

Het analyseren en kwantificeren van de eigenschappen van running blades

Afstudeeronderzoek voor de opleiding Bewegingstechnologie aan de Haagse Hogeschool

Auteur: Roeland Kruiswijk

Juni 2014

Eerste begeleider: Berger, M.A.M.
Tweede begeleider: Koopman, J.

Het analyseren en kwantificeren van de eigenschappen van running blades

1. Samenvatting

Om meer inzicht te krijgen in de eigenschappen van running blades is dit onderzoek verricht. Dit is gedaan aan de hand van de volgende onderzoeksvragen:

1. Wat zijn de stijfheden van de verschillende categorieën blades bij verschillende hoeken?
2. Wat is de invloed van de lengte van het onderbeen op de totale stijfheid van de blades?

Met een theoretische analyse is bepaald wat er gemeten moet worden en volgens welke methode. Om antwoord te geven op de eerste onderzoeksvraag is met een drukbank aan vijf verschillende (gebruikte) blades gemeten, onder vier verschillende hoeken. Hierbij werden de blades zeven centimeter ingedrukt en werd geregistreerd hoeveel kracht hiervoor nodig was. In SPSS Statistics is met behulp van een Curve Estimation Test de stijfheid van de blades bepaald. Met een Lineaire Regressietest is de lineariteit van de datapunten bepaald. Om de betrouwbaarheid van de metingen te bepalen, is één meting vier keer uitgevoerd. Op deze data is in SPSS Statistics een Two-Way Mixed Reliability Analysis uitgevoerd met behulp van een Intraclass Correlation Coefficient.

Om antwoord te kunnen geven op de tweede onderzoeksvraag is met een meetklok de maximale horizontale verplaatsing bepaald van het onderbeen van de blade en van de meetopstelling, tijdens de vier herhaalde drukbankmetingen. Hiermee wordt bepaald of het onderbeen van de blade doorbuigt wanneer er kracht op de voorvoet van de blade wordt gezet. Is dit niet het geval, dan is de lengte van het onderbeen niet van invloed op de stijfheid van de blade.

De stijfheden zijn gemeten en uitgezet tegen de verschillende hoeken. Het verloop van de curves verschilt sterk per blade, maar op een uitzondering na wordt bij elke blade de stijfheid hoger, wanneer de hoek kleiner wordt. Van elke meting was het verloop van de stijfheidscurve lineair. De metingen zijn als zeer betrouwbaar beoordeeld, op zowel consistentie als absolute overeenkomst.

De maximale horizontale verplaatsingen van het onderbeen van de blade en van de opstelling waren respectievelijk 0,4 en 0,2 millimeter. Dit is verwaarloosbaar in vergelijking met een indrukking van 70 millimeter van de voorvoet van de blade.

Het onderzoek geeft een goed inzicht in de eigenschappen van running blades. Geconcludeerd kan worden dat de lengte van het onderbeen een verwaarloosbare invloed heeft op de totale stijfheid van een blade. Verder onderzoek zal verricht moeten worden met ongebruikte blades van alle categorieën. Ook zullen aanpassingen gedaan moeten worden aan de meetopstelling om de praktijksituatie beter te benaderen.

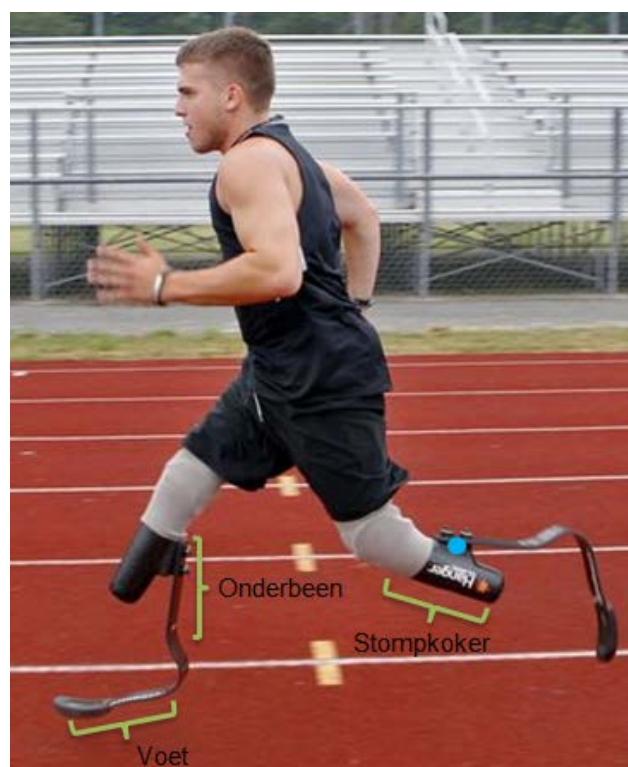
2. Inleiding

De laatste jaren is er veel onderzoek gedaan naar het gebruik van protheses, genaamd running blades, in de atletiekwereld. Er zijn echter weinig objectieve gegevens, zoals stijfheden en hoeken waarin de blades belast moeten worden, beschikbaar. Om te kunnen bepalen wat er verbeterd moet worden aan het huidige ontwerp van de running blades, moeten eerst deze objectieve gegevens gemeten worden.

Vletter (2014) heeft geconcludeerd dat er veel tijd gewonnen kan worden bij de start en de acceleratiefase door aanpassingen van de stijfheid van de blades [1]. Om inzicht te krijgen in de effecten van de stijfheid op de prestaties van een sprinter moet er onderzoek gedaan worden naar de verschillende categorieën blades en de effecten op de sprintprestaties.

2.1. Running blades

Vanuit onder andere de Nederlandse paralympische ploeg is het verzoek gekomen om een onderzoek te doen naar running blades om meer inzicht te krijgen in de eigenschappen van de blades. Alle sprinters van de Nederlandse paralympische ploeg lopen op de Sprinter blades van fabrikant Otto Bock (zie figuur 1). Ook voor andere onderdelen, zoals verspringen, wordt gebruik gemaakt van deze blades. Bij de andere onderdelen kunnen de blades verschillen, qua categorie en hoekinstelling, ten opzichte van het sprinten.



Figuur 1, Sprinter blades (1E90) van Otto Bock met onderdelen weergegeven zoals genoemd in dit artikel. De blauwe stip geeft de verbinding van de blade en de stompkoker weer (Foto: Kris J. Murante)

De Sprinter blades worden gebruikt voor het afleggen van de 100-, 200- en 400-meter sprint door atleten met zowel uni- als bilaterale amputaties. Op het moment bestaan er bij Otto Bock zes verschillende categorieën blades, gebaseerd op gewicht en vermogen van de atleet, waarvan niet exact bekend is welke categorie voor welke loper geschikt is. Een atleet van vijftig kilogram zonder ervaring zal beginnen op de minst stijve blade, categorie 1. Diezelfde atleet zal na een bepaalde tijd op een hogere categorie gaan lopen. Voor een zwaardere atleet geldt hetzelfde principe maar wordt gestart op een hogere categorie. Voor het aanmeten van een set running blades wordt nu gebruik gemaakt van een systeem van trial and error, gecombineerd met de ervaring van atleet, coach en instrumentmaker.

Elke Sprinter blade heeft dezelfde vorm en de voet heeft dezelfde lengte. Het onderbeen kan in lengte variëren om te compenseren voor de lengte van de stompkoker en de hoogte van de amputatie. De lengte van het onderbeen wordt door instrumentmakers zo kort mogelijk gehouden omdat gedacht wordt dat dit effect heeft op de totale stijfheid van de blade. Bij een lang onderbeen zou de totale stijfheid afnemen. Of deze aanname correct is, zal onderzocht moeten worden door middel van metingen aan blades met verschillende onderbeenlengtes. De verwachting is dat de invloed, van de lengte van het onderbeen op de stijfheid van de blade, verwaarloosbaar is. Tijdens de sprint wordt alleen op de voorvoet gelopen. Hierdoor kan in de rest van de blade energie opgeslagen worden. Hoe de blade deze energie weer teruggeeft, hangt af van de hoek van de blade ten opzichte van de grond. Deze hoek kan aangepast worden door de atleet tijdens het lopen door naar voren of achteren te leunen waardoor de hoeken van neerkomen en afzetten aangepast kunnen worden. Niet alleen de atleet kan de hoeken aanpassen, ook de instrumentmaker kan de blade richten door de hoek te veranderen waarmee de blade aan de stompkoker is verbonden.

Het feit dat een blade verschillende karakteristieken heeft bij verschillende hoeken ten opzichte van de grond, is bekend in de atletiekwereld. Atleten weten wanneer de hoekinstelling niet goed is (bij een afwijking van ± 5 graden) en coaches en instrumentmakers zien dit terug in de prestaties. Het is echter niet bekend wat de optimale instelling is per categorie en wat de precieze effecten zijn van een andere hoekinstelling. Verwacht wordt dat een blade een hogere stijfheid heeft wanneer de hoek van het onderbeen ten opzichte van de grond kleiner wordt. De laagste stijfheid wordt verwacht bij een hoek van negentig graden.

2.2. Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen luiden als volgt:

1. Wat zijn de stijfheden van de verschillende categorieën blades bij verschillende hoeken?
2. Wat is de invloed van de lengte van het onderbeen op de totale stijfheid van de blades?

Antwoord op deze vragen zal worden gegeven middels uitvoer van metingen in een laboratorium en niet middels een theoretisch model. Om inzicht te geven in de problematiek en de gekozen methode is hieronder een theoretische analyse gedaan.

3. Theoretische analyse

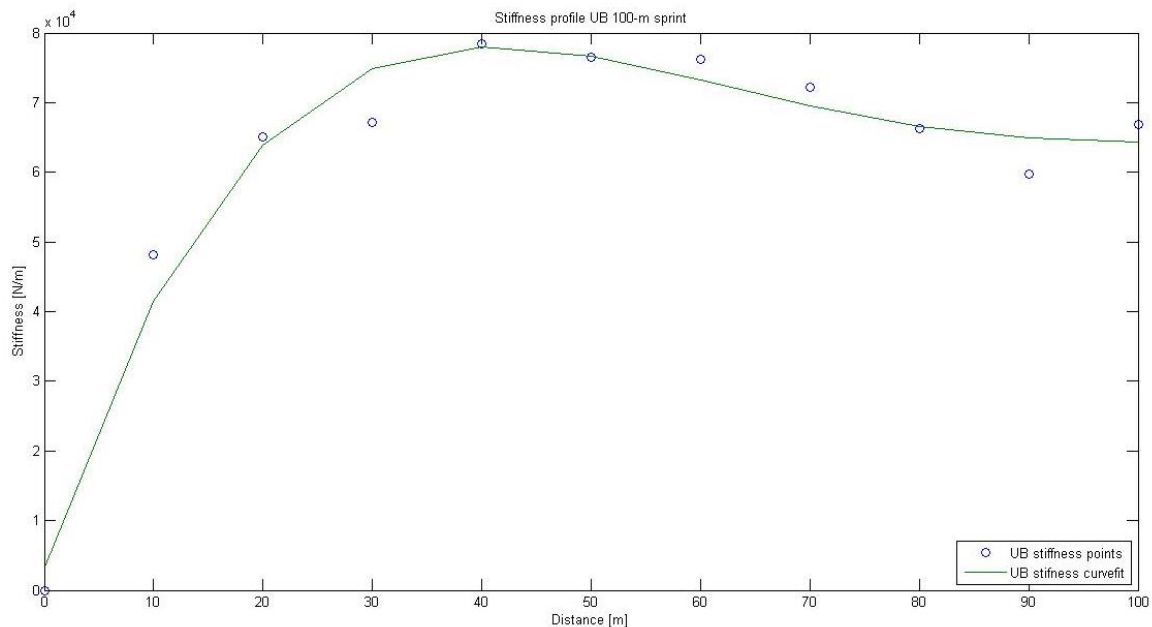
Elke categorie blade heeft een eigen spanning-rek verhouding en een bijbehorende natuurlijke frequentie. Deze frequentie kan een grote invloed hebben op de prestaties van een atleet doordat zijn ideale stapfrequentie mede bepaald wordt door de blades.

Bij een veersysteem, zoals een blade, wordt de hoogste efficiëntie verkregen wanneer de inputfrequentie (stapfrequentie) gelijk is aan de natuurlijke frequentie van de blade. Voor een optimaal gebruik van de blade moet gedurende de hele sprint de stapfrequentie gelijk zijn aan de natuurlijke frequentie van de blade. Op deze manier worden de bewegingen van de atleet minimaal gedempt waardoor zoveel mogelijk energie hergebruikt kan worden voor voortstuwing [2]. Met een wiskundig model is aangetoond dat de energie output van de blade hoger wordt als de zelfgekozen stapfrequentie gesynchroniseerd wordt met de frequentie van de blade. Dit komt overeen met het springen op een trampoline [3].

Gedurende bijvoorbeeld een 100 meter sprint verandert de kracht, het aangrijpingspunt van de kracht en de krachtrichting op de blade. Om ervoor te zorgen dat een blade optimaal presteert, zal het nodig zijn dat de stijfheid van de blade kan variëren. In een onderzoek van Krzysztof et al. (2013) naar de optimale prothese is gekeken naar de stapfrequentie van Usain Bolt tijdens zijn wereldrecord op de

100 meter sprint [4]. In hetzelfde onderzoek werd met de formules $f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$ en $k = m \cdot f^2 \cdot (2\pi)^2$

berekend wat de optimale stijfheid was voor elk deel van de race. Hierin is k de stijfheid van de virtuele prothese [N/m], f de stapfrequentie van Usain Bolt [1/s] en m de massa in [kg]. In figuur 2 is duidelijk zichtbaar dat de benodigde stijfheid stijgt, in overeenstemming met de stijgende stapfrequentie, om de prothese zo efficiënt mogelijk te gebruiken.



