

Experimenteren met een hydraulisch geveerde voorvork van een mountainbike

Citation for published version (APA):

Hensen, R. H. A. (1996). *Experimenteren met een hydraulisch geveerde voorvork van een mountainbike*. (DCT rapporten; Vol. 1996.142). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1996

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

**Experimenteren met een
Hydraulisch Geveerde Voorvork
van een Mountainbike**

R.H.A. Hensen
17 oktober 1996

WFW Stage Report nr.96.142

Professor: Prof.dr.ir. D.H. van Campen
Begeleider: Dr.ir. A de Kraker

Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit der Werktuigbouwkunde

Vakgroep: Fundamenteel
Groep: Dynamica

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Theorie	6
2.1	Vering	6
2.2	Demping	9
2.3	Hydraulisch geveerde voorvork	11
2.3.1	Luchtvering	11
2.3.2	Olie-demper	16
2.4	Een eenvoudig rekenmodel	17
3	Experimenteel	19
3.1	De proefopstelling	19
3.1.1	Lineaire schuifweerstand	20
3.1.2	X-Y schrijver	21
3.2	Experimenten	22
3.2.1	Statische proeven	22
3.2.2	Dynamische proeven	23
3.3	Statistiek	24
4	Resultaten en Discussie	26
4.1	Statische Resultaten	26
4.2	Dynamische Resultaten	27
5	Conclusies	30
6	Aanbevelingen	31
A	Constructie tekening	32

Experimenteren met een
Hydraulisch Geveerde Voorvork
van een Mountainbike

R.H.A. Hensen

17 oktober 1996

Samenvatting

In de mountainbikesport worden geveerde voorvorken gebruikt om de belasting op de rijder te verlagen en vooral om een hogere snelheid te bereiken. Er zijn verschillende soorten geveerde voorvorken, zoals uitvoeringen met lucht en olie maar ook met een veer.

In dit verslag is gebruik gemaakt van een hydraulisch geveerde voorvork, waarbij de luchtdruk in de vork en de dempingsstand gevarieerd kunnen worden. Er is voornamelijk gekeken naar het ontwerpen van eenvoudige proeven om iets te kunnen zeggen over het dynamisch en statisch gedrag van de voorvork. Hierbij zijn eenvoudige hulpmiddelen gebruikt als een lineair schuifweerstand, voltmeter en XY-schrijver.

Er zijn twee soorten experimenten opgesteld en wel statische en dynamische experimenten. Deze proeven zijn uitgevoerd met verschillende instelmogelijkheden van de luchtdruk en demperstand. Verder is gekeken naar de betrouwbaarheid van de proeven door te kijken naar de statistiek en de reproduceerbaarheid van de resultaten.

Het blijkt dat met eenvoudige experimenten een globale indruk gekregen kan worden met betrekking tot de statische en dynamische eigenschappen van de voorvork. Het is echter onmogelijk om alle verschijnselen te verklaren zonder de precieze werking van de voorvork te kennen.

Lijst van figuren

2.1	Ideaal voorgesteld wegdek.	7
2.2	Excitatie frequentie tegen de snelheid en de golflengte.	8
2.3	Amplituderesponsie van de fietser.	9
2.4	Amplituderesponsie van de fietser voor verschillende demping.	10
2.5	Schematische tekening van de voorvork.	11
2.6	Schematische weergave van werking luchtvering.	12
2.7	Bepaling van de afgeleide van kracht naar verplaatsing.	13
2.8	Isotherme compressie-decompressie, $\gamma = 1$	15
2.9	Adiabatische compressie-decompressie, $\gamma = 1.4$	15
2.10	Schematische tekening van het dempergedeelte.	16
2.11	Ideaal massa veer demper systeem.	17
2.12	Verschillende manieren van demping.	18
3.1	De proefopstelling met hefboom constructie.	19
3.2	Het elektrisch schema van de lineaire schuifweerstand.	20
3.3	De ijklijn behorende bij de schuifweerstand.	21
3.4	Kracht verplaatsings grafiek bij een luchtdruk van 3.6 [bar].	22
3.5	Dynamische proeven met demperstand 6 “Soft”.	23
3.6	95%-betrouwbaarheids interval van kracht verplaatsings grafiek	24
4.1	Kracht verplaatsings grafieken bij verschillende luchtdrukken.	26
4.2	Dynamische proeven voor de twee uiterste demperstanden.	28
4.3	Dynamische proeven met demperstand 1 “Hard”.	29

Lijst van tabellen

3.1	Gebruikte apparatuur.	20
4.1	Veerstijfheden uit een lineair verband.	27

Hoofdstuk 1

Inleiding

De mountainbikesport zoekt de onherbergzamere delen van de natuur op om er competitie te bedrijven. Dit vereist meer van het materiaal dan in de wielersport op de weg. Zo is het frame van een mountainbike zwaarder en sterker dan dat van een racefiets. Andere verschillen zijn te vinden in banden, versnellingen en vering. In dit verslag zal de vering van het voorwiel onder de loep genomen worden. Hierbij is gebruik gemaakt van een relatief eenvoudige, in de handel verkrijgbare, geveerde voorvork. In het bijzonder is er gekeken naar het onderzoeken van eigenschappen van de geveerde voorvork met behulp van eenvoudige proeven. Men moet denken aan eigenschappen als veerstijfheid, wrijving en dempingskarakteristieken. De experimenten zijn uitgevoerd met eenvoudige hulpmiddelen als lineaire schuifweerstand, voltmeter en X-Y schrijver.

In de handel zijn verschillende uitvoeringsvormen van geveerde voorvorken verkrijgbaar. Deze onderscheiden zich vooral in de type van vering. Er zijn de volgende veringen mogelijk:

- Een spiraalveer waarbij de veerstijfheid niet instelbaar is.
- De veerstijfheid is wel instelbaar in een luchtvering door middel van de luchtdruk. Dit type is tevens uitgevoerd met olie dat voor de demping zorgt. Dit type geveerde voorvork wordt een hydraulisch geveerde voorvork genoemd.
- Er zijn ook varianten met elastomeren (rubberen blok). Het elastomeer heeft een verende eigenschap, maar ook een dempende karakteristiek. Deze eigenschappen zijn enkel instelbaar door keuze andere rubber soorten.

De proeven zijn uitgevoerd met een hydraulisch geveerde voorvork van het

Nederlands bedrijf Rond WP Suspension. Het type is de Hydro Pro 3 suspension fork.

Hoofdstuk 2

Theorie

2.1 Vering

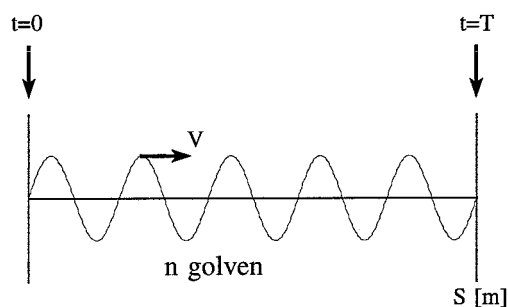
Fietsen lijken over het algemeen ongeveerd. Dit is niet helemaal waar, want banden, velgen, spaken en het frame geven mee als de fiets plus berijder over een hobbel of door een kuil rijdt. Deze bijdrages tesamen kunnen wel meerdere centimeters opleveren. Hiervan is 80 à 90% afkomstig van de banden. Dit blijkt echter niet genoeg als afgelegen wegen worden opgezocht.

Een ongeveerde fiets zal gedwongen zijn een hobbel te volgen. Hierbij wordt de massa van de berijder plus fiets verplaatst loodrecht op de bewegingsrichting. Deze massa-verplaatsing (tegen de zwaartekracht in) kost energie welke alleen door de fietser zelf kan worden opgewekt. Dit zal er toe leiden dat de bewegingsenergie van de fietser zal afnemen en dus ook de snelheid. Na de hobbel zal de fietser weer terugkeren op het wegdek door de zwaartekracht. Deze massa-verplaatsing is tevens loodrecht op de bewegingsrichting en zal geen versnelling veroorzaken in de bewegingsrichting. De fiets zal nog nastuiteren totdat de energie is weggevloeid via voornamelijk de banden. Dit nastuiteren is toe te schrijven aan de veer-eigenschap van de banden, velgen, spaken en frame tesamen. Het wegvloeien van de energie is de zogenaamde demping van de beweging.

