

Flashing geïnduceerde instabiliteit in de CIRCUS opstelling met vier parallelle kanalen

Bachelor Eind Project

Naam:	Gerward Weppelman		
Studentnummer:	1275887		
Opleiding:	Technische Natuurkunde		
Begeleider:	M. Rohde	Sectie:	R3-PNR
Startdatum:	Februari 2008	Einddatum:	September 2008
Is vertrouwelijkheid van toepassing?	Nee		

PNR-131-2008-006

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	2
Samenvatting.....	3
1. Inleiding	4
2. Experimentele opzet	6
2.1 Beschrijving van de opstelling	6
2.2 Instelling van de fricties.....	8
2.2.1 Inlaat frictie.....	8
2.2.1 Centrale inlaatfrictie.....	9
3. Onzekerheden in de metingen.....	10
3.1 Onzekerheid in het meten van de partiële massastroom.....	10
3.1.1 Thermisch effect bij meting van de druk	10
3.2 Onzekerheid in het vermogen van de staven.....	12
3.2.1 Spanning	13
3.2.2 Weerstand.....	13
3.3 Onzekerheid in de meting van de temperatuur.....	14
4. Experimentele resultaten.....	17
4.1 Stabiele massastroom.....	18
4.2 Intermittent massastroom oscillaties.....	19
4.2.1 Beschrijving van Intermittent massastroom oscillaties.....	19
4.2.2 Welk kanaal flasht als eerste	21
4.3 Uit-fase massastroom oscillaties	23
4.3.1 Beschrijving van Uit-fase massastroom oscillaties.....	23
4.3.2 Koppeling van de kanalen	26
4.4 Andere massastroom oscillaties	27
5 Conclusie.....	30
5.1 Vergelijking CIRCUS-IV met CIRCUS-II en CIRCUS-I	30
5.2 Gedrag van de kanalen in vergelijking met elkaar	31
6 Aanbevelingen.....	32
Verwijzingen.....	33

Samenvatting

Nieuwe kernreactoren worden zoveel mogelijk voorzien van passief veilige systemen. Bij een BWR (Boiling Water Reactor) kan dat gedaan worden door het koelwater met behulp van natuurlijke circulatie rond te laten stromen. Maar een BWR aangedreven door natuurlijke circulatie kan onstabiel worden tijdens het opstarten. Deze instabiliteit wordt geïnduceerd door een proces dat flashing genoemd wordt.

Als er meerdere schoorsteensecties zijn dan zal er wisselwerking tussen de kanalen optreden, waardoor een systeem van meerdere kanalen een ander gedrag kan vertonen dan een vergelijkbaar systeem met één kanaal.

Daarom is CIRCUS-IV gebouwd zodat de koppeling van vier kanalen kan worden onderzocht. In dit bachelor eindproject is deze opstelling werkend gemaakt en zijn er metingen uitgevoerd. Daarbij is er onderzocht bij een reeks van vermogens en inlaattemperaturen hoe de massastroom zich gedraagt.

De massastroom oscillaties zijn qua gedrag vergelijkbaar met de oscillaties die voorkomen bij een systeem bestaande uit twee schoorsteensecties. Wel zijn de gebieden waar die oscillaties voorkomen veranderd. Zo wordt CIRCUS-IV pas bij hogere inlaattemperaturen instabiel, de reden daarvan is de gebrekkige isolatie van de schoorsteensectie. Daarnaast is het niet mogelijk om van intermitterent oscillaties naar uit-fase oscillaties te gaan, zonder door een gebied van chaotische massastroom oscillaties te gaan.

Bij intermitterent massastroom oscillaties blijkt dat kanaal 2 in 63% van de gevallen als eerste flasht en nooit kanaal 4. Het blijkt dat dit wordt veroorzaakt door het hogere vermogen van kanaal 4.

Bij uit-fase oscillaties is er onderzocht welke kanalen aan elkaar gekoppeld zijn, en of dat afhankelijk is van het vermogen en de inlaattemperatuur. Aan de hand van de metingen kunnen daar geen conclusies over worden getrokken.

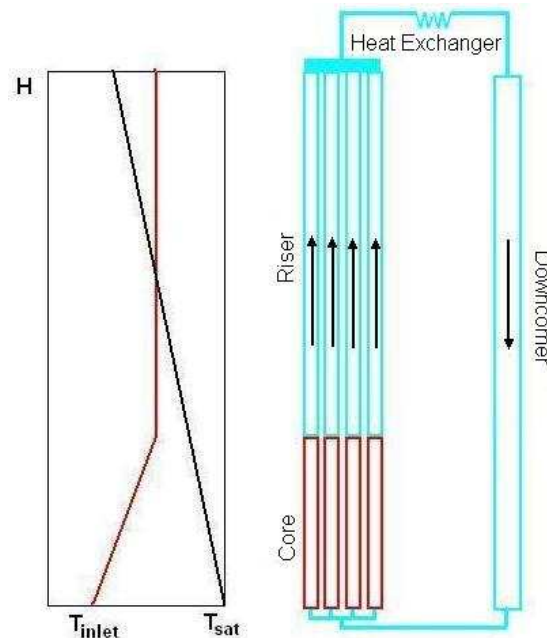
Tijdens flashing kan de partiële massastroom met een onzekerheid van 2.4% gemeten worden en bij neerwaartse stroming bedraagt de onzekerheid 8.3%. Bij een 1-fase stabiele massastroom bedraagt de onzekerheid 200%, dan is het dus niet mogelijk de massastroom nauwkeurig te meten. In de thermokoppels die de temperatuur in de schoorsteen meten zit een onzekerheid van een paar graden. In het vermogen zit een onzekerheid van 1.27%.

1. Inleiding

Om nieuwe kernreactoren nog veiliger te maken dan de huidige reactoren, wil men de veiligheidssystemen van kerncentrales meer, en als het kan volledig, passief veilig maken. Dit houdt in dat er geen actieve ingrepen van de mens dan wel van een technisch systeem nodig zijn om de veiligheid te garanderen.

Bij een BWR kan dat door het koelmiddel, water, door natuurlijke circulatie rond te laten stromen. De circulatie wordt geïnduceerd door dichtheidsverschillen tussen het relatief koude water in de downcomer en het warme water en de damp in de kern en schoorsteensectie. Dit systeem heeft ook nadelen: door het ontbreken van de pomp is er geen directe controle meer op de stroming. Het is dan ook belangrijk dat goed onderzocht wordt of zo'n systeem onstabiel kan worden.

Tijdens het opstarten kan het systeem onstabiel worden (met onstabiel wordt bedoeld dat er sterke oscillaties voorkomen in de massastroom). Deze instabiliteiten worden geïnduceerd door een proces dat flashing genoemd wordt. Bij lage druk is de verzadigingstemperatuur namelijk sterk afhankelijk van de druk, en de druk varieert over de hoogte van de kern en schoorsteensectie vanwege de dalende hydrostatische druk. Wat als gevolg heeft dat het water de verzadigingstemperatuur in de schoorsteen kan bereiken en daardoor zal er dan damp ontstaan: dit proces wordt flashing genoemd. Deze damp resulteert in een sterke toename van de massastroom, omdat de drijvende kracht tussen de downcomer (zie Figuur 1-1) en de kern en schoorsteensectie (riser) sterk toeneemt. Door de sterk toegenomen massastroom neemt het water minder warmte op en daalt de temperatuur. Wat als gevolg heeft dat de dampfractie afneemt of zelfs gelijk aan nul wordt. Er blijft nog een kleine massastroom over door dichtheidsverschillen. Daarna zal de uitlaattemperatuur van de kern weer gaan stijgen en het hele proces zal zich weer herhalen. Dit resulteert dus in een oscillerende massastroom.



Figuur 1-1 Schematische weergave van flashing. Het water stroomt met een temperatuur gelijk aan T_{inlet} de kern binnen, waar het wordt verwarmd. Maar het water stroomt met een temperatuur onder de verzadigingstemperatuur de schoorsteen in. Omdat de hydrostatische druk daalt, wordt de temperatuur gelijk aan de verzadigingstemperatuur en ontstaat er damp.

Er is experimenteel bewijs dat de massastroom kan gaan oscilleren, dit is o.a. door Manera gedaan met de opstelling CIRCUS-I¹. Deze opstelling is bij de sectie PNR gebouwd en is een axiaal geschaalde en radiaal een ruwe versie van de Dodewaard reactor². Bij lage inlaattemperatuur en vermogen is CIRCUS-I stabiel. Bij hoge vermogens en inlaattemperaturen in combinatie met een hoge inlaatfrictie is er ook stabiele 2-fase stroming voorgekomen.

Maar bij een echte BWR is de schoorsteensecties in meerdere subkanalen verdeeld. Daarom is het relevant om een systeem te onderzoeken dat meerdere kanalen heeft. Om die reden is CIRCUS-II gebouwd, waarbij het totale dwarsoppervlak, van de twee schoorstenen, ongeveer gelijk is aan die van CIRCUS-I³

Bij CIRCUS-II treden er ook uit-fase en a-periodieke (chaotische) massastroom oscillaties op. Bij uit-fase oscillaties kan er in één kanaal neerwaartse stroming en in het andere kanaal flashing optreden. Waarbij de twee kanalen steeds van rol verwisselen.

Het uiteindelijke doel is om het gedrag van een reactor bestaande uit n schoorsteensecties te kunnen voorspellen. Daarom is CIRCUS-IV gebouwd om ook het gedrag van een systeem met vier kanalen te onderzoeken. De resultaten van CIRCUS-I, II en IV worden uiteindelijk gebruikt om te extrapoleren naar een systeem bestaande uit n kanalen.

2. Experimentele opzet.

2.1 Beschrijving van de opstelling

CIRCUS-IV bevat vier kanalen die ieder uit een kern en een schoorsteen sectie bestaan. De kern wordt hierbij met behulp van verwarmingselementen elektrisch verwarmd.

De twee vaten boven de schoorsteen stellen de stoomkoepel van een reactor voor. Het linkervat, zie Figuur 2-1, is open naar de omgeving zodat de druk in de opstelling atmosferisch blijft (afgezien van de hydrostatische druk). Er is zo geen sprake van pressure feedback¹ in het systeem.

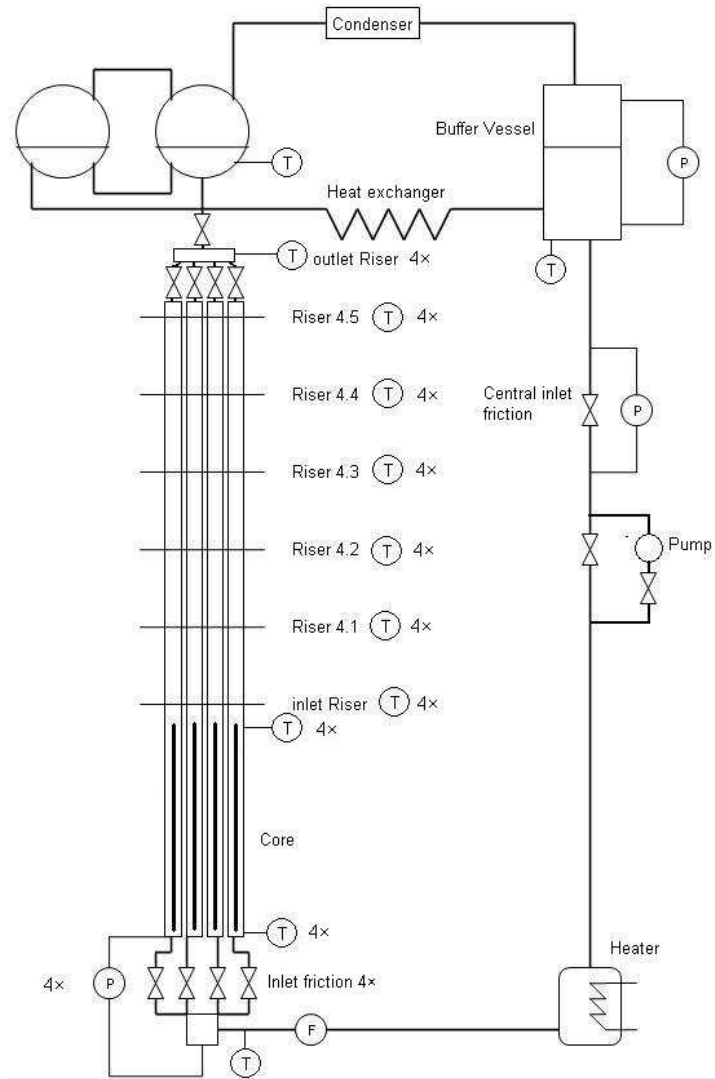
Het buffervat is er om de temperatuur te stabiliseren. Onderaan de downcomer staat een vat met daarin een verwarmingselement met een maximaal vermogen van 3kW. Door het verwarmingselement aan te sturen met een PID-regelaar wordt de centrale inlaattemperatuur stabiel gehouden.

