

MASTER

Bepaling van de amplitude van een druk/stroomgolf in een elastische buis

van Sint Fiet, L.H.M.

Award date:
1984

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

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

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

BEPALING VAN DE AMPLITUDE
VAN EEN DRUK/STROOMGOLF
IN EEN ELASTISCHE BUIS

Afstudeerdocent Prof. dr. J.A. Poulis

Begeleiders

Dr. ir. T. Arts, BMC Maastricht

Dr. ir. C.H. Massen, TH Eindhoven

L.H.M. van Sint Fiet

Maastricht, oktober 1983

Verslag van afstudeeronderzoek
verricht aan de Rijksuniversiteit
Limburg in het Biomedisch centrum
te Maastricht.

TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN
AFDELING DER TECHNISCHE NATUURKUNDE
VAKGROEP ANALYSE VAN FYSISCHE MEETMETHODEN

INHOUDSOPGAVE :

SAMENVATTING

INLEIDING

HOOFDSTUK 1 : VOORTPLANTINGSSNELHEID VAN EEN DRUK/STROOMGOLF IN EEN ELASTISCHE BUIS.

1.1 Inleiding

1.2 Voortplantingssnelheid van de drukgolf

1.3 Vloeistofstromingssnelheid

HOOFDSTUK 2 : BESCHRIJVING MEETMETHODE DIAMETERVARIATIE VAN EEN ELASTISCHE BUIS

2.1 Inleiding

2.2 De magnetische inductie $\vec{B}(t)$ van een spoel

2.3 Induktiespanning

2.4 Metingen met de spoelen

HOOFDSTUK 3 : DE MEETOPSTELLING

3.1 Inleiding

3.2 Overzicht van de opstelling

3.3 De elastische buis

3.4 De spoelen

3.5 De Doppler-apparatuur

3.6 Opzet van de metingen

HOOFDSTUK 4 : METINGEN EN RESULTATEN

4.1 Overzicht

4.2 Voortplantingssnelheid van de drukgolf

4.3 Stromingssnelheid van de vloeistof

4.4 Relatie tussen drukverval over de buis en snelheidsvariatie

4.5 Diskussie

4.6 Aanbevelingen

Appendix 1 : De 65-kHz stroombron

Appendix 2 : De ontvanger-versterker

Lijst van symbolen

Litteratuurlijst

GRAFIEKEN :

- 1 Bepaling elasticiteitsmodulus E d.m.v. Kracht-rek proef.
- 2 Bepaling elasticiteitsmodulus E uit statische drukbelasting
- 3 IJkgrafiek spoelenset
- 4 Relatie druk - diameter
- 5 Uitwijking van de buiswand bij een drukpuls (H_2O)
- 6 Relatie tussen C_0 en amplitude drukgolf p_1 (H_2O)
- 7 Relatie $C_0 - p_1$ (bloed)
- 8 Relatie tussen snelheid uit wandbeweging v_w en Dopplersnelheid v_d (bloed)
- 9 Drukverschil p_{AB} tussen de beide opnemers als functie van de tijd t
- 10 Relatie tussen snelheidsverandering ΔV en snelheidsverandering uit wandbeweging

SAMENVATTING

Aan de Rijksuniversiteit Limburg, in de capaciteitsgroep Biofysica, is men geïnteresseerd in de bepaling van vloeistofstromingssnelheden in elastische buizen.(bv.slagaders). Dit afstudeerwerk, verricht in het Biomedisch Centrum te Maastricht, is erop gericht de wandbeweging op twee plaatsen langs de elastische buis te meten en daaruit de voortplantingssnelheid van de drukgolf door de vloeistof, en de stromingssnelheid van de vloeistof te bepalen. Ter registratie van de wandbeweging is gebruik gemaakt van een inductieve afstandsmeetmethode. De zo verkregen resultaten worden vergeleken met de snelheid van de vloeistof gemeten met behulp van ultrageluid.(Doppler-methode).

INLEIDING

Er bestaat aan de Rijksuniversiteit Limburg in de capaciteitsgroep Biofysica, behoefte aan een accurate methode om de wandbeweging van een elastische buis onder pulsatieve stromingskondities te registreren. Uit de wandbewegingen van de buis is het theoretisch mogelijk de vloeistofstromingssnelheid te berekenen. Het afstudeerwerk, verricht op het Biomedisch Centrum te Maastricht, bestaat uit het ontwikkelen en testen van een inductieve afstandsmeetmethode ter registratie van de wandbewegingen van de buis en om via deze metingen de snelheid van de vloeistofstroming in de buis te bepalen.

Hoofdstuk 1 behandelt de berekening van het magnetisch veld om een spoel en de relatie tussen de in een tweede spoel geïnduceerde spanning en de afstand tussen beide spoelen.

Hoofdstuk 2 betreft de analyse van de polsgolfvoortgeleiding in een elastische buis.

Hoofdstuk 3 behandelt de meetopstelling die is gebouwd om de relatie tussen wandbewegingen en voortplantingssnelheid te toetsen. Tevens is van de opstelling gebruik gemaakt om de voortplantingssnelheid van de drukgolf door de vloeistof te bepalen uit een looptijdmeting.

In hoofdstuk 4 tenslotte, worden de resultaten van de metingen uit de wandbewegingen vergeleken met resultaten uit andersoortige metingen. Zo is de voortplantingssnelheid van de drukgolf bepaald uit de elasticiteitsmodulus E , en de stromingssnelheid van de vloeistof uit ultra-geluidsmetingen. (Doppler-systeem). Het blijkt mogelijk met de gebruikte meetmethode de snelheid van de vloeistof te registreren.

HOOFDSTUK 1 : VOORTPLANTINGSSNELHEID VAN EEN DRUK/STROOMGOLF IN EEN ELASTISCHE BUIS.

1.1 Inleiding.

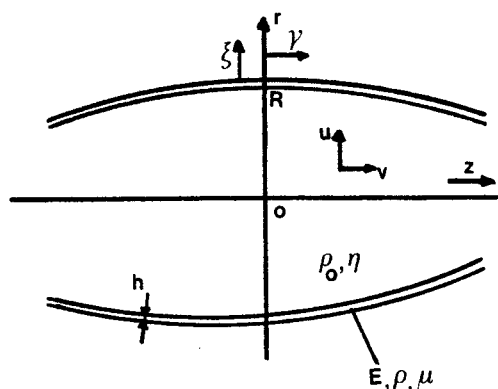
In dit hoofdstuk zullen vergelijkingen worden gepresenteerd voor de voortplantingssnelheid van de drukgolf door de vloeistof en de stromingssnelheid van de vloeistof. De theorie is vrijwel geheel gebaseerd op werk van Womersley.(Litt.3).

1.2 Voortplantingssnelheid van de drukgolf.

De voortplantingssnelheid van de drukgolf wordt voor een belangrijk gedeelte bepaald door het elastisch gedrag van de buiswand. Voor deze voortplantingssnelheid geldt bij benadering :

$$c_0 \approx \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (1.1)$$

met : K = volume-elasticiteit
 ρ_0 = soortelijke massa vloeistof.



FIGUUR 1 : Elastische buis

We gaan uit van een elastische buis met straal R , wanddikte h , elasticiteitsmodulus E , dwarskontractie μ , en soortelijke massa ρ . In de buis bevindt zich een vloeistof met viscositeit η en soortelijke massa ρ_0 .

Voor de volume-elasticiteit K kunnen we schrijven :

$$K = \frac{\Delta p}{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)} \quad (1.2)$$

met : Δp = drukverandering
 ΔV = volumeverandering bij drukverandering Δp
 V = beginvolume

Met vgl. (1.2) wordt vgl. (1.1) :

$$C_0 = \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_0(\Delta v/v)}} \quad (1.3)$$

Mc. Donald (Litt.1) en Womersley (Litt.3) vinden op deze manier voor de voortplantingssnelheid van de drukgolf C_0 :

$$C_0 = \sqrt{\frac{h \cdot E^{\otimes}}{2 R \rho_0}} \quad (1.4)$$

met E^{\otimes} = elasticiteitsmodulus in
circumferentiele richting

Deze relatie staat bekend als de vergelijking van Moens-Korteweg. Tevens kan in een zelfde buis een longitudinale golf in de buiswand voortgeplant worden. De snelheid van deze golf is :

$$C_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1-\mu^2)}} \quad (1.5)$$

Aangezien onze belangstelling uitgaat naar de vloeistofbeweging, is voor ons alleen de snelheid die benaderd wordt door C_0 van belang.

