

## KlimaatPlusWonen, te mooi om waar te zijn?

Studie naar het energetisch gedrag van kaswoningen met  
nieuwe innovatieve warmtewisselaars voor winning van  
zonnewarmte



Afstudeerwerk D.M. van Brakel  
Ct1091360

5 februari 2009

Afstudeercommissie:  
Prof.dipl-ing. J.N.J.A. Vambersky  
Prof. Ir. J.J.M. Cauberg  
Dr. Ir. W.H. van der Spoel  
Ir.H.R.Schipper  
Ing. M. van Lohuizen (Cauberg-Huygen)



## **Voorwoord**

Dit afstudeeronderzoek heeft plaats gevonden in het kader van mijn opleiding Civiele Techniek bij de sectie Building Engineering aan de Technische Universiteit Delft. Het afstudeeronderzoek is uitgevoerd bij Cauberg-Huygen Raadgevend Ingenieurs te Rotterdam.

In dit rapport worden de energetische aspecten onderzocht van de winning van zonnewarmte in kaswoningen met nieuwe innovatieve warmtewisselaars. Aanleiding is een ontwerp voor het zogenaamde KlimaatPlusWonen in Amsterdam, waarmee men netto elektrische energie wil produceren.

Thijs van Brakel  
Rotterdam, februari 2009



## Samenvatting

In dit rapport is het gebruik van de nieuwe innovatieve warmtewisselaars FiwiHex en Smart Skin in combinatie met warmteopslag bij individuele kaswoningen onderzocht. Door het combineren van deze warmtewisselaars, een kas en bodemopslag kan zonnewarmte worden gewonnen voor ruimteverwarming. In de zomer wordt de kasruimte met koud water gekoeld, waarbij het water opwarmt en wordt opgeslagen. In de winter wordt dit opgeslagen warme water gebruikt om de kas en de woning te verwarmen. Het water dat gebruikt wordt om de kas te verwarmen koelt af en kan in de zomer weer worden gebruikt om de kas te koelen. Hiermee herhaalt de cyclus zich. Op deze wijze moet het gebruik van fossiele brandstoffen voor ruimteverwarming worden teruggebracht.

Het ontwerp voor de KlimaatPlusWoningen in Amsterdam is de aanleiding van dit onderzoek. Men wil dit systeem van warmtewinning toepassen om het gebruik van fossiele brandstoffen voor ruimteverwarming aanzienlijk terug te brengen. Door dit concept te combineren met opwekking van duurzame elektrische energie wil men woningen realiseren die netto elektrische energie produceren. Dit ontwerp is de aanleiding van dit onderzoek, dat zich richt op kaswoningen met FiwiHex en Smart Skin in het algemeen.

Er is in dit rapport een formule afgeleid om het vermogen dat de FiwiHex levert te berekenen. Vergeleken met andere warmtewisselaars is de FiwiHex niet efficiënter. Wel is de verhouding tussen de hoeveelheid geleverde hulpenergie en het geleverde vermogen redelijk gunstig. Het geringe geluidsniveau, kostenoverwegingen en comfort kunnen redenen om toch te kiezen voor de FiwiHex. Deze aspecten zijn in dit rapport echter niet nader onderzocht.

De Smart Skin is nog in ontwikkeling. Uit de beschikbare meetgegevens is het gedrag van de Smart Skin lastig te analyseren. Ook is het lastig om parameters af te leiden voor simulatie, de Smart Skin is dan ook niet opgenomen in de simulaties. De vermogens die dit systeem aan de ruimte levert zijn in de beschouwde meetsituatie behoorlijk. Ook de energie die wordt gewonnen door middel het water in de leidingen is substantieel. Het is lastig te bepalen hoe dit is op andere momenten. Wel moet opgemerkt worden dat de temperatuur van het water in de buisjes maar een beperkte invloedslengte heeft over het glas. De warmteoverdracht tussen het water en de lucht wordt effectiever als men de tussenafstand kleiner maakt. Het optreden van oppervlaktecondensatie op het glas is zeer waarschijnlijk.

Als er geen warmtewisselaars in de kas worden ingezet worden er bij grote instraling relatief hoge temperaturen bereikt. In de winter kunnen de temperaturen relatief laag worden. Als warmtewisselaars in de kas worden geplaatst kan de kastemperatuur beter beheerst worden, toch blijven er in de onderzochte situatie incidentele pieken en dalen in de kastemperatuur. De periode dat de kas gebruikt kan worden als verblijfsruimte is beperkt.

Uit analyse van de warmtestromen blijkt dat bij de uitgangspunten en aannames van dit onderzoek met twee warmtewisselaars in de kas kan worden voorzien in de warmtevraag van de woning. Het temperatuurverschil dat het water in de FiwiHex ondergaat is relatief klein. Als er meer warmtewisselaars worden ingezet wordt het temperatuurverschil kleiner.

Er zijn een aantal manieren om het temperatuurverschil te verhogen. Het verlagen van de stroomsnelheid van het water is de eerste optie. Hierdoor wordt het vermogen dat aan de kas wordt geleverd wel lager. Een tweede optie is het verhogen van de stroomsnelheid van de lucht. Hierdoor neemt ook het aan de kas geleverde vermogen toe. Een derde optie is het toepassen van een zonwerend doek bovenin de kas. De FiwiHex wordt dan boven dit doek aangebracht, waar de temperaturen in de zomer aanzienlijk hoger worden dan de in de rest van de kas. De warmtewinst stijgt hierdoor en het door de FiwiHex geleverde vermogen neemt toe. Daarnaast worden de temperaturen beneden in de kas lager. De laatste twee opties genieten de voorkeur omdat deze een positieve invloed hebben op het zomercomfort in de kas. Er zijn ook combinaties mogelijk van de voorgaande opties.

Bij de aangenomen aannames en uitgangspunten is met een zonneboiler een hogere warmteopbrengst per vierkante meter mogelijk dan met de kas en FiwiHex. Ook de PER van het systeem met kas en FiwiHex is in de beschouwde situatie minder gunstig dan de PER die gehaald kan worden met zonneboilers. Hierbij is er vanuit gegaan dat de FiwiHex in de zomer wordt gebruikt om de kas te koelen en in de winter om de kas te verwarmen. Als de kas in de winter niet wordt verwarmd is de PER gunstiger. Ook in dat geval is de PER echter minder gunstig dan bij zonneboilers. De kosten van beide systemen zijn niet vergeleken.

De basis van de KlimaatPlusWoningen is dat het gebruik van primaire energie voor ruimteverwarming van de woning door de kas en FiwiHex drastisch wordt teruggebracht. De benodigde energie voor verwarming van de woning kan door de kas inderdaad worden gereduceerd. Zowel de warmteopbrengst als de PER van het systeem zijn in de beschouwde situatie echter lager dan bij toepassing van thermische zonnecollectoren. De opwekking van duurzame elektrische energie zal bij de aangenomen omstandigheden dus aanzienlijk moeten zijn om netto energie te produceren.

De resultaten van het model gelden alleen voor de beschreven aannames en uitgangspunten. Deze beïnvloeden de resultaten duidelijk.

## Lijst van gebruikte symbolen en afkortingen

### Letters (Latijn)

Symbol	Grootheid	Eenheid
$A$	Oppervlakte	$[m^2]$
$A_{gebruik}$	Gebruiksoppervlak	$[m^2]$
$A_i$	Inwendige oppervlakte warmtewisselaar	$[m^2]$
$c$	Soortelijk warmte	$[W / kg \cdot K]$
$C_o$	Compactheid	$[m^{-1}]$
$C_k$	Warmte-inhoud koude stroom warmtewisselaar	$[W/K]$
$C_w$	Warmte-inhoud warme stroom warmtewisselaar	$[W/K]$
$C_{min}$	Minimale warmte-inhoud van de stromen	$[W/K]$
$C_{max}$	Maximale warmte-inhoud van de stromen	$[W/K]$
$C_r$	Verhouding tussen $C_{min}$ en $C_{max}$	$[-]$
$COP$	Coefficient Of Performance	$[-]$
$d$	Dikte	$[m]$
$D_i$	Inwendige diameter warmtewisselaar	$[m^2]$
$g$	Valversnelling	$[m/s^2]$
$H$	Warmteverliescoëfficiënt	$[W/m^2]$
$h$	Hoogte	$[m]$
$I$	Infiltratie	$m^3/s$
$L$	Totale lengte buisjes in warmtewisselaar	$[m]$
$LTA$	Lichttoetredingsfactor (Licht Toetredingsfactor Absoluut)	$[-]$
$M$	Thermische massa	$[J/K]$
$m$	Massa	$[kg]$
$\dot{m}$	Massastroom	$[kg/s]$
$n$	Ventilatievoud	$[u^{-1}]$
$NTU$	Number of Transfer Units	$[-]$
$P$	Vermogen	$[W]$
$Pr$	Prestatie van een warmtewisselaar	$[W / m^3 \cdot K]$
$P_{el;Fiwithex}$	Benodigd elektrisch vermogen om Fiwithex te laten draaien	$[W]$
$P_{el;l}$	Benodigd elektrisch vermogen om lucht warmtewisselaar te laten stromen	$[W]$
$P_{el;w}$	Benodigd elektrisch vermogen om water warmtewisselaar te laten stromen	$[W]$
$P_{tot}$	Totaal benodigd vermogen voor warmtewisselaar	$[W]$
$P_{fossiel}$	Benodigde vermogen uit fossiele grondstoffen	$[W]$
$PER$	Primary Energy Ratio	$[-]$
$Q$	Debiet bij warmtewisselaars	$[m^3/s]$
$Q$	Interne warmtelast bij simulatie	$[W]$
$q$	Warmteoverdracht	$[W]$
$q_{av-av}$	Warmteoverdracht over gemiddeld temperatuurverschil	$[W/K]$
$q_{max}$	Theoretische maximale warmteoverdracht	$[W]$
$q_{v;10}$	Genormeerde luchtdoorlatendheid, lucht volumestroom	$[m^3/s]$
$R_c$	Warmteweerstand constructie	$[m^2 \cdot K / w]$
$R_{spouw}$	Warmteweerstand spouw	$[m^2 \cdot K / w]$
$r_e$	Warmteovergangswaarde van constructie buitenzijde	$[m^2 \cdot K / w]$
$r_i$	Warmteovergangswaarde van constructie binnenzijde	$[m^2 \cdot K / w]$
$r_i$	Binnendiameter bron (bij model bron)	$[m]$
$R_o$	Uitwendige diameter bron	$[m]$
$T$	Temperatuur	$[^{\circ}C]^*$
$t$	Dikte constructiedeel	$[m]$

$t$	Tijd	[s]
$\Delta T_{lm}$	Logaritmisch gemiddeld temperatuurverschil over wisselaar	[°C]
$U$	Totale warmteoverdrachtscoëfficiënt (warmtewisselaar)	[W / m <sup>2</sup> · K]
$U$	Warmtedoorgangscoefficiënt (glasvlakken)	[W / m <sup>2</sup> · K]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$v_l$	Luchtsnelheid	[m/s]
$ZTA$	Zontoetredingsfactor (Zon Toetredingsfactor Absoluut)	[-]

**Letters (Grieks)**

Symbool	Grootheid	Eenheid
$\alpha_c$	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W / m <sup>2</sup> · K]
$\alpha_{c,s; bi}$	Gecombineerde warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling	[W / m <sup>2</sup> · K]
$\alpha_e$	Warmteoverdrachtscoëfficiënt van constructie buitenzijde	[W / m <sup>2</sup> · K]
$\alpha_i$	Warmteoverdrachtscoëfficiënt van constructie binnenzijde	[W / m <sup>2</sup> · K]
$\alpha_s$	warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling	[W / m <sup>2</sup> · K]
$\alpha_{c,s; bi}$	Totale warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling	[W / m <sup>2</sup> · K]
$\epsilon$	Effectiviteit	[-]
$\eta$	Porositeit (bij aquifer)	[-]
$\eta_{centr}$	Rendement elektriciteitscentrale (voor bepaling PER)	[-]
$\eta_{temp}$	Temperatuurrendement warmtewisselaar	[-]
$\theta$	zichtfactor voor straling	[-]
$\lambda$	Warmtegeleidingscoëfficiënt	[w/mK]
$\rho$	Soortelijke dichtheid	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Subscripts**

Symbool	Grootheid
$b$	Brandstof
$bi$	Binnen
$bu$	Buiten
$c$	Convectie
$el$	Elektrisch
$g$	Geleiding
$glas$	Glas
$in$	Inlaat warmtewisselaar
$k$	Koude stroom
$koel$	koeling
$l$	Lucht
$mid$	Midden
$s$	Straling
$temp$	Temperatuur
$tot$	Totaal
$tw$	Tussenwand
$uit$	Uitlaat warmtewisselaar
$verw$	Verwarming
$w$	Water (in combinatie met l voor lucht)
$w$	Warme stroom (in combinatie met k voor koude stroom)
$wu$	Warmte-uitwisseling

**Afkortingen**

afkorting	betekenis
CBS	Centraal Bureau voor de statistiek
EIA	Energy Information Administration

Fiwihex	FIne WIRe Heat EXchanger
hoh	Hart op hart afstand
IEA	Internationaal Energie Agentschap
IEO	International Energy Outlook
Innovatie- Netwerk	InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster
IPCP	Intergovernmental Panel on Climate Change
LNV	Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit
Lowex	Low Exergy
LTK	Lage Temperatuur koeling
LTV	Lage Temperatuur Verwarming
PV-cellen	fotovoltaïsche cellen
SIGN	Stichting Innovatie Glastuinbouw Nederland
WEO	World Energy Outlook

\* Tenzij anders vermeld

# Inhoudsopgave

<b>VOORWOORD</b> .....	
<b>SAMENVATTING</b> .....	
<b>LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN EN AFKORTINGEN</b> .....	
<b>INHOUDSOPGAVE</b> .....	
<b>1 PROBLEEMOMSCHRIJVING</b> .....	<b>1</b>
1.1 INLEIDING .....	1
1.2 ENERGIE- EN KLIMAATPROBLEMEN .....	1
1.2.1 <i>Energieverbruik</i> .....	1
1.2.2 <i>Klimaatverandering</i> .....	2
1.2.3 <i>Beperking van gebruik van fossiele brandstoffen</i> .....	3
1.3 KAS ALS ENERGIEBRON .....	3
1.4 KAS ALS ENERGIEBRON VOOR WONINGEN.....	6
1.4.1 <i>Energiegebruik voor woningen</i> .....	6
1.4.2 <i>Het Zonneterp-principe</i> .....	9
1.4.3 <i>Kas als Energiebron in kaswoningen</i> .....	11
1.4.4 <i>KlimaatPlusWonen</i> .....	12
<b>2 ONDERZOEKSDOELSTELLINGEN</b> .....	<b>16</b>
2.1 INLEIDING .....	16
2.2 PROBLEEMSTELLING .....	16
2.3 AFBAKENING .....	16
2.4 DOELSTELLINGEN .....	17
2.5 AANPAK .....	17
<b>3 UITGANGSPUNTEN EN AANNAMES</b> .....	<b>18</b>
3.1 INLEIDING .....	18
3.2 ONTWERP KLIMAATPLUSWONINGEN .....	18
3.2.1 <i>Inleiding tot het ontwerp</i> .....	18
3.2.2 <i>Oriëntatie</i> .....	19
3.2.3 <i>Ruimtelijke indeling</i> .....	20
3.2.4 <i>Gevens</i> .....	21
3.2.5 <i>Technische tekeningen</i> .....	22
3.3 WARMTEOVERDRACHT TUSSEN LUCHT EN WATER.....	22
3.3.1 <i>Winning van zonnewarmte</i> .....	22
3.3.2 <i>Fiwihex</i> .....	22
3.3.3 <i>Smart Skin</i> .....	22
3.4 BELANGRIJKSTE AANNAMES EN UITGANGSPUNTEN.....	23
3.4.1 <i>Inleiding</i> .....	23
3.4.2 <i>Algemeen</i> .....	23
3.4.3 <i>Kas</i> .....	23
3.4.4 <i>Woning</i> .....	23
3.4.5 <i>Aquifer</i> .....	24
<b>4 DE FIWIHIX</b> .....	<b>25</b>
4.1 INLEIDING .....	25
4.2 GEGEVENS FIWIHIX.....	25
4.2.1 <i>Geometrie</i> .....	25
4.2.2 <i>Debietten water en lucht</i> .....	27
4.2.3 <i>Benodigd vermogen</i> .....	28
4.2.4 <i>Warmteoverdracht</i> .....	28
4.3 CLASSIFICATIE VAN DE FIWIHIX .....	28

4.3.1	<i>Belang van classificatie</i> .....	28
4.3.2	<i>Overdrachtsproces</i> .....	28
4.3.3	<i>Constructietype</i> .....	29
4.3.4	<i>Stroomtype</i> .....	29
4.3.5	<i>Menging</i> .....	31
4.3.6	<i>Overdrachtsmechanisme</i> .....	31
4.4	SCHEMATISERING VAN DE WARMTEOVERDRACHT IN DE FIWIHEX.....	32
4.5	VERGELIJKING MET ANDERE WARMTEWISSELAARS.....	36
4.5.1	<i>Inleiding</i> .....	36
4.5.2	<i>De beschouwde ventilatorconvectors</i> .....	37
4.5.3	<i>Vergelijking van UA</i> .....	37
4.5.4	<i>Effectiviteit</i> .....	38
4.5.5	<i>Prestatie naar volume</i> .....	39
4.5.6	<i>Temperatuurrendement</i> .....	41
4.5.7	<i>PER</i> .....	42
4.6	CONCLUSIES.....	43
<b>5</b>	<b>DE SMART SKIN</b> .....	<b>45</b>
5.1	INLEIDING.....	45
5.2	SMART SKIN GLAS.....	45
5.2.1	<i>Gegevens</i> .....	45
5.2.2	<i>Het principe en toepasbaarheid</i> .....	47
5.3	SMART SKIN POLICARBONAAT.....	49
5.3.1	<i>Gegevens</i> .....	49
5.3.2	<i>Principe en toepasbaarheid</i> .....	50
5.4	PROEFOPSTELLING FIWIHEX BV TE ALMELO.....	51
5.4.1	<i>Beschrijving</i> .....	51
5.4.2	<i>Het regelsysteem</i> .....	53
5.5	ANALYSE VAN DE SMART SKIN GLAS.....	60
5.5.1	<i>Inleiding</i> .....	60
5.5.2	<i>Analyse van de meetresultaten van Fiwihex BV</i> .....	60
5.5.3	<i>Analyse temperatuurverdeling</i> .....	63
5.5.4	<i>Oppervlaktecondensatie</i> .....	67
5.5.5	<i>Overige aspecten</i> .....	68
5.6	CONCLUSIES TEN AANZIEN VAN DE SMART SKIN GLAS.....	68
<b>6</b>	<b>MODELLERING</b> .....	<b>70</b>
6.1	SIMULATIEPAKKET.....	70
6.1.1	<i>Inleiding</i> .....	70
6.1.2	<i>Matlab-Simulink</i> .....	70
6.2	HET MODEL.....	70
6.2.1	<i>Opbouw van het model</i> .....	70
6.2.2	<i>Aannames en uitgangspunten</i> .....	70
6.3	OPBOUW VAN DE SUBSYSTEMEN.....	71
6.3.1	<i>Basis van de subsystemen</i> .....	71
6.3.2	<i>Bepaling Massamatrix</i> .....	72
6.3.3	<i>Bepaling stijfheidsmatrix</i> .....	72
6.3.4	<i>Warmtelasten</i> .....	75
6.4	SUBSYSTEEM KAS.....	76
6.4.1	<i>Schematisering</i> .....	76
6.4.2	<i>Model in Simulink</i> .....	80
6.4.3	<i>Testen</i> .....	82
6.4.4	<i>Evaluatie gebruikte parameters subsysteem kas</i> .....	94
6.5	SUBSYSTEEM WONING.....	101
6.5.1	<i>Schematisering</i> .....	101
6.5.2	<i>Model in Simulink</i> .....	105
6.5.3	<i>Testen</i> .....	107
6.5.4	<i>Evaluatie gebruikte parameters subsysteem Woning</i> .....	113

6.5.5	<i>Warmte-uitwisseling tussen Kas en Woning</i> .....	115
6.6	SUBSYSTEEM FIWIHEX .....	117
6.6.1	<i>Schematisering</i> .....	117
6.6.2	<i>Model in Simulink</i> .....	118
6.6.3	<i>Testen</i> .....	119
6.7	RELATIES TUSSEN DE SUBSYSTEMEN .....	123
<b>7</b>	<b>SIMULATIE</b> .....	<b>126</b>
7.1	KASGEDEELTE MET FIWIHEX .....	126
7.1.1	<i>Inleiding</i> .....	126
7.1.2	<i>Kas met één Fiwihex</i> .....	126
7.1.3	<i>Kas met meerdere warmtewisselaars</i> .....	132
7.2	ALLEEN WONINGGEDEELTE .....	136
7.2.1	<i>Inleiding</i> .....	136
7.2.2	<i>Benodigde verwarming</i> .....	137
7.2.3	<i>Benodigde aanvoertemperatuur</i> .....	138
7.3	ENERGIEVERLIES BIJ WARMTEOPLAG.....	140
7.3.1	<i>Inleiding</i> .....	140
7.3.2	<i>Verliezen bij warmteopslag</i> .....	140
7.4	EFFICIËNTIE VAN HET SYSTEEM .....	143
7.4.1	<i>Analyse energiestromen</i> .....	143
7.4.2	<i>Warmtewinst in verhouding tot oppervlak</i> .....	144
7.4.3	<i>Warmtewinst in verhouding tot benodigde elektrische energie</i> .....	145
7.4.4	<i>Vergelijking met thermische zonnecollectoren</i> .....	146
<b>8</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b> .....	<b>148</b>
8.1	CONCLUSIES .....	148
8.1.1	<i>Fiwihex</i> .....	148
8.1.2	<i>Smart Skin</i> .....	148
8.1.3	<i>KlimaatPlusWoning</i> .....	149
8.2	AANBEVELINGEN .....	152
8.2.1	<i>Fiwihex</i> .....	152
8.2.2	<i>Smart Skin</i> .....	152
8.2.3	<i>KlimaatPlusWoning</i> .....	152
	<b>LIJST VAN FIGUREN</b> .....	<b>153</b>
	<b>LIJST VAN TABELLEN</b> .....	<b>156</b>
	<b>LITERATUURLIJST</b> .....	<b>157</b>
	<b>BIJLAGEN</b>	
	Bijlage 1 Zonneterp	
	Bijlage 2 Technische tekeningen KlimaatPlusWonen	
	Bijlage 3 Snelheidsprofiel Fiwihex plafondfan	
	Bijlage 4 Meetgegevens Fiwihex	
	Bijlage 5 Iteratiemethode voor bepalen vermogen Fiwihex	
	Bijlage 6 Bepaling warmteoverdrachtscoëfficiënt Fiwihex	
	Bijlage 7 Technische gegevens Venkon	
	Bijlage 8 Technische gegevens Jaga Luchtverhitter	
	Bijlage 9 Vergelijking tussen Fiwihex, Venkon en Jaga	
	Bijlage 10 Variabelen en aanduidingen meetopstelling Fiwihex	
	Bijlage 11 Meetresultaten Smart Skin	
	Bijlage 12 Afleiding matrixvergelijking	
	Bijlage 13 Kastemperaturen bij verschillende aantallen warmtewisselaars	
	Bijlage 14 Geleverd vermogen per warmtewisselaar bij verschillende aantallen warmtewisselaars	
	Bijlage 15 Retourtemperaturen bij verschillende aantallen warmtewisselaars	
	Bijlage 16 SenterNovem tussenwoning met zelfregelende roosters	
	Bijlage 17 Model aquifer	

Bijlage 18 Technische gegevens DSS Zonnewarmtesysteem

Bijlage 19 Initialisatiefiles Kas

Bijlage 20 Initialisatiefiles Woning

**DANKWOORD**

# 1 Probleemomschrijving

## 1.1 Inleiding

De wereld zal in de toekomst steeds meer te kampen krijgen met energie- en klimaatproblemen. Er zal hiervoor een oplossing gevonden moeten worden en het concept Kas als Energiebron kan hier een bijdrage aan leveren. De nieuw te bouwen KlimaatPlusWoningen moeten gebruik maken van dit concept en zo de eerste woningen ter wereld worden die geen energie kosten, maar juist energie opleveren. Is het plan voor deze woningen haalbaar of is de belofte van dit concept 'te mooi om waar te zijn' ?

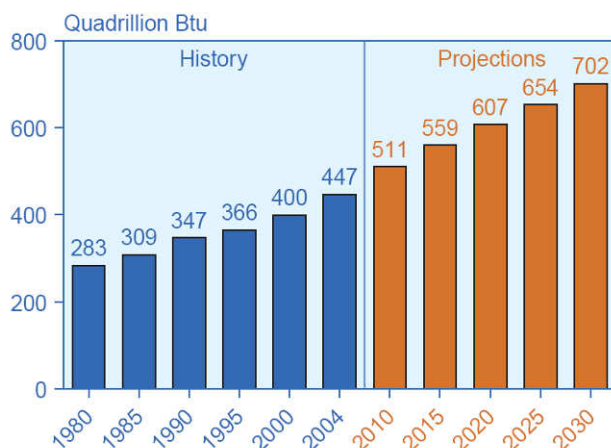
Dit rapport verkent de haalbaarheid van deze belofte. Het toepassen van het concept Kas als Energiebron bij kaswoningen wordt onderzocht naar aanleiding van de KlimaatPlusWoningen. In dit hoofdstuk wordt uiteengezet welke problemen er zijn en hoe het concept Kas als Energiebron hier op in speelt. Ook wordt toegelicht hoe de KlimaatPlusWoningen gebruik maken van dit concept.

## 1.2 Energie- en klimaatproblemen

### 1.2.1 Energieverbruik

De komende decennia zal de energiebehoefte naar verwachting fors blijven stijgen. Belangrijkste oorzaken zijn onder meer de groeiende wereldbevolking en de sterke drang tot economische ontwikkeling in veel niet-westerse landen, zoals China en India. De huidige energiemarkt is vrijwel volledig afhankelijk van fossiele brandstof, in westerse landen voornamelijk aardolie en aardgas. Andere belangrijke fossiele brandstoffen zijn steenkool en bruinkool.

Het Internationaal Energie Agentschap (IEA) beheert en publiceert zeer gedetailleerde gegevens met betrekking tot de wereldenergiemarkt. In de door haar gepubliceerde World Energy Outlook (WEO) van 2006 sprak het IAE de verwachting uit dat het energiegebruik in de periode tussen 2004 en 2030 met 51 % zal stijgen [1]. Een vergelijkbare organisatie is de Energy Information Administration (EIA), die deel uit maakt van het Amerikaanse ministerie van Energie. In 2007 publiceerde de EIA de International Energy Outlook (IEO) [2].



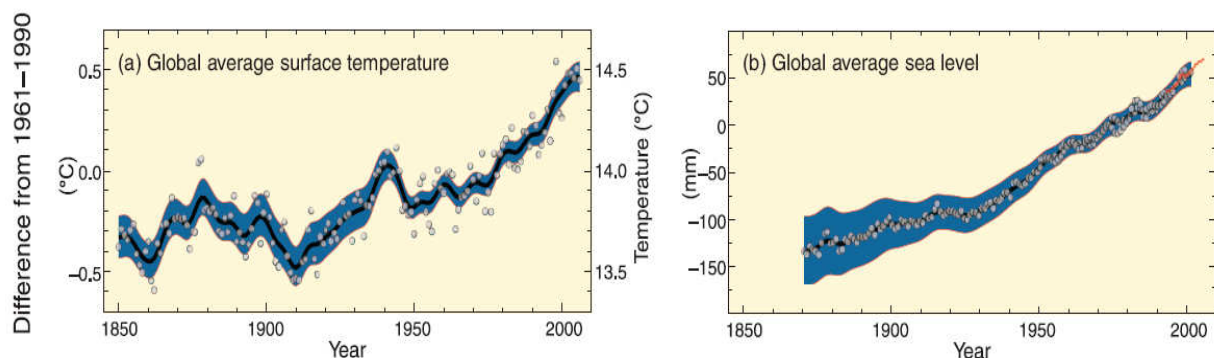
Figuur 1.1 Voorspeld wereldenergieverbruik in BTU <sup>1</sup> [2]

De resultaten voor het energieverbruik zijn vergelijkbaar met de WEO, hoewel de voorspelde toename nog groter is. Tot 2030 wordt een toename van het energieverbruik voorspeld van 57 %.

De almaar groeiende energiebehoefte zal leiden tot stijging van de toch al hoge energieprijzen, wat grote invloed zal hebben op de economie. Bovendien zijn de voorraden fossiele brandstoffen niet oneindig en zullen deze op den duur opraken. Schattingen ten aanzien van de grootte van de bestaande voorraden en voorspellingen voor het verbruik hiervan zijn erg lastig en zijn onderwerp van discussie. Feit is dat de bestaande voorraden afnemen en dat ook het aantal nieuw ontdekte velden terug loopt. Het gebruik maken van kernenergie is een alternatief, maar alleen met kernenergie zal men niet kunnen voorzien in de vraag naar energie. Bovendien brengt kernenergie andere nadelen met zich mee. Het gebruik maken van alternatieve energiebronnen is dus noodzakelijk.

### 1.2.2 Klimaatverandering

Een ander wereldwijd probleem is de opwarming van de aarde. Figuur 1.2 geeft de afwijking van de gemiddelde temperatuur op aarde ten opzichte van de periode tussen 1961 en 1990. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is in 1988 opgericht door de Verenigde Naties en heeft als taak het evalueren van de risico's van klimaatverandering. Het IPCC waarschuwt voor stijging van de zeespiegel, toename van hitte- en droogteperioden en extreme neerslag [3]. Hoewel er veel discussie is over deze voorspellingen lijkt het duidelijk dat de verandering van het klimaat grote gevolgen zal hebben.

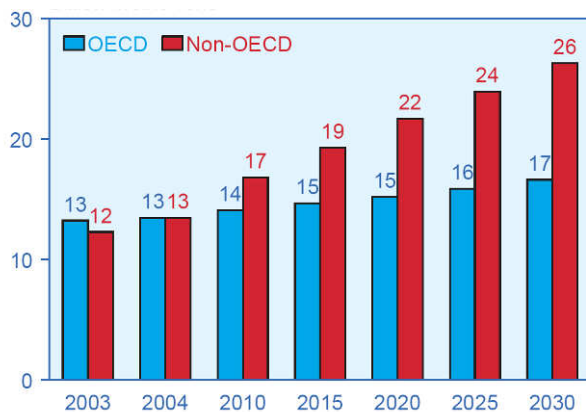


Figuur 1.2 Verloop gemiddelde temperatuur op aarde en verloop zeespiegel [3]

Als voornaamste oorzaak van de opwarming van de aarde wordt het versterkt broeikaseffect gezien. Het broeikaseffect is al zo oud als de aarde. Door de aanwezigheid van broeikasgassen als kooldioxide ( $\text{CO}_2$ ) en methaan ( $\text{CH}_4$ ) wordt zonnewarmte op de aarde vastgehouden. Vooral de concentratie  $\text{CO}_2$  heeft veel invloed op de temperatuur. Sinds de Industriële Revolutie zijn de concentraties broeikasgassen echter enorm gestegen en deze stijging zet zich nog altijd voort. Het is een algemeen aanvaarde opvatting dat dit te wijten is aan menselijk handelen en voornamelijk wordt veroorzaakt door het verstoken van fossiele brandstoffen.

In de WEO van 2006 geeft het IEA een voorspelling voor de toename van  $\text{CO}_2$ -emissie tussen 2004 en 2030. De schatting is dat deze zal stijgen met 55%. De voorspellingen van de EIA zijn nog ongunstiger, zij voorspelt een toename van 65 %. Vooral de niet-westerse landen zullen naar verwachting meer  $\text{CO}_2$  gaan

uitstoten. Deze toename zal volgens beide organisaties voornamelijk voortkomen uit het gebruik van fossiele brandstoffen. Om het versterkte broeikaseffect te beperken is het raadzaam deze uitstoot te beperken.



Figuur 1.3 Voorspelde CO<sub>2</sub>-emissie in miljarden tonnen [2]

### 1.2.3 Beperking van gebruik van fossiele brandstoffen

Het opraken van fossiele brandstoffen en de opwarming van de aarde zijn dus twee belangrijke problemen. Dan is nog niet eens stilgestaan bij de milieubelasting die voorkomt uit het gebruik van fossiele brandstoffen. Deze zaken vragen om een energietransitie.

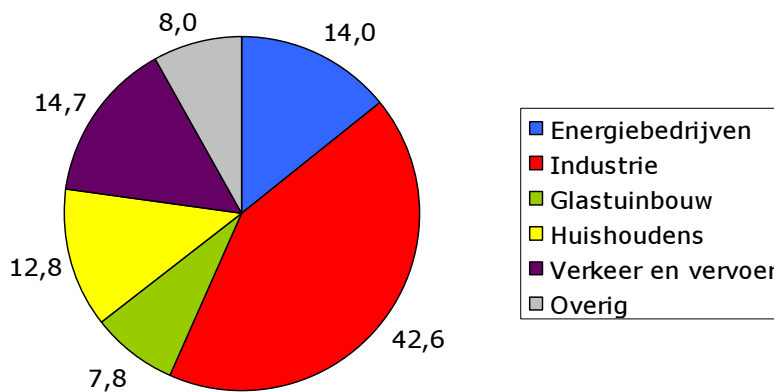
Er zijn verschillende internationale verdragen afgesloten het verbruik van fossiele brandstoffen en de emissie van CO<sub>2</sub> te beperken. Sinds 2005 geldt het Kyoto-protocol, waaraan op dit moment 167 landen zich verbonden hebben. De betrokken landen hebben zich verplicht hun CO<sub>2</sub>-emissie in de periode 2008-2012 te reduceren tot 5% onder het niveau van 1990. Een belangrijke rol is daarbij weggelegd voor duurzame energie.

De Europese Unie heeft al eerder een strengere doelstelling geformuleerd. In 2020 moet 20% van het totale energieverbruik duurzaam zijn en dus opgewekt worden uit wind, zon, waterkracht of biomassa.

## 1.3 Kas als Energiebron

Eén van de sectoren die bij deze problematiek een belangrijke rol speelt is de glastuinbouw. Op basis van gegevens van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) valt af te leiden dat de sector in 2005 goed was voor ruim 8% van het totale stroomverbruik in Nederland. Het overgrote deel van deze energie wordt gebruikt voor het verwarmen en koelen van kassen. Hierbij worden hoogwaardige fossiele brandstoffen - voornamelijk gas - omgezet in laagwaardige warmte.

Binnenlands energieverbruik in 2005 (procenten)

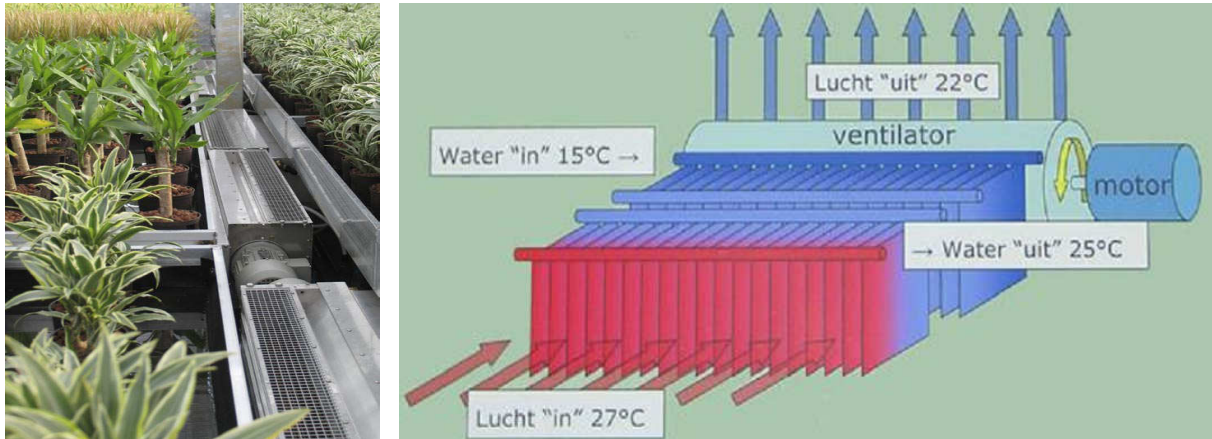


Figuur 1.4 Binnenlands energieverbruik per sector (op basis van gegevens CBS)

Om het energieverbruik door de glastuinbouw een halt toe te roepen begonnen het InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster (InnovatieNetwerk) en de Stichting Innovatie Glastuinbouw (SIGN) in 2000 met het ontwikkelen van een nieuw project: De Kas als Energiebron [4]. Door het toepassen van de Fiwihex<sup>2</sup>, het gesloten houden van de kas<sup>3</sup>, warmteopslag door middel van een aquifer<sup>4</sup> en betere isolatie bleek het mogelijk om de tuinbouwkas veel minder energie te laten verbruiken. Het bleek zelfs mogelijk om met de kas netto energie te produceren, in de vorm van warm water: een Energieproducerende Kas.

Op 24 mei 2006 werd de eerste Energieproducerende Kas officieel geopend door minister Veerman van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV). De kas staat in Huissen en is als pilot gebouwd met subsidie van de overheid. Tien procent van het totale kasoppervlak is ingericht als Energieproducerende Kas, de overige negentig procent van het oppervlak bestaat uit conventionele kas. Het energieproducerende gedeelte maakt gebruik van zonnestraling en heeft over het hele jaar een overschot van warm water, dat gebruikt wordt om de rest van de kas te verwarmen in de winter. Op dit moment is het nog de enige kas die werkt volgens dit principe.

De kas in Huissen heeft voor koelen en verwarmen 90 % minder energie nodig dan een conventionele tuinbouwkas. De kas heeft een warmteoverschot en kan andere gebouwen zelfs netto laagwaardige warmte leveren. Dat gebeurt overigens nog niet. Eigenaar Stef Huisman wil naast zijn kas een woning bouwen waarbij gebruik wordt gemaakt van de warmte die de kas produceert. Wanneer een groter deel van de kas wordt ingericht als Energieproducerende Kas, kan de kas nog veel meer laagwaardige energie leveren.