Figuur 2, Benodigde stijfheid in N/m (bepaald door stapfrequentie) van een virtuele prothese voor Usain Bolt, uitgezet tegen de afgelegde afstand (m) gedurende een 100 meter sprint. [4]

3.1. Effect van de hoek t.o.v. de grond op de stijfheid.

Om te kunnen bepalen wat de optimale karakteristieken van een prothese zijn, moet er gekeken worden naar de stijfheid ervan, in verschillende posities ten opzichte van de grond. Deze verschillende posities houden in dat de blade in een andere hoek contact maakt met de grond. De hoek met de grond wordt bepaald ten opzichte van het onderbeen van de blade (hoek α in figuur 3).

Doordat de blade een andere hoek ten opzichte van de grond maakt, zal de reactiekracht op de blade een ander effect hebben. Deze hoek verandert tijdens het lopen; bij het neerkomen van de voorvoet is de richting van de kracht anders dan bij het afzetten. Dit verschil wordt veroorzaakt door het verschil in positie van het lichaam ten opzichte van de blade. Wanneer de blade neergezet wordt, zal het lichaam zich achter de blade bevinden. Bij het afzetten bevindt het lichaam zich boven de blade.

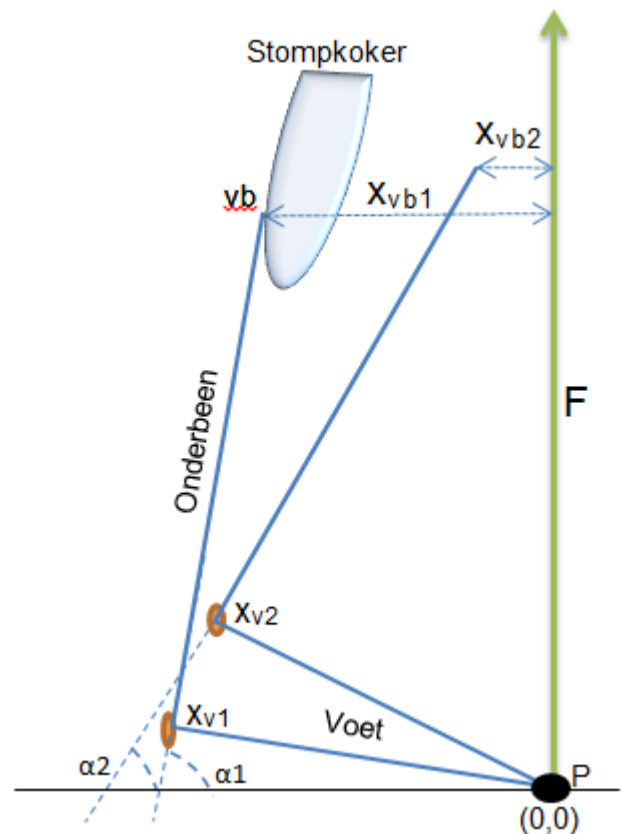
Met dezelfde reactiekracht zal het moment in het buigpunt (gele stip) kleiner zijn wanneer de arm kleiner is. In figuur 3 zal het moment in het buigpunt bij de rechter blade kleiner zijn; de rechter blade zal minder doorbuigen bij dezelfde reactiekracht.

Door de hoekstandverandering van de blade verandert niet alleen de momentsarm ten opzichte van het buigpunt maar ook ten opzichte van de verbinding tussen blade en stompkoker. Aangezien de knie in het verlengde van het onderbeen ligt, verandert ook de momentsarm - en daardoor het moment- in de knie. Deze verandering en de gevolgen hiervan voor de gebruiker zullen in een verwant onderzoek aan de Vrije Universiteit worden onderzocht.



Figuur 3, Hoeken en momentsarmen bij neerkomen (boven) en afzetten (onder). Gele stippe lijn geeft de momentsarm van de kracht (gele pijl) t.o.v. het buigpunt weer. Hoek α is de hoek van het onderbeen met de grond. (Foto's: Daniel Ochoa De Olza)

Om te verduidelijken wat de verschillen in momentsarmen en hoeken zijn tussen het neerkomen en afzetten (en de overgang hiertussen), wordt hier toegelicht wat er gebeurt met de momentsarm van de kracht F ten opzichte van de verbinding tussen blade en stompkoker (vb) bij een hoekverdraaiing van de blade. In figuur 4 is dit principe toegelicht. De blade is hier vereenvoudigd tot een voet en een onderbeen in een hoek van 90 graden in twee situaties; in situatie 1 is de hoek van de het onderbeen ten opzichte van de grond (α) 80 graden en in situatie 2 is dit 60 graden. Er is duidelijk te zien dat de momentsarm van kracht F kleiner is bij een hoek α van 60 graden dan bij 80 graden. Deze verandering is ook aan te tonen door de volgende berekeningen; $x_v = -v * \cos(90 - \alpha)$ en $x_{vb} = x_v + ob * \cos \alpha$. In de eerste formule wordt de x-coördinaat van de hak van de voet (x_v) berekend met de lengte van de voet (v) en hoek α . Die x-coördinaat wordt vervolgens gebruikt in de tweede formule om de x-coördinaat (en daarmee de momentsarm van F ten opzichte) van de verbinding tussen blade en stompkoker (x_{vb}) te berekenen. Dit wordt gedaan aan de hand van de lengte van het onderbeen (ob) en de hoek α . Beide x-coördinaten worden berekend ten opzichte van het aangrijpingspunt van de kracht F ; de punt van de blade (P).



Figuur 4, Model van blade in twee situaties met de momentsarm van F t.o.v. de verbinding (vb) tussen blade en stompkoker (x_{vb}). Situatie 1 = Hoek onderbeen t.o.v. grond (α_1) gelijk aan 80°. Situatie 2 = α_2 is gelijk aan 60°.

x_v = x-coördinaat van de hak van de voet. De punt van de voet (P) wordt beschouwd als de oorsprong $(0,0)$.

Om deze theorie te implementeren in de meetmethode zal er gemeten moeten worden met meerdere hoeken. Als hiermee een verloop kan worden bepaald van de stijfheid van een blade uitgezet tegen de hoek α , kan de vertaalslag naar de praktijk worden gemaakt. Op die manier zouden op basis van de hoek van een blade (bepaald met bijvoorbeeld videoanalyse) de momentane eigenschappen van een blade bepaald worden. Deze kunnen dan vervolgens gebruikt worden om de gevolgen voor de atleet, zoals spierspanningen en krachtrichtingen, te bepalen.

4. Methode

De beschrijving van de methode wordt hieronder opgedeeld in twee onderdelen; het meten van de stijfheden van verschillende categorieën blades bij verschillende hoeken (4.1) en het meten van de invloed van de lengte van het onderbeen op de totale stijfheid van de blade (4.2). Alle metingen zullen gedaan worden aan de Sprinter blades (1E90) van fabrikant Otto Bock.

4.1. Het meten van stijfheden bij verschillende hoeken.

Om de stijfheid bij verschillende hoeken te bepalen worden vijf blades onderzocht met behulp van een drukbank (Zwick 1484), aanwezig op de TU Delft. De vijf blades bestaan uit twee blades van categorie drie en een blade van categorie twee, vier en vijf. Door beperkte beschikbaarheid wordt er gemeten met deze blades en niet met een blade per categorie. De blades worden aangeduid met een cijfer voor de categorie en een K of L (K/L duidt op een kort/lang onderbeen) met daarachter de hoekinstelling (bijv. 3L-70). Een overzicht van alle metingen en blades is weergegeven in figuur 5. Met de opstelling van figuur 6 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** zijn pilotmetingen uitgevoerd om parameters zoals maximale belasting, mate van indrukken en snelheid van indrukken te bepalen. Uit deze metingen kwam ook naar voren dat het gebruik van teflon nodig was om de wrijving tussen blade en krachtopnemer te minimaliseren.

Blade	Lengte onderbeen (cm)	Mate van beschadiging	Metingen (graden)
2K	6	Licht beschadigd	60,70,80,90
3K	6	Onbeschadigd	60,70,80,90
3L	16	Beschadigd	60,70,80,90
4L	15	Onbeschadigd	60,70,80,90
5L	15.5	Beschadigd	60,70,80,90(4x)

Figuur 5, Gegevens van gemeten blades. Mate van beschadiging is beoordeeld op het uiterlijk van de blade en geeft geen zekerheid over hoeveel de blade is gebruikt. Totaal aantal metingen: 23.

4.1.1. Experimentele procedure

De blades worden ingedrukt met een snelheid van 50 mm/min totdat een verticale verplaatsing (van de drukbank naar boven) van zeventig millimeter wordt behaald. Hierna wordt met een snelheid van 100 mm/min de tafel naar beneden verplaatst totdat de tafel zijn beginpunt bereikt. Deze snelheden zijn gekozen op basis van standaard drukbanktests en de expertise van ervaringsdeskundigen. Bij vergelijkbare snelheden zal de test niet wezenlijk verschillen.

Het beginpunt van de tafel wordt zo ingesteld dat de krachtsensor boven de blade geen contact maakt met de blade. Dit is noodzakelijk om de sensor op nul in te stellen voordat de meting gestart wordt.

Met het traploos instelbare scharnier, te zien in figuur 6 kan de blade over 180 graden gedraaid worden zodat onder elke hoek gemeten kan worden. De metingen zullen worden uitgevoerd bij 60, 70, 80 en 90 graden.

Bij elke meting wordt de krachtopnemer op zes centimeter van de punt van de blade geplaatst. Om verschuiving van de blade over de krachtopnemer te voorkomen worden twee aluminium strips geklemd, boven en onder de blade, met de voorste rand op zeven centimeter van de punt.

Om de betrouwbaarheid van de meting te bepalen wordt bij een willekeurige blade de meting bij 90 graden drie keer herhaald.

4.1.2. Dataverwerking

De drukbank is gekoppeld aan een computer met daarop de software TestXpert (Zwick). De software registreert verticale verplaatsing van de tafel en de kracht op de sensor als datapunten in de vorm (I,F). Deze gegevens worden geëxporteerd als TRA-files die uitgelezen worden met Microsoft Excel (versie 2010). Met deze gegevens kan de stijfheid berekend worden aan de hand van de verticale verplaatsing en de benodigde kracht volgens de formule $k = F/\Delta l$, waarin k de stijfheid (veerconstante) is, F de kracht en Δl de verticale verplaatsing van de tafel.

In SPSS Statistics (versie 20, IBM) zal aan de hand van de meetresultaten de stijfheid van de blade bepaald worden door middel van een Curve Estimation Test. Hiermee wordt een lineaire trendlijn door de datapunten bepaald met een bijbehorende richtingscoëfficiënt. Deze richtingscoëfficiënt is gelijk aan de stijfheid van de blade. Vervolgens wordt met een Lineaire Regressietest de R^2 -waarde bepaald van de lineaire trendlijn. Deze waarde geeft aan in hoeverre de trendlijn correleert met de datapunten; bij een waarde van 1 komen de datapunten en de lineaire trendlijn precies overeen. Bij een waarde onder 0.95 is de correlatie niet significant.



Figuur 6, Opstelling in drukbank. 1:Krachtopnemer, 2:Teflon, 3: Aluminium strips, 4: Traploos instelbaar scharnier. Hoek $\alpha = 70^\circ$

Om de betrouwbaarheid van de meting te bepalen wordt in SPSS Statistics een Two-way Mixed Reliability Analysis uitgevoerd met behulp van een Intraclass Correlation Coefficient (ICC) waarbij wordt gekeken naar consistentie en absolute overeenkomst. Bij consistentie wordt er gekeken naar een overeenkomst tussen de patronen van de datareeksen. Bij absolute overeenkomst wordt er gekeken naar overeenkomst tussen elke afzonderlijk datapunt van de reeksen. Bij een ICC van 0.95 of hoger, wordt de meting als betrouwbaar verondersteld.

4.2. De invloed van de lengte van het onderbeen op de stijfheid van de blade.

Om te bepalen of de lengte van het onderbeen invloed heeft op de stijfheid van de blade, worden metingen gedaan met een meetklok op het onderbeen (zie figuur 7) om horizontale verplaatsing te registreren. De punt van een meetklok wordt geplaatst tegen een object waarna de meetklok op nul wordt gezet. De blade wordt vervolgens ingedrukt en de meetklok registreert de indrukking van de punt in tienden van een millimeter.

De metingen worden gelijktijdig gedaan met de vier herhaalde metingen (ter controle van betrouwbaarheid van de metingen). Als er geen horizontale verplaatsing gemeten wordt, buigt het onderbeen niet wanneer er kracht wordt gezet op de voorvoet van de blade. De buiging (vervorming) van de blade is dan beperkt tot de voet en de bocht tussen voet en onderbeen. Het onderbeen wordt in deze situatie als oneindig stijf beschouwd en heeft geen invloed op de totale stijfheid van de blade. De stijfheid van een systeem wordt bepaald door de zwakste schakel. Als het onderbeen oneindig stijf is, maakt de lengte van het onderbeen geen verschil voor de stijfheid van de blade.