Als aangenomen wordt dat de wanddikte h konstant blijft, geldt voor de relatieve verlenging in z-richting ϵ_z :

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \mu \sigma_t) \quad (1.6)$$

met σ_z en σ_t de axiale resp. tangentiële spanningen

Evenzo geldt voor de relatieve verlenging in tangentiële richting ϵ_t :

$$\epsilon_t = \frac{1}{E} (-\mu \sigma_z + \sigma_t) \quad (1.7)$$

Voor een cilindrische pijp waarvan het materiaal isotroop is geldt :

$$\sigma_t = 2\sigma_z \quad (1.8)$$

We vinden dan voor (1.5) en (1.6) :

$$\epsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} (1 - \frac{1}{2}\mu) \quad (1.9)$$

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_t}{E} (\frac{1}{2} - \mu) \quad (1.10)$$

Uit de metingen bij statische drukbelasting (zie par. 3.2) blijkt :

$$\epsilon_t = \frac{\Delta R}{R} = 0.1 \quad \text{en} \quad \epsilon_z = \frac{\Delta L}{L} = 0.0015$$

dus : $\epsilon_z \ll \epsilon_t$, waaruit volgens vgl. (1.10) volgt :

$$\mu = 0.485 \approx 0.5$$

Dan volgt uit vgl. (1.9) :

$$E^{\otimes} = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} = \frac{E}{1 - \frac{1}{2}\mu} = \frac{4}{3} E \quad (1.11)$$

Gebruik makend van relatie (1.4) volgt voor de voortplantings-snelheid van de golf C_0 :

$$C_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot h}{3 \cdot R \cdot \rho_0}} \quad (1.12)$$

1.3 Vloeistofstromingssnelheid.

Een vrij nauwkeurige mathematische beschouwing van de gemiddelde vloeistofsnelheid \bar{v} is uitgevoerd door Womersley. (Litt.3). Er wordt een relatie afgeleid die aantoont dat de uitwijking ξ een functie is van de snelheid \bar{v} :

$$\bar{v} = \frac{2C_0}{R} \xi \quad (1.13)$$

met : \bar{v} = gemiddelde snelheid
 ξ = uitwijking in radiële richting
R = straal

Mits :

1. wanddikte van de buis h dun in relatie tot de straal R .
2. golflengte λ groot in vergelijking met de diameter $2R$ van de buis.
3. relatief hoge frekventies oftewel $\alpha \gg 1$, met $\alpha = R\sqrt{\frac{\rho\omega}{\eta}}$
4. geen reflecties aan het eind van de buis

HOOFDSTUK 2 : BESCHRIJVING MEETMETHODE DIAMETERVARIATIE VAN EEN ELASTISCHE BUIS.

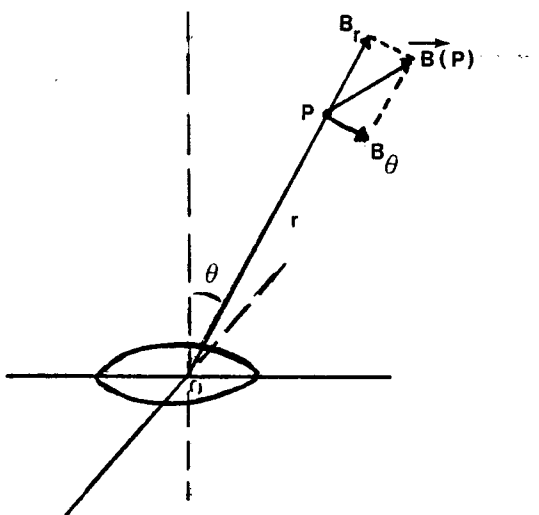
2.1 Inleiding.

In hoofdstuk 1 is de relatie tussen druk en stroom en de variaties in diameter van de elastische buis afgeleid. In dit hoofdstuk wordt de methode besproken voor de meting van diameter variaties van de elastische buis. Gekozen is voor een inductieve afstandsmeting.

Loopt door een spoel een stroom I, dan heeft deze een magnetisch inductieveld \vec{B} zowel binnen als buiten de spoel tot gevolg. Bij een wisselstroom I(t) door deze spoel, de zendspoel, wisselt de elektromagnetische inductie $\vec{B}(t)$ eveneens. Plaatsen we nu in dit veld $\vec{B}(t)$ een tweede spoel, de ontvangstspoel, dan wordt in deze spoel een elektromagnetische inductiespanning $V_{ind}(t)$ opgewekt. De grootte van deze inductiespanning is afhankelijk van de afstand tussen de twee spoelen en de oriëntatie van de spoelen t.o.v elkaar.

2.2 De magnetische inductie $\vec{B}(t)$ van een spoel.

De stroom door de spoel wordt voorgesteld als een kringstroom door een cirkelvormige geleider met straal a. (zie fig.2). We gaan voor het magneetveld $\vec{B}(t)$ uit van een dipoolbenadering.



FIGUUR 2 : KRINGSTROOM.

Voor punten P waarbij $r \gg a$ geldt er voor de inductie :

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 I(t) a^2}{4r^3} (2\cos\theta \vec{e}_r + \sin\theta \vec{e}_\theta) \quad (2.1)$$

met : r = afstand tussen de twee spoelen

θ = hoek tussen as van de winding en verbindingslijn P met hart van de spoel

\vec{e}_r = vektor in richting verbindingslijn P/hart spoel

\vec{e}_θ = vektor loodrecht op \vec{e}_r en op de as van de spoel

μ_0 = magnetische permeabiliteit van het vakuum

We schrijven nu : $\vec{B}(P) = B_r \vec{e}_r + B_\theta \vec{e}_\theta$ (2.2).

Op de as ($\theta=0$) geldt :

$$B_r(t) = \frac{\mu_0 a^2 I(t)}{2r^3} \quad (2.3)$$

$$B_\theta(t) = 0$$

2.3 Induktiespanning.

Plaatsen we nu een tweede winding in het punt P en nemen we $\theta=0$, dan vinden we voor de magnetische flux $\Phi(t)$ door die winding :

$$\Phi(t) = \frac{\mu_0 \pi a^4 I_0 \cos \omega t}{2r^3} \quad (2.4)$$

En voor de grootte van de inductiespanning $V_{ind}(t)$:

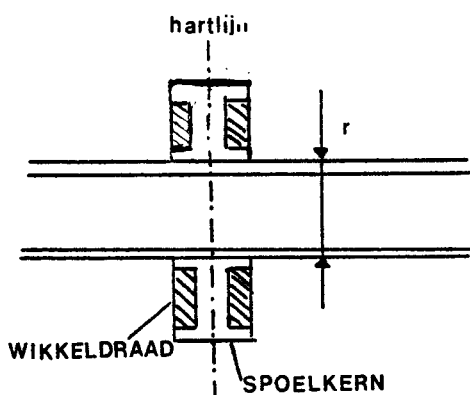
$$V_{ind}(t) = \frac{\mu_0 \pi a^4 I_0 \omega \sin \omega t}{2r^3} \quad (2.5)$$

Voor twee spoelen,beiden straal a en resp. N_1 en N_2 windingen, vinden we dan voor de inductiespanning in de tweede spoel :

$$V_{ind}(t) = \frac{N_1 \cdot N_2 \mu_0 \pi a^4 I_0 \omega \sin \omega t}{2r^3} \quad (2.6)$$

2.4 Metingen met de spoelen.

De spoelen worden op de elastische buis bevestigd met behulp van sneldrogende lijm. Er wordt voor gezorgd, dat de hartlijnen van de spoelen samenvallen. (zie fig.3).



FIGUUR 3 : Bevestiging van de spoelen.

Een verandering van diameter resulteert in een verandering van de afstand r tussen de twee spoelen. Dit leidt weer tot een verandering van de inductiespanning $V_{ind}(t)$ in de tweede spoel.

De spoelen worden in de opstelling op een afstand r van ongeveer 15 cm. van elkaar bevestigd. Een mispositionering van de hartlijnen t.o.v. elkaar ter grootte van de diameter van de spoel geeft maximaal een fout van 3 %. Dichtbij ($r \sim a$) moet er een correctie op de inductiespanning worden uitgevoerd, deze speelt bij onze metingen echter geen rol van betekenis.(Litt.2).

