

Afstudeerscriptie Ontwerpproject: Systeem ter optimalisatie individuele afstelling Pronto kantelrolstoel

In kaart brengen van noodzakelijke frameparameters per persoon, zodat de volledige verkantelingsrange schokloos bereikt wordt en de situatie immer stabiel en comfortabel is

<i>Auteur:</i>	Rosanne Liselore van Dolderen
<i>Studentnummer:</i>	09051252
<i>Opleiding:</i>	Mens en Techniek - Bewegingstechnologie
<i>Onderwijsinstelling:</i>	Haagse Hogeschool Den Haag
<i>Datum afgifte:</i>	14/06/2016

Afstudeerscriptie Ontwerpproject: Systeem ter optimalisatie individuele afstelling Pronto kantelrolstoel

In kaart brengen van noodzakelijke frameparameters per persoon, zodat de volledige verkantelingsrange schokloos bereikt wordt en de situatie immer stabiel en comfortabel is



<i>Auteur:</i>	Rosanne Liselore van Dolderen
<i>Studentnummer:</i>	09051252
<i>Opleiding:</i>	Mens en Techniek - Bewegingstechnologie
<i>Onderwijsinstelling:</i>	Haagse Hogeschool Den Haag
<i>Datum afgifte:</i>	14/06/2016
<i>Eerste begeleider BT:</i>	Chris Riezebos
<i>Tweede begeleider BT:</i>	Herre Faber
<i>Opdrachtgever:</i>	Frank Muis
<i>Instelling:</i>	Exello Revalidatietechniek Cothen

Voorwoord

Deze scriptie is geschreven door Rosanne van Dolderen, 4^e-jaars student aan de opleiding Bewegingstechnologie in Den Haag.

Het project heeft plaatsgevonden naar aanleiding van mijn afstudeerfase, welke is uitgevoerd in opdracht van Exello Revalidatietechniek in Cothen.

Dit project was interessant voor mij omdat het de mogelijkheid heeft geboden om de opgedane kennis en ervaring uit de opleiding toe te passen in de praktijk en zodoende mee te werken in het realiseren van individueel op maat gemaakte Pronto kantelrolstoelen, zodat de noodzakelijke verkantelingsrange schokloos kan verlopen en de situatie te allen tijde comfortabel en stabiel is.

Allereerst wil ik Frank Muis van Exello bedanken voor het mede mogelijk maken van dit interessante project en het geven van bruikbare feedback gedurende de periode. Ook wil ik Chris Riezebos van de Haagse Hogeschool bedanken voor de goede, frequente en motiverende begeleiding gedurende de gehele afstudeerperiode en tot slot wil ik Herre Faber bedanken voor het geven van bruikbare inhoudelijke feedback gedurende de laatste fase van de afstudeerperiode.

Utrecht, 14/06/2016

Rosanne van Dolderen

Handtekening:

Inhoudsopgave

Samenvatting	7
1. Inleiding en vraagstelling	9
1.1. Probleemstelling	9
1.2. Doelstelling	9
1.3. Plan van aanpak	9
1.4. Randvoorwaarden	10
2. Analyse huidige situatie	11
2.1. Doelgroep	11
2.2. Vormgeving en productie zitorthesen	11
2.3. Technische specificaties (standaard) Pronto onderdelen	11
2.4. Analyse huidige afstellingsprocedure	12
2.4.1. Eerste cliëntanalyse	12
2.4.2. Werkwijze rolstoelbouwer	13
2.5. Overzicht relevante parameters	14
2.6. Conclusie analyse huidige situatie	15
3. Theoretische onderbouwing	17
3.1. Definitie en belang van zwaartepunt(projectie)	17
3.2. Literatuuronderzoek algemene ZP-bepalingsmethodes	17
3.2.1. Geometrische en fotogrammetrische bepalingen	18
3.3.2. Krachtenplatform MMP-bepalingen	18
3.3.3. Vergelijking verschillende bepalingsmethodes	19
3.4. Literatuuronderzoek zwaartepunt rolstoelen	20
3.4.1. Zwaartepunt racerolstoel	21
3.4.3. Zwaartepunt kantelrolstoel	21
3.5. Literatuuronderzoek segment modellen	22
3.5.1. Bepaling segmentale parameters m.b.v. 3D-model	22
3.5.2. Bepaling segmentale parameters m.b.v. videoanalyse	23
3.5.3. Bepaling gemeenschappelijk MMP m.b.v. 3D-SESC systeem	23
3.6. Conclusie theoretische onderbouwing	25
4. Praktijkonderzoek Pronto verkantelingsmechanisme	27
4.1. Relatie tussen posities ZP, DP en wielen	27
4.1.1. Positie zwaartepunt vs. draaipunt	27
4.1.2. Plaatsing wielen	28
4.2. Onderdelen verkantelingsmechanisme	28
4.3. Methode optimalisatie verkantelingsmechanisme	29
4.3.1. Stap 1: Benodigde waarden uit cliënt-analyse	30
4.3.2. Stap 2: Zwaartepuntbaan bepalen	30
4.3.3. Stap 3: Plaatsing wielen	33
4.3.4. Stap 4: Berekening maatvoering verkanteling onderdelen	33
4.3.5. Stap 5: Schaalmodel verkantelingsmechanisme	34
4.4. Conclusie praktijkonderzoek Pronto	36
5. Eisen en wensen	37
6. Ontwerpfase	39
6.1. Test functionaliteit meetprincipe	39
6.2. Specificaties meetopstelling frame	40
6.3. Opbouw meetopstelling	41
6.4. Datacollectie	41
6.5. Dataverwerking	42

6.6. Conclusie ontwerpfase.....	44
7. Realisatiefase	45
7.1. Prototype fysieke meetopstelling	45
7.2. Definitief onderzoeksprotocol.....	46
8. Testfase	47
8.1. Test a.d.h.v. proefpersoon	47
8.1.1. Testopstelling.....	47
8.1.2. Data-analyse	48
8.1.3. Eindresultaten testfase	48
8.2. Test a.d.h.v. eisen en wensen	50
9. Discussie.....	51
10. Conclusie	55
Literatuur	57
Bijlagen	Error! Bookmark not defined.

Samenvatting

Dit afstudeerproject heeft plaatsgevonden in opdracht van Exello Revalidatietechniek, met als hoofddoelstelling: het ontwerpen, vervaardigen en testen van een onderzoeksmethode om de exacte samenstelling van de Pronto kantelrolstoel inzichtelijk te maken per persoon. Het systeem genereert een overzicht van betrouwbare parameters, waarmee de rolstoelbouwer de rolstoel individueel op maat kan maken. Zodoende moet er een immer veilige en stabiele situatie ontstaan en moet de verkanteling schokloos en comfortabel verlopen over de volledige range.

Op basis van bevindingen en overwegingen uit praktijk- en literatuurstudies, is beargumenteerd welke rolstoel- en cliënt parameters verantwoordelijk zijn voor het verloop van de verkanteling, de veiligheid en de stabiliteit van de gangbare Pronto kantelrolstoel. De gewenste situatie blijkt realiseerbaar wanneer de kantelrolstoel adequaat wordt afgesteld in het sagittale vlak, met de horizontale zwaartepuntbaan van cliënt, orthese en rolstoel gedurende de verkanteling als uitgangspunt. Deze moet als eerste achterhaald worden met vier weegschalen en kinematische berekeningen. Er is gespecificeerd op welke wijze en in welke volgorde de noodzakelijke rolstoelparameters bepaald moeten worden.

Het eindproduct bestaat uit twee onderdelen, namelijk een prototype van de fysieke Pronto meetopstelling en een gedetailleerd onderzoeksprotocol voor de uitvoering van de meetprocedure en data-analyse. Het systeem bepaald achtereenvolgend de noodzakelijke horizontale posities voor het ZP in middelste verkantelingstand, het verkantelingsdraaipunt, het ZP in minimale verkantelingstand, de voorwielas, het ZP in maximale verkantelingstand, de achterwiel as. Het systeem bepaald ook de noodzakelijke lengte- en hoekmaten van vier verkantelingsonderdelen, aan de hand van berekeningen en simulaties op een schaalmodel van het verkantelingsmechanisme.

De onderzoeksmethode is getest aan de hand van twee proefpersonen en een toetsing aan de gestelde ontwerpeisen. De toepassing van het onderzoeksprotocol is gestructureerd en succesvol verlopen. In het prototype zijn enkele beperkingen gesignaleerd, welke eenvoudig verholpen kunnen worden om de betrouwbaarheid van de meetresultaten te verbeteren. Al met al is er geconcludeerd dat de Pronto onderzoeksmethode uit dit afstudeerproject voor 90% voldoet aan de gestelde eisen. Het systeem is voldoende gebruiksvriendelijk en betrouwbaar voor de individuele afstelling van Pronto kantelrolstoelen.

1. Inleiding en vraagstelling

1.1. Probleemstelling

Het revalidatie technische bedrijf Exello is onder anderen gespecialiseerd in het produceren van zitorthesen en specialistische kantelrolstoelen, voor cliënten met zeer ernstige lichamelijke beperkingen. Tot op heden worden deze Pronto rolstoelen hoofdzakelijk vervaardigd en afgesteld op basis van gevoel, kennis en ervaring van rolstoelbouwers. Deze manier van werken heeft in het verleden vaker geleidt tot creatieve en zinvolle aanpassingen en de rolstoelkwaliteit is dan ook toegenomen door de jaren heen. Desondanks brengt de huidige afstellingsprocedure ook nadelen met zich mee. Zo worden er bij tijd en wijlen disfunctionerende rolstoelframes teruggedragen, waarbij de noodzakelijke verkantelingsrange door constructiefouten niet bereikt wordt, en de verkanteling dikwijls op een schokkerige en oncomfortabele wijze verloopt. Daarnaast zorgt de afwezigheid van een eenduidige methode voor enigszins variërende werkwijzen, waardoor de rolstoelkwaliteit wisselend kan zijn. Tot slot is de continuïteit van de Pronto productie volledig afhankelijk van een aantal gespecialiseerde rolstoelbouwers en verzuim kan dan ook directe problemen veroorzaken.

1.2. Doelstelling

Exello wenst te beschikken over een betrouwbaar en consequent systeem voor het in kaart brengen van noodzakelijke rolstoelparameters per persoon. Het systeem gebruikt de zwaartepunten posities van de verkantelingsrange om de parameters te bepalen. Er wordt een geschikte situatie verwacht indien het rolstoelframe wordt afgesteld op basis van persoonsgebonden lichamelijke- en technische eigenschappen. Vermoedelijk zorgt een consequente procedure voor een afname qua productietijd, dringt het aantal gemaakte constructiefouten terug en is de Pronto productie niet langer afhankelijk van enkele werkplaatsmedewerkers.

Het hoofddoel van dit afstudeerproject wordt op een gestructureerde en weloverwogen wijze bereikt met behulp van bevindingen aangaande de onderzoeksvraagstelling voor dit project, welke als volgt luidt:

Hoofddoel:

“Het ontwerpen van een systeem waarmee een duidelijk en betrouwbaar overzicht gegenereerd kan worden van de benodigde Pronto frameparameters per persoon, zodat de noodzakelijke verkantelingsrange op een schokloze en comfortabele wijze bereikt kan worden”.

Deelvragen:

1	“Welke persoonlijke parameters van cliënten moeten gebruikt worden om te allen tijde een veilige en stabiele situatie te kunnen garanderen”?
2	“Wat zijn de technische eigenschappen van de rolstoel (+orthese), wat zijn de technische mogelijkheden wat betreft de individuele afstelling en hoe gaat dit proces in zijn werk”?
3	“Hoe kan er vastgesteld worden waar het gemeenschappelijke zwaartepunt van de rolstoel, orthese en cliënt geprojecteerd wordt”?
4	“Welke rolstoelonderdelen zijn bepalend voor het verkantelingsverloop en hoe kunnen de exact benodigde afmetingen en posities van deze onderdelen bepaald worden”?

Relevantie

Dit afstudeerproject is relevant omdat er gepoogd wordt een technisch hulpmiddel te optimaliseren aan de hand van specifieke (bewegings)eigenschappen van de cliënten. De link tussen mens en techniek is dus duidelijk aanwezig en er worden uiteenlopende bewegingstechnologische onderwerpen behandeld gedurende het proces. Verder zijn er geen aanwijzingen gevonden die erop wijzen dat er al een vergelijkbaar systeem bestaat, en rolstoelafstellingen op basis van geprojecteerde zwaartepuntbanen worden zover bekend nog niet uitgevoerd. Het afstudeerproject wordt hiermee als vernieuwend beschouwd en gaat binnen Exello vermoedelijk zorgen voor vooruitgang in het creëren van individuele situaties.

1.3. Plan van aanpak

Voor een gestructureerd en succesvol projectverloop, wordt het afstudeerproces uitgevoerd in verschillende fases. Allereerst wordt er praktijkonderzoek verricht om relevante Pronto-aspecten inzichtelijk te maken, waarbij specificaties van de doelgroep, de rolstoel en de orthese worden uitgelicht. Verder wordt de huidige afstellingsprocedure van Exello onder de loep genomen en aandachts- en verbeterpunten worden benoemd. In de wetenschappelijke literatuurstudie worden het gedrag en belang van ZP's onderzocht en mogelijk bruikbare ZP-bepalingsmethodes worden vergeleken. Bevindingen uit het praktijk- en literatuuronderzoek worden vervolgens functioneel gecombineerd tot een onderzoeksmethode ten behoeve van het hoofddoel, en de lijst van ontwerpisen en -wensen wordt opgesteld.

De onderzoeksmethode wordt verder uitgewerkt en geoptimaliseerd in de ontwerpfase, en in de realisatiefase wordt het meetopstelling-prototype met bijbehorend onderzoeksprotocol vervaardigd. De functionaliteit en betrouwbaarheid van het systeem wordt vervolgens beoordeeld op basis van een tweetal testen (test a.d.h.v. proefpersonen; toets a.d.h.v. ontwerpeisen). In de discussie worden het projectverloop, de eindresultaten en het definitieve eindproduct kritisch geëvalueerd en getrokken conclusie worden beargumenteerd. Ook worden er aanbevelingen benoemd voor een eventueel vervolgproject, maar ook voor de implementatie van het definitieve systeem binnen Exello.

1.4. Randvoorwaarden

Voorafgaand aan de afstudeerfase zijn er een aantal randvoorwaarden aangedragen door Exello, waaraan het definitieve eindproduct zal moeten voldoen:

1. De toepassing van het uiteindelijke systeem (van opstarten tot overzicht eindresultaten) mag niet meer dan 75 minuten in beslag nemen.
2. Het systeem moet relatief eenvoudig verplaatsbaar en vervoerbaar zijn (in de mobiele werkplaats van Exello → bestelbus)
3. Het systeem moet geschikt zijn voor mensen met extreem vervormde lichamen
4. Het systeem moet de horizontaal geprojecteerde ZP-baan kunnen weergeven en/of definiëren tijdens de volledige verkantelingsrange
5. De output moet overzichtelijk worden uitgezet en moet begrijpelijk zijn voor alle (werkplaats)medewerkers van Exello

2. Analyse huidige situatie

2.1. Doelgroep

De doelgroep voor Exello's zitorthesen en Pronto kantelrolstoelen bestaat hoofdzakelijk uit mensen met zeer ernstige lichamelijke beperkingen zoals scoliose, kyfose, lordose en/of andere lichamelijke vervorming. Als gevolg van de lichamelijke vervormingen is er meestal sprake van een zeer beperkte bewegingsvrijheid in gewrichten en ernstig verstoorde spierfuncties en de aanwezigheid van bijkomende beperkingen zoals decubitus, incontinentie en/of geestelijke beperkingen is zeker niet uitzonderlijk bij de doelgroep.

Er wordt uitgegaan van het feit dat Pronto gebruikers in vrijwel alle gevallen genoodzaakt zijn het dagelijks leven zittend of liggend door te brengen en daarbij zijn zij niet in staat zich zelfstandig te verzitten of te verliggen. Met andere woorden, voor het dagelijks functioneren zijn de cliënten afhankelijk van intensieve zorg van ouders of verzorgers. Bij hen ligt de verantwoordelijkheid voor het waarborgen van een geschikte lichaamshouding en daarnaast dienen zij zorg te dragen voor voldoende drukverdeling en weefseldoorstroming in bepaalde huidgebieden, om het ontstaan van secundaire verwondingen te kunnen voorkomen.

2.2. Vormgeving en productie zitorthesen

Exello voorziet iedere Pronto kantelrolstoel van een individueel op maat gemaakte zitorthese. Op de eerste plaats ondersteunt en/of volgt de orthese bepaalde lichaamsdelen, waardoor de lichaamshouding tijdens het zitten in de rolstoel zo gezond mogelijk is. Afwijkende lichaamshoudingen worden zodoende als het ware gecompenseerd door de orthesevorm. Verder bieden orthesen weefselbelasting of -ontlasting in bepaalde huidgebieden, waardoor de kans op het ontstaan van secundaire verwondingen (decubitus/vochtletsel) sterk wordt verminderd.

De orthesen worden aangemeten en vervaardigd door een bewegingstechnologisch specialist van Exello. Aan de hand van een eerste cliënt-analyse en gesprekken met ouder(s) en/of verzorger(s), wordt het beeld van het zit- of ligprobleem in kaart gebracht en de eisen voor de gewenste situatie worden vastgesteld. Ieder verschillend zit- of ligprobleem heeft invloed op de vormgeving van de orthese. Tijdens de eerste fase van de ortheseproductie worden noodzakelijke vormaspecten afgetekend op een blok polyether, met de cliënt zelf als proefpersoon. In Exello's mobiele kunststofwerkplaats wordt de grove pasvorm uitgezaagd, waarna de orthese nogmaals wordt gepast op de cliënt. De definitieve pasvorm en oppervlakte afwerking worden vervolgens aangebracht in de algemene werkplaats van Exello. Tot slot wordt de zitorthese permanent uitneembaar geplaatst in een op maat gemaakt kunststof kader in de rolstoel (zie figuur 1).



Figuur 1: Definitieve Exello zit-orthese (beige) met kunststof kader (zwart)

2.3. Technische specificaties (standaard) Pronto onderdelen

Alhoewel er allerlei variaties mogelijk zijn in de Pronto, wordt er in dit project uitgegaan van de algemene en meest gangbare rolstoelsamenstelling (zie figuur 2). Zodoende kan het definitieve systeem worden toegepast ten behoeve van het grootste gedeelte van de rolstoelproductie. Onderstaande tabel 1 geeft een overzicht van een aantal belangrijke (standaard)onderdelen voor dit project en de bijbehorende nummers corresponderen met dezelfde nummers uit de figuren 3, 4, 5 en 6.

Het is gewenste om in een vroeg stadium van het project te beschikken over het nodige inzicht in de Pronto samenstelling, maar de beschikbare technische informatie over de rolstoelonderdelen is echter beperkt gebleken. Desondanks zijn de maten, materialen en verstelbaarheden van de meeste onderdelen uit tabel 1 toch achterhaald, aan de hand van een aantal technische tekeningen en gesprekken met de rolstoelbouwer. In bijlage 1 zijn dergelijke specificaties uitgezet per rolstoelonderdeel.

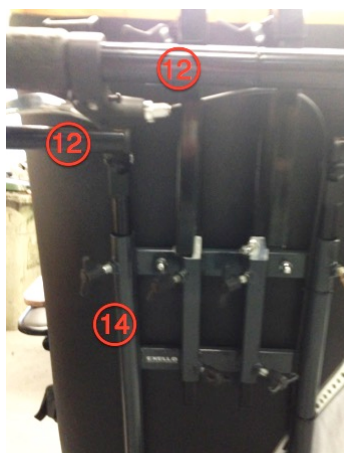
Tabel 1: Technische specificaties (standaard) Pronto onderdelen

Nr.	Beschrijving standaard onderdelen	Aantal	Nr.	Beschrijving overige onderdelen	Aantal
1	Zijframe Deel	2	15	Draaipunt zittinglengte – ophanging voetsteun	-
2	Ligger Boven Bouw (La)	2	16	Voetsteun	2
3	Zijframe Deel Koker	2	17	Ophanging voetsteun	2
4	Gasveer steun Onder Bouw	1	18	Gasveer (Lb)	1
5	Beensteunhouder en Armsteunhouder	1	19	Armlegger	2
6	Brug	1	20	Werkblad	1
7	Armlegger Steun Links/Rechts	2	21	Kunststof kader orthese	1
8	Gasveer steun Boven bouw	1	22	Orthese	1
10	Rempedaal	1	23	Voorwiel	2
11	Anti Kiep	2	24	Achterwiel	2

12	Duwbuis Bocht	1	25	Strip inbouwhoogte (La)	2
13	Werkblad Beugel	2		Stripje gasveer onder bouw	1
14	Frame rug	1		Stripje gasveer boven bouw	2



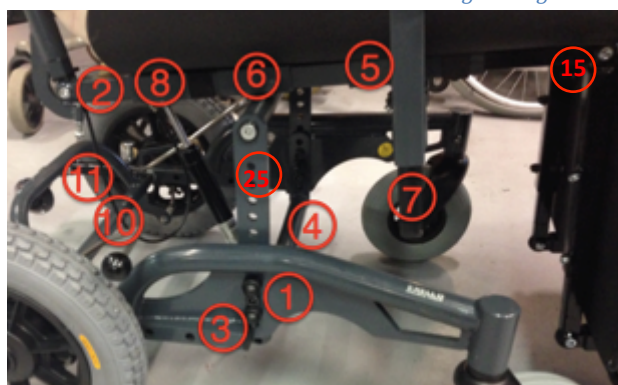
Figuur 2: Standaard Pronto samenstelling t.a.v. dit project



Figuur 3: Pronto rolstoel, achter-aanzicht rugleuning



Figuur 4: Pronto rolstoel, zij aanzicht



Figuur 5: Pronto rolstoel, zij aanzicht onderstel



Figuur 6: Pronto rolstoel, onderzijde zitting

2.4. Analyse huidige afstellingsprocedure

2.4.1. Eerste cliëntanalyse

Alvorens er een geslaagd rolstoelframe kan worden gebouwd, dienen bepaalde lichamelijke eigenschappen en technische rolstoelaspecten inzichtelijk gemaakt te worden. De orthesebouwer van Exello verzamelt de noodzakelijke informatie aan de hand van een cliënt-analyseformulier, welke wordt ingevuld in samenspraak met cliënt, verzorgers en behandelende specialisten. De rolstoel kan vervolgens opgebouwd worden op basis van uiterst zorgvuldig en weloverwogen verkregen waarden.

De inhoud van het cliënt-analyseformulier is onderzocht en enkel de zaken die mogelijk relevant en bruikbaar zijn binnen dit project worden behandeld in deze paragraaf. De bijbehorende delen van het analyseformulier zijn uitgezet in bijlage 2. Er wordt uitgegaan van het gegeven dat de huidige ortheseproductie op een zeer gestructureerde, nauwkeurige en foutloze manier verloopt, en in het vervolgproces worden onderwerpen aangaande deze fase van de afstellingsprocedure in de meeste gevallen dan ook buiten beschouwing gelaten.

Zitanalyse. Allereerst wordt er een zitanalyse uitgevoerd op de cliënt, de lichamelijke beperkingen worden onderzocht en er wordt bepaald van welke soort(en) vervorming(en) er sprake is en welke lichaamshoudingen representatief zijn voor de dagelijkse situatie van de cliënt (zie bijlage 2). Alhoewel de orthese onder anderen dient voor het compenseren van eventueel afwijkende lichaamshoudingen, is het voor het einddoel wenselijk om op de hoogte te zijn van het ziektebeeld en bewegings- en houdingssituatie van de cliënt.

Onderstel: Aan de hand van technische overwegingen worden er keuzes wat betreft het type rolstoel, de methode voor zithoek-verstelling, het remsysteem en de toe te passen wielen. Verder worden relevante parameters gemeten en gedocumenteerd, waaronder de verkantelingsrange, de inbouwhoogte, de duwbeugelhoogte en de zitting-hoogte (zie bijlage 2: fase 4 kolom 3).

Opbouw: Bepaalde antropometrische waarden en houdings- en bewegingseigenschappen zijn noodzakelijk gebleken voor een geschikte rolstoelvormgeving. In deze fase worden de waarden voor noodzakelijke parameters achterhaald die van wezenlijk belang zijn voor het einddoel, zoals de hoogte van de wervelkolomvorming, de rughoogte en bekkenbreedte. De zitsituatie wordt eveneens onderzocht en de noodzakelijke waarden voor de functionele rughoek, zittinghoek, zittinghoogte, onderbeenlengte en zitdiepte worden zodoende verkregen. Op het formulier kan er aangegeven worden met welke maten en eigenschappen rekening gehouden dient te worden bij het vervaardigen van de rolstoel (zie bijlage 2).

Positionering en hoofdsteen: Naast het kiezen van passende materialen bij gewenste rolstoelaccessoires, worden er in stap 5 van de cliëntanalyse specifieke eisen gesteld aan de hoofdsteen (zie bijlage 2). Zaken als het type, de materialen en de fixatie zijn erg belangrijk gebleken voor een optimale hoofdondersteuning, net als waarden aangaande de exact benodigde hoofdsteen positie (hoogte- en diepteafstelling).

Armleggers en werkblad: Een optimale montage van de armleggers en het werkblad in de rolstoel, gaat gepaard met een zo hoog mogelijk comfort gedurende de uitvoering van dagelijkse activiteiten. Informatie over noodzakelijke eigenschappen, afmetingen en de plaatsing van desbetreffende onderdelen is dan ook essentieel voor dit project. Reeds geformuleerde antropometrische waarden en bevindingen wat betreft fysieke beperkingen en houdingen, worden ingezet om juiste keuzes te maken aangaande: het soort armleggers, de afmetingen, de afwerking, de positionering t.o.v. de orthese, de gewenste verstelmogelijkheden en de bevestiging van de onderdelen in het rolstoelframe. Op vergelijkbare wijze worden ook de noodzakelijke afmetingen, materialen, de bevestiging en positionering van het werkblad bepaald. Het formulier uit deze fase van de cliëntanalyse is toegevoegd aan bijlage 2.

Beenopvang: Als laatste worden de specificaties van de beenopvang in kaart gebracht (zie bijlage 2, stap 7), en de noodzakelijke waarden qua afmetingen, bevestigingen, positionering en noodzakelijke verstelbaarheden worden vastgesteld. Daarnaast zijn de mogelijkheden wat betreft de voetsteunsoorten uiteenlopend (zie formulier stap 7, bijlage 2) en de keuze is sterk afhankelijk van de situatie en eisen van de cliënt. Voor de rolstoelbouwer is het noodzakelijk inzicht te hebben in de lengtes van de beide onderbenen en de posities van de voeten, dus er kan gesteld worden dat deze parameters eveneens relevant voor het einddoel van dit project.

Conclusie

In de eerste fase van het ontwikkeltraject van orthese en rolstoel, wordt de lichamelijke situatie van de cliënt grondig onderzocht op basis van de door Exello ontwikkelde eerste cliënt-analyse. De op deze wijze verkregen resultaten worden gebruikt voor het aanmeten en vervaardigen van de persoonlijke orthese en aansluitend wordt de Pronto rolstoel opgebouwd en individueel afgesteld.

Het systeem biedt de mogelijkheid een breed scala aan cliënt-parameters in kaart te brengen, en de relevantie van elke afzonderlijke parameters zijn onderzocht. Alhoewel het in het verleden zelden tot nooit nodig is gebleken het formulier volledig in te vullen, is het wel degelijk mogelijk om iedere parameter op relatief eenvoudige wijze vast te stellen. In een later stadium van het project kan deze mogelijkheid wellicht goed van pas komen.

2.4.2. Werkwijze rolstoelbouwer

Wanneer alle stappen van de huidige Pronto afstellingsprocedure duidelijk en inzichtelijk zijn, kunnen eventuele limitaties en/of bruikbare aspecten van de methode gesignaleerd en waar nodig aangepast worden. In onderstaand overzicht (tabel 2) is het globale stappenplan uitgezet welke de Pronto specialistisch van Exello hanteert om rolstoelen individueel op maat te maken.

De pasvorm van de orthese (plus omhullende kader) en bepaalde parameters uit de cliëntanalyse, vormen samen het uitgangspunt voor het bouwen van de Pronto. Er wordt een ruw Pronto-pasmodel geconstrueerd, waarvan de onderdelen pas definitief gemonteerd worden indien de functionaliteit getest is en geheel voldoet aan de gestelde eisen van de cliënt. Er is geconstateerd dat de rolstoelproductie in ieder geval gebaseerd wordt op de volgende parameters: lichaamsgewicht, vorm/afmetingen orthese, nek lengte, ruglengte, bovenbeenlengte, onderbeenlengte, voetlengte, heuphoek, kniehoek, enkelhoek, buikomvang, verkantelingsrange (minimale; maximale; gangbare).

