# **Clogging en depositie van deeltjes**

R.T.C. Rietveld

Afstudeerbegeleider:	Ir R.H.M.G. Nabben
	Koninklijke Hoogovens N.V.
	HSPP OX2 KTO
Afstudeerhoogleraar:	Prof dr ir R.V.A. Oliemans
	Technische Universiteit Delft
	Faculteit Technische Natuurkunde

September 1999

# Samenvatting

Bij het gieten van staal in een continugietproces stroomt staal door een pijp met restrictie om het debiet te regelen, de dompelpijp. Tijdens het proces doet zich clogging voor. Clogging is het probleem dat Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-deeltjes, die zich als verontreiniging in het staal bevinden, zich tijdens het gieten aan de dompelpijpwand gaan hechten. Dit heeft diverse nadelige consequenties voor het eindproduct zoals kwaliteitsverlies. Daarom is bij Research & Development van Koninklijke Hoogovens N.V. een afstudeeronderzoek naar dit probleem uitgevoerd. Het is gedaan vanuit de vakgroep Stromingsleer van de faculteit Technische Natuurkunde van de TU Delft. Het onderzoek bestond uit drie delen:

- Literatuuronderzoek
- Experimenteel onderzoek
- Numerieke berekeningen

In het literatuuronderzoek is gekeken naar het totale productieproces en de invloed van de verschillende stappen op het probleem clogging. Bekende mogelijkheden om clogging te verminderen zijn in kaart gebracht. Maar wanneer de in de literatuur voorgestelde oplossingen worden toegepast is het probleem nog steeds te groot. Om een andere manier te kunnen vinden om het probleem te verkleinen diende eerst meer bekend te worden over het mechanisme van clogging, en waarom er bepaalde voorkeurplaatsen zijn. In de literatuur zijn hiervoor namelijk wel enkele theorieën en mechanismen gevonden, echter deze spreken elkaar tegen en de juiste lijkt er niet bij te zitten. Hierbij gaat het specifiek om het verband tussen stroming en clogging.

Om hierover toch meer kennis te verkrijgen is gepoogd een opstelling te bouwen om clogging experimenteel te simuleren. Hiertoe is eerst een principe gezocht om deeltjes betrouwbaar te laten aanhechten. Dit is gevonden. Gebouwd is een opstelling met dompelpijp en schuif van perspex waardoor een water-paraffinemengsel kan stromen bij Reynoldsgelijkvormigheid. Bij de juiste procescondities gaan paraffinedeeltjes aan de dompelpijpwand hechten. Dit gebeurt in een karakteristiek reproduceerbaar patroon, met duidelijke verschillen in aanhechting voor verschillende plaatsen. Hierbij blijven bepaalde plaatsen schoon van paraffine. Ook is geconstateerd dat wanneer de gietsnelheid wordt gehalveerd er meer paraffinedeeltjes aanhechten. Belangrijk is ook dat er nu wel deeltjes aanhechten op de meeste plaatsen die bij het Reynoldsgelijkvormigheidsdebiet schoon bleven. Deze experimentele resultaten worden niet verklaard door tot nu toe bekende cloggingstheorieën.

Daarom zijn de vragen gesteld waarom deze effecten en het profiel van aanhechting optreden en welk cloggingsmechanisme bepaalt waar wel of geen aanhechting komt en hoeveel. Als antwoord hierop is de hypothese gesteld dat de mate van paraffineaanhechting op een bepaalde plaats wordt bepaald door de grootte van de schuifspanning op die plaats. Deze hypothese kan logisch verklaren wat werd gezien. Belangrijk voor het al dan niet aanvaarden van de hypothese als verklaring voor de opbouw van clogging is daarnaast de vraag of het schuifspanningsprofiel op de dompelpijpwand overeenkomt met het experimenteel gevonden profiel van paraffineaanhechting.



Daar het schuifspanningsprofiel experimenteel niet te bepalen is is gepoogd het met een numeriek model te berekenen. Met dit numeriek model is ook de stroming in de verdeelbak berekend. Hiermee is vastgesteld dat er geen sprake is van een kortsluitstroom in de verdeelbak. Ook dit zou clogging kunnen veroorzaken.

De uitkomsten van de berekeningen aan het profiel van de schuifspanning laten zien dat dit goed overeenkomt met het aanhechtingsprofiel gevonden in de experimenten. Daarmee is bepaald welk mechanisme in de opstelling de clogging bepaald. Volgens de laatste literatuur lijkt het profiel van aanhechting van aluminiumoxyde in de staalsituatie goed overeen te komen met het experimenteel gevonden profiel. Hiermee kan de verklaring van de experimentele resultaten ook als een verklaring voor de clogging in de staalsituatie worden gezien.

# Voorwoord

Dit afstudeerwerk is uitgevoerd bij Koninklijke Hoogovens N.V. te IJmuiden. Locatie was het stromingslaboratorium van Fysische Technologie en Conversieprocessen op 4H16. Hier heb ik met veel plezier aan het probleem clogging gewerkt en ik heb hier ook altijd op stimulerende begeleiding kunnen rekenen. Op de eerste plaats wil ik dan ook mijn begeleiders Ralph Nabben en Gabriël Tahitu graag bedanken voor hun grote inzet en goede hulp bij mijn afstuderen zowel op experimenteel als numeriek gebied. Daarnaast wil ik uiteraard ook Jean-Pierre Westerveld bedanken voor o.a. de diverse mogelijkheden op experimenteel gebied die mij werden geboden. Hierbij moet ook de technische hulp en handigheid van Ab Kramer in de experimenteerhal genoemd worden.

Daarnaast heb ik van de afdeling CFD van René Duursma geruime tijd de druk bezette licenties van CFX mogen gebruiken, waarvoor ik zeer erkentelijk ben. En hierbij wil ik vooral ook Tom van Essen bedanken voor de zeer deskundige adviezen en opbouwende kritiek bij verschillende gecompliceerde problemen.

Ook waardeer ik zeer dat Cor Warenga en Ivo Opstelten tijd hebben vrijgemaakt om aan dit afstudeerwerk bij te dragen.

En zeker niet in de laatste plaats ben ik mijn afstudeerhoogleraar Prof dr ir R.V.A. Oliemans zeer dankbaar voor zijn adviezen en steun bij het begrijpen van het fenomeen clogging.

Tenslotte wil ik iedereen van 4H16 bedanken voor de prettige en goede sfeer die ik altijd op de gang meemaakte.

# Symbolenlijst

Symbool	Omschrijving	Eenheid
А	Oppervlakte schijfje dompelpijpwand	$m^2$
c <sub>p</sub>	Soortelijke warmte	J/(kgK)
$c_{\mu}$	Constante in k-ɛ-model	-
D	Buisdiameter	m
d	Afstand bij ultrasoonmetingen	m
k	Turbulente kinetische energie	$m^2/s^2$
<v></v>	Gemiddelde mengselsnelheid	m/s
y <sub>+</sub>	Dimensieloze coördinaat in het wandgebied	-
α	Hoek bij ultrasoonmetingen	graden
$\Delta S_{ij}$	Verandering contactoppervlak tussen i en j	$m^2$
$\Delta T$	Temperatuurverschil tussen mengsel en buiswand	Κ
$\phi$ "	Warmteoverdracht door een schijfje dompelpijpwand	$J/(m^2s)$
η	Dynamische viscositeit	Ns/m <sup>2</sup>
λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt	W/(mK)
ρ	Dichtheid	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_{ij}$	Interface-energie tussen i en j	J/m <sup>2</sup>
τ	Schuifspanning	$N/m^2$

# Inhoudsopgave

SAMENVATTING2
VOORWOORD4
SYMBOLENLIJST5
1. INLEIDING
2. DE STAALFABRIEK EN CLOGGING
Productieproces
3. THEORIE CLOGGING
3.1. INLEIDING
4. EXPERIMENTEEL ONDERZOEK
4.1. INLEIDING. 24   4.2. ONTWERP PRINCIPE VOOR EXPERIMENTELE CLOGGINGSIMULATIE 24   4.3. EXPERIMENTEN 28   4.3.1. Cloggingsimulatie 28   4.3.2. Geheel geopende schuif 35   4.3.3. Half debiet 35   4.4. DISCUSSIE PARAFFINEPROEVEN 36
HYPOTHESE
4.5. METING VLOEISTOFSNELHEDEN OPSTELLING 39   4.5.1. Ultrasoonmetingen 40   4.5.2. LDA-metingen 40
5. NUMERIEK MODEL42
5.1. INLEIDING
6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN
LITERATUURLIJST
APPENDIX 1
APPENDIX 2
APPENDIX 360

# 1. Inleiding

Het onderwerp van dit afstudeeronderzoek is clogging. Het is uitgevoerd bij Koninklijke Hoogovens N.V. te IJmuiden. Clogging staat voor het dichtlopen van de dompelpijp in een continugietmachine. Door het voedingssysteem (de verdeelbak, bovendoorloop en dompelpijp, zie figuur 2.4) stroomt het vloeibare staal van de verdeelbak naar de gietvorm. In de dompelpijp bevindt zich een restrictie in de vorm van een schuif om het debiet te kunnen regelen. Tijdens het gieten loopt de dompelpijp gedeeltelijk dicht met aluminiumoxydedeeltjes die zich in het staal bevinden of die afkomstig zijn van het materiaal van de dompelpijp zelf. Dit cloggen is om drie redenen ongewenst:

- 1. Wanneer zich aluminiumoxyde in de dompelpijp ophoopt breken gedurende het proces stukjes af. Deze kunnen leiden tot afkeur in het koudgewalste eindproduct.
- 2. De dompelpijp kan dichtlopen waardoor het gietproces onderbroken moet worden.
- 3. Clogging verslechtert de stroming in de gietvorm wat ook een slechter eindproduct kan geven.

Tot nu toe heeft men oplossingen in een drietal hoeken gezocht:

- Vuurvastsamenstelling voedingssysteem (minder reactief en minder hechtingsvermogen)
- Verbeteren samenstelling staal (minder aluminiumoxyde of reduceren door toevoegen Ca)
- Argon blazen in het voedingssysteem tijdens het gieten

Hiervan is Argon blazen het meest effectieve middel. Een nadeel is echter dat Argonbellen in het product kunnen komen. Dit levert ook kwaliteitsverlies.

Behalve op deze vlakken is ook onderzoek gedaan naar de relatie tussen clogging en stromingsverschijnselen in de dompelpijp. Dit is gedaan omdat de aanhechting in de dompelpijp een regelmatig terugkerend patroon laat zien en de dikte van de aanhechting afhangt van de plaats in de dompelpijp. Over welke stromingsmechanismen de dikte van de aanhechting bepalen is nog niet veel duidelijkheid.

Dit afstudeeronderzoek beoogt twee dingen:

- Op basis van literatuur meer duidelijkheid geven over de bekende mogelijkheden clogging te reduceren.
- Meer duidelijkheid geven over het mechanisme van aanhechting van in het staal aanwezige aluminiumoxydedeeltjes aan de dompelpijpwand.

.

# 2. De staalfabriek en clogging

Verschillende stappen in het productieproces van staal zijn van invloed op het probleem clogging. Dat productieproces en de plaats van clogging hierin zullen hier daarom worden beschreven. De meeste aandacht wordt hierbij besteed aan het voedingsysteem. Dit is het laatste onderdeel van het productieproces en hierin vindt ook de clogging plaats en is tevens de plaats waar dit afstudeeronderzoek zich uiteindelijk op richt. Van de stappen voor het voedingssysteem wordt een overzicht gegeven omdat bij deze stappen de bron van clogging ligt.

#### Functie staalfabriek

Door de hoogovens wordt ruwijzer geproduceerd. Dit is de grondstof voor staalproductie. Deze vindt plaats in de Oxystaalfabrieken. Staal is ijzer met een koolstofgehalte lager dan 1,9 %. Het productieproces is dan ook primair bedoeld om het koolstofgehalte van ruwijzer van 4,5 % te verlagen naar de niveaus die voor de verschillende kwaliteiten nodig zijn. Daarnaast moeten ook andere verontreinigingen zoals zwavel en fosfor worden teruggebracht. Het eindproduct van de staalfabriek is een gestolde plak staal met een dikte van 225 mm, een lengte van 5,5 tot 12 m en een breedte tussen de 950 en 2100 mm. Dit product gaat vervolgens naar een walserij waar de plak wordt uitgewalst tot een dikte van enkele millimeters.

Het staalproductieproces is voor verschillende staalfabrieken in de wereld op veel punten vergelijkbaar. Er zijn echter een aantal verschillen, zoals de gietmachines. In het onderzoek is van de Hoogovenssituatie uitgegaan en deze wordt ook hier beschreven.

### Productieproces

Wanneer ruwijzer per trein in mengers bij de staalfabriek wordt aangevoerd gaat dit eerst naar de <u>ontzwavelingsinstallatie</u>. Hier wordt behalve ontzwaveld ook het fosforgehalte verlaagd. Voordat het staal naar de converter gaat, waar het koolstofniveau wordt verlaagd, wordt de slaklaag verwijderd (afslakken). De slaklaag is een vloeibare laag op het ruwijzer met o.a. verschillende oxydes die zich aan zwavel kunnen binden.

Het oxystaalproces vindt plaats in de <u>converter</u>. Het belangrijkste doel hiervan is het verlagen van het koolstofgehalte. De converter is een peervormig reactievat dat kantelbaar is opgesteld, een inhoud heeft van 320 ton staal en is voorzien van vuurvaste bekleding. Door het met een lans op het bad blazen van vrijwel zuivere zuurstof worden de ongewenste bestanddelen zoals koolstof verbrandt. Het koolstof verdwijnt als CO-gas.

De oxydatie van de verschillende elementen levert zeer veel warmte op en kan ontoelaatbaar hoge temperaturen veroorzaken. Om de overtollige warmte te binden wordt de converter gedeeltelijk met staalschrot gevuld. Dit te recyclen staal is globaal

- 8 -

zo'n 25% van de converterinhoud. Wanneer het staal de vereiste samenstelling heeft bereikt wordt de converter afgetapt in de staalpan. Het meegekomen slak vormt hierop een isolerende laag.

Afhankelijk van de kwaliteit waaraan het staal moet voldoen kan de pan nu twee kanten op: naar de Vacuüm Pan Behandelingsinstallatie (VPBI) (zie figuur 2.1) of naar de spoelstand. Het verschil tussen deze twee richtingen is dat in de VPBI staal extra diep wordt ontkoold. De andere twee functies hebben de VPBI en de spoelstand gemeen:

- 1. Het "rustig" maken van het staal.
- 2. Het toevoegen van legeringselementen zoals Mn voor specifieke staaleigenschappen.



Ad 1.

Staal dat van de converter komt bevat nog veel zuurstof. Dit geeft later



problemen bij het stollen omdat zich bij dan daling van de temperatuur bellen zullen vormen. Dit zou de staalkwaliteit verslechteren.

Om dat te voorkomen dient het zuurstof verwijderd te worden (het staal "rustig" maken). Dit wordt deoxydatie genoemd. Dat gebeurt door het toevoegen van aluminium. Na smelten van het aluminium vindt de volgende reactie plaats:  $2Al + 3O \leftrightarrow Al_2O_3(s)$ 

Oftewel er ontstaan dus vaste deeltjes aluminiumoxyde. Aluminiumoxyde is ook de stof die clogging veroorzaakt. Een vraag in dit onderzoek (en dan specifiek in het literatuuronderzoek) is of deze aluminiumoxyde ook het aluminiumoxyde is dat clogging veroorzaakt. In het volgende hoofdstuk zal worden geconcludeerd dat dit voor het grootste deel inderdaad zo is. Dat betekent dat in de spoelstand of VPBI de bron van de clogging ligt.

De deeltjesgrootte in staal varieert van enkele micrometers tot enkele honderden micrometers. Op de afmetingen en de vorm waarin deze deeltjes voorkomen wordt in het volgende hoofdstuk nog teruggekomen. De bedoeling is dat zoveel mogelijk van deze deeltjes uitstijgen. De dichtheid van staal is ongeveer 7.2 ton/m<sup>3</sup>, die van

aluminiumoxyde zo'n 3.5 ton/m<sup>3</sup>. Veel aluminiumoxyde stijgt uit en wordt in de slaklaag opgenomen. Maar vooral de kleinere deeltjes blijven in het staal achter. De hele kleine deeltjes, die kleiner zijn dan 20  $\mu$ m in de plak, worden getolereerd en zijn dus niet schadelijk voor de kwaliteit. Deeltjes die in het proces voor de plak 20  $\mu$ m of kleiner zijn kunnen wel schadelijk zijn want deze kunnen nog clusteren tot grotere deeltjes. En dus zorgen voor afkeur voor het staal. Verder kunnen deze deeltjes dus zorgen voor clogging.