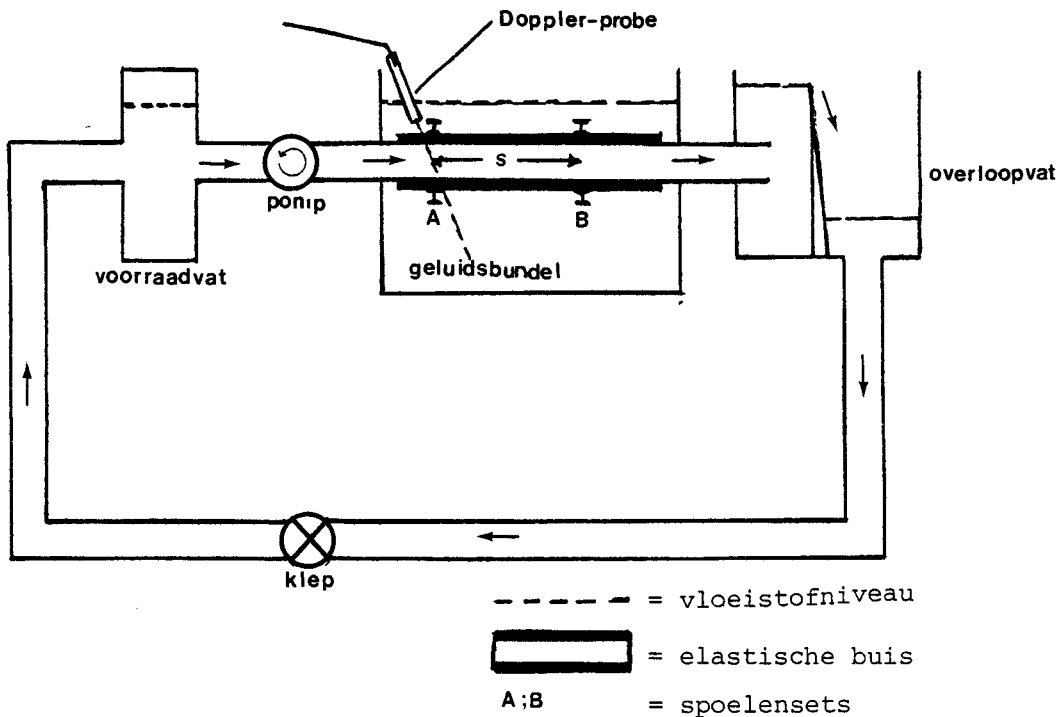
HOOFDSTUK 3 : DE MEETOPSTELLING.

3.1 Inleiding.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de meetopstelling zoals deze in onze experimenten ter bepaling van de snelheid van drukgolf en vloeistofstroming gebruikt is.

3.2 Overzicht van de opstelling.

De opstelling bestaat uit een gesloten circuit waarin de vloeistof wordt rondgepompt. In dit circuit is de elastische buis opgenomen waaraan de afstandsmetingen plaatsvinden. (zie fig. 4).



FIGUUR 4 : Overzicht van de opstelling.

De elastische buis bevindt zich onder het wateroppervlak, de vloeistof wordt door de pomp rondgepompt. De pompsnelheid kan gevarieerd worden door een elektrisch sturingssignaal. Aldus kan een stroomsterkte, aanstijgtijd, 50 ms verkregen worden waarmee een hartpompslag gesimuleerd wordt.

3.3 De elastische buis.

De elastische buis is een latex slang. Deze slang, zgn. Penrose Drain, is verkregen bij Lameris in Utrecht. Van belang voor ons onderzoek zijn enige materiaalkonstanten en geometrische eigenschappen van de buis.

geometrische eigenschappen :

Ons interesseert de buiten- cq. binnenstraal van de slang en, daarmee direkt gerelateerd de wanddikte h .

De buitenstraal is gemeten door een aantal stukken slang plat te leggen onder een perspex blokje, daarna is met een schuifmaat de breedte b gemeten. Er geldt :

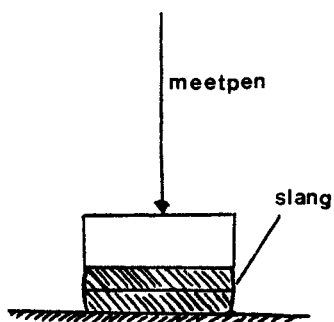
$$b = \pi R_u \quad (3.1)$$

met R_u = buitenstraal

Voor de buitenstraal R_u werd gemeten :

| |
|---|
| $R_u = 7.95 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ s.d. $\pm 0.02 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ |
|---|

Voor het meten van de wanddikte h werd gebruik gemaakt van een meetpen die op een dun licht plaatje bovenop de slang rust. (zie fig. 5).



Met de meetpen wordt de afstand tot het oppervlak (glad stuk marmer) gemeten, eerst met slang, dan zonder slang. Uit het verschil kunnen we de wanddikte h bepalen.

| |
|---|
| $h = 0.163 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ s.d. $\pm 0.001 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ |
|---|

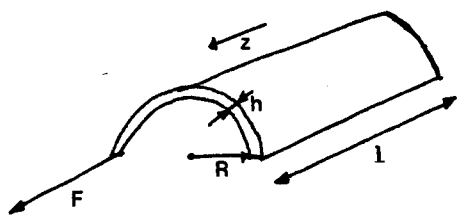
FIGUUR 5 : Meetsituatie wanddikte h .

De binnenstraal R_i is nu eenvoudig te bepalen uit het verschil $(R_u - h)$:

$$R_i = (7.79 \quad 0.02) 10^{-3} \text{ m}$$

elasticiteitsmodulus E :

De waarde van de elasticiteitsmodulus E is van belang voor het berekenen van de voortplantingssnelheid van de drukgolf C_0 . We hebben op twee manieren de elasticiteitsmodulus E bepaald, nl. via een kracht-rek proef, en door middel van de relatie tussen druk- en volumeverandering. Als eerste wordt besproken de meting van E d.m.v. een kracht-rek proef.



FIGUUR 6 : Buis, lengte l, straal R en wanddikte h.

Voor de axiale spanning σ_z uitgeoefend op de buis in lengte-richting geldt:

$$\sigma_z = \frac{F}{2 \pi R h} \quad (3.2)$$

met R = straal van de buis
F = kracht
h = wanddikte

Voor de elasticiteitsmodulus E geldt per definitie (Wet van Hooke) :

$$E = \frac{\sigma_z}{\Delta L/L} \quad (3.3)$$

met L = lengte van de buis
 ΔL = lengteverandering

Om de relatie tussen kracht en verlenging te registreren, hangen we de slang vertikaal op en belasten het vrije uiteinde met een massa m. De kracht F is gelijk aan het produkt van massa en valversnelling :

$$F = m \cdot g \quad (3.4)$$

In grafiek 1 zien we spanning σ uitgezet tegen de rek $\Delta L/L$. Uit het verloop van deze grafiek zien we dat het buismateriaal niet-lineaire eigenschappen bezit.

De metingen met pulserende stromingen (zie hoofdstuk 4), leren ons dat wij werken in een gebied met uitwijkingen van 0 tot 10 %. De waarde van de elasticiteitsmodulus E is daar :

$$E \approx (1.08 \pm 0.05) 10^6 \text{ N/m}^2$$

In vgl. (1.12) wordt de relatie tussen elasticiteitsmodulus E en drukgolfsnelheid C_0 beschreven.

$$C_0 = \sqrt{\frac{2 E \cdot h}{3 R \rho_0}} \quad (1.12)$$

met ρ_0 = soortelijke massa vloeistof

Met $E = 1.08 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, $h = 0.163 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $R = (R_i + R_u)/2 = 7.87 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ en $\rho_0 = 10^3 \text{ kg/m}^3$ vinden we voor C_0 :

$$C_0 = (3.9 \pm 0.2) \text{ m/s}$$

Een tweede manier om de elasticiteitsmodulus E te bepalen is via de relatie tussen volumeverandering en drukverandering.

