

## Toepassing van laser-Doppler anemometrie in knepen

G.F.M. Braat, H.G.J. Rutten

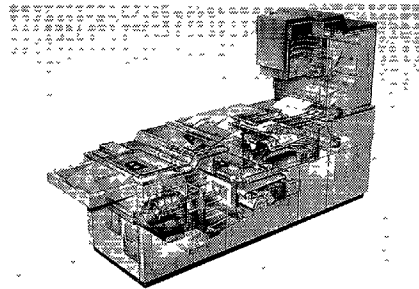
In kopieermachines en laserprinters komen veel zogenaamde knepen voor. Een kneep is het contactgebied tussen twee met rubber beklede metalen cilinders: de walsen. Figuur 1 geeft een goede indruk van het aantal knepen dat in een kopieerapparaat voorkomt. De belangrijkste taak van een kneep is het transporteren van papier. Andere functies zijn het schoonmaken (cleanen) van walsen waar toner (inktbolletjes) op achtergebleven is en het "fusen" van het beeld op het papier.

Een bron van storingen in kopieermachines en laserprinters ontstaat doordat er in een kneep iets mis gaat. Enkele voorbeelden hiervan zijn: vel papier blijft vastzitten aan een wals, papier wordt vervormd, kopie is te donker, te licht of glimt teveel. Deze problemen zijn het gevolg van eigenschappen van de walsen, zoals straal, rubberlaagdikte, elasticiteitsmodulus of van belastingen zoals normaalkracht, koppels en snelheid.

Het is dan ook van groot belang voor de goede werking van kopieerapparaten en laserprinters om een goed inzicht te hebben van dat wat er in een kneep gebeurt.

Op experimenteel gebied zijn tot nu toe niet veel resultaten beschikbaar die nauwkeurig met de praktijkbevindingen overeenkomen. Vandaar dat een onderzoek is gestart, waarvoor een meetopstelling is ontwikkeld waarin laser-Doppler anemometrie als methode wordt gebruikt om rubbervervormingen contactloos te kunnen meten.

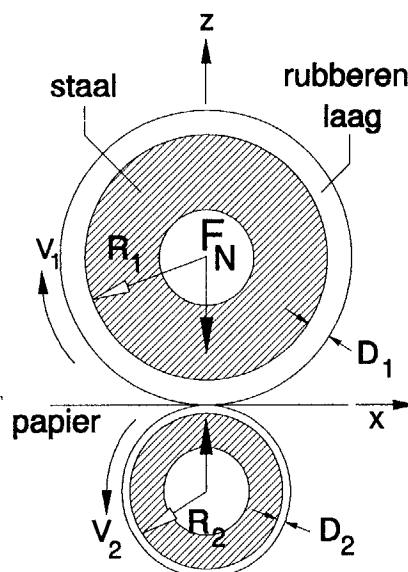
Een kneep in *onvervormde* toestand, zie figuur 2, is al vaak theoretisch benaderd. Het eenvoudigste model, gebaseerd op de halfruimtebenadering is van Hertz (1882) [1] en is uitvoerig beschreven door Johnson (1985) [2]. Het model van Kalker, gebaseerd op



Figuur 1. Knepen in een kopieerapparaat.

de gelaagde structuur - Kalker, 1990, 1991 [3, 4] en Braat, 1990 [5] - is gebruikt om de rubbervervormingen in een kneep te berekenen. De resultaten van deze berekeningen zijn verkregen met het zelf ontwikkelde programma MULTILAYER.

In dit artikel worden de meetopstelling, het principe en de toepassing van de laser-Doppler anemometrie en de onderzoeksresultaten beschreven. Tevens worden de verkregen meetresultaten vergeleken met de resultaten van de berekeningen op theoretische grondslag.



Figuur 2. Schematische voorstelling van een kneep in onvervormde toestand.

### Beschrijving van de kneep

De kneep is het contactgebied tussen twee met rubber beklede metalen cilinders, de walsen, en dient (voornamelijk) om papier te transporteren. Dit contactgebied ontstaat doordat de walsen met een normaalkracht  $F_N$  tegen elkaar worden gedrukt, zie figuur 3. Aangenomen wordt dat de cilinders onvervormbaar zijn.

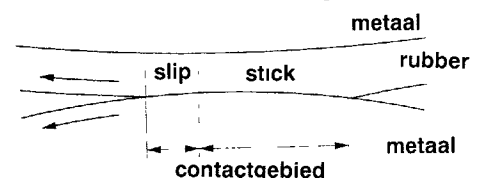
De walsen worden aangedreven door een koppel op iedere as en draaien in de in figuur 2 aangegeven richting. Aangenomen wordt dat de walsen stationair draaien, hetgeen wil zeggen dat de contactfenomenen niet in de tijd veranderen. Er kan een tangentiële kracht in het contactgebied uitgeoefend worden door de koppels op een bepaalde manier in te stellen.

Het contactgebied (figuur 3) wordt verdeeld in een stick-gebied en een slipgebied (de rubberoppervlakken hebben een snelheidsverschil ten opzichte van elkaar). Dit kunnen ook enkele slipgebieden zijn. Meestal is echter één slipgebied aanwezig, namelijk aan de kant waar het rubber het contactgebied verlaat.

Het gedetailleerde doel van het onderzoek is nu om de contactfenomenen, contactbreedte, grootte van stick- en slipgebied, rekprofielen in het contactgebied en in het inwendige, te bepalen. Met rek wordt bedoeld de rek of vervorming van het rubber in de x-richting (transportrichting). Opgemerkt wordt dat temperatuurinvloeden buiten beschouwing blijven.

### Waarom laser-Doppler anemometrie?

Een studie is verricht naar de wijze waarop de rubbervervormingen in de



Figuur 3. Het contactgebied in een belaste kneep.

kneep, verantwoordelijk voor de in het vorige hoofdstuk genoemde contactfenomenen, kunnen worden gemeten. In aanmerking komen druksensoren en contactloze meetmethoden.

#### Metten met druksensoren

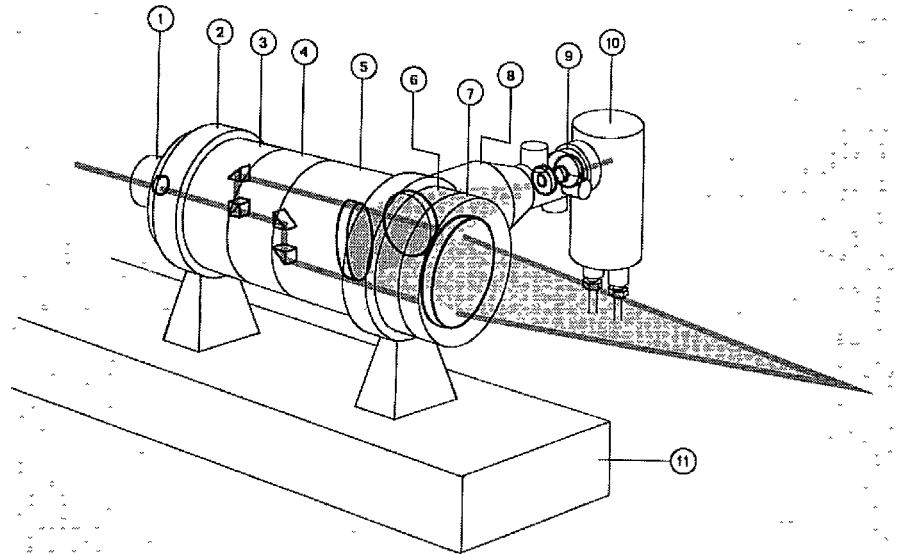
De dikte van de rubbers is doorgaans niet meer dan één à twee millimeter. Als in een zo dunne rubberlaag druksensoren zouden worden aangebracht, dan beïnvloeden deze de vervorming van het rubber dusdanig dat de nauwkeurigheid van de meting in twiifel getrokken mag worden. Een ander probleem bij het werken met druksensoren is de beperkte resolutie als gevolg van de afmetingen van een druksensor, die relatief groot zijn in verhouding tot de dikte van de rubberlaag. Een hinderlijk effect is ook dat, tengevolge van de rotatie van de wals, de sensor slechts enkele delen van een seconde per omwenteling in de kneep verblijft. Als de kneep geen continue constante krachtverdeling heeft, dient verder de positie van de sensor in de kneep uiterst nauwkeurig bekend te zijn. Een laatste probleem is nog dat de signalen op een betrouwbare manier naar "buiten" gebracht moeten worden door middel van sleepringen.