Om de pan te kunnen roeren tijdens de spoelstand wordt door poreuze bodemstenen Argongas geblazen. Dit roeren zorgt voor homogene temperaturen en concentraties en bevordert tevens het uitstijgen van de deeltjes doordat deze gaan clusteren.

Staal dat aan bijzondere kwaliteiten moet voldoen gaat naar de VPBI. De werking van een VPBI is zoals de naam al duidelijk maakt gebaseerd op het aanleggen van een vacuüm over de pan. Hierdoor wordt de partiële CO-druk verlaagd. Het effect is dat meer CO-gas uit het staal ontsnapt. Het koolstofgehalte kan hierdoor dus verder dalen. Daarnaast wordt het staal rustig gemaakt met aluminium. Dit betekent dat ook hier aluminiumoxyde ontstaat dat voor clogging kan zorgen. In de VPBI kunnen tenslotte bijzondere elementen worden toegevoegd voor bijzondere staaleigenschappen.

#### Werking VPBI

De staalpan wordt onder het vat getild. Het vat wordt vacuüm gezogen tot 0.7 mbar. Het staal gaat door de snorkels omhoog, zie figuur 2.1. Door injectie van Argon of stikstof ontstaat in de linker snorkel een opstijgende stroom en een dalende in de rechter. De circulatie die zo ontstaat zorgt ervoor dat het vat geroerd wordt. Aan het einde van het proces kunnen ook de eventuele toeslagstoffen worden toegediend. De pan gaat nu naar de continugietmachine.

### Continugietmachine

In de continugietmachine wordt het vloeibare staal in plakken gegoten. Continu betekent dat meerdere panladingen ononderbroken worden gegoten. Figuur 2.2 toont



een zijaanzicht van een continugietmachine. Hierop is één streng te zien maar per gietmachine worden parallel altijd twee strengen gegoten.

Vanuit de pan stroomt het staal in de verdeelbak. Deze heeft de volgende functies:

- Het verdelen van de staalstroom over de strengen
- Het laten uitstijgen van verontreinigingen die zich nog in het staal bevinden
- Het vormen van een voorraad vloeibaar staal waardoor het mogelijk is om tijdens het gieten van pan te wisselen. De voorraad in de verdeelbak is zo'n 65 ton.

Het staal stroomt de verdeelbak uit via twee dompelpijpen in de twee staalstrengen. Hierin bevindt zich een schuif om het debiet te kunnen regelen. Dit is bij Hoogovens een tweeplatenschuif, zie figuur 2.3, of een drieplatenschuif, zie figuur 2.4. In dit

onderzoek is van de situatie met een tweeplatenschuif uitgegaan. Belangrijk bij de schuif is dat inlek van buitenlucht wordt voorkomen. Inlek van buitenlucht is een probleem omdat dit clogging kan veroorzaken. Zuurstof dat inlekt reageert namelijk met vrij aluminium in het staal tot aluminiumoxyde. Dit heeft dan geen kans meer nog voor de dompelpijp uit te stijgen en kan zich dus gemakkelijk hierin afzetten. Daarnaast kan het dus ook in de plak terechtkomen en zorgen voor afkeur.

De dompelpijp is 75 centimeter lang en heeft een inwendige diameter van 65 mm. De functies van een dompelpijp zijn:

- Verkrijgen van een gecontroleerde staaldosering in de gietvorm
- Het voorkomen van oxydatie van het staal
- Het vergemakkelijken van het uitstijgen van deeltjes in de gietvorm
- Schuif (twee platen) Dompelpijp

Bovendoorloop

Figuur 2.3. Tweeplatenschuif.

De dompelpijp is gemaakt van

vuurvast materiaal. De samenstelling hiervan is bij Hoogovens een combinatie van de stoffen aluminiumoxyde en koolstof. De buitenzijde bevat ook zircoonoxyde tegen invreting van de slaklaag. De relatie tussen dompelpijpsamenstelling en clogging wordt in het volgende hoofdstuk bekeken. Er zijn drie redenen om clogging hier te voorkomen:

- 1. Wanneer zich aluminiumoxyde in de dompelpijp ophoopt breken gedurende het proces stukjes af. Deze kunnen leiden tot afkeur in het koudgewalste eindproduct.
- 2. De dompelpijp kan dichtlopen waardoor het gietproces onderbroken moet worden.
- 3. Clogging verslechtert de stroming in de gietvorm.

Ook in de bovendoorloop kan clogging optreden. Dit geeft dezelfde problemen als clogging in de dompelpijp. Om clogging hier en in de dompelpijp te verminderen bevindt zich hier een poreus gedeelte waardoor Argongas kan worden toegevoerd. Het ingestelde debiet ligt dan tussen de 10 en 15 Nl/min. Dit vermindert clogging aanzienlijk maar introduceert ook een nieuw probleem: Er komen Argonbellen in het gestolde staal terecht. Dit zorgt ook voor afkeur.

De gietvorm waar het staal instroomt is een rechthoekige, watergekoelde koperen vorm zonder bodem. De afmetingen van de plak die er uit komt zijn bij het gieten van twee strengen: dikte 225 mm en breedte tussen de 950 en 2100 mm. De doorzet is zo'n 500 l/min (3.5 ton/min).

De staalspiegel in de gietvorm wordt afgedekt met gietpoeder. De functie hiervan is het smeren van de gietvorm met gesmolten poeder, wat voor een goede warmtegeleiding tussen de gietvorm en de gestolde huid kan zorgen en hechting aan de gietvormwand voorkomt.

Tijdens het gieten oscilleert de gietvorm met een amplitude van 5 mm, om aanhechting tussen de gestolde huid en de gietvorm te voorkomen. Zie figuur 2.4.





Het stolproces in de gietvorm is belangrijk voor de uiteindelijke kwaliteit van de gestolde plak. Voor het stolproces is de stroming rond de meniscus belangrijk.

Daarnaast bepaalt deze stroming (maar ook die in de rest van de gietvorm) de uitstijging van aluminiumoxydedeeltjes en Argonbellen. De stroming in de gietvorm is voor de uiteindelijke staalkwaliteit dus zeer belangrijk en wordt behalve door de



debieten sterk bepaald door de vorm, grootte en stand van de uitstroomopeningen van de dompelpijp. De standaard Hoogovensdompelpijp is in figuur 2.3 geschetst.

Zoals in figuur 2.2 te zien is wordt de plak na de gietvorm gebogen door steunrollen. Deze voorkomen tevens uitbuiken van de plak door de druk van de vloeibare kern. De lengte van dit traject is zo'n 35 meter. Hier wordt het staal ook watergekoeld. Na dit traject wordt de plak door een brandsnijmachine in de gewenste lengtes gesneden.

Hier houdt de taak van de oxystaalfabrieken op en kunnen de plakken voor verdere bewerking naar de warmbandwalserij.

# 3. Theorie clogging

# 3.1. Inleiding

Een literatuurstudie is gedaan om inzicht te krijgen in de tot nu toe gevonden mechanismen van clogging en maatregelen tegen het probleem. Een oplossing om het probleem te elimineren is echter nog niet gevonden.

In dit hoofdstuk zal worden beschreven:

- samenstelling en herkomst van de clogging
- mechanismen van clogging
- mogelijkheden om clogging te verminderen

## 3.2. Verdeling over dompelpijp en morfologie van clogging

#### 3.2.1. Verdeling clogging

De verdeling van de clogging over de dompelpijpwand is niet uniform. Er zijn regelmatig terugkerende patronen. Het patroon dat in de verschillende onderzoeken constant terugkeert is de toename van de clogging stroomafwaarts in de dompelpijp, zie figuur 2.4 (CISR Progress Report). Een uitzondering hierop lijkt het gebied vlak onder de schuif te zijn. In een aantal onderzoeken wordt daar juist meer clogging gerapporteerd. Hiervoor wordt later dit hoofdstuk nog een verklaring gegeven.

Voor de beschrijving van de structuur van de clogging op de dompelpijpwand is het noodzakelijk eerst de morfologie van aluminiumoxyde te beschrijven.

### 3.2.2. Morfologie Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### In vloeibaar staal

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heeft een smeltpunt van zo'n 2000 °C en is in vloeibaar staal dus vast. Daarnaast wordt het Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> door staal ook slecht bevochtigd. Het wordt in vloeibaar staal vooral in primaire deeltjes of clusters gevonden. Deeltjes zijn stukjes vast aluminiumoxyde. De grootte is van de orde tot 50  $\mu$ m. Deze primaire deeltjes verschillen van vorm:

 dendritisch: een structuur met veel uitstekende delen, zie figuur 3.1.



Figuur 3.1. Dendritisch deeltje.

koraalvormig: een compactere structuur met ronde vormen en weinig uitstekende delen, zie figuur 3.2.

De clusters zijn structuren die zijn ontstaan door het samenklonteren van primaire deeltjes. Ook de clusters kunnen dendritisch of koraalvormig zijn. Koraalvormige clusters hebben meer ronde vormen dan de dendritische clusters (zie figuur 3.3). Een belangrijk verschil tussen clusters en primaire deeltjes is de inwendige structuur. De primaire deeltjes waaruit een cluster is opgebouwd versmelten niet. De clusters verschillen hierdoor ook in samenstelling.

Dendritische clusters bevatten naast aluminiumoxyde ook veel staal. Dit is experimenteel gevonden, een plausibele verklaring hiervoor is er echter niet. In koraalvormige clusters bestaan open ruimtes en deze hebben daardoor een korrelige structuur. De grootte van clusters is van de orde 10 tot enkele honderden µm.

De vorm waarin de deeltjes en clusters voorkomen hangt af van verschillende factoren, zoals het zuurstofgehalte en de staalbehandeling, die in het volgende worden behandeld.



Figuur 3.2. Koraalvormig deeltje.



Figuur 3.3. Dendritische cluster.

#### Zuurstofgehalte

Laboratoriumproeven hebben aangetoond dat bij lage zuurstofgehaltes vooral koraalvormige structuren ontstaan terwijl bij hoge (boven 0,019%) meer dendritische structuren ontstaan (Steinmetz en Lindberg, 1977). Koraalvormige structuren zijn typisch voor langzame groei. Ook Tiekink (1994) vond dit verband voor VPBI. Een verklaring wordt in de volgende paragraaf gegeven.

#### **Behandeling**

Tiekink (1994) vond dat bij geleidelijke toevoeging van aluminium in de spoelstand er vooral koraalvormig aluminiumoxyde ontstaat. Bij het aluminium daarentegen ineens toevoegen bij VPBI ontstaan aluminiumoxydes in de vorm van dendritische structuren. Het ontstaan van verschillende structuren wordt op de volgende manier verklaard: Bij het ineens toevoegen is lokaal overmaat aluminium aanwezig.

Overmaat leidt tot snelle groei. Dit zal het meest aan de hoekpunten gebeuren omdat daar de toevoer van reactanten daar het gemakkelijkst is. Het gevolg is naalden en dendritische structuren (CISR Progress Report). Hiervoor moeten dus zowel aluminium als zuurstof in overmaat aanwezig zijn. Ook de zuurstof is in het algemeen bij VPBI in overmaat aanwezig aangezien de evenwichtsconcentraties van CO, C en O aan een constante moeten voldoen terwijl in een VPBI de C concentratie in het algemeen laag zal zijn.

Een sluitende verklaring voor het aanwezig zijn van meer staal in dendritische clusters is er zoals gezegd niet maar er valt in ieder geval te verwachten dat er bij staal dat VPBI-behandeling heeft gehad ook in de dompelpijp meer staal in de aanhechting is te vinden in het geval dat de aanhechting afkomstig is van deeltjes die vanuit het staal worden afgezet.

#### Morfologie clogging

Wanneer naar de structuur en samenstelling van de clogging op de dompelpijpwan wordt d gekeken kunnen over het algemeen twee verschillende lagen worden onderscheiden. Zie figuur 3.4. Aan de grootte verdeling en



Figuur 3.4. Doorsnedefoto dompelpijpwand met clogging.

van lichte plekken valt te zien dat hier sprake is van verschillende structuren.

*Eerste laag:* Dit is de laag die direct op het vuurvast zit en genoemd wordt de netwerkzone. Zie figuur 3.5. Deze netwerk zone ontstaat door reacties van het vuurvast met het aluminium in het staal. De laag is 0.5 tot 2 mm dik.

*Tweede laag:* Deze laag zit op de netwerkzone en bestaat uit oxydes, voornamelijk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en metaaldruppels. Zie figuur 3.5. De dikte van deze laag



Figuur 3.5. De clogging op de dompelpijpwand is in te delen in twee verschillende lagen. SEN staat voor submerged entrynozzle.

is afhankelijk van de plaats in de dompelpijp maar kan tot enkele centimeters oplopen. Deze laag ontstaat door afzettingen van  $Al_2O_3$  uit het staal. Hoewel ook bij deze laag reacties een belangrijke rol zouden spelen volgens een aantal onderzoekers. Voor deze laag zijn verschillende aluminiumoxyde morfologieën mogelijk. Welke in een bepaalde situatie wordt gevonden hangt sterk af van de staalkwaliteit en de procescondities. Het verschil in opbouw van de tweede laag tussen staal dat via <u>VPBI</u> behandeld is en staal dat alleen over de spoelstand is gegaan is door Ogibayashi (1992 en 1994) onderzocht.

Bij staal van <u>VPBI</u> bestaat de tweede laag uit een relatief dikke laag metaal met daarin een groot aantal aluminiumoxydeclusters. Indien staal alleen door de <u>spoelstand</u> gaat vindt men in plaats van deze metalen laag een laag met vooral koraalvormige clusters. De morfologie van de deeltjes in de laag komt in beide gevallen overeen met die van de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-insluitingen in het staal. De afzettingen worden daarom als deoxydatie producten beschouwd (CISR Progress Report).

Verband tussen aanwezigheid eerste en aanwezigheid tweede laag

Op plaatsen waar meer opbouw van de tweede laag aanwezig was, was minder opbouw van de eerste laag te vinden (Ikemoto en Sawano (1995)). Het is voor het ontstaan van een tweede laag niet noodzakelijk dat er een eerste laag aanwezig is (Yamada 1994).

## **3.3.** Herkomst van clogging

Clogging wordt aan vier verschillende factoren toegeschreven:

- 1. Reacties tussen dompelpijp, deoxydatie producten en in staal opgeloste componenten, zoals Al. Deze factor wordt door de meeste Japanse onderzoekers het belangrijkst gevonden.
- 2. Depositie van aluminiumoxyde deeltjes afkomstig uit het staal. Deze factor wordt door verschillende onderzoekers als belangrijkste of op een na belangrijkste factor gezien.
- 3. Gestold staal. Wanneer de temperatuur van het staal weinig boven het stolpunt ligt en de warmteoverdracht naar de dompelpijp groot is kan vastvriezing van staal optreden. Hetzelfde is het geval bij het slecht voorverhitten van een dompelpijp. Dit kan voorkomen worden (CISR Progress Report).
- 4. Luchtinlek in de dompelpijp door poriën in de buiswand of langs de schuif. Wanneer de zuurstof het dompelpijp-staaloppervlak bereikt kan dit direct met opgelost aluminium reageren tot aluminiumoxyde en zich aan de wand afzetten (CISR Progress Report).

Hierna worden de mechanismen achter de verschillende factoren beschreven.

#### 3.3.1. Reactiemechanismen

De invloed op clogging van het type vuurvast, het koolstofgehalte in staal en de aanwezigheid van onzuiverheden als SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in vuurvast is bepaald door Poier (1995). Geconcludeerd werd dat clogging plaatsvindt bij alle typen vuurvast met koolstof maar niet bij koolstofloos vuurvast. Verder werd experimenteel

Theorie clogging

(3)(4)

aangetoond (met Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C samples, door onderdompelen en roteren in staal) dat de dikte van de laag Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toeneemt naarmate er meer verontreinigingen in het vuurvast aanwezig zijn. Ook een toename van de laagdikte was te zien bij het gebruik van staal met een lager koolstofgehalte. De effecten worden door Poier verklaard met een cloggingsmechanisme dat uit drie delen bestaat:

1. Het ontbinden van koolstof in het vuurvast aan het begin van het gietproces zorgt voor verandering in de activiteit van Al in het staal waardoor Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> neerslaat en een dunne film langs het vuurvast wordt gevormd.