In de downcomer is een klep geplaatst waarmee de centrale inlaatfrictie ingesteld kan worden. Vlak onder de kernen zitten vier kleppen, waarmee voor ieder kanaal apart een inlaatfrictie ingesteld kan worden.

De volumestroom wordt gemeten met een magnetische flow sensor, in Figuur 2-1 aangegeven met een 'F'. Deze heeft een onzekerheid van 0.01 [l/s] en een responsietijd van 1-2s⁴.

De partiële massastromen worden gemeten met 4 snelle druksensoren met een bereik van 344mbar, die ook negatieve drukken kunnen meten. Deze druksensoren zijn geschakeld over de inlaatfrictie.

De temperatuur die het water heeft voordat zij de verschillende kanalen instroomt wordt in dit verslag de centrale inlaattemperatuur genoemd. De subcooling, T_{sub} , geeft aan hoeveel Kelvin de centrale inlaattemperatuur onder de verzadigingstemperatuur bij 1 atmosfeer is. De inlaattemperatuur, T_{in} , is de temperatuur waarmee het water de kern instroomt.



Figuur 2-1 *Schema van CIRCUS-IV.*

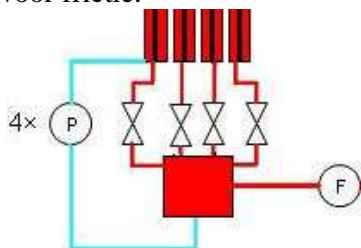
Tabel 2 -1 *Eigenschappen van de opstelling CIRCUS-IV.*

Vermogensbereik per staaf	0-3kW
Diameter verwarmingselement	12.5mm
Binnendiameter kernkanaal	20.4mm
Binnendiameter schoorsteen	25mm
Lengte schoorsteen	3m
Binnendiameter downcomer	25.4mm

2.2 Instelling van de fricties

2.2.1 Inlaat frictie

Over de inlaat van de kern zijn druksensoren geplaatst om de massastromen in de verschillende kanalen te meten, zie Figuur 2-2. Bij alle metingen staan de kleppen volledig open, alleen de bochten zorgen voor frictie.



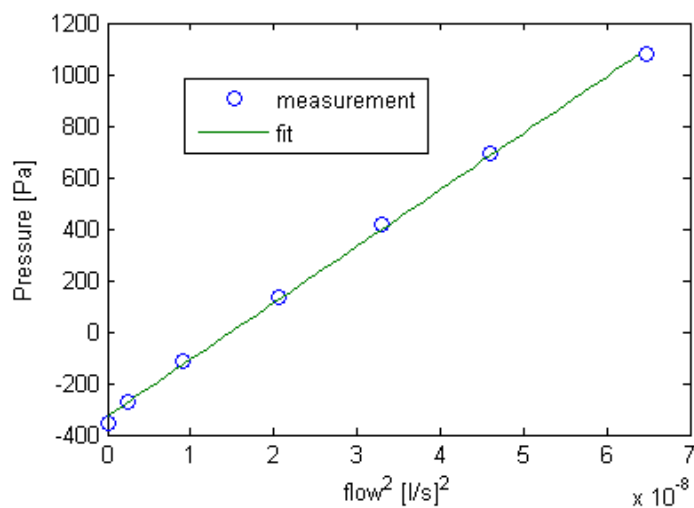
Figuur 2-2 Schema van de inlaat van de kern. De vier druksensoren worden gebruikt om de massastroom in de verschillende kanalen te meten. De kleppen staan tijdens gebruik volledig open.

Aan de hand van de drukval kan met de volgende vergelijking de massastroom worden bepaald:

$$M = A \sqrt{\frac{2\rho}{K_{in}} \Delta P} \quad (2-1)$$

Hierin is M de massastroom in [kg/s], A het dwarsoppervlak van de pijp ($D=19$ [mm]), K_{in} is de inlaatfrictieconstante en ΔP is de drukval.

De inlaatfrictieconstante van een kanaal is bepaald door de andere drie kanalen af te sluiten en de drukval uit te zetten tegen het kwadraat van het debiet, zie Figuur 2-3.



Figuur 2-3. De drukval uitgezet tegen het kwadraat van het debiet van kanaal 1. De blauwe cirkels zijn de metingen en de groene lijn is een fit van Matlab. De richtingscoëfficiënt wordt gebruikt om de frictieconstante te berekenen. Deze meting is uitgevoerd bij een koude opstelling en de kleppen van kanaal 2,3 en 4 zijn gesloten. Ieder meetpunt is een meting van ongeveer 5 minuten lang.

Tabel 2-2. *De frictieconstanten van de verschillende kanalen. Aan de hand van de fit is door Matlab de absolute fout in de frictieconstante berekend.*

kanaal	K_{in}	Absolute fout
1	3.54	0.14
2	3.42	0.12
3	3.43	0.12
4	3.38	0.14

Zoals te zien in Tabel 2-2 zijn de fricties van de kanalen binnen de foutmarge gelijk, dit is aannemelijk omdat de geometrie van de kanalen hetzelfde is.

2.2.1 Centrale inlaatfrictie

Bij CIRCUS-II bedroeg de centrale inlaatfrictieconstante $K=8.65\pm 1^5$. Voor CIRCUS-IV is daarom een vergelijkbare frictieconstante gebruikt. De reden hiervoor is dat de beide opstellingen zoveel mogelijk hetzelfde moeten zijn, zodat het vergelijken van de stabiliteit zinvol is. Bij CIRCUS-IV bedraagt de centrale inlaatfrictieconstante $K=8.90\pm 0.11$. Dit is op een vergelijkbare manier bepaald zoals ook de inlaatfrictieconstante bepaald is.

3. Onzekerheden in de metingen

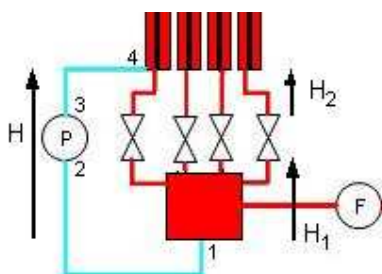
In hoofdstuk 2 is aangegeven wat de onzekerheden in het meten van de primaire volumestroom en de frictieconstanten zijn. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de onzekerheden in het meten van de partiële massastroom, de onzekerheid in het meten van de temperatuur in de schoorstenen en de onzekerheid in het meten van het vermogen.

3.1 Onzekerheid in het meten van de partiële massastroom

Met druksensoren wordt de drukval gemeten waarbij met behulp van vergelijking 2-1 de partiële massastroom bepaald wordt. Bij het meten van de drukval zijn er twee thermische effecten die een significant probleem opleveren bij het meten van de drukval. De eerste wordt veroorzaakt door drukverschillen tussen de warme pijpen van de opstelling en de koude pijpen naar de druksensoren. De tweede wordt veroorzaakt door thermische effecten in de elektronica van de druksensor. Deze twee problemen bij het meten van de drukval worden in de twee paragrafen hieronder behandeld.

3.1.1 Thermisch effect bij meting van de druk

De temperatuurverschillen tussen de leidingen naar de druksensoren en die in de opstelling zelf zijn groot, wat dus resulteert in dichtheidsverschillen die gemeten worden door de druksensoren.



Figuur 3-1. Schema van de inlaat van de kern van CIRCUS-IV. H_2 is het hoogteverschil tussen punt 3 en 4, H_1 is het hoogteverschil tussen punt 1 en 2. H is het hoogteverschil tussen 1 en 4 wat .805m bedraagt.. Het water in de rode stukken is tijdens gebruik typisch zo'n 90 graden Celcius en de blauwe stukken zijn tijdens gebruik ongeveer gelijk aan de omgevingstemperatuur, die als constant wordt verondersteld.

De temperatuurgradiënten in de horizontale gedeeltes van Figuur 3-1 dragen niet bij aan de gemeten drukval. In het verticale pijpje naar de druksensor bij punt 1 in Figuur 3-1 is de temperatuur vrijwel gelijk aan de omgevingstemperatuur, met uitzondering van de laatste centimeters, daarom wordt de bijdrage daarvan aan de drukval verwaarloosd.

De volgende vergelijkingen kunnen worden opgesteld voor de druk:

$$\begin{aligned} P_3 - P_4 &= \rho_{cold} g H_2 \\ P_1 - P_2 &= \rho_{cold} g H_1 \\ P_1 - P_4 &= \rho_{hot} g H \end{aligned} \quad (3-1)$$

Hierin is ρ_{cold} de dichtheid van het water in de pijpen naar de druksensoren. En ρ_{hot} is de dichtheid van het water in de inlaat. Door de bovenstaande drie vergelijkingen te combineren wordt de volgende vergelijking verkregen:

$$P_2 - P_3 = gH(\rho_{cold} - \rho_{hot}) \quad (3-2)$$

Dit resulteert in de volgende vergelijking voor de ΔP die gemeten wordt door de druksensor:

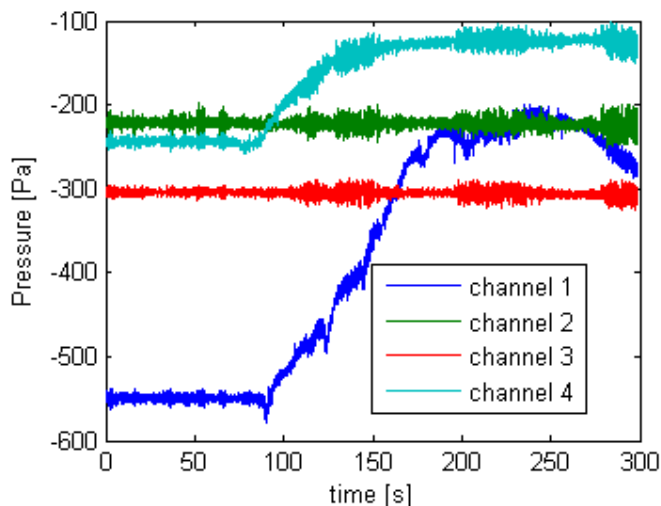
$$\Delta P = P_{offset} + P_{flow} + gH(\rho(T_{in}) - \rho(T_{surr})) \quad (3-3)$$

Hierin is P_{offset} de offset van de druksensor, P_{flow} de drukval die de massastroom veroorzaakt en $\rho(T_{in})$ de dichtheid van het water in de opstelling die een functie is van de temperatuur, $\rho(T_{surr})$ is de dichtheid van het water in de leidingen naar de druksensoren die in het blauw zijn aangegeven in Figuur 3-1. Bij temperaturen van 70°C tot 105°C geldt de volgende lineaire relatie tussen de dichtheid van water en de temperatuur:

$$\rho(T) = -0.6569T + 1024.2 \quad (3-4)$$

Hierbij is T de temperatuur in °C en ρ , bij deze linearisatie is R^2 gelijk aan 0.999.

Omdat bij de punten 1 en 4 in Figuur 3-1 de temperatuur gemeten wordt kan, aan de hand van vergelijking (3-3) en vergelijking (3-4), P_{flow} bepaald worden. Maar een ander probleem daarbij is dat P_{offset} temperatuur afhankelijk blijkt te zijn.



Figuur 3-2 Druk [Pa] versus tijd [s] bij het opwarmen van de druksensor. Vanaf $t \approx 90s$ wordt de druksensor van kanaal 1 opgewarmd tot een oppervlaktetemperatuur van ongeveer 40 °C. Te zien is dat ook het signaal van kanaal 4 stijgt, deze staat op een halve meter afstand van de druksensor van kanaal 1.

Dit is aangetoond door de druksensor op te warmen met een föhn en ondertussen het signaal van de druksensoren te meten bij een constante massastroom. Het resultaat is te zien in Figuur 3-2. De omgevingstemperatuur bij een draaiende opstelling is lager dan de temperatuur van de druksensor, van kanaal 1, bij dit experiment. Maar ook bij kanaal 4 is de druk nog ongeveer 100 [Pa] gestegen.