Tabel 2: Huidige afstellingsprocedure Pronto kantelrolstoel (volgens Prontospecialist Exello)

1	Afstelling a.d.h.v. breedte van het kunststof kader
	De orthese en kader worden gemonteerd in het frame en de parameters voor de maatvoering van de breedte-onderdelen, worden bepaald op basis van de orthese-pasvorm (zie figuren 5 en 6):
	▪ nr. 4: Gasveer steun Onder Bouw

	- nr. 5: Beensteunhouder en Armsteunhouder - nr. 6: Brug - nr. 8: Gasveer steun Boven bouw → De onderdelen worden op maat gemaakt in de werkplaats van Exello
2	Afstelling a.d.h.v. diepte van het kunststof kader De volgende onderstel-parameters worden bepaald in sagittaal rolstoelaanzicht (zie figuren 5 en 4): - nr. 1: Lengte Zijframe Deel - nr. 2: Lengte Ligger Boven Bouw
3	Plaatsing verkantelingsdraaipunt (DP) De positie van DP wordt rond het middelpunt van de totale zittinglengte (nr. 2, figuur 5) gepositioneerd, beredeneerd vanuit sagittaal aanzicht
4	Afstelling a.d.h.v. wielbreedte De noodzakelijke wielbreedte wordt ingesteld in het frame door beide "zijframe delen" te vervormen (nr. 1: figuur 3), waarmee de wielbreedte bijgesteld kan worden → Er moet een gewenste verhouding worden bereikt tussen de noodzakelijke wiel- en de zitbreedte
5	Positie bepalen voetsteun-DP De orthese-zitdiepte en de sagittale frame-lengtematen (nr. 1 en 2) worden gebruikt om de DP-positie van de voetsteun te bepalen, ten opzichte van het frame (zie figuren 5 en 4) nr. 15: Draaipunt zittinglengte (nr. 2) – ophanging voetsteun (nr. 17)
6	Hoogteverstellingen a.d.h.v. eigenschappen cliënt De onderbeenlengtes van de cliënt worden gebruikt om de volgende parameters m.b.t. de inbouwhoogte te bepalen (zie figuren 5 en 4): - nr. 17: Lengte ophanging voetsteun - nr. 25: Strip inbouwhoogte (= verticale afstand tussen nr. 2 en nr. 23/24 (wielen)) → zodanig afstellen dat de benen en voetsteun de wielen niet kunnen blokkeren
7	Kniehoek instellen a.d.h.v. eigenschappen cliënt Met de gangbare kniehoek van de cliënt, welke is bepaald tijdens de eerste client-analyse, wordt de hoek bepaald tussen "Ophanging voetsteun" en "Ligger Boven Bouw" (zie figuren 4 en 5): 1) nr. 15: Hoek tussen onderdelen 2 en 17 → beide hoeken moeten nagenoeg gelijk zijn
8	Rughoek instelling a.d.h.v. orthese De rughoek van de rolstoel wordt ingesteld aan de hand van de orthese-rughoek (zie figuren 2 en 4): dusdanig instellen dat de rug- en zittingdelen van het frame zoveel mogelijk oppervlaktecontact hebben met de orthese. → Dit hoekpunt is geen draaipunt en wordt dus vastgezet.
9	Afstelling rolstoelrug a.d.h.v. orthese De lengte van de orthese-rug wordt gebruikt om noodzakelijke lengtes voor het rugframe te bepalen in te stellen (zie figuren 2 en 4): 2) nr. 12: Duwbuis Bocht 3) nr. 14: Frame rug
10	Afstelling a.d.h.v. noodzakelijke verkantelingsrange De minimale-, maximale- en voorkeur verkanteling van de cliënt worden gebruikt om een keuze te maken qua soort gasveer en gasveer positionering (zie figuren 5 en 4) nr. 18: Gasveer
11	Controle verstellingen in rolstoelframe De achterwiel assen moeten ongeveer verticaal onder het hoekpunt van de onderdelen rug en zitting gepositioneerd zijn (zie figuren 2, 4, en 5) Wanneer de rolstoel wordt ingesteld in de voorkeurs-verkantelingstand, moeten de armsteunen en het werkblad nagenoeg horizontaal staan ten opzichte van de vloer (zie figuren 2 en 4): - nr. 19: Armlegger - nr. 20: Werkblad

2.5. Overzicht relevante parameters

De in tabel 3 uitgezette parameters zijn allen belangrijk gebleken voor de rolstoelopbouw en -afstelling. De zogenaamde primaire parameters (tabel 3: linker helft) worden eenvoudig achterhaald tijdens de cliënt-analyse. Vervolgens kunnen secundaire aspecten (tabel 3, rechter deel) worden bepaald met primaire waarden als input. Verder biedt de tabel duidelijkheid in de toe te passen bepalingsmethode per parameter. Te zien is dat de meeste onbekenden worden verkregen uit de cliënt-analyse. Enkel de waarden met betrekking tot ZP-bepalingen, welke zijn onderstreept in tabel 3, kunnen niet vastgesteld worden met de huidige afstellingsmethode van Exello.

Tabel 3: Relevante rolstoelparameters + bepalingsmethoden (nr's tussen haakjes=nr's fig. 2 t/m 6)

Primaire parameters	Eenh.	Bepalingsmethode	Secundaire parameters	Eenh.	Bepalingsmethode
Antropometrische parameters					
Zitdiepte	mm	Cliënt-analyse	Lengte Ligger onder bouw (2)	mm	Huidige methode
			Positie draaipunt rugverstelling	coörd	Huidige methode
			Positie draaipunt voetsteun	coörd	Huidige methode
Zitbreedte	mm	Cliënt-analyse	Breedte frameonderdelen (4,5,6,8,10)	mm	Huidige methode
			Kromming zijframe delen (1)	mm	Huidige methode
			Breedte tussen wielen	mm	Huidige methode
			Breedte werkblad	mm	Huidige methode
			Breedte plaatsing armleggers	mm	Huidige methode
Onderbeenlengte	mm	Cliënt-analyse	Lengte kuitklank	mm	Huidige methode

			Hoogte bouw (lengte hoogteprofiel)	mm	Huidige methode
Neklengte	mm	Clïënt-analyse	Hoofdsteunhoogte	mm	Huidige methode
Ruglengte	mm	Clïënt-analyse	Lengte rug (14)	mm	Huidige methode
Buikomvang	mm	Clïënt-analyse	Uitsparing werkblad	mm	Huidige methode
Gewicht hoofd+romp	kg	Clïënt-analyse	Positie ZP hoofd + romp	coörd	Nader te bepalen
Gewicht bovenbenen	kg	Clïënt-analyse	Positie ZP bovenbenen	coörd	Nader te bepalen
Gewicht onderbenen + voeten	kg	Clïënt-analyse	Positie ZP onderbenen + voeten	coörd	Nader te bepalen
Gewicht armen + handen	kg	Clïënt-analyse	Positie ZP armen + handen	coörd	Nader te bepalen
Totaalgewicht cliënt	kg	Clïënt-analyse	Positie gemeenschappelijk ZP lichaam	coörd	Nader te bepalen
Lichamelijke parameters					
Voorkeurshoudingen/ afwijkende houdingen		Clïënt-analyse	Afmetingen steunvlak voork.houding	mm	Clïënt-analyse
Kniehoek *2	graden	Clïënt-analyse	Positie steunvlak voork.houding	coörd	Nader te bepalen
			Positie draaipunt voetensteun	coörd	Huidige methode
			Hoek kuitplank-bovenbeen	graden	Huidige methode
Romp-hoofd hoek	graden	Clïënt-analyse	Hoofdsteundiepte	mm	Huidige methode
Orthese parameters					
Afmetingen orthese	mm	Clïënt-analyse	Positie ZP orthese	coörd	Nader te bepalen
Gewicht orthese	kg	Clïënt-analyse			
Rolstoel parameters					
Gangbare verkanteling (voorkeurshouding)	graden	Clïënt-analyse	Plaatsingshoek werkblad	graden	Huidige methode
Min. verkanteling (sta op)	graden	Clïënt-analyse	Positie gasveer	coörd	Nader te bepalen
Max. verkanteling (transfer)	graden	Clïënt-analyse	Soort gasveer		Clïënt-analyse
Afmetingen armliggers	mm	Clïënt-analyse	Soort gasveer		Clïënt-analyse
Afmetingen werkblad	mm	Clïënt-analyse			
Parameters ontwerpfase					
Afmetingen rolstoel	mm	Nader te bepalen	Positie ZP rolstoel	coörd	Nader te bepalen
Gewicht rolstoel	kg	Nader te bepalen			
Positie gemeensch. ZP	coörd	Nader te bepalen	Positie draaipunt verkanteling	coörd	Nader te bepalen
			Positie gasveer	coörd	

*2: De kniehoek van de cliënten staat meestal vast i.v.m. ernstige gewrichtsbeperking

2.6. Conclusie analyse huidige situatie

In de analysefase is de huidige situatie van de Pronto kantelrolstoel onderzocht en waar mogelijk uitgewerkt. Allereerst is de doelgroep vastgesteld en mogelijke ziektebeelden zijn bestudeerd, waarna de specifieke rolstoelsamenstelling ten aanzien van dit project is geselecteerd. Voor dit project dient de rolstoelafstelling grondig geëvalueerd en herontworpen te worden. Een uitgebreid overzicht van alle rolstoelonderdelen met technische specificaties zou hierbij goed van pas komen. Afgezien van een aantal technische SW tekeningen en schetsen, beschikt Exello niet over een compleet beeld van de huidige Prontosamenstelling. Dit komt doordat het rolstoelontwerp in de afgelopen jaren geregeld is aangepast en de wijzigingen zijn niet allemaal gedocumenteerd.

Verder is de huidige afstellingsprocedure onderzocht waarmee Exello de rolstoelen individueel op maat maakt. Ondanks de duidelijke structuur en de verwachte gebruiksvriendelijkheid van de methode, blijken de meest cruciale onderwerpen voor dit project nagenoeg onbehandeld te worden. Op de eerste plaats lijkt de huidige procedure onafhankelijk te zijn van geprojecteerde zwaartepuntposities gedurende de verkanteling. Bovendien wordt er nauwelijks aandacht besteed aan de afmetingen van het steunvlak. Er is geconstateerd dat een weloverwogen positionering van het verkantelingsdraaipunt bepalend is voor het realiseren van een zo optimaal mogelijke rolstoelsamenstelling per persoon, maar in de huidige procedure lijkt de DP-positie op geheel ondoordachte wijze doorgevoerd te worden. De zorgvuldig opgestelde cliënt-analyse uit de eerste fase van de procedure wordt daarentegen als zeer nuttig en betrouwbaar beschouwd, en een mogelijke toepassing van (delen van) de methode wordt binnen dit project niet uitgesloten.

Naar aanleiding van het praktijkonderzoek is er geconcludeerd dat de huidige afstellingsprocedure van Exello verbeterd kan worden door informatie aangaande zwaartepunten, steunvlakken en DP-posities effectief te verwerken in de rolstoelafstelling. Verwacht wordt dat wanneer deze zaken zich op de meest gunstige plaats bevinden ten opzichte van elkaar en ten opzichte van de rolstoel, er een schokloze en comfortabele verkanteling gerealiseerd kan worden over de gehele range. Om het einddoel te kunnen behalen, is vervolgonderzoek naar deze onderwerpen dus vereist.

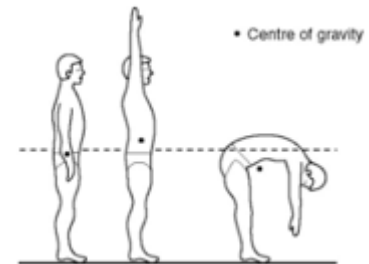
3. Theoretische onderbouwing

Er zijn verschillende onderzoeksmethodes bekend om het gemeenschappelijke zwaartepunt van een lichaam, ook wel massamiddelpunt (MMP) genoemd, vast te stellen. Om de benodigde kennis en inzicht te krijgen in dit onderwerp, is er een literatuurstudie verricht en de bruikbare resultaten en bevindingen worden besproken in dit hoofdstuk. Er worden conclusies geformuleerd om het vervolg van dit afstudeerproject in goede banen te kunnen leiden. In deze scriptie wordt zowel de term “zwaartepunt” als de term “massamiddelpunt” gebruikt, waarbij er wordt uitgegaan dat beide termen dezelfde betekenis hebben.

3.1. Definitie en belang van zwaartepunt(projectie)

De definitie van het zwaartepunt volgens het Van Dale woordenboek is: *“Punt waaromheen het gewicht van een lichaam gelijkelijk verdeeld is”* [20]. Met andere woorden, het zwaartepunt, ook wel massamiddelpunt genoemd, is het punt binnen of buiten een object waaromheen alle delen van het object elkaar in evenwicht houden. Het is de plaats waar de zwaartekracht van de massa aangrijpt [21].

Het gewicht (of de massa) van een lichaam is niet een eigenschap van het lichaam zelf, maar een reactie van het lichaam op de aantrekkingskracht van de aarde (normaalkracht = zwaartekracht) [1]. De eigenschappen van deze aantrekkingskracht zijn sterk afhankelijk van de positie van het lichaam in de ruimte, maar ook van de afstand van het lichaam tot de aarde. Het gemeenschappelijke MMP wordt gecreëerd door de MMP-posities van de afzonderlijke deelmassa's met elkaar te combineren. Ter illustratie is dit verschijnsel weergegeven in figuur 7 [22], waarbij de zwarte stip de locatie van het gemeenschappelijke zwaartepunt aangeeft. Te zien is dat bewegingen van ledematen direct resulteren in een verplaatsing van het zwaartepunt.



Figuur 7: Gedrag gemeenschappelijk zwaartepunt als gevolg van bewegingen

In dit project gaat het om een driedimensionaal lichaam, opgebouwd uit de onderdelen van de rolstoel, de orthese en (ledematen van) de cliënt. Door het onderstel nauwkeurig af te stellen aan de hand van lichamelijke eigenschappen, kan ervoor gezorgd worden dat het gemeenschappelijke zwaartepunt immer binnen het steunvlak valt, ongeacht de grootte van de bewegingsverandering (denk aan maximale- en minimale verkanteling en opvallende bewegingen van de cliënt). Alleen op deze manier kan er een te allen tijde stabiele, veilige en comfortabele situatie gerealiseerd worden.

3.2. Literatuuronderzoek algemene ZP-bepalingsmethodes

In deze paragraaf wordt er dieper ingegaan op bevindingen uit wetenschappelijk onderzoek naar het vaststellen van menselijke massamiddelpunten tijdens het bewegen. De exacte positie van het gemeenschappelijke MMP van een lichaam blijkt sterk afhankelijk te zijn van ras, leeftijd, geslacht en morfologie [4]. Voor het in kaart brengen van lichamelijke MMP's is er in het verleden veelsoortig onderzoek verricht op kadavers [2]. Maar omdat de samenstelling van botweefsel en spierweefsel flink veranderd als gevolg van de dood, komt de betrouwbaarheid van de resultaten uit dergelijk onderzoek in het geding. Gebleken is dat er tot op heden nog maar weinig vergelijkbaar onderzoek verricht is op levende mensen uit verschillende populaties [2].

In het verleden zijn er uiteenlopende technische methodes ontwikkeld en gebruikt voor het in kaart brengen van menselijke segment-parameters. Zo is er voor dergelijke doeleinden onder andere gebruik gemaakt van geavanceerde bodyscan apparatuur zoals Magnetic Resonance Imaging (MRI), Computed Tomography (CT), Dual Energy X-ray Absorptiometry (DEXA) en Gamma-ray scanning [11,12,13,14]. Vanwege de hoge kosten, mogelijke blootstelling aan schadelijke straling (afgezien van MRI) en tijdsgebonden en logistieke redenen zijn deze onderzoeksmethodes niet op grote schaal toegepast [3]. Om dezelfde redenen worden methodes met behulp van bodyscans in dit project buiten beschouwing gelaten.

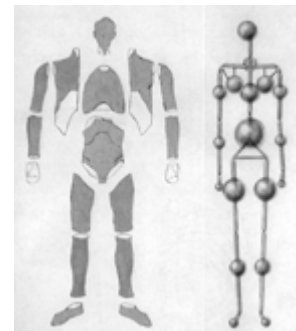
Zwaartepunten van lichamen kunnen tevens bepaald worden met behulp van slinger/oophangmeetopstellingen [15]. Echter gaat het in dergelijke onderzoeken over het algemeen om lichamen uit de luchtvaart of andere technische vakgebieden en niet om het menselijk lichaam. Omdat het voor dit project niet wenselijk is de proefpersoon, orthese en rolstoel op te hangen in verschillende posities, wordt ook deze methode niet gebruikt in het vervolg van dit project.

Verder kan het lichamelijke MMP op rekenkundige wijze benaderd worden. In bijlage 3 is een tabel weergegeven van de gemiddelde massaverdelingen van het menselijk lichaam, gebaseerd op algemene antropometrische data [1]. De tabel wordt gebruikt om het gemeenschappelijke MMP te construeren en te berekenen. Ter verduidelijking is er in bijlage 3 tevens een voorbeeld uitgewerkt, waarbij het MMP van een zittend lichaam bepaald is met behulp van de tabel. In dit project gaat het echter om mensen met zeer uiteenlopende morfologiën. Aangezien de onderzoeksmethode uit bijlage 3 uitsluitend uitgaat van algemene antropometrische data, wordt deze rekenkundige benadering niet toegepast in het vervolg van dit project.

3.2.1. Geometrische en fotogrammetrische bepalingen

Antropometrie (1)

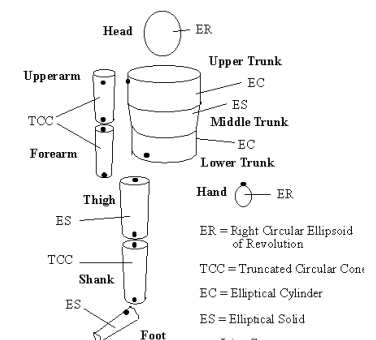
In de literatuur wordt er veel gebruik gemaakt van de Dempster en Leva methodes [17,18,2], welke beiden uitgaan van de verhoudingen tussen de massa van het lichaam en de lengtes van de ledematen (=antropometrie). Met behulp van deze waarden worden de deelmassa's van ledematen en het gemeenschappelijke MMP bepaald. In figuur 8 is een model van Dempster weergegeven waarin de afmetingen en deelmassa's van het lichaam met elkaar zijn gecombineerd. Er zijn (Dined) tabellen ontwikkeld waarmee de procentuele afmetingen van ledematen en lichaamsdelen afgelezen kunnen worden voor verschillende populaties van de wereldbevolking. Hierbij wordt er onderscheid gemaakt in leeftijd en sekse, maar ook in zittende en staande lichaamshouding.



Figuur 8: Positie en relatieve massa ledematen (Dempster)

Antropometrie (2)

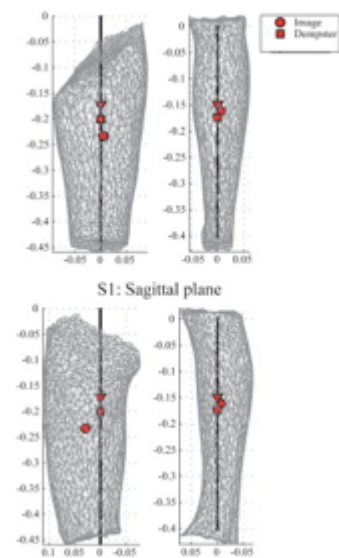
Hanavan heeft een model ontwikkeld waarmee verhoudingen en afmetingen van het menselijk lichaam vastgesteld kunnen worden. Dit model bestaat uit een vereenvoudigde weergave van het menselijk lichaam waarbij de ledematen zijn vertaald in 15 geometrische vormen (zie figuur 9) [8]. De lengtes en diameters van de ledematen zijn gebaseerd op 25 antropometrische metingen [2]. Door de ledematen op te meten kunnen de posities van de deelmassa's en het totale massamiddelpunt van een lichaam berekend worden (zie ook bijlage 3).



Figuur 9: Geometrisch model menselijk lichaam (Hanavan)

Fotogrammetrische bepalingen

Ook is het mogelijk gebruik te maken van het fotogrammetrische model van Jensen [9]. Bij deze onderzoeksmethode worden er twee foto's van het lichaam genomen (frontaal; sagittaal) op exact hetzelfde tijdstip. De ledematen worden geïdentificeerd aan de hand van het model van Dempster waarna de afzonderlijke segmenten gedigitaliseerd worden met behulp van software. Door het digitaal "doorsnijden" van de segmenten wordt iedere deelmassa bepaald en kan het gemeenschappelijke MMP berekend worden door de software [2]. In figuur 10 is een voorbeeld weergegeven van een MMP-bepaling van onder- en bovenbeen, in zowel het frontale als het sagittale vlak. Het cirkeltje geeft de fotogrammetrische bepaling volgens Jensen weer en het vierkantje illustreert de MMP-positie volgens Dempster.



Figuur 10: MMP bepaling: Jensen (cirkel) en Dempster (vierkant)

3.3.2. Krachtenplatform MMP-bepalingen

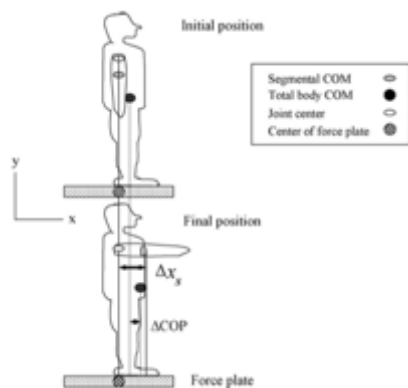
In Rusland is er in 1931 al onderzoek gedaan met behulp van een krachtenplatform [7]. Tijdens de metingen hebben de proefpersoon twee posities aangenomen op een platform, waarna de veranderingen van het gemiddelde krachtenmiddelpunt zijn bepaald. Met deze informatie zijn vervolgens de deelmassa's de gemeenschappelijke MMP-positie van een lichaam in kaart gebracht [7]. Een nadeel van de methode bleek dat de deelmassa's en het gemeenschappelijke MMP elkaar moesten berekenen tijdens de metingen. Beide parameters waren echter onbekend, waardoor men genooddakt was om antropometrische bepalingen toe te voegen in de methode. De betrouwbaarheid van de onderzoeksresultaten is hiermee afgenomen.

MMP-bepaling m.b.v. krachtenplatform en software [2]

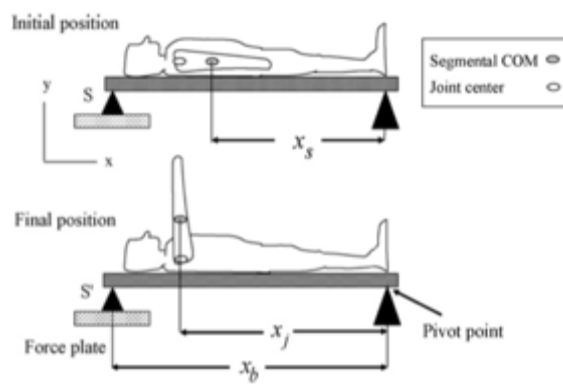
In recent onderzoek is een vergelijkbare methode gebruikt, waarmee de deelmassa's en MMP's daarentegen wel succesvol bepaald konden worden [2]. Voor wetenschappelijke studie van Damavandi et al. [2], is er in 2009 een AMTI krachtenplatform (model OR6-5, Newton, MA) en een geschikt softwarepakket gebruikt om exacte waarden voor (segmentale) lichaamszwaartepunten te genereren tijdens het uitvoeren van bewegingen op het krachtenplatform [2]. In deze paragraaf worden de relevante en mogelijk bruikbare onderdelen van desbetreffend meetprotocol besproken.

Tijdens de metingen hebben de proefpersonen eenzelfde beweging uitgevoerd in twee verschillende posities, namelijk staand en liggend op het krachtenplatform. Met behulp van de gemeten verplaatsing van het krachtenmiddelpunt als gevolg van de beweging, is het mogelijk gebleken de positie van het MMP te berekenen aan de hand van formules [2]. De methode en het verloop van deze studie worden zeer beknopt besproken. In

onderstaande figuren 11 en 12 zijn de twee meetcondities afgebeeld en de begin- en eindstanden van de beweging zijn zichtbaar, namelijk 90° anteflexie in staande en liggende houding.



Figuur 11: MMP bepaling m.b.v. krachtenplatform. Houding 1: 90° anteflexie, staand [2]



Figuur 12: Houding 2 krachtenplatform onderzoek naar bepaling MMP's d.m.v. houdingsverandering [2]

De software past verschillende formules toe om de MMP-positie van de gewogen te kunnen berekenen. Aan de hand van de eerste meetconditie (zie figuur 11) genereert het krachtenplatform een aantal noodzakelijke parameters waarmee de formules gedeeltelijk opgelost kunnen worden. Na uitvoering van de data-analyse uit de eerste meting, zijn er nog twee onbekenden aanwezig in de formule, namelijk de massa- en het massamiddelpunt van het bewogen segment (m_s ; x_s). Om uiteindelijk slechts één onbekende over te houden, de MMP-positie (x_s), is de output uit de metingen van de tweede houding (zie figuur 12) noodzakelijk gebleken.

Als gevolg van het meten van menselijke bewegingen op een krachtenplatform, is men in staat de exacte waarden te genereren voor lichaamsmassa (m_b), de horizontale verplaatsing van het drukmiddelpunt (ΔCOP), en de krachtenplatform output van voor (S) en na (S') de meting. Met behulp van software wordt er vervolgens berekend welke massa het bewogen segment heeft, wat het horizontaal afgelegde traject van het segmentale MMP geweest is als gevolg van de beweging en op welke exacte plaats het MMP van dit segment zich bevindt. Op deze wijze zijn de groottes van de deelmassa's, de posities van de segmentale MMP's en het gemeenschappelijke MMP nauwkeurig vastgesteld.

De beschreven wetenschappelijke studie van Damavandi et al. [2] is absoluut relevant en mogelijk ook bruikbaar voor de doelstelling van dit afstudeerproject. In bijlage 4 is de onderzoeksmethode gedetailleerd uitgezet met formules en toelichtingen.

3.3.3. Vergelijking verschillende bepalingsmethodes

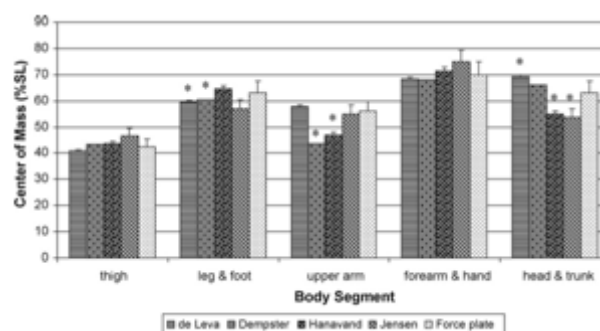
Tijdens het onderzoek van Damavandi et al. [2] is het hierboven beschreven onderzoeksprotocol meerdere malen herhaald voor verschillende bewegingen, waardoor de exacte deelmassa's en MMP's van alle afzonderlijke lichaamsdelen uiteindelijk vastgesteld zijn. Naast de bepalingen met behulp van het krachtenplatform, zijn er tevens geometrische en fotogrammetrische methodes (zie 3.3.1) toegepast op dezelfde proefpersonen, voor het in kaart brengen van segmentale massa's en MMP's [2]. In figuur 13 en 14 worden de resultaten uit het krachtenplatform onderzoek vergeleken met de resultaten uit van vier andere bepalingsmethodes (de Leva, Dempster, Hanavan, Jensen), waarbij het krachtenplatform de gouden standaard vormt.

Segment	Force plate	de Leva [32]	Dempster [1]	Hanavan [12]	Jensen [13]
Forearm and hand	1.74 (0.50)	1.68 (0.49)	1.70 (0.45)	2.01* (0.51)	1.96* (0.63)
Upper arm	2.04 (0.49)	2.05 (0.58)	2.14 (0.58)	1.60* (0.82)	1.90 (0.52)
Leg and foot	4.66 (1.12)	4.38* (1.13)	4.65 (1.25)	4.76 (1.33)	4.52 (1.19)
Thigh	8.65 (2.61)	10.86* (2.84)	7.63* (2.05)	8.47 (1.85)	8.45 (1.86)
Head and trunk	42.29 (11.5)	38.35* (10.50)	44.10* (11.87)	42.63 (11.50)	42.70 (13.36)

Figuur 13: Massa afzonderlijke lichaams-segmenten (gem. en SD), resultaten vergelijking verschillende bepalingsmethodes

De deelmassa's verkregen uit de geometrische en fotogrammetrische bepalingen verschillen van de vastgestelde deelmassa-waarden uit het krachtenplatform onderzoek (zie figuur 13). De afwijkende meetresultaten ten opzichte van de krachtenplatform uitkomsten worden toebedeeld aan het feit dat de geometrische en fotogrammetrische standaarden in het verleden niet geheel nauwkeurig zijn vastgesteld. De onderzoeksresultaten zijn toentertijd immers gebaseerd op metingen uitgevoerd op kadavers. Daarentegen wordt er gesteld dat de verschillen dusdanig klein zijn [2], dat er geconcludeerd kan worden dat alle vijf de onderzochte methodes geschikt en bruikbaar zijn voor het vaststellen van deelmassa's van afzonderlijke lichaams-segmenten.

Echter, uit figuur 14 is op te maken dat de meetresultaten wat betreft de gemeenschappelijke MMP posities uit het krachtenplatform onderzoek in een opmerkelijke mate verschillen van de resultaten afkomstig uit de overige onderzoeksmethodes. De oorzaak wordt gezocht in het feit dat de krachtenplatform methode uitgaat van direct geregistreerde data over de grootte van de deelmassa's en de posities van de MMP's, terwijl de overige methodes uitgaan van aannames gebaseerd op algemene massaverdelingen (antropometrie) [2]. Tevens wordt er gesteld dat het met een krachtenplatform mogelijk is om op een snelle, veilige en zeer nauwkeurige wijze exacte MMP's vast te stellen van mensen met zeer afwijkende morfologie, waaronder ook scoliose patiënten [2].



