leidt. Zo zijn meerdere ideeën eerst vervaardigd, om zo te bevestigen of een idee wel of niet zou werken. Als meerdere ideeën eerst theoretisch uitgewerkt hadden kunnen worden, dan had er, in sommige situaties, tijd bespaard kunnen worden.

Het testen van het model is helaas gedeeltelijk gelukt voor de inleverdatum van de scriptie. De werking van de rem is wel getest en werkt naar wens. Het testen van het veersysteem is niet gelukt. Dit onderdeel zal verder worden getest in de periode tot de verdediging. Tijdens de verdediging zullen de resterende testresultaten vermeld worden.

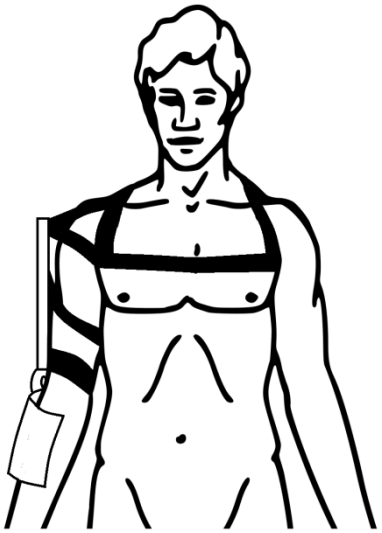
7. Aanbevelingen

Het eindontwerp van de zwaartekrachtcompensator kan nog worden verbeterd. Daarom zijn er aanbevelingen beschreven om de zwaartekrachtcompensator te optimaliseren.

7.1. Bevestiging orthese

Hoe lichter de armorthese wordt des te comfortabeler zal deze zijn in het gebruik. De orthese wordt aan het lichaam gedragen. De orthese moet worden bevestigd aan de:

- Onderarm;
- Bovenarm;
- Torso.



Afbeelding 7.1: tuigje om de romp, om de zwaartekracht compenastor op zijn plek te houden. De compensator is lateraal van de boven – en onderarm gepositioneerd.

Onderarm

Aan de onderarm wordt aangeraden een passende cupvorm te gebruiken, om de onderarm te laten rusten op het balanceersysteem (afbeelding 7.1).

Bovenarm

De inklemming van de bovenarm kan gedaan worden door een passende cupvorm tegen de laterale zijde van de bovenarm. Vervolgens worden twee banden over de bovenarm gespannen om de cupvorm op zijn plaats te houden. De banden moeten niet in de weg zitten bij spiercontractie. Een voor de hand liggende plek voor de bovenste band is dan, aan de frontale zijde, tussen de m. Biceps brachii en de m. Deltoideus. Voor de onderste band tussen de m. Biceps brachii en het art. Cubiti. Aan de dorsale zijde van de arm, moet de bovenste band de rand van m. Deltoideus volgen. De onderste band moet, aan de dorsale zijde, zo dicht mogelijk bij het art. Cubiti blijven. De onderst band moet de contractie van de m. Triceps brachii niet hinderen (afbeelding 7.1).

Torso

Om de compensator op zijn plaats te houden, zal de compensator ook aan het bovenlichaam moeten worden bevestigd. Met behulp van een tuigje om de borst (afbeelding 7.1) kan de compensator aan de borst bevestigd worden. De compensator kan via een schouderband en de bovenste bovenarmband, ter hoogte van de oksel, aan het tuigje worden bevestigd.

7.2. Remsysteem eindontwerp

Om de compensatiekracht aan te passen moet, in het huidige model, het systeem op de rem gezet worden. Dit gebeurt d.m.v. een drukknop. Zoals beschreven in de discussie is dit niet ideaal, maar hier is nog ruimte voor verbetering.

Versnellingssensoren
Een intelligente manier om het systeem te remmen, is door versnellingssensoren in de compensator aan te brengen. Op deze manier kan ervoor gezorgd worden dat het systeem op de rem gaat wanneer er een te grote valversnelling optreedt. Een te grote valversnelling treed op, wanneer de massa te groot wordt voor de compensator. De massa die niet gebalanceerd kan worden, zal vallen met een valversnelling van $9.81 m/s^2$ (gravitatie). Een nadeel aan dit systeem is dat het kan reageren op een te snelle beweging van de gebruiker, dit is uiteraard ongewenst. Daarom zou ditzelfde systeem beter tot zijn recht komen als het wordt toegevoegd aan de huidige rem van de compensator.
Door dit systeem toe te voegen kan er een soort fail-safe worden geïmplementeerd dat het systeem op de rem gaat wanneer er te snel bewogen wordt. Wanneer de gebruiker bijvoorbeeld vergeten is de rem op het systeem te zetten bij het veranderen van de massa, kunnen de versnellingssensoren ingrijpen. De versnellingssensoren kunnen ook ingrijpen wanneer de massa onbewust veranderd.

Druksensoren
De rem kan ook bestuurd worden d.m.v. druksensoren in de hand. Wanneer er iets wordt vast gepakt zal de rem door het signaal uit de druksensoren worden geactiveerd. Hierbij moet natuurlijk wel slim worden geprogrammeerd.
De rem moet niet geactiveerd blijven wanneer een voorwerp wordt vastgehouden. Een ander nadeel kan zijn, dat de rem wordt geactiveerd bij handelingen waarbij iets moet worden vastgehouden maar niet hoeft worden verplaatst.

7.3. Voeding elektrische componenten

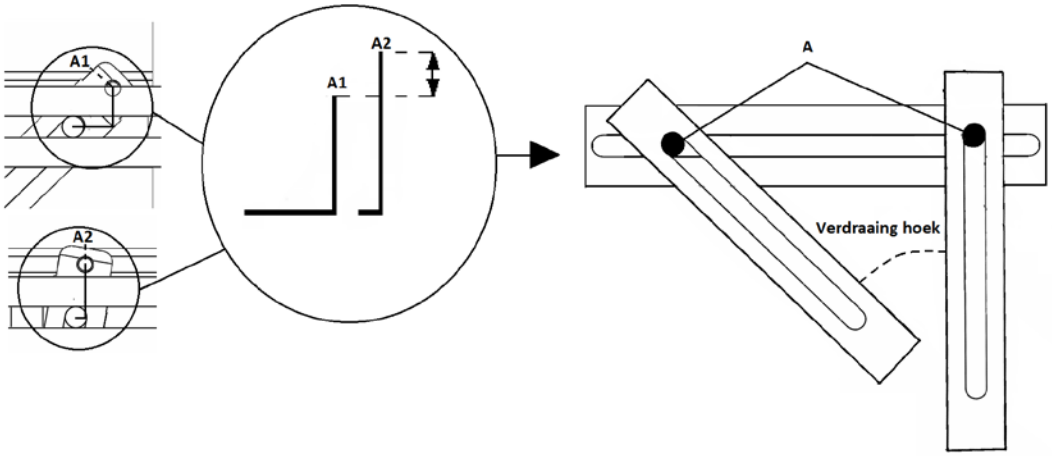
Al deze elektrische componenten hebben ook een voeding nodig. De primaire eis voor de voeding is dat deze lang genoeg meegaat tijdens het gebruik van de compensator. Wanneer de voeding opraakt functioneert de compensator niet meer en wordt de arm dus niet meer ondersteund. Dit kan worden opgelost door gebruik te maken van een verwisselbare voeding of een oplaadbare voeding.

Verwisselbare voeding
Een verwisselbare voeding kan relatief makkelijk gerealiseerd worden door gebruik te maken van batterijen. Batterijen kunnen gemakkelijk gekocht en vervangen worden. Verder zijn batterijen ook makkelijk mee te nemen.

Oplaadbare voeding
Bij een oplaadbare voeding is het handig om twee accu's te leveren bij één compensator. De ene accu kan worden opgeladen terwijl de andere gebruikt wordt. Daarnaast is het wenselijk om het laadgedrag van deze accu's hetzelfde te houden als mobiele telefoons. De gebruiker moet met één accu de compensator een dag lang kunnen gebruiken. De accu moet vervolgens 's nachts kunnen worden opgeladen, zodat de volgende dag gebruik gemaakt kan worden van dezelfde accu.

7.4. Hoogteverschil

Zoals in de discussie wordt beschreven, heeft het eindontwerp een hoogteverschil bij het verdraaien van de veren. Als 1.5kg gebalanceerd moet worden dan wordt de ROM van de zwaartekrachtcompensator 8% kleiner t.o.v. de ROM wanneer de compensator 1kg balanceert. Dit probleem komt door de hoekstandsverandering van de veren (zie afbeelding 6.3, pag. 44). een mogelijke oplossing zit in het punt waar de veren om draaien. Wanneer er voor gezorgd wordt dat het draaipunt en het uit einde van de veer in rust zich in hetzelfde punt bevinden. Dan zal er geen hoogte verschil optreden bij een hoekstandsverandering, zie afbeelding 7.2.

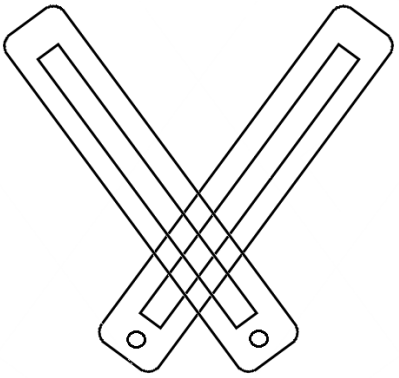


Afbeelding 7.2: oplossing hoogteverschil bij hoekverdraaiing. Door punt A op het zelfde punt te laten beginnen, als de geleider waarover gedraaid wordt, kan punt A onmogelijk verplaatsen. A1 veranderd niet meer in A2 of andersom.

7.5. Breedte zwaartekrachtcompensator

Het eindontwerp is breed uitgevallen. De zwaartekrachtcompensator is 17cm breed. Dit is eigenlijk net te breed. De zwaartekrachtcompensator kan zo niet goed onder de kleren gedragen worden. Dit komt omdat de veren om hetzelfde draaipunt draaien. De veren komen vervolgens onder een hoek van 49.16°, met de verticaal. De hoek tussen de veren is dan 98.32°.

Door de twee veren een individueel draaipunt te geven, hoeven de veren maar 49.16° te verdraaien. Denk bijvoorbeeld aan een constructie waarbij de veren kruisen, zie afbeelding 7.3. Hierbij moet wel het idee van de virtuele veer gewaarborgd blijven. De horizontale component moet dus nog steeds geen effect hebben op het systeem, als de veren worden ingedrukt in een zuiver verticale richting. Een vergelijkbare constructie is niet haalbaar gebleken in het eindontwerp. De veren moeten steeds gepaard ingedrukt worden. Door ruimtegebrek konden de drukveren niet gepaard ingedrukt worden, bij een kruislingse constructie.



Afbeelding 7.3: kruislingse constructie drukveren

8. Conclusie

Het eindontwerp voldoet aan de eisen die gesteld zijn aan de zwaartekrachtcompensator. Een variabele massa kan worden gecompenseerd op elke positie van de arm, binnen een ROM van 110° (15 ° - 125°). Het eindontwerp kan dit alleen met gebruik van elektrische componenten.
Gebleken is dat de zwaartekrachtcompensator mechanisch geen variabele massa kan balanceren. Hiervoor is een energiebron nodig. Met behulp van een energiebron kan de variabele massa worden opgevangen en gebalanceerd.

Literatuurlijst

Agrawal, A., & Agrawal, S. K. (2005). Design of gravity balancing leg orthosis using non-zero free length springs. *Mechanism and Machine Theory*, *40*(6), 693–709.

Aizawa, J., Masuda, T., Koyama, T., Nakamaru, K., Isozaki, K., Okawa, A., & Morita, S. (2010). Three-dimensional motion of the upper extremity joints during various activities of daily living. *Journal of biomechanics*, *43*(15), 2915–22.

Andel, C. J. van, Wolterbeek, N., Doorenbosch, C. a M., Veeger, D. H. E. J., & Harlaar, J. (2008). Complete 3D kinematics of upper extremity functional tasks. *Gait & posture*, *27*(1), 120–127.

Bartels, B., Pangalila, R. F., Bergen, M. P., Cobben, N. a M., Stam, H. J., & Roebroeck, M. E. (2011). Upper limb function in adults with Duchenne muscular dystrophy. *Journal of rehabilitation medicine : official journal of the UEMS European Board of Physical and Rehabilitation Medicine*, *43*(9), 770–785.

Bijvank, J. (2010). Ontwerp elleboogscharnier armorthese.

Bradley, D., & Parsons, E. (1998). Newborn screening for Duchenne muscular dystrophy. *Seminars in Neonatology*, *3*(1), 27–34.

Broeren, B. (2011). Antropometrische Data.

Broeren, B. (2013a). Stertkeleer.

Broeren, B. (2013b). Sterkteleer Buiging Mechanica.

Cornu, C., Goubel, F., & Fardeau, M. (2001). Muscle and joint elastic properties during elbow flexion in Duchenne muscular dystrophy. *The Journal of physiology*, *533*(Pt 2), 605–616.

Florence, J. M., Pandya, S., King, W. M., Robison, J. D., Signore, L. C., Wentzell, M., & Province, M. a. (1984). Clinical trials in Duchenne dystrophy. Standardization and reliability of evaluation procedures. *Physical therapy*, *64*(1), 41–45.

French, M., & Widden, M. (2000). The spring-and-lever balancing mechanism, George Carwardine and the Anglepoise lamp. *Journal of Mechanical Engineering Science*, *214*(3), 501–508.

Herder, J. (1998). Design of spring force compensation systems. *Mechanism and machine theory*, *33*(1-2), 151–161. Retrieved from

Herder, J., Barents, R., Schenk, M., Van Dorsser, W., & Wisse, B. (2007). Spring-to-spring balancing as energy-free adjustment method in gravity equilibrators. *Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference*, 742–750.

Herder, J. L., Barents, R., Wisse, B. M., & Dorsser, W. D. Van. (2011). Efficiently variable zero stiffness mechanisms, 2–3.

Lin, P.-Y., Shieh, W.-B., & Chen, D.-Z. (2013). A theoretical study of weight-balanced mechanisms for design of spring assistive mobile arm support (MAS). *Mechanism and Machine Theory*, *61*, 156–167.

Lue, Y.-J., Lin, R.-F., Chen, S.-S., & Lu, Y.-M. (2009). Measurement of the functional status of patients with different types of muscular dystrophy. *The Kaohsiung journal of medical sciences*, *25*(6), 325–333.

McDonald, C., & Abresch, R. (1995). Profiles of neuromuscular diseases. Duchenne muscular dystrophy. *American journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, *74*(5), 70–92.

Morrey, B., Askew, L., & Chao, E. (1981). A biomechanical study of normal functional elbow motion. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, *63A*(6), 872–877.

Murray, I. a, & Johnson, G. R. (2004). A study of the external forces and moments at the shoulder and elbow while performing every day tasks. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, *19*(6), 586–94.

Petuskey, K., Bagley, A., Abdala, E., James, M. a, & Rab, G. (2007). Upper extremity kinematics during functional activities: three-dimensional studies in a normal pediatric population. *Gait & posture*, *25*(4), 573–9.

Pieniazek, M., Chwala, W., Szczechowicz, J., & Pelczar-Pieniazek, M. (2007). Upper limb joint mobility ranges during activities. *Ortopedia Traumatologia Rehabilitacja*, *9*(6), 413–422.

Rosen, J., Perry, J. C., Manning, N., Burns, S., & Hannaford, B. (2005). The Human Arm Kinematics and Dynamics During Daily Activities – Toward a 7 DOF Upper Limb Powered Exoskeleton, (July).

Rundquist, P., Obrecht, C., & Woodruff, L. (2009). Three-dimensional shoulder kinematics to complete activities of daily living. *American journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, *88*(8), 623–629.

Schenk, M., Guest, S. D., & Herder, J. L. (2007). Zero stiffness tensegrity structures. *International Journal of Solids and Structures*, *44*(20), 6569–6583.

Sheikhzadeh, A., Yoon, J., Pinto, V., & Kwon, Y. (2008). Three-dimensional motion of the scapula and shoulder during activities of daily living. *Journal of shoulder and elbow surgery / American Shoulder and Elbow Surgeons ... [et al.]*, *17*(6), 936–42.

Smidts, J. (n.d.-a). Heren vrijetijdskleding naar maat, vrijetijdskleding naar Uw maat.

Tyler, K. L. (2003). Origins and early descriptions of “Duchenne muscular dystrophy”. *Muscle & nerve*, *28*(4), 402–422.

Veeger, H., Magermans, D., Nagels, J., Chadwick, E., & Helm, F. van der. (2005). A kinematical analysis of the shoulder after arthroplasty during a hair combing task. *Clinical Biomechanics*, *20*, 591–599.

Bijlage

Hier de bijlage van de afstudeeropdracht, de sterkteberekeningen, het formuleblad en de bouwtekeningen.

Bijlage I: Veerberekeningen

Zoals in het vorige hoofdstuk (H4.1 Optimalisatie virtuele veer, pag. 35) wordt uitgelegd, zullen twee drukveren een virtuele veer nabootsen die een variabele massa kan opvangen. Nu is het van belang om te weten welke eigenschappen de twee drukveren moeten hebben, zodat de virtuele veer de gewenste kracht levert en een correcte veerconstante heeft, zonder dat het balans verstoord raakt. De gewenste veerconstante en te leveren kracht worden berekend met de onderstaande formules. Hierbij is u de indrukking van de veer. Zie de inleiding van dit hoofdstuk (H4. Optimalisatie, pag.35) voor de waardes van de variabelen.

$mgL = akr$ (4)

$F = k \times u$ (6)

De indrukking van de veer is bepaald door de lengte van de veer te berekenen in de twee uiterste posities en deze van elkaar af te trekken. De lengte van de veer wordt berekend met de onderstaande formule.

$s = \sqrt{a^2 + r^2 - 2arcos\varphi}$ (2)

$u = s_1 - s_0$ (7)

In de inleiding van dit hoofdstuk (H4. Optimalisatie, pag. 35) zijn de benodigde variabelen bepaald om de k van de virtuele veer te berekenen. Er wordt uitgegaan van de situatie weergegeven in afbeelding 4.5, de twee veren stellen drukveren voor. Hoek V_1 en hoek V_2 staan beide in 10°, hoek V is dus in totaal 20°. In deze positie zal ook de maximale massa, m = 1.5kg, gecompenseerd worden. Nu kunnen alle variabele in formule 4 in gevuld worden, zodat k van de virtuele veer kan worden berekend.

$1.5 \times 9.81 \times 300 = 70 \times k \times 20$

$k = \frac{1.5 \times 9.81 \times 300}{70 \times 20}$

$k = 3.15 N/mm^2$

Vervolgens zal de indrukking worden berekend. Met de indrukking kan de kracht die de virtuele veer moet leveren brekend worden. Om de indrukking te bereken wordt formule 2 in formule 7 geplaatst. Waarna vervolgens formule 6 kan worden ingevuld.

$u = s_1 - s_0$ (7)

$s_0 = \sqrt{a^2 + r^2 - 2arcos(55)}$ (2)

$s_1 = \sqrt{a^2 + r^2 - 2arcos(165)}$ (2)

$u = \sqrt{a^2 + r^2 - 2arcos(165)} - \sqrt{a^2 + r^2 - 2arcos(55)}$

$u = \sqrt{70^2 + 20^2 - 2 \times 70 \times 20 \times cos(165)} - \sqrt{70^2 + 20^2 - 2 \times 70 \times 20 \times cos(55)}$

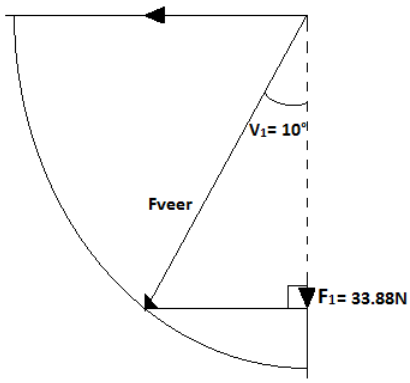
$u = 89.47 - 60.78$

$u = 28.69mm$

$F = 3.15 \times 28.69$
$F = 90.37N$

De virtuele veer moet dus een kracht leveren van 90.37N met een veerconstante van 3.15N/mm^2 en een indrukking van 28.69mm, om een massa van 1.5kg te balanceren. Het verticale component van de twee drukveren leveren beide de helft van kracht die de virtuele veer moet leveren. Eén drukveer moet dus een kracht van 45.37N leveren in verticale richting.
De indrukking van één drukveer blijft hetzelfde als die van de virtuele veer. Met de indrukking bekend en de te leveren verticale kracht, kan de kracht die één drukveer moet leveren, met behulp van de stelling van Pythagoras, uitgerekend worden, zie ook afbeelding I.1.

$F_{veer} = \frac{F_1}{\cos(V_1)}$ (8)
$F_{veer} = \frac{45.37}{\cos(10)}$
$F_{veer} = 46.07N$



Afbeelding I.1: berekening van Fveer met behulp van de stelling van Pythagoras.