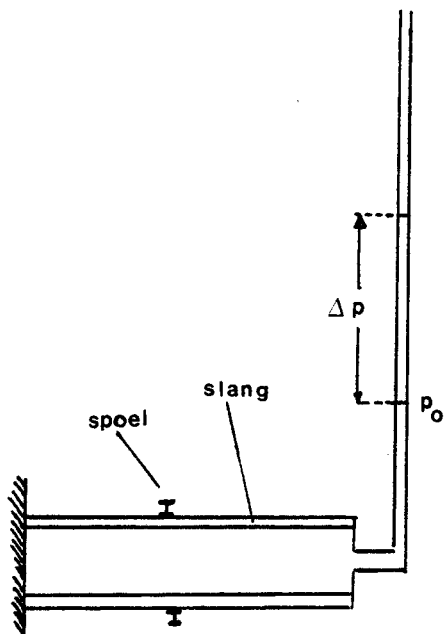
$$C_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (3.5)$$

$$\text{met } K = \frac{\Delta p}{\Delta v/v}$$

Δp = drukverandering

ΔV = volumeverandering

V = beginvolume



FIGUUR 7a : Meetopstelling bij statische drukbelasting.

$$V_0 = \pi R_0^2 L_0 \quad (3.6)$$

met : V_0 = beginvolume
 R_0 = beginstraal
 L_0 = beginlengte
 alle bij $p = p_0$

Bij een drukverandering Δp vinden we een volume V_p waarvoor geldt :

$$V_p = \pi (R_0 + \Delta R_0)^2 (L_0 + \Delta L_0) \quad (3.7)$$

met ΔR_0 = verandering van de straal
 ΔL_0 = verandering van de lengte

Voor de volumeverandering ΔV kunnen we schrijven :

$$\Delta V = V_p - V_0 \approx 2 \pi R_0 \Delta R_0 L_0 \quad (3.8)$$

als $\Delta L_0 \ll L_0$

Voor $\Delta V/V$ vinden we op deze wijze :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_0}{V_0} \approx \frac{2 \Delta R_0}{R_0} \quad (3.9)$$

Zoals in paragraaf 3.4 wordt beschreven kunnen we uit de verandering van de grootte van de inductiespanning $V_{ind}(t)$ de verandering in de afstand tussen de twee spoelen afleiden. Deze afstandsverandering is gelijk aan $2\Delta R_0$.

In grafiek 2 is $\Delta V_0/V_0$ uitgezet als functie van Δp . Met behulp van de methode der kleinste kwadraten vinden we hier voor :

$$K = (1.09 \pm 0.06) 10^4 \text{ N/m}^2$$

En voor de snelheid van de drukgolf C_0 volgens vgl. (3.5) :

$$C_0 = (3.3 \pm 0.1) \text{ m/s}$$

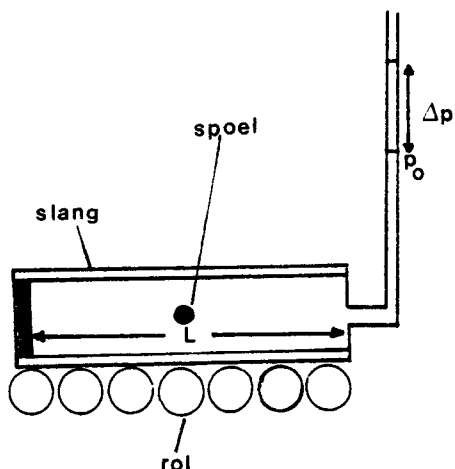
Er geldt :

$$E = \frac{3}{2} \frac{R}{h} \cdot K \quad (3.10)$$

Voor de elasticiteitsmodulus E vinden we dan :

$$E = (0.79 \pm 0.04) 10^6 \text{ N/m}^2$$

Gemeten is ook hoe de lengte en de straal van de buis veranderen bij een statische drukbelasting. Om de wrijving tussen buis en ondergrond tot een minimum te beperken is de buis op rollen gelegd. (zie fig. 7b).



Bij een aantal waarden van druk p (met $p=p_0+\Delta p$) is de verlenging in tangentiële richting ϵ_t , en de verlenging in axiale richting ϵ_z bepaald. Hiertoe is de verandering van de lengte ΔL en de verandering van de straal ΔR , alsmede de beginwaarden gemeten.

FIGUUR 7b : Meetopstelling
buis wrijvings-
loos.

Voor ϵ_t vinden we :

$$\epsilon_t = \frac{\Delta R}{R} = 0.11 \quad \text{s.d. } \pm 0.02$$

en voor ϵ_z :

$$\epsilon_z = \frac{\Delta L}{L} = 0.0018 \quad \text{s.d. } \pm 0.0006$$

3.4 De spoelen.

De spoelen bestaan uit een kunststof kern met een hoogte van 2 mm. Hierop wordt 1 meter koperdraad gewikkeld met een diameter van 50 μm . De toevoerdraden worden aangesoldeerd en getwijnd, dan wordt de kern met wikkeldraad en soldeerverbindingen ingebed in twee-komponenten lijm. De weerstand van de zo gemaakte spoelen is ongeveer 8 ohm, de coëfficiënt van zelfinductie ongeveer 16 μHenry .

De zendspoel wordt bekrachtigd via een 65-kHz stroombron (100 mA, zie appendix 1). Het signaal van de ontvangstspoel wordt in een ontvanger gefilterd en versterkt. (zie appendix 2).

We weten dat het signaal van de ontvangstspoel afhangt van de afstand r tussen de twee spoelen volgens :

$$V_{\text{ind}}(t) \propto r^{-3} \quad (3.10)$$

Deze relatie geeft uitgezet in een grafiek met logaritmische schaling een rechte lijn met helling -3. Door de ontvanger wordt daarom het signaal van de spoel logaritmisch uitgelezen. Vóór de aanvang van de metingen wordt ieder setje spoelen geijkt. Daartoe wordt de zendspoel bevestigd op een (kunststof) blokje, de ontvangstspoel wordt daarna op welbepaalde afstanden van de zendspoel bevestigd.

In grafiek 3 zien we het resultaat van zo'n ijkmeting. Hier is $\log(V_{\text{ind}}(t))$ als functie van $\log(r)$ uitgezet. Bij kleinere afstanden r ($\log r < 1$, $r < 3\text{mm}$) wijkt de gemeten waarde van de inductiespanning af van de waarde die theoretisch verwacht wordt. (lijn helling -3). De oorzaak van dit effect is te zoeken in oversturing van de versterker. Aangezien wij onze metingen doen bij een afstand $r \approx 8\text{mm}$, ($\log r \approx 1.2$), ondervinden wij tijdens de metingen geen hinder van dit effect.

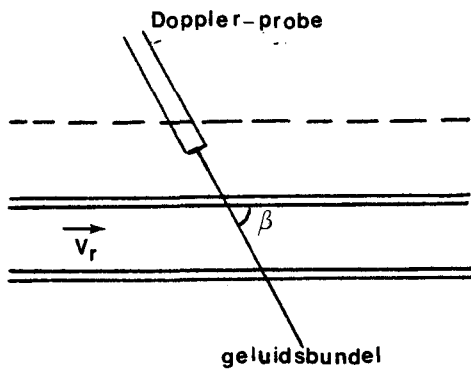
Het spreekt vanzelf dat als men een set spoelen eenmaal op het afstandsblok geijkt heeft, dat men dan uit de gemeten inductiespanning de afstand r kan bepalen uit de ijkgrafiek (mits de stroombron dezelfde stroom door de zendspoel levert).

3.5 De Doppler-apparatuur.

Principe :

Wanneer ultrageluid zich in een medium (bv. het lichaam) voortplant, dan zal niet alleen de intensiteit van het geluid afnemen door absorptie, maar het geluid zal ook gedeeltelijk verstrooien en gereflekteerd worden door grensvlakken van structuren met verschillende akoestische eigenschappen. (bv. bloeddeeltjes). De voortplantingssnelheid van het geluid c_g , is voor waterige weefsels in het lichaam (dus niet in het bot!) in de orde van 1500 m/s, de waarde voor water.

Staat een reflektor stil t.o.v. de geluidsbron, dan is de golflengte van het gereflekteerde geluid gelijk aan die van het uitgezonden geluid. Beweegt de reflektor echter met een snelheid v_r in de richting van de geluidsbron, dan zullen er meer golven per tijdseenheid de reflektor bereiken met als gevolg dat de frekwentie van het gereflekteerde geluid groter is.



FIGUUR 8 : Schematische weergave
meetsituatie Doppler-
apparatuur in de proef-
opstelling.

Voor de frekwentieverhuiving

Δf geldt :

$$\Delta f = \frac{2 v_r f_e \cos \beta}{c_g} \quad (3.12)$$

met β = hoek tussen snelheid
 v_r en richting
reflektor-bron

f_e = frekwentie uitgezon-
den geluid

In de opstelling zijn geluidsbron en ontvanger één en hetzelfde
piëzo-elektrische kristal.

3.6 Opzet van de metingen.

Een overzicht van de meetopstelling wordt gegeven in figuur 3.
Met behulp van een centrifugaalpomp wordt een continue off-
set-stroming gerealiseerd door de buis. Door middel van een
overloopvat aan het uiteinde van de buis wordt er een konstante
tegendruk aangehouden. Om de invloed van de zwaartekracht te
minimaliseren, en om het ultrageluid voort te planten wordt de
elastische buis geheel onder water gebracht.