Ter controle worden metingen uitgevoerd met de meetklok op de verbinding tussen de blade en de opstelling.

Hiermee kan worden nagegaan of de horizontale verplaatsing in het onderbeen plaatsvindt of in de opstelling zelf. Afhankelijk van de verhouding, tussen de horizontale verplaatsing van de opstelling en de blade, kan een uitspraak gedaan worden over de invloed van de lengte van het onderbeen op de totale stijfheid. Wanneer de horizontale verplaatsing van de opstelling bijvoorbeeld 2 centimeter bedraagt en die van de blade 2,1 centimeter, wordt de horizontale verplaatsing voornamelijk veroorzaakt door de opstelling. Aangezien de opstelling onder de blade zit en een hoekverdraaiing maakt, zal de gemeten verplaatsing te wijten zijn aan de hoekverdraaiing. De invloed van de lengte van het onderbeen op de verplaatsing heeft dan geen significante invloed op de totale stijfheid van de blade.



Figuur 7, Opstelling in drukbank. De getekende blade is een (overdreven) weergave van de situatie bij een ingedrukte blade. Bij 1 wordt met een meetklok de horizontale verplaatsing van het onderbeen gemeten. Bij 2 wordt de horizontale verplaatsing van de opstelling gemeten. De rode cirkel is het aangenomen draaipunt van de opstelling+blade.

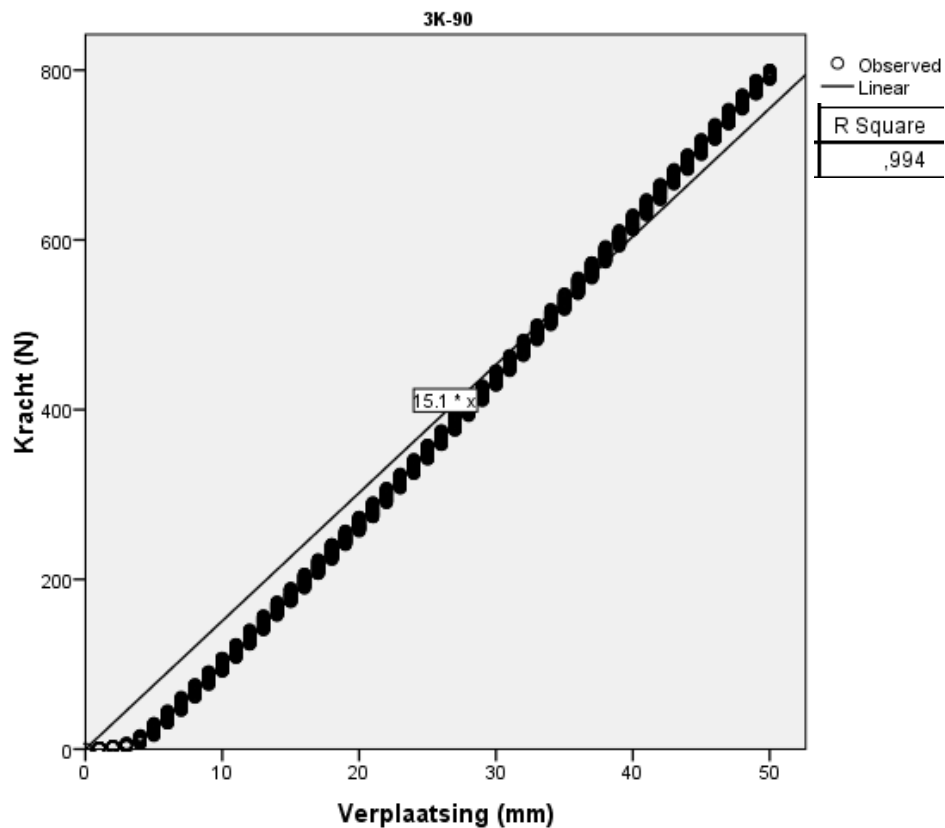
5. Resultaten

Net als de methode worden de resultaten gescheiden weergegeven; het meten van de stijfheden bij verschillende hoeken (5.1) en de invloed van de lengte van het onderbeen (5.2).

5.1. Het meten van stijfheden bij verschillende hoeken.

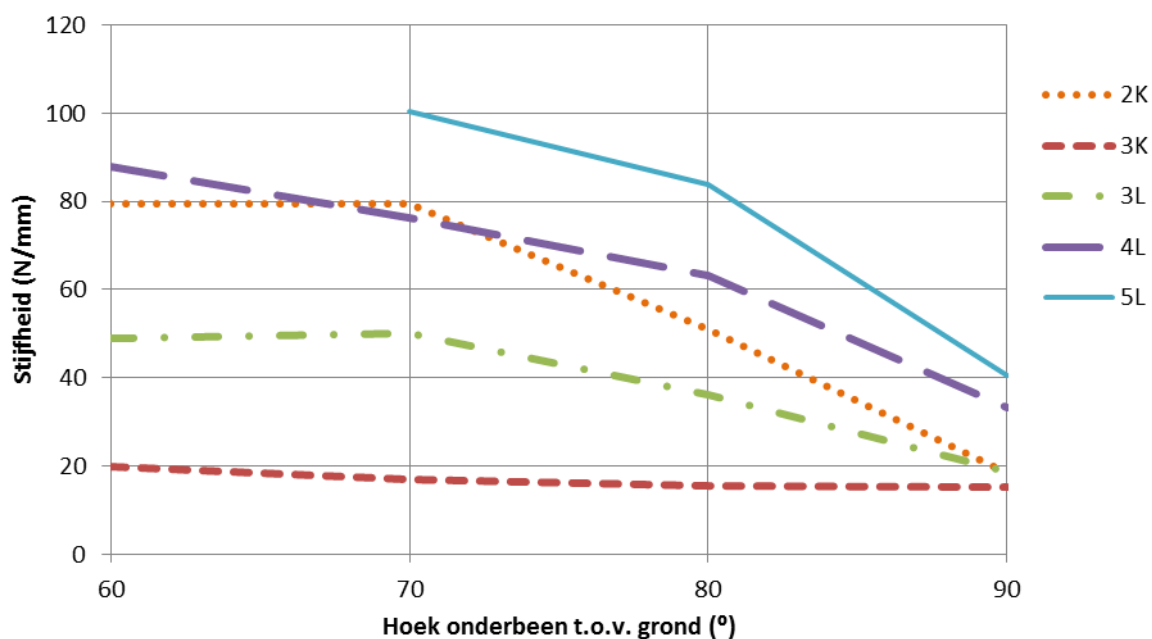
In figuur 8 wordt als voorbeeld het verplaatsing-kracht diagram weergegeven van een willekeurige blade bij een willekeurige hoekinstelling. In de bijlage (figuur 1 t/m 19) zijn van alle blades en hoekinstellingen de verplaatsing-kracht diagrammen weergegeven.

In het diagram is een lineaire trendlijn weergegeven door de datapunten met bijbehorende vergelijking. In deze vergelijking is de richtingscoëfficiënt, die de stijfheid van de blade in die positie voorstelt, weergegeven. Naast het diagram staat de uitkomst van de lineaire regressietest weergegeven onder "R Square". Bij alle metingen kwam de waarde van deze "R Square" boven een waarde van 0.95 uit.



Figuur 8, Verplaatsing-kracht diagram van 3K-90 met op de horizontale as de verplaatsing in millimeter en op de verticale as de kracht in Newton. De lijn geeft de lineaire trendlijn aan met in het tekstvak de vergelijking van de trendlijn ($15,1 \cdot x$). Naast het diagram staat de R^2 -waarde (0,994).

Alle richtingscoëfficiënten (stijfheden) van de verplaatsing-kracht diagrammen zijn uitgezet in figuur 9, waarin op de verticale as de stijfheid staat en op de horizontale as de hoek van het onderbeen ten opzichte van de grond. Per blade is het verloop, qua stijfheid, aangegeven van zestig tot negentig graden. Blade 5L heeft de hoogste stijfheid en blade 3K de laagste. Opvallend is dat de curve van blade 2K boven de curves van blades 3K en 3L ligt en dat de knik in de curve op verschillende plaatsen voorkomt. Bij blade 3K verloopt de curve vrijwel zonder knik.



Figuur 9, Stijfheden per blade per hoek met op de verticale as de stijfheid in N/mm en op de horizontale as de hoek van het onderbeen t.o.v. de grond in graden.

Om de betrouwbaarheid van de meetmethode en opstelling te verifiëren is een Reliability Analysis gedaan in SPSS Statistics. Vier herhalingen van de meting met blade 5L bij negentig graden (zie bijlage, figuur 9 t/m 12) zijn met elkaar vergeleken. In figuur 10 zijn de ICC's weergegeven op basis van consistentie en absolute overeenkomst. Beide waarden zijn boven de minimumwaarde van 0.95.

	ICC
Consistentie	0.999
Absolute overeenkomst	0.998

Figuur 10, ICC bij consistentie en absolute overeenkomst van 4 metingen bij blade 5L onder 90 graden.

5.2. De invloed van de lengte van het onderbeen op de stijfheid van de blade.

De maximale horizontale verplaatsing van het onderbeen, gemeten met een meetklok, is vastgesteld op 0,4 mm. De maximale horizontale verplaatsing van de opstelling, waarin de blades gemonteerd werden, is vastgesteld op 0,2 mm. Dit is gemeten bij een indrukking van de blade van 70 millimeter. De horizontale verplaatsing van het onderbeen bedraagt 0,57% van de verticale verplaatsing van de voorvoet van de blade.

6. Discussie

Hieronder zullen beide delen van het onderzoek afzonderlijk besproken worden, volgens dezelfde scheiding die bij voorgaande hoofdstukken werd aangehouden.

6.1. Het meten van stijfheden bij verschillende hoeken.

In dit deel van het onderzoek stond de volgende onderzoeksvraag centraal: Wat zijn de stijfheden van de verschillende categorieën blades bij verschillende hoeken? Om een antwoord te kunnen geven op deze vraag zijn metingen uitgevoerd met een drukbank aan vijf verschillende blades. In figuur 9 is te zien dat het verloop van de curve per blade veel kan verschillen. Bij blades 2K en 3L zijn de stijfheden bij 60 en 70 graden vrijwel gelijk. Bij 4L en 5L is dit niet terug te zien en bij 3K zijn de verschillen per hoek aanzienlijk kleiner.

Deze verschillende verlopen duiden op verschillende karakteristieken van de blades bij verschillende hoeken. Een precieze oorzaak kan met dit onderzoek niet worden bepaald. Als mogelijke oorzaken kan gekeken worden naar verschillende mate van belasting, leeftijd van de blades en verschillen in productieprocessen bij verschillende categorieën en/of afzonderlijke blades. Omdat de curves zoveel verschillen, is het moeilijk om een vertaalslag te maken naar de praktijk. Er kan op basis van de meetresultaten van dit onderzoek geen concrete uitspraak gedaan worden over de stijfheden van blades bij verschillende hoeken. De resultaten geven wel aan dat de stijfheid van de blade afneemt wanneer de hoek van het onderbeen met de grond toeneemt. Verwacht wordt dat de minimale stijfheid gemeten wordt bij een hoek van negentig graden. In de praktijk zal dit betekenen dat de stijfheid van de blade een lagere waarde heeft bij het neerzetten van de blade dan bij het afzetten.

Een drietal metingen is (deels) mislukt. Bij metingen 2K-80 en 4L-80 is het wegschrijven van de data mislukt. Dit probleem is deels ondervangen doordat de benodigde kracht, voor een indrukking van zeven centimeter, is genoteerd. Hierdoor kon wel de stijfheid berekend worden maar kon geen diagram worden opgesteld met bijbehorende lineaire trendlijn. Aangezien de uitkomst van de R^2 -toets bij alle andere metingen ruim boven 0.95 uitkwam, is ervoor gekozen om de resultaten mee te nemen in het onderzoek.

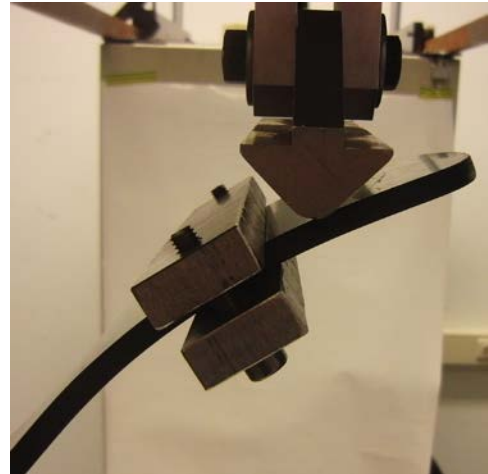
Bij 5L-60 moest de meting worden afgebroken omdat de opstelling het deels had begeven. Deze meting is niet meegenomen in het onderzoek.

Bij het meten van de blades met de drukbank hebben zich enkele problemen voorgedaan die het noodzakelijk maken om de resultaten kritisch te bekijken. Ook al zijn alle metingen beoordeeld als lineaire verbanden, toch is het belangrijk om te kijken wat de oorzaken kunnen zijn van de afwijkingen van de lineaire trendlijn. De problemen zullen hier puntsgewijs besproken worden in met daarbij de mogelijke gevolgen voor de uitkomsten.

