

# TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT

Faculteit Ontwerp, Constructie en Productie  
Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek

Rapportnr. KK - 1172

Titel: **Modelvorming voor foutendetectie  
en -diagnose**  
Model voor luchtverwarmer en hydraulisch  
systeem

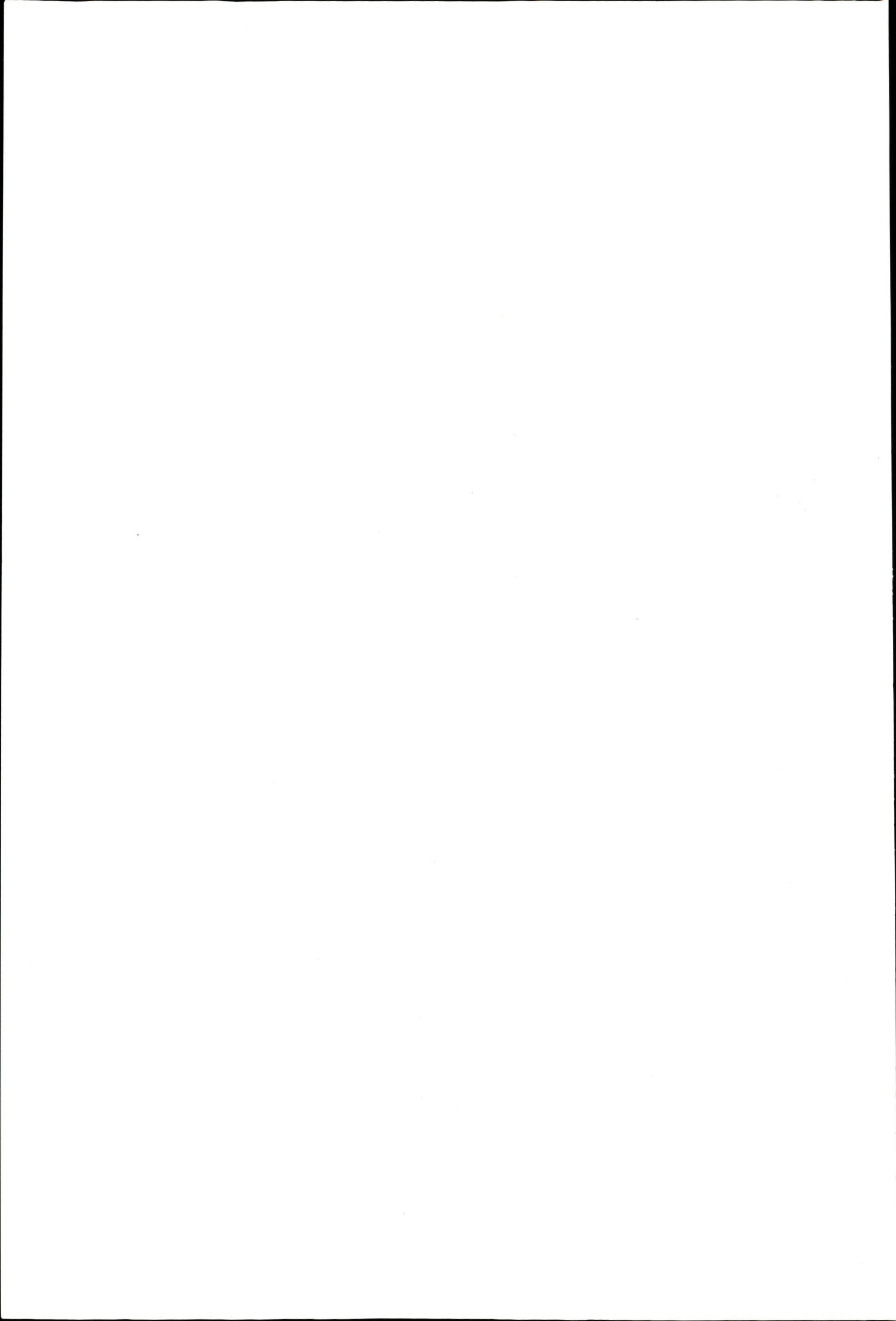
Datum/auteur: **April 2002** **W. de Jong**



**Laboratorium voor Koudetechniek en Klimaatregeling**

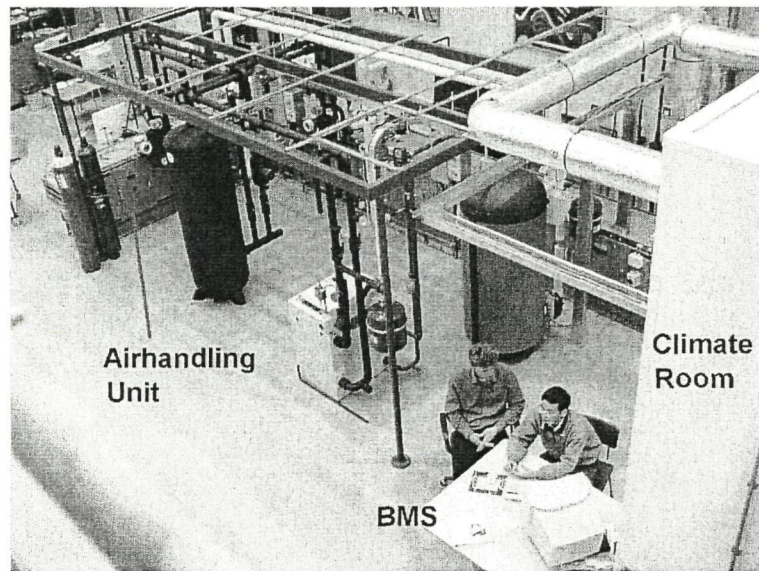
Mekelweg 2  
2628 CD Delft  
Tel. 015-2786667  
Telefax 015-2787204

Exemplaar nr. <b>E</b>	
Exemplaren van dit rapport verstrekt aan:	
<b>A</b>	Prof. dr. ir. A.H.C. van Paassen
<b>B</b>	Prof. ir. H. van der Ree
<b>C</b>	Prof. Ir. W. Zeiler
<b>D</b>	Dr. B. Yu
<b>E</b>	Dr. ir. P.A. Wieringa
<b>F</b>	Ir. W. Wortel
<b>G</b>	W. de Jong
<b>H</b>	Archief KK
<b>I</b>	Archief KK



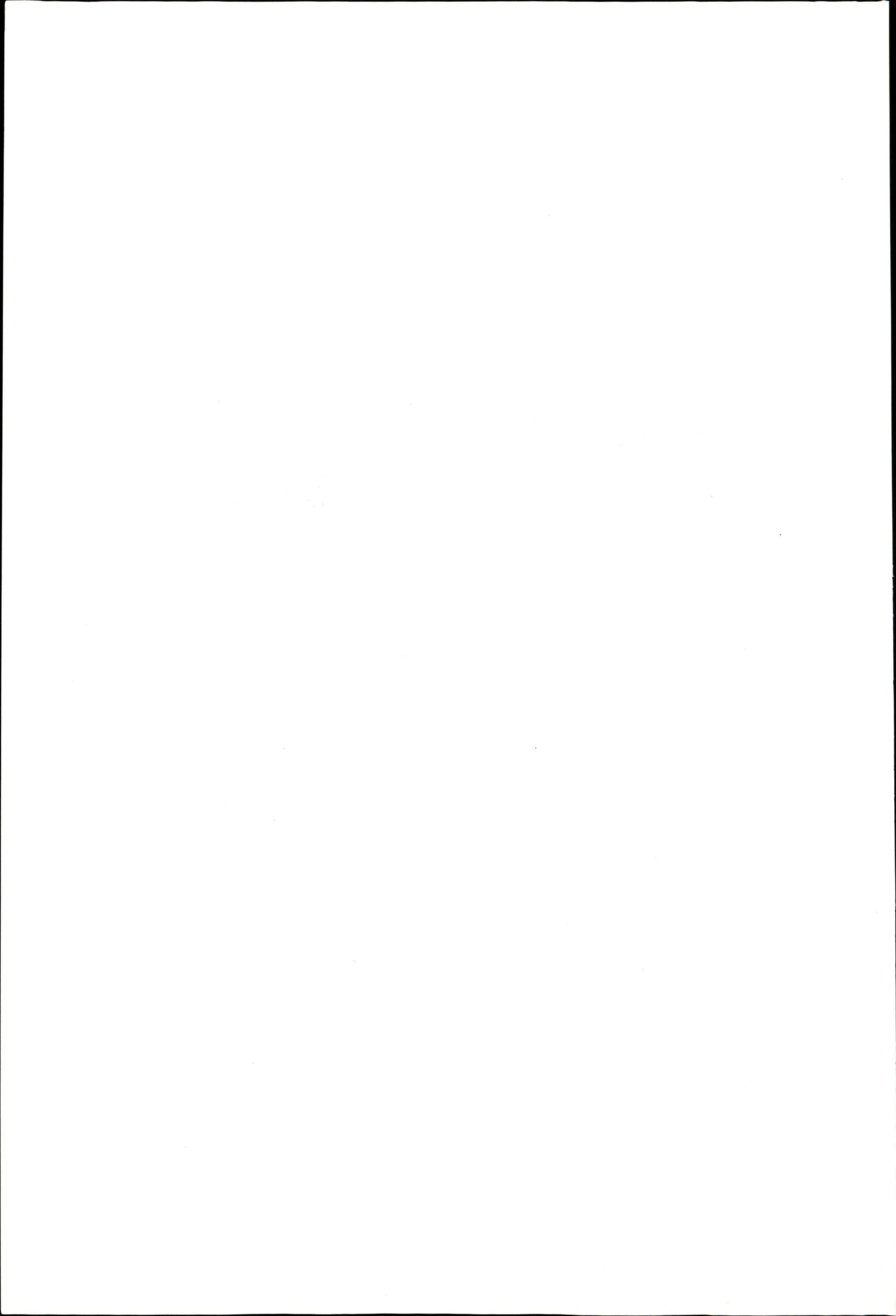
# Modelvorming voor foutendetectie en -diagnose

Model voor luchtverwarmer en hydraulisch systeem



Technische Universiteit Delft  
subfaculteit Werktuigbouwkunde  
sectie Koudetechniek en klimaatregeling

W. de Jong  
Delft 2002

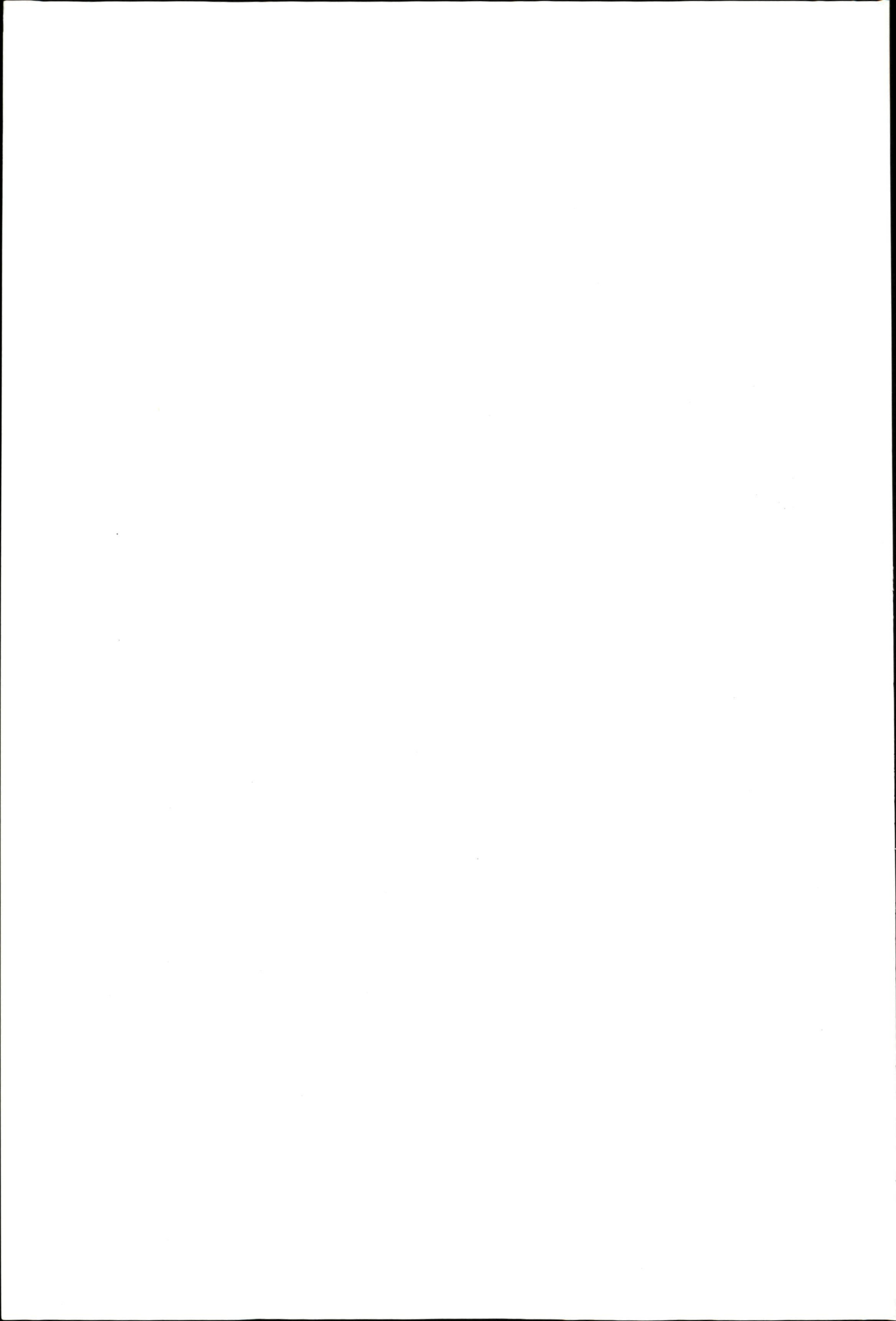


## Voorwoord

Dit afstudeerrapport is geschreven bij het afstuderen voor de specialisatie Koudetechniek en Klimaatregeling van de subfaculteit Werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteit te Delft. Dit werk maakt deel uit van het promotieonderzoek van Dr. B. Yu. Dit promotieonderzoek wordt in het kader van het ECOView project gedaan.

Lezers die vooral geïnteresseerd zijn in de validatie van de modellen worden verwezen naar hoofdstuk 5.

Ik ben dank verschuldigd aan mijn begeleiders, te weten prof. dr. ir. A.H.C. van Paassen en dr. B. Yu. Daarnaast wil ik ook de medewerkers van Kropman, Holland Heating en TU Delft bedanken voor hun behulpzaamheid.



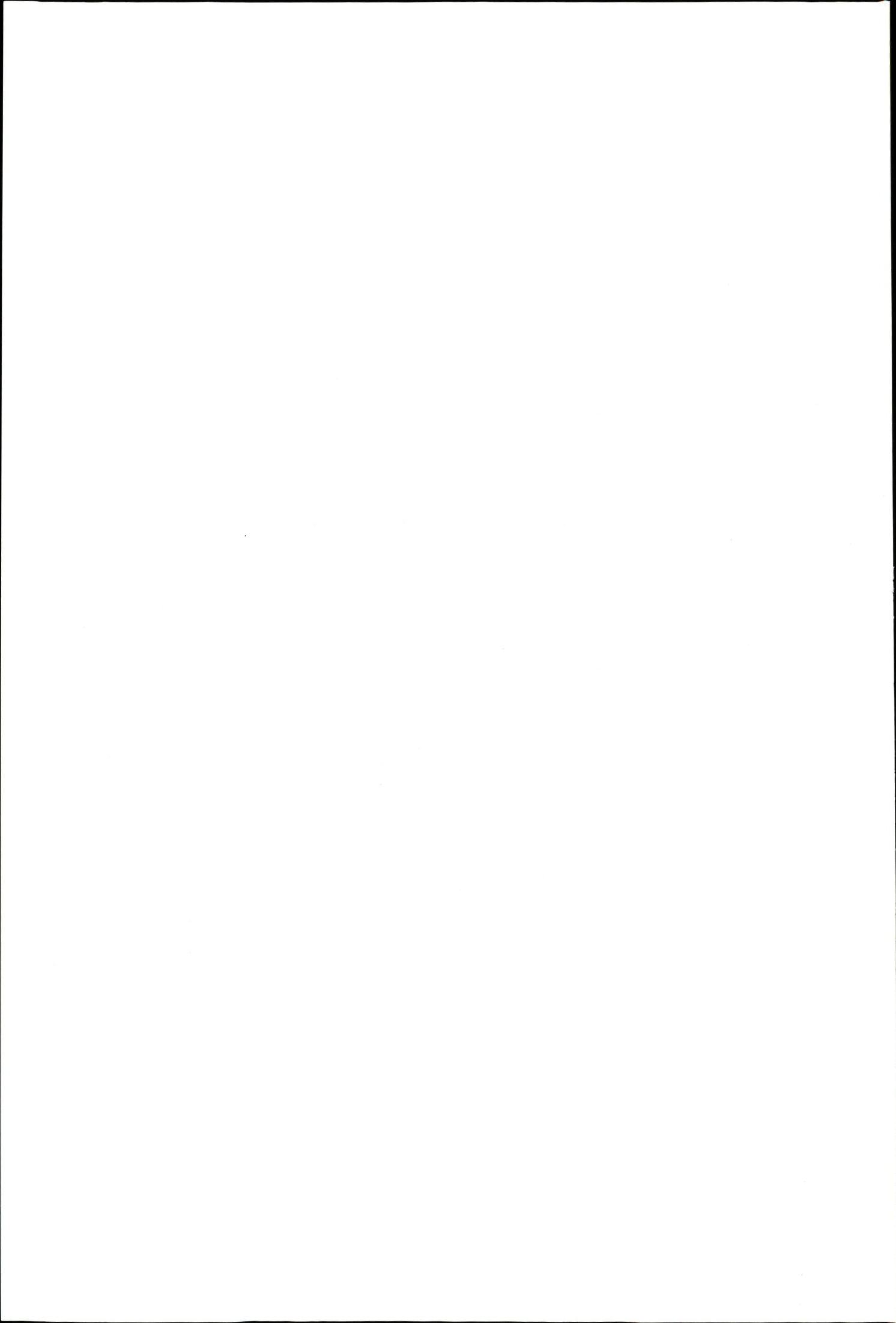
# Inhoudsopgave

<b>VOORWOORD</b>	<b>III</b>
<b>SAMENVATTING</b>	<b>IX</b>
<b>SYMBOLENLIJST</b>	<b>XI</b>
<b>1 INLEIDING</b>	<b>1</b>
<b>2 MODEL VAN HET HYDRAULISCHE SYSTEEM</b>	<b>5</b>
2.1 INLEIDING	5
2.2 AANNAMES EN OPZET VAN HET MODEL	5
2.3 MODEL VOOR EEN LEIDING	7
2.4 MODEL VOOR EEN POMP	7
2.5 MODEL VOOR EEN BOCHT	8
2.6 MODEL VOOR EEN VERLOOP	9
2.7 MODEL VOOR EEN T-STUK	11
2.8 MODEL VOOR EEN VAT	13
2.9 MODEL VOOR EEN 2-WEGKLEP	14
2.10 MODEL VOOR EEN 3-WEGKLEP	15
2.11 MODEL VOOR DE OVERIGE ELEMENTEN	16
<b>3 IMPLEMENTATIE EN SIMULATIE VAN MODEL HYDRAULISCH SYSTEEM</b>	<b>19</b>
3.1 INLEIDING	19
3.2 INVOER VAN SYSTEEMGEGEVENS	19
3.2.1 <i>Geometriegegevens</i>	19
3.2.2 <i>Elementgegevens</i>	21
3.2.3 <i>Medium- en iteratiegegevens</i>	25
3.3 BEREKENING VAN DRUKVERSCHILLEN EN VOLUMESTROMEN	26
3.4 UITVOER VAN HET PROGRAMMA: DRUKVERSCHILLEN EN VOLUMESTROMEN	29
3.4.1 <i>Berekende drukverschillen en volumestromen</i>	29
3.4.2 <i>Nauwkeurigheid van de berekeningen</i>	32
<b>4 MODEL VAN DE LUCHTVERWARMER</b>	<b>35</b>
4.1 INLEIDING	35
4.2 AANNAMES EN OPZET VAN HET MODEL	35
4.3 BEREKENING GEOMETRISCHE PARAMETERS	38
4.4 BEREKENING VAN DE STOFEIGENSCHAPPEN	41
4.5 DEFINITIE VAN DE DIMENSIELOZE KENTALLEN	42
4.6 BEREKENING VAN HET VINRENDEMENT	43
4.7 BEREKENING VAN DE WARMTEOVERDRACHTSCOËFFICIËNTEN ( $\alpha_w, \alpha_l$ )	45
<b>5 BESCHRIJVING VAN DE TESTOPSTELLING EN VALIDATIE VAN DE MODELLEN</b>	<b>49</b>
5.1 ALGEMENE BESCHRIJVING TESTOPSTELLING	49
5.1.1 <i>Klimaatkamer</i>	49
5.1.2 <i>Luchtbehandelinginstallatie</i>	50
5.1.3 <i>Warmte- en koudeopwekking</i>	51

5.1.4	<i>Hydraulisch systeem en regeling</i>	51
5.2	VALIDATIE HYDRAULISCH SYSTEEM	52
5.2.1	<i>Volumestroom door de luchtverwarmer: metingen en simulatie</i>	53
5.2.2	<i>Drukverschillen over 3-wegklep: metingen en simulatie</i>	55
5.2.3	<i>Conclusie van de validatie van het hydraulische systeem</i>	57
5.3	VALIDATIE VAN HET MODEL VAN DE LUCHTVERWARMER	57
5.3.1	<i>Temperaturen aan de uitgang van de luchtverwarmer: meting en simulatie</i>	58
5.3.2	<i>Conclusie van de validatie van de luchtverwarmer</i>	59
5.4	AANDACHTSPUNTEN BIJ DE ONTWIKKELING VAN DE MODELLEN	60
5.4.1	<i>Invloed van gemiddelde watertemperatuur op statische en dynamisch gedrag luchtverwarmer</i>	60
5.4.2	<i>Relatie voor waterzijdige warmteoverdrachtsoëfficiënt bij laminaire stroming</i>	60
5.4.3	<i>Gebruik van S-function noodzakelijk om lange simulatietijd te voorkomen</i>	62
5.4.4	<i>invoergegevens bij automatische generatie</i>	62
<b>6</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>63</b>
6.1	CONCLUSIES	63
6.2	AANBEVELINGEN	64
	<b>LITERATUUR</b>	<b>65</b>
	<b>BIJLAGE A: MATLAB-CODE VOOR HYDRAULISCH SYSTEEM</b>	<b>67</b>
A.1	CODE VAN 'TOTALESYSTEEM'	67
A.2	CODE VAN 'GEGEVENS'	69
A.3	CODE VAN 'INITIEER'	70
A.4	CODE VAN 'POMP'	72
A.5	CODE VAN 'DELTAPPOMP'	74
A.6	CODE VAN 'DELTALEIDING'	75
A.7	CODE VAN 'BEREKEN_F'	75
A.8	CODE VAN 'BOCHT'	75
A.9	CODE VAN 'VERLOOP'	77
A.10	CODE VAN 'T_STUK'	78
A.11	CODE VAN 'DELTA_PT_STUK'	82
A.12	CODE VAN 'TWEEWEG_KLEP'	86
A.13	CODE VAN 'DRIEWEG_KLEP'	87
A.14	CODE VAN 'DELTA_P3WEG_KLEP'	91
A.15	CODE VAN 'VAT'	94
A.16	CODE VAN 'OVERIG'	96
	<b>BIJLAGE B: MODEL VAN LUCHTVERWARMER UITGEWERKT IN SIMULINK</b>	<b>99</b>
B.1	BEREKENING MBP ELEMENT	100
B.2	BEREKENING INVOERGEGEVENS	101
B.3	MODEL PIJP	101
B.3.1	<i>Berekening parameters</i>	102
B.3.2	<i>Berekening parameters in warmtebalansen</i>	103
B.3.3	<i>Warmtebalansen</i>	103



<b>BIJLAGE C:</b>	<b>SPECIFICATIES EN INVOERGEGEVENS VAN HET HYDRAULISCHE SYSTEEM</b>	<b>105</b>
C.1	SPECIFICATIES HYDRAULISCH SYSTEEM	105
C.2	INVOERGEGEVENS HYDRAULISCH SYSTEEM	105
C.2.1	<i>Geometrie-matrix</i>	105
C.2.2	<i>Elementenmatrix</i>	107
<b>BIJLAGE D:</b>	<b>SPECIFICATIES EN INVOERGEGEVENS VAN DE LUCHTVERWARMER EN SENSOREN</b>	<b>113</b>
D.1	SPECIFICATIES VAN DE LUCHTVERWARMER EN SENSOREN	113
D.2	INVOERGEGEVENS VAN DE LUCHTVERWARMER	113
<b>BIJLAGE E:</b>	<b>GEMETEN DRUKVERSCHILLEN EN VOLUMESTROMEN VOOR WARMWATERSYSTEEM</b>	<b>115</b>
E.1	METING 1	115
E.2	METING 2	117



## Samenvatting

Een foutendetectie en -diagnose systeem (FDD systeem) heeft als doel in een proces fouten waar te nemen en deze fouten te lokaliseren. Om fouten te kunnen detecteren en diagnosticeren maakt een FDD systeem gebruik van meetdata die door het gebouwbeheersysteem (GBS) worden vastgelegd. Afhankelijk van de manier waarop deze data wordt gebruikt kunnen er twee soorten FDD systemen worden onderscheiden, namelijk kennisgebaseerde systemen en modelgebaseerde systemen.

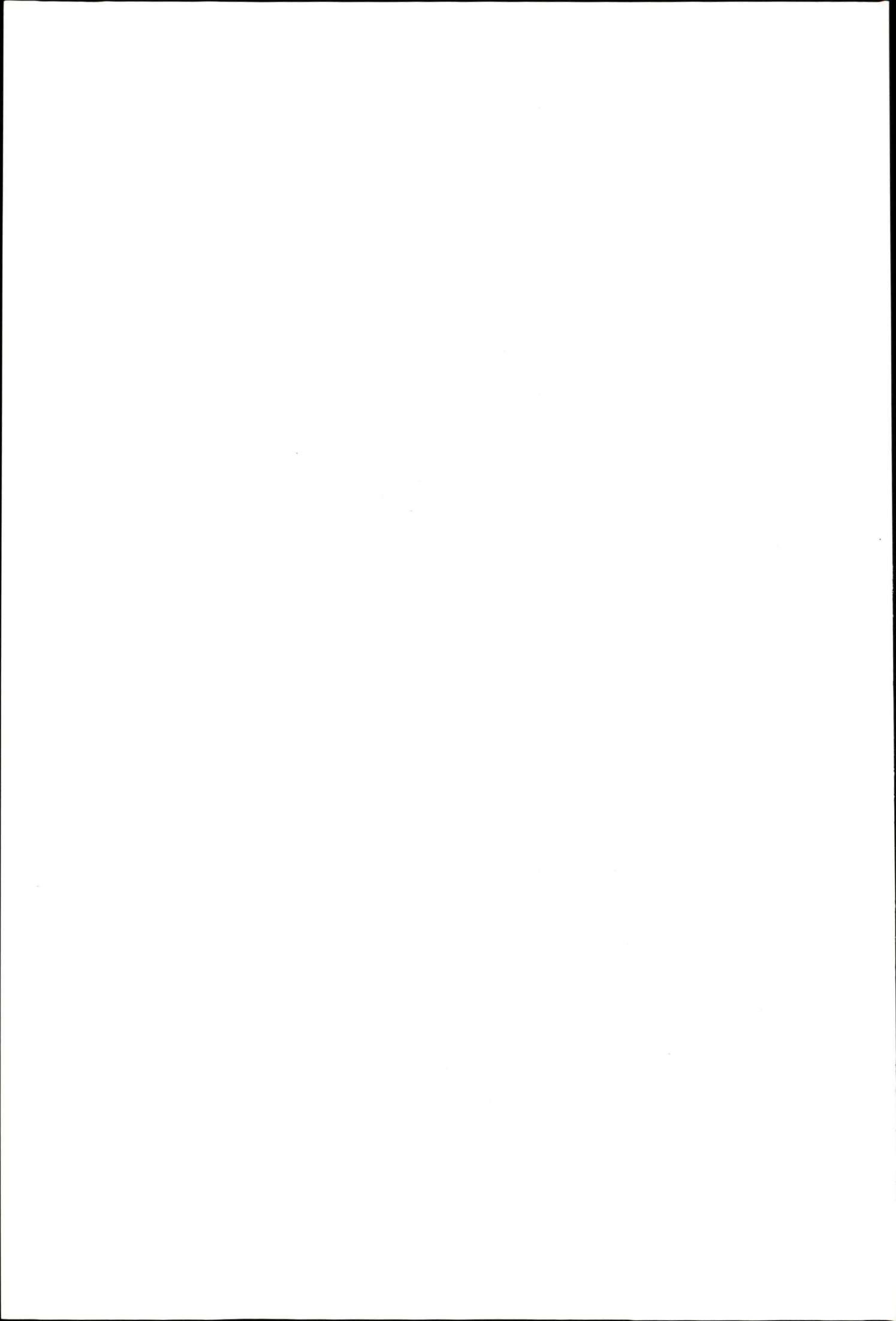
Welk type FDD systeem het beste voldoet is per situatie verschillend. Er is binnen dit project gekozen voor een modelgebaseerd FDD systeem, omdat er veel kennis over modellen en modelvorming aanwezig is. Met name bij de sectie Koudetechniek en Klimaatregeling.

In dit rapport wordt veel aandacht besteed aan de ontwikkeling van algemeen toepasbare modellen. Dit is uitgewerkt voor een hydraulisch systeem en een luchtverwarmer. Voor een goede FDD moeten de modellen de werkelijkheid voldoende nauwkeurig benaderen. De modellen zijn daarom gevalideerd en afgesteld aan de hand van metingen aan een testopstelling in het laboratorium van de sectie Koudetechniek en Klimaatregeling.

Uit deze validatie volgt dat het model voor het hydraulische systeem de volumestroom door de luchtverwarmers goed benadert. De voorwaarde hierbij is dat voor de 3-wegkleppen die de volumestroom regelen de juiste karakteristiek wordt ingevoerd. Een groot voordeel van het model voor het hydraulische systeem is de grote mate van flexibiliteit. Langere simulatietijden zijn daar een gevolg van. Voor de ontwikkeling van een foutendetectie en -diagnose (FDD) systeem is dat echter geen probleem. Het model hoeft namelijk slechts één maal gesimuleerd te worden om het gedrag van het hydraulische systeem vast te leggen.

Het model van de luchtverwarmer is flexibel, hoewel het model nog wel moet worden aangepast om ook verwarmers met tegenstroom goed te kunnen simuleren. Verder combineert dit model een grote nauwkeurigheid met een korte simulatietijd, door het toepassen van een S-function.

Er kan geconcludeerd worden dat zowel het model van het hydraulische systeem als de luchtverwarmer goed te gebruiken zijn in een modelgebaseerd FDD systeem, vanwege hun flexibiliteit en nauwkeurigheid.



## Symbolenlijst

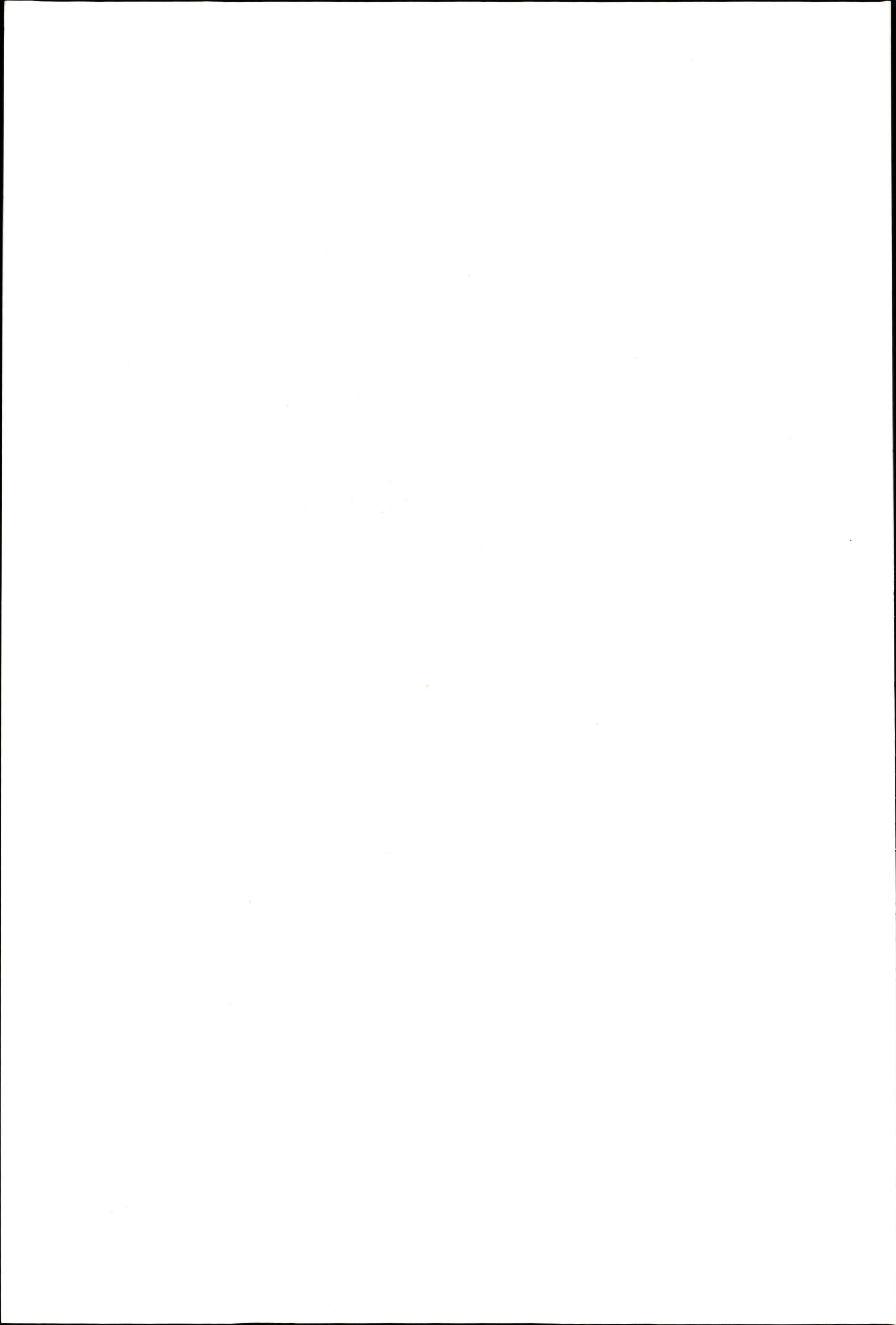
# circuits:	aantal circuits waarover de totale ingaande volumestroom water wordt verdeeld [-]
# elem:	aantal elementen waarin een recht pijpstuk wordt verdeeld [-]
# extra:	aantal pijpen in een pijprij waardoor géén water stroomt[-]
# pijpen:	aantal pijpen in een pijprij waardoor vloeistof stroomt[-]
# rijen:	aantal pijprijen in de luchtverwarmer[-]
$a_i$ :	coëfficiënten van de pompkarakteristiek [-]
A:	oppervlakte [m <sup>2</sup> ]
$b_i$ :	regressiecoëfficiënten voor berekening van weerstandsfactoren T-stuk [-]
B:	breedte van de luchtverwarmer [m]
$c_p$ :	warmtecapaciteit [J/kg/K]
$C_1, C_2$ :	coëfficiënt [-]
$C_{Re}$ :	correctiefactor i.v.m. Reynoldsgetal [-]
$C_w$ :	correctiefactor i.v.m. wandruwheid [-]
d:	diameter [m]
$d_h$ :	hydraulische binnendiameter [m]
$D_h$ :	hydraulische diameter van de luchtverwarmer [m]
$dx_{vin}$ :	hartafstand tussen vinnen of lamellen [m]
f:	wrijvingsfactor [-]
$f_e$ :	wrijvingsfactor bij desbetreffende wandruwheid [-]
$f_o$ :	wrijvingsfactor bij hydraulisch gladde uitvoering [-]
g:	versnelling van de zwaartekracht [m/s <sup>2</sup> ]
h:	hoogte [m]
h:	verticale afstand tot referentiehoogte [m]
$h/h_{100}$ :	relatieve lichthoogte van de klep [-]
H:	hoogte van de luchtverwarmer [m]
$k_v$ :	volumestroom door klep onder standaard condities [m <sup>3</sup> /h]
$k_{v0}$ :	volumestroom bij gesloten klep volgens grondkarakteristiek [m <sup>3</sup> /h]
$k_{vs}$ :	volumestroom bij volledig geopende klep volgens grondkarakteristiek [m <sup>3</sup> /h]
L:	lengte van het verloop [m]
L:	lengte van de luchtverwarmer [m]
L, M:	karakteristieke afstanden [m]
m:	massa [kg]
Nu:	getal van Nusselt [-]
p:	statische druk [Pa]
Pr:	getal van Prandtl [-]
$q_m$ :	massastroom [kg/s]
$q_v$ :	volumestroom [m <sup>3</sup> /s]
r:	afrondingsstraal verbinding vat-leiding [m]
r:	straal [m]
R:	buigstraal [m]
Re:	getal van Reynolds [-]
$Re_d$ :	Reynoldsgetal betrokken op de diameter [-]
St:	getal van Stanton [-]
t:	tijd [s]
v:	snelheid op een bepaald punt in de dwarsdoorsnede [m/s]
$\bar{v}$ :	gemiddelde snelheid [m/s]

$v_1$ :	gemiddelde snelheid in punt 1 [m/s]
$v_2$ :	gemiddelde snelheid in punt 2 [m/s]
$v_3$ :	gemiddelde snelheid in punt 3 [m/s]
$V$ :	volume [m <sup>3</sup> ]
$x$ :	absolute vochtigheid [kg/kg]
$\alpha$ :	warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/m <sup>2</sup> /K]
$\alpha$ :	kinetische energie coëfficiënt [-] afhankelijk van het snelheidsprofiel
$\delta_{\text{vin}}$ :	dikte van de vinnen of lamellen [m]
$\Delta p_v$ :	stromingsverliezen [Pa]
$\Delta p_{\text{st}}$ :	standaard drukverschil (=10 <sup>5</sup> ) [Pa]
$\Delta X_{\text{pijp,hor}}$ :	horizontale hartafstand tussen pijpen [m]
$\Delta X_{\text{pijp,ver}}$ :	verticale hartafstand tussen pijpen [m]
$\phi_{\text{vin}}$ :	vinrendement [-]
$\phi_{\text{opp}}$ :	oppervlakterendement [-]
$\lambda$ :	warmtegeleidingscoëfficiënt [W/m/K]
$\mu$ :	dynamische viscositeit [Pa*s]
$\mu_{\text{contr}}$ :	contractiefactor verloop [-]
$\theta$ :	temperatuur [°C]
$\rho$ :	dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{st}}$ :	standaard dichtheid (=1000) [kg/m <sup>3</sup> ]
$\zeta$ :	weerstandsfactor afhankelijk van het type element [-]
$\zeta_o$ :	ongecorrigeerde weerstandsfactor [-]
$\zeta_w$ :	weerstandsfactor i.v.m. wrijvingsverliezen [-]
$\zeta_s$ :	weerstandsfactor i.v.m. stootverliezen [-]
$\zeta_{\text{bocht}}$ :	weerstandsfactor van een bocht [-]
$\zeta_{\text{verloop}}$ :	weerstandsfactor van een verloop [-]
$\zeta_{\text{T-stuk}}$ :	weerstandsfactor van een tak van een T-stuk [-]
$\zeta_{\text{vat}}$ :	weerstandsfactor van een vat [-]

#### onderschrift

1:	ingående stroming
2:	uitgaande stroming
doorstr:	doorstroom
eq:	equivalente
in:	ingående stroom
inw:	inwendig
j:	geeft aan welke tak wordt bedoeld (1 of 2)
l:	lucht, luchtzijdig
L:	laminaire stroming
m:	gemiddelde
opp:	warmtewisselend oppervlak
T:	turbulente stroming
tot.	totaal of totale
type:	pijprijen in lijn of versprongen [-]
uit	uitgaande stroom
uitw	uitwendig

w: water, waterzijdig  
WW: betrekking hebbend op warmtewisselaar (luchtverwarmer)





# 1 Inleiding

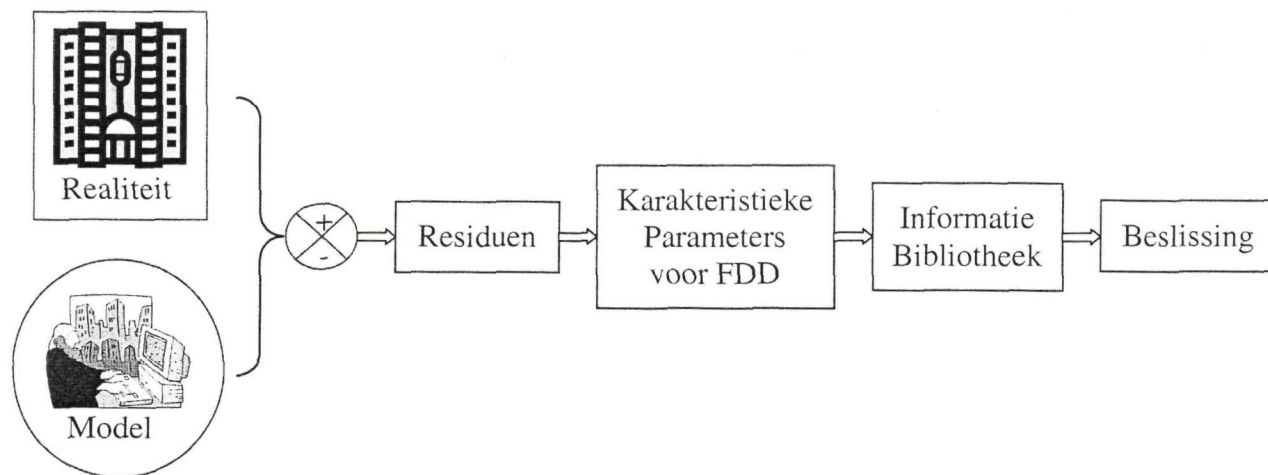
## Foutendetectie en -diagnose (FDD) in de klimaatregeling

Een foutendetectie en -diagnose systeem (FDD systeem) heeft als doel in een proces fouten waar te nemen en deze fouten te lokaliseren. In de klimaatregeling gaat het om fouten in de luchtbehandelinginstallatie, leidingen, kanalen, het gebouw, enzovoorts. Er kan daarbij gedacht worden aan lekkage, een kapotte pomp of een raam dat open is laten staan.

Om fouten te kunnen detecteren en diagnosticeren maakt een FDD systeem gebruik van meetdata die door het gebouwbeheersysteem (GBS) worden vastgelegd. Afhankelijk van de manier waarop deze data wordt gebruikt kunnen er twee soorten FDD systemen worden onderscheiden, namelijk kennisgebaseerde systemen en modelgebaseerde systemen.

Van oudsher werden de meetdata geanalyseerd door menselijke experts. Deze experts konden fouten constateren en diagnosticeren. De eerste kennisgebaseerde systemen waren een automatisering van de kennis van menselijke experts. In het algemeen gebruikt een kennisgebaseerd FDD systeem de data van het GBS om een aantal karakteristieke parameters te genereren. Door die parameters te toetsen aan vooraf opgestelde regels, wordt de FDD uitgevoerd.

Kennisgebaseerde FDD systemen zijn eenvoudig van structuur en daardoor makkelijk te realiseren. Daar tegenover staat dat ze niet algemeen zijn. Wat wil zeggen dat bij een ander systeem ook een ander FDD systeem hoort. Verder is voor vernieuwende systemen geen of weinig kennis beschikbaar, wat het opstellen van beslisregels voor de FDD bemoeilijkt.



Figuur 1.1: Schema van modelgebaseerde foutendetectie en -diagnose, Yu (2001a)

Door de opmars van de computer is de hoeveelheid elektronisch beschikbare informatie enorm toegenomen. Dit geldt niet alleen voor de ontwerpgegevens, maar ook voor de meetdata. In een modelgebaseerd FDD systeem kan al deze informatie nuttig worden gebruikt. Een modelgebaseerd FDD systeem vergelijkt de uitkomsten van het model en

de meetdata van het GBS met elkaar. Hieruit worden zogenaamde residuen afgeleid die de basis vormen voor de FDD, zie Figuur 1.1.

Modelgebaseerde FDD systemen hebben meestal een complexe structuur. Daardoor zijn ze moeilijker te doorgronden en minder overzichtelijk dan kennisgebaseerde FDD systemen. Ook zal bij een modelgebaseerd FDD systeem dieper moeten worden ingegaan op de fysische wetten die het systeem beschrijven. Dit hangt af van het type model dat wordt gebruikt. Aan de andere kant zijn modelgebaseerde FDD systemen algemeen toepasbaar, mits de gebruikte modellen ook algemeen geldig zijn.

Welk type FDD systeem het beste voldoet is per situatie verschillend. Er is binnen dit project gekozen voor een modelgebaseerd FDD systeem, omdat er veel kennis over modellen en modelvorming aanwezig is. Met name bij de sectie Koudetechniek en Klimaatregeling.