Wordt er nu een stroompuls op de offsetstroom gesuperponeerd, dan
zal deze druk/stroomgolf eerst set A passeren en daar een uitwij-
king ξ van de wand veroorzaken die geregistreerd wordt via
een verandering van de afstand r tussen de twee spoelen ter
plaatse A.

Even later zal ditzelfde plaatsvinden bij set B. De tijd tussen deze twee gebeurtenissen noemen we τ . De snelheid van de drukgolf C_0 wordt dan :

$$C_0 = s/\tau \quad (3.13)$$

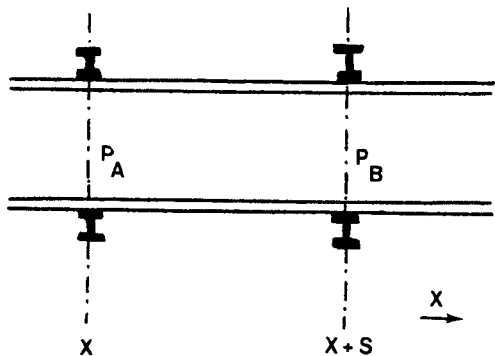
met s = afstand tussen A en B

Deze snelheid van de drukgolf gebruiken we om de gemiddelde snelheid van de vloeistof ter plaatse A te bepalen, immers volgens vergelijking (1.14) geldt :

$$\bar{v}_A = \frac{2 C_0}{R} \xi_A \quad (3.14)$$

Onder de voorwaarden vermeld in hoofdstuk, paragraaf 1.3.

De grootte van de verandering van het signaal bij A geeft de uitwijking ξ . Gelijkzeitig wordt ter plaatse A de snelheid van de vloeistof gemeten via de Doppler-methode. (zie 3.4). Voor beide sets spoelen is door middel van een statische ijking (zie 3.2 fig. 7a) de relatie tussen druk en uitwijking vastgelegd. We kunnen uit het verschil in afstand ter plaatse A en B eenvoudig het drukverschil $\Delta p_{AB} = p_A - p_B$ berekenen. (zie fig. 9).



FIGUUR 9 : Plaatsen van diameterbepaling op de elastische buis.

Verder weten we :

$$\rho_0 \, dv/dt = - dp/dx \quad (3.14)$$

met dx = afstand waarover dp gemeten wordt

oftewel :

$$\int_0^t \rho_0 (dv/dt) \, dt = - \int_0^t dp/dx \, dt \quad (3.15)$$

In ons geval vinden wij :

$$\Delta v = -1/\rho_0 s \cdot \int_0^t \Delta p_{AB} dt \quad (3.16)$$

De snelheidsverandering Δv wordt door het Doppler-systeem vastgelegd, Δp_{AB} via de afstandsuitwijkingen. Aldus kan in deze meetopstelling nagegaan worden hoe de snelheidsverandering Δv , berekend uit de buisdiametervariatië met gebruik van golfvergelijkingen, overeenkomt met de gemeten snelheidsverandering, zoals direkt gemeten met behulp van de Doppler-ultrageluidsapparatuur.

HOOFDSTUK 4 : METINGEN EN RESULTATEN.

4.1 Overzicht.

Allereerst is er met water in het vloeistofcircuit de grootte van de snelheid van de drukgolf bepaald uit looptijdmetingen. Deze snelheid wordt vergeleken met de snelheden berekend uit de elasticiteitsmetingen.(par. 3.2). Daarna is met bloed als stromende vloeistof de snelheid van de drukgolf bepaald. Ook deze snelheid wordt vergeleken met snelheden berekend uit de elasticiteitsmetingen. Gelijkzeitig met de afstandsvariatie-metingen is de snelheid van de bloedvloeistof met het Doppler-systeem geregistreerd. Uit de afstandsvariatie-metingen kan de gemiddelde vloeistofsnelheid worden berekend met vergelijking (1.13). Voor deze metingen is ook nagegaan in hoeverre aan de relatie :

$$\Delta v = - \frac{1}{\rho_0 s} \int_0^t \Delta p_{AB} dt$$

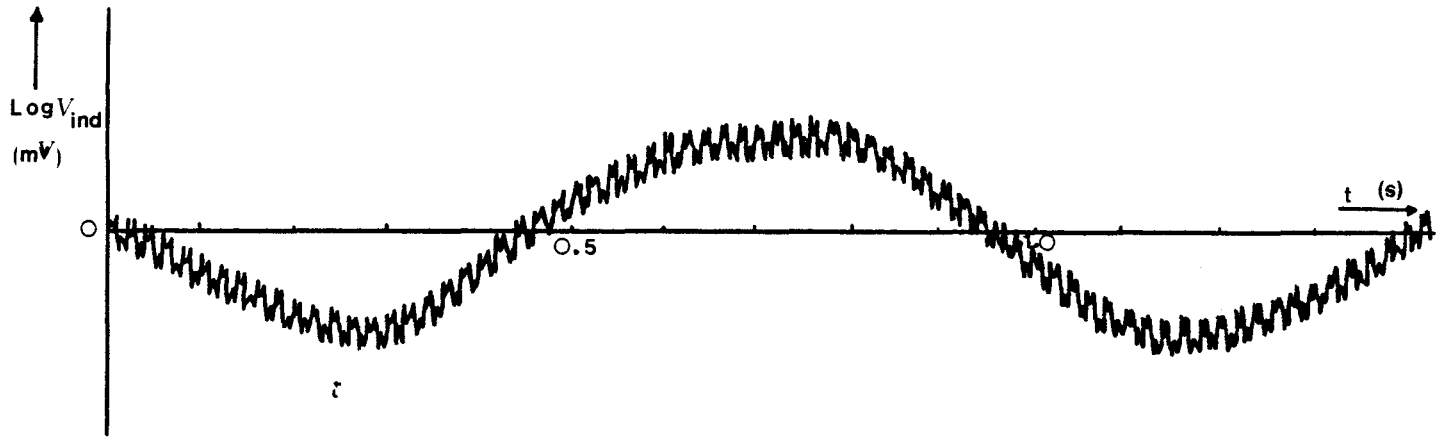
wordt voldaan.

4.2 Voortplantingssnelheid van de drukgolf.

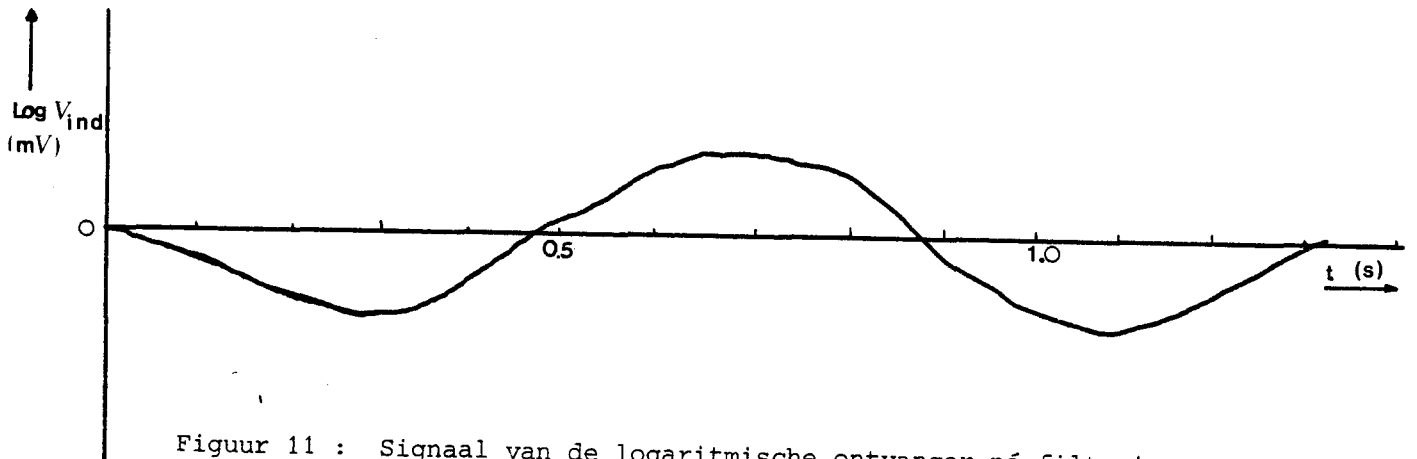
vloeistof H₂O :

De signalen van de spoelensets A en B (na de logaritmische versterker), worden op een twee-kanaalsschrijver uitgeschreven tegen de tijd t. De schrijver loopt met een konstante snelheid van 125 mm/sec.