#### Contactloos meten

Al met al is het geen ideale oplossing om door middel van contact metingen te verrichten. Gezocht is dan ook naar een contactloze meetmethode waarvoor een optische, de laser-Doppler anemometrie, de meest geschikte bleek te zijn. Deze meetmethode wordt in de industrie al op diverse plaatsen toegepast.

Bij de laser-Doppler anemometrie is het mogelijk in zeer kleine meetvolumes (minder dan  $0,025 \text{ mm}^3$ ) contactloos snelheden te meten. In het vorige hoofdstuk is aangenomen dat we te maken hebben met een stationair contactprobleem, dus tijdsafhankelijk. Dit betekent dat de tijd  $t$  omgezet kan worden naar de plaatscoördinaat  $x$  door de transformatie  $x = V \cdot t$ , waarin  $V$  de constante rolsnelheid is. Indien de verplaatsing voorgesteld wordt door  $u$  is de snelheid gelijk

$$\text{aan } \frac{du}{dt}.$$



Figuur 4. De laser-Doppler anemometer. Verklaring: 1 HeNe-laser; 2 bevestigingsverloopstuk; 3 bundeldeler; 4 bundelverplaatser; 5 detectie-optiek; 6 lenshouder; 7 projectie-objectief; 8 houder; 9 interferentiefilter; 10 fotomultiplier; 11 optische tafel.

Uit  $x = V \cdot t$  volgt dan dat:

$$\frac{du}{dt} = V \cdot \frac{du}{dx} = V \cdot \epsilon_x \quad (1)$$

Deze formule geeft de relatie tussen de gemeten snelheid  $V$  en de berekende rek  $\epsilon_x$ .

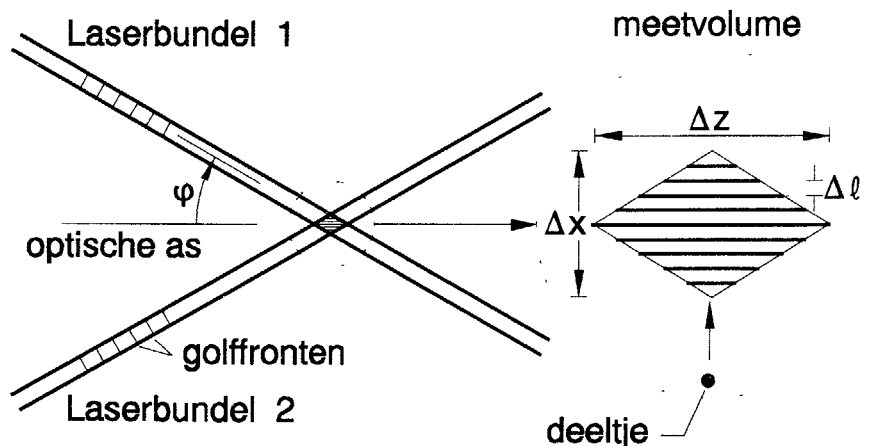
In het volgende hoofdstuk zal de theorie van de laser-Doppler meettechniek behandeld worden. Vervolgens wordt duidelijk gemaakt hoe het mogelijk is gemaakt deze techniek voor het onderzoek toe te passen.

#### Theorie van de laser-Doppler anemometrie

De term laser-Doppler anemometrie

(afgekort LDA) betekent, vrij vertaald: Meten van snelheden door gebruik te maken van het Doppler-effect van een bewegend deeltje (of een aantal deeltjes). We kennen het Doppler-effect voornamelijk bij geluidsgolven. Het fenomeen is dat, wanneer een bepaald object beweegt ten opzichte van een frequentiebron, door het object een andere frequentie wordt waargenomen dan door de bron wordt uitgezonden. Uiteraard treedt dit effect ook op bij (elektromagnetische) lichtgolven.

Het principe van de LDA laat zich het gemakkelijkst begrijpbaar uitwerken aan de hand van het zogenaamde in-



Figuur 5. De snijdende laserbundels en het meetvolume.

terferentiemodel. In figuur 4 is een schema gegeven van de laser-Doppler anemometer.

Figuur 5 toont twee elkaar snijdende laserbundels. Zij snijden elkaar onder een hoek  $\Phi = 2\phi$ . Het snijpunt van de laserbundels wordt het meetvolume genoemd. Door deze coherentie ontstaat een interferentiepatroon. De interferentielijnen (fringes) hebben een onderlinge afstand  $\Delta\ell$ , die berekend kan worden (Durst, 1981, [6]), indien de golflengte van het laserlicht bekend is (golflengte HeNe laser  $\lambda_0 = 632,8$  nm):

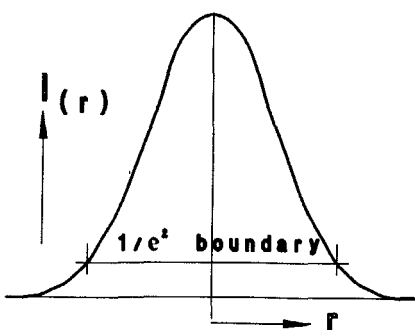
$$\Delta\ell = \frac{\lambda_0}{2} \sin^{-1} \left( \frac{\Phi}{2} \right) \quad (2)$$

Indien nu een deeltje met de snelheid  $v$  door dit interferentiepatroon beweegt zal het licht met een bepaalde frequentie verstoord worden. Deze Doppler-frequentie is gegeven door:

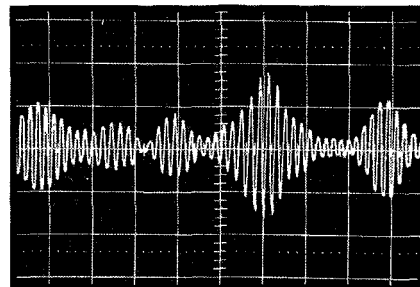
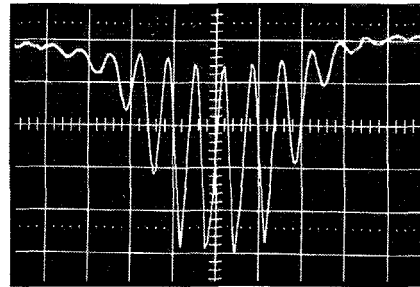
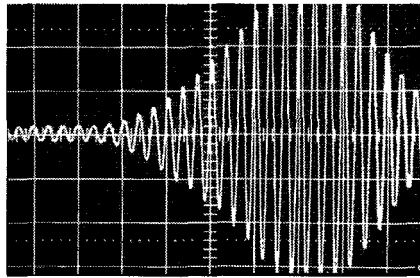
$$f_D = \frac{v}{\Delta\ell} = \frac{2v}{\lambda_0} \sin \left( \frac{\Phi}{2} \right) \quad (3)$$

Indien dus de frequentie van het teruggekaatste licht gemeten kan worden, kunnen we met (3) de snelheid van het deeltje bepalen.