Figuur 14: Massamiddelpunten afzonderlijke lichaams-segmenten, resultaten vergelijking verschillende bepalingsmethodes [2]

Afgezien van bovengenoemde voordelen van de krachtenplatform methode, wordt er gesproken over twee onnauwkeurigheden in het onderzoeksprotocol. Zo worden de platform metingen uitgevoerd in zowel een staande als een liggende houding, waarbij de romporganen een ietwat andere positie aannemen ten opzichte van elkaar. Deze orgaanverplaatsing heeft direct effect op de meetresultaten uit het krachtenplatform en daarmee ook op de door de software berekende positie van het gemeenschappelijke massamiddelpunt [2]. Een andere onnauwkeurigheid van de krachtenplatform-methode zit in het feit dat er geen rekening gehouden wordt met verplaatsing en aanspanning/ontspanning van weefsels en spieren tijdens het staan en het liggen op het platform. Aangezien deze verschillen vooral aanwezig zijn in de spieren van de onderste extremiteit, wordt er aangenomen dat de weefselverandering als gevolg van de houdingsverandering weinig effect heeft op het vastgestelde gemeenschappelijke massamiddelpunt van het lichaam [2].

In onderstaande tabel 4 staan behalve de genoemde voor- en nadelen, ook andere positieve en negatieve aspecten van de onderzochte methodes opgesomd.

Tabel 4: Voor- en nadelen van bepalingsmethodes voor lichamelijke deelmassa's en MMP's [2]

Methode	Voordelen	Nadelen
<u>Geometrisch</u> • Dempster • Leva • Hanavan	• Uitvoerbaar op levende individuen • Houdt rekeningen met verschillende soorten morfologie • Geeft duidelijk inzicht in morfologie en hoeveelheid lichaamsvet • Relatief goedkoop • Gemakkelijk te implementeren binnen verschillende instanties	• Suggereert gelijke segmentale massaverdelingen bij mensen binnen een bepaalde groep [2] • Tabellen zijn verkregen uit onderzoek met kadavers [5]
<u>Fotogrammetrisch</u> • Jensen	• Uitvoerbaar op levende individuen • Houdt rekeningen met verschillende soorten morfologie • Relatief goedkoop • Gemakkelijk te implementeren binnen verschillende instanties	• Suggereert gelijke segmentale massaverdelingen bij mensen binnen een bepaalde groep [2] • Veel verschillende handelingen • Maakt gebruik van methode van Dempster (zie "geometrisch", tabel 6)
<u>Krachtenplatform</u> • Damavandi	• Bepaling verloopt relatief snel, veilig en nauwkeurig • Houdt rekeningen met verschillen in morfologie, leeftijd, geslacht en ras • Mogelijk voor mensen met zeer afwijkende morfologie (oa. Scoliose) • Gaat uit van levende individuen • Gemakkelijk te implementeren voor klinisch onderzoek	• Relatief duur • Niet voor alle instanties mogelijk om te implementeren in werkomgeving • Gebaseerd op verschillen tussen twee houdingen; houdt geen rekening met veranderingen in positie organen en weefselsamenstelling a.g.v. houdingsverandering

Uit onderzoek is gebleken dat de afwijking van het gemeenschappelijke MMP niet meer mag zijn dan 1% van de totale lichaamslengte, in staande houding [16]. Aangezien de positie van het MMP verkregen uit de geometrische- en fotogrammetrische methodes ongeveer 1 cm lager bleek te liggen dan het MMP uit de krachtenplatform metingen, wordt er gesteld dat de afwijking te verwaarlozen is [2] en dat alle onderzochte onderzoeksmethodes voor het vaststellen van het gemeenschappelijke massamiddelpunt (in staande positie) voldoende nauwkeurig zijn.

3.4. Literatuuronderzoek zwaartepunt rolstoelen

Er zijn vele aspecten die bepalend zijn voor een comfortabele en veilige situatie per persoon. Bij het ontwerpen van rolstoelen wordt er over het algemeen voldoende aandacht besteed aan een ergonomisch verantwoorde maatvoering van verschillende onderdelen, maar ook de veiligheid en stabiliteit van de rolstoel zijn

belangrijke criteria binnen ontwerpprocessen. Alhoewel een gunstige zwaartepuntprojectie een zeer bepalende factor is in het realiseren van dergelijke kwaliteitscriteria, wordt er tijdens rolstoel-ontwerpprocessen in de praktijk weinig rekening gehouden met de uiteindelijke positie van dit zwaartepunt. Wetenschappelijk onderzoek omtrent zwaartepunten in klinische situaties is dan ook nauwelijks beschikbaar.

3.4.1. Zwaartepunt racerolstoel

Ten behoeve van de rolstoelsport is er daarentegen wel degelijk onderzoek verricht met betrekking tot het gedrag en eventuele sturing van het gemeenschappelijke zwaartepunt tijdens het rijden. Een gunstige zwaartepuntpositie gaat immers gepaard met een gunstige rolstoelstabiliteit, wegligging en wendbaarheid, waardoor er een gewenst comfort heerst en prestaties verbeterd kunnen worden.

Uit onderzoek van R. Cooper [19] naar zwaartepuntprojecties tijdens het rijden in een racerolstoel is gebleken dat het aangrijpingspunt van het gemeenschappelijke MMP van zeer groot belang is voor de algehele stabiliteit van de rolstoel en zijn wendbaarheid in de bochten. Gebleken is dat het qua stabiliteit gunstig is wanneer het ZP in de bochten rond de achteras van de rolstoel geprojecteerd wordt, terwijl het op de rechte stukken efficiënter blijkt te zijn wanneer het ZP meer richting voorwiel verplaatst wordt [19]. Deze functionele ZP-verplaatsing wordt gerealiseerd door middel van bewegingen van de bestuurder. Gezien het feit dat de doelgroep van dit project niet in staat is hun lichaamsmassa gericht te verplaatsen, worden de resultaten uit dit onderzoek niet gebruikt in het vervolg van het project. In bijlage 5 zijn inzichten over het ZP uit desbetreffend onderzoek [19] uitgebreider beschreven en afgebeeld.

3.4.3. Zwaartepunt kantelrolstoel

Tijdens het kantelen van een rolstoel verplaatst de positie van het gemeenschappelijke zwaartepunt in het sagittale vlak. Indien de posities van deze zwaartepunten bekend zijn, is het mogelijk een baan te construeren waarover het zwaartepunt zich verplaatst gedurende de verkanteling. Wanneer een rolstoel wordt afgesteld op basis van deze zwaartepuntbaan, wordt de kans op rolstoel-instabiliteit als gevolg van het verkantelen drastisch teruggedrongen [23].

In een onderzoek van Lemaire et al. [23] is er een krachtenplatform gebruikt voor het vaststellen van de ZP-baan tijdens het verkantelen van de rolstoel. Voor dit onderzoek zijn vijf proefpersonen onderzocht, waarbij er per persoon metingen uitgevoerd zijn in twee verschillende verkantelingstanden, namelijk: een standaard rughoek-verstelling en een rughoek van 116° t.o.v. horizontaal. In figuur 15 staat de meetsituatie weergegeven en in tabel 5 staan de specificaties van de symbolen uit de figuur en onderstaande formules uitgezet.

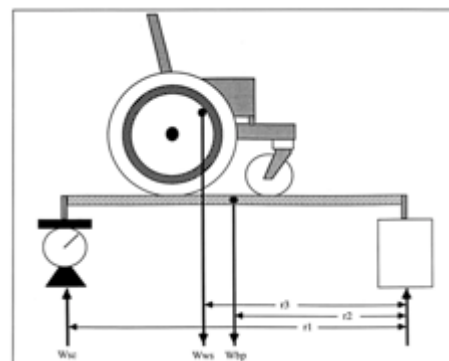
Voorafgaand aan de metingen zijn de volgende parameters bepaald: gewicht krachtenplatform (W_{bp}), zwaartepunt krachtenplatform, gewicht rolstoel plus cliënt (W_{ws}), lengte van voor- tot achteras rolstoel (wielbasis). Nadat de rolstoel plus cliënt op het platform geplaatst en vastgezet waren, werd de op de schaal aangegeven waarde afgelezen (W_{sc}) en zijn de waarden voor r_1 , r_2 en r_{rw} opgemeten. Om de onbekende parameters (r_3 en r_{rw}) te kunnen bepalen, zijn er berekeningen uitgevoerd met behulp van software. De volgende statische moment-vergelijking (1) is gebruikt voor de berekeningen (zie tabel 5):

$$\Sigma M_p = 0$$

$$r_3 W_{ws} + r_2 W_{bp} - r_1 W_{sc} = 0 \quad (1)$$

De enige onbekende uit vergelijking 1 (r_3) kon berekend worden. De afstand van de achteras tot de ZP-positie (R_{rw}) is vervolgens met vergelijking 2 (zie tabel 5):

$$R_{rw} = \left(r_1 - \left(\frac{r_1 W_{sc} - r_2 W_{bp}}{W_{ws}} \right) \right) - r_{rw} \quad (2)$$



Figuur 15: Meetsituatie ZP-bepaling kantelrolstoel-client systeem [23]

Tabel 5: Specificatie symbolen figuur/formule's

Symbol	Toelichting
W_{sc}	Aangegeven gewicht op schaal
W_{ws}	Gewicht rolstoel en patiënt
W_{bp}	Gewicht krachtenplatform
r_1	Afstand tussen 2 ophangingen
r_2	Afstand ophanging – ZP(krachtenplatform)
r_3	Afstand ophanging – ZP(rolstoel-client)
M_p	Moment rond ophanging
R_{rw}	Afstand achteras – ZP(rolstoel-client)
r_{rw}	Afstand ophanging – achteras

In tabel 6 staan de meetresultaten uitgezet [23] voor de standaard rughoek (seat up) en de vergrootte rughoek (seat back). Te zien is dat het zwaartepunt in alle gevallen meer richting achteras verplaatst wanneer de stoel meer naar achteren gekanteld wordt, maar dat de projectie in geen enkel geval achter de achteras terecht komt, waardoor elke onderzochte situatie veilig is [23].

Er wordt gesteld dat wanneer de wielbasis groter gemaakt wordt, de rolstoelstabiliteit en de achterwaartse verkanteling-mogelijkheden groter worden [23]. De kans op een zwaartepuntprojectie achter de achteras van de rolstoel vermindert immers enorm. Daarentegen vermindert de wendbaarheid, waardoor secundaire beperkingen kunnen ontstaan als gevolg van de oncomfortabel aandrijving. Een kleinere wielbasis beïnvloedt de rolstoelstabiliteit negatief, de mogelijke achterwaartse verkantelingshoek vermindert en de mobiliteit en wendbaarheid van de aandrijving verbeteren [23].

Er wordt geconcludeerd dat de beschreven onderzoeksmethode met behulp van een krachtenplatform zeer geschikt is voor het vaststellen van het gemeenschappelijke zwaartepunt van rolstoel en cliënt gedurende de verkanteling. Daarnaast wordt er gesteld dat de methode goed bruikbaar is voor zowel klinische- als wetenschappelijke doeleinden [23]. Wanneer de baan die het zwaartepunt aflegt van minimale- tot maximale verkanteling bekend is, wordt het mogelijk de rolstoel dusdanig aan te passen dat het zwaartepunt te allen tijden binnen het steunvlak (de wielbasis) valt en er per persoon een comfortabele situatie ontstaat waarbij de gewenste verkantelingstanden mogelijk zijn.

3.5. Literatuuronderzoek segment modellen

3.5.1. Bepaling segmentale parameters m.b.v. 3D-model

In een onderzoek van Davidson et al. uit 2008 [27] wordt er een nieuwe onderzoeksmethode geïntroduceerd voor het in kaart brengen van lichamelijke MMP's.

Methode

Voorafgaand aan de metingen worden er reflecterende markers rondom de ledematen en de gewrichten van de proefpersoon geplaatst. Er worden vier foto's geschoten van de proefpersoon (frontaal; dorsaal; sagittaal (2x)) met een digitale camera (4mega-pixel resolutie).

Met behulp van een relatief goedkoop 3D-modelleer programma (Lightwave 3D, NewTek Inc., San Antonio USA) en enkele vooraf opgemeten antropometrische parameters (lengte onder- en bovenarm; omvang pols, elleboog, onder- en bovenarm), wordt er een 3D geometrisch computermodel geconstrueerd, waarvan een voorbeeld is weergegeven in figuur 16. Met een Matlab programma zijn vervolgens de waarden voor de segmentale massa's, volumes en de segmentale MMP's berekend [27]. In figuur 17 is de berekende positie van het massamiddelpunt van de bovenarm weergegeven. Te zien is dat het MMP zich niet op de lijn tussen de bij het segment behorende gewrichten bevindt. De accuraatheid van het systeem neemt toe naarmate het aantal geconstrueerde polygonen per segment toeneemt (driehoekjes in figuur 17) en/of wanneer de resolutie van de camera verhoogd wordt. Ook een toename in het aantal camerabeelden per proefpersoon resulteert in meer accurate meetresultaten.

Conclusie

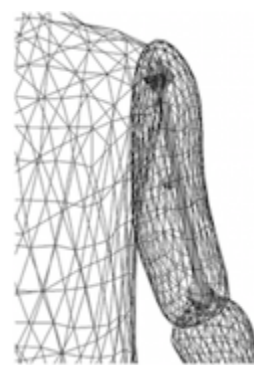
Gebleden is dat de onderzochte methode van Davidson et. al [27] grote voordelen heeft in vergelijking met gangbare fotogrammetrische en geometrische bepalingsmethoden [9,17,18]. Zo zorgt de integratie van het 3D modelleer-programma ervoor dat de uitvoering van het proces vergemakkelijkt en daarnaast zorgt het programma voor meer accurate bepalingen voor segmentale massa's en MMP's. Tegenwoordig zijn verschillende 3D modelleer programma's gebruiksvriendelijk en gemakkelijk verkrijgbaar voor particulieren. Daarnaast is het voor dit onderzoek gebruikte software programma reproduceerbaar met behulp van verschillende gangbare programmeer talen.

Tabel 6: Onderzoeksresultaten: gewicht rolstoel + client; afstand achteras – ZPprojectie

	Weight (kg)	Seat Up (cm)	Seat Back (cm)
Dummy	100.00	17.1	13.3
Subject 1	103.75	16.3	10.0
Subject 2	129.66	22.9	14.8
Subject 3	91.18	18.8	12.5
Subject 4	73.41	18.9	14.0
Subject 5	83.64	20.3	14.5



Figuur 16: Geometrisch 3D-model [27]



Figuur 17: Berekend MMP bovenarm [27]

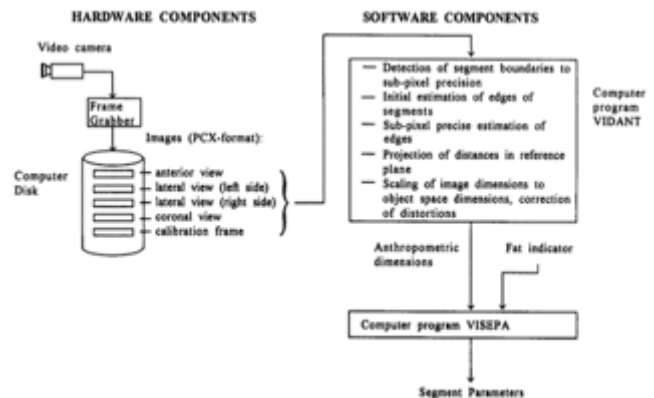
In tegenstelling tot andere onderzoeksmethodes, wordt er in dit onderzoek [27] beperkt gebruik gemaakt van antropometrische waarden. De waarden die gebruikt worden, dienen als referentiewaarden voor het te construeren 3D computermodel van de proefpersoon. Tevens is het systeem in staat asymmetrische lichaamspatronen duidelijk in kaart te brengen, waarbij de segmentale MMP's niet noodzakelijk op de lijn tussen de gewrichten van een segment hoeft te liggen. Concluderend wordt er gesteld dat de onderzoeksmethode voldoende betrouwbaar en mogelijk bruikbaar is voor het einddoel van dit project.

3.5.2. Bepaling segmentale parameters m.b.v. videoanalyse

In een technisch rapport van A. Baca uit 1996 [28] wordt er een onderzoekstechniek beschreven voor MMP-bepalingen. In figuur 18 staan de verschillende stappen uit desbetreffende onderzoeksmethode schematisch weergegeven [28].

Methode

Allereerst worden er vier video-opnamen gemaakt van de proefpersoon, waarna de videosignalen met behulp van een zogenaamde "frame grabber", worden omgezet in losse frames. Zodoende ontstaan er vier beelden van de proefpersoon, in vier verschillende lichaamshoudingen. De beelden worden gebruikt om antropometrische parameters te berekenen in het computerprogramma VIDANT. Op zijn beurt vormt de output uit VIDANT weer de input voor het programma VISEPA, waarna de segmentale parameters en MMP locaties van de proefpersoon exact achterhaald kunnen worden.



Figuur 18: Overzicht onderzoekstechniek (A. Baca [28])

Na afloop van het onderzoek zijn er 242 exacte antropometrische- en segmentale waarden per proefpersoon achterhaald, waarbij er geen gebruik gemaakt is van algemene of handmatig opgemeten antropometrische parameters. Een ander voordeel van het door A. Baca geïntroduceerde systeem [28] is dat er asymmetrische houdingen worden meegenomen in de bepalingen van de segmentalen MMP's, als gevolg van de vier verschillende aangenomen lichaamshoudingen.

Conclusie

De resultaten uit het onderzoek [28] zijn vergeleken met resultaten uit handmatige bepalingen van antropometrische waarden. Gebleken is dat de uitkomsten niet veel verschillen, waardoor er geconcludeerd is dat de door A. Baca geïntroduceerde techniek [28] nauwelijks betrouwbaarder is dan andere antropometrische onderzoeksmethodes. Daarentegen blijkt deze wel degelijk een verbetering te vormen qua gebruiksgemak, accuraatheid, benodigde tijd en kosten [28].

3.5.3. Bepaling gemeenschappelijk MMP m.b.v. 3D-SESC systeem

In deze paragraaf wordt een onderzoek van V. Bonnet et al. (2015) [29] besproken, waarin de functionaliteit en accuraatheid van een in 2009 door S. Cotton et al. geïntroduceerde onderzoeksmethode [31] opnieuw wordt onderzocht en geëvalueerd. Het systeem maakt gebruik van de zogenaamde "3D Statically Equivalent Serial Chain" (SESC) toepassing, waarvan het schematische werkingsprincipe staat weergegeven in figuur 19. Er worden geen antropometrische aannames gebruikt in de methode.



Figuur 19: Schematische weergave onderzoeksmethode "3D Statically Equivalent Serial Chain" [29]

Om de accuraatheid en bruikbaarheid van het SESC-systeem te evalueren, zijn er een aantal onderzoeksmethoden ingezet (krachtenplatform-, fotogrammetrische en antropometrische methoden) voor het meten en registreren van dezelfde condities, waarna de verschillen zijn vergeleken [29]. De metingen zijn uitgevoerd tijdens zowel statische houdingen als dynamische taken. Aangezien het voor de doelgroep van dit afstudeerproject vrijwel onmogelijk is om zelfstandig dynamische taken te verrichten, wordt er in deze paragraaf uitsluitend ingegaan op de bevindingen en resultaten op basis van statische uitgevoerde meetsituaties.

Methode

In het onderzoek van V. Bonnet et al. [29] zijn er metingen uitgevoerd op 12 gezonde proefpersonen. Er zijn 35 retro-flecterende markers geplaatst rondom de segmenten en gewrichten en met een (stereo)fotogrammetrisch systeem gebruikt (8 camera's, MX VICON) zijn de proefpersonen visueel in kaart

gebracht en de optredende krachten zijn geregistreerd met behulp van twee krachtenplatforms (OR6, AMTI). De proefpersonen zijn geïnstrueerd om 45 verschillende statische lichaamshoudingen aan te nemen met een duur van 5sec per houding. Het effect van een asymmetrische lichaamsbouw op de accuraatheid van de MMP-bepalingsmethoden, is onderzocht door extra gewichten te koppelen aan bepaalde segmenten [29].

In de eerste fase van het onderzoek (zie figuur 19, “calibration phase”) wordt de ruwe data verzameld, namelijk de (stereo)fotogrammetrische data en de dynamometer data (optredende krachten) [29]. Met behulp van deze data wordt uiteindelijk het gemeenschappelijke MMP van de proefpersonen achterhaald door uitsluitend gebruik te maken van kinematische waarden [29]. Met andere woorden, voor de datacollectie en -verwerking worden er tijdens dit onderzoek [29] geen directe antropometrische aannames gebruikt.

Dataverwerking

Voor de verwerking van de ruwe data wordt er een standaard (computer)model van het menselijk lichaam gebruikt, bestaande uit 13 afzonderlijke segmenten. Dit algemene segmentmodel wordt per proefpersoon gepersonaliseerd op basis van de data uit de eerste onderzoeksfase. De transformatie van de segmenten in het model worden onder anderen gerealiseerd met behulp van informatie over de optredende rotatie (A) en translatie (d) van twee segmenten ten opzichte van elkaar (=matrix T) [29]. Ook de geregistreerde parameters uit het SESC-systeem (r), de segmentale massa's (m) en het totale lichaamsgewicht (M) zijn waarden die bekend moeten zijn alvorens de locatie van het gemeenschappelijke MMP bepaald kan worden [29].

Tijdens de dataverwerking wordt er uitgegaan van het principe dat het menselijk lichaam bestaat uit een combinatie van vijf kinematische ketens. De MMP locaties hiervan worden achterhaald met behulp van kinematische vergelijkingen [29]. Deze MMP-locaties worden vervolgens ingevuld in een laatste vergelijking, waarmee de exacte 3D coördinaten van de gemeenschappelijke MMP-positie per proefpersoon berekend wordt.

In het artikel van V. Bonnet et al. [29] wordt er gesteld dat de horizontale positie van het MMP tijdens statische condities nagenoeg gelijk is aan de horizontale positie van het druk-middelpunt (DMP) van de proefpersoon [29]. Bij het meten van een statische conditie geldt er dus: $DMP_{x,y}(i) = MMP_{x,y}(i)$. In het beschreven onderzoek [29] is het krachtenplatform gebruikt voor het bepalen van het druk-middelpunt (DMP).

Resultaten

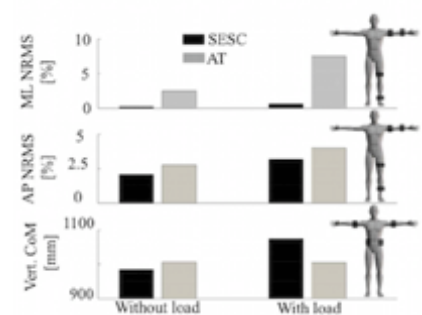
In onderstaande tabel 7 zijn de eindresultaten van de onderzochte bepalingsmethodes uitgezet. Enkel de resultaten ten aanzien van de statisch onderzochte condities worden nader beschouwd.

Tabel 7: Vergelijking verschillende MMP-metingen (SESC= Statically Equivalent Serial Chain MMP, AT=antropometrische tabel, CoP=DMP, ML=medial-lateraal, AP=anterior-posterior)

		RMS [mm]			NRMS [%]			CC			
		ML	AP	Vert.	ML	AP	Vert.	ML	AP	Vert.	
Two static postures	SESC/CoP	10 ± 7	10 ± 5	–	2.7 ± 1.9	3.2 ± 2.1	–	0.91 ± 0.11	0.90 ± 0.16	–	
	AT/CoP	29 ± 27	28 ± 21	–	7.4 ± 6.3	9.9 ± 8.5	–	0.77 ± 0.49	0.78 ± 0.61	–	
Squat	SESC/AT	10 ± 25	10 ± 22	13 ± 30	7.8 ± 13.4	20.4 ± 15.2	8.0 ± 14.5	0.80 ± 0.50	0.75 ± 0.65	0.60 ± 0.7	
	SESC/ZPZP	5 ± 2	10 ± 5	–	1.2 ± 0.7	4.4 ± 1.6	–	0.85 ± 0.30	0.84 ± 0.31	–	
Pelvis square	AT/ZPZP	7 ± 2	32 ± 12	–	1.8 ± 0.7	20.7 ± 5.2	–	0.85 ± 0.12	0.79 ± 0.30	–	
	SESC/ZPZP	7 ± 4	10 ± 4	–	2.1 ± 1.1	3.3 ± 2.1	–	0.99 ± 0.02	0.97 ± 0.02	–	
Pelvis eight	AT/ZPZP	11 ± 5	38 ± 6	–	3.0 ± 1.4	15.25 ± 4.3	–	0.98 ± 0.04	0.86 ± 0.01	–	
	SESC/ZPZP	10 ± 5	11 ± 7	–	2.8 ± 1.3	4.0 ± 2.2	–	0.98 ± 0.07	0.88 ± 0.13	–	
		AT/ZPZP ZPZP	16 ± 9	38 ± 9	–	3.0 ± 2.3	17.8 ± 5.4	–	0.96 ± 0.02	0.83 ± 0.16	–

Gebleken is dat de MMP en DMP posities erg weinig van elkaar verschillen tijdens de statische metingen [29]. Ook het verschil tussen de (genormaliseerde) standaardafwijking van de door SESC bepaalde MMP-positie en de DMP-positie is erg gering, namelijk ongeveer 4% in zowel het medio-laterale, als in het anterior-posterior vlak. De gemeten verschillen tussen de antropometrische- en DMP bepalingen zijn echter wel degelijk van grote orde, namelijk zo'n 13% in het medio-laterale vlak tot zelfs 17% in het anterior-posterior vlak.

In figuur 20 staan de resultaten weergegeven uit het onderzoek naar het effect van een asymmetrische lichaamsbouw op de accuraatheid van de onderzochte methodes [29]. De resultaten uit de antropometrische methode (AT) worden vergeleken met resultaten afkomstig uit de SESC methode. Uit de bovenste diagram van figuur 20 is op te maken dat de standaardafwijking van de AT-methode flink toeneemt in het medio-laterale vlak (ongeveer 5%), wanneer er lichamelijke asymmetrie wordt aangebracht in hetzelfde vlak. Daarentegen hebben de extra gewichten nagenoeg geen effect op de resultaten uit het SESC systeem (minder dan 1%). Wanneer dezelfde conditie wordt bekeken vanuit anterior-posterior aanzicht (zie figuur 20, middelste



Figuur 20: Vergelijking resultaten SESC en AT bij proefpersonen met extra gewicht [29]

diagram), dan wordt duidelijk dat de resultaten uit beide systemen een vrijwel identieke, maar geringe stijging qua standaardafwijking vertonen (minder dan 1%).

Conclusie

Er wordt geconcludeerd dat zowel het SESC-systeem als het krachtenplatform (voor de DMP lokalisatie) voldoende accuraat zijn voor het bepalen van de horizontale positie van het gemeenschappelijke MMP gedurende statische condities. Daarentegen blijkt de antropometrische methode aanzienlijk minder accuraat te zijn voor het meten van dezelfde condities.

Daarnaast lijkt de accuraatheid van de onderzoeksmethoden nauwelijks te veranderen wanneer er sprake is van een asymmetrische lichaamsbouw, terwijl dit bij antropometrische bepalingen wel degelijk het geval blijkt te zijn. Wanneer de asymmetrie zich echter niet in hetzelfde vlak bevindt, blijken beide onderzochte systemen ongeveer even accuraat. Aangezien er bij de doelgroep van dit project over het algemeen sprake is van een ernstig asymmetrische lichaamsbouw (in zowel het AT als het ML vlak), wordt er geconcludeerd dat een MMP-bepaling met behulp van (uitsluitend) antropometrische tabellen ongeschikt is. De SESC-methode wordt als voldoende accuraat en bruikbaar beschouwd voor MMP-bepalingen bij asymmetrische lichaamshoudingen.

Er kan geconcludeerd worden dat de toepassing van kinematische berekeningen het gebruik van antropometrische tabellen overbodig maakt, wat een positief effect heeft op het accuraat van het vaststellen van MMP's bij statische condities.

3.6. Conclusie theoretische onderbouwing

Met behulp van een krachtenplatform, een goed doordacht meetprotocol, geschikte software en juiste formules, kunnen segmentale massa's en MMP's zeer nauwkeurig en betrouwbaar worden gelokaliseerd. Het grote voordeel van krachtenplatform onderzoek is dat er gebruik gemaakt wordt van levende proefpersonen waarbij er real time bepalingen uitgevoerd kunnen worden, zonder gebruik te moeten maken van aannames. Onderzoeksmethode met behulp van een krachtenplatform zijn zeer betrouwbaar, nauwkeurig, snel en gebruiksvriendelijk gebleken in het vaststellen van deelmassa's en MMP's, terwijl de apparatuur relatief duur is en voor veel instanties blijkt implementatie van een dergelijke meetopstelling in de werkomgeving niet eenvoudig. Daarnaast zijn krachtenplatforms over het algemeen moeilijk te verplaatsen en de keuzes qua afmetingen zijn beperkt.