In Yu (2000) wordt verder ingegaan op kennis- en modelgebaseerde FDD systemen. Er wordt ook een overzicht gegeven van artikelen op dit gebied. In De Jong (2001) en Riahy (2000) wordt dieper ingegaan op FDD in de klimaatregeling.

### **Modellen voor modelgebaseerde FDD systemen**

Een model is een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid. Modellen kunnen in twee soorten worden verdeeld: fysieke en mathematische modellen. Bij fysieke modellen moet gedacht worden aan tastbare modellen, zoals schaalmodellen. Deze modellen zijn meestal erg kostbaar en kunnen alleen een specifiek systeem weergeven. Mathematische modellen bestaan uit wiskundige relaties die de uitgangsvariabelen van het model koppellen aan de ingangsvariabelen. Mathematische modellen zijn verder te verdelen in grofweg twee typen: blackbox en fysische modellen.

Bij een blackbox model hebben de wiskundige relaties geen directe fysische basis. De relaties worden vaak verkregen door modelidentificatie, dat is het bepalen van parameters in een van tevoren gekozen vergelijking. Deze modellen hebben dus slechts een beperkte algemene toepasbaarheid, omdat ze gebaseerd zijn op metingen aan een specifiek systeem.

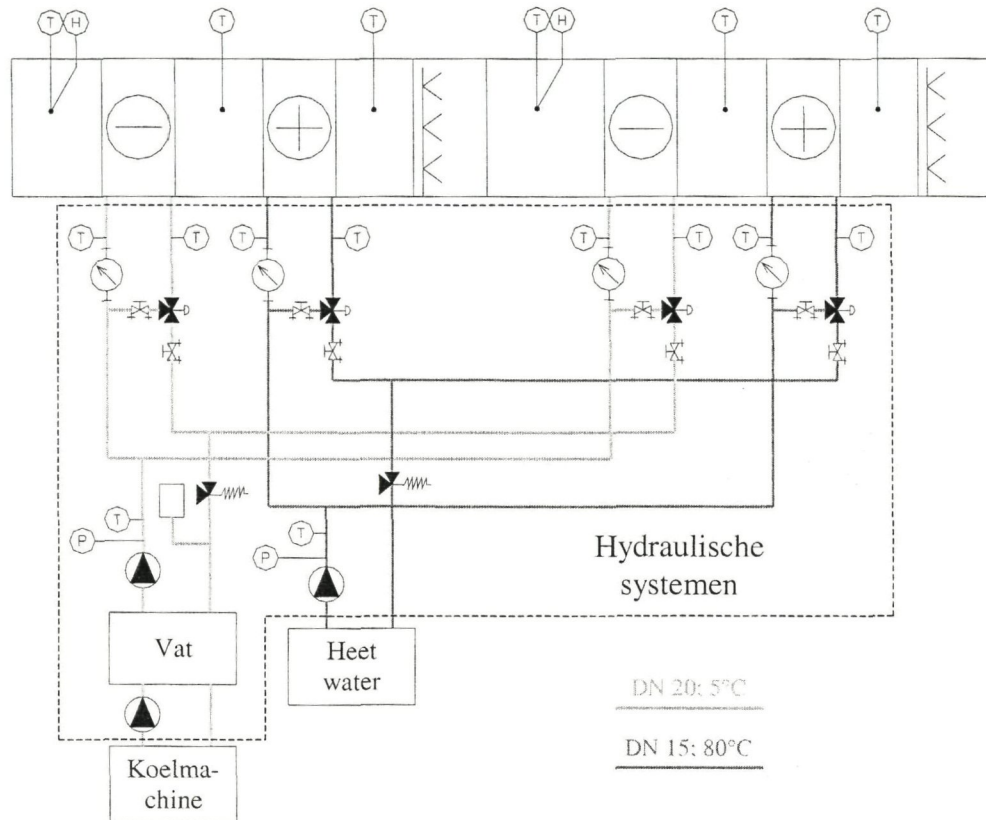
In een fysische model worden de parameters in behoudswetten berekend uit relaties die algemeen geldig zijn. De nauwkeurigheid van zo'n model hangt in sterke mate af van de aannames die worden gemaakt bij het opstellen van die behoudswetten. De algemene toepasbaarheid van deze modellen hangt af van de gebruikte relaties, maar zal over het algemeen groter zijn dan bij fysieke of blackbox modellen. Dit is een reden waarom voor fysische modellen is gekozen. Een nadeel van fysische modellen is dat er vaak alsnog metingen moeten worden verricht aan het werkelijke systeem om het model voldoende nauwkeurig te maken. Verder vergt het uitwerken van de behoudswetten en fysische relaties vaak veel tijd en moeite.

In Yu (2001a) wordt ingegaan op het maken algemene modellen voor modelgebaseerde FDD systemen. Modelvorming in Simulink en met Bondgraaf wordt vergeleken in Yu (2001b). In De Jong (2001) wordt een overzicht gegeven van modelvormingstechnieken geschikt voor modelgebaseerde FDD systemen.

### **Model voor een hydraulisch systeem en een luchtverwarmer**

In dit rapport wordt de ontwikkeling van een algemeen toepasbare modellen voor een hydraulisch systeem en een luchtverwarmer beschreven. Onder een hydraulisch systeem wordt een stelsel van leidingen en appendages verstaan, waardoor een vloeibaar medi-

um stroomt. Het vormt de verbinding tussen een leverancier en een gebruiker, zie Figuur 1.2. Onder een luchtverwarmer wordt een bundel pijpen verstaan eventueel voorzien van uitwendige vinnen of lamellen. Door de pijpen stroomt een warme vloeistof die lucht verwarmt. De lucht stroomt door een luchtbehandelinginstallatie langs de buitenzijde van de pijpen.



Figuur 1.2: Schematisch voorbeeld van een hydraulisch systeem, Yu (2001c)

Het hydraulische systeem is statisch gemodelleerd, omdat de dynamische stromingseffecten veel sneller zijn dan de thermische dynamische effecten. Om het model flexibel te maken zijn er aparte modellen gemaakt voor hydraulische componenten, zoals pomp, T-stuk enzovoorts. Deze componentmodellen kunnen eenvoudig op een willekeurige manier worden verbonden, zodat een model voor het totale hydraulische systeem ontstaat. Om de gegevens eenvoudig te kunnen invoeren is er een gebruikersinterface ontwikkeld, zie De Jong (2002).

De modellen zijn geïmplementeerd en gesimuleerd in Matlab. Voor de FDD dient de simulatietijd van de modellen zo kort mogelijk te zijn. Het trage model van het hydraulische systeem moet daarom niet gekoppeld worden met dynamische modellen. Dat zou de simulatie te veel vertragen. De karakteristiek van het hydraulische systeem wordt van tevoren bepaald en in matrixvorm opgeslagen in een bestand. Dit bestand kan als een compact model gebruikt worden in de simulatie van het totale systeem, wat veel minder simulatietijd vergt.

Om een nauwkeurig model te krijgen wordt de luchtverwarmer opgedeeld in een aantal kleinere elementen. Per element zijn de warmtebalansen opgesteld, zodat elementmodellen ontstaan. Door die elementmodellen op de juiste manier te koppelen ontstaat een model voor de gehele luchtverwarmer. Voor dit model is vanwege tijdgebrek geen ge-

bruikersinterface ontwikkeld. De modellen zijn geïmplementeerd en gesimuleerd in Simulink.

De voor de modellen benodigde gegevens moeten handmatig worden ingevoerd. In de toekomst moet het echter mogelijk worden om uit de informatie van CAD-tekeningen en specificaties automatisch een model te genereren. De modellen voor de verschillende componenten in een luchtbehandelinginstallatie zouden dan uit een bibliotheek gekozen en aan elkaar gekoppeld worden. Vervolgens worden de benodigde modelparameters automatisch uit de specificaties berekend. De praktische uitvoering van de koppeling tussen de specificaties en de modellen voerde te ver om hier uit te werken.

Voor een goede FDD moeten de modellen de werkelijkheid voldoende nauwkeurig benaderen. De modellen zijn daarom gevalideerd en afgesteld aan de hand van metingen aan een testopstelling in het laboratorium van de sectie Koudetechniek en Klimaatregeling.

### **Structuurbeschrijving**

In hoofdstuk 2 worden de vergelijkingen besproken waaruit het hydraulische systeem is opgebouwd. Deze vergelijkingen zijn geordend naar component. Vervolgens zal in het derde hoofdstuk worden uitgelegd hoe die vergelijkingen in Matlab zijn geïmplementeerd en gesimuleerd. Het vierde hoofdstuk beschrijft het model voor de luchtverwarmer. De metingen aan de testopstelling worden in hoofdstuk 5 vergeleken met de resultaten uit de modellen. Hier worden de aanpassingen beschreven, die nodig waren om de modellen voldoende dicht bij de metingen te krijgen. Ook wordt in dit hoofdstuk een beschrijving van de testopstelling gegeven. Tot slot zijn in het laatste hoofdstuk de conclusies bij elkaar gezet en worden er aanbevelingen gedaan over verder onderzoek.

## 2 Model van het hydraulische systeem

### 2.1 Inleiding

Het model van het hydraulische systeem is modulair opgebouwd. Dat wil zeggen dat het systeem opgebouwd wordt door afzonderlijke elementmodellen te koppelen. Deze methode geeft een grote mate van flexibiliteit. Dit in tegenstelling tot het apart modelleren van complete systemen, zoals in ISSO-publicatie 44: wordt gedaan. Ieder systeem heeft dan zijn specifieke model.

Er is gestreefd naar een zo algemeen mogelijke opzet van het model, zodat het flexibel en algemeen toepasbaar is. Het hydraulische systeem is daartoe opgedeeld in knooppunten. Tussen die knooppunten zitten verbindingen, zoals leidingen of luchtkanalen. In ieder knooppunt bevindt zich een element, b.v. een pomp, een T-stuk of een geregelde 2-wegklep. Over ieder element en iedere verbinding wordt het drukverschil berekend met een geschatte volumestroom. Om de juiste uitkomsten te krijgen moet er geïtereerd worden (zie ook paragraaf 3.3).

De iteraties worden gestaakt zodra de drukken in evenwicht zijn. Na iedere iteratie wordt de volumestroom aangepast. Dit wordt gedaan voor verschillende standen van het regelorgaan of -organen, meestal een klep. Op deze manier worden de drukverschillen en volumestromen door het systeem bij een aantal klepstanden bepaald. Die resultaten vormen een compact model voor het hydraulische systeem, wat weer gebruikt kan worden in de thermische modellen van bij voorbeeld de luchtverwarmer en luchtkoeler.

### 2.2 Aannames en opzet van het model

Het hydraulische systeem wordt statisch gemodelleerd, omdat de dynamische effecten in het hydraulische systeem verwaarloosbaar zijn ten opzichte van die in andere systemen. Er is verder aangenomen dat het stromingspatroon niet beïnvloed wordt door warmteoverdracht. Het medium is onsamendrukbaar en de druk is uniform in het vlak loodrecht op de stromingsrichting

Met bovenstaande aannames wordt ieder element en iedere verbinding beschreven door de volgende vergelijking uit Fox (1994).

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \rho \cdot \alpha_1 \cdot \frac{\bar{v}_1^2}{2} = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \rho \cdot \alpha_2 \cdot \frac{\bar{v}_2^2}{2} + \Delta p_v \quad (1)$$

- p: statische druk [Pa]
- $\rho$ : dichtheid [ $\text{kg/m}^3$ ]
- g: versnelling van de zwaartekracht [ $\text{m/s}^2$ ]
- h: verticale afstand tot referentiehoogte [m]
- $\alpha$ : kinetische energie coëfficiënt [-]  
afhankelijk van het snelheidsprofiel
- $\bar{v}$ : gemiddelde snelheid [m/s]
- $\Delta p_v$ : stromingsverliezen [Pa]

onderschrift

- 1: ingaande stroming
- 2: uitgaande stroming

Het snelheidsprofiel van de stroming is niet uniform. Bij de berekening van het drukverschil wordt er gewerkt met een gemiddelde snelheid, die als volgt gedefinieerd is.

$$\int_A \frac{v^2}{2} \cdot \rho \cdot v \, dA \equiv \alpha \cdot \int_A \frac{\bar{v}^2}{2} \cdot \rho \cdot v \, dA = \alpha \cdot q_m \cdot \frac{\bar{v}^2}{2}$$

$$\alpha = \frac{\int_A \rho \cdot v^3 \, dA}{q_m \cdot \bar{v}^2}$$

v: snelheid op een bepaald punt in de dwarsdoorsnede [m/s]

A: oppervlakte van de dwarsdoorsnede [m<sup>2</sup>]

q<sub>m</sub>: massastroom [kg/s]

De kinetische energie coëfficiënt ( $\alpha$ ) is dus een correctiefactor voor het niet uniform zijn van het snelheidsprofiel. Bij laminaire stroming is  $\alpha$  gelijk aan 2, bij turbulente stroming ligt  $\alpha$  afhankelijk van de turbulentiegraad tussen 1,03 en 1,08. De kinetische energie coëfficiënt ( $\alpha$ ) wordt bij turbulente stroming meestal op 1 gesteld, maar in dit model wordt van 1,05 uitgegaan.

Als de volumestroom in plaats van de gemiddelde snelheid wordt gebruikt gaat (1) over in (2).

$$\bar{v} = \frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot d_h^2}$$

$$p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_1}{\pi^2 \cdot d_{h,1}^4} \cdot q_{v,1}^2 - \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_2}{\pi^2 \cdot d_{h,2}^4} \cdot q_{v,2}^2 - \Delta p_v \quad (2)$$

d<sub>h</sub>: hydraulische binnendiameter [m]

q<sub>v</sub>: volumestroom [m<sup>3</sup>/s]

onderschrift

1: ingaande stroming

2: uitgaande stroming

### Berekening van de stromingsverliezen

De stromingsverliezen worden in het algemeen berekend in analogie met (2) volgens onderstaande vergelijking.

$$\Delta p_v = \zeta \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d_h^4} \cdot q_v^2 \quad (3)$$

$\zeta$ : weerstandsfactor afhankelijk van het type element [-]

In de volgende paragrafen worden de gebruikte modellen voor de elementen en verbindingen besproken. Ze zijn allemaal gebaseerd op vergelijking (2) en (3). De vergelijkingen voor de weerstandsfactoren zijn identiek aan de door ISSO gebruikte vergelijkingen

in ISSO-17 (1993). De vergelijkingen, zoals ze in Matlab geïmplementeerd zijn, zijn te vinden in bijlage A.

### 2.3 Model voor een leiding

De lengte van de leiding wordt gelijk genomen aan de afstand tussen het knooppunt aan het begin en het knooppunt aan het eind van de leiding. De afmeting van de elementen die de leiding worden verbonden, wordt verwaarloosd. Aangezien bij een leiding de hydraulische diameter en de volumestroom voor de in- en uitgang gelijk zijn, reduceert (2) tot:

$$p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) - \Delta p_v$$

Vergelijking (3) wordt voor een leiding:

$$\Delta p_v = f \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d_h^4} \cdot q_v^2$$

waarin  $f$  wordt bepaald uit:

$$f = \frac{64}{Re_d}, \quad Re_w \leq 2300$$

$$f = \frac{f_L \cdot (3500 - Re_d) + f_T \cdot (Re_d - 2300)}{3500 - 2300}, \quad 2300 < Re_w < 3500$$

$$f = \left[ -2 \cdot 10 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,72 \cdot d_h} + \frac{5,74}{Re_d^{0,901}} \right) \right]^{-2}, \quad Re_w \geq 3500$$

$$Re_d = \frac{4 \cdot \rho \cdot q_v}{\pi \cdot \mu \cdot d_h}$$

$f$ : wrijvingsfactor [-]

$Re_d$ : Reynoldsgetal betrokken op de diameter [-]

$\mu$ : dynamische viscositeit [Pa\*s]

onderschrift

L: laminaire stroming

T: turbulente stroming

### 2.4 Model voor een pomp

Bij een pomp wordt de z-coördinaat voor de in- en uitgang gelijk genomen. De volumestroom voor de in- en uitgang zijn gelijk. Het aanwezige hoogteverschil wordt meegenomen in de berekening van de verbinding. Het drukverschil over de pomp wordt gegeven door:

$$p_2 - p_1 = a_0 + a_1 \cdot q_{v,1} + a_2 \cdot q_{v,1}^2$$

$a_i$ : coëfficiënten van de pompkarakteristiek [-]

De coëfficiënten  $a_0$ ,  $a_1$  en  $a_2$  worden bepaald uit de pompkarakteristiek van de fabrikant. Ook de minimale en maximale volumestroom waartussen de karakteristiek geldig is dienen bekend te zijn.

## 2.5 Model voor een bocht

Bij een bocht wordt de z-coördinaat voor de in- en uitgang gelijk genomen. De volumestroom voor de in- en uitgang zijn gelijk. Het aanwezige hoogteverschil wordt meegenomen in de berekening van de verbinding. Met voorgaande reduceert (2) tot:

$$p_2 - p_1 = \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_1}{\pi^2 \cdot d_{h,1}^4} \cdot q_v^2 - \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_2}{\pi^2 \cdot d_{h,2}^4} \cdot q_v^2 - \Delta p_v$$

Vergelijking (3) wordt voor een bocht:

$$\Delta p_v = \zeta_{\text{bocht}} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d_{h,1}^4} \cdot q_v^2$$

$\zeta_{\text{bocht}}$ : weerstandsfactor van een bocht [-]

Bij turbulente stroming wordt de weerstandsfactor van een bocht met een constante cirkelvormige doorsnede berekend met:

$$\zeta_{\text{bocht}} = \zeta_0 \cdot C_{\text{Re}} \cdot C_w$$

$\zeta_0$ : ongecorrigeerde weerstandsfactor [-]  
 $C_{\text{Re}}$ : correctiefactor i.v.m. Reynoldsgetal [-]  
 $C_w$ : correctiefactor i.v.m. wandruwheid [-]

In dit model wordt deze relatie ook gebruikt voor bochten met een kleine diameterverandering en bij laminaire stroming. De ongecorrigeerde weerstandsfactoren van bochten kunnen worden berekend met de volgende benaderingsformules:

– voor 45°-bochten waarbij  $0,6 \leq R/d_h \leq 10$

$$\zeta_0 = 0,008 \cdot \frac{R}{d_h} + 0,09 \cdot \left( \frac{R}{d_h} \right)^{\frac{-0,9}{R/d_h}}$$

– voor 90°-bochten waarbij  $0,6 \leq R/d_h \leq 10$

$$\zeta_0 = 0,007 \cdot \frac{R}{d_h} + 0,24 \cdot \left( \frac{R}{d_h} \right)^{\frac{-1,34}{R/d_h}}$$



- voor 180°-bochten waarbij  $0,7 \leq R/d_h \leq 5$

$$\zeta_0 = 0,04 \cdot R/d_h + 0,26 \cdot \left( R/d_h \right)^{\frac{-2,15}{R/d_h}}$$

R: buigstraal [m]

De correctiefactor  $C_{Re}$  wordt berekend met:

$$C_{Re} = 2,9 \cdot \left( \frac{3500}{Re} \right)^{\frac{1}{2,7+1,3 \cdot R/d_h}}$$

waarbij:

- voor bochten met  $0,75 \leq R/d_h \leq 2$  wordt de correctiefactor wordt begrensd op 1 bij berekende lagere waarden
- voor bochten met  $R/d_h > 2$  dezelfde correctiefactor geldt als bij  $R/d_h = 2$  zonder begrenzing van de berekende waarde.

De correctiefactor i.v.m. de wandruwheid wordt berekend met:

$$C_w = f_\varepsilon / f_0$$

$f_\varepsilon$ : wrijvingsfactor bij desbetreffende wandruwheid [-]

$f_0$ : wrijvingsfactor bij hydraulisch gladde uitvoering [-]

## 2.6 Model voor een verloop

Bij een verloop wordt de z-coördinaat voor de in- en uitgang gelijk genomen. De volumestroom voor de in- en uitgang zijn gelijk. Het aanwezige hoogteverschil wordt meegenomen in de berekening van de verbinding. Met voorgaande reduceert (2) tot:

$$p_2 - p_1 = \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_1}{\pi^2 \cdot d_{h,1}^4} \cdot q_{v,1}^2 - \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_2}{\pi^2 \cdot d_{h,2}^4} \cdot q_{v,2}^2 - \Delta p_v$$

Vergelijking (3) wordt voor een verloop:

$$\Delta p_v = \zeta_{\text{verloop}} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d_h^4} \cdot q_v^2$$

$\zeta_{\text{verloop}}$ : weerstandsfactor van een verloop [-]

De totale weerstand van een diameterovergang wordt veroorzaakt door verliezen als gevolg van energiedissipatie in wervels en door wrijvingsverliezen. De weerstandsfactor wordt dan ook bepaald door sommatie van twee factoren volgens:

$$\zeta_{\text{verloop}} = \zeta_s + \zeta_w$$

$\zeta_s$ : weerstandsfactor i.v.m. stootverliezen [-]

$\zeta_w$ : weerstandsfactor i.v.m. wrijvingsverliezen [-]

Bij turbulente stroming geldt bij divergerende respectievelijk convergerende verloopstukken met een tophoek kleiner dan  $40^\circ$ :

– divergerende verloopstukken

$$\zeta_s = 3,2 \cdot \left( 1 - \left( \frac{d_{h,1}}{d_{h,2}} \right)^2 \right)^2 \cdot \left( \frac{d_{h,2} - d_{h,1}}{2 \cdot L} \right)^{1,25}$$

$$\zeta_w = \frac{f_1}{8 \cdot \left( \frac{d_{h,2} - d_{h,1}}{2 \cdot L} \right)} \cdot \left( 1 - \left( \frac{d_{h,1}}{d_{h,2}} \right)^4 \right)$$

– convergerende verloopstukken

$$\zeta_s = 0$$

$$\zeta_w = \frac{f_1}{8 \cdot \left( \frac{d_{h,1} - d_{h,2}}{2 \cdot L} \right)} \cdot \left( \left( \frac{d_{h,1}}{d_{h,2}} \right)^4 - 1 \right)$$

L: lengte van het verloop [m]

onderschrift

1: ingaande stroming

2: uitgaande stroming

In geval van een plotselinge verwijding respectievelijk vernauwing in een leiding wordt de weerstandsfactor uitsluitend door stootverliezen bepaald.

Bij turbulente stroming geldt voor een:

– plotselinge verwijding

$$\zeta_s = \left( 1 - \left( \frac{d_{h,1}}{d_{h,2}} \right)^2 \right)^2$$

$$\zeta_w = 0$$

- plotselinge vernauwing

$$\zeta_s = \left( \frac{d_{h,1}}{d_{h,2}} \right)^4 \cdot \left( \frac{1}{\mu_{contr.}} - 1 \right)^2$$

$$\mu_{contr.} = 0,56 + 0,44 \cdot \left( \frac{d_{h,2}}{d_{h,1}} \right)^6$$

$$\zeta_w = 0$$

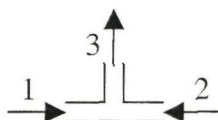
$\mu_{contr.}$ : contractiefactor verloop [-]

## 2.7 Model voor een T-stuk

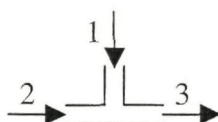
Een T-stuk kan, afhankelijk van de richting van de stromen, worden verdeeld in de volgende vier typen:

### 1 Verzamelend T-stuk: twee ingaande stromen, één uitgaande stroom

- a) Uitgaande stroming door de korte kant van het T-stuk; omgekeerd T-stuk

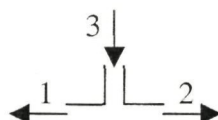


- b) Uitgaande stroming door de lange kant van het T-stuk; T-stuk 90°



### 2 Splitsend T-stuk: één ingaande stroom, twee uitgaande stromen

- a) Ingaande stroming door de korte kant van het T-stuk; omgekeerd T-stuk



- b) Ingaande stroming door de lange kant van het T-stuk; T-stuk 90°



Afhankelijk van het type stroming door het T-stuk zal het drukverschil op een iets andere manier worden berekend. In alle gevallen worden de stromingsverliezen berekend met volumestroom 3 en de daarbij behorende hydraulische diameter. Voor de vier hierboven genoemde typen worden hieronder de vergelijkingen gegeven.

### 1 Verzamelend T-stuk: twee ingaande stromen, één uitgaande stroom

Bij een T-stuk zijn de hoogte voor de in- en uitgangen gelijk genomen. Het aanwezige hoogteverschil wordt meegenomen in de berekening van de verbinding. Met voorgaande reduceert (2) tot:

$$p_3 - p_j = \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_j}{\pi^2 \cdot d_{h,j}^4} \cdot q_{v,j}^2 - \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_3}{\pi^2 \cdot d_{h,3}^4} \cdot q_{v,3}^2 - \Delta p_{v,j}$$

Vergelijking (3) wordt voor een T-stuk:

$$\Delta p_{v,j} = \zeta_{T\text{-stuk},j3} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d_{h,j}^4} \cdot q_{v,3}^2$$

$\zeta_{T\text{-stuk}}$ : weerstandsfactor van een tak van een T-stuk [-]  
 j: geeft aan welke tak bedoeld wordt (1 of 2)

### 2 Splitsend T-stuk: één ingaande stroom, twee uitgaande stromen

Bij een T-stuk zijn de hoogte voor de in- en uitgangen gelijk genomen. Het aanwezige hoogteverschil wordt meegenomen in de berekening van de verbinding. Met voorgaande reduceert (2) tot:

$$p_j - p_3 = \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_1}{\pi^2 \cdot d_{h,1}^4} \cdot q_{v,3}^2 - \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_2}{\pi^2 \cdot d_{h,j}^4} \cdot q_{v,j}^2 - \Delta p_{v,j}$$

Vergelijking (3) wordt voor een T-stuk:

$$\Delta p_{v,j} = \zeta_{T\text{-stuk},3j} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d_{h,j}^4} \cdot q_{v,3}^2$$

Bij deze T-stukken is de diameter van de hoofdleiding constant ( $d_{h,2} = d_{h,3}$ ); de diameter van de aftakking is gelijk aan of kleiner dan die van de hoofdleiding ( $d_{h,1} \leq d_{h,3}$ ). Indien er sprake is van een splitsing door middel van een omgekeerd T-stuk wordt alleen die situatie beschouwd waarbij de beide aftakkingen dezelfde diameter hebben als de hoofdleiding ( $d_{h,1} = d_{h,2} = d_{h,3}$ ).

De weerstandsfactoren van T-stukken kunnen theoretisch op basis van de impulsbalans (krachtenevenwicht) worden berekend met een benaderingsformule van de volgende gedaante:

$$\zeta_{T\text{-stuk}} = b_0 + b_1 \cdot \left( \frac{v_1}{v_3} \right) + b_2 \cdot \left( \frac{v_1}{v_3} \right)^2 + b_3 \cdot \left( \frac{v_2}{v_3} \right) + b_4 \cdot \left( \frac{v_2}{v_3} \right)^2 + b_5 \cdot \left( \frac{v_1}{v_3} \cdot \frac{v_2}{v_3} \right)$$

$b_i$ : regressiecoëfficiënt volgens Tabel 2.1 [-]  
 $v_1$ : gemiddelde stroomsnelheid in punt 1 [m/s]  
 $v_2$ : gemiddelde stroomsnelheid in punt 2 [m/s]

$v_3$ : gemiddelde stroomsnelheid in punt 3 [m/s]

Voor de in deze formule aan te houden coëfficiënt, die zijn bepaald door lineaire regressie op gemeten weerstandsfactoren, wordt verwezen Tabel 2.1.

De berekende weerstandsfactoren gelden voor het diametergebied  $0,4 \leq d_{h,1}/d_{h,3} \leq 1$  en voor  $Re \geq 10^5$  bij volledig ontwikkelde stroming. Bij lagere waarden van het Reynoldsgetal ontbreken betrouwbare weerstandsfactoren. In die gevallen, mits er sprake is van turbulente stroming ( $Re \geq 2300$ ), wordt er vooralsnog van uitgegaan dat toepassing van de weerstandsfactoren berekend met de benaderingsformule toelaatbaar is.

benaming	afwerking	stromingsvorm	$\theta$	weerstandsfactor	regressiecoëfficiënten						
					$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	
T-stuk	scherp	verzamelend	$45^\circ$	$\zeta_{13}$	-0,32	-0,14	0,82	1,31	-1,86	0,48	
				$\zeta_{23}$	-0,01	-0,36	-0,18	0,78	-0,74	0,71	
			splitsend	$45^\circ$	$\zeta_{13}$	0,11	0,34	0,66	0,98	-2,04	-0,10
					$\zeta_{23}$	0,03	0,56	-0,06	1,23	-1,22	-0,52
	afgerond	verzamelend	$90^\circ$	$\zeta_{13}$	-0,02	0,12	0,73	1,00	-1,91	0,25	
				$\zeta_{23}$	-0,18	0,51	-0,07	1,47	-1,24	-0,38	
		splitsend	$90^\circ$	$\zeta_{13}$	1,40	-1,27	0,74	-1,67	1,30	1,24	
				$\zeta_{23}$	0,42	0	0	-1,20	0,80	0	
omgekeerd T-stuk	scherp	verzamelend	$90^\circ$	$\zeta_{13}$	0,77	-0,94	1,36	0	0	0	
				$\zeta_{23}$	0,77	0	0	-0,94	1,36	0	
		splitsend	$90^\circ$	$\zeta_{13}$	0,58	0,82	-0,29	0	0	0	
				$\zeta_{23}$	0,58	0	0	0,82	-0,29	0	
	afgerond	verzamelend	$90^\circ$	$\zeta_{13}$	0,45	-0,65	1,07	0	0	0	
				$\zeta_{23}$	0,45	0	0	-0,65	1,07	0	
		splitsend	$90^\circ$	$\zeta_{13}$	0,57	0,84	-0,58	0	0	0	
				$\zeta_{23}$	0,57	0	0	0,84	-0,58	0	

Tabel 2.1: Regressiecoëfficiënten voor een T-stuk

## 2.8 Model voor een vat

Bij een vat verschillen de z-coördinaten voor de in- en uitgang. De volumestroom voor de in- en uitgang zijn gelijk. Met voorgaande reduceert (2) tot:

$$p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_1}{\pi^2 \cdot d_{h,1}^4} \cdot q_v^2 - \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_2}{\pi^2 \cdot d_{h,2}^4} \cdot q_v^2 - \Delta p_{v,1} - \Delta p_{v,2}$$

Vergelijking (3) wordt voor een vat:

$$\Delta p_{v,1} = \zeta_{vat,1} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d_h^4} \cdot q_v^2$$

$$\Delta p_{v,2} = \zeta_{vat,2} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d_h^4} \cdot q_v^2$$

$\zeta_{vat}$ : weerstandsfactor van een vat [-]

In het vat is de snelheid van het gelijk aan nul, dus de dynamische druk van de ingaande stroming gaat totaal verloren. De weerstandsfactor voor de ingang van het vat is dus gelijk aan de kinetische energie coëfficiënt van de ingaande stroming ( $\alpha_1$ ). De weerstandsfactor voor de uitgang van het vat hangt af van de manier waarop de leiding aan het vat is verbonden. Er worden drie typen onderscheiden (Fox & McDonald):

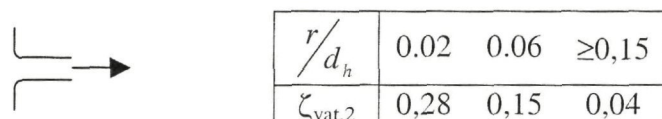
1 Doorgestoken uitstroming



2 Scherpe uitstroming



3 Afgeronde uitstroming



r: afrondingsstraal verbinding vat-leiding [m]

## 2.9 Model voor een 2-wegklep

Bij een 2-wegklep zijn de hoogtes voor de in- en uitgangen gelijk genomen. Het aanwezige hoogteverschil wordt meegenomen in de berekening van de verbinding. Het drukverschil over de 2-wegklep wordt volgens onderstaande formule berekend uit ISSO-44 (1998).

$$p_2 - p_1 = \Delta p_{st} \cdot \frac{\rho}{\rho_{st}} \left( \frac{3600 \cdot q_{vl}}{k_v} \right)^2$$

$\Delta p_{st}$ : standaard drukverschil ( $=10^5$ ) [Pa]

$\rho_{st}$ : standaard dichtheid ( $=1000$ ) [ $\text{kg/m}^3$ ]

$k_v$ : volumestroom door klep onder standaard condities [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

Een klep wordt gekarakteriseerd door zijn  $k_v$ -waarde. De  $k_v$ -waarde bij de de geheel geopende klep wordt de  $k_{vs}$ -waarde genoemd. De  $k_v$ -waarde hangt af van de  $k_{vs}$ -waarde, het type klep en de lichte hoogte van de klep.

Als de klep een lineaire karakteristiek heeft, geldt:

$$\frac{k_v}{k_{vs}} = \left(1 - \frac{k_{v0}}{k_{vs}}\right) \cdot \frac{h}{h_{100}} + \frac{k_{v0}}{k_{vs}}$$

$k_{vs}$ : volumestroom bij volledig geopende klep volgens grondkarakteristiek [m<sup>3</sup>/h]

$k_{v0}$ : volumestroom bij gesloten klep volgens grondkarakteristiek [m<sup>3</sup>/h]

$h/h_{100}$ : relatieve lichte hoogte van de klep [-]

Als de klep een exponentiële karakteristiek heeft, geldt:

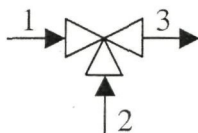
$$\frac{k_v}{k_{vs}} = \left(\frac{k_{vs}}{k_{v0}}\right)^{\left(\frac{h}{h_{100}} - 1\right)}$$

De minimale volumestroom waarbij bovenstaande vergelijkingen nog geldig zijn, wordt de  $k_{vr}$ -waarde genoemd. Bovenstaande vergelijkingen zijn niet geldig als de berekende  $k_v$ -waarde kleiner is dan de  $k_{vr}$ -waarde. In dat geval wordt geïnterpoleerd tussen de lekwaarde (werkelijke volumestroom bij gesloten klep) en de  $k_{vr}$ -waarde. In dit model is het lekverlies verwaarloosd, de  $k_{vr}$ -waarde is nul. Voor een uitgebreidere behandeling van 2-wegkleppen wordt verwezen naar VDI/VDE 2173 (1962).

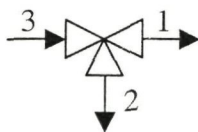
## 2.10 Model voor een 3-wegklep

Bij een 3-wegklep worden, afhankelijk van de richting van de stromen, twee typen onderscheiden:

- 1 Verzamelende 3-wegklep: twee ingaande stromen, één uitgaande stroom



- 2 Splitsende 3-wegklep: één ingaande stroom, twee uitgaande stromen



Bij een 3-wegklep zijn de hoogtes voor de in- en uitgangen gelijk genomen. Het aanwezige hoogteverschil wordt meegenomen in de berekening van de verbinding. Het drukverschil over de 3-wegklep wordt volgens onderstaande formule berekend uit ISSO-44 (1998).

$$\Delta p_j = \Delta p_{st} \cdot \frac{\rho}{\rho_{st}} \left( \frac{3600 \cdot q_{v,j}}{k_{v,j}} \right)^2$$

onderschrift

j: geeft aan welke tak wordt bedoeld (1 of 2)

Een klep wordt gekarakteriseerd door zijn  $k_v$ -waarde. De  $k_v$ -waarde bij de de geheel geopende klep wordt de  $k_{vs}$ -waarde genoemd. De  $k_v$ -waarde hangt af van de  $k_{vs}$ -waarde, het type klep en de lighthoogte van de klep.

Als beide poorten een lineaire karakteristiek hebben, geldt:

$$\frac{k_{v,1}}{k_{vs}} = \left(1 - \frac{k_{v0}}{k_{vs}}\right) \cdot \frac{h/h_{100}}{h_{100}} + \frac{k_{v0}}{k_{vs}}$$

$$\frac{k_{v,2}}{k_{vs}} = 1 - \frac{k_{v,1}}{k_{vs}}$$

Als beide poorten een exponentiële karakteristiek hebben, geldt:

$$\frac{k_{v,1}}{k_{vs}} = \left(\frac{k_{vs}}{k_{v0}}\right)^{\left(\frac{h/h_{100}}{h_{100}} - 1\right)}$$

$$\frac{k_{v,2}}{k_{vs}} = 1 - \frac{k_{v,1}}{k_{vs}}$$

Als poort 1-3 een exponentiële karakteristiek en poort 2-3 een lineaire karakteristiek heeft, geldt:

$$\frac{k_{v,1}}{k_{vs}} = \left(\frac{k_{vs}}{k_{v0}}\right)^{\left(\frac{h/h_{100}}{h_{100}} - 1\right)}$$

$$\frac{k_{v,2}}{k_{vs}} = \left(1 - \frac{k_{v0}}{k_{vs}}\right) \cdot \left(1 - \frac{h/h_{100}}{h_{100}}\right)$$

De minimale volumestroom waarbij bovenstaande vergelijkingen nog geldig zijn, wordt de  $k_{vr}$ -waarde genoemd. Bovenstaande vergelijkingen zijn niet geldig als de berekende  $k_v$ -waarde kleiner is dan de  $k_{vr}$ -waarde. In dat geval wordt geïnterpoleerd tussen de lekwaarde (werkelijke volumestroom bij gesloten klep) en de  $k_{vr}$ -waarde. In dit model is het lekverlies verwaarloosd, de  $k_{vr}$ -waarde is nul. Voor een uitgebreidere behandeling van 3-wegkleppen wordt verwezen naar VDI/VDE 2173 (1962).

## 2.11 Model voor de overige elementen

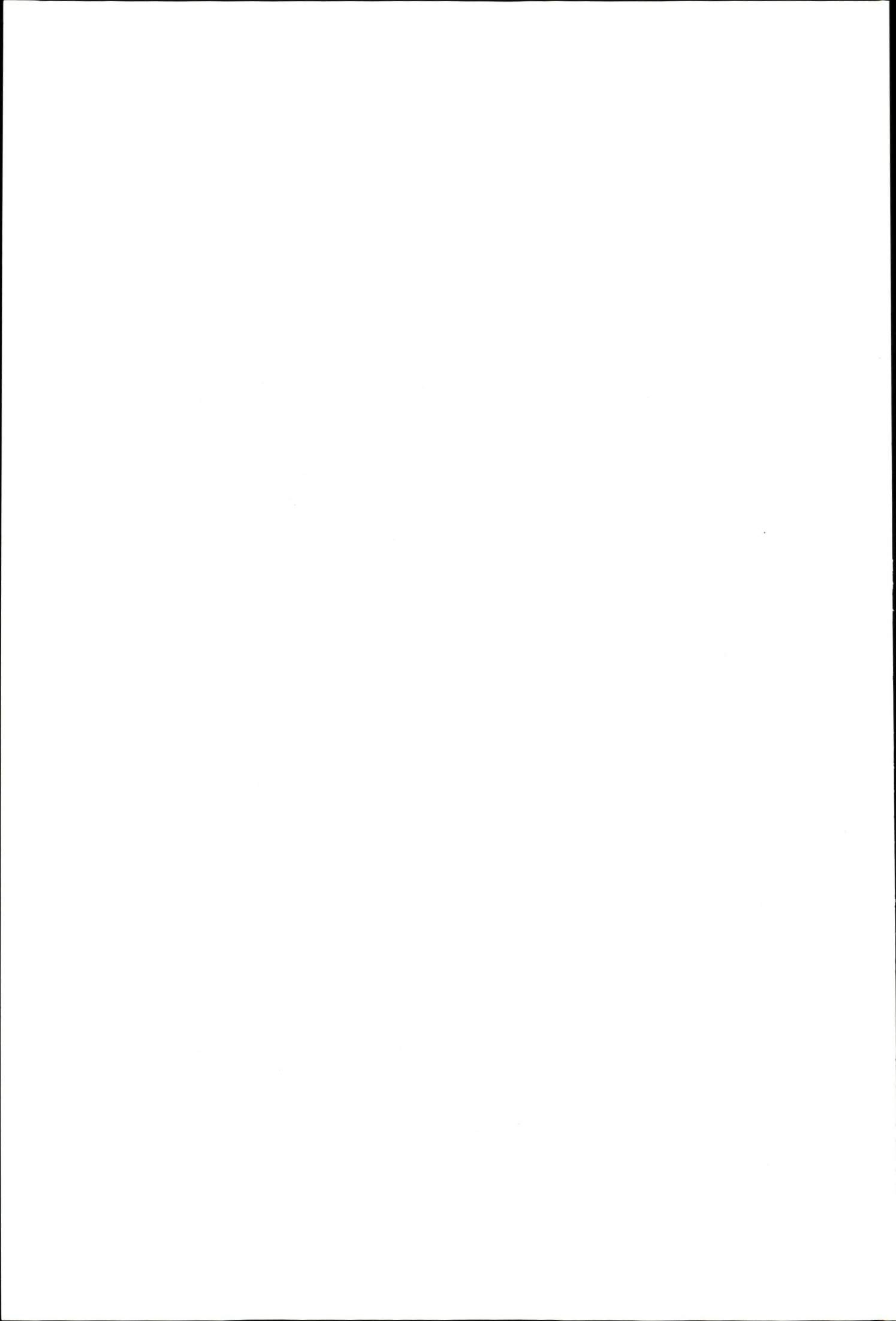
Naast de in dit hoofdstuk genoemde elementen zijn er nog een aantal andere elementen, zoals luchtverwarmers, luchtkoelers en filters. Deze elementen kunnen worden gekarakteriseerd door een constante weerstand (hoogteverschil) en een variabele (stromings)weerstand. Het drukverschil over deze elementen kan worden beschreven door onderstaande relaties.



$$p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_1}{\pi^2 \cdot d_{h,1}^4} \cdot q_{v,1}^2 - \frac{8 \cdot \rho \cdot \alpha_2}{\pi^2 \cdot d_{h,2}^4} \cdot q_{v,2}^2 - \Delta p_v$$

$$\Delta p_v = \zeta_{element} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2} \cdot \left( \frac{\frac{q_{v,1}^2}{d_{h,1}^2} + \frac{q_{v,2}^2}{d_{h,2}^2}}{2} \right)^2$$

Meestal wordt de weerstandsfactor niet expliciet vermeld, maar kan die wel uit de specificaties worden afgeleid. In bovenstaande formule wordt het gemiddelde van de in- en uitgaande snelheid genomen, omdat de gebruikte weerstandsfactor een som is van allerlei aparte weerstandsfactoren.

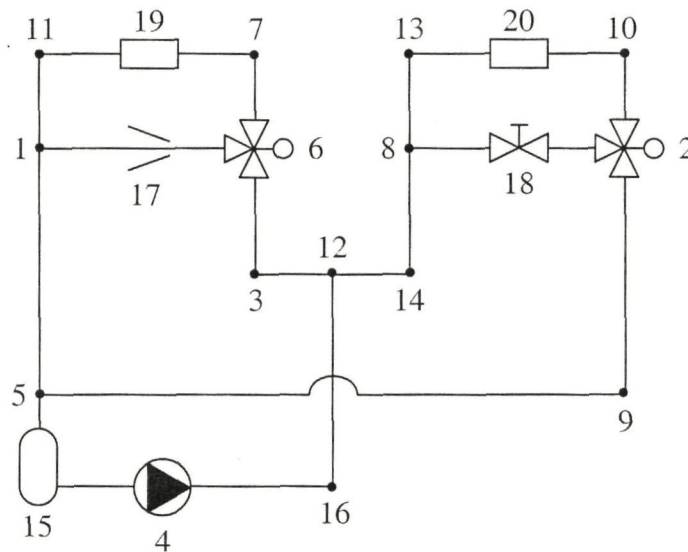


## 3 Implementatie en simulatie van model hydraulisch systeem

### 3.1 Inleiding

Van het hydraulische systeem moeten een aantal gegevens bekend zijn, voordat het model kan worden gesimuleerd. Deze gegevens worden ingevoerd met behulp van de gebruikersinterface, zie De Jong (2002), maar hebben een zodanige structuur dat dit ook kan worden geautomatiseerd. Vervolgens worden met behulp van deze gegevens de drukvallen en volumestromen door het systeem berekend met behulp van een Matlab-programma. Vervolgens geeft de gebruikersinterface de resultaten tevens op een overzichtelijke manier weer.

Alle gegevens van het systeem en alle resultaten worden opgeslagen in matrices, omdat met Matlab gewerkt wordt. Bovengenoemde gegevens, matrices en resultaten worden in dit hoofdstuk toegelicht. Daarnaast wordt ieder onderdeel voor een voorbeeld systeem uitgewerkt. Dit systeem is afgebeeld in Figuur 3.1.



