

**BESTUDEREN VAN HET DRUKPROFIEL
OVER EEN BWR BUNDEL
VOOR ÉÉN- EN TWEE-FASEN STROMING**

K. HOOGENDOORN

BACHELOR EINDPROJECT
TECHNISCHE NATUURKUNDE
TU DELFT

BEGELEIDER
DR. IR. M. ROHDE

PHYSICS of NUCLEAR REACTORS
REACTOR INSTITUUT DELFT
FACULTEIT TNW
TU DELFT

DELFT, 1 FEBRUARI 2008

Samenvatting

In dit Bachelor Eindproject is onderzoek gedaan naar het drukprofiel over de bundel van een boiling water reactor (BWR). Dit onderzoek is gedaan om te onderzoeken over welke lengte de stroming zich herstelt, na verstoring door een spacer, en of deze recovery lengte afhangt van het debiet en/of de luchtfractie. Er is gebruik gemaakt van een modelopstelling, waarbij water en lucht zijn gebruikt in plaats van water en damp. De metingen zijn gedaan bij kamertemperatuur en atmosferische druk.

Er zijn metingen gedaan aan de drukgradiënt met één- en twee-fasen stroming. Bij één-fase stroming is de drukgradiënt gemeten bij vier verschillende water debieten. De Reynolds getallen liggen tussen 3400 en 6000. Vervolgens zijn bij de twee-fasen stroming in totaal negen metingen gedaan. Deze negen metingen bestaan uit drie verschillende totale debieten; namelijk 2480 l/h, 1960 l/h en 1600 l/h. Deze debieten zijn gecombineerd met drie verschillende debieten lucht. De waarden voor de luchtfractie β liggen tussen 0% en 7%.

Bij deze experimenten is voor de recovery lengte 50 mm gevonden met een onzekerheid van 10 mm. Deze lengte hangt niet af van het water- en/of luchtdebiet.

Bij de twee-fasen metingen is ook de chordale luchtfractie gemeten. Dit is gedaan d.m.v. transmissie metingen m.b.v. de gammabron Am 241. Hieruit bleek dat de lucht zich niet goed verspreidt in de horizontale richting van de opstelling. De lucht verspreid zich slechts over 8 van de 36 kanalen.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	1
Inhoudsopgave	2
Inleiding.....	3
Nomenclatuur	4
1 Theorie.....	5
1.1 <i>Stroming in een buis</i>	5
1.2 <i>Eén-fase stroming</i>	6
1.3 <i>Twee-fasen stroming</i>	8
2 Experimentele Opzet.....	9
2.1 <i>De opstelling</i>	9
2.1.1 Afmetingen tabel	11
2.2 <i>Eén-fase stroming</i>	11
2.2.1 Bepaling van de frictie factor f	11
2.2.2 Bepaling van de frictieconstante K van de spacer	13
2.2.3 Diepte van de dip	14
2.2.4 Lengte van de dip.....	14
2.3 <i>Twee-fasen stroming</i>	15
2.3.1 Bepaling chordale luchtfractie	15
2.3.2 Gemiddelde van alfa.....	16
3 Meetresultaten & Discussie	17
3.1 <i>Resultaten drukprofiel één-fase stroming</i>	17
3.1.1 Bepaling van de frictiefactor	18
3.1.2 Vergelijking met Blasius	21
3.1.3 Bepaling van de factor K.....	22
3.2 <i>Resultaten drukprofiel twee-fasen stroming</i>	23
3.2.1 Resultaten luchtfractiemetingen.....	26
3.2.2 Onzekerheid luchtfractiemetingen	28
Conclusies.....	31
Aanbevelingen.....	33
Bibliografie.....	34
Appendix A: Transmissie Metingen	35

Inleiding

Een van de manieren om door middel van kernsplijting electriciteit te produceren is met behulp van een kokend water reactor (boiling water reactor, BWR). In een BWR wordt gebruik gemaakt van uranium-oxide splijtstaven en water als moderator.

General Electrics heeft een nieuw type reactor ontworpen, de ESBWR (Economic Symplified BWR). Om onderzoek te kunnen doen aan deze reactor is een model genaamd GENESIS nagebouwd op het Reactor Instituut Delft (RID) van de TU Delft. In GENESIS zijn geen uranium splijtstaven aanwezig. In plaats daarvan wordt warmteopwekking als gevolg van het splijtingsproces nagebootst met elektrische verwarmingselementen. Bovendien wordt in GENESIS freon 134a als vervanging van water gebruikt.

Een van de factoren die invloed heeft op het splijtingsproces (en dus op de warmte opwekking) is de dampfractie. Vloeibaar water is een veel betere moderator dan damp, dus bij een kleinere dampfractie zal het splijtingsproces beter verlopen en daarmee zal de warmteopwekking toenemen. Om de warmteopwekking in GENESIS zo goed mogelijk na te bootsen is het dus van belang dat de dampfractie in de kern bekend is. De gemiddelde dampfractie wordt bij GENESIS op dit moment bepaald door een impulsbalans over de kern op te stellen en het drukprofiel over de hele kern te meten. Het is echter niet nauwkeurig genoeg om de dampfractie gemiddeld over de hele kern te meten. Om de dampfractie nauwkeuriger te meten moeten op meer locaties drukval metingen gedaan worden, bijvoorbeeld na iedere spacer. De stroming na de spacer wordt echter verstoord door de spacer. Hierbij vertoont het drukprofiel een lokale dip, die zich herstelt na een bepaalde lengte. Deze lengte wordt de recovery lengte genoemd. Wanneer de drukmeter in het verstoorde gebied wordt geplaatst, wordt dus een te lage druk gemeten. Om de dampfractie goed te bepalen, moet de druk buiten de recovery lengte gemeten worden.

Het doel van dit Bachelor Eindproject is om te onderzoeken over welke lengte de stroming zich herstelt en of deze recovery lengte afhangt van het debiet en/of de dampfractie. Dit onderzoek is gedaan met behulp van een proefopstelling waarbij gebruik is gemaakt van water en lucht in plaats van freon 134a en freon 134a damp.

Met de resultaten van dit Bachelor Eindproject kunnen in GENESIS de locaties voor de drukmetingen bepaald worden, zodat de drukmetingen buiten de verstoring door de spacer gedaan worden.

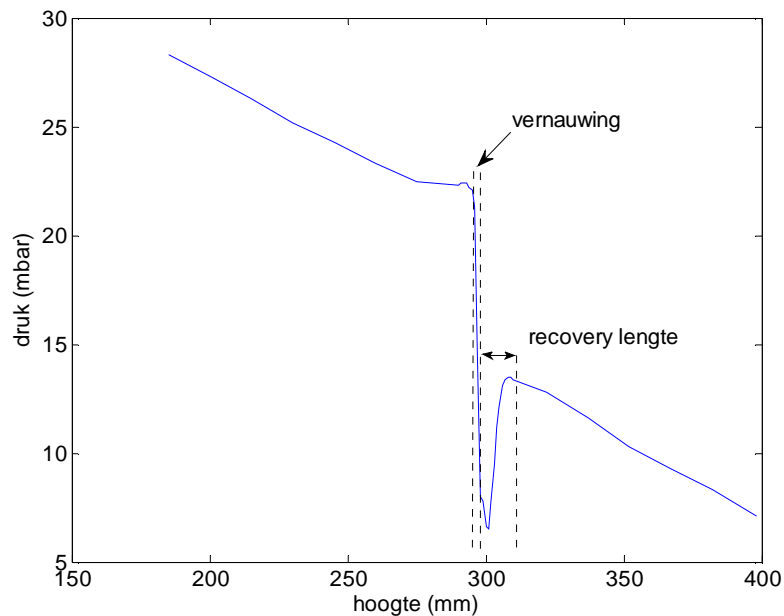
Nomenclatuur

A , oppervlak (m^2)
 b , breedte (m)
 D , hydraulische diameter (m)
 e_{fr} , energie dissipatie (J / kg)
 f , frictie factor f
 g , valversnelling (m / s^2)
 G , maximale massaflux
 I , intensiteit (s^{-1})
 j , volumetrische flux (m / s)
 K , frictie factor K
 l , lengte (m)
 L , lengte (m)
 N , aantal staven
 p , druk (Pa)
 Re , Reynolds getal
 v , snelheid (m / s)
 Q , debiet (m^3 / s)
 x , kwaliteit van de twee-fasen stroming
 z , recovery lengte (m)
 z , hoogte (m)
 α , statische luchtfractie
 β , dynamische luchtfractie
 φ , debiet (kg / s)
 ρ , dichtheid (kg / m^3)
 μ , dynamische viscositeit ($kg / (m \cdot s)$)

1 Theorie

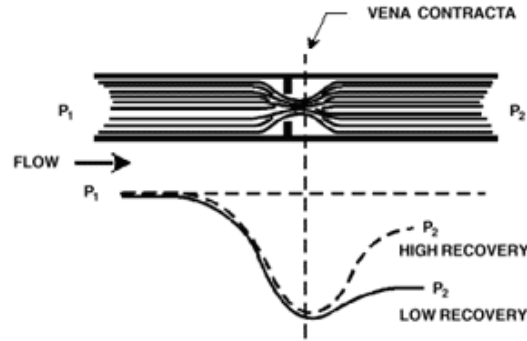
1.1 Stroming in een buis

Bij stroming in een buis neemt, als de stroming niet versnelt en de diameter van de buis niet verandert, de druk af in de stromingsrichting als gevolg van dissipatie. Bij het passeren van een vernauwing wordt de stroming verstoord. Hierbij is sprake van een extra drukval als gevolg van extra dissipatie. Daarnaast vindt een ander verschijnsel plaats. Doordat het stromingsoppervlak kleiner is in de vernauwing neemt de snelheid toe en de druk af. Hierdoor ontstaat een lokale dip in het drukprofiel. Na de vernauwing herstelt de stroming zich over een bepaalde afstand, de recovery lengte. Hierbij gaat energie als gevolg van dissipatie definitief verloren. Dit is te zien in Figuur 1.1. Hier is het resultaat te zien van één van de verrichte metingen. In deze figuur is x de afstand in de stromingsrichting.