Het idee achter een geveerde fiets is de massa, welke gedwongen wordt de hobbel te volgen, te verkleinen. Op een niet-geveerde fiets zal de berijder dit ook doen door uit het zadel te komen. Zo zal alleen de fiets deze hobbel volgen en zullen de benen en armen als vering fungeren. Bij een geveerde fiets volgt alleen het afgeveerde deel (de wielen) de hobbel en zal er minder energie verloren gaan. Een nadeel van het afveren is dat tijdens het fietsen er een deel van de trapenergie in de vering gestopt wordt. Hierbij ontstaat weer een massa-verplaatsing loodrecht op de bewegingsrichting en dus zal de

snelheid afnemen. Dit gebeurt vooral als de rijder op de pedalen staat of bergop rijdt. Tegenwoordig wordt dit voorkomen door de constructie zo te maken dat deze neerwaartse trapkracht geen uitwerking heeft op de vering.

Een ander nadeel van vering is de kans dat het veersysteem in resonantie komt. Door de resonantie zal er opslinging van de rijder plus frame ontstaan, waardoor het nuttige deel van de bewegingsenergie zal afnemen. De resonantie is afhankelijk van het aantal hobbels of oneffenheden per seconde die het veersysteem tegenkomt. Dit wordt ook wel de excitatie frequentie f in [Hz] genoemd. Tengevolge van de snelheid van de fietser en de gesteldheid van het wegdek zal de excitatie frequentie uiteenlopen van 1 tot 50 [Hz]. De volgende betrekking voor de excitatie frequentie kan worden afgeleid. Hierbij wordt uitgegaan van een een wegdek met golflengte S_0 en een snelheid V als aangegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Ideaal voorgesteld wegdek.

$$S_0 = \frac{S}{n} \quad (2.1)$$

$$T = \frac{S}{V} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} T_0 &= \frac{T}{n} \\ &= \frac{S}{Vn} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} f &:= \frac{1}{T_0} \\ &= \frac{Vn}{S} \end{aligned} \quad (2.4)$$

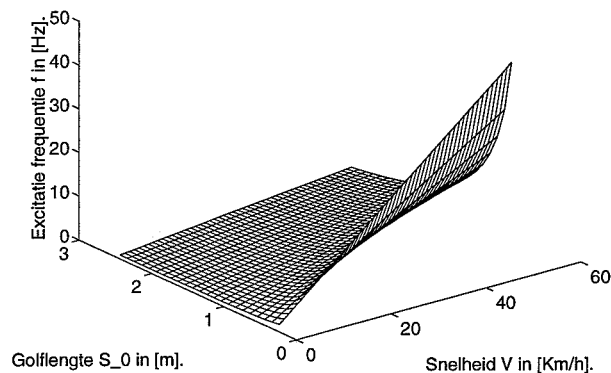
$$f = \frac{V}{S_0} \quad (2.5)$$

waar

- S_0 = Golflengte in [m].
- S = Totale lengte in [m].
- n = Aantal golven.
- V = Snelheid van de fietser in [km/h].
- T = Totale tijd in [s].
- T_0 = Trillingstijd (tijd per golf) in [s].
- f = Excitatie frequentie in [Hz].

De excitatie frequentie is dus afhankelijk van twee grootheden de snelheid V en de golflengte S_0 . Dit is in Figuur 2.2 weergegeven.

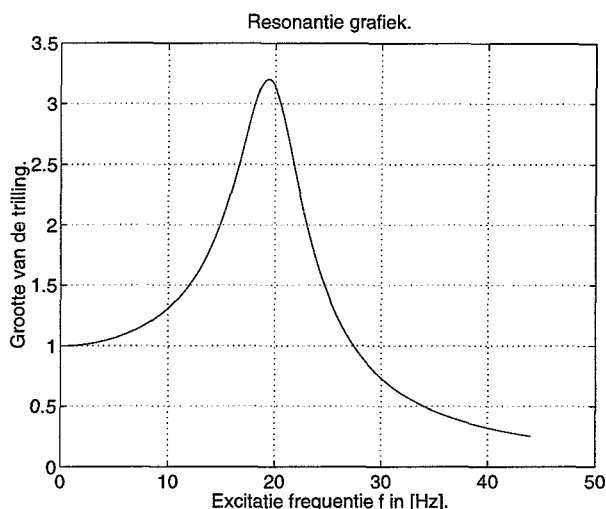
Excitatie frequentie als functie van V en S_0 .



Figuur 2.2: Excitatie frequentie tegen de snelheid en de golflengte.

De excitatie frequentie waarbij het veersysteem in resonantie treedt heet de eigenfrequentie f_r van het veersysteem. Ieder veersysteem heeft een eigenfrequentie, welke afhankelijk is van de veerstijfheid maar ook van de massa op de veer. Dit kan grafisch weergegeven worden door de grootte van de trilling (amplitude waarmee fietser trilt) uit te zetten tegen de excitatie frequentie. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in Figuur 2.3. De excitatie frequentie $f_r \approx 20$ [Hz].

Er zijn een aantal mogelijkheden om de resonantie frequentie te ontlopen. Ten eerste door harder te fietsen en dus boven de eigenfrequentie te blijven. Een andere logische mogelijkheid is langzamer te rijden en onder de eigenfrequentie te blijven. Ten derde kan het veersysteem verandert worden



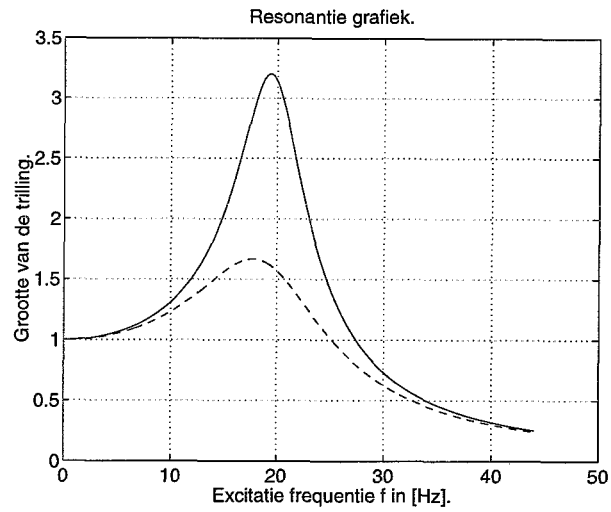
Figuur 2.3: Amplituderesponsie van de fietser.

waardoor de eigenfrequentie op een andere plaats (hogere of lagere frequentie) komt te liggen. Hierbij moet dan gedacht worden aan het veranderen van de veerstijfheid, dikte van de banden, luchtdruk in de banden en een andere vorm van de vork. De vierde en laatste mogelijkheid is het introduceren van demping. Dit wil zeggen dat het nastuiteren van de rijder plus frame uitgedempt wordt. Deze mogelijkheid wordt in paragraaf 2.2 Demping besproken.

2.2 Demping

Het dient opgemerkt te worden dat er een groot onderscheid is tussen vering en demping. Een ideale veer met een massa zal na excitatie oneindig blijven trillen met constante amplitude. Een ideale veer wordt ook wel een niet-dissiperend element genoemd. Dit zou bij een afgeveerd wiel er toe leiden dat het contact met het wegdek steeds verloren gaat door het trillen. De demping is nodig om het contact met het wegdek te behouden. De demping dissipeert energie uit het bewegend veersysteem. De demper is een zogenaamd dissiperend element. In betrekking tot de resonantie frequentie zal deze bijna niet verplaatsen, maar de opslinging zal veel minder of helemaal niet meer optreden. Dit kan weer weergegeven worden in een amplitude-responsie grafiek. In Figuur 2.4 is te zien dat een sterk gedempt systeem (gestippelde grafiek) minder opslinging vertoont dan een zwak gedempt systeem (doorgetrokken grafiek).