Figuur 3.1: Voorbeeld van een hydraulisch systeem

### 3.2 Invoer van systeemgegevens

#### 3.2.1 Geometriegegevens

##### Algemene opbouw geometrie-matrix

Er is voor gekozen om de geometrische gegevens door middel van getallen in een matrix op te slaan. De matrix met geometrische gegevens wordt verder geometrie-matrix genoemd. De geometrie-matrix is handmatig ingegeven, maar kan ook automatisch gegenereerd worden uit de CAD-tekeningen en specificaties. De geometrie-matrix ziet er als volgt uit.

	positie			in <sub>1</sub>		in <sub>2</sub>		uit <sub>1</sub>			uit <sub>2</sub>			Indien T - stuk of 3weg klep	
	x	y	z	nr.	d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	ε/d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	ε/d <sub>h</sub>	nr. korte kant	nr. 2 <sup>e</sup> T of klep
1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
j	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
n	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Figuur 3.2: Opbouw van de geometrie-matrix

Alle n knooppunten krijgen een nummer (j). De gegevens van knooppunt j staan op de j<sup>e</sup> rij. De eerste drie kolommen geven de positie van het knooppunt weer in x-, y- en z-coördinaten. Het is een cartesiaans assenstelsel met de positieve z-coördinaat tegen de zwaartekracht in.

In kolom vier tot en met dertien worden de geometrische gegevens voor de in- en uitgangen van het element weergegeven. Eerst wordt het nummer van het knooppunt vermeld, gevolgd door de hydraulische diameter van de verbinding met dat knooppunt. In geval van twee in- of uitgangen wordt de tweede in- of uitgang in<sub>2</sub> respectievelijk uit<sub>2</sub> genoemd. Bij de uitgangen wordt tevens de wandruwheid van de verbinding vermeld, kolom tien en dertien.

Als het element in het knooppunt een T-stuk of een 3weg klep is, worden de laatste twee kolommen gebruikt. Naar welk knooppunt de "korte kant" (kant van de aftakstroming) wijst wordt weergegeven in de één na laatste kolom. De laatste kolom geeft aan met welk knooppunt het huidige element een parallelschakeling vormt. In Figuur 3.1 bij voorbeeld hoort het T-stuk in knooppunt 12 bij het T-stuk in knooppunt 5 (2 hoort bij 8 en 1 hoort bij 6).

### Uitwerking van geometrie-matrix voor specifiek systeem

Als de oorsprong van het assenstelsel in punt 15 ligt (zie Figuur 3.1) en het systeem zich in het horizontale vlak bevindt. Kan de geometrie-matrix voor het voorbeeld er als volgt uitzien.

knooppunt	positie			in <sub>1</sub>		in <sub>2</sub>		uit <sub>1</sub>			uit <sub>2</sub>			als T/klep	
	x	y	z	nr.	d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	ε/d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	ε/d <sub>h</sub>	korte kant	andere T/klep
1	0	5	0	11	0.0125	17	0.015	5	0.0125	0.0036	0	0	-	17	6
2	5	5	0	18	0.0125	10	0.0125	9	0.0125	0.0036	0	0	-	18	8
3	2	4	0	12	0.0125	0	0	6	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
4	1	0	0	15	0.0125	0	0	16	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
5	0	2	0	1	0.0125	9	0.0125	15	0.0125	0.0036	0	0	-	9	12
6	2	5	0	3	0.0125	0	0	7	0.0125	0.0036	17	0.0125	0.0036	17	1
7	2	6	0	6	0.0125	0	0	19	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
8	3	5	0	14	0.0125	0	0	18	0.0125	0.0036	13	0.0125	0.0036	18	2
9	5	2	0	2	0.0125	0	0	5	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
10	5	6	0	20	0.0125	0	0	2	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
11	0	6	0	19	0.0125	0	0	1	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
12	3	4	0	16	0.0125	0	0	3	0.0125	0.0036	14	0.0125	0.0036	16	5
13	3	6	0	8	0.0125	0	0	20	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
14	3	4	0	12	0.0125	0	0	8	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
15	0	1	0	5	0.0125	0	0	4	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
16	3	0	0	4	0.0125	0	0	12	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
17	1	5	0	6	0.0125	0	0	1	0.015	0.003	0	0	-	0	0
18	4	5	0	8	0.0125	0	0	2	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
19	1	6	0	7	0.0125	0	0	11	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0
20	4	6	0	13	0.0125	0	0	10	0.0125	0.0036	0	0	-	0	0

Tabel 3.1: De geometrie-matrix voor het voorbeeld systeem

### 3.2.2 Elementgegevens

#### Algemene opbouw elementenmatrix

Als de knooppunten en verbindingen zijn vastgelegd in de geometrie-matrix, kunnen vervolgens elementen aan de knooppunten worden toegewezen. Ook moeten de eigenschappen van die elementen worden gespecificeerd. Het soort element en zijn eigenschappen worden opgeslagen in de elementenmatrix. De structuur van deze matrix is weergegeven in onderstaande figuur.

	soort element	eigenschappen					
		x	x	x	x	x	x
1	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
<i>i</i>	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
<i>n</i>	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

Figuur 3.3: Structuur van de elementenmatrix

De gegevens van knooppunt  $j$  staan op de  $j^e$  rij. De eerste kolom geeft aan welk soort element bij het knooppunt hoort. De eigenschappen van het element staan in kolom 2 tot en met 7. De eigenschappen die opgegeven moeten worden zijn afhankelijk van het soort element. Er worden acht soorten elementen onderscheiden, te weten:

- 1 pomp
- 2 bocht
- 3 verloop
- 4 T-stuk
- 5 2-wegklep
- 6 3-wegklep
- 7 vat
- 8 overig

Bovenstaande nummering komt overeen met de nummering in de elementenmatrix. Per soort element zullen nu de eigenschappen worden besproken. De nummering van de eigenschappen correspondeert wederom met de getallen in elementenmatrix.

### **Pomp (1)**

De pompkarakteristiek wordt door de volgende vergelijking beschreven.

$$p_2 - p_1 = a_0 + a_1 \cdot q_{V,1} + a_2 \cdot q_{V,1}^2$$

De eigenschappen van de pomp worden als volgt weergegeven:

- 2 constante coëfficiënt pompkarakteristiek ( $a_0$ )
- 3 lineaire coëfficiënt pompkarakteristiek ( $a_1$ )
- 4 kwadratische coëfficiënt pompkarakteristiek ( $a_2$ )
- 5 minimale volumestroom pompkarakteristiek ( $q_{V,min.}$ )
- 6 maximale volumestroom pompkarakteristiek ( $q_{V,max.}$ )

### **Bocht (2)**

Voor een bocht dienen de volgende eigenschappen bekend te zijn:

- 2 hoek van de bocht ( $\theta$ )
- 3 verhouding van de buigstraal ten opzichte van de binnendiameter van de leiding ( $R/d_h$ )

### **Verloop (3)**

Bij een verloop wordt in de tweede kolom de vorm van het verloop aangegeven. Er worden vier types onderscheiden.

- 2 type verloop
  - vloeiend divergerend (1)
  - vloeiend convergerend (2)
  - abrupt divergerend (3)
  - abrupt convergerend (4)
- 3 tophoek van het verloop ( $\theta_{top}$ )
- 4 lengte van het verloop (l)

**T-stuk (4)**

Alleen het type T-stuk dient te worden gespecificeerd. Er kan uit vijf types gekozen worden.

- 2 type T-stuk
  - 45° scherp (1)
  - 90° scherp (2)
  - 90° afgerond (3)
  - omgekeerd scherp (4)
  - omgekeerd afgerond (5)

**2-wegklep (5)**

Bij een 2-wegklep moeten de volgende eigenschappen bekend zijn:

- 2 regelbaarheid
  - regelbaar (1)
  - niet regelbaar (0)
- 3 klepkarakteristiek
  - lineair (1)
  - exponentieel (0)
- 4 Grootte van de klep ( $k_{vs}$ -waarde)
- 5 Theoretische regelverhouding ( $k_{vs}/k_{v0}$ )
- 6 Werkelijke regelverhouding ( $k_{vs}/k_{vr}$ )

**3-wegklep (6)**

De 3-wegklep lijkt sterk op de 2-wegklep alleen dient nu ook de karakteristiek van de aftakpoort te worden gespecificeerd. De rij in de elementenmatrix voor een 3-wegklep ziet er als volgt uit:

- 2 regelbaarheid
  - regelbaar (1)
  - niet regelbaar (0)
- 3 klepkarakteristiek lijnpoort
  - lineair (1)
  - exponentieel (0)
- 4 klepkarakteristiek aftakpoort
  - lineair (1)
  - exponentieel (0)
- 5 Grootte van de klep ( $k_{vs}$ -waarde)
- 6 Theoretische regelverhouding ( $k_{vs}/k_{v0}$ )
- 7 Werkelijke regelverhouding ( $k_{vs}/k_{vr}$ )

**Vat (7)**

Bij een vat kan het verschil in positie niet altijd worden verwaarloosd. De ingang van het vat wordt daarom in het knooppunt gezet, terwijl de uitgang van het vat in de elementenmatrix wordt opgegeven. De rij in de elementenmatrix voor een vat ziet er als volgt uit:

- 2 tweede kolom wordt niet gebruikt
- 3 x-coördinaat van de uitgang van het vat
- 4 y-coördinaat van de uitgang van het vat
- 5 z-coördinaat van de uitgang van het vat

- 6 type uitstromingsverbinding
- doorgestoken uitstroming (1)
  - scherpe uitstroming (2)
  - afgeronde uitstroming (3)

### Overige elementen (8)

Alle elementen die hierboven niet worden genoemd worden 'overig' genoemd. Aangezien de drukverschil kan bestaan uit een statisch en een dynamisch deel, wordt de elementenmatrix als volgt:

- 2 zeta-waarde van het element ( $\zeta_{\text{element}}$ )
- 3 x-coördinaat van de uitgang van het element
- 4 y-coördinaat van de uitgang van het element
- 5 z-coördinaat van de uitgang van het element

### Uitwerking elementenmatrix voor een specifiek systeem

In het voorbeeld systeem (Figuur 3.1) horen de volgende knooppunten en elementen bij elkaar (Tabel 3.2).

knooppunt	element	knooppunt	element
1	T-stuk	11	bocht
2	3-wegklep	12	T-stuk
3	bocht	13	bocht
4	pomp	14	bocht
5	T-stuk	15	vat
6	3-wegklep	16	bocht
7	bocht	17	verloop
8	T-stuk	18	2-wegklep
9	bocht	19	overig
10	bocht	20	overig

Tabel 3.2: Corresponderende knooppunten en elementen

Met deze combinaties van knooppunten en elementen kan de elementenmatrix voor het voorbeeld systeem er als volgt uitzien.



knoop- punt	soort element	Eigenschappen					
1	4	2	0	0	0	0	0
2	6	1	1	1	0.5	50	25
3	2	90	1.5	0	0	0	0
4	1	1.46E+06	1.00E+08	-2.40E+11	1E-04	0	0
5	4	2	0	0	0	0	0
6	6	1	1	1	0.5	50	25
7	2	90	1.5	0	0	0	0
8	4	3	0	0	0	0	0
9	2	90	1.5	0	0	0	0
10	2	90	1.5	0	0	0	0
11	2	90	1.5	0	0	0	0
12	4	4	0	0	0	0	0
13	2	90	1.5	0	0	0	0
14	2	90	1.5	0	0	0	0
15	7	0	0.25	0	0	3	0
16	2	90	1.5	0	0	0	0
17	3	1	30	0.04	0	0	0
18	5	0	2	0.5	50	25	0
19	8	10	1	6	0	0	0
20	8	10	4	6	0	0	0

Tabel 3.3: De elementenmatrix voor het voorbeeld systeem

### 3.2.3 Medium- en iteratiegegevens

In dit model wordt variatie van de dichtheid en viscositeit van het medium ten gevolge van temperatuurveranderingen verwaarloosd. Deze verwaarlozing is gerechtvaardigd voor water bij drukken tot 5bar en temperaturen van 0 tot 100°C. De toepassing in klimaatinstallaties valt meestal binnen deze grenzen. Voor een koud water circuit (5 – 7°C) kunnen natuurlijk wel een andere waarden worden genomen dan voor een warm water toepassing (60 – 80°C). De dichtheid en viscositeit moeten handmatig worden ingevoerd.

Verder moet worden opgegeven in hoeveel stappen de regelkleppen van open naar dicht gaan. Stel dat het model twee geregelde kleppen heeft en dat bij het aantal stappen drie is ingevuld. Dan zal het programma de volumestromen en drukverschillen bij de volgende combinaties van klepstanden berekenen:

Berekening		1	2	3	4	5	6	enzo- voorts
Relatieve klep- stand; $h/h_{100}$ [-]	klep A	0	1/3	2/3	1	0	1/3	
	klep B	0	0	0	0	1/3	1/3	

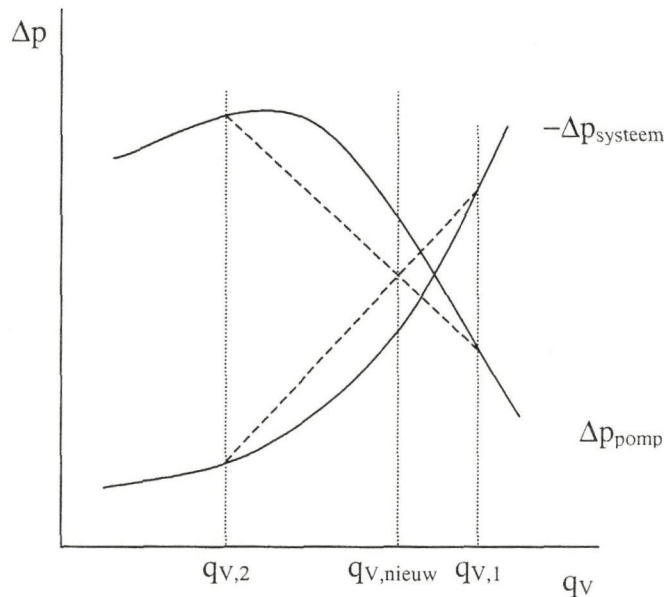
Tabel 3.4: Manier waarop het programma alle combinaties van klepstanden doorloopt

Als het model een parallelle schakeling bevat, zoals de lus 1,17,6,7,19,11 in Figuur 3.1, dan zal het drukverschil in deze lus in een aantal berekeningsstappen (iteraties) moeten worden benaderd. Als de fout beneden een bepaalde waarde komt, wordt de iteratie gestopt. Deze maximaal toelaatbare fout moet ook van tevoren worden opgegeven en zal voor alle lussen worden gehanteerd. De medium- en iteratiegegevens worden opgeslagen als globale variabelen en zijn dus in alle (sub)programma's beschikbaar.

### 3.3 Berekening van drukverschillen en volumestromen

Als alle invoergegevens bekend zijn kunnen de volumestromen en drukverschillen worden berekend. De berekeningen worden uitgevoerd voor verschillende combinaties van klepstanden, te beginnen met alle geregelde kleppen gesloten.

De berekening start bij de pomp waar de volumestroom wordt geschat door interpolatie tussen twee reeds berekende volumestromen. Hierbij wordt zo geïnterpoleerd dat de fout in het drukverschil tussen de pomp en het systeem nul wordt (zie Figuur 3.4). Voor de eerste twee iteratieslagen worden de minimale en maximale volumestroom van de pomp genomen.



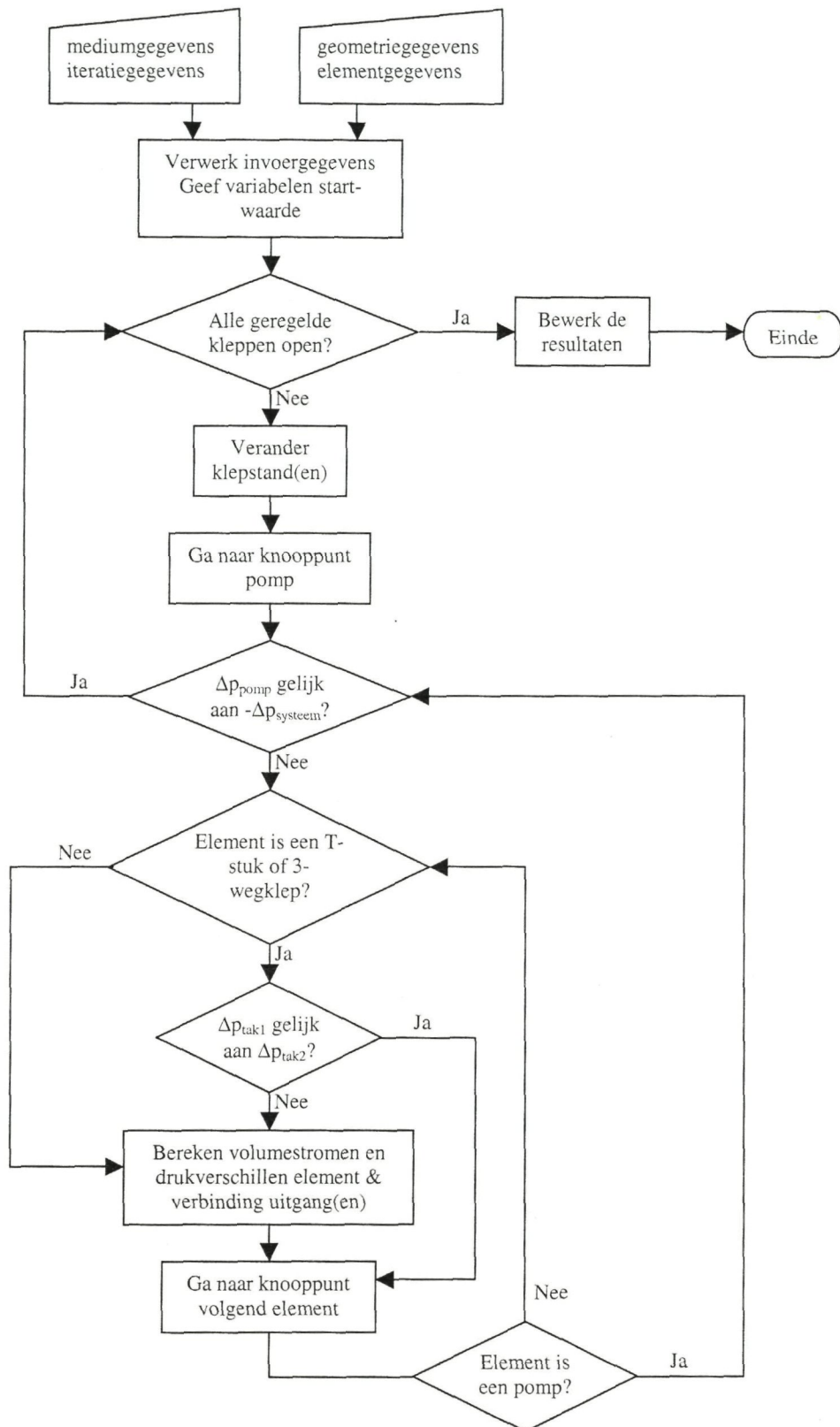
Figuur 3.4: Interpolatie tussen fouten, om volumestroom bij “fout is nul” te berekenen

In iedere iteratieslag wordt dus het drukverschil in het systeem berekend door gebruik te maken van de volumestroom die de pomp levert. Vervolgens wordt dit drukverschil vergeleken met het drukverschil over de pomp. Als het verschil tussen die twee te groot is, wordt via interpolatie een nieuwe volumestroom berekend. Deze volumestroom wordt weer gebruikt om het drukverschil in het systeem te berekenen.

Deze iteratie gaat door tot het verschil kleiner is dan de opgegeven maximale fout. Dan wordt een van de klepstanden veranderd en begint het hele proces van voren af aan. Op deze manier worden alle gewenste combinaties van klepstanden doorlopen (zie Figuur 3.5). Voor iedere combinatie worden de volumestromen en drukverschillen opgeslagen in een resultatenmatrix (zie Figuur 3.6).

Voor ieder element wordt, afhankelijk van de volumestroom, het drukverschil berekend volgens de vergelijkingen uit het vorige hoofdstuk. Vervolgens wordt ook het drukverschil over de "uitgaande" verbinding berekend.

Als het element een T-stuk of 3-wegklep is die een parallel schakeling (lus) vormt met een ander T-stuk of 3-wegklep, moet er geïtereerd worden. Deze iteratie verloopt vrijwel analoog aan de bovengenoemde iteratie bij de pomp. Nu wordt het drukverschil tussen de verschillende takken van de lus vergeleken. Als de fout kleiner is dan de maximale fout wordt de iteratie beëindigt en komt het element na het laatste T-stuk of 3-wegklep aan de beurt (zie Figuur 3.5).



Figuur 3.5: Stroomdiagram van het (hoofd)programma

### 3.4 Uitvoer van het programma: drukverschillen en volumestromen

#### 3.4.1 Berekende drukverschillen en volumestromen

##### Algemene opbouw van de resultatenmatrix

Met het model wordt het drukverschil over en de volumestroom door ieder element berekend. Deze resultaten worden weergegeven in de zogenaamde resultatenmatrix. Tevens wordt het drukverschil over iedere verbinding weergegeven. De volumestroom door een verbinding is gelijk aan de volumestroom door het voorgaande element. De structuur van de resultatenmatrix is in figuur 2.3 te zien. Voor iedere combinatie van klepstanden wordt zo'n resultatenmatrix gegenereerd en opgeslagen. Deze grote hoeveelheid resultaten is niet erg overzichtelijk, daarom zal één van de onderstaande deelverzamelingen van resultaten worden weergegeven in de gebruikersinterface, zie De Jong (2002).

- 1 De volumestroom door of het drukverschil over een bepaald element als functie van de klepstand(en).
- 2 De volumestromen en drukverschillen voor het totale systeem bij een bepaalde stand van de klep(pen).

	drukval element		drukval verbinding		volumestroom	
	$\Delta p_1$	$\Delta p_2$	$\Delta p_1$	$\Delta p_2$	$q_{V,1}$	$q_{V,2}$
1	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<i>i</i>	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<i>n</i>	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Figuur 3.6: Structuur van de resultatenmatrix

De gegevens van knooppunt  $j$  staan op de  $j^e$  rij. Het drukverschil over het element in het knooppunt staat in de eerste kolom. Als het element twee in- of uitgangen heeft wordt de tweede kolom gebruikt voor het drukverschil over de tweede in- of uitgang. De tweede in- of uitgang is de in- of uitgang die in de geometriematrix onder  $in_2$  of  $uit_2$  vermeldt staat.

In derde kolom wordt het drukverschil over de verbinding na de uitgang van het element weergegeven. Als het element twee uitgangen heeft wordt ook kolom vier gebruikt.

In de vijfde kolom staat de volumestroom door de uitgang van het element. Als het element twee uitgangen heeft wordt kolom vier gebruikt voor de volumestroom door de tweede uitgang.

##### Uitwerking resultatenmatrix voor een specifiek systeem

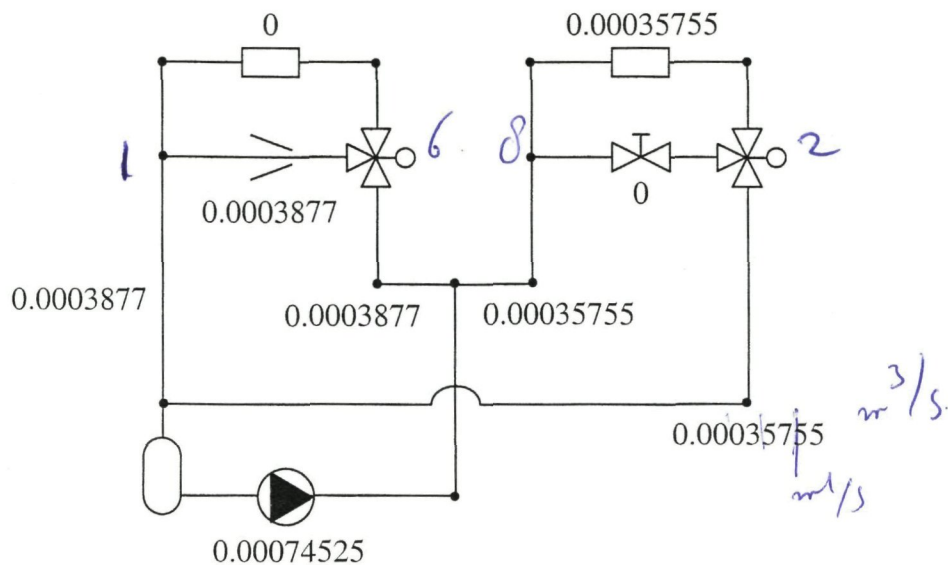
In onderstaande matrix, Tabel 3.5, worden de volumestromen en drukverschillen voor het voorbeeld systeem weergegeven. In dit geval is de 3-wegklep in 2 (zie Figuur 3.1) volledig open en die in 6 volledig dicht. De 2-wegklep in 18 is volledig geopend. De

eenheid van de drukverschillen is Pascal [Pa] en van de volumestromen kubieke meter per seconde [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]. De iteratiefout in de drukverschillen is kleiner dan 1%.

knoop- punt	element		verbinding		element / verbinding	
	$\Delta p_1$ [Pa]	$\Delta p_2$ [Pa]	$\Delta p_1$ [Pa]	$\Delta p_2$ [Pa]	$q_{v,1}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$q_{v,1}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
1	0	-5876.3	-35441	0	0.0003877	0
2	0	-6.46E+05	-30336	0	0.00035755	0
3	-2069.5	0	-17720	0	0.0003877	0
4	1.21E+06	0	-62886	0	0.00074525	0
5	-21967	-20959	-62886	0	0.00074525	0
6	0	-7.60E+05	0	-11814	0	0.0003877
7	0	0	0	0	0	0
8	0	-82.74	0	-10112	0	0.00035755
9	-1769.3	0	-50560	0	0.00035755	0
10	-1769.3	0	-10112	0	0.00035755	0
11	0	0	0	0	0	0
12	-2916.7	-1767.5	-5906.8	-5056	0.0003877	0.00035755
13	-1769.3	0	-10112	0	0.00035755	0
14	-1769.3	0	-15168	0	0.00035755	0
15	-22736	0	-31443	0	0.00074525	0
16	-7372	0	-1.47E+05	0	0.00074525	0
17	2319.5	0	-4646.6	0	0.0003877	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	-41370	0	-10112	0	0.00035755	0

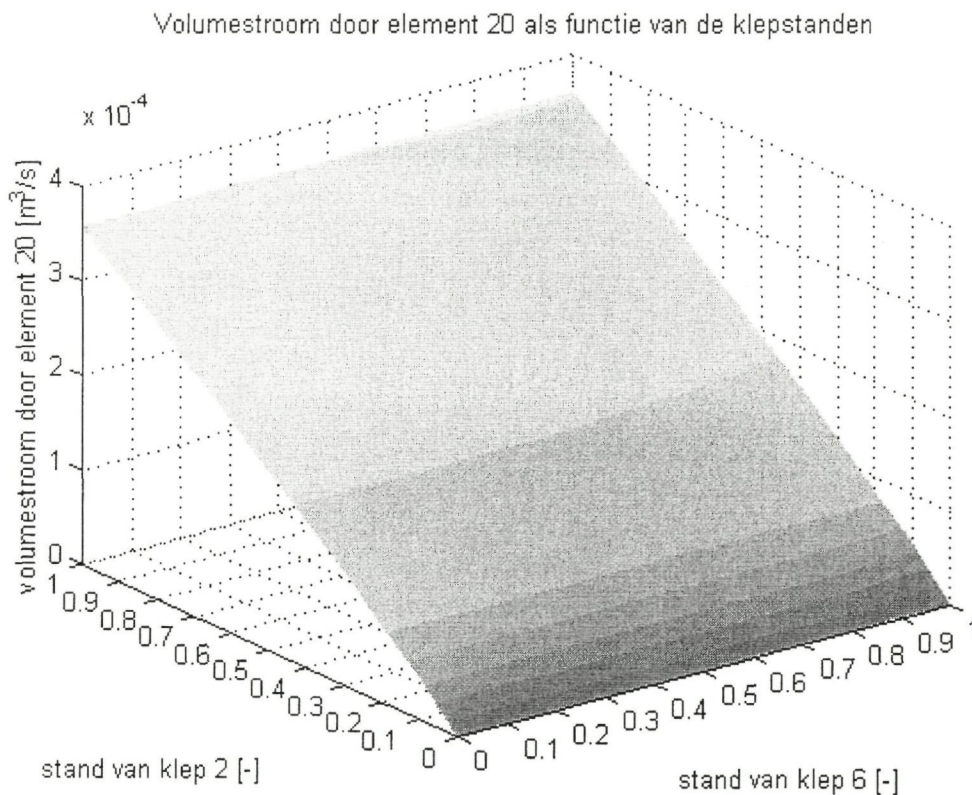
Tabel 3.5: Een resultatenmatrix van het voorbeeld systeem; klep 2 volledig open, klep 6 volledig dicht

Om de gegevens overzichtelijker te maken staan in onderstaande figuur de volumestromen in het schema van het voorbeeld systeem.



Figuur 3.7: Volumestromen [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] door voorbeeld systeem

Bij simulatie van de thermische componenten, zoals luchtverwarmer en luchtkoeler, is de volumestroom door dat component als functie van de klepstanden van belang. Hieronder is de volumestroom door element 20 (zie Figuur 3.1) als functie van de stand van klep 2 en klep 6 weergegeven.



Figuur 3.8: Volumestroom door element 20 als functie van de stand van klep 2 en 6

### 3.4.2 Nauwkeurigheid van de berekeningen

#### Algemene opbouw van de iteratiematrix

Naast de resultaten wordt er ook informatie over het iteratieproces opgeslagen in de zogenaamde iteratiematrix. De structuur van die matrix is te zien in Figuur 3.9. Voor iedere combinatie van klepstanden wordt zo'n iteratiematrix gegenereerd en opgeslagen.

	<i>numerieke oplossing</i>	
	<i>#iteraties</i>	<i>fout</i>
1	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
<i>i</i>	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
<i>n</i>	⋮	⋮

Figuur 3.9: Structuur van de iteratiematrix

De gegevens van knooppunt  $j$  staan op de  $j^e$  rij. De eerste kolom geeft indien relevant het aantal iteraties aan. Dit is het aantal keer dat het betreffende element is berekend, voordat de oplossing voldoende nauwkeurig was.

Kolom twee vermeldt de fout die uiteindelijk in het drukverschil gemaakt wordt. Deze kolommen worden alleen ingevuld bij een element dat iteratie vereist, bij voorbeeld een T-stuk, 3weg klep of een pomp.

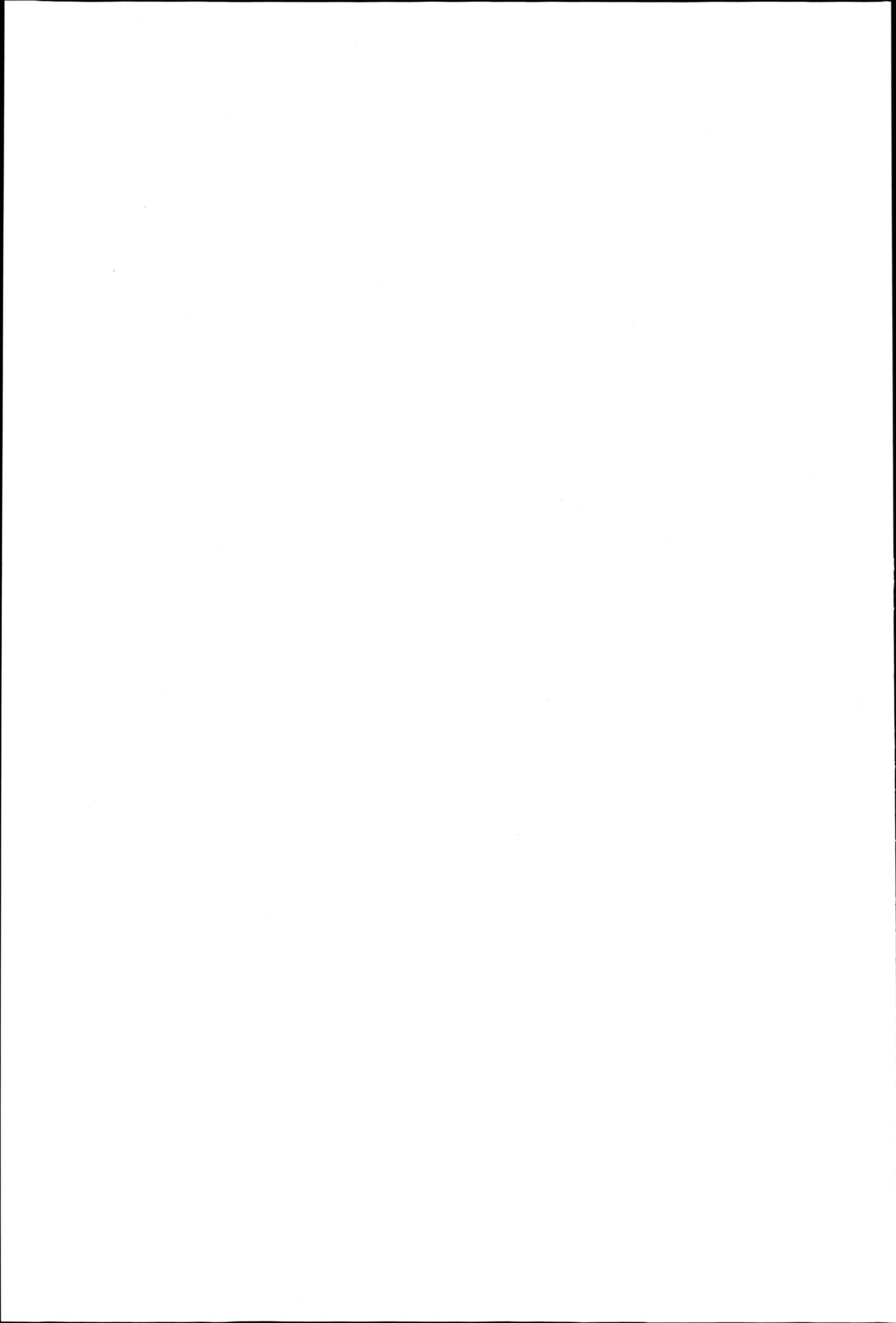
#### Uitwerking iteratiematrix voor een specifiek systeem

In onderstaande tabel (Tabel 3.6) is een iteratiematrix voor het voorbeeld systeem weer-gegeven. In dit geval staat de 3-wegklep in 2 (zie Figuur 3.1) volledig open en die in 6 volledig dicht. De 2-wegklep in 18 is volledig geopend.



knoop- punt	aantal iteraties	iteratiefout
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	9	0.008129
5	12	-0.0078312
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0

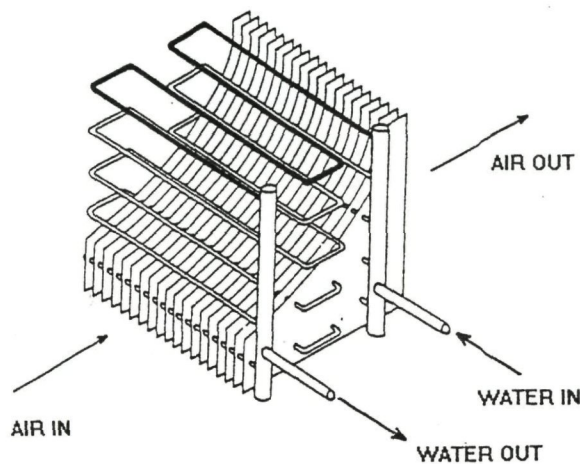
Tabel 3.6: Een iteratiematrix van het voorbeeld systeem; klep 2 volledig open, klep 6 volledig dicht



## 4 Model van de luchtverwarmer

### 4.1 Inleiding

Dit model is ontwikkeld voor luchtverwarmers die bestaan uit pijpen en uitwendige vinnen of lamellen, zie Figuur 4.1. Het model is ontwikkeld voor luchtverwarmers met kruis- of meestroom. Voor luchtverwarmers met tegenstroom moet het model worden aangepast, maar de opzet kan hetzelfde blijven.

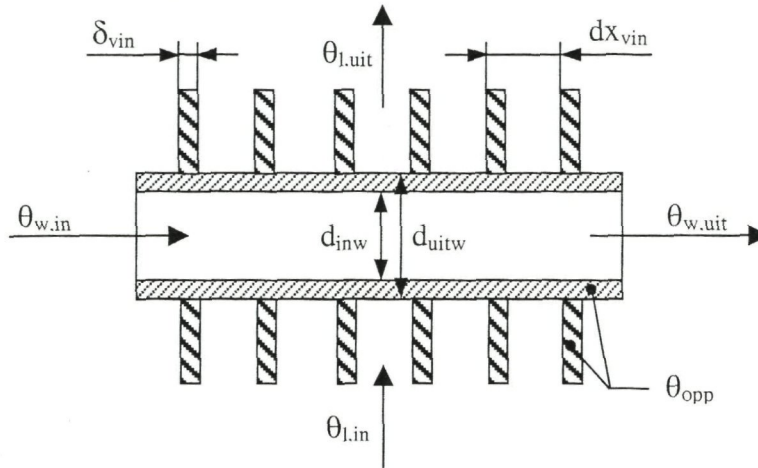


Figuur 4.1: Luchtverwarmer met pijpen en lamellen

Elke rechte pijp wordt verdeeld in een aantal elementen. Voor elk van die elementen worden de warmtebalansen opgelost. Ook voor de bochten worden de warmtebalansen opgelost. De modellen van de elementen en bochten worden gekoppeld, zodat een model voor de totale luchtverwarmer ontstaat.

### 4.2 Aannames en opzet van het model

De luchtverwarmer wordt dynamisch gemodelleerd. Het model kan op eenvoudige wijze worden verfijnd door de luchtverwarmer in meer elementen te splitsen. Langs de pijpen en lamellen van de luchtverwarmer stroomt lucht, terwijl een vloeistof (water) door de pijpen stroomt (zie Figuur 4.2). In de vergelijkingen wordt uitgegaan van water als vloeistof, maar ze gelden evengoed voor andere vloeistoffen



Figuur 4.2: Schematische weergave van een element van een luchtverwarmer

Er wordt aangenomen dat:

1. er geen warmte- en massatransport van en naar de omgeving plaatsvindt.
2. de lucht in één richting stroomt.
3. de pijpen en lamellen per element een homogene temperatuur hebben.
4. warmteoverdracht door geleiding tussen de elementen verwaarloosbaar is.
5. ieder element vloeistofzijdig een ideaal gemengd vat is.
6. de vloeistof een constante temperatuur heeft op een bepaalde dwarsdoorsnede, op een bepaalde tijd.
7. de lucht een homogene snelheid heeft over de hele luchtverwarmer.
8. de warmtecapaciteit van de lucht verwaarloosbaar is

Met deze aannames kunnen voor een element de volgende vergelijkingen worden opgesteld.

### Waterzijdig

$$\frac{\partial \theta_{w,m}}{\partial t} \cdot m_w \cdot c_{p,w} = q_{m,w} \cdot c_{p,w} \cdot (\theta_{w,in} - \theta_{w,uit}) + \alpha_{inw} \cdot A_{inw} \cdot (\theta_{opp} - \theta_{w,m})$$

- $\theta$ : temperatuur [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $t$ : tijd [s]  
 $m$ : massa [kg]  
 $c_p$ : warmtecapaciteit [J/kg/K]  
 $q_m$ : massastroom [kg/s]  
 $\alpha$ : warmteoverdrachtscoëfficiënt [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ]  
 $A$ : oppervlakte [ $\text{m}^2$ ]

onderschrift

- $w$ : water, waterzijdig  
 $m$ : gemiddelde  
 $uit$ : uitgaande stroom  
 $in$ : ingaande stroom

inw: inwendig

Met de aanname dat ieder element een ideaal gemengd vat is (aanname 5), zal de temperatuur van het uitgaande water gelijk zijn aan de gemiddelde watertemperatuur. Bovenstaande vergelijking wordt dan:

$$\frac{\partial \theta_{w,m}}{\partial t} \cdot m_w \cdot c_{p,w} = q_{m,w} \cdot c_{p,w} \cdot (\theta_{w,in} - \theta_{w,m}) + \alpha_{inw} \cdot A_{inw} \cdot (\theta_{opp} - \theta_{w,m})$$

### Warmtewisselend oppervlak: pijpen en lamellen

$$\frac{\partial \theta_{opp}}{\partial t} \cdot m_{opp} \cdot c_{p,opp} = \alpha_{inw} \cdot A_{inw} \cdot (\theta_{w,m} - \theta_{opp}) + \alpha_{uitw} \cdot A_{uitw} \cdot \phi_{opp} \cdot (\theta_{l,m} - \theta_{opp})$$

waarin  $\phi_{opp}$  wordt bepaald uit:

$$\phi_{opp} = \frac{A_{pijp} + \phi_{vin} \cdot (A_{uitw} - A_{pijp})}{A_{uitw}}$$

- A: oppervlakte [m<sup>2</sup>]  
 $\phi_{opp}$ : oppervlakterendement [-]  
 $\phi_{vin}$ : vinrendement [-]

onderschrift

- opp: warmtewisselend oppervlak  
 l: lucht, luchtzijdig  
 uitw uitwendig

### Luchtzijdig

$$\frac{\partial \theta_{l,m}}{\partial t} \cdot m_l \cdot c_{p,l} = q_{m,l} \cdot c_{p,l} \cdot (\theta_{l,in} - \theta_{l,uit}) + \alpha_{uitw} \cdot A_{uitw} \cdot \phi_{opp} \cdot (\theta_{opp} - \theta_{l,m})$$

De warmtecapaciteit van de lucht wordt verwaarloosd (aanname 8) en het tweede temperatuursverschil in de bovenstaande vergelijking wordt vervangen door het logaritmisch temperatuursverschil. Dan wordt de bovenstaande vergelijking als volgt.

$$0 = q_{m,l} \cdot c_{p,l} \cdot (\theta_{l,in} - \theta_{l,uit}) + \alpha_{uitw} \cdot A_{uitw} \cdot \phi_{opp} \cdot \left( \frac{\theta_{l,uit} - \theta_{l,in}}{\ln \frac{\theta_{opp} - \theta_{l,in}}{\theta_{opp} - \theta_{l,uit}}} \right) \Rightarrow$$

$$\ln \frac{\theta_{opp} - \theta_{l,in}}{\theta_{opp} - \theta_{l,uit}} = \frac{\alpha_{uitw} \cdot A_{uitw} \cdot \phi_{opp} \cdot (\theta_{l,in} - \theta_{l,uit})}{q_{m,l} \cdot c_{p,l} \cdot (\theta_{l,in} - \theta_{l,uit})} \Rightarrow$$

$$\theta_{opp} - \theta_{l,in} = (\theta_{opp} - \theta_{l,uit}) \cdot e^{\frac{\alpha_{uitw} \cdot A_{uitw} \cdot \phi_{opp}}{q_{m,l} \cdot c_{p,l}}} \Rightarrow$$

$$\theta_{l,uit} = \theta_{opp} + (\theta_{l,in} - \theta_{opp}) \cdot e^{-\frac{\alpha_{uitw} \cdot A_{uitw} \cdot \phi_{opp}}{q_{m,l} \cdot c_{p,l}}}$$

De vergelijkingen voor het water, het oppervlak en de lucht zijn geïmplementeerd en gesimuleerd in Simulink, een Matlab-tool. Simulink is een programma waarin op grafische wijze blokschema's kunnen worden gemaakt. Ook kan op verschillende niveaus worden gewerkt, door een blokschema samen te voegen tot één blok. Dit blok, een subsysteem, kan dan in een ander blokschema worden opgenomen. In bijlage B zijn de blokschema's voor de luchtverwarmer opgenomen.

De componentmodellen hebben dezelfde in- en uitgangsvariabelen, de zogenaamde Materie Beschrijvende Parameters (MBP). Het voordeel is, dat een model voor een luchtbehandelinginstallatie eenvoudig kan worden opgebouwd door de componentmodellen grafisch te koppelen. In de volgende paragrafen worden de parameters uit bovenstaande vergelijkingen verder uitgewerkt.

### 4.3 Berekening geometrische parameters

De volgende parameters van de geometrie moeten door de gebruiker worden opgegeven:

- $L_{ww}$ : lengte van de luchtverwarmer [m]
- $B_{ww}$ : breedte van de luchtverwarmer [m]
- $H_{ww}$ : hoogte van de luchtverwarmer [m]
- # pijpen: aantal pijpen in een pijprij waardoor vloeistof stroomt[-]
- # extra: aantal pijpen in een pijprij waardoor géén water stroomt[-]
- # rijen: aantal pijprijen in de luchtverwarmer[-]
- # circuits: aantal circuits waarover de totale ingaande volumestroom water wordt verdeeld [-]
- # elem: aantal elementen waarin een recht pijpstuk wordt verdeeld [-]
- $\Delta X_{pijp,hor}$ : horizontale hartafstand tussen pijpen [m]
- $\Delta X_{pijp,ver}$ : verticale hartafstand tussen pijpen [m]
- $dx_{vin}$ : hartafstand tussen vinnen of lamellen [m]
- $\delta_{vin}$ : dikte van de vinnen of lamellen [m]
- $d_{inw}$ : inwendige pijpdiameter [m]
- $d_{uitw}$ : uitwendige pijpdiameter [m]
- type: pijprijen in lijn of versprongen (zie figuur ???) [-]

Als de massa en het warmtewisselend oppervlak van het frame van de luchtverwarmer niet verwaarloosd mag worden, moeten ook de volgende gegevens worden gespecificeerd.