Figuur 1.1: Drukprofiel in een buis bij een vernauwing

In Figuur 1.1 is te zien dat het dieptepunt van de dip in het drukprofiel zich voorbij de werkelijke vernauwing bevindt. Dit heeft te maken met het feit dat voorbij de werkelijke vernauwing zich de zogeheten vena contracta bevindt. Dit is de locatie waar het stromingsoppervlak het kleinst is. De locatie van de vena contracta met de bijbehorende druk is weergegeven in Figuur 1.2. In deze figuur is de frictie als gevolg van de wand buiten beschouwing gelaten.



Figuur 1.2: Stroming langs een vernauwing

Na de vena contracta herstelt de stroming zich afhankelijk van de frictie die verloren is gegaan in de vernauwing tot een bepaalde druk lager dan de oorspronkelijke druk.

Bij een high recovery is p_2 groot ten opzichte van p_1 en bij een low recovery is p_2 klein ten opzichte van p_1 . Bovendien ontstaat er vlak voor de vernauwing een piek in de druk als gevolg van de ophoping van het water dat door de vernauwing geperst moet worden.

De afstand (z) van de vernauwing tot aan het punt waar de stroming volledig is hersteld wordt voor turbulente stroming gegeven door [1]

$$\frac{z}{D} = 25 \text{ tot } 40 \quad (1.1)$$

Met D de hydraulische diameter.

1.2 Eén-fase stroming

Eén-fase stroming is stroming waarbij de stroming bestaat uit ofwel een vloeistof of gas waarbij geen fase overgang plaatsvindt. In het een-dimensionale geval bij steady state voldoet deze stroming aan de vergelijking van Bernoulli die als volgt weergegeven kan worden.

$$0 = \dot{\varphi}_m \left[\frac{1}{2} v_1^2 + \frac{p_1}{\rho} + gz_1 - \frac{1}{2} v_2^2 - \frac{p_2}{\rho} - gz_2 \right] - \dot{\varphi}_m \sum e_{fr}$$

Hierin is $\dot{\varphi}_m$ de flow (kg/s), v de snelheid (m/s), p de druk (Pa), ρ de dichtheid (kg/m^3), z de hoogte (m) en e_{fr} (J/kg) de energie dissipatie.

e_{fr} kan worden opgesplitst in dissipatie als gevolg van de wand

$$e_{fr} = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} v^2$$

en dissipatie als gevolg van een obstakel

$$e_{fr} = K \frac{1}{2} v^2$$

Hierin is f de frictie factor, K de frictie verlies factor, L de lengte (m), v de snelheid (m/s) en D de hydraulische diameter gegeven door

$$D = 4 \frac{A}{S}$$

met A het stromingsoppervlak en S de stromingsomtrek.

De factoren f en K zijn typerend voor de geometrie en de wandruwheid van de buis. Bovendien is de factor f typerend voor de stroming in de buis.

De vergelijking van Bernoulli kan als volgt worden omschreven

$$p_1 - p_2 = \rho g (z_2 - z_1) + \rho \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \sum_i K_i \rho \frac{v_i^2}{2} + \sum_j f_j \rho \frac{L}{D} \frac{v_j^2}{2} \quad (1.2)$$

Hierbij moeten f en K experimenteel bepaald worden.

In Todreas en Kazimi [1] wordt voor turbulente stroming in een gladde buis met $Re < 30.000$ voor de frictie factor de Blasius relatie gegeven

$$f_{Blasius} = 0.316 Re^{-0.25}$$

Hierin is Re het Reynolds getal gegeven door

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$$

Het drukverlies over een spacer wordt gegeven door [1]

$$\Delta p_s = C_s \left(\frac{\rho v_s^2}{2} \right) \left(\frac{A_s}{A_v} \right)$$

Hierin is Δp_s het drukverlies (Pa) over een spacer, C_s een constante, v_s de snelheid (m/s), A_s het stromingsoppervlak (m²) binnen de spacer en A_v het stromingsoppervlak buiten de spacer.

Het drukverlies over het gebied tussen de spacers wordt gegeven door [1]

$$\Delta p = f \frac{NG^2}{2\rho} Z$$

Met N het aantal staven, G de maximale massa flux en Z een correctie factor die afhangt van de rangschikking van de staven.

1.3 Twee-fasen stroming

Er zijn verschillende methoden om de verhouding in debiet tussen twee fasen in een stroming te definiëren. Een daarvan is de verhouding tussen de stromings oppervlakken van de twee-fasen. De fractie van het stromingsoppervlak die een bepaalde fase beslaat wordt gedefinieerd door

$$\{\alpha_k\} \equiv \frac{A_k}{A}$$

Hierin is $\{\alpha_k\}$ de fase fractie, A_k het stromingsoppervlak (m^2) van de fase en A het totale stromingsoppervlak (m^2). Deze fase fractie is een statische eigenschap van de stroming.

Daarnaast wordt de volumetrische stromings ratio $\{\beta\}$ als volgt gedefinieerd

$$\{\beta_z\} = \frac{Q_{kz}}{Q_{kz} + Q_{k'z}} = \frac{\{j_k\}_z}{\{j\}_z}$$

Hierin is Q het debiet (m^3/s) en j de volumetrische flux (m/s) beiden gedefinieerd in de z-richting. De factoren α en β zijn als volgt aan elkaar gerelateerd

$$\frac{1-\{\alpha\}}{\{\alpha\}} = \frac{1-\{\beta\}}{\{\beta\}} S$$

met S de slip ratio. Deze hangt af van het verschil in snelheid tussen de fasen en van de radiële verdeling van de lucht.

In het homogeneous equilibrium model (HEM) wordt aangenomen dat de snelheden, temperatuur en druk van de verschillende fasen gelijk zijn.

Volgens het HEM geldt dat

$$\{\alpha\} = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho_g}{\rho_f}}$$

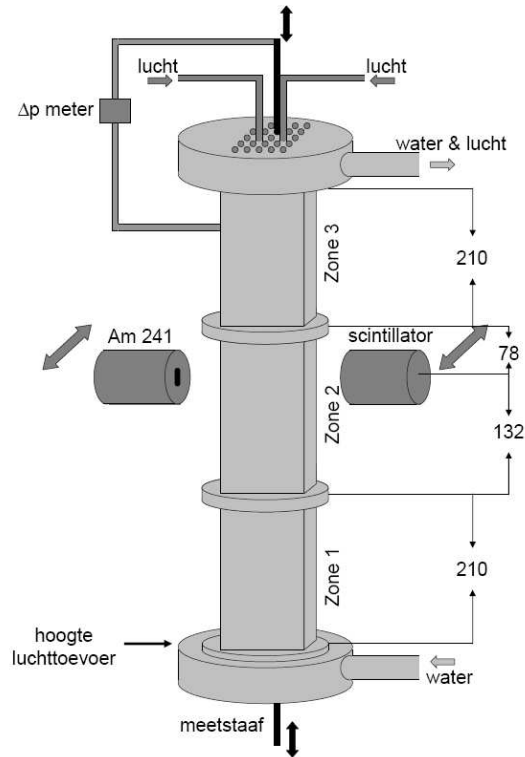
met x de kwaliteit. Deze vergelijking kan als volgt worden omgeschreven

$$x = \frac{1}{1 + \frac{1-\{\alpha\}}{\{\alpha\}} \frac{\rho_f}{\rho_g}}$$

2 Experimentele Opzet

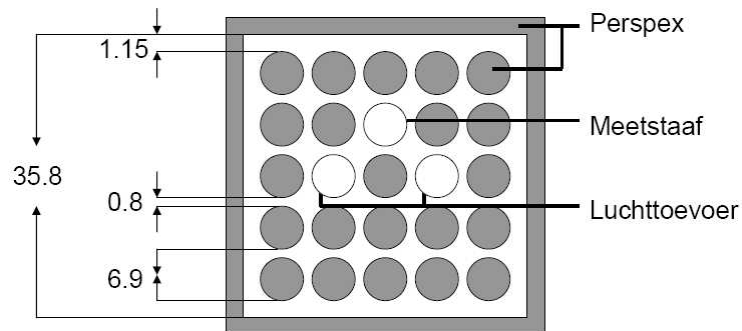
2.1 De opstelling

De metingen zijn gedaan met een vierkante buis van Perspex met afmetingen 630x5x5 cm met daarin 25 staven met een diameter van 6.1 mm, die gerangschikt zijn in een 5x5 matrix, zoals te zien in het schematische overzicht in Figuur 2.1. De afmetingen zijn weergegeven in mm.



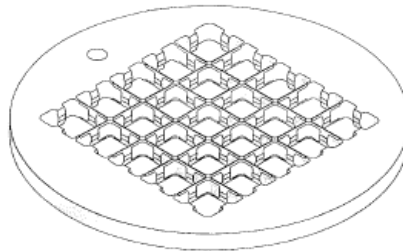
Figuur 2.1: De opstelling schematisch weergegeven

Het bovenaanzicht van de opstelling met de afmetingen in mm is weergegeven in Figuur 2.2.



Figuur 2.2: Bovenaanzicht van de opstelling met afmetingen

De wand en de staven zijn van Perspex, behalve de meetstaaf en de staven om lucht toe te voeren. Dit zijn holle staven gemaakt van aluminium. De staven worden gescheiden door drie spacers. Een tussen zone 1 en 2, een tussen zone 2 en 3 en een na zone 3. De lengte van de zones is telkens 210 mm. In Figuur 2.3 is een schets weergegeven van een spacer.



Figuur 2.3: Een spacer

Aan de boven- en onderkant van de opstelling zitten de staven gefixeerd in een messing plaatje en het Perspex. Het drukverschil wordt gemeten met de in hoogte verstelbare meetstaaf. In Figuur 2.1 is dit de zwarte staaf. In deze holle staaf zit een gaatje met een diameter van 1 mm. Ter hoogte van het gaatje wordt de druk gemeten. Aan de bovenkant is de meetstaaf verbonden met een drukverschil meter, die weer verbonden is met een referentiepunt aan de zijkant van de opstelling. De drukverschilmeter is een honeywell PX26 drukverschilmeter met een onzekerheid van 1%. Dit signaal wordt 70x versterkt, waarna een output geldt van 10mV/mbar.