In figuur 10 zien we dat er een 50 Hz-storing op het signaal voorkomt, die afkomstig blijkt te zijn van de voeding van de versterker. Een instelbaar filter (Krohn-Hite filter) wordt gebruikt om deze storing te filteren. Na plaatsing van het Krohn-Hite filter ziet het signaal er aanmerkelijk rustiger uit.(zie fig.11). Na beide kanalen wordt er een Krohn-Hite filter geplaatst.



FIGUUR 10 : Signaal van de logaritmische ontvanger



Figuur 11 : Signaal van de logaritmische ontvanger ná filtering door Krohn-Hite filter. (Low-pass 25 Hz).

Superponeren we nu met behulp van de pomp een pulsvormig signaal boven op de konstante flow, dan zal deze verstoring van de offset-flow eerst bij set A voorbijgaan, en een tijd τ later bij set B. (zie fig. 9). Het uitschrijven van de inductiespanning op logaritmische schaal tegen de tijd t van zowel set A als set B geeft ons een resultaat zoals in grafiek 5. Beide sets zijn geijkt op afstanden en uit het feit dat de helling van beide ijklijnen in grafiek 4 ongeveer gelijk is kunnen we konstateren dat de gevoeligheid van beide sets spoelen voor drukveranderingen gelijk is. In grafiek 5 zouden we dan ook krommen van gelijke hoogte verwachten. Echter aan het eind van de elastische buis treden reflecties op die tot gevolg hebben dat het signaal van set B lager is dan dat van set A op het tijdstip $t = t_0$.

Het punt van aanstijging van beide krommen is niet eenduidig te bepalen, daarom kijken we op een derde van de totale hoogte van kromme A en meten dan de tijd τ , die er verstrijkt vanaf dat tijdstip tot het tijdstip dat kromme B dezelfde hoogte heeft bereikt. De snelheid van de drukgolf wordt dan berekend volgens vergelijking (3.13). Er zijn voor drukpulsen met verschillende hoogtes metingen verricht, voor de gemiddelde snelheid van de drukgolf vinden we :

$$\begin{array}{l} C_0 = 3.1 \text{ m/s} \\ \text{s.d. } 0.2 \text{ m/s} \end{array}$$

Om na te gaan of de snelheid van de drukgolf afhankelijk is van de hoogte van de drukpuls, is in grafiek 6 de snelheid C_0 als functie van de druk p_1 , de druk die er ter plaatse A heerst als we ons op 1/3 van de totale hoogte van kromme A bevinden, uitgezet.

vloeistof runderbloed:

Runderbloed, 's ochtends vers gehaald bij het slachthuis, werd onstolbaar gemaakt met een citraat-oplossing. ($C_6H_5Na_3O_7 \cdot 2H_2O$ 0.01 molair). Na de opstelling gespoeld te hebben met een fysiologische zoutoplossing, werd het bloed in de opstelling gebracht.

De metingen ter bepaling van de snelheid van de drukgolf zijn van dezelfde opzet als die bij water. Ook de manier van verwerken is identiek.

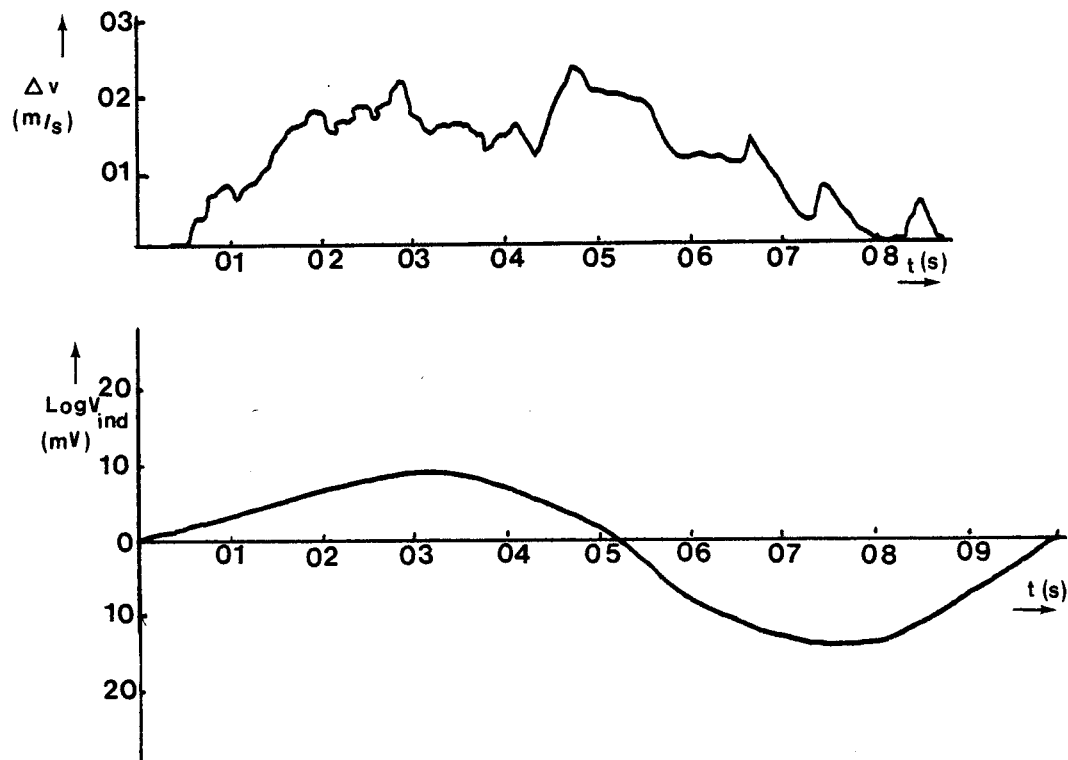
Voor bloed vinden we voor de gemiddelde snelheid van de drukgolf C_0 :

$$\begin{array}{l} C_0 = 3.2 \text{ m/s} \\ \text{s.d. } 0.3 \text{ m/s} \end{array}$$

In grafiek 7 is voor bloed de snelheid C_0 als functie van de druk p_1 uitgezet.

4.3 Stromingssnelheid van de vloeistof.

In figuur 12a zien we het signaal van de Doppler-snelheidsmeting als functie van de tijd t ; in figuur 12b is het signaal van de afstandsvariatie-meting bij set A als functie van de tijd t te zien.



We zien in figuur 12a dat er veel pieken op het Doppler-signaal waarneembaar zijn. Een verklaring hiervoor kan zijn dat er zich in de bloedvloeistof luchtbelllen bevinden. Aan het grensvlak vloeistof/lucht treedt er een grotere reflectie op dan aan het grensvlak vloeistof/deeltje. Uit de Doppler-metingen is de vloeistofsnelheid v_d bepaald op het moment dat bij set A de maximale hoogte bereikt werd. Dan zijn er nog geen gereflekteerde golven bij set A aangekomen. Uit de uitwijking ξ van de wand, gemeten met inductie-spoeltjes, berekenen we de vloeistofsnelheid v_w via vergelijking (1.7) :

$$v_w = \frac{2 c_0}{R} \xi_A$$

In grafiek 8 is de snelheid v_d uitgezet als functie van de snelheid v_w .

4.4 Relatie tussen drukverval over de buis en snelheidsvariatie.

Uit het verschil van de uitwijking van de wand ter plaatse A, en ter plaatse B kunnen we het drukverschil Δp_{AB} berekenen. Dit drukverschil Δp_{AB} is als functie van de tijd t uitgezet in grafiek 9. Integreren van Δp_{AB} van tijdstip 0 tot tijdstip t met behulp van de regel van Simpson, levert ons de waarden die in grafiek 10 uitgezet zijn als functie van de tijd. In deze grafiek is ook de snelheidsvariatie Δv , gemeten met behulp van het Doppler-systeem, als functie van de tijd getekend.

4.5 Diskussie.

snelheid van de drukgolf:

De snelheid van de drukgolf C_0 is op drie verschillende manieren bepaald :

- .1 berekend uit de elasticiteitsmodulus E , bepaald via een kracht- rek proef.
- .2 berekend uit de volume-elasticiteit K , bepaald via meting van de relatie tussen volume- en drukvariatie.
- .3 uit een looptijdmeting.