- $A_{\text{frame,tot}}$ : totale warmtewisselend frameoppervlak [ $\text{m}^2$ ]  
 $V_{\text{frame,tot}}$ : totale volume dat bij warmtewisselend frameoppervlak hoort [ $\text{m}^3$ ]  
 $c_{p,\text{frame}}$ : warmtecapaciteit van het frame [ $\text{J/kg/K}$ ]  
 $\rho_{\text{frame}}$ : dichtheid van het frame [ $\text{kg/m}^3$ ]

Uit deze invoergegevens worden andere parameters, zoals oppervlaktes en volumes berekend. Hierbij wordt uitgegaan van lamellen of vinnen met rechthoekige dwarsdoorsnede aan de luchtzijde van de pijp. Aan de waterzijde is de pijp glad. De bochtstukken worden benaderd door een recht pijpstukken met een lengte gelijk aan de hartlijn van een bochtstuk. De extra pijpen en het frame worden beschouwd als extra lamellen en worden gelijk verdeeld over alle elementen. De onderstaande parameters gelden voor één element, tenzij anders vermeld. Om de waarden voor de totale luchtverwarmer te krijgen, dienen de onderstaande waarden dus vermenigvuldigd te worden met het totaal aantal elemente.

### Geometrische parameters van de pijpen

$$A_{\text{inw, pijp}} = \frac{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot B_{\text{WW}} \cdot \pi \cdot d_{\text{inw}}}{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot \#elem} = \frac{B_{\text{WW}} \cdot \pi \cdot d_{\text{inw}}}{\#elem}$$

- $A$ : oppervlakte [ $\text{m}^2$ ]  
 $\#rijen$ : aantal rijpijpen in de luchtverwarmer [-]  
 $\#pijpen$ : aantal pijpen in een rij [-]  
 $\#elem$ : aantal elementen waarin een recht pijpstuk wordt verdeeld [-]  
 $B_{\text{WW}}$ : breedte van de luchtverwarmer [m]  
 $d$ : pijpdiameter [m]

onderschrift

inw: inwendig

WW: betrekking hebbend op warmtewisselaar (luchtverwarmer)

$$A_{\text{uitw, pijp}} = \frac{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot \left( B_{\text{WW}} - \frac{B_{\text{WW}}}{dx_{\text{vin}}} \cdot \delta_{\text{vin}} \right) \cdot \pi \cdot d_{\text{uitw}}}{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot \#elem} = \frac{B_{\text{WW}} \cdot \left( 1 - \frac{\delta_{\text{vin}}}{dx_{\text{vin}}} \right) \cdot \pi \cdot d_{\text{uitw}}}{\#elem}$$

- $\delta_{\text{vin}}$ : dikte van de vinnen of lamellen [m]  
 $dx_{\text{vin}}$ : hartafstand tussen vinnen of lamellen [m]

onderschrift

uitw: uitwendig

$$V_{pijp} = \frac{\#rijen \cdot (\#pijpen + \#extra) \cdot B_{ww} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_{uitw}^2 - d_{inw}^2)}{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot \#elem}$$

$$= \frac{(\#pijpen + \#extra) \cdot B_{ww} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_{uitw}^2 - d_{inw}^2)}{\#pijpen \cdot \#elem}$$

# extra: aantal pijpen in een pijprij waardoor géén water stroomt[-]

$$V_{w,pijp} = \frac{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot B_{ww} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{inw}^2}{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot \#elem} = \frac{B_{ww} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{inw}^2}{\#elem}$$

onderschrift

w: water, waterzijdig

### Geometrische parameters van de extra pijpen

$$A_{uitw,extra} = \frac{\#rijen \cdot \#extra \cdot \left( B_{ww} - \frac{B_{ww}}{dx_{vin}} \cdot \delta_{vin} \right) \cdot \pi \cdot d_{uitw}}{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot \#elem} = \frac{\#extra \cdot \left( B_{ww} - \frac{B_{ww}}{dx_{vin}} \cdot \delta_{vin} \right) \cdot \pi \cdot d_{uitw}}{\#pijpen \cdot \#elem}$$

### Geometrische parameters van de vinnen of lamellen

$$V_{vin} = \frac{\delta_{vin} \cdot \frac{B_{ww}}{dx_{vin}} \cdot \left( L_{ww} \cdot H_{ww} - \#rijen \cdot (\#pijpen + \#extra) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{uitw}^2 \right)}{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot \#elem}$$

$$A_{vin} = \frac{2 \cdot \frac{B_{ww}}{dx_{vin}} \cdot \left( L_{ww} \cdot H_{ww} - \#rijen \cdot (\#pijpen + \#extra) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{uitw}^2 \right)}{\#rijen \cdot \#pijpen \cdot \#elem}$$

L: lengte [m]

H: hoogte [m]

### Afgeleide geometrische parameters

$$A_{inw} = A_{inw,pijp}$$

$$A_{uitw} = A_{uitw,pijp} + A_{uitw,extra} + A_{vin} + A_{frame}$$

$$m_{opp} \cdot c_{p,opp} = m_{pijp} \cdot c_{p,pijp} + m_{vin} \cdot c_{p,vin} + m_{frame} \cdot c_{p,frame}$$



m: massa [kg]

$c_p$ : warmtecapaciteit [J/kg/K]

De volgende parameters hebben betrekking op de verwamer als geheel.

$$A_{doorstr,WW} = H_{WW} - (\#pijpen + \#extra) \cdot B_{WW} \cdot d_{uitv} - \frac{B_{WW}}{dx_{vin}} \cdot \delta_{vin} \cdot (H_{WW} - (\#pijpen + \#extra) \cdot d_{uitv})$$

$$= B_{WW} \cdot \left[ H_{WW} - \#pijpen \cdot d_{uitv} - \frac{\delta_{vin}}{dx_{vin}} \cdot (H_{WW} - (\#pijpen + \#extra) \cdot d_{uitv}) \right]$$

$$D_{h,WW} = \frac{4 \cdot A_{doorstr,l} \cdot L_{WW}}{A_{uitw,tot}}$$

#### 4.4 Berekening van de stoffeigenschappen

Onder stoffeigenschappen worden fysische grootheden verstaan, zoals dichtheid, viscositeit, enzovoorts. De stoffeigenschappen van water worden verondersteld alleen afhankelijk te zijn van de temperatuur. Die van lucht kunnen van zowel de temperatuur als de absolute vochtigheid afhangen. De stoffeigenschappen van het pijp-, vin- en framemateriaal worden constant verondersteld. Als er in plaats van water een ander medium wordt gekozen, moeten de vergelijkingen voor de stoffeigenschappen handmatig worden veranderd.

##### Stof eigenschappen lucht

De eigenschappen van lucht in het temperatuurgebied van  $-40$  tot  $100$  °C worden beschreven door onderstaande vergelijkingen.

$$\rho_l = 2,167 \cdot \frac{1 + x_l}{(\theta_l + 273,15) \cdot (0,622 + x_l)} \cdot \frac{p_l}{1000} \quad [\text{ISSO-17, (1993)}]$$

$\rho$ : dichtheid [kg/m<sup>3</sup>]

$x$ : absolute vochtigheid [kg/kg]

$\theta$ : temperatuur [°C]

$p$ : druk [Pa]

onderschrift

$l$ : lucht, luchtzijdig

$$\mu_l = \mu_0 \cdot \left( \frac{\theta_l + 273,15}{273,15} \right)^{3/2} \cdot \left( \frac{273,15 + C_s}{\theta_l + 273,15 + C_s} \right) \quad [\text{ISSO-17 (1993)}]$$

$\mu$ : dynamische viscositeit [Pa\*s]

$\mu_0$ : dynamische viscositeit bij 0 °C (=  $17,10 \cdot 10^{-6}$  Pa\*s)

$C_s$ : constante van Sutherland (= 111)

$$c_{p,l} = 1000 \cdot (1,0063 + 2,3214 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_l + 3,2738 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_l^2) \quad [\text{ISSO-17 (1993)}]$$

$c_p$ : warmtecapaciteit [J/kg/K]

$$\lambda_l = 24,524 \cdot 10^{-3} - 7,546 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_l - 2,723 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_l^2 \quad [\text{ISSO-17 (1993)}]$$

$\lambda$ : warmtegeleidingscoëfficiënt [W/m/K]

### Stof eigenschappen water

De relaties voor water worden verkregen door de data uit VDI Wärmeatlas (1988) te benaderen door onderstaande polynomen. Ze zijn geldig van 0 tot 95 °C.

$$\rho_w = 1000,6 - 6,1818 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_w + 3,7289 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w^2$$

$\rho$ : dichtheid [kg/m<sup>3</sup>]

$\theta$ : temperatuur [°C]

onderschrift

w: water, waterzijdig

$$\mu_w = 1,7517 \cdot 10^{-3} - 4,7514 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_w + 6,0188 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_w^2 - 2,7943 \cdot 10^{-9} \cdot \theta_w^3$$

$\mu$ : dynamische viscositeit [Pa\*s]

$$c_{p,w} = 4206,6 + 1,2532 \cdot \theta_w + 1,3967 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_w^2$$

$c_p$ : warmtecapaciteit [J/kg/K]

$$\lambda_w = 0,56297 + 1,9746 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w - 8,4204 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_w^2$$

$\lambda$ : warmtegeleidingscoëfficiënt [W/m/K]

## 4.5 Definitie van de dimensieloze kentallen

De dimensieloze kentallen die betrekking hebben op de waterzijde zijn de getallen van Reynolds, Nusselt en Prandtl.

$$\text{Re}_w = \frac{\rho_w \cdot \bar{v}_w \cdot d_{inw}}{\mu_w} = \frac{4 \cdot q_{m,w}}{\pi \cdot d_{inw} \cdot \mu_w}$$

Re: getal van Reynolds [-]

$\rho$ : dichtheid [kg/m<sup>3</sup>]

$\bar{v}$ : gemiddelde snelheid [m/s]

d: diameter [m]

$\mu$ : dynamische viscositeit [Pa\*s]

$q_m$ : massastroom [kg/s]

onderschrift

w: water, waterzijdig

inw: inwendig

$$Nu_w = \frac{\alpha_{inw} \cdot d_{inw}}{\lambda_w}$$

Nu: getal van Nusselt [-]

$\alpha$ : warmteoverdrachtscoëfficiënt [ $W/m^2/K$ ]

$\lambda$ : warmtegeleidingscoëfficiënt [ $W/m/K$ ]

$$Pr_w = \frac{c_{p,w} \cdot \mu_w}{\lambda_w}$$

Pr: getal van Prandtl [-]

$c_p$ : warmtecapaciteit [ $J/kg/K$ ]

De getallen van Reynolds, Stanton en Prandtl zijn voor de luchtzijde van belang.

$$Re_l = \frac{q_{m,l} \cdot D_{h,WW}}{A_{doorstr,WW} \cdot \mu_l}$$

$D_h$ : hydraulische diameter van de luchtverwarmer [m]

A: oppervlakte [ $m^2$ ]

onderschrift

doorstr: doorstroom

WW: betrekking hebbend op warmtewisselaar (luchtverwarmer)

$$St_l = \frac{\alpha_l}{\rho_l \cdot c_{p,l} \cdot \bar{v}_l} = \frac{\alpha_l \cdot A_{doorstr,WW}}{c_{p,l} \cdot q_{m,l}}$$

$$Pr_l = \frac{c_{p,l} \cdot \mu_l}{\lambda_l}$$

## 4.6 Berekening van het vinrendement

De temperatuur in de vinnen of lamellen zal afnemen naarmate de afstand tot de pijpen kleiner wordt. In de warmtebalansen (zie paragraaf 4.2) wordt gewerkt met een homogene temperatuur voor het oppervlak. Om het temperatuursverloop toch mee te nemen in de berekeningen wordt het vinrendement geïntroduceerd. Het vinrendement dient dus als correctie voor het variërende temperatuurverschil tussen de vinnen of lamellen en de lucht. Het vinrendement wordt berekend met:

$$\phi_{vin} = \frac{\tanh(m \cdot r_{uitw} \cdot \Phi) \cdot \cos(0,1 \cdot m \cdot r_{uitw} \cdot \Phi)}{m \cdot r_{uitw} \cdot \Phi}$$

[Hong (1996)]

waarin:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_l}{\lambda_{vin} \cdot \delta_{vin}}}$$

$$\Phi = \left( \frac{r_{eq,vin}}{r_{uitw}} - 1 \right) \cdot \left[ 1 + 0,35 \cdot \ln \left( \frac{r_{eq,vin}}{r_{uitw}} \right) \right]$$

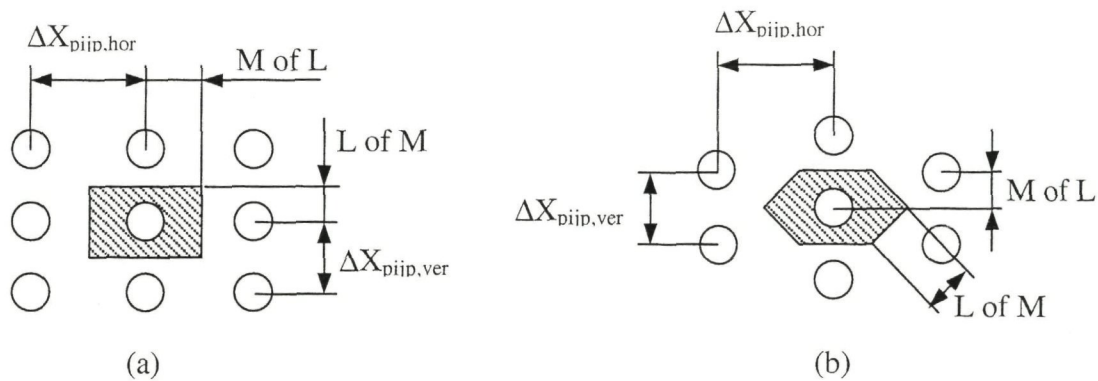
$$r_{uitw} = \frac{d_{uitw}}{2}$$

- $\phi_{vin}$ : vinrendement [-]
- r: straal [m]
- $\alpha$ : warmteoverdrachtscoëfficiënt [ $W/m^2/K$ ]
- $\lambda$ : warmtegeleidingscoëfficiënt [ $W/m/K$ ]
- $\delta_{vin}$ : dikte van de vinnen of lamellen [m]
- d: diameter [m]

onderschrift

- l: lucht, luchtzijdig
- eq: equivalente
- uitw: uitwendig

Voor de term  $\frac{r_{eq,vin}}{r_{uitw}}$  wordt afhankelijk van de schikking van de pijpen (zie Figuur 4.3) een andere uitdrukking gebruikt.



Figuur 4.3: Schikking van de pijpen: pijprijsen in lijn (a), pijprijsen versprongen (b)

Als de pijprijsen in lijn (zie Figuur 4.3a) staan ten opzichte van elkaar wordt de volgende uitdrukking gebruikt.

$$\frac{r_{eq,vin}}{r_{uitw}} = 1,28 \cdot \frac{M}{r_{uitw}} \cdot \sqrt{\frac{L}{M} - 0,2} \quad [\text{ASHRAE (1997)}]$$

waarin

$$L = \max \left( \frac{\Delta X_{\text{pijp,hor}}}{2}, \frac{\Delta X_{\text{pijp,ver}}}{2} \right)$$

$$M = \min \left( \frac{\Delta X_{\text{pijp,hor}}}{2}, \frac{\Delta X_{\text{pijp,ver}}}{2} \right)$$

L, M: karakteristieke afstanden [m]

$\Delta X_{\text{pijp,hor}}$ : horizontale hartafstand tussen pijpen [m]

$\Delta X_{\text{pijp,ver}}$ : verticale hartafstand tussen pijpen [m]

Bij versprongen pijprijen geldt:

$$\frac{r_{eq,vin}}{r_{uitw}} = 1,27 \cdot \frac{M}{r_{uitw}} \cdot \sqrt{\frac{L}{M} - 0,3} \quad [\text{ASHRAE (1997)}]$$

waarin

$$L = \max \left( \frac{1}{2} \sqrt{\Delta X_{\text{pijp,hor}}^2 + \left( \frac{\Delta X_{\text{pijp,ver}}}{2} \right)^2}, \frac{\Delta X_{\text{pijp,ver}}}{2} \right)$$

$$M = \min \left( \frac{1}{2} \sqrt{\Delta X_{\text{pijp,hor}}^2 + \left( \frac{\Delta X_{\text{pijp,ver}}}{2} \right)^2}, \frac{\Delta X_{\text{pijp,ver}}}{2} \right)$$

#### 4.7 Berekening van de warmteoverdrachtscoëfficiënten ( $\alpha_w, \alpha_l$ )

Er zijn in de literatuur vele (empirische) relaties te vinden voor zowel de water- als luchtzijdige warmteoverdrachtscoëfficiënt. In deze paragraaf worden degene die voor de luchtverwarmer gebruikt worden uitgewerkt. Vooral luchtzijdig geven de verschillende relaties een grote spreiding in uitkomsten te zien. De relatie die hier is gebruikt, is afgeleid met behulp van meetresultaten voor een aantal luchtverwarmers. Deze relatie blijkt de warmteoverdrachtscoëfficiënt goed te voorspellen. Bovengenoemde relatie luidt:

$$St_1 \cdot Pr_1^{2/3} = C_1 \cdot Re_1^{C_2} \quad [\text{Chuah (1998)}]$$

waarin

$$C_1 = 0,159 \cdot \left( \frac{\delta_{vin}}{h_{eq,vin}} \right)^{0,141} \cdot \left( \frac{D_{h,WW}}{\delta_{vin}} \right)^{0,065}$$

$$C_2 = -0,323 \cdot \left( \frac{\delta_{vin}}{h_{eq,vin}} \right)^{0,049} \cdot \left( \frac{dx_{vin}}{\delta_{vin}} \right)^{0,077} \cdot \left( \frac{2 \cdot r_{eq,vin}}{\Delta X_{\text{pijp,hor}}} \right)^{0,549}$$

met

$$h_{eq,vin} = r_{eq,vin} - \frac{d_{uitw}}{2}$$

Opm:  $r_{eq,vin}$  is hetzelfde als bij het vinrendement

- St: getal van Stanton [-]
- Pr: getal van Prandtl [-]
- Re: getal van Reynolds [-]
- $C_1, C_2$ : coëfficiënt [-]
- $\delta_{vin}$ : dikte van de vinnen of lamellen [m]
- h: hoogte [m]
- d: diameter [m]
- $dx_{vin}$ : hartafstand tussen vinnen of lamellen [m]
- r: straal [m]
- $\Delta X_{pijp,hor}$ : horizontale hartafstand tussen pijpen [m]

onderschrift

- uitw uitwendig
- eq: equivalente

De waterzijdige warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt met de volgende formules berekend.

$$Nu_{w,L} = 1,86 \cdot \left( Re_w \cdot Pr_w \cdot \frac{d_{inw}}{L} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_w}{\mu_{w,opp}} \right)^{0,14} \cdot 1,79, \quad Re_w \leq 2300 \text{ [zie subparagraaf 5.4.2]}$$

$$Nu_w = \frac{Nu_{w,L} \cdot (3500 - Re_w) + Nu_{w,T} \cdot (Re_w - 2300)}{3500 - 2300}, \quad 2300 < Re_w < 3500$$

$$Nu_{w,T} = \frac{\frac{f}{8} \cdot Re_w \cdot Pr_w}{1,07 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr_w^{2/3} - 1)} \cdot \left( \frac{\mu_w}{\mu_{w,opp}} \right)^{0,25}, \quad Re_w \geq 3500 \quad [\text{Holman (1997)}]$$

waarin

$$f = (1,82 \cdot 10^{\log Re_w} - 1,64)^{-2}$$

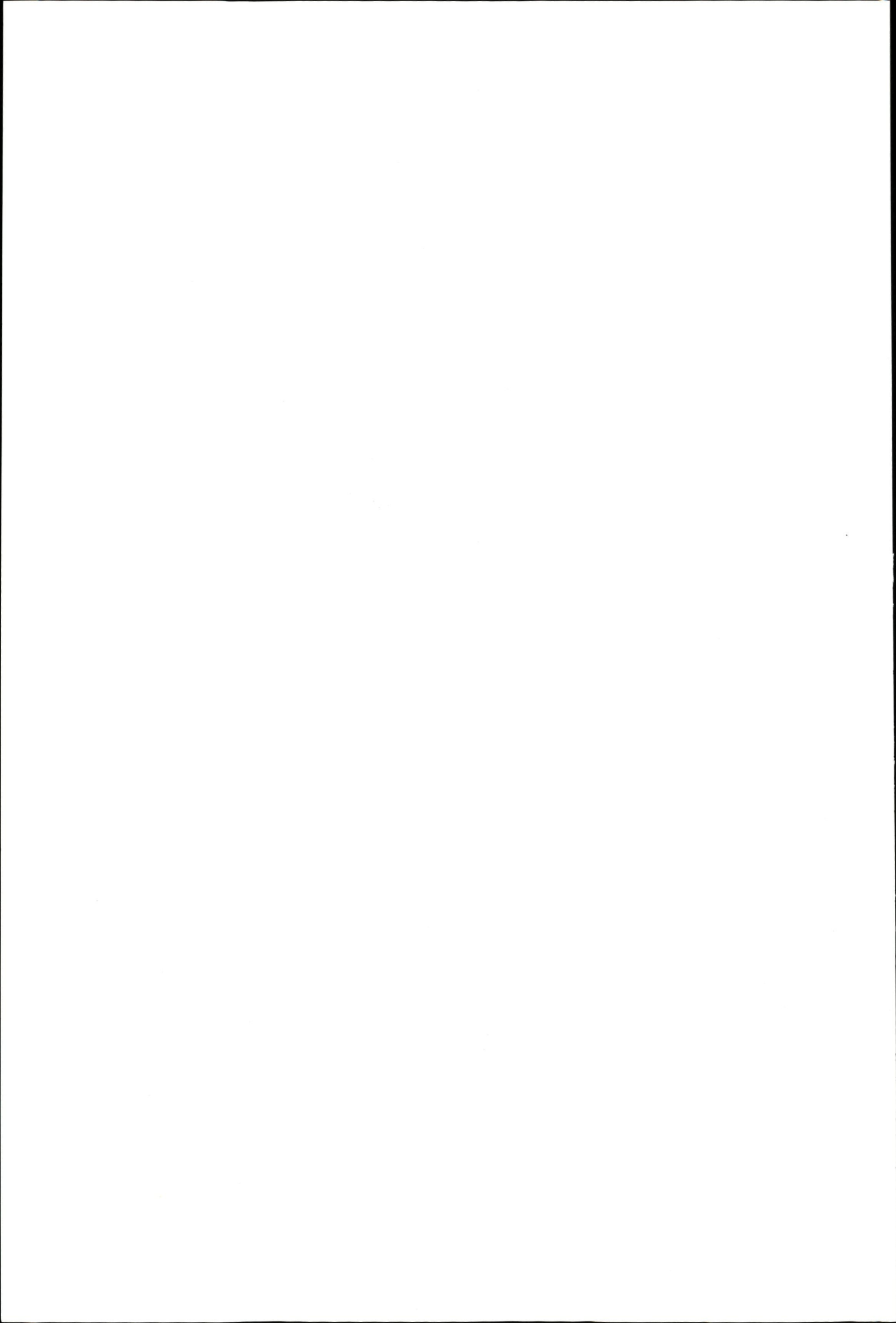
- Nu: getal van Nusselt [-]
- Re: getal van Reynolds [-]
- Pr: getal van Prandtl [-]
- d: diameter [m]
- L: lengte van de luchtverwarmer [m]
- $\mu$ : viscositeit [Pa\*s]
- f: frictiefactor [-]

onderschrift

- w: water, waterzijdig
- inw: inwendig
- opp: warmtewisselend oppervlak

L: laminair  
T: turbulent

- De getallen van Stanton, Nusselt, Reynolds en Prandtl zijn gedefinieerd zoals in paragraaf 4.5 is beschreven. Uit het getal van Stanton of Nusselt kan de luchtzijdige respectievelijk waterzijdige warmteoverdrachtscoëfficiënt worden bepaald.





## **5 Beschrijving van de testopstelling en validatie van de modellen**

Om de modellen, uitgewerkt in voorgaande hoofdstukken, te valideren zijn metingen verricht aan een luchtbehandelinginstallatie. Deze luchtbehandelinginstallatie is onderdeel van een testopstelling in het laboratorium van de sectie Koudetechniek en Klimaatregeling.

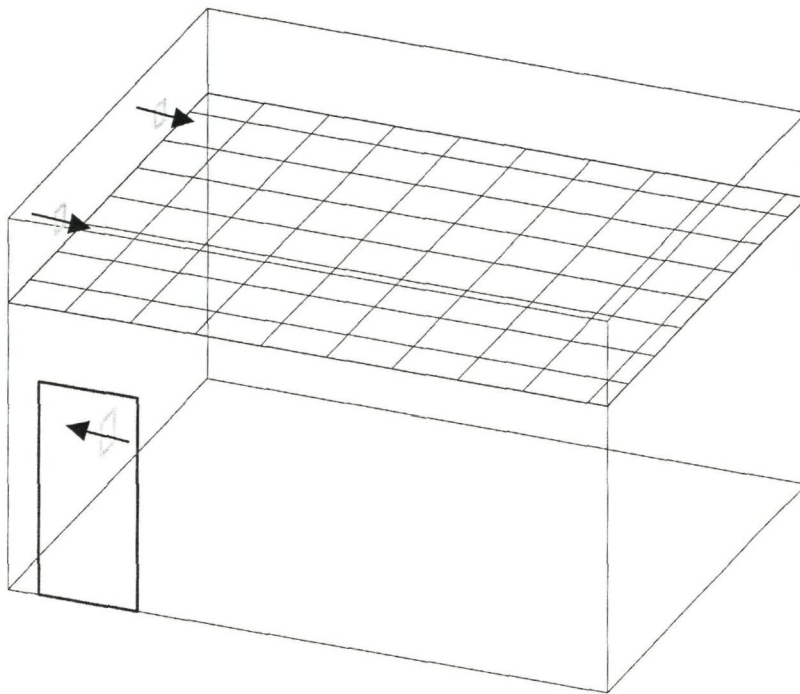
In dit hoofdstuk zal eerst de testopstelling worden beschreven. Vervolgens wordt de validatie van de modellen voor het hydraulische systeem en de luchtverwarmer beschreven. Tot slot komen enkele aandachtspunten aan bod, die tijdens de ontwikkeling van de modellen naar voren zijn gekomen.

### **5.1 Algemene beschrijving testopstelling**

De testopstelling bestaat uit drie onderdelen: de klimaatkamer, de luchtbehandelinginstallatie en het gebouwbeheersysteem (GBS; BMS in Engels). Het binnenklimaat in de klimaatkamer wordt gerealiseerd door lucht uit de luchtbehandelinginstallatie. In de klimaatkamer worden de omstandigheden van een kantoor nagebootst. In de luchtbehandelinginstallatie wordt de lucht verwarmd, gekoeld en/of bevochtigd, afhankelijk van de gewenste condities in de klimaatkamer. Het GBS verzamelt de meetdata, verzendt de regelsignalen en zal, in geval van een fout, de fout detecteren en diagnosticeren.

#### **5.1.1 Klimaatkamer**

De klimaatkamer (zie Figuur 5.1) heeft de volgende afmetingen: 5,5x4x3,5m (LxBxH). De vloer, de wanden en het plafond zijn voorzien van een polystyreen of polyurethaan isolatie. De warmtedoorgangscoefficiënt voor deze onderdelen is kleiner dan  $0,14\text{W/m}^2\text{K}$ . De deur heeft drievoudig glas met een warmtedoorgangscoefficiënt kleiner dan  $1,0\text{W/m}^2\text{K}$ .



Figuur 5.1: Schematische voorstelling van de klimaatkamer, Yu (2001c)

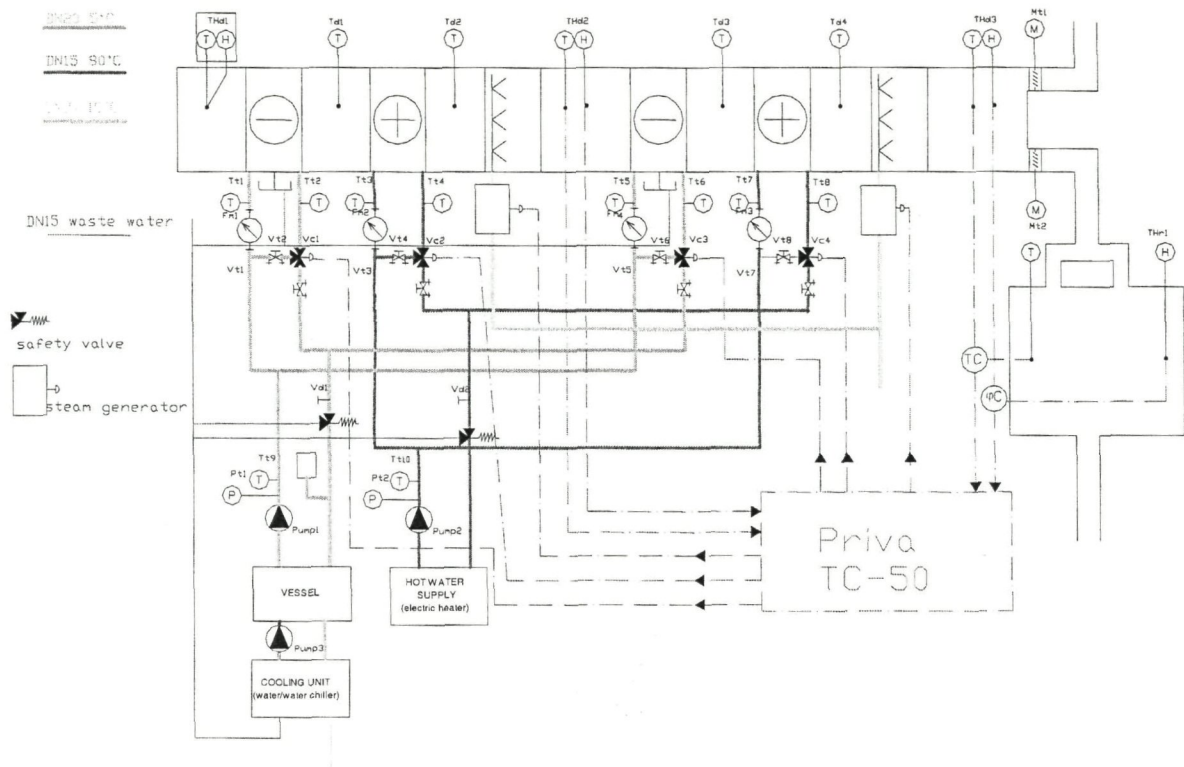
In de klimaatkamer is een verlaagd systeemplafond aangebracht, waarin twee waterbestendige lichtarmaturen zijn geplaatst. Deze armaturen geven ieder 58W aan warmte af. Daarnaast zijn er twee inblaasroosters (0,6x0,6m) in plafond gemonteerd.

De lucht wordt vanuit de luchtbehandelinginstallatie met behulp van luchtkanalen naar de inblaasroosters getransporteerd. De luchtkanalen gaan door twee openingen in de wand van de klimaatkamer. De retourlucht wordt via de opening onderaan de wand van de klimaatkamer afgeblazen in het laboratorium.

De geschatte ontwerpkoellast voor deze klimaatkamer is 1000W. Als de temperatuur van de inblaaslucht maximaal 5°C lager mag zijn dan temperatuur van de vertrekluft, komt dit neer op een luchthoeveelheid van 600m<sup>3</sup>/h.

### 5.1.2 Luchtbehandelinginstallatie

De luchtbehandelinginstallatie van Holland Heating is opgebouwd uit twee identieke delen. Met behulp van de componenten in het primaire deel worden de buitenluchtcondities nagebootst. Dit deel wordt verder aangeduid met emulator. Om energie te besparen worden niet de werkelijke buitenluchtcondities, maar de condities na de (fictieve) mengsectie gesimuleerd. In een wintersituatie wordt een temperatuur van 10°C en een relatieve vochtigheid van 83% gerealiseerd. In een zomersituatie is dat 28°C en 43%. Het secundaire deel, de eigenlijke luchtbehandelinginstallatie, is een installatie zoals die ook in een gebouw gebruikt wordt. Dit deel brengt de lucht op de gewenste inblaascondities.



Figuur 5.2: Schematische weergave van de testopstelling, Yu (2001c)

De beide delen bestaan, in de stromingsrichting van de lucht gezien, uit een luchtverwarmer, een luchtkoeler en een stoombevochtiger (zie Figuur 5.2). Voor het primaire deel bevinden zich nog een registerklep en een zakkenfilter. Na het secundaire deel komt de ventilator en twee registerkleppen.

Door de luchtbehandelinginstallatie stroomt een grotere luchthoeveelheid ( $1600\text{m}^3/\text{h}$ ) dan realistisch is voor de klimaatkamer ( $600\text{m}^3/\text{h}$ ). Vandaar dat een gedeelte van de lucht wordt afgeblazen naar het laboratorium. Bij het toepassen van een kleinere luchtbehandelinginstallatie zou de overeenkomst tussen een gangbare installatie en de installatie van de testopstelling te klein zijn.

### 5.1.3 Warmte- en koudeopwekking

Het hete water ( $80^\circ\text{C}$ ) dat naar de luchtverwarmers stroomt komt uit een buffervat met een inhoud van 500l. In dit vat zijn twee elektrische gloeispiralen gemonteerd, die het water verwarmen. Deze elektrische spiralen hebben samen een vermogen van 18kW. Het koude water ( $5^\circ\text{C}$ ) voor de luchtkoelers komt uit een vat van 500l. Dit water wordt gekoeld door een Carrier koelmachine met een koelvermogen van 14,6kW.

### 5.1.4 Hydraulisch systeem en regeling

De watervoerende componenten zijn verbonden door stalen leidingen. Het koud en warmwatersysteem zijn voorzien van isolatie. Om de capaciteit van de luchtverwarmers en luchtkoelers te regelen wordt de volumestroom door de batterijen gevarieerd. Dit wordt gedaan door de stand van de 3-wegkleppen elektronisch te variëren. Om de componenten te regelen worden de luchtcondities na de componenten gemeten door elektronische sensoren. Verder worden de volumestromen gemeten (zie Figuur 5.2). Alle

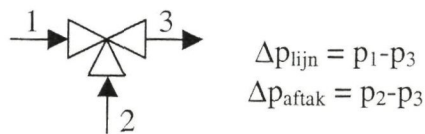
meetgegevens worden verwerkt door software van Priva. Die software stuurt ook de regelorganen aan. De grafische gebruikersschil rondom Priva heet InsiteView en is ontwikkeld door Kropman.

Voor meer informatie over de ontwerpcondities wordt verwezen naar rapport K 301 (Yu, 2001). De documentatie verstrekt door Kropman bevat specificaties van de componenten. De werking van InsiteView wordt toegelicht in de handleiding van Kropman.

## 5.2 Validatie hydraulisch systeem

Zoals in hoofdstuk 4 beschreven, is het hydraulische systeem statisch gemodelleerd. Het model van de testopstelling is ingevoerd (zie bijlage C) en gesimuleerd met behulp van Matlab. Om dit model te valideren zijn de volgende variabelen gemeten als functie van de klepstanden:

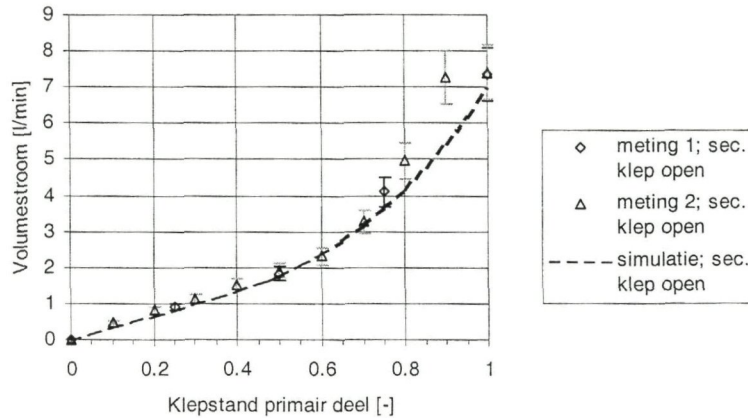
1. Het drukverschil over de 'lijn' van de 3-wegklep (zie Figuur 5.3) die de luchtverwarmer regelt.
2. Het drukverschil over de 'aftak' van de 3-wegklep (zie Figuur 5.3) die de luchtverwarmer regelt.
3. De volumestroom door de luchtverwarmer.
4. Het drukverschil over de pomp.



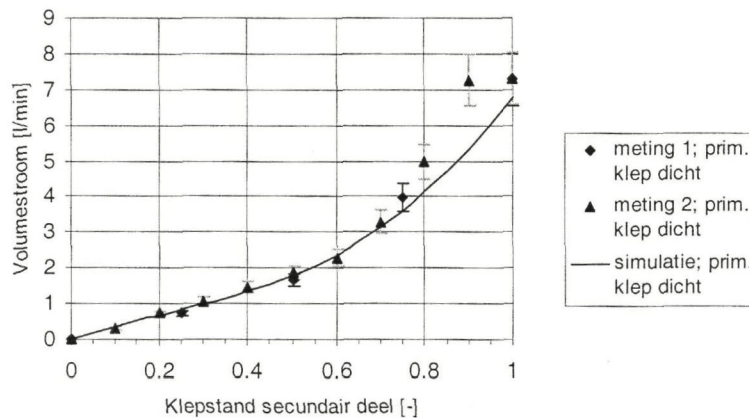
Figuur 5.3: Uitleg bij begrippen 'lijn' en 'aftak'

De genoemde variabelen zijn gemeten voor de luchtverwarmer van zowel het primaire als het secundaire deel van de luchtbehandelinginstallatie. De drukverschillen en volumestromen zijn gemeten met elektronische sensoren, waarvan de waarde handmatig is geregistreerd. Voor de specificaties van de sensoren wordt verwezen naar bijlage D. Hieronder worden de resultaten van de metingen vergeleken met het model. In sommige figuren zijn bij de meetpunten foutbalken aangegeven. Deze foutbalken geven de meetwaarde plus of min 10% aan en vergemakkelijken vergelijking van de metingen met de simulatie.

## 5.2.1 Volumestroom door de luchtverwarmer: metingen en simulatie

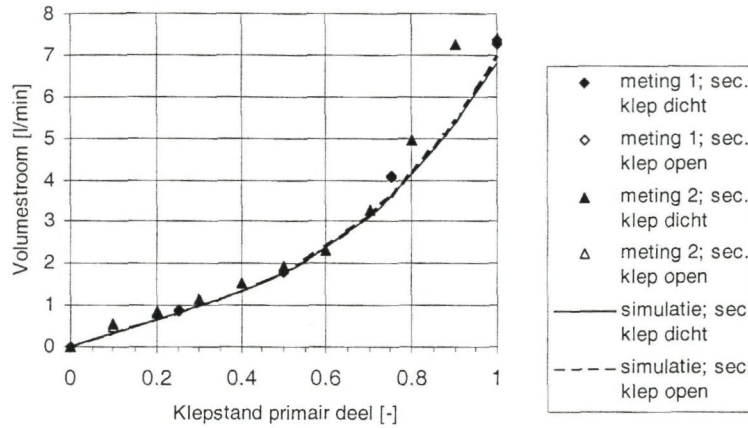


Figuur 5.4: Volumestroom door primaire luchtverwarmer als functie van klepstand klep secundaire deel open

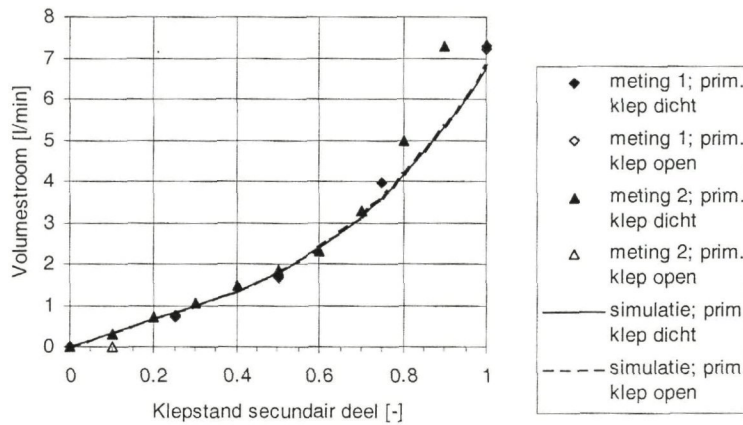


Figuur 5.5: Volumestroom door secundaire luchtverwarmer als functie van klepstand klep primair deel dicht

In Figuur 5.4 en Figuur 5.5 is te zien dat de volumestromen door de luchtverwarmers goed worden beschreven tot een klepstand van circa 0,75. Daarna wordt het verschil tussen de simulatie en de metingen groter dan 10% (zie foutbalken in de figuur). Dit wordt veroorzaakt door de karakteristiek van de 3-wegklep. De 3-wegklep heeft namelijk een lineaire karakteristiek, maar de servomotor die de spindel verstelt, wordt zo aangestuurd dat de 3-wegklep een exponentiële karakteristiek krijgt. Uit de metingen (zie Figuur 5.4) en observaties blijkt echter dat een stap van 80 naar 90% opening een veel grotere verplaatsing van de spindel geeft dan een stap van 90 naar 100%. Terwijl volgens de exponentiële karakteristiek de stap van 90 naar 100% open groter zou moeten zijn.



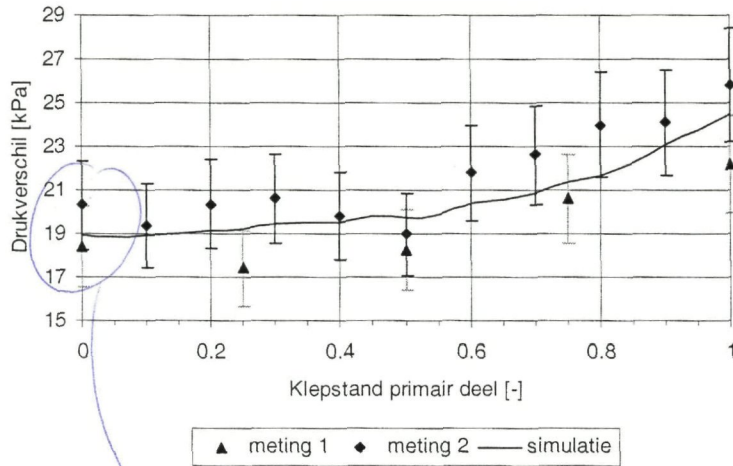
Figuur 5.6: Volumestroom door primaire luchtverwarmer als functie van klepstand



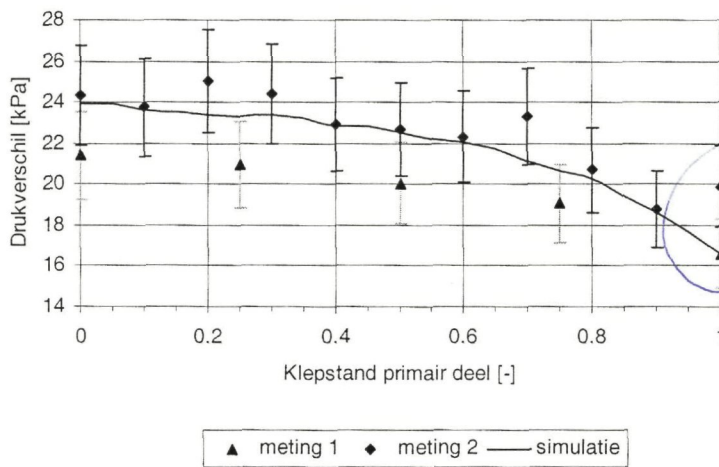
Figuur 5.7: Volumestroom door secundaire luchtverwarmer als functie van klepstand

De invloed van de op de volumestroom door de primaire luchtverwarmer is onderzocht. De volumestroom is gemeten terwijl stond. Hetzelfde is gedaan met de 3-wegklep van de secundaire luchtverwarmer dicht. Zowel de simulatie als de metingen laten zien dat de stand van de 3-wegklep van de secundaire luchtverwarmer weinig invloed heeft op de volumestroom door de primaire luchtverwarmer. Dit geldt ook voor de secundaire luchtverwarmer en de 3-wegklep van de primaire luchtverwarmer. Vergelijk de getrokken lijnen in Figuur 5.6 en Figuur 5.7 met de streeplijnen en de dichte symbolen met de open symbolen.