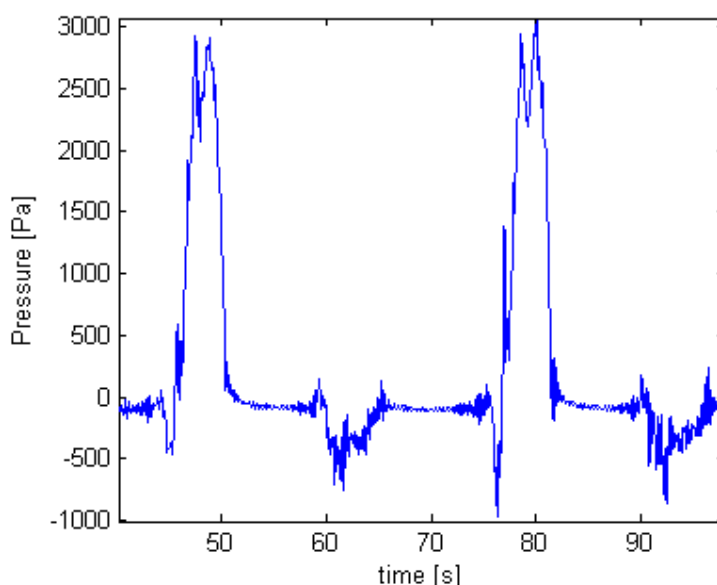
De twee hierboven genoemde onzekerheden bij het bepalen van de drukval leveren allebei een significante onzekerheid op. Als er in vergelijking (3-2) typische waarden ingevuld worden voor de dichtheid ($\rho_{cold} = 998 \text{ [kg/m}^3]$ en $\rho_{hot} = 965 \text{ [kg/m}^3]$) dan levert dat een drukverschil op van -260 [Pa]. Dit is een negatief getal omdat, per definitie, een opwaartse massastroom een positieve drukval oplevert ($P_2 > P_3$). Maar door de dichtheidsverschillen wordt P_3 groter dan P_2 zoals te zien is in vergelijking (3-2). Het thermische effect van de druksensor zelf

wordt geschat op 100 [Pa]. Netto leveren deze twee bijdragen een onzekerheid op van 130 [Pa].

Tabel 3-1 *Typische drukvallen en massastromen bij verschillende omstandigheden. Bij het bepalen van de relatieve fout in het debiet is uitgegaan van een absolute fout van -130[Pa] in de drukval.*

Omstandigheid	Drukval [kPa]	Debiet [kg/s]	Relatieve fout in het debiet [%]
flashing	2.7	0.35	2.4
negatief debiet	-0.75	0.18	-8.3
stabiel debiet (1-fase)	0.014	0.025	-1.9·10 ²

Zoals duidelijk te zien is in Tabel (3-1) is het onmogelijk een nauwkeurige waarde van de massastroom te meten met deze druksensoren bij een stabiel debiet (waarbij er alleen stroming is door de dichtheidsverschillen tussen het koude en warme vloeibare water).



Figuur 3-3 *Drukval over de inlaat van de kern als functie van de tijd. Dit bij een T_{sub} van 1.6K en een q (=thermisch vermogen van een staaf) van 1.5kW.*

3.2 Onzekerheid in het vermogen van de staven

Met behulp van vier potmeters worden de uitgangspanningen van de vier voedingen geregeld en dus ook het vermogen van de staven. Deze uitgangspanningen worden via een versterker, ADC en een DAQ-kaart gemeten en door Labview verwerkt.

Omdat de weerstandswaarden van de staven bekend zijn kan het vermogen berekend worden:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3-4)$$

Hierin is U de uitgangspanning van de voeding, en R de weerstand van de staaf.

De onzekerheid in het vermogen wordt dus bepaald door de onzekerheid in het meten van de spanning en de onzekerheid in de weerstand van de staven. In de paragrafen hieronder worden deze onzekerheden bepaald.

3.2.1 Spanning

Met behulp van een voltmeter is de spanning van de voeding gemeten en vergeleken met de waarde op de display van de voeding en de waarde volgens Labview, de resultaten zijn te vinden in Tabel 3-2.

Tabel 3-2. *Uitgangsspanning van de voedingen volgens Labview, de display van de voeding en de voltmeter. In de laatste kolom staat het procentuele verschil tussen de waarde van Labview en die van de Voltmeter.*

Voeding	Labview (V)	Display (V)	Voltmeter (V)	Relatief verschil (%)
1	240	244	241.4	-0.58
2	245	246	246.9	-0.77
3	243	246	245.5	-1.02
4	242	242	242.6	-0.25

Aan de hand van de Tabel 3-2 is de onzekerheid in de spanning geschat op 0.6%. Om dit beter te doen zou er over een reeks van spanningen gemeten moeten worden, i.p.v. van één spanning zoals hier gebeurd is. De waarden die de Voltmeter meet worden hier als 'correct' beschouwd.

3.2.2 Weerstand

Omdat de weerstand van de staven niet constant hoeven te zijn door thermische effecten is de weerstand gemeten terwijl de staven koud zijn en ook terwijl de staven warm zijn. De exacte temperatuur van de staven, als zij warm zijn, is niet bekend. Maar bij de meting had het water bij de uitlaat van de kern een temperatuur van ongeveer 90 °C. Daarnaast is de weerstand van de staven ook bepaald door de spanning en stroom, die aangegeven worden op de voeding, te vermenigvuldigen. De resultaten van deze metingen staan in Tabel 3-3.

Tabel 3-3. *De gemeten weerstanden van de staven. Bij 'Warm' betreft het twee verschillende metingen, uitgevoerd op verschillende momenten. Van de metingen bij de warme staven en die van de display zijn de variantie berekend, om een indicatie te geven van de onzekerheid in de weerstand van de staven.*

Staf	Koud [Ω]	Warm [Ω]	Warm [Ω]	Display [Ω]	Variantie [Ω]
1	34	33.9	34.1	34.7	0.18
2	34.5	35.2	34.5	34.9	0.13
3	34.7	34.6	34.8	35.2	0.11
4	33.9	34.3	34.8	34.1	0.12

De weerstanden van de verschillende staven hoeft niet hetzelfde te zijn, omdat de spoed van de draden in de staven niet hetzelfde hoeft te zijn.

Het hoeft, overigens, niet te zijn dat de staven een zelfde weerstand hebben, omdat de spoed van de draden niet hetzelfde hoeft te zijn.

De onzekerheid in de spanning bedraagt dus 0.6% en de absolute onzekerheid in de weerstand van de staven is 0.14 Ω . Aan de hand van deze twee waarden wordt de onzekerheid in het vermogen bepaald.

Voor de absolute onzekerheid in het vermogen geldt de volgende vergelijking:

$$u(P) = \sqrt{\left(\frac{2Uu(U)}{R}\right)^2 + \left(\frac{U^2u(R)}{R^2}\right)^2} \quad (3-5)$$

Waarin $u(R)$, in [Ω], de absolute onzekerheid is in de weerstand en $u(U)$, in [V], de absolute onzekerheid is in de spanning.

Om een uitdrukking te verkrijgen voor de relatieve onzekerheid in het vermogen wordt vergelijking (3-5) gedeeld door het vermogen wat resulteert in de volgende vergelijking:

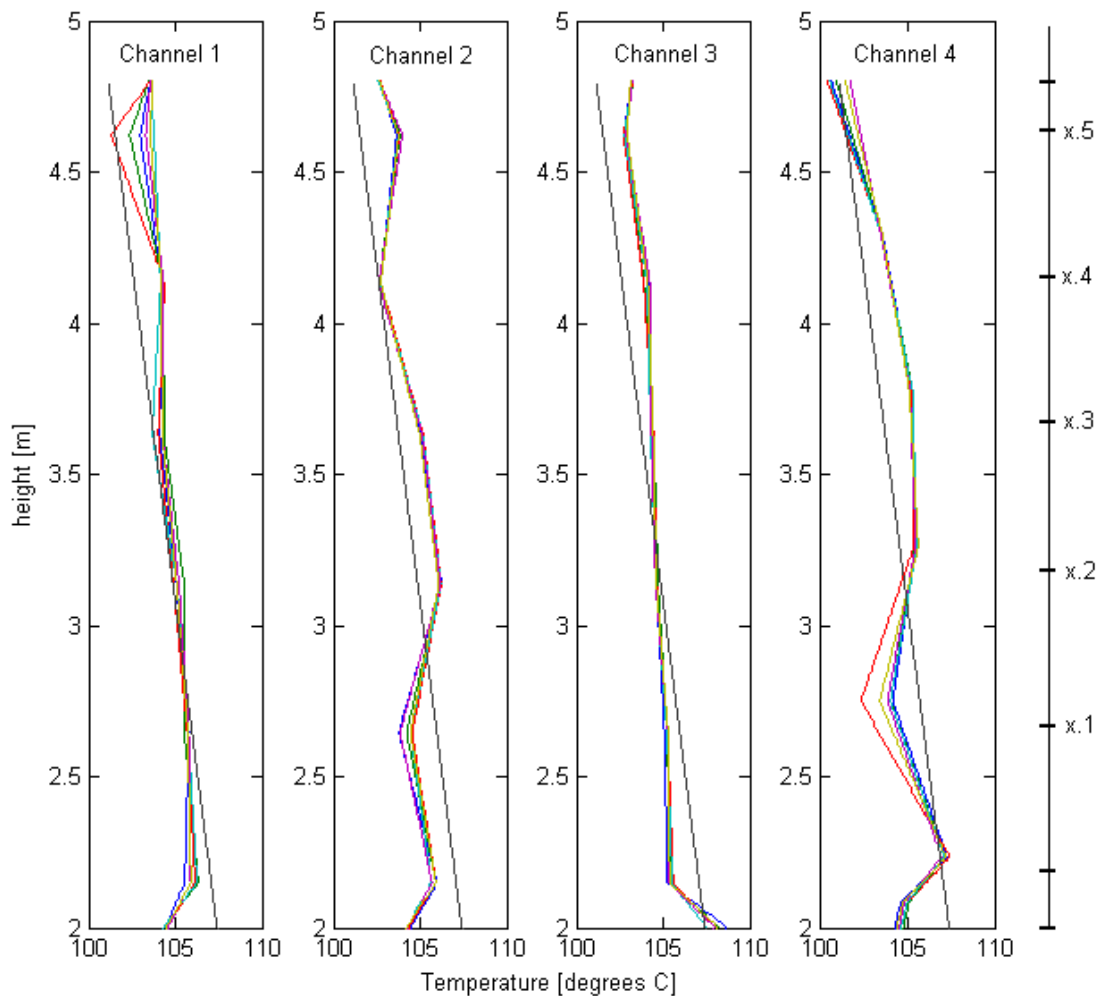
$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\left(2\frac{u(U)}{U}\right)^2 + \left(\frac{u(R)}{R}\right)^2} \quad (3-6)$$

Dit resulteert in een relatieve onzekerheid van 1.27% in het vermogen.

3.3 Onzekerheid in de meting van de temperatuur

Bij de centrale inlaat van de kern zit een PT100 die de temperatuur meet. Deze PT100 is gekalibreerd met behulp van ijswater en kokend water. Aan de hand van de afkoelcurve van de PT100 zijn de thermokoppels in de schoorsteen gekalibreerd door de opstelling te laten afkoelen met een draaiende pomp. De afwijkingen van de thermokoppels t.o.v. de PT100 bedragen 0.3K.

Het resultaat van de kalibratie is gecontroleerd door bij een stabiele massastroom, met een centrale inlaattemperatuur van 98.7 °C en met $q=0.75\text{kW}$, het temperatuurprofiel van de schoorsteen te meten. Het resultaat is geplot in Figuur 3-4.



Figuur 3-4 Het temperatuurprofiel in de vier schoorstenen. De massastroom is stabiel, $q=0.75\text{kW}$ en $T_{\text{sub}}=1.3\text{K}$. De zwarte lijn is de verzadigingstemperatuur, de andere kleuren zijn het temperatuurprofiel van zes verschillende tijdstippen. Thermokoppels 3.2 (dat is thermokoppel x.2 van kanaal 3) en 3.3 geven hetzelfde signaal omdat er een coaxkabel kapot is. Te zien is dat op sommige plaatsen de temperatuur hoger is dan de verzadigingstemperatuur.

Zoals te zien in Figuur 3-4 bedragen de variaties in de temperatuur enkele graden, wat groter is dan de variaties bij de kalibratie (0.3K). Door warmteverliezen zal de temperatuur in de schoorsteen dalen, maar in de temperatuurprofielen zijn ook stijgingen van enkele graden te zien. Ook zijn de temperaturen van de vier kanalen, op een zelfde punt in de schoorsteen, niet gelijk, er zijn verschillen van enkele graden aanwezig. Er zijn geen significante verschillen in frictie, vermogen en subcooling aanwezig die dat kunnen verklaren.

Het verschil met de kalibratie en het temperatuurprofiel in figuur 3-4 is dat de massastroom bij de kalibratie 0.7 [kg/s] bedroeg en bij Figuur 3-4 is de massastroom gelijk aan 0.075 [kg/s]. In het eerste geval stroomt het water in 8s door de schoorsteen en in het andere geval stroomt het water in ongeveer 80s door de schoorsteen.

