

**Practicum handleiding
voor de proefopstellingen
Stromingsleer**

januari 1999, Ir. J.C. van Muiswinkel

MEAH-184

Technische Universiteit Delft
Faculteit Ontwerpen, Constructie & Productie
Laboratorium voor Aëro- & Hydrodynamica
Rotterdamseweg 145
2628 AL Delft

email: j.c.vanmuiswinkel@wbmt.tudelft.nl

INHOUD:

Verantwoording

Proefopstelling 1: Omslag laminair-turbulent van een pijpstroming

- 1.1 Onderwerp van de proefopstelling
- 1.2 Begrippen en grootheden die bij de proef aan de orde komen
- 1.3 Doel van de proefopstelling
- 1.4 Theorie
- 1.5 De opstelling
- 1.6 De uitvoering van de proef
- 1.7 Vragen
- 1.8 Opdrachten voor het verslag

Proefopstelling 2: Stroming in een conische vernauwing

- 2.1 Onderwerp van de proefopstelling
- 2.2 Begrippen en grootheden die bij de proef aan de orde komen
- 2.3 Doel van de proefopstelling
- 2.4 Theorie
- 2.5 De opstelling
- 2.6 De uitvoering van de proef
- 2.7 Vragen
- 2.8 Opdrachten voor het verslag

Proefopstelling 3: Stroming door een plotselinge verwijding

- 3.1 Onderwerp van de proefopstelling
- 3.2 Begrippen en grootheden die bij de proef aan de orde komen
- 3.3 Doel van de proefopstelling
- 3.4 Theorie
- 3.5 De opstelling
- 3.6 De uitvoering van de proef
- 3.7 Vragen
- 3.8 Opdrachten voor het verslag

Uitwerking proefopstelling 1

Uitwerking proefopstelling 2

Uitwerking proefopstelling 3

Tot slot (enquête)

VERANTWOORDING:

Voor studenten die nog weinig of geen ervaring hebben met meettechnieken in de stromingsleer, zijn bij de vakgroep een drietal proefopstellingen aanwezig waarmee de eerste meetervaring kan worden opgedaan. Voor geïnteresseerden is hieronder een poging gedaan om uiteen te zetten waarom juist deze drie opstellingen zijn gekozen als zijnde het meest geschikt voor een eerste kennismaking met de stromingsleer. Voor het goed uitvoeren van de proeven is lezing van onderstaande uiteenzetting niet noodzakelijk.

Bij “normale” temperatuur en druk kunnen gassen en vloeistoffen worden opgevat als homogene enkelvoudige continua; d.w.z. dat de kleinste volumina die we beschouwen nog altijd zijn samengesteld uit zeer veel moleculen. De toestand van rust wordt bepaald door de scalaire grootheden p , \mathbf{r} en T (druk, dichtheid en temperatuur). Bij een stromend fluïdum komen daar de nog de drie snelheidscomponenten van de lokale snelheidsvector \mathbf{u} bij. Hierbij kan worden opgemerkt dat de meest praktische manier om een stroming te beschrijven die is, waarbij in elk punt, ten opzichte van een vast assenkruis, de plaatselijke waarden van p , \mathbf{r} , T en \mathbf{u} als zgn. veldgrootheden worden vastgelegd. Bij een stationaire stroming zijn deze veldgrootheden onafhankelijk van de tijd, bij een niet stationaire stroming zijn ze tijdsafhankelijk. In het algemene geval van een samendrukbaar medium zijn dus zes vergelijkingen nodig om het stromingsveld te beschrijven; d.w.z. drie scalaire vergelijkingen en een vector vergelijking:

- de continuïteitsvergelijking
- de energievergelijking
- de toestandsvergelijking
- de impulsvergelijking (3 maal)

De continuïteitsvergelijking geeft het behoud van massa weer, de energievergelijking het behoud van de verschillende vormen van energie; voor een niet stromend medium is dit de eerste hoofdwet van de thermodynamica. De impulsvergelijking geeft het behoud van impuls weer; dit is de tweede wet van Newton ($\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$). De toestandsvergelijking kan geformuleerd worden als $f(p, \mathbf{r}, T) = 0$; voor een ideaal gas luidt deze betrekking $p = R \mathbf{r} T$. Bij het opstellen van de vergelijkingen moet rekening worden gehouden met het feit dat in het stromend medium nog merkbare schuifspanningen kunnen optreden, veroorzaakt door de vervorming van het fluïdum. Dit verband, tussen schuifspanning en vervorming, moet dus ook bekend zijn. Bij “normale”, zgn. Newtonse, fluïda zijn de schuifspanningen lineaire functies van de snelheidsgradiënten. Voor een enkelvoudige gelaagde, zgn. Couette stroming, geldt:

$$\mathbf{t} = \mathbf{m} \frac{d\mathbf{u}}{dy}$$

waarin \mathbf{m} de dynamische viscositeit van het fluïdum is; een materiaaleigenschap.

Voor een driedimensionale stroming is de overeenkomstige uitdrukking opgebouwd uit soortgelijke termen maar uiteraard complexer. Het blijkt dat er ook viskeuze normaalspanningen kunnen optreden. Deze zijn in het algemeen te verwaarlozen, omdat de longitudinale snelheidsgradiënten veel kleiner zijn dan de transversale. De meeste gassen en vloeistoffen gedragen zich Newtons; uitzonderingen zijn: colloïdale oplossingen, geconcentreerde oplossingen van macromoleculen, emulsies, een grote groep suspensies en de zgn. “Bingham” vloeistoffen. Deze uitzonderingen blijven hier buiten beschouwing.

In het meest algemene geval van een stromend, samendrukbaar fluïdum, zijn de beschrijvende vergelijkingen zeer gecompliceerd. Dit wordt vooral veroorzaakt door het feit dat de impulsvergelijking niet lineair is, waardoor superpositie van oplossingen niet mogelijk is.

Een zeer sterke vereenvoudiging wordt verkregen wanneer het medium als incompressibel mag worden beschouwd. De toestandsvergelijking luidt dan: $\rho = \text{constant}$ en de eerste hoofdwet van de thermodynamica;

$$dq = de + p d\left(\frac{1}{\rho}\right)$$

wordt dan: $dq = de$; ofwel de toegevoerde warmte is gelijk aan de toename van de inwendige energie. Omdat de dichtheid ρ , in dit geval, onafhankelijk is van temperatuur en druk kunnen de druk p en de snelheid \underline{u} worden bepaald met behulp van de continuïteitsvergelijking en de impulsbalans, waarna de temperatuur met de energievergelijking kan worden bepaald. Het ligt voor de hand dat vloeistoffen als onsamendrukbaar mogen worden beschouwd. Echter ook voor gassen zijn, bij niet te hoge snelheden, de drukverschillen zo klein, dat de corresponderende dichtheidsfluctuaties te verwaarlozen zijn. Uit een eenvoudige berekening blijkt b.v. dat voor lucht, bij een snelheid van 100 [m/s], de fout in de incompressibele berekening van de dynamische druk, $\frac{1}{2}\rho u^2$, van de orde van enkele procenten is. Bij lagere snelheden kan lucht daarom als onsamendrukbaar worden beschouwd.

Beschouwen we nu een deeltje in een incompressibele stationaire stroming. De drukkrachten op dit deeltje maken evenwicht met de versnellingskrachten van de massa en de schuifspanningen ten gevolge van de viscositeit. De convectieve versnellingskrachten worden veroorzaakt doordat het deeltje bij het doorlopen van zijn baan in het algemeen geen constante snelheid heeft. Het karakter van een dergelijke stroming wordt geheel bepaald door de verhouding van de traagheidskrachten en de viskeuze krachten in de stroming. Deze verhouding wordt uitgedrukt in het getal van Reynolds:

$$Re = \frac{\text{inertial forces}}{\text{viscous forces}} = \frac{u^* \cdot \frac{u^*}{l^*}}{\rho \cdot \frac{u^*}{l^{*2}}} = \frac{u^* \cdot l^*}{\rho}$$

Hierin zijn u^* en l^* voor de betreffende configuratie karakteristieke grootheden. Voor een cirkelvormig kanaal b.v. neemt men voor l^* de diameter D van het kanaal en voor u^* de gemiddelde snelheid in de stroming, d.w.z. het volumedebiet gedeeld door het doorsnede oppervlak; bij de stroming om een lichaam neemt men voor u^* in het algemeen de ongestoorde snelheid en voor l^* de lengte of de dwarsafmeting van het voorwerp.

Voor veel technische stromingen geldt dat $Re \gg 1$, d.w.z. dat de traagheidskrachten in de stroming sterk overheersen. Een dergelijke stroming heeft bepaalde karakteristieke eigenschappen waarvan de belangrijkste wel is, dat de invloed van de viskeuze schuifspanning zich beperkt tot een zeer dunne laag langs een vaste wand: de zgn. grenslaag. Hier treedt in een dunne laag een aangroeiing van de snelheid op van nul aan de wand tot de volle waarde van de buitenstroming, met als resultaat grote schuifspanningen. Met een energiebeschouwing kan worden aangetoond dat de mechanische arbeid van de schuifspanningen in de grenslaag uiteindelijk geheel wordt omgezet in warmte. De hoogwaardige mechanische energie, d.w.z. kinetische energie en verplaatsingsarbeid van de drukkrachten, wordt dus gedegradieerd tot warmte-energie. Dit dissipatieproces wordt in het technische spraakgebruik aangeduid met “verliezen”. Een analoge “mengzone” is aanwezig in het grensvlak tussen een vrije straal en zijn omgeving. Bestuderen we een dergelijke grenslaag bij toenemende snelheid, d.w.z. bij toenemend getal van Reynolds, dan glijden aanvankelijk de fluïdum laagjes zonder storing langs elkaar; we noemen dit de laminaire grenslaag. Boven een bepaalde kritieke waarde van Re wordt, afhankelijk van de configuratie, het grenslaag profiel instabiel; dan ontstaat de turbulente grenslaag. Naast de hoofdstroming treden nu willekeurige snelheidsfluctuaties op van de orde van 10 % van de hoofdstroomsnelheid. Hierdoor worden de schuifspanningen zeer veel groter en wordt ook het snelheidsprofiel duidelijk anders dan bij de laminaire grenslaag. Bij technische problemen ligt Re in het algemeen boven de kritieke omslagwaarde, zodat turbulente grenslagen de normale toestand zijn. De omslag van de laminaire - naar de turbulente stromingsvorm is een van de meest fundamentele problemen in de stromingsleer.

Hierboven is uiteengezet dat de stromingstoestand van een, als onsamendrukbaar op te vatten, medium wordt bepaald door de impulsvergelijking en de continuïteitsvergelijking. Voor praktische toepassingen hebben we deze nodig in de integraal vorm. Met gebruikmaking van de massabalans, wordt dan de impulsbalans geïntegreerd. Dit kan doeltreffend op twee manieren gebeuren:

- Door naar het volume te integreren verkrijgen we de integraalvorm van de impulsvergelijking die het impulsevenwicht voorstelt van een eindig volume. Voor een stationaire stroming blijkt het mogelijk om alle volume-integralen te transformeren in oppervlakte-integralen over het begrenzend oppervlak. Het grote praktische belang van deze vorm is duidelijk: het is vaak mogelijk het omsluitende controle-oppervlak zo te kiezen, dat de integrale impulsvergelijking kan worden toegepast, waarmee de stromingstoestand vast ligt. Vanzelfsprekend geeft deze integrale vorm geen details van de stroming binnen het oppervlak maar deze zijn voor de meeste technische toepassingen ook minder belangrijk.
- Integratie van de impulsvergelijking langs een stroomlijn in een wrijvingsloze stroming levert, in het stationaire geval, eveneens een eenvoudig te interpreteren resultaat: het stelt de arbeid voor die wordt verricht op een discreet fluïdumdeeltje en het is doelmatig om voor dit deeltje een eenheid van massa, dan wel een volume-eenheid te kiezen. Zo'n deeltje volgt dan een stroomlijn waarvoor de zgn. wet van Bernoulli geldt, die voor een tweedimensionale stroming, zonder invloed van de zwaartekracht, luidt:

$$p + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) = \text{constant}$$

waarin u en v de snelheidscomponenten in de x - en y richting zijn. Bij een stationaire stroming is, in een bepaald ruimtepunt, de toestand steeds gelijk, d.w.z. dat de wet van Bernoulli ook geïnterpreteerd kan worden als de energietoestand in de verschillende ruimtepunten. Vermenigvuldigen we de termen in de vergelijking van Bernoulli met de lokale snelheid, dan vinden we de mechanische energie stroom door de dwarsdoorsnede van een, door stroomlijnen begrensde, stroombuis.