De voorstelling van het meetvolume door een ruit en de interferentielijnen als rechte lijnen is fictief. In werkelijkheid (driedimensionaal) is het meetvolume een ellipsoïde en zijn de interferentievlakken gekromd en wel zodanig dat de vlakken aan de uiteinden dichter bij elkaar liggen (Durst, 1981). Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de laserbundels in werkelijkheid niet recht zijn, maar gekromd. De kleinste diameter van de laserbundels, de waist, moet in het meetvolume vallen, omdat de golfvronten van



Figuur 6. Een laserbundel met een Gaussische intensiteitsverdeling.



Figuur 7. (a) Het Dopplersignaal van de fotodetector, (b) na het hoogdoorlaatfilter en (c) een 'multi-particle' signaal.

de laserbundels daar vlak zijn.

De intensiteit van de laserbundel is niet uniform verdeeld als functie van de straal, maar Gaussisch; zie figuur 6. Als gevolg hiervan zal de intensiteitsverdeling van de interferentielijnen in het meetvolume ook Gaussisch zijn. Indien nu het gereflecteerde licht van een deeltje wordt opgevangen door een fotodetector, zien we het signaal gegeven in figuur 7a. Dit signaal wordt gefilterd door een hoogdoorlaatfilter en wat we dan overhouden is de zogenaamde Doppler-burst; zie figuur 7b.

De frequentie van dit signaal is de Doppler-frequentie, die gerelateerd is aan de snelheid van het deeltje en is het inputsignaal voor de signaalverwerking. De kwaliteit van het Doppler-signaal is afhankelijk van de grootte en de concentratie van de reflecterende deeltjes:

– De grootte van de reflecterende deeltjes.

De signaalkwaliteit is het beste in-

dien de diameter van de deeltjes kleiner dan of gelijk is aan de afstand tussen de interferentielijnen, maar nog wel groot genoeg om voldoende licht te kunnen reflecteren. In de praktijk zullen de deeltjes echter van verschillende grootte zijn. Het resulterend signaal zal daardoor een combinatie zijn van signalen met hoge en lage signaalverhouding. Het signaalverwerkingssysteem is zodanig opgebouwd dat alleen 'goede' signalen verwerkt worden.

– De concentratie van deeltjes.

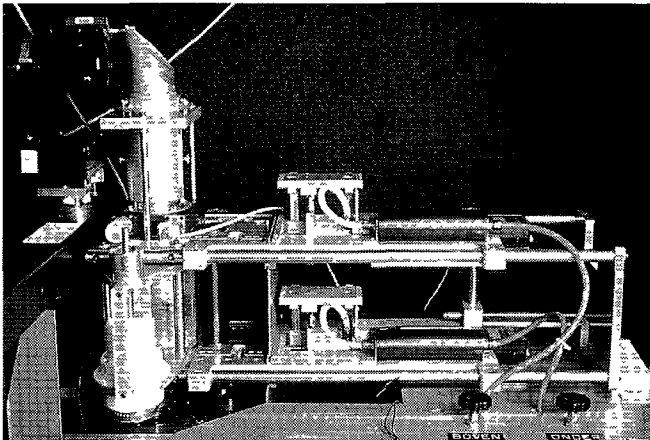
Indien de concentratie te hoog is zal de signaalkwaliteit slecht zijn. Immers, wanneer zich twee deeltjes in het meetvolume bevinden die uit fase zijn, zal hun resterende signaal een lagere modulatie diepte hebben dan het signaal van ieder deeltje apart. In de praktijk worden echter vele snelheidsmetingen op één punt gedaan. Het gemiddelde is dan de uiteindelijke snelheid. Indien de concentratie van de deeltjes te laag is zal een dergelijke meting lang gaan duren.

Indien er meer deeltjes tegelijk in het meetvolume aanwezig zijn, krijgen we een zogenaamd multi-particle Doppler-signaal, gegeven in figuur 7c.

**De meetopstelling;** zie figuur 8

Het principe van de meetmethode is als volgt ontwikkeld. De metalen cilinders, doorgaans vervaardigd uit stalen buis of massief staaf, zijn vervangen door een holle glazen cilinder en een zwart geanodiseerde aluminiumcilinder, beide voorzien van een transparante rubberlaag.

Op de rubberlaag van de glazen wals zijn kleine deeltjes aangebracht (Iridine Feinsatn van de firma Merck), die sterk reflecteren en goed plakken aan de ondergrond. De laser-Doppler anemometer "kijkt" via spiegels naar de binnenkant van de glazen wals, "ziet" de rubberlaag en reageert wanneer een dergelijk deeltje door het meetvolume beweegt. Door met de zwart geanodiseerde (druk)wals tegen de glazen wals te drukken is het mogelijk bepaalde kneepdrukken en koppels te genereren. De drukwals is gematteerd met een laagje grafiet (Aqua-

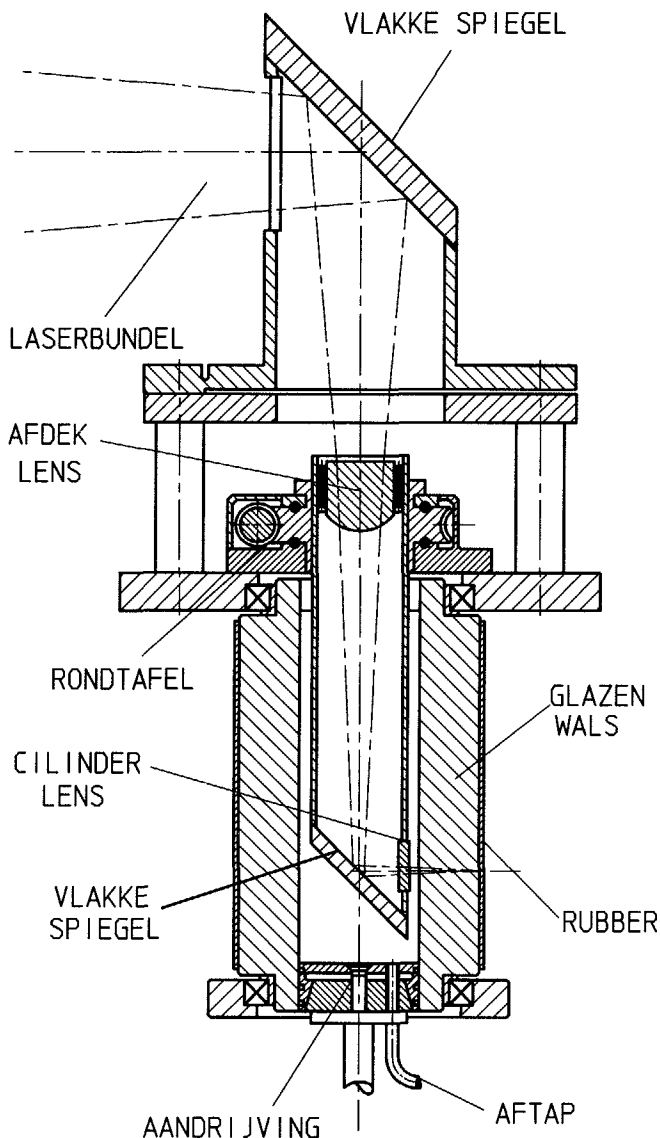


Figuur 8. De totale proefopstelling.

dak Colloid Graphite), om reflecties te voorkomen als gevolg van zijn oorspronkelijk glimmende zwarte oppervlak. Deze reflecties treden het sterkst op indien één van de laserbun-

dels loodrecht op dit glimmende oppervlak valt, waardoor zogenaamde multiple-fringes ontstaan.