Met de kracht en de indrukking van één drukveer bekend, kan de veerconstante van één drukveer berekend worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van formule 6.
$F = k \times u$ (6)
$k = \frac{F_{veer}}{u}$
$k = \frac{46.07}{28.69}$
$k = 1.61N/mm^2$

Eén drukveer moet dus een kracht kunnen leveren van 46.07N en een veerconstante van 1.61N/mm^2. De verticale indrukking blijft constant, 28.69mm. De indrukking van de veer is afhankelijk van de hoekstand.
$u_{veer} = \frac{u_1}{\cos(V_1)}$
$u_{veer} = \frac{28.69}{\cos(10)}$
$u_{veer} = 29.13mm$

Met twee drukveren die een kracht kunnen leveren van 46.07N, een veerconstante hebben van 1.61N/mm^2 en een indrukking van 29.13mm hebben, kan de virtuele veer een maximale massa van 1.5kg balanceren. Maar wanneer de massa verminderd tot 1kg, dan verandert de k van de virtuele veer. De indrukking, van de virtuele veer, blijft bij beide massa's hetzelfde, 28.69mm. De ROM blijft hetzelfde. Wanneer naar formule 6 wordt gekeken, blijkt dat de F kleiner moet worden, om de k van de virtuele veer te verkleinen. De F van de virtuele veer kan worden berekend voor een massa van 1kg. Vervolgens kan hoek V_1 verdraaid worden, om zo één drukveer een kleinere verticale kracht te laten leveren. Nu F_{veer} bekend is, kan de benodigde hoekverdraaiing van V_1 berekend worden, zie ook afbeelding 4.7. Tot slot kan nogmaals de benodigde indrukking worden berekend.
$1 \times 9.81 \times 300 = 70 \times k \times 20$
$k = \frac{1 \times 9.81 \times 300}{70 \times 20}$
$k = 2.10N/mm^2$
$u = s_1 - s_0$

$u = \sqrt{70^2 + 20^2 - 2 \times 70 \times 20 \times cos(165)} - \sqrt{70^2 + 20^2 - 2 \times 70 \times 20 \times cos(55)}$
$u = 89.47 - 60.78$
$u = 28.69mm$

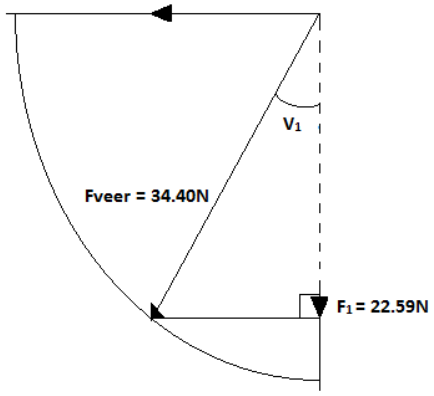
$F = k \times u$
$F = 2.10 \times 28.69$
$F = 60.25N$

$F_1 = \frac{60.25}{2}$
$F_1 = 30.13$

$F_{veer} = \frac{F_1}{\cos(V_1)}$
$F_{veer} = 46.07N$

$V_1 = \text{acos}\left(\frac{F_1}{F_{veer}}\right)$
$V_1 = \text{acos}\left(\frac{30.13}{46.07}\right)$
$V_1 = 49.16°$

$u_{veer} = \frac{u_1}{\cos(V_1)}$
$u_{veer} = \frac{28.69}{\cos(49.16)}$
$u_{veer} = 43.87mm$



Afbeelding II.2: berekening hoekverdraaiing V_1.

De veren moeten dus onder een hoek van 49.16° staan, ten opzichte van de verticaal, om een massa van 1kg te balanceren. Dit is een hoekverdraaiing van 39.16°.
Beide drukveren moeten dus een kracht kunnen leveren van 46.07N, waarbij de veerconstante 1.61N/mm^2 bedraagt en de indrukking 28.69mm is. Om een massa van 1.5kg te balanceren moeten de veren in een hoek van 10° staan met de verticaal. De veren moeten 39.16° verdraait worden om een massa van 1kg te balanceren. Door het verdraaien van de twee drukveren wordt de k van de virtuele veer kleiner, waardoor het balans behouden blijft bij het veranderen van de massa.

Bijlage II: Sterkteberekeningen

Het draaipunt van het eindconcept wordt tijdens het gebruik belast. De as wordt belast op stuik-, schuif- en buigspanning. Verder oefent de rem een kracht op de remschijf uit, om de kracht van de massa te compenseren. Alle definities en formules gebruikt in de berekeningen komen voort uit de sterkteleer reader van Broeren (Broeren, 2013a) en sterkteleer buiging mechanica reader van Broeren (Broeren, 2013b).

Wrijving berekeningen

Zoals in afbeelding II.1 is te zien drukt de rem met de kracht van F_n op de remschijf (I). De grootte van F_w is afhankelijk van de grootte van F_n en wrijvingscoëfficiënt (f), zie ook formule 9.

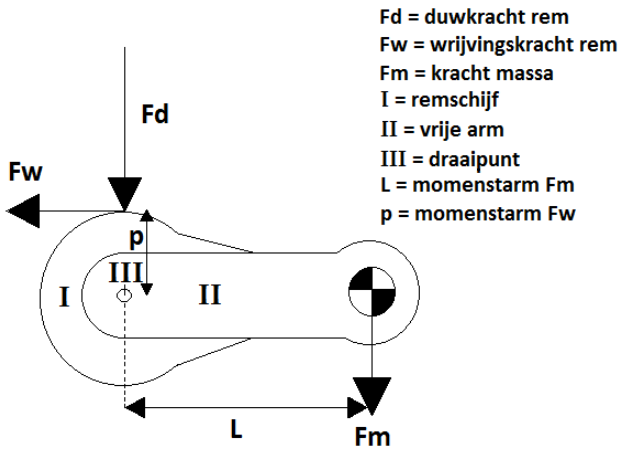
$$F_w = F_n \times f \qquad (9)$$

Wanneer het moment van F_w gelijk is aan F_m zal de remschijf stil staan. De maximale massa is bekend, namelijk 1.5kg, waardoor F_m bekend is, formule 10.

$$F_m = m \times g \qquad (10)$$

$$F_m = 1.5 \times 9.81$$

$$F_m = 14.7N$$



Afbeelding II.1: benodigde wrijvingskracht en duwkracht van de rem om Fm tegen te gaan

Zoals gezegd moet het moment van F_w gelijk zijn aan F_m, zie formule 11. De momentsarm p heeft een lengte van 40mm en L een lengte van 300mm.

$$F_w \times p = F_m \times L \qquad (11)$$

$$F_w \times 40 = 14.7 \times 300$$

$$F_w = 110.3N$$

Nu F_w bekend is, is de statische wrijvingscoëfficiënt nodig om F_n, de drukkracht van de rem op de remschijf, te berekenen. Gewenst is een hoge statische wrijvingscoëfficiënt zodat F_n zo klein mogelijk blijft. Gekozen is voor metaal en rubber, de statische wrijvingscoëfficiënt tussen metaal en rubber bedraagt 1.35. Nu kan formule 9 ingevuld worden zodat F_n berekend kan worden.

$$110.3 = F_n \times 1.35$$

$$F_n = 81.7N$$

De rem moet dus minimaal een kracht van 81.7N leveren om de remschijf stil te houden bij een massa van 1.5.kg.

Schuifspanning

Op de as (III, afbeelding II.1), waarover de remschijf en de vrije arm (II, afbeelding II.1) bewegen, staat een schuifspanning. Schuifspanning wordt berekend met formule 12, waarbij τ schuifspanning, F de kracht op de as in N en A de oppervlakte van de as in mm^2.

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad (12)$$

De oppervlakte van een as kan ook berekend worden aan de hand van formule 13, waarbij r de straal is van de as. De minimale diameter is tweemaal de straal.

$$A = \pi \times r^2 \qquad (13)$$

De toelaatbare schuifspanning kan worden berekend met formule 14. Hierbij is σ_e de vloeigrens van aluminium. De vloeigrens van aluminium is gelijk aan 400N/mm^2.

$$\bar{\tau} = 0.7 \times \sigma_e \qquad (14)$$

$$\bar{\tau} = 0.7 \times 400$$

$$\bar{\tau} = 280 N/mm^2$$

De toelaatbare schuifspanning is gelijk aan 280N/mm^2. De kracht op de as is gelijk aan de kracht waarmee de rem op de remschijf duwt plus de kracht van de massa van de arm. Dit komt neer op een F van 96.4N. De straal van de as is 5mm. Nu kan de optreden schuifspanning berekend worden, door formule 12 in te vullen.

$$\tau = \frac{96.4}{A}$$

$$\tau = \frac{96.4}{\pi \times 5^2}$$

$$\tau = 1.23 N/mm^2$$

Buiten de directe kracht staat er ook nog een torsiemoment op de as, waarbij schuifspanning optreedt. De schuifspanning die dit torsiemoment met zich meebrengt, wordt berekend met formule 15. Hierbij is M_w het optredende torsiemoment (gelijk aan $F_m \times L$ beschreven in de wrijvingberekeningen), ρ de straal van de as en I_p het polaire traagheidsmoment. I_p wordt brekend met formule 16.

$$\tau = \frac{M_w \times \rho}{I_p} \qquad (15)$$

$$I_p = \frac{\pi D^4}{32} \qquad (16)$$

$$\tau = \frac{M_w \times \rho}{\left(\frac{\pi D^4}{32}\right)}$$

$$\tau = \frac{4410 \times 5}{\left(\frac{\pi \times 10^4}{32}\right)}$$

$$\tau = 22.46 N/mm^2$$

De totale schuifspanning is dan de schuifspanning van de rem, de massa van de arm en het torsiemoment bij elkaar opgeteld.

$$\tau_{totaal} = 1.23 + 22.46$$

$$\tau_{totaal} = 23.69 N/mm^2$$

De maximaal optredende schuifspanning bedraagt 23.68N/mm^2. Toelaatbaar is 280N/mm^2. De as kan makkelijk de optredende schuifspanningen aan.

Stuikspanning

Naast schuifspanning treedt er ook stuikspanning op in de as. Stuikspanning wordt berekend aan de hand van de formule 17 Stuikspanning is de spanning van het werkelijke contactvlak van de as tegen de gatwand.

De spanning van het contactvlak is in werkelijkheid het grootst in de richting van de kracht het grootst is en neemt af naar de zijkant, zie afbeelding II.2. Hier is σ_s de stuikspanning, F de kracht op de as (96.4N) en $d \times t$ het contactoppervlak.

$$\sigma_s = \frac{F}{d \times t} \qquad (17)$$

$$\sigma_s = \frac{96.4}{10 \times 18}$$

$$\sigma_s = 0.54 N/mm^2$$

De toelaatbare stuikspanning hangt af van de lengte en de diameter van de as, zie formule 18 en 19. De diamater van de as is 10mm. De lengte van de as hangt af van breedte van de constructie, die is gelijk aan 20mm.

Door de diameter en lengte van de as in te vullen in formule 20 is bepaald dat de toelaatbare stuikspanning berekend moet worden met formule 19. Omdat $\frac{l}{d} \geq 2$. Waarbij σ_e nogmaals de vloeigrens is van aluminium, die 400N/mm^2 bedraagt.

$$\bar{\sigma_s} = 1.4 \times \sigma_e \ (indien\ 1.5 \leq \frac{l}{d} \leq 2) \qquad (18)$$

$$\bar{\sigma_s} = 1.75 \times \sigma_e \ (indien\ \frac{l}{d} \geq 2) \qquad (19)$$

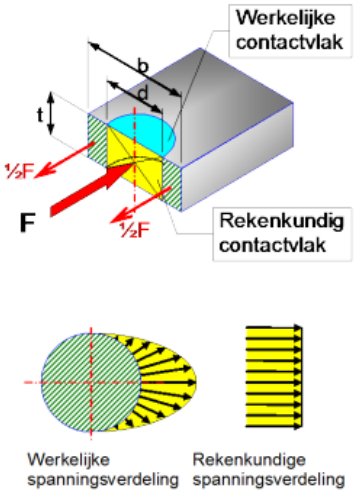
$$formule\ \bar{\sigma_s} = \frac{l}{d} \qquad (20)$$

$$formule\ \bar{\sigma_s} = \frac{20}{10}$$

$$formule\ \bar{\sigma_s} = 2$$

$$\bar{\sigma_s} = 1.75 \times 400$$

$$\bar{\sigma_s} = 700 N/mm^2$$



Afbeelding II.2: stuikspanning. De werkelijke spanningsverdeling tussen as en plaat (Broeren, 2013a).

De as van 10mm is dik genoeg om de massa van 1.5kg en de kracht van de rem tegen te houden ($\bar{\sigma_s} = 700 N/mm^2 > \sigma_s = 0.54 N/mm^2$).

Buigspanning

In deze constructie worden twee assen belast op buigspanning de remas en de as waarover geroteerd wordt.

Buigspanning remas

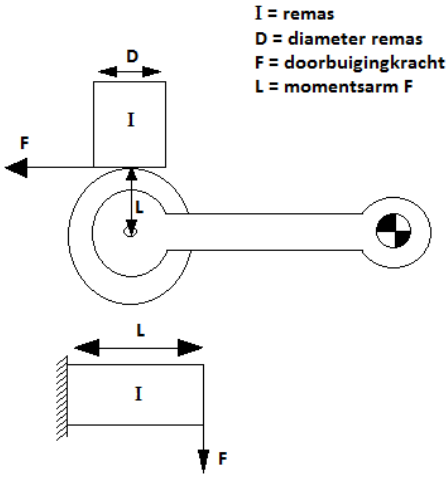
De remschijf wordt geremd door een as die met een kracht van 81.7N duwt op de remschijf. Deze as wordt belast op doorbuiging. De buigspanning wordt berekend met formule 21, waar σ_b de buigspanning is, M_b het moment en W_b het weerstandsmoment tegen buigen.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \qquad (21)$$

W_b kan berekend worden aan de hand van de diameter, D, van de as in mm, zie formule 22.

$$W_b = \frac{\pi \times D^3}{32} \qquad (22)$$

De toelaatbare buigspanning van een aluminium buis/aluminium geëxtrudeerd profiel bedraagt 60N/mm^2 bij een statische belasting. Als formule 21 in formule 19 (pag. 42) wordt ingevuld ontstaat formule 23, waarmee de minimale diameter van de as berekend kan worden. Hier is F de wrijvingskracht waarmee de as de remschijf remt, L de momentsarm van kracht F, zie afbeelding II.3.



Afbeelding II.3: buigspanning op remas I.

$$\sigma_b = \frac{F \times L}{\left(\frac{\pi \times D^3}{32}\right)} \qquad (23)$$

$$\sigma_b \times \left(\frac{\pi \times D^3}{32}\right) = F \times L$$

$$\frac{\sigma_b \times \pi \times D^3}{32} = F \times L$$

$$\sigma_b \times \pi \times D^3 = 32 \times F \times L$$

$$D^3 = \frac{32 \times F \times L}{\sigma_b \times \pi}$$

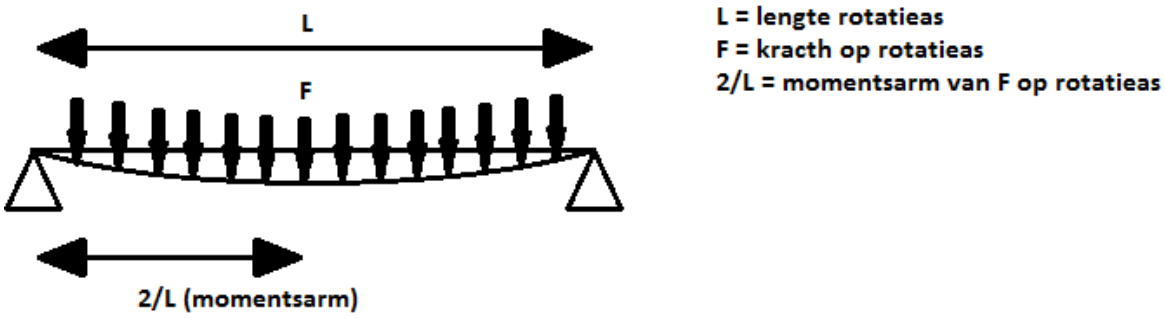
$$D = \sqrt[3]{\frac{32 \times F \times L}{\sigma_b \times \pi}}$$

$$D = 9.1mm$$

De as moet een grotere diameter hebben dan 9.1mm.

Buigspanning rotatieas

De rotatieas wordt, net als de remas, belast op buiging. De buigspanning in de rotatieas is anders dan die in de remas, zie afbeelding II.4. Het maximale moment is nu niet aan het uiteinde van de as maar in het midden van de as. Dit heeft als resultaat dat de momentsarm de helft van de lengte van de as is.



Afbeelding II.4: buigspanning op de rotatieas. L = 20 mm.

De lengte van de rotatie as 20mm. Nu kan formule 23 nogmaals ingevuld worden om zo de minimale diameter te bepalen van de rotatieas. De toelaatbare buigspanning bedraagt 60N/mm2. De kracht F bedraagt 96.4N. De momentsarm van de kracht is de helft van de lengte van de rotatieas $\left(\frac{2}{L}\right)$. De diameter van de rotatieas is 10mm.

$$\sigma_b = \frac{F \times \frac{2}{L}}{\left(\frac{\pi \times D^3}{32}\right)} \qquad (23)$$

$$\sigma_b = \frac{96.4 \times \frac{2}{10}}{\left(\frac{\pi \times 10^3}{32}\right)}$$

$$\sigma_b = 0.20 N/mm^2$$

Een rotatieas met een diameter van 10mm is voldoende.

Bijlage III: Formuleblad

$$U_p = U_m + U_s = mgLcos\varphi + \frac{1}{2}ks^2 \quad (1)$$

$$s = \sqrt{a^2 + r^2 - 2arcos\varphi} \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_p}{\partial \varphi} = -mgLsin\varphi + akrsin\varphi = 0 \quad (3)$$

$$mgL = akr \quad (4)$$

$$F_m = \frac{akr}{L} \quad (5)$$

$$F = k \times u \quad (6)$$

$$u = s_1 - s_0 \quad (7)$$

$$Fveer = \frac{F_1}{\cos(V_1)} \quad (8)$$

$$F_w = F_n \times f \quad (9)$$

$$F_m = m \times g \quad (10)$$

$$F_w \times p = F_m \times L \quad (11)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (12)$$

$$A = \pi \times r^2 \quad (13)$$

$$\bar{\tau} = 0.7 \times \sigma_e \quad (14)$$

$$\tau = \frac{M_w \times \rho}{I_p} \quad (15)$$

$$I_p = \frac{\pi D^4}{32} \quad (16)$$

$$\sigma_s = \frac{F}{d \times t} \quad (17)$$

$$\bar{\sigma_s} = 1.4 \times \sigma_e \ (indien\ 1.5 \leq \frac{l}{d} \leq 2) \quad (18)$$

$$\bar{\sigma_s} = 1.75 \times \sigma_e \ (indien\ \frac{l}{d} \geq 2) \quad (19)$$

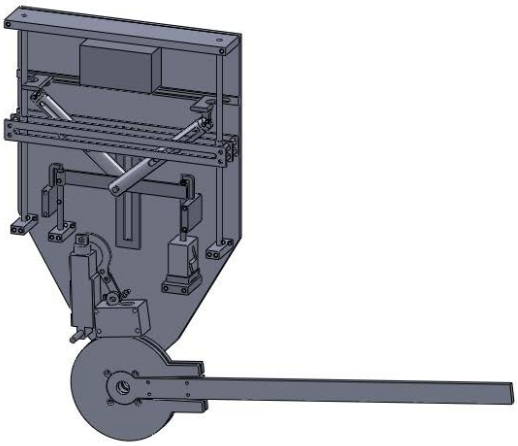
$$formule\ \bar{\sigma_s} = \frac{l}{d} \quad (20)$$

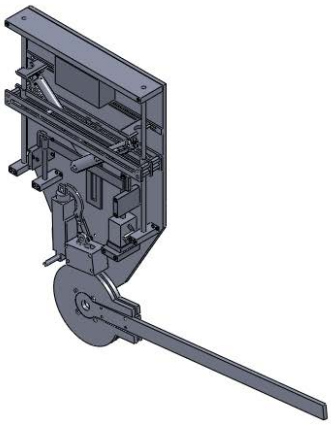
$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \quad (21)$$

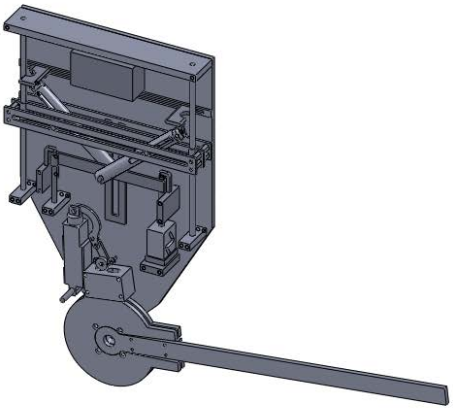
$$W_b = \frac{\pi \times D^3}{32} \quad (22)$$