Het water stroomt in opwaartse richting door de opstelling. De rotameter om het waterdebiet te meten heeft een bereik van 0 tot 2500 l/h en een onzekerheid van 10 l/h. De lucht wordt aangevoerd via de twee luchtbuizen. Onderin deze buizen zitten vier gaatjes met ieder een diameter van 1 mm, waaruit de lucht in kleine bellen wordt aangevoerd. De rotameter om het luchtdebiet te bepalen heeft een bereik van 0 tot 250 l/h en een onzekerheid van 12,5 l/h.

Om de chordale luchtfractie te meten is een gammabron Am 241 met een activiteit van 11 GBq gebruikt. Deze is geplaatst in een houder waarmee d.m.v. een 70 mm lang diafragma met een doorsnede van 2x8mm een smalle bundel wordt gecreëerd.

Voor de detectie van gammastraling is een BGO scintillatie kristal gebruikt van het merk Scionix. De scintillator wordt gevoed met een Canberra 3002 hoogspanningsvoeding met een spanning van 933V. Het signaal uit de scintillator wordt 200x versterkt door een Ortec 570 versterker. M.b.v. de Ortec 550a single channel analyser (SCA) wordt het spectrum van energieën gefilterd, zodat slechts een bepaalde bandbreedte aan energieën overblijft.

De gammabron en de scintillator worden tegelijk horizontaal verplaatst m.b.v. een stappenmotor. Deze stappenmotor heeft een nauwkeurigheid van 200 stappen per omwenteling en dit komt na omzetting van rotatie naar translatie overeen met 1mm per omwenteling. De metingen worden verwerkt met een National Instruments PCI 6229 data aquisition kaart. De PCI 6229 kan zowel digitale als analoge data op hetzelfde moment verwerken met dezelfde samplefrequentie.

2.1.1 Afmetingen tabel

Diameter staaf	6.1	+/-	0.1mm
Pitch	6.9	+/-	0.1mm
Doorsnede buis	35.8	+/-	0.3mm
Stromings oppervlak	552	+/-	36mm ²
Stromings omtrek	622	+/-	36mm
Hydraulische diameter	3.55	+/-	0.03mm

2.2 Eén-fase stroming

Om tot een werkformule voor het drukverschil als functie van de frictiefactoren K en f te komen, wordt de vergelijking (1.2) gebruikt. Hierbij wordt aangenomen dat de snelheid van het water in de opstelling constant is als functie van de hoogte.

De drukverschilmeter bevindt zich op constante hoogte en er is aangenomen dat de dichtheid in de waterkolom constant is als functie van de hoogte. Hierdoor verandert de netto hydrostatische druk niet als functie van de hoogte van het gaatje in de meetbuis.

Het drukverschil tussen twee hoogten in de opstelling kan nu als volgt uitgedrukt worden.

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \sum_i K_i \frac{v_{i_{ref}}^2}{2} + \sum_j f_j \frac{L}{D_h} \frac{v_{j_{ref}}^2}{2} \quad (2.1)$$

2.2.1 Bepaling van de frictie factor f

Om de frictie factor f te bepalen wordt gekeken naar de drukgradiënt over een recht stuk. Omdat er in dit gebied geen obstakels zijn, wordt alleen de drukval als gevolg van een gladde wand in beschouwing genomen.

$$\Delta p = f \rho \frac{L}{D_h} \frac{v_{ref}^2}{2}$$

Zodat de frictiefactor als volgt bepaald kan worden

$$f_{Exp} = \frac{2D_h \Delta p}{\rho v_{ref}^2 \Delta h} \quad (2.2)$$

Met behulp van de vergelijking (2.2) kan de waarde voor de constante f experimenteel bepaald worden door de drukgradiënt te meten bij verschillende debieten. Daarbij moet rekening gehouden worden met de verstoring door de spacers. De afname in de druk in dit gebied is lineair met de hoogte en de frictiefactor kan bepaald worden door dit gedeelte van de grafiek lineair te fitten. Dit is gedaan m.b.v. het programma Origin.

Hiermee is de afgeleide van de lijn B [mV/mm] bepaald. Hiermee is

$$\frac{\Delta p}{\Delta h} = 10^3 \eta B$$

met η is 10 mV/mbar.

Voor de onzekerheid van f geldt [4]

$$\left(\frac{u(f)}{f} \right)^2 = \left(\frac{u(D)}{D} \right)^2 + \left(2 \frac{u(v_{ref})}{v_{ref}} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho)}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{u(B)}{B} \right)^2$$

Omdat voor v_{ref} geldt [4]

$$v_{ref} = \frac{\phi}{A}$$

geldt voor $u(v_{ref})$

$$\left(\frac{u(v_{ref})}{v_{ref}} \right)^2 = \left(\frac{u(\phi)}{\phi} \right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A} \right)^2$$

Hierin is

$$A = l \cdot b$$

Dus geldt

$$\left(\frac{u(A)}{A} \right)^2 = \left(\frac{u(l)}{l} \right)^2 + \left(\frac{u(b)}{b} \right)^2$$

2.2.2 Bepaling van de frictieconstante K van de spacer

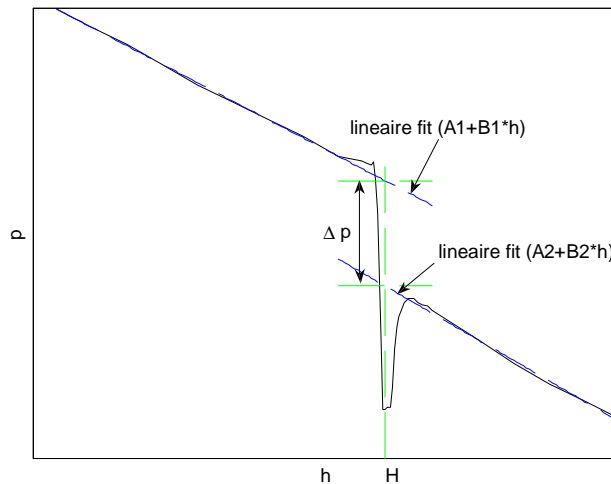
Voor de bepaling van de K-waarde is gebruik gemaakt van vergelijking (2.1). Hierbij wordt het de drukval als gevolg van een spacer gegeven door

$$\Delta p = K \rho \frac{v_{i_{ref}}^2}{2} \quad (2.3)$$

Om Δp te bepalen is de lineaire fit van de gemeten waarden van de druk van twee aangrenzende zones gebruikt en vervolgens is het drukverschil op de plaats van de spacer bepaald. Dit is gedaan m.b.v. (zie Figuur 2.4)

$$\Delta p = (A_1 + B_1 H) - (A_2 + B_2 H)$$

Met A het snijpunt met de y-as en B de richtingscoëfficiënt van de lineaire fit door de gemeten waarden van de druk van de aangrenzende zones.



Figuur 2.4: Bepaling drukval als gevolg van een spacer

Deze drukverschilmetingen bij verschillende flows zijn uitgezet tegen v , waarna de grafiek is gefit met

$$y = a \cdot x^2$$

Hieruit kan vervolgens de waarde voor K afgeleid worden (zie vergelijking (2.3))

$$K = 2 \frac{a}{\rho} \quad (2.4)$$

Voor de onzekerheid in K geldt

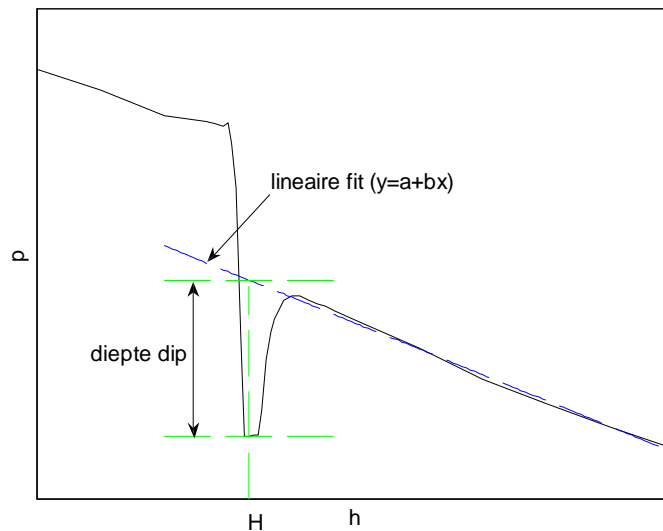
$$\left(\frac{u(K_T)}{K_T}\right)^2 = \left(2\frac{u(v_{ref})}{v_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{u^2(p_1) + u^2(p_2)}}{p_1 + p_2}\right)^2$$

De gemeten spanningen voor de druk in mV zijn uitgezet tegen de hoogte in mm en gefit met de lijn $y = a + bx$. Voor de onzekerheid van de druk geldt nu

$$(u(p))^2 = (u(a))^2 + \left(\left(\frac{u(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{u(h)}{h}\right)^2\right)^2$$

2.2.3 Diepte van de dip

De diepte van de dip is bepaald met behulp van een lineaire fit ($y = a + bx$) door de meetpunten in de zone na de de spacer. Vervolgens is het verschil bepaald tussen het minimum van de dip en de waarde van de lineaire fit ter hoogte H van de dip (zie Figuur 2.5).



Figuur 2.5: Bepaling van de diepte van de dip

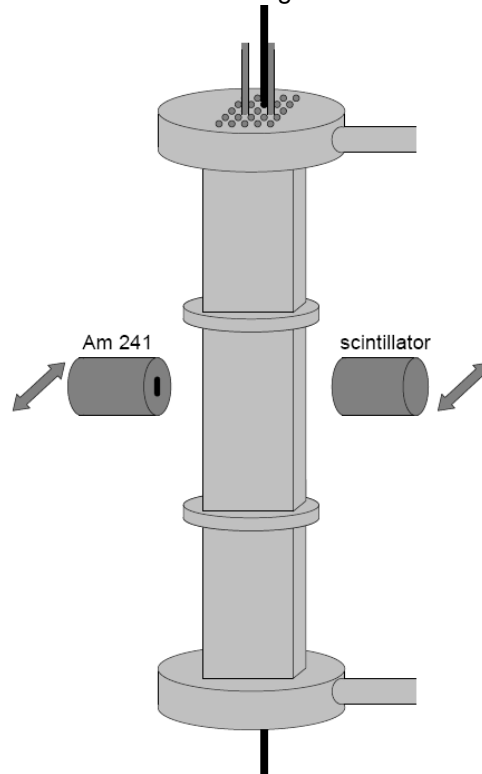
2.2.4 Lengte van de dip

De lengte van de dip wordt bepaald met behulp van de drukgradiënt. Op het gebied waar de stroming zich heeft hersteld is de drukgradiënt constant. Het einde van de dip komt dus overeen met het punt vanaf waar de drukgradiënt weer constant is. In theorie wordt de lengte van de dip gegeven door $z/D = 25$ tot 40 (zie vergelijking (1.1)). De hydraulische diameter D is 3.55 mm. Verwacht wordt dus dat de lengte van de dip maximaal ligt tussen $8,9$ cm en $14,2$ cm.