Bij turbulente pijpstroming kan de gehele temperatuurgradiënt geconcentreerd worden geacht binnen een film aan de wand met een dikte δ_q , binnen de rest van de pijp is de

temperatuurgradiënt nul. Dat betekent dat de bulk van de vloeistof een temperatuur $\langle T \rangle$ heeft, en dat de binnenwand van de pijp een temperatuur $T_{w,binnen}$ heeft. Dan kan, indien δ_q een dikte klein t.o.v. de diameter D heeft, de volgende vergelijking opgesteld worden voor de warmteflux:

$$\phi_q'' = h(T_{w,binnen} - \langle T \rangle) = \lambda \frac{dT}{dr} \approx \lambda \frac{T_{w,binnen} - \langle T \rangle}{\delta_q} \quad (3-7)$$

Met λ [W/(m·K)] als warmtegeleidingcoëfficiënt van water. Het rechterdeel van vergelijking (3-7) is alleen geldig als $D \gg \delta_q$. Gebruik makend van de definitie van het Nusselt getal ($Nu = hD/\lambda$) wordt de volgende vergelijking verkregen:

$$\frac{Nu \cdot \lambda}{D} (T_{w,binnen} - \langle T \rangle) = \lambda \frac{T_{w,binnen} - \langle T \rangle}{\delta_q} \quad (3-8)$$

Vereenvoudiging van vergelijking (3-8) en gebruik makend van Dittus-Boelter⁶ levert de volgende uitdrukking op voor δ_q :

$$\delta_q'' = \frac{D}{Nu} = \frac{D}{0.027 Re^{0.8} Pr^{0.33}} \quad (3-8)$$

Met de diameter D gelijk aan 25mm en Pr gelijk aan 1.75. Vergelijking (3-8) levert een thermische grenslaagdikte op van 1.2mm ($Re = 3.3 \cdot 10^3$) maar Dittus-Boelter is niet geldig voor $Re < 1.0 \cdot 10^4$.

De volgende definitie van het Nusselt getal is geldig voor Reynolds getallen tussen 4000 en 10,000 (met een onnauwkeurigheid van 5%)⁷:

$$Nu = \frac{D}{0.021 \cdot Re^{0.8} Pr^{0.4}} \quad (3-9)$$

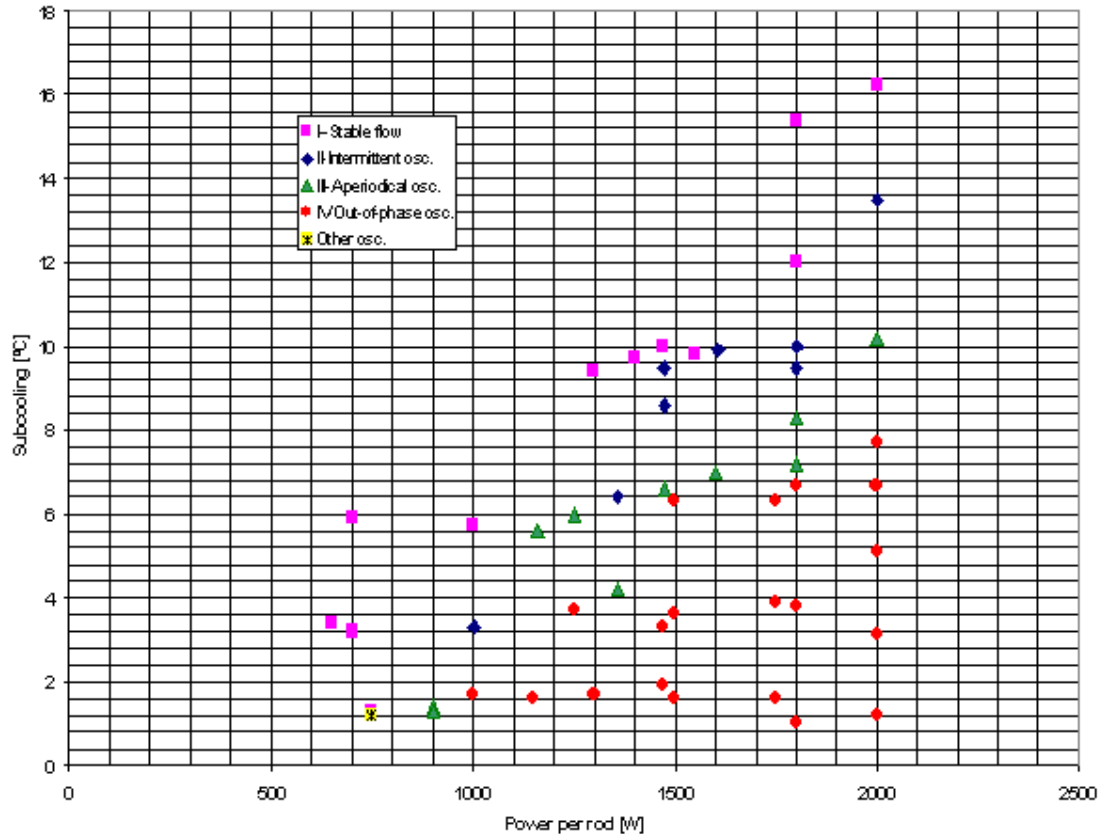
Als voor het Nusselt getal vergelijking (3-9) wordt gebruikt is de dikte van de thermische grenslaag gelijk aan 1.5mm. Dus aan de hand van deze berekening kan er gezegd worden dat de thermische grenslaag er niet toe doet. Maar dit is in dit onderzoek niet experimenteel gecontroleerd.

Duidelijk te zien is, in Figuur 3-4, dat ook de absolute waarde van de gemeten temperatuur te hoog is. Omdat er temperaturen worden gemeten die enkele graden hoger zijn dan de verzadigingstemperatuur.

4. Experimentele resultaten

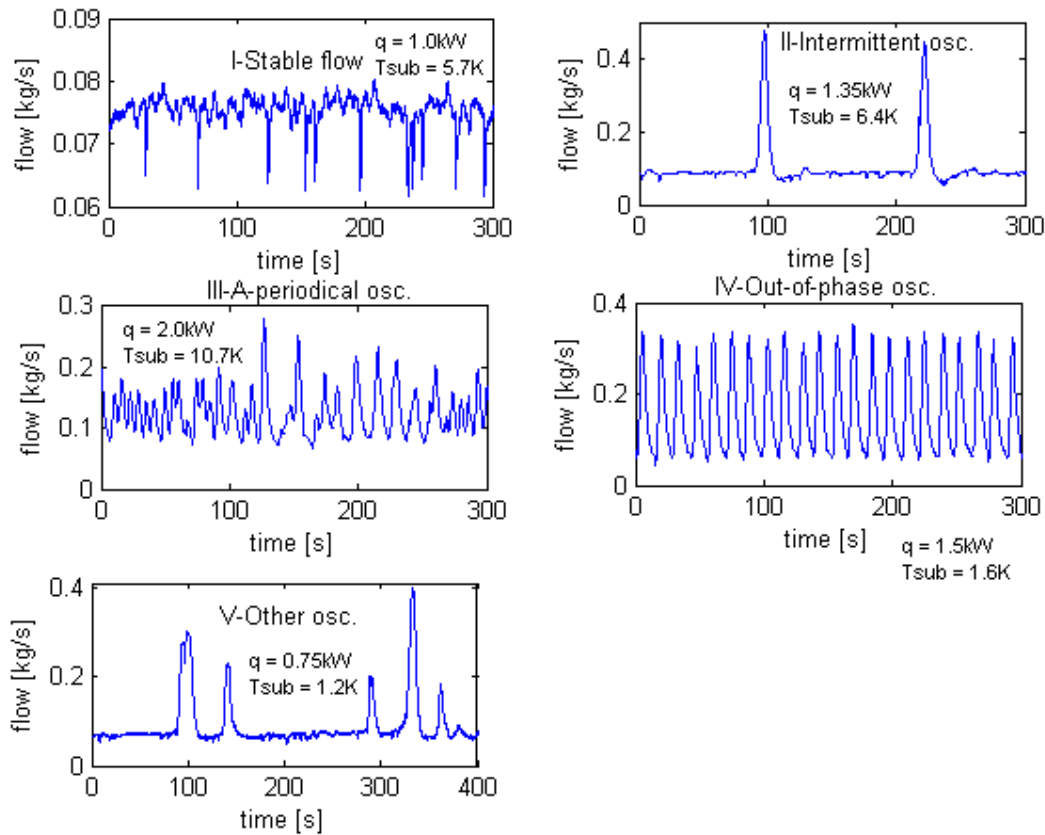
Een BWR staat ingesteld op een bepaald thermisch vermogen en inlaattemperatuur, dit wordt het werkpunt genoemd. Daarom wordt er onderzocht hoe de massastroom zich gedraagt op verschillende werkpunten. Het resultaat daarvan is in een stabiliteitsfiguur geplaatst, zoals te zien is in Figuur 4-1.

Bij al de metingen bedraagt de centrale inlaat frictie $K_{in}=8.9\pm 0.11$. Deze frictie is vergelijkbaar met de centrale inlaat frictie die gebruikt is bij CIRCUS-II⁵, zodat de resultaten vergeleken kunnen worden.



Figuur 4-1 Stabiliteitsfiguur van CIRCUS-IV bij een centrale inlaat frictie van $K_{in}=8.9$

Zoals te zien in de stabiliteitsfiguur zijn er vijf verschillende manieren waarop de massastroom zich gedraagt, van iedere situatie is in Figuur 4-2 een plot van de massastroom geplaatst.

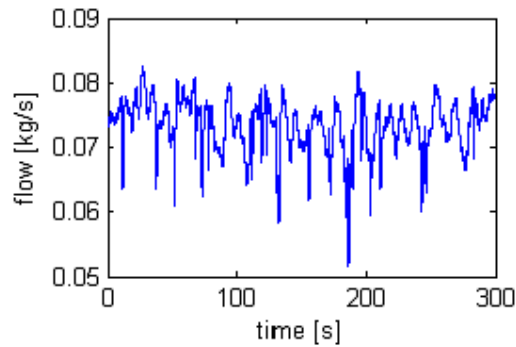


Figuur 4-2 Plot van de primaire massaflow bij de verschillende instabiliteiten die er voorkomen bij de verschillende vermogens en subcoolings.

In de volgende paragrafen wordt een verdere beschrijving gegeven van de verschillende manieren waarop de massaflow zich gedraagt, behalve die van A-periodieke massaflow oscillaties.

4.1 Stabiele massaflow

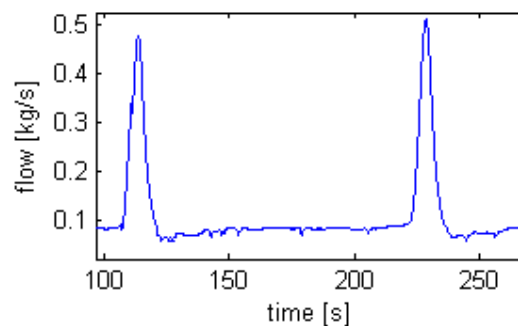
Bij een stabiele massaflow is er geen of vrijwel geen damp aanwezig in de schoorsteen. Dat er toch sprake is van een debiet komt omdat het water in de kern en schoorsteen heter is dan het water in de downcomer, waardoor er dichtheidsverschillen in het systeem aanwezig zijn. Zoals in Figuur 4-2 en Figuur 4-3 te zien is zitten er spikes in de massaflow. Deze zijn ook aanwezig als de opstelling koud is en de pomp draait. De spikes worden dus niet veroorzaakt door een fysieke verandering van de massaflow. Dit moet dus aan de flow sensor liggen, maar het is onbekend waarom de flow sensor dat gedrag vertoont.



Figuur 4-3 Plot van de primaire massaflow versus de tijd. Bij $q = 1.00\text{kW}$ en $T_{sub} = 5.7\text{K}$.

4.2 Intermittent massaflow oscillaties

Kenmerkend van Intermittent massaflow oscillaties is dat de massaflow voor een lange periode stabiel is en dat er dan een piek optreedt in de massaflow doordat er flashing optreedt, zie Figuur 4-4. Ook zijn de faseverschillen, in de partiële massaflow, tussen de kanalen klein t.o.v. de tijd tussen twee flashing gebeurtenissen.