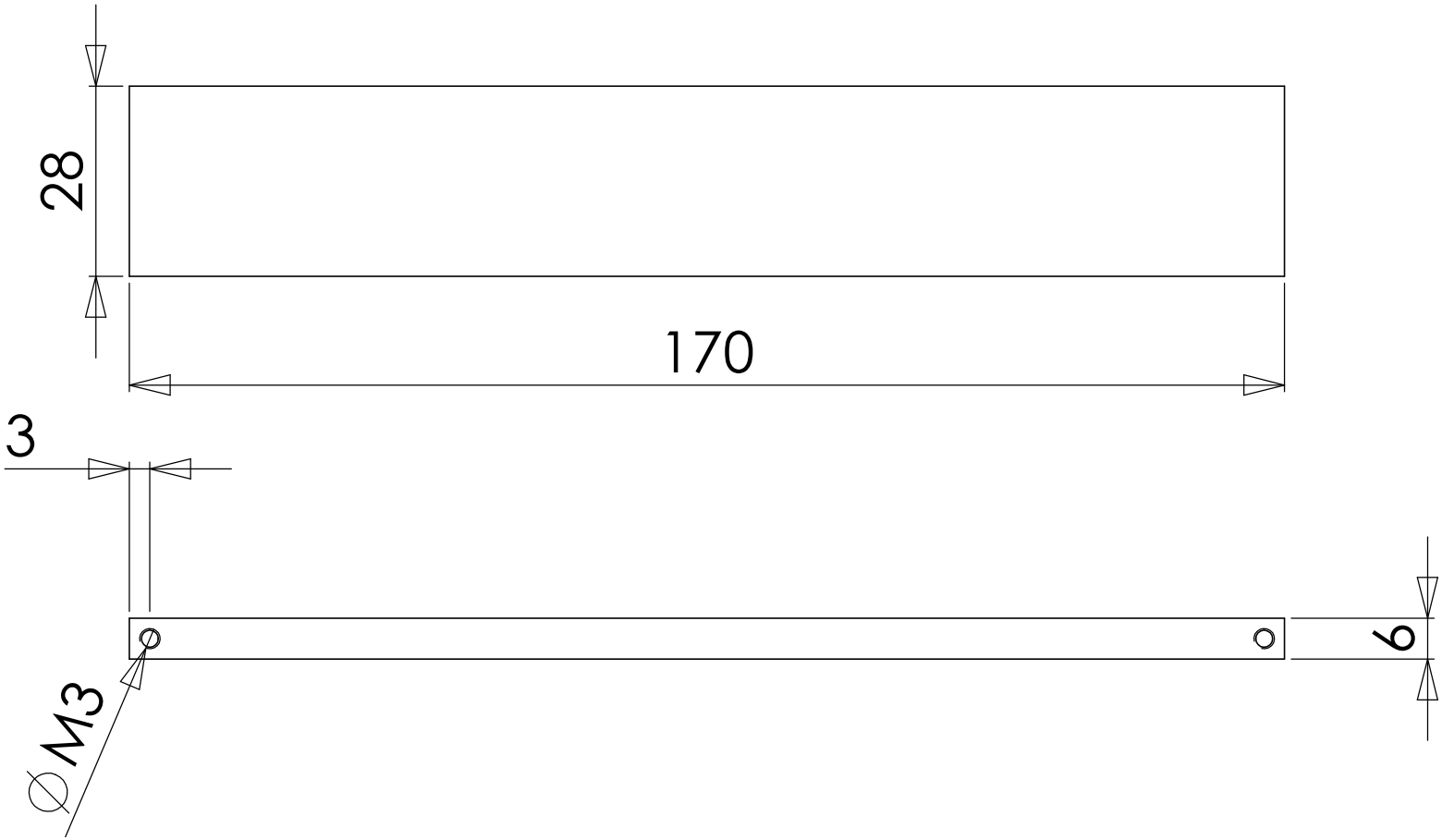
$$\sigma_b = \frac{F \times L}{\left(\frac{\pi \times D^3}{32}\right)} \quad (23)$$

Bijlage IV Bouwtekeningen









PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

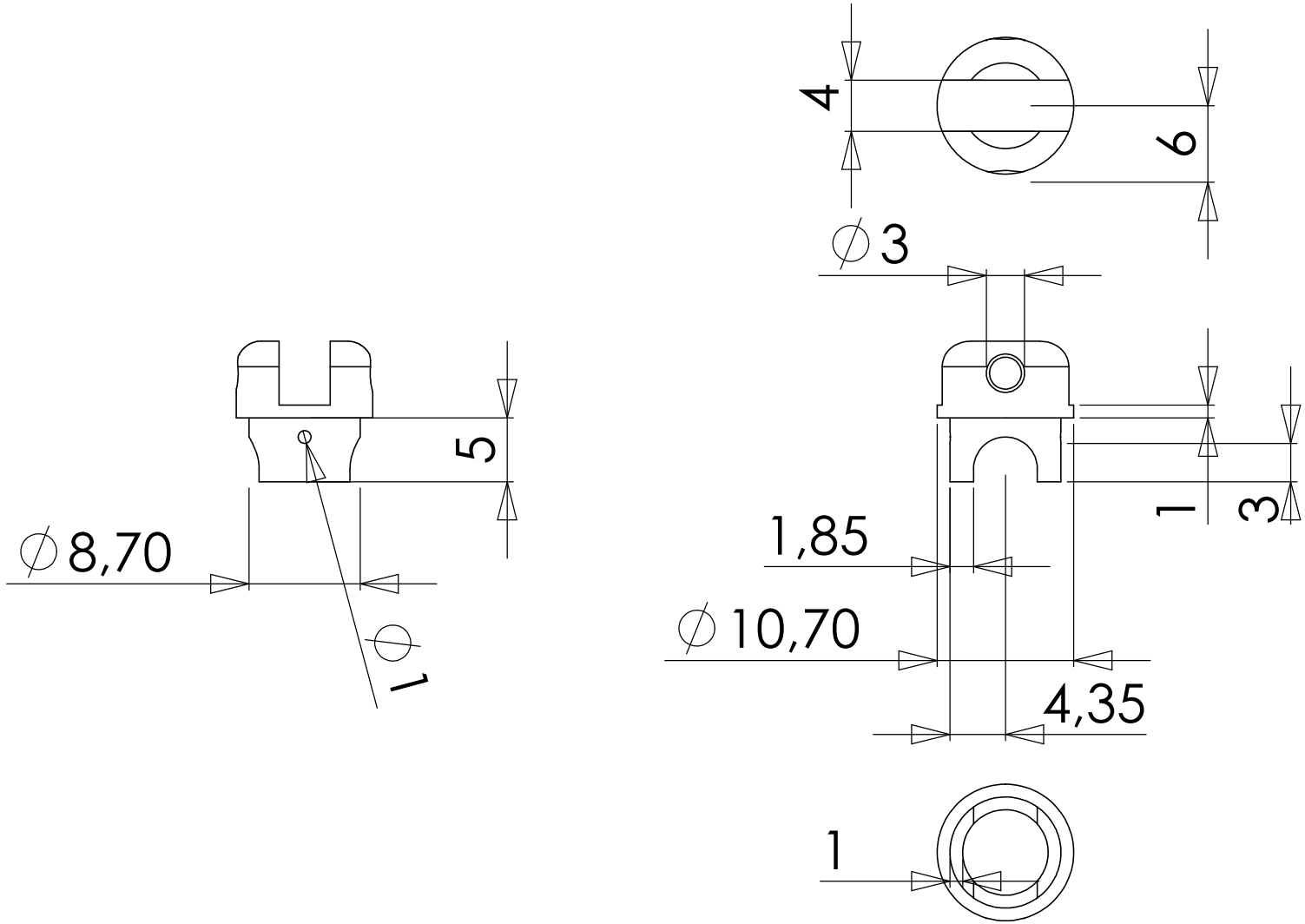
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

3bovenplaat

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:2	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

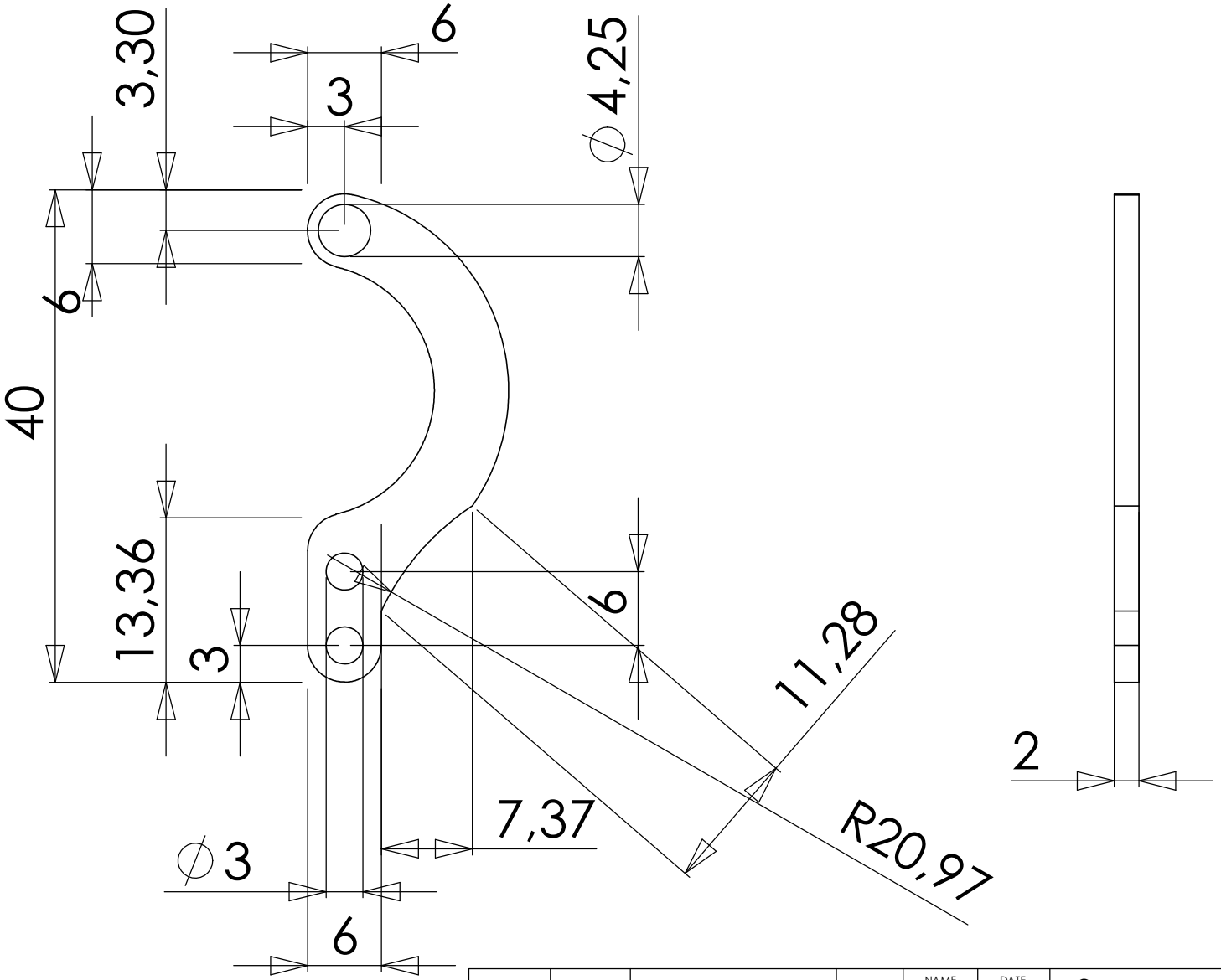
3dop drukverengeleiding

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:5:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

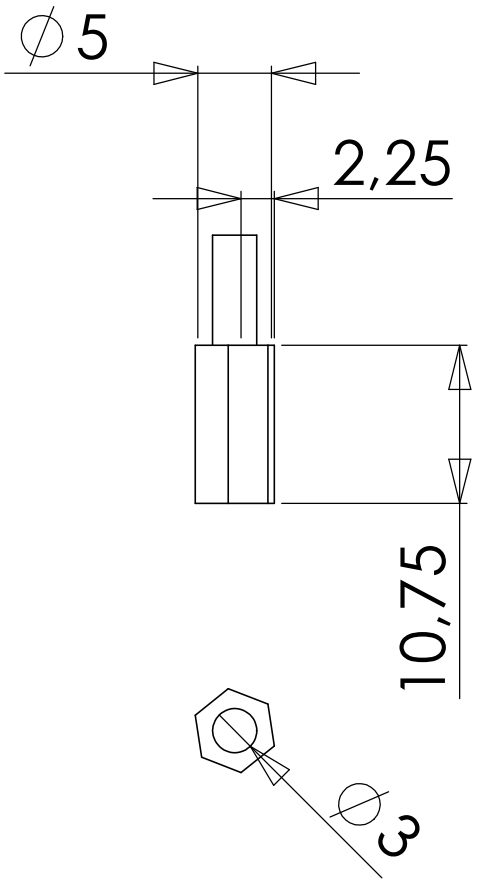
SolidWorks Student License
Academic Use Only



				NAME	DATE	3mm rempoot
		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±	DRAWN			
			CHECKED			
			ENG APPR.			
			MFG APPR.			
		MATERIAL --	Q.A.			
			COMMENTS:			
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --				SIZE A / DWG. NO. / REV.
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING				SCALE:2:1 / WEIGHT: / SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

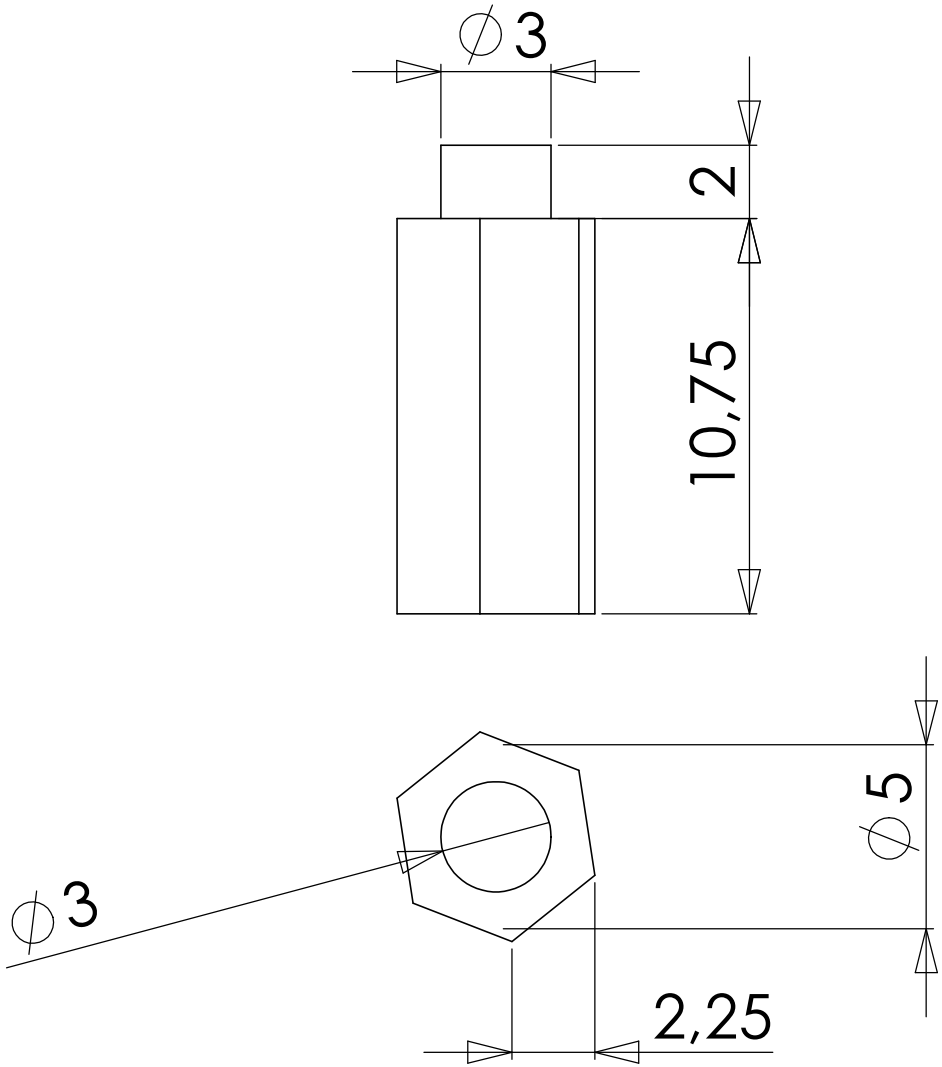
3moer

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

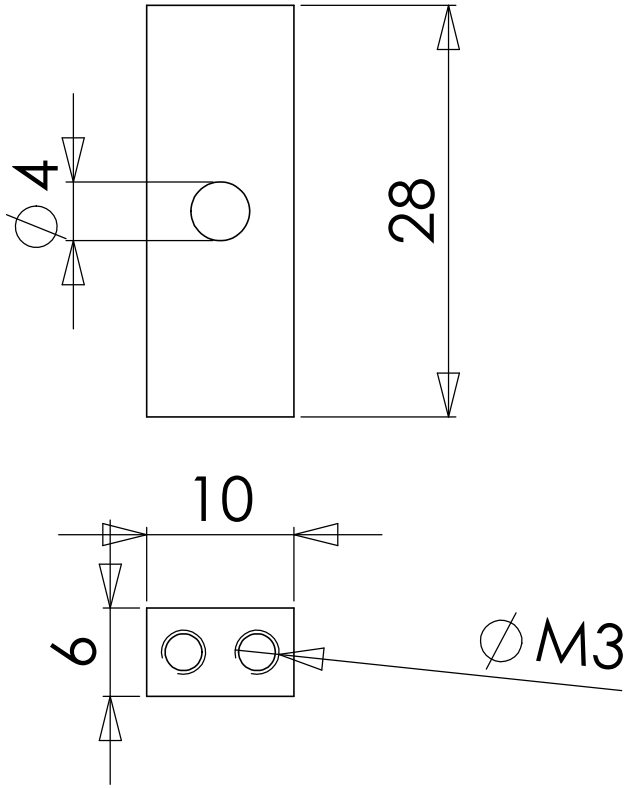
3moer 2

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SIZE A	DWG. NO.	REV.
SCALE:5:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

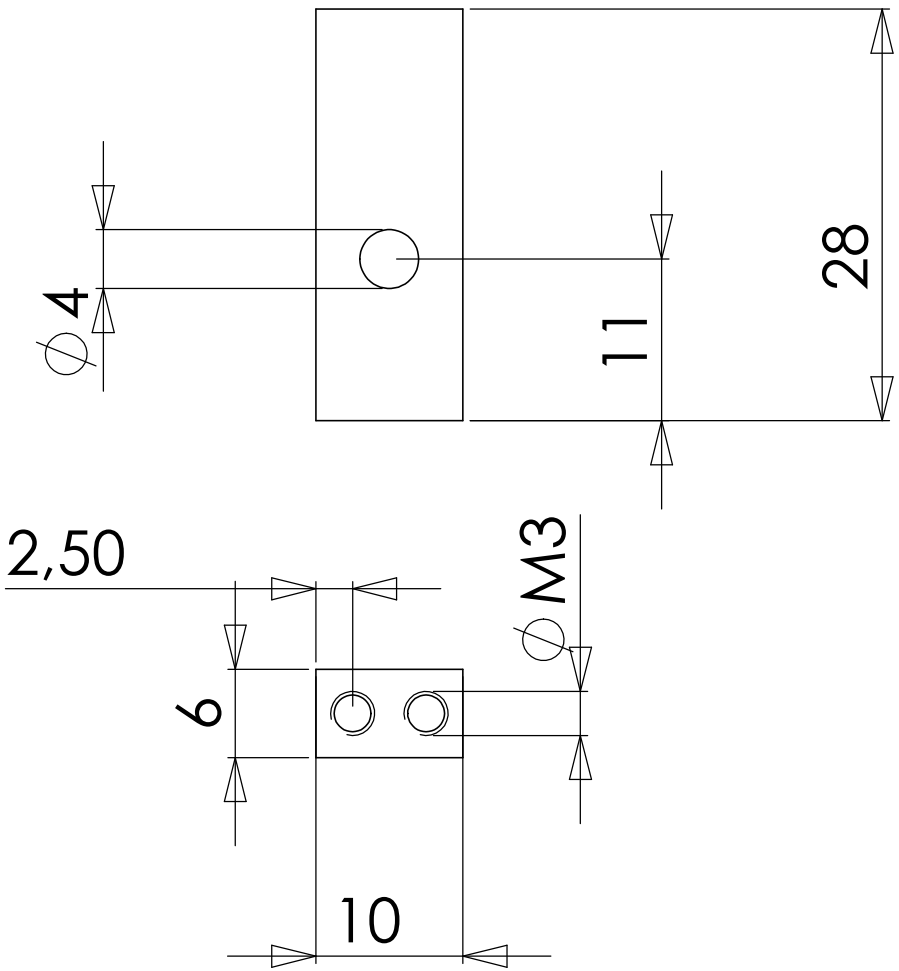
3ondersluiting-vertigeleiding

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

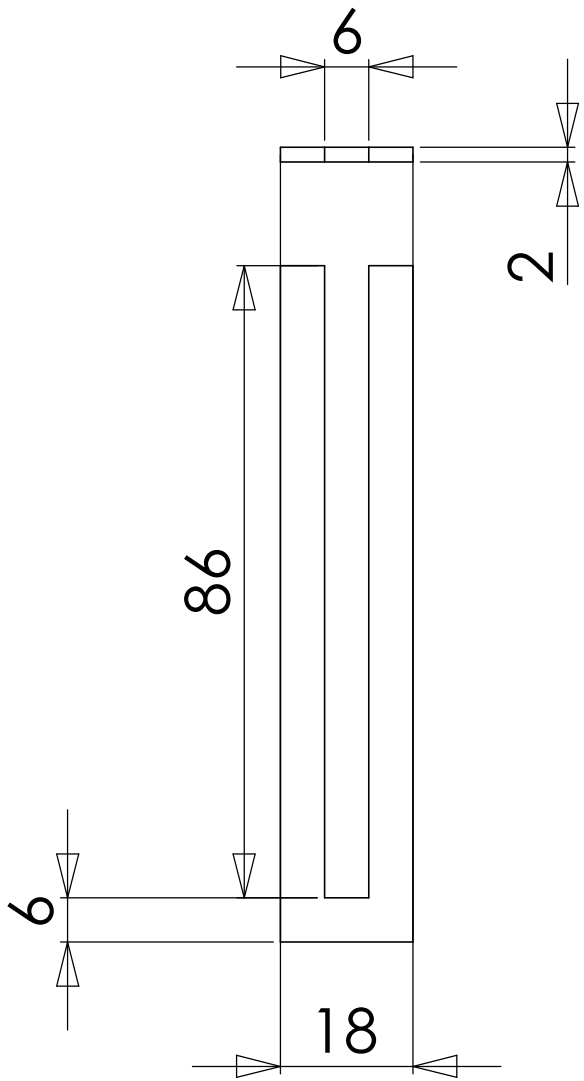
3ondersluiting-vertigeleidingdraaipunt

SIZE A	DWG. NO.	REV.
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

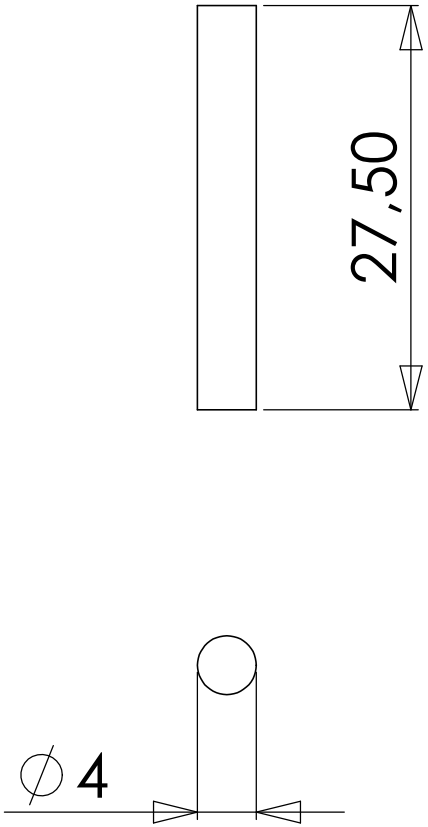
3overbrengingkabel-veer

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL±
ANGULAR: MACH± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