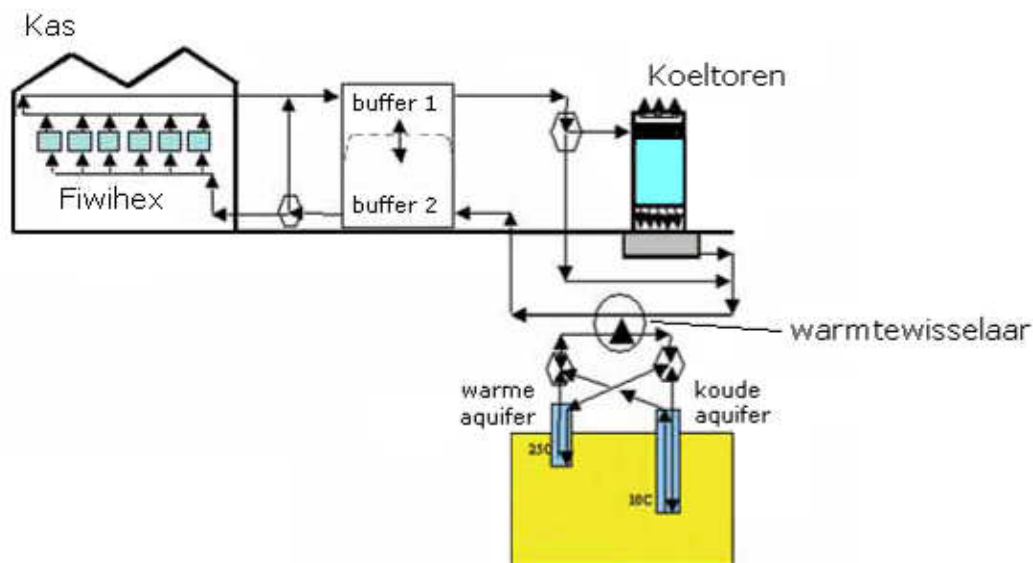
Figuur 1.5 Links: lineaire Fiwihex in energieproducerende kas te Huissen [4], rechts werking lineaire Fiwihex [5]

### Werking van de Energieproducerende Kas

Hoe werkt de Energieproducerende Kas? Het idee is als volgt: in de zomer valt er veel zon op de kas en is er sprake van een warmteoverschot. De kas wordt dan gekoeld door de Fiwihex te voeden met koel water uit de aquifer. Hierdoor koelt de lucht in de kas af en wordt het water opgewarmd. Het geproduceerde warme water wordt vervolgens opgeslagen in een dagbuffer en vanaf daar naar de aquifer getransporteerd. Tussen maart en november is er per etmaal een netto warmteoverschot in de kas. De kas wordt in deze periode zo nodig verwarmd met het water uit de dagbuffer. De rest van het warme water wordt opgeslagen om in de winter te gebruiken om te verwarmen.

In de wintermaanden (dus van november tot en met maart) wordt warm water onttrokken aan de aquifer. Door dit water door de Fiwihex te voeren kan de kas verwarmd worden. Het water koelt af en wordt afgevoerd. In de kas in Huissen wordt dit water verder afgekoeld door middel van een koeltoren en opgeslagen om mee te koelen in de zomer. Er is over een heel jaar gezien namelijk een netto warmteoverschot. Een alternatief voor een koeltoren is een warmtepomp<sup>5</sup>. Hiermee kan het water gekoeld worden om te gebruiken in de zomer, maar tegelijkertijd wordt de warmte die nog in het water zit gewonnen. Deze warmte kan worden gebruikt voor levering van warmte buiten de kas, bijvoorbeeld aan woningen en utiliteitsbouw. Op deze manier kunnen dus andere gebouwen verwarmd worden met het netto warmteoverschot dat de kas heeft. Er kan ook meer laagwaardige energie worden geleverd door een groter deel van de kas in te richten als Energieproducerende Kas.

De installatie van de kas bestaat uit twee vloeistofcirculatiesystemen. Het ene systeem verbindt de warmtewisselaars, de buffers en de koeltoren. Het andere verbindt de koude en de warme bron. Dit is geïllustreerd in figuur 1.6. Er is dus geen direct contact tussen beide vloeistofcirculatiesystemen, de warmteoverdracht tussen beide systemen vindt plaats via een scheidingswarmtewisselaar. De reden hiervoor is dat men verstopping van de aquifer wil voorkomen.



Figuur 1.6 In de kas in Huissen zijn de twee vloeistofcirculatiesystemen verbonden door een warmtewisselaar [6]

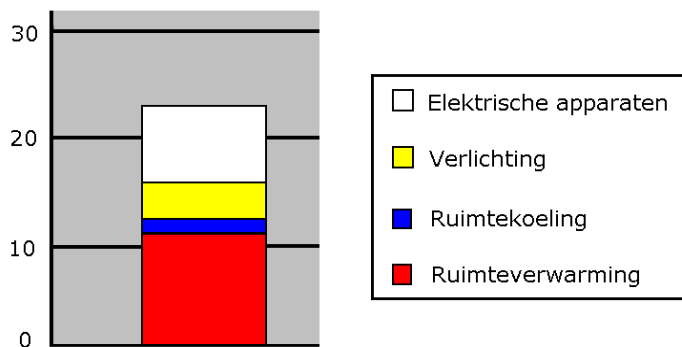
Concluderend is het energieverbruik van de kas in Huissen dus beperkt. Er wordt alleen energie verbruikt voor de pompen, de ventilatoren en de koeltoren. Daarnaast kan de kas bij het toepassen van een warmtepomp dus zelfs netto laagwaardige warmte leveren. Deze warmte wordt geleverd in de vorm van water met een temperatuur van ongeveer 25 °C. Door middel van lage temperatuurverwarming kan dit water worden gebruikt om woningen te verwarmen. Op dit moment gebeurt dat echter nog niet, omdat conventionele woningen hogere watertemperaturen nodig hebben voor verwarming.

## 1.4 Kas als Energiebron voor woningen

### 1.4.1 Energiegebruik voor woningen

Net als het energieverbruik van de glastuinbouw is ook de hoeveelheid energie die wordt gebruikt voor woningen aanzienlijk. Uit figuur 1.4 blijkt dat 12,8 % van de in Nederland geconsumeerde energie in 2005 werd gebruikt voor woningen. Deze energie wordt voornamelijk gebruikt voor elektrische apparaten, verlichting en ruimteverwarming. Figuur 1.7 geeft aan dat de meeste energie bij woningen wordt gebruikt om te verwarmen. In bijna alle gevallen gebeurt dit door met een verwarmingsketel. Om in de verschillende ruimten een temperatuur van rond de 20 °C te realiseren wordt de ketel opgestookt naar een temperatuur van meer dan 100 °C en het water opgewarmd naar 90 °C. Dit is zeer inefficiënt. Het gebruiken van het warmteoverschot van kassen voor ruimteverwarming is dus een zeer interessante optie.

### Jaarlijks energieverbruik (GJ per jaar)

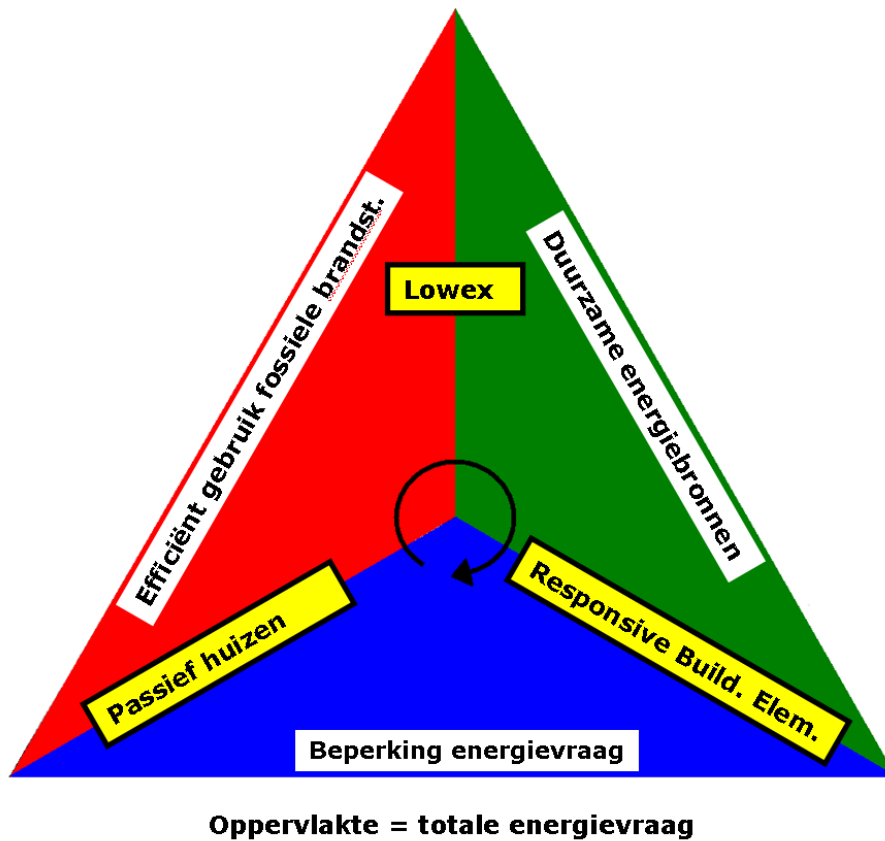


*Figuur 1.7 Primair energiegebruik zuinige nieuwbouwwoning (gebaseerd op [7])*

Het energieverbruik voor woningen is dus substantieel. Om het energieverbruik te verlagen kan men een aantal dingen doen. De Trias Energetica is ontwikkeld door de TU Delft en geeft een ontwerpstrategie om te komen tot optimaal duurzaam energiegebruik voor woningen. De strategie bestaat uit drie ontwerpaspecten, die men als cyclus moet doorlopen.

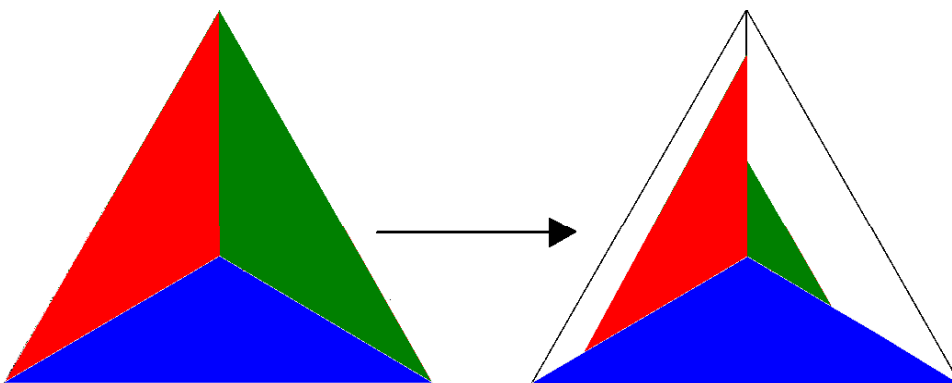
In figuur 1.8 is de Trias Energetica weergegeven. De oppervlakte van de driehoek geeft het totale verbruik van fossiele brandstoffen voor een woning weer. De drie verschillende vlakken geven de ontwerpaspecten weer waarmee dit verbruik gereduceerd kan worden. Het eerste aspect is energiebesparing, dus het beperken van de energievraag. In de praktijk men dit ondermeer doen door het toepassen van goede thermische isolatie, luchtdicht bouwen en het tegengaan van verspilling van energie. Het volgende aspect is zo veel mogelijk gebruik maken van duurzame energiebronnen. Dit kan ondermeer gebeuren door energie op te wekken uit zon, water, wind of biomassa. Ook kan men gebruik maken van bodemwarmte. Ten slotte het verbruik van fossiele brandstoffen worden beperkt door zo efficiënt mogelijk gebruik te maken van deze fossiele brandstoffen. Hiervoor is het van belang om verlichting, installaties en andere apparatuur te gebruiken met een hoog rendement.

De gele blokken geven de belangrijkste technische concepten om te komen tot meer duurzame woningbouw. De positie in de driehoek geeft aan welke ontwerpstrategieën voornamelijk worden gebruikt. Bij het Passief Huizen wordt de nadruk gelegd op het minimaliseren van de energievraag en het efficiënt aanwenden van de hoogst nodige fossiele brandstoffen. Gebouwen met Responsive Building Elements kunnen reageren op omstandigheden en zich aanpassen. Hierdoor kan men beter gebruik maken van duurzame energie en tevens de energievraag beperken. Dit kan men bijvoorbeeld bereiken door de zoninstraling te reguleren. Lowex-systemen (waarbij Lowex staat voor LOW Exergy), richten zich op beperken van het verlies van exergie<sup>6</sup>. Een voorbeeld hiervan is het toepassen van Lage Temperatuur Verwarming (LTV) en Hoge Temperatuur Koeling (HTK). Lowex-systemen richten zich op het efficiënt gebruik maken van fossiele brandstoffen en op het gebruik van duurzame energie.



*Figuur 1.8 Trias Energetica: ontwerpaspecten met plaats van verschillende concepten*

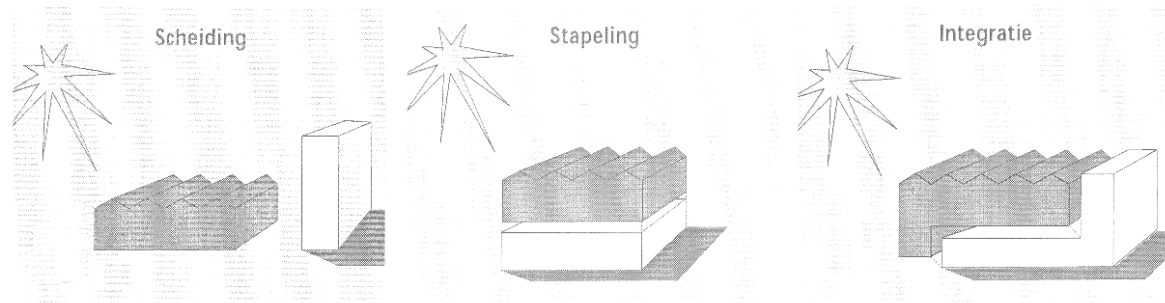
Het concept Kas als Energiebron is nog nooit toegepast in de woningbouw. Het concept zou ook kunnen bijdragen aan het verlagen van het gebruik van fossiele brandstoffen voor woningen. Er zijn enkele ontwerpen waarbij men voor woningen van dit concept gebruik wil maken. Het concept richt zich, net als de Lowex-systemen, op efficiënt gebruik van fossiele brandstoffen en gebruik van duurzame energie. Als men er in slaagt om het concept succesvol toe te passen bij woningen zal het energieverbruik voor de woningen lager worden. Dit zal voornamelijk het gevolg zijn van het gebruik van duurzame energie. Figuur 1.9 geeft de daling van fossiele brandstoffen weer, waarbij de oppervlakte van de driehoek verbruik weergeeft.



*Figuur 1.9 Daling van energieverbruik fossiele brandstoffen door Kas als Energiebron*

### 1.4.2 Het Zonneterp-principe

In de vorige paragraaf bleek dat het mogelijk is om door middel van kassen zonnewarmte te winnen en netto laagwaardige warmte te leveren. Dit is echter nog nooit gebeurd. Volgens het InnovatieNetwerk moet het mogelijk zijn om met een kasoppervlak van 1 hectare jaarlijks  $3 \cdot 10^3$  GJ aan energie te winnen, hiermee zijn circa 100 woningen te voorzien van voldoende warm water voor verwarming [8]. Er bestaan drie verschillende koppelingsprincipes om kassen en woningen te verbinden. De verschillende principes zijn grafisch weergegeven in figuur 1.10.



*Figuur 1.10 Koppelingsprincipes tuinbouwkassen en gebouwen [8]*

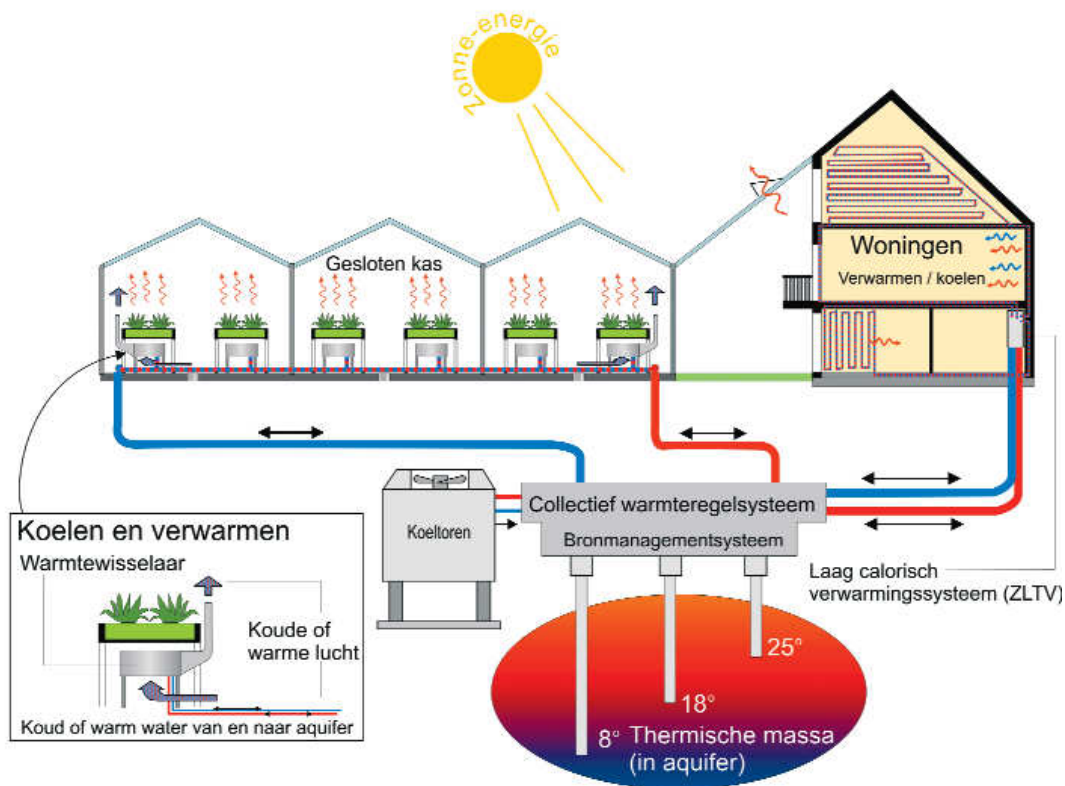
Bij scheiding van de kassen en de bebouwing mag de afstand tussen de tuinbouwkassen en de woningen niet te groot zijn. Dit omdat er bij het transport van warm water veel energie verloren gaat, ook het transport is erg kostbaar. Volgens het InnovatieNetwerk bedraagt het warmteverlies ongeveer 30 GJ per kilometer [8]. De afstand tussen de kas en de bebouwing mag niet meer dan enkele kilometers zijn.

Bij stapeling bevinden de tuinbouwkassen zich op de bebouwing. Om de bedrijfsvoering van tuinbouwkassen efficiënt te houden, is een minimaal kasoppervlak van 1 hectare benodigd [8]. Koppeling met woningen is met principe niet aan te raden in verband met daglichttoetreding. Men kan wel denken aan industriegebouwen, discotheken of bioscopen.

Bij integratie vormen de kassen en de bebouwing ruimtelijk en functioneel één geheel. Het theoretische concept De Zonneterp [9] is een voorbeeld van integratie. Dit concept is ontwikkeld in opdracht van het InnovatieNetwerk en is gebaseerd op het principe Kas als Energiebron. Het winnen van zonnewarmte gebeurt hierbij in een glastuinbouwkas. De kas levert netto warmte, die benut kan worden voor het verwarmen van de omliggende bebouwing. Deze bebouwing bestaat ondermeer uit woningen, maar ook uit gebouwen met andere functies. Zonneterp is een complex van gebouwen met veel verschillende functies en kan grotendeels duurzaam en zelfvoorzienend functioneren. Naast de kringloop van zonnewarmte lopen er in het complex ook kringlopen van koolstof, water en nutriënten. In Bijlage 1 wordt het concept Zonneterp nader toegelicht. Er wordt in [9] gesteld dat er met dit concept "energie in overvloed" is en dat de kosten "met voldoende marge" worden terug verdiend.

In Venlo wil men het Zonneterp-principe voor het eerst op grote schaal in praktijk brengen. Dit gebeurt in het kader van de internationale tuinbouwtentoonstelling Floriade in 2012. De eerste plannen van architect Jón

Kristinsson voor het multifunctionele complex Villa Flora zijn afgerond. Het ontwerp bevat een grote verscheidenheid aan kantoorruimten, met verschillende klimaten en sferen. Het ontwerp bevat geen woningen, maar is wel gebaseerd op het Zonneterp-concept. Het project zit echter nog in de ontwerpfase.



Figuur 1.11 Schematische weergave het warmtesysteem Zonneterp [9]



Figuur 1.12 Impressie Vila Flora [10]



Figuur 1.13 Impressie interieur Vila Flora [10]

### 1.4.3 Kas als Energiebron in kaswoningen

Het concept Zonneterp gaat uit van een groot complex, waarvan woningen slechts een onderdeel zijn. Doordat een groot aantal verschillende functies is gecombineerd, heeft dit concept een aantal restricties voor het gebruik van voorzieningen tot gevolg. Zo zullen piekmomenten in het stroomverbruik vermeden moeten worden en kunnen bepaalde chemische stoffen niet worden gebruikt. Daarnaast kan de bundeling van functies tot overlast voor de bewoners van de woningen leiden. Het principe brengt dus bepaalde nadelen met zich mee.

Bij zowel integratie en stapeling worden functies gebundeld, waardoor conflicten kunnen optreden. Bij scheiding is dit niet het geval. Zoals eerder werd beschreven treedt er dan warmteverlies op en mag de afstand tussen de kassen en de woningen in dat geval niet te groot zijn. Deze eis heeft veel invloed op de ruimtelijke ordening.

Dit roept de vraag op of het niet mogelijk is om kaswoningen te realiseren, waarin op locatie zonnewarmte wordt gewonnen. Deze warmte kan na opslag weer gebruikt worden om de woning in de winter te verwarmen. Elke woning heeft dan dus een eigen kasconstructie om zonnewarmte te oogsten. De kasconstructie heeft als meerwaarde dat ze in de tussenseizoenen gebruikt kan worden als buffer tussen binnen en buiten, met een hogere temperatuur dan buiten. Ook kan men planten in de kas laten groeien.

Dit concept is nog nooit toegepast. Wel zijn er in Nederland al enkele kaswoningen, zoals de Zonnewoningen in Culemborg. Dit zijn woningen met een omhullende passieve kas. Het doel van deze kas is het vergroten van het gebruiksoppervlak en het beperken van transmissieverliezen. Uit onderzoek van Cauberg-Huygen Raadgevend Ingenieurs is gebleken dat de kas een groot deel van het jaar te gebruiken is als tussenzone tussen binnen en buiten. Ook bleken

de transmissieverliezen inderdaad kleiner te zijn dan bij woningen zonder kasconstructie, maar dat het effect op het energiegebruik minimaal is [11].

#### **1.4.4 KlimaatPlusWonen**

In samenwerking met het InnovatieNetwerk hebben AM Noord-Holland en Inbo Architecten enkele ontwerpen gemaakt voor zogenaamde KlimaatPlusWoningen aan de Scheepsbouwweg in Amsterdam. Deze woningen bevatten een kasruimte die is geïntegreerd in de woning. Er wordt net als bij de tuinbouwkas in Huissen gebruik gemaakt van de Fiwihex in combinatie met warmteopslag. Daarnaast zijn er in het ontwerp grote vlakken Smart Skin opgenomen. Dit is een warmtewisselaar die bestaat uit drie glasvlakken, waartussen een systeem van watervoerende kanalen is aangebracht. Met de Smart Skin kan men net als de Fiwihex koelen, verwarmen en zonnewarmte oogsten. Met de Fiwihex en de Smart Skin kan laagwaardige zonnewarmte worden gewonnen en opgeslagen. Deze warmte kan in winterperiode worden gebruikt om de woning te verwarmen.

Naast het gebruik van de Fiwihex en de Smart Skin zijn in het ontwerp ook PV-cellen<sup>7</sup> en windturbines opgenomen om zonnewarmte en energie om te zetten in elektriciteit. De Fiwihex en de Smart Skin moeten volgens het principe "Kas als Energiebron" zorgen dat er nauwelijks elektrische energie meer nodig is voor koeling en verwarming. De kleine hoeveelheid elektriciteit voor de pompen en de Fiwihex worden geleverd door de zonnepanelen en windturbines. Deze leveren daarnaast de benodigde elektrische energie aan de woning. De energieopwekking moet zelfs groter zijn dan de energiebehoefte, zodat de woningen netto elektrische energie leveren. Als dit werkelijk lukt, is er dus geen sprake van KlimaatNeutraalWonen, maar van KlimaatPlusWonen.

Naast besparing van fossiele brandstoffen claimt men nog een aspect dat de KlimaatPlusWoningen meerwaarde geeft. De kas is een buffer tussen binnen en buiten, en levert dus extra gebruiksoppervlakte op. Een derde aspect van meerwaarde dat men voor de KlimaatPlusWoningen kan aanvoeren is dat de kasruimte van de woning geschikt is om veel planten in te laten groeien. Dit heeft een positieve invloed op het thermisch comfort, luchtkwaliteit, geluidsabsorptie en daarnaast positieve psychologische aspecten [12].

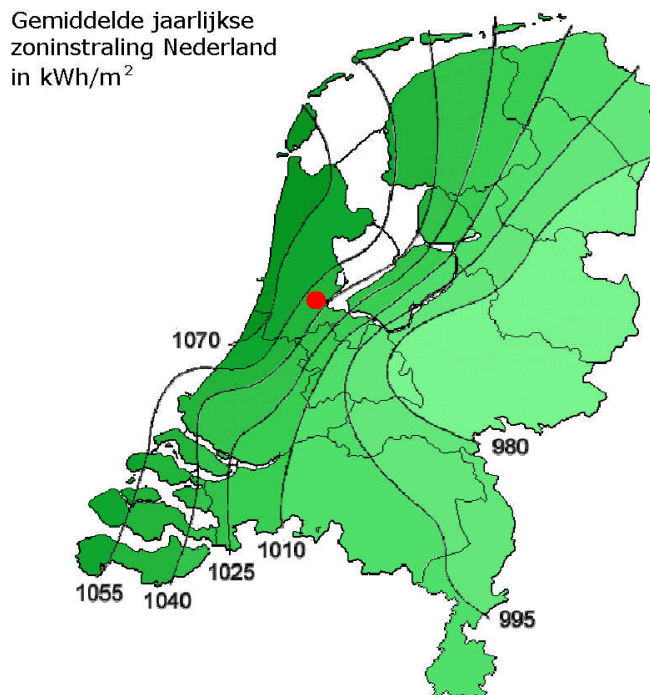
Het concept "Kas als Energiebron" is een heel belangrijk onderdeel van het ontwerp. Een groot deel van het energiegebruik in woningen wordt gebruikt voor verwarming. Met het toepassen van dit concept moet deze hoeveelheid energie vrijwel helemaal gereduceerd worden. Hierdoor is de energievraag van de woning veel kleiner en kunnen de PV-cellen en windturbines genoeg energie leveren voor de woning en moet er zelfs een energieoverschot ontstaan. Als het concept "Kas als Energiebron" voor de woning niet werkt, moet er veel meer duurzame energie worden opgewekt. De doelstelling van het ontwerp, netto energie produceren, zal dan niet meer worden gerealiseerd.



*Figuur 1.14 Schetsmatige weergave van het ontwerp voor de KlimaatPlusWoningen [13]*

### **Levering van energie door de zon**

Er wordt in Nederland door de zon veel meer energie ingestraald dan dat er energie wordt verbruikt. Om een indicatie te geven van de hoeveelheid warmte die de zon levert wordt nu bepaald hoe efficiënt de warmtewinning in de kas zou moeten zijn opdat men de woning niet extra bij hoeft te verwarmen.



*Figuur 1.15 Globale zoningstraling naar regio [14]*

Figuur 1.14 geeft de gemiddelde zoningstraling in Nederland per vierkante meter. De woningen zullen gerealiseerd worden in Amsterdam, de gemiddelde zoningstraling per vierkante meter blijkt in deze regio minimaal 1040 kWh, ofwel 3,7 GJ.

In het conceptontwerp is de oppervlakte van de kas 50 m<sup>2</sup>. Op het horizontale vlak waar de kas staat, valt jaarlijks gemiddeld dus 181 GJ aan zonne-energie. Dit is ruim vijftien keer zo veel energie als de energie die nodig is om een zuinige nieuwbouwwoning een jaar te verwarmen, zie figuur 1.7. Dit betekent dat bij de winning en opslag van zonne-energie met deze kas een rendement van 7 % voldoende is om de woning te kunnen verwarmen.

### **Doel van dit rapport**

Het concept "Kas als Energiebron" is dus een heel belangrijk onderdeel van het ontwerp. Als het concept "Kas als Energiebron" voor de woning niet werkt, moet er veel meer duurzame energie worden opgewekt. De doelstelling van het ontwerp, netto energie produceren, zal dan niet meer worden gerealiseerd. In dit rapport wordt het gebruik van de FiwiHex en de Smart Skin in combinatie met warmteopslag bij de KlimaatPlusWoningen beschouwd. Hierbij wordt uitgegaan van Conceptrapport 2.0 voor KlimaatPlusWoningen aan de Scheepsbouwweg in Amsterdam [13].

Aan de hand hiervan wordt gekeken of toepassing van het concept Kas als Energiebron voor kaswoningen haalbaar is en of het KlimaatPlusWoningen kans van slagen heeft. Of zijn de beloften van dit concept "te mooi om waar te zijn" ?

## **Voetnoten hoofdstuk 1**

1 De **British Thermal Unit (BTU)** is een eenheid voor energie. Eén BTU is 1060 J.

2 De **Fiwihex** is een dunne-draad warmtewisselaar die is ontwikkeld door Fiwihex BV. Warmteoverdracht vindt plaats via dunne koperdraden, die om koperen buisjes geweven zijn. Hoofdstuk 4 gaat hier verder op in.

3 Wanneer de luchtramen van een kas gedurende het gehele jaar niet worden geopend, spreekt men van een **gesloten** kas. Conventionele kassen zijn voor klimaatbeheersing afhankelijk van natuurlijke ventilatie door middel van het openen van de luchtramen. De ramen zijn gemiddeld 80 dagen per jaar geopend omdat de temperatuur of de relatieve vochtigheid te hoog is [15]. Nadelen hiervan zijn verlies van CO<sub>2</sub> en infecties.

4 Een **aquifer** is een ondergrondse, watervoerende zandafzetting die ligt ingesloten tussen ondoordringbare materialen, zoals klei. Wanneer dergelijke lagen goed bereikbaar zijn voor boringen en de stroming van het grondwater voldoende klein is, dan kan men warmte en 'koude' opslaan in de aquifers. Dit wordt warmte/koudeopslag (WKO) genoemd. In het grootste deel van Nederland is warmte/koudeopslag mogelijk. In hoofdstuk 6 wordt hier op terug gekomen.

5 Een **warmtepomp** verplaatst warmte door middel van arbeid. Op de plaats waar men energie wil onttrekken laat men de circulatievloeistof onder hoge druk verdampen. Vervolgens laat men het gasvormige medium bij een lagere druk condenseren. Hierbij komt warmte vrij. Men kan dus koelen of verwarmen door middel van een warmtepomp. De Coefficient Of Performance (COP) geeft de verhouding weer tussen de hoeveelheid afgegeven warmte en de hoeveelheid elektrische energie die hiervoor nodig is.

6 De hoeveelheid **exergie** geeft de kwaliteit van een energiestroom en is gelijk aan de maximale hoeveelheid arbeid of elektriciteit die hieruit is te verkrijgen.

7 De **PV-cel**, ofwel de fofovoltaische cel is het meest toegepaste type zonnecel. Als er zonlicht op de cel valt, worden er elektronen los gestoten. De elektronen gaan bewegen en vormen een elektrische stroom.

## 2 Onderzoeksdoelstellingen

### 2.1 Inleiding

In dit rapport wordt het gebruik van de nieuwe innovatieve warmtewisselaars Fiwihex en Smart Skin in combinatie met warmteopslag bij individuele kaswoningen onderzocht. In het vorige hoofdstuk is het concept kort beschreven en zijn de achtergronden van het onderzoek geschetst. In dit hoofdstuk wordt de probleemstelling geformuleerd, wordt het onderzoek afgebakend en de exacte doelstellingen van het onderzoek worden omschreven. Ook is de aanpak van het onderzoek uiteengezet.

### 2.2 Probleemstelling

Ondermeer door het toepassen van de Fiwihex en Smart Skin in kaswoningen wil men woningen realiseren die netto energie leveren. In de zomer wordt de kasruimte met koud water gekoeld, waarbij het water opwarmt en wordt opgeslagen. In de winter wordt het opgeslagen warme water gebruikt om de kas en de woning te verwarmen. Het in de kas gebruikte water voor verwarming koelt hierbij af en wordt opgeslagen. In de zomer kan dit koele water weer worden gebruikt om de kas te koelen, waarmee de cyclus zich herhaalt. Op deze manier is het gebruik van fossiele brandstoffen voor ruimteverwarming te reduceren.

Verder wil men elektrische energie opwekken door middel van PV-cellen, windturbines en een biogasinstallatie. De opgewekte elektriciteit wordt gebruikt voor de Fiwihex, de pompen en de elektrische apparatuur in de woning. Als de benodigde elektrische energie voor verwarming drastisch kan worden teruggebracht, denkt men zoveel elektriciteit op te kunnen wekken dat de woning een netto energieoverschot heeft.

De meerwaarde van deze woningen moet zijn dat er minder fossiele brandstoffen verstoekt hoeven voor verwarming en dat er netto elektriciteit geleverd wordt. Daarnaast is de kas een buffer tussen binnen en buiten, zodat het gebruiksoppervlak vergroot wordt. Ook is de kas geschikt om planten in te laten groeien, wat fysische en psychische voordelen zou hebben.

Er worden een aantal belangrijke vragen opgeroepen:

- Werkt het systeem met Fiwihex en/of Smart Skin in individuele woningen?
- Hoe efficiënt is dit systeem? Zijn thermische zonnecollectoren niet efficiënter?
- Welk gedeelte van het jaar is het kasgedeelte als verblijfsgebied te gebruiken?

### 2.3 Afbakening

Voor het onderzoek zal worden uitgegaan van *Conceptontwerp 2.0 KlimaatPlusWonen* van AM Wonen, Inbo Architecten, SIGN en het InnovatieNetwerk [14]. Dit is de aanleiding van het onderzoek. Het gebruik van de Fiwihex en de Smart Skin in combinatie met warmteopslag wordt onderzocht. Energieopwekking via PV-cellen, windturbines en biogasinstallatie wordt buiten beschouwing gelaten. Er zal in dit rapport niet worden ingegaan op de fysische en psychologische aspecten van kaswoningen.

## 2.4 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van dit onderzoek is het bestuderen van het energetisch gedrag van een woning met kasconstructie in combinatie met FiwiHex en/of Smart Skin, waarmee de kas gekoeld en verwarmd kan worden, waarbij met koelen tegelijkertijd laagwaardige zonnewarmte wordt gewonnen. Deze warmte wordt opgeslagen en kan later worden gebruikt voor verwarming van de kas en de woning.

Met deze doelstelling kunnen de andere doelstellingen worden gerealiseerd:

- het vergelijken van de efficiëntie van dit concept met thermische zonnecollectoren
- het beschouwen van het thermisch comfort in de kas

## 2.5 Aanpak

Het onderzoek bestaat uit drie fasen. In de eerste fase wordt *Conceptontwerp 2.0 KlimaatPlusWonen* in kaart gebracht. Ook worden de randvoorwaarden en uitgangspunten beschreven. Waar nodig worden aannames gedaan. Vervolgens worden de FiwiHex dunne-draad warmtewisselaar en Smart Skin beschreven en geëvalueerd. Daarna worden de relevante parameters bepaald. Dit gebeurt aan de hand van documentatie van het bedrijf FiwiHex BV, meetgegevens en waar nodig via eigen modellen.

De tweede fase bestaat uit opstellen van een model met het simulatieprogramma Matlab-Simulink. Vervolgens wordt het gebruik van warmtewisselaars in de kaswoning gesimuleerd. Of beide warmtewisselaars opgenomen worden in de simulaties is afhankelijk van de beschikbare gegevens die in de eerste fase zijn verkregen. Ook de woning wordt gesimuleerd, met daarin vloerverwarming die wordt gevoed met water uit bodemopslag.

De derde fase is de analysefase. De werking van het systeem, de optredende temperaturen in de kas en de verliezen bij warmteopslag worden geanalyseerd. Aan de hand hiervan wordt de efficiëntie van het systeem bepaald. Deze wordt vergeleken met het gebruik van thermische zonnecollectoren. Dit alles leidt tot de conclusies en aanbevelingen.

## 3 Uitgangspunten en aannames

### 3.1 Inleiding

Bij het onderzoeken van de mogelijkheden voor het concept Kas als Energiebron bij kaswoningen is van belang welke uitgangspunten men gebruikt. In sommige gevallen zullen aannames gedaan moeten worden. In dit hoofdstuk worden deze uitgangspunten en aannames beschreven. Ten eerste wordt het ontwerp van de KlimaatPlusWoningen omschreven. Dit is de aanleiding van het onderzoek, waar nodig worden in dit rapport aannames gedaan met betrekking tot het ontwerp. Vervolgens worden de voorgestelde methoden van warmtewinning in de kas kort beschreven en ten slotte worden de belangrijkste aannames en uitgangspunten opgesomd.



*Figuur 3.1 Artistieke impressie van de KlimaatPlusWoningen [13]*

### 3.2 Ontwerp KlimaatPlusWoningen

#### 3.2.1 Inleiding tot het ontwerp

Als uitgangspunt voor het onderzoek van kaswoningen zal Concept Ontwerp 2.0 voor KlimaatPlusWonen aan de Scheepsbouwweg in Amsterdam gebruikt worden [14]. Dit plan zal in deze paragraaf worden omschreven. Inbo Architecten Woudenberg heeft dit ontwerp gemaakt, in opdracht van AM Wonen en het InnovatieNetwerk. Het plan beschrijft een wijk met 24 kaswoningen, daarnaast zijn ook vier appartementengebouwen in het ontwerp opgenomen. In dit verslag zal alleen gekeken worden naar de kaswoningen, hierbij worden alleen de tussenwoningen beschouwd.