Resultaten

| wijze van bepalen | C_0 m/s | |
|-----------------------------------|-----------|---------|
| | water | bloed |
| kracht-rek proef (par. 3.2) | 3.9±0.2 | 3.7±0.2 |
| volume-elasticiteit (par. 3.2) | 3.3±0.1 | 3.2±0.1 |
| looptijdmeting (par. 3.6) | 3.1±0.2 | 3.0±0.2 |

We zien dat uit de kracht-rek proef een grotere snelheid wordt gevonden dan uit de andere metingen.

Uit de grafieken 6 & 7 valt op te maken dat de snelheid van de drukgolf onafhankelijk is van de grootte van de druk in de buis.

snelheid van de vloeistof

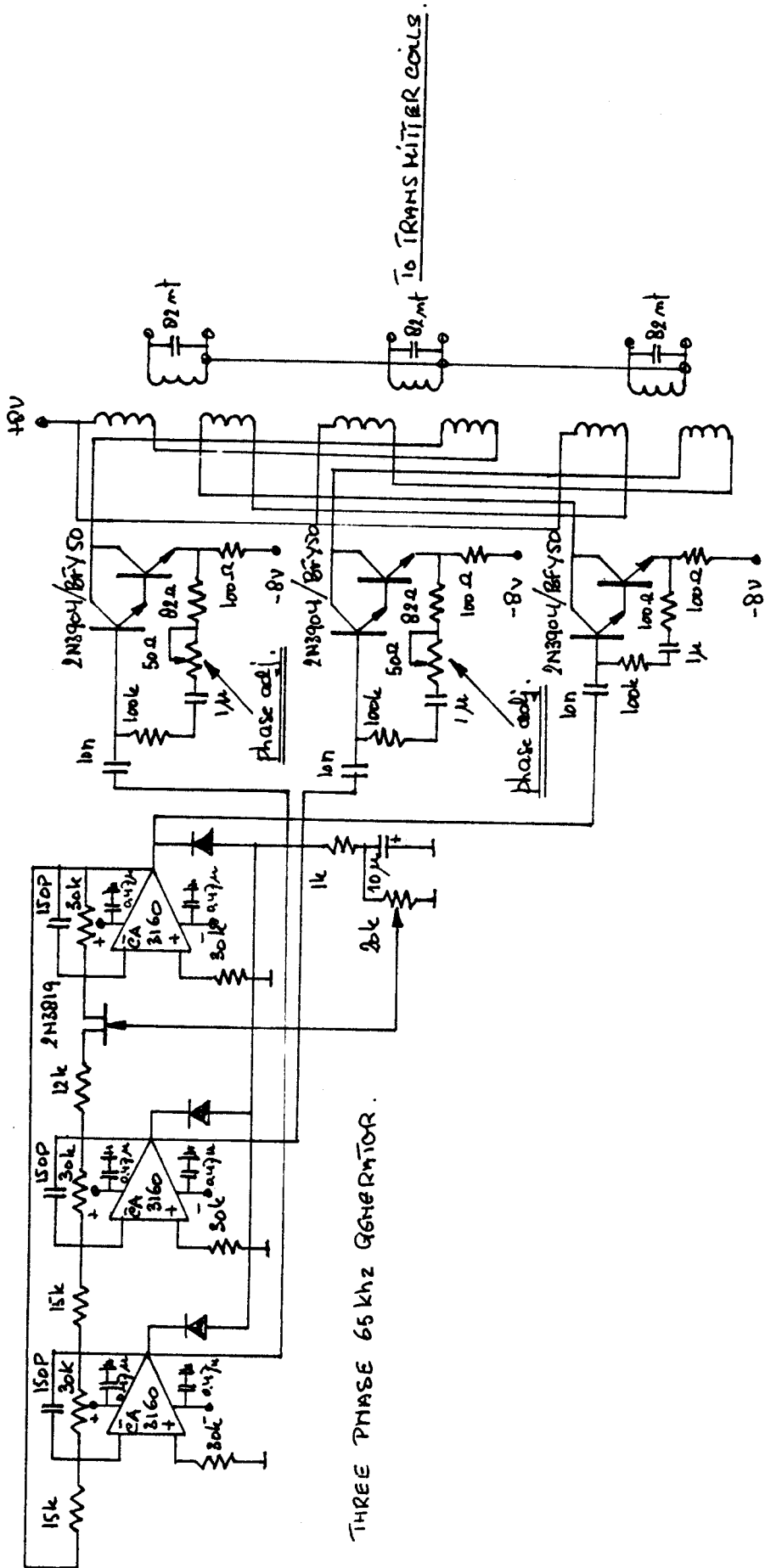
Uit grafiek 10 blijkt dat de waarden voor de variatie van de snelheid van de vloeistof uit de Doppler-meting, en de waarden berekend uit het drukverval over de buis binnen 20 % met elkaar overeenkomen.

4.6 Aanbevelingen.

Een verbetering van de metingen zou men kunnen verkrijgen door de buis karakteristiek af te sluiten, zodat de reflecties aan het uiteinde van de buis niet meer voorkomen.

Om de storing in het Doppler-meetsignaal te verkleinen zou men het bloed kunnen ontlichten. Aangezien het werken met bloed enige problemen met zich meebrengt, (stollen etc.) zou men ook een andere vloeistof met deeltjes kunnen gebruiken.

Appendix 1 : De 65-kHz stroombron



THREE PHASE 65 kHz GENERATOR.

LIJST VAN SYMBOLEN

| Symbool | Omschrijving | Eenheid |
|------------------|--|-----------|
| a | straal van de spoel | m |
| b | breedte van de buis | m |
| $\vec{B}(t)$ | magnetische inductie | T |
| B_r | r-komponent van $\vec{B}(t)$ | T |
| B_θ | θ -komponent van $\vec{B}(t)$ | T |
| C_0 | voortplantingssnelheid van de drukgolf | ms^{-1} |
| C_g | voortplantingssnelheid geluid in water | ms^{-1} |
| C_l | longitudinale voortplantingssnelheid | ms^{-1} |
| E | elasticiteitsmodulus | Nm^{-2} |
| E^\otimes | elasticiteitsmod. in circumferentiele richting | Nm^{-2} |
| \vec{e}_r | eenheidsvektor in r-richting | - |
| \vec{e}_θ | eenheidsvektor in θ -richting | - |
| F | kracht | N |
| f_e | frekwentie ultrageluid | Hz |
| h | wanddikte buis | m |
| $I(t)$ | stroomsterkte | A |
| I_0 | amplitude van de stroomsterkte | A |
| N_i | aantal windingen van spoel i | - |
| L | lengte van de buis | m |
| p | druk | Pa |
| p_1 | amplitude van de drukgolf | Pa |
| r | afstand tussen de spoelen | m |
| R_1 | inwendige straal van de buis | m |
| R_u | uitwendige straal van de buis | m |
| R | straal van de buis $(=(R_1+R_u)/2)$ | m |
| s | afstand tussen twee spoelensets | m |
| t | tijd | s |
| u | vloeistofsnelheid in radiale richting | ms^{-1} |
| v | vloeistofsnelheid in axiale richting | ms^{-1} |

| | | |
|---------------------|--|---------------------------|
| v_d | vloeistofsnelheid gemeten met Doppler-systeem | ms^{-1} |
| v_w | vloeistofsnelheid uit wandbeweging | ms^{-1} |
| \bar{v} | gemiddelde vloeistofsnelheid | ms^{-1} |
| v_r | snelheid van de reflektor | ms^{-1} |
| v_g | geluidssnelheid in water | ms^{-1} |
| $V_{\text{ind}}(t)$ | induktiespanning | V |
| z | axiale coördinaat | m |
| α | getal van Womersley | - |
| β | hoek | rad |
| ξ | uitwijking in axiale richting | m |
| ϵ_t | relatieve verlenging in tangentele richting | - |
| ϵ_z | relatieve verlenging in axiale richting | - |
| η | viskositeit | m^2s^{-1} |
| K | volume-elasticiteit | Nm^{-2} |
| ω | hoekfrequentie | rads^{-1} |
| Φ | magnetische flux | Wb |
| μ | dwarskontraktiemodulus | - |
| μ_0 | magnetische permeabiliteit van het vakuum | - |
| λ | golflengte | m |
| ρ | soortelijke massa buismateriaal | kgm^{-3} |
| ρ_0 | soortelijke massa vloeistof | kgm^{-3} |
| σ_t | spanning in tangentele richting | Nm^{-2} |
| σ_z | spanning in axiale richting | Nm^{-2} |
| | looptijd | s |

Δi = verandering van grootheid i .