Dit eenvoudige principe is omgezet in een meetopstelling, die te verdelen is



Figuur 9. Het "optische-wals" systeem.

OLIE-VULLING NIET GETEKEND

in vier elementen, ieder met een eigen functie:

- o de laser-Doppler anemometer,
  - o het "optische-wals" systeem,
  - o het drukkkrachtsysteem, en
  - o het koppel-, meet- en regelsysteem.
- De laser-Doppler anemometer is reeds eerder behandeld; de andere drie elementen worden hierna beschreven

#### Het "optische-wals" systeem; zie figuur 9

De twee bundels die van de laser-Doppler anemometer afkomen moeten nu precies in de transparante rubberlaag hun snijpunt hebben. Het optische-wals systeem is daartoe opgebouwd uit een spiegelsysteem met een kijktubus en de optische holle wals.

Het spiegelsysteem is uitgevoerd als een periscoop. De bundels van de laser-Doppler anemometer komen horizontaal binnen. Een grote, optische, ellipsvormige vlakke spiegel is onder 45 graden geplaatst. De bundels worden daardoor vertikaal naar beneden gebogen waar een kleinere, optische, ellipsvormige vlakke spiegel onder 45 graden geplaatst is, die de bundel weer horizontaal projecteert. De eisen die aan deze spiegels gesteld worden zijn zeer hoog. De vlakheid ervan is beter dan  $1/12$  van de golflengte van de laser. Deze hoge eis is om een aantal redenen noodzakelijk, waarvan een van de belangrijkste is dat geen vormenrichtingsverandering mag optreden van de bundels die van de laser-Doppler anemometer komen. Een andere belangrijke is dat de camera die in de laser-Doppler anemometer is ingebouwd, geen vervormd beeld mag zien. Dit zou leiden tot verschillen in frequenties van de interferentielijnen die in het meetvolume ontstaan.

Door de afstand tussen de beide spiegels te veranderen kan de buitenmantel van het rubber overal waargenomen worden.

De afgesloten kijktubus is geheel gevuld met immersie-olie om een aantal redenen. Op de eerste plaats wordt de convergentie van de twee bundels minder, waardoor de weglengte die mogelijk is, groter wordt. Een andere reden is dat het aantal glas-lucht overgangen wordt gemit-

## Toepassing van laser-Doppler anemometrie in knepen

maliseerd. Een derde reden is dat een open immersie-oliebad altijd een trillend oppervlak zal hebben, hetgeen de bundels en beelden dermate sterk zou vervormen, dat van betrouwbare metingen in de verste zin van het woord geen sprake meer kan zijn. Om deze reden is de kijktubus aan de bovenzijde voorzien van een venster, de afdeklens, dat de tubus afsluit. Dit venster is een sterke plan-convexe (platbolle) lens waarvan de vlakke zijde ook hier een zeer hoge vlakheid heeft van beter dan  $1/12$  golflengte. De bolle zijde zit in het immersie-oliebad. Tijdens het vullen van de kijktubus met immersie-olie ontstaan luchtbelletjes, die zeer gemakkelijk naar boven komen. Bij een vlak venster krijgt een luchtbel geen impuls om onder het venster vandaan te komen. Door de sterke bolvorm van lens bewegen de luchtbelletjes zich nu langs het glasoppervlak naar boven. Aan de onderzijde is de kijktubus afgesloten met een plan-convexe cilinderlens, die een kromtestraal heeft gelijk aan radius van de kijktubus.

De optische holle wals is vervaardigd van hoogwaardig optisch glas (BK-7 grade A). Deze kwaliteit van het glas is nodig om vervormingen van bundels en beelden te voorkomen. In gewoon vensterglas bijvoorbeeld komen schlieren voor. Dit zijn verschillen in brekingsindices in het glas. Doordat de wals ronddraait zouden deze schlieren zich door de bundels bewegen met als gevolg dat de bundels van richting veranderen.

De wals is voorzien van astappen voor het kunnen opnemen van een lager. De concentriciteiten en coaxialiteiten van de astappen, de binnen- en buitendiameter moeten zeer hoog zijn, wat nog extra werd bemoeilijkt doordat de lagers via een teflonbus op de astappen dragen. Bereikt is beter dan 0,02 mm. Deze hoge nauwkeurigheid is nodig om te voorkomen dat er snelheidsverschillen ontstaan aan het oppervlak van de wals en dat de kracht die van buitenaf aangebracht wordt gaat variëren.

De binnen- en buitendiameter van de optische wals zijn met zeer hoge vormnauwkeurigheid en oppervlaktegesteldheid uitgepolijst. De rondheid

ervan aan de buitenzijde is beter dan 0,001 mm, terwijl de "scratch and dig" overeenkomt met 40/20. Dit wil zeggen dat de krasjes, die op het oppervlak mogen zitten niet langer mogen zijn dan 40  $\mu\text{m}$  en niet dieper dan 20  $\mu\text{m}$ . De wals wordt voorzien van een daarvoor speciaal ontwikkelde optische transparante rubber. Rubber hecht echter niet aan glas zodat er ook weer een speciaal optisch transparant hechtmiddel ontwikkeld moest worden. Dit zijn allemaal eigen recepturen van Océ. Het speciale rubber wordt in speciale matrijzen aangebracht, waarbij de glazen wals dan als kernstuk dient.

Door deze wijze van het aanbrengen van het rubber is een hoge centriciteit wel mogelijk, maar perfect is het nooit. De rubberlaag kan dus dikker en dunner zijn, zij het slechts enkele hondersten millimeters.

Deze dikteverschillen beïnvloeden echter weer het elastisch gedrag van de rubberlaag. Daar waar de rubberlaag dikker is, zal deze bij eenzelfde kracht verder ingedrukt worden, dan op een plaats waar hij dunner is. Nadat een wals voorzien is van een laag is het echter niet meer mogelijk de dikte op een non-destructieve wijze te bepalen. Variaties in dikte geven een variatie van de neutrale lijn van de rubberlaag. Om nauwkeurig te kunnen meten is het nodig de tengevolge van de rotatie optredende periodieke variaties exact op elkaar te kunnen leggen. Niet alleen in relatie tot de omtrek van de wals, maar ook in relatie tot de wisselende plek waar de laser-Doppler anemometer "kijkt". Door een groot aantal metingen op elkaar te leggen wordt elke positie gemiddeld en is het mogelijk ruis eruit te filteren. Het mechanisme dat gebruikt is om metingen op elkaar te leggen is heel eenvoudig. De optische wals drijft door middel van een tandriemoverbrenging met een verhoogde nauwkeurigheid een pulsenschijf aan die 18000 pulsen per omwenteling geeft (resolutie 0,2 graad). Experimenteel wordt bepaald waar de nulpuls van deze pulsenschijf zit ten opzichte van de wals. Bij het verdraaien van de waarneemperscoop (zie het hoofdstuk "Resultaten") verandert echter de plaats van het waar-