Het uitgangspunt van het ontwerp is de Energieleverende Kas. De woning is gesplitst in twee gedeelten. Naast het dichte gedeelte is er de zogenaamde kasruimte. Deze glazen overspanning moet de woning voorzien van veel licht. In de zomer wordt de woning door middel van de Fiwihex gekoeld en tegelijkertijd wordt de warmte geogst voor de wintersituatie. De gewonnen warmte wordt

opgeslagen in een aquifer. Op deze wijze wil men de woning voor verwarmen en koelen energieneutraal laten zijn.

Door plaatsing van windmolens en PV-cellen wil men ook klimaatneutrale elektriciteitsvraag realiseren. Naast de woningen moeten ook enkele appartementsgebouwen worden gerealiseerd. Deze moeten een biogasinstallatie bevatten waarmee men ook energie op kan wekken. Men wil een project realiseren dat netto meer energie levert dan het verbruikt, zowel qua verwarming als qua elektriciteitsvraag: KlimaatPlusWonen dus.

Naast het opwekken van energie moeten de KlimaatPlusWoningen meer voordelen bieden. De kas is een buffer tussen binnen en buiten en levert dus extra gebruiksoppervlakte op. Daarnaast levert de lichte en groene kasruimte een positieve bijdrage aan een prettige leefomgeving.

### 3.2.2 Oriëntatie

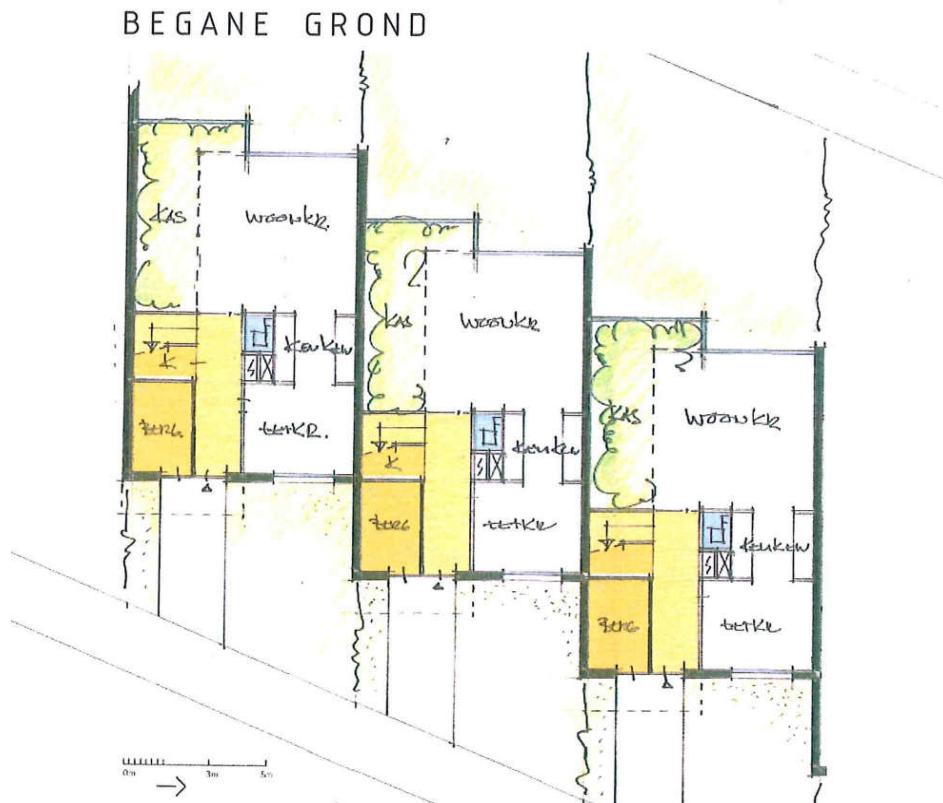
De oriëntatie van de KlimaatPlusWoningen is zo gekozen dat de voorgevel op het oosten ligt en de achtergevel op het westen. Dit is gedaan om optimaal gebruik te kunnen maken van de zonnewarmte die de kas ontvangt. Om dit te bereiken liggen de woningen onder een hoek ten opzichte van de weg. De gevel verspringt per woning. Het dak van de kas staat onder een hoek van  $21^\circ$  en is gericht op het zuiden. Ook dit heeft ten doel om kas meer zonnewarmte in de kas te laten komen.



Figuur 3.2 Situatieschets project KlimaatPlusWonen

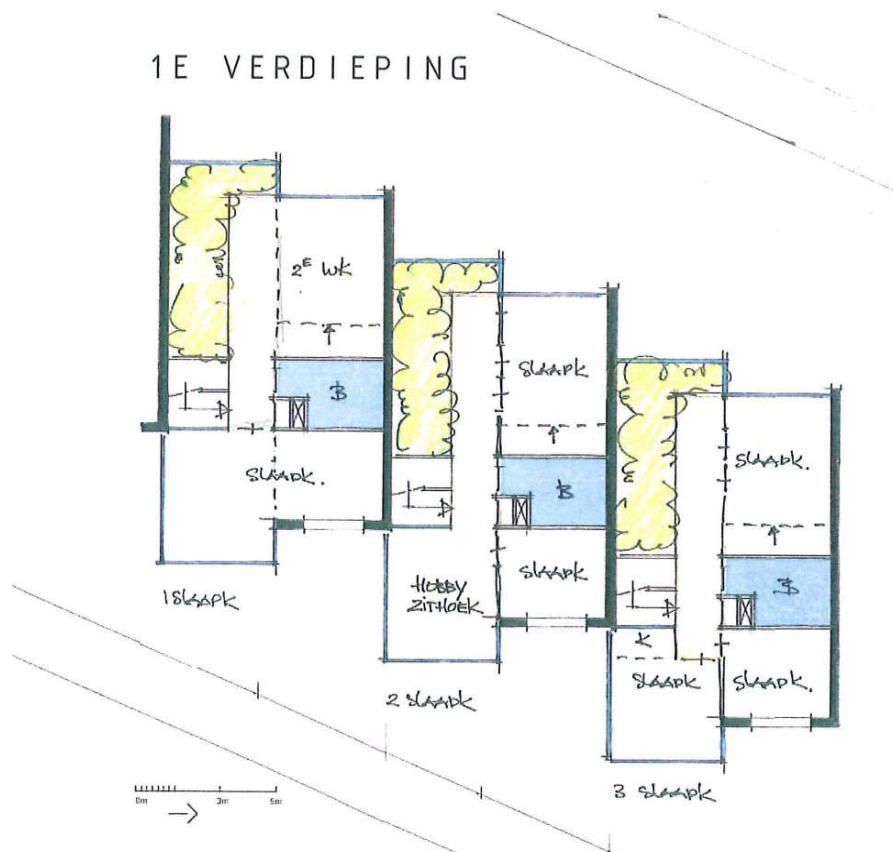
### 3.2.3 Ruimtelijke indeling

Figuur 3.3 en 3.4 geven de plattegrond van de woningen weer. Het belangrijkste gedeelte van de woning is de lichte kasruimte, die op de begane grond naast de woonkamer gesitueerd is. Dit kasgedeelte is een groene ruimte, waar veel planten groeien. Voor de kas liggen de entree van de woning en een berging. De eetkamer en keuken bevinden zich hiernaast, aan de voorzijde van de woning.

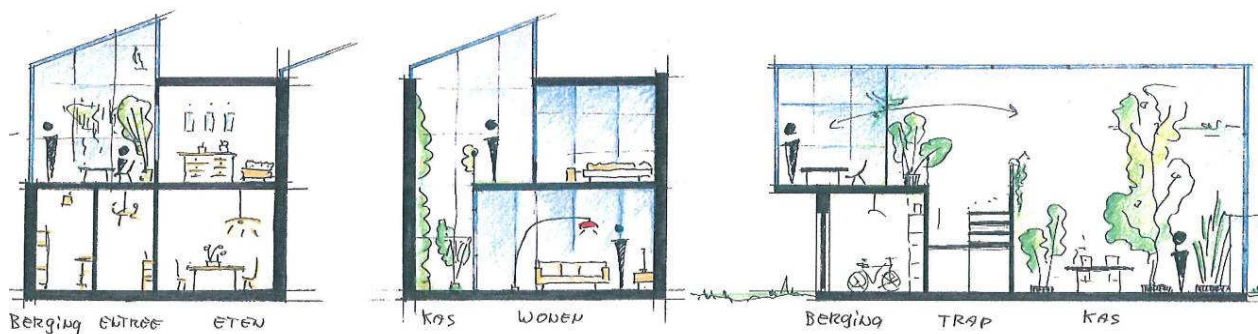


Figuur 3.3 Plattegrond van de woningen, begane grond [14]

De kas is ruim 7,5 meter hoog en loopt dus door over de eerste verdieping. Het oppervlak van de kas beslaat een groter oppervlak dan op de begane grond. Een deel van de kas ligt boven de berging en entree. Daarnaast steekt de kas ongeveer 1,2 meter de gevel uit. Op de eerste verdieping bevinden zich verder twee slaapkamers. Deze grenzen direct aan de kasruimte, waardoor elke slaapkamer minimaal licht van twee zijden krijgt. De badkamer bevindt zich tussen beide slaapkamers. Aan de voorzijde van het kasgedeelte bevindt zich een werkkamer.



Figuur 3.4 Plattegrond van de woningen, eerste verdieping [14]



Figuur 3.5 Doorsneden: dwarsdoorsnede ter plaatste van berging; dwarsdoorsnede ter plaatse van kas en woongedeelte; lengtedoorsnede ter plaatse van kas [14]

### 3.2.4 Gevels

De voor- en achtergevel zijn vanwege de andere oriëntatie zeer verschillend. De voorzijde ligt op het oosten en bevat naast het kasgedeelte relatief weinig glas om de energieverliezen in winterperiode te beperken. De achtergevel is op het zuiden georiënteerd en bevat veel glas om zo veel mogelijk zoninstraling binnen te laten. In het conceptrapport wordt geopperd om alle glazen delen uit te voeren als Smart Skin. De zijgevels van de woningen grenzen vrijwel volledig aan elkaar. Het is niet bekend hoeveel ramen zich in de zijgevels van de hoekwoningen bevinden.



Figuur 3.6 Aanzicht voorgevel, op het oosten [14]

Op het dichte dakvlak wil men PV-cellen toepassen om elektriciteit mee op te wekken. Er wordt in het conceptontwerp ook geopperd om kleine windmolens op het dak te plaatsen als aanvullende voorziening om elektriciteit op te wekken.

### 3.2.5 Technische tekeningen

Voor dit rapport is uitgegaan van de technische tekeningen die in Conceptrapport 2.0 zijn opgenomen. Deze zijn weergegeven in bijlage 2.

## 3.3 Warmteoverdracht tussen lucht en water

### 3.3.1 Wining van zonnewarmte

Het principe van het toegepaste concept is dat er bij het koelen van de kasruimte zonnewarmte wordt gewonnen. De warme lucht in de kas wordt gekoeld met water, dat opwarmt en wordt opgeslagen. Bij verwarmen van de kasruimte werkt het omgekeerd, de warmte wordt dan juist van het water overgedragen naar de lucht. Voor de overdracht tussen water en lucht is een warmtewisselaar nodig. Hierbij is de efficiëntie van de warmtewisselaar van groot belang. De Fiwihex en de Smart Skin worden in het conceptontwerp genoemd als mogelijke warmtewisselaars.

### 3.3.2 Fiwihex

De Fiwihex is een warmtewisselaar, waarmee op een effectieve manier warmte van lucht naar water overgedragen kan worden en omgekeerd. Het water stroomt door koperen buisjes, waarop koperdraadjes zijn geweven. De lucht wordt hier door middel van een ventilator langs gezogen, waarbij warmteoverdracht plaats vindt. In hoofdstuk 4 zal de Fiwihex nader besproken worden. Na analyse worden parameters afgeleid voor simulatie.

### 3.3.3 Smart Skin

De glazen Smart Skin bestaat uit drie glasvlakken, met daartussen twee luchtspouwen. In elke spouw lopen leidingen, waar water doorheen stroomt. Op deze manier wordt er warmte overgedragen. De Smart Skin is nog nooit toegepast en is nog in ontwikkeling. In hoofdstuk 5 wordt deze warmtewisselaar beschreven. Na analyse zal blijken dat het op basis van de beschikbare informatie niet mogelijk is om de Smart Skin in de simulatie op te nemen. Wel wordt het concept geëvalueerd.

## **3.4 Belangrijkste aannames en uitgangspunten**

### **3.4.1 Inleiding**

In deze paragraaf worden de belangrijkste aannames en uitgangspunten besproken. Deze zijn een aanvulling op de afbakening en onderzoeksdoelstelling van hoofdstuk 2. In deze paragraaf worden de aannames en uitgangspunten gegeven met betrekking tot het onderzoek in het algemeen, en met betrekking tot kas, woning en bodemopslag. In hoofdstuk 6 worden de aannames en uitgangspunten die specifiek met de modellering samenhangen beschreven.

### **3.4.2 Algemeen**

- Er wordt een model gemaakt waarmee simulaties worden uitgevoerd. Het doel hiervan is de haalbaarheid onderzoeken van het concept Kas als Energiebron. Er worden simulaties uitgevoerd voor de kas met FiwiHex en de woning met vloerverwarming.
- Het ontwerp voor de KlimaatPlusWoningen wordt gebruikt als uitgangspunt. Het onderzoek richt zich echter op kaswoningen met een FiwiHex in het algemeen. Waar nodig wordt het ontwerp gewijzigd of vereenvoudigd.
- In het kasgedeelte van de woning wordt warmte geleverd of onttrokken door de FiwiHex. In het geval van verwarming koelt het water af en wordt opgeslagen in de aquifer. Dit water wordt later weer gebruikt om de kas te koelen. Als de FiwiHex wordt gebruikt om de kas te koelen warmt het water op en wordt opgeslagen. Dit warme water wordt later weer gebruikt om de woning en de kas te verwarmen. Dit is de werking zoals is beschreven in [13].
- In werkelijkheid zal zich een buffer tussen de FiwiHex en de aquifer bevinden. In dit onderzoek wordt model wordt deze buffer ter vereenvoudiging niet meegenomen.

### **3.4.3 Kas**

- De kasruimte zal worden beschouwd als ruimte met een tussenklimaat tussen binnen en buiten.
- Voor de kasconstructie wordt uitgegaan van toepassing van enkel glas. Er wordt aangenomen dat 90% van de oppervlakte van de buitengevels en het dak uit glas bestaat. De overige 10% van het oppervlak bestaat uit frame.
- In de kas zal een temperatuurgradiënt ontstaan. Hiervan wordt gebruik gemaakt door de FiwiHex bovenin de kas te plaatsen.
- De FiwiHex wordt gebruikt om de kas te koelen als de temperatuur te hoog wordt. Het water stroomt dan van de koude naar de warme bron. Wanneer de temperatuur te laag wordt, dan zorgt de FiwiHex voor verwarming. Het water stroomt dan in omgekeerde richting.

### **3.4.4 Woning**

- In de woning kan worden verwarmd door middel van vloerverwarming. Het benodigde water wordt onttrokken aan de warme bron. Het water uit de aquifer wordt indien nodig naverwarmd door middel van een warmtepomp. Ten slotte wordt het water weer teruggevoerd naar de warme bron.

- Er is geen directe verbinding tussen de FiwiHex en de verwarming in de woning. Dit omdat er een faseverschil bestaat tussen het moment van winning van warm water en het moment van vraag naar warm water.

### **3.4.5 Aquifer**

- Warmteopslag vindt plaats door middel van grondopslag in een aquifer. De installatie bestaat uit twee bronnen, het warme water wordt opgeslagen in een warme bron en het koude water in een koude bron. Er zal voor het onderzoek van worden uitgegaan dat deze bronnen beide een constante temperatuur hebben. Deze aanname zal na simulatie worden gecontroleerd.
- Er zullen meerdere woningen worden aangesloten op dezelfde WKO-installatie. Met dit schaal-effect moet rekening worden gehouden. Er wordt uitgegaan van een verhouding van 100 woningen op één aquifer.

## 4 De Fiwihex

### 4.1 Inleiding

De Fiwihex is een warmtewisselaar die is ontwikkeld door Noor en Eur van Andel. Fiwihex staat voor FIne WIRe Heat EXhanger. Het is dus een warmtewisselaar, waarmee op een effectieve manier warmte van lucht naar water overgedragen kan worden en omgekeerd. Zoals de naam al zegt, gebeurt dit doordat er op de watervoerende buisjes dichte matten van vertinde koperdraadjes zijn aangebracht, waar de lucht langs stroomt. Door deze efficiënte manier van warmteoverdracht kan er bij zeer kleine temperatuurverschillen al effectief warmte worden overgedragen, claimt producent Fiwihex. De Fiwihex is uitgevonden als plafondfan voor zeer lage temperatuurverwarming en is rond van vorm. Deze ronde plafondfan is onder meer toegepast in het Kramerslaboratorium van de TU Delft. Speciaal voor het gebruik in tuinbouwkassen maakt het bedrijf Fiwihex sinds enige jaren ook lineaire warmtewisselaars. De optredende luchtsnelheden zijn echter te hoog voor toepassing in woningen, er zijn waarden gemeten tot 6 m/s.



*Figuur 4.1 Fiwihex plafondfan*



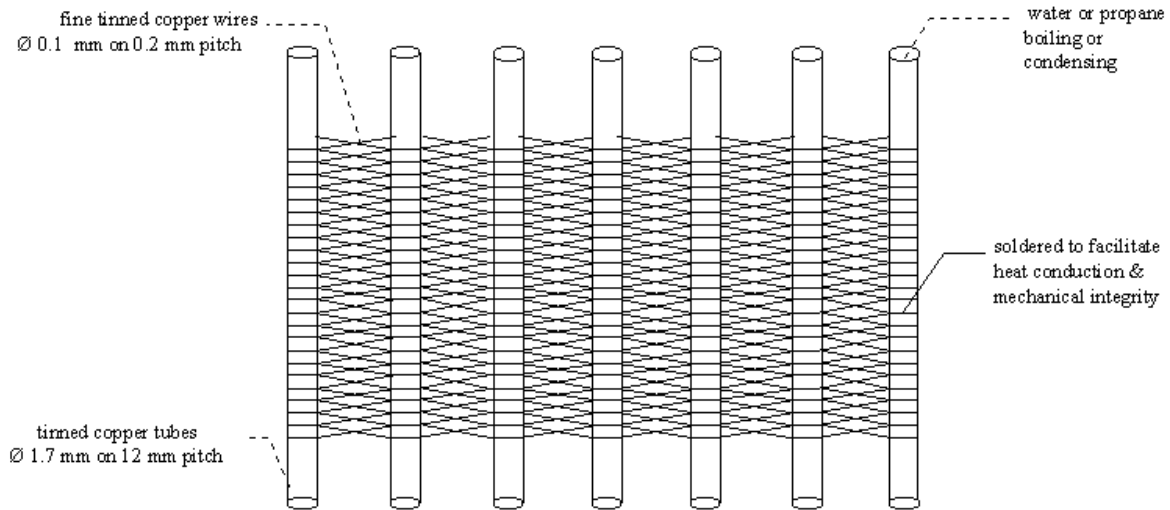
*Figuur 4.2 Plastic schoepenrad dat zorgt voor luchtverplaatsing*

### 4.2 Gegevens Fiwihex

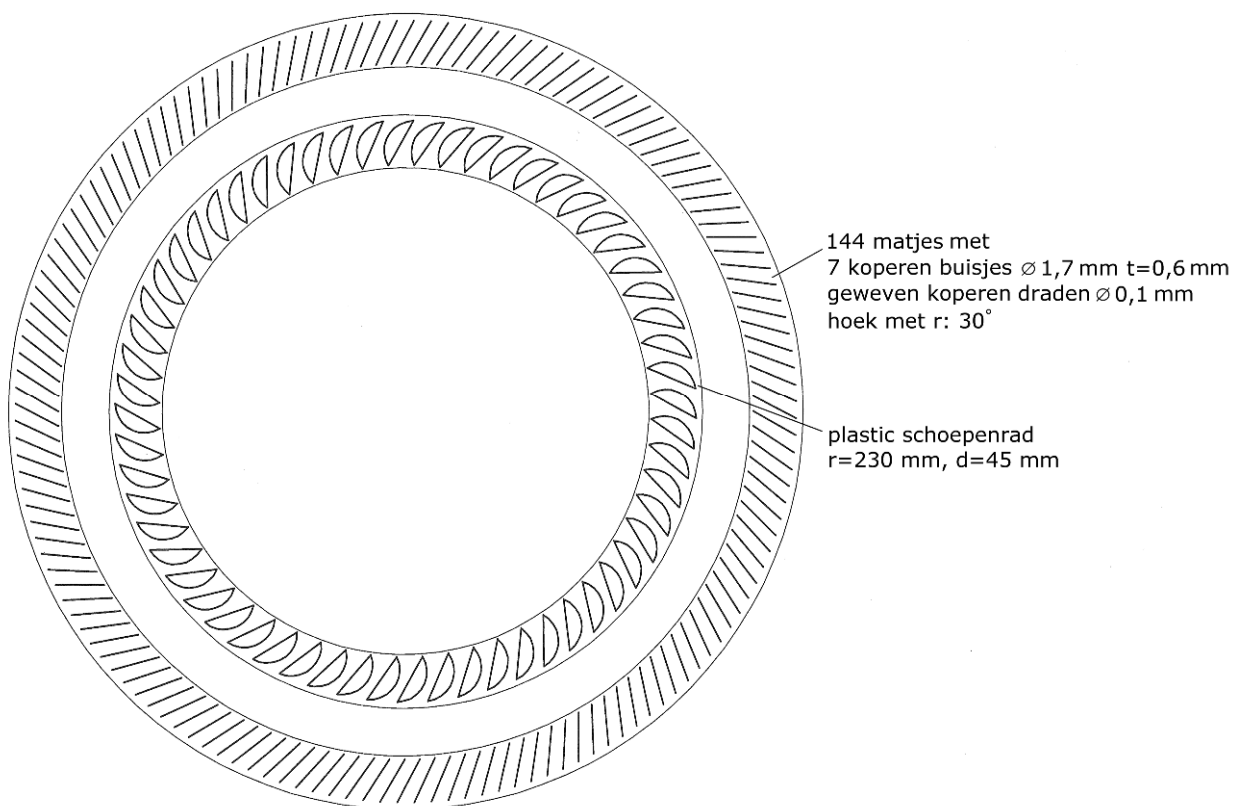
#### 4.2.1 Geometrie

De warmtewisselaar bestaat uit een plastic schoepenrad dat op de as van een elektromotor is gemonteerd. De aldus verkregen centrifugaal ventilator is omgeven door 144 matjes van 7 koperen pijpjes. Deze watervoerende pijpjes hebben een externe diameter van 1,7 mm en een interne diameter van 1,1 mm. Tussen de pijpjes zijn koperdraden met een diameter van 0,1 mm geweven. Dit geheel is aan onder en bovenzijde in twee koperen ringen gesoldeerd, waarbij de matjes ten opzichte van de radius onder een hoek staan. De buitendiameter van de Fiwihex is daarmee 700 mm, de hoogte is 180 mm. De ventilator zuigt lucht aan via de onderzijde en blaast de lucht langs de matten weer naar buiten, waarbij de warmte van de lucht aan de dunne draden wordt overgedragen. Als de warmtewisselaar voor verwarming wordt gebruikt is het omgekeerde het geval. Vervolgens wordt de warmte van de dunne draadjes aan de

watervoerende koperen buisjes overgedragen. Het ingestelde toerental bepaalt de luchtsnelheid. De ventilator heeft verschillende standen, het hoogste aantal toeren is 180.



Figuur 4.3 Vooraanzicht matje van watervoerende buisjes met geweven draadjes [16]



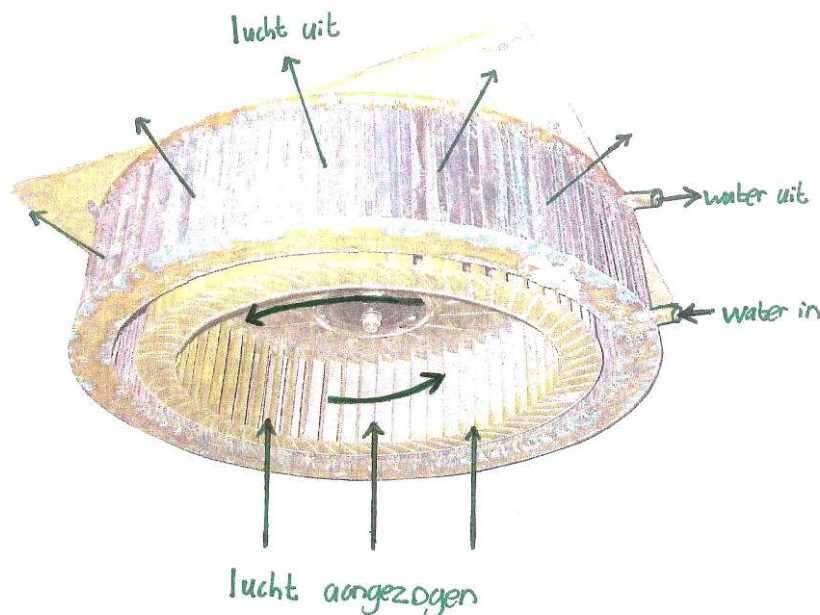
Figuur 4.4 Horizontale doorsnede over de Fiwihex (kijkrichting omlaag)

Figuur 4.5 geeft een zijaanzicht van de matjes met watervoerende buisjes. Het water stroomt verticaal door de buisjes, van beneden naar boven. De lucht wordt

de Fiwihex ingezogen vanaf de onderzijde, door middel van de ventilator. De bovenzijde van de warmtewisselaar is dicht en de lucht stroomt de wisselaar dus weer uit in radiale richting. Dit is weergegeven in figuur 4.6. Daarbij stroomt de lucht dus langs de matjes, in tegengestelde richting dan de kijkrichting in figuur 4.5. Er is bewust voor gekozen om de lucht door middel van aanzuiging de warmtewisselaar in te laten stromen, omdat dit bij de buisjes de minste wervels geeft.



Figuur 4.5 Zijaanzicht van de matjes, de lucht stroomt in tegengestelde richting dan de kijkrichting [16]



Figuur 4.6 Schematisering van de stromen

#### 4.2.2 Debieten water en lucht

Het debiet van lucht is afhankelijk van de stand waarop de plafondfan is ingesteld. Bij het maximale aantal van 180 toeren is de luchtstroom 300 l/s, ofwel 0,3 m<sup>3</sup>/s. De luchtsnelheden die optreden zijn laag en hebben dus weinig invloed op het comfort. Op meer dan één meter afstand van de ronde Fiwihex zijn geen grotere snelheden waarneembaar dan 0,2 m/s. Voor een warmtewisselaar die onder het plafond hangt zijn de optredende luchtsnelheden in de hoogste stand gemeten door Fiwihex. Het verkregen luchtsnelheidprofiel is

weergegeven in bijlage 3. Het debiet van de waterstroom is constant en is 100 ml/s, ofwel  $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.2.3 Benodigd vermogen

Het laten draaien van het schoepenrad kost energie. Het theoretisch benodigde vermogen volgt uit het product van het debiet en de druk bij luchtverplaatsing. Volgens Eur van Andel, directeur van Fiwihex, is de druk bij de hoogste stand ongeveer 25 Pa. Bij maximale luchtsnelheid is het theoretisch benodigde vermogen voor de fan dus ongeveer 7,5 W. In de praktijk is dit hoger, doordat het rendement van de motor en de ventilator moeten worden meegenomen. Uit praktijkmetingen blijkt het benodigde vermogen voor het laten stromen van de lucht  $P_{el;l}$  ongeveer 50 W.

Ook het laten stromen van het water kost energie. De drukval van het water is volgens Van Andel ongeveer 10 kPa. Het theoretische vermogen dat de pomp moet leveren is daarmee ongeveer 1 W. Wanneer het rendement van de pomp en de drukval over de leidingen worden meegenomen blijkt het benodigde vermogen voor het rondpompen van het water  $P_{el;w}$  ongeveer 10 W.

In totaal is het benodigde elektrische vermogen voor de Fiwihex op de hoogste stand  $P_{el;Fiwihex}$  dus ongeveer 60 W.

#### 4.2.4 Warmteoverdracht

Om de warmteoverdracht te bepalen zijn door Fiwihex praktijkmetingen verricht. In bijlage 4 zijn deze meetgegevens voor zowel verwarmen het koelen met de Fiwihex weergegeven. Naast de gemeten totale warmteoverdracht  $q$  zijn ook het benodigde vermogen voor de ventilator en de berekende COP weergegeven. Tevens is de waardeoverdracht over het gemiddelde temperatuurverschil  $q_{av-av}$  bepaald. In bijlage 5 is beknopt weergegeven hoe hieruit  $q$  bepaald kan worden. Wanneer de temperaturen van de instromende lucht en het water bekend zijn is dit temperatuurverschil via iteratie te bepalen.

### 4.3 Classificatie van de Fiwihex

#### 4.3.1 Belang van classificatie

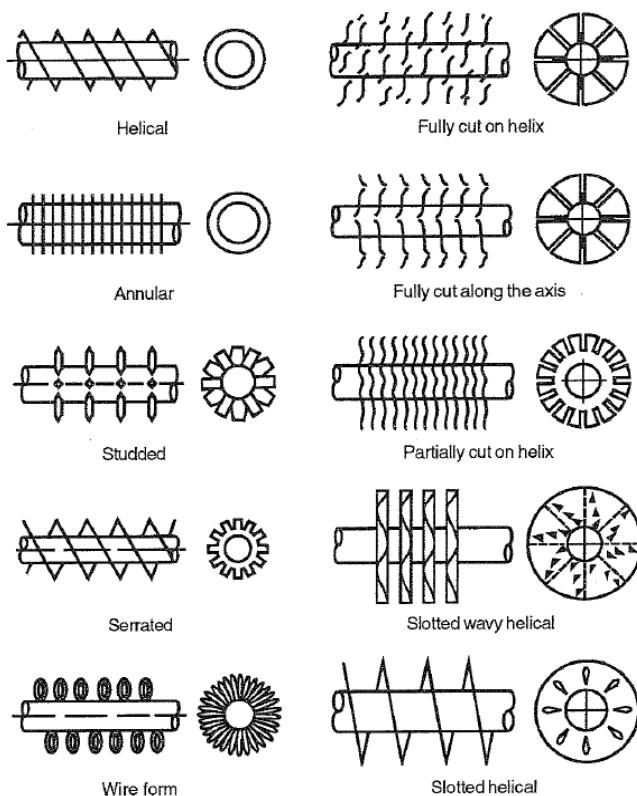
Om het gebruik van de Fiwihex goed te kunnen modeleren en te vergelijken met andere warmtewisselaars is het nodig om de Fiwihex te classificeren. Er zijn verschillende aspecten op grond waarvan classificatie van warmtewisselaars plaats vindt. Voor de Fiwihex zullen deze verschillende aspecten hier beschouwd worden. Er wordt hierbij alleen gekeken naar de meest gangbare warmtewisselaars, met twee verschillende stromen.

#### 4.3.2 Overdrachtsproces

Het eerste aspect dat wordt onderscheiden is het overdrachtsproces. Bij indirect contact blijven de twee verschillende stromen fysiek van elkaar gescheiden. Warmteoverdracht vindt plaats via een scheidingsoppervlak. Bij de Fiwihex is dit het geval. Daarnaast kan er onderscheid worden gemaakt naar de fase van de beiden stromen. De stromen in de Fiwihex zijn lucht en water, het is dus een gas-vloeistof warmtewisselaar.

### 4.3.3 Constructietype

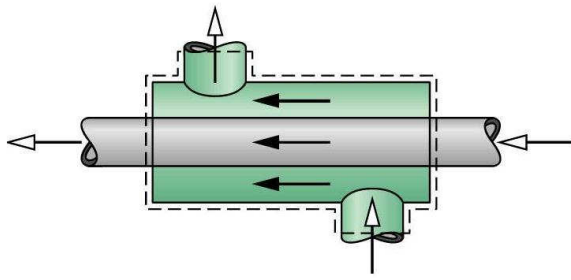
Ten tweede is er een classificatie naar constructietype. De Fiwihex komt het meest overeen met een buiswisselaar. Hierbij gaat de ene stroom (meestal water) door een buis, waar de andere stroom (meestal lucht) langs stroomt. Bij gas-vloeistof warmtewisselaars is het uit oogpunt van compactheid belangrijk dat de maximale warmteoverdracht van beide stoffen ongeveer gelijk is, de kleinste overdracht is namelijk maatgevend. Omdat de overdrachtscoëfficiënt van lucht veel kleiner is probeert men bij deze wisselaars het contactoppervlak tussen de lucht en de buis zo groot mogelijk te maken. Aan de buitenkant van de buis worden zogenaamde vinnen gemaakt. Wanneer dit voor elke aparte buis gebeurt, spreekt men van individueel gevinde buiswisselaars. De matten met vertinde koperdraadjes zien er anders uit, maar hebben dezelfde functie als de vinnen.



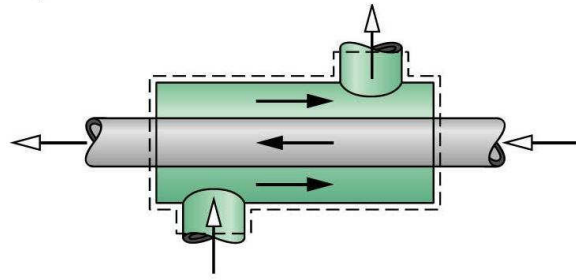
Figuur 4.7 Verschillende typen gevinde buiswisselaars [17]

### 4.3.4 Stroomtype

Het stroomtype is ook een belangrijke eigenschap. De stromen hebben geen aftakkingen onderweg, wat betekent dat er sprake is van een enkele weg. Het stroomtype wordt bepaald door de richting van beide stromen. Bij parallelflow hebben beide stromen dezelfde richting, bij counterflow zijn de stroomrichtingen tegengesteld. De warmteoverdracht is het meest effectief bij counterflow.

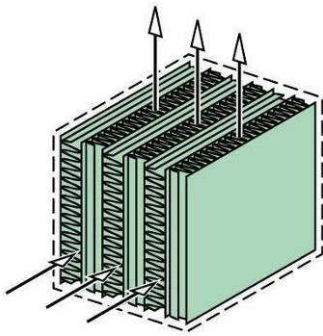


Figuur 4.8 parallelflow [18]

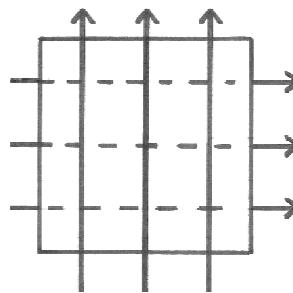


Figuur 4.9 counterflow [18]

Naast parallelflow en counterflow is crossflow een veel voorkomend stroomtype. Bij dit stroomtype staan de stroomrichtingen loodrecht op elkaar. Figuur 4.10 geeft weer hoe de stromen lopen bij crossflow voor een plaatwarmtewisselaar. In figuur 4.11 zijn een aantal stroomlijnen geschematiseerd weergegeven voor de stromen aan beide zijden van een plaat waarover warmte wordt uitgewisseld. De effectiviteit van crossflow ligt tussen counterflow en parallelflow in.

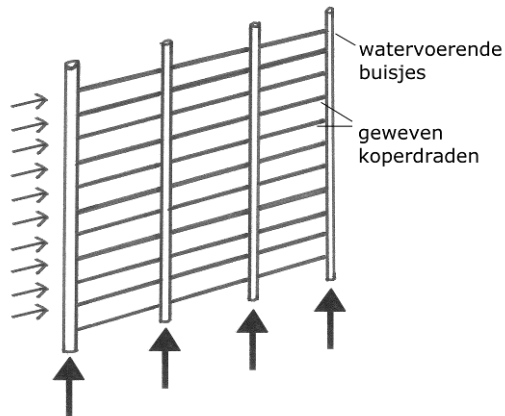


Figuur 4.10 Crossflow [18]

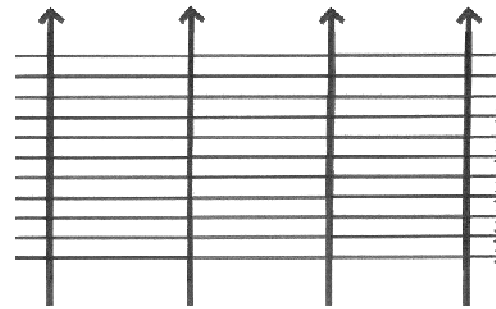


Figuur 4.11 Schematisering crossflow plaatwarmtewisselaar

Bij de FiwiHex stroomt de lucht tussen de matjes door, dus evenwijdig aan de koperdraden. Er vindt warmteoverdracht plaats van de lucht naar de koperdraden. Vervolgens wordt warmte overgedragen tussen de koperdraden en de watervoerende buisjes. De richting waarin de warmte door de koperdraden stroomt en de richting waarin het water stroomt, staan loodrecht op elkaar, zoals in figuur 4.12 is weergegeven. Wanneer de stromen geschematiseerd worden weergegeven is goed te zien dat het schema van de stromen overeenkomt met dat van de plaatwarmtewisselaar (zie figuur 4.13).



Figuur 4.12 Warmtestromen in een deel van een matje van de FiwiHex



Figuur 4.13 Schematisering van de warmteoverdracht bij FiwiHex

Het stroomtype van de FiwiHex valt dus onder crossflow. Hierbij moet wel de kanttekening worden gemaakt dat het mogelijk is dat er een geringe hoeveelheid lucht tussen de geweven koperdraadjes door stroomt. Dit zal naar verwachting nauwelijks gebeuren, maar kan er voor zorgen dat er niet helemaal sprake is van zuivere crossflow.

#### 4.3.5 Menging

Het al dan niet optreden van menging is ook een belangrijk criterium. Er is sprake van ongemengde stroom als de vloeistof (het gas) door individuele kanalen of buizen stroomt zonder te mengen met de vloeistof (het gas) uit aangrenzende kanalen of buizen. Als een stroom ongemengd is ontstaat een temperatuurgradiënt in minstens één richting, de transversale richting. Bij de wervoerende leidingen van de FiwiHex is duidelijk geen sprake van menging. De lucht stroomt langs de koperen draadjes, waarbij warmte wordt uitgewisseld. Er vindt tussen de aangrenzende koperdraden geen warmte-uitwisseling plaats. Hier is dus ook geen sprake van menging. Alleen via de wervoerende leidingen kan enige warmte tussen de draden worden uitgewisseld. Deze uitwisseling zal echter minimaal zijn. De luchtstroom zal dus worden opgevat als ongemengd.