2. In de dompelpijp vinden de volgende oxydatiereacties en verdamping plaats:  $SiO_2(s) + C(s) \rightarrow SiO(g) + CO(g)$ (1) $Na_2O(s) + C(s) \rightarrow 2Na(g) + CO(g)$ De onderdruk in de dompelpijp laat de gassen naar de vuurvast/staal interface gaan. Na reoxydatie van de gassen ontstaat een stof gelijk aan albite en vormt de comt

laag op het vuurvast:

 $2Na(g) + 6SiO(g) + Al_2O_3 + 7[O]_{Fe} \rightarrow Na_2O - Al_2O_3 - 6SiO_2$ (2)

3. Het naar het vuurvast/staal oppervlak getransporteerde koolmonoxydegas vormt aluminiumoxyde:

 $[C]_{Fe} + [O]_{Fe} \Leftrightarrow CO(g)$ 

$$2[Al]_{Fe} + 3[O]_{Fe} \Leftrightarrow Al_2O_3$$

Het gevormde aluminiumoxyde slaat nu neer op het vuurvast.

Sasai en Mizukami (1994) onderzochten Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C vuurvast dat SiC bevat (dus vergelijkbaar met Hoogovens' dompelpijpen). Zij constateerden een afname van Sien C-gehalte en een toename van het Al-gehalte in het vuurvast. Als mechanisme hiervoor gaven zij:

 $SiO_2(s) + C(s) \rightarrow SiO(g) + CO(g)$ (5)Dit diffundeert weer naar de interface waar de volgende reacties plaatsvinden: (6) $3SiO(g) + 2Al \rightarrow Al_2O_3(s) + 3Si$  $3CO(g) + 2Al \rightarrow Al_2O_3(s) + 3C$ (7)

In het onderzoek van Ikemoto en Sawano (1995) werd Si aangetroffen in de eerste laag (4-10 gew.%). Vergelijking (6) maakt dus duidelijk waarom. Het reactiemechanisme lijkt sterk op dat van Poier: vergelijking (1) en (5) zijn hetzelfde, het diffunderen ook en vergelijking (3), (4) en (7) ook. Een verschil treedt op bij SiO(g). De laag albite wordt niet geconstateerd. Dit kan veroorzaakt worden door een andere vuurvastsamenstelling of de nogal verschillende proefopstellingen. Het wel overeenkomende gedeelte moet als het meest relevante of algemeen toepasbare deel van deze twee cloggingsmechanismen worden beschouwd.

Fukuda (1992) vond iets vergelijkbaars. Daarnaast vond hij dat zelfs in het geval staal zonder Al of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> werd gebruikt er deposities plaatsvonden. Deze kunnen dus alleen door reacties tussen staal en vuurvast zijn ontstaan. De voorgestelde reactiemechanismen in het vuurvast zijn:

 $SiO_2(s) + C(s) \rightarrow SiO(g) + CO(g)$  $Al_2O_3(s) + 2C(s) \rightarrow Al_2O(g) + 2CO(g)$ Op de interface:  $SiO(g) \rightarrow Si + O$  $Al_2O(g) \rightarrow 2\underline{Al} + O$  $3Al_2O(g) \rightarrow 4Al + Al_2O_3$
Hierdoor vindt in het vloeibare staal dan nog plaats:  $2\underline{Al} + 3\underline{O} \rightarrow Al_2O_3(s)$ 

Deze theorieën verklaren clogging als chemisch verschijnsel. Dit geldt duidelijk voor de eerste laag, die tot 2 mm dik kan worden. Maar dat dit het sterkste cloggingmechanisme zou zijn is onwaarschijnlijk.

De tweede laag ontstaat ook wanneer er geen eerste laag aanwezig is blijkens het onderzoek van Yamada (1994). (Hier wordt met eerste en tweede laag gedoeld op de structuur zoals in § 3.3 bij eerste en tweede laag beschreven.) Dat de genoemde reactiemechanismen de opbouw van de tweede laag zouden kunnen verklaren is om een aantal redenen onwaarschijnlijk:

- Het drukverschil speelt in de theorieën, zoals bij Poier, een belangrijke rol. In zijn experiment (onderdompelen van vuurvast in staal) is dit echter niet aanwezig geweest.
- Daarnaast vindt clogging ook boven de schuif, in de doorloop, plaats. Daar heerst echter overdruk zodat de koolmonoxyde naar buiten diffundeert. Verder neemt de onderdruk in de dompelpijp naar beneden toe juist af terwijl de clogging in die richting juist toeneemt. Zelfs onder het staalniveau is clogging waargenomen. Overigens zal om deze redenen ook luchtinlek geen belangrijke rol spelen, afgezien eventueel van op de plaats van de schuif bij slecht aansluitende platen.
- De morfologie van de cloggingslaag hangt af van de morfologie van het Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in het vloeibare staal en komt hiermee overeen.
- De samenstelling van de clogging. Ikemoto in Sawano rapporteren slechts in een dunne laag van zo'n 2 mm de aanwezigheid van silicium. Niet in de dikke laag (30 mm) die daarna komt. We mogen er dus vanuit gaan dat vrijwel al het silicium dat heeft gereageerd zoals Poier en anderen voorstellen is te vinden in die dunne laag, en niet is ontsnapt naar het staal. Het gehalte aan Si is in die dunne laag 4 tot 10 wt. %, in de totale laag dus minder dan 1 wt. %. Aangezien volgens de reactie vergelijkingen (5)-(7) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en Si in een verhouding 2:3 ontstaan bestaat op de grootste 'probleemplaatsen' volgens een ruwe schatting slechts 1 tot 2 wt. % van de ophoping uit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> afkomstig van reacties zoals die van Poier.

De conclusie kan dus worden getrokken dat de eerste laag tot stand komt door reacties tussen staal en vuurvast en de tweede niet.

## 3.3.2. Depositie mechanismen

Dit mechanisme verklaart het deel van clogging dat bestaat uit het aan de wand hechten van al in het staal aanwezige aluminiumoxydedeeltjes.

Een deeltje hecht dan en alleen dan aan een wand wanneer wordt voldaan aan:

- 1. Thermodynamische voorwaarde
- 2. Kinematische voorwaarde

#### Thermodynamische voorwaarde

Een deeltje zal alleen aan een wand willen hechten wanneer dit energetisch gunstig is. Dit is het geval wanneer wordt voldaan aan:

WCCU 7 re mil 64 15 pactich User C

# \*

.

#### - 20 -

Theorie clogging

 $\sigma_{dw}\Delta S_{dw} > \sigma_{ds}\Delta S_{ds} + \sigma_{sw}\Delta S_{sw}$ 

Hierin is:

$$\begin{split} &\sigma_{ij} = interface\text{-energie tussen i en j m}^{-2} \\ &\Delta S_{ij} = verandering van interface\text{-oppervlakte tussen i en j bij hechting van het deeltje aan de wand \\ &d = deeltje \\ &w = wand \\ &s = staal \end{split}$$

Hieruit blijkt dat aluminiumoxydedeeltjes beter aan de dompelpijp zullen hechten naarmate staal zowel het aluminiumoxyde als het vuurvast van de dompelpijpwand slechter bevochtigd. Aluminiumoxyde wordt door staal slecht bevochtigd, de contacthoek wordt geschat tussen de 134 en 146 graden (CISR Progress Report). Bij een contacthoek groter dan 90 graden wordt een stof slecht bevochtigd. Het vuurvast van Hoogovens dompelpijpen bestaat uit:  $Al_2O_3$  en C. C heeft voor staal bij temperaturen tegen de giettemperatuur een contacthoeken van 120 graden (Cramb, 1990). Dit is dus ook slecht bevochtigbaar. Dit betekent dat aluminiumoxyde zich graag aan het vuurvast wil hechten aangezien het contact met het staal dan wordt geminimaliseerd.

Een manier om clogging te verkleinen zou dus kunnen zijn het gebruik van goed door het staal bevochtigbare dompelpijpen. Probleem is echter dat vuurvast altijd uit oxydes bestaat en deze zijn in de regel slecht bevochtigbaar. Daarnaast zijn er strenge eisen aan de weerstand tegen corrosie en thermische schok.

#### Sintering

Bij 1600 graden speelt bij de hechting van aluminiumoxydedeeltjes aan vuurvast het effect sintering ook een belangrijke rol. Sintering zorgt voor een chemische band tussen de wand en het deeltje die veel sterker is dan de hechting door oppervlakte krachten. Deze binding kan al binnen 0.03 seconden ontstaan (K. Uemura (1992)).

#### Kinetische voorwaarde

Deze voorwaarde stelt dat een deeltje alleen aan een wand kan hechten als het die ook kan bereiken. Hiervoor moeten de deeltjes dus door de laminaire laag bewegen dwars op de stroomrichting van het staal. Hiervoor zijn twee theorieën.

Singh (1974) stelt met de grenslaagtheorie dat aluminiumoxydedeeljes door de laminaire laag kunnen bewegen doordat deze deeltjes van turbulente eddies bij of soms in de visceuze sublaag een snelheid loodrecht op de wand meekrijgen. Deze zou dan voldoende moeten zijn om door de visceuze sublaag van naar schatting 50  $\mu$ m heen te komen.

Dawson (1990) rekende uit dat de stopafstand van aluminiumoxydedeeltjes van 1-4  $\mu$  m doorsnede een stopafstand hebben van kleiner dan 0.2  $\mu$ m. Daarnaast verklaart de grenslaagtheorie niet goed waarom op bepaalde plaatsen meer clogging plaatsvindt dan op andere, zoals bijvoorbeeld in de bovendoorloop. In de bovendoorloop is de

(3.1)

In een laboratoriumexperiment van Dawson met een schuinaangestroomde buis (zie figuur 3.6) met diameter 8 mm blijkt enige aanhechting in de recirculatie zone plaats te vinden. De kant zonder recirculatiezone bleef schoon.

Dawson geeft een oorzakelijk verband tussen het voorkomen van een recirculatie en meer aanhechtingen. Het voorkomen van een recirculatie heeft een aantal effecten:

- In het loslatingspunt is de schuifspanning nul. Hierdoor worden eddies niet tegengewerkt of minder opgebroken. Hierdoor zullen insluitingen snel gemakkelijker naar de wand kunnen worden getransporteerd. Er komen in een recirculatie immers meer fluctuaties loodrecht op de wand voor.
- Dat de schuifspanning nul wordt betekent ook dat afgezette deeltjes ook niet door resuspensie weer kunnen losraken.

In een turbulente recirculatie wisselt de stroming continu van richting. Dit betekent dat op zo'n moment in de hele recirculatie de schuifspanning nul is en dat deeltjes dus gemakkelijk kunnen worden afgezet.

Buis van vuurvast materiaal

Richting staalstroom

Figuur 3.6. Schuinaangestroomde buis van Dawson.

Opmerkelijk is hier dat Dawson kennelijk de in de tijd minimaal voorkomende schuifspanning belangrijk acht voor de opbouw van deeltjes. Dit onderwerp zal meer aandacht krijgen bij de experimenten en de verklaring van de resultaten van dit onderzoek. Daarnaast is het duidelijkste patroon van aanhechting in een dompelpijp de toename in de beneden richting. Dit verklaart de theorie van Dawson niet.

Geconcludeerd kan worden dat:

- De tweede laag wordt niet gevormd door reacties maar door depositie van deeltjes.
- Voor de beschrijving van het opbouwmechanisme van die tweede laag is nog geen sluitende theorie of verklaring.

#### 3.4. **Oplossingen tegen clogging**

Er zijn tot nu toe een aantal chemische en stromingsmaatregelen tegen clogging effectief gebleken.

# 3.4.1. Chemie

Calciumbehandeling van staal

Het is mogelijk om clogging te reduceren door het toevoegen van Ca aan Al-rustig staal (Faulring, 1980). Ca heeft een kookpunt van 1490 °C, waardoor het na toevoeging aan het staal verdampt en dan reageert met opgelost zuurstof, of de zuurstof in  $Al_2O_3$  of b.v. opgelost zwavel. Als voldoende Ca wordt toegevoegd ontstaat een verbinding tussen CaO en  $Al_2O_3$  met een smeltpunt lager dan staal. Het gevolg is dan dus dat aluminiumoxydedeeltjes vloeibaar worden waardoor die niet meer kunnen cloggen. Het is belangrijk een juiste hoeveelheid toe te voegen. Te weinig levert juist meer clogging op door een grotere hoeveelheid oxydes die nog niet vloeibaar zijn. Door te veel toevoegen gaat Ca reageren met zwavel. Het dan ontstane CaS is vast en zorgt voor cloggingsverschijnselen gelijk aan die van aluminiumoxyde. Door Larsen (1990) is berekend hoeveel Ca mag worden toegevoegd afhankelijk van Al en S concentraties. De bevindingen worden door experimenteel werk ondersteund. Nadeel is dat op grote schaal Ca toevoegen duur is en ook is het belangrijk een goed beeld te hebben van de zuurstof- en aluminiumoxydeconcentraties in het staal.

#### Calcium toevoegen aan het vuurvast

De eigenschap van CaO het smeltpunt van  $Al_2O_3$  te verlagen kan ook worden ingezet door aan de dompelpijp  $ZrO_2$  en vooral CaO toe te voegen, meestal in een laag aan de binnenwand van het vuurvast. Het effect is dat wanneer  $Al_2O_3$  aan de wand kleeft,  $ZrO_2$  en CaO uit het vuurvast in het aluminiumoxyde diffunderen en het smeltpunt verlagen. Hierdoor vormen de insluitingen in combinatie met het CaO een min of meer vloeibare laag waardoor  $Al_2O_3$  deeltjes die in contact met de wand komen simpel door het staal worden weggespoeld. Het  $ZrO_2$  wordt toegevoegd omdat alleen CaO veel te snel zou oplossen. Er zijn wel enige problemen bij de exacte samenstelling van het materiaal omdat het aan een aantal belangrijke eisen moet voldoen.

- Er moet voldoende Ca aanwezig zijn zonder de sterkte van het vuurvast aan te tasten.
- Het transport van Ca in het vuurvast naar de vuurvast/staal-interface mag niet reactiesnelheidsbepalend zijn aangezien er voldoende Ca aanwezig moet zijn om de aanwezige Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> te binden.
- Ook mogen er geen kinetische factoren zijn die de reactie bemoeilijken, zoals warmte toevoer.

Experimenten hebben aangetoond dat deze typen vuurvast alleen werken in situaties waar al weinig cloggingsproblemen zijn. Aangezien er dan nog wel Ca in het vuurvast aanwezig is is het transport van CaO waarschijnlijk de knellende factor. Daarom heeft Miyagawa (1995) onderzoek gedaan aan  $ZrO_2$ -CaO-C vuurvast waarvan de decompositie van  $ZrO_2$ -CaO en het reageren met Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sneller zouden gaan. Dit blijkt te lukken door het toevoegen van SiO<sub>2</sub> waarmee de clogging dan dus beter wordt onderdrukt. Maar de aanwezigheid van SiO<sub>2</sub> kan wel de sterkte van het materiaal aantasten, wat ook de reden zal zijn dat het Calcium transport sneller gaat want het bevordert eigenlijk de reacties in het vuurvast. Dus blijft het een compromiskwestie.

#### 3.4.2. Stroming

Omdat de juiste relatie tussen stroming en clogging nog niet bekend is zijn nog geen maatregelen genomen om de geometrie aan te passen. Wel is het injecteren van Argon zeer effectief gebleken.

Het succes van Argon wordt verklaard met goed en minder sterk onderbouwde theorieën. Minder sterk onderbouwd is dat de toevoer van Argon de turbulentie verhoogd en er daardoor de clogging wegspoelt. Dit wordt met een verwijzing in het CISR Progress Report gemeld maar bij opvraging van literatuur blijkt er een 'ketting' van doorverwijzingen naar steeds andere artikelen te bestaan waarin de bewering wel wordt herhaald maar nergens wordt onderbouwd.