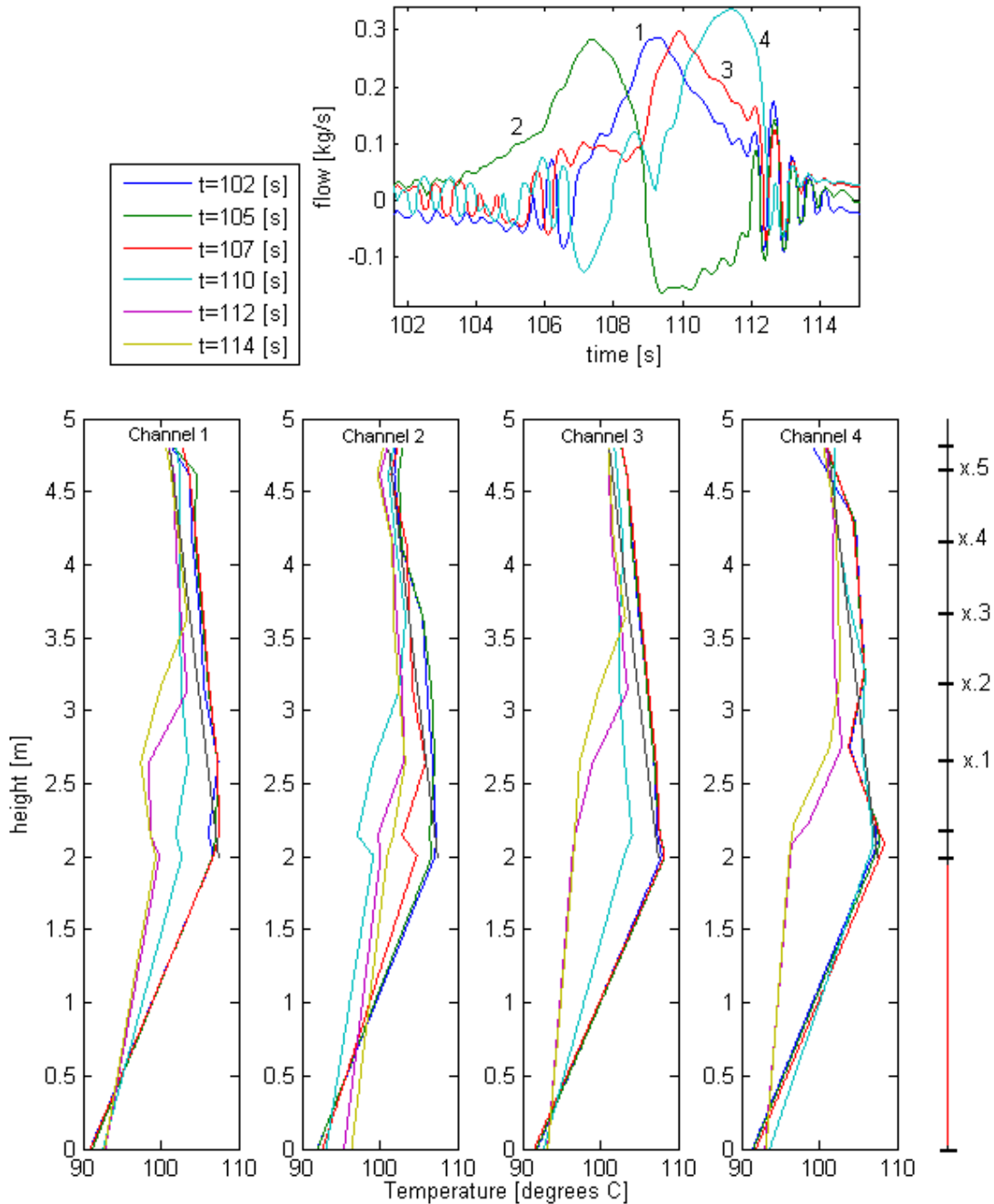
Figuur 4-4 De massaflow tijdens intermittente massaflow oscillaties. Dit is gemeten bij een $T_{sub} = 6.4\text{K}$ en bij $q = 1.35\text{kW}$.

4.2.1 Beschrijving van Intermittent massaflow oscillaties

In deze paragraaf wordt een beschrijving van Intermittent massaflow oscillaties gegeven. Dit wordt gedaan aan de hand van de partiële massaflow en een temperatuurprofiel, zoals weergegeven in Figuur 4-5.

Er is een kanaal waar duidelijk als eerste flashing optreedt, dit is te zien aan de partiële massaflow in Figuur 4-5 (hier kanaal 2). Daarna volgen de andere drie kanalen en is er sprake van neerwaartse stroming in kanaal 2.

Na $t = 112\text{s}$ is er een gedempte oscillatie te zien in de partiële massaflow van alle kanalen, waarbij deze oscillaties in fase zijn. Wat hier gemeten wordt zijn drukoscillaties die niet veroorzaakt kunnen zijn door een veranderende massaflow. Dit omdat, volgens het 'ongefiltreerde' druksignaal, de partiële massaflow in 0.1s van een opwaartse stroming van 0.6 [kg/s] naar een neerwaartse stroming van 0.6 [kg/s] verandert.



Figuur 4-5 Het temperatuurprofiel van de kern en de schoorsteen van de vier kanalen. De zwarte lijn is de verzadigingstemperatuur in de schoorsteen. Rechts van het temperatuurprofiel wordt aangegeven op welke plaatsen een thermokoppel geïnstalleerd is. Daarboven staat een figuur van de partiële massastromen van de vier kanalen.

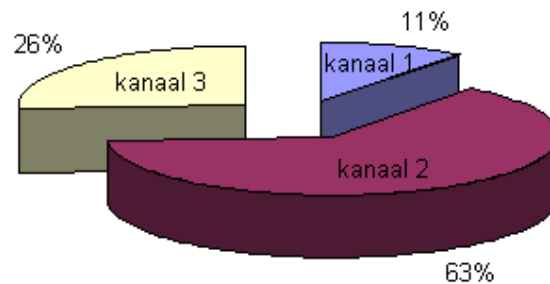
Op $t=102$ s, zie Figuur 4-5, zijn er geen significante verschillen in het temperatuurprofiel van de verschillende kanalen te zien. Hoewel er op $t=105$ s wel flashing optreedt in kanaal 2 is dit nog niet terug te zien in het temperatuurprofiel. Op $t=107$ s verandert het temperatuurprofiel van kanaal 1, 3 en 4 niet, terwijl de uitlaattemperatuur van de kern van kanaal 2 daalt doordat de massastroom in dat kanaal fors toegenomen is. Op $t=110$ s vindt er ook flashing (en/of koken) plaats in de kanalen 1 en 3 waardoor de temperaturen aan het begin van de

schoorsteen duidelijk dalen. Door neerwaartse massaastroom in kanaal 2 stijgt de inlaattemperatuur en de temperatuur bij het begin van de schoorsteen bij $t = 112s$. Op hetzelfde tijdstip is de massaastroom in kanaal 4 $0.25 [kg/s]$ en is de massaastroom aan het dalen daarom nadert de uitlaattemperatuur van de kern de inlaattemperatuur. Op $t=114s$ is de situatie weer stabiel en is te zien dat kanaal 2 een hoge inlaattemperatuur heeft omdat er daar een neerwaartse massaastroom heeft opgetreden.

4.2.2 Welk kanaal flasht als eerste

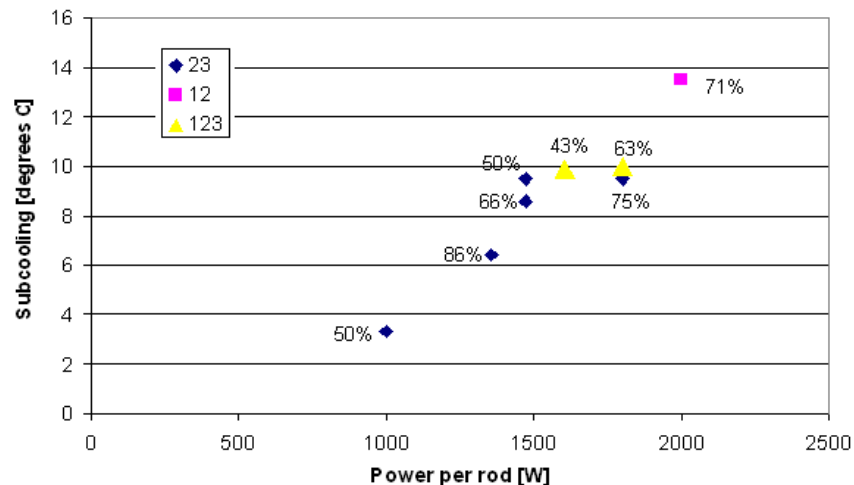
In deze paragraaf wordt onderzocht in hoeveel procent van de metingen een bepaald kanaal als eerst flasht en wat de oorzaak daarvan is.

Bij iedere meting treedt er meerdere malen flashing op. Daarom kan van iedere meting een percentage berekend worden van hoeveel maal een bepaald kanaal het eerste kanaal was waar flashing optrad. Het resultaat van het gemiddelde percentage van alle metingen staat in Figuur 4-6



Figuur 4-6 Percentage van het aantal keren dat er als eerste flashing voorkwam in een bepaald kanaal. Dit is gebaseerd op 8 metingen waarbij in totaal 57 keer flashing plaatsvond.

Opvallend aan Figuur 4-6 is dat in 63% van de gevallen kanaal 2 als eerste flasht en nooit kanaal 4. Het percentage van de gevallen waar kanaal 2 als eerste flasht staat, per meting, in Figuur 4-7.

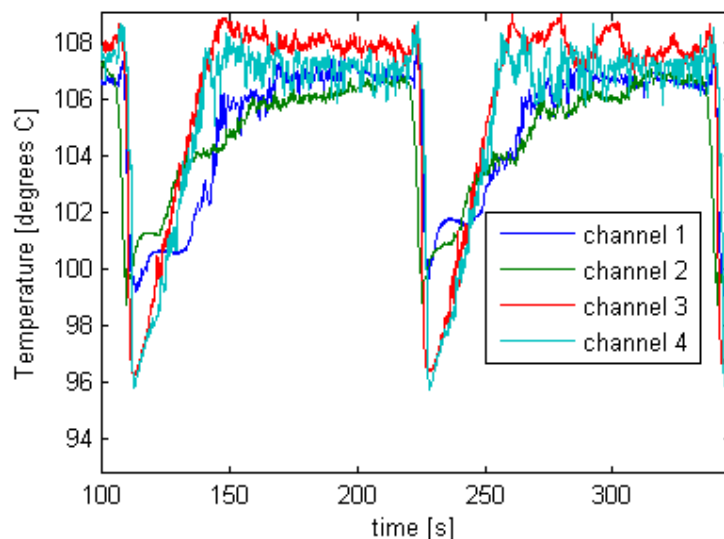


Figuur 4-7 Kanalen die als eerste flashen. Aan het gebruikte teken is te zien welke kanalen tijdens de meting als eerste flashen. Ieder percentage in de figuur geeft het percentage aan dat kanaal 2 als eerste flashte. Een gele driehoek betekent dus dat, tijdens die meting, kanalen 1, 2 en 3 als eerste hebben geflasht.

In Figuur 4-7 is te zien dat bij lage T_{sub} en lage q kanalen 2 en 3 de eerste kanalen zijn waar flashing optreedt. Bij hogere T_{sub} en hogere q verschuift dat naar kanalen 2 en 1, met daartussen een overgangsgebied.

Het water stroomt met 9cm/s door de kern en met een snelheid van 3.8cm/s door de schoorsteen. Dat betekent dat het water in 100s van de inlaat van de kern naar de uitlaat van de schoorsteen stroomt. Deze tijd is ongeveer gelijk aan de periodetijd van de massastroom oscillaties, zie Figuur 4-4. Er kan dus worden verondersteld dat een eerdere flashing gebeurtenis geen invloed heeft op de vraag welk kanaal als eerste flasht.

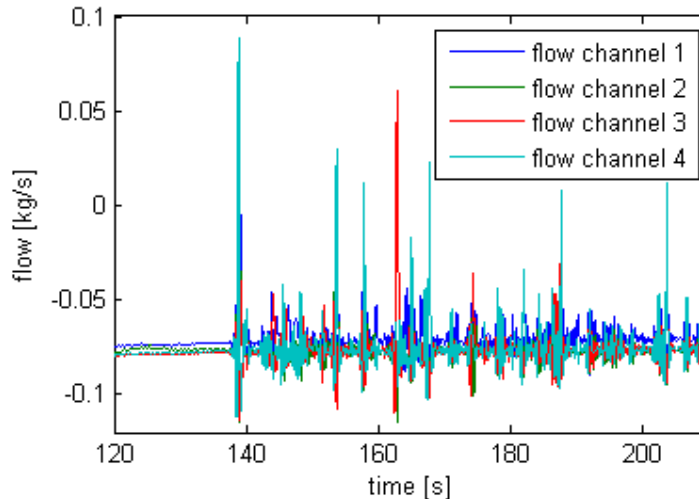
Aan de hand van de meting die in paragraaf 4.2.1 behandeld is wordt verklaard waarom kanaal 2 in de meerderheid van de gevallen als eerst flasht. Dit wordt gedaan aan de hand van een plot van de kernuitlaat temperatuur en van de partiële massastroom.