Er zijn verschillende soorten demping, maar ze hebben allemaal één ding

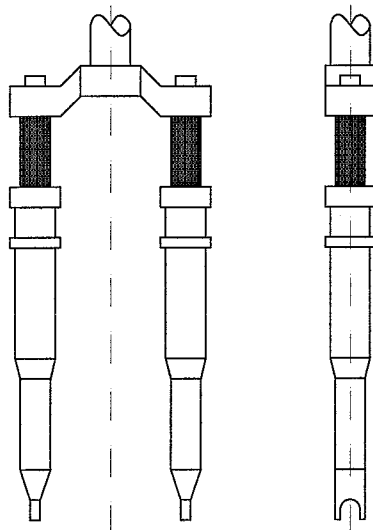


Figuur 2.4: Amplituderesponsie van de fietser voor verschillende demping.

gemeen het resulteert in een of andere vorm van warmte ontwikkeling. Zo kan er gebruik gemaakt worden van elastomeren, rubber of olie die door restricties geperst wordt.

2.3 Hydraulisch geveerde voorvork

De hydraulisch geveerde voorvork, de Hydro Pro 3, is schematisch weergegeven in Figuur 2.5. Een constructie tekening van de voorvork is te zien in Bijlage A¹. In Figuur 2.5 is de stabilisatorbrug weggelaten voor de duidelijk-



Figuur 2.5: Schematische tekening van de voorvork.

heid van de tekening. In Bijlage A is deze brug wel te zien. Deze brug heeft twee functies:

- Vergroting van de stijfheid van de constructie, zodat de twee benen van de vork niet uit elkaar kunnen.
- Bevestigingspunten voor de voorremmen op een mountainbike. Dit zijn meestal zogenaamde delta-remmen.

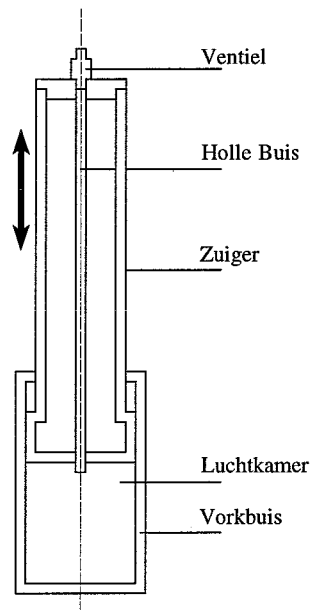
In deze paragraaf zullen verder de luchtvering en de olie-demper afzonderlijk besproken worden.

2.3.1 Luchtvering

Er zijn is de praktijk twee soorten luchtveren, (i) de hoge druk en (ii) de lage druk luchtvering. Het verschil tussen deze twee is de maximale belasting van

¹Met dank aan Rond WP Suspension.

de luchtvering. Een hoge druk luchtvering zal hoger belast kunnen worden dan een lage druk luchtvering. De vering op de mountainbikes is een lage druk luchtvering instelbaar van 2.4 tot 3.6 [Bar]. Met een ventiel, die op de benen van de voorvork geplaatst kan worden, wordt de lucht in de vork op de gewenste druk gebracht met een pomp met drukmeter. In Figuur 2.6 is schematisch weergegeven hoe dit in zijn werk gaat.



Figuur 2.6: Schematische weergave van werking luchtvering.

Er zijn drie parameters die de luchtvering karakteriseren.

1. De oppervlakte A in $[m^2]$ van de zuigerbodem.
Dit oppervlak is het kracht dragend deel van de luchtveer. De oppervlakte van de zuigerbodem is constant. Dit betekent dat deze parameter alleen bij het ontwerp van de voorvork gevarieerd kan worden. Voor het dragend oppervlak geldt

$$A = \frac{1}{4}\pi D_{\text{bodem}}^2 \quad (2.6)$$

2. Gasvolume $V = A * l$ in $[m^3]$ in de luchtkamer.

3. Gasdruk P in $[\frac{N}{m^2}]$ in de luchtkamer. De druk is de verhouding van de opgelegde belasting W en het kracht dragend oppervlak A

$$P = \frac{W}{A} \quad (2.7)$$

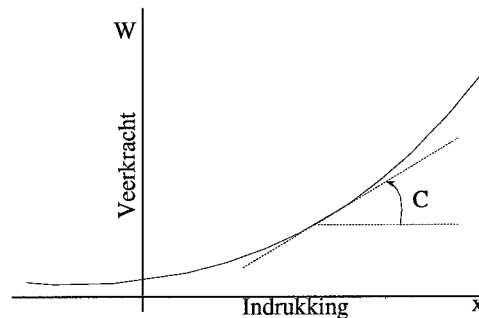
De laatste twee veranderen tijdens het in- en uitveren van de vork.

Een eigenschap van veren is de veerstijfheid. Deze is gedefiniëerd als de afgeleide van de kracht van gas op zuigerbodem (veerkracht) naar de verplaatsing, zie Figuur 2.7.

$$C = \frac{dW}{dx} \quad (2.8)$$

waar

$$\begin{aligned} W &= \text{Veerkracht in [N].} \\ x &= \text{Indrukking in [m].} \end{aligned}$$



Figuur 2.7: Bepaling van de afgeleide van kracht naar verplaatsing.

Er is dus een kracht-verplaatsings grafiek nodig om de veerstijfheid van de luchtvering te berekenen. Het theoretisch verloop van deze grafiek kan wiskundig afgeleid worden door middel van de gaswet en de thermodynamica van lucht. De verandering van het volume volgt de volgende vergelijking

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad (2.9)$$

waar

$$\begin{aligned} P_1 &= \text{Begindruk in [Pa].} \\ V_1 &= \text{Beginvolume in [m}^3\text{].} \\ P_2 &= \text{Einddruk in [Pa].} \\ V_2 &= \text{Eindvolume in [m}^3\text{].} \\ \gamma &= \text{Verhouding van soortelijke warmtes.} \end{aligned}$$

De waarde van γ hangt af van de snelheid waarmee de volumeverandering plaatsvindt. Voor langzame veranderingen is deze waarde gelijk aan 1. De volumeverandering verloopt dan isotherm en het gas volgt de gaswet $PV = \text{Constant}$. Als de volumeverandering in een korte tijd plaatsvindt noemen dit proces adiabatisch. Dit betekent dat de temperatuursverhoging van het gas door de compressie of decompressie niet voldoende tijd heeft om via het metaal af gevoerd te worden. Voor lucht geldt dan $\gamma = 1.4$ en de lucht volgt $PV^{1.4} = \text{Constant}$. Voor de veerkracht geldt

$$W = AP \tag{2.10}$$

en

$$\begin{aligned} PV^\gamma &= \text{Constant}k \\ P &= kV^{-\gamma} \\ &= \frac{k}{(V_0 - xA)^\gamma} \\ &= \frac{kA^{-\gamma}}{(x_0 - x)^\gamma} \end{aligned} \tag{2.11}$$

waar

$$\begin{aligned} V_0 &= \text{Beginvolume in [m}^3\text{]}. \\ x_0 &= \text{Beginhoogte van luchtkamer in [m]}. \end{aligned}$$

Dit levert voor vergelijking 2.5

$$W = \frac{kA^{1-\gamma}}{(x_0 - x)^\gamma} \tag{2.12}$$

De veerstijfheid wordt nu berekend door vergelijking 2.7 te differentiëren naar de indrukking x .

$$C = \gamma k A^{1-\gamma} \frac{1}{(x_0 - x)^{\gamma+1}} \tag{2.13}$$

De veerstijfheid en de veerkracht (die het gas op de zuigerbodem uitoefend) zijn dus afhankelijk van

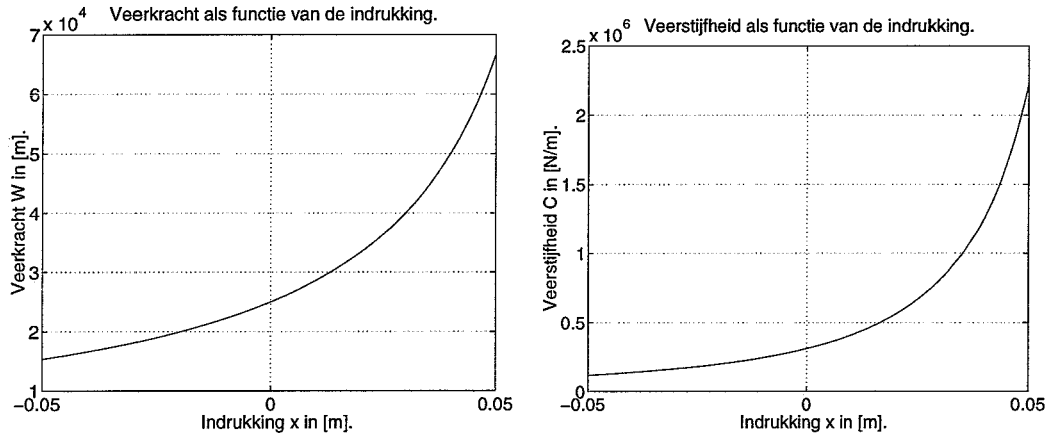
- Begindruk van de lucht P_0 .
- Beginhoogte van de luchtkamer x_0 .
- Indrukking x .
- Oppervlakte van de zuigerbodem A .