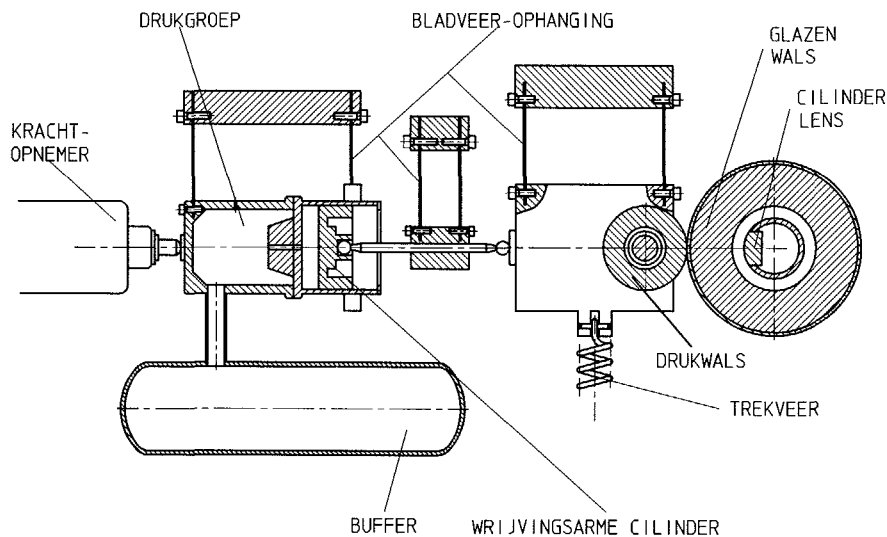
neemveld in de kneep. Natuurlijk is het rekenkundig mogelijk te bepalen wanneer de nulpuls weer exact door het meetvolume gaat. Om dit te lastige rekenwerk te besparen is een staalbandoverbrenging van precies 1:1 tussen de waarneemperscoop en het huis van de pulsenschijf aangebracht, die het huis exact hetzelfde verdraait als de waarneemtubus. Dus de nulpuls geeft dan precies aan welk deel van de optische wals zich op dat moment in het meetvolume bevindt. Op deze manier wordt de meetnauwkeurigheid zonder veel rekenwerk sterk verhoogd.

### Het drukkrachtsysteem; zie figuur 10

Het doel van de opstelling is het elastische vervormingsgedrag van een kneep te meten en te bepalen welke mechanismen daarbij werkzaam zijn.

De kneep ontstaat doordat twee walsen met een bepaalde kracht tegen elkaar gedrukt worden. De mate waarin het rubber vervormt is afhankelijk van de kracht. In de meetopstelling moet het dus mogelijk zijn verschillende krachten aan te brengen. Nu zijn er diverse methoden om de beide walsen tegen elkaar te drukken. De walsen dienen echter ook op hun plaats te blijven en de kracht moet onafhankelijk van de indrukking even groot blijven. Door onrondheid van de walsen gaan deze op en neer, wat ook gebeurt als er een velletje papier tussen de beide walsen wordt doorgevoerd. Deze veranderingen in de hartafstand tussen de beide walsen mag geen invloed hebben op de grootte van de aangebrachte kracht. Daarbij komt ook nog dat er geen hystereses mogen optreden. De hoofdoorzaak van een hysteresis is wrijving. Door de hysteresis ontstaat bij de meting een gebied (ruis) waardoor niet exact bekend is wat de optredende kracht is. Kleine krachtvariëaties met hoge frequentie kunnen dan ondergaan in deze ruis. De ruis is door veelvuldig meten wel te reduceren, maar in principe blijft er altijd een meetfout bestaan.

Om al deze redenen is extra aandacht besteed aan het systeem dat de kracht aanbrengt. De maximale kracht waarmee een kneep samengedrukt wordt in ongeveer 3N per millimeter kneep-



Figuur 10. Het drukkrachtsysteem.

lengte. De lengte van de optische wals is 150 mm, zodat de totale kracht neerkomt op circa 450 N.

Veel constructies hebben allerlei onvoorspelbare en daardoor ontoelaatbare eigenschappen. Vandaar dat een oplossing is gekozen waarbij de optredende wrijvingen minimaal zijn.

De drukwals is opgehangen in een houder die gelagerd is in bladverscharnieren. De zuiger van een wrijvingsarme luchtcilinder drukt nu de zwarte drukwals tegen de optische, met rubber beklede, glazen wals. Deze wrijvingsarme luchtcilinder is vervaardigd uit glas met een zuiger van gegraafte kunststof. De wrijvingskracht die optreedt in minder dan 0,01 N. De reactiekracht wordt opgenomen door een krachtopnemer.

Een luchtcilinder is echter ook een veer, waardoor eventuele onregelmatigheden toch weer zouden leiden tot krachtveranderingen. Daarbij komt ook nog dat de lucht door een reduceerventiel wordt toegevoerd. Een standaard reduceerventiel heeft ook weer een hysteresis die snel in de buurt van 0,1 bar komt, wat bij een zuigerdiameter van 40 mm al een krachtvariatie geeft van 12 N per bar druk. Om deze reden is gekozen voor een precisie-reduceerventiel (niet getekend) dat een hysteresis heeft van slechts 1 mbar. Om elk compressie-effect te voorkomen is tussen de luchtcilinder en het regelventiel een buffer aangebracht met een klein lek.

Het is onmogelijk de luchtcilinder zonder neveneffecten aan de krachtopnemer te bevestigen. Om deze tot een minimum te beperken, is de luchtcilinder opgehangen in een juk dat door middel van bladveren als parallelscharnier aan een tussenfreem is bevestigd. De druklichamen, die de kracht naar de walshouder via de drukgroep naar de krachtopnemer doorgeven, zijn voorzien van bolvormen die tegen glazen drukstukken werken. Door de manier van ophangen zijn er geen dwarsverplaatsingen mogelijk. De krachtvariaties die nog optreden zijn in de orde van 3 tot 6 N bij een kracht van ca. 300 N.

#### Het koppel-, meet- en regelsysteem

In een kopieerapparaat werkt niet alleen de kracht waarmee de walsen op elkaar gedrukt worden. Er wordt ook een koppel overgebracht. In een werkelijk kopieerapparaat ontstaat dit koppel door de kracht die nodig is om de geleidende band gedurende de beeldoverdracht aan te drijven. Dit koppel geeft aan de kneep een vormverandering, waardoor mogelijk een beeldvorming optreedt. Ook dit wordt in de meetopstelling gesimuleerd.

De walsen worden ieder door een gelijkstroommotor aangedreven. De ene motor wordt op snelheid geregeld en de andere op koppel. De regelcyclus dient zeer snel te zijn en de snelheidsvariaties zo gering mogelijk. Het snel-

le regelgedrag wordt bereikt door gelijkstroommotoren te gebruiken met een ijzerloze rotor, ook wel klokankermotoren genoemd. De regelfrequentie waar de motor nog op reageert is ca. 30 Hz. De snelheidsvariaties die optreden zijn zeer gering door gebruik te maken van nauwkeurige planeetwieloverbrengingen. Een nog hogere loopnauwkeurigheid kan bereikt worden met wrijvingsoverbrengingen. De combinatie van snelheid- en krachtgestuurde motoren geeft vaak complicaties. De snelheid die een gelijkstroommotor krijgt is rechtstreeks afhankelijk van de spanning die over de motor staat. Het koppel daarentegen is rechtstreeks afhankelijk van de stroom die door de motor gaat. Dat betekent dus dat de wals die de snelheid bepaalt een spanninggestuurde motor is, terwijl de motor die het koppel bepaalt een stroomgestuurde motor is.