Een andere theorie is dat er een gasfilm wordt gevormd tussen wand en staal waardoor de deeltjes niet in contact met de wand zouden kunnen komen (CISR Progress Report). Dit wordt ook niet verder onderbouwd.

Een wel goed onderbouwde theorie is flotatie (Wang, 1996). Deze theorie stelt dat Argonbellen aluminiumoxydedeeltjes invangen in het voedingssysteem. De deeltjes blijven op de bel-staalinterface zitten omdat dit energetisch zeer gunstig is. Dit effect heeft dus dezelfde theoretische basis als de verklaring waarom niet ingevangen aluminiumoxydedeeltjes aan het vuurvast hechten (zie § 3.3.2, thermodynamische voorwaarde). De bellen stijgen uit in de gietvorm en er is dus een wassend effect van Argon.

Nadeel van de methode is dat kwaliteitsverlies kan optreden door het voorkomen van bellen in het gestolde staal.

Naast deze maatregelen zijn er de algemenere zoals de zorg dat er in het voortraject van de gietmachine zo weinig mogelijk verontreinigingen in het staal komen. Of het voorkomen van luchtinlek bij de schuif door soms slecht sluitende platen. Dit zou eventueel de nogal wissellende hoeveelheid clogging vlak onder de schuif kunnen verklaren.

Wat nu opgehelderd dient te worden is het mechanisme van deeltjesaanhechting in de dompelpijp. De daartoe gedane experimenten zullen in het volgende hoofdstuk worden beschreven.

# 4. Experimenteel onderzoek

# 4.1. Inleiding

Het belangrijkste doel is op te helderen door welke factor de aanhechting van deeltjes in de dompelpijp wordt bepaald. Probleem is echter dat nog niet zeker is in welk patroon aluminiumoxyde aanhecht in een dompelpijp. Hierdoor kunnen hypothesen ook niet worden getoetst aan werkelijke hoeveelheden afzettingen. Dit betekent dat eerst een methode bedacht dient te worden waarmee experimenteel het patroon van aanhechting van deeltjes in een geometrie gelijk aan die van een dompelpijp met schuif kan worden bepaald. Het is echter niet uitgesloten dat door wat andere hechtingseigenschappen van de experimentele deeltjes in vergelijking met aluminiumoxydedeeltjes het patroon in een experimentele opstelling niet geheel overeenkomt met dat van clogging. Maar dan zal ter verkrijging van meer informatie over hechting van deeltjes in het algemeen in ieder geval gepoogd worden de hechting in de experimentele opstelling te verklaren.

# 4.2. Ontwerp principe voor experimentele cloggingsimulatie

Voor het laten hechten van deeltjes aan een wand kunnen verschillende principes worden beschouwd. Er dient wel voldaan te worden aan de thermodynamische voorwaarde van § 3.3.2. Middels proeven zijn twee verschillende principes op hun voldoen aan deze voorwaarde getest. De principes waren op chemische en thermische eigenschappen gebaseerd.

#### **Calciumsulfaatoplossing**

Gepoogd is CaSO<sub>4</sub> oplossing in een sterk geroerd bekerglas neer te laten slaan op een blokje gips dat immers ook bestaat ook uit calciumsulfaat. Dit zou moeten gebeuren onder toevoeging aan de oplossing van aceton. Dit is een weinig polaire stof terwijl de calciumsulfaatoplossing zeer polair is. Dit maakt de aanwezigheid van CaSO<sub>4</sub> in het mengsel van oplossing en aceton vergelijkbaar met de aanwezigheid van de slecht bevochtigbare aluminiumoxyde deeltjes in staal. Vanuit energetisch oogpunt zal het calciumsulfaat dan uit het mengsel worden gedreven en neerslaan op het gips dat dezelfde polariteit heeft. Bij welslagen van dit experiment zouden proeven kunnen worden gedaan met een simpel in gips uitgevoerde dompelpijpgeometrie.

Het resultaat was dat het calciumsulfaat wel neersloeg maar niet op het gips. Het sloeg wel neer tegen de wand van het bekerglas maar hechtte niet zodanig dat het standhield wanneer een roerder werd aangezet. Dit betekent dat hiermee geen clogging valt na te bootsen. Aangezien andere chemische stoffen volgens de tabellen voor het nabootsen van clogging slechtere eigenschappen hebben (polariteit, oplosbaarheid) of minder praktisch waren is het nabootsen van clogging op basis van een thermisch mechanisme geprobeerd.

## Paraffine in water

Dit principe gaat uit van een a-polaire stof met een smeltpunt tussen 0 en 100 °C. Door de a-polariteit lost deze stof niet op in water en kan bij de juiste temperatuur in druppels aanwezig zijn. Daarnaast moet de stof enige kleverigheid of hechtingsvermogen aan een wand kunnen bezitten. Ook de dichtheid mag niet teveel van water afwijken om scheiding van de stoffen te voorkomen. Hieraan voldoet in principe de stof paraffine. De dichtheid is zo'n 0.8 ton/m<sup>3</sup>, het smelttraject ligt tussen 57 en 62 °C. Er kunnen nu twee manieren getest worden om paraffine deeltjes te laten hechten:

- 1. Paraffine deeltjes/druppels in het smelttraject in een bekerglas in water doen en deze door roeren in contact met de wand brengen. Door de kleverigheid in het smelttraject zullen ze daar vervolgens moeten blijven hechten.
- 2. Paraffine boven het smelttraject in water doen, door roeren een dispersie maken en de wand plaatselijk afkoelen zodat een druppel paraffine die de wand raakt zal stollen en dus blijven hechten.

## Methode 1

Deze methode is getest in een simpele opstelling als in figuur 4.2. Maar dan

aanvankelijk zonder glasplaatje. Er is bij verschillende temperaturen geprobeerd paraffine aan het bekerglas te laten hechten. Dit gebeurde vrijwel niet. Dat zou kunnen komen doordat er te weinig paraffine in de buurt van de wand kwam door het dichtheidsverschil en de vloeistofbeweging door de roerder. Daarom werd op het moment dat de dispersie een bepaalde temperatuur bereikt had er een stuk glas in gestoken. bleef wanneer Hieraan de temperatuur constant werd gehouden geen paraffine hechten. Bij lagere temperaturen in het smelttraject stolde de paraffine vrij snel. Dit zorgde



# Figuur 4.1. Opstelling voor testen hechtingsprincipe (methode 1).

ervoor dat klonten paraffine ontstonden die snel boven kwamen drijven zodat geen goede dispersie was te maken voordat het glas erin werd gestoken. Werken met hogere temperaturen kon scheiding van de stoffen voorkomen maar zorgde er daarentegen helaas voor dat de paraffine "druppels" die tegen het stuk glas aankwamen niet bleven hechten o.a. door de vloeistofbeweging veroorzaakt door de roerder en het kennelijk geringere hechtingsvermogen van de paraffine bij die temperaturen.

Om toch paraffine te kunnen laten hechten werd eerst een goede dispersie gemaakt met temperatuur boven het smelttraject (63 °C), het glas erin gestoken en daarna koud

water toegevoegd. Dit leverde wel enige aanhechting van deeltjes op. Er ontstond echter geen aaneengesloten laag maar in de orde van 10 tot 25 % (geschat) van het glasoppervlak was wel bedekt. De proef is ook gedaan met het in het mengsel steken van perspex in plaats van glas. Dit leverde een vergelijkbare hoeveelheid aanhechting op. Hierbij moet wel gezegd worden dat er nogal wat variatie zat in de hoeveelheid aanhechting per uitvoering van de proef.

### Conclusie

Deze methode zou kunnen worden opgeschaald en worden gebruikt voor het simuleren van clogging. Probleem is echter dat deze proeven niet bij constante conditie van de deeltjes lukte en dat de eigenschappen van de druppels/deeltjes dus tijdens het experiment moesten veranderen. Dit sluit echter op zich niet uit dat het constant houden van de temperatuur in de andere geometrie van een dompelpijpopstelling eventueel wel werkt. Helaas was de hoeveelheid aangehechte deeltjes niet bepaald groot en is dus ook hier de vraag wat er gebeurt in een andere geometrie en een opgeschaalde situatie. Dus voldoende reden om ook de tweede methode te proberen.

## Methode 2

Deze methode is getest met een opstelling als in figuur 4.2. Het water werd eerst tot

70 °C verwarmd. Nadat alle paraffine was gesmolten werd de koudwatertoevoer aangezet. Tussen de slang in de reageerbuis en de reageerbuis stroomt dan koud water dat moet zorgen voor de afvoer van warmte zodat de reageerbuiswand op een lagere temperatuur komt dan de dispersie. Het bleek bij deze dispersietemperatuur niet mogelijk paraffine laten te



Figuur 4.2. Opstelling voor testen hechtingsprincipe (methode 2).

hechten. Daarom werd de temperatuur van het mengsel geleidelijk verlaagd om zo de benodigde warmteoverdracht voor stolling kleiner te maken. Bij de koudwaterkraan geheel open bleef er bij 64 °C paraffine hechten aan het glazen buisje. Dit is een zeer dun laagje (tot één mm). Wanneer de temperatuur van het mengsel wordt verlaagd groeit het laagje verder aan. Dit is stapsgewijs gedaan. Hierdoor kon worden vastgesteld dat het hechten van een grotere laag paraffine werd veroorzaakt door de lagere mengseltemperatuur en niet doordat het aangroeien van een dikkere laag paraffine meer tijd nodig heeft.

#### Conclusie

1. Het is ook met dit principe mogelijk paraffine in water gemengd af te zetten aan een glazen wand;

2. De hoeveelheid paraffine die aan de wand blijft kleven neemt sterk toe naarmate de temperatuur van het mengsel lager is in het smelttraject van de paraffine.

Dit betekent dat beide methoden geschikt lijken te zijn voor het simuleren van clogging. Echter, de tweede methode zou niet alleen constructie-technisch lastig op te schalen zijn tot de geometrie van een dompelpijp maar toepassing van warmtebalansen gecombineerd met het geconstateerde hechtingsgedrag bracht ook een ander relevant punt aan het licht. Wanneer de wand van een experimentele dompelpijp wordt gekoeld koelt uiteraard ook het water-paraffinemengsel dat daar doorheen stroomt af. Dat zou geen probleem zijn wanneer het hechtingsgedrag van paraffine niet zo temperatuurgevoelig was als in het experiment bleek. Dit betekent dat stroomafwaarts steeds meer paraffine aan de wand blijft hechten veroorzaakt door de steeds lagere temperatuur. Dit geeft dus een betrouwbaarheidsprobleem voor resultaten van een eventuele proefopstelling. Het doel van het experiment is immers het hechtingsgedrag van deeltjes te bepalen in een dompelpijpstroming waar niet langs de stroming de hechtingseigenschappen van de deeltjes sterk veranderen. De berekening die voor een eventuele proefopstelling is gemaakt is te vinden in Appendix I. Conclusie hieruit is dat deze methode weinig geschikt of onbetrouwbaar is voor het simuleren van clogging.

Dus werd besloten een opstelling te bouwen gebaseerd op het eerste principe. Deze opstelling wordt hieronder beschreven.

#### Proefopstelling voor cloggingsimulatie

Gebouwd werd een opstelling als in figuur 4.3. Deze bestaat o.a. uit een voorraadbak van 192 liter (lang 0.8 m;breed 0.4 m en hoog 0.6 m). Hierin kan Schuif worden geplaatst een Dompelpijp electrische roerder. In de voorraadbak waren ook twee Koudwatertoevoer verwarmings-Roerder elementen aanwezig. De bak was Afsluiter aangesloten op een electrische Pomp pomp. Het debiet hiervan Verwarmingselementen worden kon geregeld met Figuur 4.3. Proefopstelling voor cloggingsimulatie. een stroomafwaarts

die

How work

-			
Exn	prin	ipn	len
Drep	01 111		

gelegen afsluiter. Hier vandaan kon het mengsel verder stromen richting de dompelpijp van perspex (PMMA). Dit ging via een slang met inwendige diameter 5 cm. De geconstrueerde dompelpijp had een inwendige diameter van 4 cm en een lengte van 34 cm voor de schuif en 65 cm erna. Er is een stalen schuif geconstrueerd die op verschillende schuifopeningen in elkaar gezet kon worden. Tijdens de experimenten is gekozen voor een opening van 3/8 aangezien deze in werkelijkheid ook vaak optreedt. Het maximaal haalbare debiet bij deze schuifopening is 160 liter/minuut. Dit is voldoende om aan Reynoldsgelijkvormigheid te kunnen voldoen (zie hiervoor volgende paragraaf). Na de dompelpijp is er een vrije uitstroom in de voorraadbak.

## 4.3. Experimenten

#### 4.3.1. Cloggingsimulatie

Het doel van de eerste proeven met de opstelling was het vaststellen van de beste methode om paraffine te laten hechten. Dit betekent dat moet worden vastgesteld bij welke temperaturen moet worden gewerkt en welke concentraties paraffine en eventuele andere relevante instellingen het best werken. Bij slecht functioneren kan het debiet eventueel wat worden aangepast. De stroming zal echter wel turbulent moeten blijven. Standaard zal echter worden gewerkt met Reynoldsgelijkvormigheid, dit betekent Re = 1.6E+05 in de dompelpijp. Hierbij is het debiet 136 liter/minuut en de gemiddelde vloeistofsnelheid in de dompelpijp 1.8 m/s. Hierbij zijn de hooguit enkele procenten paraffine in het water verwaarloosd en is uitgegaan van de kinematische viscositeit van water van 65 °C.

#### Temperatuur constant

Als eerste zijn proeven uitgevoerd bij constante temperatuur van het water/paraffine mengsel. De bak was half gevuld en de paraffine concentratie was 0.5 % ( $\approx 0.5$  kg). De temperatuur werd verhoogd tot 65 °C en door roeren werd een zo goed mogelijke dispersie gecreëerd. De pomp stond uiteraard nog niet aan. De temperatuur werd tot naar het smelttraject verlaagd door het toevoegen van koud water.

Toen ontstond een belangrijk en naar later bleek ook niet oplosbaar probleem: de paraffine druppels/deeltjes gingen clusteren en er onstonden klonten en een vaste laag paraffine die op het vloeistofoppervlak kwam drijven. Dit gebeurde al tijdens het omzetten van de druppels in deeltjes. Het gevolg was dus dat met het dalen van de temperatuur de twee stoffen snel werden gescheiden. Dit was ook duidelijk te zien aan de kleur van het mengsel. Controle door het nemen van een monster liet dat ook zien. Het probleem trad op in het smelttraject tot de temperatuur van 60 °C. Daarboven trad het niet meer op. Wanneer bij deze hogere temperaturen de pomp werd aangezet was ook aan de kleur van het mengsel in de dompelpijp de paraffineaanwezigheid te zien. Er was echter geen debiet waarbij paraffine aan de dompelpijpwand bleef hechten. Dit is ook logisch omdat er aan het eind van het smelttraject immers weinig of geen kleverigheid of hechtingsvermogen meer is.

De volgende vier oplossingen voor het probleem van de scheiding zijn geprobeerd: 1. Intensiever roeren

- 2. Maken bypass
- 3. Kleinere mengselhoeveelheid in de bak
- 4. Hogere paraffineconcentratie in het mengsel
- Ad 2: Deze bypass is een niet ondergedompelde slang tussen pomp en voorraadbak. De bedoeling hiervan is dat door de sterke jet uit de slang brokken paraffine op het vloeistofoppervlak weer in het mengsel verdwijnen waarna die door de hoge turbulentie in de pomp in kleine deeltjes zouden moeten worden opgebroken. Deze bypass kan worden gebruikt zowel tijdens het maken van de deeltjes als bij het simuleren van clogging.
- Ad 3: Dit moet er toe leiden dat door het gedaalde vloeistofniveau in de vloeistof meegenomen brokken paraffine een grotere kans hebben in de buis naar de pomp te verdwijnen in plaats van weer uit te stijgen. Deze zouden dan ook tijdens het simuleren van clogging door de pomp kunnen worden opgebroken.

De maatregelen zijn bij diverse temperaturen tussen de 57 en 60 °C toegepast. Helaas verbeterde dit de situatie geenszins. De paraffine bleef zeer sterk klonteren en uitstijgen. Ook is er "handmatig" voor gezorgd dat al gestolde grotere brokken paraffine werden aangezogen. Deze waren dan na de pomp inderdaad gedeeltelijk opgebroken in kleinere stukjes/deeltjes maar niet zodanig klein of kleverig dat ze aan de dompelpijpwand bleven hechten.