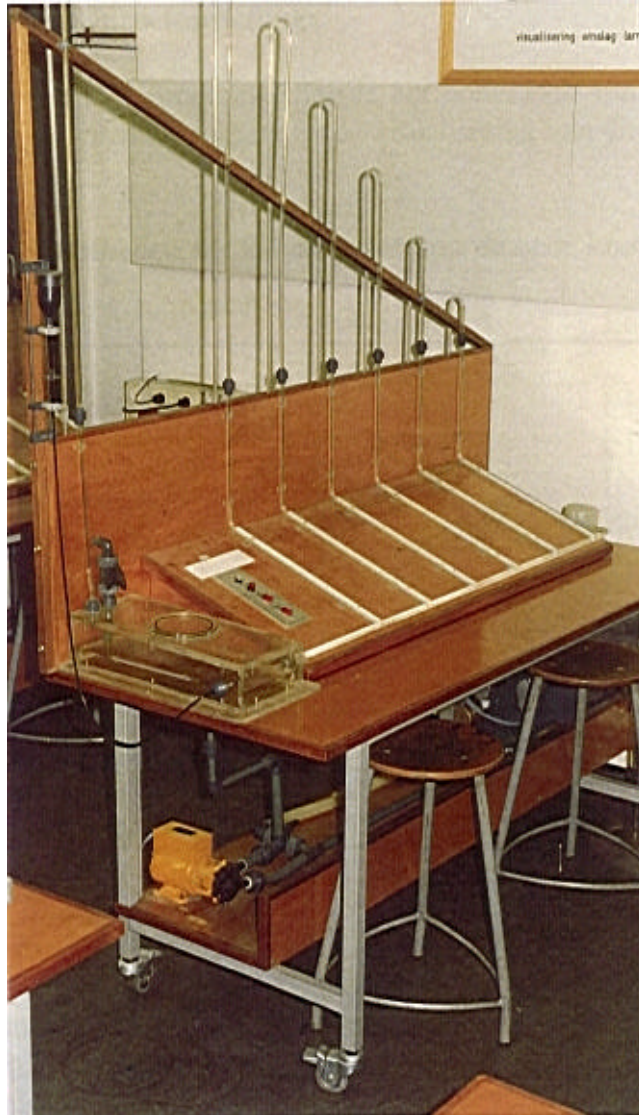
Naast de integrale impulsbalans is de wet van Bernoulli de meest toegepaste vergelijking in de technische stromingsleer. Zonder deze beide, formeel betrekkelijk eenvoudige, standaardvergelijkingen, is de technische stromingsleer ondenkbaar; ze kunnen worden opgevat als een minimum basis van de stromingsleer. Anderzijds leveren ze, mits goed toegepast, bruikbare oplossingen voor vele technische problemen. Vooral aan de toepassing van de wet van Bernoulli dienen echter beperkingen te worden gesteld, n.l. in die gevallen waarbij de schuifspanningen niet verwaarloosbaar zijn. Het getal van Reynolds moet dus voldoende groot zijn, zodat de schuifspanningen kunnen worden beschouwd als spanningen die aan de wand aangrijpen; het zgn. grenslaag concept.

Na deze verhandeling zal het duidelijk zijn dat over de keuze van de experimentele instructieopstellingen nauwelijks discussie nodig is: de omslag laminair-turbulent, de integrale impulsvergelijking en de wet van Bernoulli zijn de aangewezen basisopstellingen. Dit zijn algemeen fysische begrippen en voor instructiedoeleinden kunnen ze het beste als zodanig worden gepresenteerd. Het introduceren van werktuigkundige aspecten komt op de tweede plaats en mag de begripsvorming in elk geval niet vertroebelen.

- Bij de opstelling van de omslag laminair-turbulent kan in een 6 [mm] nauwe buis, door het instellen van de snelheid zowel een laminaire - als een turbulente stroming worden ingesteld. De kenmerkende verschillen, o.a. het aanzienlijke verschil in drukverlies, komen hierbij duidelijk naar voren. De gevonden meetwaarden kunnen in het, in de praktijk gebruikelijke, diagram van Moody worden weergegeven. De student leert hierdoor met dit dubbel-logaritmische diagram omgaan. Door verwarming van het circulerende water wordt tevens de afname van de viscositeit met de temperatuur en de invloed die dat heeft op het getal van Reynolds, experimenteel gedemonstreerd. Tenslotte wordt het omslagverschijnsel direct zichtbaar gemaakt door het injecteren van een fijne straal inkt. Hierbij wordt aangetoond dat het omslag proces uitermate ingewikkeld is.
- De integrale impulsvergelijking kan in zijn meest eenvoudige vorm gedemonstreerd worden aan de klassieke configuratie van een plotselinge verwijding. Hierbij is extra aandacht besteed aan de druk ter plaatse van de sprong in de diameter; de gebruikelijke stilzwijgende aanname van constante druk is n.l. niet vanzelfsprekend. Tevens kan bij deze opstelling de mechanische energiestroom berekend worden en degradatie van een gedeelte tot thermische energie worden aangetoond. Technische voorbeelden van een plotselinge verwijding zijn: sprong in de diameter van een leiding, pijp in tank, afsluiter, etc.
- Een tweede meer geavanceerde toepassing van de integrale impulsvergelijking is de conische vernauwing. Hierop kan tevens de wet van Bernoulli worden toegepast, waarbij door berekening moet worden aangetoond dat de ene wet uit de andere volgt.

Met de uittredende vrije straal van de beide laatste opstellingen zijn nog meer geavanceerde experimenten mogelijk; vooral bij de conus, omdat bij deze opstelling het snelheidsprofiel in de uittree-opening nog over een groot gedeelte (ca 75 %) recht is. Beide opstellingen geven overigens configuraties weer die in technische pijpsystemen dikwijls voorkomen.

Delft, januari 1999.



Proefopstelling 1

Omslag laminair-turbulent van een pijpstroming

1.1 Onderwerp van de proefopstelling:

Het onderwerp van de proefopstelling is het onderzoek van het omslagproces van laminaire naar turbulente stroming en de visualisering van dit omslagproces.

1.2 Begrippen en grootheden die bij de proef aan de orde komen:

Grootheid:	Symbol:	Eenheid:
Het getal van Reynolds	Re	[-]
De frictiefactor	f	[-]
Drukval	Dp	[N/m ²]
Pijpdiameter	D	[m]
Pijplengte	L	[m]
Dichtheid	ρ	[kg/m ³]
Snelheid	v	[m/s]
Kinematische viscositeit	ν	[m ² /s]
Volumedebiet	F_v	[m ³ /s]
Wandruwheid	e	[m]
Relatieve wandruwheid	e/D	[-]

1.3 Doel van de proefopstelling:

- Toepassing van het dubbel-logaritmische diagram van *Moody* voor zowel laminaire- als turbulente buisstroming.
- Bestudering van de invloed die de temperatuur heeft op de viscositeit en dus op het getal van *Reynolds*.
- Visualisering van het omslagproces door het injecteren van een fijne straal inkt in de stroming.

1.4 Theorie:

a. Laminaire stroming:

Voor $Re_D < \text{ca } 2300$, is de stroming laminair en kan dan worden beschreven m.b.v. de formule van *Poiseuille*. Voor de frictiefactor f geldt in dat geval:

$$f = \frac{64}{Re_D}$$

waarin Re_D het getal van *Reynolds* is, betrokken op de binnen diameter D van de pijp. In het dubbel-logaritmische diagram van *Moody* [1] wordt betrekking (1.1) weergegeven door een rechte lijn (zie figuur 1.1).

b. Turbulente stroming:

Voor $Re_D > \text{ca } 4000$, is de stroming turbulent. De frictie-factor f is dan zowel van Re_D als van $\frac{e}{D}$ afhankelijk. In het *turbulente* weerstandsgebied van het *Moody*-diagram zullen de meetpunten, bij deze opstelling, in de buurt van de "gladde pijp" lijn komen te liggen.

c. Omslag gebied:

Voor $2300 < Re_D < 4000$ is de frictiefactor f niet te voorspellen. Hij ligt dan ergens in het gearceerde gebied, afhankelijk van de instroomcondities en de ruwheid van de buiswand. In dit gebied kan het omslagproces worden gevisualiseerd door een fijne straal inkt in de stroming te injecteren.

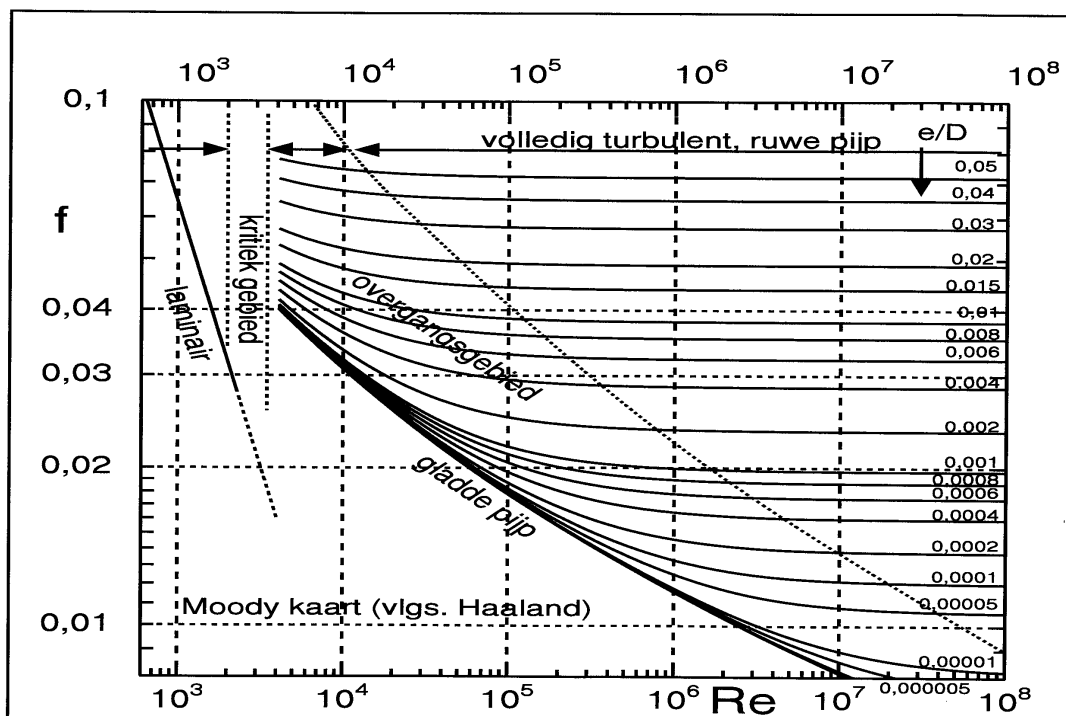


Fig. 1.1: Frictie factor voor volledig ontwikkelde stroming in pijpen met cirkelvormige doorsnede.