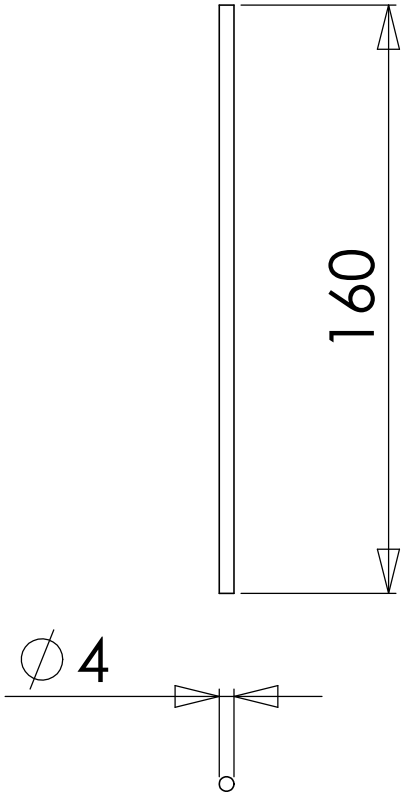
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

3pin

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

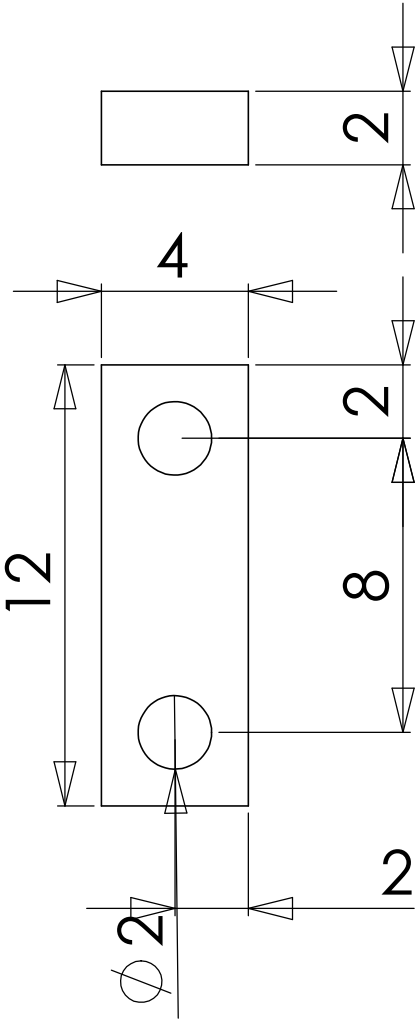
3schroefzonder

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:2	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL ± ANGULAR: MACH ± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

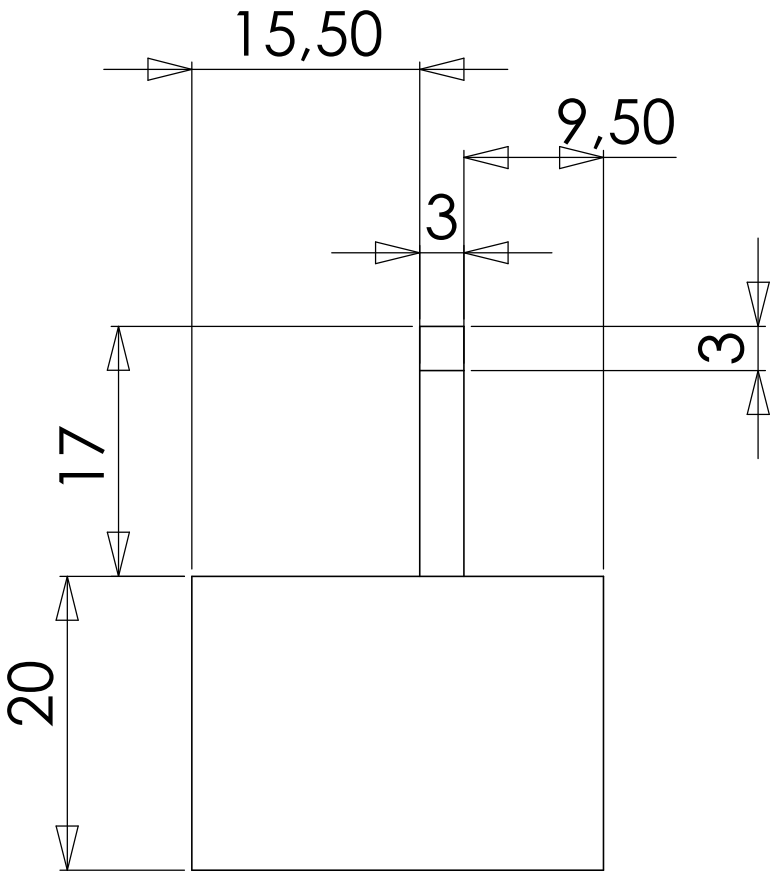
4mm rempoot

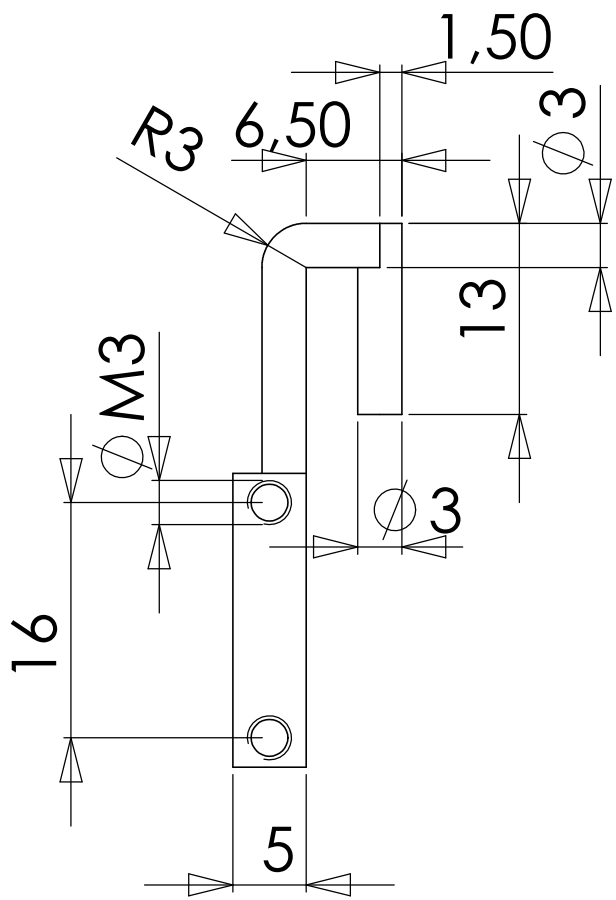
SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:5:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only





				NAME	DATE
		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±	DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

bevestiging geleiding

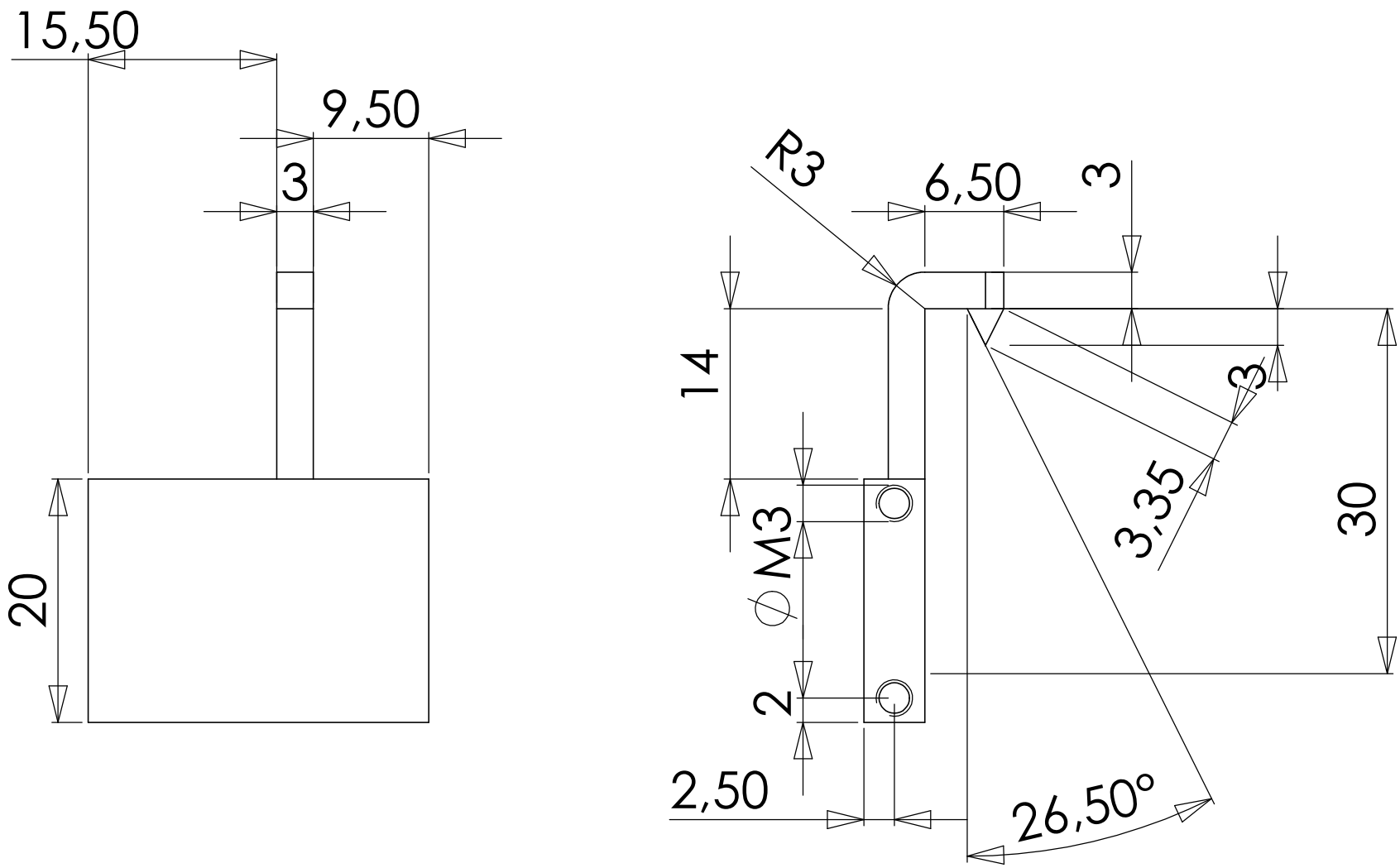
SIZE A | DWG. NO. | REV.

SCALE:1:1 | WEIGHT: | SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

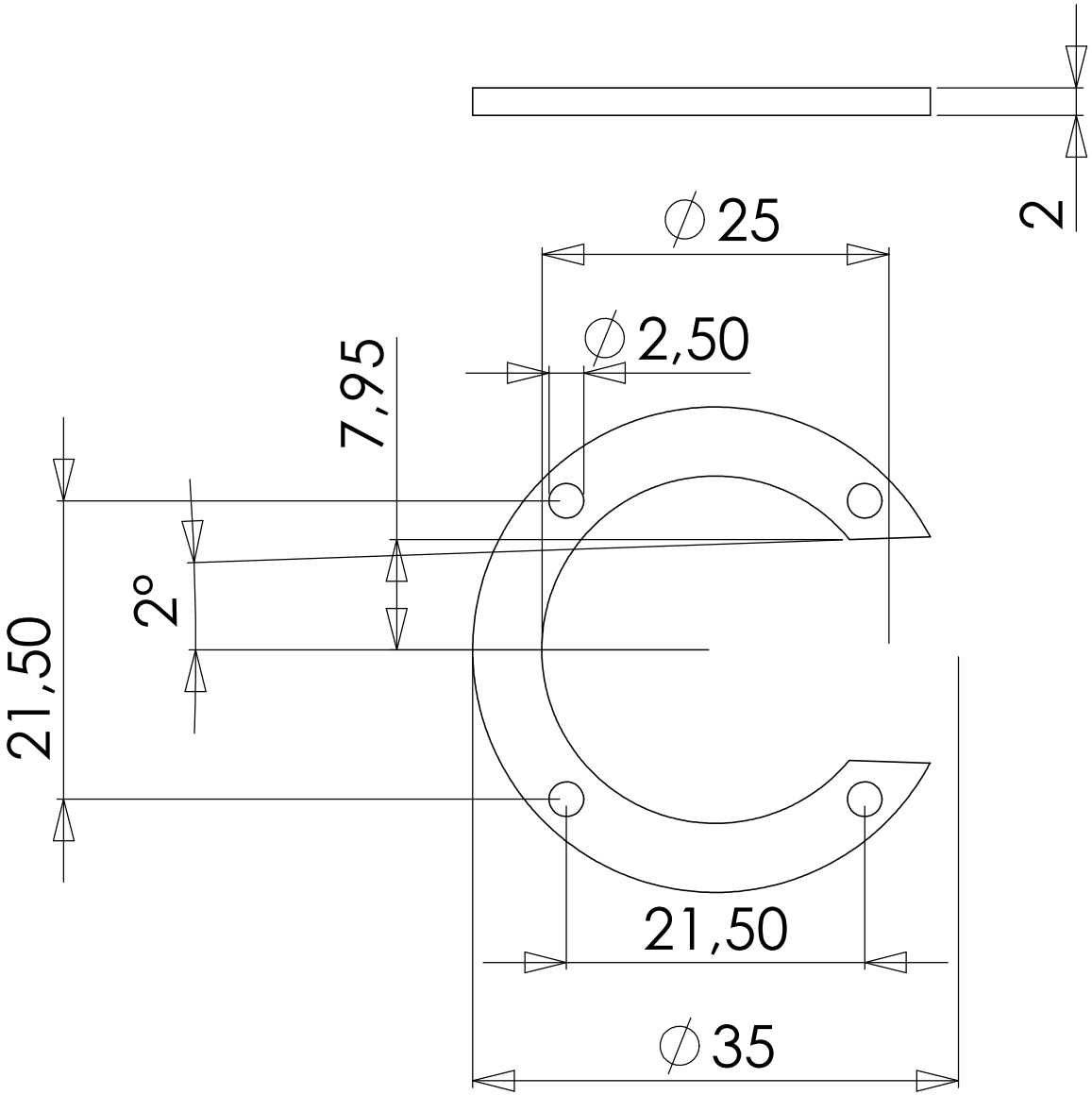
bevestiging geleidingschroef

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

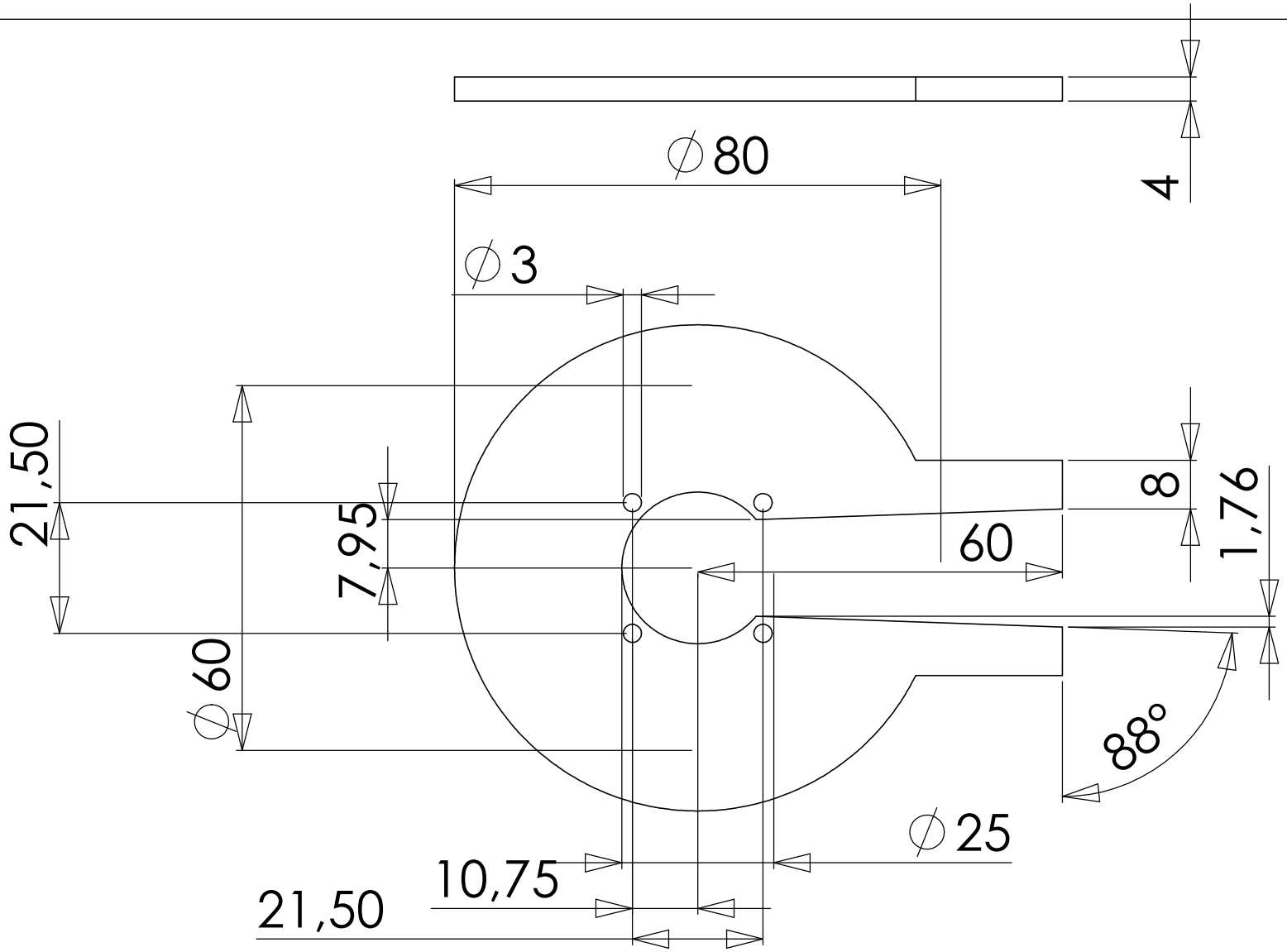
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

buitenschijfbinnen

SIZE A	DWG. NO.	REV.
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

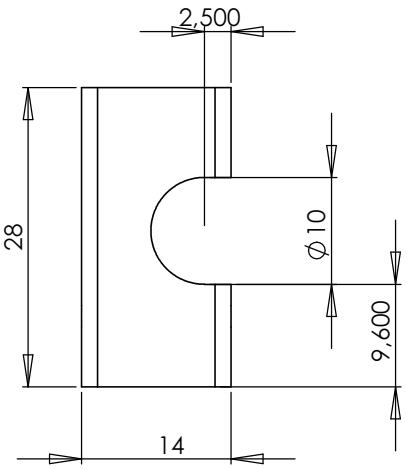
buitenschuifrem

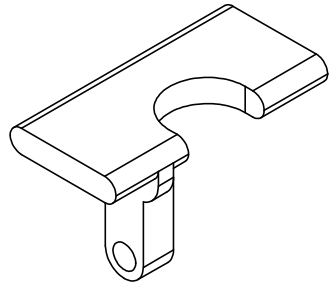
SIZE A	DWG. NO.	REV.
SCALE:1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

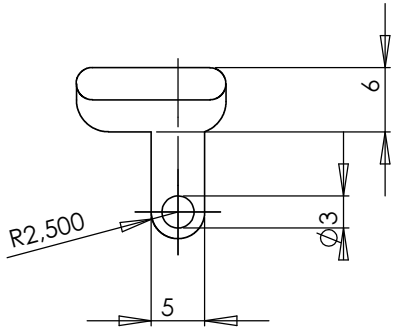
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