Samenvattend is de situatie dat de paraffinedeeltjes in het smelttraject te zeer aan elkaar hechten en klonteren terwijl ze buiten het smelttraject ook geen hechtingsvermogen aan de dompelpijpwand meer hebben.

#### Conclusie:

Het is niet mogelijk is om in de bak een water/parafine mengsel te creëren, op constante temperatuur te houden en paraffinedeeltjes hiervan aan de dompelpijpwand te laten hechten.

#### Variabele temperatuur

Een andere methode om paraffinedeeltjes te laten hechten kan zijn de aanpassing van methode 1 (zie pagina 25). Deze bleek toen succesvol. Gewerkt werd met een half gevulde bak met zo'n 0.5 kg paraffine. De temperatuur werd verhoogd tot zo'n 65 °C. Door roeren en het aanzetten van de pomp werd een goede dispersie verkregen. Dit was ook te zien aan de witte kleur van het mengsel. Vooral het enkele minuten verpompen van de vloeistof had een gunstig effect hierop. Dit wordt veroorzaakt doordat:

- Er in de pomp een relatief hoge turbulentie heerst wat voor een kleinere druppelgrootte zorgt en dus druppels die minder snel uit kunnen stijgen;
- De vrije uitstroomopening zorgt voor entrainment van vloeibare paraffine die op de vloeistof in de bak komt drijven. Wanneer de uitstroomopening was ondergedompeld leverde dit een minder troebel mengsel op.

De koudwatertoevoer in de bak werd aangezet met een debiet van rond de 250 liter per uur. Daarmee daalde de temperatuur in vijf minuten naar 57 °C.

#### Resultaten

Het resultaat hiervan was dat er paraffine hechtte aan de dompelpijpwand. Zie figuur 4.4. Hieraan viel op dat er in het gebied tot zo'n 12 cm onder de schuif geen paraffine aanhechtte en na die 12 cm de aanhechting in stroomafwaartse richting toenam. De totale hoeveelheid paraffine die aanhechtte was echter niet groot: op plaatsen met maximale aanhechting was ongeveer de helft van de oppervlakte (op het oog geschat) bedekt met paraffine. De paraffine aanhechting groeide redelijk geleidelijk met het dalen van de temperatuur van 60° C naar 57 °C, maar de meeste paraffine kwam rond de 58 °C op de wand.

Figuur 4.4. Aanhechting paraffine in opstelling van figuur 4.3. De metalen plaat aan de bovenkant van de foto is de onderste helft

Het toenemen van de paraffine aanhechting

in stroomafwaartse richting en het totaal afwezig zijn van clogging in het gebied onder de schuif was op het moment van de proef opmerkelijk omdat in de recentste literatuur (CISR Progress Report 1996) ook vaak clogging onder de schuif werd gerapporteerd.

van de schuif.

De proef is uiteraard verschillende keren herhaald om verschillende parameters zo in te kunnen stellen dat de hoeveelheid aan te hechten paraffine zo groot mogelijk te maken en de reproduceerbaarheid van de resultaten te testen.

Hieruit volgden de volgende punten voor de uitvoering van de proef:

- Wanneer het experiment met exact dezelfde condities werd herhaald bleef steeds minder paraffine hechten. Dit werd veroorzaakt door vervuiling door roest afkomstig van stalen onderdelen van het buizenstelsel van de opstelling. Het probleem kon worden opgelost door na elke proef de dompelpijp en de bak te reinigen. Ook was het noodzakelijk nieuwe paraffine te nemen.
- Het ideale vloeistofniveau was rond de 25 cm vanaf de bodem. Bij te weinig vloeistof in de bak was er in totaal ook weinig paraffine in de vloeistof aanwezig



·

om te hechten. Bij een te hoog vloeistofniveau kwam minder paraffine van de laag paraffine aan het vloeistofoppervlak bij de pompingang.

- Meer paraffine dan 400 gram in de bak vergrootte de aanhechting niet meer.
- De begintemperatuur heeft niet veel invloed maar moet wel minimaal 62 °C zijn.
- Het koudwater debiet diende zo'n 300 l/h te zijn. Dit betekent dat de temperatuur sneller daalt, ook omdat de totale hoeveelheid mengsel in de bak naar beneden is aangepast. De verklaring waarom dat beter werkt is dat er bij temperaturen onder 60 °C al gestolde paraffine op het vloeistofoppervlak begint te komen. Naarmate de temperatuur verder daalt gaat meer paraffine klonteren en uitstijgen. Dit betekent dat wanneer het afkoelen langzaam gaat er bij de lagere temperaturen weinig paraffine meer in het water meer aanwezig zal zijn. Terwijl ook te zien is dat juist zo rond de 58 °C de meeste paraffine blijft hechten omdat dan de kleverigheid het grootst is.

#### Reproduceerbaarheid

Wanneer de proef op bovenstaande wijze werd herhaald trad bij elke proef een andere hoeveelheid aanhechting op. Wat wel bij elke proef optrad was het patroon van toename van paraffineaanhechting in stroomafwaartse richting. De hoeveelheid aanhechting kon op de plaatsen met veel aanhechting per uitvoering van de proef een factor twee verschillen. Ook de grens waar de aanhechting begon lag niet op een constante plaats. Bij een uitvoering met veel aanhechting lag deze verder naar boven. Ook was de vorm van de grens vaak een ellips (de grens was dus een 'schuine

doorsnede' van de buis). Hiervan lag het laagste punt altijd aan de rechterzijkant van de buis (gezien vanuit de positie van figuur 4.4). Overigens was deze grens niet altijd even scherp. Er zal dus eventueel moeten worden geprobeerd de hoeveelheid aanhechting te vergroten zodat het effect met meer zekerheid kan worden vastgesteld.

De proef is ook twee maal gedaan met de schuif geheel open. Het resultaat was beide vergelijkbaar: keren een uniforme verdeling van de aanhechting (zie figuur 4.5). Op het oog was wel een afname van de hoeveelheid aanhechting in stroomafwaartse richting waar te nemen (dit is later bij een verbeterde opstelling ook gemeten). Deze afname ligt ook voor de hand gezien de dalende concentratie paraffinedeeltjes. Verder is ook gebleken dat de temperatuurdaling van het mengsel wanneer het door de buizen, de pomp en de dompelpijp stroomt minder dan 0.1 °C meetnauwkeurigheid) (de is. Een temperatuursgradiënt over de dompelpijp



Figuur 4.5. Paraffine-aanhechting bij geheel geopende schuif.

speelt bij de opbouw van het patroon dus geen rol.

#### Conclusie

Met de resultaten voor open en gedeeltelijk geopende schuif kan worden gesteld dat het patroon van toename van aanhechting onder de schuif bij gedeeltelijk geopende schuif een gevolg is van o.a. de geometrie van dompelpijp en schuif en niet door het principe van de paraffineaanhechting. De opvallende vorm van de grens van aanhechting zal duidelijker in beeld moeten worden gebracht voordat dit met zekerheid ook als een gevolg van de gedeeltelijk geopende schuif kan worden gezien.

#### Aanpassing opstelling

Met de huidige opstelling bleek het niet mogelijk door aanpassing van parameters meer paraffine te laten hechten. Een belangrijk probleem is dat tijdens het doen van de proef de temperatuur in de voorraadbak verandert. Daarom is een aangepast principe geprobeerd. Hiermee wordt het koude water niet in de voorraadbak maar in de buis vlak voor de dompelpijp ingespoten en zullen dus de druppels pas dan kleverige deeltjes worden. De voorraadbak kan dan op constante temperatuur worden gehouden. Dit heeft twee praktische voordelen:

- 1. Het is beter mogelijk deeltjes rond de 58 °C door de buis te laten stromen. Dit is belangrijk omdat dan de kleverigheid het grootst is. Het probleem dat de paraffine in de voorraadbak bij deze temperatuur klontert en uitstijgt wordt nu dus opgelost.
- 2. Een zo groot mogelijk gedeelte van de gecreëerde deeltjes bereikt de dompelpijp en gaat niet in het lange traject stroomopwaarts al hechten.

Na enig testen blijkt het principe te werken en wordt besloten de opstelling aan te passen. Tegelijk worden nog een aantal andere aanpassingen gedaan:



Er wordt een voorraadbak voor heet water bij geplaatst. Dit omdat de temperatuurdaling door koudwatertoevoeging praktisch niet met verwarmingselementen continu is op te vangen. Er wordt een afvoervat bijgeplaatst om stijging van het vloeistofniveau in de voorraadbak te voorkomen.



Zoveel mogelijk stalen onderdelen worden door roestvrije vervangen omdat de sterke indruk bestaat dat de aanslag die de paraffine slechter laat hechten roest is. In de leiding waar het mengsel doorheen stroomt wordt een meetschijf geïnstalleerd. Het nauwkeuriger instellen van het debiet is nu belangrijk omdat de

juiste verhouding tussen mengseldebiet en koud water moet worden ingesteld. In de koudwatertoevoer wordt dan ook een rotameter opgenomen. De opstelling wordt dan als in figuur 4.6.

Hierbij is de koudwatertoevoer op de zijkant van de bocht aangesloten (dit is voor het vlak van aanzicht in de figuur waarin de aansluiting is geprojecteerd). De opening in de wand is 5 mm in doorsnede. De druk over de meetschijf wordt gemeten door het verschil in waterhoogte in twee eraan bevestigde slangen op te nemen. De ijking van de meetschijf vond plaats door er een toevoerleiding met

# Tabel 4.1. IJking elektromagnetischedebietmeter.

%	tijd (s)	gewicht (kg)	debiet l/m
5,0	41	10,9	16,0
5,0	40	11,0	16,5
9,9	35	18,9	32,4
9,9	35	19,0	32,6
10,05	60	33,5	33,5
20,05	40	44,3	66,4
25,2	30	41,5	82,9
35,1	25	46,0	110,3
40,5	20	42,5	127,5

electromagnetische debietmeter op aan te sluiten. Deze geeft het debiet als percentage



van het maximale debiet (300 l/m). Hierin kan een systematische fout zitten en dus moest ook deze worden geijkt. De resultaten hiervan staan in tabel 4.1. Hierin staat het aantal liter dat per seconde in een bak stroomde bij een bepaald percentage van het totale debiet.

Dit leidt met een kleinste kwadratenaanpassing en de eis debiet = 0 voor percentage = 0 tot het verband tussen percentage en debiet dat in figuur 4.7 is te zien.

Hierin is te zien dat 1% is 3.19 l/s. Vervolgens is met deze debietmeter de meetschijf geijkt. De meetresultaten staan in tabel 4.2.

Met de resultaten uit tabel 4.1 en tabel 4.2 volgt dan het verband tussen de druk over de meetschijf en het debiet in figuur 4.8. Hierbij is ervan uitgegaan dat de iets andere eigenschappen van het mengsel dat er rond 60 °C doorheen stroomt geen andere ijkgrafiek zullen geven.

# Tabel 4.2. IJking meetschijf.

%	druk (cm)
20,5	13,5
30,7	27,5
27,5	22,0
31,7	30,5
22,5	16,5
33,2	33,0
34,7	35,5
25,05	19,5
37,3	40,5
40,35	47,5
42,6	51,5





De polynoom is een tweedegraads kwadratenaanpassing waarbij de eis is opgelegd dat de grafiek door de oorsprong gaat.

#### Instellingen

Na proefdraaien met de opstelling is gevonden dat de best werkende instelling van het debiet is: mengsel: 130 l/min en koudwatertoevoer 350 l/h (= 5.8 l/min). Bij deze instelling is voldaan aan Re =  $1.5*10^5$  in de dompelpijp. De temperatuur van de voorraadbak is 60 °C. De gemeten temperatuurdaling door de koudwatertoevoer is 1.8 °C bij een koudwatertemperatuur van 17 °C. Het vloeistofniveau lag 35 cm boven de bodem van de voorraadbak. Dit is verhoogd ten opzichte van de vorige opstelling omdat hierdoor de temperatuur beter constant te houden is. Het bezwaar bij de vorige proef van het snelle uitstijgen van de paraffine geldt wegens de hogere temperatuur hier dus niet. De paraffineconcentratie was 5 gram per liter. De concentratie daalt tijdens het experiment door het continu afvoeren van mengsel maar werd tijdens het experiment weer op peil gebracht. De toevoer van heet water had geen vaste instelling maar werd zo gecontroleerd dat de temperatuur van de voorraadbak dicht bij de 60 °C

bleef, d.w.z. afwijkingen van maximaal enkele tiende graden.

#### Resultaten

De aanhechting van paraffine is duidelijk verbeterd ten opzichte van de vorige opstelling. De buis was vooral in het onderste gedeelte geheel bedekt met paraffine. De dikte van de laag kon groeien tot 1 á 2 mm. Het patroon van aanhechting is te zien in figuur 4.9.

#### 4.3.2. Geheel geopende schuif

De proef is ook uitgevoerd met de schuif geheel open (dus geen schuif). Het resultaat was dat de aanhechting in stroomafwaartse richting afnam. Dit is dus het tegenovergestelde effect van een proef met gedeeltelijk geopende schuif.

#### 4.3.3. Half debiet

Er zijn ook proeven gedaan met het halve debiet van dat wat Reynoldsgelijkvormigheid geeft (hoger debiet was niet mogelijk). Voor deze situatie zijn alle instellingen zoals temperaturen en paraffineconcentratie gelijkgehouden. Alleen de debieten zijn gehalveerd. De resultaten hiervan waren



Figuur 4.9. Paraffine-aanhechting in dompelpijp van verbeterde paraffine-opstelling van figuur 4.6. Aan de bovenrand van de foto is het begin van de schuif te zien.

dat de totale hoeveelheid paraffine die in de dompelpijp aanhechtte groter was dan met het standaarddebiet. Dit kwam met name omdat nu wel paraffine onder de schuif aanhechtte. De hoeveelheid verderop in de dompelpijp was meestal wat groter maar aangezien de hoeveelheid aanhechting per proef behoorlijk kan verschillen (zowel bij het hele als het halve debiet) kunnen hierover geen eenduidige conclusies worden getrokken.

Wel eenduidig was dat het in gebiedje onder de schuif nu wel paraffine aanhechtte.

Er bleven slechts kleine stukjes bij de recirculatiezone onbedekt. Een foto hiervan is te zien in figuur 4.10.



Figuur 4.10. Paraffine-aanhechting bij halve debiet. Gefotografeerd is nu vanuit de rechterkant van figuur 4.6.

## 4.4. Discussie paraffineproeven

De uitkomst van de experimenten kan als volgt samengevat worden:

1. Bij het debiet met Reynoldsgelijkvormigheid gaat in de buis paraffine aanhechten. Dit gebeurt echter niet in een gebiedje vlak ander de schuif. Het gebiedje dat schoon blijft heeft een specifieke vorm die herhaaldelijk terugkeert. De aanhechting in de buis neemt toe in stroomafwaartse richting.
- 2. Bij geheel geopende schuif vindt in de gehele buis aanhechting plaats. Maar dan neemt de aanhechting juist af in stroomafwaartse richting. Hieruit wordt de conclusie getrokken dat het patroon van deposities op de wand in het eerste experiment een gevolg is van het stromingspatroon zoals dat door de schuif gedeeltelijk te sluiten ontstaat.
- 3. Daarnaast is het belangrijk te constateren dat bij het halve debiet er wel paraffine aanhecht onder de schuif. Bij de recirculatie kunnen enkele open plekjes voorkomen en is het laagje in ieder geval dunner dan verderop in de buis bij het hele of halve debiet.

De vraag nu is waarom het andere stromingspatroon bij gedeeltelijk geopende schuif een ander patoon van deposities oplevert. Ofwel, de voor terugdringen van clogging zeer belangrijke vraag is welke parameter(s) verantwoordelijk is/zijn voor de plaatsafhankelijke hoeveelheid deposities.

Hiervoor is een hypothese gesteld. Ter bevordering van de duidelijkheid wordt nog even gesteld wat hier wordt bedoeld met de voor dit verslag belangrijke begrippen depositie en resuspensie.