2.3 Twee-fasen stroming

2.3.1 Bepaling chordale luchtfractie

Om de chordale luchtfractie te bepalen wordt een gammabron met als radioactieve stof Americium-241 gebruikt. Deze wordt op een vaste verticale positie en variabele horizontale positie geplaatst ten opzichte van de opstelling, zoals te zien is in Figuur 2.6.



Figuur 2.6: Opstelling met gammadetectie

Om de chordale luchtfractie te bepalen wordt voor aanvang van de meting de transmissie gemeten bij 0 % en 100 % luchtfractie. Vervolgens worden een water flow en een lucht flow ingesteld, waarna de transmissie van de meting bepaald wordt. Voor extra zekerheid wordt aan het eind van de meting een tweede transmissie gemeten om te controleren of de chordale luchtfractie tijdens de meting constant is gebleven. Om de chordale luchtfractie te berekenen, wordt de volgende vergelijking gebruikt [5]

$$\frac{I(d)}{I(0)} = e^{-\mu d}$$

Hierbij is $I(0)$ de intensiteit van de gammastraling zonder absorberend materiaal tussen de bron en de detector. $I(d)$ is de intensiteit met absorberend materiaal en μ de absorptiecoëfficiënt.

Hieruit volgt de luchtfractie

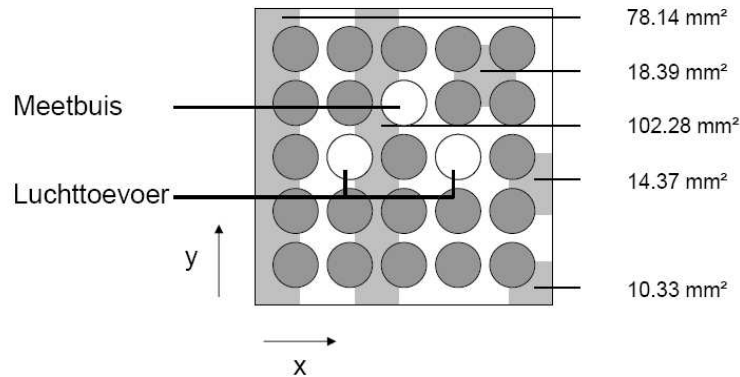
$$\alpha(lucht) = 100 - \frac{\ln I(100) - \ln I(\alpha)}{\ln I(100) - \ln I(0)} * 100\% \quad (2.5)$$

met $I(100)$, $I(0)$ en $I(\alpha)$ respectievelijk de transmissies bij 100% damp, 0% damp en meting % damp.

2.3.2 Gemiddelde van alfa

Met behulp van de transmissie metingen zijn de waarden van de transmissie van de zes kanalen tussen de staven bepaald. De transmissie metingen zijn gedaan in de horizontale x- en y-richting (zie Figuur 1.1).

Op basis van deze meetresultaten wordt een over het stromingsoppervlakte gemiddelde alfa berekend.



Figuur 2.7: Doorsnede bundel met oppervlakten

3 Meetresultaten & Discussie

3.1 Resultaten drukprofiel één-fase stroming

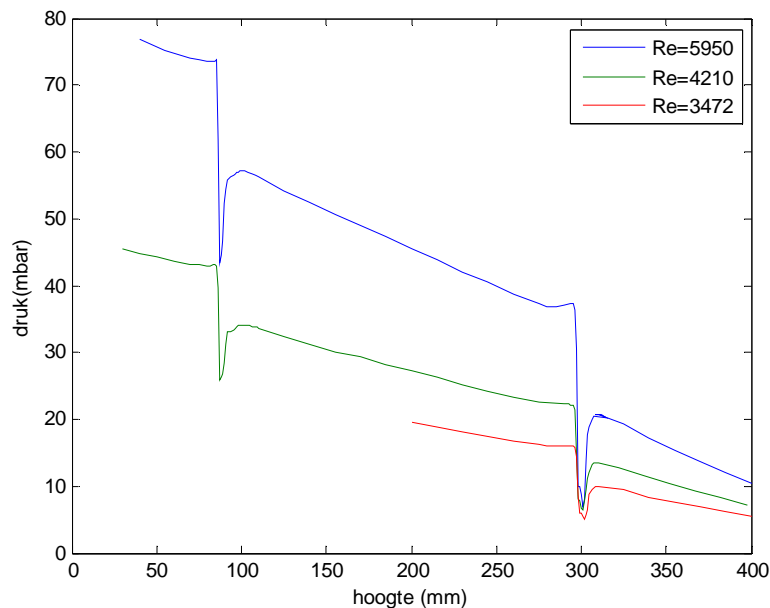
Er zijn vijf verschillende metingen verricht met vier verschillende debieten water. Drie metingen over alleen de bovenste spacer en twee metingen over beide spacers. In Tabel 3-1 is een overzicht weergegeven van de uitgevoerde één-fase metingen.

Meting nr	Debiet (l/h)	Re	Aant spacers
1	3337	5950	2
2	2362	4210	2
3	1948	3472	1
4	2416	4307	1
5	3337	5950	1

Tabel 3-1: Overzicht van de één-fase metingen

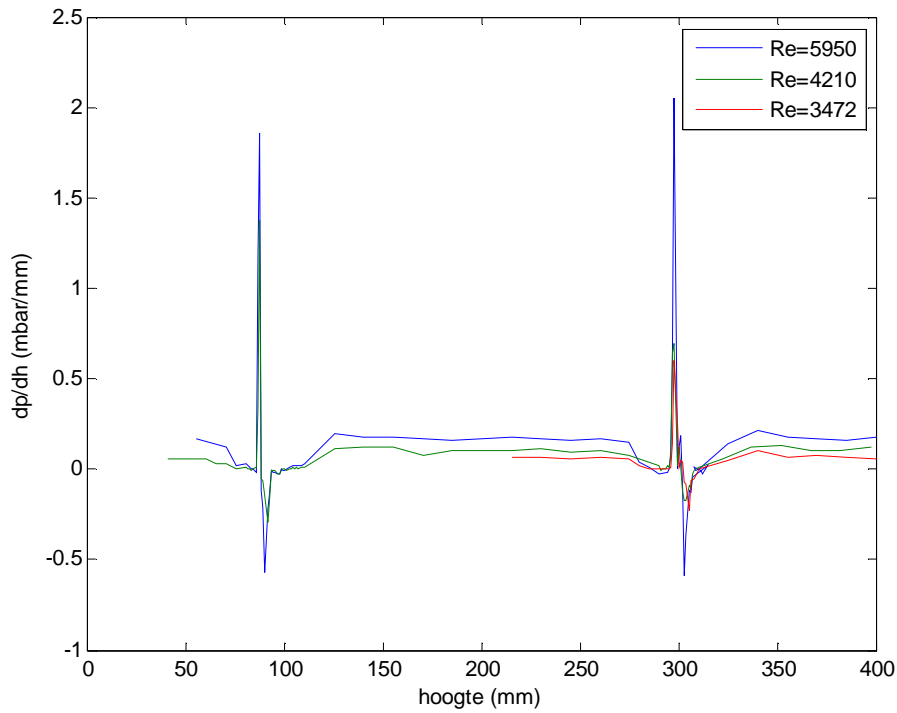
In Figuur 3.1 zijn van meting 1,2 en 3 de drukmetingen uitgezet tegen het Reynolds getal. Te zien is dat hoe groter het Reynolds getal des te groter is het drukverschil per hoogte eenheid. De piek vlak voor de spacer neemt toe met het Reynolds getal en voor de dip na de spacer geldt hetzelfde.

Wat ook opvalt is dat de dip niet of nauwelijks langer wordt naarmate het Reynolds getal toeneemt. De stroming herstelt zich dus over dezelfde afstand onafhankelijk van stroomsnelheid. Het feit dat de recovery lengte niet afhankelijk is van Reynolds getal komt overeen met de verwachting op basis van vergelijking (1.1).



Figuur 3.1: Drukprofiel één-fase

Om de recovery lengte van de één-fase metingen te bepalen, zijn de drukgradiënten in Figuur 3.2 geplot. Uit de figuur is af te leiden dat de recovery lengte voor de één-fase metingen 50 mm +/- 10 mm is.



Figuur 3.2: Drukgradiënten over de lengte van de bundel (één-fase)

3.1.1 Bepaling van de frictiefactor

Van de opstelling is bij verschillende Reynolds getallen de frictiefactor f van de opstelling bepaald. Deze zijn in Figuur 3.3 uitgezet als functie van het Reynolds getal. De verschillende kleuren geven de verschillende zones in de opstelling aan. De metingen zijn gedaan voor Reynolds getallen tussen de 2000 en 4000. Dit is in het transitiegebied tussen laminaire en turbulente stroming. Het voorspellen van de frictiefactor is goed mogelijk in het laminaire gebied en in het turbulente gebied, maar in de transitie zone is het veel minder goed gedefinieerd. De gemeten waarden zijn vergeleken met het model van Blasius voor een gladde ronde buis. Alle waarden voor de frictiefactor f liggen nog onder de door Blasius voorspelde waarde. In principe kan de frictiefactor f alleen boven de door Blasius voorspelde waarde liggen. Dat in deze opstelling is sprake van een andere geometrie zou een mogelijke verklaring kunnen zijn. Wanneer een hogere zone van de opstelling wordt vergeleken met een lagere zone is te zien dat de waarden voor de frictiefactor f verder verwijderd van de Blasius waarden voor een gladde buis komen te liggen.