In de meetopstelling wordt de optische wals aangedreven door de stroomgestuurde motor en de drukwals door de snelheidgestuurde. De reden hiervoor is duidelijk. Zou de optische wals door de snelheidgestuurde motor aangedreven worden, dan zouden ten gevolge van de indrukking van het rubber snelheidsvariaties ontstaan. De metalen drukwals heeft daar geen last van. Wel treden er, ook weer ten gevolge van de indrukking van het rubber, kleine koppelvariaties op, die echter verwaarloosbaar klein zijn.

Ofschoon de stroom die door een motor gaat, samen met de spanning die erover staat, een maat is voor het koppel, is dit niet voldoende nauwkeurig. Vooral thermische en inloop-effecten in de tandwieloverbrenging zijn moeilijk voorspelbaar. Dit is dus te onnauwkeurig om betrouwbare waarden te krijgen. Het koppel dat door de gelijkstroommotor aan de drukwals wordt toegevoerd, wordt daarom gemeten met behulp van een koppelmeter. Deze koppelmeter zit via een Schmidt-koppeling direct gekoppeld aan de wals. Gekozen is voor een Schmidt-koppeling omdat deze koppelingen zeer stijf zijn en bij verschillende asafstanden geen extra rotatie introduceren.

Bij de optische wals is om de volgende reden eveneens een koppelmeter

## Toepassing van laser-Doppler anemometrie in knepen

tussen de wals en de motor aangebracht. Als de neutrale diameters van de drukwals en de optische wals exact gelijk zijn, dan wijzen beide koppelometers hetzelfde koppel aan indien er geen energie verloren zou gaan in de kneep. In de kneep is echter vervormingsvermogen nodig. De diameterverschillen zijn bekend, zodat, door de beide koppels te verrekenen met de diameters, bekend is wat het vervormingsvermogen is. De enige onnauwkeurigheid die hierin optreedt is de wrijving van de lagers van de walsen en van de Schmidt-koppeling (deze bevat naaldlagers).

## Resultaten

De numerieke gegevens van de laser-Doppler anemometer zijn als volgt:

brandpunt lens:	$f_L$	=	349,8 mm
diameter laserbundel:	$d$	=	1,1 mm
golflengte HeNe laser:	$\lambda_0$	=	632,8 nm
afstand van de laserbundels vóór de convexe lens:	$\delta$	=	50,0 mm
brekingsindex lucht-olie:	$n_G$	=	1,52
lucht-rubber:	$n_R$	=	1,40
factor bundelverbreder:	$B$	=	2,27

De gegevens die hiervan afgeleid kunnen worden zijn:

$$\text{diameter waist: } d_w = \frac{4f_L \lambda_0}{\pi B d} \quad d_w = 0,113 \text{ mm}$$

afmetingen van het meetvolume:

$$\begin{aligned} d_x &= d_w / \cos(\varphi) & d_x &= 0,113 \text{ mm} \\ d_y &= d_w & d_y &= 0,113 \text{ mm} \\ d_z &= d_w / \sin(\varphi) & d_z &= 2,222 \text{ mm} \end{aligned}$$

afstand interferentielijnen (vergelijking (1)):  $\Delta\ell = 4,4\mu\text{m}$

$$\text{aantal interferentielijnen. } N_f = \frac{d_x}{\Delta\ell} = 25$$

$$\begin{aligned} \text{aantal cycles per Doppler-burst: } N_{\text{CPB}} &= 16 \\ \text{halve hoek tussen laserbundels in lucht: } \varphi_L &= 4,09^\circ \\ \text{halve hoek tussen laserbundels in glas: } \varphi_G &= 2,69^\circ \\ \text{halve hoek tussen laserbundels in rubber: } \varphi_R &= 2,92^\circ \end{aligned}$$

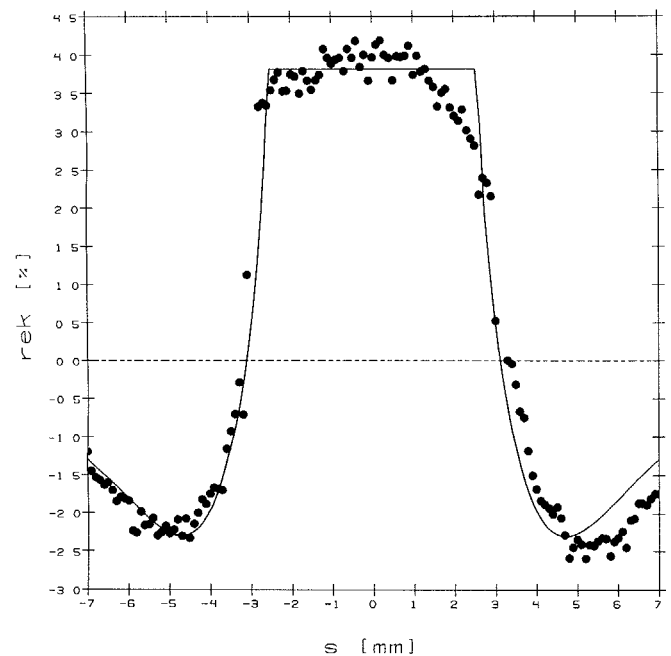
De gegevens van het mechanische gedeelte zijn:

straal glazen wals:	$R_1$	=	50,0 mm
straal zwarte (druk)wals:	$R_2$	=	25,0 mm
dikte rubberlaag:	$D_1$	=	2,0 mm
lengte van de walsen:	$L$	=	150,0 mm
elasticiteitsmodulus rubber:	$E$	=	0,91 N/mm <sup>2</sup>
Poissongetal:	$\nu$	=	0,49
omtrekssnelheid:	$V$	=	60,0 mm/s

metingnr.	$F_N$	$F_T$
1	0,74	0
2	1,50	0
3	1,50	0,05
4	1,50	0,15
5	1,50	0,30

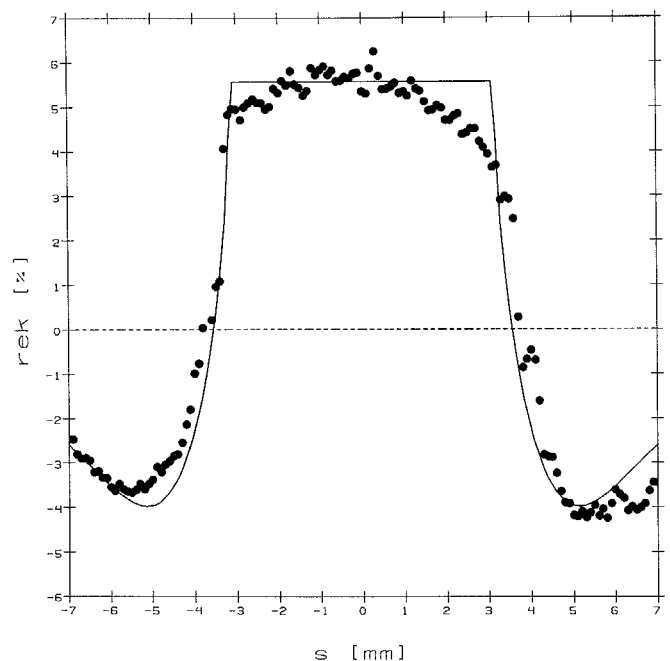
Tabel 1. Normaal- en tangentele krachten [N/mm] tijdens de metingen.