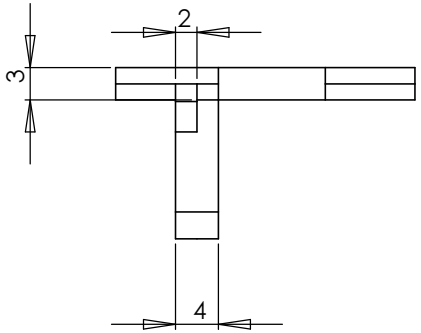
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only









UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING / REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:

MATERIAL:

WEIGHT:

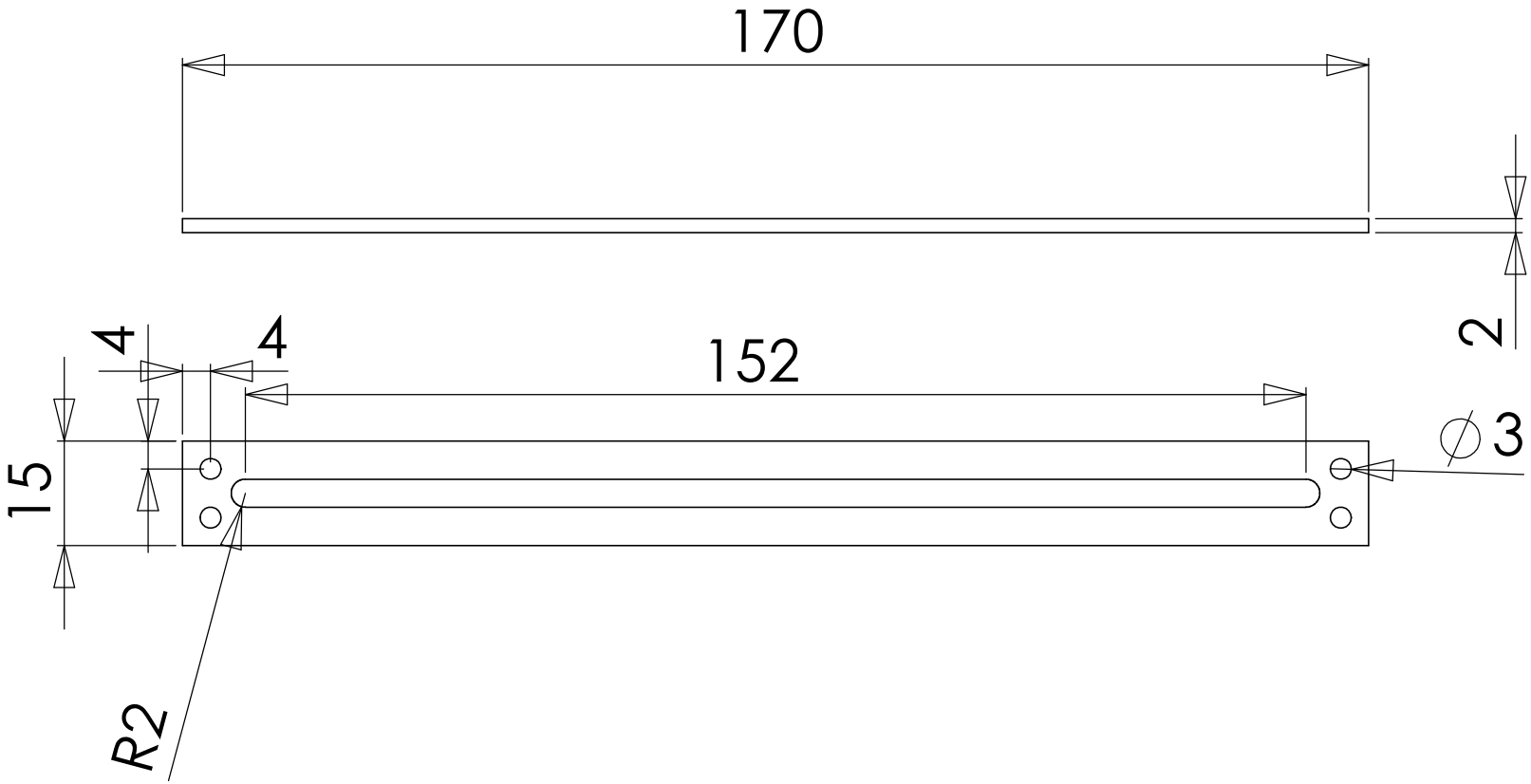
DWG NO. busbootje

A4

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL±
ANGULAR: MACH± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

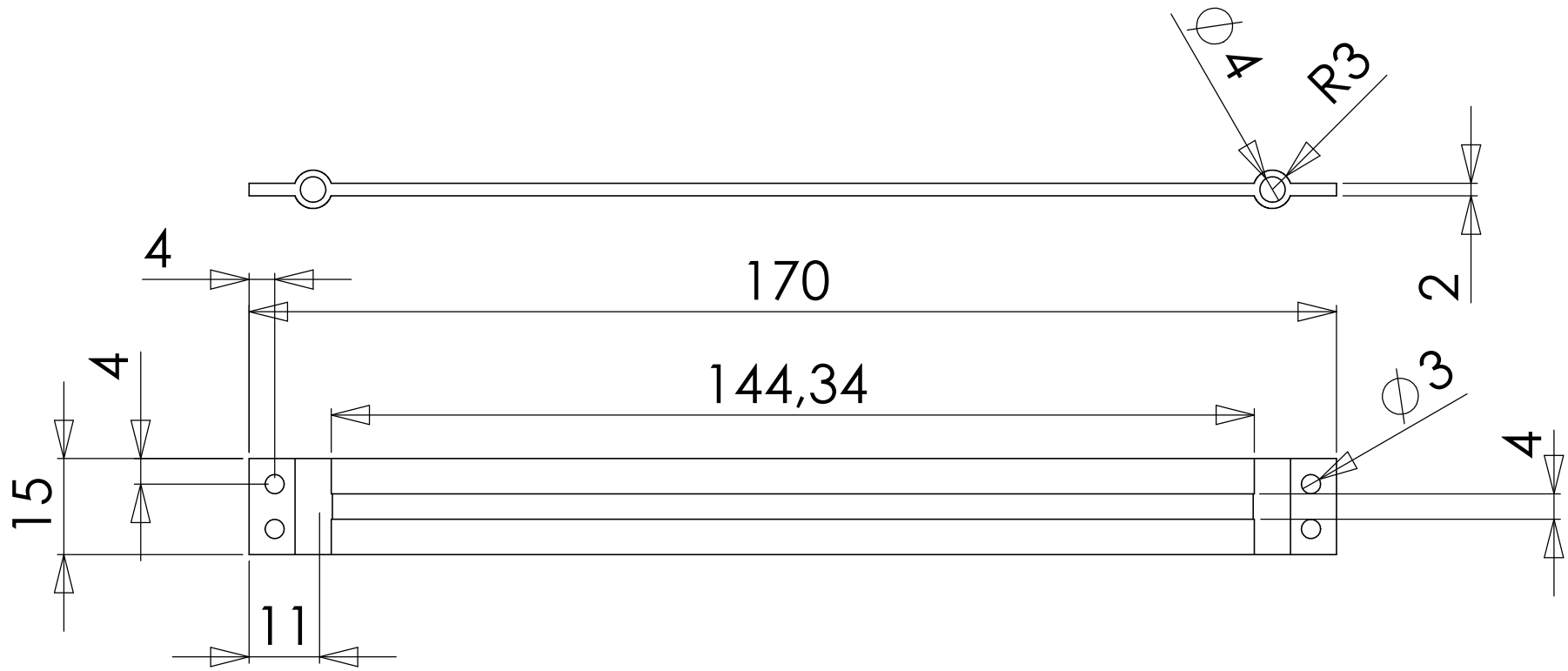
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

driedubbel geleiding

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:2	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

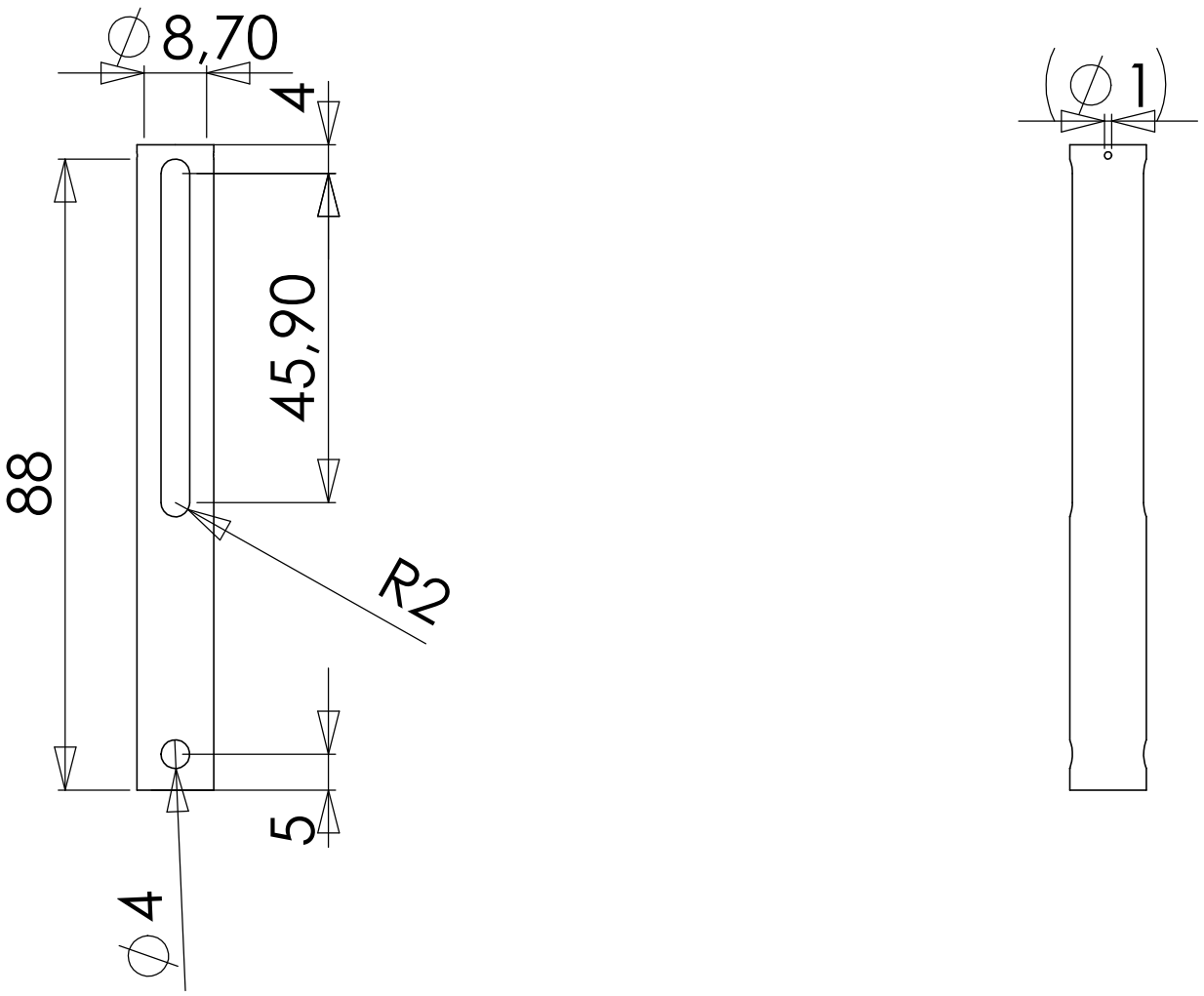
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

driedubbel geleiding met geleiding

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:2	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL±
ANGULAR: MACH± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

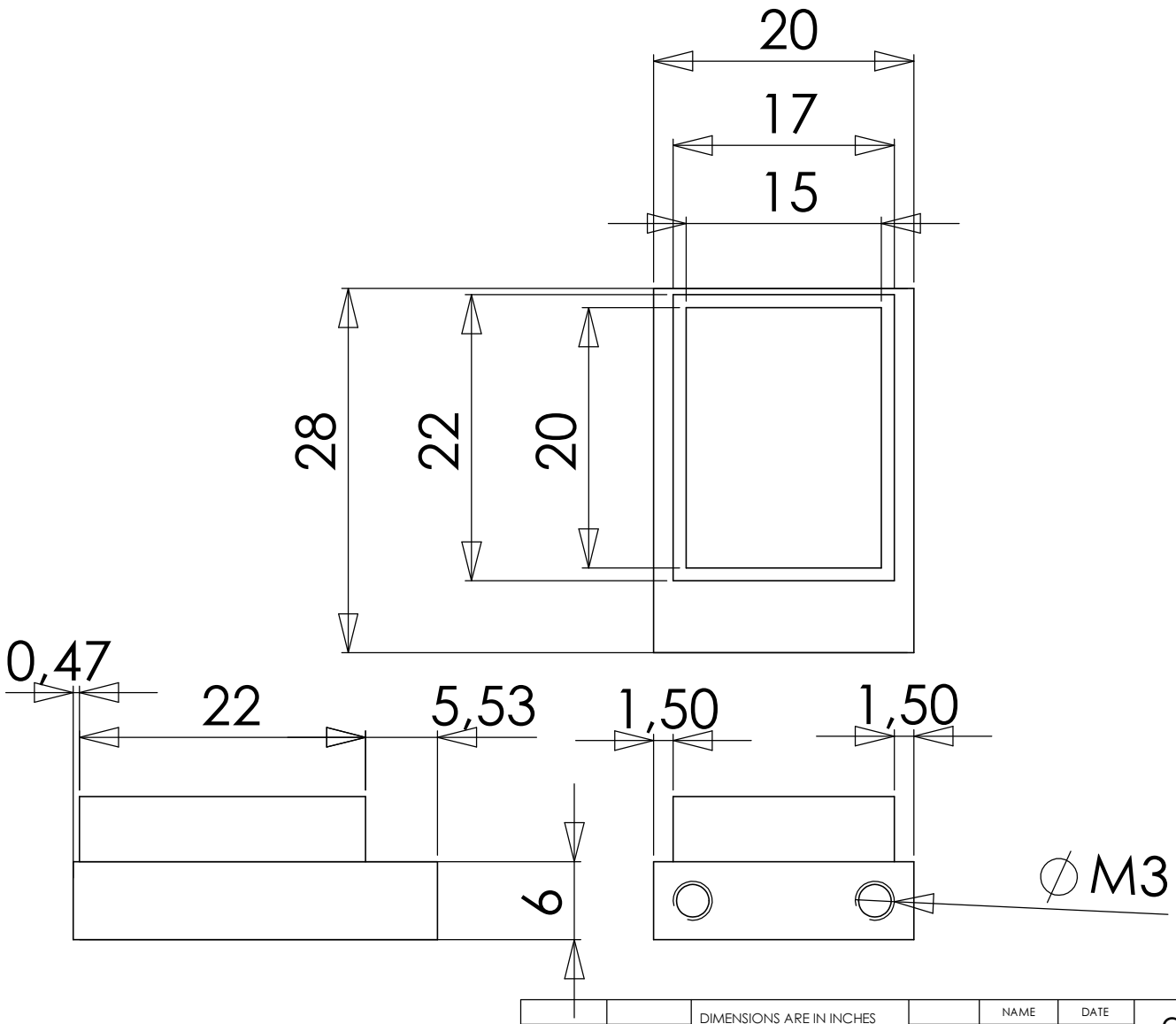
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

Drukverenbus

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

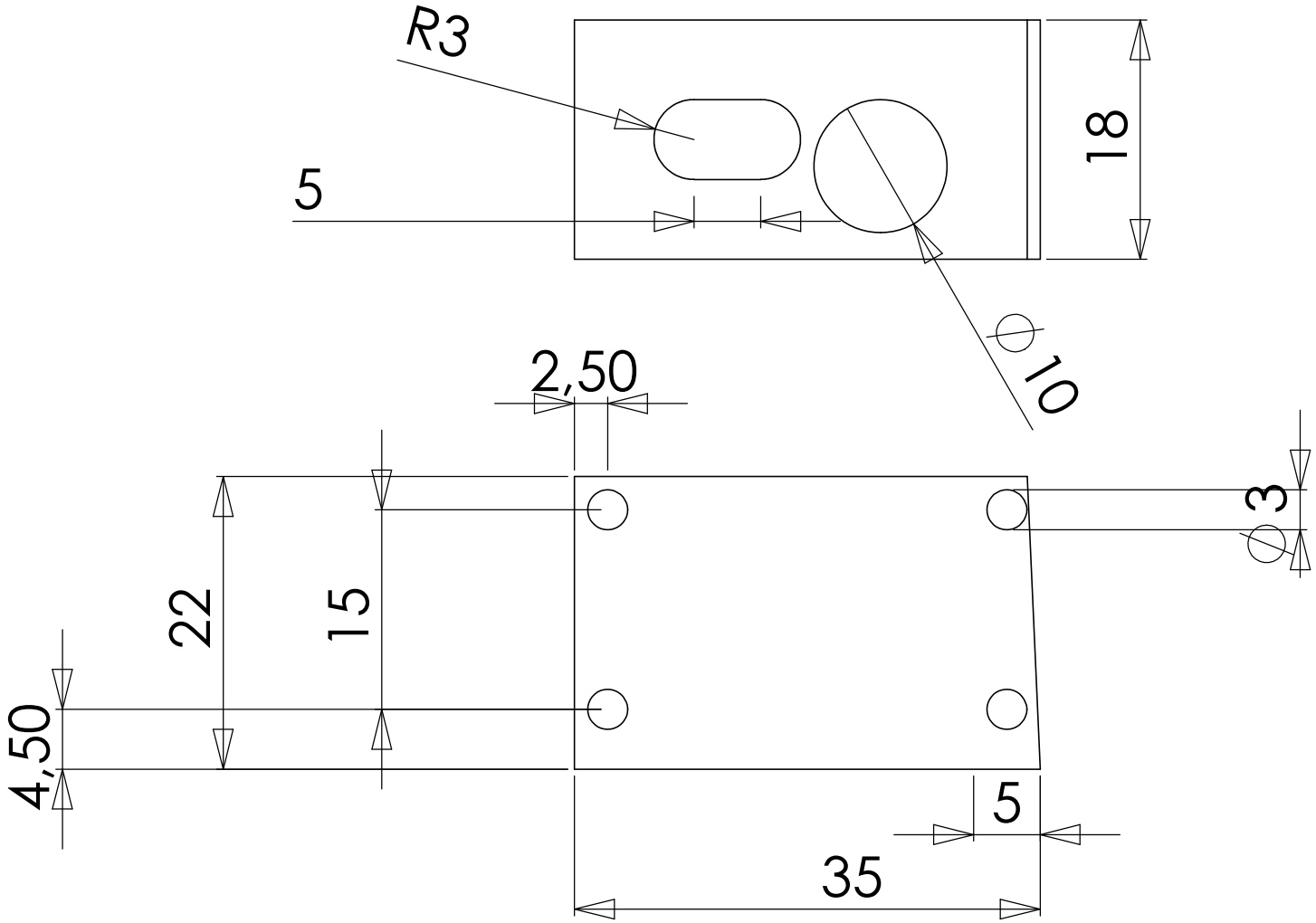
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

elektromotor houder

SIZE A	DWG. NO.	REV.
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

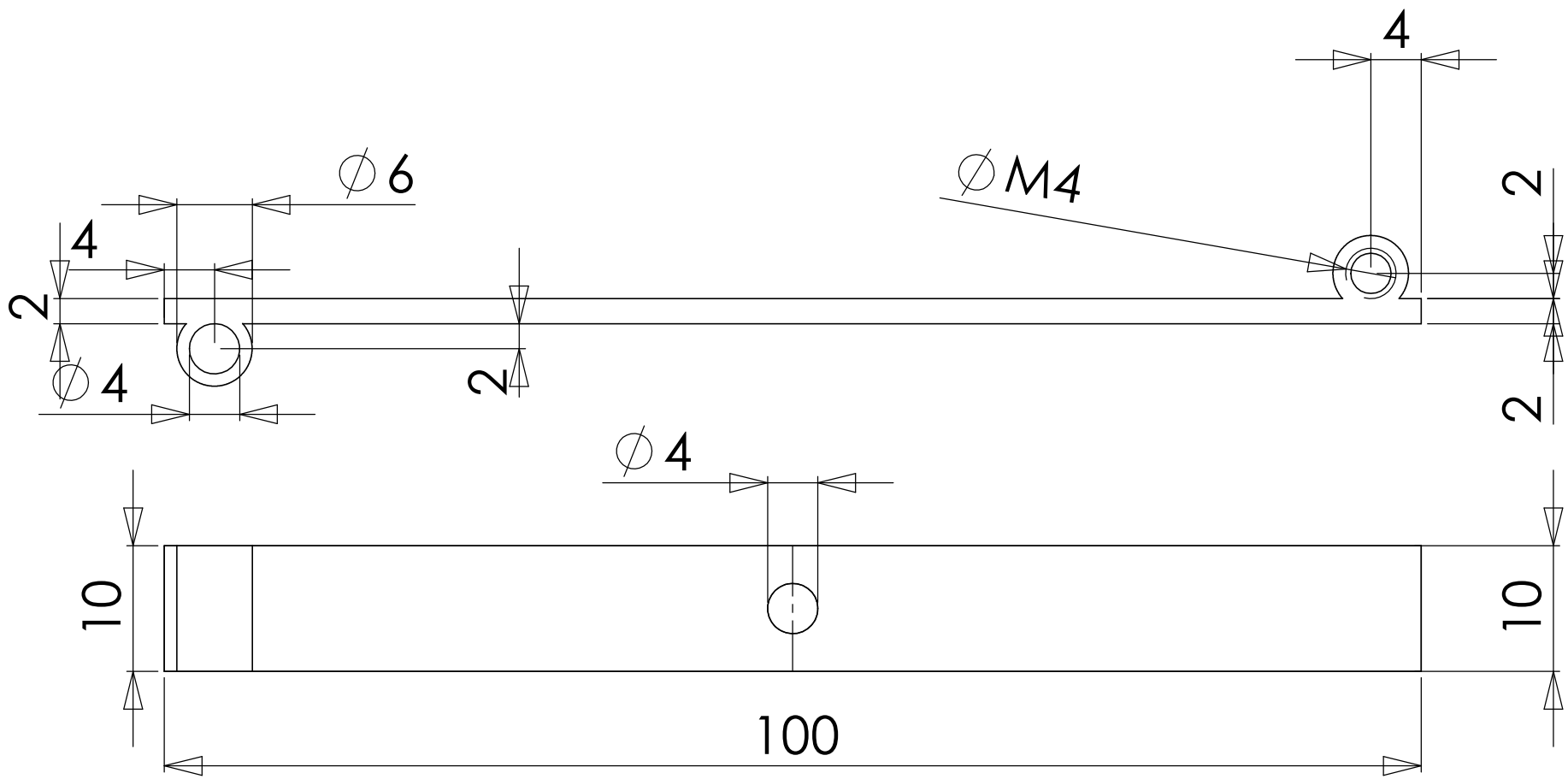
geleiding-blok-rem-pal eindontwerp

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL±
ANGULAR: MACH± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