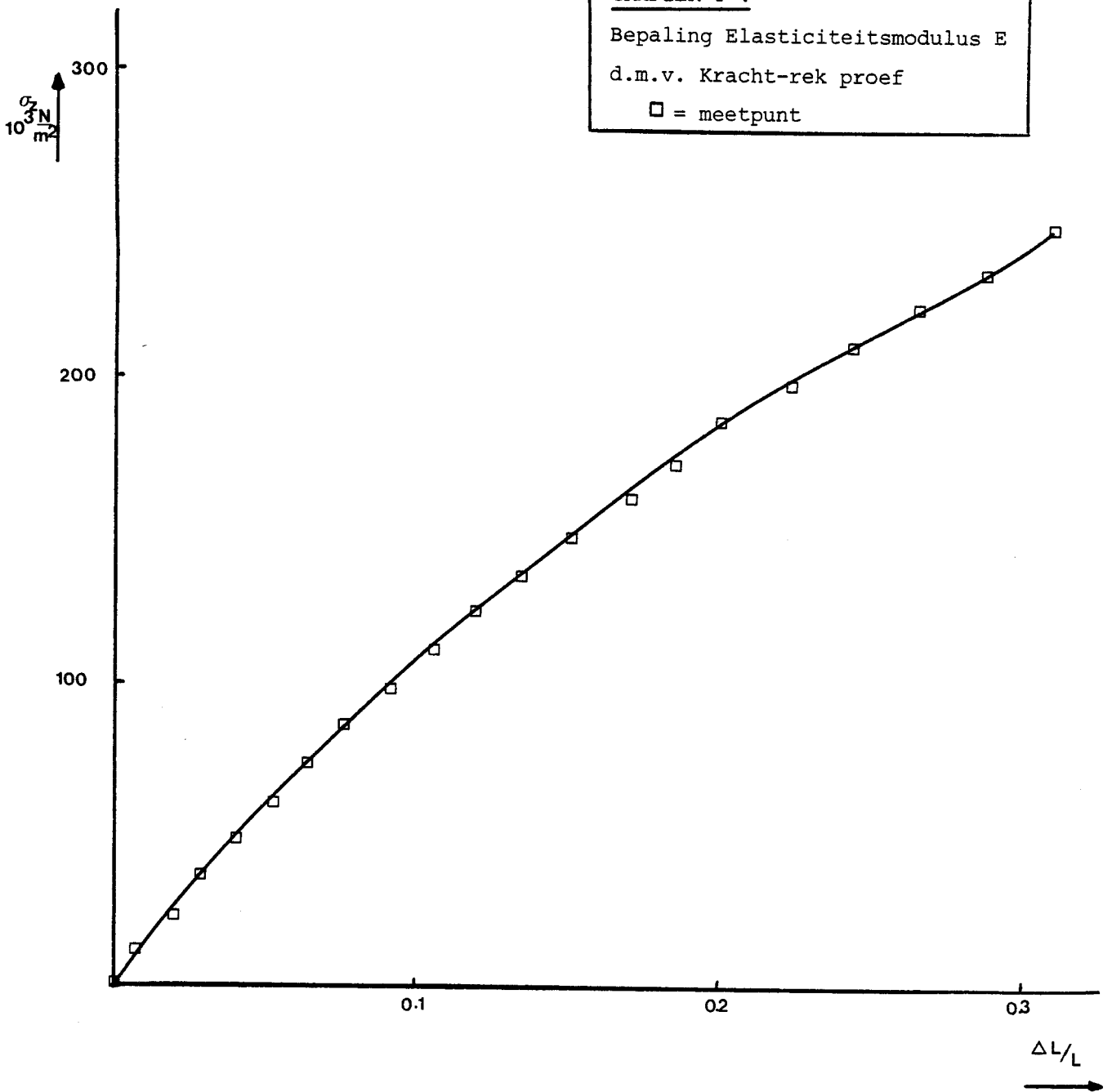
LITTERATUURLIJST

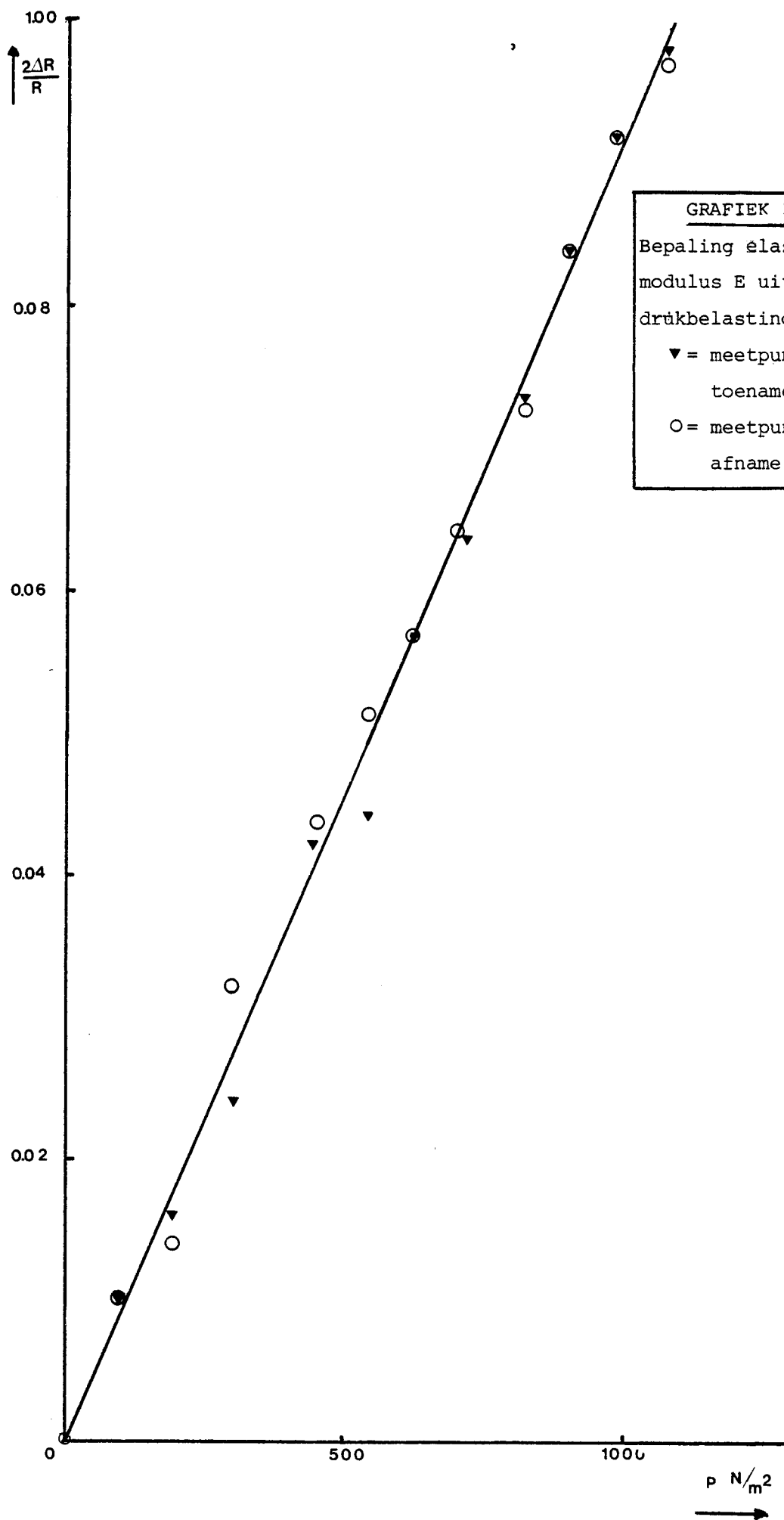
1. Mc. Donald D.A. (1960) : "Blood flow in arteries " Hfdst. 10 en 11, Camelot Press Ltd. Southampton; tweede druk, 1974.

2. Sint Fiet, L.H.M. van (1983) : "Een inductieve afstandsmeetmethode : Belangrijke grootheden" Tussentijds rapport Biomedisch Centrum Maastricht.

3. Womersley, J.R. (1955) : "Oscillatory Motion of a Viscous Liquid in a Thin-Walled Elastic Tube - I : The Linear approximation for Long Waves" Philosophical Magazine vol. 46 pp 199 -221.

GRAFIEK 1 :
Bepaling Elasticiteitsmodulus E
d.m.v. Kracht-rek proef
□ = meetpunt





GRAFIEK 2 :
Bepaling elasticiteits-
modulus E uit statische
drukbelasting.

- ▼ = meetpunt bij druk-
toename
- = meetpunt bij druk-
afname