**Depositie**: Hiermee wordt hier bedoeld dat een paraffinedeeltje door de stroming tot tegen de wand worden gebracht. Er kunnen dan twee dingen gebeuren: Óf het deeltje blijft aan de wand plakken, óf het wordt, eventueel direct, weer door de stroming meegevoerd. Bij de behandeling van de theorie en de staalsituatie werd in aansluiting op de literatuur alleen in het eerste geval van depositie gesproken. Maar om een verklaring voor de resultaten van het experiment duidelijk te maken wordt hier dus in beide gevallen van depositie gesproken.

Resuspensie: Hiermee wordt gedoeld op het verschijnsel van deeltjes die de wand raken maar door de weerstand van de langsstromende vloeistof niet vast blijven zitten en weer worden meegevoerd. Dit kan dus gelden voor deeltjes die zojuist naar de wand meegevoerd zijn en daar nog geen bepaalde tijd aan vast geplakt hebben gezeten maar ook voor deeltjes die al wel enige tijd aan de wand gehecht zaten. Van factoren die de resuspensie van deeltjes bepalen zoals b.v. vloeistofeigenschappen is in het experiment alleen het stromingsprofiel van de vloeistof plaatsafhankelijk in de dompelpijp. In het volgende hoofdstuk is gepoogd een indruk van de plaatsafhankelijkheid van de resuspensie te verkrijgen. Hiervoor moest een relevante parameter van de stroming worden gekozen die natuurlijk ook nog enigszins betrouwbaar is te bepalen. Als maat voor de resuspensie op een bepaalde plaats op de dompelpijpwand wordt genomen de schuifspanning op die plaats. Het bepalen van de schuifspanning op de dompelpijpwand is mede gezien de geometrie niet eenvoudig, maar gezien de naar verwachting goede samenhang tussen de resuspensie en de schuifspanning is toch voor deze parameter gekozen. Er is hier niet onderzocht hoe groot de samenhang of afwijking van deze twee parameters is maar intuïtief valt in te zien dat er op zijn minst een sterk verband moet zijn. Op het bepalen van de schuifspanning en de problemen hierbij wordt in het volgende hoofdstuk teruggekomen.

De gestelde hypothese ter verklaring van de experimentele resultaten luidt als volgt:

# Hypothese

De mate van paraffineaanhechting op een bepaalde plaats wordt in de proefopstelling bepaald door de grootte van de schuifspanning op die plaats. Ofwel: het profiel van de schuifspanning over de dompelpijpwand is vergelijkbaar met het profiel van de paraffineaanhechting

#### Motivering/onderbouwing van de hypothese

Vlak onder de schuif is de turbulentieintensiteit het grootst. Daar zullen dus ook de meeste deposities plaatsvinden. Wat dat betreft zou men dus juist meer deposities verwachten vlak onder de schuif. Het omgekeerde is bij elke herhaling van het experiment te zien. Dit kan alleen betekenen dat deeltjes die tot bij de wand worden gebracht daar niet vast willen plakken. Hiervoor zouden twee oorzaken kunnen zijn:

- 1. Er is op die plaats iets onregelmatigs met het materiaal van de dompelpijp, bijvoorbeeld: hij is daar niet goed schoon waardoor het kleefvermogen van de paraffine aan de wand kleiner is. De proef is echter ook uitgevoerd met de schuif open en het gevolg was dat nu wel in de gehele dompelpijp paraffine aanhechtte. De aanhechting nam nu juist af in stroomafwaartse richting. Er kan dus gesteld worden dat het verschijnsel aan de geometrie is te wijten c.q. te danken. De volgende oorzaak geeft wel een waarschijnlijke verklaring.
- 2. De hoge turbulentieintensiteit vlak onder de schuif door de recirculatiezone en de jet door de gedeeltelijk geopende schuif zorgen plaatselijk voor grotere schuifspanningen op de dompelpijpwand. Dit betekent dat de resuspensie vlak onder de schuif groter zal zijn dan verder stroomafwaarts waardoor daar minder paraffine aanhechting plaats zal vinden wat in overeenstemming is met de resultaten.

In het experiment blijft het gebiedje vlak onder de schuif zelfs vrij van aanhechting. Dit kan komen doordat vlak onder de schuif de schuifspanning zo groot is dat de kleverigheid van paraffine aan de dompelpijpwand te klein is om de kracht van de stroming te weerstaan. Het is dan ook opvallend dat wanneer het experiment wordt uitgevoerd met half debiet en de schuifspanningen op de wand dus ook kleiner zijn er in het grootste deel van het gebied onder de schuif waar eerst geen paraffine aanhechtte nu wel een (dun) laagje paraffine aanhecht. Wanneer depositiegraad belangrijk zou zijn zou men bij het halve debiet juist minder paraffine aanhechting verwachten.

De hoeveelheid paraffinedeeltjes die aanhecht is uiteraard een balans tussen de hoeveelheid deposities op een bepaalde plaats en de resuspensie van deeltjes van die plaats. Zonder deposities zullen uiteraard geen deeltjes aanhechten. Maar er is hier dus alle reden om er vanuit te gaan dat het profiel van de aanhechting wordt bepaald door het profiel van de resuspensie langs de wand. Of, als maat hiervoor, door het profiel van de schuifspanning op de wand.

Er is dus een logische verklaring voor de hypothese. Nu is het de vraag of het schuifspanningprofiel wel overeenkomt met het profiel van aanhechting. Zo nee, dan is de hypothese uiteraard verworpen. Bij een goede overeenkomst wordt er vanuit gegaan dat dat samen met de logische verklaring gezien kan worden als voldoende tub ritesin Vlab on the solucif

onderbouwing om de hypothese als verklaring te zien voor de uitkomsten van de experimenten.

Dan is de vervolgvraag hoe de schuifspanning moet worden bepaald. Het schuifspanningprofiel in de dompelpijp is praktisch gezien niet experimenteel te bepalen. Tot op zekere hoogte zou dit wel kunnen met een numeriek model.

Daarnaast zijn er nog twee redenen om een numeriek model van de verdeelbak te maken:

- Voor een onderzoek in EGKS-verband (Europese Gemeenschap van Kolen en Staal) is het namelijk nodig om vast te stellen of er sprake is van een kortsluitstroom in de verdeelbak. Bij Hoogovens is echter wel al bekend dat deze kortsluitstroom er niet zal zijn, maar dit dient voor dat onderzoek wel nog met zekerheid te worden vastgesteld. Een kortsluitstroom zou zeer ongewenst zijn omdat aluminiumoxydedeeltjes dan veel slechter uitstijgen met als gevolg meer clogging dan nodig.
- Er is nog de theorie van Dawson, die het optreden van clogging koppelt aan de aanwezigheid van recirculatiezones (zie § 3.3.2, onder kinetische voorwaarde). Gezien de experimentele resultaten en het optreden van clogging in de staalsituatie komt deze theorie al als onjuist voor. Echter wanneer de berekeningen aangeven dat er helemaal geen recirculaties in de bovendoorloop aanwezig zijn, terwijl er regelmatig clogging aanwezig is kan met zekerheid worden geconcludeerd dat deze theorie geen juiste verklaring geeft voor het verband tussen stroming en clogging. Om de stroming in de bovendoorloop te berekenen dient uiteraard ook de stroming in de verdeelbak te worden meegenomen.

Er wordt dus besloten om te pogen een numeriek model van zowel de verdeelbak, de bovendoorloop als de dompelpijp te bouwen. Dit is gezien de geometrie een omvangrijk en lastig karwei. Over deze berekeningen zal het volgende hoofdstuk gaan.

Bij het berekenen van het schuifspanningprofiel is het berekenen van de k-waarde zeer essentieel. Juist de berekening van deze parameter is voor turbulentiemodellen een lastig punt. Om toch een beeld van de betrouwbaarheid van de modeluitkomsten te krijgen is geprobeerd om ook op een aantal plaatsen in de opstelling de vloeistofsnelheid en k-waarde experimenteel te bepalen. Deze metingen zijn beschreven in de volgende paragraaf.

#### 4.5. Meting vloeistofsnelheden opstelling

Voor numerieke modellen is het moeilijk om een recirculatiezone uit te rekenen. Daarom is in de experimentele opstelling geprobeerd de vloeistofsnelheden op de plaats van de recirculatie te meten om de nauwkeurigheid van de berekeningen goed te kunnen bepalen. Er is geprobeerd de snelheden ultrasoon te meten.

#### 4.5.1. Ultrasoonmetingen

Wanneer op een plaats wordt gemeten waar de turbulentie isotroop is kan de k-waarde uit de variantie van de gemeten snelheid worden bepaald. Er is daarom ook buiten de recirculatie, in de ingestelde stroming gemeten. Het bepalen van de k-waarde in of bij de recirculatiezone is vanwege de anisotropie met ultrasoonmetingen niet goed mogelijk.

#### Resultaten

Er traden bij het meten veel problemen op door ongewenste reflecties. Hiertegen werd uiteraard ook pasta tussen de transducer en de dompelpijp gebruikt. Daarnaast is de hoek  $\alpha$  zo ingesteld voor elke positie dat zo betrouwbaar mogelijke metingen werden verkregen. Dit mocht helaas niet



baten. De gemeten snelheden zijn te laag of te hoog en kunnen alleen al vanwege onderlinge tegenstrijdigheid niet kloppen. De resultaten van de snelheidsmetingen zijn daarom in appendix 2 geplaatst. Er is op drie verschillende posities gemeten: d = 3 cm en  $\alpha = 102^\circ$ ; d = 20 cm en  $\alpha = 107^\circ$  en als laatste d = 42 cm en  $\alpha = 72^\circ$ . De betekenis van de symbolen is als in figuur 4.11. Gezien de onbetrouwbaarheid van de snelheidsmetingen heeft het geen zin met de variantie hierin de k-waarden te berekenen.

#### 4.5.2. LDA-metingen

Aangezien het ultrasoon meten van de snelheden niet lukte zijn LDA-metingen geprobeerd. Er waren echter ook hier zeer veel problemen met ongewenste reflecties. Als oplossingen hiervoor zijn geprobeerd:

- Zwart verven van de overzijdewand van de dompelpijp.
- Gebruik zwart doek met zo klein mogelijke doorlaatopening aan de voorzijdewand van de dompelpijp.
- Plaatsen waterbakje met rechthoekige geometrie om dompelpijp.

Deze maatregelen verbeterden allen de situatie, echter de reflecties van de dompelpijp bleken toch te hardnekkig voor het verkrijgen van voldoende betrouwbare metingen.

Om de effecten van de reflecties in de resultaten zoveel mogelijk teniet te doen zijn de frequentiediagrammen van gemeten snelheden met de hand verder bewerkt en hieruit

· Reflection problem ? wind en gebruchtig il hab ton - segund e delat - ees. » Resulting ton - segund e delat a gebied » war ve cheching for » to be ton gee versier e gebied » to be ton to be to be » to be to be to be » to be to be to be » to be to be to be to be » to be to be to be » to be to be to be » to be to be to be to be » to be to be to be to be » to be to be to be to be » to be to be to be to be to be » to be to be to be to be » to be to be to be to be to be » to be to b

zijn een gemiddelde snelheid en fout hierin bepaald. Voor de fout is genomen de fout die gemaakt kan worden door de plaats van de juiste piek verkeerd te bepalen. Dit leidt tot de resultaten in tabel 4.3. Hierin zijn de posities aangegeven met x en y. Deze worden in figuur 4.12 verklaard. Hierbij ligt het aangegeven nulpunt aan de binnenzijde van de perspex dompelpijp. De y-posities van het meetvolume zijn gecorrigeerd voor de grotere verplaatsing in de dompelpijp vanwege de breking.

#### Tabel 4.3. Resultaten LDA-metingen. snelheid in fout (m/s) x (cm) y (mm) x-richting (m/s) 2 11 -0,065 0,115 2 21 -4,580 0,225 3 11 -2,385 0,455 3 16 -3,675 0,455 3 -4,390 21 0,110 18 11 -1,185 0,115 16 -1,075 0,115 18 -1,055 0,110 18 21 -1,135 0,115 32 16 32 21 -1,2940,105

Van een aantal posities kon geen zinvol maximum worden bepaald. Hiervoor kon dus geen snelheid worden berekend en deze posities zijn dus ook niet opgenomen in de tabel. Van deze resultaten zijn alle waarden significant te laag. Dit valt met name op bij de posities met x groter dan 18 cm. Hiervoor geldt namelijk dat de stroming redelijk tot goed ingesteld is. De gemeten snelheid zal in het midden van de dompelpijp, y = 20 mm, ongeveer gelijk moeten zijn aan de superficiële snelheid. Deze is 1,8 m/s. Dit is hier zeker niet het geval. Het lijkt alsof het debiet te laag was ingesteld, maar dit zal het geval niet zijn; het verschil is zo groot dat de veel zachtere straal tijdens het meten snel zou zijn opgevallen. Maar de cijfers betekenen dus wel dat deze niet echt gebruikt kunnen worden om de resultaten van het numeriek model te verifiëren. Met het numeriek model zullen dus geen sterke kwantitatieve uitspraken kunnen worden gedaan.



negatie/!

allen

# 5. Numeriek model

### 5.1. Inleiding

Het vorige hoofdstuk behandelde met de paraffineproeven zeer interessante experimentele resultaten. Voor deze resultaten is een verklaring geopperd. Deze lijkt logisch gezien juist maar het blijft toch de vraag of er in werkelijkheid ook inderdaad overeenkomst is tussen het profiel van de schuifspanning en de aanhechting van paraffinedeeltjes.

Experimentele bepaling van de schuifspanning in de dompelpijp als functie van plaats is niet mogelijk. Daarom wordt gepoogd deze met een numeriek model uit te rekenen.

Tevens is het gewenst het stromingspatroon in de verdeelbak te kennen om te kunnen vaststellen dat er geen kortsluitstroom aanwezig is.

Daarnaast is er nog de theorie van Dawson. Het optreden van clogging wordt gekoppeld aan de aanwezigheid van recirculatiezones. Gezien de experimentele resultaten en het optreden van clogging in de staalsituatie is dit hoogstwaarschijnlijk onjuist. Dit kan definitief worden vastgesteld door het afwezig blijken te zijn van recirculatiezones in de bovendoorloop, wat een van de hardnekkige clogging plaatsen is.

Daarom is geprobeerd een numeriek model met zowel de verdeelbak als de dompelpijp met schuif te maken. Het is vooraf echter zeer de vraag of de berekeningen zullen slagen gezien de grootte en complexiteit van de geometrie. Vooraf voorziene problemen zijn namelijk het bouwen van deze geometrie, die binnen de strikte regels van het softwarepakket moet passen en die de computers qua rekentijd aan moeten kunnen en verder kan het laten convergeren van de stromingsberekening in een dergelijke geometrie uiteraard een probleem zijn.

Voor de simulatie is het CFD-pakket van CFX gebruikt.

#### 5.2. Berekeningen

#### Geometrie

De geometrie die in het model gezet diende te worden is afgebeeld in de figuren 5.1 en 5.2. Voor de duidelijkheid wordt opgemerkt dat dit de helft van de werkelijke geometrie is. Aan elke verdeelbak hangen namelijk twee dompelpijpen en de gietpijp waar het staal door in de verdeelbak stroomt hangt boven het midden van de verdeelbak. Hierdoor is de situatie dus symmetrisch. Op de plek van de uitholling op de voorgrond, boven, in figuur 5.1 bevindt zich de helft van de gietpijp. De bovendoorloop is te zien in figuur 5.2. Het dompelpijpdebiet is 500 l/m. Er lijkt in de





Figuur 5.2. Bovendoorloop en dompelpijp.

# Figuur 5.1. Verdeelbak, bovendoorloop en dompelpijp.

lengterichting nog een symmetrievlak te zitten maar hiervan kon bij de berekening geen

gebruik worden gemaakt daar er bij de bovendoorloop een asymmetrische instroom zou kunnen zijn. Verder bevindt zich ook de gietplaat niet symmetrisch onder de instroom. Dit is de uitholling op de voorgrond maar dan onder. Aangezien deze onder de instroom ligt zou de scheve ligging invloed kunnen hebben op de stroming in de verdeelbak. De lengte van de verdeelbakhelft is ongeveer 4m. De diameter van de dompelpijp is 65 mm, de lengte 75 cm.

#### Het model van de geometrie

Voor het bouwen van de geometrie is het pakket CFX Build 4.1 en later CFX Build 4.2 gebruikt. Een uitdaging werd gegeven door de eisen die werden gesteld aan de blokken en de aansluitcondities hiertussen. Het model moet zijn opgebouwd uit blokken met ieder zes vlakken met elk vier hoekpunten en er mogen geen kleine hoeken in voorkomen. Voor blokken die op elkaar aansluiten geldt dat die elkaars contactvlak geheel moeten bedekken.