6.1.1. Opstelling in de drukbank.

Doordat de blade maar aan één kant ingeklemd was, verschoof de blade onder de krachtopnemer. Dit zorgt ervoor dat de momentsarm van de kracht ten opzichte van het buigpunt verandert. Aangezien de drukbank en bijbehorende software geen rekening houden met de verandering in momentsarm, wordt dit geregistreerd als een verandering in stijfheid van de blade. Wanneer de kracht aangrijpt op een punt dat verder is verwijderd van het buigpunt, zal de kracht, die benodigd is om de blade een millimeter in te drukken, afnemen. Dit wordt door de software geregistreerd als een afname van de stijfheid.

Om de verschuiving van de blade tot een minimum te beperken, is gebruik gemaakt van twee aluminium strips aan weerszijden van de blade (zie figuur 11). Doordat de krachtopnemer van de drukbank tegen de bovenste strip aankomt, wordt een (onbekende) kracht tegen de krachtopnemer geleverd. Omdat de blade ter hoogte van de strips ongeveer zeven centimeter doorbuigt, verandert de hoek van de voet en daarmee ook de hoek waarin de krachtopnemer tegen de strip drukt. Wat de grootte van de gevolgen zijn voor de metingen is niet bekend. Bij een eventueel vervolgonderzoek zullen deze gevolgen gekwantificeerd moeten worden. Een andere mogelijkheid is het aanpassen van de meetopstelling waardoor dit probleem zich niet meer voordoet.



Figuur 11, Aluminium strips om verschuiving tot een minimum te beperken, gemonteerd aan weerszijden van de blade. Driehoek boven de blade is de krachtopnemer van de drukbank.

6.1.2. Gebruikte blades.

Vanwege de zeer beperkte beschikbaarheid van niet gebruikte blades is er gemeten aan gebruikte blades. Omdat het niet bekend was in welke mate de blades gebruikt zijn en wat de productiedatum was, kunnen er alleen uitspraken gedaan worden over de gemeten blades. Over de karakteristieken van niet gebruikte blades kunnen hier geen concrete uitspraken gedaan worden.

Dat het gebruik van de blades invloed heeft op de stijfheid ervan, wordt gesuggereerd door het verschil in stijfheden tussen blades 2K en 3K of 3L. Een hogere categorie heeft een hogere stijfheid, maar dit is niet het geval bij blade 2K. Bij blade 2K is de stijfheid significant hoger bij 60, 70 en 80 graden dan blade 3K en 3L. Opvallend is dat dit verschil aanzienlijk minder is bij 90 graden. Bij 70 graden is de stijfheid van blade 2K zelfs hoger dan blade 4L. Of deze verschillen veroorzaakt zijn door het langdurig gebruik van de blades kan niet met zekerheid gezegd worden. Het kan ook veroorzaakt zijn door een productiefout die geleid heeft tot een stijvere of minder stijve blade. Ook een meetfout kan niet uitgesloten worden.

Waardoor en in welke mate de stijfheid van een blade beïnvloed wordt, dient in verder onderzoek bepaald te worden. Hierbij kan gekeken worden naar verschillende invloeden; mate en duur van belasting, leeftijd van de blade en blootstelling aan extreme temperaturen en uv-licht. Wanneer dit onderzoek gedaan wordt met nieuwe blades van alle categorieën, kan er een indicatie gegeven worden over de levensduur van een blade bij bepaalde omstandigheden.

6.1.3. Betrouwbaarheid van de metingen.

Uit de vergelijking tussen vier dezelfde metingen is gebleken dat de meetmethode zeer betrouwbaar is. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de metingen alleen herhaald zijn bij één blade en bij één hoek. Over de betrouwbaarheid van metingen met andere blades en in andere hoeken kan niet met zekerheid een uitspraak worden gedaan. De verwachting is echter wel dat ook met andere blades en hoeken betrouwbare metingen kunnen worden uitgevoerd.

6.2. De invloed van de lengte van het onderbeen op de stijfheid van de blade.

In dit deel van het onderzoek is een poging gedaan om antwoord te geven op de vraag: Wat is de invloed van de lengte van het onderbeen op de totale stijfheid van de blades? Door metingen te doen met een meetklok op het onderbeen is de maximale horizontale verplaatsing geregistreerd.

De maximale horizontale verplaatsing van het onderbeen is vastgesteld op 0,4 millimeter en die van de opstelling op 0,2 millimeter. Bij een indrukking van de blade van zeventig millimeter is deze horizontale verplaatsing verwaarloosbaar klein. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat er alleen gemeten is met een verticale krachtrichting. Wat de horizontale verplaatsing van het onderbeen is bij een andere krachtrichting, kon met dit onderzoek niet worden bepaald.

Omdat het hier gaat om een horizontale verplaatsing ten gevolge van een hoekverdraaiing, is een deel van de horizontale verplaatsing van het onderbeen te wijten aan de hoekverdraaiing van de opstelling. Hierdoor wordt de daadwerkelijke horizontale verplaatsing van het onderbeen nog lager geschat.

De speling in de opstelling kan deels worden verholpen door gebruik te maken van een bredere grondplaat waarop de opstelling gemonteerd wordt. Door de geringe breedte van de gebruikte grondplaat kon de gehele opstelling kantelen bij hoge krachten.

6.3. Aanbevelingen voor verder onderzoek.

Om ervoor te zorgen dat eventueel verder onderzoek meer voor de praktijk bruikbare data oplevert, moeten enkele aspecten van dit onderzoek aangepast worden. Allereerst wordt het noodzakelijk geacht om de metingen te verrichten met nieuwe, ongebruikte blades. Hierdoor worden onzekerheden over mate van gebruik weggenomen. Ook moeten blades van elke categorie getest worden en bij voorkeur meerdere blades per categorie om afwijkingen in de blades te ondervangen. Aanpassingen aan de meetopstelling worden ook noodzakelijk geacht; de grondplaat van de opstelling zal verbreed moeten worden om speling te beperken. Ook het wegschuiven van de blade zal op een andere manier verhinderd moeten worden zodat de aluminium strips niet tegen de krachtopnemer drukken.

Wellicht zal er zelfs gekeken moeten worden naar het gebruik van een ander meetinstrument dan de gebruikte drukbank. Om de blades te meten zoals ze in de praktijk gebruikt worden, kan gekeken worden naar een meer dynamische meetmethode die realistische snelheden kan behalen. Wanneer dit gecombineerd kan worden met het instellen van verschillende krachtrichtingen kan de praktijksituatie zo goed mogelijk benaderd worden.

7. Conclusie

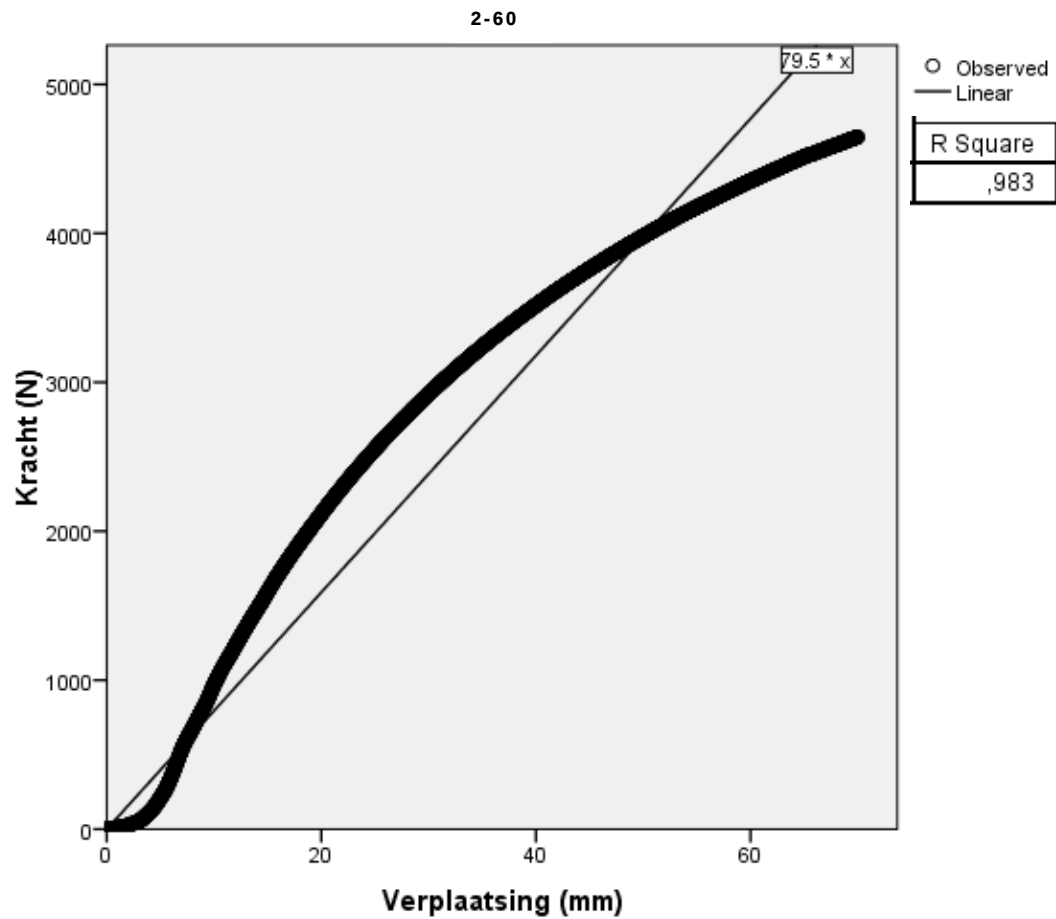
Concluderend kan hier gesteld worden dat het onderzoek een goed inzicht geeft in de verschillende stijfheden van running blades, van verschillende categorieën en gemeten bij verschillende hoeken. Om concrete uitspraken te kunnen doen hierover, zal verder onderzoek verricht moeten worden met alle categorieën en niet gebruikte blades.

De invloed van de lengte van het onderbeen op de totale stijfheid van de blade wordt, aan de hand van dit onderzoek, bepaald als zijnde verwaarloosbaar.

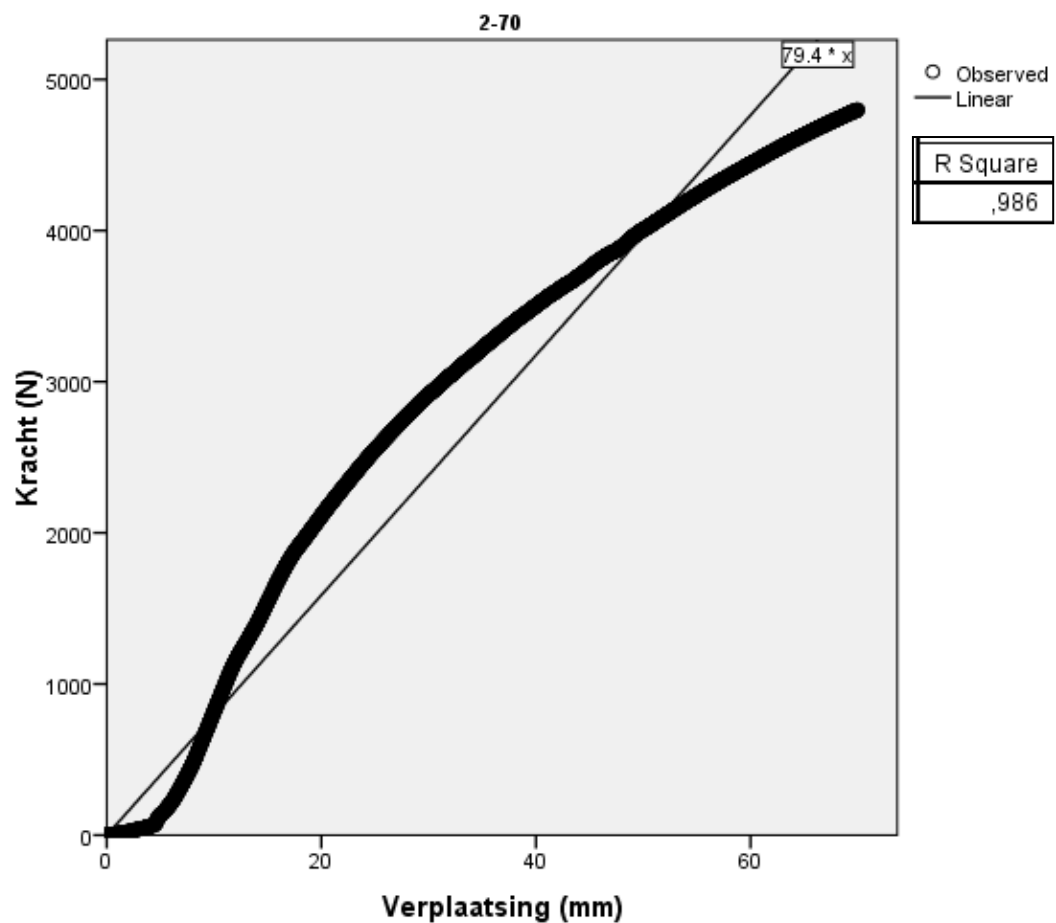
8. Literatuurlijst

- [1] G. Vletter, "The ideal running-specific prosthesis for a 100-m sprint," Jan. 2014.
- [2] S. Noroozi, P. Sewell, a. G. a. Rahman, J. Vinney, O. Z. Chao, and B. Dyer, "Modal analysis of composite prosthetic energy-storing-and-returning feet: an initial investigation," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part P J. Sport. Eng. Technol.*, vol. 227, no. 1, pp. 39–48, Mar. 2012.
- [3] S. Noroozi, P. Sewell, A. Ghaffar Abdul Rahman, J. Vinney, O. Zhi Chao, and B. Dyer, "Performance enhancement of bi-lateral lower-limb amputees in the latter phases of running events: an initial investigation," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part P J. Sport. Eng. Technol.*, vol. 227, no. 2, pp. 105–115, Jul. 2012.
- [4] M. Krzysztow and A. Mero, "A kinematics analysis of three best 100 m performances ever.," *J. Hum. Kinet.*, vol. 36, no. March, pp. 149–60, Mar. 2013.