Geometrische- en fotogrammetrische bepalingsmethodes zijn minder geavanceerd, minder accuraat en verouderd gebleken in vergelijking met krachtenplatform methodes. In de praktijk worden zij echter nog regelmatig gebruikt voor het bepalen van lichamelijke MMP's. Proefpersonen worden hierbij gecategoriseerd op basis van geslacht, populatie, morfologie en leeftijd, waarna MMP-posities van specifieke houdingen bepaald worden met behulp van handmatig uitgevoerde lengte- en breedtemetingen en gemiddelde antropometrische aannames uit universele tabellen. Ondanks het feit dat de dood zorgt voor duidelijke veranderingen in de lichamelijke afmetingen van de mens, zijn antropometrische tabellen vaak ontstaan uit gedateerd onderzoek op kadavers. In tegenstelling tot geometrische methodes, maken fotogrammetrische methodes ook gebruik van visuele informatie van lichamelijke situaties. Alhoewel deze extra data de eindresultaten vermoedelijk betrouwbaarder maakt, zijn geometrische- en fotogrammetrische methodes beiden voldoende nauwkeurig gebleken, de toelaatbare meetfout van de vastgestelde MMP's bleek in beide gevallen niet te zijn overschreden. Tot slot wordt er geconcludeerd dat de onderzoeksmethodes relatief goedkoop zijn en daarnaast zeer eenvoudig te implementeren binnen verschillende soorten instanties.

Ook is er een wetenschappelijke studie bestudeerd over zwaartepunt bepalingen tijdens het verkantelen van kantelrolstoelen. Gebleken is dat de positie van het zwaartepunt verplaatst tijdens het kantelen in het sagittale vlak. Wanneer de rolstoel adequaat is afgesteld op basis van deze zwaartepuntbaan (projectie van minimale- tot maximale verkanteling), wordt de kans op rolstoel-instabiliteit als gevolg van de verkanteling drastisch teruggedrongen. Voor het in kaart brengen van de ZP-baan is er in desbetreffend onderzoek gebruik gemaakt van een krachtenplatform en met geschikte software en formules is de ZP-positie tijdens het verkantelen berekend. Logischerwijs verplaatst het zwaartepunt meer richting achteras wanneer de stoel naar achteren gekanteld wordt en bij het naar voren kantelen verschuift deze meer richting voorwielen. Ten aanzien van de rolstoelstabiliteit, veiligheid en verkantelingscomfort is het uiterst noodzakelijk gebleken dat het geprojecteerde ZP te allen tijden binnen het steunvlak (in dit geval de wielbasis) valt. Tevens wordt er gesteld dat een bredere wielbasis resulteert in een grotere stabiliteit en veiligheid maar een negatief effect heeft op de wendbaarheid en het rijcomfort van de rolstoel. Voor dit afstudeerproject is het uiterst belangrijk dat er naar juiste verhoudingen gezocht wordt tussen de wielbasis-breedte en de gewenste verkantelingsmogelijkheden, zodat het geprojecteerde ZP te allen tijden binnen het steunvlak valt.

Verder is er onderzocht in hoeverre de wetenschap beschikt over bruikbare systemen voor MMP-bepalingen op basis van menselijke segmentmodellen. Zodoende zijn er twee soortgelijke studies onderzocht, waarbij 3D-modelleringsprogramma's gebruikt worden om een geavanceerd geometrisch computermodel van

proefpersonen te construeren. Dergelijke modellen zijn gebaseerd op enkele handmatig bepaalde maten en vier digitale beelden van een lichaamshouding vanuit vier anatomische vlakken. Met behulp van een relatief eenvoudig softwareprogramma worden berekeningen uitgevoerd voor het inzichtelijk maken van segmentale en gemeenschappelijke MMP-locaties. Desbetreffende onderzoeksmethodes worden beschouwd als voldoende accuraat en betrouwbaar, relatief goedkoop, gemakkelijk verkrijgbaar en gebruiksvriendelijk. De systemen zijn tevens geschikt gebleken voor MMP-bepalingen bij mensen met afwijkende morfologiën en asymmetrische lichaamshoudingen. Naar aanleiding van de genoemde argumenten worden desbetreffende bepalingsmethodes bruikbaar geacht voor het einddoel van dit afstudeerproject.

Uit recent onderzoek is gebleken dat de mate van te gebruiken antropometrische aannames wel degelijk van invloed is op de accuraatheid van MMP-bepalingsmethodes. In 2015 is er een wetenschappelijke studie uitgevoerd waarin de accuraatheid van het onderzochte SESC-systeem, welke onafhankelijk is van antropometrische aannames, vergeleken is met resultaten uit twee andere onderzoeksmethodes (krachtenplatform- en antropometrische methodes). De voor het onderzoek benodigde input data wordt verzameld met behulp van een (stereo)fotogrammetrisch systeem en twee krachtenplatforms. Het te onderzoeken systeem gebruikt een dataverwerking waarin uitsluitend kinematische berekeningen worden uitgevoerd. De verschillen tussen de eindresultaten van de SESC- en krachtenplatform methoden zijn verwaarloosbaar gebleken. Ook een asymmetrische lichaamsbouw bleek nagenoeg geen invloed te hebben op de accuraatheid van beide onderzoeksmethodes, terwijl dit bij antropometrische bepalingen wel degelijk het geval blijkt te zijn. Ten opzichte van de andere methoden is de antropometrische onderzoeksmethode aanzienlijk minder accuraat gebleken voor MMP-bepalingen. Door toepassing van kinematische berekeningen in de dataverwerking, wordt de noodzaak om dergelijke aannames te gebruiken teruggedrongen, wat direct resulteert in een verhoogde accuraatheid van MMP-bepalingen tijdens statische meetcondities.

Verder is er gebleken dat de horizontale positie van het gemeenschappelijke MMP (geprojecteerd op de grond) tijdens statische condities, nagenoeg overeen komt met de horizontale positie van het gemeenschappelijke druk-middelpunt (DMP) van de proefpersoon [29]. Bij het meten van een statische conditie geldt er dus: $DMP_{x,y}(i) = MMP_{x,y}(i)$. Aangezien het te ontwerpen systeem hoofdzakelijk gebruikt wordt tijdens statische condities, wordt er geconcludeerd dat het beschreven principe mogelijk toegepast kan worden ten behoeve van het einddoel van dit project.

Al met al wordt er geconcludeerd dat iedere bestudeerde onderzoeksmethode in principe voldoende betrouwbaar is voor het bepalen van de 3D-locaties van segmentale- en gemeenschappelijke MMP's. Verder blijken de meeste methodes een zeer lichte mate van lichamelijke vervormingen te ondersteunen. Enkel krachtenplatforms zijn geschikt bevonden voor onderzoek op mensen met extreem afwijkende lichaamshoudingen, waaronder ook scoliose patiënten. Daar het overgrote gedeelte van de doelgroep voor dit project last heeft van ernstige lichamelijke vervormingen, is het noodzakelijk dat het te ontwerpen systeem informatie verwerkt en/of voldoende rekening kan houden met uiteenlopende morfologiën en afwijkende lichaamshoudingen. Er wordt geconcludeerd dat een krachtenplatform een geschikte optie is voor het realiseren van het einddoel van dit afstudeerproject. Verder blijken krachtenplatform-toepassingen over het algemeen gepaard te gaan met een erg gebruiksvriendelijke, relatief snelle en nauwkeurige wijze van meten, registreren en data verwerken.

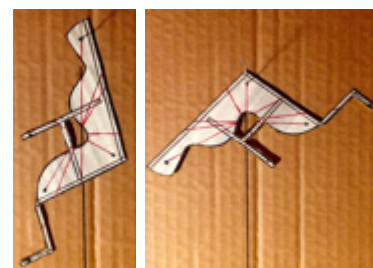
4. Praktijkonderzoek Pronto verkantelingsmechanisme

In dit hoofdstuk wordt er zowel praktijk- als literatuurgericht onderzoek gedaan naar zaken die bepalend zijn voor de Pronto rolstoelverkanteling. Zodoende worden de noodzakelijke parameters in kaart gebracht en de wijze waarop deze bepaald kunnen worden wordt uitgediept.

4.1. Relatie tussen posities ZP, DP en wielen

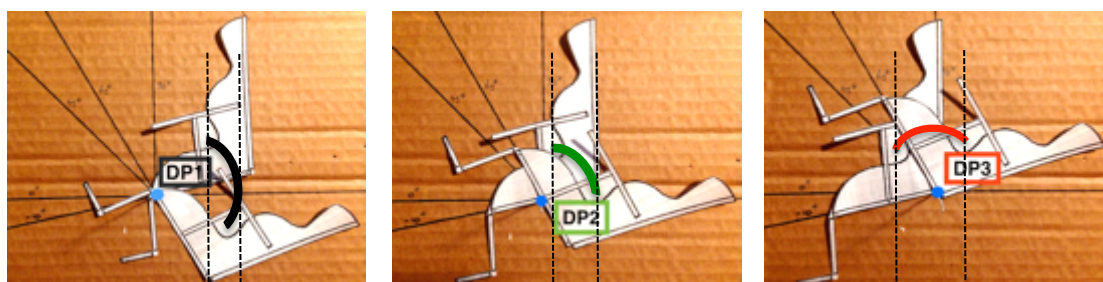
4.1.1. Positie zwaartepunt vs. draaipunt

Het gedrag van het zwaartepunt bij verschillende draaipunt-posities is op zeer schematische wijze geanalyseerd. Allereerst is de zogenaamde “geometrische ophangmethode” gebruikt om het ZP te bepalen van een sterk vereenvoudigde weergave van de Pronto (zie figuur 21). In de praktijk is het echter niet mogelijk de rolstoel plus cliënt op te hangen. Bovendien zijn de deelmassa’s in het sagittale rolstoelvlak in werkelijkheid niet homogeen verdeeld, terwijl dit volgens de ophangmethode wel gesuggereerd wordt. Om deze redenen is de voorgestelde methode ongeschikt voor de ZP-bepaling binnen dit project.



Figuur 21: Bepaling ZP Pronto bovenstel a.d.h.v. ophangmethode

Vervolgens is het ZP-traject gedurende de verkanteling geconstrueerd bij drie DP-posities. Er is gekeken naar de maximaal mogelijke verkantelingsrange van de Pronto, namelijk van -10° tot 60° . In figuur 22 zijn de drie situaties weergegeven (DP1, DP2, DP3), waarbij de ZP-trajecten zijn weergegeven van minimale- tot maximale hoekstand. De schematische Pronto staat in deze uiterste standen afgebeeld in de figuur.



Figuur 22: ZP-traject tijdens gehele verkantelingsrange (-10° - 60°) om 3 verschillende DP-posities (zwart=DP1 (voorzijde zitting); groen=DP2 (middenzitting); rood=DP3 (achterzijde zitting))

Te zien is dat ZP meer in hoogte verandert naarmate DP meer naar voren zit (DP1). De ZP-verplaatsing in horizontale richting is het grootst wanneer DP naar achteren geplaatst wordt (DP3). Het frame zelf transleert meer naarmate DP meer naar voren zit (DP1) en deze blijft nagenoeg op dezelfde plek wanneer DP zich ter hoogte van het zitting middelpunt bevindt (DP2), of meer richting de zitting hoek verplaatst (DP3).

Vanzelfsprekend is het niet wenselijk dat de zitting fors naar beneden of naar boven verplaatst tijdens de verkanteling (DP1). De inbouw moet in zo'n situatie immers onpraktisch veel verhoogd worden om te voorkomen dat het bovenstel tijdens de verkanteling gehinderd wordt door het onderstel. Daarnaast zorgt het grote moment van de maximale kantenstand ervoor dat er een oncomfortabel grote kracht geleverd moet worden tijdens het terug kanten van de rolstoel.

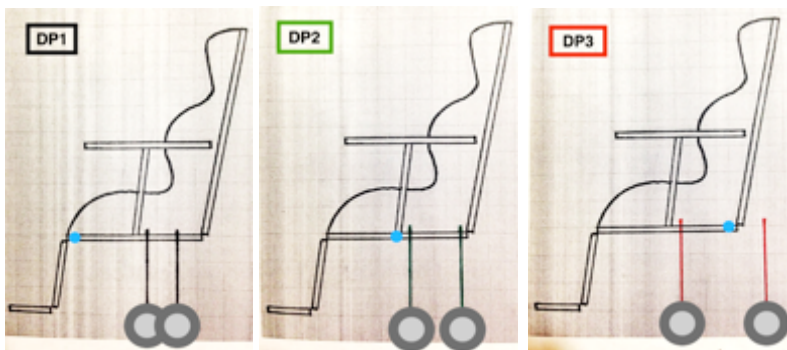
Uit de geometrische methode is gebleken dat het gunstig is wanneer het draaipunt zich rond de zittinghoek bevindt. Het orthese hoekpunt blijft in deze situatie nagenoeg op dezelfde plek, en het ZP balanceert als het ware in een boog over het DP waarbij de ZP-positie zich in de middelste verkantelingstand ongeveer boven het DP bevindt (zie figuur 22). Dit verschijnsel resulteert in een gunstig krachtenspel tijdens de verkanteling aangezien de te leveren kracht tijdens het voorover en achterover kanten van ongeveer gelijke grote is.

Binnen Exello wordt het verkantelingsdraaipunt (DP) over het algemeen op ongeveer de helft van de totale zittinglengte gepositioneerd. Gebleken is dat een dergelijke DP positionering in veel gevallen resulteert in een soepel en efficiënt gasveergedrag bij de noodzakelijke verkantelingsrange. In het vervolg van dit ontwerpproject wordt er uitgegaan dat de DP positie toelaatbaar is vanaf het middelpunt van de zitting tot aan het de rughoek (DP2-DP3). Tevens is het gunstig indien het ZP en DP op dezelfde verticaallijn liggen, in de middelste hoekstand van de verkanteling. Indien de juiste DP-positie achterhaald is, vormt deze positie tevens het uitgangspunt om andere noodzakelijke frameparameters te bepalen.

Het gedrag van het zwaartepunt gedurende de verkanteling is behalve van de positie van het draaipunt, tevens afhankelijk van persoonlijke- en technische eigenschappen van de cliënt, de orthese en de rolstoel. Relevante parameters omtrent deze eigenschappen dienen dan ook meegenomen te worden in de uiteindelijke ZP bepalingen. Op deze onderwerpen wordt dieper ingegaan in hoofdstuk 4.3.

4.1.2. Plaatsing wielen

Met behulp van de ZP-baan is het vervolgens mogelijk een geschikte plaatsing van de wielen te realiseren. In het geval van dit project wordt er gesteld dat de minimaal benodigde afstand tussen de voor- en achterwiel assen (=steunvlak) overeenkomt met de horizontale afstand tussen de ZP-posities van respectievelijk de minimale- en maximale verkantelingstand. Het verticale verloop van de ZP-baan heeft dus geen invloed op de afmetingen van het steunvlak en deze wordt in de vervolgfasen van het project dan ook buiten beschouwing gelaten. Ter verduidelijking is deze methode toegepast op de drie situaties uit figuur 22 en de bijbehorende wielpositioneringen staan geïllustreerd in figuur 23. De uitgevoerde berekeningen voor de plaatsbepalingen van de ZP-banen en de wielassen staan uitgezet in bijlage 6.

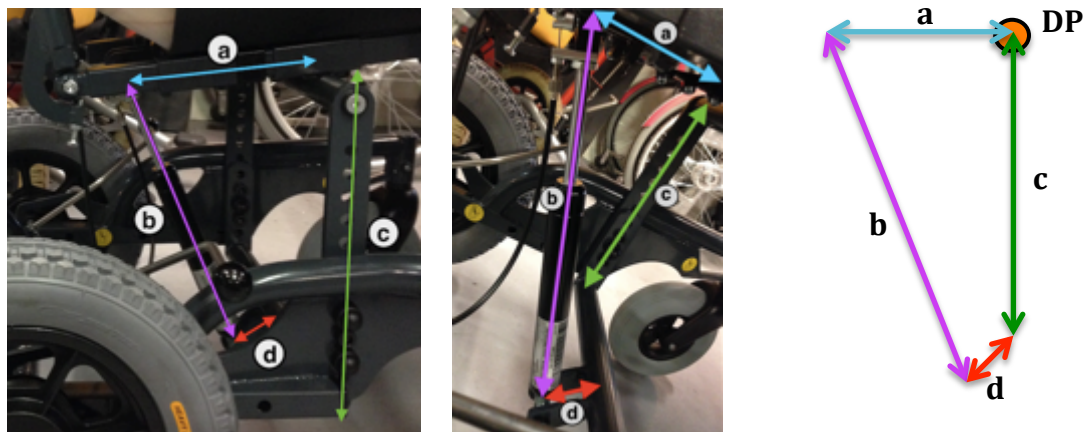


Figuur 23: Positie v.d. wielen bij DP1, DP2, DP3. Blauwe stippen = DP; Wielassen a.d.h.v. min. en max. verticale ZP-projecties over verkantelingsrange -10° - 60°

Uit de praktijk blijkt dat het veiliger is wanneer het minimale steunvlak wordt vergroot, zodat afwijkende bewegingen en/of toevoegingen van extra gewicht aan de rolstoel niet direct resulteren in een onstabiele en onveilige situatie. Om deze reden dient het steunvlak in een bepaalde mate vergroot te worden, afhankelijk van persoonlijke- en technische eigenschappen per situatie. De wijze waarop dit gebeurt in dit project wordt toegelicht in paragraaf 4.3.3.

4.2. Onderdelen verkantelingsmechanisme

De wijze waarop de rolstoelverkanteling verloopt is sterk afhankelijk van de afmetingen en de onderlinge positioneringen van onderdelen van het Pronto verkantelingsmechanisme. Aangezien de verkanteling uitsluitend plaatsvindt in het sagittale vlak, wordt er voor het verdere onderzoek enkel uitgegaan van de elementen in dit vlak, oftewel de onderdelen a, b, c en d (zie figuur 24). Het draaipunt van de verkanteling bevindt zich in punt "ac". In tabel 8 zijn relevante eigenschappen van de vier onderdelen uitgezet, namelijk de materialen, standaard afmetingen, onderlinge positioneringen en koppelingen. De tabel is tevens voorzien van technische tekeningen en er wordt vermeld welke lengte- en positievariaties er mogelijk zijn.



Figuur 24: Sagittale onderdelen van het Pronto verkantelingsmechanisme: 2x detailfoto, 1x schematische weergave. → Voor specificaties symbolen: zie tabel 8

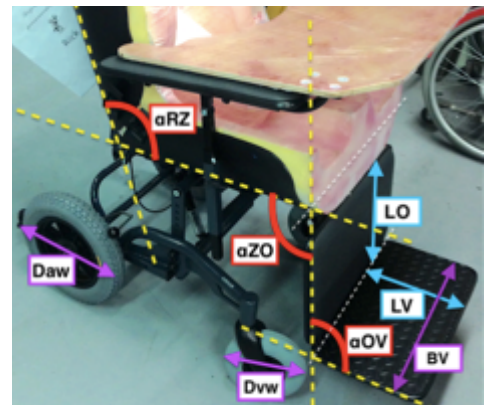
Tabel 8: Specificaties Pronto onderdelen die een rol spelen bij het verkanteling verloop

	Omschrijving	Positionering	Technische tekening	Standaard maten (mm)	Mogelijke maten (mm)
a	(Gedeelte van) Ligger Boven Bouw Afstand DP-gasveer	Verloop: variabel schuin Koppelingen: - α_{ab} : bovenzijde b (scharnier) - α_{ac} : bovenzijde c (a=scharnier; c=vast) → hoek ac = DP		Lengte: 440 Breedte: 25*25	-

4.3.1. Stap 1: Benodigde waarden uit cliënt-analyse

Allereerst worden persoonsgebonden parameters gedefinieerd op basis van de lichamelijke cliënt-situatie en specifieke rolstoel-eisen, en deze vormen belangrijke input voor de onderzoeksmethode. Het merendeel wordt vastgesteld tijdens de eerste cliënt analyse van Exello (zie hoofdstuk 2.4.1). In figuur 26 zijn de meest essentiële parameters uit stap 1 weergegeven en andere relevante aspecten zijn vermeldt in figuur 25 (zwarte symbolen) en in de resultatentabel (zie bijlage 7, eerste gedeelte).

NB. In bijlage 8 zijn uitsluitend de lichamelijke parameters uitgezet, welke mogelijk nodig zijn in een later stadium van dit project.



Figuur 26: Belangrijkste parameters stap 1 onderzoeksmethode (uit 1e cliënt-analyse). Toelichting symbolen: zie bijlage 7

4.3.2. Stap 2: Zwaartepuntbaan bepalen

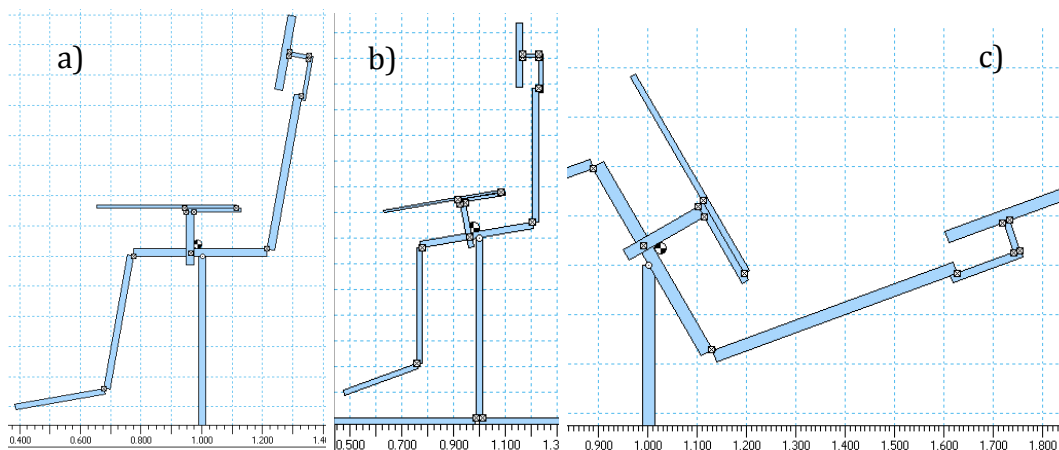
Tijdens stap twee dienen de op de grond geprojecteerde ZP-posities bepaald te worden in het sagittale vlak, tijdens drie statische verkantelings-situaties (α_{1min} ; α_{1mid} ; α_{1max}). De noodzakelijke parameters uit onderzoeksfase 2 zijn in het rood afgebeeld in figuur 25 en daarnaast gespecificeerd in de resultatentabel (zie bijlage 6). Om een juiste keuze te maken uit optionele ZP-bepalingsmethodes, zijn toepassingen van zowel een softwarematig segmentmodel, als een fysieke meetmethode met krachtenplatforms getest en beoordeeld.

4.3.2.1. Softwarematige bepaling: Interactive Physics

Met behulp van het softwarepakket “Interactive Physics” is er een sterk vereenvoudigd computermodel geconstrueerd van het sagittale Pronto bovenstel. In het model worden alle onderdelen gevormd, geplaatst en benoemd als losse segmenten. Voor het creëren van een realistisch en betrouwbaar model, is de beschikbare informatie over de lichamelijke en technische situatie echter veel te beperkt. Het model is dan ook hoofdzakelijk geconstrueerd op basis van aannames.

De ZP-baan is bepaald met simulaties van drie statische condities (zie figuur 27):

- Conditie 1: Zitting in de middelste verkantelingstand zetten; programma runnen; ZP-positie wordt zichtbaar als zwart-wit balletje (figuur 27a)
- DP-positie: DP verplaatsen over de “zittinglengte” tot deze zich op dezelfde verticaallijn bevindt als het gelokaliseerde ZP van conditie 1
- Conditie 2-3: Zitting in respectievelijk de minimale- (figuur 27b) en maximale (figuur 27c) verkantelingstand zetten; programma runnen; ZP-posities worden zichtbaar



Figuur 27: ZP-bepaling a.d.h.v. Interactive Physics; ZP=zwart-wit balletje. a=mid. verkanteling (25°); b=min. verkanteling (-10°); c=max. verkanteling (60°)

Conclusie

Het is niet mogelijk gebleken een realistisch Pronto IP-model te creëren, laat staan een betrouwbare ZP-bepaling uit te voeren. De benodigde parameters zijn beperkt beschikbaar bij Exello, en daarnaast zijn er nauwelijks parameters vastgesteld in deze beginfase van de onderzoeksmethode. Uitstellen van ZP-bepalingen is geen optie. Omdat ZP-projecties van grote invloed zijn op het verkantelingsverloop en de rolstoelstabiliteit, dienen zij immers als uitgangspunt te fungeren in het vervolg van het onderzoek.

Verder gaat IP er standaard van uit dat alle deelmassa's homogeen verdeeld zijn, terwijl dit in werkelijkheid absoluut niet het geval is. Het aanpassen van de onderdelen is mogelijk in IP, maar tevens erg tijdrovende. Bovendien is het niet mogelijk gebleken bepaalde vorm- en materiaalwijzigingen door te voeren, zonder dat onderlinge verbindingen en posities tussen onderdelen verloren gingen.

Er wordt geconcludeerd dat de software Interactive Physics onvoldoende geschikt en bruikbaar is voor het vaststellen van exacte ZP-posities gedurende de rolstoelverkanteling.

4.3.2.2. Bepaling a.d.h.v. meetsysteem: krachtenplatforms

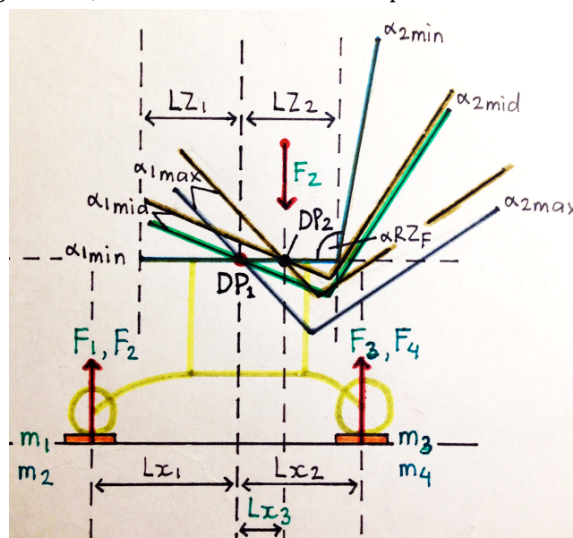
Personenweegschalen kunnen toegepast worden als krachtenplatforms. Alhoewel deze aanzienlijk goedkoper en eenvoudiger te bedienen zijn, blijven zij qua accuraatheid achter op krachtenplatforms. In deze paragraaf wordt onderzocht in hoeverre een fysieke meetopstelling met weegschalen geschikt is voor de ZP-bepalingen van dit project.

Opbouw meetopstelling

Figuur 28 vormt een schematische weergave van de Pronto meetopstelling van dit project. De fysieke meetopstelling moet zoveel mogelijk lijken op de echte Pronto, zodat de ZP-baan van de opstelling overeen komt met de uiteindelijke situatie. Daarom moet de meetopstelling voornamelijk uit originele Pronto-onderdelen bestaan. Daarnaast moeten er uiteenlopende verstelmogelijkheden worden aangebracht, zodat de opstelling bruikbaar is voor de gehele doelgroep. In de ontwerp- en realisatiefase (zie hoofdstukken 6 en 7) wordt er dieper ingegaan op deze onderwerpen.

Er is gekozen om gebruik te maken van vier weegschalen, welke in de vier hoekpunten van de meetopstelling worden geplaatst. Deze moeten stevig verankerd worden met zowel het frame van de opstelling als de ondergrond, zodat de opstelling in geen geval los kan komen en een immer veilige en stabiele situatie gegarandeerd is. Met het vierkante meetoppervlak kunnen niet alleen de massaverdelingen tijdens de verkanteling gemeten worden in het sagittale vlak, ook eventuele zijwaartse afwijkingen in de massaverdelingen (frontaal/dorsaal vlak) worden geregistreerd.

Het DP van de meetopstelling (DP_1) is ongeveer halverwege de totale zittinglengte gesitueerd (LZ_1 ; LZ_2). Volgens de rolstoelbouwers van Exello zou dit immers een gangbare en geschikte positie zijn voor de meeste rolstoelen, dus voor de meetopstelling is dit een prima uitgangspunt. Aan het einde van deze paragraaf wordt de noodzakelijke DP-positie per persoon bepaald aan de hand van de ZP-baan van de verkanteling. Ter verduidelijking zijn alle noodzakelijke parameters van de onderzoeksmethode uitgezet in tabel 9, op de volgorde waarin zij bepaald dienen te worden per onderzoeksstap. In hoofdstuk 6.4 wordt desbetreffende methode nader uitgediept en toegelicht.