$$\begin{aligned} F_N &= 0,74 \text{ N/mm} \\ F_T &= 0,00 \text{ N/mm} \end{aligned}$$



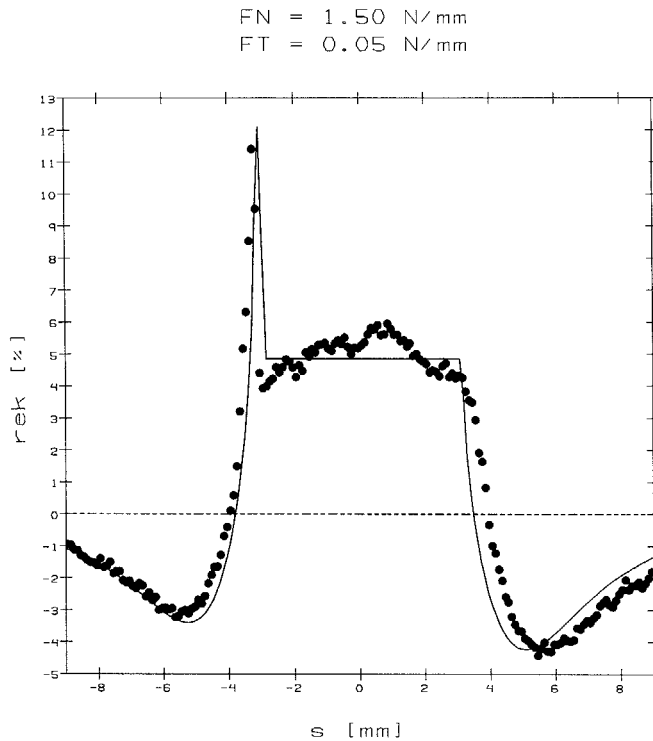
Figuur 11A.

$$\begin{aligned} F_N &= 1,50 \text{ N/mm} \\ F_T &= 0,00 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

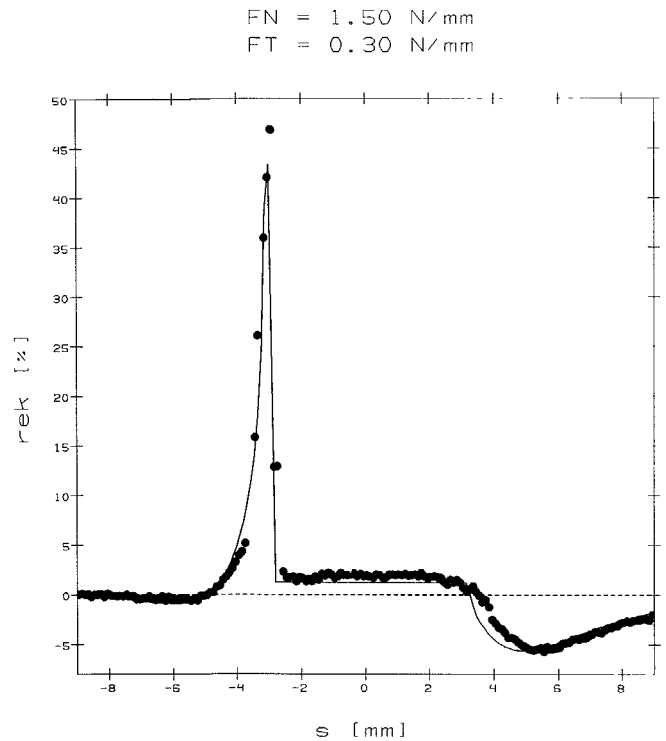


Figuur 11B.

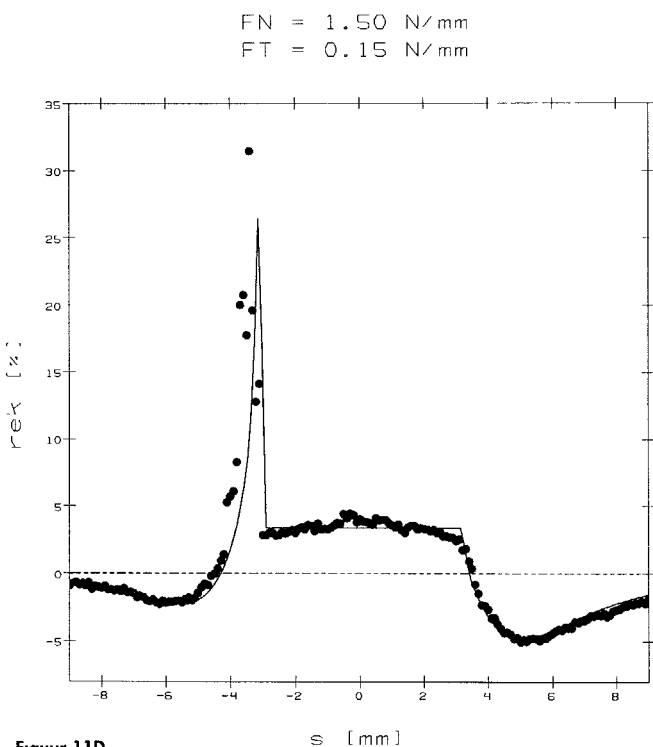
Figuur 11. Meetresultaten van het rekprofiel bij variabele normaalkracht en tangentele kracht.



Figuur 11C.



Figuur 11E.



Figuur 11D.

Met deze instellingen worden vijf snelheidsprofielen of rekprofielen gemeten. Hierbij worden de normaalkracht en tangentiële kracht gevarieerd volgens tabel 1. De dimensie van  $F_N$  en  $F_T$  in de tabel is N/mm, omdat de kracht per millimeter walslengte wordt opgenomen

(de analyse is tweedimensionaal). Het meetvolume wordt tangenciaal over de rubberen buitenmantel van de optische wals verdraaid van  $\alpha = -10,0$  graden naar  $+10,0$  graden in stappen van  $0,1$  graad (201 meetpunten). Per meetpunt wordt 512 keer de snelheid gemeten en in een histogram uitgezet, waaruit de gemiddelde snelheid wordt bepaald in dat punt. De resultaten zijn gegeven in figuren 11A tot en met 11E.

In deze figuren is de lokale snelheid uitgezet als functie van de coördinaat  $s$  ( $y$ -richting) langs het oppervlak. Dit is dan tevens de rek  $\epsilon_x$  in procenten, vanwege de relatie tussen snelheid en rek die in het hoofdstuk "waarom laser-Doppler anemometrie" is aangetoond. De rek  $\epsilon_x$  geeft de procentuele afwijking van de lokale snelheid ten opzichte van de omtreksnelheid (= snelheid van het onvervormde rubber). Het relatieve verschil tussen deze snelheden wordt ook wel kruip genoemd. In de figuren geeft de getrokken lijn het resultaat van de theoretische berekeningen en de lijn met bolletjes het resultaat van de metingen weer. De snelheden zijn gecorrigeerd voor de hoekverdraaiing  $\alpha$  omdat door deze verdraaiing de orientatie van de interferentielijnen over eenzelfde hoek  $\alpha$  verandert. Hierdoor wordt niet de werkelijke deeltjessnelheid  $v$  gemeten, maar  $v \cos(\alpha)$ . De meetwaarden zijn dus eerst gedeeld door  $\cos(\alpha)$ . De rechterkant van de figuren is de plaats waar de deeltjes het contactgebied naderen en dus afgeremd worden. In het contactgebied (horizontale rechte stuk van de theoretische berekeningen) is de snelheid groter dan de omtreksnelheid. Dit is een gevolg van het feit dat het rubber ingedrukt wordt en bij benadering geen volumeverandering kan ondergaan ( $\nu = 0,49$ ). De rek in de transvertriching is dus positief. Na de kneep relaxeert het rubber weer.