- De thermodynamische grootheid γ .

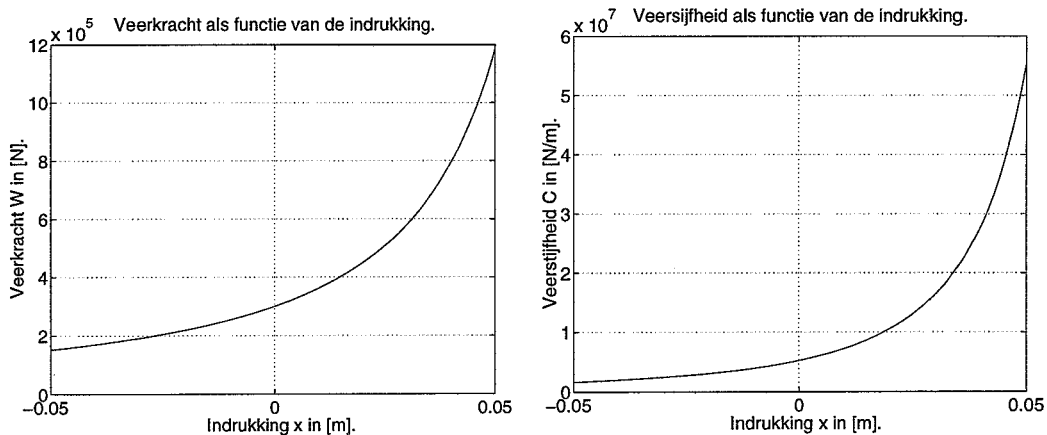
Het theoretisch verloop van de veerkracht en veerstijfheid tegen de indrukking is weergegeven in Figuur 2.8 en Figuur 2.9 met verschillende γ . De krachten en stijfheden tijdens een adiabatische compressie kunnen een factor 10 à 100 groter zijn dan tijdens een isotherme compressie. De veerkracht is dus niet enkel afhankelijk van de indrukking, maar ook zeer sterk afhankelijk van de onbekende thermodynamische grootheid γ in tegenstelling tot een ideale veer.

$$W = W(x, \gamma) \quad (2.14)$$

Tijdens het gebruik van de voorvork zal de thermodynamische grootheid γ gelijk zijn dichter bij 1.4 liggen dan bij 1.



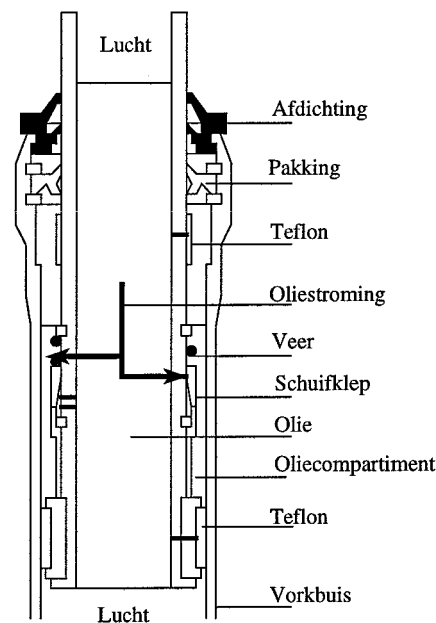
Figuur 2.8: Isotherme compressie-decompressie, $\gamma = 1$.



Figuur 2.9: Adiabatische compressie-decompressie, $\gamma = 1.4$.

2.3.2 Olie-demper

Tijdens de verandering van de indrukking (snelheid \dot{x}) is er naast de veerkracht de dempingskracht. Deze dempingskracht is nul als de snelheid $\dot{x} = 0$. De dempingskracht dissipeert de energie uit de beweging door olie door restricties te persen. De energie wordt hierbij omgezet in warmte. Door de restricties groter of kleiner te maken is het mogelijk om de demping in te stellen. De demping kan van "Hard" naar "Soft" veranderd worden door twee draaiknoppen op de twee benen van de voorvork. Een schematische doorsnede van het dempergedeelte is in Figuur 2.10 weergegeven. Het demperge-



Figuur 2.10: Schematische tekening van het dempergedeelte.

deelte bestaat uit twee delen, het olie reservoir en een compartiment welke van volume verandert als de zuiger op en neer beweegt. De twee delen staan in verbinding door de restricties (gaatjes). Beweegt de zuiger omlaag zal het volume toenemen en zal er olie uit het reservoir naar het compartiment stromen door de restricties. Bij het omhoog bewegen gebeurt precies het omgekeerde.

Bij een ideale demper is de demperkracht lineair met de snelheid \dot{x} .

$$B = b\dot{x} \quad (2.15)$$

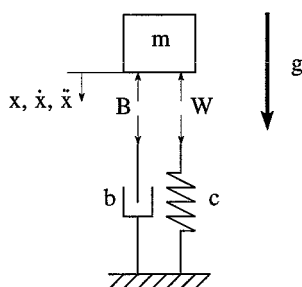
De dempingskracht in deze voorvork zal niet ideaal zijn en niet-lineair gedrag

vertonen dus de dempingskracht is waarschijnlijk een niet-lineaire functie in \dot{x} .

$$B = B(\dot{x}) \quad (2.16)$$

2.4 Een eenvoudig rekenmodel

Als uitgegaan wordt van een ideale veer en een ideale demper kan er het volgende systeem opgesteld worden, zie Figuur 2.11. De demper en veer werken samen tegen de indrukking dus kunnen de afzonderlijke krachten opgeteld worden. Dit levert een parallel schakeling voor de veer en demper. In Figuur 2.11 is m dat deel van de massa van de fietser dat op de voorvork



Figuur 2.11: Ideaal massa veer demper systeem.

rust. Als de tweede wet van Newton wordt toegepast dan geldt

$$F_{resulteerd} = m\ddot{x} \quad (2.17)$$

waar

$$\begin{aligned} F_{resulteerd} &= mg - B - W \\ &= mg - b\dot{x} - cx \end{aligned} \quad (2.18)$$

Dit resulteert in een lineaire tweede orde differentiaal vergelijking

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = mg \quad (2.19)$$

Voor de niet-ideale veer en demper gaat deze differentiaal vergelijking over in

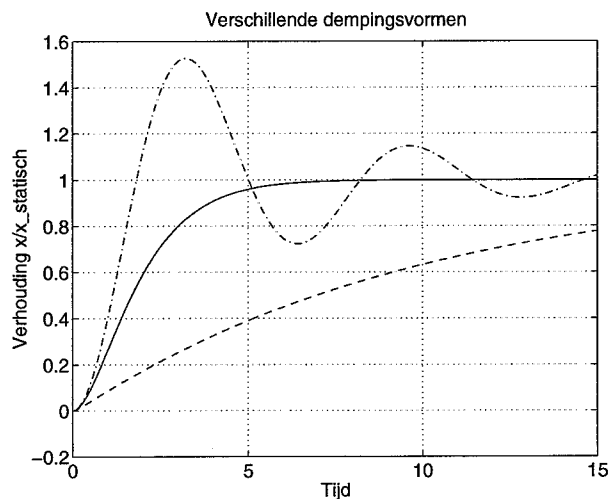
$$m\ddot{x} + B(\dot{x}) + W(x, \gamma) = mg \quad (2.20)$$

De oplossing van de lineaire differentiaal vergelijking geeft de indrukking als functie van de tijd. De eindwaarde van x is de statische indrukking $x_{statisch}$ onder invloed van de zwaartekracht. Hiervoor geldt dat $\dot{x} = \ddot{x} = 0$ en voor de ideale veer

$$x_{statisch} = \frac{mg}{c} \quad (2.21)$$

Het verloop van x als functie van de tijd wordt het dynamisch gedrag van het systeem genoemd. Er zijn een aantal verschillende manieren waarop de eindwaarde wordt bereikt. Deze zijn afhankelijk van de massa, demping en vering dus m , b en c in de lineaire differentiaal vergelijking 2.19. De verschillende dempingsvormen zijn weergegeven in Figuur 2.12. en te onderscheiden in

- Kritisch gedempte beweging met een behoorlijke demping.
De doorgetrokken grafiek.
- Onderkritisch gedempte beweging met een zwakke demping.
De gestippel-streepte grafiek.
- Bovenkritisch gedempte beweging met een sterke demping.
De gestreepte grafiek.