Figuur 28: Pronto meetopstelling 4 weegschalen (m_1 -4): ZP-bepaling tijdens verkanteling. DP_1 =standaard positie meetopstelling; DP_2 = noodzakelijke positie p.p. (specificaties symbolen: zie bijlage 7)

Tabel 9: Volgorde bepaling parameters, Pronto onderzoeksmethode per stap (specificaties: zie fig. 28/bijlage 7)

Stap 1	Stap 2	Stap 3	Stap 4	Stap 5
1	α_{1mid} ; α_{1min} ; α_{1max}	DP_1	FZ_{min} ; FZ_{max}	ZHt
2	α_{RZ_f}	LZ_1 ; LZ_2	Lx_{3min} ; Lx_{3max}	La
3		m_1 ; m_2 ; m_3 ; m_4	B_{VW} ; B_{AW}	Ld
4		Lx_1 ; Lx_2		Lb
5		FZ_{mid}		α_{ac}
6		Lx_{3mid}		
7		DP_2		
8		LZ_{1f} ; LZ_{2f}		
9		Lx_{1f} ; Lx_{2f}		

Mogelijke beperkingen meetopstelling

De individueel bepaalde ZP-posities van de verkanteling vormen het eerste en meest cruciale uitgangspunt voor het bepalen van alle noodzakelijke rolstoelparameters. Het is dan ook erg belangrijk dat deze baan op volstrekt correcte wijze verkregen wordt, maar een aantal aspecten zijn mogelijkserwijs van invloed op de betrouwbaarheid van de ZP-bepaling.

Op de eerste plaats dient de plaatsing van de weegschalen heroverwogen te worden. Figuur 28 suggereert dat $Lx1_F = B_{VW}$ en $Lx2_F = B_{AW}$, en tijdens het verdere onderzoek is er ook uitgegaan van deze situatie. In de definitieve meetopstelling moet dit veranderd worden om een optimale betrouwbaarheid van de meetresultaten te kunnen garanderen.

Verder dient onderzocht te worden welke effecten de vaste posities van DP_1 en (de onderdelen van) het verkantelingsmechanisme hebben op de kwaliteit van de ZP-bepalingen. De ZP-posities uit de meetopstelling worden immers gebruikt om de definitieve DP-positie (DP_2) en de samenstelling van het verkantelingsmechanisme te berekenen. Maar daarbij moet beargumenteerd worden of de ZP-baan al dan niet veranderd als gevolg van deze DP-verplaatsing. Indien dit het geval blijkt te zijn, moet er beredeneerd worden of het ZP-traject dan nog wel betrouwbaar en bruikbaar is voor het berekenen van de overige rolstoelparameters.

Aangezien deze inzichten pas verkregen zijn in de laatste fase van de afstudeerperiode, wordt er hiermee geen rekening gehouden in het vervolgonderzoek. In de discussie (zie hoofdstuk 9) worden de mogelijk nadelige eigenschappen van de meetopstelling nader beschouwd. Hieruit is er geconcludeerd dat de afstand tussen de weegschalen in bepaalde mate vergroot moet worden in de definitieve meetopstelling. De meetopstelling zelf is daarentegen voldoende betrouwbaar en geschikt gebleken voor het uitvoeren van de ZP-bepalingen voor dit project.

Datacollecte en dataverwerking

De eerste frameverstellingen worden aangebracht op basis van de orthesevorm en de proefpersoon zelf vormt het uitgangspunt voor de secundaire en definitieve rolstoelverstelling. In totaal worden er drie statische condities gemeten van de meetopstelling, orthese en cliënt, namelijk in respectievelijk $\alpha 1_{mid}$, $\alpha 1_{min}$, $\alpha 1_{max}$ (zie figuur 28 en/of bijlage 7).

Het evenwicht tijdens de statische metingen wordt gedefinieerd in momentenvergelijkingen, gezien vanuit sagittaal aanzicht. Eventuele krachten in DP en de wrijvingskrachten worden hierin buiten beschouwing gelaten. De verticale krachten ($F1_{mid}$; $F2_{mid}$; Fz_{mid}) worden berekend met onderstaande formules 1 t/m 3, waarna de waarde voor $Lx3$ verkregen wordt uit vergelijking 4 (zie figuur 28 en bijlage 7).

$$\begin{array}{lll}
 F1_{mid} = (m1_{mid} + m2_{mid}) * g & (1) & \Sigma M = 0 \quad (-CW) \\
 F2_{mid} = (m3_{mid} + m4_{mid}) * g & (2) & (-F1_{mid} * Lx1) + (F2_{mid} * Lx2) - (Fz_{mid} * Lx3) = 0 \\
 Fz_{mid} = F1_{mid} + F2_{mid} & (3) & Lx3_{mid} = \frac{(F2_{mid} * Lx2) - (F1_{mid} * Lx1)}{Fz_{mid}} \quad (4)
 \end{array}$$

Voor een optimaal verkantelingsverloop, gasveergebruik en krachtlevering is het gunstig gebleken het DP onder het ZP van de middelste verkantelingstand te plaatsen. DP wordt zodoende $Lx3_{mid}$ mm verplaatst over Lx , waardoor de parameters $LZ1$, $LZ2$, $Lx1$ en $Lx2$ eveneens wijzigen (zie figuur 25 en bijlage 7). Tot slot worden de uiterste ZP-posities ($Lx3_{min}$; $Lx3_{max}$) berekend met bovenstaande rekenregels 1 t/m 4, gebruikt makend van de vernieuwde DP en lengteparameters.

Conclusie

De vormgeving van de fysieke meetopstelling komt sterk overeen met de oorspronkelijke situatie van de cliënt, waardoor er een vertrouwd comfort heerst gedurende de metingen en de opstelling relatief eenvoudig en snel bediend kan worden. De fysieke meetopstelling wordt ingesteld met de cliënt als uitgangspunt. Client-specifieke bewegingen, massaverdelingen, beperkingen en cetera zijn zodoende opgenomen in de situatie, waardoor de meetresultaten als zeer betrouwbaar beschouwd wordt. Weegschalen zijn relatief goedkoop, gebruiksvriendelijk en eenvoudig en snel te bedienen en naar verwachting zijn de weegschalen voldoende accuraat voor de meetdoelen van dit project. Met behulp van bepaalde framelengtes en de output van de weegschalen, worden een aantal momentenvergelijking opgelost om de horizontale ZP-posities te bepalen in verschillende verkantelingstanden. Het hiervoor benodigde aantal parameters is gering en de meeste waarden zijn gemakkelijk op te meten in de meetopstelling. Concluderend wordt er gesteld dat het ontwikkelde fysieke meetsysteem voldoende functioneel en betrouwbaar is voor het vaststellen van horizontale ZP-posities gedurende de verkanteling.

4.3.2.3. Voordelen en nadelen ZP-bepalingsmethodes

In tegenstelling tot de onderzochte softwarematige methode met Interactive Physics, blijkt de ontwikkelde fysieke weegschalen-meetopstelling wel degelijk betrouwbaar en toepasbaar te zijn voor de doelstelling. In de tabel van bijlage 9 staan belangrijke voor- en nadelen van beide methodes uitgezet. Er is gekozen om de fysieke meetopstelling uit hoofdstuk 4.3.2.2 verder uit te werken en toe te voegen aan de definitieve onderzoeksmethode voor dit project.

4.3.3. Stap 3: Plaatsing wielen

De voor- en achterwiel assen worden in eerste instantie gepositioneerd op de verticale lijn uit respectievelijk de Fz_{min} en Fz_{max} uit de vorige onderzoekstap (zie figuur 28). De minimaal benodigde afstand tussen beiden (=steunvlak in zijaanzicht) is hierbij gelijk aan de horizontale afstand tussen de uiterste ZP-posities van de verkanteling. Onderstaande vergelijkingen zijn van toepassing op desbetreffende situatie. De parameters uit deze fase zijn rood afgebeeld in figuur 25 en worden gespecificeerd en gedocumenteerd in de resultatentabel (zie bijlage 7).

$$B_{VWmin} = \text{afstand DP - voorwielas} = Lx3_{min} \quad (5)$$

$$B_{VWmax} = \text{afstand DP - achterwielas} = Lx3_{max} \quad (6)$$

$$\text{Minimale breedte steunvlak} = Lx3_{min} - Lx3_{max} \quad (7)$$

Theoretisch gezien is de steunvlakbreedte van de geschetste situatie precies veilig genoeg. Wanneer er minimale houdings- of massaveranderingen optreden, is er echter een reële kans op een ZP-projectie buiten het steunvlak. Daarnaast is er een onnauwkeurigheid geconstateerd in de uitgevoerde $Lx3_{min-max}$ bepalingen (zie stap 2). In de momentenvergelijkingen (4) zijn namelijk de gewijzigde moment armen ($Lx1_F$; $Lx2_F$) gebruikt, in combinatie met de massa groottes op basis van de oorspronkelijke, ongewijzigde situatie. De vergelijkingen zijn zodoende uit evenwicht, het berekende ZP-traject wordt minder betrouwbaar en de kans op een onveilige situatie neemt toe. Om desbetreffende redenen is er geconcludeerd dat de minimale steunvlakbreedte (7) in een bepaalde mate vergroot dient te worden.

Vergroten steunvlak

De wijzen waarop de wielbasis vergroot kan worden zijn uiteenlopend en afhankelijk van zaken als massaverdeling, bewegingspatroon en rijgedrag. Binnen dit project wordt het steunvlak standaard vergroot in het sagittale vlak, door een volledige wieldiameter toe te voegen aan weerszijden van dit steunvlak. Deze manier is absoluut niet vaststaand en definitief in de onderzoeksmethode van dit project, maar wordt gezien als een eerste algemene veiligheidsmarge. Om uiteenlopende belastingen te kunnen ondervangen, moet er ook rekening gehouden worden met persoonlijke eigenschappen en ervaringen van de cliënt, verzorgers en/of specialisten. De technische ervaring en inzicht van Exello's Pronto-specialisten is in dezen zeer zinvol, en de definitieve besluitvorming aangaande het steunvlak wordt dan ook aan hen toevertrouwd.

4.3.4. Stap 4: Berekening maatvoering verkanteling onderdelen

In stap 4 van de onderzoeksmethode worden de waarden van vier parameters van het verkantelingsmechanisme berekend, namelijk L_b , L_c , L_d , α_{ac} , met reeds bepaalde parameters als input. In figuur 25 (rechtsonder) zijn parameters voor deze onderzoeksfase bruin gekleurd en de specificaties van de symbolen zijn vermeld in de resultatentabel van bijlage 7.

Zithoogte (ZHt)

De noodzakelijke Pronto zithoogte wordt berekend vanuit de laagst mogelijke positie van de voetenplank: de minimale verkantelingstand. ZHt bestaat maximaal uit 3 hoogtematen (ZH1; ZH2; ZH3) en bepaalde hoeken zijn bepalen voor de toe te passen berekeningen (zie figuur 25). In tabel 10 zijn de drie mogelijke formule-sets uitgezet, waarbij de juiste kolom wordt geselecteerd met waardes voor $\alpha1_{min}$ en α_b .

Indien $\alpha1_{min} > 0$, dan ligt de kniehoek hoger dan DP en veranderen de ZH2- berekeningen. ZH1 bevindt zich in dit geval boven DP en speelt dus geen rol in de totale hoogtebepaling (tabel 10: 2^e kolom). Wanneer $\alpha_b < 0$, dan staat de voetenplank in een bepaalde hoek omhoog ten opzichte van de grond, waardoor α_{OV} het laagste punt van de voetsteun is geworden. ZHt wordt nu bepaald uit ZH1 en ZH2 (tabel 10: 3^e kolom).

Tabel 10: Formules zithoogte (ZHt) bepaling: te kiezen kolom afhankelijk van situatie

Indien: $\alpha1_{min} < 0$	Indien: $\alpha1_{min} > 0$ en $\alpha_b < 0$	Indien: $\alpha_b > 0$
$\alpha_a = \alpha_{ZO} + \alpha1_{min} - 90$ $\alpha_b = \alpha_{VO} - \alpha_a - 90$ $ZH1 = LZ1_F * \sin(\alpha1_{min})$ $ZH2 = LO * \cos(\alpha_a)$ $ZH3 = LV * \sin(\alpha_b)$ $ZHt = ZH1 + ZH2 + ZH3$	$\alpha_a = \alpha_{ZO} + \alpha1_{min} - 90$ $\alpha_b = 90 - \alpha_{VO} + \alpha_a$ $ZH1 = LZ1_F * \sin(\alpha1_{min})$ $ZH2 = LO_F * \cos(\alpha_a) - ZH1$ $ZH3 = LV_F * \sin(-\alpha_b)$ $ZHt = ZH2 + ZH3$	$ZH1 = LZ1_F * \sin(\alpha1_{min})$ $ZH2 = LO_F * \cos(\alpha_a) - ZH1$ $ZHt = ZH2$

Onderdeel Lc

Onderdeel "Lc" (zie figuur 25, rechtsonder) heeft een eenmalig te wijzigen lengte van maximaal 280mm, welke in stappen van 20mm verkort kan worden. Lc en ZHt zijn ongeveer gelijk qua lengte. Lc wordt bepaald door de berekende ZHt-waarde naar boven af te ronden, tot de eerstvolgende veelvoud van 20mm.

De bovenzijde van Lc en een uiteinde van La vormen samen het verkantelingsdraaipunt. Lc verloopt vanuit DP in zuiver verticale richting naar beneden, en is vastgezet ter hoogte van de achterwielas, waarna rotatie en translatie aan beide uiteinden onmogelijk zijn geworden.

Onderdeel Ld

Onderdeel Ld heeft een standaard lengte van 63mm, zijn concave uiteinde wordt onlosmakelijk gekoppeld met de onderzijde van Lc en het convexe uiteinde is verbonden met Lb (de gasveer). Alvorens Lc en Ld aan elkaar gelast worden, kan de hoekgrote van α_{cd} vrij gekozen worden binnen een cirkel van ongeveer 270°. Deze hoek wordt benaderd in de vijfde stap van de onderzoeksmethode.

Onderdeel Lb

Onderdeel Lb, de gasveer, is toepasbaar in twee soorten (zie tabel 8). Voor de Pronto wordt er echter vrijwel altijd gekozen voor de 300N-120mm gasveer, waarvan eveneens uitgegaan wordt in het vervolg van dit project. Lb heeft een maximale lengte van 330mm en zijn minimale lengte bedraagt 210mm. Lb kan in beperkte mate blijven roteren om α_{ab} en α_{bd} wordt vastgezet in een eenmalig te kiezen hoek (zie figuur 25).

Bij het voorover kantelen verkleint de verkantelinghoek ten opzichte van horizontaal, doordat de zittinghoek (α_{RZ}) omhoog geduwd wordt door de gasveer. Met andere woorden: naarmate Lb verlengt, wordt de verkantelinghoek kleiner, en andersom neemt de verkantelingshoek toe door het verkorten van Lb. Voor een efficiënt gasveer-gebruik, een optimaal krachten- en momentenspel en een comfortabele en schokloze verkantelingsverloop, wordt er gestreefd naar het benutten van de volledige slaglengte tijdens de volledige verkantelingrange, waarbij er geldt:

$$\alpha_{1min} \rightarrow Lb = \text{maximaal} = 330\text{mm} \quad (8)$$

$$\alpha_{1mid} \rightarrow Lb = \text{middel} = 270\text{mm} \quad (9)$$

$$\alpha_{1max} \rightarrow Lb = \text{minimaal} = 210\text{mm} \quad (10)$$

Hoek a-c

La is geen los onderdeel van het verkantelingsmechanisme, maar wordt gedefinieerd als een bepaalde lengte van het frame-element "Ligger boven Bouw" (zie figuur 25 en tabel 8). De uiteinden van La zijn gesitueerd in de hoekpunten α_{ab} en α_{ac} (=DP). Lc staat vast in zuiver verticale stand, terwijl La roteert in DP als direct gevolg van de rolstoelverkanteling. Voor de onderzoeksmethode is α_{ac} van belang tijdens de minimale-, middelste- en maximale verkantelingstand. Er geldt:

$$\alpha_{acmin} = 90^\circ - \alpha_{1min} \quad (11)$$

$$\alpha_{acmid} = 90^\circ - \alpha_{1mid} \quad (12)$$

$$\alpha_{acmax} = 90^\circ - \alpha_{1max} \quad (13)$$

4.3.5. Stap 5: Schaalmodel verkantelingsmechanisme

In de laatste stap van de onderzoeksmethode zijn vier van de acht parameters van het verkantelingsstelsel nog onbekend (zie figuur 25, paarse symbolen). Omdat zij niet wiskundig berekend kunnen worden, is er gezocht naar manieren om de waarden zo goed mogelijk te schatten of benaderen. Zodoende is er een schaalmodel vervaardigd van het verkantelingsmechanisme, waarin de vier bekenden de input vormen voor het simuleren van optionele onderdelenconstructies.

De benaderingsmethode wordt toegelicht aan de hand van twee extreme Pronto voorbeelden en de algemene uitleg bij het schaalmodel wordt vermeldt in tabel 11.

Tabel 11: Bediening schaalmodel: benadering laatste onbekenden verkantelingsmechanisme

1 Algemene bediening simulatiemodel:
Parameters Lb, α_{bd} en α_{cd} zijn te wijzigen door het knopje in α_{bd} te verschuiven in de cirkelvormige rails; La, α_{ac} en α_{ab} zijn verstelbaar door onderdeel a te roteren in DP
2 Lc instellen op het schaalmodel:
Verplaats de gele schuif in verticale richting, totdat de juiste LC-waarde zichtbaar wordt in het venster
3 Positiebepaling onderdeel Lb:
Roteer/transleer Lb en zoek naar situaties waarin de α_{1min} -lijn zichtbaar is door het bovenste venstertje van Lb (min), en de α_{1max} -lijn te zien is in het onderste schermje van Lb (max). De α_{1max} -lijn moet zo dicht mogelijk in de buurt liggen van het middelste venstertje van Lb

(mid).

→ Indien geschikte positie gevonden: vastzetten op schaalmodel

4 Positiebepaling onderdeel La:

Roteer La in DP en positioneer deze dusdanig dat zijn middellijn zichtbaar is door het bovenste schermje van Lb (min)

5 Collecteren + documenteren parameters uit schaalmodel:

Parameters Lc, La, Lb, α_{cd} en α_{ac} zijn direct af te lezen uit het schaalmodel. Parameters α_{bd} en α_{ab} moeten handmatig opgemeten worden m.b.v. een geo-driehoek. → optionele verkantelingsmechanismen documenteren (resultatentabel bijlage 7)

Voorbeeldsimulatie 1: Extreem korte Lc

Aan de “bekende” parameters van het verkantelingsmechanisme zijn waarden toegekend, welke zijn uitgezet in nevenstaande tabel 12. De situatie uit dit voorbeeld heeft is uiterst gangbare en veel voorkomende verkantelingsrange, terwijl Lc een extreem lage waarde heeft.

Het schaalmodel is ingesteld aan de hand van de toelichting uit tabel 11 en de inputwaarden. Bij een Lc-waarde van 160mm is gebleken dat $\alpha_{1\max}$ enkel behaald kan worden wanneer deze niet groter is dan 35° , wat wel het geval is in dit voorbeeld. Er kan geen geschikt verkantelingsstelsel gesimuleerd worden bij deze situatie en in figuur 29 (links) is de minst slechte simulatie van het schaalmodel weergegeven. Het gebruiken van een kleinere gasveer en het verlengen van Lc zijn hiervoor mogelijke oplossingen. Zodoende is Lc stapsgewijs verlengt in het schaalmodel en in figuur 29 (rechts) is het eerste optie voor deze situatie weergegeven. Er kan dus gesteld worden dat een minimale Lc-lengte van 200mm gewenst is bij de gasveer uit dit project.

Tabel 12: Input voorbeeldsimulaties 1 en 2

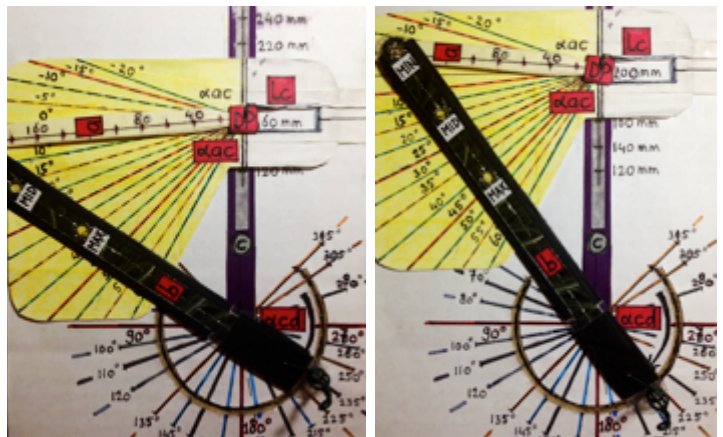
Input VB1	Input VB2
Lc = 160	Lc = 240
Ld = 63	Ld = 63
Lb _{min} = 330	Lb _{min} = 330
Lb _{mid} = 270	Lb _{mid} = 270
Lb _{max} = 210	Lb _{max} = 210
$\alpha_{1\min}$ = -5°	$\alpha_{1\min}$ = -10°
$\alpha_{1\text{mid}}$ = 20°	$\alpha_{1\text{mid}}$ = 25°
$\alpha_{1\max}$ = 45°	$\alpha_{1\max}$ = 60°

Voorbeeldsimulatie 2: Maximale verkantelingsrange

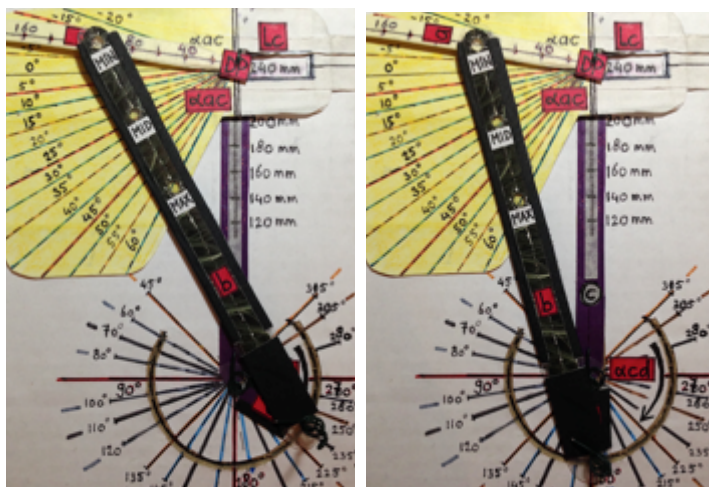
De maximaal mogelijke verkantelingsrange van de Pronto wordt onderzocht in dit eerste voorbeeld. Dergelijke extreme situaties komen in de praktijk nagenoeg nooit voor. Met behulp van de inputwaarden (zie tabel 12, VB2) en het schaalmodel, zijn er twee optionele verkantelingsmechanismen gesimuleerd voor desbetreffende situatie (zie figuur 30).

In beide situaties wordt de volledige gasveerlengte optimaal benut, de vergelijkingen 8, 9 en 10 (zie hoofdstuk 4.3.4) zijn immers nagenoeg geheel van toepassing. Verder zorgt het verschil in α_{cd} in beide situaties voor de zichtbaar andere gasveerpositie. Ten behoeve van een optimale krachtlevering in de gasveer, is een verticaal verloop gunstiger dan een schuin verloop. Bovendien neemt de mate van slijtage en optredende wringingsmomenten in bepaalde onderdelen toe wanneer Lb en Lc elkaar kruisen. Kortom, er wordt gesteld dat optie 2 (zie figuur 30 rechts) het meest geschikt is voor de situatie uit simulatievoorbeeld 1. De verkantelingsrange heeft in dit geval geen duidelijke problemen opgeleverd aangaande de rolstoelafstelling, wat verklaard wordt door de relatief grote waarde voor Lc.

Op basis van de in deze paragraaf uitgevoerde simulaties voor het uiteindelijke verkantelingsmechanisme, is gebleken dat een juiste verhouding tussen de onderdelen strikt noodzakelijk is voor een gewenst verkantelingsverloop. Extreme waarden in het systeem dienen zodoende als het ware gecompenseerd te worden door andere verkantelingsparameters. Tot slot wordt er geconcludeerd dat het ontwikkelde schaalmodel van het verkanteling systeem erg bruikbaar is om exacte verkantelingsparameters in kaart te brengen en opties te overwegen.



Figuur 29: Schaalmodel verkantelingsmechanisme, simulaties VB1. Links: “beste” optie ($abd=0$; $acd=235$; $La=230$; $\alpha_{1\max}=35$). Rechts: 1e optie na vergroten Lc ($abd=0$; $acd=215$; $La=160$; $\alpha_{1\max}=15$)



Figuur 30: Schaalmodel verkantelingsstelsel, geschikte simulaties VB2. Links: optie1 ($abd=28$; $acd=235$; $a=108$; $\alpha_{1\text{mid}}=25$). Rechts: optie2 ($abd=16$; $acd=180$; $La=90$; $\alpha_{1\text{mid}}=28$)

4.4. Conclusie praktijkonderzoek Pronto

Tijdens het praktijkonderzoek is er duidelijkheid ontstaan in de noodzakelijke aspecten die van invloed zijn op het verloop van de rolstoelverkanteling. Op de eerste plaats dient het horizontale ZP-traject van de gehele verkantelingsrange inzichtelijk gemaakt te worden in het sagittale aanzicht. Aan de hand van deze informatie kan er vervolgens gezocht worden naar een juiste positionering van het verkantelingsdraaipunt en de wielas van voor- en achterwiel. Ook is er bepaald welke specifieke rolstoelonderdelen een rol spelen bij de verkanteling en dergelijke onderdelen dienen dus exact vormgegeven en gepositioneerd te worden. Ter optimalisatie van de afstellingsprocedure van het Pronto frame, is er een onderzoeksmethode ontworpen en deze is uitvoerig beschreven in dit hoofdstuk. In de methode wordt er aan de hand van vijf stappen inzichtelijk gemaakt wat de exacte maatvoering en onderlinge positionering van relevante rolstoelonderdelen moeten zijn.

Noodzakelijke cliënt- en rolstoel parameters worden in de eerste stap verzameld op basis van de eerste cliënt-analyse. Stap twee staat in het teken van de horizontale zwaartepunttraject-bepaling bij de noodzakelijke verkantelingsrange, waarvoor de toepassing van een fysieke Pronto meetopstelling met vier weegschalen erg geschikt is gebleken. De noodzakelijke positie van DP wordt vervolgens vastgesteld op onderdeel LZ, zodanig dat DP en ZP_{mid} zich op dezelfde verticale lijn bevinden. De verticale projecties van ZP_{min} en ZP_{max} worden gebruikt als de minimale posities van respectievelijk de voor- en achterassen (stap drie). Tijdens onderzoekstap vier worden vier de noodzakelijke parameters van het verkantelingsmechanisme berekend. De laatste vier waarden worden benaderd in stap vijf, aan de hand van een simulatie-schaalmodel van het verkantelingsmechanisme.

Tot slot wordt er geconcludeerd dat iedere stap van de onderzoeksmethode succesvol is uitgedacht en toegepast, waarmee de methode geschikt bevonden wordt voor het stapsgewijs bepalen van de relevante rolstoelparameters per persoon.

5. Eisen en wensen

Belangrijke en bruikbare bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken worden opgesomd in een lijst met ontwerpeisen en wensen (zie tabel 13), welke in de ontwerp- en realisatiefase gebruikt worden voor het creëren van een naar wens functionerend eindproduct. Het is de bedoeling dat het eindontwerp zo veel mogelijk voldoet aan deze eisen en wensen. Zoals te zien is in tabel 13 is er aan elke eis een weegfactor toegekend, welke aangeeft hoe belangrijk deze eis is voor het eindontwerp. De weegfactoren variëren tussen de 1 en de 5, waarbij 1 zeer onbelangrijk is en 5 zeer belangrijk.