Dit levert een gecompliceerde situatie op voor de aansluiting tussen de dompelpijp met schuif, bovendoorloop (met een axiale geometrie) en de verdeelbak met een gedeeltelijk rechthoekige geometrie.

Belangrijk uitgangspunt is dat het grid zo moet zijn dat er aan de ene kant niet teveel elementjes worden gebruikt met het oog op de rekentijd en het geheugen terwijl aan de andere kant de oplossing voldoende nauwkeurig moet zijn op de voor het probleem relevante plaatsen. Relevante plaatsen zijn bij de bovendoorloop, in de dompelpijp in het algemeen en onder de schuif in het bijzonder. Zowel een te fijn als een te grof grid kan convergentie bemoeilijken. Het is mogelijk het grid op relevante plaatsen te verfijnen. Echter men is nog wel gebonden aan de regels voor het aansluiten van de elementjes. Dit betekent bijvoorbeeld dat wanneer er in het vlak loodrecht op de axiale richting van de dompelpijp meer elementjes komen ook het grid in de verdeelbak meer elementjes gaat tellen.

Ook moet er rekening mee worden gehouden dat gridafmetingen niet teveel mogen verschillen in de verschillende richtingen en ook sterke overgangen in afmetingen moeten worden vermeden.

Deze maatregelen zijn in eerste instantie bedoeld om ervoor te zorgen dat het probleem kan convergeren. Maar ook voor de betrouwbaarheid van een eventuele oplossing zijn deze regels van belang. Daarom is aan het toepassen hiervan veel aandacht besteedt.

De geometrie is zo gebouwd dat in de dompelpijp en vooral in de bovendoorloop zoveel mogelijk het grid grover of fijner gemaakt kan worden met zo min mogelijk invloed op het grid in de verdeelbak en zonder het gebouwde model weer drastisch te moeten wijzigen. Dit is gedaan omdat er na enig rekenen misschien/waarschijnlijk aanpassingen van het grid nodig zijn. Dit kan zijn omdat het probleem niet convergeert maar ook omdat tegemoet moet worden gekomen aan de eisen in de buurt van de wand om de schuifspanning betrouwbaar uit te kunnen rekenen.

#### Schuifspanningseis aan grid

Voor het modelleren van een stroming is het niet nodig om het grid langs de wand extreem fijn te maken. CFX modelleert de stroming langs een wand met behulp van wandfuncties. Hierbij gaat CFX er vanuit dat het middelpunt van de aan de wand grenzende cellen in de logaritmische laag ligt. Als absolute minimum voorwaarde stelt CFX in haar manual dat de afstand tot de wand groter moet zijn dan 11.225 y<sub>+</sub>. Dit punt is het punt waar in de theorie vaak de logaritmische en visceuze sublaag aan elkaar worden gematched. Echter, dit punt ligt in de bufferlaag en is een absolute minimum eis om nog enigszins betrouwbare resultaten te krijgen. Aangezien het hier belangrijk is een betrouwbaar beeld van deze schuifspanningen te krijgen is hier de eis verzwaard naar minimale afstand 30 y<sub>+</sub>, waardoor het middelpunt dus ook echt in de logarithmische laag ligt. Hierbij moet dan natuurlijk ook wel rekening worden gehouden met de maximale afstand maar op grote afstand wijkt het logarithmische snelheidsprofiel niet spectaculair af van gerapporteerde experimentele profielen (zie bijvoorbeeld Bradshaw, "Experimental Fluid Mechanics"). Maar om de resultaten zo betrouwbaar mogelijk te krijgen willen we er toch wel voor zorgen dat de afstand ook weer niet te groot wordt. Daarom wordt ook de eis gesteld dat de maximale afstand

zo'n 150 y<sub>+</sub> bedraagt. Deze waarde is gekozen als redelijk omdat er rond deze waarde bij het van toepassing zijnde Reynoldsgetal enige afwijking begint te komen.

Deze eisen worden niet zozeer gesteld omdat het belangrijk is de exacte getalwaarde van de schuifspanning te kennen maar voor het testen van de hypothese het is wel van belang dat de schuifspanningen in verschillende gebieden met elkaar vergeleken kunnen worden. Dit kan beter als de celmiddelpunten vooral consequent in de logarithmische laag liggen.

#### Rekenen

Bij het bouwen van de geometrie bleek eigenlijk duidelijk dat het voedingssysteem geschikter is om staal te gieten dan om in een rekenmodel te zetten. (Dat maakte de uitdaging des te interessanter). Maar ook het rekenen eraan leverde de nodige hobbeltjes op: Het model convergeerde niet. Hiertegen zijn verschillende maatregelen genomen:

- Toepassen onder-relaxatie
- Toepassen valse tijdstappen
- Gebruik andere solver (AMG: heeft betere convergentie eigenschappen voor complexe blokstructuren maar neemt meer tijd)

Dit bleek de problemen niet echt te kunnen oplossen en dus is de blokstructuur en dus ook het grid veranderd specifiek op de plaatsen waar de residuen het eerst te groot werden. Namelijk in de bovendoorloop en bij de gietpijp.

Bij het nieuwe model lukte het wel een numerieke oplossing van het stromingspatroon in het voedingssysteem te vinden.

#### Resultaten

Het stromingspatroon is te vinden in de figuren 5.3 en 5.4. De pijltjes zijn





$$\left( \frac{i_{me}}{me} \left( \frac{i_{me}}{me} \right) \frac{k_{me}}{e} + \frac{i_{me}}{e} \frac{k_{me}}{e} \right) = \frac{i_{me}}{e} \frac{k_{me}}{e} + \frac{i_{me}}{e} + \frac{i_{me}}{e} \frac{k_{me}}{e} + \frac{i_{me}}{e} +$$



0 0,013 0,025 0,038 0,050

Figuur 5.4. Doorsnede verdeelbak met snelheidsprofiel (in m/s). De lijn met pijptjes door het midden is figuur 5.3 van opzij gezien.

genormaliseerd en geven alleen de richting van de snelheid. Hieruit kan direct worden geconcludeerd dat er in de verdeelbak geen sprake is van een kortsluitstroom.

De bovendoorloop is bestudeerd op het voorkomen van recirculatiezones en deze zijn niet gevonden.

#### **Schuifspanning**

De CFX solver kan ook standaard schuifspanning uitrekenen en de afstanden van de eerste wandcel in y+eenheden geven. Het resultaat van de schuifspanningberekening was nu niet bepaald wat werd verwacht. Daarnaast klopten ook de y<sub>+</sub>-waarden niet van de eerste wandcel. Op de meeste plaatsen in de dompelpijp en bovendoorloop moest het grid een factor twee tot vier fijner gemaakt worden en op een aantal andere plaatsen was het duidelijk te fijn. Dit laatste kan tot echt foute resultaten leiden en dus ligt het voor de hand het grid te verbeteren en een nieuwe berekening te doen.

De nieuwe berekeningen gaven in de verdeelbak buiten de buurt van de wand uiteraard hetzelfde stromingsbeeld.

De  $y_+$ -waarden bleken nu wel goed te kloppen. Een beeld van het verloop van de  $y_+$ -waarden is te vinden in appendix 3, figuur A3.1.



We kunnen nu dus een betrouwbaarder schuifspanningprofiel verwachten. Dat zag eruit als in figuur 5.5. Het meest opvallende aan deze figuur is dat juist in het gebied vlak onder de schuif de schuifspanning relatief laag is. Dit is het tegenovergestelde van wat werd verwacht. Hier is dus aanleiding tot discussie.

#### Discussie

Op basis van het berekende schuifspanningprofiel zoals dat in figuur 5.5 is te zien zou de hypothese gesteld in het vorige hoofdstuk zijn verworpen. Echter, wanneer van een andere kant wordt gekeken, zie figuur 5.6 valt op dat er een ring is te zien vlak

onder de schuif waar de schuifspanning bijna verwaarloosbaar klein is. Deze ring blijkt precies op de plaats te liggen waar de gemiddelde snelheid nul is omdat het de grens is tussen de recirculatiezone en de hoofdstroom. Dit suggereert dat de berekende schuifspanning op een bepaalde plaats is afgeleid van de gemiddelde snelheid op die plaats. Contact met CFX bevestigde dit.

Dit is een probleem omdat een gemiddelde schuifspanning op basis van de gemiddelde snelheid nabij een recirculatiezone weinig zegt over de op die plaats optredende instantane schuifspanningen.

Maar voor de vraag of een paraffinedeeltje loslaat van de wand is juist relevant of er op een bepaald moment een kracht op hem wordt uitgeoefend die sterker is dan de kracht waarmee de wand hem kan vasthouden. De gemiddelde kracht zegt hier bij een recirculatiezone weinig over. Deze kracht is op sommige plaatsen bijna afwezig. De



Figuur 5.6. Schuifspanning (N/m<sup>2</sup>), rechteraanzicht van figuur 5.5.

instantaan optredende waarden ten gevolge van turbulente fluctuaties zullen naar verwachting groter zijn en dus een juister beeld geven. Dit betekent dat met de berekende schuifspanningen de gestelde hypothese nog niet hoeft te worden verworpen en verder dat een manier moet worden gevonden om bij het berekenen van de schuifspanningen beter de effecten van de turbulente fluctuaties mee te nemen.

Nu blijkt er ook nog een andere veel gebruikte methode te zijn schuifspanningen uit te rekenen. De formule wordt ook al in de User Guide van CFX vermeld en luidt:

gelespeld cec

 $\tau = \rho \sqrt{c_{\mu}} k$ 

Hierin is  $\tau$  de schuifspanning,  $\rho$  de dichtheid en c<sub>µ</sub> een constante waarvoor standaard 0,09 wordt genomen. Voor deze formule pleit dat hij uitgaat van de turbulente kinetische energie en dus van de turbulente snelheidsfluctuaties. Deze zijn verantwoordelijk voor de instantane schuifspanningen.

Dat neemt niet weg dat deze formule, net als die van CFX, eigenlijk bedoeld is om een gemiddelde schuifspanning uit te rekenen in een ingestelde stroming. Wanneer deze formule daarvoor wordt gebruikt zal dat dezelfde uitkomst opleveren als de formule van CFX oplevert.

Aangezien deze formule niet helemaal is bedoeld voor de stroming zoals we die hier hebben zullen de getalwaarden van de uitkomsten niet exact kloppen. Maar het gaat hier slechts om de verhoudingen tussen de schuifspanningen. Het profiel is van belang.

Als de verschillen in schuifspanning voldoende groot zijn mag er dus best een aardige fout in de berekende schuifspanning zitten om toch nog voldoende nauwkeurigheid te hebben om een oordeel over de hypothese te vellen.

Besloten wordt de schuifspanning uit te rekenen met de formule die rekening houdt met de turbulente snelheidsfluctuaties.

#### Resultaten

De resultaten van deze berekening zijn als in figuur 5.7.

#### Discussie

Aan figuur 5.7 is te zien dat het verloop van de schuifspanning een goede overeenkomst vertoont met het verloop van het profiel van de aanhechting van paraffine in de experimentele opstelling. Opvallend is ook het hoekje vlak boven de schuif dat een hoge schuifspanning heeft. Nakijken bij de experimentele situatie leerde dat ook dit hoekje altijd zonder aanhechting bleef.

Wat dit betreft lijkt de hypothese onderbouwd. Echter, het is toch goed nog eens naar de betrouwbaarheid van de berekeningen te kijken. In de vorige discussie is de schuifspannings-



U, UJ VIA Jack visc

formule al aan de orde geweest. Een andere bron van onzekerheid is natuurlijk de numerieke berekening van het stromingspatroon. Numerieke pakketten hebben namelijk nogal eens problemen met recirculatiezones, bijvoorbeeld bij de berekening van de plaats van het impinging point. Bij de hier gedane berekeningen is het k- $\varepsilon$ model gebruikt. Dat is met name voor de berekening van een recirculatiezone en de k-waarde niet het meest geschikte turbulentiemodel vanwege de niet-lokale en anisotrope turbulentie.

Aangezien de betrouwbaarheid van de berekening van het stromingsprofiel en van de turbulente kinetische energie k van duidelijk belang zijn voor de betrouwbaarheid van de schuifspanningberekening (de schuifspanning is evenredig met k) is het de moeite waard om te kijken of de betrouwbaarheid kan worden opgevoerd door een betrouwbaarder turbulentiemodel te gebruiken. Hierbij wordt gedacht aan het algebraïschespanningsmodel (ASM) of het Reynoldsspanningsmodel (RSM).

Probleem is echter dat deze modellen een stuk moeilijker convergeren en hiervoor dus ook meer tijd nodig hebben. Op basis van de moeizame convergentie van het k-εmodel wordt ingeschat dat het onmogelijk zal zijn het hele model met de geometrie zoals die nu bestaat met gebruik van een ASM of RSM model te laten convergeren. Daarnaast zal dit veel rekentijd vragen, aangezien ook de gehele verdeelbak en bovendoorloop opnieuw doorgerekend zullen moeten worden. Dit zou kunnen worden opgelost door de verdeelbak van het model af te halen en de bovendoorloop gedeeltelijk te verwijderen en nieuwe instroomcondities op te leggen. Het was echter

ook eenvoudig een modelletje van de simpele geometrie van de experimentele opstelling met begin en eindbocht te maken, voor zover dat ook invloed heeft op het stromingspatroon. Dit laatste is gedaan en het geheel rekende duidelijk beter.

#### Rekenen

De eerste berekening wilde alleen niet convergeren vanwege te grote residuen bij de inlet voor koud water in de experimentele opstelling. Dit is ook verklaarbaar gezien de combinatie doorsnede/debiet en de snelheidsgradiënten met de hoofdstroom die daar optraden. Deze inlet is dus op nul gesteld en de andere inlet verhoogd zodat het totale debiet hetzelfde bleef en dit de stroming dus niet wezenlijk heeft beïnvloed. Het model convergeerde makkelijk voor het k-e model. De uitkomst hiervan is gebruikt als eerste schatting voor de berekening met het ASM model en de uitkomst hiervan weer als schatting voor de RSM berekening. De berekening van het ASM model kostte enige moeite, echter, met deze uitkomst was de RSM uitkomst niet moeilijk en snel te verkrijgen.



Figuur 5.8. Schuifspanning (N/m<sup>2</sup>), met k-ε-model.

#### onel builder era



De resultaten van de berekeningen met de verschillende modellen zijn in de figuren 5.8 (k-emodel), 5.9 (ASM) en 5.10 (RSM) te vinden.

Ook bij de berekeningen aan de opstelling is er uiteraard weer voor gezorgd dat de eerste wandcel in de logaritmische laag ligt.

Wanneer we de schuifspanningberek eningen met het k-Emodel van het eerste grid dat veel te grof was vergelijken met de schuifspanningsberekeningen met het juiste grid zien we dat er weinig

Figuur 5.9. Schuifspanning  $(N/m^2)$ , met ASM.

verschil is. Zeker weinig met betrekking tot het profiel. Zie hiervoor ook Appendix 3, figuren A3.2, A3.3 en A3.4.

#### Halve debiet

Ook is gerekend aan de situatie met het halve debiet. De resultaten hiervan zijn dat vrijwel de gehele dompelpijp een zo lage schuifspanning heeft als de pijp met het hoge debiet op de plaatsen waar aanhechting is. Zie figuur 5.11. Dit klopt met het paraffine experiment met het halve debiet. Op een plaats is wel een wat hogere schuifspanning te zien maar daar is in het experiment dan ook een slechtere aanhechting te zien. Vergelijk b.v. figuur 4.10 met figuur A3.5. In beide modellen lijkt een zelfde kritische schuifspanning te zijn waarboven geen aanhechting meer kan plaatsvinden. Deze lijkt voor de paraffine experimenten zo tussen de 35 en 40 N/m<sup>2</sup> te liggen. Dit

kan echter niet zo geconcludeerd worden omdat het maar de vraag of dat de manier is van

Figuur 5.11. Schuifspanning halve debiet (N/m<sup>2</sup>), met k-εmodel.



Figuur 5.10. Schuifspanning  $(N/m^2)$ , met RSM.



schuifspanning berekenen ook nauwkeurig genoeg is voor dit type kwantitatieve conclusies.