Figuur 2.12: Verschillende manieren van demping.

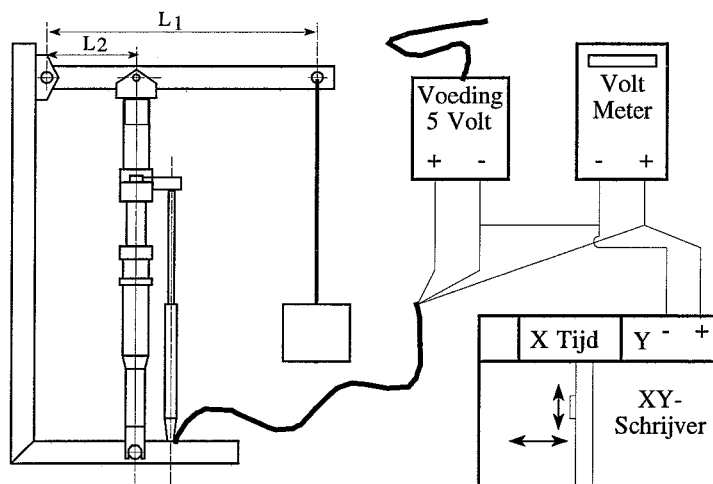
Door het uitvoeren van proeven en metingen aan de voorvork kan het dynamisch gedrag vergeleken worden met de plaatjes in Figuur 2.12 en een uitspraak gedaan worden over het dynamisch gedrag.

Hoofdstuk 3

Experimenteel

3.1 De proefopstelling

De krachten die nodig zijn om de voorvork in te drukken zijn erg groot (100-500 [N]). Om met niet al te grote gewichten te werken is er een hefboom constructie bedacht. De constructie is in Figuur 3.1 weergegeven. De arm-



Figuur 3.1: De proefopstelling met hefboom constructie.

verhouding $\alpha = \frac{L_2}{L_1} = 0.3$. Als aan de hefboom een massa m wordt gehangen dan gaat de lineaire differentiaal vergelijking van vergelijking 2.17 over in

$$\frac{m}{\alpha^2} \ddot{x} + b\dot{x} + cx = \frac{mg}{\alpha} \quad (3.1)$$

De 'effectieve' massa op de voorvork is nu $\frac{1}{\alpha^2} \approx 11$ maal zo groot als de massa aan de hefboom. Voor de 'effectieve' zwaartekracht geldt dat deze $\frac{1}{\alpha} \approx 3.3$

maal zo groot is.

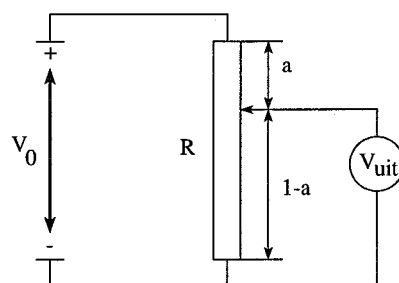
Tijdens de experimenten is gebruik gemaakt van de volgende elektronische apparatuur:

Apparaat	Type	Merk
Displacement Transducer	PD 20	Ether
X-Y recorder	PM 8043	PHILIPS
Rms multimeter	PM 2718X	PHILIPS

Tabel 3.1: Gebruikte apparatuur.

3.1.1 Lineaire schuifweerstand

De verplaatsing wordt gemeten met behulp van een lineair schuifweerstand. Een lineaire schuifweerstand wordt gevoed met een constante spanning. De voedingsspanning is 5 [V] en wordt geleverd door een voeding die aangesloten is op de netspanning. Het elektrisch schema van de lineaire schuifweerstand is in Figuur 3.2 weergegeven. Over de hele weerstand staat dus 5 [V] en voor



Figuur 3.2: Het elektrisch schema van de lineaire schuifweerstand.

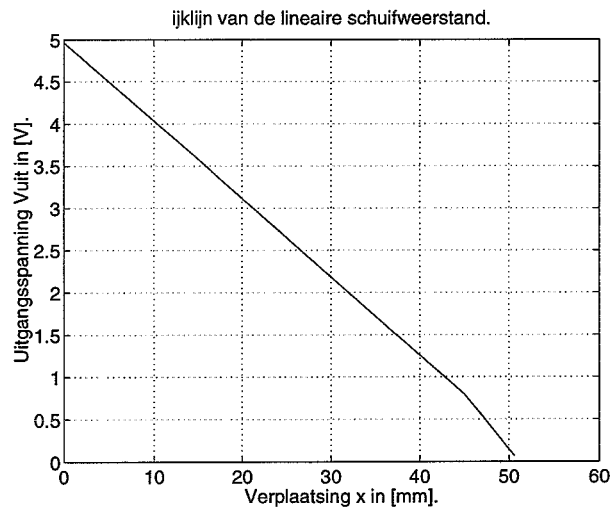
de uitgangsspanning V_{uit} , die met behulp van een voltmeter wordt afgelezen, geldt

$$V_{uit} = V_0(1 - a) \quad (3.2)$$

waar

$$\begin{aligned} V_0 &= \text{Voedingsspanning} \\ a &= \text{Relatieve verplaatsing} \end{aligned}$$

Een ijklijn is nodig om niet-lineariteiten van de schuifweerstand te bepalen. De ijklijn wordt verkregen door de verplaatsing te meten (met schuifmaat) en de daarbij optredende spanning te noteren. Voor de gebruikte weerstand gaf dit Figuur 3.3. Het gedrag van de weerstand is nagenoeg line-



Figuur 3.3: De ijklijn behorende bij de schuifweerstand.

air op één stuk in de verplaatsing na. Als het constructief mogelijk is wordt dit stuk tijdens het experimenteren vermeden en kan er een lineair verband tussen verplaatsing en uitgangsspanning opgesteld worden.

Een ander eigenschap van de weerstand is de traagheid waarmee de uitgangsspanning de verplaatsing volgt. Dit is vooral belangrijk bij dynamische proeven waar de snelheid van de beweging wordt geregistreerd. De gebruikte weerstand bezit geen traagheid en is dus naast statische proeven ook te gebruiken voor dynamische proeven.

3.1.2 X-Y schrijver

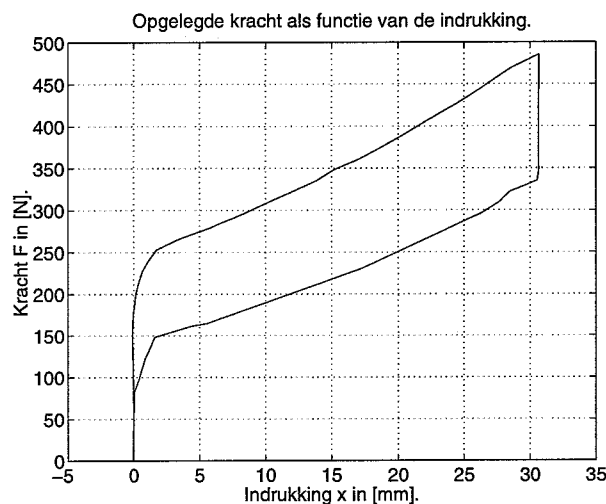
De X-Y schrijver is nodig om dynamische resultaten vast te leggen. De X-Y schrijver heeft twee ingangen X en Y. Ingang X kan als tijdbasis gebruikt worden om tijdsafhankelijke effecten te registreren. Ingang Y heeft de te registreren spanning V_{uit} als ingang. Van iedere ingang kan de gevoeligheid ingesteld worden. De gevoeligheid voor de X-basis wordt in sec/cm weergegeven en voor de Y-basis in V/cm.