1.5 De opstelling: (zie figuur 1.2).

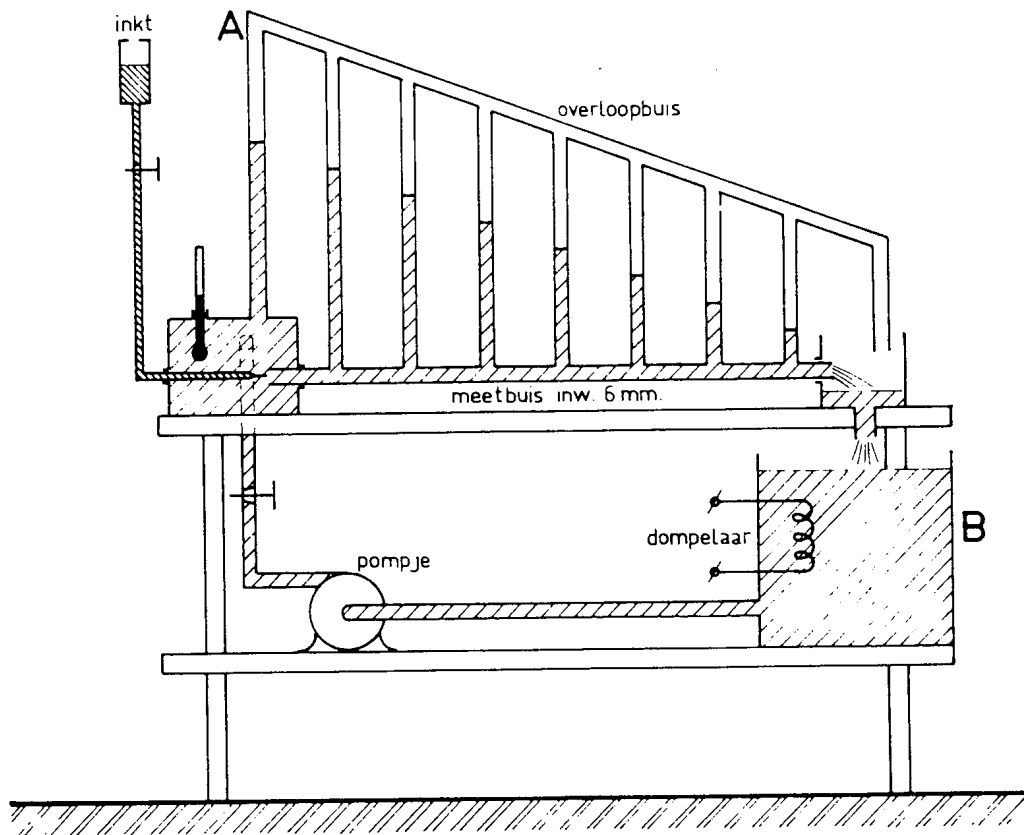


Fig. 1.2: De opstelling.

Door draaien aan de kraan wordt de hoogte van het water in buis **A** ingesteld. Hierdoor wordt het debiet geregeld. Op deze manier kan de stroming zowel in het laminaire- als in het turbulente gebied worden ingesteld. Bij ca 56 [°C] zullen bijna alle meetpunten in het turbulente gebied terecht komen; bij kamertemperatuur kan ook in het laminaire gebied worden gemeten. Aan bak **B** zitten enkele aansluitingen, waardoor het doorgestroomde water kan worden afgevoerd, respectievelijk kan worden opgevangen in een maatbeker, ter bepaling van het debiet. De vlotter zorgt er voor dat zich steeds voldoende water in bak **B** bevindt. Mocht om welke reden dan ook, het niveau in de bak te laag worden, dan schakelt de vlotter de verwarming uit. Hierdoor wordt de mogelijkheid uitgesloten dat de verwarming zou blijven werken wanneer zich te weinig of géén water in bak **B** bevindt. Van de twee verwarmingselementen schakelt er één (van 2000 [W]) uit bij ca 54 [°C] en de ander (van 1000 [W]) bij ca 56 [°C]. Deze temperatuur (van 56 [°C]) blijft dus gehandhaafd met behulp van één element. Het andere element dient slechts om de temperatuur van 56 [°C] sneller te kunnen instellen.

1.6 De uitvoering van de proef:

Algemeen: De kraan van de waterleiding dient, tijdens de metingen bij 56 [°C], gesloten te blijven. Dit omdat anders tijdens de metingen steeds wat water wegloopt door de overloop van bak **B**, wat door de waterleiding weer wordt aangevuld. Hierdoor zou de temperatuur teveel dalen. Tijdens de metingen bij kamertemperatuur kan de kraan gewoon open blijven staan. Bij aanvang van de proef dient de temperatuur te zijn ingesteld op ca 56 [°C]. De opwarmtijd bedraagt ca 45 minuten. Bij 56 [°C] is de stroming, ook bij héél lage snelheden, nog steeds turbulent. Na de metingen bij 56 [°C] kan de opstelling in ca 8 minuten op kamertemperatuur worden gebracht. Dit kan gebeuren door de bak leeg te laten lopen, waarna met behulp van vers leidingwater de kamertemperatuur kan worden ingesteld. Aan het einde van de proef kan het omslagproces m.b.v. inktinjectie visueel worden gedemonstreerd. De inktinjectie inrichting moet dan met inkt gevuld zijn. Verstopping ergens in de toevoerleiding van de inkt kan soms de oorzaak zijn dat de inkt toevoer stagneert. Wanneer het niet lukt om dit ongemak te verhelpen, zal evt. assistentie van iemand uit de werkplaats nodig zijn om een goede stromingsvisualisatie te realiseren. Door draaien aan de kraan kan de drukval over de pijp en dus ook het volumedebiet worden gevarieerd. Door bij verschillende debieten de drukval over 1 meter pijplengte, het volumedebiet en de temperatuur te meten, kunnen de Reynolds getallen (Re_D) en de bijbehorende frictiefactoren f , worden bepaald. Hiertoe gaat men als volgt te werk:

Bepaling van het getal van Reynolds:

Voor het getal van *Reynolds* geldt:

$$Re_D = \frac{vD}{\nu} \quad (1.2)$$

De kinematische viscositeit ν kan worden afgelezen in figuur 1.3. Hierin staat ν uitgezet als functie van de temperatuur. De temperatuur wordt bij elke meting afgelezen op de thermometer in de doorzichtige bak aan de voorzijde van de opstelling, waar de instroming plaats vindt. De snelheid kan worden berekend uit het debiet. Hiervoor geldt:

$$\Phi_v = \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot v \quad (1.3)$$

Na oplossing van de snelheid en substitutie in (1.2) vinden we voor het *Reynolds* getal:

$$Re = \frac{4\Phi_v}{\pi n D} = C_1 \cdot \frac{\Phi_v}{n} \quad (1.4)$$

Hierin is C_1 een constante, die nog van de pijpdiameter D afhangt. Deze pijpdiameter is niet precies gelijk aan de opgegeven 6 [mm] en de constante C_1 is daarom tevoren door ijking bepaald. C_1 staat op de opstelling vermeld. Hierbij is (voor het gemak!) rekening gehouden met het invullen van \dot{O}_v [ml/s] en ν in [mm²/s] in (1.4).

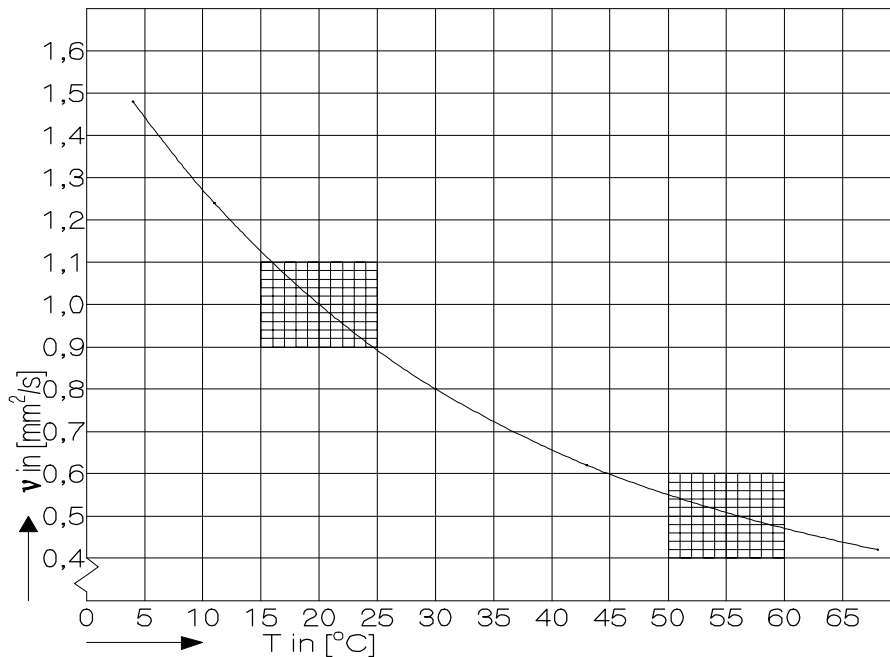


Fig. 1.3: De kinematische viscositeit ν in $[\text{mm}^2/\text{s}]$ als functie van de de temperatuur T in $[\text{°C}]$

Bepaling van de frictiefactor f :

Voor de drukval in de pijp, over een lengte L , geldt:

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1.5)$$

Hierin is f de frictiefactor, waarvoor (1.5) tezamen met (1.3) geeft:

$$f = \frac{\rho^2 D^5}{8 r L} \cdot \frac{\Delta p}{\Phi_v^2} = C_2 \cdot \frac{\Delta p}{\Phi_v^2} \quad (1.6)$$

De waarde van C_2 , die nog sterker afhankelijk is van D dan C_1 (5^{e} macht!), staat weer op de opstelling vermeld. Hierbij is rekening gehouden met het invullen van D_p in $[\text{cm H}_2\text{O}]$ en Φ_v in $[\text{ml/s}]$ in (1.3).

Voer nu de volgende zes opdrachten uit:

1) Doe bij ca 56 $[\text{°C}]$ een zestal waarnemingen. Begin bij de hoogste druk (hoogste snelheid), door de druk in buis 1 (p_1 ; zie figuur 1.2) ca 75 $[\text{cm H}_2\text{O}]$ te maken en laat deze druk bij de volgende vijf waarnemingen zakken tot waarden van ca 60, 45, 30, 15 en 3 á 4 $[\text{cm H}_2\text{O}]$. Meet bij al deze instellingen de volgende drie grootheden:

1. De drukval D_p : De drukval D_p over 1 $[\text{m}]$ pijplengte wordt gemeten in $[\text{cm H}_2\text{O}]$ tussen de voorste en de achterste aansluiting op het paneel (p_1-p_6). Er zitten zes

aansluitingen waarvan dus alleen de voorste en de achterste behoeven te worden afgelezen (n.l. de afstand tussen twee aansluitingen is 20 [cm]). De tussenliggende drukken hoeven niet te worden afgelezen maar het is mogelijk om de drukval nauwkeuriger te bepalen door alle zes de drukken te meten en hier met de computer een rechte lijn door te trekken (kleinste kwadraten methode). De hellingshoek van het paneel is in de schaalverdeling verwerkt, waardoor deze, ter plaatse, wat "uitgerekt" is.

2. *Het volumedebiet F_v* : De pijp mondt uit in een fles, waaraan een slang zit verbonden die aan de zijkant van bak **B** in een gat kan worden gestoken, waardoor het water in de maatbeker stroomt. Doe dit gedurende een bepaalde tijd. Neem daarna de maatbeker weg en meet het doorgestroomde debiet (b.v. 600 [ml] in 20 [s] is 30 [ml/s]). Kies de meettijd zodanig dat steeds méér dan 0,5 [l] wordt opgevangen; d.w.z. bij de hoogste drukken ca 10 à 15 [s] meten en bij de lagere drukken geleidelijk wat langer tot ca 40 à 45 [s] bij de laagste drukken. Indien de meettijd te kort wordt gekozen, wordt de meting te onnauwkeurig.
3. *De kinematische viscositeit ν* : De temperatuur wordt "constant" gehouden m.b.v. een thermostaat die zo nu en dan aan en af slaat. Dit gebeurt met een zekere traagheid waardoor de temperatuur enigszins fluctueert. Deze fluctuatie zit dus ook in de viscositeit. Bij elke meting moet daarom de temperatuur worden bepaald. Dit gebeurt door aan de zijkant in de doorschijnende bak aan de voorzijde van de opstelling te kijken, waar zich de thermometer bevindt (zie figuur 1.2). De viscositeit wordt nu afgelezen in figuur 1.3. In de gebiedjes waar gemeten wordt, bij 20 [°C] en 56 [°C], zijn in de figuur extra coördinaten lijntjes aangebracht waardoor het aflezen nauwkeuriger kan gebeuren.