#### 4.3.6 Overdrachtsmechanisme

Tenslotte wordt er ook onderscheid gemaakt naar overdrachtsmechanisme. Wanneer de beide stromen geen faseveranderingen ondergaan is er sprake van een enkele fase convectie. Als faseveranderingen plaats vinden is er sprake van meervoudige fase convectie. Ook is een combinatie tussen stralingsoverdracht en convectie mogelijk. In principe zullen er bij de FiwiHex geen faseveranderingen plaats vinden. De invloed van straling zal gering zijn en zal worden verwaarloosd.

#### Classificatie naar aspect

Overdrachtsproces  
Constructietype  
Stroomtype  
Mengingsvorm  
Overdrachtmechanisme

#### Classificatie FiwiHex

Indirect contact, gas – vloeistof  
Individueel gevinde buiswisselaar  
Enkele weg, crossflow  
Beide stoffen ongemengd  
Enkele fase convectie

Tabel 4.1 Classificatie van de FiwiHex

#### 4.4 Schematisering van de warmteoverdracht in de FiwiHex

Wanneer de inwendige oppervlakte en de in- en uitgaande temperaturen bekend zijn volgt de warmteoverdracht uit de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt  $U$  [ $W/m^2 \cdot K$ ]. Hoe hoger het product van  $U \cdot A$ , hoe meer warmteoverdracht er plaats vindt. Het is dus belangrijk om  $U$  te kennen. Enerzijds kan met deze waarde relatief eenvoudig de totale warmteoverdracht bepaald worden, anderzijds kan de FiwiHex met deze parameter eenvoudig vergeleken worden met andere warmtewisselaars.

Voor de warmteoverdracht is het van belang hoe groot het oppervlak is dat beide stromen scheidt. Over deze oppervlakte wisselen beide stromen warmte uit. Voor de berekeningen is het van belang van welke oppervlakte wordt uitgegaan.

Als referentieoppervlak wordt het inwendige oppervlak van de buisjes genomen. Hiervoor geldt

$$A_i = \pi \cdot D_i \cdot L,$$

waarbij  $D_i$  = inwendige diameter en  $L$  = totale lengte.

In tabel 4.2 is het inwendige oppervlak bepaald.

Gegevens watervoerende pijpjes	
Aantal pijpjes	1008
Lengte pijpjes	180 mm
Totale lengte pijpjes	181,4 m
Inwendig oppervlak $A_i$	0,627 m <sup>2</sup>

Tabel 4.2 Gegevens watervoerende buisjes

Voor de overgedragen warmte geldt volgens [19]:

$$q = UA\Delta T_{lm}, \quad \text{vergelijking 4.1}$$

waarbij

$U$  = totale warmteoverdrachtscoëfficiënt in  $W/m^2 \cdot K$

$A$  = warmteoverdrachtsoppervlak; hetzij koud hetzij warm

$\Delta T_{lm}$  = gemiddeld logaritmisch temperatuurverschil

Als de koude stroom door de warmtewisselaar gaat, stijgt de temperatuur geleidelijk. De temperatuur van de warme stroom daalt geleidelijk. Daarom wordt gerekend met het gemiddelde logaritmisch temperatuurverschil  $\Delta T_{lm}$  tussen de beide stromen.

Voor  $\Delta T_{lm}$  geldt:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{LN(\Delta T_1 / \Delta T_2)}, \quad \text{vergelijking 4.2}$$

met voor crossflow:

$$\Delta T_1 = T_{w,in} - T_{k,uit}$$

$$\Delta T_2 = T_{w,uit} - T_{k,in}$$

Voor de subscripten geldt:

w = warme stroom

k = koude stroom

in = inlaat warmtewisselaar

uit = uitlaat warmtewisselaar

Voor het warmteoverdrachtsoppervlak wordt gerekend met het inwendige oppervlak  $A_i$ , waarvoor is bepaald dat  $A_i = 0,627 \text{ m}^2$ .

Nu moet  $U$  worden afgeleid uit de bekende meetgegevens van de FiwiHex in bedrijfstoestand. De waarde voor de warmteoverdracht  $q$  is bij verschillende ingaande water- en luchttemperaturen bekend, zie bijlage 4. Voor 180 toeren is geen meting verricht, maar aan de hand van extrapolatie is een redelijk betrouwbare schatting te maken van de waarden bij dit toerental. Het probleem is echter dat voor het bepalen van  $U$  via vergelijking 4.2 ook de uitgaande temperaturen bekend moeten zijn. Dat is niet het geval.  $U$  kan echter toch worden bepaald, via de zogenaamde effectiviteit-NTU methode.

De effectiviteit  $\varepsilon$  geeft een maat voor de efficiëntie van een warmtewisselaar. De effectiviteit is gedefinieerd als het gedeelte van de theoretisch mogelijke warmteoverdracht dat daadwerkelijk wordt overgedragen. Voor  $\varepsilon$  geldt:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (0 < \varepsilon < 1)$$

Hierbij is  $q_{max}$  de maximale warmteoverdracht die in theorie kan optreden, dit is het theoretische geval van crossflow met oneindige lengte. Voor  $q_{max}$  geldt [19]:

$$q_{max} = C_{min}(T_{w,in} - T_{k,in}),$$

waarin

$C_{min}$  = laagste waarde van  $C_w$  en  $C_k$ .

Analoog hieraan geldt:

$C_{max}$  = hoogste waarde van  $C_w$  en  $C_k$ .

Hierbij geldt:

$C_w$  = warmte-inhoud warme stroom =  $Q_w \rho_w c_w = \dot{m}_w c_w$

$C_k$  = warmte-inhoud koude stroom =  $Q_k \rho_k c_k = \dot{m}_k c_k$

In tabel 4.3 zijn de benodigde gegevens voor het bepalen van  $C_{\min}$  en  $C_{\max}$  weergegeven. Voor de FiwiHex blijkt warmte-inhoud van de luchtstroom het laagst.  $C_{\min}$  is daarmee 360 W/K en  $C_{\max}$  420 W/K.

Grootheid	Water	Lucht
Debiet $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,3
Dichtheid $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1000	1,2
Soortelijke warmte (W/K)	4200	1000
Warmte-inhoud massastroom per s (W/K)	420 ( $C_{\max}$ )	360 ( $C_{\min}$ )

Tabel 4.3 Bepaling van  $C_{\min}$ , waarden volgens [20]

Aan de hand van de effectiviteit is  $q$  dus te bepalen als men  $U$  en  $A$  niet kent:

$$q = \varepsilon \cdot C_{\min}(T_{w,in} - T_{k,in}) \quad \text{vergelijking 4.3}$$

Omdat de ingaande temperaturen en de warmteoverdracht bekend zijn, kan de formule ook andersom gebruikt worden. De waarde van  $\varepsilon$  kan dus uit de praktijkmetingen bepaald worden.

Voor diverse warmtewisselaars zijn ook vergelijkingen opgesteld om  $\varepsilon$  te bepalen. Deze vergelijkingen zijn van de volgende vorm:

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right),$$

waarbij  $\frac{C_{\min}}{C_{\max}}$  ook wel wordt geschreven als  $C_r$ .

Hierbij is NTU het "Number of Transfer Units", een dimensieloos getal waarvoor geldt:

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad \text{vergelijking 4.4}$$

Voor crossflow wisselaars (enkele weg) waarbij beide stromen ongemengd zijn, is in [21] de volgende formule opgesteld:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C_r}\right)(NTU)^{0,22} \left\{\exp[-C_r(NTU)^{0,78}] - 1\right\}\right] \quad \text{vergelijking 4.5}$$

Omdat  $\varepsilon$  kan worden bepaald uit vergelijking 4.3, kan  $U$  worden bepaald door NTU in vergelijking 4.5 te vervangen door vergelijking 4.4. Deze vergelijking is iteratief op te lossen. Dit is gebeurd aan de hand van interpolatie van de uitgevoerde metingen voor het maximale toerental, zie bijlage 6.

In tabel 4.4 zijn de bepaalde waarden van  $\varepsilon$  en  $U$  weergegeven. De waarden zijn bepaald voor twee situaties. In het eerste geval werd de FiwiHex gebruikt om een ruimte te verwarmen, in het tweede geval is de FiwiHex gebruikt om te koelen. Het blijkt dat de gevonden waarden voor  $U$  verschillen.

In het geval van koeling (zomersituatie) wordt een  $U$  van  $272 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  gevonden, wanneer de Fiwihex wordt gebruikt om te verwarmen (wintersituatie) is de warmteoverdrachtscoëfficiënt  $249 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Dit levert voor  $U \cdot A$  de waarden  $157,7 \text{ W/K}$  respectievelijk  $171,4 \text{ W/K}$  voor verwarmen en koelen.

Grootheid	Verwarming	Koeling
Totale warmteoverdracht $q$ uit metingen Fiwihex (W)	2140	1360
Temperatuur ingaand water ( $^{\circ}\text{C}$ )	41,0	13,0
Temperatuur ingaande lucht ( $^{\circ}\text{C}$ )	21,0	25,0
Bepaalde effectiviteit $\varepsilon$	0,297	0,315
Bepaalde warmteoverdrachtscoëfficiënt $U$ ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	251,1	273,4
Bepaalde waarde voor $U \cdot A$ (W/K)	156,9	171,4

Tabel 4.4 Bepaling van de waarde van  $UA$

### Kalibratie

Aan de hand van vergelijking 4.3 kan  $q$  voor alle gevallen worden bepaald. Helaas zijn er voor beide situaties slechts gegevens bekend van één meetsituatie, waarmee  $U$  is bepaald. Het is dus lastig om het model te kalibreren. Wel gebruikt men bij Fiwihex een iteratiemethode waarmee  $q$  voor elke situatie bij benadering te bepalen is. In Bijlage 5 is deze methode kort toegelicht. De resultaten van beide methoden zijn in de onderstaande tabel weergegeven. Het blijkt dat de verschillen zeer gering zijn en ruim beneden de 1% blijven.

$T_{w,in}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{k,in}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Berekende $q$ via vergelijking 5 (W)	Bepaalde $q$ via iteratiemethode Fiwihex (W)
Verwarming d.m.v. water			
41	21	2140 (=gemeten waarde)	2145
40	20	2140	2145
40	15	2675	2682
30	20	1070	1073
30	15	1605	1609
25	20	535	536
25	15	1070	1073
Koeling d.m.v. water			
25	13	1360 (=gemeten waarde)	1355
25	10	1700	1694
20	10	1133	1129
25	15	1133	1129
20	15	567	565
25	20	567	565

Tabel 4.5 Vergelijking van de  $\varepsilon$ -NTU methode en de iteratiemethode van Fiwihex bij  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  luchtstroom

De waarde van  $U \cdot A$  is dus door middel van vergelijking 4.3 en 4.5 afgeleid uit de meetresultaten van Fiwihex. Wanneer  $q$  bekend is kan men door gebruik te maken van de massastroom en de soortelijke warmte voor beide stromen bepalen wat de uitstroomtemperatuur is.

Dit kan met de volgende formules:

$$\Delta T_w = \frac{q}{\dot{m}_w \cdot c_w} \text{ voor de warme stroom en}$$

$$\Delta T_k = \frac{q}{\dot{m}_k \cdot c_k} \text{ voor de koude stroom.} \quad \text{vergelijking 4.6}$$

Als deze temperaturen bekend zijn kan men via vergelijking 4.1 terugrekenen naar  $U \cdot A$ . Wanneer men dit doet voor de gemeten situatie dan blijken de gevonden waarden voor  $U \cdot A$  lager te zijn dan eerder werd bepaald. De verschillen zijn weergegeven in tabel 4.6.

Grootheid	Verwarming	Koeling	Afwijking (%)
$U \cdot A$ (W/K) bepaald uit metingen	157	171	5,7
$U \cdot A$ (W/K) na terugrekenen met vergelijking 1	148	161	5,8

Tabel 4.6  $U \cdot A$  bepaald uit metingen en bepaald door terugrekenen

Het gevonden verschil is te verklaren vanuit het feit dat het stroomtype is geschematiseerd als crossflow. Dit is echter slechts een model, zoals eerder werd gesteld is er geen sprake van helemaal zuivere crossflow. In beide gevallen bedraagt het verschil ongeveer 6 %. Dit verschil is aanvaardbaar. Voor het bepalen van  $q$  zal verder uitgegaan worden van vergelijking 4.3. Daarom zal verder voor  $U \cdot A$  uitgegaan worden van de waarden die volgen uit de metingen.

Overigens moet wel worden opgemerkt dat weinig bekend is over de gevolgen van vervuiling van de binnenzijde van de buisjes en van de koperen draden en van de snelheid waarmee dit gebeurt. Ook over de gevolgen van condensvorming op de koperen draden van de Fiwihex (lagere warmteoverdrachtscoëfficiënt, faseverandering) is weinig bekend. In deze gevallen is de warmteoverdracht minder goed, waardoor de prestaties van de Fiwihex minder zullen zijn.

## 4.5 Vergelijking met andere warmtewisselaars

### 4.5.1 Inleiding

Het bedrijf Fiwihex BV beweert dat de Fiwihex een bijzonder efficiënte warmtewisselaar is. Om een indruk te geven van de prestaties van de Fiwihex is het nuttig om een vergelijking te maken met andere warmtewisselaars. De Fiwihex is een ventilatorconvector, een warmtewisselaar die lucht aanzuigt en de lucht vervolgens langs metalen watervoerende buizen voert. Wanneer het water koud is zorgt de ventilatorconvector voor koeling van de ruimte, wanneer het warm is zorgt ze voor verwarming.

In deze paragraaf wordt de Fiwihex vergeleken met twee andere ventilatorconvectors. Deze hebben vergelijkbare luchtdebieten en ook de optredende waterstromen zijn ongeveer gelijk. Er bestaan verschillende beoordelingscriteria, die onderlinge vergelijking van warmtewisselaars beter mogelijk maken. De belangrijkste criteria zullen worden omschreven en de ventilatorconvectors zullen aan de hand hiervan kwantitatief worden vergeleken.

Er wordt hierbij gekeken naar de eerder beschreven kenmerken  $U \cdot A$  en de effectiviteit. Ook worden de prestatie naar buitenvolume, het temperatuurrendement en de benodigde fossiele brandstoffen vergeleken. Het doel hiervan is een indruk te geven van de prestaties van de Fiwihex ten opzichte van andere warmtewisselaars.

#### 4.5.2 De beschouwde ventilatorconvectors

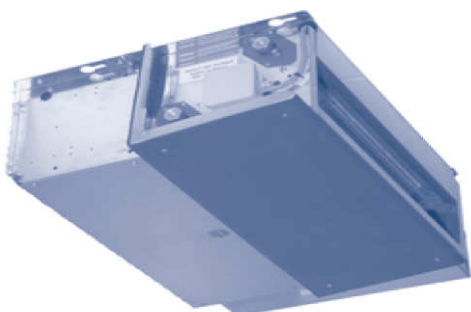
De Fiwihex wordt vergeleken met de Venkon Ventilator Convector [22] en de Jaga Mini Luchtverhitter [23]. De Venkon wordt geproduceerd door Kampmann en is geschikt voor het verwarmen en koelen van woningen. De Jaga Mini Luchtverhitter is van fabrikant Jaga. Deze luchtverhitter is onder meer te gebruiken in serres en is alleen geschikt om te verwarmen. Bijlage 7 en 8 geven de technische gegevens van de Venkon en de Jaga Luchtverhitter.

Hoewel de waterstroom en het luchtdebiet van beide ventilatorconvectors dezelfde orde van grootte hebben als bij de Fiwihex, zijn de beschikbare metingen uitgevoerd bij andere debieten. Voor de Fiwihex is het vermogen bij deze debieten te bepalen door middel van de afgeleide formules. Aan de hand hiervan is de Fiwihex goed te vergelijken met de beide andere ventilatorconvectors. Vanwege de iets andere debieten wijken  $U \cdot A$  en  $\varepsilon$  van de Fiwihex iets af van de in de vorige paragrafen berekende waarden.

Tabel 4.7 geeft de bij de metingen gebruikte debieten. Het luchtdebiet van de Fiwihex is  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  en het debiet van het water is  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Bij de Venkon is voor koeling gemeten bij een iets lager waterdebiet dan bij verwarming.

Type ventilatorconvector	$q_{\text{verw}}$ (kW)	$q_{\text{koel}}$ (kW)	$Q_{\text{lucht}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$Q_{\text{water}}$ ( $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ )
Venkon Ventilator Convector, bouwgrootte 5	12,3	4,2	0,27	3,0 / 2,7
Jaga Mini Luchtverhitter 230 Mono	3,9	nvt	0,26	1,2

Tabel 4.7 Warmteoverdracht en luchtdebiet voor de beschouwde ventilatorconvectors



Figuur 4.14 Venkon Ventilator Convector [22]    Figuur 4.15 Jaga Mini Luchtverhitter [23]

#### 4.5.3 Vergelijking van UA

De warmteoverdrachtscoëfficiënt  $U$  geeft aan hoeveel warmte er door middel van een warmtewisselaar wordt overgedragen.  $U$  kan worden bepaald uit de overdrachtsweerstand ten gevolge van convectie aan beide zijden, de geleiding door de wand, de contactweerstand aan beide zijden en de mate van

vervuiling. Wanneer  $U$  wordt bepaald vanuit  $q$  dan moet men het gekozen referentieoppervlak  $A_i$  van de warmtewisselaars weten. De keuze hiervan heeft dus direct invloed op de berekende waarde van  $U$ . Om de warmtewisselaars te vergelijken is  $U$  dus geen goede parameter, in plaats daarvan is de waarde van  $U \cdot A$  hiervoor wel geschikt.

Via de gegeven waarde voor  $q$  en de bekende in- en uitgaanstemperaturen van de Venkon en de Jaga is  $U \cdot A$  te bepalen volgens vergelijking 4.1. Voor de Fiwihex kan  $q$  worden bepaald door vergelijking 4.3, 4.4 en 4.5 te combineren. Aan de hand hiervan kan ook  $U \cdot A$  voor de Fiwihex worden bepaald. Deze is iets anders dan de eerder bepaalde waarde, dit komt zoals gezegd door de iets andere debieten. Het verschil met de bepaalde waarden blijkt echter klein. De berekende waarden voor  $U \cdot A$  zijn weergegeven in tabel 4.8 en 4.9.

Type ventilatorconvector	Verwarming	Koeling
	$T_{\text{lucht};\text{in}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};\text{in}} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{lucht};\text{in}} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};\text{in}} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$
	$U \cdot A \text{ (W/m}^2\text{k)}$	$U \cdot A \text{ (W/m}^2\text{k)}$
Fiwihex	149,4	160,9
Venkon Ventilator Convector, bouwgrootte 5	428,7	407,8

Tabel 4.8 Bepaalde waarden voor  $U \cdot A$  ( $Q_{\text{lucht}} = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\text{water}} = 3,0 \cdot 10^{-4} / 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

Type ventilatorconvector	Verwarming	Koeling
	$T_{\text{lucht};\text{in}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};\text{in}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	n.v.t.
	$U \cdot A \text{ (W/m}^2\text{k)}$	
Fiwihex	156,7	
Jaga Mini Luchtverhitter 230 Mono	154,7	

Tabel 4.9 Bepaalde waarden voor  $U \cdot A$  ( $Q_{\text{lucht}} = 0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\text{water}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

Het blijkt dat  $U \cdot A$  voor de Venkon veel hoger is dan bij de Fiwihex. De vermogens die de Venkon kan leveren zijn dan ook veel groter. De fabrikant van de Venkon geeft aan dat de ventilatorconvector werkt volgens het principe van counterflow, wat efficiënter is dan crossflow. De verschillen hierdoor blijken erg groot. Het verschil in  $U \cdot A$  met de Jaga luchtverhitter is gering, de waarde voor de Fiwihex is iets hoger. De Jaga werkt net als de Fiwihex volgens het principe van crossflow. De bepaalde waarden gelden alleen voor de aangegeven debieten van water en lucht.

#### 4.5.4 Effectiviteit

Het volgende aspect dat wordt bekeken is de effectiviteit  $\epsilon$ , die eerder al voor de Fiwihex werd bepaald. De effectiviteit geeft een maat voor de thermische prestatie van een warmtewisselaar. Het is het quotiënt van de werkelijke warmteoverdracht en de theoretisch maximale overdracht. Hierbij wordt de werkelijke overdracht bepaald door de warmte-inhoud van één van de twee stromen en het bijbehorende temperatuurverschil. De theoretisch maximale overdracht wordt verkregen uit het temperatuurverschil van instroom en de

minimale warmte-inhoud van de twee stromen, deze is maatgevend voor de overdracht. In formulevorm [17]:

$$\varepsilon = \frac{q}{C_{\min} \cdot (T_{w;in} - T_{k;in})}$$

$$= \frac{C_w \cdot (T_{w;in} - T_{w;uit})}{C_{\min} \cdot (T_{w;in} - T_{k;in})} = \frac{C_k \cdot (T_{k;uit} - T_{k;in})}{C_{\min} \cdot (T_{w;in} - T_{k;in})} \quad \text{vergelijking 4.7}$$

In tabel 4.10 en 4.11 is  $\varepsilon$  weergegeven voor de verschillende ventilatorconvectors. De waarde voor de Fiwihex blijkt duidelijk hoger dan eerder bepaald. Dit komt door de grotere waterstroom.

Type ventilatorconvector	Verwarming $T_{\text{lucht};in} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};in} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$	Koeling $T_{\text{lucht};in} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};in} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$
	$\varepsilon_{\text{verwarming}}$	$\varepsilon_{\text{koeling}}$
Fiwihex	0,36	0,39
Venkon Ventilator Convector, bouwgrootte 5	0,70	0,68

Tabel 4.10 Bepaalde waarden voor  $\varepsilon$  ( $Q_{\text{lucht}} = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\text{water}} = 3,0 \cdot 10^{-4} / 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

Type ventilatorconvector	Verwarming $T_{\text{lucht};in} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};in} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	Koeling n.v.t.
	$\varepsilon_{\text{verwarming}}$	
Fiwihex	0,37	
Jaga Mini Luchtverhitter 230 Mono	0,32	

Tabel 4.11 Bepaalde waarden voor  $\varepsilon$  ( $Q_{\text{lucht}} = 0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\text{water}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

Het blijkt dat de Fiwihex bij verwarmen vergelijkbaar is met de luchtverhitter van Jaga, maar zowel bij verwarmen als koelen slechter dan de Venkon. De Venkon is in de beschouwde situatie dus veel effectiever. Dit is te verklaren vanuit de hogere waarde van  $U \cdot A$ . Ook de bepaalde effectiviteit verandert als het debiet anders wordt.

#### 4.5.5 Prestatie naar volume

Zowel de Prestatie Pr als de compactheid Co geven een maat voor de prestatie van de warmtewisselaars naar volume. Beiden worden kort besproken in de paragraaf.

##### Prestatie

Vervolgens is de prestatie Pr, de verhouding tussen  $U \cdot A$  en het volume van de warmtewisselaar van belang. De prestatie is een vaste constante voor een bepaalde warmtewisselaar en geeft een maat voor het behaalde vermogen in relatie tot het volume van de warmtewisselaar.

Pr wordt bepaald door de volgende formule:

$$Pr = \frac{U \cdot A}{V}$$

vergelijking 4.8

Uit tabel 4.12 en 4.13 blijkt dat Pr voor de Fiwihex duidelijk slechter is dan voor de Venkon, zowel bij verwarming en koeling. De Fiwihex is wel kleiner met een uitwendig volume van 0,069 m<sup>3</sup> ten opzichte van 0,141 m<sup>3</sup>. Het vermogen van de Venkon is echter veel hoger. Wanneer men echter kijkt naar de Jaga Luchtverhitter, met een uitwendig volume van 0,115 m<sup>3</sup> blijkt de prestatie van de Fiwihex duidelijk beter.

Type ventilatorconvector	Verwarming T <sub>lucht;in</sub> = 20 °C T <sub>water;in</sub> = 75 °C	Koeling T <sub>lucht;in</sub> = 27 °C T <sub>water;in</sub> = 7 °C
	Pr (W/m <sup>3</sup> K)	Pr (W/m <sup>3</sup> K)
Fiwihex	2157	2322
Venkon Ventilator Convector, bouwgroote 5	2784	2648

Tabel 4.12 Bepaalde Pr (Q<sub>lucht</sub> = 0,27 m<sup>3</sup>/s; Q<sub>water</sub> = 3,0 · 10<sup>-4</sup> / 2,7 · 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s)

Type ventilatorconvector	Verwarming T <sub>lucht;in</sub> = 15 °C T <sub>water;in</sub> = 55	Koeling n.v.t.
	Pr (W/m <sup>3</sup> K)	
Fiwihex	2262	
Jaga Mini Luchtverhitter 230 Mono	1864	

Tabel 4.13 Bepaalde Pr (Q<sub>lucht</sub> = 0,26 m<sup>3</sup>/s; Q<sub>water</sub> = 1,2 · 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s)

### Compactheid

De compactheid Co is andere maat voor de prestatie in verhouding tot het volume. Co wordt echter bepaald aan de hand van de grootte van het warmtewisselend oppervlak. De compactheid is gedefinieerd als het quotiënt van het warmtewisselend oppervlak A en het volume van de warmtewisselaar. Co hangt dus af van het gekozen referentieoppervlak, maar geeft toch goede indicatie voor de compactheid. Een hoge waarde voor Co is positief, er is dan veel warmtewisselend oppervlak, terwijl de benodigde ruimte voor de warmtewisselaar relatief klein is.

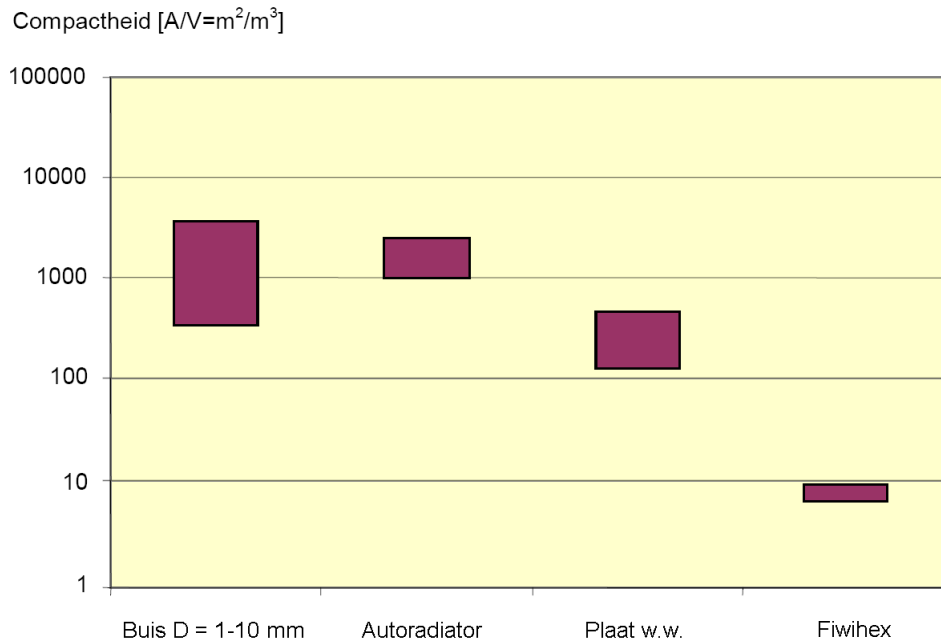
Co wordt bepaald door de volgende formule:

$$Co = \frac{A}{V}$$

vergelijking 4.10

Van zowel de Venkon als de Jaga is het warmtewisselend oppervlak niet bekend. Om een idee te geven van de compactheid van de Fiwihex ten opzichte van verschillende andere soorten warmtewisselaars is in figuur 4.16 een overzicht gegeven van de compactheid van een buiswisselaar, autoradiator, plaatwisselaar en Fiwihex. De vergeleken warmtewisselaars zijn allemaal wisselaars waarbij warmte wordt uitgewisseld tussen water en lucht. Hoewel de vergeleken

wisselaars allemaal totaal anders zijn, blijkt de compactheid van de Fiwihex relatief gezien erg laag.



Figuur 4.16 Compactheid van verschillende warmtewisselaars, gegevens [24]

#### 4.5.6 Temperatuurrendement

Een ander aspect waar bij warmtewisselaars vaak naar wordt gekeken is het temperatuurrendement. Dit is het quotiënt van het temperatuurverschil tussen de ingaande en uitgaande lucht en het verschil in instroomtemperatuur van de lucht en het water. Het rendement geeft dus de verhouding tussen de opwarming van de lucht en het benodigde temperatuurverschil weer.

Het temperatuurrendement  $\eta_{temp}$  wordt gegeven door [19]:

$$\eta_{temp} = \frac{T_{l;uit} - T_{l;in}}{T_{w;in} - T_{l;in}} \text{ voor verwarming}$$

$$\eta_{temp} = \frac{T_{l;in} - T_{l;uit}}{T_{l;in} - T_{w;in}} \text{ voor koeling} \qquad \text{vergelijking 4.11}$$

In tabel 4.14 en 4.15 zijn de resultaten voor de verschillende warmtewisselaars weergegeven.

Type ventilatorconvector	Verwarming	Koeling
	$T_{lucht;in} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{water;in} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{lucht;in} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{water;in} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$
	$\eta_{temp;verw}$	$\eta_{temp;koel}$
Fiwihex	0,35	0,39
Venkon Ventilator Convector, bouwgrootte 5	0,69	0,67

Tabel 4.14 Bepaalde waarden voor  $\eta_{temp}$  ( $Q_{lucht} = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{water} = 3,0 \cdot 10^{-4} / 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

Type ventilatorconvector	Verwarming $T_{\text{lucht};\text{in}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};\text{in}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	Koeling n.v.t.
	$\eta_{\text{temp};\text{koel}}$	
Fiwihex	0,34	
Jaga Mini Luchtverhitter 230 Mono	0,33	

Tabel 4.15 Bepaalde waarden voor  $\eta_{\text{temp}}$  ( $Q_{\text{lucht}} = 0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\text{water}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

Het temperatuurrendement blijkt duidelijk nauw verband te houden met de effectiviteit. De Fiwihex is bij verwarmen weer vergelijkbaar met de luchtverhitter van Jaga, zowel bij verwarmen als koelen blijkt de Fiwihex opnieuw slechter dan de Venkon.

#### 4.5.7 PER

Ten slotte is de Primary Energy Ratio (PER) een belangrijk instrument, waarmee gekeken wordt hoe veel fossiele brandstoffen er verstoekt moeten worden om het benodigde vermogen te leveren. Voor de PER geldt:

$$PER = \frac{q}{P_{\text{fossiel}} \cdot \eta_{\text{centrale}}} \quad \text{vergelijking 4.12}$$

Met betrekking tot  $P_{\text{fossiel}}$  moet rekening worden gehouden met het rendement van opwekking van elektriciteit in de elektriciteitscentrale. Dit rendement is in Nederland gemiddeld 0,39 [25].

Daarnaast moet bij het bepalen van de PER ook het elektriciteitsverbruik om het benodigde aanvoerwater op de juiste temperatuur te brengen in rekening worden gebracht. Hierbij moet rekening gehouden met het rendement van de centrale, maar ook met de COP van de gebruikte warmtepomp. Bij de vergelijking tussen de Fiwihex en de beide andere warmtewisselaars is dit echter niet van toepassing omdat de aanvoertemperaturen van het water gelijk is.

In tabel 4.16 is voor de verschillende ventilatorconvectors weergegeven hoe groot de PER is. Hierbij moet worden opgemerkt dat de hoeveelheid hulpenergie die de Fiwihex nodig heeft bij de gebruikte debieten niet bekend is. Voor deze hoeveelheid energie voor de Fiwihex is een schatting gedaan.

Type ventilatorconvector	Verwarming $T_{\text{lucht};\text{in}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};\text{in}} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$	Koeling $T_{\text{lucht};\text{in}} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};\text{in}} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$
	$\eta_{\text{temp};\text{verw}}$	$\eta_{\text{temp};\text{koel}}$
Fiwihex	30,9	11,7
Venkon Ventilator Convector, bouwgrootte 5	34,5	11,8

Tabel 4.16 Bepaalde PER ( $Q_{\text{lucht}} = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\text{water}} = 3,0 \cdot 10^{-4} / 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

Type ventilatorconvector	Verwarming $T_{\text{lucht};\text{in}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{water};\text{in}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	Koeling n.v.t.
	$\eta_{\text{temp};\text{koel}}$	
Fiwihex	29,4	
Jaga Mini Luchtverhitter 230 Mono	15,6	

Tabel 4.17 Bepaalde PER ( $Q_{\text{lucht}} = 0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\text{water}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

De hoeveelheid fossiele brandstoffen die de Fiwihex gebruikt is relatief laag. De PER van de Venkon is hoger, maar het verschil is kleiner dan met op grond van het verschil in geleverd vermogen zou verwachten. Het verschil tussen verwarmen en koelen is voor de Fiwihex en de Venkon beiden zeer groot, dit komt omdat de koelvermogens in beide gevallen lager zijn dan de verwarmingsvermogens. Wanneer de Jaga Luchtverhitter wordt vergeleken met de Fiwihex doet de Fiwihex het duidelijk beter.

Overigens moet nogmaals worden opgemerkt dat de berekende PER voor de verschillende warmtewisselaars bij andere debieten anders zal zijn. Ook hebben de temperaturen van de ingaande stromen grote invloed op de waarde van de PER. De in deze paragraaf bepaalde waarden gelden dus alleen voor de aangegeven situaties. De berekende waarden zijn alleen bedoeld om de eigenschappen van de warmtewisselaars te vergelijken. In hoofdstuk 6 wordt op de PER terug gekomen.

## 4.6 Conclusies

De Fiwihex is te classificeren als een individueel gevinde buiswarmtewisselaar met als stroomtype crossflow (enkele weg). Beide stoffen zijn ongemengd en er is sprake van eerste fase convectie. Het vermogen dat de Fiwihex levert is te berekenen met de volgende formule

$$q = \varepsilon \cdot C_{\min}(T_{w,\text{in}} - T_{k,\text{in}}),$$

waarbij geldt dat

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0,297 \text{ voor verwarming} \\ &= 0,315 \text{ voor koeling} \\ C_{\min} &= 360 \text{ W/K} \end{aligned}$$

De temperaturen van de uitgaande stromen zijn te bepalen via

$$\begin{aligned} \Delta T_w &= \frac{q}{\dot{m}_w \cdot c_w} \text{ voor de warme stroom en} \\ \Delta T_k &= \frac{q}{\dot{m}_k \cdot c_k} \text{ voor de koude stroom.} \end{aligned}$$

Er is weinig bekend over de gevolgen van vervuiling en van de snelheid waarmee dit gebeurt. Ook over condensvorming op de koperen draden is weinig bekend. In deze gevallen is de warmteoverdracht minder goed, waardoor de prestaties van de Fiwihex minder zullen zijn. Wanneer het lastig is om bij de Fiwihex te

komen kan het verwijderen van vervuiling praktische problemen met zich mee brengen.

De Fiwihex is vergeleken met twee andere warmtewisselaars. De Venkon blijkt efficiënter en de geleverde vermogens zijn veel groter. Dit komt doordat het stroomtype van de Venkon te schematiseren is als counterflow, wat efficiënter is dan crossflow. De verschillen tussen de Jaga luchtverhitter en de Fiwihex blijken gering, de Fiwihex blijkt iets beter.

Ook de prestaties ten opzichte van het uitwendige volume van Venkon zijn beter. Vergeleken met de Jaga luchtverhitter is de prestatie van de Fiwihex wel duidelijk beter.

Uit de vergelijking met de andere warmtewisselaars blijkt dat de Fiwihex een redelijk gunstige verhouding heeft tussen de hoeveelheid geleverde hulpenergie en het geleverde vermogen. De PER van de Venkon is hoger, maar het verschil valt relatief mee. Wanneer de Jaga Luchtverhitter wordt vergeleken met de Fiwihex doet de Fiwihex het duidelijk beter.

De Fiwihex blijkt dus ongeveer even efficiënt als de ene warmtewisselaar, maar veel minder efficiënt dan de andere. Omdat de Fiwihex een warmtewisselaar is die werkt volgens het principe van crossflow is de efficiëntie beperkt. Vergeleken met andere warmtewisselaars is de Fiwihex dus niet efficiënter. Het geringe geluidsniveau, kostenoverwegingen en comfort kunnen redenen om toch te kiezen voor de Fiwihex. Deze aspecten worden in dit rapport niet nader onderzocht.

## 5 De Smart Skin

### 5.1 Inleiding

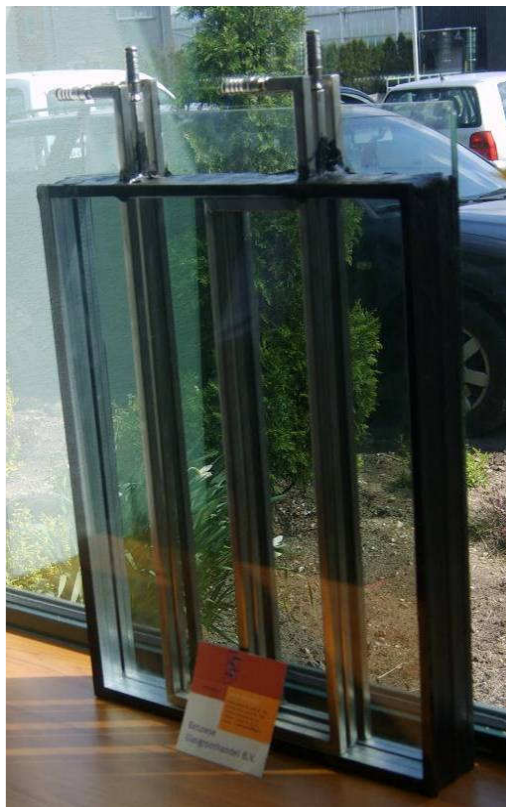
De Smart Skin is net als de FiwiHex ontwikkeld door ingenieur Noor van Aniel. Ze wordt nog niet toegepast, maar er is een prototype gemaakt. De eerste testresultaten zijn sinds juli beschikbaar. Er zijn twee alternatieve varianten, de Smart Skin in glas en de Smart Skin in polycarbonaat. Deze variant van de Smart Skin zal vermoedelijk worden toegepast bij herinrichting van de voormalige diamantbeurs aan het Weesperplein te Amsterdam.