In Figuur 3.4 hebben alle zones dezelfde kleur. Om een voorspelling te kunnen doen over de ffrictiefactor f zijn de meetpunten gefit met behulp van Matlab met de functie

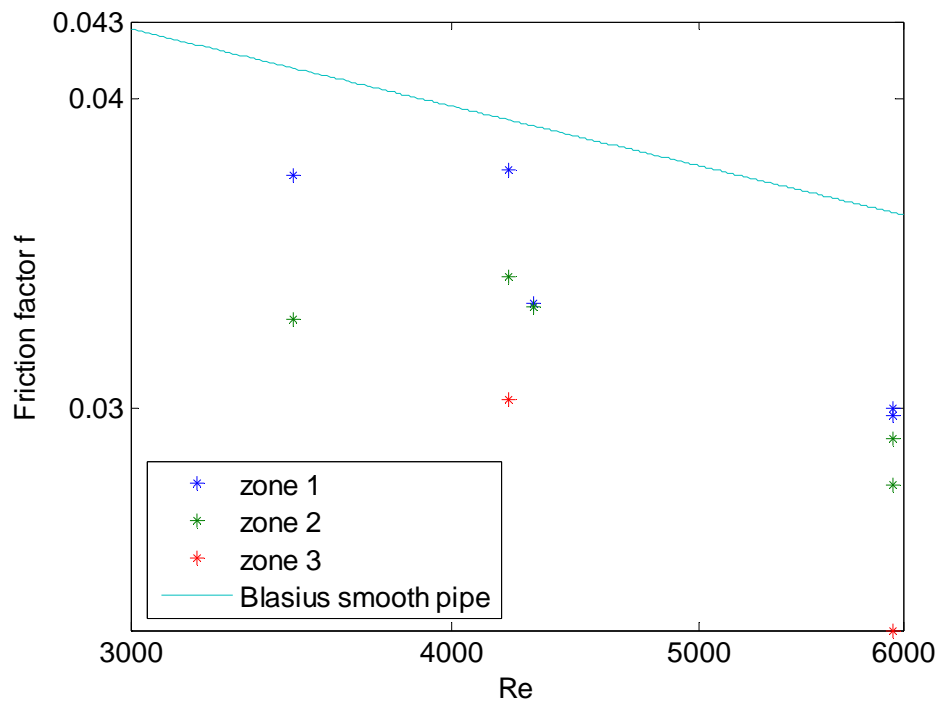
$$y = a \cdot Re^b$$

Het resultaat hiervan is dat op basis van deze fit de correlatie tussen de ffrictiefactor en het Reynolds getal als volgt is gevonden

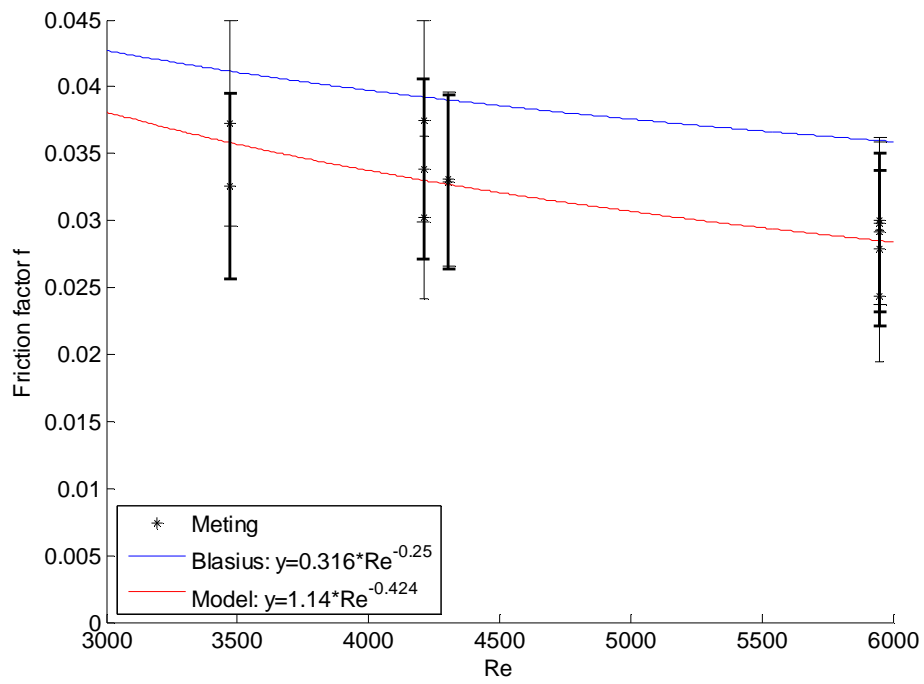
$$f = 1.14 \cdot Re^{-0.424}$$

In dezelfde figuur is de onzekerheid van de metingen weergegeven in combinatie met het model. Hierbij is te zien dat het model niet helemaal binnen de onzekerheid van de metingen valt.

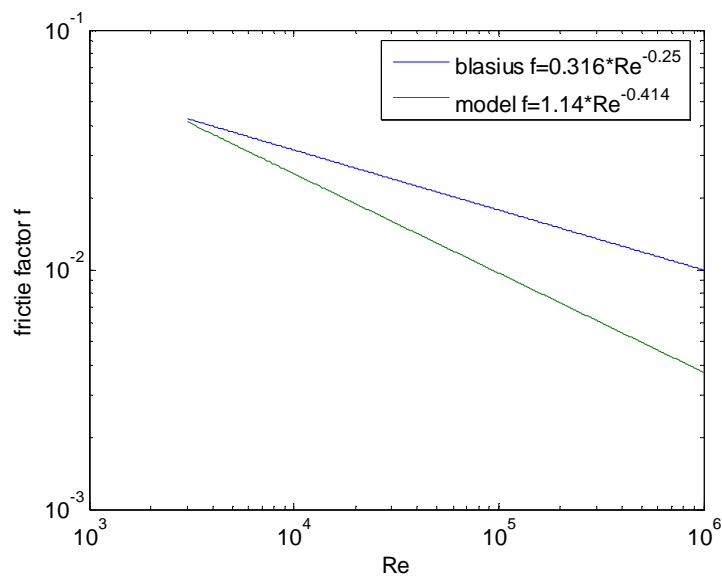
In Figuur 3.5 zijn de relatie van Blasius en die van het model voor de ffrictie factor als functie van het Reynolds getal weergegeven voor een grotere range Reynolds getallen. Hierin is te zien voor grotere Reynolds getallen het model steeds meer afwijkt van Blasius.



Figuur 3.3: Bepaalde ffrictie factor f als functie van het Reynold's getal



Figuur 3.4: Model voor frictie factor f vergeleken met Blasius

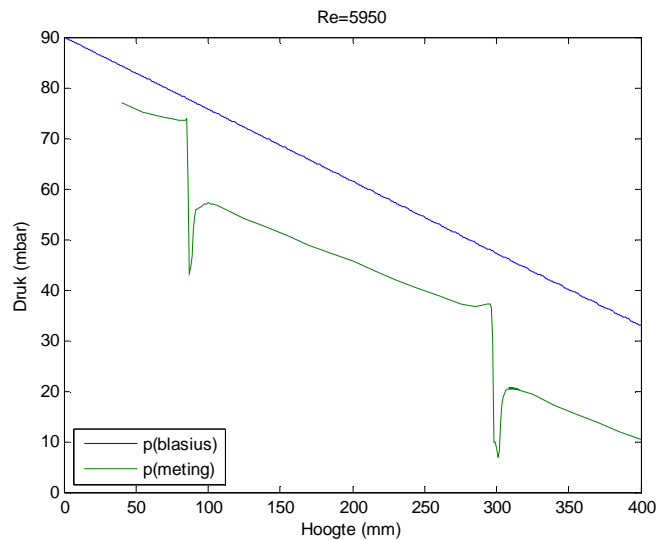


Figuur 3.5: Model vergeleken met Blasius

3.1.2 Vergelijking met Blasius

Uit de gegevens in paragraaf 3.1.1 is geconcludeerd dat de gemiddelde frictiefactor over een zone onder de frictiefactor ligt die m.b.v. de Blasius relatie is berekend. Daarom is hieronder voor de meting met Reynold's getal 5950 de gemeten waarde voor het drukprofiel vergeleken met de waarde die met de Blasius relatie is berekend. Dit is gedaan door het drukprofiel voorspeld door Blasius in dezelfde grafiek te plotten. Hierdoor kan gekeken worden of er specifieke locaties in de bundel zijn waar het drukprofiel wel voldoet aan Blasius en in welke gebieden Blasius erg afwijkt van de gemeten waarden.

In de grafiek is te zien dat in de gebieden tussen de spacers het gemeten drukprofiel niet helemaal gelijk is aan de die van Blasius, maar wel vrij constant is.