3.2 Experimenten

In paragraaf 2.4 is al gewezen op de statische en dynamische eigenschappen van een massa veer demper systeem. In de volgende twee paragrafen zullen de uitgevoerde experimenten besproken worden.

3.2.1 Statische proeven

Tijdens de statische proeven wordt de massa aan de hefboom langzaam opgevoerd en wordt de optredende indrukking genoteerd. Er wordt bij het opvoeren van de massa steeds gewacht tot het hele systeem weer in rust is. Dit kan tot enkele minuten duren, maar is zeer belangrijk voor het resultaat. Te snel aflezen en opvoeren van de massa zal een systematische meetfout introduceren. Tijdens het opvoeren van de massa mag er geen extra kracht uitgeoefend worden door de hand. Hierdoor kan tevens een systematische meetfout geïntroduceerd worden. De toename van de massa dient in kleine stappen te gebeuren (maximaal 0.5 [kg] per stap) om een goed verloop van de kracht verplaatsings grafiek te krijgen. Bij een indrukking van 3 tot 4 [cm] wordt de massa weer stapsgewijs afgebouwd tot nul. Deze afname is er om zogeheten hysteresis in de luchtvering te onderzoeken. Een voorbeeld van dit experiment is weergegeven in Figuur 3.4.



Figuur 3.4: Kracht verplaatsings grafiek bij een luchtdruk van 3.6 [bar].

Aangezien de luchtdruk in de luchtvering aangepast kan worden is het nuttig verschillende kracht-verplaatsings grafieken op te stellen voor verschillende luchtdrukken (bijvoorbeeld 2.4-3-3.6 [bar]). Naast de luchtdruk is ook

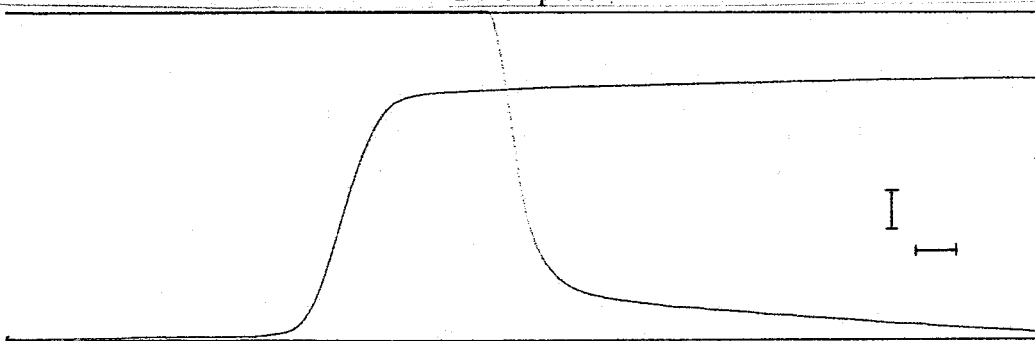
de demping in te stellen. In principe is de statische indrukking onafhankelijk van de demping, maar het is toch handig om dit te onderzoeken. Dit kan gedaan worden door kracht verplaatsings grafieken voor de kleinste en grootste dempingsstand op te stellen en deze te vergelijken (verkregen onder dezelfde luchtdruk).

De spanningen die de voltmeter weergeeft zijn de meetdata die verwerkt moet worden. De spanningen moeten via de ijklijn omgerekend worden naar verplaatsingen. De kracht op de voorvork moet berekend worden uit de armverhouding van de hefboom en de opgelegde massa. Hierna kunnen de kracht verplaatsings grafieken getekend worden voor de verschillende experimenten. Deze grafieken kunnen getekend worden op grafiekpapier of met behulp van een computerprogramma als Matlab.

3.2.2 Dynamische proeven

De dynamische experimenten worden uitgevoerd door een massa m aan de hefboom in één keer los te laten (bijvoorbeeld 7 [kg]), compressie van de luchtkamer. De beweging wordt geregistreerd door de X-Y schrijver. Door de demping van de voorvork te verstellen is het mogelijk de verschillen in de dempingsstanden te registreren. Als de massa aan de hefboom in rust is gekomen kan nog een ander experiment uitgevoerd worden en dat is het instantaan weghalen van de massa, decompressie van de luchtkamer. Een voorbeeld van deze twee proeven is in Figuur 3.5.

Totale massa:	6.53 [kg]	↑ Indrukking
Demperstand:	6	
Gevoeligheid X:	0.2 [sec/cm]	→ Tijd
Gevoeligheid Y:	0.2 [V/cm]	
Proef:	Compressie/ Decompressie	



Figuur 3.5: Dynamische proeven met demperstand 6 "Soft".

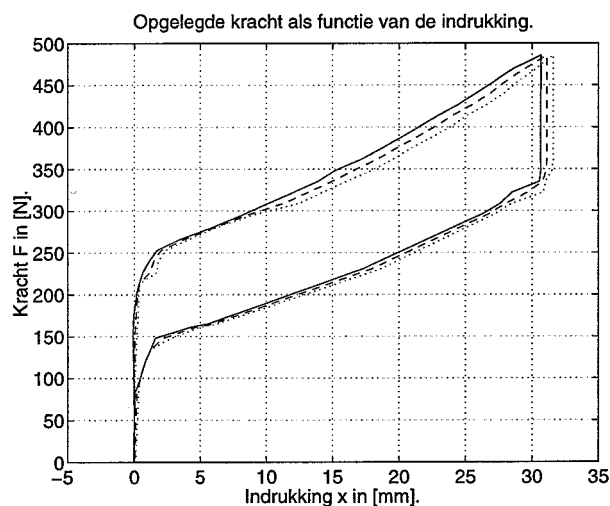
De tijd-basis moet goed ingesteld worden anders is er geen verschil te zien tussen de verschillende dempingsstanden. Deze vergelijkende proeven dienen bij één luchtdruk uitgevoerd te worden.

Door de luchtdruk te veranderen is te zien of deze invloed heeft op het dempingsgedrag buiten de verandering van de eindwaarde van de indrukking x .

De X-Y schrijver levert goed bruikbare grafieken. De instellingen als gevoeligheden van X- en Y-basis, demperstand, luchtdruk en opgelegde massa dienen op de grafieken vermeldt te worden.

3.3 Statistiek

Door een aantal keren dezelfde experimenten te herhalen kan er iets gezegd worden over de statistiek van de experimenten. Zo kan hetzelfde statisch experiment 4 à 5 keer herhaald worden om statistische grootheden als gemiddelde μ en standaarddeviatie σ te berekenen. Het experiment in paragraaf 3.2.1 is 5 keer herhaald en de gemiddelden en standaarddeviaties per opgelegde kracht zijn berekend. Grafisch kan dit weergegeven worden door het gemiddelde te tekenen en daaromheen het 95%-betrouwbaarheids interval ($\pm 2\sigma$), zie Figuur 3.6.



Figuur 3.6: 95%-betrouwbaarheids interval van kracht verplaatsings grafiek .

Voor de dynamische experimenten gaat dit moeilijker, maar door dezelfde proef een aantal keren te herhalen en de grafieken over elkaar tegen het licht te houden kan er iets gezegd worden over de reproduceerbaarheid van de proeven.