De glazen Smart Skin bestaat uit drie lagen glas, met daartussen twee luchtsponen. In elke spouw lopen leidingen waar water doorheen stroomt. Daarnaast is er tevens een variant die bestaat uit polycarbonaat met buisjes van polyethyleen. Ook bij deze variant is er sprake van drie lagen waardoor buisjes lopen. In dit hoofdstuk worden beide varianten beschreven en geanalyseerd.

### 5.2 Smart Skin glas

#### 5.2.1 Gegevens

De Smart Skin bestaat uit drie glasvlakken. De glasvlakken aan de buitenzijde en in het midden hebben een dikte van 5 mm, het vlak aan de binnenzijde is veiligheidsglas. Dit vlak bestaat uit twee lagen glas met een dikte van 4 mm en een plastic tussenlaag van 1 mm. Er is geen speciale gasvulling tussen de glaslagen. De buitenste spouw heeft een breedte van 25 mm en de binnenste spouw van 15 mm.



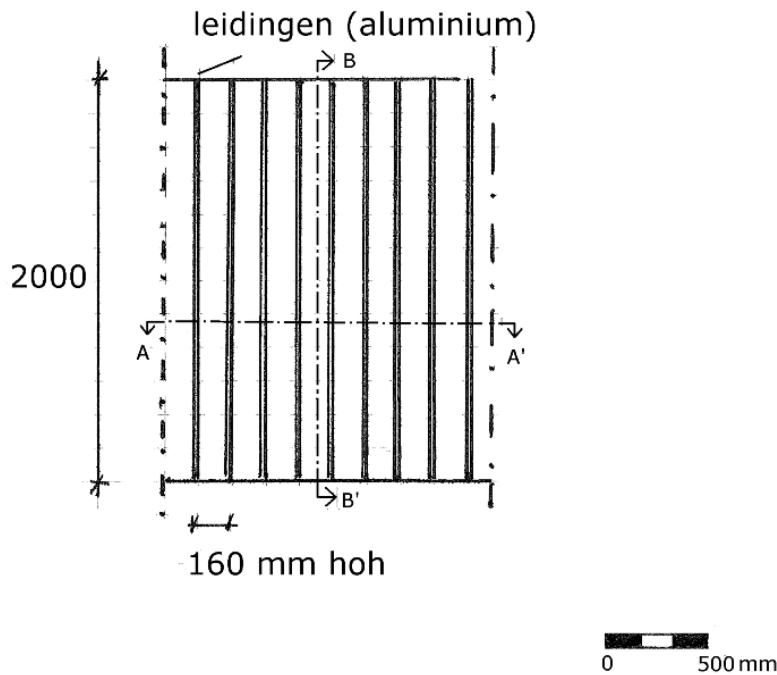
Figuur 5.1 Prototype Smart Skin glas



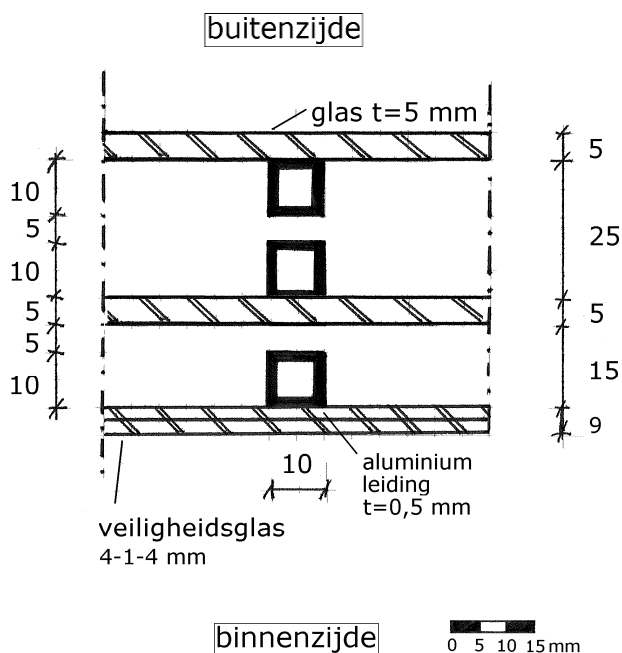
Figuur 5.2 Prototype Smart Skin matglas [26]

De leidingen zijn vierkant met zijden van 10 mm en de afstand tussen de leidingen bedraagt 160 mm hart op hart. In het prototype zijn deze leidingen nog gemaakt van staal, de fabrikant wil bij het echte product aluminium toepassen.

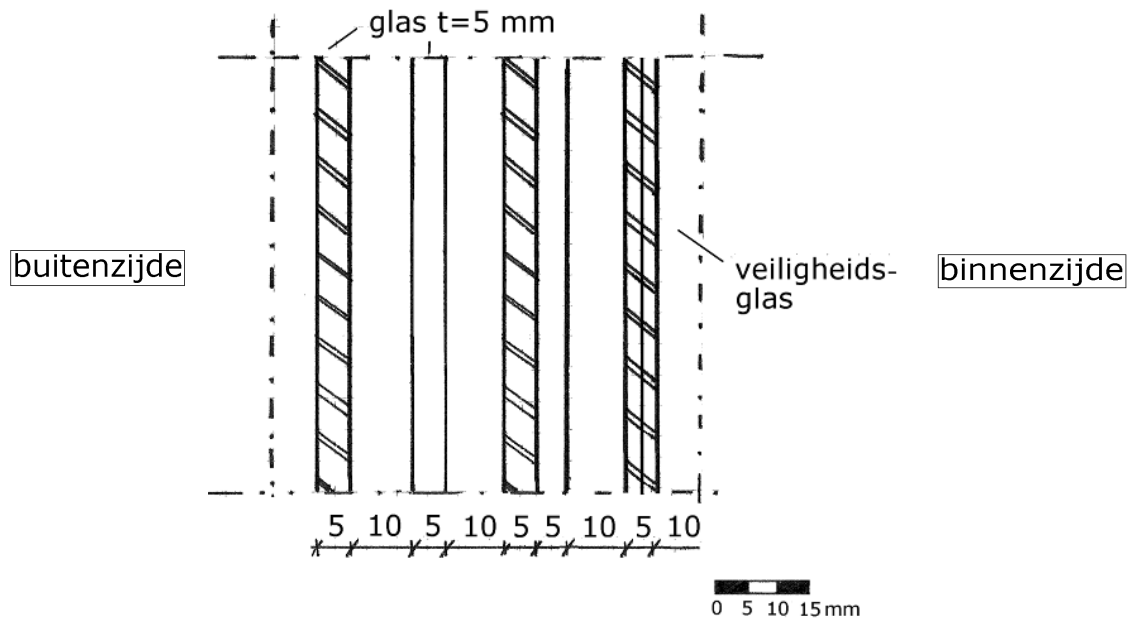
De buitenste glasvlakken hebben dezelfde fysische eigenschappen als gewoon enkel glas, het middelste glasvlak is grijs glas met een LTA van 0,5. Verder zitten er in de onderzijde van elke spouw kleine openingen met materiaal voor vochtabsorptie voor het geval dat er vocht in de spouw zou binnendringen. Er bestaat ook een prototype van de glazen Smart Skin waarbij matglas wordt gebruikt.



Figuur 5.3 Vooraanzicht Smart Skin



Figuur 5.4 Horizontale doorsnede AA'



Figuur 5.5 Verticale doorsnede BB'

### 5.2.2 Het principe en toepasbaarheid

De glazen variant van de Smart Skin is toepasbaar in utiliteitsbouw en woningen, voor zowel gevels als daken. De Smart Skin kan een gebouw verwarmen, waarbij tegelijkertijd koude wordt gewonnen. Omgekeerd kan ze ook koelen, waarbij warmte wordt gewonnen. Er wordt bij het gebruik van de Smart Skin gebruik gemaakt van water met drie verschillende temperaturniveaus: koud, lauw en warm. De temperaturen van deze niveaus kunnen worden ingesteld, maar liggen in principe rond de 12, 19 en 25 °C. In de beschrijving die volgt wordt van de genoemde temperaturen uitgegaan.

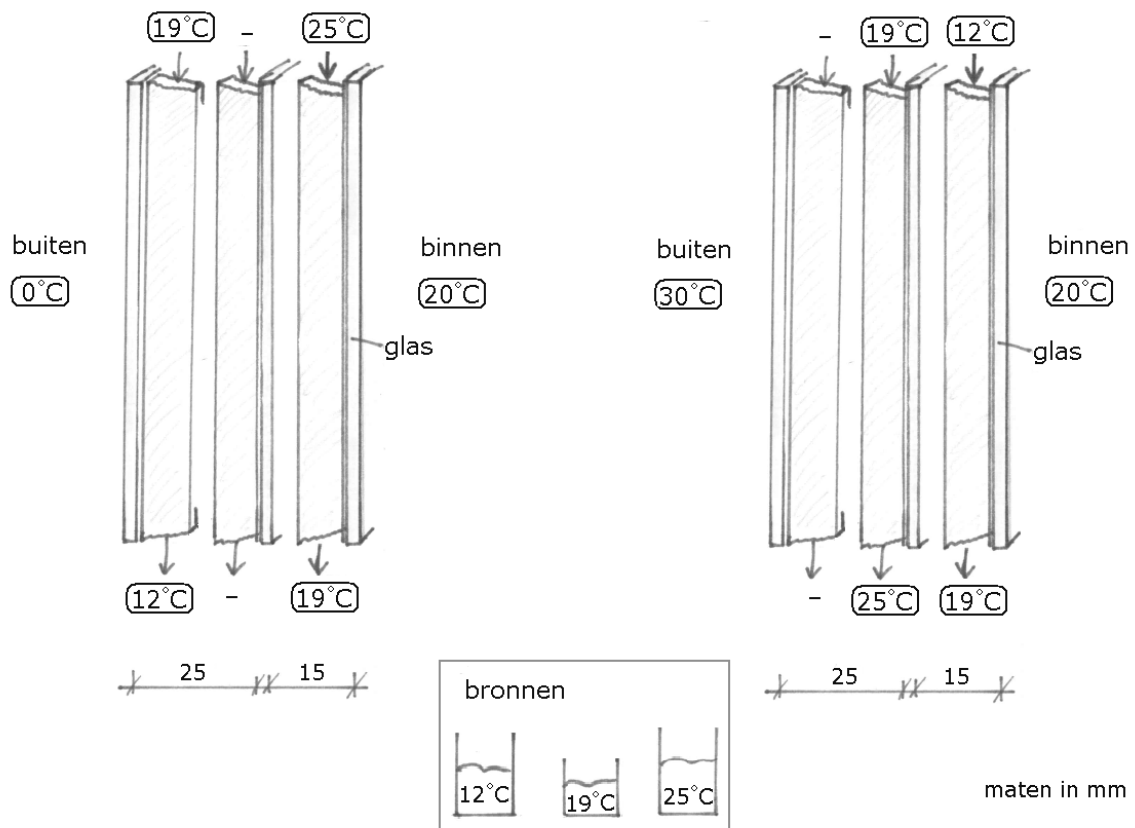
In de winter produceert de Smart Skin koud water en in de zomer warm water. Om dit water later weer te kunnen gebruiken moet het worden opgeslagen. Dit kan het beste gebeuren in een aquifer. Het water met beide temperaturen kan in dezelfde aquifer worden opgeslagen, het koude water aan de onderzijde en het warme water aan de bovenzijde. Er moeten dan wel twee verschillende bronnen worden geslagen, waarmee men het water de aquifer in en uit kan pompen. Voor de duidelijkheid wordt er gesproken van de 'koude bron' en de 'warme bron'. Ook het lauwe water kan worden opgeslagen in de aquifer, in dat geval zal worden gesproken over de 'lauwe bron'.

De beoogde werking van de Smart Skin is als volgt: in wintersituatie worden de leidingen in de binnenste spouw gevoed met water uit de warme bron. Dit water heeft een temperatuur van ongeveer 25 °C, waardoor het glasvlak opwarmt en warme straling afgeeft. Op deze manier werkt het binnenste glasvlak als een soort wandverwarming en de ruimte wordt zo verwarmd. Het water in de leidingen koelt af en het debiet wordt door het systeem zo geregeld, dat het water 19 °C is als het de spouw verlaat. Deze temperatuur kan overigens iets lager zijn dan de temperatuur in de ruimte die wordt verwarmd, omdat een deel van de warmte van het water naar buiten gaat. Na het verlaten van de binnenste spouw wordt het lauwe water opnieuw door de Smart Skin geleid, maar dit maal door de buitenste spouw. Deze waterstroom heeft ten gevolg dat de transmissieverliezen door de Smart Skin worden gereduceerd, omdat het totale

temperatuurverschil over de Smart Skin afneemt. Daarnaast koelt het lauwe water af door de lage buitentemperatuur. Het debiet wordt weer zo geregeld, dat het uitstromende water 12 °C is. Er wordt dus koude uit de lucht gehaald. Om de winning van koude zo effectief mogelijk te maken wordt de buitenste spouw gebruikt. Het koude water wordt opgeslagen door middel van warmte/koude-opslag en kan in de zomer weer worden gebruikt voor koeling. Netto wordt er dus warm water uit de warme bron in de Smart Skin gepompt en wordt de koude bron aangevuld met koud water. Daarnaast wordt de ruimte verwarmd. Figuur 5.6 geeft een overzicht van de in- en uitstroomtemperaturen van de verschillende leidingen.

## Wintersituatie

## Zomersituatie



Figuur 5.6 In- en uitstroomtemperaturen van de buisjes in winter en zomer. De temperaturen zijn ter indicatie gegeven

In de zomersituatie is de werking van de Smart Skin als volgt: de leidingen in de binnenste spouw worden dan gevoed met water uit de koude bron. Dit water heeft een temperatuur van 12 °C, waardoor het glasvlak afkoelt en koude straling afgeeft. Op deze manier zorgt het binnenste glasvlak dus voor koeling van de ruimte. Het water warmt op en is 19 °C als het de spouw verlaat. Vervolgens wordt dit lauwe water opnieuw door de Smart Skin geleid, maar nu door de middelste spouw. Het water is nog steeds relatief koel en zorgt dat het middelste glasvlak niet te warm wordt door de zonnestraling. Hierdoor is de warmte die straling aan het binnenste glasvlak afgeeft beperkt. Daarnaast warmt het lauwe water in de leidingen op door de instraling van de zon. Het debiet wordt weer zo geregeld, dat het uitstromende water 25 °C is. Er wordt dus

zonnewarmte gewonnen. Het warme water wordt weer opgeslagen door middel van warmte-/koudeopslag en kan in de winter weer worden gebruikt voor verwarming. Netto wordt er dus koud water uit de koude bron in de Smart Skin gepompt en wordt de warme bron aangevuld met warm water. Daarnaast wordt de warmtelast naar de ruimte beperkt.

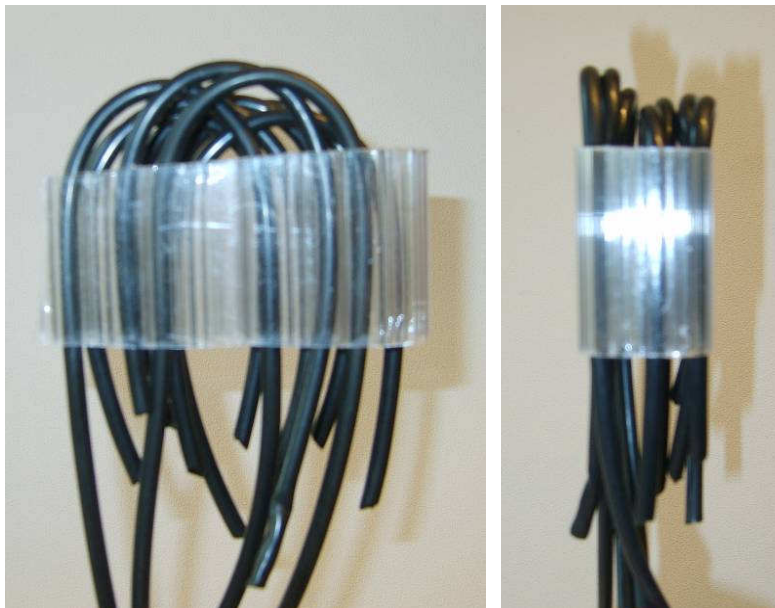
De hoeveelheid water die door de leidingen stroomt, moet dus worden geregeld door het systeem. Dit moet zodanig gebeuren dat de gewenste uitstroomtemperatuur wordt gerealiseerd. Hier zal nog op worden teruggekomen in paragraaf 5.4.

## 5.3 Smart Skin polycarbonaat

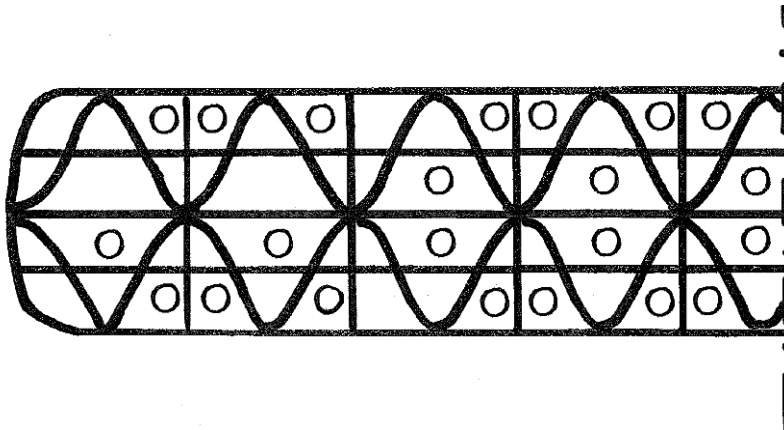
### 5.3.1 Gegevens

Het idee van deze variant van de Smart Skin is in principe hetzelfde. Het polycarbonaat bestaat uit verschillende lagen met lucht ertussen.

In figuur 5.7 is een doorsnede op ware grootte weergegeven van een sectie van de Smart Skin van polycarbonaat. In de lengteas is de doorsnede symmetrisch. Door de holtes worden buisjes van polyethyleen gevoerd. Deze buisjes mogen bevriezen, ze keren weer terug in de oude toestand. Wel is een eis dat er altijd wat water in de buisjes moet zitten omdat de buisjes anders kapot gaan.

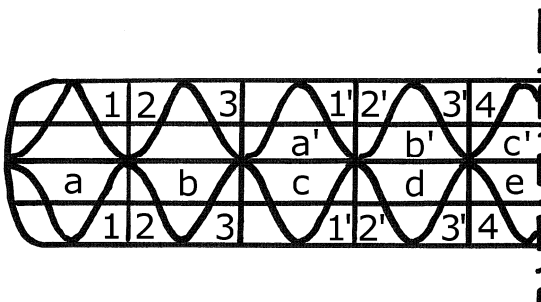


*Figuur 5.7 Stukje polycarbonaat met enkele polyetheen slangetjes. Vooraanzicht (rechts) en zijaanzicht (links)*



Figuur 5.8 Sectie Smart Skin van polycarbonaat, schaal 1:1

De configuratie van de buisjes is in figuur 5.9 schematisch weergegeven. In de twee buitenste zijden van het polycarbonaat is de configuratie hetzelfde. De buisjes zijn genummerd. De accenten betekenen dat het buisje met dit nummer vanaf de andere kant weer terug komt. Aan de bovenzijde maken de buisjes namelijk een lus en gaan weer terug naar beneden (zie figuur 5.7). De bochten in de buisjes mogen niet te scherp zijn, omdat de doorstroming anders niet goed is. Om deze reden zijn de buisjes in groepjes van drie gebundeld, zowel naar boven als naar beneden. In het midden zitten de buisjes onder een hoek omdat de beide middelste spouwtjes worden gebruikt. Voor deze buisjes zijn cijfers gebruikt, waarbij ook accenten zijn aangegeven.



Figuur 5.9 Sectie Smart Skin met aanduiding configuratie van buisjes. De accenten geven aan dat het buisje vanaf de andere kant weer terug komt. Aan de beiden buitenzijden is de configuratie hetzelfde, de middelste buisjes zitten schuin.

### 5.3.2 Principe en toepasbaarheid

De werking van deze variant van de Smart Skin is hetzelfde als bij de glazen variant. De verschillende waterstromen lopen precies op dezelfde manier door de verschillende schillen. In kassen is deze variant goed bruikbaar, als gevel voor woningen is het polycarbonaat echter niet geschikt. Dit vanwege ondermeer de lage warmteweerstand en de gevoeligheid voor vandalisme. De Smart Skin met polycarbonaat is wel bruikbaar op daken van woningen. De Smart Skin moet dan boven de thermische isolatie worden aangebracht. Ze werkt dan als een soort zonnecollector. Volgens Eur van Andel kan dit systeem momentaan een warmteopbrengst  $500 \text{ W/m}^2$  leveren. Het principe lijkt veel op het concept Energiedak [27], dat onder meer is toegepast in sporthal De Estafette te Nieuw Vennep.

Omdat de variant van de Smart Skin met polycarbonaat niet toepasbaar voor de KlimaatPlusWoningen wordt in dit rapport verder alleen de variant met glas beschouwd.

## **5.4 Proefopstelling Fiwihex BV te Almelo**

### **5.4.1 Beschrijving**

Bij Fiwihex BV worden sinds december 2007 metingen verricht met betrekking tot de beide varianten van de Smart Skin. In deze paragraaf wordt de proefopstelling beschreven. Dit is noodzakelijk om de meetresultaten goed te kunnen beoordelen. Ook de regeling van de proefopstelling wordt beschreven. Dit is eveneens om een goede analyse van de resultaten mogelijk te maken, maar ook om aan te geven hoe het regelsysteem van de Smart Skin gaat functioneren. Wanneer de Smart Skin gaat worden toegepast zal de regeling namelijk volgens hetzelfde principe werken.

De proefopstelling bestaat uit een houten kast met een lengte van 1000 mm, breedte van 400 mm en hoogte van 1600 mm. De voorzijde van de kast bestaat grotendeels uit Smart Skin van glas, dit vlak heeft een lengte van 900 mm en een hoogte van 1400 mm. Aan de onderzijde zijn watervoerende slangen bevestigd. De kast staat naast een gebouw en hoewel ze soms wordt omgekeerd staat deze zijde meestal van het gebouw af. Dit is het zuiden.

De achterzijde van de kast bestaat vrijwel geheel uit Smart Skin van polycarbonaat. De lengte van dit vlak is 900 mm en de hoogte 1550 mm. De buisjes van polyethyleen worden eveneens aan de onderzijde met water gevoed. De proefopstelling is weergegeven in figuur 5.10 en 5.11.

De openingen tussen de houten kast en de beide vlakken aan voor- en achterzijde zijn gedicht met piepschuim. Aan de bovenzijde van de voorkant (bij de glazen variant dus) zit echter een kier met een hoogte van ongeveer 10 mm (zie figuur 5.12).

Verder bevindt zich in de kast een Fiwihex dunne-draad warmtewisselaar. Deze kan gebruikt worden om extra te koelen en te verwarmen. Ook deze wordt voorzien van water. Daarnaast zijn ook een aantal sensoren aangebracht. In de kast is een sensor aangebracht die de stralingstemperatuur tengevolge van de zon meet, wat een indicatie geeft van de instraling. In de kast bevindt zich tevens een luchttemperatuurmeter. Aan de buitenzijde van de kast is in de schaduw ook een luchttemperatuurmeter aangebracht om de buitentemperatuur te meten.



*Figuur 5.10 Voorzijde proefopstelling: Smart Skin van glas*



*Figuur 5.11 Achterzijde proefopstelling: Smart Skin van polycarbonaat*



*Figuur 5.12 Detail van aansluiting linkerbovenzijde. Boven het glas is een kier van ongeveer 10 mm zichtbaar*

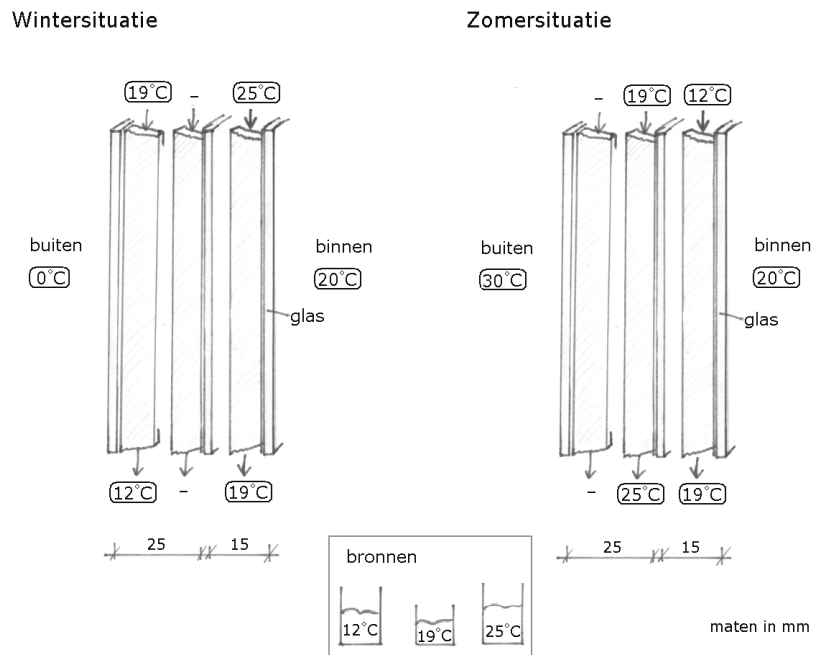


*Figuur 5.13 Binnenzijde van de kast. De Fiwihex warmtewisselaar is zichtbaar, aan rechterzijde de polycarbonaat Smart Skin*

#### **5.4.2 Het regelsysteem**

Aan de hand van de meetopstelling zal worden beschreven welke elementen nodig zijn om het systeem te laten functioneren. Als de Smart Skin wordt toegepast zal het regelsysteem in grote lijnen gelijk zijn aan dit systeem. Indien er verschillen zijn tussen de meetopstelling en het systeem dat Fiwihex BV toe wil gaan passen wordt dit duidelijk vermeld.

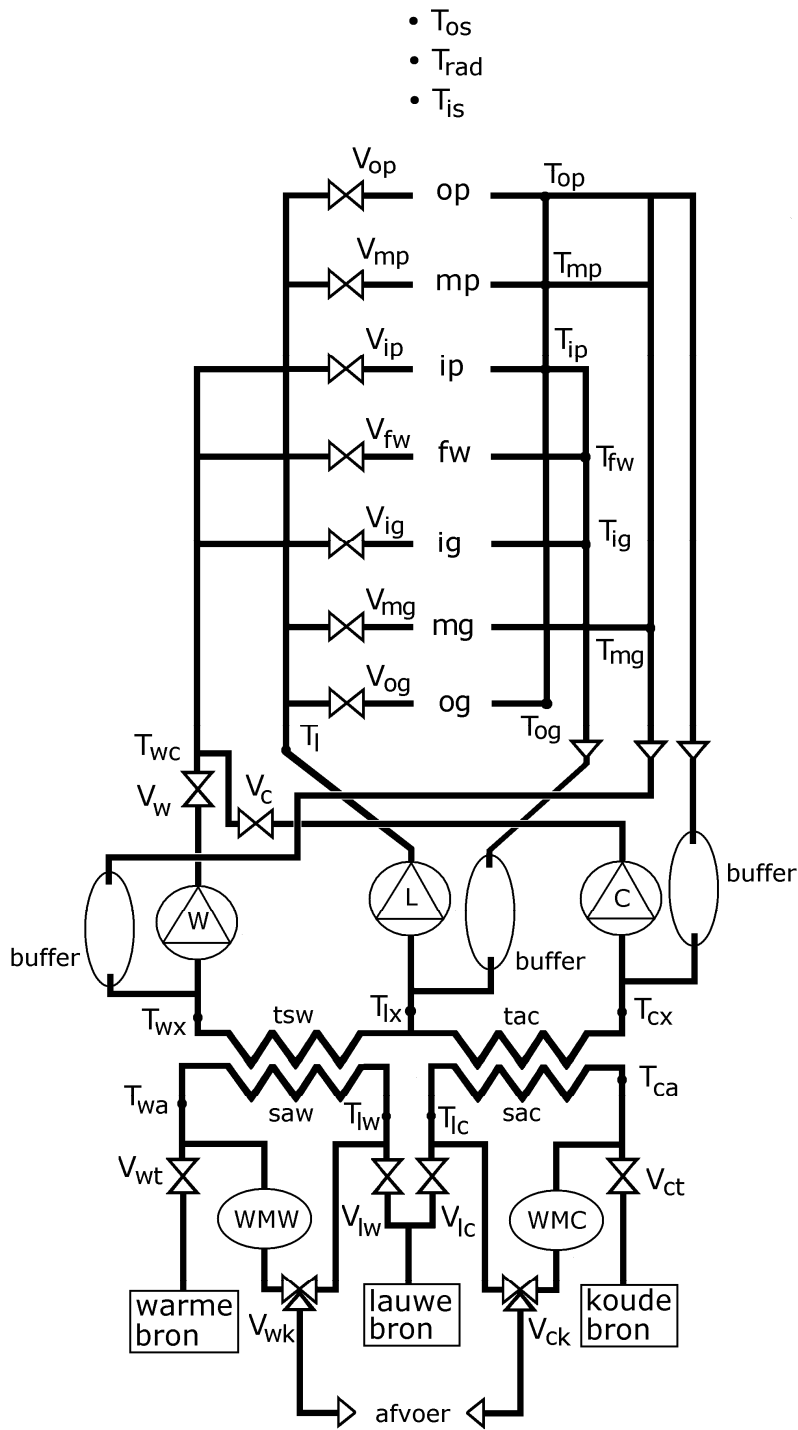
Voor het functioneren van het systeem zijn drie bronnen met verschillende temperaturen nodig. In werkelijkheid zullen deze drie bronnen binnen dezelfde aquifer liggen, waarop een grote groep woningen aangesloten is. Bij de proefopstelling is het gebruik van een aquifer niet haalbaar en wordt gebruik gemaakt van leidingwater, dat zo nodig wordt verwarmd. Het principe van de opstelling is verder gelijk. De temperatuur van de drie bronnen zal door het jaar variëren, maar de drie bronnen bevatten warm water (rond 25 °C), lauw water (rond 19 °C) en koud water (rond 12 °C). In figuur 5.14 is nogmaals weergegeven door welke spouw warm, lauw of koud water loopt in zomer en winter.



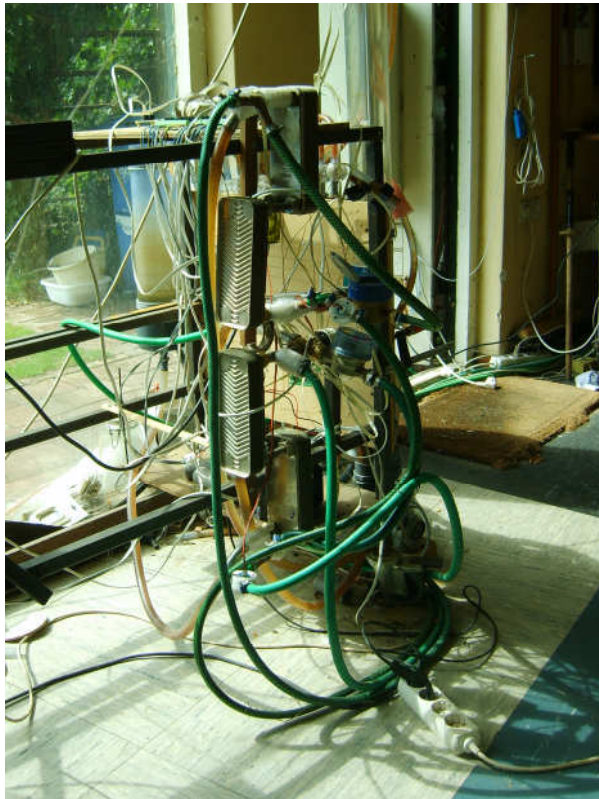
*Figuur 5.14 In- en uitstroomtemperaturen van de buisjes in zomer en winter. De temperaturen zijn ter indicatie gegeven*

In figuur 5.15 is de meetopstelling van Fiwihex BV schematisch weergegeven. De drie bronnen worden bediend door kleppen, die met V worden aangeduid. Tussen de warme en lauwe bron en de lauwe en koude bron loopt een circuit met een warmtewisselaar. Beide circuits zijn met elkaar verbonden en zijn nodig om de waterstromen fysiek gescheiden te houden, dit in verband met corrosie en vervuiling. In de meetopstelling te Almelo zitten in elk circuit twee in serie geplaatste warmtewisselaars in plaats van één warmtewisselaar. Dit omdat de warmteoverdracht bij het gebruikte model warmtewisselaar (douchewisselaar uit een Vaillant CV ketel) te klein is. In het werkelijke systeem wordt wel gewoon één warmtewisselaar toegepast.

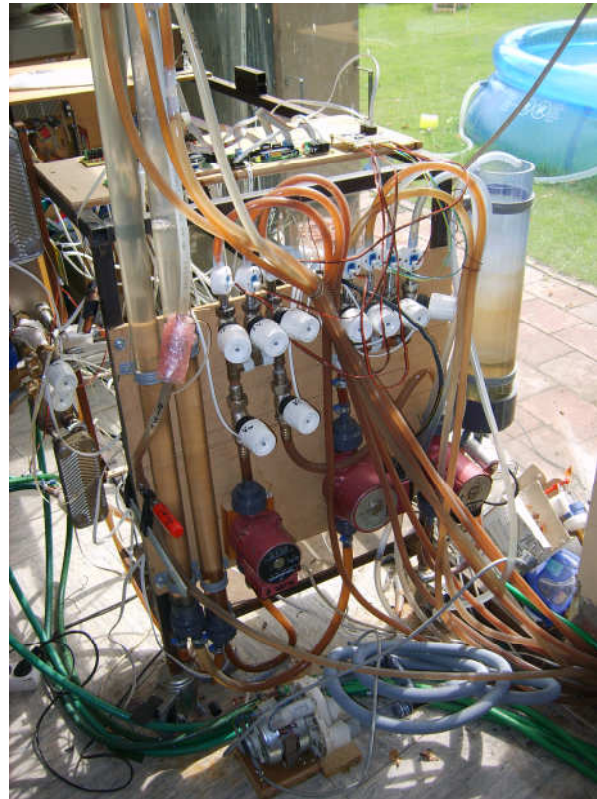
Aan de andere zijde van de warmtewisselaar bevinden zich drie pompen. Deze zijn voor het warme circuit (W), het lauwe (W) en het koude (K). Wanneer de temperatuur lager dan  $19^{\circ}\text{C}$  is staan W en de L aan, wanneer de temperatuur hoger dan  $19^{\circ}\text{C}$  staan K en L aan. De Fiwihex dunne-draad warmtewisselaar wordt gebruikt om te verwarmen en te koelen. Deze slaat aan als de temperatuur in de kast hoger wordt dan  $24^{\circ}\text{C}$  of lager dan  $19^{\circ}\text{C}$ . In bijlage 10 zijn alle variabelen en aanduidingen nader toegelicht. Alle variabelen zijn met blauw aangeduid.



Figuur 5.15 Schematische weergave meetopstelling Fiwihex BV in Almelo



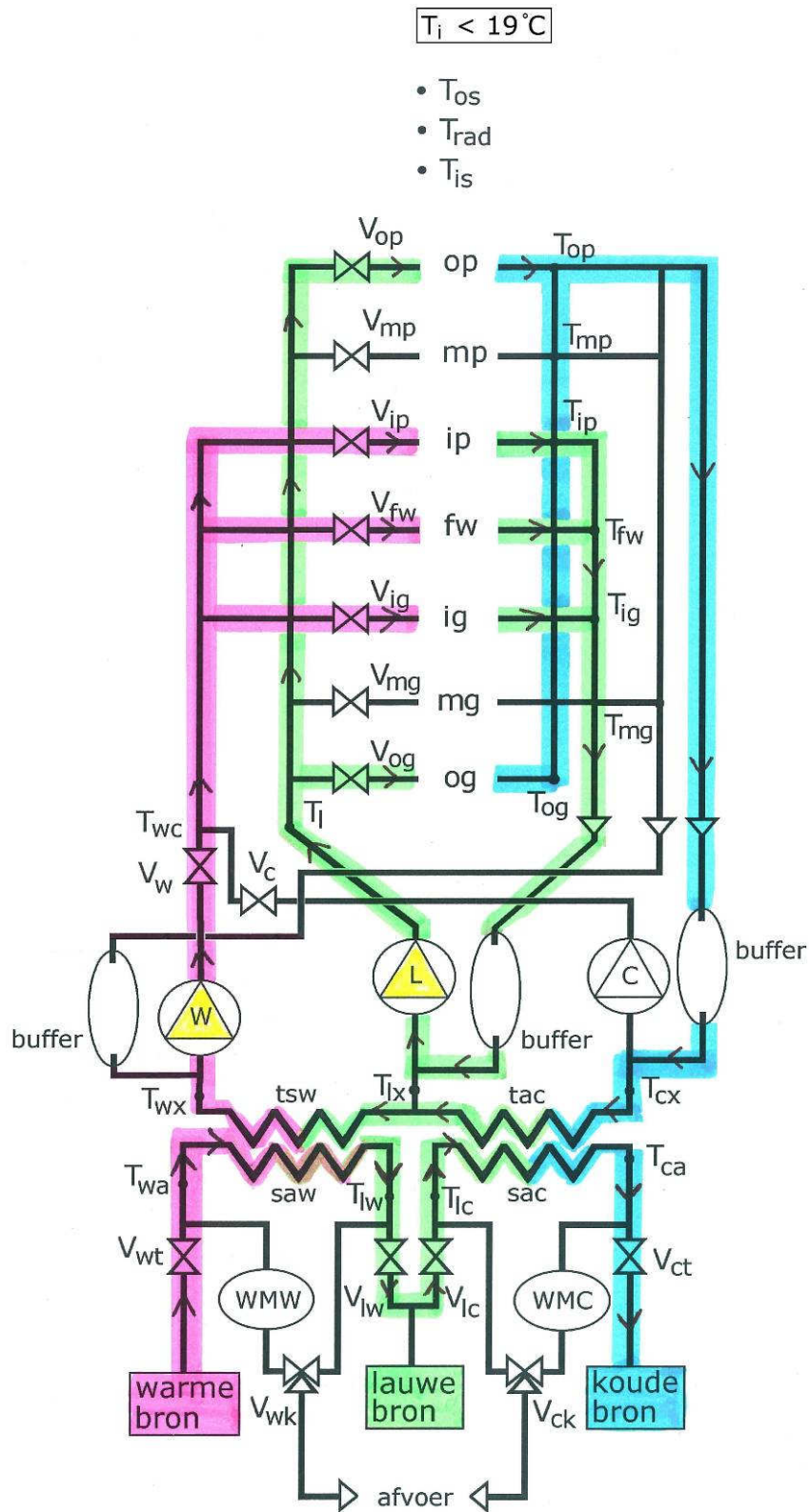
*Figuur 5.16 Meetopstelling Fiwihex BV te Almelo. De warmtewisselaars – twee aan twee in serie geplaatst - zijn goed zichtbaar*



*Figuur 5.17 Aan deze kant zijn de drie circuits met pompen duidelijk herkenbaar, net als de regelknoppen van de kleppen*

In figuur 5.18 is weergegeven hoe de waterstromen lopen in wintersituatie, als  $T_i < 19\text{ }^\circ\text{C}$ . De pompen W en L zijn in werking, de Fiwihex is ook in werking. Vanuit de warme bron stroomt er water door de bronzijde van de linker warmtewisselaar (saw). Aan de andere zijde van de wisselaar stroomt er lauw water in deze wisselaar (taw). Dit water warmt op en wordt warm. Het warme water stroomt via klep  $V_w$  naar de klep van de binnenste spouw van beide typen Smart Skin,  $V_{ip}$  en  $V_{ig}$ . Indien de Fiwihex in werking is, stroomt het water ook naar de dunne-draad wisselaar. Hierdoor wordt de ruimte verwarmd. Tegelijkertijd koelt het water af en wordt lauw. Dit lauwe water stroomt via de lauwe buffer naar de klep van de buitenste spouw van de beide typen Smart Skin,  $V_{op}$  en  $V_{og}$ . Het water zorgt dat de transmissie kleiner wordt en koelt nog verder af. Via de koude buffer stroomt het koude water door de rechter warmtewisselaar (tac). Aan deze zijde wordt er koude afgegeven, het water wordt weer lauw en stroomt door naar de linker wisselaar (saw). Aan de bronzijde van de rechter warmtewisselaar (sac) wordt lauw water afgekoeld en stroomt de koude bron in.