Figuur 4-8 *Temperatuur van de kernuitlaat als functie van de tijd voor de verschillende kanalen.*

In Figuur 4-8 is te zien dat de uitlaattemperatuur van kanaal 2 blijft stijgen, totdat er flashing optreedt. Daarnaast zitten er minder oscillaties in het signaal van kanaal 2, wat kan duiden op een stabielere massastroom in dat kanaal. Maar zoals in paragraaf 3.3 vermeld is, zitten er grote onzekerheden in de temperatuur, daarom moet Figuur 4-8 kritisch bekeken worden.

De vorming van damp resulteert in een grotere massastroom. Dit is te zien in Figuur 4-9 waar er allerlei pieken te zien zijn in de partiële massastromen.



Figuur 4-9 De partiële massastroom tussen twee flashing gebeurtenissen. Te zien is dat de signalen in het begin heel weinig ruis bevatten. Maar na $t=138s$ is er veel ruis op de signalen te zien, ook zijn er pieken in de massastroom te zien omdat er bellen gevormd worden, vooral bij kanaal 4 en in mindere mate bij kanaal 1 en 3. Dit is consequent tijdens de hele meting te zien.

De reden dat er tot $t=138s$ geen variaties zijn in de partiële massastroom, is dat er na een flashing gebeurtenis veel koud water in de kern zit waardoor er geen damp wordt gevormd. (Het water stroomt in $\sim 22s$ door de kern, dat betekent dat het koude water, op $t=138s$, vrijwel uit de kernsectie is.)

Op $t=138s$, zie Figuur 4-9, stijgt de massastroom in kanaal 4 tot $0.1[kg/s]$. Dat betekent dat kanaal 4 het eerste kanaal is waar er damp gevormd wordt. Dit duidt erop dat kanaal 4 het eerste kanaal is dat de verzadigingstemperatuur bereikt heeft.

Dit terwijl de fricties gelijk zijn omdat de geometrie van de kanalen hetzelfde is en het ook niet blijkt uit de metingen van de inlaatfrictie, zie Tabel 2-2. En omdat, zoals vermeldt, de geometrie en isolatie van de inlaat hetzelfde is, is ook de inlaattemperatuur van de vier kanalen gelijk.

Dus de reden dat kanaal 4 het eerste de verzadigingstemperatuur bereikt is het hogere vermogen.

4.3 Uit-fase massastroom oscillaties

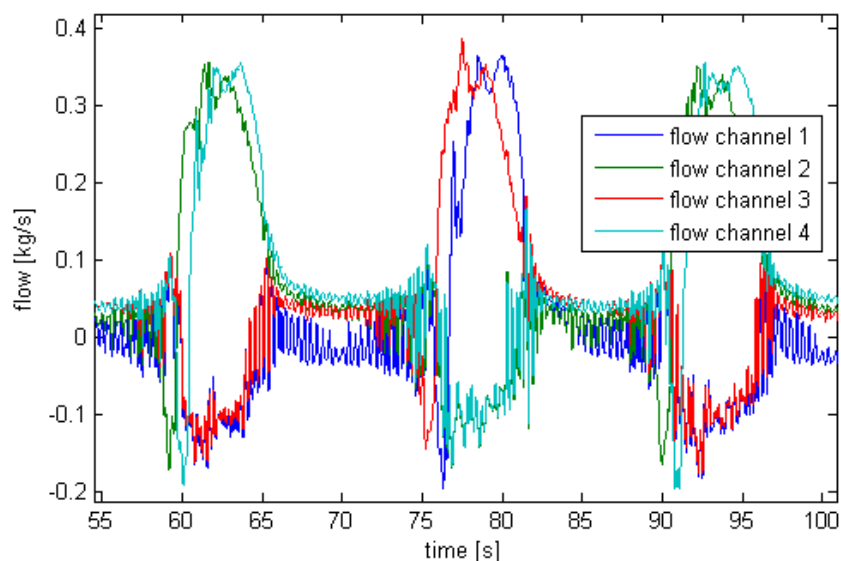
In paragraaf 4.3.1 wordt uitgelegd wat uit-fase massastroom oscillaties zijn. Dit wordt gedaan aan de hand van figuren van de partiële en primaire massastromen. Om beter te beschrijven wat er gebeurd wordt ook een figuur van het temperatuurprofiel gegeven.

Daarnaast wordt er in paragraaf 4.3.2 gekeken welke kanalen gekoppeld zijn en of er een verband is tussen het werkpunt en de kanalen die gekoppeld zijn.

4.3.1 Beschrijving van Uit-fase massastroom oscillaties

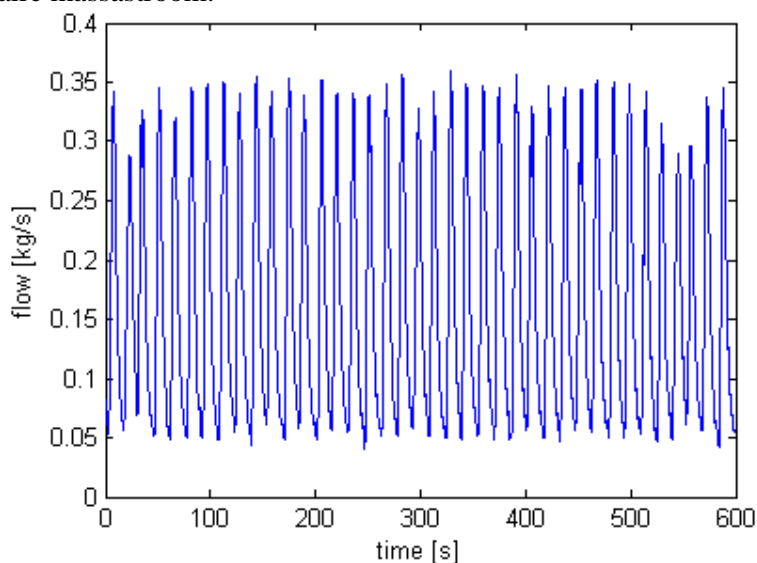
Hiermee wordt bedoeld dat er twee paren van twee kanalen zich uit fase gedragen. In twee kanalen vindt flashing en koken plaats, waardoor de massastroom door die kanalen stijgt. (Met

koken wordt bedoeld dat er damp ontstaat door de toevoer van thermische energie van de verwarmingselementen.) Wat als gevolg heeft dat er in de andere twee kanalen neerwaartse stroming plaats vindt. Daarna wordt de massastroom stabiel en even later zullen de kanalen van rol verwisselen, zie Figuur 4-10.



Figuur 4-10 *Partiële massastroom bij uit-fase oscillaties. Er zijn twee paren van twee kanalen die zich ongeveer in fase gedragen. Bij deze meting is $T_{sub}=1.6K$ en $q=1.50kW$.*

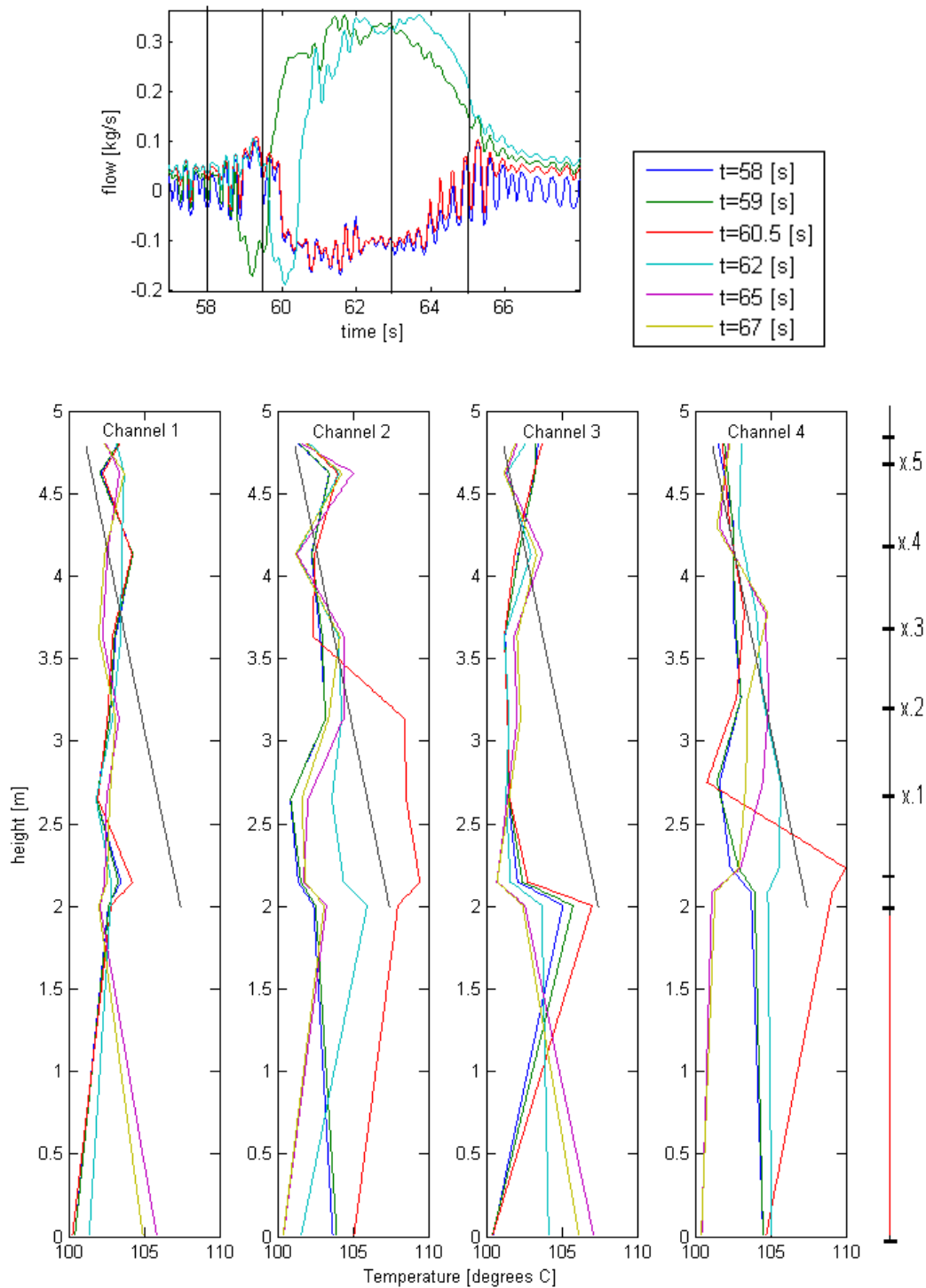
Het faseverschil tussen twee gekoppelde kanalen is niet nul, zie Figuur 4-10, en varieert (de één komt net iets eerder dan de ander). Rond $t = 30s$ en $t = 550s$ draagt dit bij aan een kleinere piek in de primaire massastroom.



Figuur 4-11 *De primaire massastroom versus de tijd.*

Voordat de partiële massastroom in een kanaal fors toeneemt, vindt er in dat kanaal neerwaartse stroming plaats die ongeveer 2 seconden lang duurt, zie Figuur 4-10. Dit treedt consistent op in alle metingen waar uit-fase massastroom oscillaties plaatsvinden. Visueel is er waargenomen dat er ergens in de kern bellen ontstaan en dat deze naar beneden stromen. Daarna neemt de massastroom snel toe en stromen de bellen met een hoog tempo uit de kern.

De oorzaak hiervan is dat water in dampvorm een lagere dichtheid heeft, waardoor er uitzetting plaatsvindt. Dit effect is zo sterk dat als gevolg daarvan het water bij de inlaat naar beneden stroomt.



Figuur 4-12 *Temperatuurprofiel van de kern en de schoorsteen van de vier kanalen. De zwarte lijn is de verzadigingstemperatuur. Rechts van het temperatuurprofiel wordt aangegeven op welke plaatsen een thermokoppel geïnstalleerd is. Daarboven staat een figuur van de partiële massastroom van de vier kanalen.*

In Figuur 4-12 is te zien dat op $t=58$ [s] de inlaattemperatuur van de kernen 2 en 4 hoger zijn dan die van de kernen 1 en 3. Dit komt omdat in de eerste twee kanalen 10 seconden eerder neerwaartse stroming plaatsvond waardoor de inlaattemperatuur hoger is.

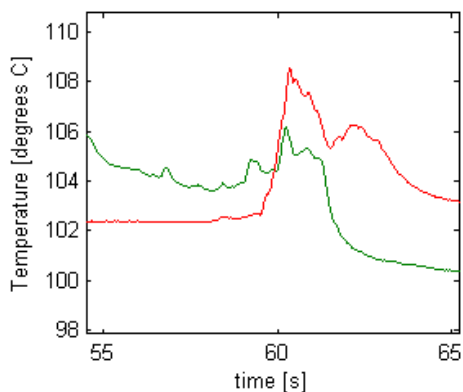
Op $t=59$ [s] is de inlaattemperatuur van alle kanalen gelijk aan die van $t=58$ [s], behalve die van kanaal 2 die iets gestegen is, de oorzaak is de neerwaartse massastroom die optreed op dat tijdstip, zie ook Figuur 4-13.