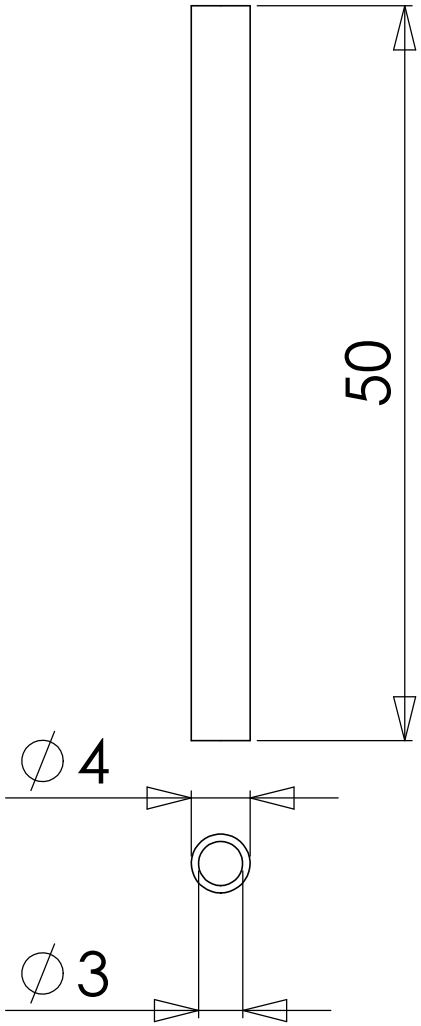
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

geleidingdraaias duwert

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

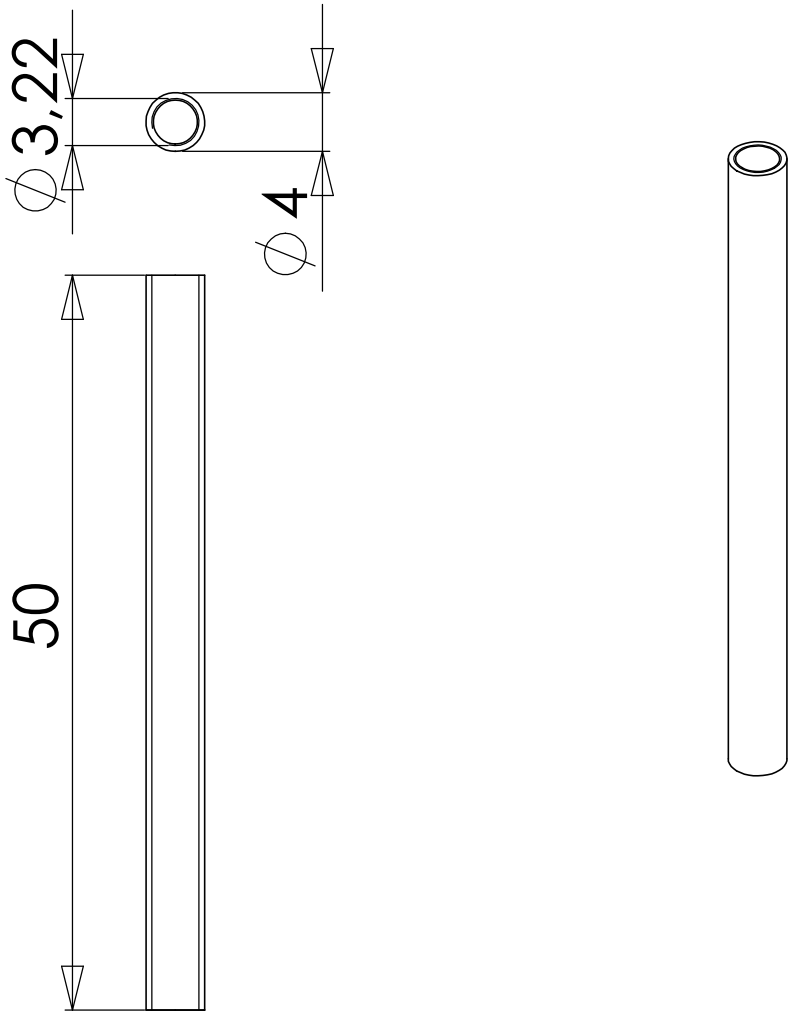
geleidingsdraaipunt

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

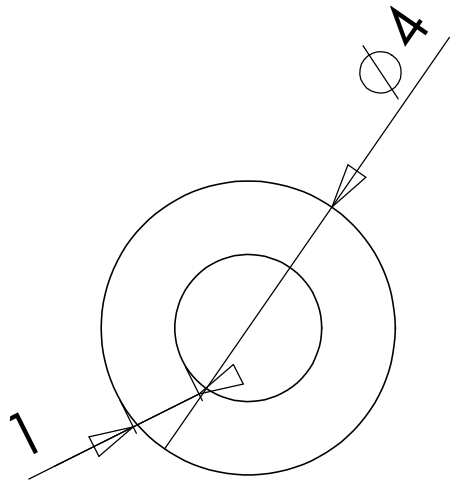
geleidingdraaipuntschroef

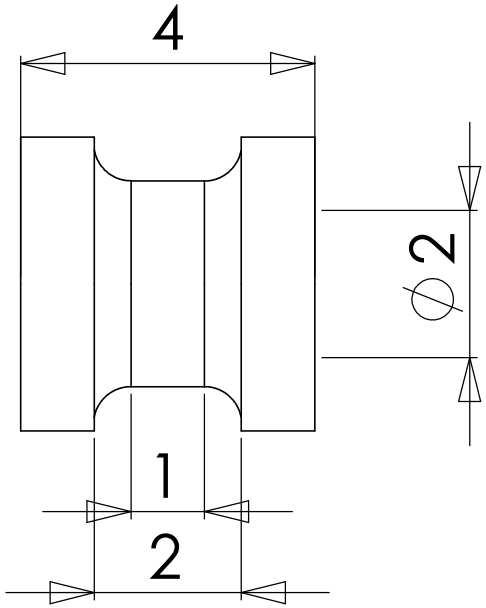
SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only





PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

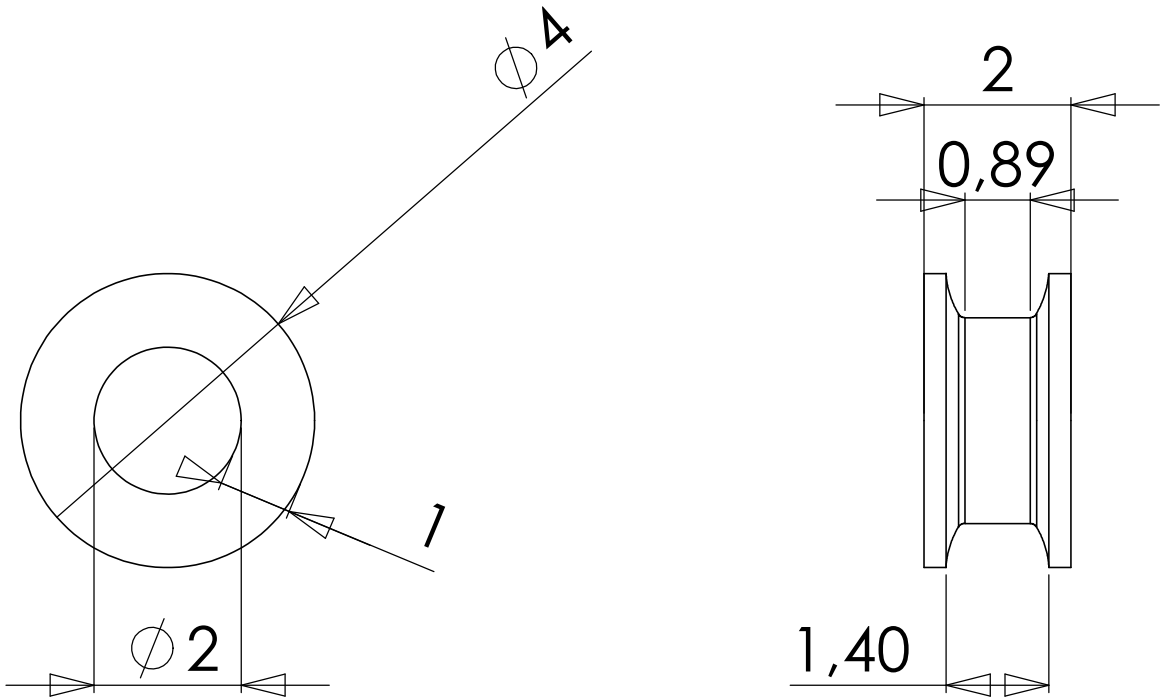
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

katrolwiel

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:10:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL±
ANGULAR: MACH± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

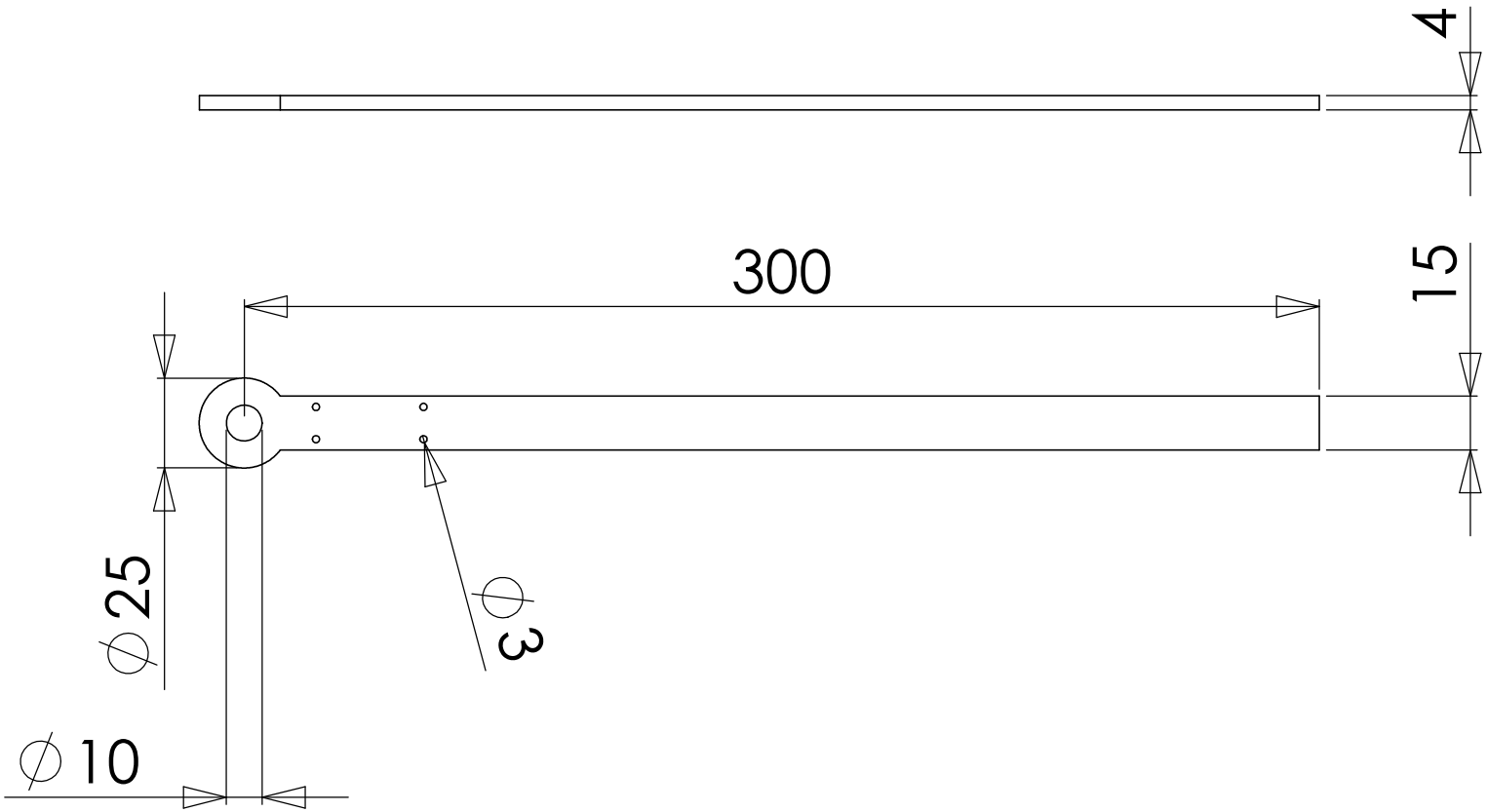
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

katrolwielonderarm

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:10:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

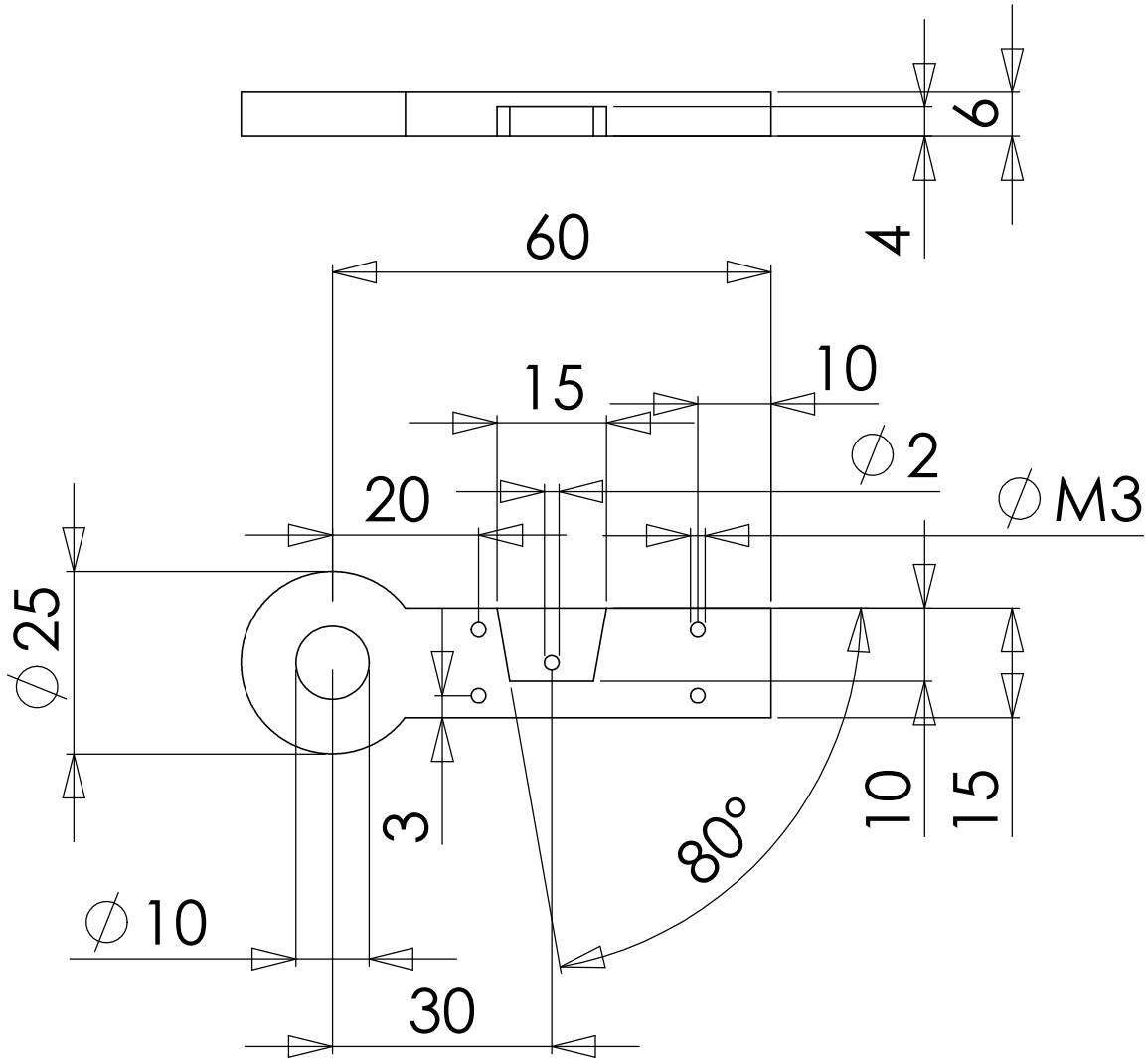
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

Onderarm Eind-ontwerp

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:5	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

Ònderarmverdikking Eind-ontwerp

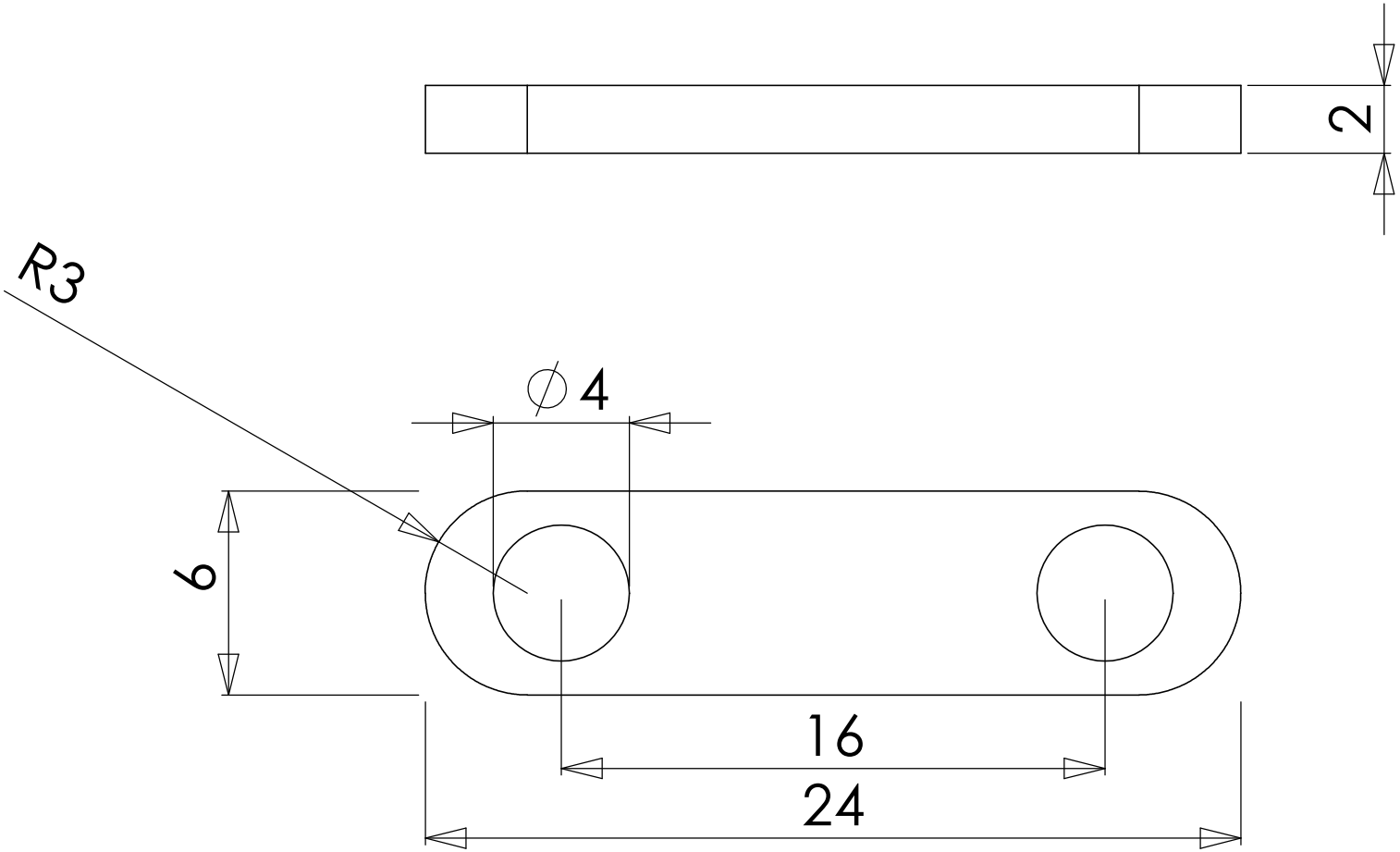
SIZE A | DWG. NO. | REV.