### 5.2.2 Drukverschillen over 3-wegklep: metingen en simulatie

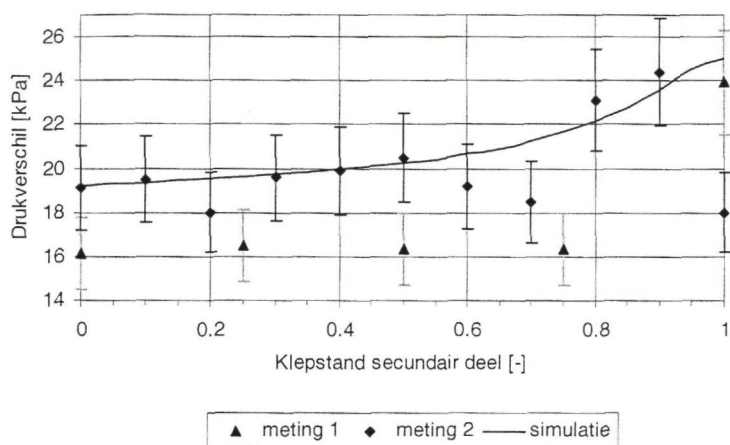


Figuur 5.8: Drukverschil over 'aftak' 3-wegklep primaire deel als functie van klepstand klep secundaire deel dicht

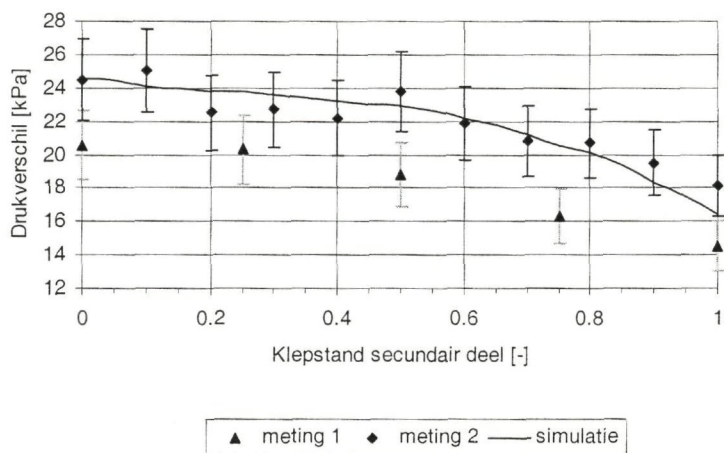


2 kPa  $\approx$  20cm  
positieve  
meting  
3w. klep.  
16

Figuur 5.9: Drukverschil over 'lijn' 3-wegklep primaire deel als functie van klepstand klep secundaire deel dicht



Figuur 5.10: Drukverschil over 'aftak' 3-wegklep secundaire deel als functie van klepstand; klep primair deel open



Figuur 5.11: Drukverschil over 'lijn' 3-wegklep secundaire deel als functie van klepstand; klep primair deel open

Uit Figuur 5.8 tot en met Figuur 5.11 blijkt dat het verschil tussen de meetwaarde en de simulatie voor de meeste punten minder dan 10% bedraagt. Verder is te zien dat meting 1 en 2 onderling veel verschillen. De grote spreiding in de meetwaarden kan twee oorzaken hebben. Ten eerste fluctueert de prestatie van de pomp nogal, namelijk  $\pm 6\%$  (volgens catalogus Grundfos). Deze fluctuaties beïnvloeden ook de gemeten drukverschillen. Het tweede punt is de eventuele aanwezigheid van lucht in het systeem. Hoewel het systeem goed ontlucht is, is het mogelijk dat er ergens in het systeem toch nog een beetje lucht aanwezig is. Deze lucht geeft een fluctuatie in de meting als ze langs een meetpunt of door de pomp stroomt.

Voor een tabellarisch overzicht van alle meetwaarden wordt verwezen naar bijlage E.



### 5.2.3 Conclusie van de validatie van het hydraulische systeem

De berekening van de volumestromen door de luchtverwarmers met behulp van het model is voldoende nauwkeurig voor klepstanden kleiner dan 75%. Bij grotere openingen wordt het verschil tussen de metingen en de simulatie groter dan 10%, hetgeen voor toepassing in een foutendetectie en –diagnose (FDD) systeem te groot is. De fabrikant van de 3-wegkleppen dient de juiste karakteristiek te geven en het model moet worden aangepast om deze karakteristiek in te kunnen voeren. Het model zal dan zeer waarschijnlijk goede resultaten geven voor het hele regelbereik van de 3-wegklep.

Door de grote spreiding (zie Figuur 5.8 tot en met Figuur 5.11) is het moeilijk om een goede uitspraak te doen over de nauwkeurigheid van het model. De simulatie lijkt de metingen toch redelijk te benaderen, maar om hierover uitsluitsel te geven dienen meer metingen te worden verricht. Het voorgaande heeft echter geen directe consequenties voor het FDD systeem, omdat het drukverschil niet gebruikt wordt voor de FDD.

Het valt op dat de effecten die grote spreiding in de meetwaarden van het drukverschil veroorzaken geen invloed hebben op de volumestroom. Dit is gunstig voor de FDD, omdat daarbij de volumestroom door de luchtverwarmer van belang is.

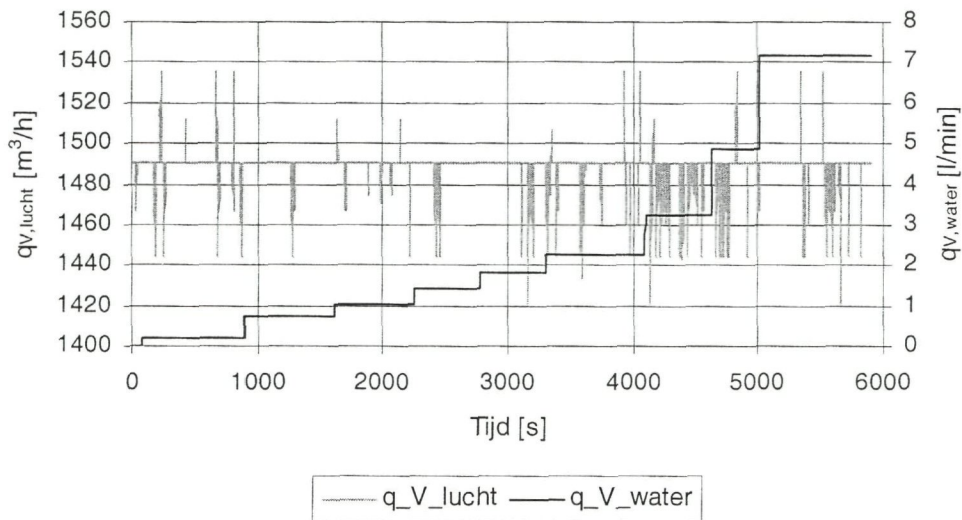
## 5.3 Validatie van het model van de luchtverwarmer

De luchtverwarmer is dynamisch gemodelleerd, zoals in hoofdstuk 4 is beschreven. Het model van de luchtverwarmer is ingevoerd (zie bijlage B) en gesimuleerd met behulp van Simulink. Iedere pijp van de luchtverwarmer is verdeeld in acht elementen. Voor de totale luchtverwarmer komt dat neer op 32 elementen. Voor de validatie van het model van de luchtverwarmer is gebruik gemaakt van meetgegevens van de luchtverwarmer in het secundaire deel van de luchtbehandelinginstallatie. De volgende variabelen zijn gemeten als functie van de klepstand en de tijd:

1. watertemperatuur aan in- en uitgang luchtverwarmer
2. luchttemperatuur aan in- en uitgang luchtverwarmer
3. Volumestroom water door luchtverwarmer
4. Volumestroom lucht door luchtverwarmer

De gemeten temperaturen aan de ingang en de volumestromen vormen de invoer voor het model, zodat het model de temperaturen aan de uitgang kan berekenen.

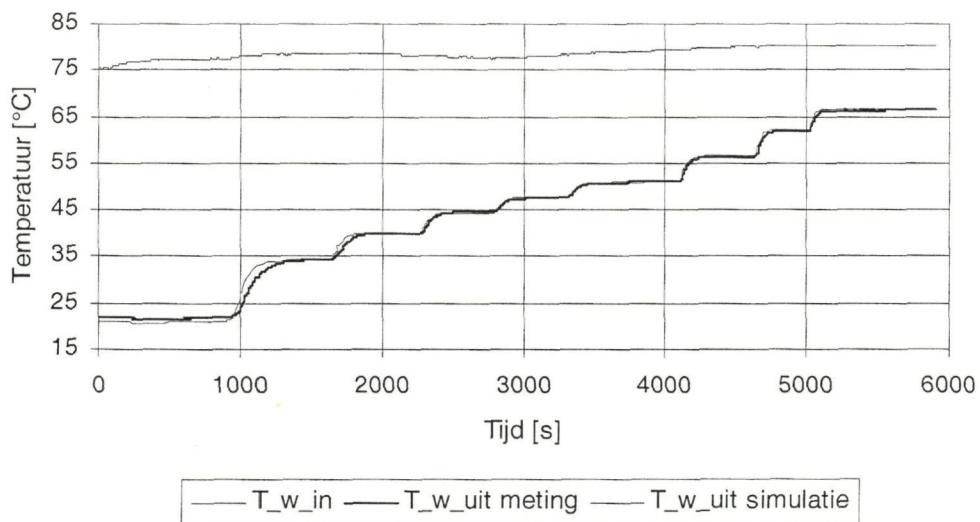
De temperaturen zijn gemeten met Ni 1000 elementen, de volumestromen door elektronische sensoren. De meetwaarden zijn door een PC geregistreerd. Voor de specificaties van de sensoren wordt verwezen naar bijlage D. Hieronder worden de resultaten van de metingen vergeleken met het model.



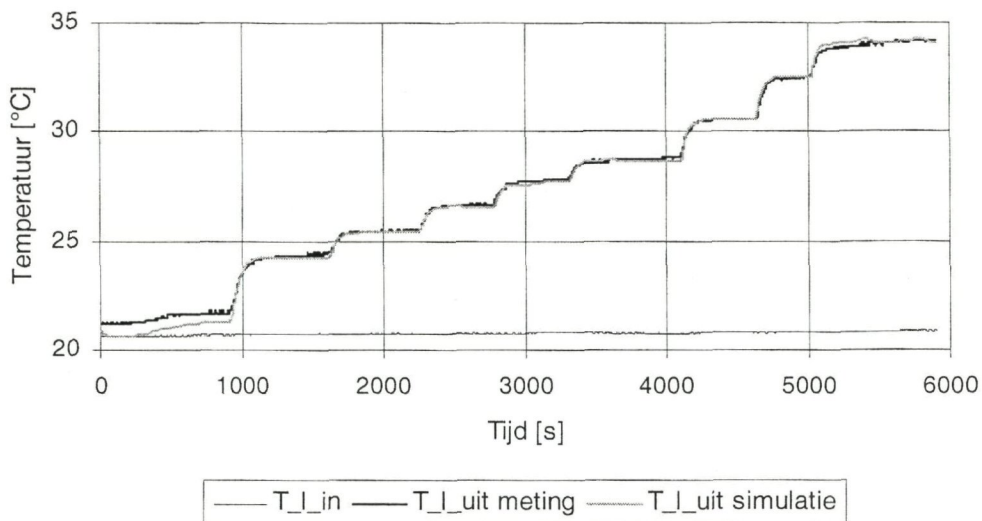
Figuur 5.12: Volumestromen door de secundaire luchtverwarmer als functie van de tijd

De volumestroom water ( $q_{V, \text{water}}$ ) door de luchtverwarmer van het secundaire deel wordt gevarieerd door de stand van de 3-wegklep met stappen van 10% te verhogen (zie Figuur 5.12). De volumestroom lucht ( $q_{V, \text{constant}}$ ) is afgezien van ruis constant (zie Figuur 5.12).

### 5.3.1 Temperaturen aan de uitgang van de luchtverwarmer: meting en simulatie



Figuur 5.13: Watertemperatuur aan in- en uitgang secundaire luchtverwarmer als functie van tijd



Figuur 5.14: Luchttemperatuur aan in- en uitgang secundaire luchtverwarmer als functie van tijd

De watertemperatuur aan de uitgang van de luchtverwarmer heeft een zeer kleine statische fout (zie Figuur 5.13). Voor een klepstand van 20% of groter is de fout kleiner dan  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Het dynamische gedrag wordt minder goed benaderd. Het model reageert sneller dan de werkelijke luchtverwarmer.

Een mogelijke reden voor het verschil tussen de meting en de simulatie is het verwaarlozen van de geleiding tussen de elementen waarin de luchtverwarmer wordt opgesplitst. Ook het opsplitsen zelf heeft effect op het dynamisch gedrag van het model, zie subparagraaf 5.4.1. Daarnaast is ook de natuurlijke convectie voor de bochten verwaarloosd. Wat betekent dat het uitwendige oppervlak van de bochten geen warmte uitwisselt met de stilstaande, omringende lucht. Tot slot draagt verwaarlozing van de warmteoverdracht door straling aan het uitwendige oppervlak van de luchtverwarmer bij tot de fout.

Voor de luchttemperatuur aan de uitgang is zowel het dynamische als het statische gedrag van het model in overeenstemming met de werkelijke luchtverwarmer (zie Figuur 5.14). Opvallend is dat het dynamische gedrag van het model luchtzijdig beter is dan waterzijdig. De reden hiervoor is de grote tijdsconstante van de temperatuursensor (20s). Dat zorgt ervoor dat de dynamica van de luchtverwarmer wordt bepaald door het dynamische gedrag van de temperatuursensor. Dit geldt voor zowel het model als de werkelijke luchtverwarmer.

Een mogelijke reden voor het verschil tussen de gemeten uitgaande luchttemperatuur en de simulatie is een meetfout die bij het meten van de volumestroom lucht wordt gemaakt. De nauwkeurigheid van de volumestroomsensor bedraagt namelijk  $\pm 5\%$ .

### 5.3.2 Conclusie van de validatie van de luchtverwarmer

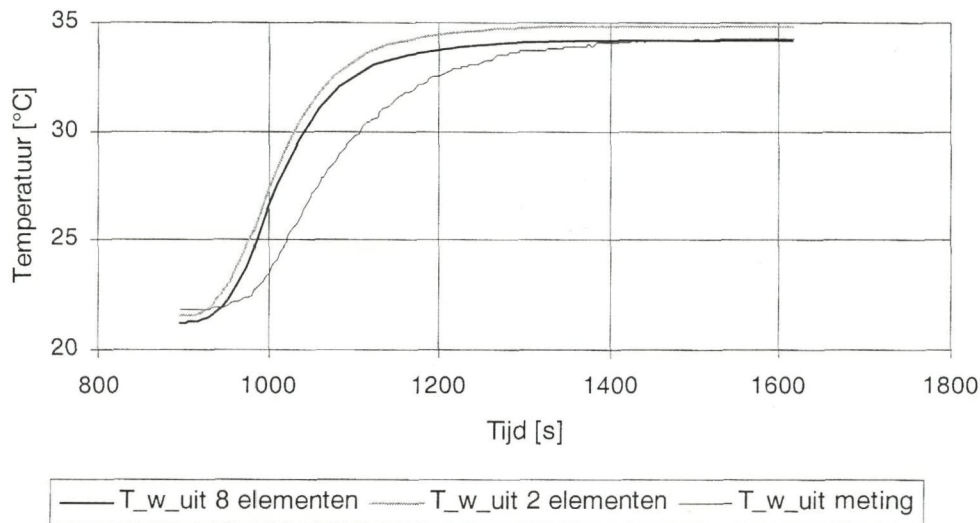
Het verschil tussen de meting en het model is voor alle klepstanden van 20% of groter voldoende klein om een goed FDD systeem te kunnen ontwikkelen. De grotere fout bij klepstanden kleiner dan 20% is in de praktijk geen probleem, omdat dat gebied toch moet worden gemedan vanwege de slechte regelbaarheid van de 3-wegklep in dat gebied.

## 5.4 Aandachtspunten bij de ontwikkeling van de modellen

Bij het ontwikkelen van de modellen voor de luchtverwarmer en het hydraulische systeem kwamen er enkele punten naar voren die wellicht interessant zijn bij verdere studie. Hieronder worden deze aandachtspunten beschreven.

### 5.4.1 Invloed van gemiddelde watertemperatuur op statische en dynamisch gedrag luchtverwarmer

Een probleem bij het opstellen van de waterzijdige warmtebalans voor een element is de definitie van de gemiddelde temperatuur van het water ( $\theta_{w,m}$ ). Dit is de temperatuur waarbij de warmte-uitwisseling met het oppervlak plaatsvindt.



Figuur 5.15: Watertemperatuur aan uitgang voor 2 en 8 elementen per pijp als functie van tijd

De meest logische keus is om voor die temperatuur het rekenkundig gemiddelde te nemen van temperatuur aan de in- en uitgang. Dit levert echter het probleem op dat bij een stapvormige verandering van de ingaande temperatuur, de uitgaande temperatuur dezelfde stap in tegenovergestelde richting maakt. Dat is niet realistisch, omdat in werkelijkheid de uitgaande temperatuur in dezelfde richting zal veranderen als de ingaande temperatuur.

Een ander optie is om een element te beschouwen als een ideaal gemengd vat. Dit betekent dat de uitgaande en de gemiddelde watertemperatuur aan elkaar gelijk zijn. Het verschil tussen de uitgaande en de gemiddelde watertemperatuur wordt steeds kleiner, naarmate de elementen kleiner worden gemaakt. Aan de andere kant hebben kleinere elementen ook een kleinere tijdsconstante. Grote statische nauwkeurigheid vraagt kleine elementen, terwijl grote dynamische nauwkeurigheid grote elementen vraagt (Figuur 5.15). De grootte van de elementen moet dus zodanig worden gekozen, dat zowel het statische als het dynamische gedrag acceptabel is.

### 5.4.2 Relatie voor waterzijdige warmteoverdrachtsoëfficiënt bij laminaire stroming

Een ander probleem is het vinden van een goede relatie voor de waterzijdige warmteoverdrachtscoëfficiënt. In de handboeken van Kays (1993) en Kakaç(1987) worden vele

relaties genoemd. Het probleem met deze relaties is echter dat ze zijn bepaald voor een rechte pijp, zodat ze niet zonder meer toegepast kunnen worden voor een verwarmingsbatterij. In iedere bocht wordt het water gemengd, zodat het radiale temperatuurprofiel in de pijp opnieuw moet worden opgebouwd.

Eén van de relaties die bij de situatie van de verwarmingsbatterij in de buurt komt is:

$$\text{Nu}_{w,L} = 1,86 \cdot \left( \text{Re}_w \cdot \text{Pr}_w \cdot \frac{d_{inw}}{L} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_w}{\mu_{w,opp}} \right)^{0,14} \quad [\text{Holman (1997)}], (1)$$

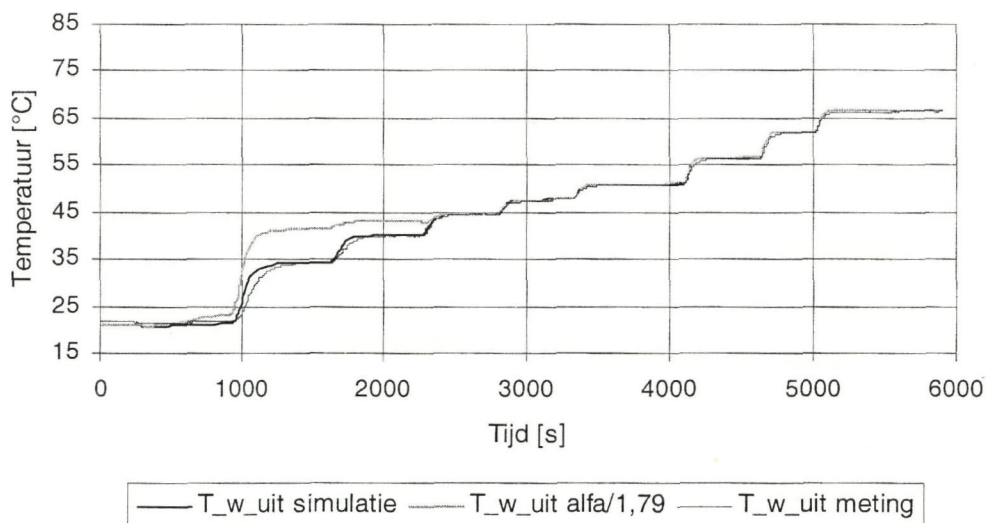
- Nu: getal van Nusselt [-]  
 Re: getal van Reynolds [-]  
 Pr: getal van Prandtl [-]  
 d: diameter [m]  
 L: lengte van de luchtverwarmer [m]  
 $\mu$ : viscositeit [Pa\*s]

*lerste v. 1 pijp*  
*- profiel opbouw*

onderschrift

- w: water, waterzijdig  
 inw: inwendig  
 opp: warmtewisselend oppervlak  
 L: laminair

Deze relatie geeft echter in dit geval een te lage warmteoverdrachtscoëfficiënt aan. Als deze warmteoverdrachtscoëfficiënt met 1,79 wordt vermenigvuldigd, wordt het totale verschil tussen meting en simulatie het kleinst. In Figuur 5.16 zijn deze twee gevallen samen met de meting weergegeven.



Figuur 5.16: Watertemperaturen aan uitgang met en zonder correctie van laminaire warmteoverdrachtscoëfficiënt

### **5.4.3 Gebruik van S-function noodzakelijk om lange simulatietijd te voorkomen**

De lange simulatietijd van het model was een probleem dat moest worden opgelost. Het foutendetectie en -diagnose (FDD) systeem vraagt immers om een korte simulatietijd. De simulatietijd voor het model van de luchtverwarmer bedroeg circa 20 minuten, als iedere pijp wordt verdeeld in acht elementen. Door het Simulink model om te zetten in een zogenaamde S-function kan de simulatietijd worden teruggebracht naar 10 seconden.

Een S-function is een in C-code geschreven programma die hetzelfde model in compactere vorm representeert. Bij een S-function is de structuur van het model niet meer grafisch zichtbaar, zoals bij een Simulink model. Een S-function heeft dezelfde in- en uitgangen als het model waarvan het is afgeleid en kan op dezelfde wijze worden gekoppeld als Simulink-blokken. Het genereren van de S-function duurt ook nog wel enkele minuten, maar hoeft slechts één keer te worden uitgevoerd.

### **5.4.4 invoergegevens bij automatische generatie**

Als op basis van de specificaties van de installateur en de fabrikanten automatisch een model gegenereerd wordt, moet die informatie wel betrouwbaar en gemakkelijk toegankelijk zijn. Tijdens deze opdracht is gebleken dat de betrouwbaarheid van de specificaties in enkele gevallen te wensen overlaat.

Ten eerste stemden de geometrie voor het hydraulische systeem op de CAD tekeningen van de installateur niet overeen met de testopstelling. Ten tweede week het gedrag van de 3-wegkleppen af van het gedrag dat door de fabrikant werd opgegeven. Verbetering van de betrouwbaarheid van de specificaties is nodig om automatische generatie van modellen mogelijk te maken.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

#### **Model hydraulisch systeem benadert volumestroom goed**

Uit de validatie volgt dat het model voor het hydraulische systeem de volumestroom door de luchtverwarmer goed benadert. De voorwaarde hierbij is dat voor de 3-wegkleppen die de volumestroom regelen de juiste karakteristiek wordt ingevoerd. Bij de toegepaste karakteristiek is het model goed tot en met een klepopening van 75%.

#### **Model hydraulisch systeem benadert drukverschil redelijk goed**

De meetwaarden van de drukverschillen worden door het model redelijk goed benaderd, meestal binnen tien procent. Verder is geconstateerd dat er een grote spreiding is bij het meten van de drukverschillen in tegenstelling tot de meting van de volumestromen. Waarschijnlijk wordt dat veroorzaakt door fluctuaties van de pomp.

#### **Grote flexibiliteit tot lange simulatietijden**

Een groot voordeel van beide modellen is de grote mate van flexibiliteit. Het gevolg van die flexibiliteit is een lange simulatietijd. Bij het hydraulische systeem bedraagt de simulatietijd 15 minuten bij een systeem van 52 elementen. Voor de ontwikkeling van een foutendetectie en -diagnose (FDD) systeem is dat echter geen probleem, omdat het hydraulische systeem slechts één maal gesimuleerd hoeft te worden. Bij het model van de luchtverwarmer is de simulatietijd van 20 minuten naar 10 seconden gebracht, door het model om te zetten in een S-function.

#### **Model luchtverwarmer geeft goede resultaten**

Na vergelijking van de metingen met de simulatie kan geconcludeerd worden dat het model zowel het dynamische als het statische gedrag van de luchtverwarmer goed benadert. Het dynamische gedrag van het model zou nog verder kunnen worden verbeterd.

#### **Afstellen parameters noodzakelijk bij model luchtverwarmer**

Om een goed model voor de luchtverwarmer te krijgen, moest de waterzijdige warmteoverdrachtscoëfficiënt bij laminaire stroming worden aangepast aan de hand van de metingen. Waarschijnlijk zal dat ook nodig zijn voor, nog te ontwikkelen, modellen voor luchtkoelers, bevochtigers enzovoorts. Automatisering van de afstelling van modellen is noodzakelijk voor automatische generatie van modellen.

#### **Correcte specificaties niet vanzelfsprekend**

Om automatisch modellen te kunnen genereren moeten de specificaties van de installateur en de fabrikant betrouwbaar zijn. Dit bleek niet het geval te zijn voor de klepkarakteristiek van de 3-wegklep en de geometrie voor het hydraulische systeem. Verbetering van de betrouwbaarheid van de specificaties is nodig om automatische generatie van modellen mogelijk te maken.

De modellen van het hydraulische systeem en de luchtverwarmer zijn goed toe te passen in een FDD systeem, maar moeten niet worden gezien als afgerond. Ze zijn een eerste aanzet tot de automatische generatie van modellen, voor onder meer FDD.

## 6.2 Aanbevelingen

Het beschrijven van de goede karakteristiek voor de 3-wegklep dient nog te gebeuren. Tevens moet het model van het hydraulische systeem worden aangepast, zodat deze karakteristiek kan worden ingevoerd in het model.

Om een goede uitspraak over de nauwkeurigheid van het model van het hydraulische systeem ten aanzien van het drukverschil te kunnen doen, zullen meer metingen gedaan moeten worden.

Het model van de luchtverwarmer moet nog wel worden aangepast om ook luchtverwarmers met tegenstroom goed te kunnen simuleren. Een goede aanpak is wellicht om de warmtebalansen in toestandsvorm te schrijven.

Meer metingen aan andere typen luchtverwarmers zijn nodig om de algemene toepasbaarheid van dit model verder te valideren.

Er moeten ook modellen worden ontwikkeld voor andere componenten in de luchtbehandelinginstallatie, zoals luchtkoelers, bevochtigers. Deze modellen moeten voldoende nauwkeurig en algemeen toepasbaar zijn.

De afstelling van modellen dient geautomatiseerd te worden om automatische generatie van modellen mogelijk te maken. Die automatische afstelling verandert bepaalde parameters, in een iteratief proces. Dat gebeurt door metingen te vergelijken met de simulatie van het model.



## Literatuur

- ASHRAE *Handbook, Fundamentals*. SI-version. Atlanta: ASHRAE, Inc., 1997.
- Chow, T.T., 'Chilled water cooling coil models from empirical to fundamental'. *Numerical heat transfer*, Vol. 32, No. 1 (1997), p. 63-83.
- Chuah, Y.K., e.a., 'Experiments on the dehumidification performance of a finned tube heat exchanger'. *International journal of HVAC & R Research*, Vol. 4, No. 2 (1998), p. 167-178.
- Fox, R.W., en A.T. McDonald, *Introduction to fluid mechanics*. SI version. 4<sup>th</sup> edition. New York: Wiley, 1994.
- Holman, J.P., *Heat Transfer*. 8<sup>e</sup> druk. New York: Mc Graw-Hill, Inc., 1997.
- Hong, K.T., en R.L. Webb, 'Calculation of fin efficiency for wet and dry fins'. *International journal of HVAC & R Research*, Vol. 2, No 1 (1996), p. 27-42.
- ISSO-publikatie 17. deel 2. Rotterdam: Stichting ISSO, 1993.
- ISSO-publikatie 44. Rotterdam: Stichting ISSO, 1998.
- Jong, W. de, *Modelvorming van luchtbehandelingsinstallaties voor foutendetectie* (KK 1166). Delft: sectie Koudetechniek en Klimaatregeling, subfaculteit Werktuigbouwkunde, Technische Universiteit Delft, 2001.
- Jong, W. de, *Handleiding bij gebruikersinterface hydraulisch systeem* (KK 1173). Delft: sectie Koudetechniek en Klimaatregeling, subfaculteit Werktuigbouwkunde, Technische Universiteit Delft, 2002.
- Kakaç, S., e.a., *Handbook of single-phase convective heat transfer*. New York: Wiley, 1987.
- Kays, W.M., en M.E. Crawford, *Convective heat and mass transfer*. 3<sup>rd</sup> edition. New York: Mc Graw-Hill, Inc., 1993.
- Mirth, D.R., en S. Ramadhyani, 'Performance of chilled-water cooling coils'. *International journal of HVAC & R Research*, Vol. 1, No. 2 (1995), p. 160-172.
- Riahy, S., en A.H.C. van Paassen, 'Modelgebaseerde foutendetectie en diagnose systeem voor een kantoorvertrek'. *TVVL magazine*, 11 (2000), p. 68-73.
- VDI/VDE 2173: *Stromungstechnische Kenngrößen von Stellventilen und deren Bestimmung*. Düsseldorf: VDI, 1962
- VDI *Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*. fünfte Auflage. Düsseldorf: VDI, 1988
- Yu, B., en A.H.C. van Paassen, 'State-of-the-art of energy fault diagnosis for building

HVAC system'. In: *Proceedings of international symposium on air conditioning in high rise buildings, 2000*. Shanghai: China architecture and building press, 2000, p. 162-167.

Yu, B. e.a., 'General modeling for model-based FDD on building HVAC system'. In: *Proceedings of the 7<sup>th</sup> representatives of European heating and ventilation associations, world congress, Clima 2000*. Napols: 2001a, CD-rom.

Yu, B., en A.H.C. van Paassen, 'Modeling with Simulink and Bond Graph method for fault detection in air-conditioned room'. In: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> international conference on indoor air quality, ventilation & energy conservation in buildings*. Vol. 2. Changsha: City University of Hong Kong, 2001b, p. 1163-1170.

Yu, B., *Test-facility of FDD on building HVAC system, testfaciliteit project (K 301)*. Delft: sectie Koudetechniek en Klimaatregeling, subfaculteit Werktuigbouwkunde, Technische Universiteit Delft, 2001c

## Bijlage A: Matlab-code voor hydraulisch systeem

In deze bijlage is de Matlab-programmacode opgenomen die het model van het hydraulische systeem vormt. De code is onderverdeeld naar component. Tekst voorafgegaan door een %-teken is toelichting bij de code.

### A.1 Code van 'TotaleSysteem'

```
global B D E K N FOUT ITT max_fout j_pomp j_regelklep x dx resultaat iteratie stop

Gegevens; %Lees de gegevens in
Initieer2; %Geeft bepaalde variabelen beginwaarde

j_1e=j_regelklep(1); %Eerste regelklep qua index
aantal_regelklep=length(j_regelklep); %Aantal regelkleppen
aantal_enen=0; %Aantal regelklep met klepstand 1
x(j_regelklep)=0; %Startwaarden van de regelkleppen
x(j_1e)=-dx; %Startwaarde van de eerste regelklep
b=0; %Teller van het aantal klepstandcombinaties
tot_aant_stappen=(1/dx+1)^2;
stop=0;
wacht=waitbar(0,'Even geduld a.u.b...','CreateCancelBtn','Stop_berekening');
set(wacht,'WindowStyle','normal');
set(wacht,'Name','De berekening wordt uitgevoerd');
Kinderen_wacht=get(wacht,'Children');
set(Kinderen_wacht(2),'String','Stop');

%Vergroot de stand van de eerste regelklep met de stapgrootte totdat die 1 is.
%Vergroot vervolgens de stand van de eerstvolgende regelklep met stand ongelijk aan 1 met de
% stapgrootte.

%Herhaal bovenstaande totdat alle regelkleppen stand 1 hebben.
while aantal_enen~=aantal_regelklep & ~stop %Terwijl niet alle regelkleppen in stand 1
    B=sparse(B); %Sla de matrix op in compacte vorm
    D=sparse(D); %Sla de matrix op in compacte vorm
    b=b+1; %Teller van het aantal klepstandcombinaties plus 1

    if abs(x(j_1e)-(1-dx))<10e-10 %Als stand eerste regelklep is 1-stapgrootte
        x(j_1e)=x(j_1e)+dx; %Stand eerste regelklep is 1
        enen=find((abs(1-x(j_regelklep))<10e-10)==1); %Regelkleppen in stand 1
        aantal_enen=length(enen); %Aantal regelklep met klepstand 1
    elseif abs(x(j_1e)-1)>10e-10 %Anders: als stand eerste regelklep is ongelijk 1
        x(j_1e)=x(j_1e)+dx; %Stand eerste regelklep plus stapgrootte
    else %Anders: als stand eerste regelklep is 1
        a=1; %Index van de regelklep

        while abs(x(j_regelklep(a))-1)<10e-10 %Terwijl stand regelklep is 1
            x(j_regelklep(a))=0; %Stand regelklep is 0
            a=a+1; %Volgende regelklep
        end %Einde (Terwijl stand regelklep is 1)

        x(j_regelklep(a))=x(j_regelklep(a))+dx; %Stand regelklep plus stapgrootte
    end %Einde (Als stand eerste regelklep is 1-stapgrootte)

    x(j_regelklep)
```

```

%Bereken de volumestromen en drukverschillen in het systeem. Begin bij de pomp en bereken
    alle elementen
%in de stromingsrichting.
%Herhaal bovenstaande totdat de fout in het drukverschil kleiner is dan de toelaatbare fout.
j=j_pomp; %Begin bij de pomp

while min(abs(D(j_pomp,[2 3])))>max_fout & ~stop
    %Zolang d_p_pomp ongelijk d_p_systeem
%    j
%    wout=find(D(:,1)~=0)
%    full(D(wout,:))
    switch E(j,1) %Kies afhankelijk van element
    case 1 %Als pomp in huidig knooppunt
        j=Pomp(j); %Bereken drukverschil en ga naar volgende
    case 2 %Als bocht in huidig knooppunt
        j=Bocht(j); %Bereken drukverschil en ga naar volgende
    case 3 %Als verloop in huidig knooppunt
        j=Verloop(j); %Bereken drukverschil en ga naar volgende
    case 4 %Als T-stuk in huidig knooppunt
%    j
%    squeeze(C(j,:,:))
%    D(j,:)
        j=T_stuk(j); %Bereken drukverschil en ga naar volgende
    case 5 %Als 2-wegklep in huidig knooppunt
        j=TweeWeg_klep(j); %Bereken drukverschil en ga naar volgende
    case 6 %Als 3-wegklep in huidig knooppunt
%    j
%    squeeze(C(j,:,:))
%    D(j,:)
        j=DrieWeg_klep(j); %Bereken drukverschil en ga naar volgende
    case 7 %Als vat in huidig knooppunt
        j=Wat(j); %Bereken drukverschil en ga naar volgende
    case 8
        j=Overig(j);
    end %Einde (Kies afhankelijk van element)
end %Einde (Zolang d_p_pomp ongelijk d_p_systeem)

resultatenmatrices(:,b)=full(B(:,1:6)); %Sla resultaat huidige klepstandcombinatie op
lengteITT=length(ITT); %Lengte van de iteratievector
lengteFOUT=length(FOUT); %Lengte van de foutvector
D(:,1)=[ITT,zeros(1,(N-lengteITT))]; %Geef fout van pomp en T-stukken weer
D(:,2)=[FOUT,zeros(1,(N-lengteFOUT))]; %Geef aantal iteraties weer
iteratiematrices(:,b)=full(D(:,1:2)); %Sla numerieke info huidige klepstandcombinatie op

%Geef de overige variabelen hun startwaarden
B=zeros(N,6); %Drukverschillen, volumestromen per knooppunt
FOUT(1:N)=0; %Geen enkel element heeft een fout
ITT(1:N)=0; %Aantal iteraties voor alle elementen wordt nul
fout(1:N)=inf; %Alle elementen hebben oneindig grote fout
D=[zeros(N,1) fout' fout']; %Aantal iteraties en bijbehorende fout voor T-stukken/3-wegkleppen
nullijn=zeros(N,1); %Lijnen van T-stuk/3-wegklep waardoor geen medium stroomt
if ~stop
    waitbar(b/tot_aant_stappen,wacht);
end
    
```

```

end                                     %Einde (Terwijl niet alle regelkleppen in stand 1)

if ~stop
delete(wacht);

%De resultaten worden bewerkt en bewaard voor later gebruik
aantal_standen(1:aantal_regelklep)=1/dx + 1;   %Aantal standen die iedere regelklep doorloopt
transformeer_res=[size(B(:,1:6)) aantal_standen];   %Vector nodig voor tranformatie
transformeer_itt=[size(D(:,1:2)) aantal_standen];   %Vector nodig voor tranformatie
resultaat=reshape(resultatenmatrices,transformeer_res);
                                                %Transformeer de resultaten naar de juiste vorm
iteratie=reshape(iteratiematrixes,transformeer_itt);
                                                %Transformeer de numerieke info naar de juiste vorm
save resultaten.tmp resultaat iteratie A dx j_regelklep -mat;
Interface_resultaat;
end

```

## A.2 Code van 'Gegevens'

```

%Gegevens
%Laad gegevens in workspace die onafhankelijk zijn van geometrie:
%g: versnelling van de zwaartekracht 9.81 m/s^2
%rho: dichtheid van het medium [kg/m^3]
%mu: viscositeit van het medium [Pa*s]
%zeta_T_stuk_splits:           1e pag.: regressiecoëfficiënten T-stuk scherp 45°
%                               2e pag.: regressiecoëfficiënten T-stuk scherp 90°
%                               3e pag.: regressiecoëfficiënten T-stuk afgerond 90°
%                               4e pag.: regressiecoëfficiënten omgekeerd T-stuk scherp 90°
%                               5e pag.: regressiecoëfficiënten omgekeerd T-stuk afgerond 90°
%zeta_T_stuk_verzamel:        1e pag.: regressiecoëfficiënten T-stuk scherp 45°
%                               2e pag.: regressiecoëfficiënten T-stuk scherp 90°
%                               3e pag.: regressiecoëfficiënten T-stuk afgerond 90°
%                               4e pag.: regressiecoëfficiënten omgekeerd T-stuk scherp 90°
%                               5e pag.: regressiecoëfficiënten omgekeerd T-stuk afgerond 90°
%GegPomp:                     element 1 t/m 3: coëfficiënten die karakteristiek beschrijven
%                               element 4: minimale volumestroom van de pomp
%                               element 5: maximale volumestroom van de pomp
global rho mu g zeta_T_stuk_splits zeta_T_stuk_verzamel

%rho_water(75°)=974.7;
%rho_water(10°)=998.8;
rho=974.7;
mu=890.8e-6;
g=9.81;

zeta_T_stuk_splits(1,:,:)=[-0.25 0.45 0.25 0.56 0.68 -0.27;
 0.42 0 0 -1.20 0.80 0];
zeta_T_stuk_splits(2,:,:)=[1.79 -1.86 1.26 -1.72 0.94 1.33;
 0.42 0 0 -1.20 0.80 0];
zeta_T_stuk_splits(3,:,:)=[1.40 -1.27 0.74 -1.67 1.30 1.24;
 0.42 0 0 -1.20 0.80 0];
zeta_T_stuk_splits(4,:,:)=[0.58 0.82 -0.29 0 0 0;
 0.58 0 0 0.82 -0.29 0];
zeta_T_stuk_splits(5,:,:)=[0.57 0.84 -0.58 0 0 0;
 0.57 0 0 0.84 -0.58 0];

```

```
zeta_T_stuk_verzamel(1,:,:)=[-0.32 -0.14 0.82 1.31 -1.86 0.48;
    -0.01 -0.36 -0.18 0.78 -0.74 0.71];
zeta_T_stuk_verzamel(2,:,:)=[0.11 0.34 0.66 0.98 -2.04 -0.10;
    0.03 0.56 -0.06 1.23 -1.22 -0.52];
zeta_T_stuk_verzamel(3,:,:)=[-0.02 0.12 0.73 1.00 -1.91 0.25;
    -0.18 0.51 -0.07 1.47 -1.24 -0.38];
zeta_T_stuk_verzamel(4,:,:)=[0.77 -0.94 1.36 0 0 0;
    0.77 0 0 -0.94 1.36 0];
zeta_T_stuk_verzamel(5,:,:)=[0.45 -0.65 1.07 0 0 0;
    0.45 0 0 -0.65 1.07 0];
```

### A.3 Code van 'Initieer'

```
global A B C D E N delta_p_tot j_pomp max_fout x nullijn dx
```

```
d_h=20e-3; %Hydraulische diameter
d_verl=d_h+5e-3; %Hydraulische diameter
epsilon=0.045e-3; %Wandruwheid verbinding
ratio_R_d=1.5; %Verhouding straal-binnendiameter bocht
```

```
a1=[0 5 2 1 0 2 2 3 5 5 0 2.5 3 3 0 2.5 1 4 1 4];
a2=[5 5 3.5 0 2 5 6 5 2 6 6 3.5 6 3.5 0.5 0 5 5 6 6];
a3=zeros(1,20);
a4=[11 10 12 15 1 3 6 14 2 20 19 16 8 12 5 4 6 8 7 13];
a5=d_h*ones(1,20);
a6=[17 18 0 0 9 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
a7=[d_verl d_h*[1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]];
a8=[5 9 6 16 15 7 19 18 5 2 1 3 20 8 4 12 1 2 11 10];
a9=[d_h*ones(1,16) d_verl d_h*ones(1,3)];
a10=epsilon./a9;
a11=[0 0 0 0 17 0 13 0 0 0 14 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
a12=d_h*[0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
a13=epsilon./a12;
a14=[17 18 0 0 9 17 0 18 0 0 0 16 0 0 0 0 0 0 0 0];
A=[a1' a2' a3' a4' a5' a6' a7' ...%A: geometrie-matrix
    a8' a9' a10' a11' a12' a13' a14'];
```

```
e1=[4 6 2 1 4 6 2 4 2 2 2 4 2 2 7 2 3 5 8 8];
e2=[2 1 90 1.46E+06 2 1 90 3 90 90 90 4 90 90 0 90 1 0 10 10];
e3=[0 1 ratio_R_d 1E+08 0 1 ratio_R_d 0 ratio_R_d ratio_R_d ratio_R_d 0 ratio_R_d ra-
    tio_R_d 0.25 ratio_R_d 30 2 1 4];
e4=[0 1 0 -2.4E+11 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.04 0.5 6 6];
e5=[0 0.5 0 0.0001 0 0.5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 50 0 0];
e6=[0 50 0 0.002 0 50 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 0 0 25 0 0];
e7=[0 25 0 0 0 25 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.04 0 0 0 0 0];
E=[e1' e2' e3' e4' e5' e6' e7'];
```

%E: gegevensmatrix

```
N=length(A(:,1)); %Aantal knooppunten
j_klep=find(E(:,1)==6 | E(:,1)==7); %Knooppunten met klep
j_regelklep=j_klep(find(E(j_klep,2)==1)); %Knooppunten met geregelde klep
j_pomp=find(E(:,1)==1); %Knooppunt met pomp
```

```
%De volgende code bepaald welke T-stukken/3-wegkleppen bij elkaar horen
a=0; %Teller aantal T-stukken
posities_T=find(E(:,1)==4 | E(:,1)==6); %Knooppunten T-stukken en 3-wegkleppen
```

```

Aantal_T=length(posities_T); %Aantal T-stukken en 3-wegkleppen

%Bepaal eerst welke T-stukken/3-wegkleppen evt. bij elkaar kunnen horen
for e=1:Aantal_T %Voor alle T-stukken en 3-wegkleppen
    j=posities_T(e); %Knooppunt huidig T-stuk of 3-wegklep

    if A(j,11)~=0 %Als T-stuk/3-wegklep 2x uit
        a=a+1; %Teller aantal T-stukken/3-wegkleppen(2uit) plus 1
        T1(a,1)=j; %Alle elementen op lijn1 van T-stuk/3-wegklep in j
        T2(a,1)=j; %Alle elementen op lijn2 van T-stuk/3-wegklep in j
        k1=A(j,8); %Volgende knooppunt op lijn1
        k2=A(j,11); %Volgende knooppunt op lijn2
        b=1; %Teller aantal T-stukken/3-wegkleppen(1uit) op lijn1 van T-stuk/3-wegklep in j
        c=1; %Teller aantal T-stukken/3-wegkleppen(1uit) op lijn2 van T-stuk/3-wegklep in j

    %Doorloop lijn1
    while k1~=j_pomp %Zolang de pomp niet bereikt is
        if (E(k1,1)==4 | E(k1,1)==6) & A(k1,11)==0 %Als T-stuk/3-wegklep 1x uit
            b=b+1; %Teller lijn1 plus 1
            T1(a,b)=k1; %Voeg huidig knooppunt aan T1 toe
            k1=A(k1,8); %Ga naar het volgende knooppunt
        else %Anders: als T-stuk/3-wegklep 2x uit
            k1=A(k1,8); %Ga naar het volgende knooppunt
        end %Einde (Als T-stuk/3-wegklep 1x uit)
    end %Einde (Zolang de pomp niet bereikt is)

    %Doorloop lijn2
    while k2~=j_pomp %Zolang de pomp niet bereikt is
        if (E(k2,1)==4 | E(k2,1)==6) & A(k2,11)==0 %Als T-stuk/3-wegklep 1x uit
            c=c+1; %Teller lijn2 plus 1
            T2(a,c)=k2; %Voeg huidig knooppunt aan T2 toe
            k2=A(k2,8); %Ga naar het volgende knooppunt
        else %Anders: als T-stuk/3-wegklep 2x uit
            k2=A(k2,8); %Ga naar het volgende knooppunt
        end %Einde (Als T-stuk/3-wegklep 1x uit)
    end %Einde (Zolang de pomp niet bereikt is)

    j=j+1; %Ga naar het volgende knooppunt
    else %Anders: als T-stuk/3-wegklep 1x uit
        j=j+1; %Ga naar het volgende knooppunt
    end %Einde (Als T-stuk/3-wegklep 2x uit)
end; %Einde (Voor alle T-stukken en 3-wegkleppen)

%Vervolgens worden de juiste T-stukken/3-wegkleppen bij elkaar gezocht
while ~isempty(find(T1(:,2:end))) %Zolang niet alle T's gekoppeld zijn
    for d=1:a; %Voor alle T-stukken/3-wegkleppen met 2x uit
        andere_T=intersect(T1(d,2:end),T2(d,2:end)); %Bepaal gelijke elementen T1rij_d, T2rij_d
        Aantal_andere_T=length(andere_T); %Grootte van de vector "andere_T"

        if andere_T(end)~=0 %Als T1rij_d en T2rij_d één gemeenschappelijke waarde ongelijk nul
            if Aantal_andere_T==1 %hebben, horen die T's bij elkaar. De desbetreffende elementen in
                T1(d,2:end)=0;%T1 en T2 worden op nul gezet. Als "andere_T" maar één element heeft,
                T2(d,2:end)=0; % geeft "end-1" een foutmelding, vandaar de if-loop.
                T1(find(T1==andere_T))=0;
                T2(find(T2==andere_T))=0;
                A(T1(d,1),15)=andere_T(1);
                A(andere_T(1),15)=T1(d,1);
            end
        end
    end
end