Netto wordt er dus warm water in het systeem gepompt en koud water gewonnen. Daarnaast wordt de verwarmd en worden de transmissieverliezen beperkt.



Figuur 5.18 Schematische weergave van de waterstromen in wintersituatie

In figuur 5.19 is weergegeven hoe de waterstromen lopen in zomersituatie, wanneer  $T_i > 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De pompen C en L zijn in dit geval in werking, de Fiwihex alleen als  $T_i > 24$ . Vanuit de koude bron stroomt er water door de bronzijde van de rechter warmtewisselaar (sac). Aan de andere zijde stroomt er lauw water in deze wisselaar (tac), dit koelt af en wordt koud. Dit koude water stroomt via klep  $V_c$  naar de kleppen van de binnenste spouwen,  $V_{ip}$  en  $V_{ig}$ . Indien de Fiwihex in werking is, stroomt het water ook naar de dunne-draad wisselaar. Hierdoor wordt de ruimte gekoeld. Tegelijkertijd warmt het water op en wordt lauw. Dit lauwe water stroomt via de lauwe buffer naar de kleppen van de middelste spouwen,  $V_{mp}$  en  $V_{mg}$ . Het water warmt hierin op en wordt warm. Via de warme buffer stroomt het warme water door de linker warmtewisselaar (tsw). Aan de deze zijde wordt er warmte afgegeven, het water wordt weer lauw en stroomt door naar de rechter wisselaar (sac). Aan de bronzijde van de linker warmtewisselaar (saw) wordt lauw water opgewarmd en stroomt de warme bron in.

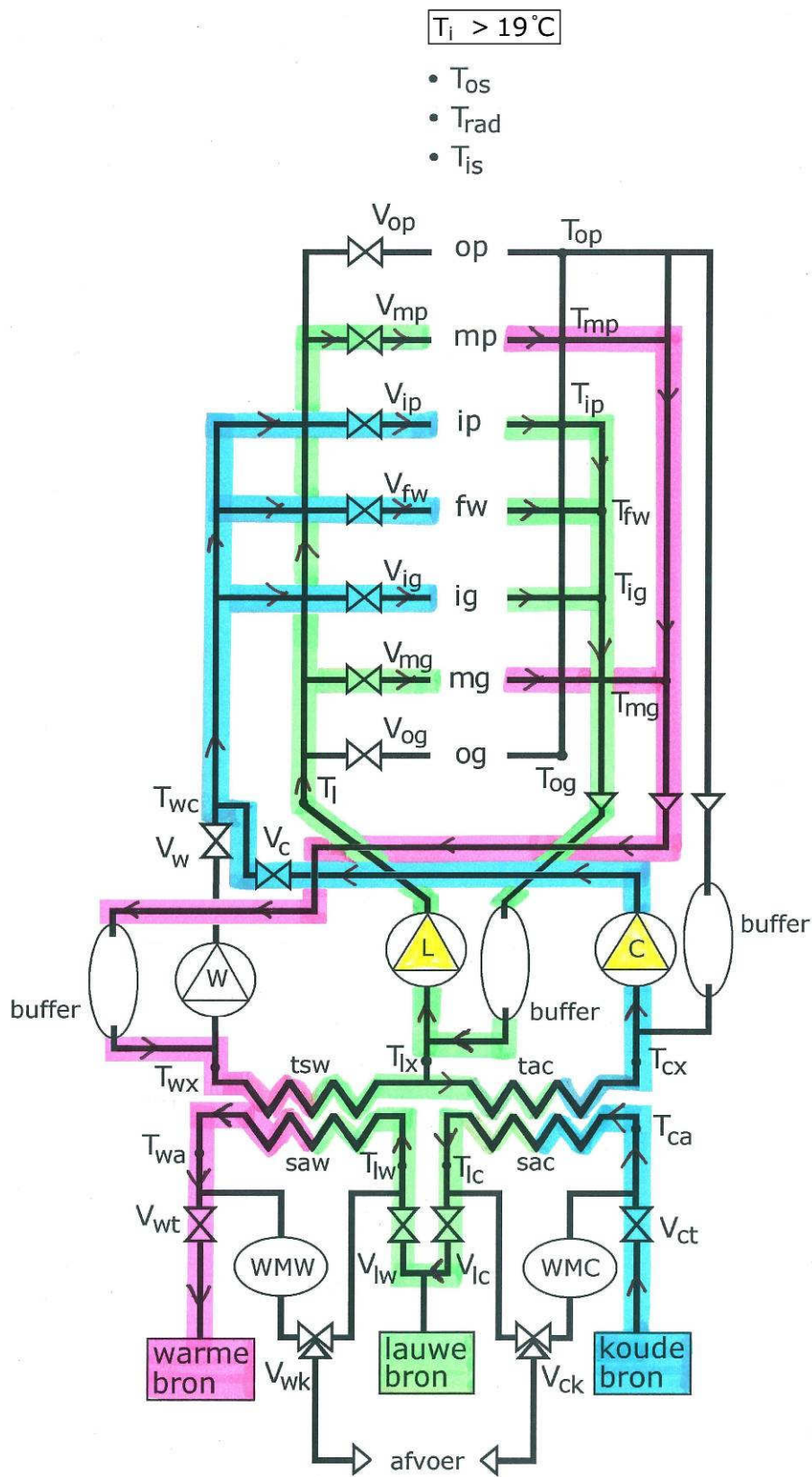
Netto wordt er nu dus koud water in het systeem gepompt en warm water gewonnen. Daarnaast wordt de ruimte gekoeld.

### Bediening van de kleppen

Het belangrijkste aspect van de Smart Skin is de regeling. Het is ondoenlijk om alle kleppen handmatig te bedienen, zeker als de Smart Skin in gebouwen toegepast gaat worden. Bij de huidige meetopstelling worden de uitgaande temperaturen van de verschillende "skins" gemeten en vergeleken met de gewenste temperaturen. Dit gebeurt nu door een programma dat door Eur van Andel is geschreven in *Python*. Later moet dit gebeuren door microcontrollers. Wegens kostentechnische overwegingen worden regelknoppen met PTC-weerstanden gebruikt. Dit zijn weerstanden met Positieve Temperatuur Coëfficiënt, die ook in woningen worden toegepast. Door de stroom op de knop op te voeren zorgt deze dat er meer water door de leidingen gaat stromen, zodat het debiet te regelen is. In de praktijk blijkt echter dat de knoppen in de meetopstelling aan of uit staan, maar dit is door fijnere afstelling aan te passen denkt Eur van Andel.



Figuur 5.19 De toegepaste regelknoppen met ptc-weerstanden



Figuur 5.20 Schematische weergave van de waterstromen in zomersituatie

## **5.5 Analyse van de Smart Skin glas**

### **5.5.1 Inleiding**

In deze paragraaf wordt de glazen variant van de Smart Skin geëvalueerd. De metingen die het bedrijf Fiwihex BV heeft verricht worden geanalyseerd. Ook wordt de temperatuurverdeling over het glas geanalyseerd en wordt bepaald of het optreden van oppervlaktecondensatie waarschijnlijk is. Ten slotte worden nog enkele andere aspecten beschouwd.

### **5.5.2 Analyse van de meetresultaten van Fiwihex BV**

Omdat in de meetopstelling zowel de Fiwihex als de beide typen Smart Skin worden getest zijn er veel variabelen die invloed hebben op de metingen. Ook wordt de kast soms gedraaid, waardoor de oriëntatie verandert. Daarnaast is de kast niet luchtdicht afgesloten en zijn geen metingen verricht voor de zoninstraling. De gemeten stralingstemperatuur geeft wel een indicatie. Om deze redenen is lastig om het gedrag van de Smart Skin te analyseren en om uit de metingen parameters af te leiden voor simulatie van de Smart Skin. Hierdoor is het afleiden van parameters zeer arbeidsintensief en niet haalbaar in het kader van dit afstudeeronderzoek.

Er zullen dus geen parameters worden afgeleid voor de Smart Skin en ze zal niet worden opgenomen in de simulatie van de KlimaatPlusWoning. Wel zullen de beschikbare meetgegevens kort geanalyseerd worden. Ook wordt in de volgende paragrafen een aantal aspecten van de Smart Skin nader onderzocht. Aan de hand hiervan wordt een aantal aanbevelingen gedaan.

### **Meetomstandigheden**

Bijlage 11 geeft de relevante beschikbare meetgegevens van het bedrijf Fiwihex BV weer. De metingen zijn gedaan op dinsdag 1 juli en woensdag 2 juli 2008. Dit waren extreem warme dagen. Uit de eerste grafiek blijkt dat de buitenluchttemperatuur op 1 juli varieert tussen 14 °C in de nacht en 32 °C overdag. Op 2 juli varieert de temperatuur tussen 17 °C en 36 °C. De stralingstemperatuur geeft een maat voor de grootte van zoninstraling en varieert tussen 19 °C en 43 °C. De periode tussen 8.00 uur en 22.00 wordt aangeduid als 'dag' en de overige tijd als 'nacht'. Gedurende de dagperiode is de buitenlucht vrijwel altijd hoger dan de lucht in de meetkast. Buiten deze periode is dit niet het geval en is er vrijwel geen zoninstraling.

### **Binnenste spouw - overdag**

Overdag wordt het binnenste glasvlak gebruikt om de metruimte te koelen en om warmte te winnen door middel van opwarming van het water in de buisjes. Uit de tweede grafiek in bijlage 11 blijkt dat de temperaturen van het ingaande en uitgaande water erg fluctueren. Het instromende water is warmer dan voor goede werking zou moeten en het uitstromende water is niet warm genoeg om mee te verwarmen. De regeling die er voor moet zorgen dat het instromende en uitstromende water een constante temperatuur hebben, werkt duidelijk nog niet goed.

Het water dat de binnenste spouw in stroomt, zou ongeveer 12 °C moeten zijn. De temperatuur varieert echter en is altijd warmer dan 20 °C. De temperatuur van het water dat de spouw uit stroomt, is niet meer dan 1 °C warmer. Het water zou moeten opwarmen naar 25 °C. De opwarming van het water is dus

maar minimaal. Als de temperatuur van het instromende water lager is, dan zal de opwarming groter worden. Het is lastig in te schatten hoe groot de opwarming zou zijn bij een lagere instroomtemperatuur. Ook het waterdebiet is van invloed op het temperatuurverschil. Het debiet varieert, maar is nu gemiddeld 23 ml/s. Dit betekent dat het water ongeveer 7 seconde in de leiding zit. Door het debiet aan te passen is de temperatuur van het uitgaande water te beïnvloeden. Bij een lager debiet is de opwarming van het water groter.

De energie die het water opneemt is bij benadering gelijk aan het koelvermogen dat de binnenschil levert. Dit vermogen ligt tussen 0 en 250 W, met een gemiddelde waarde van ongeveer 100 W. Dit is ondanks de relatief hoge temperatuur van het water dat door de binnenste spouw stroomt. De oppervlakte van de glazen Smart in de meetopstelling is 1,26 m<sup>2</sup>, dit betekent dat het koelvermogen in de gemeten situatie 80 W/m<sup>2</sup> Smart Skin is. Bij een groot oppervlak is dus een behoorlijk hoog vermogen te behalen op een dag zoals deze. Het is op basis van de beschikbare gegevens niet mogelijk om te beoordelen hoe dit op andere dagen is, zowel in zomer als winter. De opwarming van het water is ook ongeveer 80 W/m<sup>2</sup> Smart Skin. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de opwarming bij deze in- en uitstroomtemperatuur zo gering is dat men weinig heeft aan deze warmtewinst.

### **Binnenste spouw – 's nachts**

In nachtperiode wordt er warmer water door de leidingen in de binnenste spouw gevoerd. Het glasvlak wordt gebruikt om te verwarmen en er wordt 'koude' gewonnen.

De temperaturen van het ingaande en uitgaande water fluctueren weer, maar verlopen constanter dan overdag. In de nacht van 31 juni op 1 juli is de afkoeling van het water gering, maar de volgende nacht is het temperatuurverschil een stuk groter. Het water koelt tot 7 °C af. Het debiet varieert sterk, maar is iets kleiner dan overdag.

De energie die het water afgeeft is gelijk aan het verwarmingsvermogen dat de binnenschil levert. In de grafieken is alleen het vermogen van de koeling ofwel de opwarming van het water weergegeven. Uit de gegevens blijkt dat het vermogen 's nachts varieert tussen 0 en 500 W, met een gemiddelde waarde van ongeveer 150 W. Dit komt neer op een vermogen van 120 W/m<sup>2</sup> Smart Skin voor de verwarming van de ruimte en de afkoeling van het water. Bij een groot oppervlak is in deze situatie dus een behoorlijk hoog vermogen te behalen. Het is op basis van de beschikbare gegevens niet mogelijk om te beoordelen hoe dit op andere momenten is.

### **Middelste spouw - overdag**

Overdag wordt het middelste glasvlak gebruikt om zonnewarmte te winnen. Ook zorgt deze spouw ervoor dat er minder stralingswarmte in de binnenruimte doordringt. Uit de derde en vierde grafiek in bijlage 11 blijkt dat de temperaturen van het ingaande en uitgaande water ook in deze spouw erg fluctueren en dat de regeling niet goed werkt.

De temperatuur van het water in de middelste spouw zou ongeveer 19 °C moeten zijn. Het water is echter veel warmer, een groot deel van de dag meer dan 25 °C. De opwarming van het water is erg klein, niet meer dan 2 °C. Dit is

opnieuw te verklaren door de regeling die nog niet goed functioneert. Het debiet varieert zeer sterk, tussen 0 en 17 ml/s.

De opwarming van het water in de binnenste spouw ligt tussen 0 en 100 W, met een gemiddelde waarde van ongeveer 80 W. De opwarming van het water komt neer op 64 W/m<sup>2</sup> Smart Skin. De stralingswarmte die de ruimte in gaat wordt door het relatief koele water in de spouw ook kleiner. Er is dus sprake indirecte van koeling. Het is op basis van de meetgegevens niet te zeggen hoe groot deze indirecte koeling precies is.

In totaal is het met de beide spouwen van de Smart Skin dus mogelijk om op een warme dag als deze 144 W/m<sup>2</sup> Smart Skin aan warmte te winnen. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het opgewarmde water alleen nuttig is als het een temperatuur heeft die men later weer kan gebruiken. Het totale koelvermogen van de ruimte is 80 W/m<sup>2</sup> Smart Skin ten gevolge van de binnenste spouw. Daarbij komt nog de indirecte koeling van de middelste spouw. Het is op basis van de beschikbare gegevens niet mogelijk om te beoordelen hoe dit op andere dagen is, zowel in de zomer als de winter.

### **Middelste spouw - 's nachts**

Overdag wordt het middelste glasvlak gebruikt om zonnewarmte te winnen en om de instraling te verkleinen. 's Nachts is er geen instraling ten gevolge van de zon en wordt deze spouw dan ook niet gebruikt.

### **Conclusies**

De regeling die er voor moet zorgen dat de instromende en uitstromende waterstromen de gewenste temperatuur hebben werkt nog niet optimaal. De stromen hebben niet de gewenste temperatuur en de waarden fluctueren sterk.

De opwarming van het water in de beide spouwen is kleiner dan gewenst. Als de regeling beter werkt zal dit veranderen. Dit komt enerzijds doordat de temperatuur van instroom lager is bij koelen en hoger bij verwarmen. Anderzijds kan het debiet worden aangepast.

Toch is de energie die wordt gewonnen door middel van opwarming of afkoeling van het water behoorlijk. In totaal is het met de beide spouwen van de Smart Skin mogelijk om op de beschouwde dag overdag 144 W/m<sup>2</sup> Smart Skin aan warmte te winnen. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het opgewarmde water alleen nuttig is als het een temperatuur heeft die men later weer kan gebruiken. Het totale koelvermogen van de ruimte is 80 W/m<sup>2</sup> Smart Skin, daarbij komt nog de indirecte bijdrage van de middelste spouw. Bij een groot oppervlak Smart Skin is in deze situatie dus een relatief hoog vermogen te behalen. Het is op basis van de beschikbare gegevens niet mogelijk om te beoordelen hoe dit op andere dagen is, zowel in de zomer als de winter

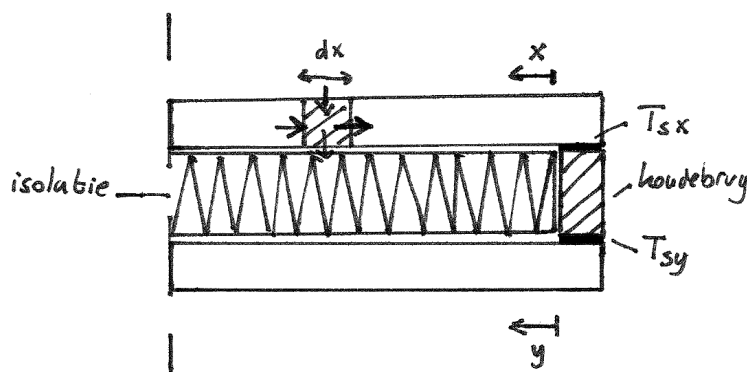
In nachtperiode wordt het glasvlak gebruikt om te verwarmen en er wordt 'koude' gewonnen. Op de tweede meetdag is het temperatuurverschil tussen het in en uitstromende water groter. De ruimteverwarming is 120 W/m<sup>2</sup> Smart Skin en de afkoeling van het water is ongeveer gelijk. Ook nu is het vermogen weer vrij groot. Het is op basis van de beschikbare gegevens niet mogelijk om te beoordelen hoe dit op andere momenten is.

### 5.5.3 Analyse temperatuurverdeling

Het principe van de Smart Skin is dat de watervoerende buisjes zijn verbonden met de verschillende glasvlakken en dat de glasvlakken hierdoor opwarmen of afkoelen. De glasvlakken werken op deze manier als een soort vinnen, waardoor de warmteoverdracht tussen de lucht in de ruimte en het water in de buisjes verbeterd wordt. Effectieve warmteoverdracht is enerzijds van belang voor het effectief verwarmen en koelen van de binnenruimte. Anderzijds is het ook belangrijk voor de afkoeling en opwarming van het water in de leidingen.

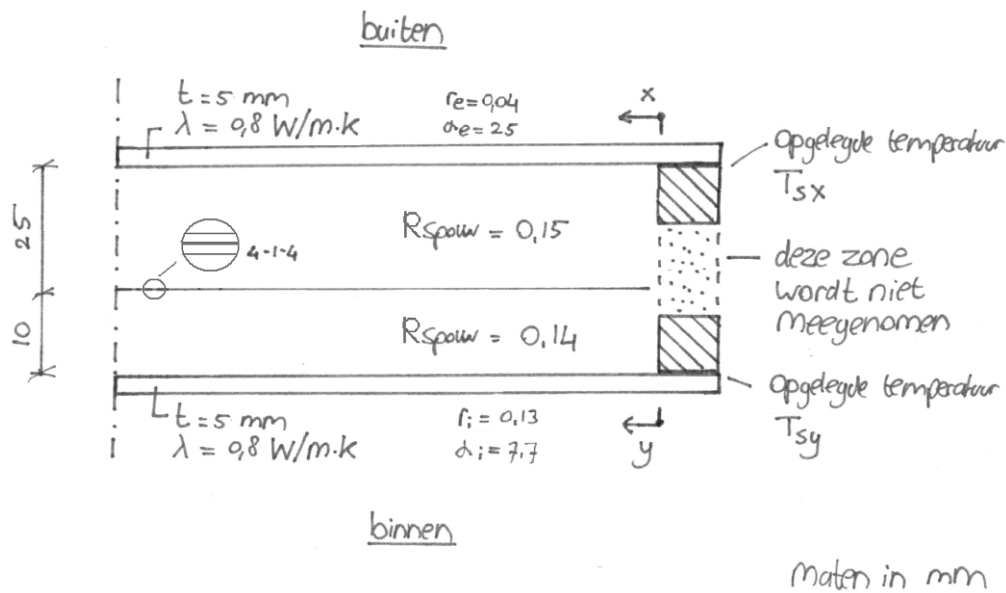
Om de warmteoverdracht zo effectief mogelijk te maken is het dus van belang dat de glastemperatuur tussen twee leidingen zo min mogelijk afwijkt van de temperatuur van het water in de leidingen. Daarom zal de temperatuurverdeling over het glas tussen twee leidingen worden beschouwd. Dit gebeurt aan de hand van een analytisch model. In [28] is een berekeningsmethode afgeleid voor de warmtedoorgangscoefficiënt, ofwel de U-waarde van vacuümpanelen. Deze methode zal worden gebruikt om te berekenen hoe het temperatuurverloop over de glasplaten is.

De methode gaat uit van de warmtebalans voor een strookje van het paneel met lengte  $d_x$ , weergegeven in figuur 5.21 Het blokje materiaal tussen beide panelen werkt als koudebrug en verlaagt de U-waarde van het paneel. Als onderdeel van het model wordt bepaald wat de temperatuurverdeling over de buitenste vlakken is. Dit onderdeel van het model is bruikbaar om het temperatuurverloop over de Smart Skin tussen twee verticale leidingen te onderzoeken.



Figuur 5.21 Schematisering van de beschouwde situatie in [28]

In plaats van een paneel met aan beide zijden een koudebrug wordt er een glasvlak bekeken tussen twee leidingen met water. Door aan de punten  $T_{sx}$  en  $T_{sy}$  de temperaturen van leidingen in de beide spouwen op te leggen kan de invloed van de buisjes met water worden onderzocht. In het oorspronkelijke model kan de invloed van een vacuüm worden meegenomen. Omdat hier geen sprake van is bij de Smart Skin wordt hier geen gebruik van gemaakt.



Figuur 5.22 Schematisering van de beschouwing van de Smart Skin

In plaats van de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  voor de isolatie moet de totale  $\lambda$  worden bepaald van alles wat tussen de twee buitenste glasvlakken ligt. Dit zijn dus de middelste glasplaat en de twee spouwen.

Voor de warmteweerstand van het middelste glasvlak  $R_{glas;mi}$  geldt:

$$R_{glas;mid} = \frac{d_{glas}}{\lambda_{glas}} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{0,8} = 0,01 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

Omdat er geen uitwisseling van lucht met buiten plaats vindt kan de spouw opgevat worden als zwak geventileerd. Voor een spouw van 15 mm breed is uit [29] af te leiden dat  $R_{spouw} = 0,14 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$  en voor een spouw van 25 mm  $R_{spouw} = 0,15 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ .

De R van de middelste constructie is dan:

$$R_{mid} = R_{glas;mid} + R_{spouw;bu} + R_{spouw;bi} = 0,01 + 0,14 + 0,15 = 0,30 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

Dit geeft een  $\lambda$  van  $0,16 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$ .

De totale R van de constructie is dan:

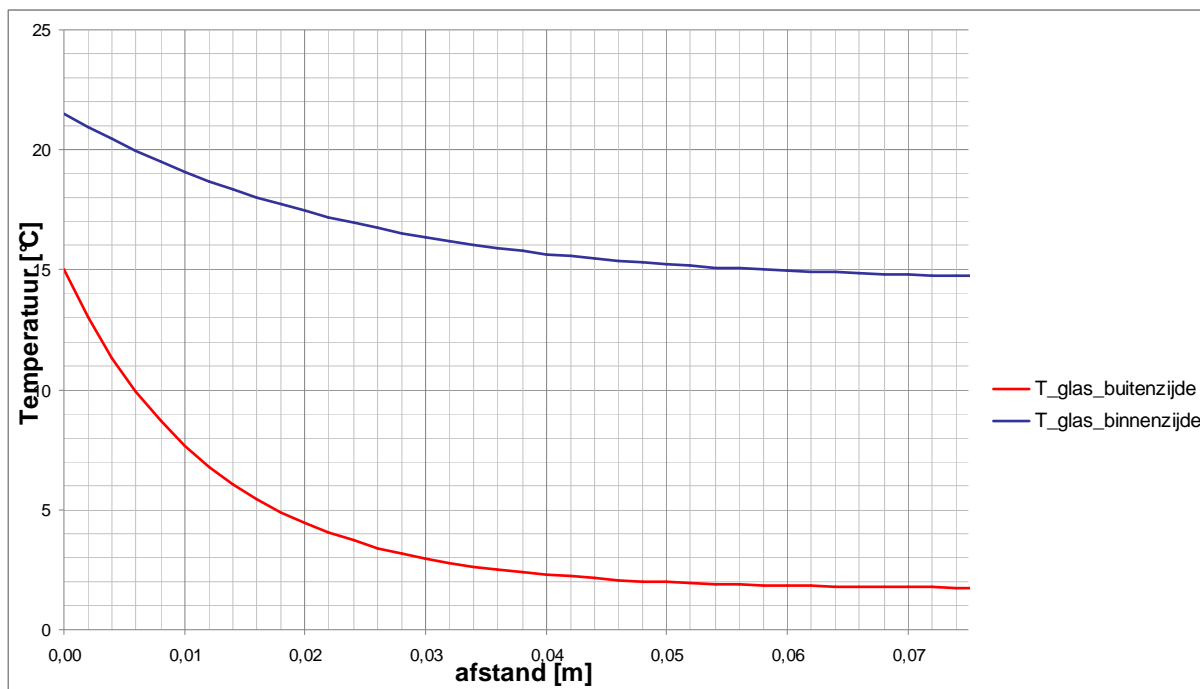
$$R_{tot} = r_e + r_i + R_{glas;bu} + R_{glas;bi} + R_{mid} = 0,04 + 0,13 + 2 \cdot 0,0063 + 0,30 = 0,48 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

Bij de toepassing van het model moet de opmerking worden gemaakt dat het model geldt voor een oneindig lang paneel. De temperatuur op grote afstand van de beschouwde leiding (of koudebrug) gaat dan naar een limiet. Als men een glasvlak beschouwt met aan beide zijden een leiding met dezelfde eigenschappen, dan kan men volstaan met het bekijken van de helft van de totale afstand van het glas indien de hellingen bij toenemende  $x$  en  $y$  naar nul

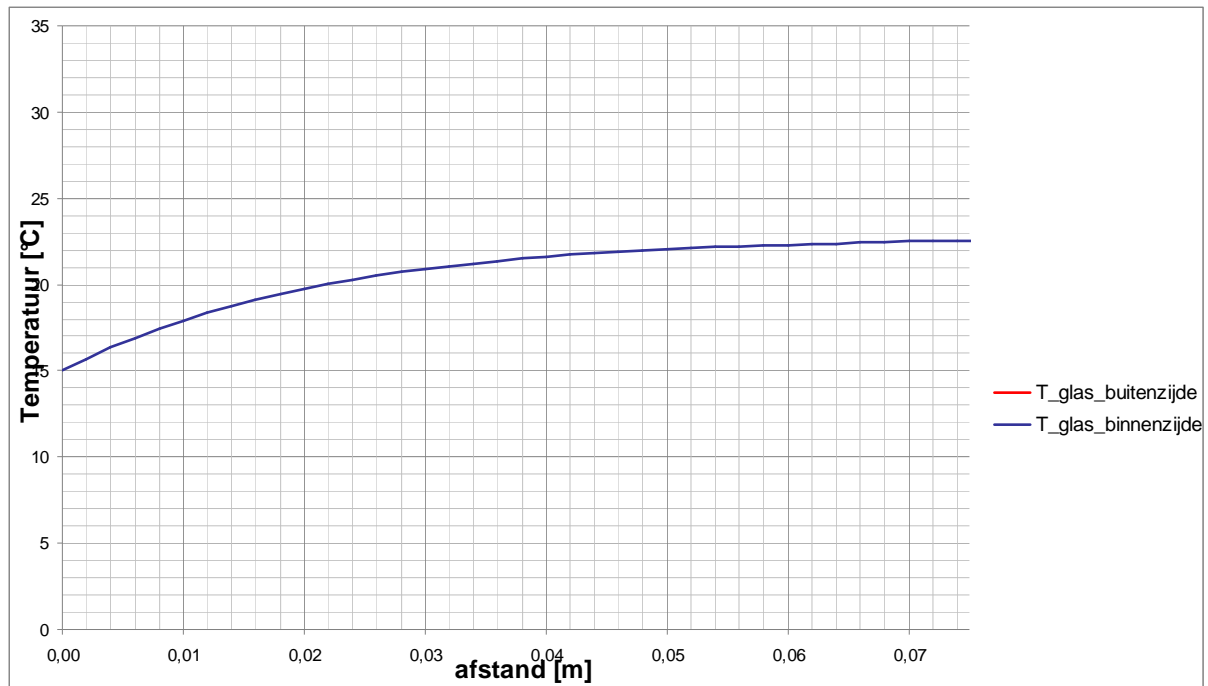
halverwege het paneel naderen, voordat men halverwege het paneel komt. Met andere woorden, de helling halverwege het paneel moet zeer klein zijn. Daarnaast is de limiet waar de temperatuur naar toe gaat vrij eenvoudig te bepalen. Dit kan via de temperaturen aan beide zijden van de constructie en de verschillende warmteweerstanden.

Voor het bepalen is aangenomen dat het glas ter plekke van het contactpunt met het buisje dezelfde temperatuur heeft als het water in de leiding. Er is uitgegaan van het gemiddelde van de in- en uitstroomtemperaturen van de buisjes. Verder kunnen alleen de binnenste en de buitenste ruiten worden beschouwd met dit model. De middelste ruit wordt in deze analyse daarom buiten beschouwing gelaten.

In de figuren 5.23 en 5.24 is de temperatuurverdeling gegeven vanaf de leiding tot halverwege het paneel. De hart op hart afstand tussen de leidingen is 160 mm, de lengte van het glas tussen twee leidingen is 150 mm. Vanaf de buitenzijde van de leiding is dus 75 mm van het glasvlak weergegeven.



Figuur 5.23 Glastemperaturen in winter met 15 °C buitenzijde en 21,5 °C binnenzijde



Figuur 5.24 Glastemperaturen in zomer met 21,5 °C buitenzijde en 15 °C binnenzijde

### Bespreking resultaten

In de grafieken is de halve afstand van het glasvlak tussen twee verticale leidingen beschouwd. Ten eerste moet de helling halverwege het paneel worden gecontroleerd om te zien of de aanname terecht was dat men kon volstaan met het beschouwen van een half paneel. Het blijkt dat de helling van de grafiek op deze halve afstand (7,5 cm) zeer klein is, in alle gevallen kleiner dan 0,1 °C/cm. Ook de afwijking tussen de berekende temperatuur op deze afstand en de theoretische limiet is in alle gevallen gering, kleiner dan 0,2 °C of 1 % van de waarde van de limiet. Dit geeft aan dat de aanname dat het paneel als oneindig beschouwd kan worden aanvaardbaar is voor een eerste beschouwing. Het verkregen temperatuurprofiel kan dus in de verticale as op 75 mm worden gespiegeld.

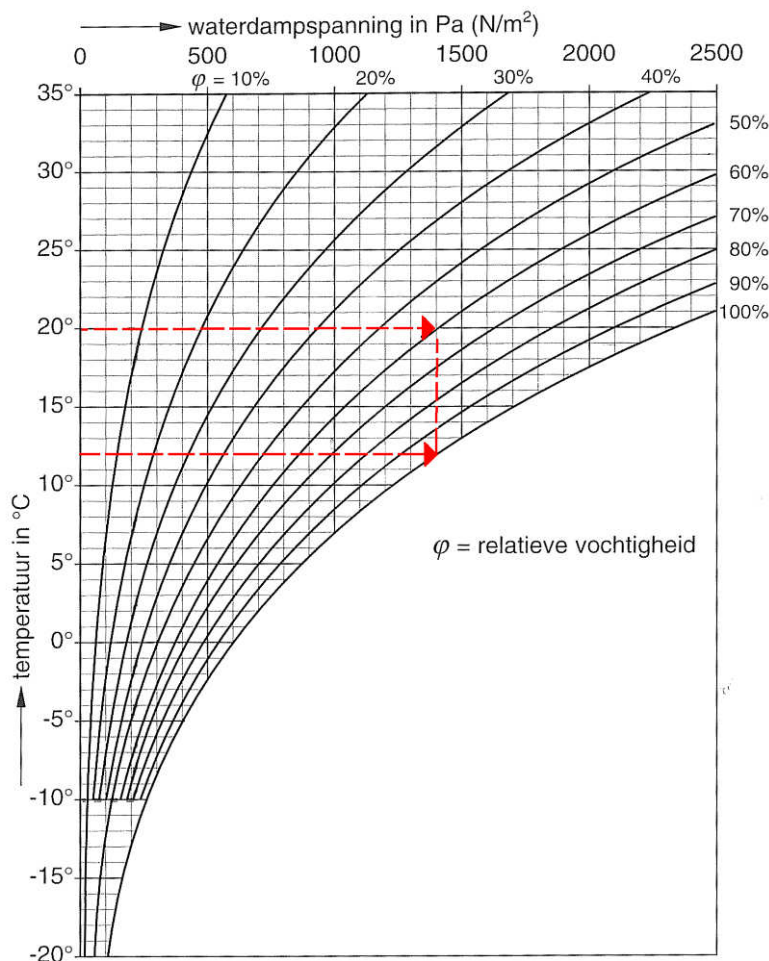
Het blijkt dat de invloed van de temperatuur van een buisje maar een beperkte invloedslengte heeft op het glas. Van het temperatuurverschil ter plaatse van de leiding is in beide gevallen op 30 mm afstand van het buisje minder dan 25% over en op 50 mm afstand van het buisje minder dan 10 %. Wanneer het totale glasvlak van 150 mm wordt beschouwd is de invloed van de buisjes dus gering over 90 mm (kleiner dan 25 % van het maximale temperatuurverschil) en zeer gering over 50 mm van de 150 mm (kleiner dan 10%).

Als men de warmteoverdracht tussen het water en de lucht effectiever wil maken, zal men de tussenafstand dus kleiner moeten maken, bij voorkeur kleiner dan 60 mm. Dit is in het belang van het effectief verwarmen en koelen van de binnenruimte, maar ook voor het effectief afkoelen en opwarmen van het water in de leidingen.

### 5.5.4 Oppervlaktecondensatie

Omdat het glas in de zomer gekoeld wordt met water van ongeveer 12 °C kan er condensatie optreden op het glasoppervlak. Er zal nu worden bepaald bij welke temperatuur en luchtvochtigheid dit gebeurt.

Aan de hand van een aantal eenvoudige Bij een binnentemperatuur van 20 °C treedt condensatie op als de relatieve luchtvochtigheid hoger is dan 60%. Dit is geïllustreerd aan de hand van figuur 5.25. Bij een oppervlaktetemperatuur van 12 °C is de relatieve vochtigheid 100 % (ofwel er treedt condensatie op) als de waterdampspanning hoger is dan 1400 Pa. Deze waterdampspanning wordt bij een luchttemperatuur van 20 °C gehaald als de relatieve luchtvochtigheid 60% of hoger is. Bij een hogere binnentemperatuur treedt eerder condensatie op. Als de binnentemperatuur 22 °C is, treedt condensatie al op bij een relatieve luchtvochtigheid hoger dan 53%. Bij 25 °C treedt condensatie zelfs al op als de relatieve vochtigheid hoger is dan 44%. In de zomer worden de berekende waarden van de luchtvochtigheid vaak gehaald.



*Figuur 5.25 Bepaling van relatieve luchtvochtigheid waarbij condensatie in de zomer optreedt. Grafiek: [29]*

Er moet wel worden opgemerkt dat er in de berekeningen van uit is gegaan dat de oppervlaktetemperatuur van het glas gelijk is aan de temperatuur van het water. Ter plaatse van de leidingen zal dit bij benadering zo zijn, tussen de leidingen in zal de temperatuur van het glas iets hoger zijn en zal minder snel

condensatie optreden. Dit neemt niet weg dat er een grote kans op condensatie is, zeker ter plaatse van de leidingen.

Het is de vraag of deze grote kans op oppervlaktecondensatie aanvaardbaar is. Vanuit esthetisch oogpunt wil men condensatie vaak vermijden, maar ook vanwege praktische overwegingen. In ieder geval deint men hier bij het ontwerpen en maken van details rekening mee houden.

### **5.5.5 Overige aspecten**

Naast de genoemde aspecten moeten er nog enkele andere zaken worden opgemerkt. De Smart Skin is een systeem waarmee zowel gekoeld en verwarmd kan worden en waarmee tegelijkertijd warmte respectievelijk koude gewonnen kan worden. Het is systeem gebruikt volgens de producent weinig energie.