SCALE:1:1 | WEIGHT: | SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

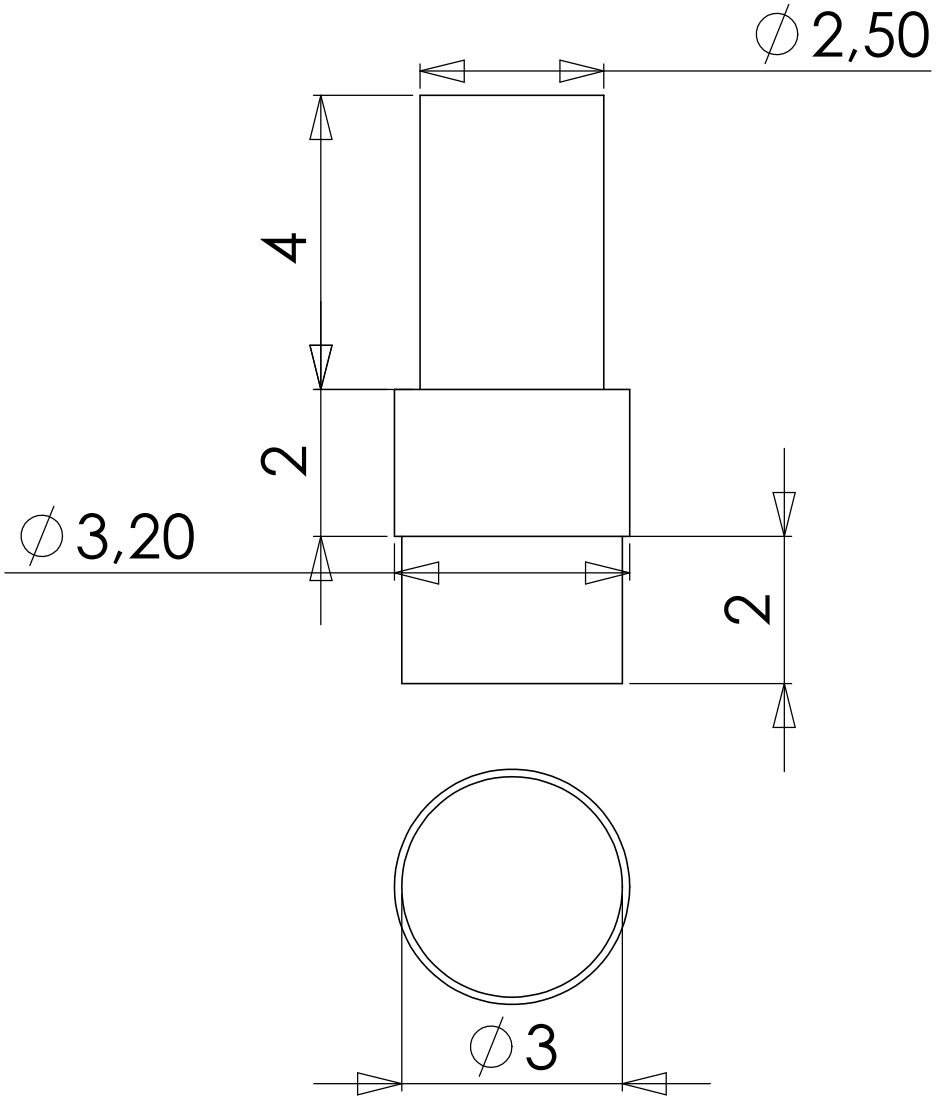
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

remlink

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:5:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

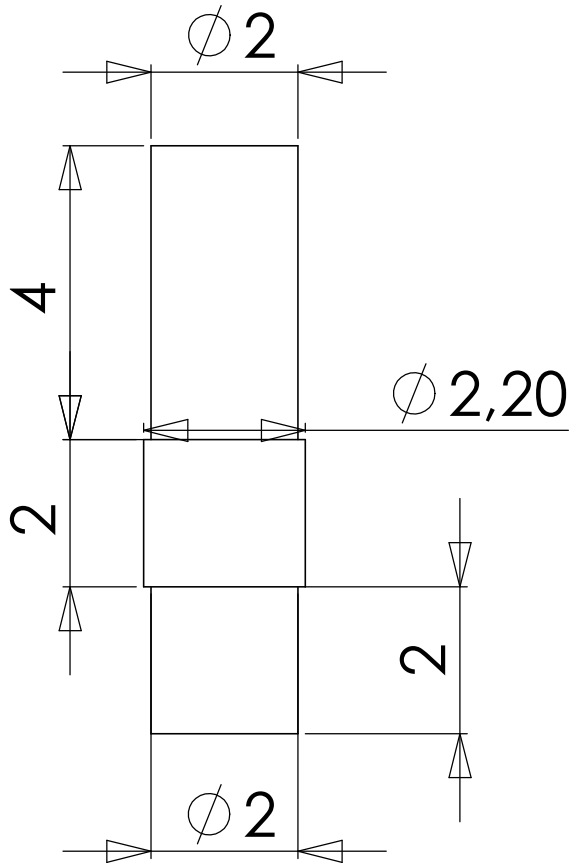
rempen1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:10:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL±
ANGULAR: MACH± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

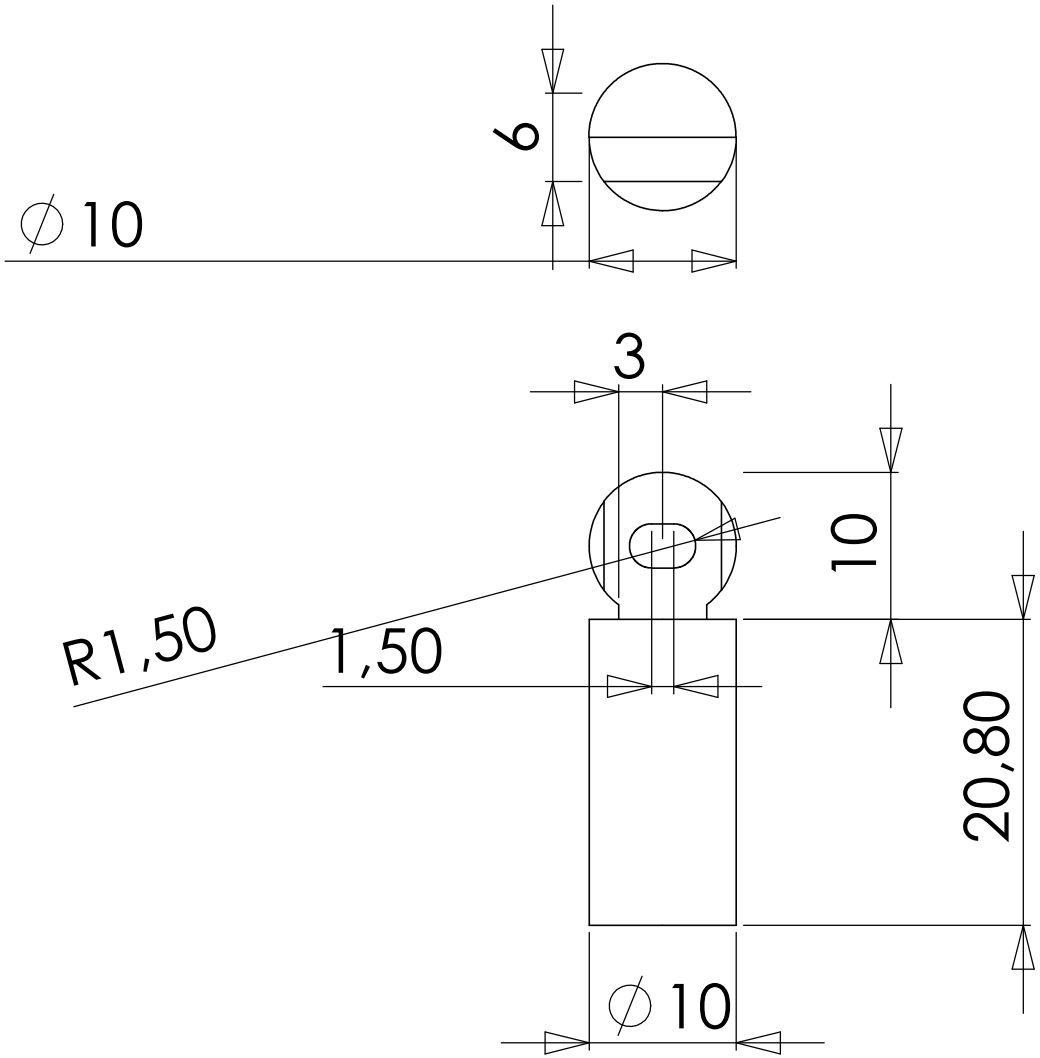
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

rempen2

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:10:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

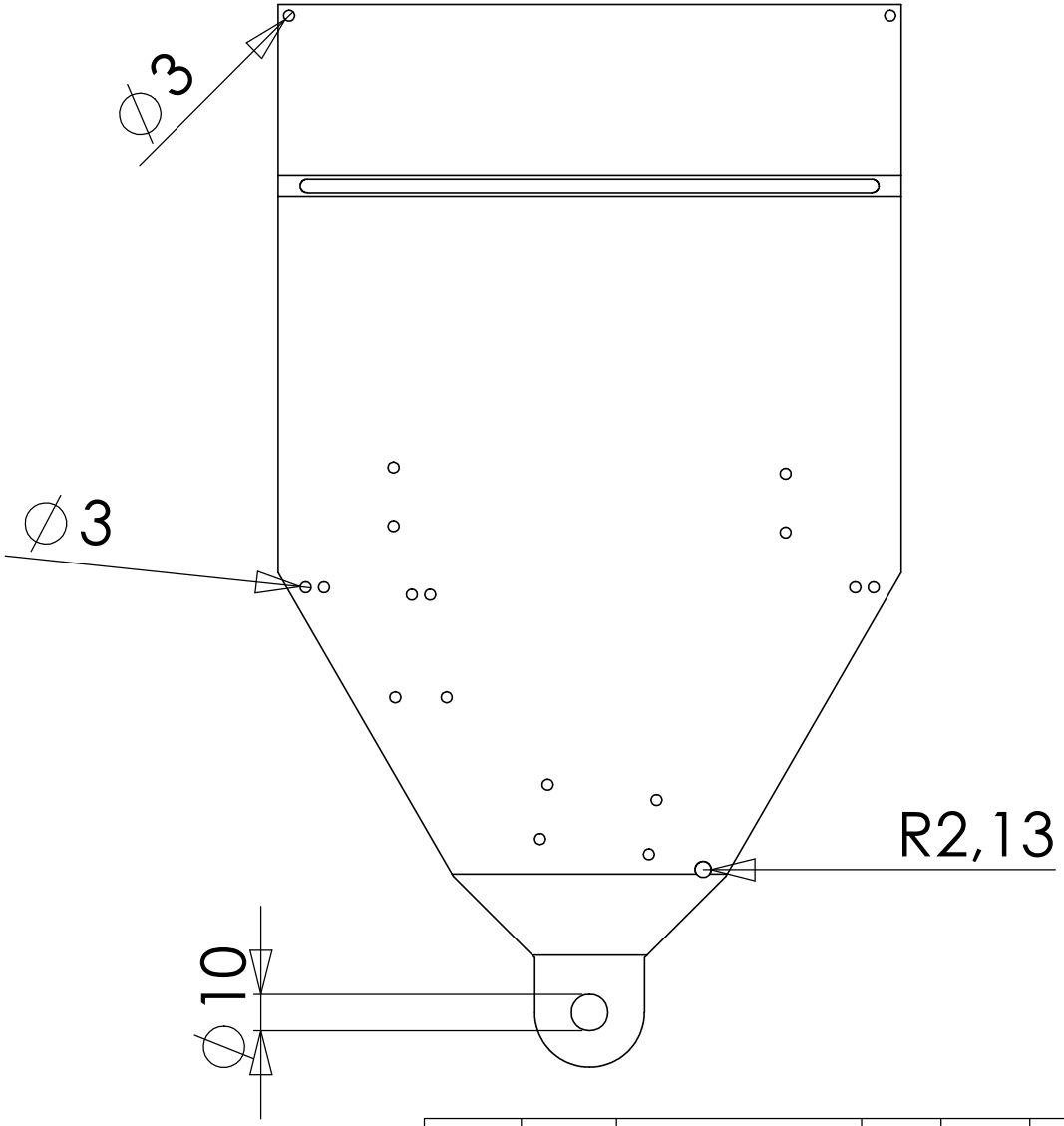
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

rempin eindontwerp

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

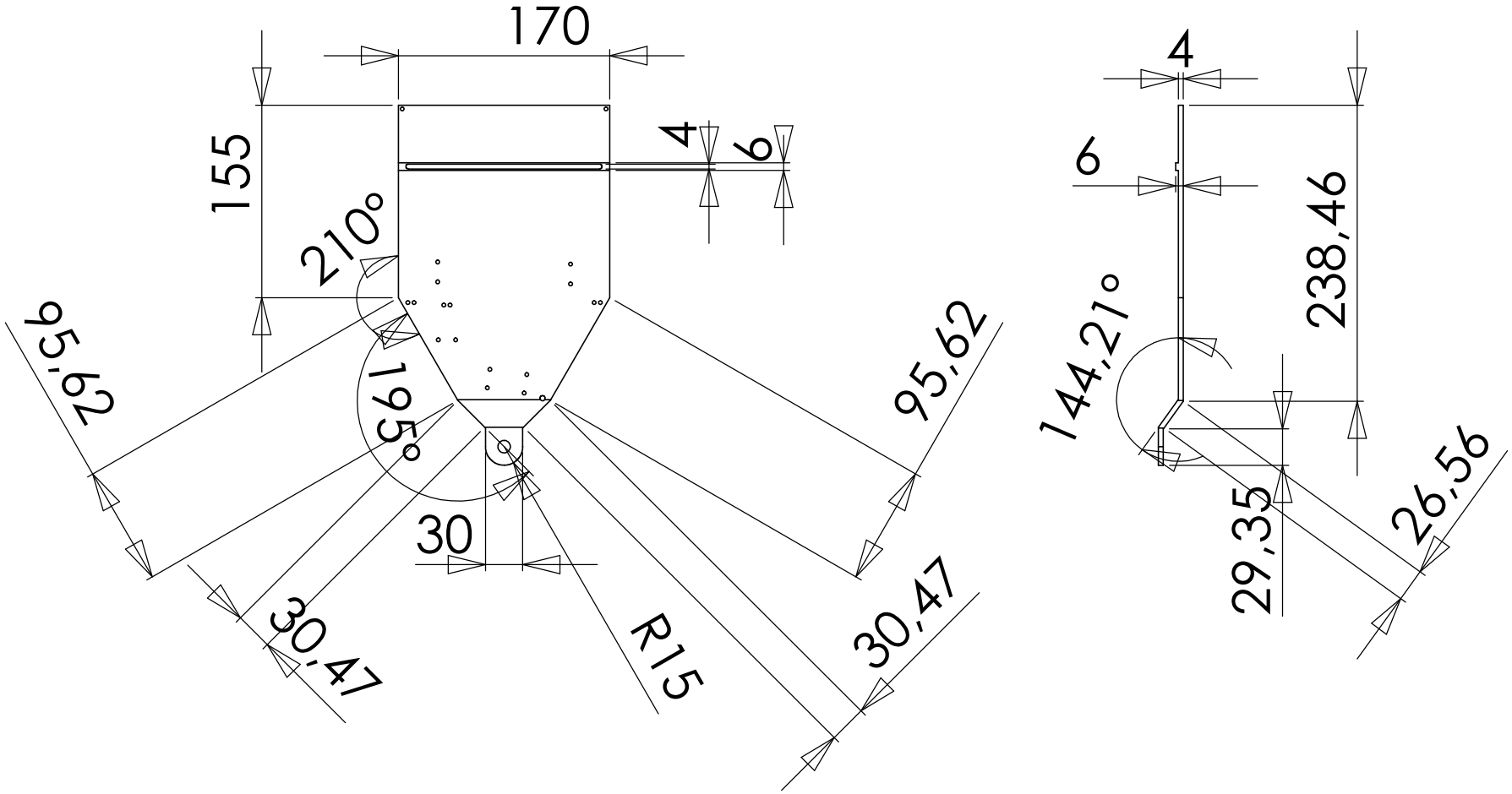
COMMENTS:

Sluitplaat hoek gaten

Alle niet gedefinieerde hoeken zijn 3mm

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:5	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

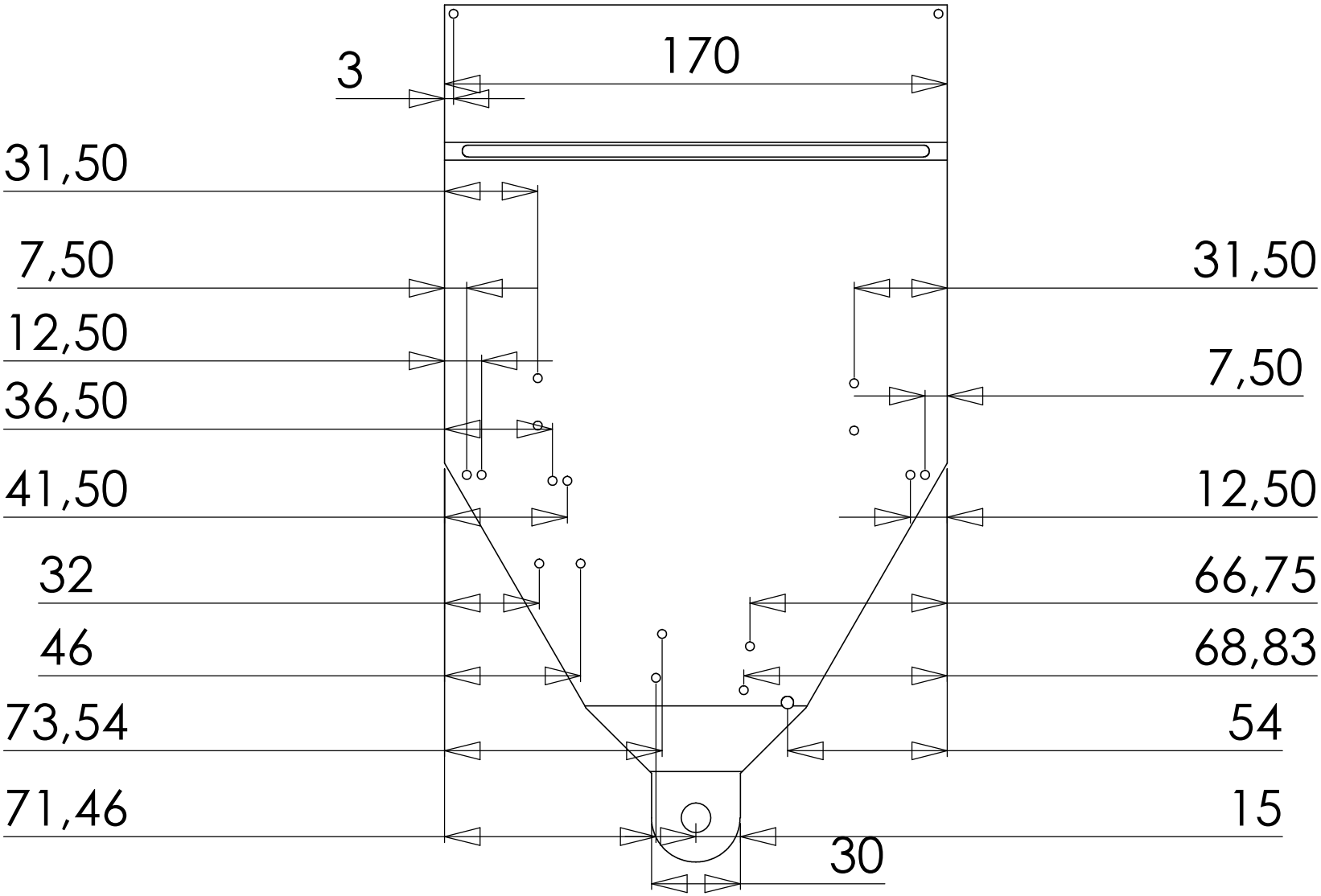
sluiplaat hoek hoofdmaten

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:5	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