Met behulp van (1.4) en (1.6) worden nu de zes *Reynolds* getallen en de bijbehorende frictiefactoren berekend. Teken de zes metingen vervolgens in, in het *Moody* diagram (Maak van de figuren 1.1 en 1.3 van te voren even een kopie).

2) Om een indruk te krijgen van de *reproduceerbaarheid* van de metingen worden vervolgens nog drie extra metingen uitgevoerd. Kies hiervoor drie instellingen die bij het intekenen in het *Moody* diagram de minst bevredigende resultaten gaven: d.w.z. tussen twee punten die wat ver uit elkaar liggen dan wel sterk afwijken van de te verwachten ligging (de kromme voor "gladde pijp" in het turbulente gebied en de rechte in het laminaire gebied).

3) De opstelling moet nu worden afgekoeld tot kamertemperatuur. Laat dus de bak leeg lopen en vul deze vervolgens met koud leidingwater door de kraan te openen.

4) Herhaal nu de metingen als onder 1) en 2) beschreven maar nu bij 20 [°C] (of lager). De metingen komen nu ook gedeeltelijk in het omslaggebied en in het laminaire gebied te liggen. Teken weer alle meetpunten in, in het diagram van *Moody*. Maak onderscheid tussen "warm" en "koud" door "nulletjes" en "kruisjes" te zetten of door verschillende kleuren te gebruiken.

5) Tracht met behulp van inkt injectie het omslag proces en vervolgens de laminaire stroming te visualiseren. In het geval van turbulente stroming is alleen een lichte verkleuring van de stroming te zien.

6) Schrijf een verslag van de proef. (zie "**1.8 Opdrachten voor het verslag:**")

1.7 Vragen:

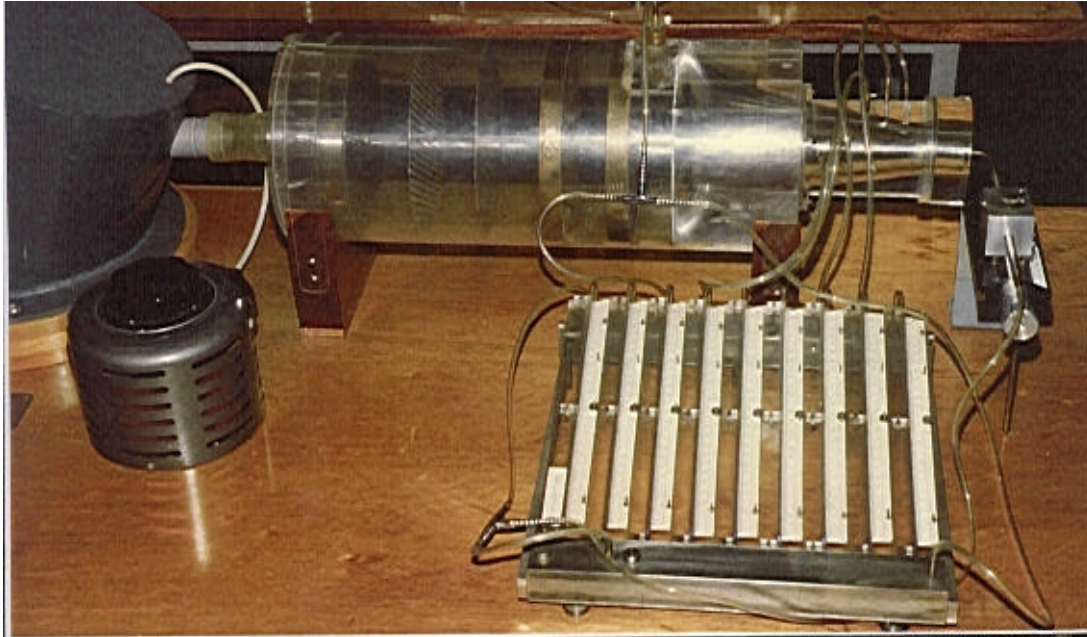
- a) Waarom is de omslag bij hoge temperatuur niet of nauwelijks te demonstreren?
- b) Waarom is de drukval Dp zo moeilijk te bepalen als het meetpunt in het omslaggebied valt?

1.8 Opdrachten voor het verslag:

- 1) Noteer alle waarnemingen in tabelvorm. Maak ook tabellen van de berekende *Reynolds*-getallen en de bijbehorende frictiefactoren voor beide temperaturen.
- b) Teken alle waarnemingen in het diagram van *Moody* (figuur 1.1).
- c) Beantwoord de vragen onder **1.7**

REFERENTIES

- [1.] Moody, L.F., "Friction Factors for Pipe Flow", *Transactions of the ASME*, **66**, 8, November 1944, pp. 671-684.



Proefopstelling 2

Stroming in een conische vernauwing

2.1 Onderwerp van de proefopstelling:

Het onderwerp van de proefopstelling is het onderzoek van de stroming in een convergerende buis.

Gecontroleerd worden de wet van Bernoulli en de impulsbalans.

2.2 Begrippen en grootheden die bij de proef aan de orde komen:

Grootheid:	Symbol:	Eenheid:
Suskamerdruk	p_0	[N/m ²]
Statische druk	p	[N/m ²]
Snelheid	v	[m/s]
Diameter	d	[m]
Straal	r	[m]
Dichtheid	\tilde{n}	[kg/m ³]
Kracht	F	[N]

2.3 Doel van de proefopstelling:

- Verificatie van de wet van Bernoulli door meting en berekening.
- Verificatie van de impulsbalans door meting en berekening.

2.4 Theorie:

Wet van Bernoulli:

Lucht stroomt uit een grote suskamer in een convergerende buis. De druk in de suskamer is p_0 , gemeten t.o.v. de atmosfeer. De snelheid in de suskamer is verwaarloosbaar klein.

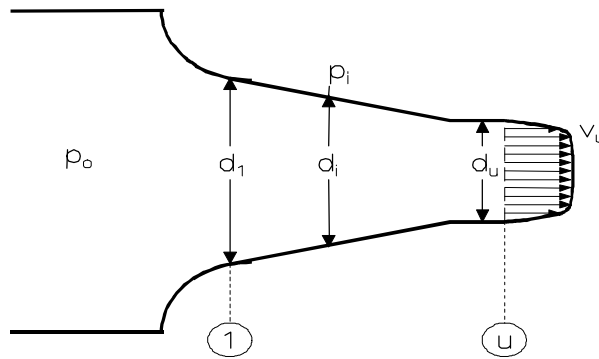


Fig. 2.1: Principeschets van de opstelling.

Als ergens in de conische vernauwing (zie figuur 2.1), waar de doorsnede d_i is, de statische druk gelijk is aan p_i en de snelheid gelijk aan v_i , dan geldt volgens de wet van Bernoulli:

$$p_0 = p_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 \quad (2.1)$$

Of:

$$v_i = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 - p_i)} = C_1 \sqrt{p_0 - p_i}$$

Met de continuïteitsvergelijking:

$$v_i d_i = C_2, \quad (2.3)$$

vinden we nu:

$$\sqrt{p_0 - p_i} \cdot d_i = \text{Constant}. \quad (2.4)$$

Betrekking (2.4) wordt bij de proef gecontroleerd, door meting en berekening.

Impulsbalans:

We nemen $\underline{1}$ en \underline{u} als controle-oppervlakken. Vanwege de grote contractie kunnen, in doorsnede $\underline{1}$, over de hele doorsnede, zowel de snelheid v_1 als de statische druk p_1 constant genomen worden. Neem aan dat de luchtstroom in de uittreed-opening aangepast is aan de omgeving, d.w.z. dat de statische druk, p_u , daar gelijk is aan de atmosferische druk. Daar alle drukken gerekend worden t.o.v. de atmosferische druk is dus $p_u=0$.

Dan geldt:

$$p r_1^2 (p_1 + r v_1^2) = F + \int_0^{r_u} r v_u^2 \cdot 2p r dr \quad (2.5)$$

Hierin is F de naar links gerichte kracht door *de conus op de stroming* uitgeoefend. Hiervoor geldt:

$$F = \int_{r_u}^{r_1} p_i 2p r_i \cdot dr_i \quad (2.6)$$

Voor $i=1$ luidt (2.1):

$$p_0 = p_1 + \frac{1}{2} r v_1^2 \quad (2.7)$$

Met de totaaldruk-buis wordt, in de uittreedopening \underline{u} , de druk in het stuwpunt, d.w.z. de totale druk gemeten. Hiervoor geldt:

$$p_{tot} = p_u + \frac{1}{2} r v_u^2 = \frac{1}{2} r v_u^2 \quad (2.8)$$

Omdat $p_u = 0$. Met (2.6), (2.7) en (2.8) luidt de impulsbalans (2.5):

$$r_1^2 (2 p_0 - p_1) = 2 \int_{r_u}^{r_1} p_i r_i dr_i + 4 \int_0^{r_u} (p_{tot} \cdot r) dr \quad (2.9)$$

(Ga dit na!)

Betrekking (2.9) wordt bij de proef gecontroleerd, door meting en berekening.

2.5 De opstelling:

Een stofzuiger-ventilator, waarvan het toerental regelbaar is m.b.v. een regeltrafo, blaast lucht in de suskamer. De diameter van de suskamer is groot t.o.v. die in de convergerende buis. De gemeten suskamerdruk, p_0 , kan daarom gelijk gesteld worden aan de totaaldruk van de stroming. Deze totaaldruk is aangesloten aan de voorkant(+) van de manometer op het grote reservoir en aan de achterkant(-) van de manometer, waar deze gemerkt is met een **A**. Het daar gemeten drukverschil is dus nul. Deze aansluiting registreert de daling van het vloeistofniveau in het reservoir van de manometer als daar de, voor de

aflezing benodigde, vloeistof aan wordt onttrokken. Hierdoor is het mogelijk om de afgelezen drukverschillen, $(p_0 - p_i)$, te corrigeren voor deze nulpuntsverschuiving.

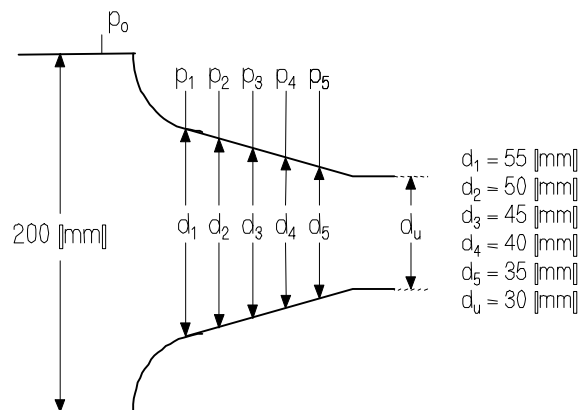


Fig. 2.2: Afmetingen van de opstelling

In de convergerende buis bevinden zich vijf drukaansluitingen op de aangegeven diameters (zie figuur 2.2). De daar gemeten statische drukken, p_i , zijn aangesloten aan de min-kant van de manometer. De uittreedende stroming kan vlak achter de uitstroomopening worden getraverseerd met een totaal-drukbuis. Deze wordt hierbij van de ene kant van de uitstroomopening naar de andere kant bewogen. Het is toelaatbaar om de statische druk daar, p_u , gelijk aan nul te stellen t.o.v. de atmosferische druk. Omdat de totaal-drukbuis t.o.v. de atmosfeer meet, registreert hij dus de dynamische druk: $\frac{1}{2} \rho v_u^2$.