Figuur 3.6: Drukprofiel één-fase vergeleken met Blasius

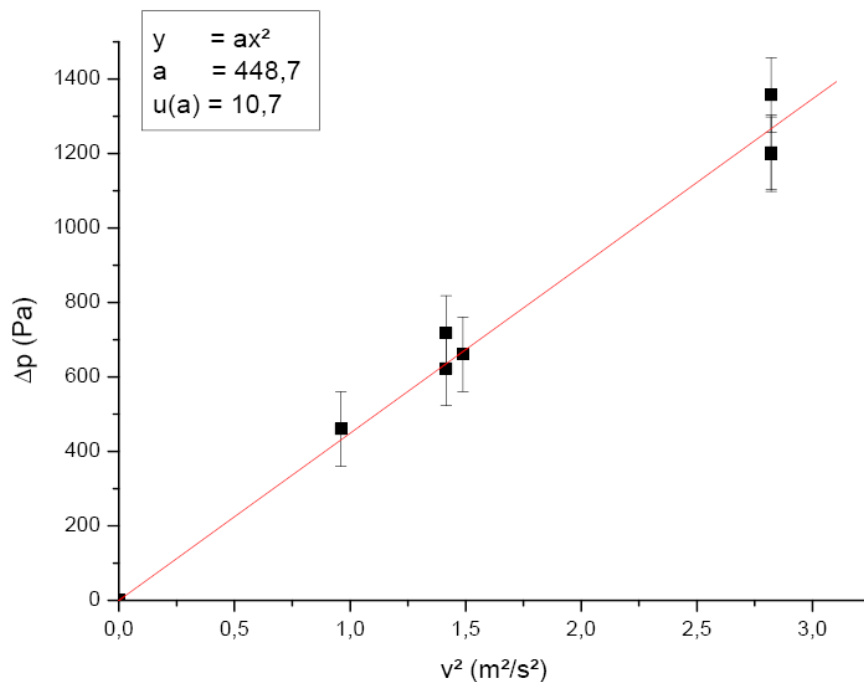
3.1.3 Bepaling van de factor K

Hieronder in Figuur 3.7 zijn de gemeten waarden voor het drukverschil over een spacer als functie van de referentie snelheid ($v = \phi / A$) weergegeven. Voor de hoogte H van de spacer is 298 mm genomen. Het punt waarvoor het drukverschil nul is bij een snelheid van nul is toegevoegd aan de metingen. Vervolgens is Δp uitgezet tegen v^2 en deze punten zijn gefit in Origin met $y = ax$. Voor de constante a is door Origin de waarde 448.7 gevonden. Hier volgt uit m.b.v. vergelijking (2.4) dat voor de waarde van K is bepaald op

$$K = 0.90$$

Met

$$u(K) = 0.02$$



Figuur 3.7: Bepaling k-waarde

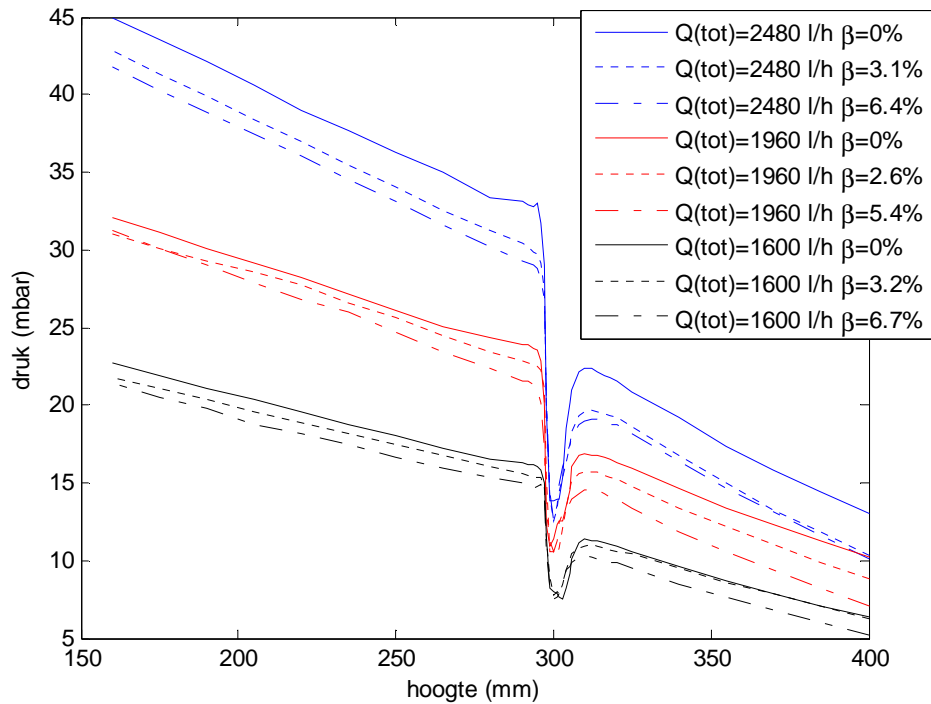
3.2 Resultaten drukprofiel twee-fasen stroming

In totaal zijn negen twee-fasen metingen verricht, weergegeven in Tabel 3-2. Hierin is $Q(w)$ het debiet van water, $Q(l)$ het debiet van lucht, $Q(\text{tot})$ het totale debiet en $Re(w)$ het Reynolds getal van de waterfase. De metingen zijn gedaan bij drie verschillende totale debieten en per totaal debiet werd het lucht debiet gevarieerd. In Figuur 3.8 is het drukprofiel weergegeven van de twee-fasen metingen. De metingen waarbij het totale debiet gelijk is zijn weergegeven in dezelfde kleur.

Als de grafieken per totaal debiet bekeken worden valt een aantal dingen op. Zo is te zien dat in het lineaire gebied voor en na de dip de absolute waarde van de druk lager is bij een hoger luchtdebiet. Bij een hoger lucht debiet is er relatief meer lucht in de opstelling aanwezig. Hierdoor is het aandeel van de hydrostatische druk lager. Aan de andere kant neemt de wrijving naarmate β toeneemt. Dit heeft een grotere drukgradiënt tot gevolg. De gradiënten bij verschillende β zijn ongeveer gelijk, dus de lucht heeft weinig invloed op de drukgradiënt. Verder is bij gelijkblijvend totaal debiet de waarde van de absolute druk bij dieptepunt van de dip ongeveer gelijk.

Meting	$Q(\text{tot})$ (l/h)	$Q(w)$ (l/h)	$Q(l)$ (l/h)	β (%)	$Re(w)$	Dip(d) (mbar)	Dip(l) (mm)	U(dip(l))
1	2480	2480	0	0	4422	9,6	50	10
2	2480	2405	75	3,1	4287	8,6	50	10
3	2480	2330	150	6,4	4152	8,1	50	10
4	1960	1960	0	0	3492	6,2	50	10
5	1960	1910	50	2,6	3408	6,1	50	10
6	1960	1860	100	5,4	3318	6,1	50	10
7	1600	1600	0	0	2850	4,0	50	10
8	1600	1550	50	3,2	2766	3,9	50	10
9	1600	1500	100	6,7	2676	3,3	50	10

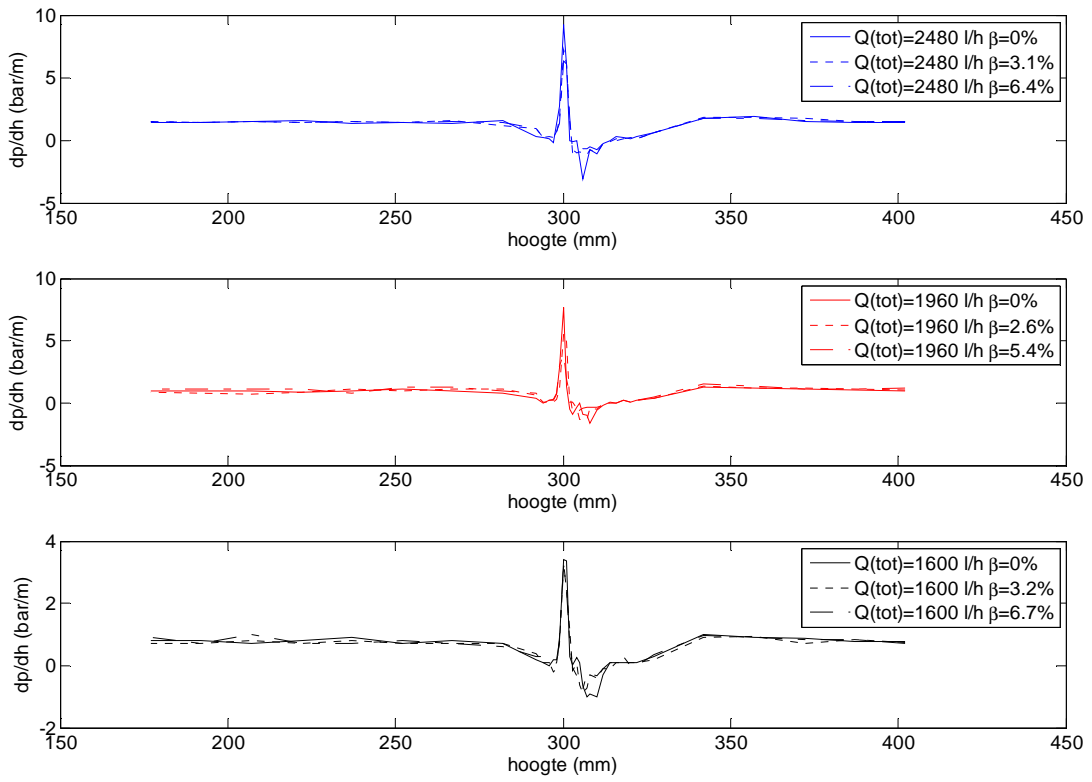
Tabel 3-2: Overzicht van de twee-fasen metingen



Figuur 3.8: Drukprofiel twee-fasen

Om goed te kunnen beoordelen waar de stroming volledig is hersteld, is per totaal debiet van Figuur 3.8 de drukgradiënt genomen en weergegeven in Figuur 3.9. De stippen zijn de meetpunten.

In deze figuur komt de grote piek bij 300 mm overeen met het dieptepunt van de dip in het drukprofiel van Figuur 3.8. Uit de figuur blijkt dat de stroming is hersteld op ongeveer 50 mm na de dip bij 350 mm. Opvallend is dat de lengte van het herstel van de stroming niet afhangt van de β in dit stromingsregime. Ook is uit de figuren af te leiden, dat de lengte van het herstel van de stroming in dit geval niet afhangt van het totale debiet.