Op $t=60.5$ s is de massastroom in kanaal 2 hoog, dit is duidelijk te zien in Figuur 4-16, de temperatuur bij de inlaat van de schoorsteen nu 110°C geworden. Duidelijk is te zien dat in kanaal 4 iets later flashing optreedt, omdat in kanaal 2 al op posities hoger in de schoorsteen de temperatuur hoog opgelopen is. Op dit tijdstip treedt er neerwaartse massastroom op in de kanalen 1 en 3 daarom lijkt het vreemd dat de temperatuur bij de inlaat van de schoorsteen stijgt. De reden daarvoor is dat kort daarvoor de massastroom in kanaal 1 en 3 hoger was

Op $t = 62$ s is duidelijk te zien dat de uitlaattemperatuur van de kern daalt en de inlaattemperatuur stijgt door de sterke neerwaartse massastroom in kanalen 1 en 3. Ook in kanalen 2 en 4 daalt de uitlaattemperatuur omdat de massastroom hoog is warmt het water dat langs de kern stroom niet veel meer op en daalt de uitlaattemperatuur van de kern.

Het water koelt af als zij omhoog beweegt door de koudere wanden van de schoorsteen en het koudere water vlak langs de wand. Dit is in Figuur 4-12 duidelijk te zien omdat de piektemperaturen hoger in de schoorsteen lager zijn.

De inlaattemperatuur is consequent hoger dan de centrale inlaattemperatuur, wat duidelijk te zien is in Figuur 4-13.

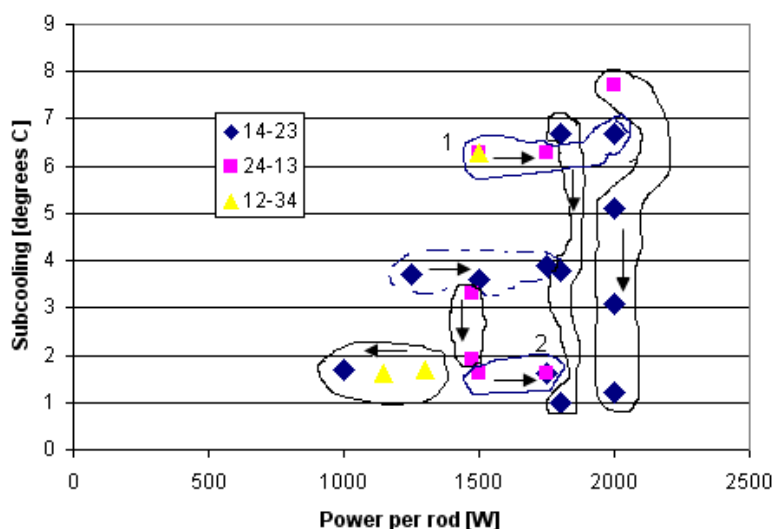


Figuur 4-13 De temperatuur van de inlaat (groen) en de uitlaat (rood) van de kern van kanaal 2. Lagere temperaturen komen er niet voor in de inlaattemperatuur van de kern.

De reden hiervan is dat iedere keer bij neerwaartse stroming warm water de inlaat instroomt, waardoor de buizen warmer worden. Als de massastroom weer stabiel wordt zal er weer water met de centrale inlaattemperatuur de inlaat instromen. Hier wordt het water verwarmd door de buizen van de inlaat en zal het water met een hogere temperatuur dan de centrale inlaattemperatuur de kern instromen.

4.3.2 Koppeling van de kanalen

Te zien is dat in dit voorbeeld bij een T_{sub} van 1.6°C en een $q=1.50\text{kW}$ kanalen 1 en 3 gekoppeld zijn, evenals kanalen 2 en 4. In deze paragraaf wordt gekeken of bij de verschillende metingen van out-of-phase oscillaties bepaalde kanalen een voorkeur voor elkaar hebben. Wat hierbij verwacht wordt is dat de koppeling van kanalen in een ideaal systeem (dus ieder kanaal heeft een exact gelijk vermogen, frictie en inlaat temperatuur) de kanalen willekeurig aan elkaar gekoppeld worden. En dat bij iedere opeenvolgende meting in het uit-fase gebied dezelfde kanalen aan elkaar gekoppeld blijven. Mits het vermogen van de verschillende kanalen op ongeveer hetzelfde tijdstip verhoogd wordt.

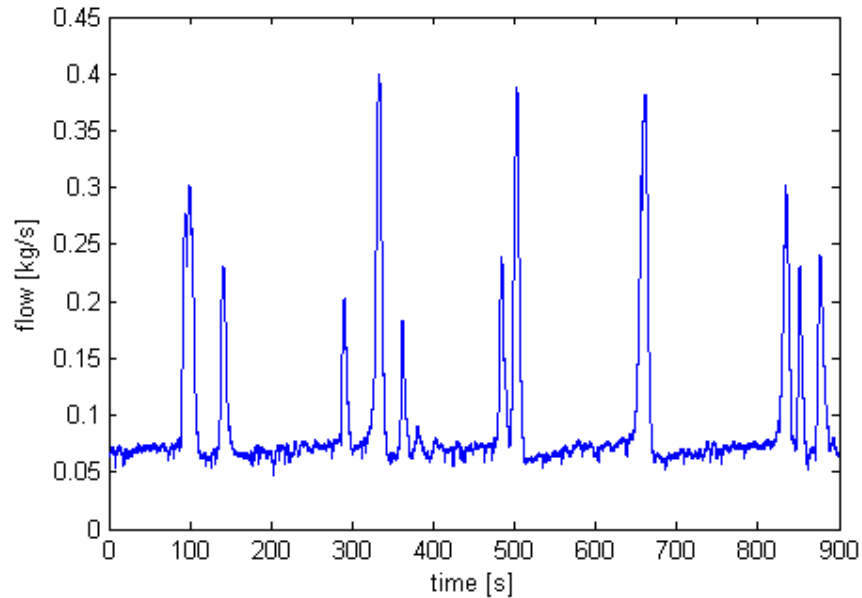


Figuur 4-14 Gekoppelde kanalen bij uit-fase oscillaties. Van elke meting met uit-fase oscillaties is aangegeven welke kanalen gekoppeld zijn. Zo zijn bij de blauwe ruitjes kanalen 1 en 4 gekoppeld en dus ook kanalen 2 en 3. De meetpunten die omcirkeld zijn, zijn metingen die na elkaar uitgevoerd zijn (waarbij iedere keer ongeveer een uur gewacht is voor de volgende meting gestart werd), waarbij de pijlen de volgorde aangeven. Bij de 1 in de figuur is te zien dat tijdens de meting eerst kanalen 21-34 gekoppeld zijn en later kanalen 24-13. Hetzelfde gebeurt bij 2 maar dan zijn eerst 24-13 gekoppeld en later de kanalen 14-23.

Zoals in Figuur 4-14 te zien is de koppeling van de kanalen niet willekeurig. Omdat in de meerderheid van de metingen kanalen 1 en 4 gekoppeld zijn. Ook komt het voor dat tijdens een meetreeks andere kanalen gekoppeld raken. Er is echter geen duidelijk verband tussen het werkpunt en de koppeling van de kanalen zichtbaar.

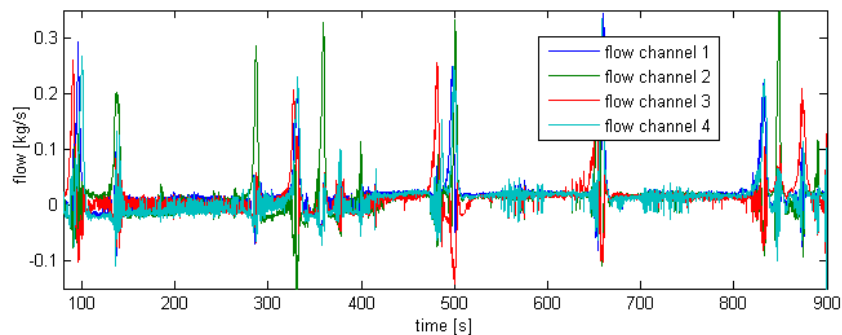
4.4 Andere massastroom oscillaties

De tot nu toe behandelde oscillaties in de primaire massastroom kwamen ook al voor bij CIRCUS I en/of CIRCUS II, zie hoofdstuk 1. Maar bij één meting is er duidelijk ander gedrag te zien in de primaire massastroom. Deze meting zit dicht op de stabiliteitsgrens tussen een stabiele en onstabiele massastroom. Want bij een T_{sub} van 0.1K hoger is de massastroom stabiel, zie Figuur 4-1.



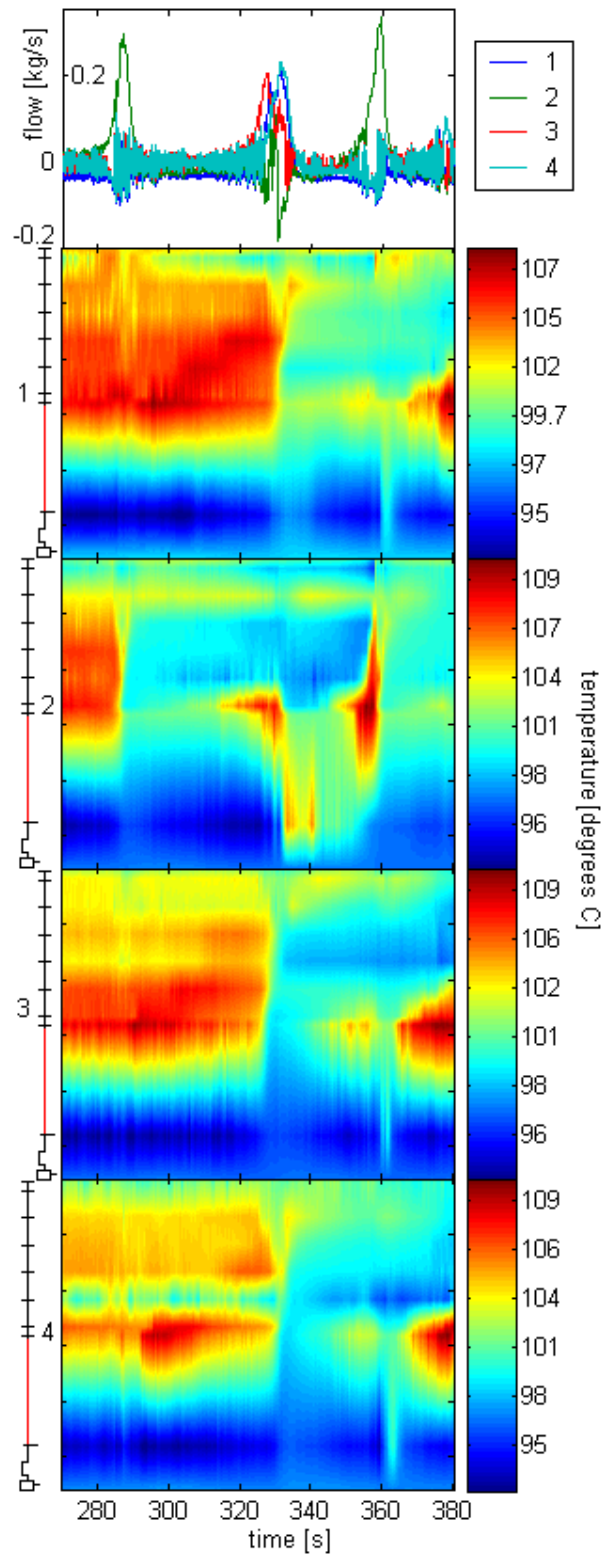
Figuur 4-15 Plot van de primaire massastroom. Deze meting is uitgevoerd bij $T_{sub} = 1.2K$ en $q = 0.75kW$.

Deze oscillaties lijken op intermitterent massastroom oscillaties, omdat de massastroom voor lange tijd stabiel is voordat er (combinaties van) pieken optreden. Wel zijn er significante fase verschillen aanwezig tussen de verschillende kanalen, dit is te zien in Figuur 4-16.



Figuur 4-16 Partiele massastroom

In Figuur 4-17 is te zien dat zowel flashing als koken oscillaties in de massastroom veroorzaakt. Rond $t = 360$ [s] is te zien dat, in kanaal 2, er daar door koken in de kern damp ontstaat waardoor de massastroom stijgt. Dit moet in de kern plaatsvinden omdat de temperatuur in de schoorsteen te laag is om daar flashing te induceren. Rond $t = 330$ [s] duidt het vele hete water in de schoorsteen, van kanaal 1, erop dat daar de massastroom stijgt door flashing in de schoorsteen.