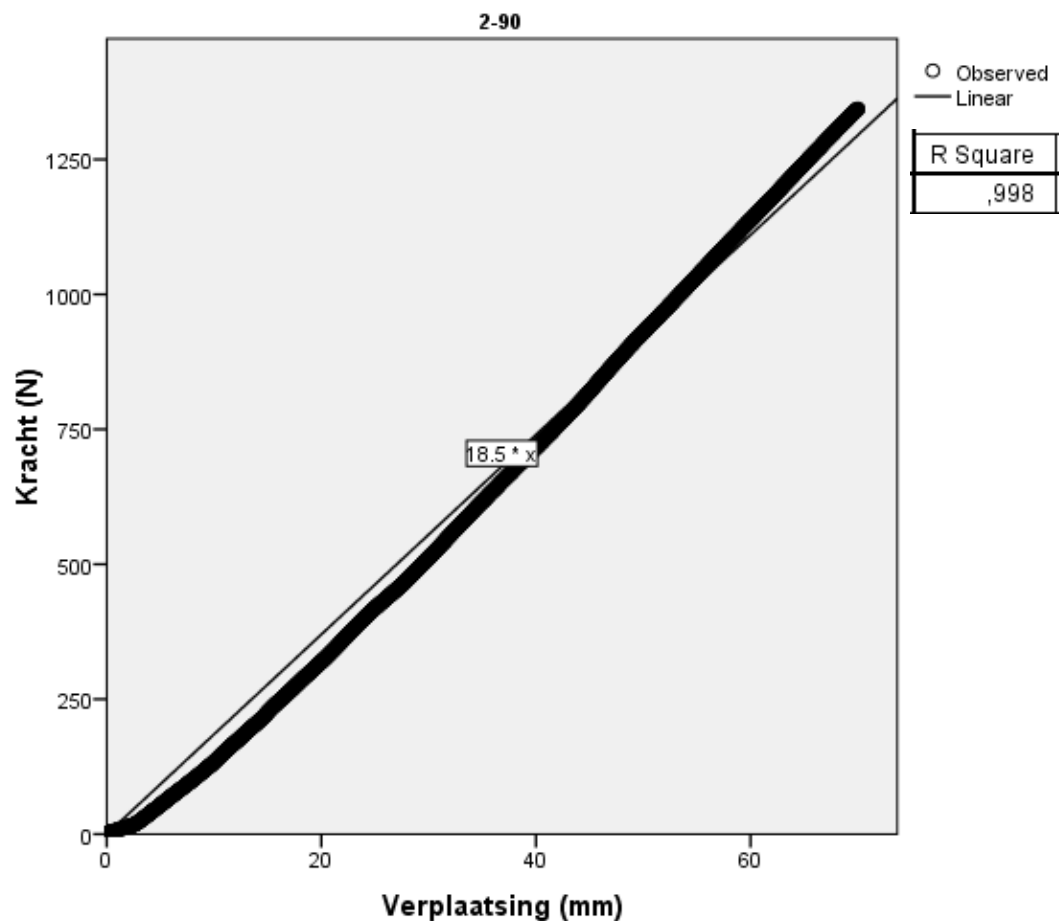
9. Bijlage



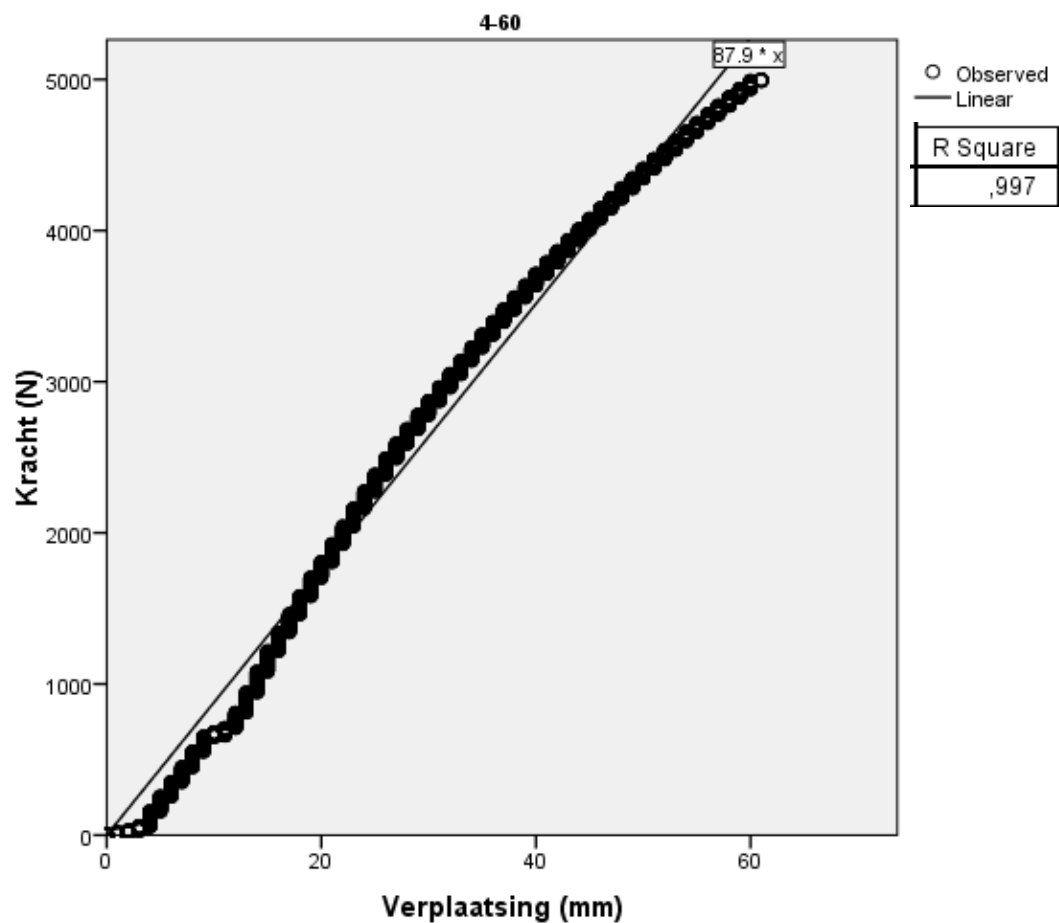
Figuur 1, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



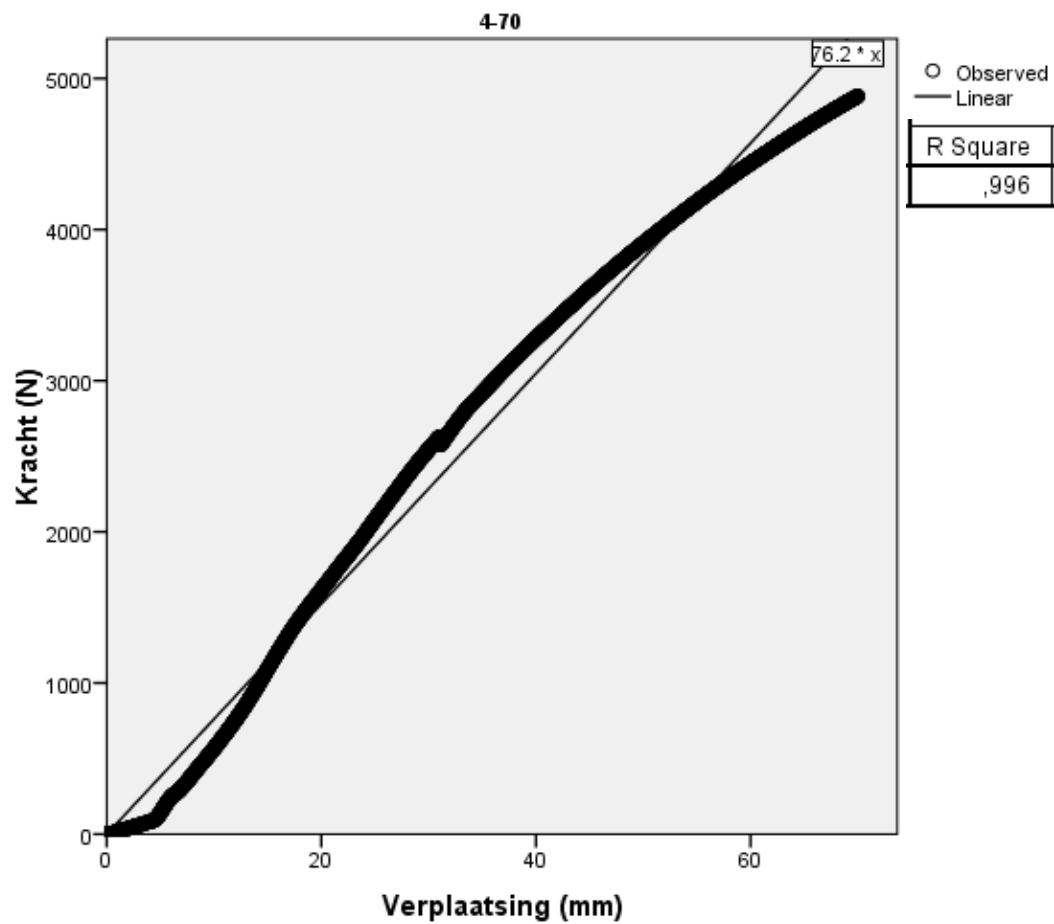
Figuur 2, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



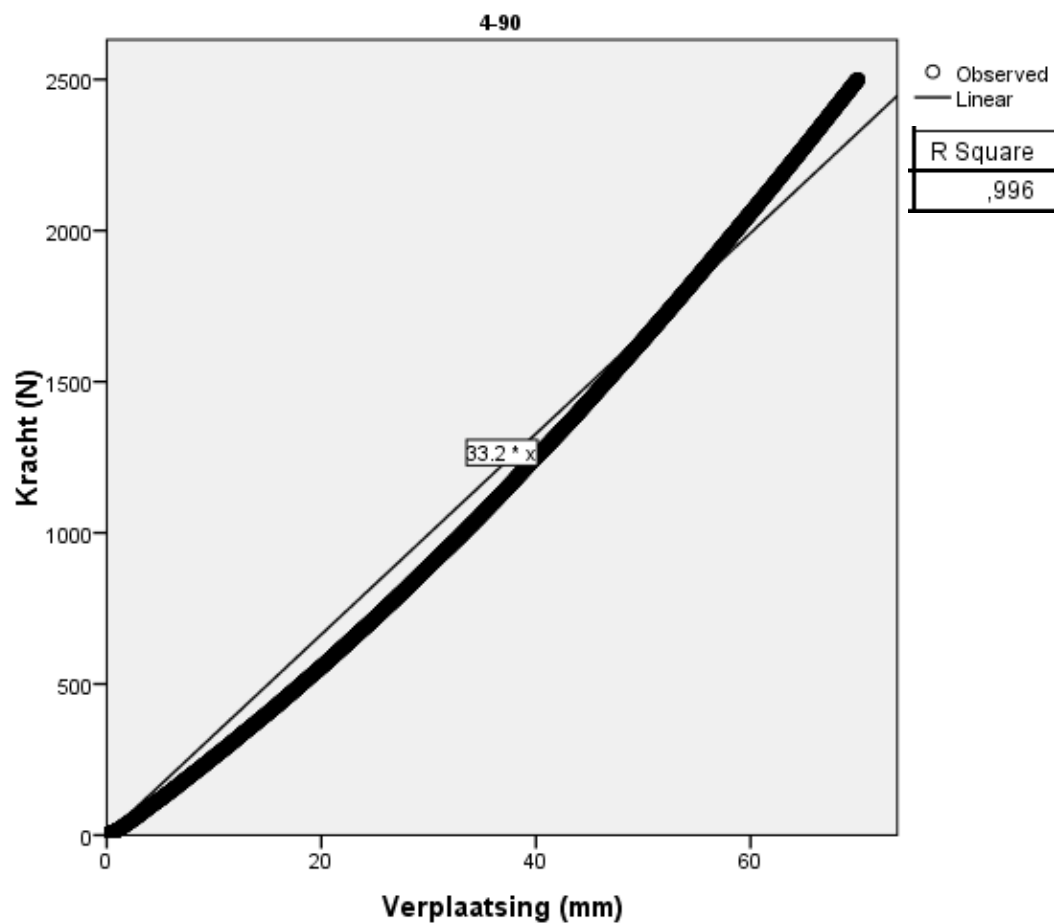
Figuur 3, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