2.6 De uitvoering van de proef:

Tijdens de uitvoering van de proef niets voor de uitstroomopening houden. De suskamerdruk kan dan te hoog oplopen, waardoor vloeistof uit de manometer loopt!

- 1) Stel p_0 in op ca 20 [mm WK] (mm waterkolom) (d.i. 10 [cm] op de schaal). Deze waarde dient verder constant te worden gehouden.
- 2) Meet p_0 en drukverschillen $p_0 - p_i$, voor $i=1,2,3,4,5$. Meet, door aan- en uitzetten van de ventilator, ook de nulpuntsverschuiving.
- 3) Bepaal de middenstand van de totaal-drukbuis uit twee symmetrische posities. De buis wordt daartoe in de grenslaag gedraaid, zodanig dat de gemeten p_{tot} gelijk is aan 10 [mm WK] (5 [cm] op de schaal). De snelheidsgradiënt is hier groot en de stand van de buis kan daardoor nauwkeurig (op 0,01 [mm]) worden bepaald. Herhaal dit aan de andere kant en middel de twee afgelezen waarden. Plaats de buis vervolgens in het, aldus bepaalde, midden van de uitstroomopening en tra-

verseer naar de wand. Tot ca 13 [mm] uit het midden is p_{tot} vrijwel constant. In de grenslaag ($r = \text{ca } 13 \text{ [mm]}$) tot aan de wand: $r = 15 \text{ [mm]}$) moet met stapjes van 0,25 [mm] worden gemeten. Zorg er wel voor dat de afstand tot de wand steeds een geheel aantal malen 0,25 [mm] is. Noteer alle waarnemingen.

2.7 Vragen:

- Hoe groot is de snelheid aan de wand ($r = r_u = 15 \text{ [mm]}$) theoretisch?
- Is dit in overeenstemming met de metingen? Verklaar een eventueel verschil.
- Welke waarde kan bij de berekeningen het beste worden gebruikt, de theoretische - of de praktische waarde en waarom?

2.8 Opdrachten voor het verslag:

Algemeen: Noteer alle waarnemingen in tabelvorm. Bereken de verschillende termen in de impulsbalans apart. Neem ook de berekening met de formule van Simpson op in het verslag.

- Controleer de, uit de wet van Bernoulli afgeleide, formule (2.4), door de constante zes maal (d.w.z. voor $i = 1, 2, 3, 4, 5$ en u), te berekenen. Doe dit met en zonder nulpuntcorrectie. Moet deze correctie worden opgeteld of afgetrokken? Wat is de maximale afwijking van het gemiddelde in procenten (met en zonder correctie)?
- Bereken de termen in de impulsbalans (2.9). De eerste integraal in het rechter lid van (2.9) wordt als volgt berekend:
Uit (2.4) volgt:

$$\sqrt{p_0 - p_i} \cdot r_i^2 = \text{constant} = \sqrt{p_0} \cdot r_u^2, \quad (2.10)$$

en dus:

$$p_i = p_0 [1 - (r_u / r_i)^4]. \quad (2.11)$$

Dit ingevuld in de integraal geeft:

$$\begin{aligned} 2 \int_{r_u}^{r_1} p_i r_i \, dr_i &= 2 p_0 \left(\int_{r_u}^{r_1} r_i \, dr_i - r_u^4 \int_{r_u}^{r_1} \frac{dr_i}{r_i^3} \right) = \\ &= 2 p_0 \left[\frac{(r_1^2 - r_u^2)}{2} - r_u^4 \left(\frac{1}{2r_u^2} - \frac{1}{2r_1^2} \right) \right] = \\ &= p_0 \left(r_1^2 - 2r_u^2 + \frac{r_u^4}{r_1^2} \right) = p_0 \left[\frac{(r_1 + r_u)(r_1 - r_u)}{r_1} \right]^2 \end{aligned}$$

dus:

$$2 \int_{r_u}^{r_l} p_i r_i \cdot dr_i = p_0 \left[\frac{(r_l + r_u)(r_l - r_u)}{r_l} \right]^2 \quad (2.12)$$

Controleer dit alles en gebruik het resultaat.

De tweede integraal in het rechter lid wordt numeriek met de formule van Simpson bepaald. Bereken eerst het gedeelte van de integraal waarvoor geldt $p_{tot} \gg p_0$ (recht snelheidsprofiel) en vervolgens het restant (de grenslaag) m.b.v. de formule van Simpson.

We vinden dan:

$$\int_0^{r_u} (p_{tot} \cdot r) dr = p_0 \int_0^{r_g} r dr + \int_{r_g}^{r_u} (p_{tot} \cdot r) dr = \frac{1}{2} p_0 r_g^2 + I_{Simpson}$$

Waarin r_g de waarde van r is waar de grenslaag begint. Zorg er wel voor dat de grenslaagdikte ($r_u - r_g$) een geheel aantal malen 0,25 [mm] is.

De formule van Simpson luidt:

$$\int_{r_g}^{r_u} f(r) dr = \frac{h}{3} (f_1 + 4 f_2 + 2 f_3 + 4 f_4 + 2 f_5 + \dots + 4 f_{n-1} + f_n)$$

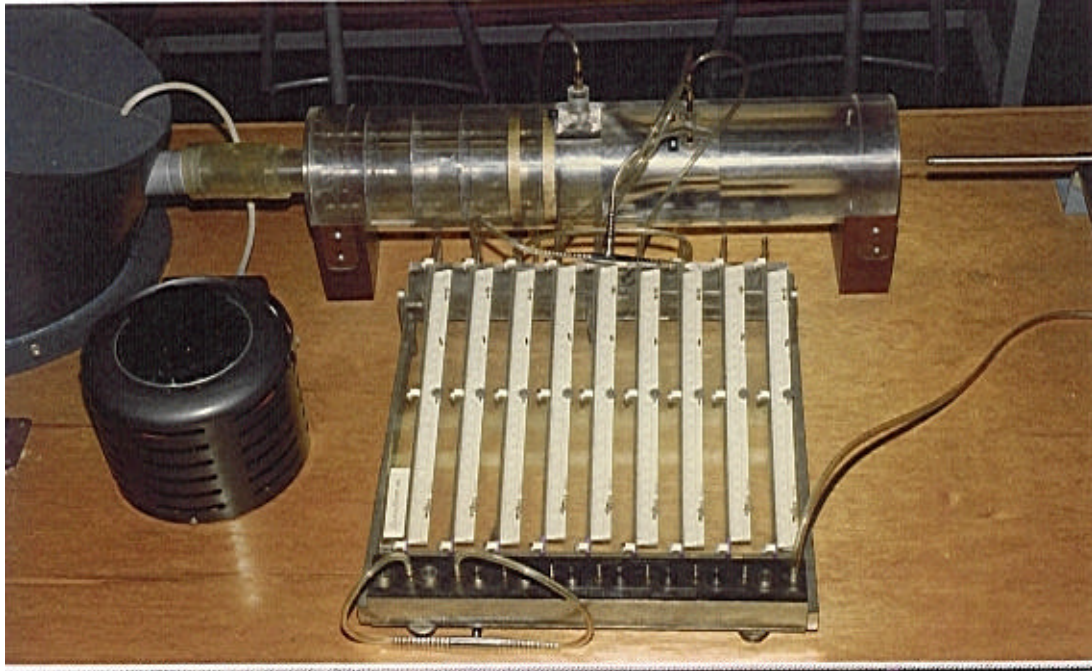
Hierin is h de stapgrootte en f_1 t/m f_n zijn de waarnemingen van $(p_{tot} \cdot r)$ voor waarden van r : $r_g < r < r_u$. Werk met een constante stapgrootte van 0,25 [mm] en zorg er voor dat het aantal waarnemingen oneven is. Mocht het aantal waarnemingen onverhoopt toch even zijn, dan luidt de formule van Simpson:

$$I_{Simpson} = \frac{h}{3} (f_1 + 4 f_2 + 2 f_3 + \dots + 4 f_{n-2} + \frac{5}{2} f_{n-1} + \frac{3}{2} f_n)$$

De laatste waarneming is nu met de trapezium-regel meegenomen en dit werkt dus iets minder nauwkeurig.

Als enigszins zorgvuldig wordt gemeten en gerekend, klopt de balans op 2 à 3 % nauwkeurig.

c) Beantwoord de vragen onder **2.7**.



Proefopstelling 3

Stroming door een plotselinge verwijding

3.1 Onderwerp van de proefopstelling:

Het onderwerp van de proefopstelling is het onderzoek van de stroming door een plotselinge verwijding.

Bepaald wordt het verlies aan mechanische energie na een plotselinge verwijding en de degradatie van een gedeelte van de mechanische energiestroom wordt aangetoond.

3.2 Begrippen en grootheden die bij de proef aan de orde komen:

Grootheid:	Symbol:	Eenheid:
Dichtheid van lucht	\tilde{n}_l	[kg/m ³]
Dichtheid van water	\tilde{n}_w	[kg/m ³]
Snelheid	v	[m/s]
Doorsnede-diameter	d	[m]
Straal (radius)	r	[m]
Wandschuifspanning	$\hat{\sigma}$	[N/m ²]
Druk	p	[N/m ²]
Totaaldruk	p_{tot}	[N/m ²]
Statische druk	p_{st}	[N/m ²]
Dynamische druk	$\hat{\Delta}p (=p_{tot}-p_{st}=\frac{1}{2}\tilde{n} v^2)$	[N/m ²]
Atmosferische druk	p_{atm}	[N/m ²]
Hoogteverschil	$\hat{\Delta}h$	[mm]
Integratie-stapgrootte	h	[m]
Soortelijke warmte bij constante druk	c_p	[J/kgK]

3.3 Doel van de proefopstelling:

Meting en berekening van de mechanische energiestroom door een plotselinge verwijding. De degradatie van een gedeelte van deze energiestroom tot thermische energie wordt aangetoond. Extra aandacht is besteed aan de druk ter plaatse van de sprong in de diameter waarachter zich een zwakke ringvormige wervel vormt en terugstroming langs de wand optreedt.

3.4 Theorie:

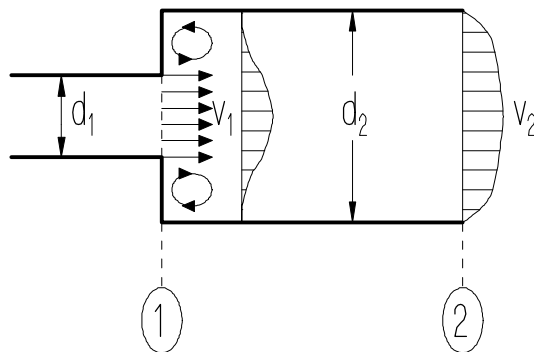


Fig. 3.1: Principeschets van de opstelling.

Lucht stroomt uit een nauwe pijp in een wijdere. Dicht achter de verwijding zal zich een zwakke ringvormige wervel vormen, waarbij langs de wand terugstroming optreedt. Verder stroomafwaarts zal over de gehele pijpdoorsnede weer een stroming in de richting van de uitstroomopening 2 aanwezig zijn.