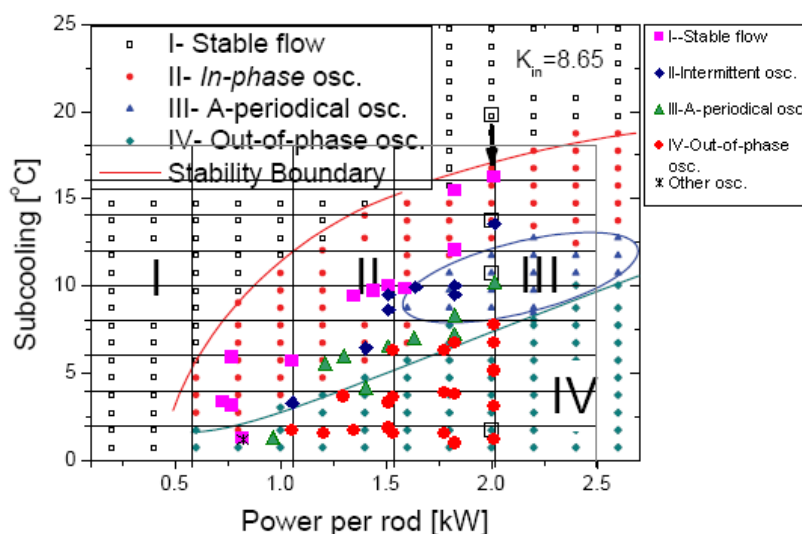


Figuur 4-17 *Het temperatuurprofiel in de kanalen als functie van de tijd. Bovenaan staat de plot van de partiële massastromen als functie van de tijd.*

5 Conclusie

5.1 Vergelijking CIRCUS-IV met CIRCUS-II en CIRCUS-I

Omdat bij een BWR de schoorsteensectie verdeeld is in subkanalen, is het relevant om de stabiliteitsfiguren van CIRCUS-IV met die van CIRCUS-II en CIRCUS-I te vergelijken. Deze kunnen vergeleken worden omdat het totale dwarsoppervlak van de schoorsteen vergelijkbaar is voor de verschillende opstellingen. Daarnaast is het belangrijk dat de fricties vergelijkbaar zijn, zodat de massastroom vergelijkbaar zal zijn. Want een hogere massastroom resulteert in een lagere uitlaattemperatuur van de kern, waardoor er pas bij een lagere T_{sub} flashing optreedt. De stabiele 1-fase massastroom bij CIRCUS-II bedraagt⁸ 0.10 [kg/s] en bij CIRCUS-IV bedraagt deze 0.075 [kg/s] (zie Figuur 4-3).



Figuur 5-1 De gecombineerde stabiliteitsfiguren van CIRCUS-II⁵ en CIRCUS-IV.

Voor de stabiliteitsfiguur van CIRCUS-IV zijn er nog niet voldoende metingen uitgevoerd. Zo valt de 'precieze' stabiliteitsgrens tussen onstabiele en stabiele 1-fase massastroom nog niet te bepalen. En er zijn geen metingen uitgevoerd bij q groter dan 2kW. Maar over het gebied lager dan $q=2$ kW kunnen er al wel conclusies worden getrokken.

Bij CIRCUS-IV ligt de grens tussen een onstabiele en stabiele massastroom bij lagere T_{sub} dan bij CIRCUS-II. Bij $q=0.75$ [kW], bijvoorbeeld, is het verschil in T_{sub} gelijk aan 6 [K] en bij $q=1.5$ [kW] is het verschil 5 [K]. Dit is een significant verschil, wat veroorzaakt wordt door het gebrek aan isolatie van de schoorsteen. (Er wordt hier van uitgegaan dat bij een bepaald werkpunt, CIRCUS-II en CIRCUS-IV ook daadwerkelijk een gelijke q en T_{sub} hebben.) De frictie is bij CIRCUS-IV ook groter maar dat zorgt voor een lagere massastroom waardoor de stabiliteitsgrens stijgt (bij een hogere T_{sub} wordt de massastroom al onstabiel).

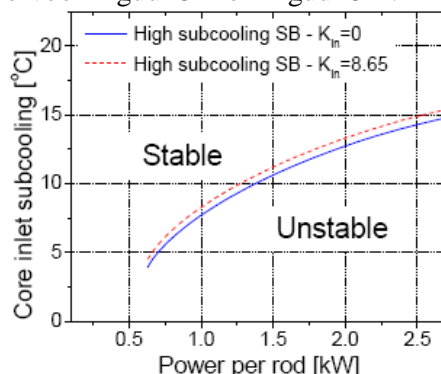
Een tweede verschil is dat er ook bij lagere vermogens bij CIRCUS-IV a-periodieke massastroom oscillaties optreden. Zoals in Figuur 5-1 te zien is er geen overgang mogelijk van intermitterent massastroom oscillaties naar uit-fase massastroom oscillaties zonder door een chaotisch gebied te moeten.

In Figuur 5-1 is ook te zien dat het gebied van uit-fase massastroom oscillaties vergelijkbaar is voor CIRCUS-II en CIRCUS-IV. De verschillen die er zijn kunnen toegewezen worden aan de onzekerheid in T_{sub} . Alleen beneden $q=1.0\text{kW}$ is de grens duidelijk verschoven.

In gebied III in Figuur 5-1 vinden er a-periodieke oscillaties plaats bij CIRCUS-II, terwijl er bij CIRCUS-IV in dat gebied ook intermitterent oscillaties plaatsvinden.

Bij CIRCUS-IV speelt koken een belangrijke rol bij intermitterent massastroom oscillaties. Net zoals bij CIRCUS-II vindt er in het kanaal waar als eerste de massastroom sterk toeneemt flashing plaats, in de kanalen die daarna komen vindt er koken in de kern plaats. Bij Circus II vond er later in de schoorsteen nog een keer flashing plaats⁹, dit is bij CIRCUS-IV visueel niet waargenomen.

Van CIRCUS-I is ook een stabiliteitsfiguur gemaakt door Marcel¹⁰, maar dat is gedaan door bij CIRCUS-II een kanaal af te sluiten¹¹. Omdat de massastroom door slechts twee kernsecties stroomt i.p.v. vier, zal de snelheid van het water dat langs de kern stroomt toenemen. Wat als gevolg heeft dat de kernuitlaattemperatuur daalt waardoor de massastroom pas bij lagere T_{sub} onstabiel wordt, vergelijk hiervoor Figuur 5-1 en Figuur 5-2.



Figuur 5-2 Stabiliteitsgrens (SB) van CIRCUS-I, zoals die gemeten is door Marcel¹⁰.

5.2 Gedrag van de kanalen onderling

Er is onderzocht welk kanaal als eerst flasht bij intermitterent massastroom oscillaties en er is onderzocht welke kanalen gekoppeld zijn bij uit-fase oscillaties.

Bij 63% van de metingen was kanaal 2 het eerste kanaal waar flashing optrad en nooit kanaal 4. Na een flashing gebeurtenis is kanaal 4 het kanaal waar als eerste damp ontstaat. Hieruit is geconcludeerd dat q van kanaal 4 groter is dan van de andere kanalen.

Bij uit-fase massastroom oscillaties komt het voor dat er tijdens een meetreeks niet steeds dezelfde kanalen gekoppeld zijn. Het is twee keer voorgekomen dat er tijdens een meting andere kanalen gekoppeld worden.

Er zijn echter geen duidelijke werkgebieden te onderscheiden waarbij er bepaalde kanalen gekoppeld zijn.

6 Aanbevelingen

Belangrijk is dat de schoorsteen beter geïsoleerd wordt, zodat de stabiliteitsgrenzen van CIRCUS-II en CIRCUS-IV beter met elkaar vergeleken kunnen worden.

Om de stabiliteitsgrenzen van CIRCUS-II en CIRCUS-IV te kunnen vergelijken is het belangrijk dat de frictie en dus de massastroom gelijk zijn. Dit kan gedaan worden door een T_{sub} en q te kiezen zodanig dat er sprake is van een stabiele 1-fase massastroom. Vervolgens moet de centrale inlaatfrictie zo ingesteld worden dat de massastroom overeenkomt met de massastroom van CIRCUS-II. Als ervan uitgegaan kan worden dat uitlaatfrictie van de schoorsteen bij CIRCUS-II en CIRCUS-IV vergelijkbaar is.

Er zou moeten onderzocht worden hoeveel de gemeten temperatuur veranderd als de thermokoppels verder de schoorsteen worden ingeschoven. Als dat toch voor significante temperatuurverschillen zorgt moeten alle thermokoppels even ver de schoorsteen in gestoken worden.

Sluit tijdens het afkoelen van CIRCUS-IV drie kanalen af en kalibreer aan de hand van de afkoelingscurve de thermokoppels van het kanaal dat opengebleven is, het voordeel daarvan is dat er dan een grotere massastroom door het opengebleven kanaal stroomt. Hierdoor zal het water minder afkoelen als het omhoog stroomt, ervan uitgaande dat de warmteweerstand niet zodanig daalt dat het water juist verder afkoelt.

Als de thermokoppels allemaal even ver de schoorsteen in geschoven zitten en niet vlakbij de wand zitten kan de correlatie tussen twee thermokoppels gebruikt worden om de stabiele massastroom in een kanaal te meten.

Ondanks het gebruik van een regelaar zijn, bij intermitterende massastroom oscillaties, de piek-piek waarden in T_{sub} gelijk aan 0.7K. Om de centrale inlaattemperatuur nog beter te stabiliseren is het handig om de downcomer en het stuk pijp tussen het verwarmingselement en de PT100 beter te isoleren. Omdat, bij een stabiele massastroom, het water relatief sterk in temperatuur daalt. Bij flashing is de massastroom groter en daalt de temperatuur van het water minder.

Een kanaal met een hoger vermogen flasht nooit als eerste bij Intermitterende massastroom oscillaties. Om dat experimenteel aan te tonen zou het vermogen van een bepaald kanaal met een aantal procenten verlaagt/verhoogt moeten worden. Ook zou moeten worden onderzocht of dit voor grotere vermogens nog steeds opgaat.

Hetzelfde kan gedaan worden bij uit-fase massastroom oscillaties zodat er gekeken worden wat voor effect het vermogen heeft op de koppeling van de kanalen.

Ook zou moeten worden onderzocht, bij uit-fase massastroom oscillaties, of de metingen reproduceerbaar zijn. Het is namelijk de vraag of bij gelijke q en T_{sub} weer dezelfde kanalen gekoppeld zijn. Dit zou gedaan kunnen worden door in een meetreeks de verschillende gebieden te kruisen zoals die in Figuur 4-19 te zien zijn.

Om de stabiliteitsfiguur compleet te maken zullen er metingen uitgevoerd moeten worden bij een q groter dan 2.0kW.

Verwijzingen

1. A. MANERA, T.H.J.J. VAN DER HAGEN, “Stability of Natural-Circulation-Cooled Boiling Water Reactors during startup: Experimental Results”, *Nucl. Tech.*, 143, 2003.
2. C.P. Marcel, “Experimental and Numerical Stability Investigations on Natural Circulation Boiling Water Reactors”, proefschrift, pag. 76 (2007)
3. C.P. Marcel, “Experimental and Numerical Stability Investigations on Natural Circulation Boiling Water Reactors”, proefschrift, pag. 97 (2007)
4. A. MANERA, “Experimental and Analytical investigations on flashing-induced instabilities in natural circulation two-phase systems”, proefschrift, pag. 33 (2003)
5. C.P. Marcel, “Experimental and Numerical Stability Investigations on Natural Circulation Boiling Water Reactors”, proefschrift, pag. 98, Figuur 6-2
6. L.P.B.M. Janssen, M.M.C.G. Warmoeskerken, Transport Phenomena Data Companion, VSSD (2006).
7. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0618544>
8. C.P. Marcel, “Experimental and Numerical Stability Investigations on Natural Circulation Boiling Water Reactors”, proefschrift, pag. 100, Figuur 6-3 (2007)
9. C.P. Marcel, “Experimental and Numerical Stability Investigations on Natural Circulation Boiling Water Reactors”, proefschrift, pag. 101, Figuur 6-4 (2007)
10. C.P. Marcel, “Experimental and Numerical Stability Investigations on Natural Circulation Boiling Water Reactors”, proefschrift, pag. 78, Figuur 5-2 (2007)
11. C.P. Marcel, “Experimental and Numerical Stability Investigations on Natural Circulation Boiling Water Reactors”, proefschrift, pag. 76, Figuur 5-1 (2007)