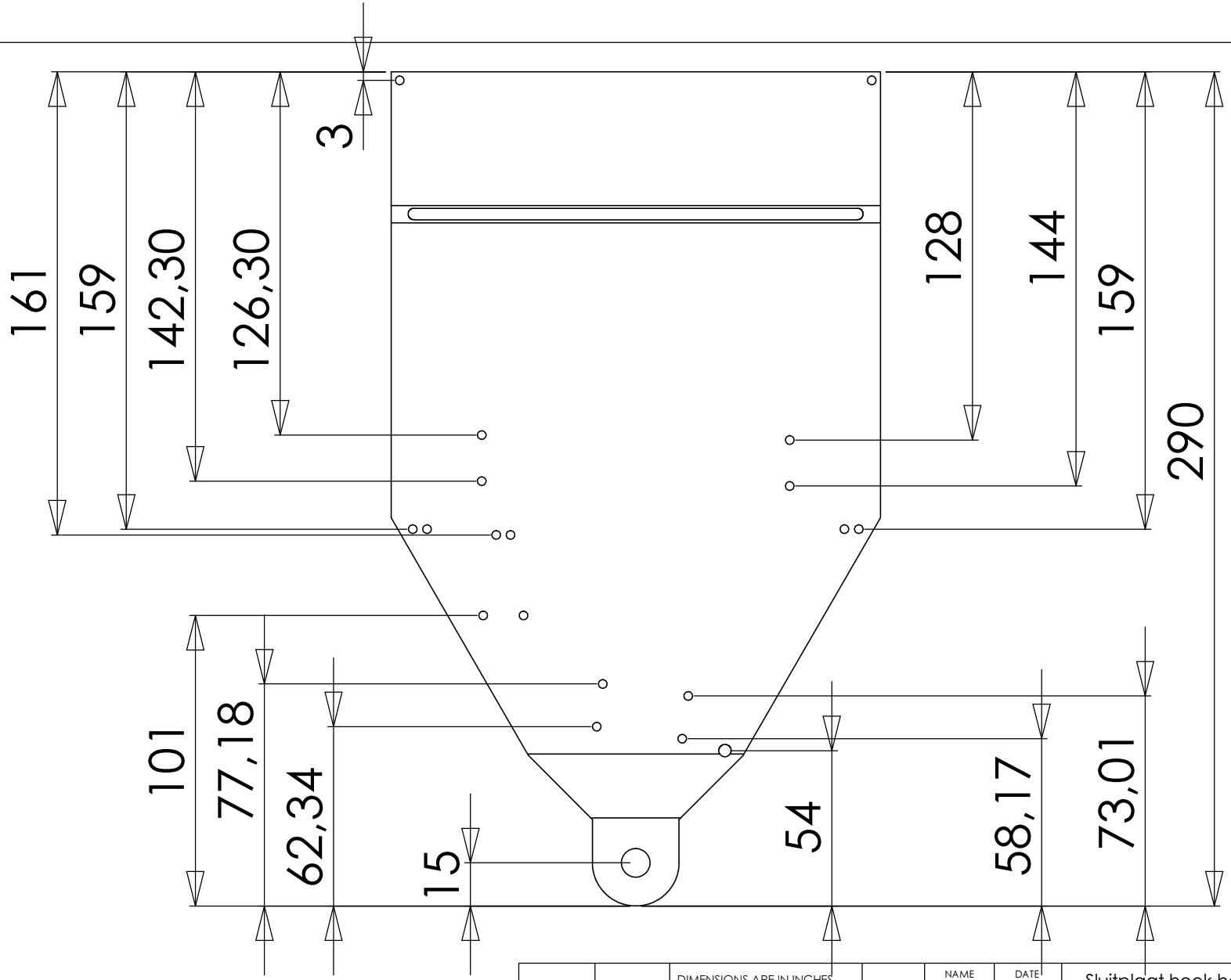
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

Sluitplaat hoek horizontaal

SIZE A	DWG. NO.	REV.
SCALE:1:5	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

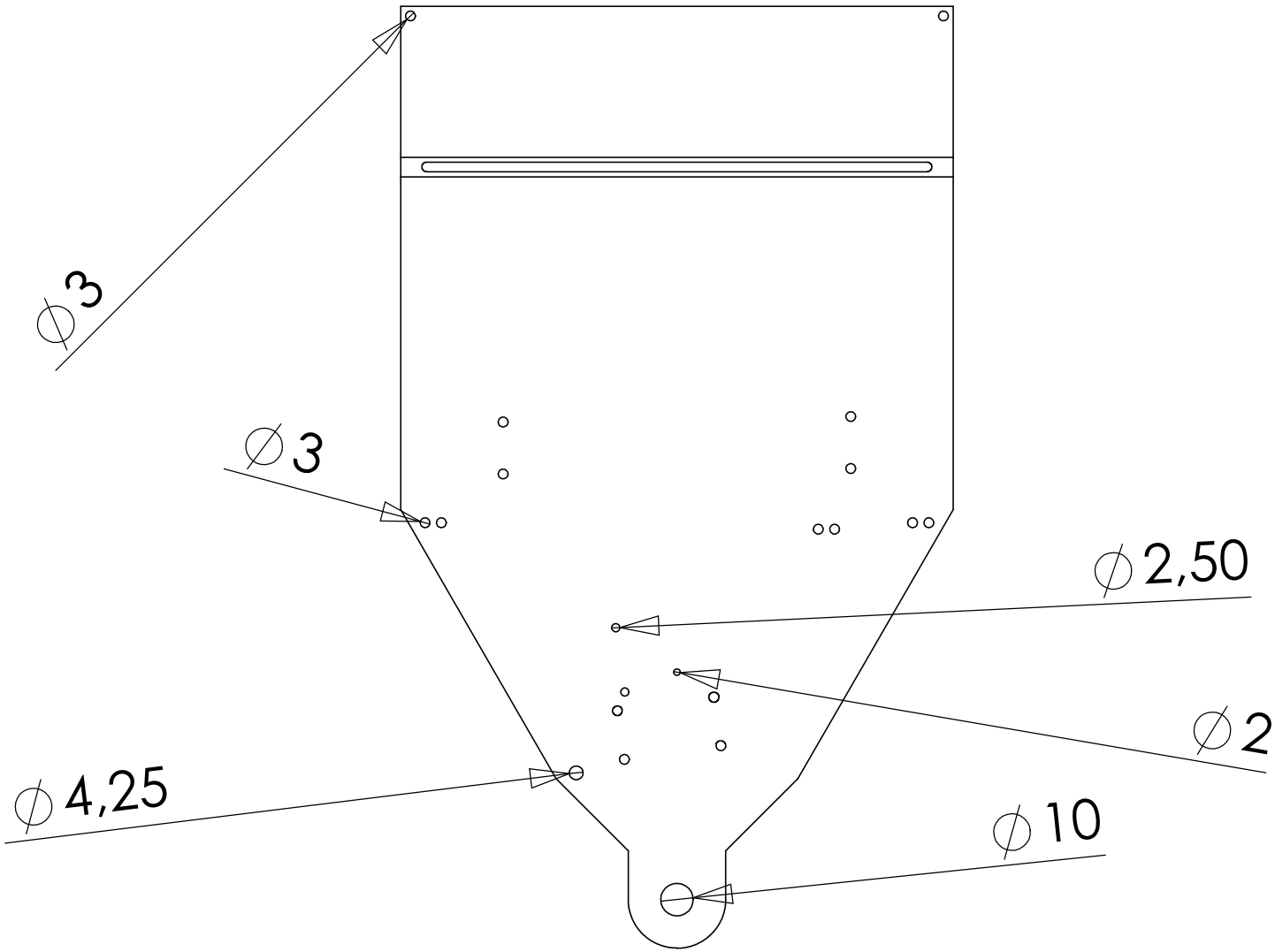
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

Sluitplaat hoek horizontale gaten

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:5	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

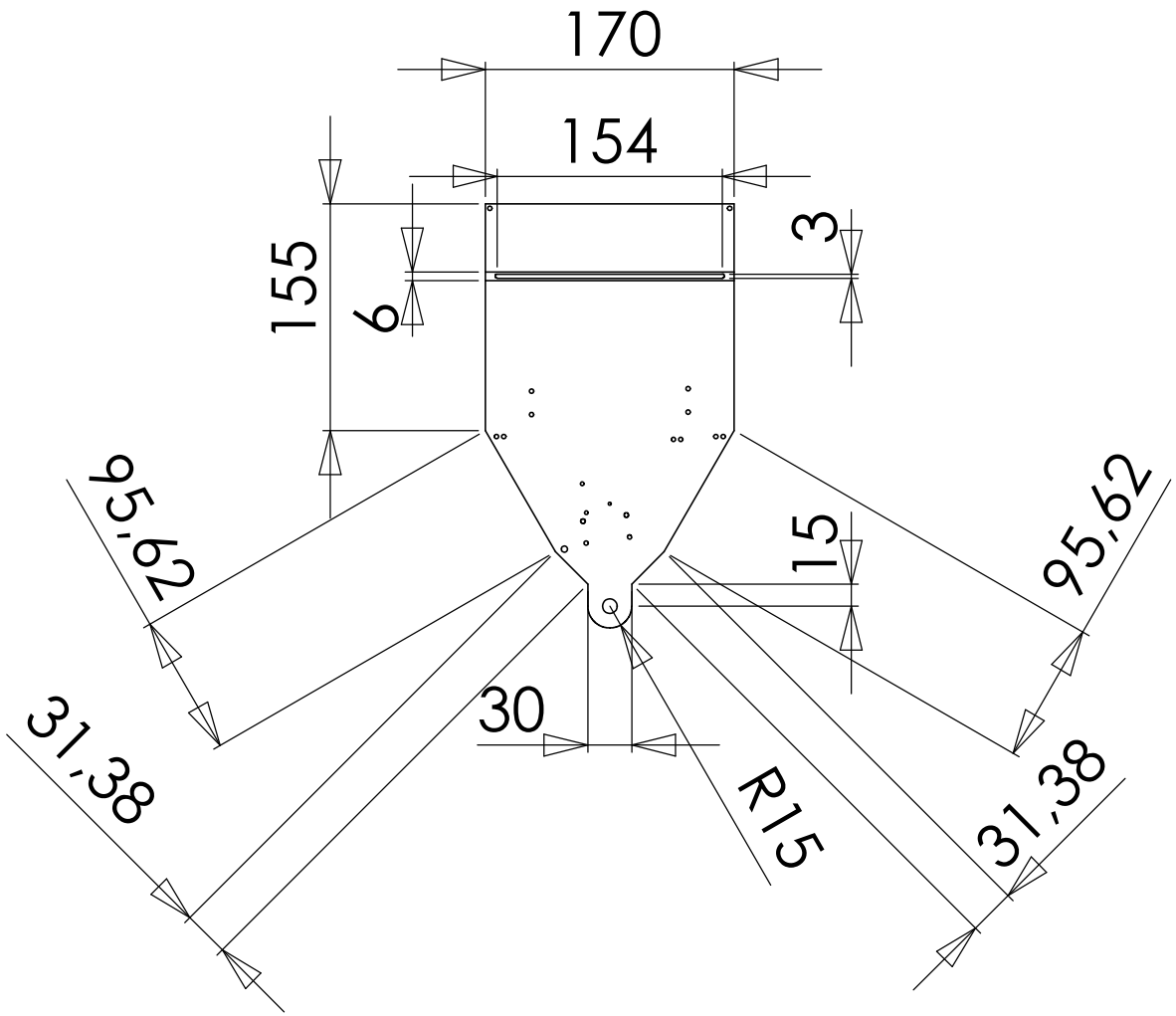
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

Sluitplaat recht gaten

Alle niet gedefinieerde maten hebben een diameter van 3

SIZE A	DWG. NO.	REV.
SCALE:1:5	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

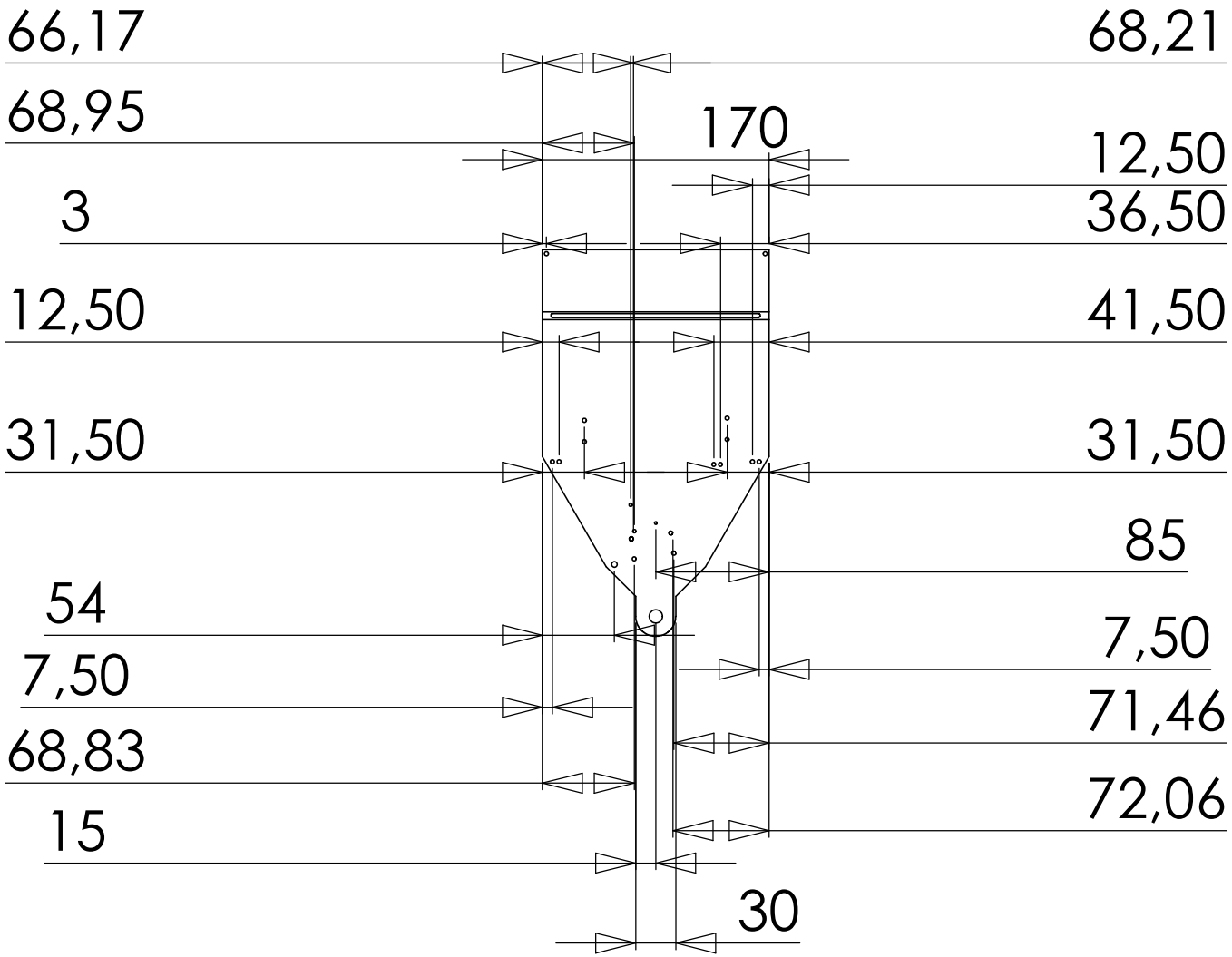
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

Sluitplaat recht hoofdmaten

SIZE A	DWG. NO.	REV.
SCALE:1:5	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME	DATE
			DRAWN		
			CHECKED		
			ENG APPR.		
			MFG APPR.		
		MATERIAL --	Q.A.		
			COMMENTS:		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH --			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			

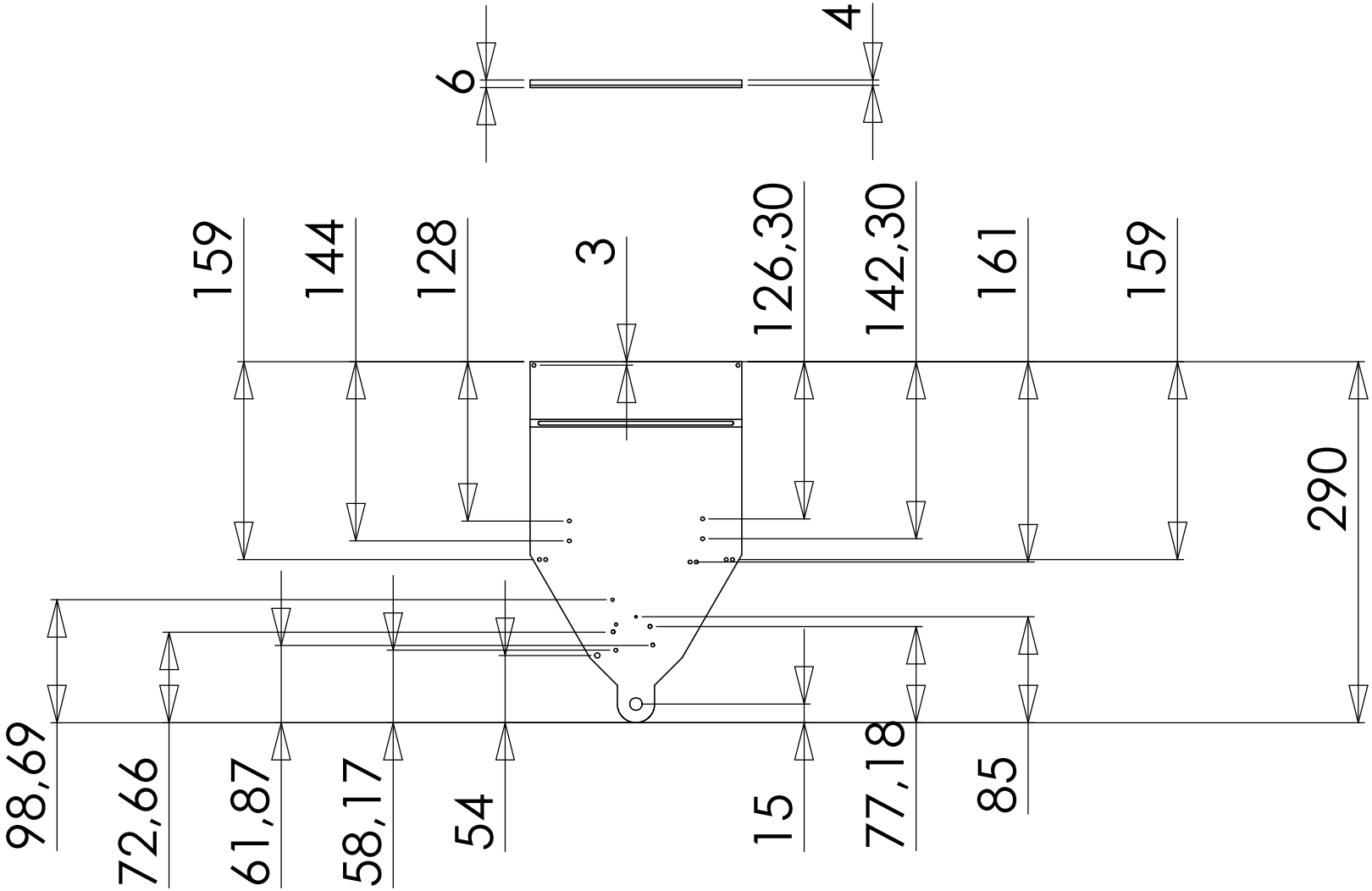
Sluitplaat recht horizontale afstand

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:5	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

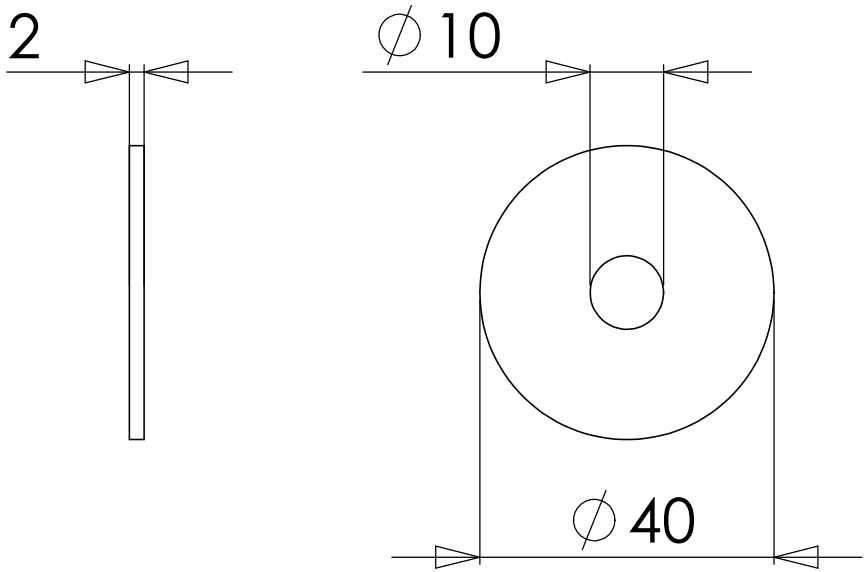
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

Sluitplaat recht verticale afstand

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:5	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL±
ANGULAR: MACH± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

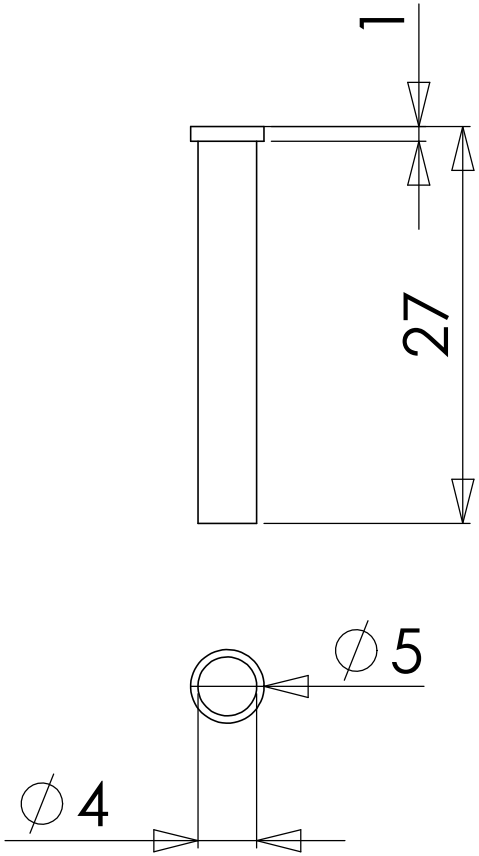
	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

spacerring

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY	USED ON
APPLICATION	

DIMENSIONS ARE IN INCHES
TOLERANCES:
FRACTIONAL±
ANGULAR: MACH± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

MATERIAL --

FINISH --

DO NOT SCALE DRAWING

	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		

COMMENTS:

verenpen

SIZE	DWG. NO.	REV.
A		
SCALE:2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SolidWorks Student License
Academic Use Only