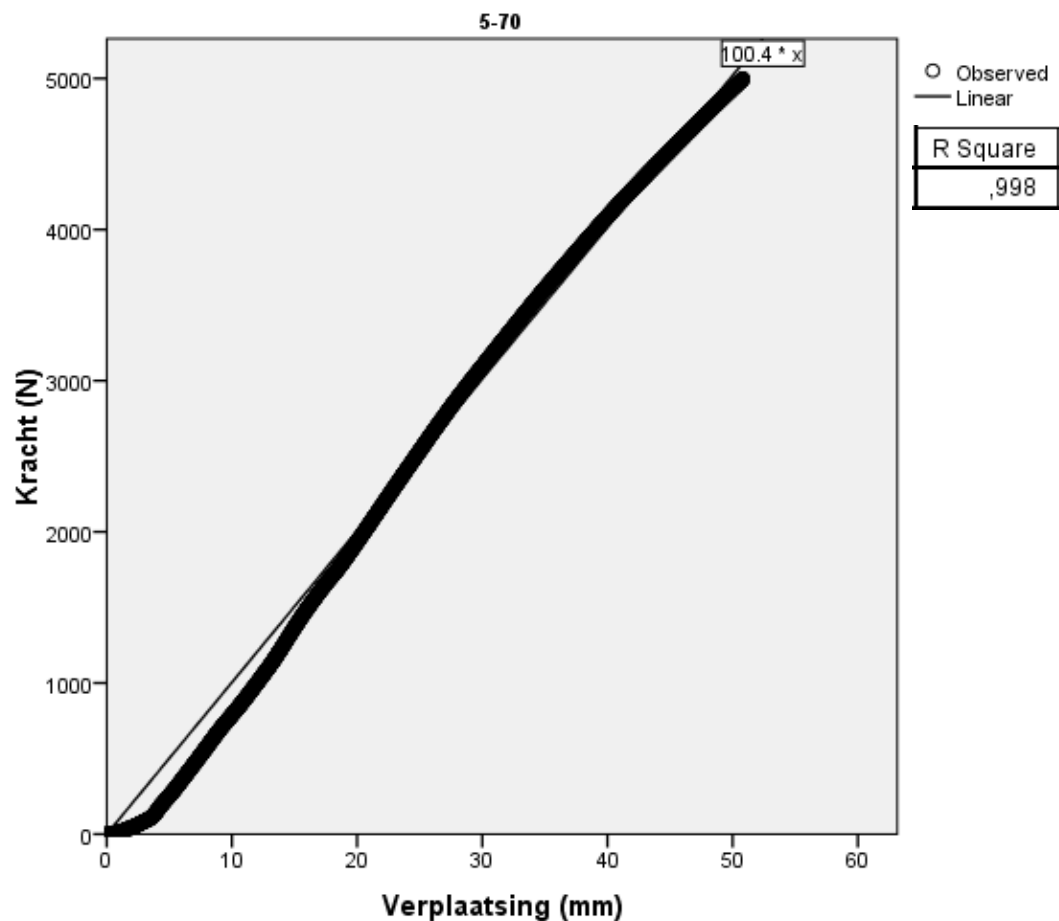
Figuur 4, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



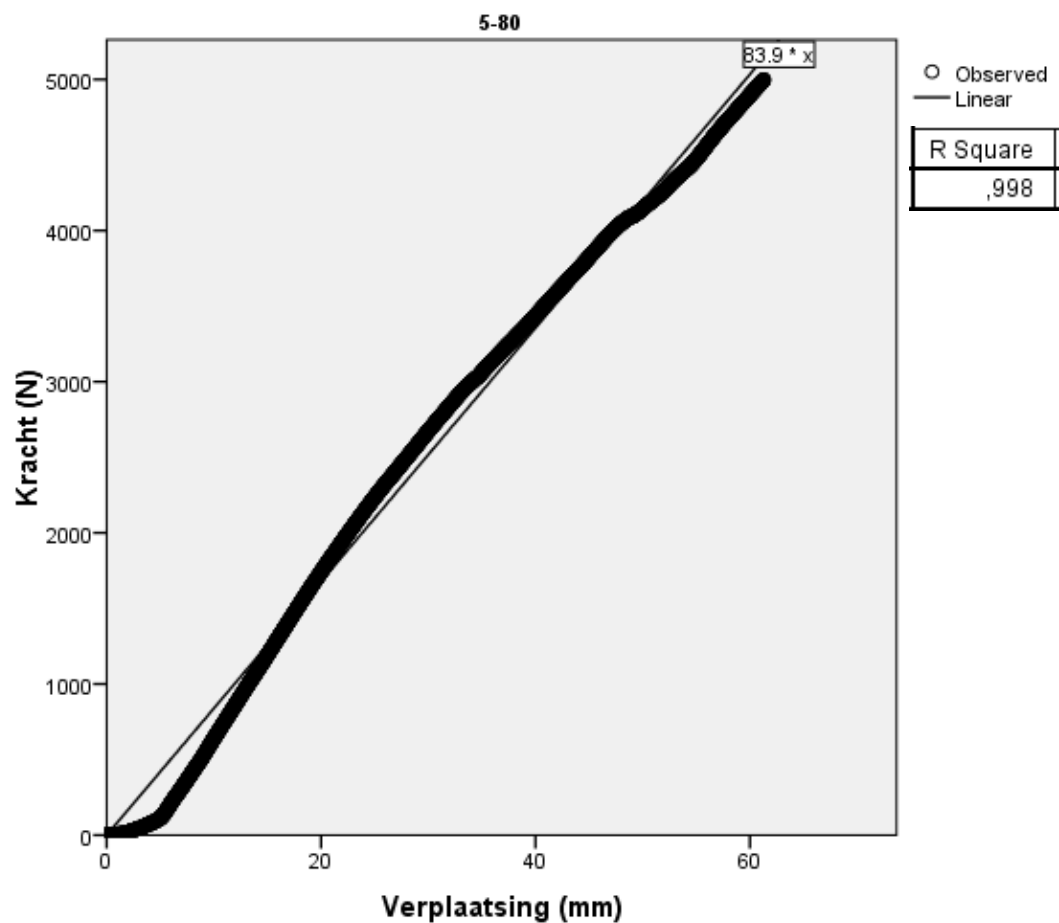
Figuur 5, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



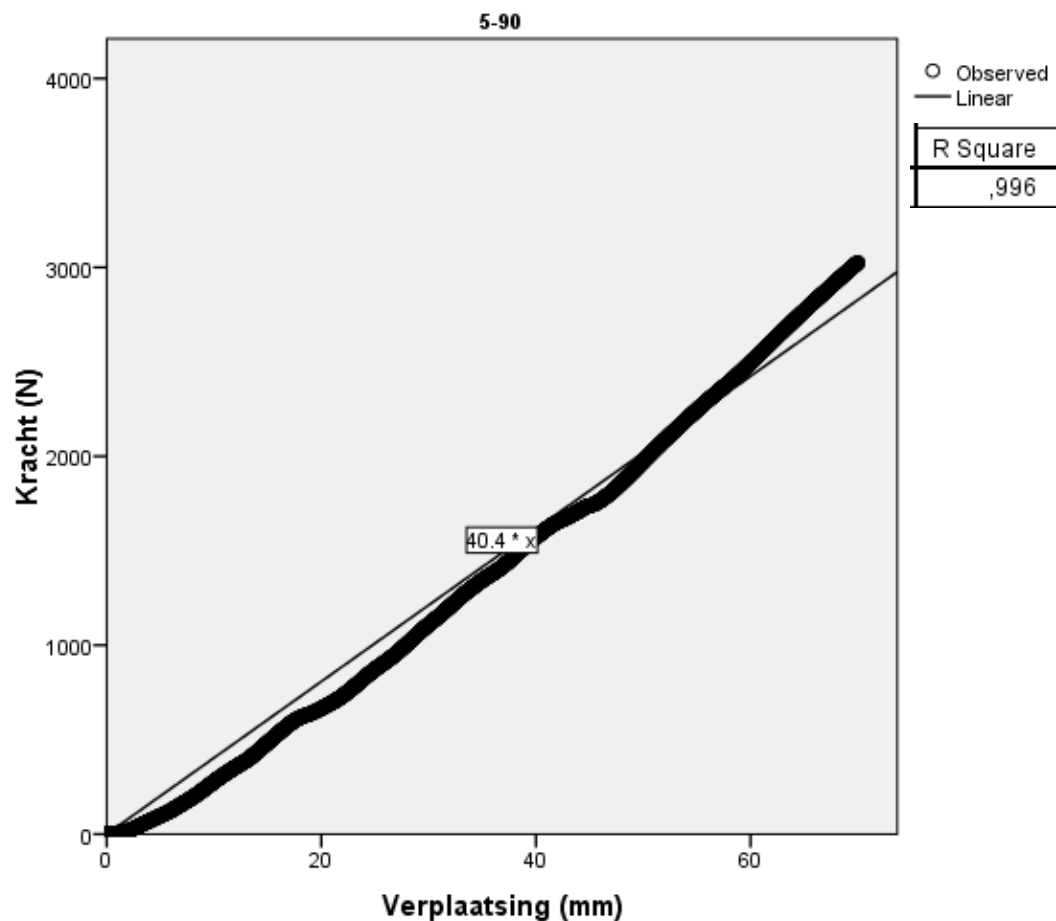
Figuur 6, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



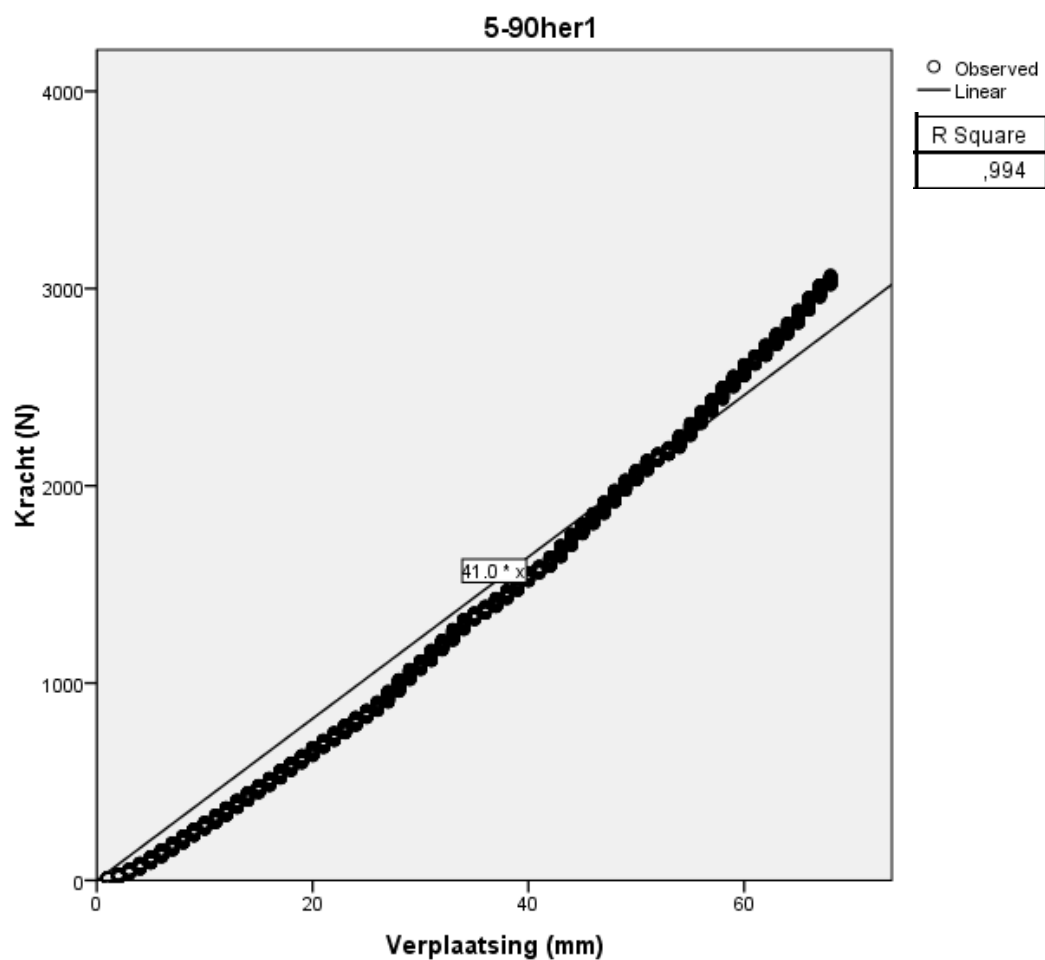
Figuur 7, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