Figuur 3.9: Drukgradiënten over de lengte van de bundel (twee-fasen)

3.2.1 Resultaten luchtfractiemetingen

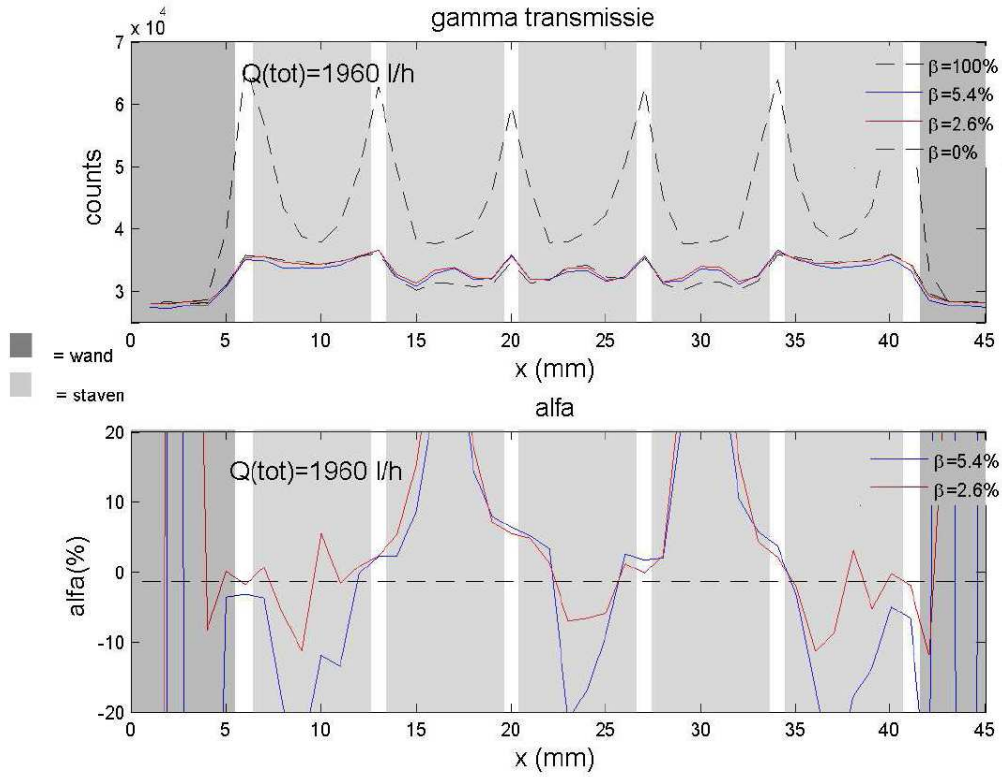
Bij deze methode worden de transmissie metingen met behulp van de gammabron als volgt gedaan. Er worden 45 samples genomen met een onderlinge afstand van 1mm en met een meettijd van 20 seconde per sample. De transmissiemetingen zijn op een vaste verticale positie in de x- en y-richting uitgevoerd (zie Figuur 2.7). De resultaten van de transmissiemetingen met een debiet van 1960 l/h zijn weergegeven in Figuur 3.10 en Figuur 3.11. Een overzicht van alle transmissiemetingen is te vinden in het appendix A. Eerst zijn de metingen met alleen water en met alleen lucht uitgevoerd om de ijkpunten vast te stellen voor 0% lucht en 100% lucht. Vervolgens zijn de metingen gedaan met verschillende debieten en luchtfracties. De metingen zijn gedaan bij drie verschillende debieten van water gecombineerd met twee verschillende debieten lucht zie Tabel 3-2. In de bovenste grafiek van Figuur 3.10 en Figuur 3.11 zijn het aantal counts uitgezet als functie van respectievelijk de afstand x (mm) en y (mm) langs de opstelling. De onderste zwarte lijn is meting 4 uit Tabel 3-2 (met 0% lucht), de rode lijn meting 5 (met luchtdebiet 50 l/h), de blauwe lijn meting 6 (met luchtdebiet 100 l/h) en de bovenste zwarte lijn de meting met 100% lucht. In de onderste grafiek van Figuur 3.10 en Figuur 3.11 is de luchtfractie weergegeven als functie van x of y berekend m.b.v. vergelijking (2.5). Met grijs tinten zijn de staven en de wand van de opstelling aangegeven. Het donkergrijze gebied geeft de wand aan en het lichtgrijze gebieden zijn de rijen staven. De witte strepen geven dus het gebied tussen de rijen staven aan.

Verwacht wordt dat in het gebied waar de staven zich bevinden nauwelijks verschil zal optreden tussen metingen bij verschillende luchtfracties, omdat het stromingsoppervlak in dit gebied naar verhouding klein is en de absorptiecoëfficiënt van Perspex ongeveer gelijk is aan die van water.

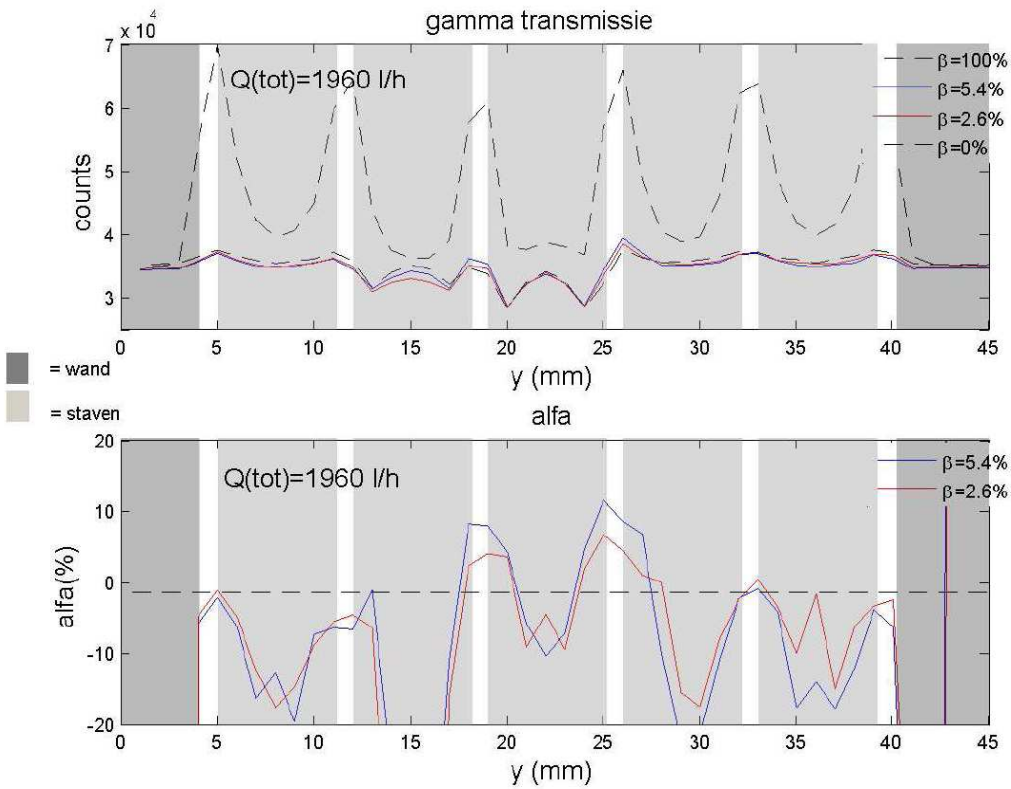
Op de locatie van de kanalen is juist de meeste interessante informatie te vinden, omdat hier per positie met breedte Δx het stromingsoppervlak het grootst is.

Op de locatie van de wanden zou de transmissie voor elke meting gelijk moeten zijn. In Figuur 3.10 en Figuur 3.11 is te zien dat dit niet het geval is, omdat in het donkergrijze gebied de lijnen van de verschillende luchtfracties niet precies over elkaar heen liggen. Bij elke meting zijn er gebieden waar de alfa negatief is. Dit is uiteraard onmogelijk aangezien er nooit minder dan 0% lucht aanwezig kan zijn.

Als we kijken naar de transmissiemeting met 100% lucht, zien we op het gebied van de openingen een piek in de grafiek en op het gebied van de staven een dal. Dit is logisch omdat lucht een hogere transmissie vertoont dan Perspex. Verder zien we dat het dal niet recht



Figuur 3.10: Transmissie en alfa in de x-richting

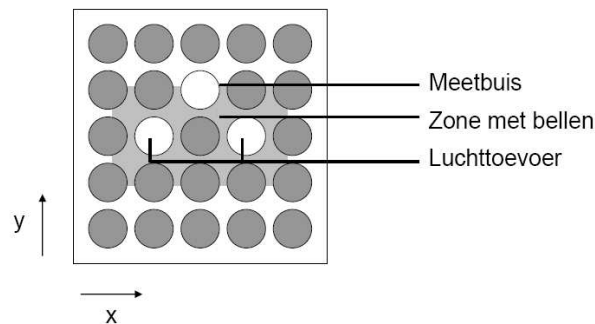


Figuur 3.11: Transmissie en alfa in de y-richting

maar afgerond is en dat de overgang tussen staaf en een opening geleidelijk is. Een van de oorzaken is dat de gammastraal een breedte van heeft van 2 mm, waardoor er zich geleidelijk meer staaf materiaal tussen de bron en de detector bevindt. Een andere reden voor de geleidelijke overgang tussen de staven en de opening is dat de staven rond zijn in plaats van vierkant.

Als we kijken naar de andere transmissiemetingen herkennen we hetzelfde patroon met kleinere pieken en dalen. Bovendien zien we bij in het gebied van sommige staven een lokale piek. Dit geeft aan dat er een luchttoevoerbuis of de meetbuis in deze rij zit. De luchttoevoerbuisen zijn in de bovenste grafiek van Figuur 3.10 te zien bij x is 15mm-18mm en bij x is 29mm-32mm. De meetbuis is te zien bij x is 22mm-25mm.

In Figuur 3.10 en Figuur 3.11 is te zien dat de luchtbellens zich duidelijk niet homogeen over de breedte van de opstelling verdelen. Gezien vanuit de x -richting bevinden de bellen zich vooral in de middelste vier van de zes kanalen en gezien vanuit de y -richting bevinden de bellen zich in de middelste twee kanalen. Dit gebied is aangegeven met het grijze vlak in Figuur 3.12.