```





```

%k: index van het volgende knooppunt
%knooppunt: knooppunt van de pomp
global A B C D E FOUT ITT max_fout delta_p_tot j_pomp nullijn

j=knooppunt; %huidige knooppunt

if min(abs(D(j,[2 3])))>max_fout
switch D(j,1)
case 0
D(j,1)=D(j,1)+1; %Als fout in druk groter dan maximaal
B(j,5)=E(j,5); %Kies afhankelijk van aantal itt.
DeltaPPomp(j); %Als 0 maal geïttereerd
delta_p_tot(j,1)=B(j,1); %Aantal iteraties neemt met een toe
k=A(j,8); %Volumestroom pomp is minimaal
case 1 %Druksprong over pomp plus leiding
D(j,1)=D(j,1)+1; %Druksprong over pomp
som=B(j,3); %Volgend knooppunt
j=A(j,8); %Als 1 maal geïttereerd
%Aantal iteraties neemt met een toe
%Som: sommatie drukval lijn1
%Ga naar element na pomp

while j~=j_pomp %Zolang de pomp niet is bereikt
if B(j,6)==0 %Tel drukval element op bij som
som=som+B(j,1)+B(j,3); %Naar volgende knooppunt
j=A(j,8);
else %Tel drukval element op bij som
som=som+B(j,2)+B(j,4); %Naar volgende knooppunt
j=A(j,11);
end
end %Einde (Bij: Zolang de pomp...)

delta_p_tot(j,2)=som; %Drukval over systeem
C(j,1,1)=B(j,5); %q_V_klein is q_V_pomp minimaal
C(j,1,2)=delta_p_tot(j,1); %Druksprong pomp bij q_V_klein
C(j,1,3)=delta_p_tot(j,2); %Drukval systeem bij q_V_klein
D(j,2)=(delta_p_tot(j,2)+delta_p_tot(j,1))/... %bij q_V_klein
max(abs(delta_p_tot(j,2)),abs(delta_p_tot(j,1))); %Volumestroom pomp is maximaal
B(j,5)=E(j,6); %Druksprong over pomp plus leiding
DeltaPPomp(j); %Druksprong over pomp
delta_p_tot(j,1)=B(j,1); %Volgend knooppunt
k=A(j,8); %Anders (Bij: Kies afhank. van...)
otherwise %Aantal iteraties neemt met een toe
D(j,1)=D(j,1)+1; %Som: sommatie drukval lijn1
som=B(j,3); %Ga naar element na pomp
j=A(j,8);

while j~=j_pomp %Zolang de pomp niet is bereikt
if nullijn(j)==1 %Tel drukval element op bij som
if A(j,11)~=0 %Naar volgende knooppunt
som=som+B(j,2)+B(j,4);
j=A(j,11);
else %Tel drukval element op bij som
som=som+B(j,2)+B(j,3); %Naar volgende knooppunt
j=A(j,8);
end
else %Tel drukval element op bij som
som=som+B(j,1)+B(j,3);
end
end

```

```

        j=A(j,8);                                %Naar volgende knooppunt
    end
end                                               %Einde (Bij: Zolang de pomp...)

delta_p_tot(j,2)=som;                            %Drukval over systeem
fout=(delta_p_tot(j,2)+delta_p_tot(j,1))/...
    max(abs(delta_p_tot(j,2)),abs(delta_p_tot(j,1)));

if -delta_p_tot(j,2)<delta_p_tot(j,1)             %Als -d_p_systeem<d_p_pomp
    C(j,1,1)=B(j,5);                            %q_V_klein is huidige q_V_pomp
    C(j,1,2)=delta_p_tot(j,1);                 %Druksprong pomp bij q_V_klein
    C(j,1,3)=delta_p_tot(j,2);                 %Drukval systeem bij q_V_klein
    D(j,2)=fout;                                %Fout bij q_V_klein
else                                             %Anders (Bij: Als -d_p_systeem...)
    C(j,2,1)=B(j,5);                            %q_V_groot is huidige q_V_pomp
    C(j,2,2)=delta_p_tot(j,1);                 %Druksprong pomp bij q_V_groot
    C(j,2,3)=delta_p_tot(j,2);                 %Drukval systeem bij q_V_groot
    D(j,3)=fout;                                %Fout bij q_V_groot
end                                               %Einde (Bij: Als -d_p_systeem...)

if min(abs(D(j,[2 3])))>max_fout                %Als fout in druk groter dan maximaal
    B(j,5)=interp1([D(j,2) D(j,3)],[C(j,1,1) C(j,2,1)],0); %q_V_pomp is gemiddelde van
    DeltaPPomp(j);                             %Druksprong over pomp plus leiding
    delta_p_tot(j,1)=B(j,1);                   %Druksprong over pomp
    k=A(j,8);                                   %Volgend knooppunt
else
    k=j_pomp;
end
end                                               %Einde (Bij: Kies afhank. van...)
else                                             %Anders (Bij: Als fout in...)
    k=j_pomp;                                    %Volgend knooppunt is knooppunt_pomp
end                                               %Einde (Bij: Als fout in...)
ITT(j)=D(j,1);                                  %Totaal aantal iteraties
FOUT(j)=min(D(j,[2 3]));                        %Uiteindelijke fout
    
```

## A.5 Code van 'DeltaPPomp'

```

function DeltaPPomp(knooppunt)
%DeltaPPomp(knooppunt)
%Berekening van de drukverschil over de pomp en leiding
%knooppunt: knooppunt van de pomp
global rho mu A B E

j=knooppunt;                                    %Index huidige knooppunt
k=A(j,8);                                       %Index volgende knooppunt

d_h_uit=A(j,9);                                %Hydraulische diameter uit
q_V_uit=B(j,5);                                %Uitgaande volumestroom

ratio_eps_d=A(j,10);                           %Wandruwheid leiding/binnendiameter leiding
Re_uit=4*rho * q_V_uit / pi / mu / d_h_uit;    %Berekening Reynoldsgetal

a0=E(j,2);                                     %Coefficient pompkarakteristiek
a1=E(j,3);                                     %Coefficient pompkarakteristiek
a2=E(j,4);                                     %Coefficient pompkarakteristiek
    
```

```

B(j,1)=a0+a1*q_V_uit+a2*q_V_uit^2;           %Drukverschil over pomp
B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k,d_h_uit,q_V_uit,Re_uit,ratio_eps_d); %Drukval over leiding
B(j,7)=Re_uit;                               %Sla Reynoldsgetal

```

## A.6 Code van 'DeltaPLeiding'

```

function dp=DeltaPLeiding(knooppunt1,knooppunt2,d_h,q_V,Re,ratio_eps_d)
%dp=DeltaPLeiding(knooppunt1,knooppunt2,d_e,q_V)
%Berekening van de drukval over de leiding
%dp: drukval over de leiding
%knooppunt1: knooppunt aan het begin van de leiding
%knooppunt2: knooppunt aan het einde van de leiding
%d_h: (hydraulische) diameter van de leiding
%q_V: volumestroom door de leiding
%Re: Reynoldsgetal
%ratio_eps_d: wandruwheid leiding/binnendiameter leiding
global rho g A

j=knooppunt1;                               %Index huidige knooppunt
k=knooppunt2;                               %Index volgende knooppunt
p1=A(j,1:3);                                %Positie begin leiding
p2=A(k,1:3);                                %Positie eind leiding

if q_V~=0                                   %Als q_V door leiding ongelijk nul
    f=Bereken_f(ratio_eps_d,Re);            %Frictiefactor
    l=norm(p1-p2);                          %Lengte leiding
    dp=-rho * g * (p2(3) - p1(3)) ...       %Drukverschil leiding
        - f * l / d_h * 8*rho / pi^2 / d_h^4 * q_V^2;
else                                         %Anders: als q_V door leiding is nul
    dp=-rho * g * (p2(3) - p1(3));          %Drukverschil leiding
end                                          %Einde (Als q_V door leiding ongelijk nul)

```

## A.7 Code van 'Bereken\_f'

```

function f=Bereken_f(ratio_eps_d,Re)
%f=Bereken_f(ratio_eps_d,Re)
%Berekening van de frictiefactor
%f: frictiefactor
%ratio_eps_d: verhouding van wandruwheid t.o.v. binnendiameter
%Re: Reynoldsgetal

if Re<=2300                                %Als stroming laminair is
    f=64/Re;                                %Berekening frictiefactor
elseif Re>=3500                            %Als stroming turbulent is
    f=(-2*log10(1/3.72 * ratio_eps_d + 5.74 / Re^0.901))^-2; %Berekening frictiefactor
else                                         %Als stroming laminair noch turbulent
    f_l=64/2300;                            %Berekening f_laminair
    f_t=(-2*log10(1/3.72 * ratio_eps_d + 5.74 / 3500^0.901))^-2; %Berekening f_turbulent
    f=(f_l*(3500-Re) + f_t*(Re-2300))/(3500-2300); %Interpoleren tussen f_l en f_t
end                                          %Einde: Als stroming laminair is

```

## A.8 Code van 'Bocht'

```

function k=Bocht(knooppunt)
%k=Bocht(knooppunt)
%Berekening van het drukverschil over een bocht en leiding

```

%k: index van het volgende knooppunt  
 %knooppunt: index van de bocht  
 global rho mu A B E

```

j=knooppunt; %Index huidige knooppunt
i=A(j,4); %Index vorige knooppunt
k=A(j,8); %Index volgende knooppunt
d_h_in=A(j,5); %Hydraulische diameter in
d_h_uit=A(j,9); %Hydraulische diameter uit
ratio_eps_d=A(j,10); %Wandruwheid leiding/binnendiameter leiding

if j==A(i,8) %Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt
    q_V_in=B(i,5); %Ingaande q_V gelijk aan q_V uit1
    Re_in=B(i,7); %Reynoldsgetal ingaande stroming
else %Anders: Als uit2 van vorige punt gelijk aan huidige punt
    q_V_in=B(i,6); %Ingaande q_V gelijk aan q_V uit2
    Re_in=B(i,8); %Reynoldsgetal ingaande stroming
end %Einde (Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt)

q_V_uit=q_V_in; %Uitgaande volumestroom

if q_V_in~=0 %Als q_V door bocht ongelijk nul
    theta=E(j,2); %Hoek van de bocht
    ratio_R_d=E(j,3); %Straal_bocht/binnendiameter bocht
    Re_uit=4*rho * q_V_uit / pi / mu / d_h_uit; %Berekening Reynoldsgetal
    f_epsilon=Bereken_f(ratio_eps_d,Re_uit); %Berekening frictiefactor bij wandruwheid

if Re_in>=2300 %Als stroming turbulent is
    alfa_in=1.05; %Berekening kinetische energie coëfficiënt
else %Anders: Als stroming laminair is
    alfa_in=2; %Berekening kinetische energie coëfficiënt
end %Einde (Als stroming turbulent is)

if Re_uit>=2300 %Als stroming turbulent is
    alfa_uit=1.05; %Berekening kinetische energie coëfficiënt
else %Anders: Als stroming laminair is
    alfa_uit=2; %Berekening kinetische energie coëfficiënt
end %Einde (Als stroming turbulent is)

switch theta %Kies afhankelijk van de hoek
case 45 %Als de hoek 45 graden is
    zeta0=0.008*ratio_R_d + 0.09 * ratio_R_d^(-0.9/ratio_R_d);
    %Ongecorrigeerd weerstandsgetal
case 90 %Als de hoek 90 graden is
    zeta0=0.007*ratio_R_d + 0.24 * ratio_R_d^(-1.34/ratio_R_d);
    %Ongecorrigeerd weerstandsgetal
case 180 %Als de hoek 180 graden is
    zeta0=0.04*ratio_R_d + 0.26 * ratio_R_d^(-2.15/ratio_R_d);
    %Ongecorrigeerd weerstandsgetal
end %Einde (Kies afhankelijk van de hoek)

if ratio_R_d>2 %Als buigstraal bocht/binnendiameter bocht groter dan 2
    ratio_R_d=2; %buigstraal bocht/binnendiameter bocht gelijk aan 2
end %Einde (Als buigstraal bocht/binnendiameter bocht groter dan 2)
    
```

```

C_Re=2.9 * (3500/Re_uit)^(1 / (2.7+1.3*ratio_R_d)); %Correctiefactor i.v.m. Reynoldsgetal

if C_Re<1 & ratio_R_d<=2                                %Als correctiefactor kleiner dan 1
    C_Re=1;                                             %Correctiefactor gelijk aan 1
end                                                    %Einde (Als correctiefactor kleiner dan 1)

f_0=Bereken_f(0,Re_uit);                                %Frictiecoefficient bij wandruwheid
C_w=f_epsilon/f_0;                                     %Correctiefactor i.v.m. wandruwheid
zeta=zeta0*C_Re*C_w;                                   %Weerstandsgetal van de bocht
B(j,1)=-8*rho / pi^2 * (alfa_uit * q_V_uit^2 / d_h_uit^4 - ...
    alfa_in * q_V_in^2 / d_h_in^4) - ...
    zeta*8*rho / pi^2 / d_h_in^4 * q_V_in^2;           %Drukverschil over bocht
else
    B(j,1)=0;                                           %Weerstandsgetal van de bocht
    Re_uit=0;                                           %Reynoldsgetal uitgaande stroming
end

B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k,d_h_uit,q_V_uit,Re_uit,ratio_eps_d); %Drukverschil over leiding
B(j,5)=q_V_uit;                                        %Sla uitgaande volumestroom op
B(j,7)=Re_uit;                                        %Sla Reynoldsgetal op

```

## A.9 Code van 'Verloop'

```

function k=Verloop(knooppunt)
%k=Verloop(knooppunt)
%Berekening van de drukval over een verloop en leiding
%k: index van het volgende knooppunt
%knooppunt: knooppunt van het verloop
global mu rho A B E

j=knooppunt;                                           %Index huidige knooppunt
i=A(j,4);                                              %Index vorige knooppunt
k=A(j,8);                                              %Index volgende knooppunt
d_e_in=A(j,5);                                        %Hydraulische diameter in
d_e_uit=A(j,9);                                       %Hydraulische diameter uit_V door verloop ongelijk nul
ratio_eps_d_uit=A(j,10);                              %Wandruwheid leiding/binnendiameter leiding
theta_top=E(j,3);                                     %Tophoek van het verloop

if j==A(i,8)                                           %Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt
    q_V_in=B(i,5);                                     %Ingaande q_V gelijk aan q_V uit1
    Re_in=B(i,7);                                     %Reynoldsgetal ingaande stroming
    ratio_eps_d_in=A(i,10);                            %verhouding wandruwheid t.o.v. diameter
else                                                    %Anders: Als uit2 van vorige punt gelijk aan huidige punt
    q_V_in=B(i,6);                                     %Ingaande q_V gelijk aan q_V uit2
    Re_in=B(i,8);                                     %Reynoldsgetal ingaande stroming
    ratio_eps_d_in=A(i,13);                            %Wandruwheid leiding/binnendiameter leiding
end                                                    %Einde (Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt)

q_V_uit=q_V_in;                                       %Uitgaande volumestroom

if q_V_in~=0                                           %Als q_V door verloop ongelijk nul
    soort_verloop=E(j,2);                              %soort verloop (div./conv., etc.)
    L=E(j,4);                                          %Lengte van het verloop
    Re_uit=4*rho * q_V_uit / pi / mu / d_e_uit;      %Berekening Reynoldsgetal
    f_in=Bereken_f(ratio_eps_d_in,Re_in);            %Berekening frictiefactor

```

```

if Re_in>=2300                                %Als stroming turbulent is
    alfa_in=1.05;                               %Berekening kinetische energie coëfficiënt
else                                             %Anders: Als stroming laminair is
    alfa_in=2;                                   %Berekening kinetische energie coëfficiënt
end                                              %Einde (Als stroming turbulent is)

if Re_uit>=2300                                %Als stroming turbulent is
    alfa_uit=1.05;                              %Berekening kinetische energie coëfficiënt
else                                             %Anders: Als stroming laminair is
    alfa_uit=2;                                   %Berekening kinetische energie coëfficiënt
end                                              %Einde (Als stroming turbulent is)

switch soort_verloop                            %Kies afhankelijk van soort verloop
case 1                                           %Als verloop vloeiend divergerend
    zeta_s=3.2*( 1 - (d_e_in/d_e_uit)^2 )^2 * ( (d_e_uit-d_e_in)/2/L )^1.25;
                                                %Weerstandsfactor stootverliezen
    zeta_w=f_in/8/((d_e_uit-d_e_in)/2/L) * ( 1 - (d_e_in/d_e_uit)^4 );
                                                %Weerstandsfactor wrijvingsverliezen
case 2                                           %Als verloop vloeiend convergerend
    zeta_s=0;                                     %Weerstandsfactor stootverliezen
    zeta_w=f_in/8/((d_e_in-d_e_uit)/2/L) * ((d_e_in/d_e_uit)^4 - 1 );
                                                %Weerstandsfactor wrijvingsverliezen
case 3                                           %Als verloop abrupt divergerend
    zeta_s=( 1 - (d_e_in/d_e_uit)^2 )^2;         %Weerstandsfactor stootverliezen
    zeta_w=0;                                     %Weerstandsfactor wrijvingsverliezen
case 4                                           %Als verloop abrupt convergerend
    mu_contr=0.56 + 0.44 * (d_e_uit/d_e_in)^6;   %Berekening contractiefactor
    zeta_s=(d_e_in/d_e_uit)^4 * ( 1/mu_contr - L )^2; %Weerstandsfactor stootverliezen
    zeta_w=0;                                     %Weerstandsfactor wrijvingsverliezen
end                                              %Einde (Kies afhankelijk van soort verloop)

zeta=zeta_s+zeta_w;                             %Weerstandsfactor
B(j,1)=-8*rho / pi^2 * (alfa_uit * q_V_uit^2 / d_e_uit^4 - ...
    alfa_in * q_V_in^2 / d_e_in^4) - ...
    zeta*8*rho / pi^2 / d_e_in^4 * q_V_in^2;     %Drukverschil over verloop
else                                             %Anders: als q_V door verloop is nul
    B(j,1)=0;                                     %Drukverschil over verloop
    Re_uit=0;                                     %Reynoldsgetal
end                                              %Einde (Als q_V door verloop ongelijk nul en tophoek<40°)

B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k,d_e_uit,q_V_uit,Re_uit,ratio_eps_d_uit); %Drukverschil over leiding
B(j,5)=q_V_uit;                                  %Sla uitgaande volumestroom op
B(j,7)=Re_uit;                                   %Sla Reynoldsgetal op
    
```

### A.10 Code van 'T\_stuk'

```

function k=T_stuk(knooppunt)
%k=T_stuk(knooppunt)
%Ittereerd tussen 2 3-wegkleppen of T-stukken totdat fout kleiner dan max. fout
%k: index van het volgende knooppunt na 1e of 2e T-stuk of 3-wegklep
%knooppunt: knooppunt van T-stuk
global A B C D E FOUT ITT max_fout delta_p_tot x nullijn

j=knooppunt;                                     %huidige knooppunt
    
```

```

j_ander=A(j,15); %knooppunt andere T/klep
i=A(j,4); %Index vorige knooppunt

if A(j,6)==0 & min(abs(D(j_ander,[2 3])))>max_fout
    %Als T/klep(2uit) en fout groter dan max. fout
    if j==A(i,8) %Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt
        q_V_in=B(i,5); %huidige q_V_in gelijk aan vorige q_V uit1
    else %Anders: Als uit2 van vorige punt gelijk aan huidige punt
        q_V_in=B(i,6); %huidige q_V_in gelijk aan vorige q_V uit2
    end %Einde (Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt)

    B(j_ander,5)=q_V_in; %q_V_uit 2e T/klep is q_V_in 1e T/klep

    if x(j_ander)==0 & nullijn(j)~=3 %Als stand klep is 0
        if A(j_ander,4)==A(j_ander,14) %Als korte kant in lijn1 bij 2e T
            nullijn([j j_ander])=2; %Door lijn2 stroomt niets
        else %Als korte kant in lijn2 bij 2e T
            nullijn([j j_ander])=1; %Door lijn1 stroomt niets
        end %Einde (Als korte kant in lijn1)
    elseif abs(x(j_ander)-1)<10e-10 & nullijn(j)~=3 %Als klepstand is 1
        if A(j_ander,4)~=A(j_ander,14) %Als lange kant in lijn1 bij 2e T
            nullijn([j j_ander])=2; %Door lijn2 stroomt niets
        else %Als lange kant in lijn2 bij 2e T
            nullijn([j j_ander])=1; %Door lijn1 stroomt niets
        end %Einde (Als lange kant in lijn1)
    end %Einde (Als stand klep is 0)

    switch nullijn(j) %Kies afhankelijk van lijn zonder volumestroom
    case 0 %Als geen volumestroom nul is
        switch D(j,1) %Kies afhankelijk van aantal itt.
        case 0 %Als 0 maal 1e T/klep
            D(j,1)=D(j,1)+1; %Aantal maal 1e T/klep plus een
            B(j_ander,5)=q_V_in; %q_V_uit 2e T/klep is q_V_in 1e T/klep
            B(j,5)=0; %q_V_uit lijn1 is nul
            B(j,6)=q_V_in; %q_V_uit lijn1 is q_V_in 1e T/klep
            DeltaPT_stuk(j,1); %Drukval over T-stuk plus leiding
            k=A(j,8); %Uit1 wordt volgende knooppunt
        case 1 %Als 1 maal 1e T/klep
            D(j,1)=D(j,1)+1; %Aantal maal 1e T/klep plus een
            DeltaPT_stuk(j,2); %Drukval over T-stuk plus leiding
            k=A(j,11); %Uit2 wordt volgende knooppunt
        case 2 %Als 2 maal 1e T/klep
            D(j,1)=D(j,1)+1; %Aantal maal 1e T/klep plus een
            B(j,5)=q_V_in; %q_V_uit lijn1 is q_V_in 1e T/klep
            B(j,6)=0; %q_V_uit lijn2 is nul
            DeltaPT_stuk(j,1); %Drukval over T-stuk plus leiding
            k=A(j,8); %Uit1 wordt volgende knooppunt
        case 3 %Als 3 maal 1e T/klep
            D(j,1)=D(j,1)+1; %Aantal maal 1e T/klep plus een
            DeltaPT_stuk(j,2); %Drukval over T-stuk plus leiding
            k=A(j,11); %Uit2 wordt volgende knooppunt
        otherwise %Anders (Bij: Kies afhankelijk van...)
            if mod(D(j,1),2)==0 %Als even maal 1e T/klep
                D(j,1)=D(j,1)+1; %Aantal maal 1e T/klep plus een
                B(j,5)=interp1([D(j_ander,2) D(j_ander,3)],[C(j_ander,1,1) C(j_ander,2,1)],0);
            end
        end
    end

```

```

    B(j,6)=q_V_in-B(j,5);
    DeltaPT_stuk(j,1);
    k=A(j,8);
else
    D(j,1)=D(j,1)+1;
    DeltaPT_stuk(j,2);
    k=A(j,11);
end;
end;
case 1
    B(j,5)=0;
    B(j,6)=q_V_in;
    DeltaPT_stuk(j,2);
    k=A(j,11);
case 2
    B(j,5)=q_V_in;
    B(j,6)=0;
    DeltaPT_stuk(j,1);
    k=A(j,8);
case 3
    B(j_ander,5)=0;
    B(j,:)=0;
    j_volgende=j;
    j=A(j,4);

while ~(E(j,1)==4 | E(j,1)==6)
    B(j,:)=0;
    j_volgende=j;
    j=A(j,4);
end

j_ander=A(j,15);

if j_volgende==A(j,8)
    nullijn([j j_ander])=nullijn([j j_ander])+1;
    B(j,[1 3 5 7])=0;
    C(j_ander,:)=zeros(2,4);
    D(j_ander,[1 2 3])=[0 inf inf];
else
    nullijn([j j_ander])=nullijn([j j_ander])+2;
    B(j,[2 4 6 8])=0;
    C(j_ander,:)=zeros(2,4);
    D(j_ander,[1 2 3])=[0 inf inf];
end

k=j;
end
elseif A(j,6)~=0 & min(abs(D(j,[2 3])))>max_fout

if nullijn(j)==1
    DeltaPT_stuk(j,2);
    k=A(j,8);
elseif nullijn(j)==2
    DeltaPT_stuk(j,1);
    k=A(j,8);

```

%q\_V\_uit2 is q\_V\_in 1e T/klep min q\_V\_uit1  
 %Drukval over T-stuk plus leiding  
 %Uit1 wordt volgende knooppunt  
 %Anders: oneven maal 1e T/klep  
 %Aantal maal 1e T/klep plus een  
 %Drukval over T-stuk plus leiding  
 %Uit2 wordt volgende knooppunt  
 %Einde (Als even maal 1e T/klep)  
 %Einde (Kies afhankelijk van aantal itt.)  
 %Als volumestroom lijn1 nul is  
 %q\_V\_uit lijn1 is nul  
 %q\_V\_uit lijn2 T/klep is q\_V\_in  
 %Drukval over klep plus leiding  
 %Index volgende knooppunt  
 %Als volumestroom lijn2 nul is  
 %q\_V\_uit lijn1 T/klep is q\_V\_in  
 %q\_V\_uit lijn2 is nul  
 %Drukval over klep plus leiding  
 %Index volgende knooppunt  
 %Als volumestroom lijn1 en lijn2 nul zijn  
 %q\_V\_uit 2e T/klep is nul  
 %Volumestromen en drukverschillen zijn nul  
 %Bewaar index huidige knooppunt  
 %Naar vorige knooppunt  
 %Terwijl geen T-stuk of 3-wegklep  
 %Volumestromen en drukverschillen zijn nul  
 %Bewaar index huidige knooppunt  
 %Naar vorige knooppunt  
 %Einde (Terwijl geen T-stuk of 3-wegklep)  
 %knooppunt andere T/klep  
 %Als huidige uit1 gelijk aan volgende punt  
 %Volumestroom lijn1 is nul  
 %Volumestromen en drukverschillen lijn1 zijn nul  
 %Startwaarde iteratie variabele  
 %Startwaarde iteratie variabele  
 %Anders: als huidige uit2 gelijk aan volgende punt  
 %Volumestroom lijn2 is nul  
 %Volumestromen en drukverschillen lijn2 zijn nul  
 %Startwaarde iteratie variabele  
 %Startwaarde iteratie variabele  
 %Einde (Als huidige uit1 gelijk aan volgende punt)  
 %Index volgende knooppunt  
 %Einde (Kies afhankelijk van lijn zonder volumestroom)  
 %Anders: als T/klep 2x in en fout groter dan max.fout  
 %Als volumestroom lijn1 nul is  
 %Drukval over T-stuk plus leiding  
 %Index volgende knooppunt  
 %Als volumestroom lijn2 nul is  
 %Drukval over T-stuk plus leiding  
 %Index volgende knooppunt



```

else
    if mod(D(j,1),2)==0
        D(j,1)=D(j,1)+1;
        j_huidig=j;
        j=j_ander;
        som=B(j,1)+B(j,3);
        j=A(j,8);

        while j~=j_huidig
            if nullijn(j)==1
                if A(j,11)~=0
                    som=som+B(j,2)+B(j,4);
                    j=A(j,11);
                else
                    som=som+B(j,2)+B(j,3);
                    j=A(j,8);
                end
            else
                som=som+B(j,1)+B(j,3);
                j=A(j,8);
            end
        end

        DeltaPT_stuk(j,1);
        delta_p_tot(j,1)=som+B(j,1);
        k=j_ander;
    else
        D(j,1)=D(j,1)+1;
        j_huidig=j;
        j=j_ander;
        som=B(j,2)+B(j,4);
        j=A(j,11);

        while j~=j_huidig
            if nullijn(j)==1
                if A(j,11)~=0
                    som=som+B(j,2)+B(j,4);
                    j=A(j,11);
                else
                    som=som+B(j,2)+B(j,3);
                    j=A(j,8);
                end
            else
                som=som+B(j,1)+B(j,3);
                j=A(j,8);
            end
        end

        DeltaPT_stuk(j,2);
        delta_p_tot(j,2)=som+B(j,2);

        if delta_p_tot(j,1)+delta_p_tot(j,2)~=0
            fout=(delta_p_tot(j,1)-delta_p_tot(j,2))/...
                max(abs(delta_p_tot(j,2)),abs(delta_p_tot(j,1)));
        else

```

```

%Anders: als volumestroom lijn1 en lijn2 ongelijk nul
%Als even maal 2e T/klep (lijn1)
%Aantal maal 2e T/klep plus een
%Knooppunt 2e T/klep
%Terug naar 1e T/klep
%Tel drukverschil element op bij som
%Naar volgende knooppunt

%Zolang 2e T/klep niet bereikt is
%Als volumestroom lijn1 nul is
%Als klep 2x uit
%Tel drukverschil element op bij som
%Naar volgende knooppunt
%Anders: als klep 1x uit
%Tel drukverschil element op bij som
%Naar volgende knooppunt
%Einde (Als klep 2x uit)

%Anders: als volumestroom lijn1 ongelijk nul
%Tel drukverschil element op bij som
%Naar volgende knooppunt
%Einde (Als volumestroom lijn1 nul is)
%Einde (Bij: Zolang 2e T/klep...)

%Drukval over T-stuk plus leiding
%Totale drukverschil over lijn1
%ga terug naar 1e T/klep
%Anders (Bij: Als even maal...)(lijn2)
%Aantal maal 2e T/klep plus een
%Knooppunt 2e T/klep
%Terug naar 1e T/klep
%Som: sommatie drukverschil lijn2
%Uit2 wordt volgende knooppunt

%Zolang 2e T/klep niet bereikt is
%Als volumestroom lijn1 nul is
%Als klep 2x uit
%Tel drukverschil element op bij som
%Naar volgende knooppunt
%Anders: als klep 1x uit
%Tel drukverschil element op bij som
%Naar volgende knooppunt
%Einde (Als klep 2x uit)

%Anders: als volumestroom lijn1 ongelijk nul
%Tel drukverschil element op bij som
%Naar volgende knooppunt
%Einde (Als volumestroom lijn1 nul is)
%Einde (Bij: Zolang 2e T/klep...)

%Drukval over T-stuk plus leiding
%Totale drukverschil over lijn2

%fout tussen d_p_lijn1, d_p_lijn2

```

```

    fout=0;
end

if delta_p_tot(j,2)<delta_p_tot(j,1)
    C(j,1,1)=B(j_ander,5);
    C(j,1,2)=delta_p_tot(j,1);
    C(j,1,3)=delta_p_tot(j,2);
    D(j,2)=fout;
else
    C(j,2,1)=B(j_ander,5);
    C(j,2,2)=delta_p_tot(j,1);
    C(j,2,3)=delta_p_tot(j,2);
    D(j,3)=fout;
end

    k=j_ander;
end
end
else
    D(j,1)=0;
    j=j_ander;
    C(j,,:)=zeros(2,4);
    ITT(j)=D(j,1);
    D(j,1)=0;
    FOOT(j)=min(D(j,[2 3]));
    D(j,2)=inf;
    D(j,3)=inf;
    k=A(j,8);
end

    %Als d_p_lijn2 kleiner dan d_p_lijn1
    %q_V_klein is q_V_uit1 1e T/klep
    %Drukverschil lijn1 bij q_V_klein
    %Drukverschil lijn2 bij q_V_klein
    %Fout bij q_V_klein
    %Anders: als d_p_lijn2 groter dan d_p_lijn1
    %q_V_groot is q_V_uit1 1e T/klep
    %Drukverschil lijn1 bij q_V_groot
    %Drukverschil lijn2 bij q_V_groot
    %Fout bij q_V_groot
    %Einde (Als d_p_lijn2 kleiner dan d_p_lijn1)

    %Terug naar 1e T/klep
    %Einde (Als even maal 2e T/klep (lijn1))
    %Einde (Als volumestroom lijn1 nul is)
    %Anders: als fout kleiner dan max. fout
    %Zet aantal maal 1e T/klep op nul
    %Terug naar 2e T/klep
    %Maak matrix C leeg
    %Aantal iteraties T-stuk
    %Zet aantal maal 2e T/klep op nul
    %Zet fout T-stuk bij andere fouten
    %Zet huidige fout T-stuk op oneindig
    %Zet vorige fout T-stuk op oneindig
    %Uit1 wordt volgende knooppunt
    %Einde (Als klep 2x uit en fout groter dan max. fout)

```

### A.11 Code van 'DeltaPT\_stuk'

```

function DeltaPT_stuk(knooppunt,lijn)
%DeltaPT_stuk(knooppunt,lijn)
%Berekening van de drukverschil over het T-stuk en leiding
%knooppunt: knooppunt van het T-stuk
%lijn=1: lijn1 wordt berekend
%lijn=2: lijn2 wordt berekend
global rho mu A B E zeta_T_stuk_splits zeta_T_stuk_verzamel

j=knooppunt;
i1=A(j,4);
i2=A(j,6);
k1=A(j,8);
k2=A(j,11);

    %Index huidige knooppunt
    %Index vorige knooppunt lijn1
    %Index vorige knooppunt lijn2
    %Index volgende knooppunt lijn1
    %index volgende knooppunt lijn2

d_h_in1=A(j,5);
d_h_in2=A(j,7);
d_h_uit1=A(j,9);
d_h_uit2=A(j,12);

    %Hydraulische diameter in lijn1
    %Hydraulische diameter in lijn2
    %Hydraulische diameter uit lijn1
    %Hydraulische diameter uit lijn2

ratio_eps_d_uit1=A(j,10);
ratio_eps_d_uit2=A(j,13);

    %wandruwheid/binnendiameter uit1
    %wandruwheid/binnendiameter uit2

soort_T_stuk=E(j,2);

```

```

if i2==0
    %Als T-stuk 1 ingang heeft
    if j==A(i1,8)
        %Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt
        q_V_in1=B(i1,5);
        %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit1
        Re_in1=B(i1,7);
        %Berekening Reynoldsgetal
    else
        %Anders: als vorige uit2 gelijk aan huidige punt
        q_V_in1=B(i1,6);
        %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit2
        Re_in1=B(i1,8);
        %Berekening Reynoldsgetal
    end
    %Einde (Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt)

if q_V_in1~=0
    %Als q_V door T-stuk ongelijk nul
    q_V_uit1=B(j,5);
    %Uitgaande volumestroom lijn1
    q_V_uit2=B(j,6);
    %Uitgaande volumestroom lijn2
    a_13=zeta_T_stuk_splits(soort_T_stuk,1,:);
    %Regressiecoëfficiënten
    a_23=zeta_T_stuk_splits(soort_T_stuk,2,:);
    %Regressiecoëfficiënten
    ratio_v1_v3=q_V_uit1*d_h_in1^2/q_V_in1/d_h_uit1^2;
    %Verhouding snelheden
    ratio_v2_v3=q_V_uit2*d_h_in1^2/q_V_in1/d_h_uit2^2;
    %Verhouding snelheden

if lijn==1
    %Als lijn1 berekend wordt
    if k1==A(j,14)
        %Als korte kant in lijn1
        zeta1=a_13(1)+a_13(2)*ratio_v1_v3+a_13(3)*ratio_v1_v3^2+...
            a_13(4)*ratio_v2_v3+a_13(5)*ratio_v2_v3^2+a_13(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
        %Weerstandsfactor
    elseif k2==A(j,14)
        %Anders: als korte kant in lijn2
        zeta1=a_23(1)+a_23(2)*ratio_v2_v3+a_23(3)*ratio_v2_v3^2+...
            a_23(4)*ratio_v1_v3+a_23(5)*ratio_v1_v3^2+a_23(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
        %Weerstandsfactor
    else
        %Anders: als korte kant is ingang
        zeta1=a_13(1)+a_13(2)*ratio_v1_v3+a_13(3)*ratio_v1_v3^2+...
            a_13(4)*ratio_v2_v3+a_13(5)*ratio_v2_v3^2+a_13(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
        %Weerstandsfactor
    end
    %Einde (Als korte kant in lijn1)
    Re_uit1=4*rho * q_V_uit1 / pi / mu / d_h_uit1;
    %Berekening Reynoldsgetal
    B(j,1)=DeltaPComp(q_V_in1,q_V_uit1,...
        d_h_in1,d_h_uit1,Re_in1,Re_uit1,q_V_in1,d_h_in1,zeta1);
    %Drukverschil T-stuk
    B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,q_V_uit1,Re_uit1,ratio_eps_d_uit1);
    %Drukverschil leiding
    B(j,7)=Re_uit1;
    %Sla Reynoldsgetal op
else
    %Anders: Als lijn2 berekend wordt
    if k1==A(j,14)
        %Als korte kant in lijn1
        zeta2=a_23(1)+a_23(2)*ratio_v1_v3+a_23(3)*ratio_v1_v3^2+...
            a_23(4)*ratio_v2_v3+a_23(5)*ratio_v2_v3^2+a_23(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
        %Weerstandsfactor
    elseif k2==A(j,14)
        %Anders: als korte kant in lijn2
        zeta2=a_13(1)+a_13(2)*ratio_v2_v3+a_13(3)*ratio_v2_v3^2+...
            a_13(4)*ratio_v1_v3+a_13(5)*ratio_v1_v3^2+a_13(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
        %Weerstandsfactor
    else
        %Anders: als korte kant is ingang
        zeta2=a_23(1)+a_23(2)*ratio_v1_v3+a_23(3)*ratio_v1_v3^2+...
            a_23(4)*ratio_v2_v3+a_23(5)*ratio_v2_v3^2+a_23(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
        %Weerstandsfactor
    end
    %Einde (Als korte kant in lijn1)

Re_uit2=4*rho * q_V_uit2 / pi / mu / d_h_uit2;
%Berekening Reynoldsgetal
B(j,2)=DeltaPComp(q_V_in1,q_V_uit2,...