Indien de lucht onsamendrukbaar wordt ondersteld kunnen voor de doorsneden 1 en 2 (zie figuur 3.1) de volgende balansen worden opgesteld:

a) de massabalans:

In woorden:

massa per sec door 1 = massa per sec door 2.

of:

$$\int_0^{r_1} r v_1 \cdot 2\pi r dr = \int_0^{r_2} r v_2 \cdot 2\pi r dr \quad (3.1)$$

Of daar $v_1 = Constant$, over de hele doorsnede:

$$\frac{1}{2} v_1 r_1^2 = \int_0^{r_2} v_2 r dr \quad (3.2)$$

b) de impulsbalans:

Bij verwaarlozing van de wandschuifspanning en met de aanname dat de druk op de ringvormige wand bij 1 gelijk is aan de statische druk p_1 bij het uiteinde van de nauwe buis, luidt de impulsbalans in woorden:

Kracht naar rechts = Impulsstroom door 2 - Impulsstroom door 1.

of:

$$p r_2^2 (p_1 - p_2) = \int_0^{r_2} r v_2 \cdot v_2 \cdot 2\pi r dr - \int_0^{r_1} r v_1 \cdot v_1 \cdot 2\pi r dr \quad (3.3)$$

of

$$(p_1 - p_2)r_2^2 = r [2 \int_0^{r_2} v_2^2 r dr - v_1^2 r_1^2] \quad (3.4)$$

c) de energiebalans:

In woorden:

Kinetische energie door **1** + arbeid drukkkrachten = kinetische energie door **2** + "rest" (dissipatie!).

of:

$$\begin{aligned} \int_0^{r_1} \frac{1}{2} r v_1^2 \cdot v_1 2pr dr + p_1 \int_0^{r_1} v_1 2pr dr - p_2 \int_0^{r_2} v_2 2pr dr = \\ = \int_0^{r_2} \frac{1}{2} r v_2^2 \cdot v_2 2pr dr + y \end{aligned} \quad (3.5)$$

Waarin y de dissipatie is. M.b.v. de massabalans (3.2) en het gegeven $v_1 = Constant$, vinden we nu:

$$\frac{1}{2} r v_1^3 r_1^2 + (p_1 - p_2) v_1 r_1^2 = r \int_0^{r_2} v_2^3 r dr + \frac{y}{p} \quad (3.6)$$

(Is $(p_1 - p_2)$ hier groter of kleiner dan nul?)

Het doel van de proef is de termen uit deze energiebalans te bepalen, d.w.z. drie termen door meting en de dissipatie y als sluitpost. Uit y kan dan weer de temperatuurstijging worden berekend.

3.5 De opstelling:

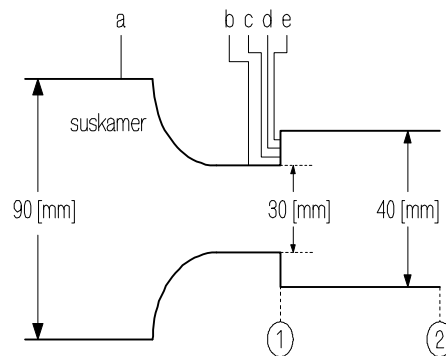


Fig. 3.2: De opstelling.

Een stofzuiger ventilator, ingebouwd tegen geluidshinder, blaast lucht in de suskamer. Het toerental is regelbaar d.m.v. een regeltrafo. De suskamer is voorzien van enkele gazen en

roosters om een "mooie" homogene snelheids- en drukverdeling te krijgen. De statische druk in de suskamer wordt gemeten bij aansluiting **a**. (zie figuur 3.2).

Omdat de snelheid in de suskamer nog heel laag is, kan de statische druk daar, bij benadering, gelijk gesteld worden aan de totale druk voor de stroming. De statische druk in de nauwe buis, p_1 , wordt gemeten bij aansluiting **b**. Is deze druk positief of negatief? (we rekenen alle drukken *t.o.v.* de atmosferische druk!)

De aansluitingen **c**, **d** en **e** geven de druk op verschillende plaatsen van de verwijdende, ringvormige wand. Deze dienen om te kunnen controleren dat de aanname van constante druk over deze wand, reëel is. Aan het uiteinde van de wijde buis kan de statische druk, p_2 , gelijk gesteld worden aan de atmosferische druk. Omdat de totaal druk-buis de totale druk meet *t.o.v.* de atmosferische druk, meet hij in de uitstroomopening dus direct de dynamische druk:

$$\Delta p_2 = (p_{tot} - p_{st})_2 = p_{tot,2} = \frac{1}{2} r v_2^2 \quad (3.7)$$

Door traverseren wordt het hele snelheidsprofiel in doorsnede **2** opgemeten. Omdat, zoals gezegd, de statische druk in de suskamer gelijk is aan de totale druk aldaar en deze tevens gelijk is aan de totale druk in doorsnede **1** (geén verliezen!), kan de snelheid in doorsnede **1** worden bepaald uit:

$$\Delta p_1 = (p_{tot} - p_{st})_1 = p_a - p_b = \frac{1}{2} r v_1^2 \quad (3.8)$$

Controleer dat deze aansluiting, ($p_a - p_b$), op de manometer aanwezig is. Hier kan dus de snelheid v_1 (= *constant*) worden bepaald. De snelheid v_1 kan ook worden bepaald uit het verschil tussen $p_{tot,1}$ gemeten met de totaal druk-buis (naar binnen schuiven) en de statische druk in doorsnede **1**, gemeten bij **b**.

De drukken worden gemeten in [mm WK] (mm waterkolom); dus als de dynamische druk gelijk is aan $\frac{1}{2} r v^2 = Dp = r_w g Dh$, dan volgt de snelheid uit:

$$v = \sqrt{\frac{2}{r_l} r_w g \Delta h \cdot 10^{-3}} \approx 4 \sqrt{\Delta h}$$

met $r_l \gg 1,2$ [kg/m³], $r_w = 1000$ [kg/m³] en $g \gg 9,81$ [m/s²].

Anders gezegd:

$$v = 4 \sqrt{\Delta p} \quad (3.9)$$

met $Dp = (p_{tot} - p_{st})$ in [mm WK]. Deze regel kan worden gebruikt voor het bepalen van de snelheid.

3.6 De uitvoering van de proef:

Tijdens de uitvoering van de proef s.v.p. *niets* voor de uitstroomopening houden. De suskamerdruk kan dan te hoog oplopen, waardoor vloeistof uit de manometer loopt!

- 1) Regel de trafo zo af, dat de druk in de suskamer 9 [mm WK] boven de atmosferische druk is. Deze druk kan tijdens de metingen iets verlopen (b.v. door het inbrengen van de totaal drukbuis). Hij dient dan op de oorspronkelijke waarde te worden teruggebracht.
- 2) Bij het opstellen van de impulsbalans is aangenomen dat over de gehele verwijdende, ringvormige, wand bij doorsnede 1, gerekend mag worden met een constante statische druk p_1 , dus dat $p_b=p_c=p_d=p_e$. Meet deze drukken *t.o.v.* de atmosferische druk (let op het teken!)
- 3) Aangenomen mag worden dat het snelheidsprofiel bij uitstroming uit de nauwe buis recht is; d.w.z. dat over de gehele doorsnede dezelfde snelheid heerst. Meet deze snelheid, zowel door het drukverschil p_a-p_b te meten, als ook door het meten van $p_{tot,1}$ met de totaal druk-buis (naar binnen schuiven en bijregelen) en daar de statische druk $p_1 (=p_b)$ van af te trekken. Zijn, na het naar inbrengen van de totaal druk-buis en het op nieuw afregelen van de trafo, de drukken p_b t/m p_e weer op hun oorspronkelijke waarden terug gekeerd? Indien dit niet zo is, wat is hiervan dan de verklaring? Welke methode om v_1 te bepalen zal het meest nauwkeurig zijn?
- 4) Meet het snelheidsprofiel in doorsnede 2. Het bepalen van de middenstand van de totaal druk-buis m.b.v. twee symmetrische posities (zoals bij **proefopstelling 2**) is niet erg nauwkeurig, omdat het snelheidsprofiel een nogal "flauw" verloop heeft. Plaats daarom de totaal druk-buis met het midden precies aan de wand en meet vanuit die positie, met stapjes van 5 [mm], het *hele* profiel op. Bij $r = 20, 15, 10$ en 5 [mm] worden op die manier steeds twee waarden verkregen. Indien deze twee waarden niet precies aan elkaar gelijk zijn, kan het gemiddelde worden genomen. Neem wel steeds gelijk intervallen (5 [mm]), voor numerieke integratie.

3.7 Vragen:

- a) De invloed van de wandschuifspanning werd verwaarloosd. Indien we dat niet hadden gedaan, zou dat dan van invloed zijn geweest op de massa-, impuls- en/of energiebalans? Hoe?
- b) Maak een ruwe schets van het verloop van de wandschuifspanning als functie van de plaats, in axiale richting in de wijde buis, tussen de doorsneden 1 en 2.

- c) Indien de plotselinge verwijding wordt vervangen door een geleidelijk overgang (diffusor), kan het verlies aan mechanische energie aanzienlijk worden beperkt. Verklaar dit. Aan welke voorwaarde dient een dergelijk diffusor te voldoen?

3.8 Opdrachten voor het verslag:

Algemeen: Noteer alle waarnemingen in tabelvorm. Bereken de verschillende termen in de energiebalans apart. Neem ook de berekening met de formule van Simpson op in het verslag. Neem bij de berekeningen $\tilde{n}_l = 1,2$ [kg/m³]. Reken alle drukken *t.o.v.* de atmosferische druk, dus een druk die groter is dan de atmosferische druk positief, een druk die kleiner is negatief en de atmosferische druk zelf nul.

- 1) Aan de integraal in het rechterlid van (3.6) is te zien dat $(v^3 \cdot r)$ een maat is voor het kinetische energiedebiet, op dezelfde manier als v een maat is voor het volumedebiet. Maak een kopie van de diagrammen voor de snelheid en de energie en teken daarin vervolgens:
 - de snelheidsprofielen in 1 ($d_1 = 30$ [mm]) en 2 ($d_2 = 40$ [mm]) en
 - de $(v^3 \cdot r)$ -profielen in de doorsneden 1 en 2.

- 2) Bereken de termen in de energiebalans (3.6). Het verschil tussen de statische drukken in de doorsneden 1 en 2, ($p_1 - p_2$), in de tweede term van het linkerlid, moet worden omgerekend van [mm waterkolom] naar [N/m²] (= [Pa]). (n.l. 1 [mm WK] ° 9,81 (=g) [Pa]; ga dit na !).
De integratie van:

$$\int_0^{r_2} v_2^3 r \, dr$$

gebeurt numeriek met de formule van Simpson, deze luidt:

$$\int_0^{r_2} f(r) \, dr = \frac{h}{3} (f_1 + 4f_2 + 2f_3 + 4f_4 + 2f_5 + \dots + 4f_{n-1} + f_n)$$

voor een oneven aantal waarnemingen. Hierin is h de stapgrootte en f_1 t/m f_n zijn de waarnemingen van $(v_2^3 \cdot r)$ voor $0 \leq r \leq r_2$. Werk met een constante stapgrootte van 5 [mm]; het aantal waarnemingen wordt dan oneven ($r_2 = 20, 15, 10, 5$ en 0 [mm]).