Onder reproduceerbaarheid wordt verstaan

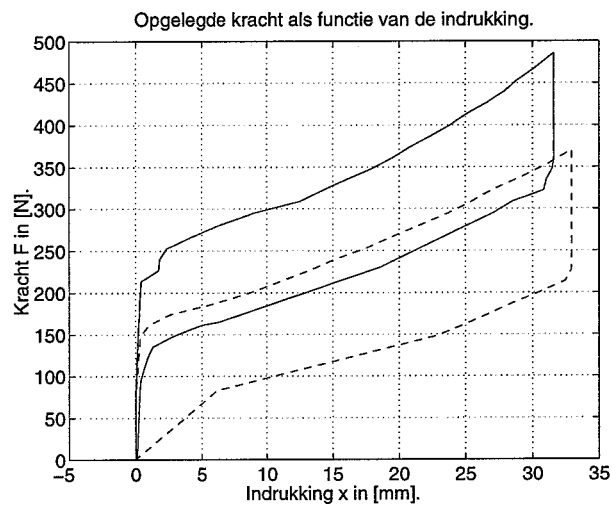
de mate waarin de resultaten van metingen van dezelfde meetgrootte, gedaan onder uiteenlopende omstandigheden, met elkaar overeenstemmen. Deze omstandigheden zijn bijvoorbeeld temperatuur, luchtvochtigheid en tijdstip (ochtend-middag-avond).

Hoofdstuk 4

Resultaten en Discussie

4.1 Statische Resultaten

Het verschil in veerstijfheid van de vork, ten gevolge van luchtdruk variatie, is getest bij twee luchtdrukken 3 en 3.6 [bar]. Het is te verwachten dat de veerstijfheid bij 3 [bar] kleiner is dan bij 3.6 [bar]. De bijbehorende kracht verplaatsings grafieken zijn weergegeven in Figuur 4.1, waar de doorgetrokken grafiek 3.6 [bar] en de gestreepte grafiek 3 [bar] is. Uit de grafieken blijkt



Figuur 4.1: Kracht verplaatsings grafieken bij verschillende luchtdrukken.

inderdaad dat bij 3 [bar] minder kracht nodig is om dezelfde verplaatsing te bereiken als bij 3.6 [bar].

Als een lineair verband wordt opgesteld tussen kracht en verplaatsing worden de volgende veerstijfheden gevonden.

Luchtdruk P [bar]	Veerstijfheid C [N/mm]
3	6.5
3.6	8

Tabel 4.1: Veerstijfheden uit een lineair verband.

Uit de theorie is echter gebleken dat er geen lineair verband bestaat tussen de opgelegde kracht en de verplaatsing bij luchtvering maar een progressief verband. Dit is terug te vinden in Figuur 4.1. Door de raaklijn aan de kracht verplaatsings grafiek voor verschillende verplaatsingen x te bepalen kan de veerstijfheid als functie van de verplaatsing $C(x)$ bepaalt worden. De lineaire veerstijfheden geven een orde van grootte.

Bij deze lineaire veerstijfheden dient opgemerkt te worden dat deze verkregen zijn met statische experimenten. Dit houdt in dat er steeds gewacht wordt met meten tot de opstelling in rust is. De thermodynamische grootte γ zal dus gelijk zijn aan 1 (Isotherme beweging). In de praktijk volgen de hobbels en kuilen zich zo snel op dat er sprake is van een adiabatische beweging en de thermodynamische grootte $\gamma = 1.4$. Hierdoor zullen de veerstijfheden in de praktijk een factor 10 à 100 groter kunnen zijn.

Uit de statische proeven blijkt tevens dat er een behoorlijke hysteresis in het systeem aanwezig is. Deze hysteresis wordt veroorzaakt door wrijving in de afdichtingen in de vorkbuis, zie Figuur 2.6.

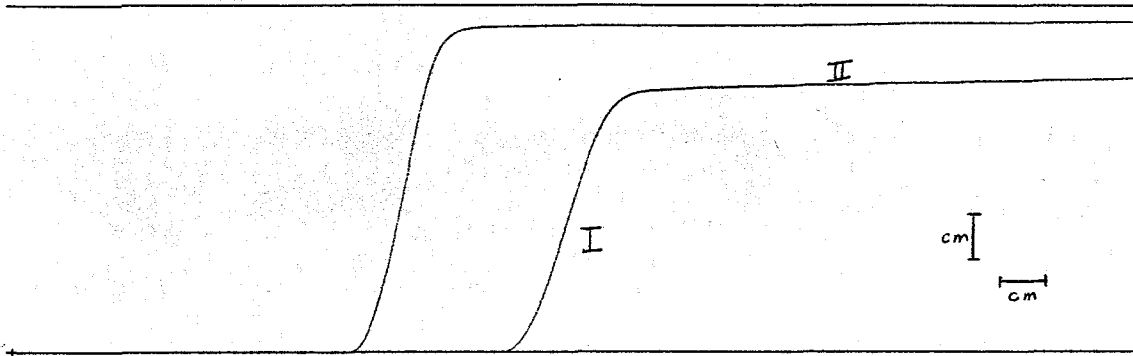
Over de statistiek van de statische experimenten is te zeggen dat de maximale standaarddeviatie σ niet meer bedraagt dan 0.5 [mm], zie Figuur 3.6. De experimenten zijn erg betrouwbaar, mits de systematische meetfouten zo klein als mogelijk zijn gemaakt.

4.2 Dynamische Resultaten

De verschillen tussen de demperstanden zijn getest in de twee uiterste standen demperstand 1 “Hard” en demperstand 6 “Soft”. De twee bijbehorende karakteristieken zijn weergegeven in Figuur 4.2, waar de linker grafiek demperstand 1 “Hard” en de rechter grafiek demperstand 6 “Soft” zijn. Het is duidelijk dat hier voor beide gevallen sprake is van bovenkritische demping met sterke demping. Als de twee demperstanden vergeleken worden dan heeft demperstand 1 een zwakkere demping dan demperstand 6. Hier ontstaat spraakverwarring, want demperstand “Hard” heeft een zwakkere

Totale massa: 6.53 [kg]
 Demperstand: 1 en 6
 Gevoeligheid X: 0.2 [sec/cm]
 Gevoeligheid Y: 0.2 [V/cm]
 Proef: Compressie

↑ Indrukking
 → Tijd



Figuur 4.2: Dynamische proeven voor de twee uiterste demperstanden.

demping dan demperstand “Soft”. De term “Soft” komt waarschijnlijk van de wijze waarop de eindwaarde bereikt wordt.

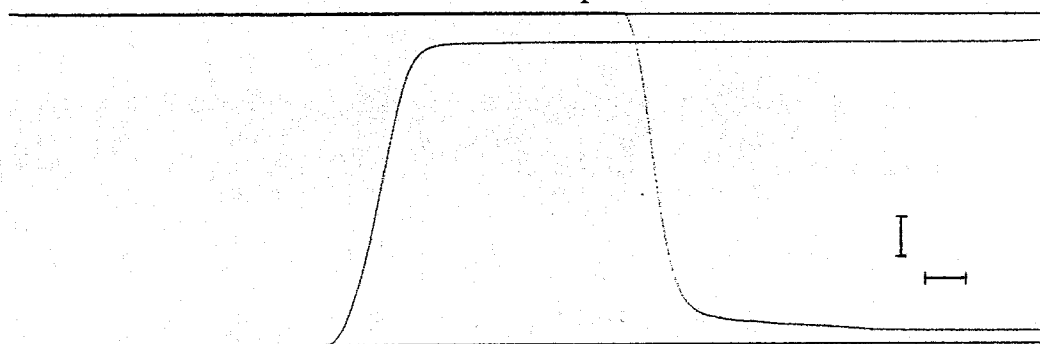
Dezelfde eindwaarde wordt voor beide demperstanden bereikt. Dit betekent dat de demping geen invloed heeft op de statische indrukking en de statische proeven.

In beide grafieken zijn twee trajecten te onderscheiden (zie Figuur 4.2).

1. Hier wordt de olie uit het oliereservoir door de restricties in het oliecompartiment geperst. Dit leidt tot demping van de indrukking. Het verschil tussen de helling van demperstand 1 en van demperstand 6 komt door grootteverandering van de restricties voor deze standen. Verder wordt de luchtvering adiabatisch samengedrukt. Deze adiabatiese samenpersing leidt tot een temperatuursverhoging van de lucht.
2. In dit traject neemt de hoge temperatuur van de lucht af, door warmteoverdracht via het metaal van de vorkbuis, tot kamertemperatuur. Dit zorgt voor verdere indrukking van de vork.
 In dit traject zal tevens nog olie uit het oliereservoir naar het oliecompartiment stromen. Deze stroming zal echter geen grote demping veroorzaken, want de snelheid van de beweging is nog maar gering.