```

```

    d_h_in1,d_h_uit2,Re_in1,Re_uit2,q_V_in1,d_h_in1,zeta2);      %Drukverschil T-stuk
    B(j,4)=DeltaPLeiding(j,k2,d_h_uit1,q_V_uit2,Re_uit2,ratio_eps_d_uit2);
                                                                %Drukverschil leiding
    B(j,8)=Re_uit2;                                           %Sla Reynoldsgetal op
end                                                                 %Einde (Als lijn1 berekend wordt)
else                                                                 %Anders: als q_V door T-stuk is nul
    B(j,1)=0;                                                 %Drukverschil T-stuk
    B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,0,0,ratio_eps_d_uit1); %Drukverschil leiding
    B(j,7)=0;                                                 %Sla Reynoldsgetal op
    B(j,2)=0;                                                 %Drukverschil T-stuk
    B(j,4)=DeltaPLeiding(j,k2,d_h_uit2,0,0,ratio_eps_d_uit2); %Drukverschil leiding
    B(j,8)=0;                                                 %Sla Reynoldsgetal op
end                                                                 %Einde (Als q_V door T-stuk ongelijk nul)
else                                                                 %Anders: als T-stuk 2 ingangen heeft
    q_V_uit1=B(j,5);                                         %Uitgaande volumestroom

if q_V_uit1~=0                                               %Als q_V door T-stuk ongelijk nul
    if j==A(i1,8)                                             %Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt
        q_V_in1=B(i1,5);                                     %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit1
        Re_in1=B(i1,7);                                     %Berekening Reynoldsgetal
    else                                                       %Anders: als vorige uit2 gelijk aan huidige punt
        q_V_in1=B(i1,6);                                     %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit2
        Re_in1=B(i1,8);                                     %Berekening Reynoldsgetal
    end                                                         %Einde (Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt)

if j==A(i2,8)                                                 %Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt
    q_V_in2=B(i2,5);                                         %huidige q_V_in2 gelijk aan vorige q_V uit1
    Re_in2=B(i2,7);                                         %Berekening Reynoldsgetal
else                                                           %Anders: als vorige uit2 gelijk aan huidige punt
    q_V_in2=B(i2,6);                                         %huidige q_V_in2 gelijk aan vorige q_V uit2
    Re_in2=B(i2,8);                                         %Berekening Reynoldsgetal
end                                                           %Einde (Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt)

Re_uit1=4*rho * q_V_uit1 / pi / mu / d_h_uit1;             %Berekening Reynoldsgetal
a_13=zeta_T_stuk_verzamel(soort_T_stuk,1,:);               %Regressiecoefficienten
a_23=zeta_T_stuk_verzamel(soort_T_stuk,2,:);               %Regressiecoefficienten
ratio_v1_v3=q_V_in1*d_h_uit1^2/q_V_uit1/d_h_in1^2;         %Verhouding snelheden
ratio_v2_v3=q_V_in2*d_h_uit1^2/q_V_uit1/d_h_in2^2;         %Verhouding snelheden
Re_uit1=4*rho * q_V_uit1 / pi / mu / d_h_uit1;             %Berekening Reynoldsgetal
B(j,7)=Re_uit1;                                             %Sla Reynoldsgetal op

if lijn==1                                                    %Als lijn1 berekend wordt
    if i1==A(j,14)                                           %Als korte kant in lijn1
        zeta1=a_13(1)+a_13(2)*ratio_v1_v3+a_13(3)*ratio_v1_v3^2+...
            a_13(4)*ratio_v2_v3+a_13(5)*ratio_v2_v3^2+a_13(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
                                                                %Weerstandsfactor
    elseif i2==A(j,14)                                       %Anders: als korte kant in lijn2
        zeta1=a_23(1)+a_23(2)*ratio_v2_v3+a_23(3)*ratio_v2_v3^2+...
            a_23(4)*ratio_v1_v3+a_23(5)*ratio_v1_v3^2+a_23(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
                                                                %Weerstandsfactor
    else                                                       %Anders: als korte kant is ingang
        zeta1=a_13(1)+a_13(2)*ratio_v1_v3+a_13(3)*ratio_v1_v3^2+...
            a_13(4)*ratio_v2_v3+a_13(5)*ratio_v2_v3^2+a_13(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
                                                                %Weerstandsfactor
    end                                                         %Einde (Als korte kant in lijn1)

```

```

B(j,1)=DeltaPComp(q_V_in1,q_V_uit1,...%Drukverschil T-stuk
    d_h_in1,d_h_uit1,Re_in1,Re_uit1,q_V_uit1,d_h_uit1,zeta1);
B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,q_V_uit1,Re_uit1,ratio_eps_d_uit1);
                                                    %Drukverschil leiding
else                                                    %Anders: Als lijn2 berekend wordt
    if i1==A(j,14)                                    %Als korte kant in lijn1
        zeta2=a_23(1)+a_23(2)*ratio_v1_v3+a_23(3)*ratio_v1_v3^2+...
            a_23(4)*ratio_v2_v3+a_23(5)*ratio_v2_v3^2+a_23(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
                                                    %Weerstandsfactor
    elseif i2==A(j,14)                                %Anders: als korte kant in lijn2
        zeta2=a_13(1)+a_13(2)*ratio_v2_v3+a_13(3)*ratio_v2_v3^2+...
            a_13(4)*ratio_v1_v3+a_13(5)*ratio_v1_v3^2+a_13(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
                                                    %Weerstandsfactor
    else                                              %Anders: als korte kant is ingang
        zeta2=a_23(1)+a_23(2)*ratio_v1_v3+a_23(3)*ratio_v1_v3^2+...
            a_23(4)*ratio_v2_v3+a_23(5)*ratio_v2_v3^2+a_23(6)*ratio_v2_v3*ratio_v1_v3;
                                                    %Weerstandsfactor
    end                                              %Einde (Als korte kant in lijn1)

B(j,2)=DeltaPComp(q_V_in2,q_V_uit1,...%Drukverschil T-stuk
    d_h_in2,d_h_uit1,Re_in2,Re_uit1,q_V_uit1,d_h_uit1,zeta2);
B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,q_V_uit1,Re_uit1,ratio_eps_d_uit1);
                                                    %Drukverschil leiding
end                                                    %Einde (Als lijn1 berekend wordt)
else                                                    %Anders: als q_V door T-stuk is nul
    B(j,1)=0;                                        %Drukverschil T-stuk
    B(j,2)=0;                                        %Drukverschil T-stuk
    B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,0,0,ratio_eps_d_uit1); %Drukverschil leiding
end                                                    %Einde (Als q_V door T-stuk ongelijk nul)
end                                                    %Einde (Als T-stuk 1 ingang heeft)

%-----

function dp=DeltaPComp(q_V_in,q_V_uit,d_h_in,...
    d_h_uit,Re_in,Re_uit,q_V_verlies,d_h_verlies,zeta_verlies)
%dp=DeltaPComp(q_V_in,q_V_uit,d_h_in,...
% d_h_uit,q_V_verlies,d_h_verlies,zeta_verlies)
%Berekening van de drukverschil over het T-stuk
%dp: drukverschil over het T-stuk
%q_V_in: ingaande volumestroom
%q_V_uit: uitgaande volumestroom
%d_h_in: hydraulische diameter in
%d_h_uit: hydraulische diameter uit
%q_V_verlies: volumestroom voor berekening verlies
%d_h_verlies: hydraulische diameter voor berekening verlies
%zeta_verlies: weerstandsgetal
global rho mu

if Re_in>=2300
    alfa_in=1.05;
else
    alfa_in=2;
end
                                                    %Als stroming turbelent is
                                                    %Berekening kinetische energie coëfficiënt
                                                    %Anders: als stroming laminair is
                                                    %Berekening kinetische-energie-coëfficiënt
                                                    %Eind: (Als stroming turbelent is)

```

```

if Re_uit>=2300                                %Als stroming turbelent is
    alfa_uit=1.05;                               %Berekening kinetische energie coëfficiënt
else                                             %Anders: als stroming laminair is
    alfa_uit=2;                                  %Berekening kinetische-energie-coëfficiënt
end                                              %Eind: (Als stroming turbelent is)

dp=-8*rho / pi^2 * (alfa_uit * q_V_uit^2 / d_h_uit^4 -...
    alfa_in*q_V_in^2 / d_h_in^4) -...
    zeta_verlies*8*rho / pi^2 / d_h_verlies^4 * q_V_verlies^2; %Drukverschil T-stuk
    
```

## A.12 Code van 'TweeWeg\_klep'

```

function k=TweeWeg_klep(knooppunt)
%TweeWeg_klep(knooppunt)
%Berekening van de drukverschil over de 2-wegklep en leiding
%knooppunt: knooppunt van de 2-wegklep
global A B E rho mu x nullijn

j=knooppunt;                                %Index huidige knooppunt
i=A(j,4);                                   %Index vorige knooppunt lijn1
k=A(j,8);                                   %Index volgende knooppunt lijn1

d_e_in=A(j,5);                               %Hydraulische diameter in lijn1
d_e_uit=A(j,9);                              %Hydraulische diameter uit lijn1

ratio_eps_d_uit=A(j,10);                    %wandruwheid/binnendiameter

if x(j)~=0                                    %Als stand klep ongelijk 0
    if j==A(i,8)                               %Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt
        q_V_in=B(i,5);                         %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit1
    else                                       %Anders: Als uit2 van vorige punt gelijk aan huidige punt
        q_V_in=B(i,6);                         %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit2
    end                                       %Einde (Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt)

    if q_V_in~=0                               %Als q_V door klep ongelijk nul
        q_V_uit=q_V_in;                         %Uitgaande volumestroom
        Re_uit=4*rho * q_V_uit / pi / mu / d_e_uit; %Berekening Reynoldsgetal
        k_vs=E(j,4);                             %Volumestroom door volledig geopende klep [m^3/h]
        k_v=k_vs*KlepKarakteristiek(j);         %Weerstand klep
        B(j,1)=-1e5*rho/1000/k_v^2*3600^2*q_V_uit^2; %Drukverschil klep
        B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k,d_e_uit,q_V_uit,Re_uit,ratio_eps_d_uit); %Drukverschil leiding
        B(j,5)=q_V_uit;                          %Sla uitgaande volumestroom
        B(j,7)=Re_uit;                            %Sla Reynoldsgetal op
    else                                       %Anders: Als q_V door klep is nul
        B(j,1)=0;                                %Drukverschil klep
        B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k,d_e_uit,0,0,ratio_eps_d_uit); %Drukverschil leiding
        B(j,5)=0;                                %Sla uitgaande volumestroom
        B(j,7)=0;                                %Sla Reynoldsgetal op
    end                                       %Einde (Als q_V door ongelijk nul)
else                                         %Anders: als stand klep is 0
    while ~(E(j,1)==4 | E(j,1)==6)             %Terwijl geen T-stuk of 3-wegklep
        B(j,:)=0;                               %Volumestromen en drukverschillen zijn nul
        j_volgende=j;                           %Bewaar index huidige knooppunt
        j=A(j,4);                                %Naar vorige knooppunt
    end                                       %Einde (Terwijl geen T-stuk of 3-wegklep)
    
```

```

j_ander=A(j,15); %knooppunt andere T/klep

if j_volgende==A(j,8) %Als huidige uit1 gelijk aan volgende punt
    nullijn([j j_ander])=nullijn([j j_ander])+1; %Volumestroom lijn1 is nul
    B(j,[1 3 5 7])=0; %Volumestromen en drukverschillen lijn1 zijn nul
else %Anders: als huidige uit2 gelijk aan volgende punt
    nullijn([j j_ander])=nullijn([j j_ander])+2; %Volumestroom lijn2 is nul
    B(j,[2 4 6 8])=0; %Volumestromen en drukverschillen lijn2 zijn nul
end %Einde (Als huidige uit1 gelijk aan volgende punt)

k=j; %Index volgende knooppunt
end %Einde (Als stand klep ongelijk 0)

%-----

function ratio_kv_kvs=KlepKarakteristiek(knooppunt)
%ratio_kv_kvs=KlepKarakteristiek(knooppunt)
%Bepaling van k_v/k_vs bij gegeven klepstand
%knooppunt: knooppunt van de 2-wegklep
global E x

j=knooppunt; %Index huidige knooppunt
klepstand=x(j); %klepstand: huidige slag gedeeld door maximale slag
SV0=E(j,5); %theoretische regelverhouding (k_vs/k_v0)
ratio_kvr_kvs=1/E(j,6); %Werkelijke regelbereik

if E(j,3)==1 %Als klepkarakteristiek lineair is
    x_r=(ratio_kvr_kvs - 1/SV0) / (1 - 1/SV0); %Minimale klepstand binnen karakteristiek

    if klepstand>x_r %Als huidige klepstand groter dan minimale
        ratio_kv_kvs=(1 - 1/SV0)*klepstand + 1/SV0; %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
    else %Anders: als huidige klepstand kleiner dan minimale
        ratio_kv_kvs=ratio_kvr_kvs/x_r * klepstand; %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
    end %Einde (Als huidige klepstand groter dan minimale)
else %Anders: als klepkarakteristiek exponentieel is
    x_r=log(ratio_kvr_kvs)/log(SV0) + 1; %Minimale klepstand binnen karakteristiek

    if klepstand>x_r %Als huidige klepstand groter dan minimale
        ratio_kv_kvs=SV0^(klepstand-1); %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
    else %Anders: als huidige klepstand kleiner dan minimale
        ratio_kv_kvs=ratio_kvr_kvs/x_r * klepstand; %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
    end %Einde (Als huidige klepstand groter dan minimale)
end %Einde: (Als klepkarakteristiek lineair is)
end

```

### A.13 Code van 'DrieWeg\_klep'

```

function k=DrieWeg_klep(knooppunt)
%k=3wegKlep(knooppunt)
%Ittereerd tussen 2 3-wegkleppen/T-stukken totdat fout kleiner dan max. fout
%k: index van het volgende knooppunt na 1e of 2e T-stuk of 3-wegklep
%knooppunt: knooppunt van klep

```

```

global A B C D E FOUT ITT max_fout delta_p_tot x nullijn

j=knooppunt; %huidige knooppunt
j_ander=A(j,15); %knooppunt andere T/klep
i=A(j,4); %Index vorige knooppunt

if A(j,6)==0 & min(abs(D(j_ander,[2 3])))>max_fout
    %Als klep 2x uit en fout groter dan max. fout
    if j==A(i,8) %Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt
        q_V_in=B(i,5); %huidige q_V_in gelijk aan vorige q_V uit1
    else %Anders: Als uit2 van vorige punt gelijk aan huidige punt
        q_V_in=B(i,6); %huidige q_V_in gelijk aan vorige q_V uit2
    end %Einde (Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt)

    B(j_ander,5)=q_V_in; %q_V_uit 2e T/klep is q_V_in 1e T/klep

    if x(j)==0 & nullijn(j)~=3 %Als stand klep is 0
        if A(j,8)==A(j,14) %Als korte kant in lijn1
            nullijn([j j_ander])=2; %Door lijn2 stroomt niets
        else %Anders: als korte kant in lijn2
            nullijn([j j_ander])=1; %Door lijn1 stroomt niets
        end %Einde (Als korte kant in lijn1)
    elseif abs(x(j)-1)<10e-10 & nullijn(j)~=3 %Als klepstand is 1
        if A(j,8)~=A(j,14) %Als lange kant in lijn1
            nullijn([j j_ander])=2; %Door lijn2 stroomt niets
        else %Anders: als lange kant in lijn2
            nullijn([j j_ander])=1; %Door lijn1 stroomt niets
        end %Einde (Als lange kant in lijn1)
    end %Einde (Als stand klep is 0)

    switch nullijn(j) %Kies afhankelijk van lijn zonder volumestroom
    case 0 %Als geen volumestroom nul is
        switch D(j,1) %Kies afhankelijk van aantal itt.
        case 0 %Als 0 maal 1e T/klep
            D(j,1)=D(j,1)+1; %Aantal maal 1e T/klep plus een
            B(j_ander,5)=q_V_in; %q_V_uit 2e T/klep is q_V_in 1e T/klep
            B(j,5)=0; %q_V_uit lijn1 is nul
            B(j,6)=q_V_in; %q_V_uit lijn2 is q_V_in 1e T/klep
            DeltaP3weg_klep(j,1); %Drukverschil over klep enleiding
            k=A(j,8); %Uit1 wordt volgende knooppunt
        case 1 %Als 1 maal 1e T/klep
            D(j,1)=D(j,1)+1; %Aantal maal 1e T/klep plus een
            DeltaP3weg_klep(j,2); %Drukverschil over klep enleiding
            k=A(j,11); %Uit2 wordt volgende knooppunt
        case 2 %Als 2 maal 1e T/klep
            D(j,1)=D(j,1)+1; %Aantal maal 1e T/klep plus een
            B(j,5)=q_V_in; %q_V_uit lijn1 is q_V_in 1e T/klep
            B(j,6)=0; %q_V_uit lijn2 is nul
            DeltaP3weg_klep(j,1); %Drukverschil over klep en leiding
            k=A(j,8); %Uit1 wordt volgende knooppunt
        case 3 %Als 3 maal 1e T/klep
            D(j,1)=D(j,1)+1; %Aantal maal 1e T/klep plus een
            DeltaP3weg_klep(j,2); %Drukverschil over klep en leiding
            k=A(j,11); %Uit2 wordt volgende knooppunt
        otherwise %Anders: Als 3 of meer maal 1e T/klep
    end
end
    
```



```

if mod(D(j,1),2)==0
    D(j,1)=D(j,1)+1;
    B(j,5)=interp1([D(j_ander,2) D(j_ander,3)], [C(j_ander,1,1) C(j_ander,2,1)], 0);
    B(j,6)=q_V_in-B(j,5);
    DeltaP3weg_klep(j,1);
    k=A(j,8);
else
    D(j,1)=D(j,1)+1;
    DeltaP3weg_klep(j,2);
    k=A(j,11);
end;
end;
case 1
    B(j,5)=0;
    B(j,6)=q_V_in;
    DeltaP3weg_klep(j,2);
    k=A(j,11);
case 2
    B(j,5)=q_V_in;
    B(j,6)=0;
    DeltaP3weg_klep(j,1);
    k=A(j,8);
case 3
    B(j,:)=0;
    j_volgende=j;
    j=A(j,4);

while ~(E(j,1)==4 | E(j,1)==6)
    B(j,:)=0;
    j_volgende=j;
    j=A(j,4);
end

j_ander=A(j,15);

if j_volgende==A(j,8)
    nullijn([j j_ander])=nullijn([j j_ander])+1;
    B(j,[1 3 5 7])=0;
    C(j_ander,:)=zeros(2,4);
    D(j_ander,[1 2 3])=[0 inf inf];
else
    nullijn([j j_ander])=nullijn([j j_ander])+2;
    B(j,[2 4 6 8])=0;
    C(j_ander,:)=zeros(2,4);
    D(j_ander,[1 2 3])=[0 inf inf];
end

k=j;
end
elseif A(j,6)~=0 & min(abs(D(j,[2 3])))>max_fout
if nullijn(j)==1
    DeltaP3weg_klep(j,2);
    k=A(j,8);
elseif nullijn(j)==2

```

```

DeltaP3weg_klep(j,1);
k=A(j,8);
else
if mod(D(j,1),2)==0
    D(j,1)=D(j,1)+1;
    j_huidig=j;
    j=j_ander;
    som=B(j,1)+B(j,3);
    j=A(j,8);

while j~=j_huidig
    if nullijn(j)==1
        if A(j,11)~=0
            som=som+B(j,2)+B(j,4);
            j=A(j,11);
        else
            som=som+B(j,2)+B(j,3);
            j=A(j,8);
        end
    else
        som=som+B(j,1)+B(j,3);
        j=A(j,8);
    end
end

DeltaP3weg_klep(j,1);
delta_p_tot(j,1)=som+B(j,1);
k=j_ander;
else
D(j,1)=D(j,1)+1;
j_huidig=j;
j=j_ander;
som=B(j,2)+B(j,4);
j=A(j,11);

while j~=j_huidig
    if nullijn(j)==1
        if A(j,11)~=0
            som=som+B(j,2)+B(j,4);
            j=A(j,11);
        else
            som=som+B(j,2)+B(j,3);
            j=A(j,8);
        end
    else
        som=som+B(j,1)+B(j,3);
        j=A(j,8);
    end
end

DeltaP3weg_klep(j,2);
delta_p_tot(j,2)=som+B(j,2);

if delta_p_tot(j,1)+delta_p_tot(j,2)~=0
    fout=(delta_p_tot(j,1)-delta_p_tot(j,2))/...

```

%Drukverschil over klep en leiding  
 %Index volgende knooppunt  
 %Anders: als volumestroom lijn1 en lijn2 ongelijk nul  
 %Als even maal 2e T/klep (lijn1)  
 %Aantal maal 2e T/klep plus een  
 %Knooppunt 2e T/klep  
 %Terug naar 1e T/klep  
 %Tel drukverschil element op bij som  
 %Naar volgende knooppunt  
  
 %Zolang 2e T/klep niet bereikt is  
 %Als volumestroom lijn1 nul is  
 %Als klep 2x uit  
 %Tel drukverschil element op bij som  
 %Naar volgende knooppunt  
 %Anders: als klep 1x uit  
 %Tel drukverschil element op bij som  
 %Naar volgende knooppunt  
 %Einde (Als klep 2x uit)  
 %Anders: als volumestroom lijn1 ongelijk nul  
 %Tel drukverschil element op bij som  
 %Naar volgende knooppunt  
 %Einde (Als volumestroom lijn1 nul is)  
 %Einde (Bij: Zolang 2e T/klep...)  
  
 %Drukverschil over klep en leiding  
 %Totale drukverschil over lijn1  
 %ga terug naar 1e T/klep  
 %Anders (Bij: Als even maal...)(lijn2)  
 %Aantal maal 2e T/klep plus een  
 %Knooppunt 2e T/klep  
 %Terug naar 1e T/klep  
 %Som: sommatie drukverschil lijn2  
 %Uit2 wordt volgende knooppunt  
  
 %Zolang 2e T/klep niet bereikt is  
 %Als volumestroom lijn1 nul is  
 %Als klep 2x uit  
 %Tel drukverschil element op bij som  
 %Naar volgende knooppunt  
 %Anders: als klep 1x uit  
 %Tel drukverschil element op bij som  
 %Naar volgende knooppunt  
 %Einde (Als klep 2x uit)  
 %Anders: als volumestroom lijn1 ongelijk nul  
 %Tel drukverschil element op bij som  
 %Naar volgende knooppunt  
 %Einde (Als volumestroom lijn1 nul is)  
 %Einde (Bij: Zolang 2e T/klep...)  
  
 %Drukverschil over klep en leiding  
 %Totale drukverschil over lijn2  
  
 %fout tussen d\_p\_lijn1, d\_p\_lijn2

```

        max(abs(delta_p_tot(j,2)),abs(delta_p_tot(j,1)));
    else
        fout=0;
    end

    if delta_p_tot(j,2)<delta_p_tot(j,1)%Als d_p_lijn2 kleiner dan d_p_lijn1
        C(j,1,1)=B(j_ander,5); %q_V_klein is q_V_uit1 1e T/klep
        C(j,1,2)=delta_p_tot(j,1); %Drukverschil lijn1 bij q_V_klein
        C(j,1,3)=delta_p_tot(j,2); %Drukverschil lijn2 bij q_V_klein
        D(j,2)=fout; %Fout bij q_V_klein
    else %Anders: als d_p_lijn2 groter dan d_p_lijn1
        C(j,2,1)=B(j_ander,5); %q_V_groot is q_V_uit1 1e T/klep
        C(j,2,2)=delta_p_tot(j,1); %Drukverschil lijn1 bij q_V_groot
        C(j,2,3)=delta_p_tot(j,2); %Drukverschil lijn2 bij q_V_groot
        D(j,3)=fout; %Fout bij q_V_groot
    end %Einde (Als d_p_lijn2 kleiner dan d_p_lijn1)

    k=j_ander; %Terug naar 1e T/klep
end %Einde (Als even maal 2e T/klep (lijn1))
end %Einde (Als volumestroom lijn1 nul is)
else %Anders: als fout kleiner dan max. fout
    D(j,1)=0; %Zet aantal maal 1e T/klep op nul
    j=j_ander; %Terug naar 2e T/klep
    C(j, :, :) = zeros(2,4); %Maak matrix C leeg
    ITT(j)=D(j,1); %Aantal iteraties klep
    D(j,1)=0; %Zet aantal maal 2e T/klep op nul
    FOUT(j)=min(D(j,[2 3])); %Zet fout klep bij andere fouten
    D(j,2)=inf; %Zet huidige fout klep op oneindig
    D(j,3)=inf; %Zet vorige fout klep op oneindig
    k=A(j,8); %Uit1 wordt volgende knooppunt
end %Einde (Als klep 2x uit en fout groter dan max. fout)

```

#### A.14 Code van 'DeltaP3weg\_klep'

```

function DeltaP3weg_klep(knooppunt,lijn)
%DeltaP3wegKlep(knooppunt,lijn)
%Berekening van de drukverschil over de 3-wegklep en leiding
%knooppunt: index van de 3-wegklep
%lijn=1: lijn1 wordt berekend
%lijn=2: lijn2 wordt berekend
global A B E rho mu

j=knooppunt; %Index huidige knooppunt
i1=A(j,4); %Index vorige knooppunt lijn1
i2=A(j,6); %Index vorige knooppunt lijn2
k1=A(j,8); %Index volgende knooppunt lijn1
k2=A(j,11); %index volgende knooppunt lijn2

d_h_in1=A(j,5); %Hydraulische diameter in lijn1
d_h_in2=A(j,7); %Hydraulische diameter in lijn2
d_h_uit1=A(j,9); %Hydraulische diameter uit lijn1
d_h_uit2=A(j,12); %Hydraulische diameter uit lijn2

ratio_eps_d_uit1=A(j,10); %wandruwheid/binnendiameter uit1
ratio_eps_d_uit2=A(j,13); %wandruwheid/binnendiameter uit2

```

```

if i2==0
    %Als klep 1 ingang heeft
    if j==A(i1,8)
        %Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt
        q_V_in1=B(i1,5);
        %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit1
    else
        %Anders: als vorige uit2 gelijk aan huidige punt
        q_V_in1=B(i1,6);
        %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit2
    end
    %Einde (Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt)

if q_V_in1~=0
    %Als q_V door klep ongelijk nul
    q_V_uit1=B(j,5);
    %Uitgaande volumestroom lijn1
    q_V_uit2=B(j,6);
    %Uitgaande volumestroom lijn2
    k_vs=E(j,5);
    %Volumestroom door volledig geopende klep [m^3/h]

if lijn==1
    %Als lijn1 berekend wordt
    if k1==A(j,14)
        %Als korte kant in lijn1
        k_v1=k_vs*KlepKarakteristiek(j,'aftak');
        %Weerstand klep lijn1
    else
        %Anders: als korte kant in lijn2
        k_v1=k_vs*KlepKarakteristiek(j,'lijn');
        %Weerstand klep lijn1
    end
    %Einde (Als korte kant in lijn1)

Re_uit1=4*rho * q_V_uit1 / pi / mu / d_h_uit1;
%Berekening Reynoldsgetal
B(j,1)=-1e5*rho/1000/k_v1^2*3600^2*q_V_uit1^2;
%drukverschil klep
B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,q_V_uit1,Re_uit1,ratio_eps_d_uit1);
%drukverschil leiding
B(j,7)=Re_uit1;
%Slu Reynoldsgetal op
else
    %Anders (Als lijn2 berekend wordt)
    if k1==A(j,14)
        %Als korte kant in lijn1
        k_v2=k_vs*KlepKarakteristiek(j,'lijn');
        %Weerstand klep lijn2
    else
        %Anders: als korte kant in lijn2
        k_v2=k_vs*KlepKarakteristiek(j,'aftak');
        %Weerstand klep lijn2
    end
    %Einde (Als korte kant in lijn1)

Re_uit2=4*rho * q_V_uit2 / pi / mu / d_h_uit2;
%Berekening Reynoldsgetal
B(j,2)=-1e5*rho/1000/k_v2^2*3600^2*q_V_uit2^2;
%drukverschil klep
B(j,4)=DeltaPLeiding(j,k2,d_h_uit2,q_V_uit2,Re_uit2,ratio_eps_d_uit2);
%drukverschil leiding
B(j,8)=Re_uit2;
%Slu Reynoldsgetal op
end
%Einde (Als lijn1 berekend wordt)
else
    %Anders: als q_V door klep is nul
    B(j,1)=0;
    %drukverschil klep
    B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,0,0,ratio_eps_d_uit1);
    %drukverschil leiding
    B(j,7)=0;
    %Slu Reynoldsgetal op
    B(j,2)=0;
    %drukverschil klep
    B(j,4)=DeltaPLeiding(j,k2,d_h_uit2,0,0,ratio_eps_d_uit2);
    %drukverschil leiding
    B(j,8)=0;
    %Slu Reynoldsgetal op
end
%Einde (Als q_V door ongelijk nul)
else
    %Anders: als klep 2 ingangen heeft
    q_V_uit1=B(j,5);
    %Uitgaande volumestroom

if q_V_uit1~=0
    %Als q_V door klep ongelijk nul
    if j==A(i1,8)
        %Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt
        q_V_in1=B(i1,5);
        %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit1
    else
        %Anders: als vorige uit2 gelijk aan huidige punt
        q_V_in1=B(i1,6);
        %huidige q_V_in1 gelijk aan vorige q_V uit2
    end
    %Einde (Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt)

```

```

if j==A(i2,8)                                %Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt
    q_V_in2=B(i2,5);                          %huidige q_V_in2 gelijk aan vorige q_V uit1
else
    q_V_in2=B(i2,6);                          %Anders: als vorige uit2 gelijk aan huidige punt
    %huidige q_V_in2 gelijk aan vorige q_V uit2
end                                             %Einde (Als vorige uit1 gelijk aan huidige punt)

k_vs=E(j,5);                                  %Volumestroom door volledig geopende klep [m^3/h]
Re_uit1=4*rho * q_V_uit1 / pi / mu / d_h_uit1; %Berekening Reynoldsgetal
B(j,7)=Re_uit1;                               %Sla Reynoldsgetal op

if lijn==1                                    %Als lijn1 berekend wordt
    if i1==A(j,14)                             %Als korte kant in lijn1
        k_v1=k_vs*KlepKarakteristiek(j,'aftak'); %Weerstand klep lijn1
    else                                        %Anders: als korte kant in lijn2
        k_v1=k_vs*KlepKarakteristiek(j,'lijn'); %Weerstand klep lijn1
    end                                         %Einde (Als korte kant in lijn1)

    B(j,1)=-1e5*rho/1000/k_v1^2*3600^2*q_V_in1^2; %drukverschil klep
    B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,q_V_uit1,Re_uit1,ratio_eps_d_uit1);
    %drukverschil leiding

else                                           %Anders: als lijn2 berekend wordt
    if i1==A(j,14)                             %Als korte kant in lijn1
        k_v2=k_vs*KlepKarakteristiek(j,'lijn'); %Weerstand klep lijn2
    else                                        %Anders: als korte kant in lijn2
        k_v2=k_vs*KlepKarakteristiek(j,'aftak'); %Weerstand klep lijn2
    end                                         %Einde (Als korte kant in lijn1)

    B(j,2)=-1e5*rho/1000/k_v2^2*3600^2*q_V_in2^2; %drukverschil klep
    B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,q_V_uit1,Re_uit1,ratio_eps_d_uit1);
    %drukverschil leiding

end                                           %Einde (Als lijn1 berekend wordt)
else                                           %Anders: als q_V door klep is nul
    B(j,1)=0;                                   %Drukverschil klep
    B(j,2)=0;                                   %Drukverschil klep
    B(j,3)=DeltaPLeiding(j,k1,d_h_uit1,0,0,ratio_eps_d_uit1); %Drukverschil leiding
end                                           %Einde (Als q_V door klep ongelijk nul)
end                                           %Einde (Bij: Als het klep...)

%-----

function ratio_kv_kvs=KlepKarakteristiek(knooppunt,stroming)
%ratio_kv_kvs=KlepKarakteristiek(knooppunt,stroming)
%Bepaling van de k_v/k_vs van de aftak- of lijnstroming bij gegeven klepstand
%knooppunt: knooppunt van de 3-wegklep
%stroming='lijn': er is sprake van lijnstroming
%stroming='aftak': er is sprake van aftakstroming
global E x

j=knooppunt;                                  %Index huidige knooppunt
klepstand=x(j);                               %Klepstand: huidige slag gedeeld door maximale slag
SV0=E(j,6);                                  %Theoretische regelverhouding (k_vs/k_v0)
ratio_kvr_kvs=1/E(j,7);                      %Werkelijke regelbereik

if stroming(1)=='l'                           %Als lijnstroming berekend wordt

```

```

if E(j,3)==1                                %Als karakteristiek lijnstroming lineair is
    x_r=(ratio_kvr_kvs - 1/SV0) / (1 - 1/SV0); %Minimale klepstand binnen karakteristiek

    if klepstand>x_r                          %Als huidige klepstand groter dan minimale
        ratio_kv_kvs=(1 - 1/SV0)*klepstand + 1/SV0;
                                                %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
    else                                       %Anders: als huidige klepstand kleiner dan minimale
        ratio_kv_kvs=ratio_kvr_kvs/x_r * klepstand;
                                                %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
    end                                       %Einde (Als huidige klepstand groter dan minimale)
else                                         %Anders: als karakteristiek lijnstroming exponentieel is
    x_r=log(ratio_kvr_kvs)/log(SV0) + 1;    %Minimale klepstand binnen karakteristiek

    if klepstand>x_r                          %Als huidige klepstand groter dan minimale
        ratio_kv_kvs=SV0^(klepstand-1);    %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
    else                                       %Anders: als huidige klepstand kleiner dan minimale
        ratio_kv_kvs=ratio_kvr_kvs/x_r * klepstand;
                                                %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
    end                                       %Einde (Als huidige klepstand groter dan minimale)
end                                           %Einde: (Als karakteristiek lijnstroming lineair is)
else                                         %Ander aftakstroming berekend wordt
    if E(j,4)==1                              %Als karakteristiek aftakstroming lineair is
        x_r=(ratio_kvr_kvs - 1/SV0) / (1 - 1/SV0); %Minimale klepstand binnen karakteristiek

        if klepstand>x_r                      %Als huidige klepstand groter dan minimale
            ratio_kv_kvs=(1 - 1/SV0)*(1-klepstand); %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
        else                                  %Anders: als huidige klepstand kleiner dan minimale
            ratio_kv_kvs=1 - ratio_kvr_kvs/x_r * klepstand;
                                                %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
        end                                  %Einde (Als huidige klepstand groter dan minimale)
    else                                      %Anders: als karakteristiek aftakstroming exponentieel is
        x_r=log(ratio_kvr_kvs)/log(SV0) + 1; %Minimale klepstand binnen karakteristiek

        if klepstand>x_r                      %Als huidige klepstand groter dan minimale
            ratio_kv_kvs=1 - SV0^(klepstand-1); %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
        else                                  %Anders: als huidige klepstand kleiner dan minimale
            ratio_kv_kvs=1 - ratio_kvr_kvs/x_r * klepstand;
                                                %Volumestroom huidig/volumestroom maximaal
        end                                  %Einde (Als huidige klepstand groter dan minimale)
    end                                       %Einde: (Als karakteristiek aftakstroming lineair is)
end                                           %Als lijnstroming berekend wordt
    
```

### A.15 Code van 'Vat'

```

function k=Vat(knooppunt)
%k=Vat(knooppunt)
%Berekening van de drukval over een vat en leiding
%k: index van het volgende knooppunt
%knooppunt: knooppunt van het buffervat
global rho mu g A B E

j=knooppunt;                                %Index huidige knooppunt
i=A(j,4);                                    %Index vorige knooppunt
k=A(j,8);                                    %Index volgende knooppunt
d_h_in=A(j,5);                               %Hydraulische diameter in
    
```

```

d_h_uit=A(j,9); %Hydraulische diameter uit
ratio_eps_d=A(j,10); %Wandruwheid leiding/binnendiameter leiding
positie_uit=E(j,3:5); %Positie van uitgang

if j==A(i,8) %Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt
    q_V_in=B(i,5); %Ingaande q_V gelijk aan q_V uit1
    Re_in=B(i,7); %Reynoldsgetal ingaande stroming
else %Anders: Als uit2 van vorige punt gelijk aan huidige punt
    q_V_in=B(i,6); %Ingaande q_V gelijk aan q_V uit2
    Re_in=B(i,8); %Reynoldsgetal ingaande stroming
end %Einde: Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt

q_V_uit=q_V_in; %Uitgaande volumestroom

if q_V_in~=0 %Als q_V door vat ongelijk nul
    d_h_in=A(j,5); %Hydraulische diameter in
    soort_uit=E(j,6); %Uitvoering van verbinding vat->leiding
    ratio_r_D_uit=E(j,7); %Afrondingsstraal uitstroomopening/binnendiameter leiding
    Re_uit=4*rho * q_V_uit / pi / mu / d_h_uit; %Berekening Reynoldsgetal

    if Re_in>=2300 %Als stroming turbulent is
        alfa_in=1.05; %Berekening kinetische energie coëfficiënt
    else %Anders: als stroming laminair is
        alfa_in=2; %Berekening kinetische-energie-coëfficiënt
    end %Einde (Als stroming turbulent is)

    if Re_uit>=2300 %Als stroming turbulent is
        alfa_uit=1.05; %Berekening kinetische energie coëfficiënt
    else %Anders: als stroming laminair is
        alfa_uit=2; %Berekening kinetische-energie-coëfficiënt
    end %Einde (Als stroming turbulent is)

    zeta_in=alfa_in; %Bereken weerstandsfactor

    switch soort_uit %Kies afhankelijk van uitvoering verbinding vat->leiding
    case 1 %Als leiding invat doorsteekt
        zeta_uit=0.78; %Bereken weerstandsfactor
    case 2 %Als hoek uitstroomopening scherp
        zeta_uit=0.5; %Bereken weerstandsfactor
    case 3 %Als hoek uitstroomopening afgerond
        if ratio_r_D_uit<=0.15 %Als relatieve afronding kleiner/gelijk 0.15
            zeta_uit=interp1([0 0.02 0.06 0.15],[0.5 0.28 0.15 0.04],ratio_r_D_uit);
            %Bereken weerstandsfactor
        else %Anders: als relatieve afronding groter 0.15
            zeta_uit=0.04; %Bereken weerstandsfactor
        end %Einde (Als relatieve afronding kleiner/gelijk 0.15)
    end %Einde (Kies afhankelijk van uitvoering verbinding vat->leiding)
    B(j,1)=rho * g * (A(j,3) - positie_uit(3))-8*rho / pi^2 * (alfa_uit * q_V_uit^2 / d_h_uit^4 ...
    - alfa_in * q_V_in^2 / d_h_in^4) - zeta_in*8*rho / pi^2 / d_h_in^4 * q_V_in^2 ...
    - zeta_uit*8*rho / pi^2 / d_h_uit^4 * q_V_uit^2; %Drukverschil over vat
else %Anders: als q_V door vat is nul
    Re_uit=0; %Berekening Reynoldsgetal
    B(j,1)=rho * g * (A(j,3) - positie_uit(3)); %Drukverschil over vat
end %Einde: (Als q_V door vat ongelijk nul)

```

```
B(j,3)=DeltaPLeiding2(positie_uit,k,d_h_uit,q_V_uit,Re_uit,ratio_eps_d);
                                     %Drukverschil over leiding
B(j,5)=q_V_uit;                       %Sla uitgaande volumestroom op
B(j,7)=Re_uit;                         %Sla Reynoldsgetal op
```

```
%-----
function dp=DeltaPLeiding2(positie_in,knooppunt2,d_h,q_V,Re,ratio_eps_d)
%dp=DeltaPLeiding(knooppunt1,knooppunt2,d_h,q_V)
%Berekening van de drukval over de leiding
%dp: drukval over de leiding
%positie_in: positie van het begin van de leiding
%knooppunt2: knooppunt aan het einde van de leiding
%d: (hydraulische) diameter van de leiding
%q_V: volumestroom door de leiding
global rho g A

k=knooppunt2;                          %Index volgende knooppunt
p1=positie_in;                          %Positie begin leiding
p2=A(k,1:3);                             %Positie eind leiding

if q_V~=0                                %Als q_V door leiding ongelijk nul is
    f=Bereken_f(ratio_eps_d,Re);          %Frictiefactor
    l=norm(p1-p2);                        %Lengte leiding
    dp=-rho * g * (p2(3) - p1(3)) -...
        f * l / d_h * 8*rho / pi^2 / d_h^4 * q_V^2; %Drukverschil leiding
else                                       %Anders: als q_V door leiding is nul
    dp=-rho * g * (p2(3) - p1(3));        %drukval leiding
end                                       %Einde (Als q_V door leiding ongelijk nul)
```

### A.16Code van 'Overig'

```
function k=Overig(knooppunt)
%k=Overig(knooppunt)
%Berekening van de drukval over een component en leiding
%k: index van het volgende knooppunt
%knooppunt: knooppunt van het component
global rho mu g A B E

j=knooppunt;                             %Index huidige knooppunt
i=A(j,4);                                 %Index vorige knooppunt
k=A(j,8);                                 %Index volgende knooppunt
d_h_in=A(j,5);                            %Hydraulische diameter in
d_h_uit=A(j,9);                           %Hydraulische diameter uit
ratio_eps_d=A(j,10);                      %Wandruwheid leiding/binnendiameter leiding
positie_uit=E(j,3:5);                     %Positie van uitgang

if j==A(i,8)                              %Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt
    q_V_in=B(i,5);                         %Ingaande q_V gelijk aan q_V uit1
    Re_in=B(i,7);                          %Reynoldsgetal ingaande stroming
else                                       %Anders: Als uit2 van vorige punt gelijk aan huidige punt
    q_V_in=B(i,6);                         %Ingaande q_V gelijk aan q_V uit2
    Re_in=B(i,8);                          %Reynoldsgetal ingaande stroming
end                                       %Einde: Als uit1 van vorige punt gelijk aan huidige punt

q_V_uit=q_V_in;                           %Uitgaande volumestroom
```



```

if q_V_in~=0
    d_h_in=A(j,5);
    ratio_r_D_uit=E(j,7);%verhouding wandruwheid t.o.v. diameter
    Re_uit=4*rho * q_V_uit / pi / mu / d_h_uit;
    zeta=E(j,2);

if Re_in>=2300
    alfa_in=1.05;
else
    alfa_in=2;
end

if Re_uit>=2300
    alfa_uit=1.05;
else
    alfa_uit=2;
end

B(j,1)=rho * g * (A(j,3) - positie_uit(3)) ...
- 8*rho / pi^2 * (alfa_uit * q_V_uit^2 / d_h_uit^4 - alfa_in * q_V_in^2 / d_h_in^4) ...
-zeta*8*rho / pi^2 * ((q_V_in/d_h_in^2 + q_V_uit/d_h_uit^2)/2 )^2;

else
    Re_uit=0;
    B(j,1)=rho * g * (A(j,3) - positie_uit(3));
end

B(j,3)=DeltaPLeiding2(positie_uit,k,d_h_uit,q_V_uit,Re_uit,ratio_eps_d);

B(j,5)=q_V_uit;
B(j,7)=Re_uit;

%-----
function dp=DeltaPLeiding2(positie_in,knooppunt2,d_h,q_V,Re,ratio_eps_d)
%dp=DeltaPLeiding(knooppunt1,knooppunt2,d_h,q_V)
%Berekening van de drukval over de leiding
%dp: drukval over de leiding
%knooppunt1: knooppunt aan het begin van de leiding
%knooppunt2: knooppunt aan het einde van de leiding
%d: (hydraulische) diameter van de leiding
%q_V: volumestroom door de leiding
global rho g A

k=knooppunt2;
p1=positie_in;
p2=A(k,1:3);

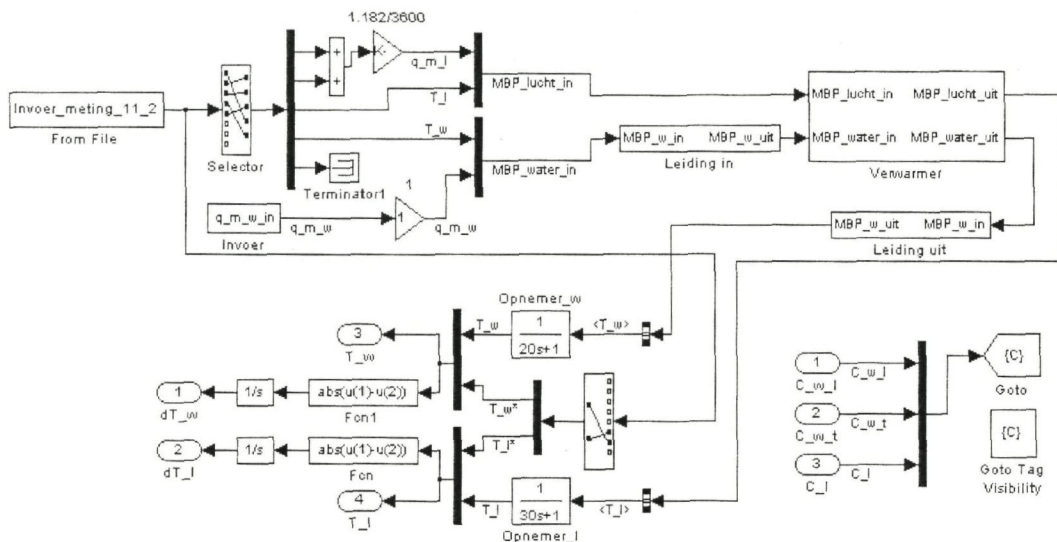
```

```
if q_V~=0 %Als q_V door leiding ongelijk nul is
    f=Bereken_f(ratio_eps_d,Re); %Frictiefactor
    l=norm(p1-p2); %Lengte leiding
    dp=-rho * g * (p2(3) - p1(3)) -...
        f * l / d_h * 8*rho / pi^2 / d_h^4 * q_V^2; %Drukverschil leiding
else %Anders: als q_V door leiding is nul
    dp=-rho * g * (p2(3) - p1(3)); %drukval leiding
end %Einde (Als q_V door leiding ongelijk nul)
```

## Bijlage B: Model van luchtverwarmer uitgewerkt in Simulink

In deze bijlage wordt het model besproken van de luchtverwarmer, zoals dat in Simulink in blokschema's is uitgewerkt. Dit is het gevalideerde model, dat beschreven wordt door de vergelijkingen en relaties uit hoofdstuk 4. *Cursief geschreven woorden hebben betrekking op blokken in de figuren of op computerbestanden*

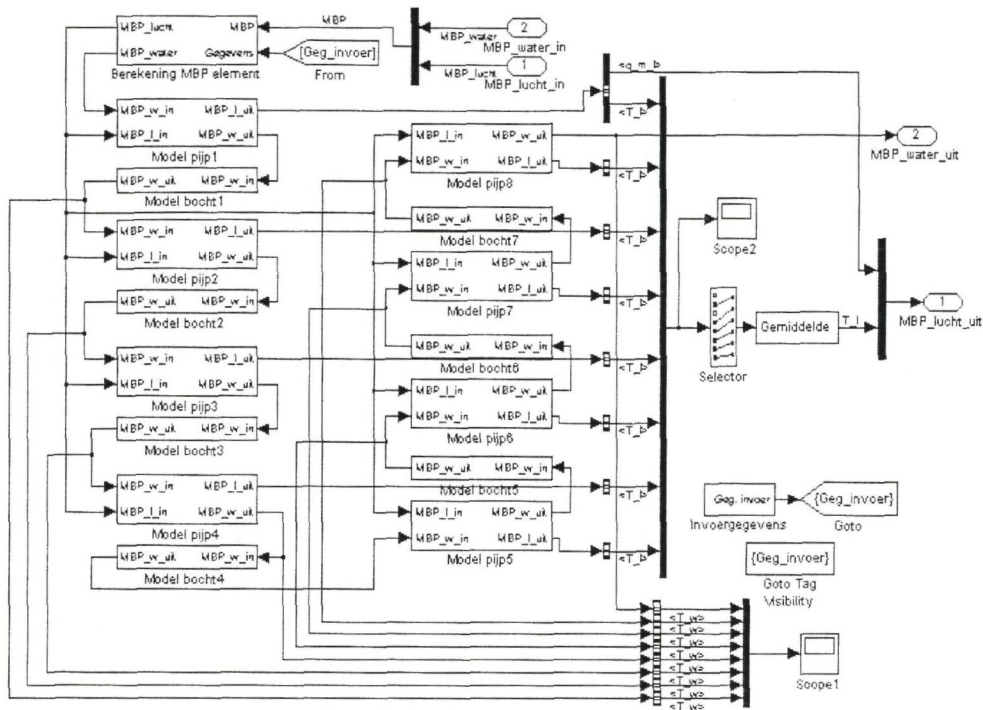
Wanneer het bestand *Totaal6C\_8elem.mdl* wordt geopend verschijnt het volgende model.



Figuur B.1: Blokschema Totaal6C\_8elem

Het gedeelte voor het blok *luchtverwarmer* zorgt voor de invoer van de benodigde meetwaarden. De blokken *leiding in* en *leiding uit* verschillen alleen van de *luchtverwarmer* in het feit dat het uitwendige oppervlak van de leidingen geen warmte uitwisselt met de lucht. De blokken *leiding in* en *leiding uit* zullen daarom niet worden beschreven.

Na dubbelklikken op *luchtverwarmer* verschijnt volgend blokschema.



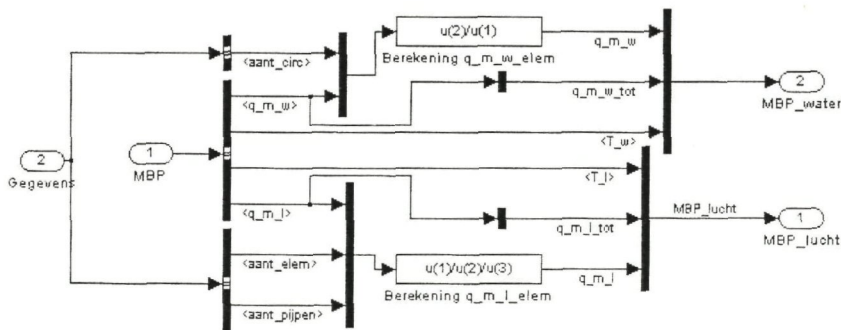
Figuur B.2: Blokschema Totaal6C\_8elem/luchtverwarmer

Zoals te zien in Figuur B.2 bestaat de luchtverwarmer uit 8 pijpen en één pijprijs. Na iedere *pijp*, behalve de laatste, volgt een *bocht*. Het blok *model bocht* verschillen alleen van het blok *model pijp* in het feit dat het uitwendige oppervlak van de bochten geen warmte uitwisselt met de lucht. Het blok *model bocht* zal daarom niet worden beschreven.

In de volgende paragrafen zullen achtereenvolgens *berekening MBP element*, *invoergegevens* en *model pijp* worden behandeld.

### B.1 Berekening MBP element

Figuur B.3 geeft de inhoud van *invoergegevens* weer.

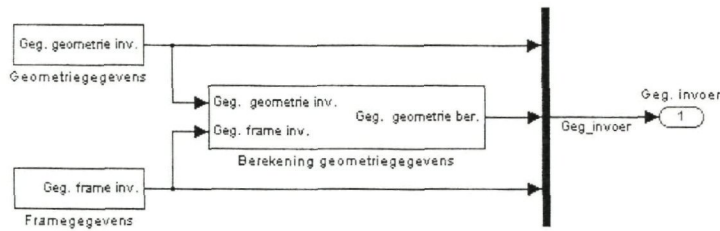


Figuur B.3: Blokschema Totaal6C\_8elem/luchtverwarmer/invoergegevens

Dit blok past de materie beschrijvende parameters (MBP) aan, zodat de elementen de juiste MBP als invoer krijgen.