### 5.3. Conclusies en discussie

Gebleken is dat:

- Er in de verdeelbak geen kortsluitstroom aanwezig is.
- Er geen recirculatiezones in de bovendoorloop voorkomen.

De theorie van Dawson geeft dus geen juiste verklaring voor het verband tussen stroming en clogging.

#### Gridonafhankelijkheid

Alle modellen zijn met het k- $\epsilon$ -model eerst met een grof grid doorgerekend. Dit grove grid gaf geen ander beeld over de kortsluitstroom of het afwezig zijn van de recirculatiezones in de bovendoorloop dan de berekeningen met het fijne grid.

Het grove grid bleek bij de wand vaak een factor 2 tot 4 te grof te zijn. Wanneer de modellen met een goed grid, dat wil zeggen een grid dat ook voldoet aan de eisen voor de wandwetten, werden doorgerekend dan kwam daar zowel bij de verdeelbak als de twee verschillende debieten van de opstelling hetzelfde schuifspanningsprofiel uit. In combinatie met de grote verschillen tussen de gridden kunnen we dus stellen dat de resultaten gridonafhankelijk zijn.

Het debiet met Reynoldsgelijkvormigheid is met k- $\epsilon$ , ASM en RSM doorgerekend en er waren tussen de uitkomsten van de verschillende turbulentiemodellen slechts kleine kwantitatieve verschillen. Maar het schuifspanningprofiel komt overeen. We kunnen dus ook stellen dat de conclusies met betrekking tot het oordelen over de hypothese turbulentiemodel-onafhankelijk zijn.

Verder kunnen we stellen dat de berekening aan het halve debiet consistent is met de experimentele resultaten en de hypothese.

De conclusie uit deze berekeningen is dus dat de resultaten van de paraffine experimenten inderdaad kunnen worden verklaard door de verschillen in schuifspanning op de verschillende plaatsen van de wand. Blijkbaar is dit in de paraffine-experimenten het bepalende cloggingmechanisme.

#### Vergelijking met staalsituatie

De vervolgvraag is of dit ook zo is in de staalsituatie, aangezien de hechtingseigenschappen van aluminiumoxyde anders zijn door sintering. Maar in de staalsituatie wordt toch een vergelijkbaar patroon van aanhechting gerapporteerd. Zie bijvoorbeeld figuur 2.5. En in de zelf geziene geclogde dompelpijpen is ook een vergelijkbare aanhechting te vinden. Maar voordat met alle zekerheid wordt geconcludeerd dat de aanhechting van paraffine hetzelfde verloopt als de aanhechting van aluminiumoxyde is nog wel enig onderzoek nodig. Dat het echter wel vergelijkbaar is is op basis van de nu beschikbare informatie wel een redelijke aanname. Dus kan er redelijkheidshalve vanuit gegaan worden dat de clogging in de

staalsituatie ook wordt verklaard door het met de paraffine-experimenten en berekeningen gevonden cloggingmechanisme.

Maar hoewel het in de experimenten gevonden aanhechtingsprofiel dus ook globaal opgaat voor de staalsituatie moet niet vergeten worden dat soms toch clogging vlak onder de schuif voorkomt. Dit heeft zoals gesteld hoogstwaarschijnlijk te maken met het niet goed aansluiten van de platen van de schuif. Dit zorgt dan voor een zeer veel grotere aanvoer van verontreinigingen dichtbij de wand. Wanneer aluminiumoxyde op dezelfde manier zou hechten aan vuurvast als paraffine aan perspex zou de extra aanvoer misschien wel weggevoerd worden. Maar aluminiumoxyde gaat daarentegen binnen een bepaalde tijd sinteren. Sintering treedt echter alleen op als het deeltje voldoende lang aan de wand zit. Het zou goed kunnen dat sintering daarom in het grootste deel van de dompelpijp geen hele grote rol speelt. Door de veel grotere aanvoer van verontreinigingen bij slecht sluitende platen zou het zo kunnen zijn dat er daar dan wel voldoende tijd is om een voldoende stevige band te laten ontstaan. Wegvoeren van deeltjes uit die zone is dan in ieder geval moeilijker. Dit betekent dat de clogging die soms in dit stukje dompelpijp voorkomt niet sterk hoeft te worden beïnvloedt door de stroming van het staal. Deze stroming is altijd aanwezig en het effect van clogging onder de schuif slechts soms. We moeten er in ieder geval dan ook vanuit gaan dat dit effect geen rol speelt voor het verband tussen stroming en clogging. Dit dus in tegenstelling tot het structureel voorkomende effect van clogging door het grootste deel van de dompelpijp.

.

# 6. Conclusies en aanbevelingen

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat zowel chemische als stromingstechnische factoren de grootte van het cloggingprobleem bepalen. Dit betekent dat de grootste vermindering van het probleem clogging bereikt kan worden door het probleem niet eenzijdig te benaderen. Daarom is in dit onderzoek niet alleen de stromingtechnische kant uitgediept. Niet-stromingstechnische maatregelen die succesvol blijken zijn:

- Zorgen voor zo weinig mogelijk verontreinigingen in de pan. Dus het probleem al in een vroeg stadium bij de staalbehandeling aanpakken.
- Luchtinlek door de platen van de schuif beperken. Dit is hoogstwaarschijnlijk verantwoordelijk voor het soms optreden van clogging direct onder de schuif.
- Calciumbehandeling toepassen. Dit kan clogging sterk doen verminderen maar het is dan wel belangrijk de hoeveelheid verontreinigingen in het staal goed te kennen omdat de toe te voegen hoeveelheid hierop moet worden afgestemd. Verkeerd afstemmen kan het probleem juist vergroten.

Deze conclusies zijn getrokken op basis van het literatuuronderzoek.

Met de paraffine-experimenten is een principe gevonden waarmee het cloggen van een dompelpijp kan worden nagebootst. Het patroon van aanhechting lijkt op basis van de literatuur en geziene geclogde dompelpijpen goed vergelijkbaar met de staalsituatie. Ondanks de verschillende hechtingseigenschappen. Vanwege dit feit verdient het dan ook aanbeveling eventueel nog een onderzoek te doen naar de exacte overeenkomst tussen deze twee. In het vervolg van onderzoek en conclusies is er van de waarschijnlijke goede overeenkomst uitgegaan.

Een belangrijke constatering uit de experimenten is dat het lage debiet meer aanhechting opleverde. Dit levert dan ook een aanbeveling voor de gietsnelheid om het probleem clogging te verminderen.

Om de resultaten van de experimenten te verklaren is de hypothese gesteld dat de hoeveelheid aanhechting sterk wordt bepaald door de grootte van de aanwezige schuifspanning. Met behulp van numerieke berekeningen is deze hypothese bevestigd.

Dit geeft antwoord op de aan het begin van dit onderzoek gestelde vraag naar het verband tussen stroming en clogging.

## Literatuurlijst

A. W. Cramb, I. Jimbo, "Interfacial considerations in continuous casting", ISS Transactions, 1990, 11, p67.

S. Dawson, "Tundish nozzle blockage during continous casting of Al-killed steel", Steel Making Conference proceedings, 1990, p15.

P. Bradshaw, Experimental Fluid Mechanics, Pergamon Press, 1964.

G.M. Faulring, J.W. Farrel, D.C. Hilty, "Steel flow through nozzle: Influence of calcium", I&SM, 1980, februari, p14.

Y. Fukuda, Y. Ueshima, S. Mizoguchi, "Mechanism of alumina deposition on alumina graphite immersion nozzle in continuous casting", ISIJ International, 1992, 32, p164.

T. Ikemoto, K. Sawano, Taikabutsu Overseas, 1995, 15, p15.

K. Larsen, R.J. Fruehan, "Calcium modification of oxide inclusions", Steel Making Conference Proceedings, 1990, p497. 1990

N. Miyagawa et. al., Taikabutsu Overseas, 1995, 15, p50.

S. Ogibayashi, M. Uchimura, Y. Maruki, D. Mizukoshi, K. Tanizawa, "Mechanism and countermeasure of alumina buildup on submerged nozzle in continous casting steel", Steel Making Conference Proceedings, 1992, p337.

S. Ogibayashi, "Advances in technology of oxide metallurgy", Nippon Steel Technical Report, 1994, april, p70.

B.T. Poier, M.A. Guiban, G. Provost, "Mechanisms and countermeasures of alumina clogging in submerged nozzles", Steel Making Conference Proceedings, 1995, p451.

R. Rastogi, A.W. Cramb, CISR Progress Report, Clogging in liquid steels, CISR 1995-1999 (tussenrapportage 1996).

R. Rastogi, A.W. Cramb, Tundish nozzle clogging, A Literature Review, CISR, tussenrapportage eind 1997.

K. Sasai, Y. Mizukami, ISIJ International, 1994, 34, p802.

S.N. Singh, "Mechanism of alumina buildup in tundish nozzle during continous casting of Al-killed steels", Metallurgical Transactions, 1974, 5, p2165.

E. Steinmetz, H. Lindberg, W. Morsdorf, Arch. Eisenhuttenwes, 1977, 48, p569.
W.K. Tiekink, A. Pieters, J. Hekkema, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in steel: Morphology dependent on treatment", Steel Making Conference Proceedings, 1994, p423.

K. Uemura et. al., "Filtration mechanism of non-metalic inclusions in steel by ceramic loop filter", ISIJ International, 1992, 32, p150.

L. Wang, H.G. Lee, P. Hayes, "A new approach to molten steel refining using fine gas bubbles, ISIJ International, 1996, 36, p17.

Y. Yamada, Y. Tsutsui, K. Kanematsu, "Evaluation method of alumina build-up to submerged nozzle", Taikabutsu Overseas, 1994, 14, p25.

## Appendix 1

Hier wordt afgeschat hoe groot de temperatuurdaling is van een waterparaffinemengsel dat door een experimentele dompelpijp stroomt wanneer de wand op een constante temperatuur wordt gehouden. Het doel is paraffine aan de wand te laten hechten en te zien in welk patroon dat gebeurt. Hiervoor zal een schaalmodel moeten worden gemaakt van de schuif en (een deel van) de dompelpijp. Het is niet mogelijk het experiment 1:1 te doen, voornamelijk wegens het grote debiet dat dan is vereist van het mengsel. Dus moet worden geschaald, en dat is gedaan op basis van Reynoldsgelijkvormigheid. Tegenover de noodzaak van schalen staat dat de temperatuurdaling des te kleiner zal zijn naarmate de diameter van de experimentele dompelpijp groter is (bij een ingestelde stroming zijn deze omgekeerd evenredig). Daarom wordt hier uitgegaan van de in principe nog maximaal toepasbare dompelpijpdiameter van 4 cm.

Het Reynoldsgetal in de staalsituatie is met een debiet van 500 l/m of 8.33 m<sup>3</sup>/s; een dompelpijpdiameter van D = 65 mm en een kinematische viscositeit van staal bij 1600 °C van  $\nu \approx 1E-06 \text{ m}^2$ /s: Re = 1.6E+05.

Hier gaan we er vanuit dat de paraffineconcentratie zo laag is dat de dichtheid, warmtegeleidingscoëfficiënt, viscositeit en soortelijke warmte van het mengsel niet belangrijk afwijken van die van water.

Dit betekent dat we voor water van 65 °C met  $\eta = 0.435$ E-03 om aan het Reynoldsgelijkvormigheidscriterium te voldoen uit moeten gaan van een gemiddelde vloeistofsnelheid van 1.8 m/s.

De temperatuurdaling  $\Delta T_m$  per centimeter buislengte kan worden geschat met:

$$\Delta T_{m, cm} = \frac{\phi'' A}{\langle v \rangle \frac{\pi}{4} D^2 \rho c_p}$$

A1.1

Hierin is:

 $\phi$ " warmteoverdracht door een "schijfje" van de buis (J/(m<sup>2</sup>s)) A oppervlakte van de omtrek van het schijfje (m<sup>2</sup>) <v> gemiddelde snelheid mengsel in buis (m/s) D diameter buis (m)  $\rho$  dichtheid mengsel in buis (kg/m<sup>3</sup>)  $c_p$  soortelijke warmte (J/(kgK))

Voor  $\phi$ " geldt:

$$\phi'' = N u \frac{\lambda}{D} \Delta T$$
 A1.2

 $Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{0.33}$ A1.3

Hierin is:

 $\lambda$  de warmtegeleidingscoëfficiënt van het mengsel (W/(mK))  $\Delta T$  temperatuur mengsel min temperatuur buiswand (binnenvlak) (K)

Er wordt vanuit gegaan dat de temperatuur van de binnenkant van de buiswand uniform 57 °C is. Dit levert een temperatuurdaling van 0.44 °C voor de eerste centimeter in de buis vanaf het punt waar het mengsel 65 °C is. De temperatuurdaling per centimeter wordt uiteraard in de stroomrichting steeds kleiner, maar dat de temperatuur snel daalt blijkt ook wanneer wordt uitgerekend wanneer het temperatuurverschil tussen wand en mengsel nog maar één graad is. Opstelling van een warmtebalans over de buis (met de x-coördinaat in axiale richting) geeft:

$$\Delta T(x+dx) - \Delta T(x) = \frac{\phi''(x) \cdot \pi D dx \cdot \frac{dx}{\langle v \rangle}}{c_p \cdot \rho \cdot \frac{\pi}{4} D^2 dx}$$
A1.4

Met A1.2 leidt dit tot:

$$\Delta T(x) = 8 e^{\frac{-4Nu\lambda x}{c_p \rho D^2 < v >}}$$
A1.5

Hierbij is de randvoorwaarde gesteld dat op x = 0  $T_m = 65$  °C, dus  $\Delta T(x = 0) = 8$ . Met A1.3 blijkt hieruit blijkt dat na 38 cm het mengsel nog slechts één graad warmer is dan de wand. Hierbij zijn wel een aantal aannames gedaan. Er wordt namelijk vanuit gegaan dat:

- De binnenkant van de wand op een uniforme temperatuur van 57 °C kan worden gehouden, ondanks de temperatuur en het verloop daarvan van het mengsel.
- Instroomeffecten verwaarloosbaar zijn.
- Wanneer paraffine deeltjes of druppels aan de wand hechten relatief toch maar een klein deel van het oppervlak echt bedekt zal zijn door deeltjes of druppels paraffine. Bij een dichte laag zou warmteoverdracht naar de wand kleiner zijn.
- De flux door stolwarmte verwaarloosbaar is ten opzichte van de berekende warmteflux. Wanneer aan de voorgaande voorwaarde wordt voldaan, d.w.z. maar een gedeelte van de oppervlakte bedekt raakt met paraffine, is aan deze voorwaarde sowieso voldaan.

Uit het resultaat van de snelle temperatuurdaling blijkt dat het principe van wandkoeling alleen is toe te passen wanneer het stolgedrag van paraffine zo is dat het stollen voor het grootste gedeelte plaatsvindt in een beperkt gedeelte van het stoltraject. Uit de proef beschreven in hoofdstuk 4 blijkt echter dat het stollen zeer geleidelijk over dat traject gebeurt. Dit zou een experiment gebaseerd op dit principe dus onbetrouwbaar maken.

## Appendix 2

Resultaten ultrasoonmetingen:





\*

Appendix 2



-





Figuur A3.1. Aantal  $y_+$ -waarden dat het celcentrum van de eerste wandcel van de wand af ligt (verdeelbak, juiste grid).



Figuur A3.2. Aantal  $y_+$ -waarden dat het celcentrum van de eerste wandcel van de wand af ligt (k- $\varepsilon$ -model, hele debiet, juiste grid).

## **Erratum Appendix 3:**

Figuur 5.8 in het verslag is abusievelijk aangezien voor de figuur die eigenlijk bij A3.3 in het verslag zou moeten staan. Figuur 5.8 is juist, maar de juiste figuur A3.3 is de onderstaande:



Figuur A3.3 Schuifspanning  $(N/m^2)$  (hele debiet, k- $\varepsilon$ -model, met te grove grid van figuur A3.4).





Figuur A3.4. Aantal  $y_+$ -waarden dat het celcentrum van de eerste wandcel van de wand af ligt (k- $\varepsilon$ -model, hele debiet, te grove grid).



Figuur A3.5. Schuifspanning bij halve debiet  $(N/m^2)$ , met k- $\epsilon$ -model (hoek van aanzicht is dat van figuur 4.10).

0