Daar tegenover staan een aantal nadelen. Ten eerste moet men er rekening mee houden dat de Smart Skin erg bepalend is voor het gevelbeeld. Dit hoeft geen nadeel te zijn, maar is wel een overweging die gemaakt moet worden.

Ten tweede zijn er veel aansluitingen nodig voor het systeem. Bij het huidige ontwerp lopen er om de 150 mm drie leidingen door het glas. Elke leiding moet aan boven- en onderzijde worden verbonden met een watervoerende pijp, die in verbinding staat met het regelsysteem dat de waterhoeveelheden regelt. Verder zijn er in het systeem veertien regelkleppen opgenomen, drie waterbuffers en twee warmtewisselaars. Het maken van aansluitingen tussen de verschillende elementen kost tijd en geld. Ook kunnen de verschillende elementen of de aansluitingen falen.

Daarnaast is het regelsysteem erg complex. Het waterdebiet moet zo worden afgesteld dat het water dat de leiding uitstroomt de juiste temperatuur heeft, zodat het kan worden opgeslagen of opnieuw de Smart Skin kan worden doorgevoerd. Als de Smart Skin wordt toegepast wil Eur van Andel de regeling met behulp van microcontrollers verzorgen. In de proefopstelling is de regeling nog niet heel nauwkeurig, in de praktijk zal de afstelling nauwkeuriger moeten zijn.

Over de kosten kan men bij FiwiHex BV nog geen uitspraken doen, maar de glazen Smart Skin is een aanzienlijke investering. Voorlopig zal de Smart Skin vermoedelijk alleen bij aanpassing van bestaande bouw met bepaalde eisen rendabel zijn. De herinrichting van de voormalige diamantbeurs te Amsterdam, waar men de Smart Skin vermoedelijk zal gaan toepassen is hier een voorbeeld van. De ramen moeten vervangen worden en verder mag er niets aan het gebouw veranderd worden. Toch moet er extra vermogen voor verwarming en koeling in het gebouw worden aangebracht.

## **5.6 Conclusies ten aanzien van de Smart Skin glas**

Door de opzet van de metingen is het lastig om het gedrag van de Smart Skin te analyseren en om uit de metingen parameters af te leiden voor simulatie van de Smart Skin. Hierdoor is het afleiden van parameters zeer arbeidsintensief en niet haalbaar in het kader van dit afstudeeronderzoek.

Uit de meetresultaten blijkt dat de regeling die er voor moet zorgen dat de instromende en uitstromende waterstromen de gewenste temperatuur hebben

nog niet optimaal werkt. De stromen hebben niet de gewenste temperatuur en de waarden fluctueren sterk.

De opwarming van het water in de beide spouwen is maar minimaal. Als de regeling beter werkt zal dit veranderen. Dit komt enerzijds doordat de temperatuur van instroom lager is bij koelen en hoger bij verwarmen. Anderzijds kan het debiet worden aangepast.

Toch is de energie die wordt gewonnen door middel van opwarming of afkoeling van het water behoorlijk. In totaal is het met de beide spouwen van de Smart Skin mogelijk om op de beschouwde dag overdag  $144 \text{ W/m}^2$  Smart Skin aan warmte te winnen. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het opgewarmde water alleen nuttig is als het een temperatuur heeft die men later weer kan gebruiken. Het totale koelvermogen van de ruimte is  $80 \text{ W/m}^2$  Smart Skin. Daarbij komt nog de indirecte bijdrage van de middelste spouw. Bij een groot oppervlak Smart Skin is in deze situatie dus een behoorlijk hoog vermogen te behalen. Het is op basis van de beschikbare gegevens niet mogelijk om te beoordelen hoe dit op andere dagen is, zowel in de zomer als de winter

In nachtperiode wordt het glasvlak gebruikt om te verwarmen en er wordt 'koude' gewonnen. Op de tweede meetdag is het temperatuurverschil tussen het in en uitstromende water groter. De ruimteverwarming is  $120 \text{ W/m}^2$  Smart Skin en de afkoeling van het water is ongeveer gelijk. Ook nu is het vermogen weer vrij groot. Het is op basis van de beschikbare gegevens niet mogelijk om te beoordelen hoe dit op andere momenten is.

De temperatuur van het water in de buisjes heeft maar een beperkte invloedslengte over het glas. Als men de warmteoverdracht tussen het water en de lucht effectiever wil maken, zal men de tussenafstand kleiner moeten maken, bij voorkeur kleiner dan 60 mm. Dit is van belang voor het effectief verwarmen en koelen van de binnenruimte, maar ook voor het effectief afkoelen en verwarmen van het water in de leidingen.

Het optreden van oppervlaktecondensatie is zeer waarschijnlijk. Het is de vraag of dit vanuit esthetisch oogpunt wenselijk is. In ieder geval moet men hier bij het ontwerpen en maken van details rekening mee houden.

Daarnaast zijn er nog een aantal zaken waar men rekening mee dient te houden. Zo is de Smart Skin erg bepalend voor het gevelbeeld. Dit hoeft geen nadeel te zijn, maar is wel een overweging die gemaakt moet worden. Ook zijn er veel aansluitingen nodig voor het systeem. Het maken van aansluitingen tussen de verschillende elementen kost tijd en geld. Ook kunnen de verschillende elementen of de aansluitingen falen. Ten derde is het regelsysteem erg complex. In de praktijk zal de afstelling van de regeling nauwkeuriger moeten zijn dan bij de meetopstelling. Ten slotte moet worden opgemerkt dat de glazen Smart Skin een aanzienlijke investering is. Voorlopig zal men alleen bij aanpassing van bestaande bouw met bepaalde eisen rendabel zijn.

## **6 Modelling**

### **6.1 Simulatiepakket**

#### **6.1.1 Inleiding**

Om de werking van een woning met kasconstructie in combinatie met Fiwihex te onderzoeken, zullen computersimulaties uitgevoerd worden. Hiervoor wordt een model opgesteld dat bestaat uit meerdere subsystemen. Deze worden in dit hoofdstuk beschreven. Aan de hand van het opgestelde model wordt gesimuleerd met het programma Matlab-Simulink. Met de resultaten van de simulaties kunnen het functioneren van totale systeem, het comfort in de kas en de efficiëntie van het systeem onderzocht worden.

#### **6.1.2 Matlab-Simulink**

Matlab is een rekenprogramma van The Mathworks, het is zeer geschikt voor het rekenen met matrices. In combinatie met Matlab kan men de toolbox Simulink gebruiken. Simulink is een simulatieprogramma, waarmee dynamische processen gesimuleerd kunnen worden. Het programma maakt hiervoor gebruik van Matlab. Het maken van een model in Simulink gebeurt met behulp van modellen in de vorm van blokschema's. Men kan ondermeer gebruik maken van blokken voor constanten, matrices, functies en logische operaties.

### **6.2 Het model**

#### **6.2.1 Opbouw van het model**

Het model van de KlimaatPlusWoning wordt opgebouwd uit een aantal subsystemen. Deze kunnen apart van elkaar worden gebruikt, maar ook als geheel. Er zijn drie verschillende subsystemen: Kas, Woning en Fiwihex.

De KlimaatPlusWoning wordt gesplitst in een kasgedeelte en een woninggedeelte. De subsystemen Kas en Woning worden los van elkaar geschematiseerd, maar er is wel interactie mogelijk. De Fiwihex wordt gemodelleerd als een apart subsysteem. Dit is een hulpsysteem, het regelt wanneer de Fiwihex werkt en bepaalt onder meer het geleverde vermogen. De verschillende subsystemen wisselen gegevens uit en kunnen worden gecombineerd tot één model.

In paragraaf 6.7 wordt de interactie tussen de verschillende subsystemen beschreven.

#### **6.2.2 Aannames en uitgangspunten**

Voor het modelleren zijn de aannames en uitgangspunten van belang. In hoofdstuk 3 werden de belangrijkste aannames en uitgangspunten van het onderzoek beschreven. In deze paragraaf worden de uitgangspunten en aannames beschreven die specifiek voor het model gelden.

- Er wordt gesimuleerd met klimaatdata voor het referentiejaar 1964. Dit is een gebruikelijk referentiejaar bij gebouwsimulaties. Er wordt gebruik gemaakt van de luchttemperatuur en van de zonstraling op noordelijk, oostelijk, zuidelijk, westelijk en horizontaal georiënteerde vlakken.

- Bij simulatie wordt de dichtheid van water en lucht wordt constant verondersteld. Dit geldt ook voor de dichtheid van de constructiematerialen en de grond. Dit kan omdat de temperatuurverschillen relatief klein zijn. Deze materialen worden verder opgevat als zijnde homogeen.
- Om te voorkomen dat het model te complex wordt, zal stralingsoverdracht tussen interne oppervlakken bij de zowel de kas als de woning sterk vereenvoudigd meegenomen worden. Er wordt gerekend met een gecombineerde warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling. Straling tussen de vlakken in de ruimte wordt op deze manier indirect meegenomen via de lucht. De invloed van de gekozen waarde voor de overdrachtscoëfficiënt zal nader onderzocht worden.
- Voor zowel de kas als de woning wordt stralingsuitwisseling tussen het buitenoppervlak en omliggende grond en gebouwen niet meegenomen. De omliggende bebouwing staat volgens het ontwerp op ruime afstand van de KlimaatPlusWoningen.
- Om het model niet te complex te maken wordt met betrekking tot ventilatie en infiltratie in kas en woning uitgegaan van een constante luchthoeveelheid gedurende het hele jaar.
- Er wordt verondersteld dat de woningscheidende wanden tussen de woningen goed geïsoleerd zijn. De warmteoverdracht door deze wand zal relatief klein zijn en wordt verwaarloosd.
- Met betrekking tot de wand tussen het kasgedeelte en het woninggedeelte zijn geen gegevens bekend. De invloed van de isolatiewaarde van de wand en van luchtuitwisseling tussen kas en woning wordt kort beschouwd.
- Zoals in hoofdstuk 3 werd gesteld zal er van worden uitgegaan dat de bronnen van de WKO-installatie een constante temperatuur hebben. Voor de warme bron wordt uitgegaan van een temperatuur van 25 °C en voor de koude bron van 8 °C. Deze aanname is gebaseerd op de beschrijving van het concept De Zonneterp [9] en zal na simulatie worden geëvalueerd.
- De grondtemperatuur op een diepte van tien meter onder de grond is over het gehele jaar nagenoeg constant. Er wordt van uitgegaan dat de grond op deze diepte een temperatuur heeft van 12 °C. Voor diepere grondlagen wordt van dezelfde temperatuur uitgegaan.

De aannames en uitgangspunten met betrekking tot de subsystemen worden uiteengezet bij de beschrijving van de schematisering in de paragrafen 6.4, 6.5 en 6.6.

## **6.3 Opbouw van de subsystemen**

### **6.3.1 Basis van de subsystemen**

In deze paragraaf wordt de basisopzet van de subsystemen besproken. Elk subsysteem bestaat uit meerdere knopen, het hulpsysteem FiwiHex uitgezonderd. Voor al deze knopen wordt een energiebalans opgesteld. Per subsysteem zal de definitie van de knopen in de volgende paragrafen kort worden benoemd. Alle knopen hebben een bepaalde thermische massa en tussen de knopen vindt warmteoverdracht plaats.

Wanneer de warmtebalans voor elke knoop van een subsysteem wordt opgeschreven kunnen deze vergelijkingen samen als matrixvergelijking worden geschreven:

$$\mathbf{MT}' + \mathbf{ST} = \mathbf{Q}.$$

*vergelijking 6.1*

Hierbij is  $\mathbf{T}$  een vector met temperaturen van de verschillende knopen,  $\mathbf{M}$  de massamatrix,  $\mathbf{S}$  de stijfheidsmatrix en  $\mathbf{Q}$  is een vector met de warmtelasten voor elke knoop.

Bijlage 10 illustreert hoe vergelijking 6.1 is af te leiden voor een zeer eenvoudig model met twee knopen. Hierbij is goed te zien hoe de verschillende matrices er uit komen te zien. Bij een model met meerdere knopen werkt dit op dezelfde manier.

Het oplossen van vergelijking 6.1 gebeurt met Matlab-Simulink. Bij elke tijdstap wordt de vergelijking opgelost voor alle subsystemen, behalve voor hulpsysteem FiwiHex.

De massamatrix, de stijfheidsmatrix en de vector met warmtelasten verschillen per subsysteem. De algemene werkwijze om de waarden te bepalen zal in de komende drie paragrafen worden omschreven.

### 6.3.2 Bepaling Massamatrix

De diagonaal van de massamatrix  $\mathbf{M}$  bestaat uit de thermische massa's van alle knopen. De andere elementen in de matrix zijn gelijk aan nul. Dit is ook te zien in bijlage 10. De thermische massa van de knopen moet dus bepaald worden, deze is te bepalen met de volgende formule:

$$M = V \cdot \rho \cdot c,$$

*vergelijking 6.2*

waarbij

- M = thermische massa in J/K
- V = volume in m<sup>3</sup>
- $\rho$  = soortelijke dichtheid in kg/m<sup>3</sup>
- c = soortelijke warmte in J / Kg · K

### 6.3.3 Bepaling stijfheidsmatrix

De stijfheidsmatrix  $\mathbf{S}$  geeft de warmteoverdracht tussen de verschillende knopen. In bijlage 10 is te zien hoe de  $\mathbf{S}$  opgesteld wordt. Het is voor het opstellen van de matrix dus noodzakelijk om de relaties tussen alle knopen te bepalen.

Er bestaan een aantal verschillende manieren waarop warmteoverdracht tussen de knopen plaats kan vinden. Dit zijn conductie, convectie, stralingsoverdracht en uitwisseling van lucht. Warmteoverdracht tussen het kasgedeelte en het woongedeelte is een combinatie van al deze vormen. De verschillende manieren van warmteoverdracht worden nu kort omschreven.

**- Conductie**

Wanneer er temperatuurverschillen bestaan in een vast materiaal treedt conductie of geleiding op. In de beschouwde situaties is de conductie in lucht en water verwaarloosbaar klein in verhouding met convectie. Voor de warmteoverdracht door conductie geldt:

$$q_g = \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta T \cdot A, \quad \text{vergelijking 6.3}$$

Met

$q_g$  = warmteoverdracht door conductie (geleiding) in W

$\lambda$  = warmtegeleidingscoëfficiënt in  $W / m \cdot K$

$d$  = dikte van het materiaal in m

$\Delta T$  = temperatuurverschil over de constructie in K of °C

$A$  = Oppervlakte van de constructie in  $m^2$

Omdat het warmteverschil volgt uit de matrixvergelijking, is de term in de stijfheidsmatrix tengevolge van conductie:  $\frac{\lambda}{d} \cdot A$ .

**- Convectie**

Conductie treedt via stroming van de lucht en water tussen twee oppervlakken met een verschillende temperatuur. De warmteoverdracht is te schematiseren aan de hand van de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt  $\alpha_c$  :

$$q_c = \alpha_c \cdot A \cdot \Delta T, \quad \text{vergelijking 6.4}$$

waarbij

$q_c$  = warmteoverdracht door convectie in W

$\alpha_c$  = convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt  $W / m^2 \cdot K$

In het model van de kas en de woning wordt uitgegaan van een  $\alpha_c$  van 2,7  $W / m^2 \cdot K$  voor vlakken binnen de ruimte en 20  $W / m^2 \cdot K$  voor de gevelvlakken [30].

**- Stralingsoverdracht**

Straling tussen twee vlakken treedt op wanneer vlakken een verschillende temperatuur hebben. De warmteoverdracht door straling is evenredig met de vierde macht van het temperatuurverschil. Bij relatief kleine temperatuurverschillen is linearisering van de warmteoverdracht mogelijk volgens:

$$q_s = \alpha_s \cdot A \cdot \Delta T \cdot \theta \quad \text{vergelijking 6.5}$$

met

$q_s$  = warmteoverdracht door straling in W

$\alpha_s$  = warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling  $W / m^2 \cdot K$

$\theta$  = zichtfactor tussen de beide vlakken

Zoals in paragraaf 6.2 is vermeld, wordt straling tussen interne oppervlakken bij de modellering sterk vereenvoudigd. De invloed van interne straling wordt meegenomen door de waarde van  $\alpha_{c,s;bi}$  in de binnensituatie aan te passen. De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt  $\alpha_{c,s;bi}$  wordt gesteld op  $8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , wat een gebruikelijke waarde is bij simulaties. De invloed van deze waarde zal nog worden onderzocht.

### - Luchtuitwisseling

Deze bestaat uit ventilatie en infiltratie. Door ventilatie met buitenlucht wordt warmte uitgewisseld tussen binnen en buiten. In het model wordt de ventilatie gekarakteriseerd door het ventilatievoud, dat aangeeft hoe vaak de lucht in de ruimte ververscht wordt. Een ventilatievoud van  $1 \text{ u}^{-1}$  geeft aan dat het ventilatiedebiet in een uur gelijk is aan het volume van de kas dan wel het volume van de woning.

Infiltratie is de luchthoeveelheid die een gebouw onbedoeld in of uit stroomt door kieren en naden. In het artikel 5.9 van het Bouwbesluit is een waarde voor de infiltratie gegeven [31]. Deze genormeerde  $q_{v,10}$  waarde geeft de infiltratie bij drukverschil van 10 Pa tussen binnen en buiten en bedraagt  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit is echter een bovengrens, voor nieuwbouwwoningen zal de infiltratie veel kleiner zijn.

De totale warmte-uitwisseling is dus:

$$q_{wu} = \left( \frac{n \cdot V}{3600} + I \right) \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T, \quad \text{vergelijking 6.6}$$

met

$$\begin{aligned} n &= \text{ventilatievoud per uur in } \text{u}^{-1} \\ V &= \text{volume in } \text{m}^3 \\ I &= \text{infiltratie in } \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

De term die men moet invullen in de stijfheidsmatrix  $\mathbf{S}$  is  $\left( \frac{n \cdot V}{3600} + I \right) \cdot \rho \cdot c$ . De term  $\Delta T$  volgt namelijk al uit vermenigvuldiging van  $\mathbf{S}$  en  $\mathbf{T}$  in vergelijking 6.1.

Als de waarden voor de warmte-uitwisseling tussen alle knopen is bepaald kan de Stijfheidsmatrix worden opgesteld. Dit gebeurt met behulp van Matlab.

### - Warmteoverdracht tussen Kas en Woning

Naast de beschreven relaties kan in het model ook warmteoverdracht opgenomen worden tussen de kas en het woongedeelte. Dit is een combinatie van alle beschreven mechanismen van warmteoverdracht. Aan de hand van de voorgaande formules is de grootte van de warmteoverdracht tussen beide delen te benaderen. De warmte-uitwisseling kan worden benaderd door het temperatuurverschil te vermenigvuldigen met de volgende factor:

$$A \cdot \left( \frac{1}{\frac{d_{tw}}{\lambda_{tw}} + \frac{1}{\alpha_{c,s;bi}}} \right) + Q_I \cdot \rho \cdot c \quad \text{vergelijking 6.7}$$

Hierbij

$\lambda_{tw}$  = warmtegeleidingscoëfficiënt tussenwand in  $W / m \cdot K$

$d_{tw}$  = dikte tussenwand in m

$\alpha_{c,s;bi}$  = warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling in  $W / m^2 \cdot K$

$Q_l$  = gemiddeld debiet luchtuitwisseling tussen woning en kas

De grootte van  $Q_l$  hangt af van het temperatuurverschil tussen de beide ruimten. Het luchtdebiet kan worden bepaald naar analogie van het debiet bij een enkelvoudige ventilatieopening. Tussen de beide delen van de kas wordt een fictieve opening aangenomen, de grootte hiervan wordt gebaseerd op een aangenomen percentage kieren. Op deze manier wordt een indicatie gegeven voor de luchtstroom tussen de woning en de kasruimte. Het debiet  $Q_l$  wordt dan bepaald via:

$$Q_l = 0,2 \cdot A \cdot \left( \frac{g \cdot h \cdot \Delta T}{T} \right)^{0,5}, \quad \text{vergelijking 6.8}$$

Waarbij

A = fictieve opening tussen beide delen in  $m^2$

g = valversnelling in  $m/s^2$

h = fictieve hoogte opening in m

$\Delta T$  = temperatuurverschil tussen woning en kas in K

T = temperatuur woning in K

Met behulp van de afgeleide formules is het mogelijk de warmteoverdracht tussen de woning en de kas te benaderen. De grootte van deze warmteoverdracht is echter sterk afhankelijk van de warmteweerstand van de tussenwand en de luchtuitwisseling tussen de kas en de woning. Wanneer de kas en de woning ruimtelijk los van elkaar worden gerealiseerd, valt de term in het geheel weg. Om deze reden zal de warmte-uitwisseling tussen woning en kas niet betrokken worden in de simulaties. Om toch een indruk te geven van de grootte van de warmte-uitwisseling, wordt in paragraaf 6.5 voor een specifieke situatie bepaald hoe groot de warmte-uitwisseling is.

### 6.3.4 Warmtelasten

Er zijn verschillende warmtebronnen die beschouwd moeten worden. Dit zijn instraling door de zon en interne warmtebronnen. Interne warmtebronnen kunnen personen, verlichting en elektrische apparaten zijn. Op de interne warmtebronnen wordt per subsysteem ingegaan.

Voor de zoninstraling wordt uitgegaan van klimaatgegevens van het referentiejaar 1964. Dit is een gebruikelijk referentiejaar voor gebouwsimulaties. De gebruikte klimaatfile geeft het totaal van directe zonnestraling en indirecte zonnestraling voor vlakken op het noorden, oosten, zuiden, westen en voor horizontaal georiënteerde vlakken.

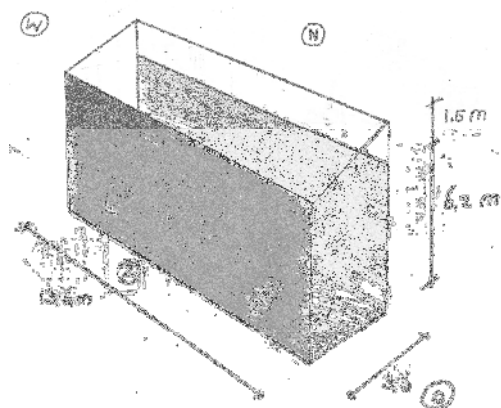
## 6.4 Substelsiem Kas

### 6.4.1 Schematisering

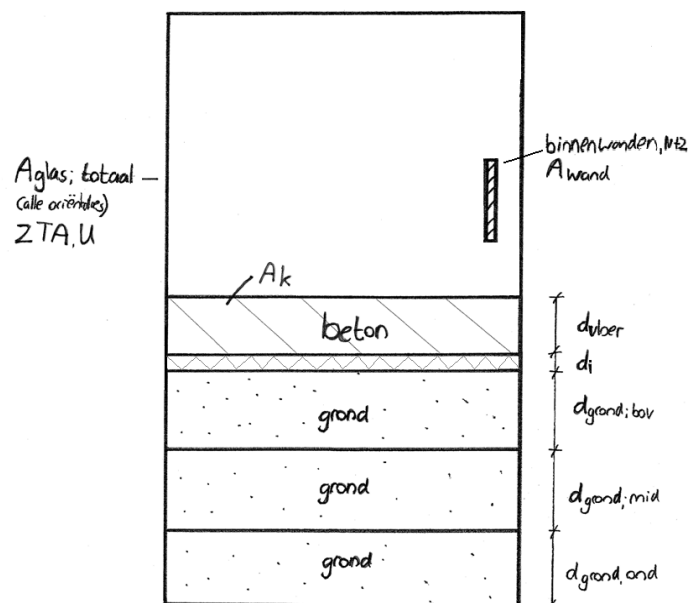
Het kasgedeelte is geschematiseerd tot een rechthoekige ruimte met schuin dak. Figuur 6.1 geeft de geometrie weer. De oost- en westgevel bestaan volledig uit glas, evenals het dak. De noordgevel grenst aan het woongedeelte en de zuidgevel grenst aan de aanliggende woning. Beide zijgevels grenzen niet aan het buitenklimaat, afgezien van het dak en een strook in de noordgevel die boven de woning uitsteekt. Volgens het ontwerp bevindt een deel van de kas zich boven de entree en berging. De entree en de berging worden ter vereenvoudiging bij de modellering geschematiseerd als onderdeel van de kas.

Voor het thermisch comfort in de kas is een grote thermische massa gunstig. Deze massa werkt als buffer voor warmte, waardoor kortstondige grote warmtelasten tot minder grote temperatuurpieken zullen leiden. Uit dit oogpunt is het voordelig voor het kasklimaat als isolatiewaarde van de vloer niet te hoog is. De grond onder de vloerconstructie draagt dan bij aan de thermische massa.

De grond onder de vloer wordt dus meegenomen in de simulatie. Er worden verschillende grondlagen meegenomen bij het modelleren, om de invloed van de grond goed in beeld te brengen. Ook de wanden aan de zijde van het woongedeelte en de woningscheidende wand worden aangenomen als zijnde van beton. Deze wanden grenzen beiden niet aan het buitenklimaat. Figuur 6.2 geeft schematisch aan hoe de kas wordt gemodelleerd.



Figuur 6.1 Schematisering van de geometrie van de kas



Figuur 6.2 Schematische weergave van het kasgedeelte

Voor de vloerconstructie wordt uitgegaan van betonnen platen met aan de onderzijde isolatiemateriaal. Er wordt voor de isolatiewaarde van de totale constructie uitgegaan van de minimale eis voor verwarmde ruimten volgens het Bouwbesluit. Deze waarde bedraagt  $2,5 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Zoals in hoofdstuk 3 werd

gesteld wordt de kas opgevat als ruimte met een tussenklimaat, wat betekent dat de kas geen verwarmde ruimte is volgens het Bouwbesluit. Men zou deze waarde dus nog kunnen verlagen. Hierdoor wordt de meewerkende massa in de kas groter. Dit zal wel resulteren in lagere vloertemperaturen gedurende een deel van het jaar, wat een negatieve invloed heeft op het thermisch comfort. Het effect van een lagere  $R_c$  zou onderzocht kunnen worden. In dit rapport wordt deze waarde echter gezien als uitgangspunt.

Verder wordt er zoals eerder werd vermeld aangenomen dat 90% van de oppervlakte van gevels en dak van de kas uit glas bestaat en de overige 10% van het oppervlak uit frame. Met betrekking tot het frame wordt aangenomen dat de warmteweerstand minimaal gelijk is aan de warmteweerstand van het glas.

De belangrijkste bouwkundige en bouwfysische gegevens van het kasgedeelte zijn weergegeven in tabel 6.1.

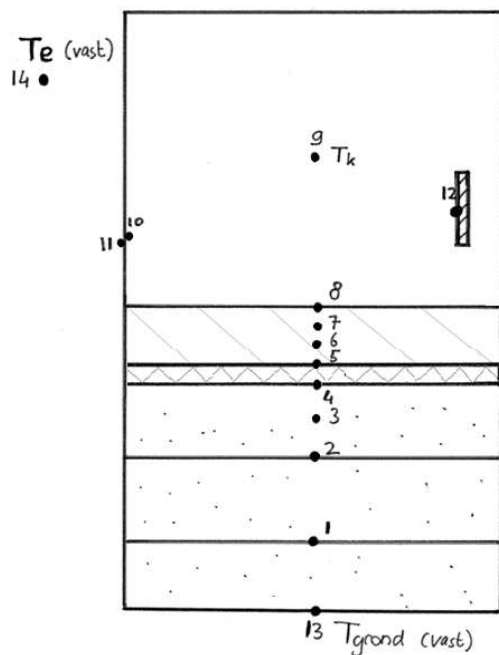
Bouwkundige en Bouwfysische aspecten	Symbool	Aangenomen waarde	Eenheid
Totaal volume kasruimte	V	340,3	$m^3$
Totaal gebruiksoppervlak kasruimte	$A_{\text{gebruik}}$	77,9	$m^2$
Vloeroppervlak begane grond	$A_{\text{vloer}}$	49,0	$m^2$
Warmteweerstand vloerconstructie	$R_{c;\text{vloer}}$	2,5	$M^2K/w$
Totaal glasoppervlak	$A_{\text{glas;totaal}}$	116,3	$M^2$
Warmtedoorgangscoefficiënt glas	U	5,7	$W/m^2K$
Totaal oppervlak frame	$A_{\text{frame}}$	12,9	$m^2$
Warmteweerstand frame	$R_{c;\text{frame}}$	0,18	$M^2K/w$
ZTA glas	ZTA	0,75	-
Oppervlakte tussenwanden	$A_{\text{wand}}$	63,7	$m^2$

Tabel 6.1 Bouwkundige en Bouwfysische gegevens kasgedeelte

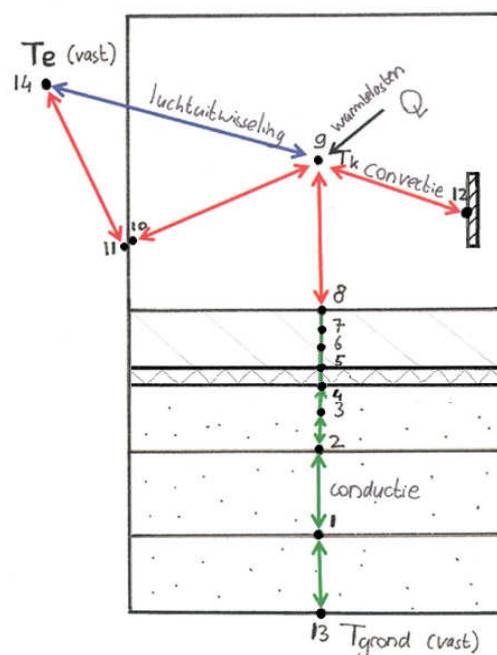
Het kasgedeelte wordt onderverdeeld in verschillende knopen. De toewijzing van knopen is weergegeven in figuur 6.3. Om de invloed van de grond goed mee te nemen wordt deze onderverdeeld in verschillende lagen met meerdere knopen. Dit zelfde geldt voor de betonnen vloer. De totale dikte van de grondlagen is 10 meter, de dikte van de vloer 250 mm. De knooppunten liggen in principe op de materiaalovergangen, maar enkele andere knopen liggen binnen de lagen. Dit is gedaan om nog een beter beeld te krijgen van het gedrag van de constructie, de resultaten worden hierdoor nauwkeuriger. Knooppunt 9 geeft de lucht in de kas weer. Deze temperatuur is een belangrijke parameter bij de simulatie.

De knooppunten 10 en 11 liggen aan de binnen- respectievelijk buitenzijde van het glas. Omdat in de kas een tussenklimaat heerst wordt volstaan met enkel plas. Knooppunt 12 ligt aan de binnenzijde van de binnenwanden. Deze knoop geeft de oppervlaktetemperatuur weer. Voor het bepalen van de actieve thermische massa is de meewerkende dikte<sup>1</sup> van de wanden van belang. Hiervoor wordt uitgegaan van een dikte van 100 mm. Knoop 13 ligt aan de onderkant van de onderste grondlaag en knoop 14 geeft de buitentemperatuur. De temperaturen van deze twee knopen worden opgelegd, dit zijn zogenaamde vaste knopen. Zoals in paragraaf 6.2 werd gesteld is aangenomen dat de grondtemperatuur op een diepte van tien meter onder de grond het gehele jaar

12 °C is. Voor de buitentemperatuur wordt gebruik gemaakt van de waarden in het referentiejaar 1964.



Figuur 6.3 Toewijzing van knopen voor de modellering van het kasgedeelte



Figuur 6.4 Schematische weergave verbanden tussen de knopen

Om het verloop van de temperaturen te simuleren is het nodig om een initiële temperatuur voor alle toegekende knopen van het model te definiëren. Voor alle constructieonderdelen wordt uitgegaan van een initiële temperatuur van 20 °C. Voor de grondlagen wordt gerekend met een initiële temperatuur van 12 °C.

### Warmteoverdracht tussen de knopen

In paragraaf 6.2.3 werden de mogelijke mechanismen van warmteoverdracht tussen de knopen omschreven. In het subsysteem Kas is sprake van conductie, convectie en luchtuitwisseling. De invloed van straling wordt indirect meegenomen doordat extra warmteoverdracht tussen de vlakken in de ruimte en de lucht wordt meegenomen. De verschillende overdrachtsmechanismen zijn schematisch weergegeven in figuur 6.4. Conductie is met groen aangegeven, convectie met rood en luchtuitwisseling met blauw.

Zoals in paragraaf 6.2 werd gesteld wordt er gerekend met een gecombineerde warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling. Bij luchtuitwisseling tussen de kas en de buitenlucht zijn het ventilatievoud en de hoeveelheid infiltrerende lucht van belang. De gebruikte waarden zullen nu kort worden toegelicht.

#### - Ventilatie

Zoals in paragraaf 6.2 werd gesteld wordt gerekend met constante waarden voor ventilatie en infiltratie gedurende het hele jaar. Dit is een vereenvoudiging van de werkelijkheid. In de zomer is veel ventilatie gunstig voor het thermisch comfort om de temperatuur in de kas laag te houden. Het ventilatievoud moet ook niet te hoog worden omdat dit de

winning van zonnewarmte negatief beïnvloedt. Er wordt aangenomen dat het ventilatievoud in de zomer ongeveer  $4 \text{ u}^{-1}$  is. In de winter is een hoog ventilatievoud juist ongunstig omdat er door ventilatie warmte verloren gaat. Het ventilatievoud zal in wintersituatie lager zijn, er wordt uitgegaan van een waarde van ongeveer  $1 \text{ u}^{-1}$ . Omdat in het model wordt gerekend met een constante zal worden uitgegaan van het gemiddelde van deze waarden, er zal gerekend worden met een ventilatievoud van  $2 \text{ u}^{-1}$ . Dit betekent dat er het gehele jaar een ventilatiedebiet van  $680 \text{ m}^3/\text{u}$  wordt gerealiseerd.

- Infiltratie

Zoals in paragraaf 6.2.3 werd gesteld geeft het Bouwbesluit een maximale waarde voor de infiltratie in woningen. Deze genormeerde  $q_{v;10}$  waarde bedraagt  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Omdat de kas niet zo goed luchtdicht zal worden gebouwd als nieuwbouwwoningen, wordt voor de kas gerekend met deze  $q_{v;10}$  waarde. Dit komt neer op  $720 \text{ m}^3/\text{u}$ .

### Warmtelasten

Zoals eerder omschreven zijn ook de warmtelasten nodig om het verloop van de temperaturen te bepalen. De belangrijkste warmtelast is instraling door de zon. De buitenvlakken zijn helemaal van glas en grenzen aan alle oriëntaties. Deze vlakken bestaan zoals eerder werd vermeld wel gedeeltelijk uit een frame, dat geen zonnestraling doorlaat. Met betrekking tot het frame is aangenomen dat de warmteweerstand gelijk is aan de warmteweerstand van het glas.

Er wordt aangenomen dat het glas 10 % van de opvallende zonnewarmte absorbeert. Van de warmte die de ruimte binnenkomt, zal een gedeelte de kas direct weer verlaten in de vorm van kortgolvlige straling. Er wordt aangenomen dat dit percentage ook ongeveer 10 % is. De overige warmte zal zorgen voor opwarming van de wanden, de vloer en de kaslucht. Aan de hand van de geometrie is geschat welk gedeelte van straling op elk constructiedeel valt. Dit is weergegeven in tabel 6.2.

	Deel van binnengekomen warmte (%)
Verlaat kas direct weer als kortgolvlige straling	10
Zorgt voor opwarming wanden	40
Zorgt voor opwarming vloer	30
Zorgt voor opwarming lucht	20
<b>Totaal</b>	<b>100</b>

Tabel 6.2 Bestemming van de binnengekomen zonnewarmte

In de kas is de interne warmteproductie afkomstig van personen, verlichting en elektrische apparatuur. Hiervoor wordt voor zowel de kas als de woning gerekend met de gemiddelde warmteproductie in woningen die de Nederlandse norm NEN 5128 geeft in bijlage E [32]. De norm geeft gemiddelde waarden voor de warmtelast per vierkante meter gebruiksoppervlak, voor verschillende tijdstippen op de dag. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen weekend en doordeweeks en ook niet tussen de verschillende seizoenen. De invloed hiervan zal gering zijn. De gebruiksoppervlakte van het kasgedeelte is  $68 \text{ m}^2$ . Dit betekent dat de warmtelast in de kas varieert tussen 270 en 740 W.

Tijdstip	Warmteproductie in verwarmde zone [W/m <sup>2</sup> ]
0.00 - 7.00	4
7.00 - 17.00	4,6
17.00 - 23.00	10,9
23.00 - 24.00	4

Tabel 6.3 Gemiddelde warmtelast ten gevolge van personen, apparaten en verlichting [31]

Het vermogen dat de FiwiHex levert voor verwarming of koeling is ook een warmtelast. Deze wordt bepaald door het subsysteem FiwiHex.

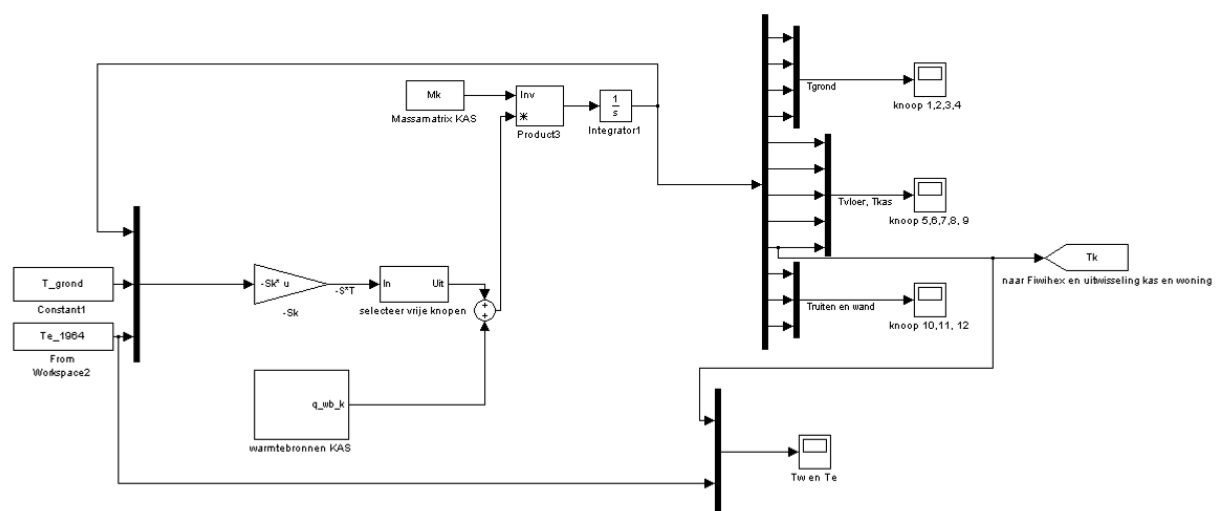
### 6.4.2 Model in Simulink

Met behulp van Matlab worden de initialisatiegegevens voor het model ingelezen en de matrices **M**, **S** en **Q** worden bepaald. Met Simulink wordt vervolgens het model gemaakt. De grafische weergave van het subsysteem Kas is weergegeven in de figuren 6.5, 6.6 en 6.7 en wordt nu beknopt toegelicht.