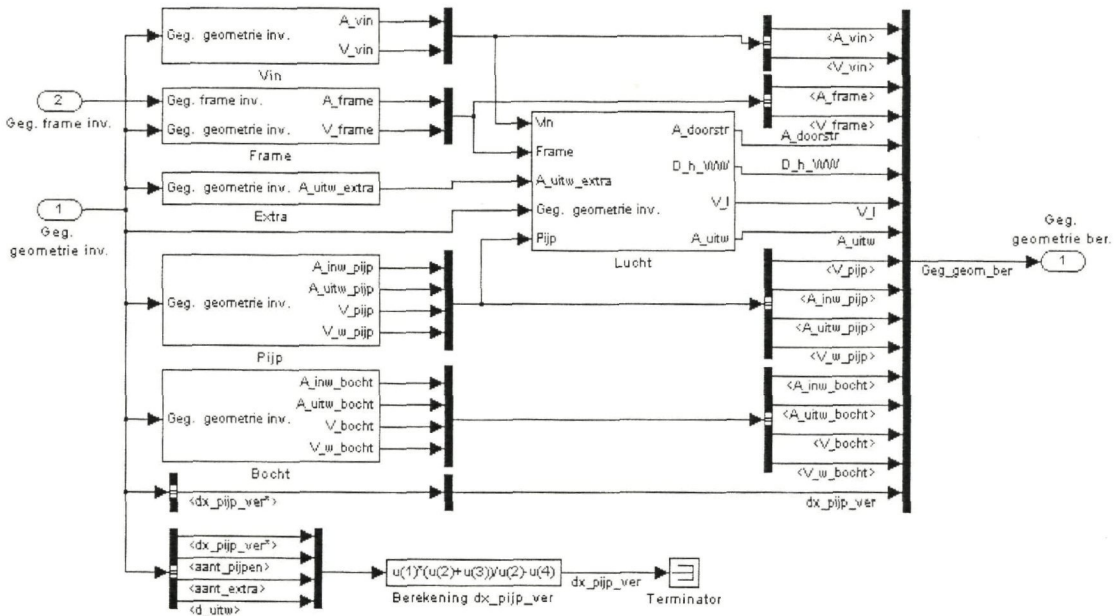
## B.2 Berekening invoergegevens

De inhoud van het blok *invoergegevens* is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur B.4: Blokschema Totaal6C\_8elem/luchtverwarmer/invoergegevens

De blokken *geometriegegevens* en *framegegevens* bevatten invoergegevens van de luchtverwarmer. Met behulp van deze gegevens worden in *berekening geometriegegevens* de grootte van de oppervlakken en volumina berekend. In Figuur B.5 wordt de inhoud van dit blok getoond.

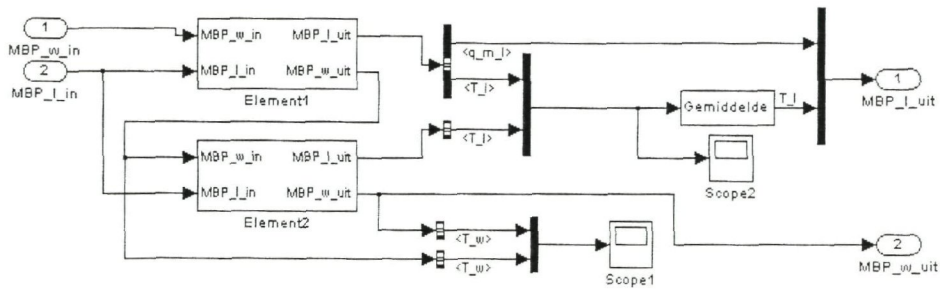


Figuur B.5: Blokschema Totaal6C\_8elem/luchtverwarmer/invoergegevens/berekening geometriegegevens

De berekeningen zijn onderverdeeld naar het onderdeel waarop ze betrekking hebben, te weten: *vin*, *frame*, *extra*, *pijp*, *bocht* en *lucht*.

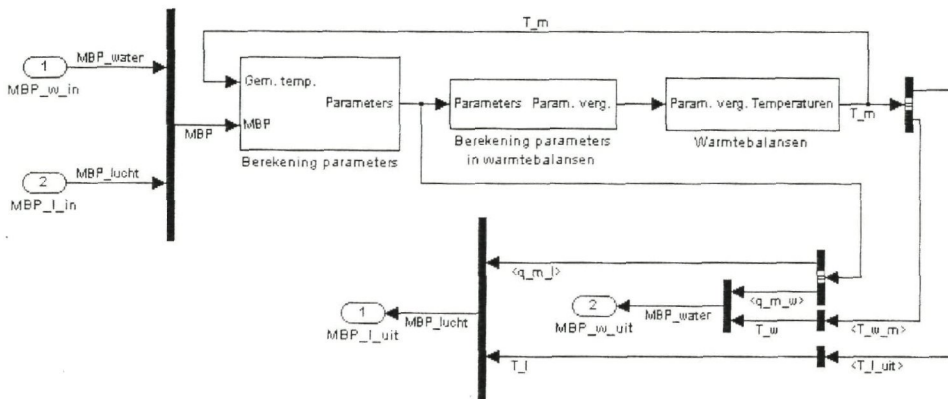
## B.3 Model pijp

Het blok *model pijp* vormt de kern van het model voor de luchtverwarmer. In de volgende figuur is omwille van de overzichtelijkheid het blok weergegeven voor een verdeling in 2 in plaats van in 8 elementen.



Figuur B.6: Blokschema Totaal6C\_8elem/luchtverwarmer/model pijp

Na dubbelklikken op één van de blokken *element* verschijnt het blokschema zoals in

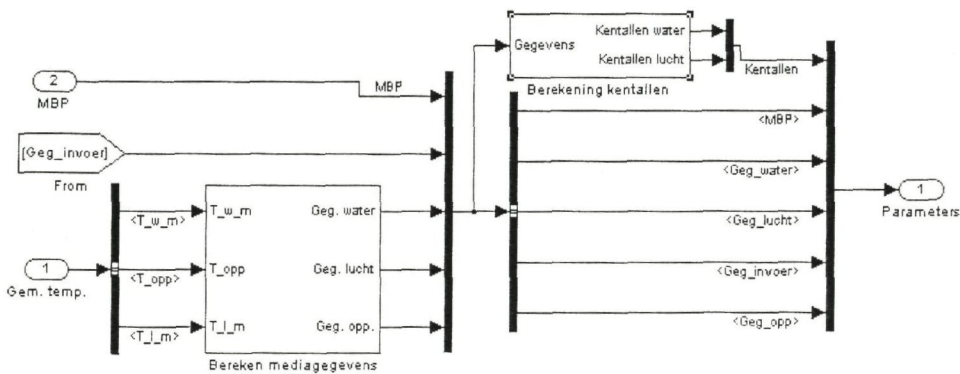


Figuur B.7: Blokschema Totaal6C\_8elem/luchtverwarmer/model pijp/element

In de volgende subparagrafen worden de blokken *berekening parameters*, *berekening parameters in warmtebalansen* en *warmtebalansen* beschreven.

### B.3.1 Berekening parameters

Figuur B.8 geeft de inhoud van *berekening parameters* weer.



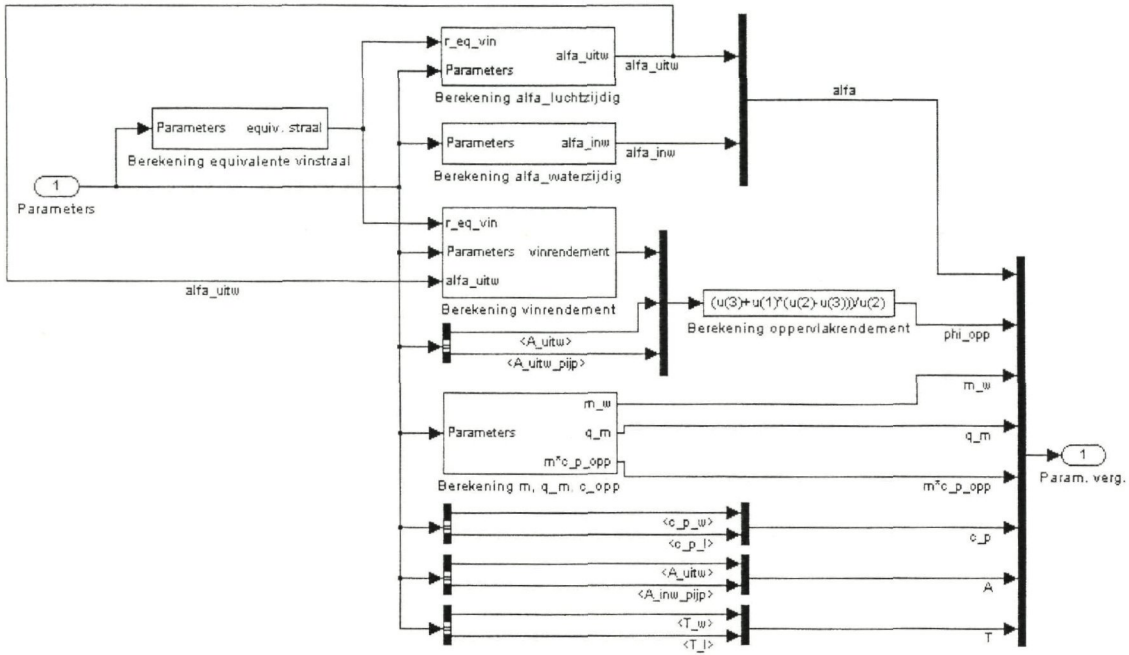
Figuur B.8: Blokschema Totaal6C\_8elem/luchtverwarmer/model pijp/element/berekening parameters

Het blok *bereken mediagegevens* berekent aan de hand van de temperatuur de fysische eigenschappen van de verschillende stoffen, te weten: water, lucht, pijp- en vinopper-

vlak. De fysische eigenschappen worden weer gebruikt in *berekening kentallen* om de getallen van Reynolds en Prandtl voor water en lucht te berekenen.

### B.3.2 Berekening parameters in warmtebalansen

In is de inhoud van *berekening parameters in warmtebalansen* te zien.

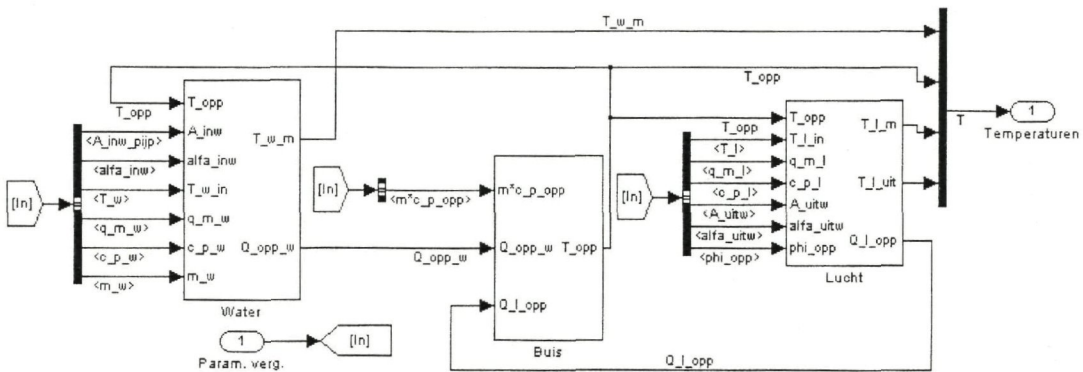


Figuur B.9: Blokschema Totaal6C\_8elem/luchtverwarmer/model pijp/element/berekening parameters in warmtebalansen

In bovenstaand blokschema is te zien dat uit de *parameters*, zoals invoergegevens en de fysische parameters, de parameters worden berekend, zoals ze in de warmtebalansen uit H4 voorkomen.

### B.3.3 Warmtebalansen

Het blok *warmtebalansen* heeft de volgende inhoud.



Figuur B.10: Blokschema Totaal6C\_8elem/luchtverwarmer/model pijp/element/warmtebalansen

Per elementen wordt de warmtebalans voor het water, de buis en de lucht opgelost, zoals te zien in Figuur B.10. Simulink lost de drie gekoppelde balansen via iteratie op. De met dit blok berekende temperaturen worden doorgegeven aan het volgende element.



## Bijlage C: Specificaties en invoergegevens van het hydraulische systeem

### C.1 Specificaties hydraulisch systeem

#### Buis

Draadbus: wandruwheid = 0.0045mm

DN 10:  $d_{inw.} = 9\text{mm}$ , wanddikte = 1mm

DN 15:  $d_{inw.} = 16\text{mm}$ , wanddikte = 2,65mm

DN 20:  $d_{inw.} = 21,6\text{mm}$ , wanddikte = 2,65mm

DN 25:  $d_{inw.} = 27,2\text{mm}$ , wanddikte = 3,25mm

#### Bocht

Gelast:  $R = 1,5 * d_{inw.}$

Draad:  $R = d_{inw.}$

#### Verloop

Van DN 15 naar DN 20:  $L = 38\text{mm}$

Van DN 20 naar DN 25:  $L = 50\text{mm}$

#### T-stuk

90° afgerond

#### Vat

Cetecell 500:II: inhoud = 500l

#### 2-wegklep

Oventrop "Hydrocontrol": Druktrap = PN 16, Grootte: DN 15

#### 3-wegklep

Siemens VXG44.15-1:  $k_{vs} = 1\text{m}^3/\text{h}$

#### Pomp

Grundfos UPS 25-50 180

#### Luchtverwarmer

Faco P40-16AC 1/2R-14T-435A-2.0Pa 1NC Cu/Al:  $\Delta p = 2\text{kPa}$  bij  $q_v = 0,1\text{l/s}$

#### Druksensor

Econosto PFM 2000: nauwkeurigheid = 0,1kPa als  $\Delta p \leq 10\text{kPa}$

nauwkeurigheid =  $\pm 1\%$  als  $\Delta p > 10\text{kPa}$

#### Sensor volumestroom

Endress-Hauser Promag50H: nauwkeurigheid =  $\pm 0,5\%$ .

### C.2 Invoergegevens hydraulisch systeem

Uit de specificaties voor de componenten van het hydraulische systeem en de tekeningen van de installateur kunnen de volgende invoergegevens worden samengesteld.

#### C.2.1 Geometrie-matrix

De eerste drie kolommen van Tabel C.1 geven de positie van het knooppunt weer in x-, y- en z-coördinaten. Het is een cartesiaans assenstelsel met de positieve z-coördinaat tegen de zwaartekracht in.

In kolom vier tot en met dertien worden de geometrische gegevens voor de in- en uitgangen van het element weergegeven. Eerst wordt het nummer van het knooppunt vermeld, gevolgd door de hydraulische diameter van de verbinding met dat knooppunt. In geval van twee in- of uitgangen wordt de tweede in- of uitgang  $in_2$  respectievelijk  $uit_2$  genoemd. Bij de uitgangen wordt tevens de wandruwheid van de verbinding vermeld, kolom tien en dertien.

Als het element in het knooppunt een T-stuk of een 3weg klep is, worden de laatste twee kolommen gebruikt. Naar welk knooppunt de "korte kant" (kant van de aftakstroming) wijst wordt weergegeven in de één na laatste kolom. De laatste kolom geeft aan met welk knooppunt het huidige element een parallelschakeling vormt.

knooppunt	positie			in <sub>1</sub>		in <sub>2</sub>		uit <sub>1</sub>			uit <sub>2</sub>			als T/klep	
	x	y	z	nr.	d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	ε/d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	ε/d <sub>h</sub>	korte kant	andere T/klep
1	0	0,63	1,5	49	0,027	0	0	2	0,027	0,002	0	0	0	0	0
2	0	0,63	2,4	1	0,027	0	0	22	0,027	0,002	0	0	0	0	0
3	-2,36	0,63	1,5	16	0,022	0	0	9	0,016	0,003	0	0	0	0	0
4	-2,36	0,63	0,98	20	0,022	0	0	19	0,016	0,003	5	0,022	0,002	19	8
5	-2,36	0,63	0,28	4	0,022	0	0	52	0,022	0,002	0	0	0	0	0
6	-2,36	0,82	0,8	50	0,016	0	0	7	0,022	0,002	0	0	0	0	0
7	-2,36	0,82	1,03	6	0,022	0	0	21	0,009	0,005	0	0	0	0	0
8	-2,36	0,82	1,38	21	0,016	17	0,016	11	0,016	0,003	0	0	0	17	4
9	-2,36	0,63	1,13	3	0,016	0	0	20	0,016	0,003	0	0	0	0	0
10	-2,23	0,63	1,13	19	0,016	0	0	18	0,016	0,003	0	0	0	0	0
11	-2,36	0,82	1,5	8	0,016	0	0	12	0,022	0,002	0	0	0	0	0
12	-2,36	0,82	2,19	11	0,022	0	0	13	0,022	0,002	0	0	0	0	0
13	-2,3	0,82	2,19	12	0,022	0	0	14	0,022	0,002	0	0	0	0	0
14	-2,3	0,45	2,19	13	0,022	0	0	15	0,022	0,002	0	0	0	0	0
15	-2,3	0,45	2,4	14	0,022	38	0,022	23	0,022	0,002	0	0	0	14	16
16	-2,36	0,63	2,4	22	0,022	0	0	3	0,022	0,002	24	0,022	0,002	3	15
17	-2,23	0,82	1,38	18	0,016	0	0	8	0,016	0,003	0	0	0	0	0
18	-2,23	0,63	1,38	10	0,016	0	0	17	0,016	0,003	0	0	0	0	0
19	-2,23	0,63	0,98	4	0,016	0	0	10	0,016	0,003	0	0	0	0	0
20	-2,36	0,63	1,05	9	0,016	0	0	4	0,022	0,002	0	0	0	0	0
21	-2,36	0,82	1,22	7	0,009	0	0	8	0,016	0,003	0	0	0	0	0
22	-2,06	0,63	2,4	2	0,027	0	0	16	0,022	0,002	0	0	0	0	0
23	-2,06	0,45	2,4	15	0,022	0	0	43	0,027	0,002	0	0	0	0	0
24	-4,66	0,63	2,4	16	0,022	0	0	25	0,022	0,002	0	0	0	0	0
25	-4,66	0,63	2,28	24	0,022	0	0	26	0,022	0,002	0	0	0	0	0
26	-4,66	0,45	2,28	25	0,022	0	0	27	0,022	0,002	0	0	0	0	0
27	-4,66	0,45	1,25	26	0,022	0	0	28	0,016	0,003	0	0	0	0	0
28	-4,66	0,45	1,14	27	0,016	0	0	31	0,016	0,003	0	0	0	0	0
29	-4,66	0,45	0,95	31	0,016	0	0	30	0,022	0,002	0	0	0	0	0
30	-4,66	0,45	0,28	29	0,022	0	0	34	0,022	0,002	0	0	0	0	0
31	-4,66	0,45	0,99	28	0,016	0	0	29	0,016	0,003	39	0,016	0,003	39	36
32	-4,76	0,45	0,81	51	0,016	0	0	33	0,022	0,002	0	0	0	0	0
33	-4,76	0,45	1,03	32	0,022	0	0	35	0,009	0,005	0	0	0	0	0
34	-4,86	0,45	0,28	30	0,022	0	0	51	0,016	0,003	0	0	0	0	0

knooppunt	positie			in <sub>1</sub>		in <sub>2</sub>		uit <sub>1</sub>			uit <sub>2</sub>			als T/klep	
	x	y	z	nr.	d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	ε/d <sub>h</sub>	nr.	d <sub>h</sub>	ε/d <sub>h</sub>	korte kant	andere T/klep
35	-4,76	0,45	1,22	33	0,009	0	0	36	0,016	0,003	0	0	0	0	0
36	-4,76	0,45	1,39	35	0,016	42	0,016	37	0,016	0,003	0	0	0	42	31
37	-4,76	0,45	1,5	36	0,016	0	0	38	0,022	0,002	0	0	0	0	0
38	-4,76	0,45	2,4	37	0,022	0	0	15	0,022	0,002	0	0	0	0	0
39	-4,66	0,58	0,99	31	0,016	0	0	40	0,016	0,003	0	0	0	0	0
40	-4,76	0,58	0,99	39	0,016	0	0	41	0,016	0,003	0	0	0	0	0
41	-4,76	0,58	1,14	40	0,016	0	0	42	0,016	0,003	0	0	0	0	0
42	-4,76	0,58	1,39	41	0,016	0	0	36	0,016	0,003	0	0	0	0	0
43	0,141	0,45	2,4	23	0,027	0	0	44	0,027	0,002	0	0	0	0	0
44	0,141	0,45	1,97	43	0,027	0	0	45	0,027	0,002	0	0	0	0	0
45	0,141	0,76	1,97	44	0,027	0	0	46	0,027	0,002	0	0	0	0	0
46	0	0,76	1,97	45	0,027	0	0	48	0,027	0,002	0	0	0	0	0
47	0	0,76	0,1	48	0,027	0	0	49	0,027	0,002	0	0	0	0	0
48	0	0,76	1,25	46	0,027	0	0	47	0,027	0,002	0	0	0	0	0
49	0	0,38	0,1	47	0,027	0	0	1	0,027	0,002	0	0	0	0	0
50	-2,36	0,87	0,28	52	0,016	0	0	6	0,016	0,003	0	0	0	0	0
51	-4,86	0,45	0,28	34	0,016	0	0	32	0,022	0,002	0	0	0	0	0
52	-2,36	0,87	0,28	5	0,022	0	0	50	0,016	0,003	0	0	0	0	0

Tabel C.1: De geometrie-matrix voor de testopstelling

### C.2.2 Elementenmatrix

De eerste kolom van Tabel C.2 geeft aan welk soort element bij het knooppunt hoort. De eigenschappen van het element staan in kolom 2 tot en met 7. De eigenschappen die opgegeven moeten worden zijn afhankelijk van het soort element. Er worden acht soorten elementen onderscheiden, te weten:

- 2 pomp
- 3 bocht
- 4 verloop
- 5 T-stuk
- 6 2-wegklep
- 7 3-wegklep
- 8 vat
- 9 overig

Bovenstaande nummering komt overeen met de nummering in de elementenmatrix. Per soort element zullen nu de eigenschappen worden besproken. De nummering van de eigenschappen correspondeert wederom met de getallen in elementenmatrix.

### **Pomp (1)**

De pompkarakteristiek wordt door de volgende vergelijking beschreven.

$$p_2 - p_1 = a_0 + a_1 \cdot q_{V,1} + a_2 \cdot q_{V,1}^2$$

De eigenschappen van de pomp worden als volgt weergegeven:

- 2 constante coëfficiënt pompkarakteristiek ( $a_0$ )
- 3 lineaire coëfficiënt pompkarakteristiek ( $a_1$ )
- 4 kwadratische coëfficiënt pompkarakteristiek ( $a_2$ )
- 5 minimale volumestroom pompkarakteristiek ( $q_{V,\min.}$ )
- 6 maximale volumestroom pompkarakteristiek ( $q_{V,\max.}$ )

### **Bocht (2)**

Voor een bocht dienen de volgende eigenschappen bekend te zijn:

- 2 hoek van de bocht ( $\theta$ )
- 3 verhouding van de buigstraal ten opzichte van de binnendiameter van de leiding ( $R/d_h$ )

### **Verloop (3)**

Bij een verloop wordt in de tweede kolom de vorm van het verloop aangegeven. Er worden vier types onderscheiden.

- 2 type verloop
  - vloeiend divergerend (1)
  - vloeiend convergerend (2)
  - abrupt divergerend (3)
  - abrupt convergerend (4)
- 3 tophoek van het verloop ( $\theta_{\text{top}}$ )
- 4 lengte van het verloop ( $l$ )

### **T-stuk (4)**

Alleen het type T-stuk dient te worden gespecificeerd. Er kan uit vijf types gekozen worden.

- 2 type T-stuk
  - 45° scherp (1)
  - 90° scherp (2)
  - 90° afgerond (3)
  - omgekeerd scherp (4)
  - omgekeerd afgerond (5)

### **2-wegklep (5)**

Bij een 2-wegklep moeten de volgende eigenschappen bekend zijn:

- 2 regelbaarheid
  - regelbaar (1)
  - niet regelbaar (0)
- 3 klepkarakteristiek
  - lineair (1)
  - exponentieel (0)
- 4 Grootte van de klep ( $k_{vs}$ -waarde)
- 5 Theoretische regelverhouding ( $k_{vs}/k_{v0}$ )

6 Werkelijke regelverhouding ( $k_{vs}/k_{vr}$ )**3-wegklep (6)**

De 3-wegklep lijkt sterk op de 2-wegklep alleen dient nu ook de karakteristiek van de aftakpoort te worden gespecificeerd. De rij in de elementenmatrix voor een 3-wegklep ziet er als volgt uit:

- 2 regelbaarheid
  - regelbaar (1)
  - niet regelbaar (0)
- 3 klepkarakteristiek lijnpoort
  - lineair (1)
  - exponentieel (0)
- 4 klepkarakteristiek aftakpoort
  - lineair (1)
  - exponentieel (0)
- 5 Grootte van de klep ( $k_{vs}$ -waarde)
- 6 Theoretische regelverhouding ( $k_{vs}/k_{v0}$ )
- 7 Werkelijke regelverhouding ( $k_{vs}/k_{vr}$ )

**Vat (7)**

Bij een vat kan het verschil in positie niet altijd worden verwaarloosd. De ingang van het vat wordt daarom in het knooppunt gezet, terwijl de uitgang van het vat in de elementenmatrix wordt opgegeven. De rij in de elementenmatrix voor een vat ziet er als volgt uit:

- 2 tweede kolom wordt niet gebruikt
- 3 x-coördinaat van de uitgang van het vat
- 4 y-coördinaat van de uitgang van het vat
- 5 z-coördinaat van de uitgang van het vat
- 6 type uitstromingsverbinding
  - doorgestoken uitstroming (1)
  - scherpe uitstroming (2)
  - afgeronde uitstroming (3)

**Overige elementen (8)**

Alle elementen die hierboven niet worden genoemd worden 'overig' genoemd. Aangezien de drukverschil kan bestaan uit een statisch en een dynamisch deel, wordt de elementenmatrix als volgt:

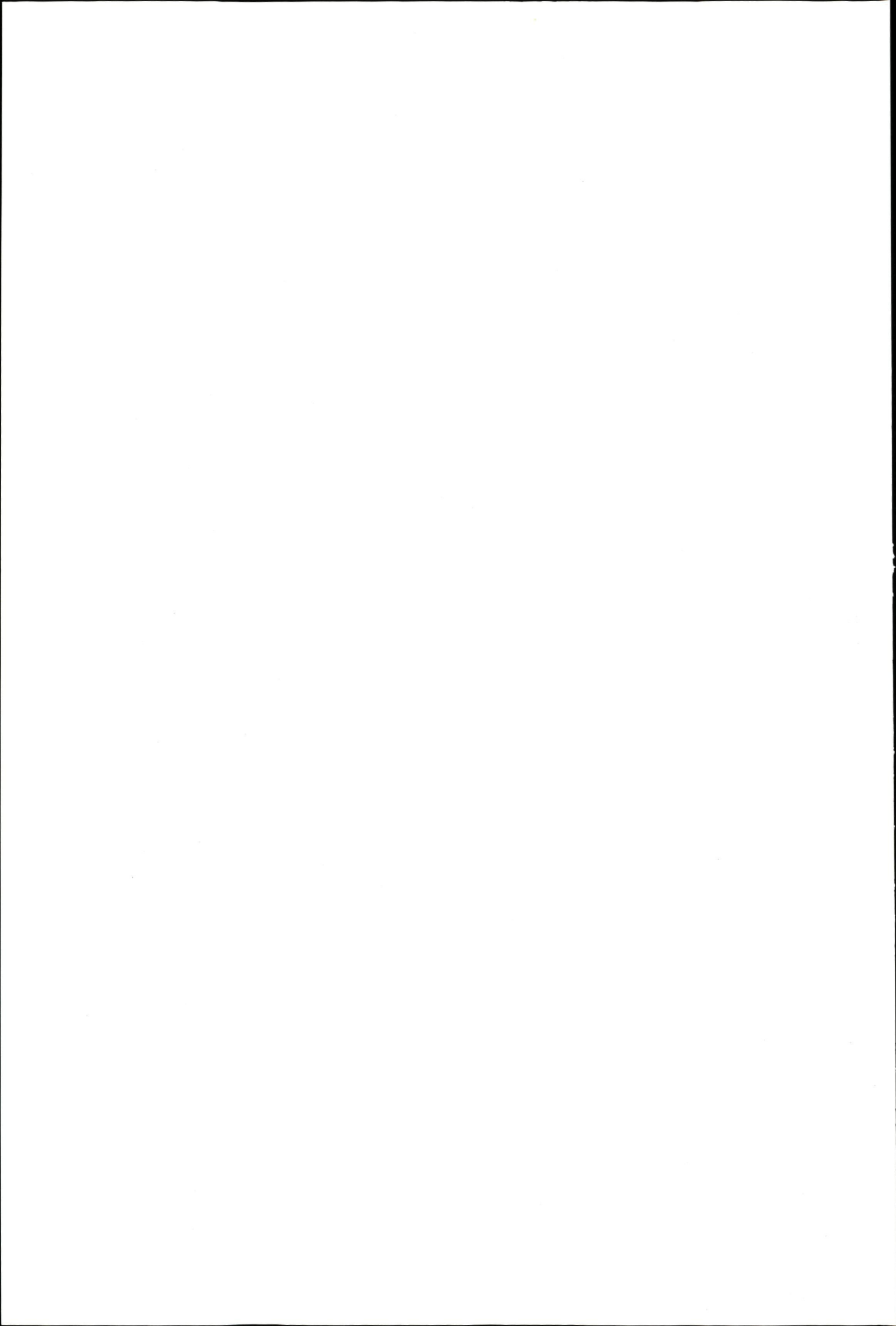
- 2 zeta-waarde van het element ( $\zeta_{\text{element}}$ )
- 3 x-coördinaat van de uitgang van het element
- 4 y-coördinaat van de uitgang van het element
- 5 z-coördinaat van de uitgang van het element

Modelvorming voor foutendetectie en -diagnose  
 Model voor luchtverwarmer en hydraulisch systeem

knoop- punt	soort element	Eigenschappen					
1	2	90	1,5	0	0	0	0
2	2	90	1,5	0	0	0	0
3	3	2	20	0,038	0	0	0
4	4	3	0	0	0	0	0
5	2	90	1,5	0	0	0	0
6	2	90	1	0	0	0	0
7	3	4	180	0,099	0	0	0
8	6	1	0	0	1	20,08	8,17
9	8	24,93	-2,355	0,63	1,367	0	0
10	8	24,93	-2,23	0,63	1,367	0	0
11	3	1	20	0,038	0	0	0
12	2	90	1,5	0	0	0	0
13	2	90	1,5	0	0	0	0
14	2	90	1,5	0	0	0	0
15	4	3	0	0	0	0	0
16	4	3	0	0	0	0	0
17	2	90	1,5	0	0	0	0
18	2	90	1,5	0	0	0	0
19	2	90	1,5	0	0	0	0
20	3	1	20	0,038	0	0	0
21	3	3	180	0,099	0	0	0
22	3	2	20	0,05	0	0	0
23	3	1	20	0,05	0	0	0
24	2	90	1,5	0	0	0	0
25	2	90	1,5	0	0	0	0
26	2	90	1,5	0	0	0	0
27	3	2	20	0,038	0	0	0
28	8	24,93	-4,662	0,445	1,457	0	0
29	3	1	20	0,038	0	0	0
30	2	90	1,5	0	0	0	0
31	4	3	0	0	0	0	0
32	2	90	1	0	0	0	0
33	3	4	180	0,099	0	0	0
34	3	2	20	0,038	0	0	0
35	3	3	180	0,099	0	0	0
36	6	1	0	0	1	20,08	8,17
37	3	1	20	0,038	0	0	0
38	2	90	1,5	0	0	0	0
39	2	90	1,5	0	0	0	0

knoop- punt	soort element	Eigenschappen					
40	2	90	1,5	0	0	0	0
41	8	24,93	-4,761	0,58	1,457	0	0
42	2	90	1,5	0	0	0	0
43	2	90	1,5	0	0	0	0
44	2	90	1,5	0	0	0	0
45	2	90	1,5	0	0	0	0
46	2	90	1,5	0	0	0	0
47	2	90	1,5	0	0	0	0
48	1	43315	-5,6E+07	1,089E+10	0,00021	0,00072	0
49	7	0	0	0,38	1,591	3	0
50	8	15,27	-2,355	0,87	0,806	0	0
51	8	15,27	-4,86	0,445	0,806	0	0
52	3	2	20	0,038	0	0	0

Tabel C.2: De elementenmatrix voor de testopstelling





## Bijlage D: Specificaties en invoergegevens van de luchtverwarmer en sensoren

### D.1 Specificaties van de luchtverwarmer en sensoren

#### Luchtverwarmer secundair

Faco P40-16AC 1/2R-14T-435A-2.0Pa INC Cu/Al.:

P40: de steek van de pijpen is 40mm.

16AC: de nominale pijpdiаметer is 16mm. Dit komt met een standaard wanddikte van 0,4mm neer op een binnendiameter van 15,7mm en een buitendiameter van 16,5mm.

1/2R: een halve rij: de helft van het aantal pijpen (14) plus één wordt gebruikt.

14T: 14 pijpen per rij.

Dat wil zeggen dat door 8 van de 14 aanwezige pijpen water stroomt. In de overige 6 zit lucht.

435A: de nuttige breedte van het element bedraagt 435mm.

2.0Pa: de lamelafstand is 2,0mm. De standaarddikte bedraagt 0,13mm.

INC: er is één circuit.

Cu/Al: de pijpen zijn van koper, de lamellen van aluminium.

Verder volgt uit bovenstaande dat de hoogte van de luchtverwarmer (14x40=) 560mm bedraagt. De standaard lamelbreedte, dat is in de lengterichting van de luchtverwarmer, bedraagt 35mm per rij.

#### Sensor watertemperatuur

Siemens QAE22: nauwkeurigheid =  $\pm 1K$ , tijdsconstante=20s

#### Sensor luchttemperatuur

Siemens QAM22: nauwkeurigheid =  $\pm 1K$ , tijdsconstante = 30s bij lichtsnelheid = 2m/s.

Sensor meet gemiddelde temperatuur over de lengte van de sensor.

#### Sensor volumestroom water

Endress-Hauser Promag50H: nauwkeurigheid =  $\pm 0,5\%$ .

#### Sensor volumestroom water

Trox VMR160: nauwkeurigheid =  $\pm 5\%$

Trox VMR200: nauwkeurigheid =  $\pm 5\%$

### D.2 Invoergegevens van de luchtverwarmer

Uit de specificaties voor de luchtverwarmer en metingen aan de testopstelling kunnen de volgende invoergegevens worden samengesteld.

$$L_{WW} = 35\text{mm}$$

$$B_{WW} = 435\text{mm}$$

$$H_{WW} = 560\text{mm}$$

$$\# \text{ pijpen} = 8$$

$$\# \text{ extra} = 6$$

$$\# \text{ rijen} = 1$$

$$\# \text{ circuits} = 1$$

$$\# \text{ elem} = 8$$

$$\Delta X_{\text{pijp,hor}} = 35\text{mm}$$

$$\Delta X_{\text{pijp,ver}} = 40\text{mm}$$

$$d_{\text{vin}} = 2\text{mm}$$

$$\delta_{\text{vin}} = 0,13\text{mm}$$

$$d_{\text{inw}} = 15,7\text{mm}$$

$$d_{\text{uitw}} = 16,5\text{mm}$$

$$\text{type} = \text{in lijn (2)}$$

$$A_{\text{frame,tot}} = 0,201\text{m}^2$$

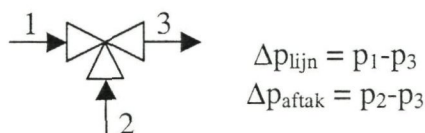
$$V_{\text{frame,tot}} = 3,01 \cdot 10^{-4}\text{m}^3$$

$$c_{p,\text{frame}} = 495\text{J/kg/K}$$

$$\rho_{\text{frame}} = 7833\text{kg/m}^3$$

## Bijlage E: Gemeten drukverschillen en volumestromen voor warmwatersysteem

In deze bijlage zijn de meetwaarden opgenomen van de twee metingen aan het warmwatersysteem van de testopstelling. De begrippen 'lijn' en 'aftak' worden verklaard in Figuur E.1



Figuur E.1: Uitleg bij begrippen 'lijn' en 'aftak'

### E.1 Meting 1

		Primaire lbk			Secundaire lbk			
Klepstand primair	Klepstand secundair	q_V [dm <sup>3</sup> /min]	dp_lijn [kPa]	dp_aftak [kPa]	q_V [dm <sup>3</sup> /min]	dp_aftak [kPa]	dp_lijn [kPa]	dp_pomp [kPa]
0	0	0	21.42	18.39	0	15.81	23.59	28.95
0.25	0	0.865	20.95	17.41	0	15.63	20.06	28.79
0.5	0	1.78	20.04	18.27	0	15.84	20.41	27.93
0.75	0	4.04	19.05	20.6	0	16.02	20.26	27.29
1	0	7.27	16.62	22.22	0	16.12	20.56	29.74
0	0.25	0	22.92	17.71	0.725	16.13	19.75	29.71
0.25	0.25	0.86	20.35	16.03	0.725	15.29	20.43	26.6
0.5	0.25	1.78	19.57	17.13	0.73	15.71	20.88	27.44
0.75	0.25	4.01	18.07	19.16	0.73	15.29	19.56	27.78
1	0.25	7.32	16.63	23.05	0.765	16.5	20.29	28.8
0	0.5	0	21.4	17.29	1.67	16.36	18.88	26.94
0.25	0.5	0.88	20.08	16.76	1.67	16.36	18.72	28.89
0.5	0.5	1.8	19.64	17.79	1.67	16.69	18.61	27.21
0.75	0.5	4.02	17.39	17.79	1.67	16.54	18.9	27.78
1	0.5	7.24	15.84	18.75	1.7	16.37	18.8	29.04

Tabel E.1: Meetwaarden van het warmwatersysteem; meting 1

		Primaire lbk			Secundaire lbk			
Klepstand primair	Klepstand secundair	q_V [dm <sup>3</sup> /min]	dp_lijn [kPa]	dp_aftak [kPa]	q_V [dm <sup>3</sup> /min]	dp_aftak [kPa]	dp_lijn [kPa]	dp_pomp [kPa]
0	0.75	0	20.61	15.71	3.97	17.13	15.42	26.81
0.25	0.75	0.89	18.68	15.59	3.9	16.35	15.03	27.68
0.5	0.75	1.82	16.85	14.37	3.9	15.21	16.28	27.53
0.75	0.75	4.01	17.61	16.29	4	17.61	16.83	28.72
1	0.75	7.29	15.88	21.02	3.975	16.32	16.32	28.2
0	1	0	22.58	18.25	7.275	19.81	16.15	28.43
0.25	1	0.9	19.49	16.28	7.14	19.42	15.07	27.29
0.5	1	1.83	20.8	16.36	7.18	20.25	16.22	27.57
0.75	1	4.105	16.41	17.46	7.09	19.89	14.93	25.24
1	1	7.35	16.98	20.89	7.21	23.91	14.53	26.9

Tabel E.1: Meetwaarden van het warmwatersysteem; meting 1 (vervolg)

## E.2 Meting 2

Klepstand primair	Klepstand secundair	Primair deel LBK				Secundair deel LBK				dp_pomp [kPa]
		q_V [dm <sup>3</sup> /min]	dp_lijn [kPa]	dp_aftak [kPa]	dp_comm. [kPa]	q_V [dm <sup>3</sup> /min]	dp_lijn [kPa]	dp_aftak [kPa]	dp_comm. [kPa]	
0	0	0	24.35	20.32	4.3	0	24.6	18.7	3.65	30.34
0.1	0	0.55	23.74	19.38	4.83	0	24.08	19.04	4.8	30.25
0.2	0	0.83	25	20.36	5.83	0	23.35	18.76	5.8	31.5
0.3	0	1.14	24.4	20.6	5.6	0	23.6	19.9	6.6	30.5
0.4	0	1.52	22.9	19.83	6	0	23.7	18.7	-	31.3
0.5	0	1.92	22.7	18.97	5.7	0	25.17	21.3	5.6	33.8
0.6	0	2.29	22.3	21.8	7.6	0	22.9	24.1	5.15	30.1
0.7	0	3.27	23.3	22.6	8.7	0	25.4	19.4	5.4	29.9
0.8	0	4.95	20.7	24	5.8	0	24.1	17.2	5.6	30.4
0.9	0	7.27	18.8	24.1	6.3	0	24.7	19.8	6.1	30.7
1	0	7.41	19.9	25.8	8.6	0	24.5	19.1	5.8	34.1
0	1	0	26.8	21.7	12	7.31	25.2	17.3	9.2	32.8
0.1	1	0.48	24.3	20.9	8.4	7.28	18.8	17.3	9.5	31.1
0.2	1	0.84	24.1	19.3	6.4	7.29	18.5	17.9	6.1	30.1
0.3	1	1.14	23	19.5	4.9	7.28	17.8	18.1	6.9	30.7
0.4	1	1.53	23	19.7	5.3	7.3	20.3	17.2	7	29.6
0.5	1	1.91	22.4	19.4	5.2	7.28	17.8	18.1	7.1	30.5
0.6	1	2.32	22.5	20.3	5.5	7.27	17.5	18.6	7	30.3
0.7	1	3.28	21.5	20.6	5.3	7.29	17.6	17.5	5.7	30.4
0.8	1	4.96	20.8	22.6	6.2	7.28	17.7	17.2	5	30.5
0.9	1	7.27	19.3	24.2	5	7.28	19.2	18	6.1	30.4
1	1	7.42	19.5	24.8	7.1	7.31	18.1	18	8.1	31.3

Tabel E.2: Meetwaarden van het warmwatersysteem; meting 2

Klepstand primair secundair	Primair deelLBK			Secundair deelLBK			dp_pomp [kPa]		
	q_V [dm <sup>3</sup> /min]	dp_lijn [kPa]	dp_aftak [kPa]	dp_comm. [kPa]	q_V [dm <sup>3</sup> /min]	dp_lijn [kPa]		dp_aftak [kPa]	dp_comm. [kPa]
0	0	25.2	19.1	4.4	0.31	22.8	18.1	6.3	29.9
0	0	26	18.9	4.3	0.73	25.7	19.5	6.7	31.2
0	0	25.1	18.7	5.4	1.06	24.8	20.6	6.3	31.7
0	0	26	19.1	4.4	1.46	23.2	19.6	5.6	31.6
0	0	24	20.4	4.8	1.86	23.6	20.7	6.7	30.3
0	0	24.5	19.8	5.2	2.29	23.2	20.4	7.6	31.6
0	0	24.6	19.6	5	3.28	21.7	20.9	6.6	31.6
0	0	24.4	19.5	6.7	4.98	20.6	22.6	6.8	30.5
0	0	24.6	19.8	4.9	7.27	18.5	23.4	7.1	31.4
1	7.48	18.5	23.7	5.7	0	25	19.5	5.7	33
1	7.39	19.1	24.8	5	0.73	22.5	18	6.6	31.3
1	7.39	18.4	24.5	5.3	1.06	22.7	19.6	5.9	31.4
1	7.39	20.2	24.4	4.6	1.46	22.2	19.9	7.6	31.4
1	7.37	18.5	23.3	7.6	1.86	21.48	20.5	7	30.6
1	7.38	19.1	24.5	6	2.29	21.9	19.2	6.2	30
1	7.38	19.2	25.3	5.2	3.27	20.8	19.59	6.5	30.1
1	7.41	19.9	25	5.2	4.98	20.7	23.1	6.2	30.2
1	7.46	20.2	25.9	7.6	7.28	19.5	24.4	6.2	30.4

Tabel E.2: Meetwaarden van het warmwatersysteem; meting 2 (vervolg)

Aan de leden van de examencommissie  
Voor het ingenieursexamen van  
De heer W. de Jong

Mekelweg 2  
2628 CD Delft  
Telefoon: (015) 278 6667  
Fax: (015) 278 2460  
Email: a.g.oosterom@wbmt.tudelft.nl

Uw kenmerk en datum

Ons kenmerk  
AO/02-15

Doorkiesnummer  
(015) 278 6667

Datum  
05-04-2002

Onderwerp:  
Ingenieursexamen

Zeer geachte heer,

Graag danken wij u voor uw bereidheid om zitting te nemen in de commissie voor het ingenieursexamen van de heer W. de Jong. Het examen zal worden gehouden op:

**woensdag, 17 april 2002, om 14.00 uur**

op kamer 1.22 van de sectie Koudetechniek en Klimaatregeling.

Voorafgaand aan het examen zal de heer W. de Jong, om 13.00 uur in zaal K, een colloquium houden getiteld:

**Modelvorming voor foutendetectie en –diagnose**  
**Model voor luchtverwarmer en hydraulisch systeem**

U wordt om 12.50 uur verwacht op het secretariaat, kamer no. 2.06.

In de examencommissie nemen zitting:

- Prof. dr. ir. A.H.C. van Paassen
- Prof. ir. H. van der Ree
- Prof. Ir. W. Zeiler
- Dr. B. Yu
- Dr. ir. P.A. Wieringa
- Ir. W. Wortel

met vriendelijke groeten,



Anneke Oosterom,  
secretaresse