- 3) Neem aan dat het verlies aan mechanische energie volledig in warmte is omgezet, en bereken de temperatuurstijging van de lucht uit:

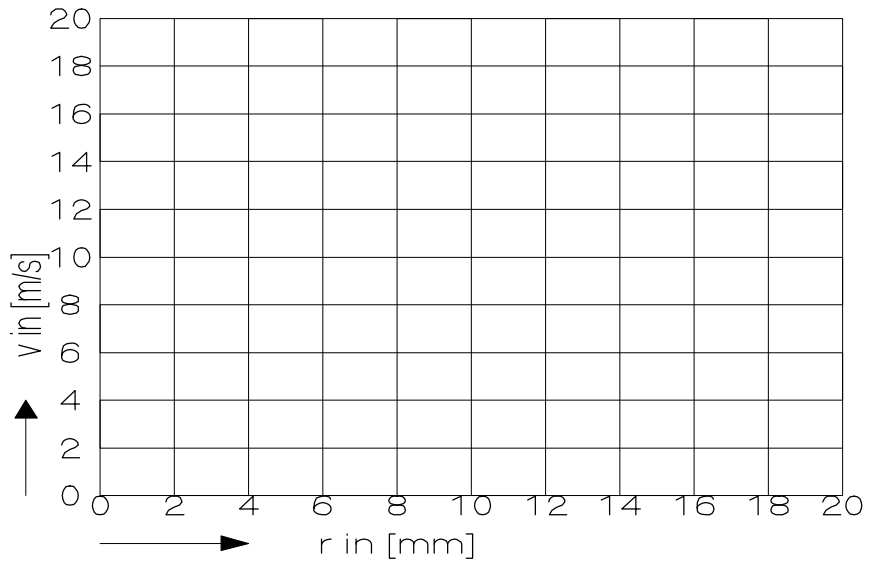
$$y = \Phi_m c_p \Delta T \quad (3.10)$$

waarin c_p de soortelijke warmte bij constante druk van de lucht is ($c_p = 10^3$ [J/kgK]). Het massadebiet Φ_m kan het gemakkelijkst worden berekend in doorsnede 1, omdat de snelheid daar constant is:

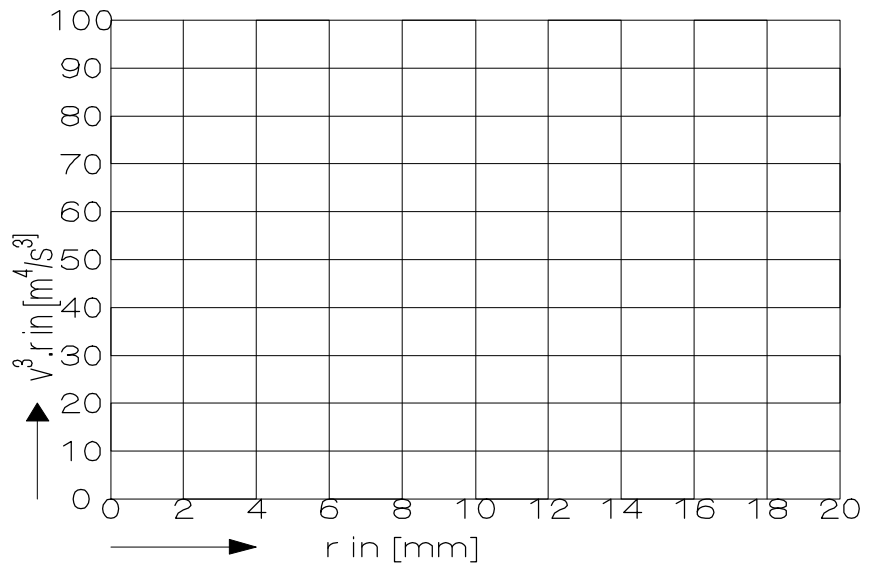
$$\Phi_m = r v_1 \cdot \rho r_1^2 \quad (3.11)$$

- d)** Beantwoord de vragen onder 7.

snelheid



energie



Uitwerking proefopstelling 1:

1.8a)

p in [cm H₂O]; **Φ** in [ml/s]; **T** in [°C]; **v** [mm²/s]

p₁	p₆	Δp	Φ_v	T	v	Re	f
75.4	23.7	51.7	38.5	54.5	0.51	16540	0.0280
60.5	18.7	41.8	34.4	53.2	0.52	14494	0.0283
45.1	14.3	30.8	29.0	55.5	0.50	12708	0.0294
30.0	9.5	20.5	22.6	56.8	0.49	10105	0.0322
15.0	5.1	9.9	15.3	56.8	0.49	6841	0.0339
4.0	1.6	2.4	6.8	56.5	0.50	2980	0.0416
45.7	14.5	31.2	28.7	51.0	0.54	11645	0.0304
30.5	9.8	20.7	22.6	50.2	0.54	9170	0.0325
3.2	1.5	1.7	6.5	49.5	0.55	2589	0.0322
75.3	22.8	52.5	35.0	20.0	1.01	6971	0.0343
60.1	18.0	42.1	31.6	20.0	1.01	6294	0.0338
45.0	13.8	31.2	26.7	20.0	1.01	5318	0.0351
30.5	9.5	21.0	21.1	20.0	1.01	4203	0.0378
15.0	5.8	9.2	16.0	20.0	1.01	3187	0.0288
3.9	1.6	2.3	5.6	20.0	1.01	1115	0.0588
75.2	22.5	52.7	34.5	20.0	1.01	6872	0.0355
60.0	17.9	42.1	30.8	20.0	1.01	6135	0.0356
15.0	5.6	9.4	15.1	20.0	1.01	3008	0.0330

1.8b) Zie Moody-diagram; Δ = koud ($\gg 20$ [°C]), \circ = warm ($\gg 56$ [°C]):

1.8c)

1.7a) Bij hoge temperatuur is de viscositeit zo laag, dat ook bij heel lage snelheid de stroming nog steeds turbulent is (te hoge **Re**). Hierdoor is het niet of nauwelijks mogelijk om de stroming in het omslag-gebied of in het laminaire gebied in te stellen.

1.7b) In het omslag-gebied wisselen de laminaire- en de turbulente stromingsvorm elkaar af. Als de stroming turbulent wordt zorgt het stijl verlopende snelheidsprofiel in de buurt van de wand voor een hoge wandschuifspanning ($\hat{\sigma}_w = \zeta(du/dr)_w$). Hierdoor remt de stroming af en de snelheid daalt; het **Re**-getal wordt ook iets kleiner en de stroming wordt dus laminair. Bij het parabolische profiel van de laminaire stroming hoort een lagere wandschuifspanning, waardoor de snelheid weer toeneemt, etc. De drukval **Δp** fluctueert t.g.v. het bovenstaande en is daardoor moeilijk als één getal af te lezen.

Uitwerking proefopstelling 2

2.8a) $p_0 = 20$ [mm WK]

i	$p_0 - p_i$ in [mmWK]	$(p_0 - p_i)$ na correctie	$[\sqrt{(\Delta p) \cdot d^2}]_i$	$[\sqrt{(\Delta p) \cdot d^2}]_i$ na correctie
1	1.3	1.5	3450	3700
2	2.0	2.2	3540	3710
3	3.3	3.5	3680	3790
4	5.8	6.0	3850	3920
5	10.1	10.3	3890	3930
u	20.0	20.2	4020	4040
			S.D. = 220	S.D. = 135

In de laatste kolom staat de gecorrigeerde waarde van $[\sqrt{(\Delta p) \cdot d^2}]_i$. De standaarddeviatie van dit laatste rijtje is ruim 60 % kleiner dan van het ongecorrigeerde rijtje. De correctie was dus zinvol! De gemiddelde waarde van het ongecorrigeerde rijtje is 3740 met daarin een afwijking van ca 8 %. De gemiddelde gecorrigeerde waarde is 3850. De maximale afwijking hierin is ca 5 %, wat niet onredelijk groot is.

r [mm]	p [mm WK]
0 < r < 13.0	20.0
13.0	20.0
13.25	19.9
13.5	19.8
13.75	19.5
14.0	18.8
14.25	16.4
14.5	11.2
14.75	4.8
15.0	0.5

2.8b)

Het linkerlid wordt:

$$r_i^2(2 p_0 - p_1) = \left(\frac{55}{2}\right)^2(20 + 1.5) \approx \underline{16300} \text{ [mm}^2 \cdot \text{mm WK]}$$

De eerste term in het rechterlid wordt:

Install Equation Editor and double-click here to view equation.

De tweede term in het rechterlid wordt:

Install Equation Editor and double-click here to view equation.

Daarmee wordt het rechterlid in het totaal gelijk aan: $7460 + 8420 \gg \mathbf{15900}$ [mm².mm WK], wat ongeveer 2.5 % minder is dan het linkerlid ($\mathbf{16300}$ [mm².mm WK]). Deze afwijking is in overeenstemming met de meetnauwkeurigheid.

2.8c)

2.7a) Aan de wand geldt de hechtconditie, dus $v = 0$.

2.7b) Aan de wand wordt nog een snelheid van $4\ddot{O}0.5 = 2.8$ [m/s] gemeten. Dit kan worden verklaard uit het feit dat het instrument, i.v.m. zijn eindige afmetingen,

niet in staat is om in een punt te meten (dus ook nog een beetje in de grenslaag meet).

- 2.7c)** Uit het bovenstaande blijkt dat het instrument aan de wand niet juist meet. Het beste kan dus de theoretische waarde, $v = 0$, worden gebruikt.

Uitwerking proefopstelling 3:

$$p_0 = 9 \text{ [mm WK]}$$

$$p_b \gg p_c \gg p_d \gg p_e \gg -6.8 \text{ [mm WK]}$$

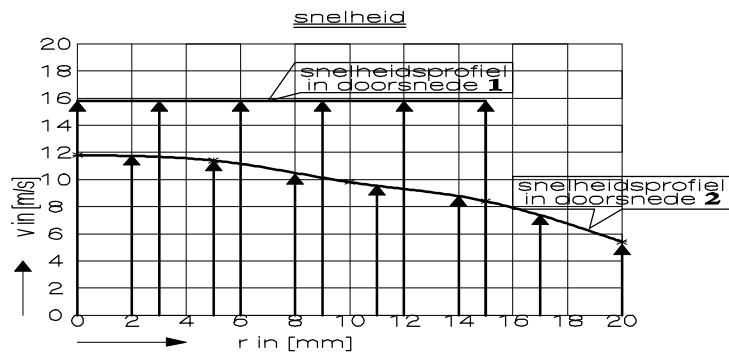
$$v_1 \gg 4\ddot{O}(p_0 - p_b) = 15.9 \text{ [m/s];}$$

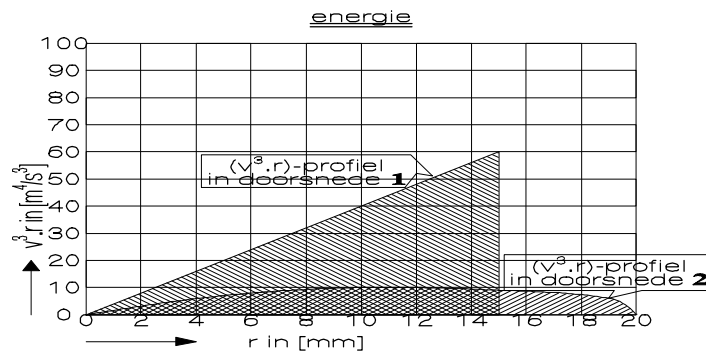
$$\text{met de totaaldrukbus gemeten: } v_1 = 4\ddot{O}(p_{\text{tot}} - p_b) = 15.5 \text{ [m/s].}$$

De eerste methode is de nauwkeurigste, want de totaaldrukbus verstoort de stroming; neem daarom: $v_1 = 15.9 \text{ [m/s]}$.

Metingen in doorsnede 2:

r in [mm]	p_{tot} in [mm WK]	v_2 in [m/s]
0	8.9	11.9
5	8.1	11.4
10	6.1	9.9
15	4.4	8.4
20	1.6	5.1





3.8b)

Install Equation Editor and double-click here to view equation.

Eerste term in het linkerlid van (3.6):

Install Equation Editor and double-click here to view equation.

Met $p_1 = p_b = -6,8 \cdot 9,81 = -66,7$ [Pa] en $p_2 = 0$ wordt de tweede term in het linkerlid:

Install Equation Editor and double-click here to view equation.

De eerste term in het rechterlid wordt m.b.v. de formule van Simpson:

Nu alle termen in vgl. (3.6) bekend zijn, kan de dissipatie worden berekend uit:

Install Equation Editor and double-click here to view equation.

3.8c)

Install Equation Editor and double-click here to view equation.

De temperatuurstijging wordt:

3.8d)

3.7a) Massabalans: geen invloed.

Install Equation Editor and double-click here to view equation.

Impulsbalans: term verwaarloosd, n.l.:

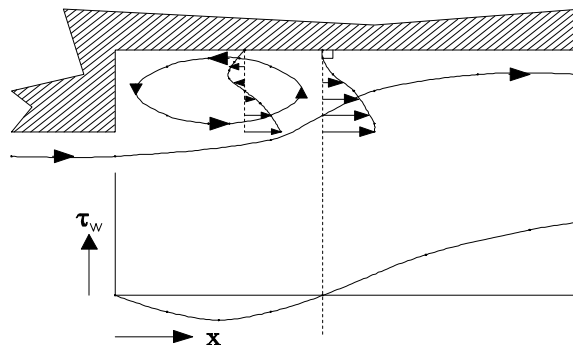
Install Equation Editor and double-click here to view equation.