Als de decompressie voor de beide dempingsstanden worden vergeleken (Figuur 3.5 en Figuur 4.3) is er geen verschil te herkennen. Dit duidt erop dat de grootte van de restricties voor deze proef voor iedere demperstand

Totale massa:	6.53 [kg]	↑ Indrukking
Demperstand:	1	
Gevoeligheid X:	0.2 [sec/cm]	→ Tijd
Gevoeligheid Y:	0.2 [V/cm]	
Proef:	Compressie/ Decompressie	



Figuur 4.3: Dynamische proeven met demperstand 1 "Hard".

hetzelfde is. De demperstand heeft dus geen invloed op het dynamisch gedrag van de terugvering van de vork.

De reproduceerbaarheid van de proeven blijkt erg goed te zijn en geen problemen op te leveren voor de betrouwbaarheid van de proeven.

Hoofdstuk 5

Conclusies

Het experimenteren met een hydraulisch geveerde voorvork van een mountainbike kan met eenvoudige proeven en hulpmiddelen tot zeer bruikbare gegevens leiden. Zo kunnen eenvoudige statische als dynamische experimenten uitgevoerd worden om kennis te krijgen van:

- Veerstijfheid.
- Hysterese (wrijving).
- Dempingsgedrag.
- Invloed van de verschillende instelmogelijkheden op deze eigenschappen.

De eigenschappen kunnen met deze proeven goed beschreven worden, maar niet alles kan fysisch verklaard worden. Dit zou uitvoerigere en diepgaandere experimenten vereisen. De resultaten geven dan ook niet meer dan een globale indruk van de verende en dempende eigenschappen van de voorvork.

Uit de theorie blijkt dat thermodynamische effecten een belangrijke rol spelen tijdens de vering. Deze effecten zijn niet meteen uit de proeven af te leiden. Zonder de kennis over deze thermodynamica kunnen verkeerde conclusies getrokken worden uit de verschillende proeven. Zo zijn de veerstijfheden berekend uit de statische proeven niet de stijfheden die in de praktijk optreden.

De experimenten zijn op de voorvork uitgevoerd zonder frame en wielen. Het statische en dynamische gedrag wordt echter tevens bepaald door het frame en de wielen. In de praktijk zullen er dus nog andere verschijnselen optreden dan die uit de experimenten naar voren zijn gekomen.

Hoofdstuk 6

Aanbevelingen

De gebruikte proefopstelling heeft de beperking dat alleen indrukkingen gerealiseerd kunnen worden. De karakteristieken voor het uitrekken van de voorvork (bijvoorbeeld bij het rijden door een kuil) zijn niet per definitie hetzelfde als bij het indrukken. Het is dan ook aan te raden bij het ontwerpen van de opstelling de mogelijkheid tot het uitrekken van de voorvork op te nemen.

Bij de conclusies werd geëindigd met de opmerking dat in de praktijk het frame en de wielen een rol spelen in het gedrag van de vering. De invloed van het voorwiel kan onderzocht worden door deze in een proefopstelling op te nemen. Door vergelijkende experimenten, met en zonder voorwiel, uit te voeren kan er iets gezegd worden over de bijdrage van het voorwiel.

Om alle fysische eigenschappen te kunnen verklaren zal de voorvork nader onderzocht moeten worden. Dit kan door middel van (i) goede constructie tekeningen met bematingen, detailtekeningen, toelichtingen of (ii) het demonteren en analyseren van de voorvork.

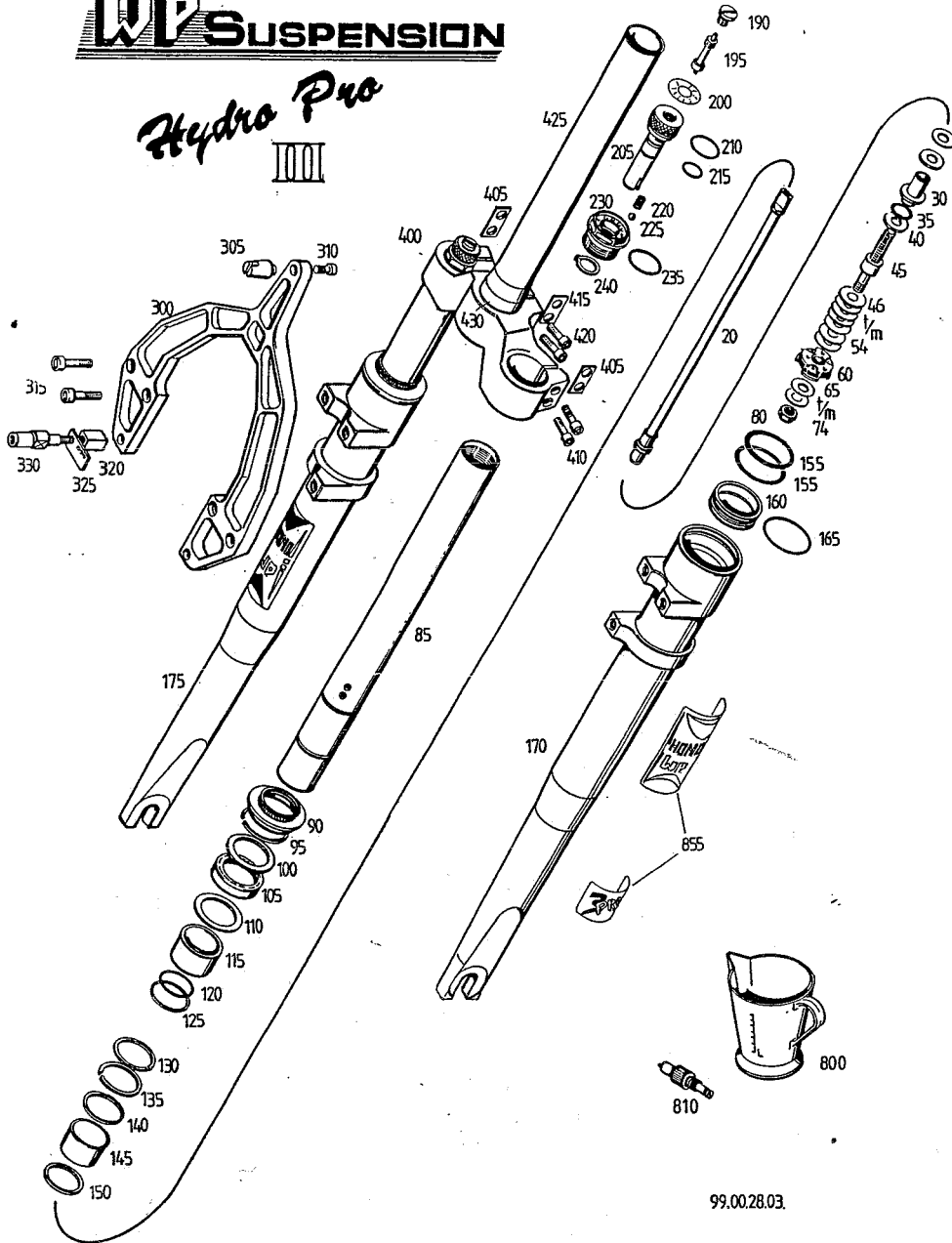
Het valideren van de verkregen gegevens uit de eenvoudige experimenten zou kunnen plaatsvinden met behulp van geavanceerde apparatuur als een trekbank. Dit kan aanleiding geven tot het opstellen van andere eenvoudige proeven die tot een beter resultaat leiden.

Bibliografie

- [1] Frazee Bedell. *Automotive Suspensions Steering and Wheel Alignment*. American Technical Society, 1955.
- [2] J.G. Giles. *Steering, Suspension and Tyres*, volume 1 van *Automotive Technology Series*. Iliffe Books Ltd, 1968.
- [3] E. Wagner. Lucht, Olie en Rubber. *All Terrain Bike Magazine*.
- [4] G. van de Beek. Begripsverwarring? Vering is geen demping. *Fiets*, Nr. 5:pp. 14-17.

Hydro Pro III

32



99.00.28.03

Bijlage A
Constructie tekening

Hydro Pro