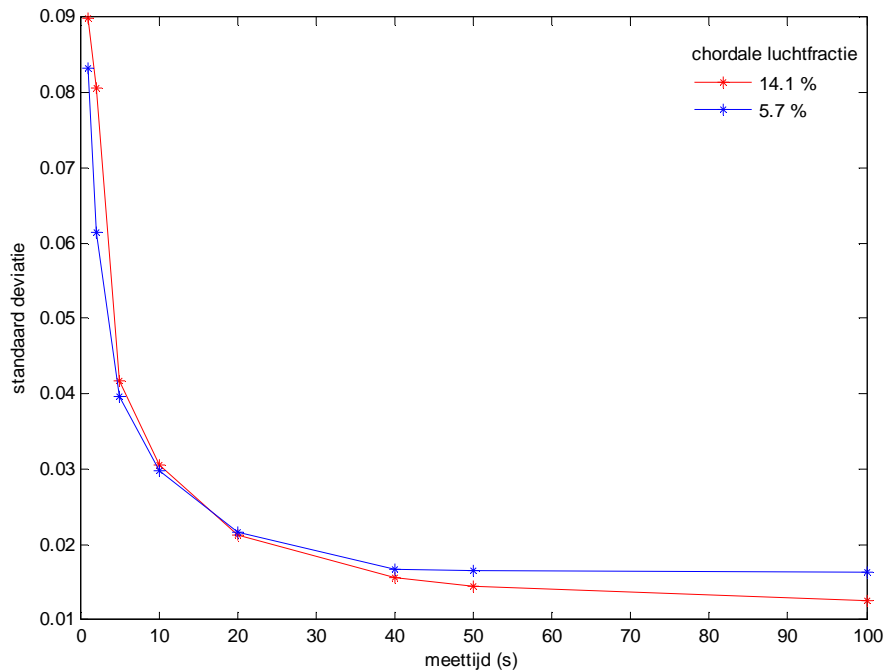
Figuur 3.12: Verdeling van de bellen over het stromingsoppervlak

De bellen bevinden zich dus voornamelijk in de kanalen rond de luchttoevoer. Een reden hiervoor kan zijn dat de bellen te groot zijn t.o.v. de spleetbreedte tussen de staven, om te verplaatsen van het ene kanaal naar het andere. Het feit dat de bellen zich niet verspreiden geeft aan de ene kant geen goed beeld van de werkelijkheid, omdat in GENESIS de bellen bij iedere staaf ontstaan en dus veel beter verdeeld zijn over de doorsnede van de bundel. Aan de andere kant zal uiteindelijk gerekend worden met een gemiddelde luchtfractie, waardoor de resultaten mogelijk toch bruikbaar zijn.

3.2.2 Onzekerheid luchtfractiemetingen

Om de onzekerheid van de luchtfractie metingen te bepalen als functie van de meettijd, zijn de standaarddeviaties van de alfametingen bepaald bij twee verschillende chordale luchtfracties. Hierbij was het

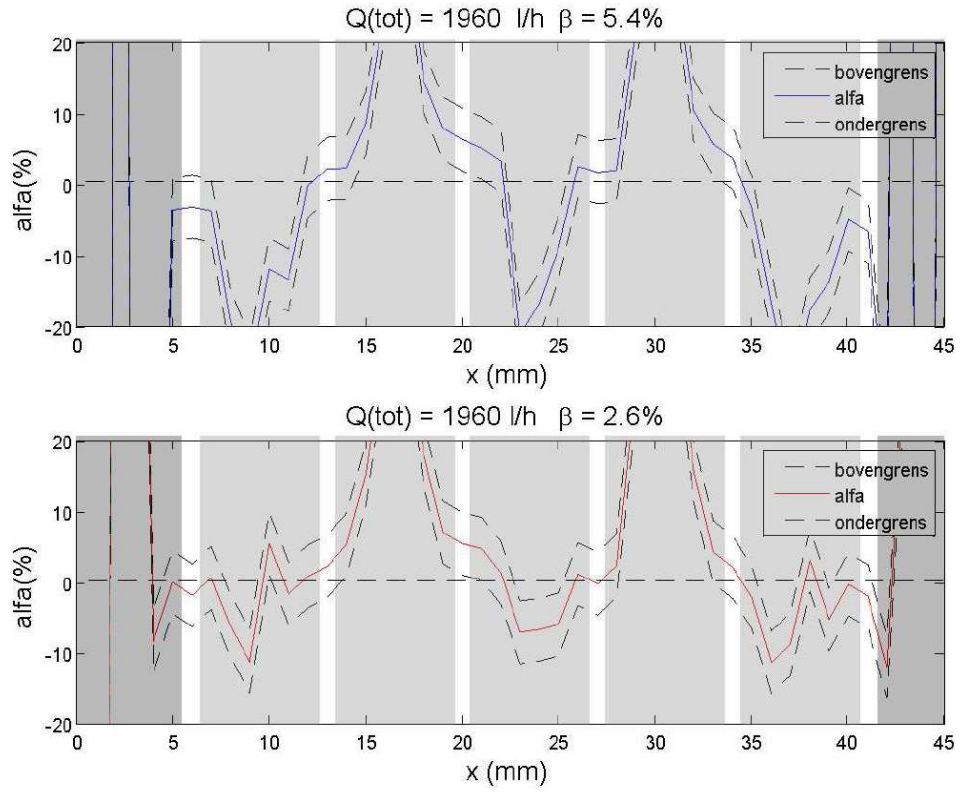
waterdebiet 1990 l/h en de luchtfracties 14.1% en 5.7%. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3.13.



Figuur 3.13: Standaard deviatie van de chordale luchtfractie bij 14.1% en 5.7% luchtfractie uitgezet tegen de meettijd.

Bij de luchtfractie metingen in dit onderzoek is een meettijd aangehouden van 20 seconden per positie. Uit Figuur 3.13 is af te lezen dat bij een meettijd van 20 seconden de standaarddeviatie 2.2% is. Dit houdt een onzekerheid in van 4.4%. Verder is in Figuur 3.13 te zien dat bij een meettijd van 40 tot 60 seconden de standaarddeviatie met 30% is afgenomen.

In Figuur 3.14 is α met de onzekerheidsgrenzen weergegeven. Het waterdebiet is hier 1990 l/h, het luchtdebiet is 100 l/h in de bovenste grafiek en 50 l/h in de onderste grafiek. De onzekerheid bedraagt dus de gemeten waarde voor α +/- 4.4.



Figuur 3.14: Alfa met de bijbehorende onzekerheidsgrenzen

Conclusies

De metingen die gedaan zijn in dit onderzoek, bevinden zich in het stromingsregime tussen laminaire en turbulente stroming. De Reynolds getallen liggen tussen $Re(w)=2000$ en $Re(w)=4500$. De gevonden waarden voor de frictie factor f liggen allemaal 0% tot 10% onder de waarden gegeven door de Blasius relatie. Dit kan verklaard worden door het feit dat m.b.v. Blasius frictie factoren in het turbulente gebied worden berekend, terwijl de stroming in het overgangsgedebied zit.

Om voor de gebruikte opstelling de frictie factor f te berekenen is het volgende fit gevonden in het geval van één-fase stroming op een gebied van ontwikkelde stroming, namelijk

$$f = 1.14 \cdot Re^{-0.424}$$

Voor de K-waarde van de spacers bij één-fase stroming is gevonden

$$K = 0.90$$

met $u(K) = 0.02$

Wanneer we kijken naar het gebied waar de storing zich heeft hersteld, kunnen we voor twee-fasen stroming het volgende concluderen; bij een hogere luchtfractie is de waarde voor de druk lager op een bepaalde hoogte. In dit stromingsregime met een β tussen 0% en 7% verandert dp/dh niet significant als functie van β . De invloed van wrijving door de bellen is niet groot.

Voor de recovery lengte van de spacer is gevonden bij zowel de één-fase als de twee-fasen metingen

$$\text{Recovery lengte} = 50 \text{ mm } \pm 10 \text{ mm}$$

Hierbij is als referentiepunt het minimum van de dip genomen. De recovery lengte hangt niet af van β in het gebied tussen $Re(w) = 2000$ en $Re(w) = 4500$ bij kamertemperatuur en atmosferische druk. Het minimum van de dip lag voor alle metingen op een hoogte $H = 300$ mm.

De metingen voor de radiële luchtfractie-verdeling in de bundel zijn gedaan met behulp van gammatransmissie. De onzekerheid in de metingen voor α is de waarde voor α $\pm 4\%$. De β ligt tussen 0% en 7%. De onzekerheid van de meetresultaten is daarmee te groot om kwantitatieve conclusies te trekken. Daarom zijn de resultaten van de α metingen alleen kwalitatief gebruikt om te bepalen in welke kanalen de bellen zich bevinden. De lucht verspreid zich slechts over 8 van de 36 kanalen.

Eén van de oorzaken is dat de luchtstroom niet constant is. Bovendien wordt met de gammastraal maar een klein gebied bekeken, waarbinnen de luchtstroom ook fluctueert. Om de nauwkeurigheid te verbeteren moet langer gemeten worden per positie. Bij een meettijd van 40 tot 60 seconde per positie verbetert de nauwkeurigheid al met 30% tot 50%.

Kwalitatief is bepaald dat de lucht zich voornamelijk in 8 van de 36 kanalen bevindt.

Aanbevelingen

De transmissiemetingen moeten nauwkeuriger zijn om kwantitatieve uitspraken te doen over de luchtfractie. Een manier om dit te doen is door veel langer te meten per positie. Bij dit onderzoek is per meetpunt 20 seconden gemeten. Wanneer een gammastraal met een kleinere diameter gebruikt wordt, kan nauwkeuriger per positie de luchtfractie gemeten worden. Met name in het gebied tussen de staven vindt dan minder overlap plaats tussen een gebied met en zonder staven.

Om de twee-fasen metingen beter te kunnen doen moet een oplossing gevonden worden om de luchtbellens beter over het stromingoppervlak te verdelen. Bijvoorbeeld door onderin ieder kanaal een luchtinlaat te plaatsen.

Het lijkt erop dat de absolute waarde van de druk bij het dieptepunt van de dip in het drukprofiel bij een bepaald totaal debiet niet veranderd als functie van de luchtfractie. Er zal onderzocht moeten worden of en waarom dit het geval is.

Tenslotte zal nog onderzocht moeten worden van welke factoren de diepte van de dip afhankelijk is en hoe deze factoren zich verhouden tot de diepte van de dip.

Bibliografie

- [1] Nuclear systems 1, Neil E. Todreas & Muijd S. Kazimi, Taylor & Francis, tweede druk 1993
- [2] Fysische transportverschijnselen 1, H.E.A van den Akker & R.F. Mudde, Delft University Press, 2003
- [3] Transport Phenomena Data Companion, L.P.B.M. Janssen & M.M.C.G. Warmoeskerken, Delft University Press, derde druk 2001
- [4] Inleiding Practicum TNW, ir S.E. Angad-Gaur & dr. E.Lagendijk, Werkgroep Natuurkundig Onderwijs, 2002
- [5] Practische Stralingshygiëne, G. Brouwer & J. van den Eijnde, Syntax Media, tweede oplage, 2006

Appendix A: Transmissie Metingen