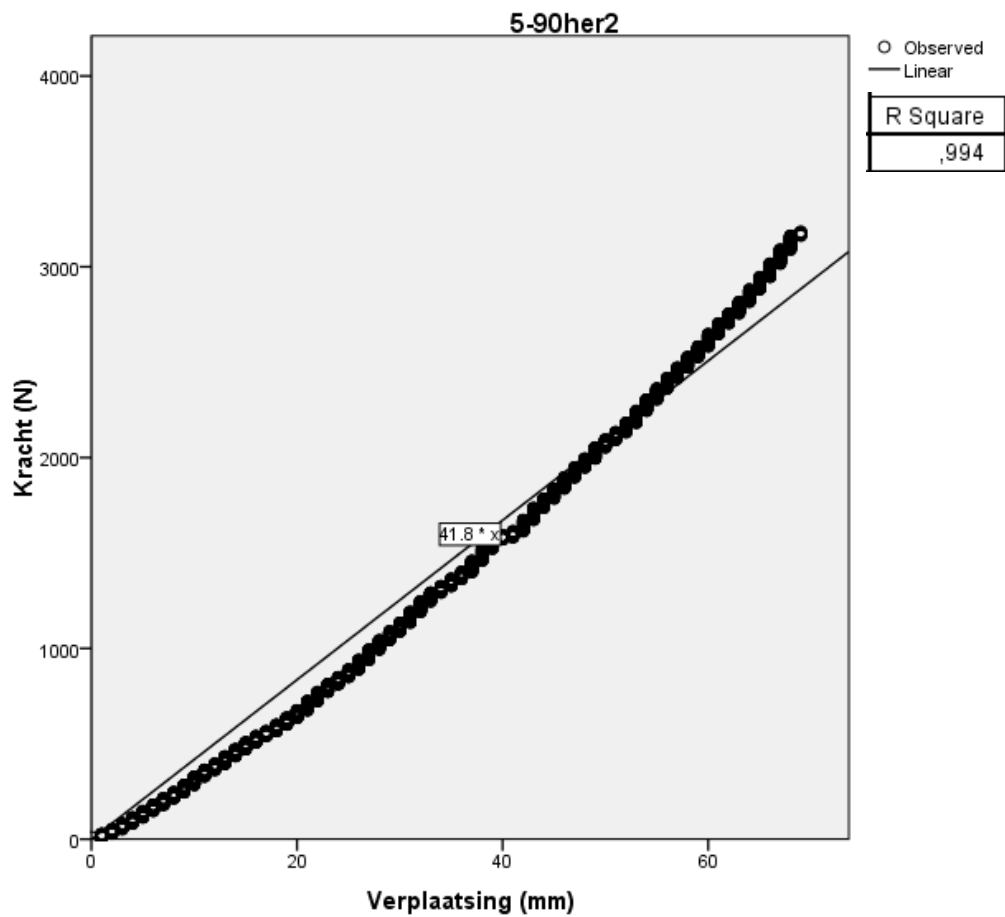
Figuur 8, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



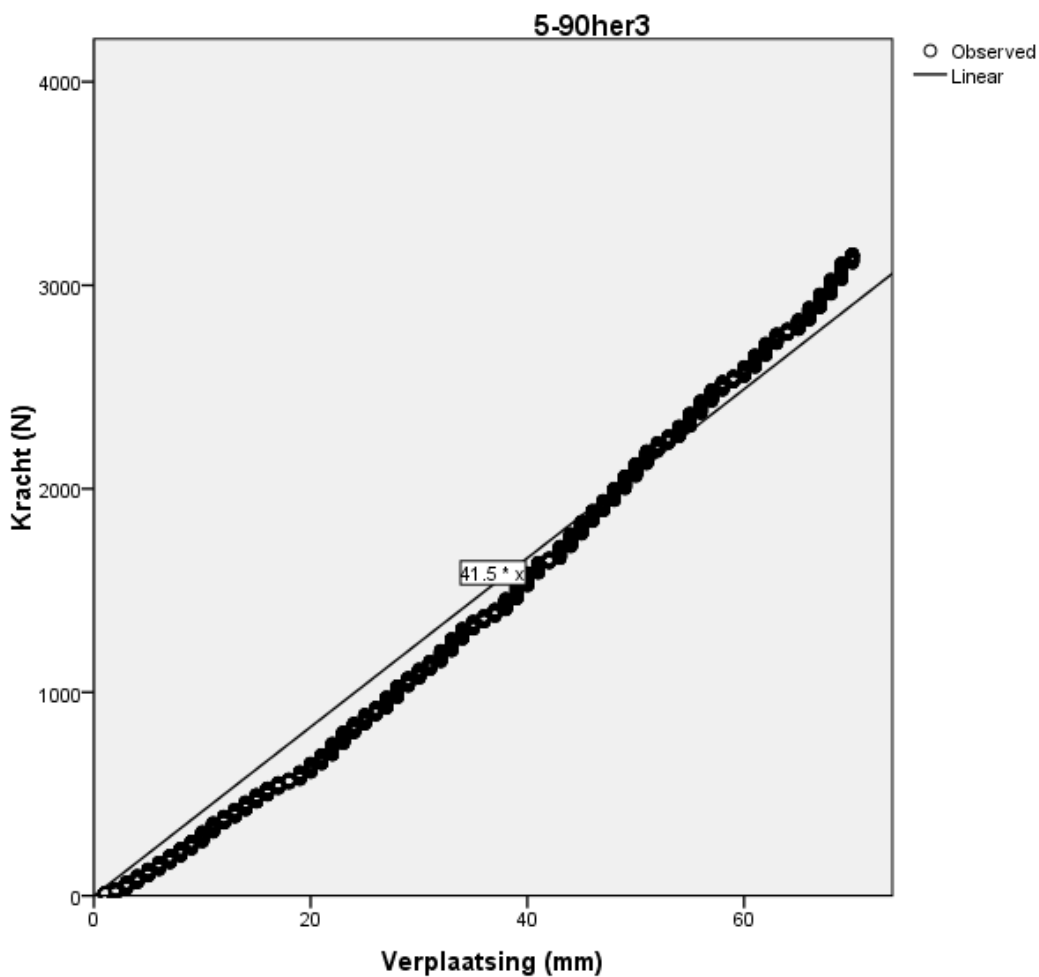
Figuur 9, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



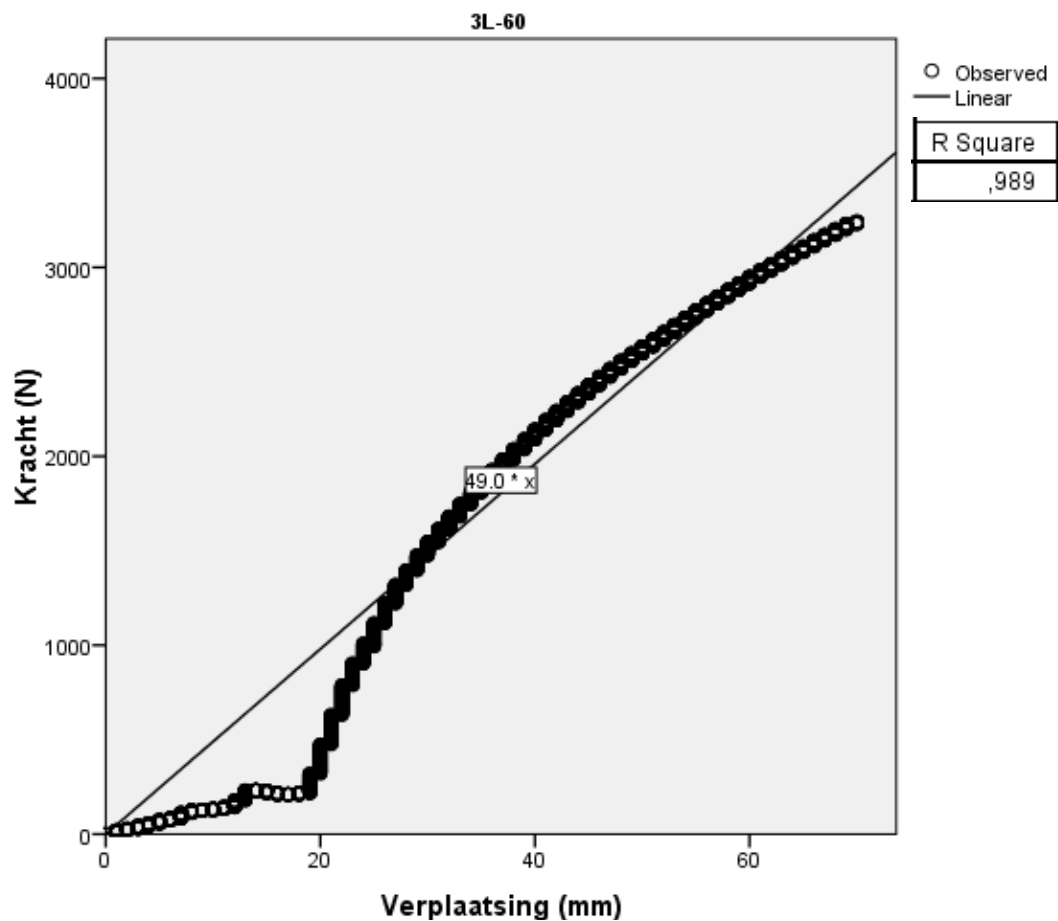
Figuur 10, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



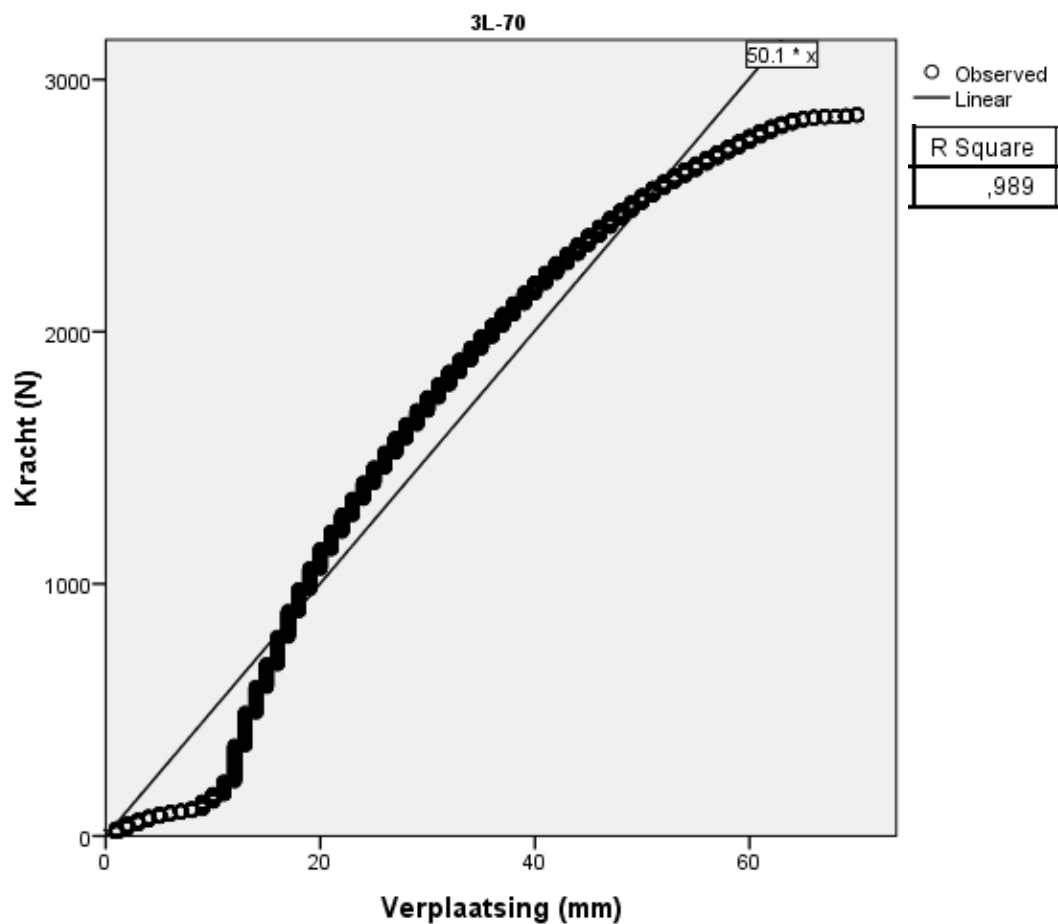
Figuur 11, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



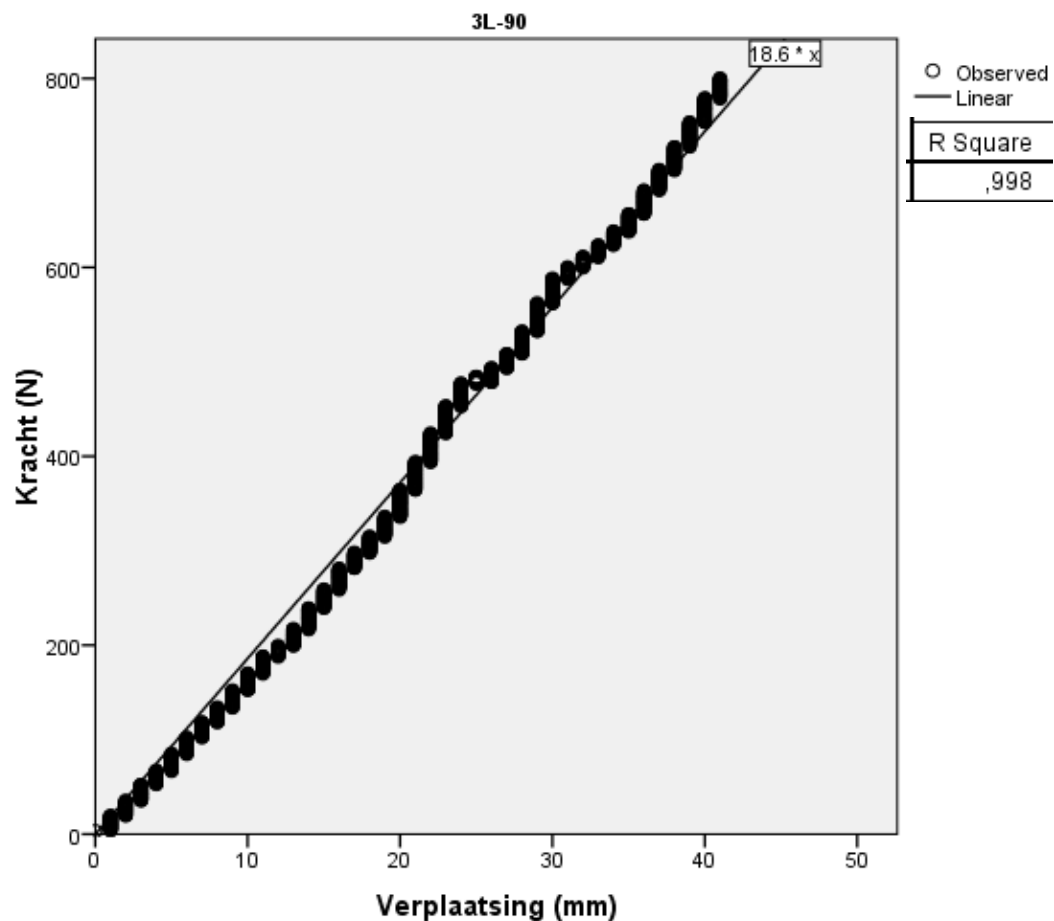
Figuur 12, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