Tabel 13: Pakket van ontwerpeisen en –wensen voor het uiteindelijke systeem (WF=weegfactor)

Nr	Beschrijving eisen en wensen	WF
ONTWERP EISEN		
1	De noodzakelijke verkantelingsrange per cliënt moet volledig bereikt worden	5
2	De verkanteling moet schokloos en gestaag verlopen over de gehele range	4
3	Het comfort van de cliënt moet onveranderd of verbeterd worden door toepassing van het systeem	5
4	De afstellingsprocedure moet betrouwbaarder zijn dan de huidige procedure	5
5	De afstellingsprocedure moet gestructureerd zijn dan de huidige afstellingsprocedure	5
6	De rolstoel moet worden afgesteld op basis van de zwaartepuntbaan van de volledige verkantelingsrange	4
7	Het gemeenschappelijke zwaartepunt moet te allen tijde binnen het steunvlak vallen	5
8	Het systeem moet het tweedimensionale horizontale ZP-traject bepalen, in sagittaal aanzicht	3
9	De verticale ZP verplaatsing (ΔZP_V) moet tijdens de verkanteling zo klein mogelijk zijn	3
10	Voor de ZP-bepaling moeten er krachtenplatform(s), geometrische, fotogrammetrische en/of kinematische methodes gebruikt worden	4
11	Het systeem moet gebruiksvriendelijk bedienbaar zijn m.b.v. een duidelijk onderzoeksprotocol	4
12	Het systeem moet rekening houden met de voorkeurshoudingen en -bewegingen van de cliënt	4
13	Het systeem moet rekening houden met mogelijke opvallende en/of extreme houdingen en bewegingen van de cliënt	3
14	Het systeem moet rekening houden met uiteenlopende morfologiën en afwijkende lichaamshoudingen	5
15	Het systeem mag niet uitsluitend uitgaan van (handmatig opgemeten) antropometrische aannames (niet meer dan 50%)	3
16	Het systeem moet rekening houden met eventuele toevoegingen van accessoires en/of uitzonderlijke onderdelen	3
17	Het systeem moet rekening houden met het feit dat rolstoel-elementen niet homogeen verdeeld zijn qua massa	5
18	De ontwikkeling van het gehele systeem mag niet meer dan bedragen	
19	Het fysieke systeem moet verplaatst kunnen worden	3
20	De meetopstelling moet stabiel en stevig aan de ondergrond staan	5
21	De uitvoering van de metingen mag niet langer dan 45 minuten duren	4
22	De situatie van de metingen moet overeen komen met de werkelijke situatie	5
23	Metingen moeten uitgevoerd worden in drie statische condities, namelijk de verkantelingstanden: α_{1mid} , α_{1min} , α_{1max}	5
24	De metingen moeten uitgevoerd worden op de cliënt zelf	4
25	De metingen moeten comfortabel verlopen voor de cliënt	5
26	De persoonlijke orthese + kunststof kader moeten gemonteerd kunnen worden in de meetopstelling	3
27	De meetopstelling moet verstelbaar zijn op basis van maten en eigenschappen van de orthese + kunststof kader	5
28	De meetopstelling moet verstelbaar zijn op basis van maten en eigenschappen van de cliënt	5
29	Het meetopstelling frame moet overeenkomen met de basisconstructie van de Pronto	4
30	De positie van de hoofdsteen moet verstelbaar zijn in de meetopstelling	3
31	De ruglengte (LR_F) moet verstelbaar zijn in de meetopstelling	5
32	De rugbreedte (BR_F) moet verstelbaar zijn in de meetopstelling	4
33	De zittinglengte (LZ_F) moet verstelbaar zijn in de meetopstelling	5
34	De zittingbreedte (BZ_F) moet verstelbaar zijn in de meetopstelling	4
35	De positie van de armsteunen moeten verstelbaar zijn in de meetopstelling	3
36	De lengte van de voetsteun ophanging (LO_F) moet verstelbaar zijn in de meetopstelling	3
37	De rug-zitting hoek (αRZ_F) moet verstelbaar zijn in de meetopstelling	5
38	De zitting-ophanging voetsteun (αZO_F) moet verstelbaar zijn in de meetopstelling	5
39	De ophanging voetsteun-voetsteun hoek (αOV_F) moet verstelbaar zijn in de meetopstelling	5
40	De massagroottes moeten gemeten worden door vier identieke analoge personenweegschalen	5
41	De weegschalen moeten loodrecht onder de vier wielbases van de meetopstelling gepositioneerd zijn	5
42	De weegschalen moeten op een vlakke ondergrond geplaatst worden, op gelijke hoogte t.o.v. elkaar en de ondergrond	5
43	Bepaalde frame lengtes moeten eenvoudig en snel afgelezen kunnen worden uit de meetopstelling: LR_F , LZ_F , LO_F , LV_F	3
44	Bepaalde frame hoeken moeten eenvoudig en snel afgelezen kunnen worden uit de meetopstelling: αRZ_F , αZO_F , αOV_F	3
45	Meetresultaten moeten snel en overzichtelijk gecollecteerd worden	4
46	De uitvoering van de data-analyse mag niet langer dan 30 minuten duren	3
47	De output moet gebaseerd zijn op lichamelijke eigenschappen van de cliënt	5
48	De output moet gebaseerd zijn op maten en eigenschappen van de orthese + kunststof kader	5
49	De output moet gebaseerd zijn op de noodzakelijke frame eigenschappen van de rug en -zitting	5
50	De output moet gebaseerd zijn op de noodzakelijke frame eigenschappen van de voetsteun	4
51	De output moet gebaseerd zijn op de noodzakelijke frame eigenschappen van de hoofdsteen en armleggers	3
52	De horizontale ZP-posities (sagittaal) van rolstoel, orthese en cliënt moeten vastgesteld worden in verkantelingstanden α_{1mid} , α_{1min} , α_{1max}	5
53	De output moet informatie geven over de exacte positie van het verkantelingsdraaipunt ($LZ1_F$, $LZ2_F$)	5
54	De output moet informatie geven over de exacte positie van de voor- en achterwielen (B_{VW} , B_{AW})	5
55	De output moet informatie geven over de exacte afmetingen en posities van vier onderdelen van het verkantelingsmechanisme	5
56	In de middelste verkantelingstand (α_{1mid}) moeten de posities van DP en ZP op ongeveer dezelfde verticale lijn liggen	4

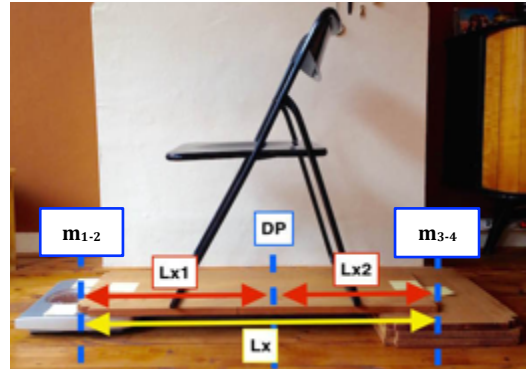
57	Het verkantelingsdraaipunt moet tussen het middelpunt van de zittinglengte (LZ_F) en de rug-zittinghoek liggen (αRZ_F)	4
58	De minimale steunvlakbreedte moet overeenkomen met de horizontale afstand tussen de ZP in min. en max. verkantelingstand	5
59	De voorwielas (B_{VW}) moet een voorwioldiameter naar voren gepositioneerd worden t.o.v. ZP-positie in min. verkantelingstand	4
60	De achterwielas (B_{AW}) moet een achterwioldiameter naar achteren verplaatst worden t.o.v. ZP in max. verkantelingstand	4
61	De achterwielas mag niet voor de verticaallijn uit de rug-zitting hoek van het bovenstel liggen	5
62	De benodigde zithoogte (ZH_i) moet bepaald worden vanuit de minimale verkantelingstand van de rolstoel	4
63	Lengte van onderdeel "c" (L_c) moet een even grote waarde hebben als de zithoogte (ZH_i)	3
64	Onderdeel "c" moet verticaal geplaatst worden	4
65	De bovenzijde van onderdeel "c" moet zich op dezelfde plaats bevinden als het verkantelingsdraaipunt ($DP = \alpha ac$)	5
66	In minimale verkantelingstand ($\alpha 1_{min}$) moet de gasveer (L_b) maximaal verlengd zijn	4
67	In maximale verkantelingstand ($\alpha 1_{max}$) moet de gasveer (L_b) minimaal verlengd zijn	4
68	In middelste verkantelingstand ($\alpha 1_{mid}$) moet de gasveer (L_b) ongeveer half verlengd zijn	4
69	De gasveer (onderdeel "b") moet zo verticaal mogelijk geplaatst worden	4
70	Er moet een uitdraai gemaakt worden met exacte waarden voor: $LZ1_F$, $LZ2_F$, LO_F , LV_F , αRZ_F , αZO_F , αOV_F , B_{VW} , B_{AW} , La , L_c , αcd , αbd	5
71	De uitdraai van de output moet overzichtelijk en begrijpelijk zijn voor de rolstoelbouwers van Exello	4
ONTWERP WENSEN		
1	De meetopstelling moet gebruikt kunnen worden voor andere soorten rolstoelen	2
2	De data-analyse wordt uitgevoerd m.b.v. software	3
3	Het fysieke systeem moet zelfstandig in en uit een bestelbus geladen kunnen worden	4
4	Metingen moeten op locatie uitgevoerd kunnen worden	5

6. Ontwerpfase

Tijdens de ontwerpfase wordt de onderzoeksmethode uit hoofdstuk 4 zo veel mogelijk vereenvoudigd en verbeterd, aan de hand van de geformuleerde eisen en wensen. De functionaliteit en betrouwbaarheid van het systeem moet gewaarborgd blijven en het gebruiksgemak moet toenemen.

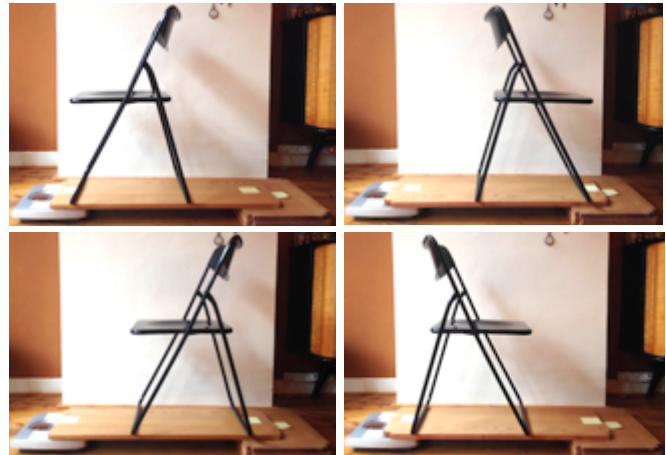
6.1. Test functionaliteit meetprincipe

Om er zeker van te zijn dat een fysieke meetopstelling met weegschalen (zie hoofdstuk 4.3.2.2) daadwerkelijk gebruikt kan worden voor de ZP-bepalingen, wordt de praktische toepassing van het meetprincipe getest. Figuur 31 geeft de sterk vereenvoudigde testopstelling weer, voorzien van de noodzakelijke “frame” parameters. Verder is de kantelrolstoel verwisseld voor een normale stoel. Tijdens de test worden er twee condities onderzocht, namelijk $\alpha_{1\min}$ en $\alpha_{1\max}$, welke worden nabootst door de stoel (+proefpersoon) respectievelijk naar voren of achteren te verschuiven ten opzichte van de weegschaal.



Figuur 31: Testopstelling meetprincipe. m_{1-2} = $m_{\text{voorwielen}}$; m_{3-4} = $m_{\text{achterwielen}}$ (zie figuur 28/bijlage 7)

Bij gebrek aan meerdere weegschalen is er slechts één weegschaal gebruikt tijdens deze test. Maar toch moeten de massagroottes per conditie gemeten worden aan de beide uiteinden van de testopstelling. Daarom worden er twee metingen uitgevoerd per conditie (zie figuur 32), waarbij de stoel 180° wordt gedraaid en de afstand van de voorpoot tot de het uiteinde van de plank gelijk blijft. De output van de weegschaal komt overeen met de gecombineerde massa onder de beide voor- of achterwielen ($m_{1-2}=m_1+m_2$; $m_{3-4}=m_3+m_4$). De meetwaarden en de opgemeten parameters uit figuur 31 vormen de input voor de data-analyse, welke staat uitgezet in tabel 14. De wrijvingskracht wordt buiten beschouwing gelaten.



Figuur 32: Meetsituaties weegschalentest. Boven=conditie1; Onder=conditie2; Links=weegsch. voor; Rechts= weegsch. achter.

Het horizontale ZP-traject van de testsituatie is berekend in het sagittale vlak, van $\alpha_{1\min}$ tot $\alpha_{1\max}$. Uit tabel 14 is op te maken dat de minimale afstand van de voor- en achteras, respectievelijk 223mm en 53mm bedragen ten opzichte van DP. Het benodigde steunvlak heeft in dit geval een minimale lengte van 276mm.

Tabel 14: Berekening horizontale ZP verplaatsing a.d.h.v. waarden uit weegschalen testopstelling

Conditie 1: $\alpha_{1\min}$ (stoel aan voorzijde)	Conditie 2: $\alpha_{1\max}$ (stoel aan achterzijde)
Output uit metingen Lx1 = 470 Lx2 = 445 $m_{1\min} = 46 \text{ kg}$ $m_{2\min} = 17 \text{ kg}$	Output uit metingen Lx1 = 470 Lx2 = 445 $m_{1\max} = 27 \text{ kg}$ $m_{2\max} = 36 \text{ kg}$
Verticale krachten berekenen $F_{1\min} = 46 \cdot 9,8 = 451 \text{ N}$ $F_{2\min} = 17 \cdot 9,8 = 167 \text{ N}$ $F_{Z\min} = 451 + 167 = 618 \text{ N}$	Verticale krachten berekenen $F_{1\max} = 27 \cdot 9,8 = 265 \text{ N}$ $F_{2\max} = 36 \cdot 9,8 = 353 \text{ N}$ $F_{Z\max} = 265 + 353 = 618 \text{ N}$
Horizontale positie FZ berekenen t.o.v. DP $\Sigma M = 0$ $Lx3_{\min} = ((F_{2\min} \cdot Lx2) - (F_{1\min} \cdot Lx1)) / F_{Z\min}$ $Lx3_{\min} = ((167 \cdot 445) - (451 \cdot 470)) / 618 = -223 \text{ mm}$	Horizontale positie FZ berekenen t.o.v. DP $\Sigma M = 0$ $Lx3_{\max} = ((F_{2\max} \cdot Lx2) - (F_{1\max} \cdot Lx1)) / F_{Z\max}$ $Lx3_{\max} = ((353 \cdot 445) - (265 \cdot 470)) / 618 = 53 \text{ mm}$

Ter controle zijn de totaalmassa's van de metingen en testopstelling vergeleken:

- Massa conditie 1	$= m_{1\min} + m_{2\min} = 46 + 17$	$= 63 \text{ kg}$
- Massa conditie 2	$= m_{1\max} + m_{2\max} = 27 + 36$	$= 63 \text{ kg}$
- Massa tesopstelling	$= m_{pp} + m_{stoel} + m_{plank} = 59 + 3 + 3$	$= 65 \text{ kg}$

Gebleken is dat de totaalmassa's uit beide testcondities precies even groot zijn, wat aangeeft dat de weegschaal zeer accuraat is in het meten van exacte massa's tijdens wisselende situaties. Verder blijkt het handmatig gewogen gewicht van testopstelling 2kg te verschillen met de meetresultaten. Waarschijnlijk komt dit door het onnauwkeurig aflezen van de weegschaal tijdens de metingen.

Al met al wordt er geconcludeerd dat de onderzochte meetmethode op een zeer eenvoudige en snelle wijze uitgevoerd kan worden en daarnaast zijn de eindresultaten voldoende representatief. Het meetprincipe wordt zodoende geschikt bevonden voor het uitvoeren van betrouwbare ZP-bepalingen.

6.2. Specificaties meetopstelling frame

De eerste fase van de onderzoeksmethode staat in het teken van het gewenst opbouwen en individueel instellen van de meetopstelling. Onderwerpen ten behoeve van de te vervaardigen Pronto meetopstelling worden besproken in deze paragraaf en ontwerpkeuzes worden uitgezet.

Basisconstructie

Om optimaal betrouwbare meetresultaten te verkrijgen, moet de situatie van het onderzoek zo veel mogelijk overeenkomen met de werkelijkheid. Zodoende wordt er een Pronto passtoel gebruikt als basisframe (zie figuur 33), welke qua functionaliteit overeenkomt met de Pronto waarvan uitgegaan wordt binnen dit project. De passtoel is opgebouwd uit enkel de meest essentiële constructie elementen, wat de volgende voordelen heeft:

- Toevoegen van verstelbaarheden en/of accessoires is relatief eenvoudig
- Onderdelen zijn duidelijk zichtbaar; verplaatsingen als gevolg van de verkanteling worden gemakkelijk geëvalueerd
- Voldoende ruimte om noodzakelijke frameparameters probleemloos op te meten
- Houten planken van de zitting en rugleuning maken de montage van orthese en kunststof kader ongecompliceerd

Verstelbaarheid meetopstelling

In de uiteindelijke meetopstelling moeten verschillende frame-elementen in bepaalde mate verstelbaar zijn, zodat de situatie aangepast kan worden per persoon. In deze paragraaf zijn de afmetingen, onderlinge positioneringen en mogelijke verstelbaarheden van onderdelen van de Pronto passtoel inzichtelijk gemaakt. In tabel 15 zijn de belangrijkste maten en verstelmogelijkheden van de passtoel uitgezet. Het merendeel van de parameters blijken naar wens geïntegreerd te zijn in de passtoel en de beperkingen van de passtoel staan uitgezet in het rood.



Figuur 33: Pronto passtoel, basisconstructie meetopstelling

Tabel 15: Maten en verstellingen noodzakelijke passtoel parameters (rood=beperking)

Symbol	Specificatie	Afmetingen	Verstelbaarheid	Verstellingswijze
BZ _F	Breedte zitting frame	500 mm	x	NVT
LZ _F	Lengte zitting frame	500 mm	350 – 500 mm	Klemmen met schroefknop
BR _F	Breedte rug frame	500 mm	x	NVT
LR _F	Lengte rug frame	620 mm	x	NVT
αRZ _F	Hoek rug-zitting frame	97°	86° – 136°	Gasveer
PH	Positie hoofdsteun t.o.v. LZ	L*B*H: 360*100*14 mm	Hoogte: 69 – 88 mm	Klemmen met schroefknop
PA	Positie armleggers	L*B*H: 300*150*10 mm	Breedte: 32 – 72 mm	Klemmen met schroefknop
α1	Verkantelingstand	NVT	5° – 40°	Gasveer
LZ1	Afstand αZO _F – DP	NVT	60 – 200 mm	Verstelling zittinglengte
LZ2	Afstand DP – αRZ _F	NVT	270 – 280 mm	Verstelling zittinglengte
Lx1	Hor. afstand weegsch1 – DP	200 mm	NVT	NVT
Lx2	Hor. afstand DP – weegsch1 DP	280 mm	NVT	NVT
ZH	Zithoogte: afst DP – ondergrond	420 mm	NVT	NVT
D _{VW}	Diameter voorwiel	170 mm	NVT	NVT
D _{AW}	Diameter achterwiel	310 mm	NVT	NVT

Een beperking van de passtoel is de geringe verkantelingsrange, welke van 5° tot 40° versteld kan worden. Voor de uiteindelijke meetopstelling moeten de meest extreme situaties toelaatbaar zijn, en een verkantelingsrange van -10° tot 60° is daarbij gewenst. Desondanks is de verkantelingsrange van de passtoel vrij

gangbaar binnen Exello, dus voor het doeleinde van dit project is deze groot genoeg. Verder zijn de zittingbreedte (BZ_F), rugbreedte (BR_F) en rughoogte (LR_F) niet geheel naar wens in te stellen in de passtoel. Daarentegen zijn deze parameters dusdanig groot toegepast, dat verwacht wordt dat vrijwel iedere orthese succesvol geïnstalleerd kan worden in het frame. Vermoedelijk blijven de stabiliteit en veiligheid van de meetsituaties hiermee gewaarborgd.

Daarnaast zijn de wielassen van de passtoel niet verstelbaar en de afmetingen van het steunvlak kunnen dus niet aangepast worden aan persoonlijke situaties waardoor er onveilige situaties kunnen ontstaan. Indien de passtoel echter stevig wordt vastgezet aan de ondergrond, wordt een stabiele en veilige meetsituatie daarentegen wel gegarandeerd en is de verstelbaarheid van de wielbasis overbodig geworden.

Het grootste nadeel is de afwezigheid van een voetsteun in de passtoel. Voor een betrouwbare ZP-bepaling is dit onderdeel echter van wezenlijk belang, daar de massa en positionering van (onderdelen van) de voetsteun een directe invloed hebben op de ZP-projectie. Ook kunnen de voeten geen steun vinden gedurende de metingen, waarbij discomfort en/of rolstoel-instabiliteit kan ontstaan. Vanwege de genoemde argumenten zullen de meetresultaten naar verwachting enigszins afwijken van de noodzakelijke situatie met voetsteun. Voor de uiteindelijk opstelling is een voetsteun dus vereist.

6.3. Opbouw meetopstelling

Plaatsing weegschalen

Er is gekozen om analoge personenweegschalen te gebruiken in de uiteindelijke meetopstelling en de keuzeonderbouwing wordt besproken in bijlage 10. Voor de meetprocedure van dit project is het vooral noodzakelijk dat de weegschalen langdurig en zwaar belast kunnen worden, en de displays moeten daarbij op ieder tijdstip afgelezen kunnen worden. Analoge personenweegschalen zijn bij uitstek geschikt gebleken voor dit doeleinde.

Voor het verkrijgen van de gewenste output uit de metingen, namelijk de massagrootte en massaverdeling, worden er vier identieke analoge personenweegschalen toegepast in de meetopstelling. Allereerst is het uiterst noodzakelijk dat de weegschalen op een vlakke (waterpas) ondergrond staan, op gelijke hoogte ten opzichte van elkaar en ten opzichte van de aarde. Zodoende werken de optredende krachten (F_1 ; F_2 ; F_3 ; F_4) in een zuiver verticale richting en is de output van de weegschalen zeer betrouwbaar. Indien de uitlijning niet klopt, kan de krachtrichting afwijken van verticaal waardoor de correctheid van de momentenvergelijkingen uit de data-analyse afneemt.

De weegschalen worden onder de vier steunpunten van de passtoel gepositioneerd, in dit geval de wielassen. De weegschalen worden stevig vastgezet aan zowel de passtoel als de ondergrond, waarmee een veilige en stabiele situatie gegarandeerd kan worden. Door het vierkante meetoppervlak worden zowel de voor- en achterwaartse massaverdelingen als gevolg van de verkanteling gemeten (sagittaal aanzicht), maar eventuele zijwaartse instabiliteiten en/of asymmetriën worden eveneens geregistreerd (frontaal/dorsaal vlak). De verkregen meetoutput uit desbetreffend systeem wordt als zeer accuraat beschouwd.

Lengtemeters en hoekmeters

Voor de data-analyse dienen verschillende frameparameters van de meetopstelling gedefinieerd worden. Om dergelijke lengte- en hoekmaten eenvoudig en snel te kunnen bepalen tijdens de meetprocedure, wordt de passtoel op een aantal plaatsen voorzien van meetlinten en hoekmeters. In bijlage 11 staat uitgezet om welke parameters het gaat en de juiste plaatsbepaling en bevestigingswijzen van de meters zijn daarbij vermeld.

6.4. Datacollectie

Voor aanvang van de daadwerkelijke metingen worden de op maat gemaakte orthese en kunststof kader stevig gemonteerd in de passtoel. Voor optimale steun en stabiliteit dient er zo veel mogelijk oppervlaktecontact te bestaan tussen de orthese-, kader-, zitting- en rugvlakken van de passtoel. Op basis van de afmetingen van de orthese worden de eerste verstellingen aangebracht in de zitting, rug, armleggers en hoofdsteen van de meetopstelling. Parameters uit de eerste cliënt analyse, zoals onderbeenlengte, voetlengte, kniehoek en enkelhoek (zie hoofdstuk 4.3.1), worden vervolgens gebruikt om de voetsteun gewenst te positioneren in de opstelling.

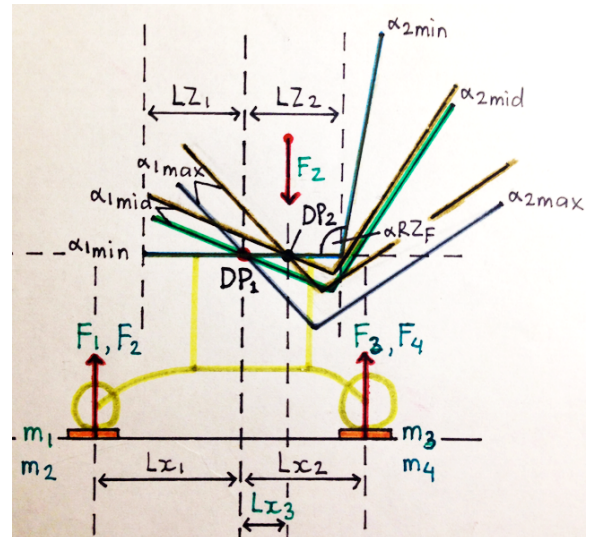
Wanneer alle verstelbaarheden aangebracht en vastgezet zijn, neemt de cliënt plaats in de passtoel en alle instellingen van het frame worden nogmaals gecontroleerd en waar nodig een laatste keer bijgesteld. Vervolgens worden er drie statische condities gemeten en geregistreerd, namelijk de situatie in middelste-, minimale – en maximale verkantelingstand. De meetwaarden moeten zo nauwkeurig en snel mogelijk afgelezen worden van de weegschalen en op een overzichtelijke wijze gecollecteerd worden.

Voor de volledigheid en zekerheid wordt iedere meting twee maal achter elkaar uitgevoerd, met een tussenpauze van circa 3 minuten per conditie. Uiteindelijk zijn er dus twee maal drie condities gemeten over vier weegschalen, met 24 meetwaarden als resultaat.

Bepalingswijze- en volgorde parameters Pronto onderzoeksmethode

Ter verduidelijking wordt de bepalingswijze- en volgorde van de parameters hieronder kort besproken (zie figuur 34 en bijlage 13).

- 1) De noodzakelijke input voor de data-analyse wordt allereerst gecollecteerd: opgemeten moment armen in de meetopstelling, van de weegschalen tot DP₁ (Lx₁; Lx₂) De gemeten massa's van de weegschalen (m₁; m₂; m₃; m₄) worden gedocumenteerd voor drie condities, namelijk α_{1mid} , α_{1min} en α_{1max} .
- 2) Drie momentenvergelijkingen worden achtereenvolgend opgelost om de horizontale ZP-posities van de drie verkantelingstanden te bepalen in het sagittale vlak (zie figuur 34). In eerste instantie wordt de horizontale ZP-positie tijdens α_{1mid} berekend ten opzichte van DP (Lx₃), en de moment armen worden hierop aangepast (Lx_{1F}; Lx_{2F}).
- 3) De noodzakelijke DP-positie (DP₂) per persoon moet zich bevinden op LZ, op dezelfde verticale lijn als FZ_{mid}. De noodzakelijke DP-verplaatsing over de totale zittingenlengte (LZ) wordt berekend ten opzichte van DP₁ (=LZ₃, zie bijlage 13).
- 4) Als gevolg van de DP-verplaatsing moeten tevens de waarden voor LZ herberekend worden (LZ_{1F}; LZ_{2F}).
- 5) Aan de hand van de horizontale ZP-posities van α_{1min} en α_{1max} , wordt de minimaal noodzakelijke wielbasis berekend in het sagittale vlak (resp. B_{VW}; B_{AW}), ten opzichte van DP₂. Er wordt dus uitgegaan van de individueel bepaalde DP-positie, met de daarbij behorende moment armen (DP₂; Lx_{1F}; Lx_{2F}; LZ_{1F}; LZ_{2F}).
- 6) Tot slot worden de noodzakelijke acht parameters van het verkantelingsmechanisme berekend en benaderd per persoon, gebruik makend van de reeds berekende frameparameters en persoonlijke parameters uit de eerste cliënt-analyse (zie hoofdstuk 4.3.4).



Figuur 34: Pronto meetopstelling: DP1=standaard positie meetopstelling; DP2=berekende noodzakelijke positie p.p. Fz verplaatst verticaal, nauwelijks horizontaal (specificaties: zie tekst en bijlage 7)

Mogelijke beperkingen meetopstelling

Op de eerste plaats is de ZP-baan gebaseerd op verkanteling om de standaard DP-positie van de meetopstelling, en dus niet op de noodzakelijke DP-positie per persoon. Alhoewel de ZP-baan iets zal verschuiven als gevolg van de DP-verplaatsing, zal dit verschil naar verwachting niet noemenswaardig zijn. De noodzakelijke DP-verplaatsing wordt namelijk relatief klein verwacht omdat de positie van DP_{meetopstelling} gemiddeld/gangbaar is gepositioneerd in de meetopstelling. In dit geval zal het ZP-traject dus ook nauwelijks veranderen. Wanneer de berekende DP-verplaatsing wel noemenswaardig is, zal de ZP-baan voornamelijk verschuiven in verticale richting en nagenoeg niet in horizontale richting. Dit verschijnsel is inzichtelijk gemaakt in figuur 34, waarbij de bruine "zittingen" de situatie nabootsen bij een aangepaste DP-positie. Aangezien voor dit project alleen de horizontale ZP-baan van belang is, blijft de betrouwbaarheid van de ZP-bepaling, de meet- en de uiteindelijke eindresultaten dus voldoende betrouwbaar.

Daarnaast is de ZP-baan bepaald met een meetopstelling waarin het verkantelingsmechanisme op standaard wijze is aangebracht. De noodzakelijke maten en posities van deze onderdelen per persoon, worden in een later stadium van de onderzoeksmethode bepaald, en de ZP-baan vormt hierbij (indirect) het uitgangspunt. De vormgeving van het verkantelingsmechanisme heeft echter geen invloed op het traject van de verkanteling in de ruimte, maar enkel op het comfort en de krachtleveringen van het verkantelingsverloop. De verkantelingsonderdelen zijn daarentegen wel verantwoordelijk voor de mogelijke verkantelingsrange, dus in de uiteindelijke meetopstelling dient deze dusdanig vormgegeven te worden dat de meest extreme hoekstanden (-10°-60°) ingesteld kunnen worden.

6.5. Dataverwerking

De output van de meetprocedure, de opgemeten frameparameters van de meetopstelling en een aantal noodzakelijke cliënt-parameters vormen de input voor de data-analyse. Het horizontale ZP-traject gedurende de rolstoelverkanteling, beredeneerd vanuit sagittaal aanzicht, vormt het belangrijkste uitgangspunt van waaruit alle noodzakelijke rolstoelparameters bepaald kunnen worden. Zodoende wordt ZP_{mid} als eerste gebruikt om DP₂ vast te stellen, ZP_{min} bepaald de minimale voorwiel-positie en de achterwiel as wordt op de verticale lijn uit ZP_{max}

geplaatst. Door krachten- en momentenvergelijkingen en andere rekenregels op te lossen, worden er stap voor stap meer noodzakelijke rolstoelparameters gedefinieerd. Ook worden er benaderingen uitgevoerd op een schaalmodel van het Pronto verkantelingsmechanisme.