Energiebalans: geen invloed, want de term:

Wegens: $v_w = 0$ (hechtconditie!)

3.7b)

3.7c) Bij een diffusor vindt geen wervelvorming plaats, want door de geleidelijke overgang treedt geen loslating en terugstroming op. De tophoek mag echter niet groter zijn dan ca 8° anders wordt de drukgradiënt te groot en treedt *wel* loslating en terugstroming en dus dissipatie op!



Tot slot:

Tot aan het verschijnen van deze handleiding vormden de hierin besproken proefopstellingen een onderdeel van de studie Werktuigbouwkunde & Maritieme Techniek in het tweede studiejaar. Deze proeven werden toen aangeduid met SI, SII en SIII. Inmiddels wordt het practicum achterhaald door het projectonderwijs en zullen de opstellingen een ander doel gaan dienen. Enige tijd geleden hield ik onder de studenten die het practicum voltooiden een enquête teneinde de studeerbaarheid te toetsen en om een indruk te krijgen hoe de stof naar de studenten toe overkomt. Ter wille van de volledigheid heb ik deze enquête en de resultaten ervan hier integraal opgenomen.

Enquête WP 2 (werktuigkundig practicum in het 2^e studiejaar) - Stromingsleerproeven:

De drie instructie-opstellingen SI, SII en SIII vormen een praktische illustratie van de theorie die behandeld wordt bij het vak Stroming en Warmteoverdracht I (wb1220).

De basis van dit vak en van de stromingsleer in het algemeen, vormen de behoudswetten van massa, impuls en energie. Voor een incompressibele, stationaire eenfase-stroming is het getal van Reynolds het enige bepalende kental. Dit kental geeft de verhouding van traagheidskrachten en viskeuze krachten in de stroming. Als basis voor het practicum is daarom gekozen voor de behoudswetten en het kental van Reynolds. Proef S I illustreert hoe het kental van Reynolds de omslag van laminaire- naar turbulente stroming en de drukval in een pijpstroming bepaald. Bij proef S II komen massabalans en impulsbalans aan de orde en bij proef S III massabalans en energiebalans.

Hieronder volgen een aantal vragen waarop we, ter evaluatie van het practicum, graag een antwoord willen hebben. Na afloop van de proef kun je de vragen beantwoorden die op die proef betrekking hebben (vraag 5 en 8). Na de nabespreking dan graag het ingevulde enquête-formulier, zonder naam, terug leggen op de tafel bij de inschrijving. Bij elk vraag staan de nummertjes 1 t/m 5 aangegeven. 1 betekent "geheel oneens" en 5 betekent "geheel eens", 2, 3 en 4 iets daartussen. De bedoeling is steeds 1, 2, 3, 4 of 5 aan te kruisen.

- 1.** Vind je dat de proeven een goede illustratie vormen van de bij S.W.O. I behandelde stof?
1 2 3 4 5
- 2.** Bij de meetinstrumenten is bewust gekozen voor eenvoudige technieken, zodat je goed kan zien wat er gebeurt. Vind je deze keuze terecht?
1 2 3 4 5
- 3.** Om de studielast voor één proef tot één ochtend of middag te beperken is gekozen voor een beperkte verslaglegging. Ben je het hiermee eens?
1 2 3 4 5
- 4.** Ben je het eens met de keuze van de proeven of had je liever andere onderwerpen gezien? (eventueel aan te geven bij opmerkingen).
1 2 3 4 5
- 5.** Zijn de handleidingen duidelijk?
S I: 1 2 3 4 5
S II: 1 2 3 4 5
S III: 1 2 3 4 5
- 6.** Is de begeleiding op de middag zelf voldoende?
1 2 3 4 5
- 7.** Ben je tevreden over de nabespreking?
1 2 3 4 5
- 8.** Is de proef in een ochtend of middag goed te doen?
S I: 1 2 3 4 5
S II: 1 2 3 4 5
S III: 1 2 3 4 5
- 9.** Heb je nog opmerkingen? Graag hieronder of aan de achterkant!

Uitslag van de enquête WPII - Stromingsleer:

Aan deze anonieme enquête namen 88 studenten deel. Het cijfer **3** (dat op een schaal van 1 tot 10 overeenkomt met een 5½) is gerekend als "ontevreden" over dit onderdeel van de enquête.

- 1.** Deze vraag over de aansluiting van de proeven op de, bij S.W.O. I behandelde, stof werd gemiddeld beantwoord met het cijfer **4,06**. Op een schaal van 1 tot 10 komt dit overeen met het cijfer **7,9**. De standaardafwijking in dit laatste getal was **2,4**. Dit laatste zegt iets over de mate waarin door de studenten verschillend werd gedacht over deze vraag. Van de **85** studenten die op deze vraag antwoord gaven deden **64** dat met een 4 of een 5 (tevreden) en **21** met 1, 2 of 3 (niet tevreden).
Samenvattend: **4,06 P 7,9 ± 2,4**. Tevreden **75 %**. Ontevreden **25 %**.
- 2.** Deze vraag over de gekozen opstellingen en de toegepaste (eenvoudige) meettechnieken, werd gemiddeld beantwoord met het cijfer **4,41** wat op een schaal van 1 tot 10 overeenkomt met **8,7**. Standaarddeviatie **2,2**. Van de **88** respondenten waren er **80** tevreden en **8** ontevreden (zie ook bij opmerkingen, vraag 9).
Samenvattend: **4,41 P 8,7 ± 2,2**. Tevreden **91 %**. Ontevreden **9 %**.
- 3.** Deze vraag ging over het verslag, waarvan de omvang, gezien de tijd, beperkt gehouden is. Gemiddeld cijfer **4,47**, wat overeenkomt met een **8,8**. Standaarddeviatie **2,3**. **87** respondenten waarvan **73** tevreden en **14** niet.
Samenvattend: **4,47 P 8,8 ± 2,3**. Tevreden **84 %**. Ontevreden **16 %**.
- 4.** Deze vraag ging over de keuze van de proeven (onderwerpen) en of men daarin eventueel wijziging zou willen zien (zie ook opmerkingen). Gemiddeld cijfer **3,90**, wat overeenkomt met een **7,5**. Standaarddeviatie **2,7**. Van de **82** respondenten waren er **54** tevreden en dus **28** niet.
Samenvattend: **3,90 P 7,5 ± 2,7**. Tevreden **66 %**. Ontevreden **34 %**.
- 5.** Deze vraag heeft betrekking op de duidelijkheid van de handleidingen. In de tabel aan het einde van deze uitslag is onderscheid gemaakt tussen de drie verschillende opstellingen hier alleen de samenvatting van alle drie proeven tezamen. Gemiddeld cijfer **4,34**, overeenkomend met het cijfer **8,5**. Standaardafwijking **2,2**. **88** respondenten waarvan **76** tevreden en **12** ontevreden.
Samenvattend: **4,34 P 8,5 ± 2,2**. Tevreden **86 %**. Ontevreden **14 %**.
- 6.** Deze vraag heeft betrekking het al dan niet krijgen van voldoende begeleiding op de middag zelf. Het gemiddeld oordeel was hier **4,38**, d.w.z. een **8,6** met standaarddeviatie **2,6**. **85** studenten reageerden op deze vraag waarvan **75** tevreden waren en **10** niet.
Samenvattend: **4,38 P 8,6 ± 2,6**. Tevreden **88 %**. Ontevreden **12 %**.
- 7.** Hier wordt gevraagd naar de mate waarin de student tevreden is over de wijze van nabespreken van de resultaten met de begeleider. Gemiddeld oordeel **4,46**, overeenkomend met het cijfer **8,8**, standaarddeviatie **2,7**. Van de **77** studenten die hierop reageerden waren er **67** tevreden over de wijze van nabespreken en **10** niet.

Samenvattend: **4,46 P 8,8 ± 2,7**. Tevreden **87 %**. Ontevreden **13 %**.

- 8.** Tenslotte de vraag over hoe moeilijk of makkelijk het is om de proef in één ochtend of middag helemaal klaar te krijgen. In de tabel is dit uitgesplitst per proef, hier worden de drie proeven samengevat. Het gemiddeld oordeel hierover was **4,43**, d.w.z. een **8,7** met standaarddeviatie **2,6**. **88** reagerende studenten, waarvan **76** tevreden en **12** ontevreden. Samenvattend: **4,43 P 8,7 ± 2,6**. Tevreden **86 %**. Ontevreden **14 %**.

Vraag Nr.	Gemiddeld oordeel	Op schaal 1 tot 10	Standaard-afwijking	Tevreden in %	Ontevreden in %
1.	4,06	7,9	2,4	75	25
2.	4,41	8,7	2,2	91	9
3.	4,47	8,8	2,3	84	16
4.	3,90	7,5	2,7	66	34
5.-S1	4,48	8,8	2,3	87	13
5.-S2	4,10	8,0	2,3	74	26
5.-S3	4,38	8,6	1,9	92	8
Gem.	4,34	8,5	2,2	86	14
6.	4,38	8,6	2,6	88	12
7.	4,46	8,8	2,7	87	13
8.-S1	4,40	8,7	2,8	84	16
8.-S2	4,35	8,5	2,9	81	19
8.-S3	4,60	9,1	2,0	96	4
Gem.	4,43	8,7	2,6	86	14

De omrekening van het gemiddeld oordeel naar de schaal van 1 tot 10 vindt plaats

Install Equation Editor and double-click here to view equation.

volgens:

Het grootste aantal ontevreden studenten bij vraag 4 lijkt enigszins in tegenspraak met het kleinste aantal ontevreden studenten bij vraag 2.

9. Opmerkingen over:

De proeven:

- Leuke proeven, goede proeven (aantal malen genoemd).
- Eens met de keuze van de proeven. Zijn ook proeven met windtunnels of andere (grotere) installaties mogelijk?
- Liever wat meer proeven verplicht stellen maar dan ook meer studiepunten er voor geven. Demonstraties mogelijk?
- Het gebruik van PC's (spreadsheet programma's) bij het practicum zou het practicum wellicht efficiënter maken.

De handleidingen:

- De handleidingen zijn erg duidelijk.

Aansluiting bij het college S.W.O. I:

- Het practicum is een nuttige aanvulling op het college S.W.O. I.
- Liever drie proeven verplicht stellen, dan zou je het vak beter snappen.
- Het practicum is een goede voorbereiding op het tentamen.
- Jammer dat het practicum is ingekort, anders zou je meer kans hebben om te slagen voor S.W.O. I.

Het verslag:

- Een uitgebreider verslag zou het inzicht kunnen verdiepen.

Irritaties:

- Je moet wel eens wachten bij de nabespreking van het verslag (n.l. als de begeleider nog bezig is met de nabespreking met andere studenten). Dat is wel eens een beetje irritant.

Conclusies:

- Over het algemeen is het practicum gunstig beoordeeld met het gemiddeld cijfer $8\frac{1}{2}$ (ter vergelijking het gemiddeld cijfer dat op het practicum wordt gegeven is $7\frac{1}{2}$).
- Studenten die niet (zo) tevreden waren, waren dat meestal over de hele linie. Dit kunnen studenten zijn die stromingsleer niet leuk vinden of in het algemeen erg kritisch zijn ingesteld. Het valt niet te verwachten dat deze studenten tot andere gedachten te brengen zijn door het practicum heel anders in te richten.
- Een aantal studenten lijkt behoefte te hebben aan het werken aan grotere installaties zoals een windtunnel. Ook aan geavanceerde demonstraties lijkt een bepaalde behoefte te zijn. Het gebruik van spreadsheet programma's voor de PC zou volgens een aantal studenten een aantrekkelijk onderdeel van het practicum kunnen zijn.