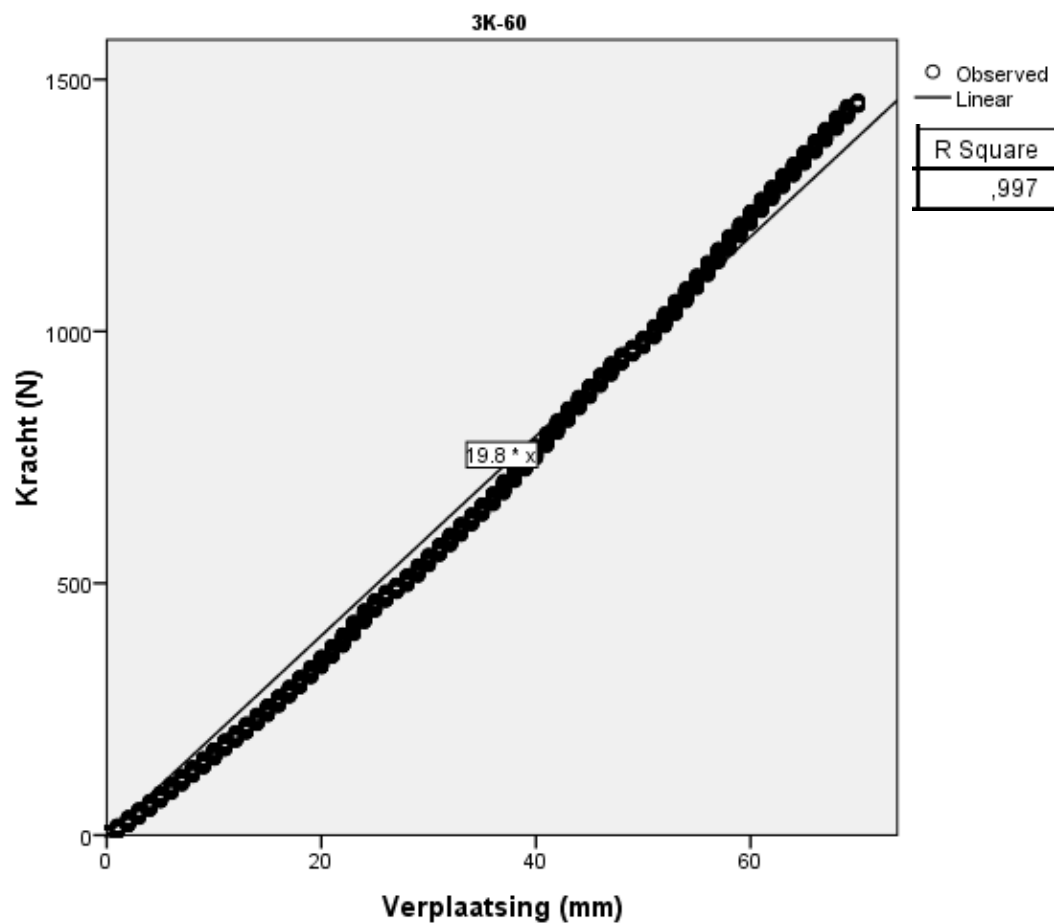
Figuur 13, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



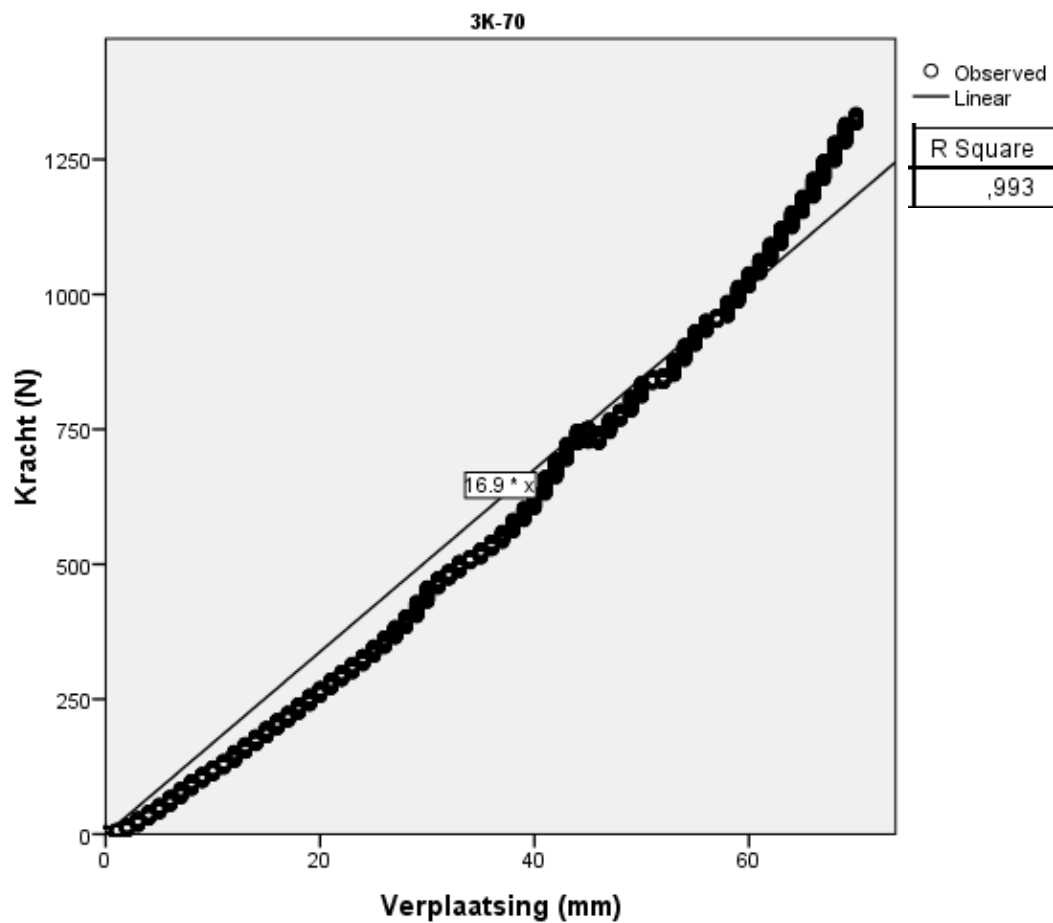
Figuur 14, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



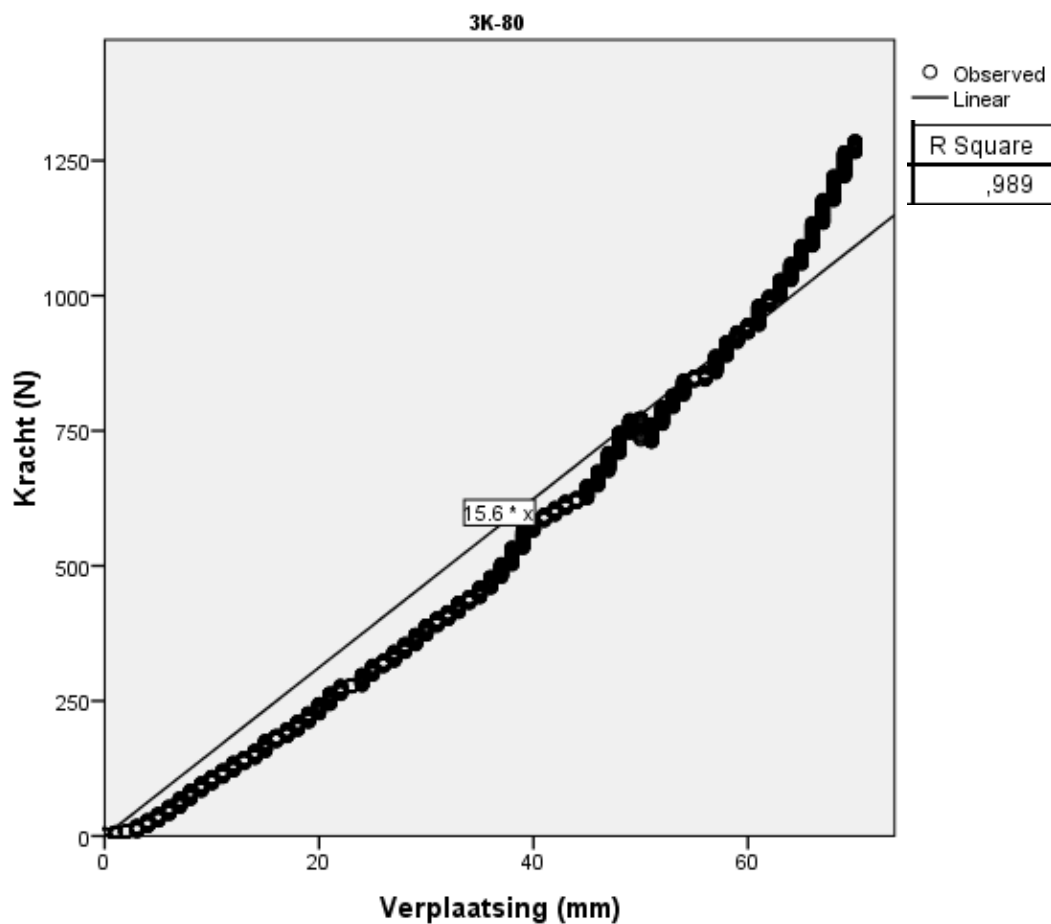
Figuur 15, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



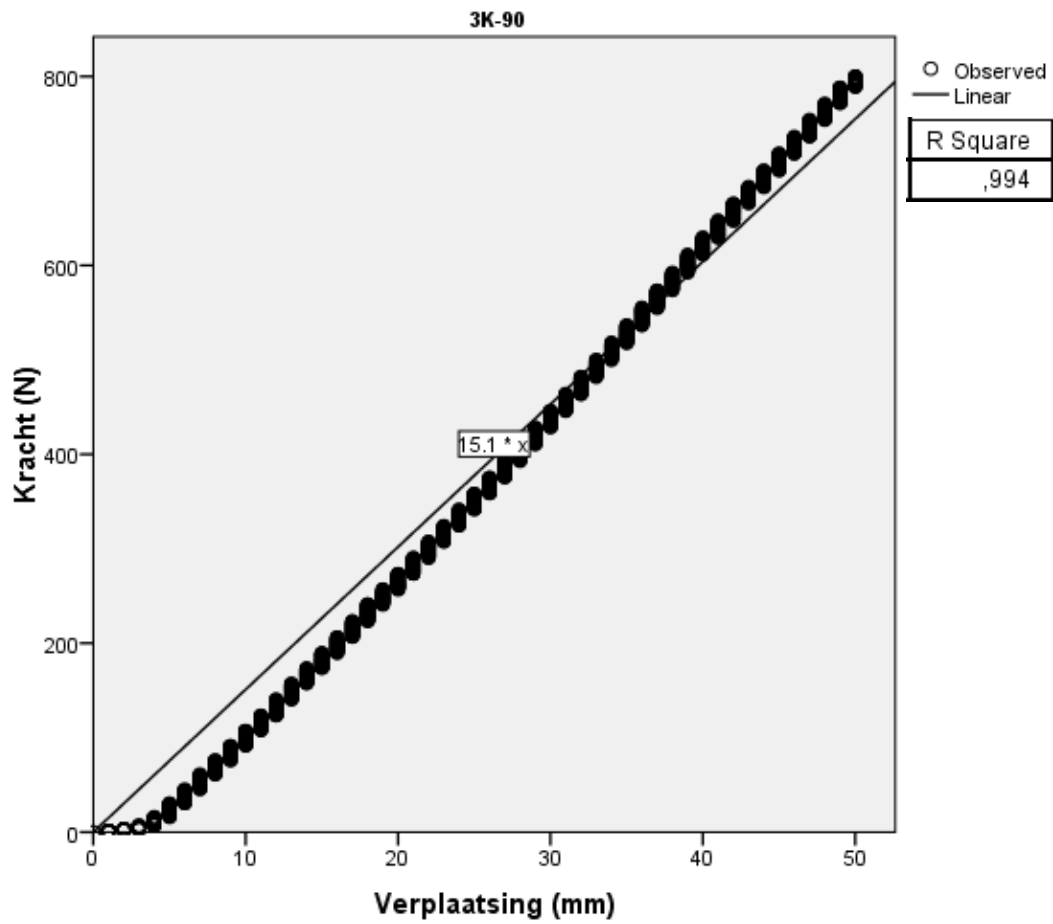
Figuur 16, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



Figuur 17, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



Figuur 18, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.



Figuur 19, Verplaatsing-kracht diagram met op de verticale as de kracht in Newton en op de horizontale as de verplaatsing in millimeter.