Vereenvoudigde data-analyse

Alhoewel de in hoofdstuk 4 geïntroduceerde data-analyse geschikt bevonden is wat betreft de kwaliteit en bruikbaarheid voor dit project, wordt er een hogere mate van gebruiksvriendelijkheid verwacht wanneer deze gestructureerde en begrijpelijker wordt uitgezet. Zodoende zijn de afzonderlijke stappen uit de data-analyse heroverwogen, verbeterd en vereenvoudigd en deze staat uitgezet in tabel 16 (voor toelichtingen symbolen en/of berekeningen, zie hoofdstuk 4 en/of bijlage 7).

Tabel 16: Definitief stappenplan van de data-analyse voor de Pronto onderzoeksmethode

Input data-analyse		
$\alpha_{1_{\min}}$; $\alpha_{1_{\max}}$; $\alpha_{1_{\text{mid}}}$ D_{vw} ; D_{AW} BZ_F ; BR_F LZ_F ; $LZ1$; $LZ2$; LR_F ; LO_F ; LV_F αRZ_F ; αZO_F ; αOV_F Lx ; $Lx1$; $Lx2$		$m1_{\text{mid}}$; $m2_{\text{mid}}$; $m3_{\text{mid}}$; $m4_{\text{mid}}$ $m1_{\min}$; $m2_{\min}$; $m3_{\min}$; $m4_{\min}$ $m1_{\max}$; $m2_{\max}$; $m3_{\max}$; $m4_{\max}$
Berekenen Fz: middelste verkantelingstand	→	Berekenen positie DP
$F1_{\text{mid}} = (m1_{\text{mid}} + m2_{\text{mid}}) * g$ $F2_{\text{mid}} = (m3_{\text{mid}} + m4_{\text{mid}}) * g$ $Fz_{\text{mid}} = F1_{\text{mid}} + F2_{\text{mid}}$ $Lx3_{\text{mid}} = ((F2_{\text{mid}} * Lx2) - (F1_{\text{mid}} * Lx1)) / Fz_{\text{mid}}$		$LZ3 = Lx3_{\text{mid}} / \cos(\alpha1_{\text{mid}})$ $LZ1_F = LZ1 + LZ3$ $LZ2_F = LZ2 - LZ3$ $Lx1_F = Lx1 + LZ3$ $Lx2_F = Lx2 - LZ3$
Berekenen Fz: minimale verkantelingstand	→	Berekenen positie voorwielas
$F1_{\min} = (m1_{\min} + m2_{\min}) * g$ $F2_{\min} = (m3_{\min} + m4_{\min}) * g$ $Fz_{\min} = F1_{\min} + F2_{\min}$ $Lx3_{\min} = ((F2_{\min} * Lx2_F) - (F1_{\min} * Lx1_F)) / Fz_{\min}$		$B_{\text{vw}} = Lx3_{\min} - D_{\text{vw}}$
Berekenen Fz: maximale verkantelingstand	→	Berekenen positie achterwielas
$F1_{\max} = (m1_{\max} + m2_{\max}) * g$ $F2_{\max} = (m3_{\max} + m4_{\max}) * g$ $Fz_{\max} = F2_{\max} + F2_{\max}$ $Lx3_{\max} = ((F2_{\max} * Lx2_F) - (F1_{\max} * Lx1_F)) / Fz_{\max}$		$B_{\text{AW}} = Lx3_{\max} + D_{\text{AW}}$
Bereken maatvoering verkantelingsmechanisme		
Indien $\alpha1_{\min} = \text{negatief}$	Indien $\alpha1_{\min} = \text{positief}$ (en $\alpha b = \text{negatief}$)	Indien $\alpha b = \text{positief}$
$\alpha a = \alpha ZO + \alpha1_{\min} - 90$ $\alpha b = \alpha VO - \alpha a - 90$ $ZH1 = LZ1_F * \sin(\alpha1_{\min})$ $ZH2 = LO * \cos(\alpha a)$ $ZH3 = LV * \sin(\alpha b)$ $ZHt = ZH1 + ZH2 + ZH3$	$\alpha a = \alpha ZO + \alpha1_{\min} - 90$ $\alpha b = 90 - \alpha VO + \alpha a$ $ZH1 = LZ1_F * \sin(\alpha1_{\min})$ $ZH2 = LO_F * \cos(\alpha a) - ZH1$ $ZH3 = LV_F * \sin(-\alpha b)$ $ZHt = ZH2 + ZH3$	$ZH1 = LZ1_F * \sin(\alpha1_{\min})$ $ZH2 = LO_F * \cos(\alpha a) - ZH1$ $ZHt = ZH2$
$Lc = ZHt \rightarrow Lc$ waarde afronden naar tot eerstvolgende 20-tal $\alpha a_{\min} = 90 - \alpha1_{\min}$ $\alpha a_{\text{mid}} = 90 - \alpha1_{\text{mid}}$ $\alpha a_{\max} = 90 - \alpha1_{\max}$		
Benaderen maatvoering verkantelingsmechanisme		
Instellen op schaalmodel: Lc , $\alpha1_{\min}$, $\alpha1_{\text{mid}}$, $\alpha1_{\max}$. Mogelijke onderdelensamenstellingen simuleren om αcd , αbd en La te bepalen, waarbij onderstaande stellingen zo veel mogelijk van toepassing zijn Tijdens $\alpha1_{\min} \rightarrow Lb = \max = \pm 330\text{mm} \rightarrow La$ bepalen vanuit deze lengte Tijdens $\alpha1_{\text{mid}} \rightarrow Lb = \text{mid} = \pm 270\text{mm}$ Tijdens $\alpha1_{\max} \rightarrow Lb = \min = \pm 210\text{mm}$		

Toepassing Software

Voor een optimale accuraatheid en gebruiksvriendelijkheid van het uiteindelijke systeem, lijkt het voor de hand liggend om software te gebruiken voor het uitvoeren van de data-analyse. Aangezien de beschikbare tijd voor dit afstudeerproject beperkt is, is er echter gekozen om geen softwareprogramma te schrijven, maar in plaats daarvan de focus te leggen op het onderzoeken en testen van de kwaliteit van de onderzoeksmethode. Voor een eventueel vervolg op dit project, zijn er in bijlage 12 een aantal bevindingen geformuleerd omtrent eventueel bruikbare software.

6.6. Conclusie ontwerpfase

Het werkingsprincipe van de fysieke meetopstelling is getest met behulp van een sterk vereenvoudigde testopstelling en de stappen uit de onderzoeksmethode van hoofdstuk 4. De meetopstelling met weegschalen is voldoende accuraat gebleken om horizontale ZP-posities van statische verkanteling standvast te stellen.

In de fysieke meetopstelling wordt een passtoel gebruikt als basisconstructie. De passtoel bestaat uitsluitend uit de belangrijkste Pronto onderdelen, wat de opbouw, de bediening en de evaluatie van de meetopstelling vergemakkelijkt. De meeste noodzakelijke functionaliteiten, eigenschappen en verstelbaarheden komen overeen met de originele Pronto voor dit project. Enkele gesignaleerde rolstoelaspecten kunnen daarentegen mogelijk voor problemen zorgen gedurende de metingen.

Als belangrijkste nadeel zorgt de afwezigheid van een voetsteun in de passtoel voor een massa-tekort rond de voorwielen, waardoor het ZP-traject direct verplaatst in vergelijking met de daadwerkelijke situatie. De meetwaarden en de uiteindelijke rolstoelmaatvoering worden nemen dan ook sterk af in betrouwbaarheid. Voor de definitieve opstelling is een voetsteun absoluut vereist, maar ten aanzien van het testen van het werkingsprincipe, wordt de passtoel echter wel als voldoende geschikt geacht.

Een aantal frameparameters zijn onvoldoende verstelbaar gebleken in de passtoel. Zo dient de rolstoelverkanteling een bereik te hebben van -10° - 60° , terwijl deze in de testopstelling slechts 5° - 40° is. Desondanks wordt deze relatief kleine, doch vrij gangbare verkantelingsrange voldoende geschikt bevonden voor een succesvolle uitvoering van de realisatie- en testfase. Wat betreft de relatief grote en niet verstelbare afmetingen van de passtoelzitting en -rug worden er ook geen noemenswaardige problemen verwacht. De orthese inbouw moet immers zorgen voor de gewenste pasvorm en zithouding gedurende de metingen. In de definitieve meetopstelling dienen dergelijke aspecten daarentegen wel verstelbaar te zijn.

Er worden vier identieke analoge personenweegschalen geplaatst onder de steunpunten (=wielassen) van de opstelling. Voor een optimale stabiliteit en veiligheid worden de weegschalen vastgezet aan de meetopstelling en de ondergrond. Het relatief grote steun- en meetoppervlak registreert de massaverdelingen in zowel het sagittale, als het frontale/dorsale vlak van de meetopstelling.

Door het aanbrengen van vereenvoudigingen en het creëren van meer overzicht in de afzonderlijke stappen van de data-analyse uit hoofdstuk 4, is de gebruiksvriendelijkheid, efficiëntie en kwaliteit van het systeem verbeterd. Naar aanleiding van de ontwerpfase kan het vervaardigen van het prototype en het bijbehorend onderzoeksprotocol succesvol volbracht worden. Met de combinatie van deze twee weloverwogen eindproducten worden er betrouwbare eindresultaten gegenereerd per individuele situatie.

7. Realisatiefase

De Pronto onderzoeksmethode bestaat uit twee producten, namelijk de fysieke meetopstelling en een gedetailleerd onderzoeksprotocol. Beiden producten zijn vervaardigd in de realisatiefase.

7.1. Prototype fysieke meetopstelling

In de realisatiefase is er een prototype vervaardigd van de fysieke Pronto meetopstelling, en het eindresultaat is afgebeeld in figuur 35. Er zijn verschillende vereenvoudigingen en wijzigingen aangebracht het prototype ten opzichte van het definitieve ontwerp. De factoren die mogelijk van invloed zijn op de kwaliteit van de meetresultaten worden besproken in deze paragraaf.

Passtoel: De frameconstructie bestaat grotendeels uit basisonderdelen van een verouderd Pronto model. Het verkantelingsmechanisme is qua functionaliteit nagenoeg hetzelfde gebleven, terwijl bepaalde onderdelen opvallende vormwijzigingen hebben doorgemaakt. Desondanks zijn de voor de onderzoeksmethode relevante rolstoelparameters (zie tabel 15) op vergelijkbare wijzen toegepast in de beide modellen. Er wordt aangenomen dat de constructieverschillen tussen het prototype en de werkelijke situatie verwaarloosbaar zijn ten aanzien van de testfase.

Weegschalen: Bij gebrek aan voldoende weegschalen tijdens de realisatiefase, is het prototype voorzien van drie verschillende analoge weegschalen, in plaats van vier identieke exemplaren. Twee weegschalen staan onder beide achterwielen en de derde is precies tussen de twee voorwielen geplaatst (zie figuur 36). De weegschalen zijn op gelijke hoogte ten opzichte van elkaar en de ondergrond uitgelijnd. Vervolgens zijn zij gereset, zodat het gewicht van de planken niet meegerekend wordt tijdens de metingen. Alhoewel de gewijzigde meetsituatie gepaard gaat met een alternatieve meetopstelling opbouw, blijven de stappen uit de meetprocedure en data-analyse vrijwel onveranderd.

Eén steunpunt minder resulteert in een kleiner steunvlak, waardoor een zekere rolstoelinstabiliteit kan heersen rond de voorzijde van het prototype. Daarentegen verplaatst ZP meer richting achterzijde naarmate de meetprocedure toeneemt en de situatie stabiel wordt. Instabiliteit wordt bovendien voornamelijk verwacht tijdens de dynamische verkanteling, terwijl deze weer verdwijnt in de statische meetcondities.

Ondanks de eliminatie van één weegschaal/steunpunt in de opstelling (3 i.p.v. 4), wordt er tijdens de metingen zelf geen noemenswaardige instabiliteit verwacht. Ook de meetresultaten en de data-analyse levert naar verwachting geen minder betrouwbare eindresultaten op. Daarentegen wijzen de monitoren van de weegschalen richting binnenzijde van de opstelling. Het aflezen van de massa's wordt daardoor bemoeilijkt en de betrouwbaarheid van de meetresultaten verminderd enigszins.

Orthese + kunststof kader: In het prototype is geen originele Exello orthese met kunststof kader ingebouwd, terwijl dit wel de bedoeling is voor de definitieve meetopstelling. In plaats daarvan is de orthese-pasvorm zo goed mogelijk nagebootst met behulp van verschillende kussens. Veranderingen in de gemeten massa's worden er hierbij niet verwacht. Daarentegen vormt de orthese het uitgangspunt voor de eerste frame-afstelling, maar in het prototype gebeurt dit aan de hand van antropometrische waarden van de proefpersoon. Deze gewijzigde procedure heeft mogelijk effect op de meetresultaten, wat een probleem zou kunnen vormen voor het definitieve systeem. Het prototype is echter alleen bedoeld voor het testen en beoordelen van de onderzoeksmethode en de genoemde wijzigingen vormen geen belemmering voor desbetreffend doeleinde.



Figuur 35: Prototype van de definitieve fysieke Pronto meetopstelling



Figuur 36: Plaatsing weegschalen in de meetopstelling: 2 onder beide achterwielen; 1 tussen beide voorwielen

Voetsteun: Er is geen voetsteun aanwezig in het prototype, waardoor opvallende veranderingen verwacht worden in de meetcondities en output (zie hoofdstuk 6.2). Er wordt geconcludeerd dat het van groot belang is dat het genoemde constructieprobleem wordt meegenomen tijdens het interpreteren van de meetresultaten uit de testfase.

Bandenspanning: De bandenspanning in de achterbanden van de meetopstelling is ongelijk verdeeld, waarbij m3 slapper is dan m4 en dus ook verder doorzakt bij belasting. Enerzijds veroorzaakt dit gegeven vermoedelijk veranderingen in de massaverdeling op de weegschalen 3 en 4 en daarnaast kan er een verhoogde zijwaartse instabiliteit ontstaan naarmate de verkantelingshoek wordt vergroot. Ook dit aspect is erg belangrijk ten aanzien van een juiste en bruikbare evaluatie van de testresultaten.

Uitlijning wielen: De voorwielen van de passtoel zijn enigszins ongelijk gepositioneerd in het sagittale vlak en de afstanden tussen de voorwiel assen en DP (=Lx1) hebben dan ook afwijkende waarden. Om de accuraatheid van de eindresultaten optimaal te houden, dient de gemiddelde waarde van de beide lengtes van Lx1 gebruikt te worden voor de berekeningen in de data-analyse.

Verder zijn de achterwielen van de passtoel ongelijk uitgelijnd ten opzichte van elkaar. Vanuit dorsaal aanzicht is B_{AWrechts} enkele graden naar buiten gekanteld, maar de achterwielassen bevinden zich daarentegen wel op dezelfde positie in het sagittale vlak. Er worden dan ook geen opvallende afwijkingen verwacht in het krachterspel en dus ook niet in de meetresultaten.

7.2. Definitief onderzoeksprotocol

Om de onderzoeksmethode immer betrouwbaar, gebruiksvriendelijk en consequent uit te kunnen voeren, is het wenselijk wanneer iedere cliënt wordt onderzocht volgens een vaststaande methode. Naar aanleiding van de eisen en wensen en bevindingen uit de ontwerpfase, is er een gedetailleerd onderzoeksprotocol samengesteld en vormgegeven (zie bijlage 13).

Het protocol is bedoeld als leidraad en hulpmiddel bij het uitvoeren van de onderzoeksmethode, van begin (opbouwen meetopstelling), tot eind (uitdraaien individuele rolstoelmaatvoering). Het onderzoek is in veel kleine stappen opgedeeld en per stap worden er duidelijke doch beknopte tekstuele en visuele toelichtingen gegeven bij de doelen en acties. Op deze manier wordt er gestreefd naar een situatie waarin alle Exello medewerkers in staat zijn de onderzoeksmethode succesvol uit te voeren.

Het onderzoeksprotocol van dit project is uitgezet in bijlage 13 en is opgebouwd uit drie hoofdfases, namelijk: Voorbereiden metingen; Meetprocedure; Data-analyse. In het protocol is een resultatentabel bijgevoegd met alle te bepalen parameters uitgezet per stap, voorzien van bijbehorende specificaties. Ter verduidelijking wordt de bepalingwijze- en volgorde van de parameters kort besproken in hoofdstuk 6.4 (zie ook bijlage 13).

Weergave eindresultaten

De kantelrolstoel dient exact afgesteld te worden op basis van de verkregen resultaten uit de Pronto onderzoeksmethode. In de resultatentabel van de methode zijn een groot aantal complexe parameters verzameld, maar voor een geschikte rolstoelafstelling per persoon zijn slechts enkele waarden noodzakelijk. In tabel 17 is de uitdraai voor de rolstoelbouwer gepresenteerd. Ter verduidelijking zijn de parameters eveneens weergegeven in een schematische Pronto frameconstructie (zie tabel 17).

Tabel 17: Overzicht resultaten: maatvoering voor individuele rolstoelafstelling

Symb	Specificatie	Waarde	Schematische weergave Pronto frameconstructie	
Parameters basisconstructie frame → zwart in figuur				
LZ _F	Lengte zitting totaal			
LZ _{1F}	Lengte voorste deel zitting (αZ_{OF} -DP)			
LZ _{2F}	Lengte achterste deel zitting (DP- αRZ_F)			
ZH _t	Zithoogte: DP-onderk. voetsteun			
Parameters plaatsing wielen → rood in figuur				
B _{VW}	Horizontale afst. voorwielas - DP			
B _{AW}	Horizontale afst. achterwielas - DP			
Parameters verkantelingmechanisme → blauw in figuur				
L _a	Lengte onderdeel a			
L _d	Lengte onderdeel d			
L _c	Lengte onderdeel c			
L _b	Lengte onderdeel b			
α_{cd}	Hoek c-d			
α_{bd}	Hoek b-d			

8. Testfase

8.1. Test a.d.h.v. proefpersoon

De functionaliteit en kwaliteit van de Pronto meetopstelling en het bijbehorende onderzoeksprotocol uit bijlage 13 worden onderzocht aan de hand van een tweetal test-soorten. De definitieve onderzoeksmethode wordt beoordeeld aan de hand van de testresultaten.

8.1.1. Testopstelling

Tijdens de testfase zijn het onderzoeksprotocol uit bijlage 13 stapsgewijs toegepast, waarbij drie condities zijn onderzocht met behulp van het prototype van de Pronto meetopstelling en de data-analyse uit het onderzoeksprotocol. De onderzochte meetcondities (α_{1mid} , α_{1min} , α_{1max}) zijn weergegeven in figuur 37. Er zijn twee gezonde proefpersonen onderzocht en de persoonlijke eigenschappen staan vermeldt in tabel 18. In deze fase van het project is er bewust gekozen voor onderzoek naar stabiele lichamelijke situatie. Eventuele afwijkende meetresultaten of disfunctionerende aspecten in de meetopstelling kunnen dan immers direct herleidt worden naar de constructie en/of meetapparatuur. Geconstateerde fouten in het ontwerp kunnen zodoende relatief snel en eenvoudig herkent en heroverwogen word

Tabel 18: Eigenschappen proefpersonen testfase

	PP 1	PP 2
Geslacht	M	V
Leeftijd	31 jr.	28 jr.
Lengte	1,81 m	1,71 m
Gewicht	80 kg	59 kg

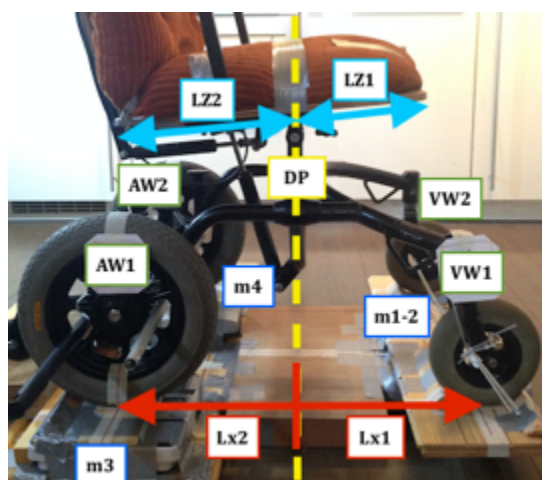


Figuur 37: Pronto testopstelling, toegepast a.d.h.v. onderzoeksprotocol (zie bijlage ...): Meten massagroottes en -verdelingen in 3 verkantelingstanden (conditie1: $\alpha_{1mid}=25^\circ$; conditie2: $\alpha_{1min}=10^\circ$; conditie3: $\alpha_{1max}=40^\circ$)

Gezien de beperkte verkantelingsmogelijkheid van de passtoel, zijn beide proefpersonen onderzocht over een relatief kleine doch vrij gangbare range van 10° - 40° . Door een tekort aan weegschalen, zijn de massa's gemeten met slechts drie weegschalen in plaats van vier (zie hoofdstuk 7.1). Noodzakelijke frameparameters zijn opgemeten in het rolstoel. Figuur 38 geeft inzicht in de output-waarden en in tabel 19 staan de verkregen testresultaten uitgezet.

Tabel 19: Output van gemeten condities in de testfase

	PP 1	PP 2
Parameters uit meetopstelling		
α_{1min}	10°	10°
α_{1mid}	25°	25°
α_{1max}	40°	40°
Lx1	295 mm	295 mm
Lx2	275 mm	275 mm
LZ1	210 mm	210 mm
LZ2	280 mm	280 mm
Meetresultaten		
m1-2 _{mid}	16,5 kg	13 kg
m3 _{mid}	50,5 kg	42 kg
m4 _{mid}	43,5 kg	42 kg
m1-2 _{min}	34,5	26 kg
m3 _{min}	43 kg	35,5 kg
m4 _{min}	43 kg	36 kg
m1-2 _{max}	5 kg	2 kg
m3 _{max}	56 kg	45 kg
m4 _{max}	42,5 kg	43 kg



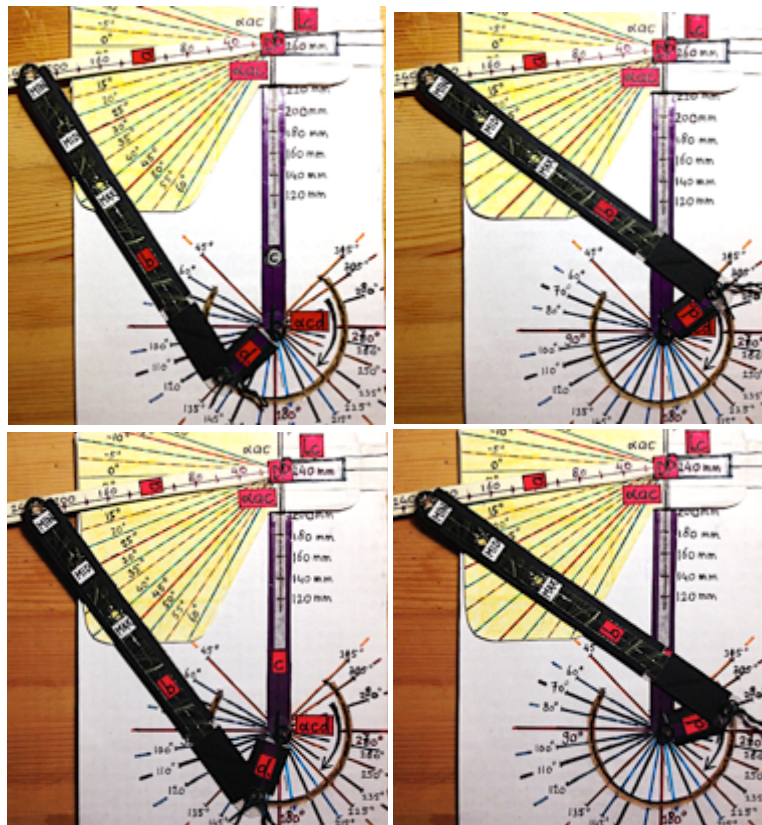
Figuur 38: Parameters uit het Prototype van de Pronto meetopstelling, t.a.v. data-analyse

8.1.2. Data-analyse

De meetresultaten worden verwerkt volgens fase drie van het onderzoeksprotocol, de data-analyse (zie bijlage 13). Alle uitgevoerde stappen zijn uitgewerkt in bijlage 14 en de belangrijkste eindresultaten uit zowel de metingen als de data-analyse, worden vermeldt in onderstaande tabel 20. In figuur 39 zijn de simulaties weergegeven van de mogelijke samenstellingen van het verkantelingsmechanisme per persoon (zie bijlage 13, stap 7).

Tabel 20: Eindresultaten testfase (specificatie symbolen en berekeningen: zie bijlage 13 en 14)

Stap	Symb.	Waarde PP1	Waarde PP2
4.1)	F1 _{mid}	162 N	128 N
	F2 _{mid}	922 N	824 N
	Fz _{mid}	1084 N	952 N
	Lx3 _{mid}	189,8 mm	198,4 mm
	LZ3	209,4 mm	218,9 mm
	LZ1 _F	419,4 mm	428,9 mm
	LZ2 _F	70,6 mm	61,1 mm
4.2)	Lx1 _F	504,4 mm	513,9 mm
	Lx2 _F	65,6 mm	56,1 mm
	F1 _{min}	338 N	255 N
	F2 _{min}	844 N	701 N
	Fz _{min}	1182 N	956 N
4.3)	Lx3 _{min}	-28,0 mm	-31,4 mm
	F1 _{max}	49 N	20 N
	F2 _{max}	966 N	863 N
	Fz _{max}	1015 N	883 N
5)	Lx3 _{max}	107,6 mm	107,7 mm
	B _{VW}	-198,0 mm	-201,4 mm
6)	B _{AW}	417,6 mm	417,7 mm
	ZHt	404,8 mm	383,4 mm
7)	Lc	260 mm	240 mm
	Optie1		
Optie2	α _{cd}	135°	160°
	α _{bd}	77°	57°
	La	225 mm	225 mm
	α _{cd}	305°	285°
Optie2	α _{bd}	75°	51°
	La	216 mm	217 mm



Figuur 39: Resultaten laatste stap testfase: Simulaties mogelijke onderdelen-samenstellingen verkantelingsmechanisme (linksboven=optie1, pp1; rechtsboven=optie2, pp1; linksonder=optie1, pp2; rechtsonder=optie2, pp2)

8.1.3. Eindresultaten testfase

Output metingen

In paragraaf 7.1.1 zijn verschillende constructie-aspecten van het prototype benoemd, die mogelijk van invloed zijn op de output van de metingen. Het gaat in het geval van dit onderzoek om de volgende aspecten: toepassing van drie weegschalen in plaats van vier; onnauwkeurig aflezen van de weegschalen; afwezigheid voetsteun; wisselende bandenspanning (achterwielen). In deze paragraaf wordt bepaald in hoeverre de meetwaarden beïnvloed zijn door desbetreffende beperkingen. Zodoende wordt de output van de weegschalen met elkaar vergeleken (zie tabel 21), waarna er uitspraken gedaan worden over de kwaliteit van de meetopstelling. Er wordt ervan uitgegaan dat de noodzakelijke frame-parameters correct zijn opgemeten in de meetopstelling.

Tabel 21: Vergelijking output weegschalen per proefpersoon

		Meetopstelling			Proefpersoon 1			Proefpersoon 2		
		α1 _{min}	α1 _{mid}	α1 _{max}	α1 _{min}	α1 _{mid}	α1 _{max}	α1 _{min}	α1 _{mid}	α1 _{max}
m _{opst}	kg	-	-	-	39,5	39	40,5	39,5	39	40,5
m _{pp}	kg	-	-	-	80	80	80	59	59	59
m _{tot}	kg	-	-	-	119,5	119	120,5	98,5	98	99,5
m ₁₋₂	kg	9,0	7,5	6,5	34,5	16,5	5	26	13	2
m ₃	kg	15,5	15,5	17	43	50,5	56	35,5	42	45
m ₄	kg	15,0	16	17	43	43,5	42,5	36	42	43
m _{tot}	kg	39,5	39,0	40,5	120,5	110,5	103,5	97,5	97	90
Verschil	kg	-	-	-	↑1,0	↓8,5	↓17,0	↓1,0	↓1,0	↓9,5
Verschil	%	-	-	-	0,83	7,69	16,43	1,03	1,03	10,56

Tijdens nagenoeg alle metingen blijkt de massa van m3 groter te zijn dan die van m4, vooral wanneer m3 een waarde heeft boven de 50kg (zie tabel 21 en figuur 38). Dit gegeven wordt verklaard door de slappere bandenspanning van m3 ten opzichte van m4. De doorzakking van m3 wordt groter naarmate de verkantelingshoek toeneemt: ZP verplaatst richting achteras; de massa's op weegschalen m3 en m4 nemen toe; m3 zakt meer door dan m4 door het spanningsverschil; ZP verplaatst richting m3 en het massaverschil tussen m3 en m4 neemt toe.