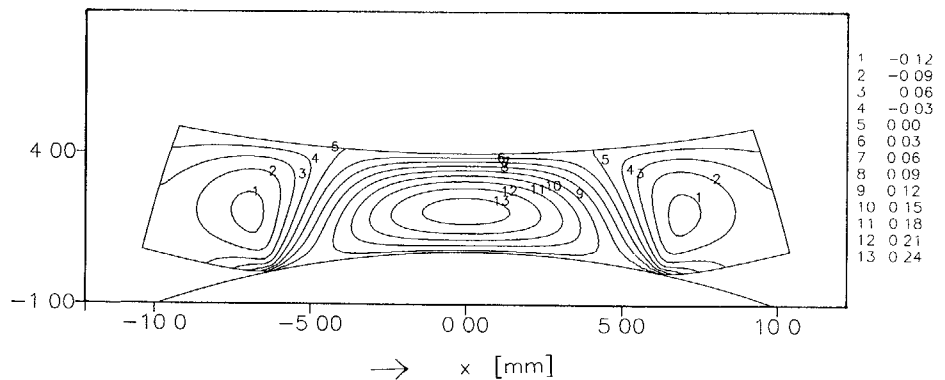
## Toepassing van laser-Doppler anemometrie in knepen

Indien geen tangentiële kracht wordt uitgeoefend, is het rekprofiel symmetrisch; zie de figuren 11A en 11B. In het geval dat de tangentiële kracht ongelijk aan nul is ontstaat een gebied waar de snelheid omhoog schiet. De tangentiële kracht is zodanig gericht dat de optische wals afgeremd wordt. Het rubber op de optische wals heeft een relatieve snelheid ten opzichte van de zwarte drukwals: er ontstaat een slipgebied. Naarmate de tangentiële kracht groter wordt, wordt het slipgebied groter. De grootte van het contactgebied en van het slipgebied die volgen uit de theoretische berekeningen, zijn gegeven in tabel 2. Deze gegevens zijn ook uit de metingen te halen, zij het niet zo nauwkeurig. Twee punten verdienen nog de aandacht:

- De metingen vertonen geen horizontaal recht stuk. De berekeningen doen dit wel. Dit is grotendeels te verklaren uit het feit dat niet alleen aan de oppervlakte, maar ook in het inwendige van het rubber deeltjes door het meetvolume gaan. In radiale richting immers is de afmeting van het meetvolume ruim 2 mm. Deze deeltjes kunnen verontreinigingen of luchtbelletjes zijn. In figuur 12 is te zien dat de rek in het midden van de laag groter is dan in het contactgebied. Buiten de zone van het contactgebied wordt de rek kleiner. Er wordt dus eigenlijk een gewogen snelheid in radiale richting gemeten.
- In de figuren 11A en 11B is duidelijk te zien dat het minimum aan de rechterkant lager ligt dan aan de linkerkant. Dit wordt veroorzaakt door viscoëlastische eigenschappen van het rubber.

nr.	contactgebied [mm]	slipgebied [mm]	kruip [%]
1	4,8	0,0	3,8
2	6,1	0,0	5,6
3	6,0	0,024	4,9
4	5,9	0,081	3,4
5	5,7	0,155	1,2

Tabel 2. Resultaten van de theoretische berekeningen voor enkelvoudige grootheden.



Figuur 12. De rekverdeling over de gehele rubberlaag in de kneep. De bovenkant van de profiellijnfiguur is de radius van de optische wals en de onderkant die van de zwarte drukwals. Rechts van het kader is de rek in mm gegeven.

## Conclusies

Gezien de resultaten mag geconcludeerd worden dat de LDA-methode zoals zij hier is toegepast een uitstekende methode is om lokaal rubbersnelheden te meten in knepen. Met name de metingen van de slipgebieden vereisen een hoge nauwkeurigheid en daaraan wordt geheel voldaan. Tevens is aangetoond dat het theoretische model, gebaseerd op de lineaire elasticiteitstheorie en de invloedsfuncties voor gelaagd viscoëlastisch rubber, een goed bruikbare benadering van de realiteit is. In de slipgebieden, waar de rek kan oplopen tot 40%, is de lineaire elasticiteitstheorie toepasbaar, hetgeen men op grond van de grote vervorming niet zou verwachten.

In de toekomst zal een configuratie met meer lagen op één wals bestudeerd worden. Ook hiervoor is het programma MULTILAYER geschikt. Meten midden in de laag vereist een kleiner meetvolume in radiale richting. Door een bundelverbreder met factor 8,5 te nemen worden de afmetingen van het meetvolume ruwweg met een factor 4 verkleind, wat met name voor configuraties met meer lagen interessant is. Er kan dan gemeten worden op een overgang tussen twee lagen om bijvoorbeeld hechtingsonderzoek te verrichten. Dit zal in de toekomst plaatsvinden.

Ondanks dat er in de literatuur zeer weinig geschreven is over meetopstellingen voor het meten van rubbervervormingen in een kneep, is een

meetopstelling goed realiseerbaar gebleken. uit de grote nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid van de metingen blijkt dat een betrouwbare meetopstelling is gerealiseerd met op zich een eenvoudige opbouw. Natuurlijk zijn enkele nauwkeurige optische en mechanische onderdelen nodig. Aan elektronica zijde is de nodige aandacht gegeven aan het verkrijgen van een goed regelgedrag van de motoren om een zo constant mogelijk koppel in de kneep aan te kunnen brengen. Natuurlijk is dit onmogelijk zonder gebruik te maken van moderne sensoren, koppelmeters en positie-encoders.

## Literatuur

- [1] H. Hertz, (1882), Über die Berührung fester elastischer Körper; Journal für reine und angewandte Mathematik. 92, pp 156-171
- [2] K.L. Johnson, (1985), Contact mechanics, Cambridge University Press, Cambridge U.K.
- [3] J.J. Kalker, (1990), Three dimensional elastic bodies in rolling contact, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- [4] J.J. Kalker, (1991), Viscoelastic multilayered cylinders rolling with dry friction, Journal of Applied Mechanics, 58, pp 666-679
- [5] G.F.M. Blaat, J.J. Kalker, (1990), Deformations of viscoelastic layered rubber coated on two stationary rolling cylinders, Integration of Theory and Applications in Applied Mechanics, Edited by J.F. Dijkstra and F.T.M. Nieuwstadt, pp 103-111, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- [6] F. Durst, A. Melling, J.H. Whitelaw, (1981), Principles and practice of laser-Doppler anemometry, Academic Press, London

## Auteursnoot

Ir. G.F.M. Braat en H.G.J. Rutten zijn werkzaam bij Océ Nederland B.V., Afdeling R & D, Postbus 101, 5900 MA Venlo, Nederland