Bij de beide proefpersonen blijkt er tevens een aanzienlijk aantal kilo's verloren te zijn gegaan gedurende de metingen (zie tabel 21, onderste rij). Er wordt beredeneerd dat de ZP-projecties in $\alpha 1_{\max}$ achter de achterwielen geprojecteerd worden, waardoor de weegschalen niet in staat zijn alle optredende krachten op te vangen. Zodoende ontstaat er een onstabiele situatie waarbij houdingsveranderingen uitgevoerd dienen te worden voor evenwichtsbehoud. Afgezien van discomfort zorgen dergelijke aspecten tevens voor aanzienlijk minder betrouwbare meetresultaten. De integratie van een voetsteun in de testopstelling zou het ZP meer richting voorwielen doen verplaatsen, waardoor het algemene evenwicht van de meetopstelling toeneemt, met betrouwbaardere output als resultaat.

Tijdens de data-analyse van de onderzoeksmethode (zie bijlage 13, fase 3) zijn de noodzakelijke rolstoelparameters per proefpersoon vastgesteld in het sagittale vlak, en de eindresultaten staan uitgezet in tabel 22. De meetwaarden en frameparameters uit de meetopstelling zijn gebruikt voor het berekenen van DP2, BVW en BAW. Daarnaast zijn de afmetingen en onderlinge positioneringen van onderdelen van het verkantelingsmechanisme berekend en benaderd. Aangezien het gewenst is wanneer de gasveer zo verticaal mogelijk gepositioneerd staat (zie bijlage 13, stap 7), is er wat betreft het verkantelingsmechanisme in beide gevallen gekozen voor de eerste optie van het simulatiemode (zie tabel 20 en figuur 29). Met behulp van de parameters uit tabel 22 kan de definitieve rolstoel vervolgens persoonlijk op maat gemaakt worden.

Symb	Specificatie	Waarde PP1	Waarde PP2	Pronto frameconstructie (sagittaal)
Parameters basisconstructie frame → zwart in figuur				
LZ _F	Lengte zitting totaal	490 mm	490 mm	
LZ1 _F	Lengte voorste deel zitting (αZO _F -DP)	419,4 mm	428,9 mm	
LZ2 _F	Lengte achterste deel zitting (DP-αRZ _F)	70,6 mm	61,1 mm	
ZHt	Zithoogte: DP-onderk. voetsteun	404,8 mm	383,4 mm	
Parameters plaatsing wielen → rood in figuur				
B _{VW}	Horizontale afst. voorwielas - DP	198,0 mm	201,4 mm	
B _{AW}	Horizontale afst. achterwielas - DP	417,6 mm	417,7 mm	
Parameters verkantelingmechanisme → blauw in figuur				
L _a	Lengte onderdeel a	225 mm	225 mm	
L _d	Lengte onderdeel d	63 mm	63 mm	
L _c	Lengte onderdeel c	260 mm	240 mm	
L _b	Lengte onderdeel b	260-320 mm	260-320 mm	
α _{cd}	Hoek c-d	135°	160°	
α _{bd}	Hoek b-d	77°	57°	

Te zien is dat de afmetingen en positioneringen omtrent de zittinglengte (LZ_F), het DP en de wielassen erg overeenkomen voor beide proefpersonen. Dit is logisch aangezien er voor de metingen gebruik gemaakt is van exact dezelfde frameverstellingen en verkantelingshoeken. De onderdelensamenstellingen van het verkantelingsmechanisme is daarentegen wel verschillend doordat de lichaamsmaten van de proefpersonen anders zijn.

8.2. Test a.d.h.v. eisen en wensen

Om te bepalen in hoeverre de Pronto onderzoeksmethode van dit afstudeerproject geslaagd is, wordt het eindontwerp getoetst aan de vooraf gestelde eisen (zie tabel 13, hoofdstuk 5). Het toetsen van het eindontwerp gebeurt aan de hand van de zogenaamde “Cardinale methode”. In deze methode worden er twee scores toegekend aan iedere eis, één geeft aan hoe belangrijk deze eis is en de andere geeft informatie over de mate waarin deze aanwezig is in het eindontwerp. De vermenigvuldigde waarden vormen de totaalscores per eis, op basis waarvan het eindproduct gemakkelijk beoordeeld kan worden. Eventuele mankementen in het ontwerp worden gesignaleerd en geanalyseerd, waarna er oplossingen geopperd kunnen worden voor verbetering. De uitgevoerde “Cardinale methode” staat uitgezet in de tabel van bijlage 15.

In totaal zijn er twee eisen niet meegenomen in de bepalingen. Eis 3 kan niet beoordeeld worden aangezien de vernieuwde rolstoel maatvoering niet verwerkt is in een rolstoel, waardoor er tot op heden niks gezegd kan worden over het comfort. Verder is er in dit project geen onderzoek gedaan naar de kosten van het definitieve systeem waardoor eis 18 dus niet aan de orde is gekomen.

Aan de hand van bijlage 15 wordt er geconcludeerd dat het eindproduct van de Pronto onderzoeksmethode voor 90% voldoet aan de vooraf gestelde ontwerpeisen ($((100/1440)*1297=90)$). In onderstaand overzicht worden er verklaringen en oplossingen gegeven voor de 10% van het eindontwerp dat niet geslaagd is.

Eisen m.b.t de aanwezigheid van een voetsteun (eisen 36, 38, 39, 50, 70)

Zoals eerder in de testfase reeds is vastgesteld, levert de afwezigheid van een voetsteun problemen op wat betreft de stabiliteit van de meetopstelling, het comfort tijdens de metingen en de betrouwbaarheid van de meetresultaten. De eisen met betrekking tot de voetsteun zorgen voor een puntenverlaging van 73, wat resulteert in een 5% minder geslaagd eindproduct. Er kan gesteld worden dat een voetsteun erg belangrijk is voor de kwaliteit van ontworpen systeem.

Eisen m.b.t. verstelbaarheid meetopstelling (eisen 1, 31, 32, 34)

In de vervaardigde testopstelling zijn een aantal frame-elementen onvoldoende verstelbaar, namelijk de verkantelingshoek (α_1), de ruglengte (LR_F), de rugbreedte (BR_F) en de zittingbreedte (BZ_F). In totaal zorgt dit gegeven voor een 33 punten en 2,4% lagere totaalscore.

Eisen m.b.t het aantal weegschalen (eisen 20, 25, 40)

In de testopstelling zijn drie weegschalen gebruikt in plaats van vier, waardoor de stabiliteit van de opstelling en het comfort gedurende de metingen verminderd is in vergelijking met het voorgestelde definitieve meetopstelling ontwerp. Dit ontwerpaspect gaat gepaard met een puntenverlies van 20 (= 1,5%).

Overige eisen (13, 16, 29, 45)

Enkele aspecten die zorgen voor een niet standaard situatie, waaronder niet-frequent extreme lichaamshoudingen van de cliënt (eis 13) en toevoegingen van bepaalde accessoires (eis 16), worden niet voldoende meegenomen in de bepalingen van de meetopstelling. Het aflezen van de weegschalen gebeurt op een onvoldoende nauwkeurige wijze (eis 45) en daarnaast bestaat het frame uit verouderde Pronto onderdelen, waardoor deze niet volledig overeenkomt met de werkelijke situatie (eis 29). Deze aspecten hebben zorgen voor een verminderd puntenaantal van 17, wat overeenkomt met 1,25% verlaging van de kwaliteit van het eindontwerp.

9. Discussie

Dit afstudeerproject heeft plaatsgevonden in opdracht van Exello Revalidatietechniek in Cothen. Tijdens de afstudeerperiode is er een systeem ontwikkeld, vervaardigd en getest, waarmee Exello de Pronto kantelrolstoel op betrouwbare en gebruiksvriendelijke wijze exact kan afstellen op het individu. Het systeem genereert een overzicht van de noodzakelijke rolstoelparameters per persoon, om zodoende een immer veilige en stabiele situatie te creëren en de noodzakelijke verkantelingsrange bereikt kan worden op een schokloze en comfortabele manier. Het uiteindelijke systeem bepaald de benodigde afmetingen en onderlinge positioneringen van Pronto onderdelen bepalen aan de hand van de zwaartepuntbaan van de rolstoel, orthese en cliënt, waarbij het verkantelingsdraaipunt en de voor- en achterwielas weloverwogen gepositioneerd worden ten opzichte van elkaar en ten opzichte van de ZP-baan.

Voorafgaand aan de afstudeerperiode is er een onderzoeksvraagstelling opgesteld, welke gedurende het proces beantwoord is. De vraagstelling met betrekking tot het vooronderzoek luidt als volgt: *“Welke persoonlijke cliënt-parameters moeten gebruikt worden om te allen tijde een veilige en stabiele situatie te kunnen garanderen?”* en *“Wat zijn de technische eigenschappen van de rolstoel (+ orthese), wat zijn de technische mogelijkheden wat betreft de individuele afstelling en hoe gaat dit proces in zijn werk?”* Ook zijn er antwoorden geformuleerd op de onderzoeksvragen ten behoeve van het ontwerpproces, namelijk: *“Hoe kan er vastgesteld worden waar het gemeenschappelijke zwaartepunt van de rolstoel, orthese en cliënt geprojecteerd wordt?”* en tot slot: *“Welke rolstoelonderdelen zijn bepalend voor het verkantelingsverloop en hoe kunnen de exact benodigde afmetingen en posities van deze onderdelen bepaald worden?”* De ontwikkelde en vervaardigde onderzoeksmethode bestaat uit twee producten, namelijk een prototype van een verstelbare, fysieke Pronto meetopstelling en een gedetailleerd onderzoeksprotocol met duidelijke toelichting bij alle stappen van de meetprocedure en data-analyse.

Aan de hand van praktijkgericht onderzoek binnen Exello is er informatie verzameld over de doelgroep, de huidige afstellingsprocedure van de kantelrolstoel en de technische specificaties. Met name het aanbod aan technisch naslagwerk is beperkt gebleken. Maar met behulp van de nodige technische (SW) tekeningen, grove schetsen, gesprekken met medewerkers van Exello en het bestuderen van de Pronto, zijn de (standaard) afmetingen en mogelijke vorm- en positie variaties van een belangrijk deel van de onderdelen toch inzichtelijk gemaakt. De afmetingen en posities van het draaipunt, de voor- en achterwiel as en vier onderdelen van het verkantelingsmechanisme in het sagittale vlak zijn van groot belang gebleken voor het creëren van een gewenst verkantelingsverloop. Desbetreffende aspecten blijken allen bepaald te moeten worden op basis van de horizontale ZP-baan van de rolstoel, orthese en cliënt gedurende de volledige verkantelingsrange in het sagittale vlak.

In het uiteindelijke systeem moet de ZP-baan van de verkanteling dus als eerste bepaald worden. Uit veelsoortig wetenschappelijk onderzoek is gebleken dat de toepassing van krachtenplatforms en kinematische berekeningen het meest geschikt zijn voor het doeleinde, maar de apparatuur is veel te kostbaar voor dit project en de precisie van het systeem is onnodig hoog. De toepassing van personenweegschalen is overwogen, daar zij beschouwd kunnen worden als vereenvoudigde, minder accurate en minder kostbare krachtenplatforms. De functionaliteit en bruikbaarheid van de onderzoeksmethode is beoordeeld aan de hand van zowel een theoretische- als een fysieke testsituatie. Uit beide tests is geconcludeerd dat een fysieke meetopstelling met personenweegschalen zeer goed bruikbaar is voor de ZP-bepalingen van dit project.

In de meetopstelling is er een gedeeltelijk verstelbare Pronto passtoel toegepast als basisconstructie, waarin voornamelijk de voor dit project relevante standaard onderdelen zijn vertegenwoordigd. Het opmeten van de noodzakelijke frameaspecten en het bestuderen van rolstoel elementen tijdens de metingen is daardoor ongecompliceerd en overzichtelijk gebleken. Qua functionaliteit lijken de originele- en de passtoel Pronto sterk op elkaar en het frame kan dus goed aangepast worden aan persoonlijke situaties. En alhoewel de passtoel wat verouderd is qua model, het verkantelingsmechanisme werkt nog hetzelfde waardoor ook de uiteindelijke ZP-baan representatief is. Verder is de passtoel reeds voorzien van veel noodzakelijke verstelbaarheden en de orthese kan eenvoudig gemonteerd worden in het frame. Een belangrijk voordeel van de fysieke meetopstelling is dat cliënt-specifieke bewegingen, massaverdelingen, beperkingen et cetera zijn opgenomen in de bepalingmethode, waardoor de output erg natuurgetrouw en betrouwbaar is.

De ontwikkelde onderzoeksmethode is getest door het Pronto onderzoeksprotocol van begin tot eind te doorlopen, gebruik makend van het meetopstelling-prototype en twee (gezonde) proefpersonen. De massaverdelingen van de rolstoel, orthese en cliënt zijn gemeten tijdens drie statische condities (minimale, middelste, maximale verkanteling). Vervolgens wordt de horizontale zwaartepunt-baan in het sagittale vlak

berekend met een drietal momentenvergelijkingen, waarna achtereenvolgend de noodzakelijke posities worden bepaald van het DP, de voor- en achterwiel as en acht noodzakelijke lengte- en hoekmaten van onderdelen van het verkantelingsmechanisme.

In de eindfase van het afstudeerproject zijn er een aantal aspecten aan het licht gekomen die anders zouden kunnen voor een veiligere, comfortabelere en betrouwbaardere Pronto onderzoeksmethode. Tijdens de metingen is er vooral in de maximale verkantelingstand zijwaartse instabiliteit ervaren, wat tevens gemeten is door de weegschalen. Voornamelijk de achterwaartse instabiliteit was duidelijk merkbaar volgens beide proefpersonen en er heerste een verhoogde neiging tot omvallen richting achterzijde in de verkantelingstand van 40°. De meet- en eindresultaten uit beide testsituaties geven een duidelijke bevestiging van desbetreffende waarnemingen, en de situatie wordt verklaard aan de hand van een aantal beperkingen in het prototype. In ieder geval is het in het prototype al duidelijk zichtbaar geworden dat de achterwiel as te veel naar voren geplaatst is (richting DP). Bovendien bleken de berekende posities van de voor- en achterwiel as een aanzienlijk stuk verder weg van DP te moeten liggen dan nu het geval is in de passtoel. Het feit dat de instabiliteit al ontstaat bij een relatief kleine maximale verkantelingstand (40°) is dan ook niet verwonderlijk.

Tijdens de ontwerpfase is gekozen om vier weegschalen direct onder de vier steunpunten van het rolstoelframe te verankeren (=wielassen), zodat het steunvlak qua afmetingen overeen komt met het daadwerkelijke Pronto situatie. Door middel van een stevige montage tussen de ondergrond, weegschalen en rolstoelframe werd deze situatie gezien als immer veilig en stabiel. Daarnaast heeft het vierkante meetoppervlak inzicht geboden in de massaverdeling van zowel het sagittale als het dorsale/frontale vlak, waardoor eventuele ongewenste afwijkingen in het krachten spel nog beter gesignaleerd en verholpen kunnen worden. Wanneer de rolstoel wordt ingesteld in een (zeer) grote verkantelingshoek, kan er echter niet uitgesloten worden dat er (delen van) krachten buiten het meetoppervlak aangrijpen. Uit de meetresultaten van beide proefpersonen is gebleken dat er inderdaad krachten verloren zijn gegaan tijdens de metingen. Hierdoor is de betrouwbaarheid van de meetwaarden en dus ook van de berekende ZP-posities verminderd. In de uiteindelijke meetopstelling dienen de weegschalen daarom dusdanig ver uit elkaar te staan dat de krachten nooit buiten het steunvlak kunnen vallen, zelfs niet in de meest extreme situaties.

De bandenspanning in de achterwielen van de passtoel bleek ongelijk verdeeld, waardoor er zowel een voor-achterwaartse-, als een zijwaartse instabiliteit is geconstateerd tijdens de metingen. De output van de testmetingen laat zien dat deze instabiliteit in het sagittale vlak alleen maar toeneemt naarmate de verkanteling vordert. Dit is logisch, de ZP-positie verplaatst immers meer naar achteren naarmate de verkantelingstand toeneemt. Door de slappe band is het massa-verschil eveneens toegenomen in het dorsale vlak, doordat een verdere doorzakking een grotere ZP-verplaatsing veroorzaakt richting de slappe band. Het aangrijpen van krachten buiten het steunvlak vormt in dergelijke situaties een verhoogde kans. Dit probleem kan zeer eenvoudig opgelost worden door de banden van alle wielen op te pompen met eenzelfde bandenspanning.

Bij gebrek aan meerdere weegschalen is het prototype voorzien van slechts drie weegschalen in plaats van vier. Gebleken is dat eliminatie van één weegschaal/steunpunt uit de meetopstelling weinig effect heeft gehad op de meetresultaten. De gezonde proefpersonen hebben de kleine balansverstoring ongedaan gemaakt middels subtiele spiermomenten zonder waarneembare houdingsveranderingen. Wel hebben beide proefpersonen een zekere instabiliteit ervaren tijdens het plaatsnemen in de meetopstelling. Desondanks wordt er gesteld dat vier weegschalen zorgen voor een verhoogde stabiliteit en comfort gedurende de metingen, wat noodzakelijke aspecten zijn voor de doelgroep van dit project. Uiteindelijk zal de betrouwbaarheid van de output uit de meetopstelling en de eindresultaten eveneens toenemen.

Daarnaast zijn er verschillende soorten weegschalen gebruikt met verschillende afmetingen, waardoor er een constructie gebouwd moest worden om de weegschalen exact juist te kunnen positioneren. Het definitieve eindontwerp moet bestaan uit een aanzienlijk eenvoudiger en steviger constructie. Verder is het aflezen van de weegschalen bemoeilijkt tijdens de metingen doordat de monitoren gepositioneerd zijn aan de onderzijde van de meetopstelling. Het gemak, de duur en de betrouwbaarheid van het collecteren van de meet data is hierdoor in het geding gekomen. In de definitieve meetopstelling moeten de weegschaalmonitoren aan de zijkanten van de opstelling geplaatst worden.

Het ontbreken van de voetsteun in de meetopstelling is erg nadelig gebleken. Naast het gesignaleerde discomfort door het niet kunnen plaatsen van de voeten, ontbreekt er een aanzienlijke massa aan de voorzijde van de meetopstelling. De ZP-projectie wijkt hierdoor af van de daadwerkelijke situatie en verplaatst bovendien in toenemende mate meer richting achteras naarmate de verkanteling vordert. De afwezigheid van de voetsteun

resulteert niet alleen in een onveilige en instabiele situatie, ook de betrouwbaarheid van de meet- en eindresultaten neemt af. Voor de uiteindelijk opstelling is een voetsteun dus absoluut vereist. De passtoel is reeds uitgerust met een constructie die een stevige montage en variabele positionering van een passende voetsteun mogelijk maakt.

Een aantal frameonderdelen zijn onvoldoende verstelbaar in de passtoel. Zo zijn de zittingbreedte, rugbreedte en ruglengte helemaal niet variabel en hun afmetingen zijn vrij groot toegepast in het frame. In de testfase zijn de loze ruimtes tussen de zitelementen opgevuld door de (geïmproviseerde) orthese van het prototype. Beide proefpersonen hebben hierdoor voldoende steun en comfort ervaren gedurende de metingen. In de definitieve meetopstelling moeten er daarentegen wel verstelbaarheden aangebracht kunnen worden in desbetreffende parameters, zodat iedere orthese gewenst ingepast kan worden voor een optimaal comfort tijdens de metingen. Ook de verkantelingsrange is beperkt verstelbaar in het prototype, namelijk van minimaal 5° tot maximaal 40°. Overigens is dit een vrij gangbare range binnen Exello en deze bleek dan ook voldoende groot om een geschikte en realistische testsituatie te creëren. Uiteindelijk dient de verkanteling echter een bereik te hebben van -10° tot 60° omdat deze range onderzoek toelaat voor de meest extreme situaties.

Het onderzoeksprotocol is erg gebruiksvriendelijk gebleken, vooral vanwege de overzichtelijke opbouw, de duidelijke toelichting bij iedere stap en de wijze van output-documentatie. Voor de werkplaatsmedewerkers is het relatief eenvoudig om het vernieuwde afstellingsprotocol toe te passen en onder de knie te krijgen. Ook is het eindproduct getoetst aan de vooraf gestelde ontwerpeisen en er is vastgesteld dat het systeem voor 90% voldoet aan gestelde eisen. De doelstelling van het project is hiermee behaald en het gerealiseerde systeem ter optimalisatie van de individuele Pronto rolstoelafstelling is geslaagd. De 10% van het systeem dat niet geschikt bevonden is wordt volledig veroorzaakt door de genoemde beperkingen van het prototype. Er is geconcludeerd dat bijna alle gesignaleerde problemen op zeer eenvoudige wijze verholpen kunnen worden, uitgezonderd van de gewenste verstellingen van de verkantelingsrange, de zittingbreedte, rugbreedte en ruglengte.

Al met al wordt er geconcludeerd dat de voor dit project ontworpen onderzoeksmethode goed bruikbaar is voor het nauwkeurig vaststellen van relevante rolstoelparameters. In een eventueel vervolg op dit project wordt de methode geoptimaliseerd door één weegschaal toe te voegen aan de meetopstelling, de afstand tussen de weegschalen te vergroten, een voetsteun te bevestigen en de banden gelijk op te pompen. De kwaliteit van de Pronto onderzoeksmethode wordt zodoende verhoogd met een totaal slagingspercentage van maar liefst 98% als eindresultaat. Uiteindelijk wordt er met behulp van de methodisch verkregen output een veilige en betrouwbare situatie gecreëerd per persoon, waarbij de gewenste verkantelingsrange op een comfortabele en schokloze wijze bereikt kan worden. Ook de kans op secundair gesignaleerde constructieproblemen wordt teruggedrongen.

10. Conclusie

Tijdens deze afstudeerperiode is er een systeem ontwikkeld waarmee de geschikte rolstoelafstelling voor mensen met ernstig lichamelijke beperkingen in kaart gebracht kan worden. Het eindproduct van dit project bestaat uit een prototype van de fysieke Pronto meetopstelling, en een onderzoeksprotocol, waarin de uit te voeren meetprocedure en data-analyse stap voor stap uitgezet zijn. Hiermee wordt allereerst de zwaartepuntbaan van cliënt, orthese en rolstoel bepaald gedurende de verkantelingsrange, welke vervolgens het uitgangspunt vormt voor het berekenen en benaderen van de noodzakelijke rolstoelparameters in het sagittale vlak.

In de testfase is de kwaliteit en functionaliteit van de definitieve onderzoeksmethode beoordeeld aan de hand van twee proefpersonen en een toetsing aan de vooraf gestelde eisen voor het eindproduct. Gebleken is dat het systeem voor het overgrote gedeelte, namelijk 90%, voldoet aan de verwachtingen en eisen. Daarmee is er geconcludeerd dat het systeem erg goed toepasbaar is voor het optimaliseren van het individuele afstellingsprocedure. Er is beargumenteerd dat bepaalde beperkingen van het prototype resulteren in verminderd betrouwbare meetresultaten. Dit kan opgelost worden door de uiteindelijke meetopstelling te voorzien van vier weegschalen, de afstand tussen de weegschalen te vergroten, een voetsteun te integreren in het frame en de banden een gelijke spanning te geven. Indien deze wijzigingen zijn doorgevoerd in het frame is de onderzoeksmethode voor maar liefst 98% geslaagd.

Tot slot is er geconcludeerd dat het hoofddoel voor dit project op een succesvolle wijze behaald is. Met het ontworpen systeem is het mogelijk een duidelijk en betrouwbaar overzicht te genereren van de benodigde Pronto frameparameters per persoon. Met deze parameters kunnen de rolstoelbouwers van Exello de rolstoel exact individueel op maat maken, zodat er een optimaal comfort ontstaat en de noodzakelijke verkantelingsrange op een schokloze en comfortabele wijze bereikt kan worden.

Literatuur

1. Weide L. "Mensenmassa".
2. Damavandi M., Farahpour N., Allard P. 2009. "Determination of body segment masses and centers of mass using a force plate method in individuals of different morphology". Medical Engineering & Physics; 31: 1187-1194.
3. Pearsall DJ., Reid JG., Ross R. 1994. "Inertial properties of the human trunk of males determined from magnetic resonance imaging". Ann Biomed Eng; 22: 692-706.
4. Jensen RK. 1993. "Human morphology: its role in the mechanics of movement". Journal of Biomechanics; 26(suppl.1): 81-94.
5. Clarys JP., Marfell-Jones MJ. 1986. "Anthropometric prediction of component tissue masses in the minor limb segments of the human body". Hum Biol; 58: 761-9.
6. Eliakim A. Et al. 2002. "The effect of a combined intervention on body mass index and fitness in obese children and adolescents: a clinical experience". Eur J Pediatr; 161(August (8)): 449-54.
7. Bernstein NA., Salzgeber OA., Pavlenko PP., Gurvich NA. 1931. "Determination of location of the centers of gravity and mass of the limbs of the living human body". Moscow: Russian All-Union Institute of Experimental Medicine.
8. Hanavan EP. 1964. "A mathematical model of the human body". AMRL Technical Report 64-102. Wright-Patterson Air Force Base, OH.
9. Jensen RK. 1978. "Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method". J Biomech; 11: 349-58.
10. Winter DA. 2005. "Biomechanics and motor control of human movement". 3rd ed. New York: Wiley & Sons Inc.; p.74-5.
11. Martin PE., Mungiole M., Marzke MW., Longhill LM. 1989. "The use of magnetic resonance imaging for measuring segment inertial properties". J Biomech; 22: 367-76.
12. Huang HK., Suarez FR. 1983. "Evaluation of cross-sectional geometry and mass density distributions of humans and laboratory animals using computerized tomography". J Biomech; 16: 821-32.
13. Durkin JL., Dowling JJ., Andrews DM. 2002. "The measurement of body segment inertial parameters using dual energy X-ray absorptiometry". J Biomech; 35(12): 1575-80.
14. Zatsiorsky VM., Seluyanov VN. 1983. "The mass and inertial characteristics of the main segments of the human body". In: Matsui H, Kobayashi K, editors. Biomechanics, vol. VIII-B. Champagne, IL: Human Kinetics Publishers; p. 1152-9.
15. Tang L., Shangguan WB. 2011. "An improved pendulum method for the determination of the center of gravity and inertia tensor for irregular-shaped bodies". Measurement; 44: 1849-1859.
16. Zatsiorsky VM., Aruin AS., Seluyanov VN. 1981. "Biomechanics of musculo-skeletal system". Moscow: FiS.
17. Dempster WT. 1955. "Space requirements for the seated operator. WADC Technical Report 55-159". Wright-Patterson Air Force Base, OH.
18. De Leva P. 1996. "Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertial parameters". J Biomech; 29: 1223-30.
19. Cooper RA. 1989. "An international track wheelchair with a center of gravity directional controller: A technical note". Journal of Rehabilitation Research and Development; vol. 26, No. 2: p. 63-70.
20. Vandale.nl, "Zwaartepunt". Geraadpleegd op 31 maart 2015. <http://www.vandale.nl/opzoeken?pattern=zwaartepunten&lang=nn#.VRndbroxFGE>
21. Wikipedia.nl, "Zwaartepunt". Geraadpleegd op 20 november 2014. <http://nl.wikipedia.org/wiki/Zwaartepunt>
22. Google.com, "Massamiddelpunt menselijk lichaam". Geraadpleegd op 31 maart 2015. <http://www.hijc.nl/Schaatsen/Schaatstechniek.aspx>
23. Lemaire ED., Lamontagne M., Barclay HW., John T., Martel G. 1991. "A technique for the determination of center of gravity and rolling resistance for tilt-set wheelchairs". Journal of Rehabilitation Research and Development; 28(3): p. 51-58.
24. Cooper RA. 1989. "Racing wheelchair crown compensation". Journal of Rehabilitation and Research Development 26(1): 25-32.
25. Brubaker CE. 1986. "Wheelchair prescription: An analysis of factors that affect mobility and performance". Journal of Rehabilitation Research and Development; 23(4): 19-26.
26. Lenzi D., Capello A., Chiari L. 2003. "Influence of body segment parameters and modeling assumptions on the estimate of center of mass trajectory". Journal of Biomechanics; 36: 1335-1341.
27. Davidson PL., Wilson SJ., Wilson BD., Chalmers DJ. 2008. "Estimating subject-specific body segment parameters using a 3-dimensional modeller program". Journal of Biomechanics; 41: 3506-3510.
28. Baca A. 1996. "Technical note - Precise determination of anthropometric dimensions by means of image processing methods for estimating human body segment parameter values". Journal of Biomechanics; vol. 29, no. 4, pp.563-567.
29. Bonnet V., Gonzalez A., Azevedo-Coste C., Hayashibe M., Cotton S., Fraisse P. 2015. "Determination of subject specific whole-body centre of mass using the 3D Statically Equivalent Serial Chain". Elsevier, Gait & Posture 41; 70-75.
30. Lafond D., Duarte M., Prince F. 2004. "Comparison of three methods to estimate the center of mass during balance assessment". J Biomech; 37:1421-6.
31. Cotton S., Murray A., Fraisse P. 2009. "Estimation of the center of mass: from humanoid robots to human beings". IEEE/ASME Trans Mech; 14:707-12.