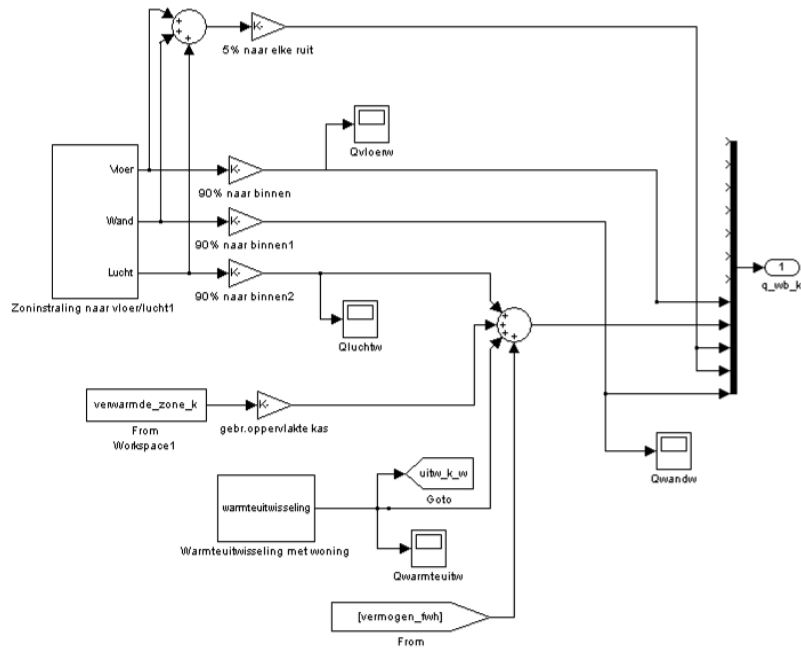
De basis van het model is de eerder genoemde formule  $MT' + ST = Q$ . Deze kan eenvoudig worden omgeschreven naar:

$$T_{n+1} = \int_{t_n}^{t_{n+1}} M^{-1}(-ST_n + Q) dt \quad \text{vergelijking 6.9}$$

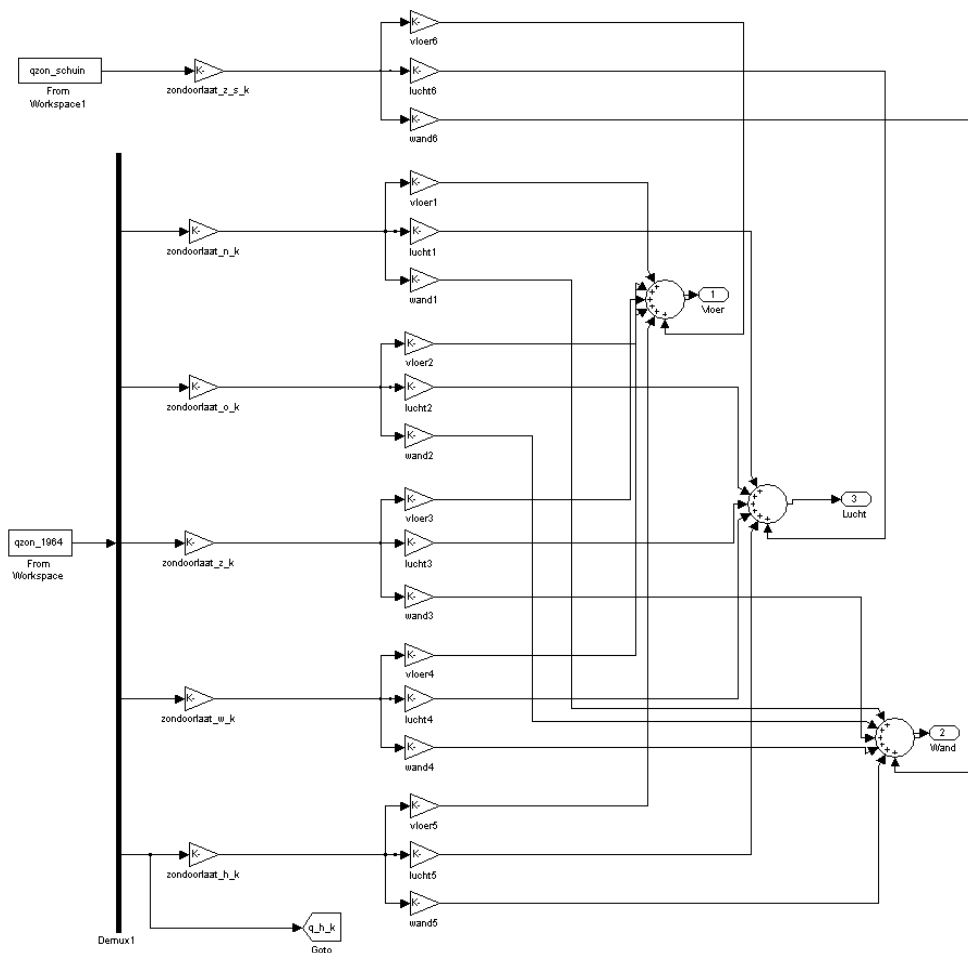
Deze formule vormt de basis van het model. Er moet een initiële temperatuurvector worden gedefinieerd, deze wordt vermenigvuldigd met  $-S$  en hierbij wordt de vector **Q** opgeteld. De som wordt vervolgens vermenigvuldigd met de inverse van **M** en de integraal wordt bepaald. Het resultaat is een vector met temperaturen van de gedefinieerde knopen na de eerste tijdstap. Deze vector is de basis voor de volgende tijdstap. Voor elke tijdstap wordt dit proces herhaald.



Figuur 6.5 Simulink-model voor het subsysteem Kas

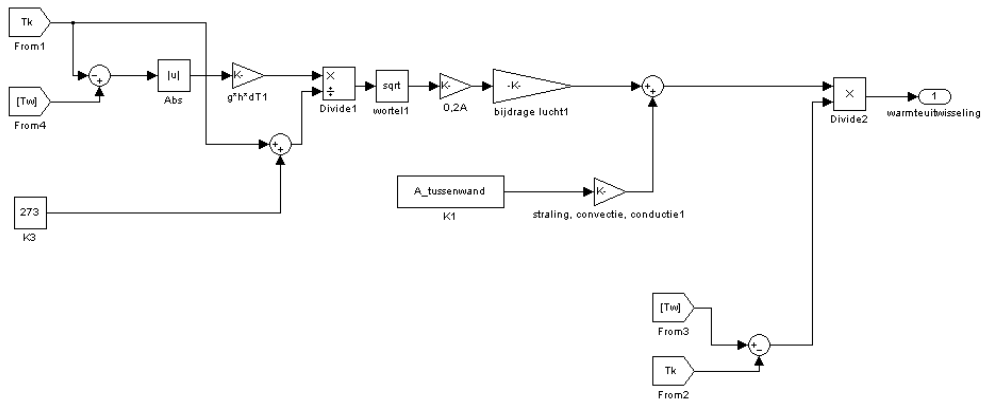


Figuur 6.6 Block Warmtebronnen, subsysteem van Kas



Figuur 6.7 Block Zoninstraling, subsysteem van Warmtebronnen

De warmte-uitwisseling tussen de kas en de woning wordt bepaald met een apart subsysteem. Dit is weergegeven in figuur 6.8. De hoeveelheid uitgewisselde warmte wordt in het model geschaard onder interne warmtelasten. De warmte-uitwisseling hangt of van het temperatuurverschil tussen beide ruimten. De invloed van deze term wordt beschouwd bij het subsysteem Woning.



Figuur 6.8 Block Warmte-uitwisseling kas en woning, subsysteem van Warmtebronnen

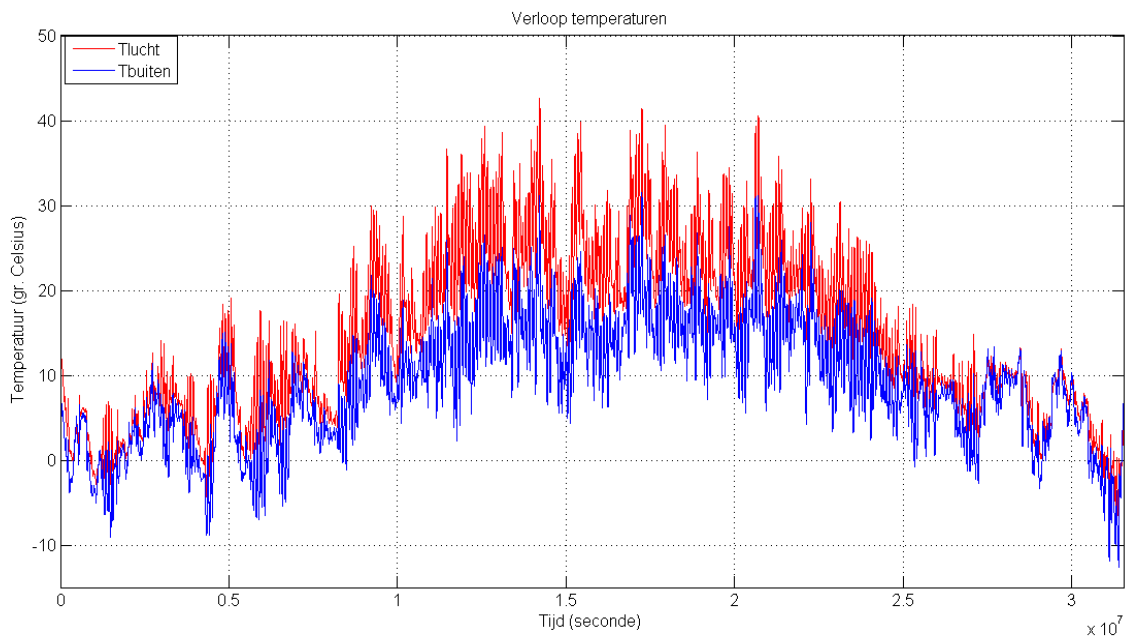
### 6.4.3 Testen

Het model dat werd beschreven in de voorgaande paragrafen is uitgebreid onderzocht. In deze paragraaf worden de testresultaten van het subsysteem kas beschreven en geanalyseerd. Ook worden de warmtestromen in beeld gebracht en gebruikt om het model te controleren. Daarnaast wordt de invloed van de belangrijkste parameters onderzocht.

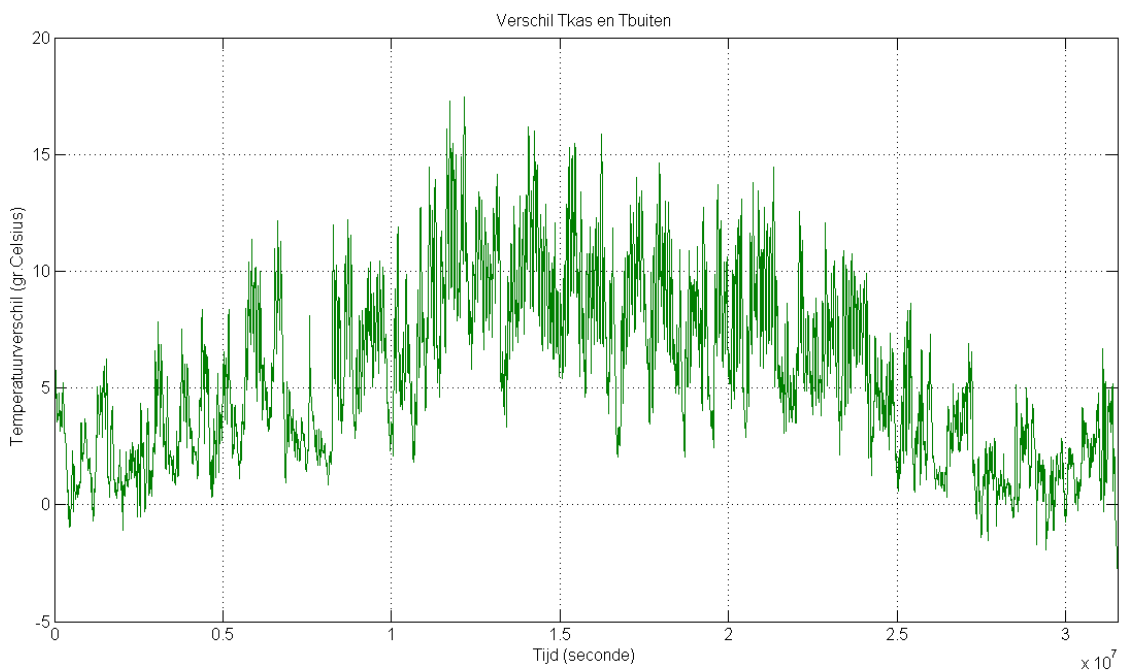
### Resultaten

Figuur 6.9 geeft de buitentemperatuur en de berekende gemiddelde temperatuur in de kas weer gedurende het gehele jaar. Bij de simulatie is gerekend voor de kas met warmtebronnen, maar zonder warmte-uitwisseling met de woning. Voor het ventilatievoud is uitgegaan van het genoemde ventilatievoud van  $2 \text{ u}^{-1}$  en voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling is  $8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  aangehouden. De invloed van deze parameters zal nog onderzocht worden.

De kastemperatuur vertoont grote verschillen en ligt tussen  $-3 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $43 \text{ }^\circ\text{C}$ . De luchttemperatuur in de kas is vrijwel altijd hoger dan de buitentemperatuur. Gemiddeld over het jaar is de temperatuur in de kas  $15,5 \text{ }^\circ\text{C}$



Figuur 6.9 Verloop buitentemperatuur en kastemperatuur ( $n = 2 \text{ u}^{-1}$ ,  $\alpha = 8 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

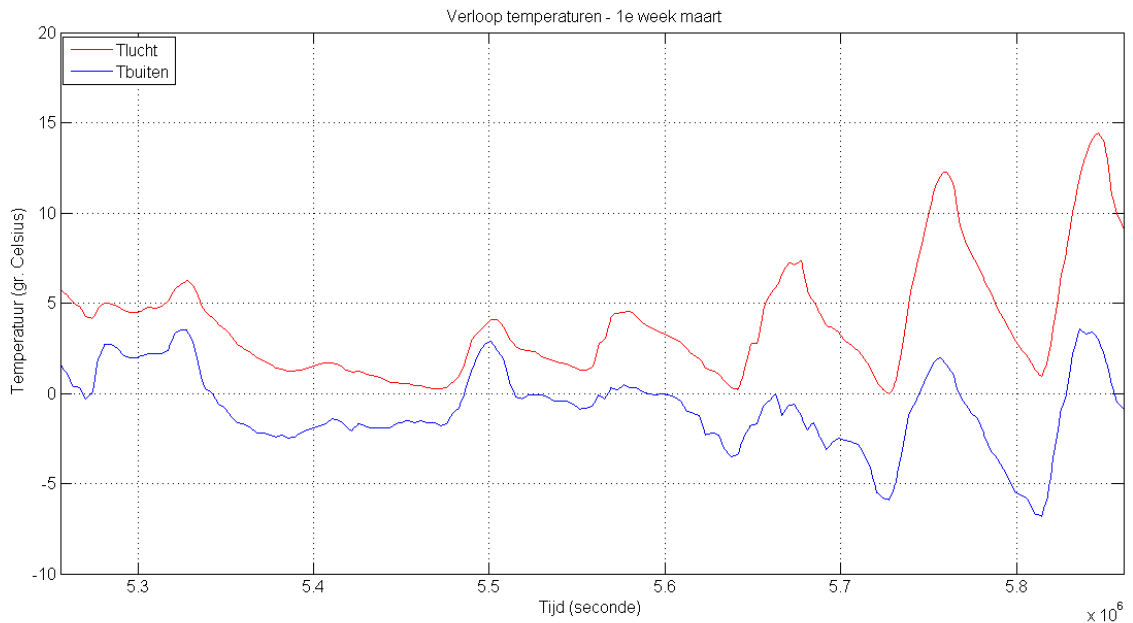


Figuur 6.10 Verschil tussen kastemperatuur en buitentemperatuur (uurlijks,  $n = 2 \text{ u}^{-1}$ ,  $\alpha = 8 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

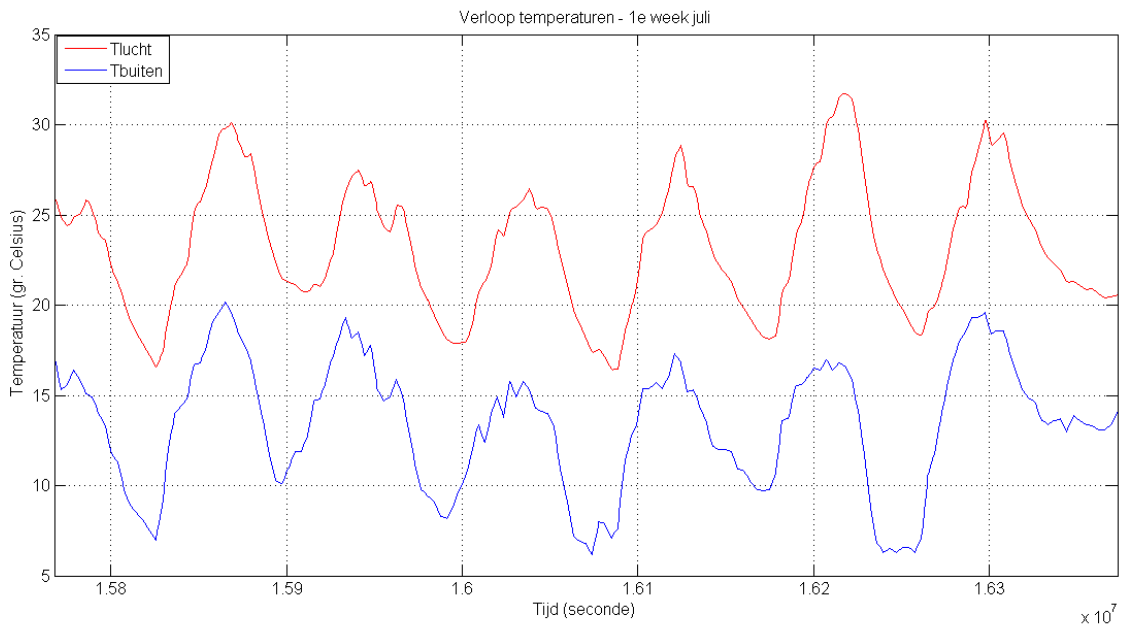
Tussen 23.00 en 7.00 zijn er over het algemeen geen mensen in de kas aanwezig. Tussen 7.00 uur en 23.00 uur is dit wel het geval. Deze periode zal aangeduid worden als gebruiksperiode. De gemiddelde temperatuur in de gebruiksperiode is 15,7 °C. De invloed van het aantal warmtewisselaars in de kas zal in hoofdstuk 7 onderzocht worden. Hierbij is het deel van de gebruiksperiode dat de kas te gebruiken is als verblijfsgebied een belangrijk gegeven. Om de verschillende situaties te vergelijken wordt gekeken naar het

deel van deze tijd dat de kastemperatuur tussen 18 °C en 25 °C ligt. Bij simulatie van de kas zonder Fiwihex is dit 23 % van de tijd.

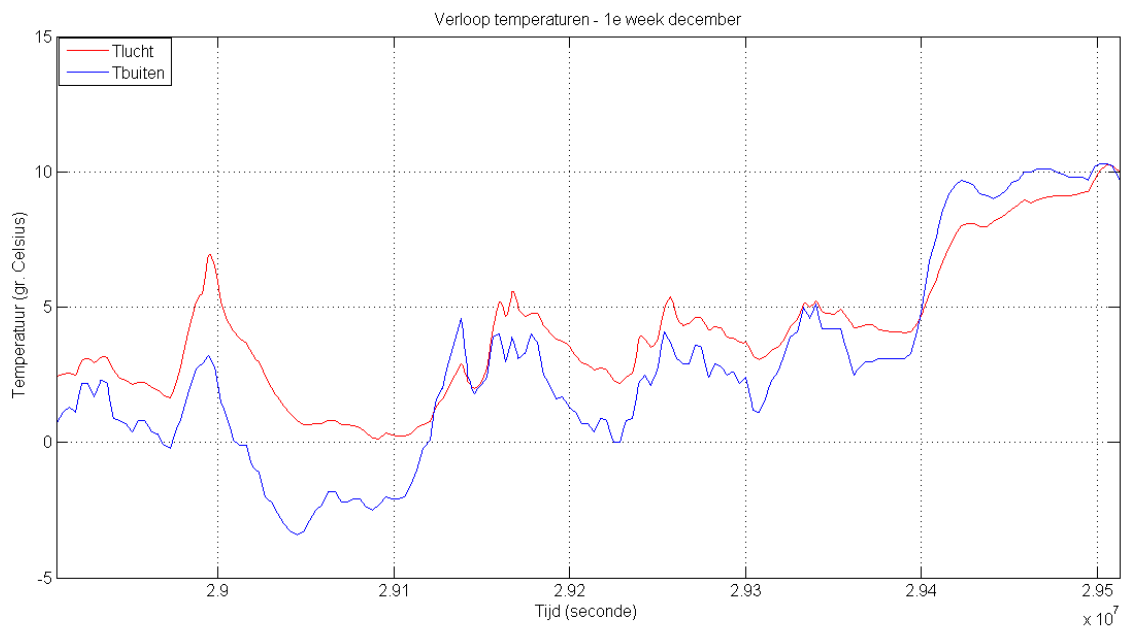
Om een betere indruk te krijgen van het temperatuurverloop is de temperatuur in de kas in de figuren 6.11, 6.12, 6.13 weergegeven voor een week in het tussenseizoen, een week in de zomer en een week in de winter.



Figuur 6.11 Verloop buitentemperatuur en kastemperatuur in de eerste week van maart



Figuur 6.12 Verloop buitentemperatuur en kastemperatuur in de eerste week van juli



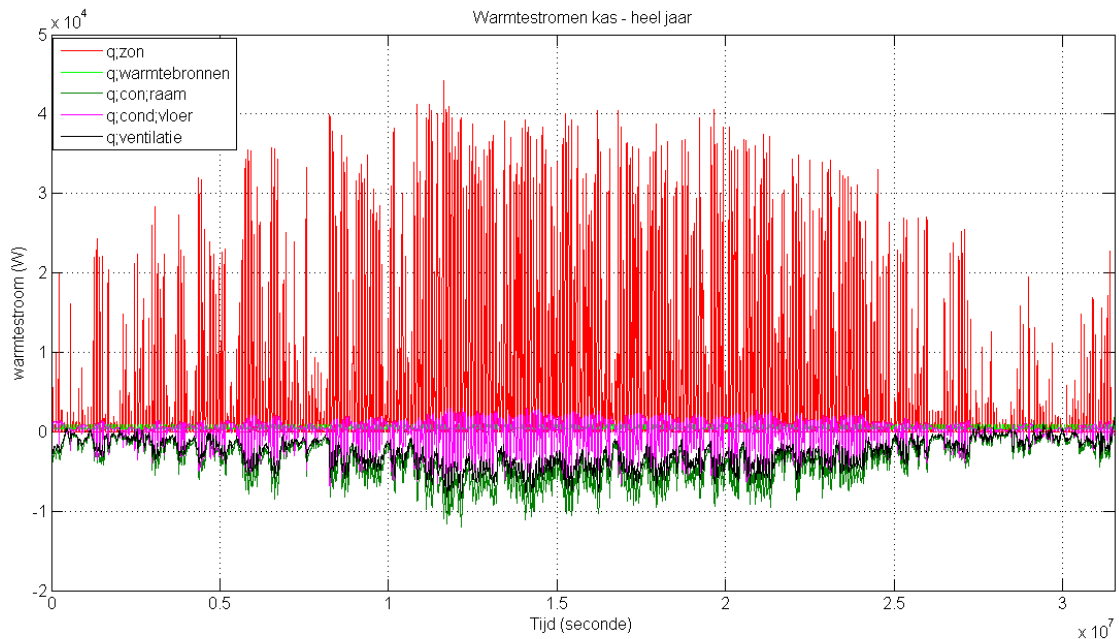
Figuur 6.13 Verloop buitentemperatuur en kastemperatuur in de eerste week van juli

Zoals uit de figuur 6.10 al bleek is de gemiddelde temperatuur van de kaslucht vrijwel altijd hoger dan de buitenlucht. Dit is conform de verwachting en is verklaarbaar door het broeikaseffect. Wat verder op valt is dat beide grafieken vrijwel dezelfde pieken en dalen hebben. Er zit echter een gering faseverschil tussen beide grafieken. De kaslucht reageert dus enigszins vertraagd op de buitentemperatuur, dit is te verklaren door de thermische massa in de kas.

Bij hoge instraling in de eerste week van maart blijkt de kastemperatuur al op te lopen tot 10 °C hoger dan de buitenluchttemperatuur. In de beschouwde week in juli lopen de temperaturen in de kas hoog op wanneer de zoninstraling hoog is, terwijl de buitentemperatuur nog relatief laag is. Ook de eerste week van december blijkt dat de temperatuur van de kas vrijwel altijd hoger, tenzij de buitenlucht snel stijgt. De kastemperatuur reageert dan langzamer dan de buitenluchttemperatuur en is tijdelijk lager. Ook hierin is de invloed van de thermische massa van de kas merkbaar.

### Warmtestromen

Voor de kasruimte is een warmtebalans opgesteld. De warmtestromen die de kas binnenkomen en verlaten zijn hiervoor beschouwd. De oppervlakken van de vloer en de wanden bevinden zich binnen de systeemgrens, evenals het binnenste glasvlak. De energiestromen die hoeveelheid energie in de kas beïnvloeden zijn zoninstraling, interne warmtebronnen, transmissie door het glas, conductie door de vloer en ventilatie. Er is in deze simulatie nog geen rekening gehouden met het vermogen dat de FiwiHex levert. In figuur 6.14 zijn deze warmtestromen voor het kasgedeelte in beeld gebracht.

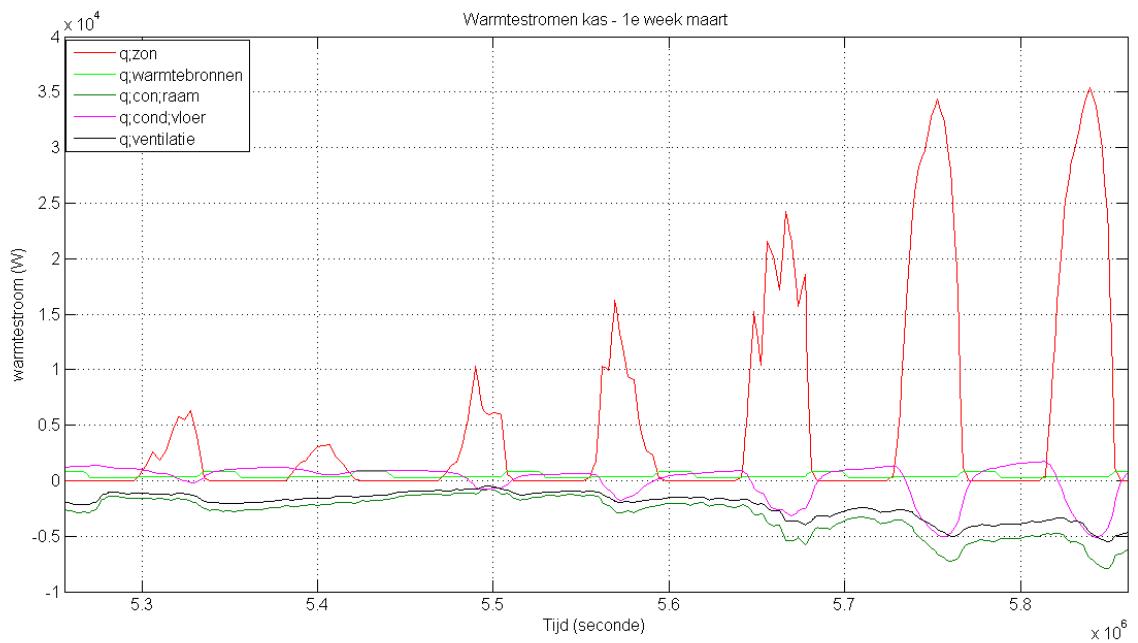


Figuur 6.14 Verloop warmtestromen kasgedeelte

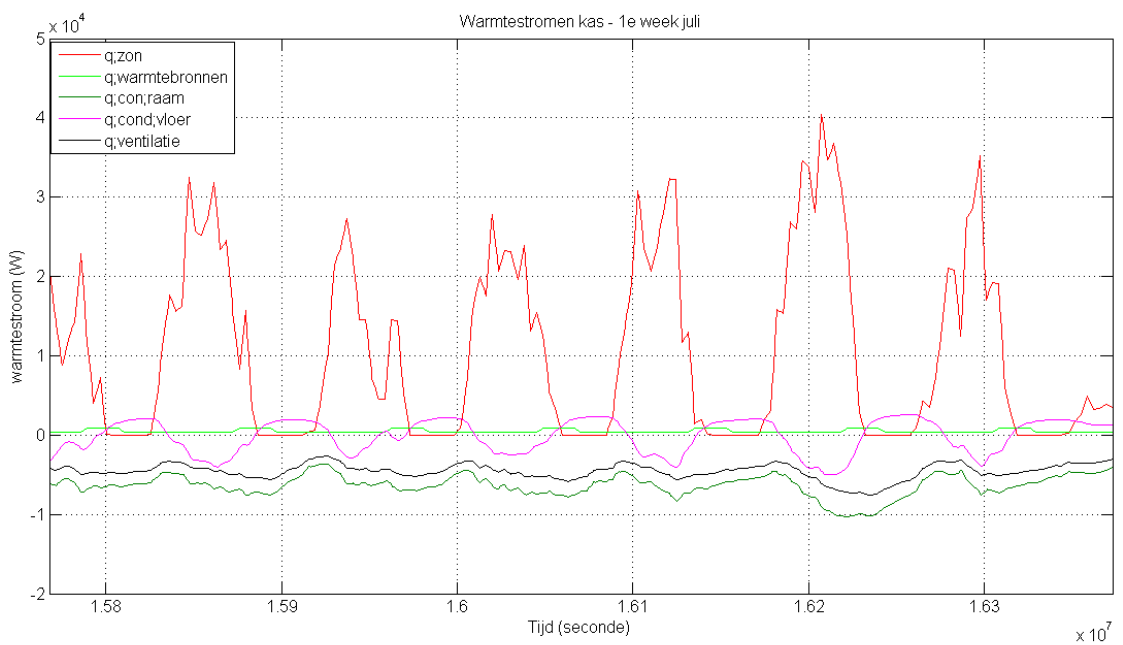
Om de warmtestromen beter te kunnen analyseren, zijn deze in figuur 6.15, 6.16 en 6.17 weergegeven voor drie weken gedurende het jaar.

De zoninstraling blijkt gedurende een gedeelte van de dag vele malen groter dan de andere warmtestromen. Wel bestaat deze warmtestroom uit relatief korte pieken. In de winter is de zoninstraling beduidend kleiner dan in de rest van het jaar. Er is ook hier een verschil in fase tussen de verschillende stromen te zien. Dit is te verklaren door de thermische massa van de lucht en de constructie.

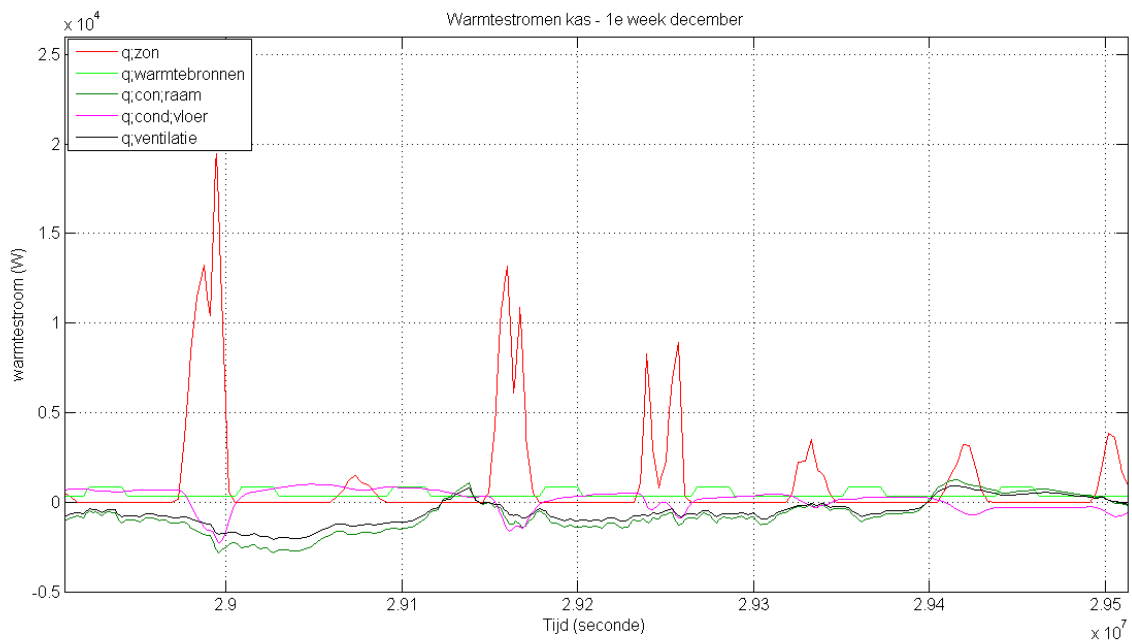
Gedurende de momenten dat de zoninstraling groot is gaat er een substantiële energiestroom van de kas de vloer in. Wanneer er geen zoninstraling is dan keert de richting van deze stroom om en stroomt er warmte vanuit de vloer de kas in. De massa van de vloer stabiliseert het temperatuurverloop in de kas dus. Door ventilatie en transmissie wordt gedurende het hele jaar energie aan de kas onttrokken. Dit is volgens verwachting, omdat de temperatuur van de kas vrijwel het gehele jaar hoger is dan de buitentemperatuur. Ten slotte blijkt dat de invloed van de interne warmtebronnen ten opzichte van de andere energiestromen minimaal is.



Figuur 6.15 Warmtestromen in de eerste week van maart



Figuur 6.16 Warmtestromen in de eerste week van juli

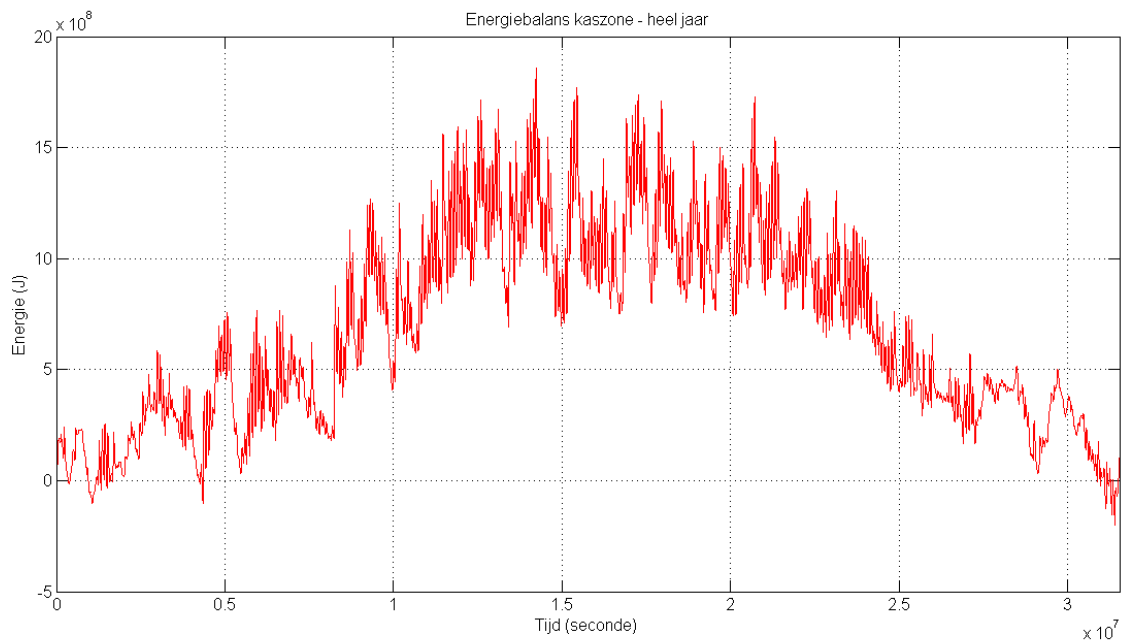


*Figuur 6.17 Warmtestromen in de eerste week van december*

Aan de hand van de afzonderlijke warmtestromen, is de totale netto warmtestroom naar de kas te berekenen. Hiermee is te bepalen hoeveel energie de kas over een geheel jaar binnenkomt, dan wel verlaat. Dit kan door middel van integratie van de totale warmtestroom.

Zoals werd beschreven wordt in het model de initiële temperatuur van alle constructiedelen gesteld op 20 °C en van de grond op 12 °C. Door de initiële temperatuur van de kaslucht en de constructiedelen echter gelijk te stellen aan de buitentemperatuur kan het systeem getest worden; er zit dan bij aanvang van de simulatie dan namelijk nog geen energie in het systeem. Voor de buitentemperatuur wordt gerekend met de klimaatgegevens van 1964. Na een heel jaar zou er balans moeten zijn tussen de ingaande en de uitgaande energiestromen. De kas zou anders namelijk erg gaan opwarmen.

Figuur 6.18 geeft weer hoeveel energie er aan het systeem wordt toegevoerd en onttrokken gedurende het hele jaar. De hoeveelheid energie die netto aan het systeem wordt toegevoerd blijkt inderdaad klein. In het tussenseizoen en in de zomer wordt er energie toegevoerd, in de winter wordt er energie onttrokken. In het begin van het jaar is de energiebalans positief. Dit lijkt vreemd omdat het dan nog winter is, dit is echter te verklaren vanuit de lage initiële temperaturen.



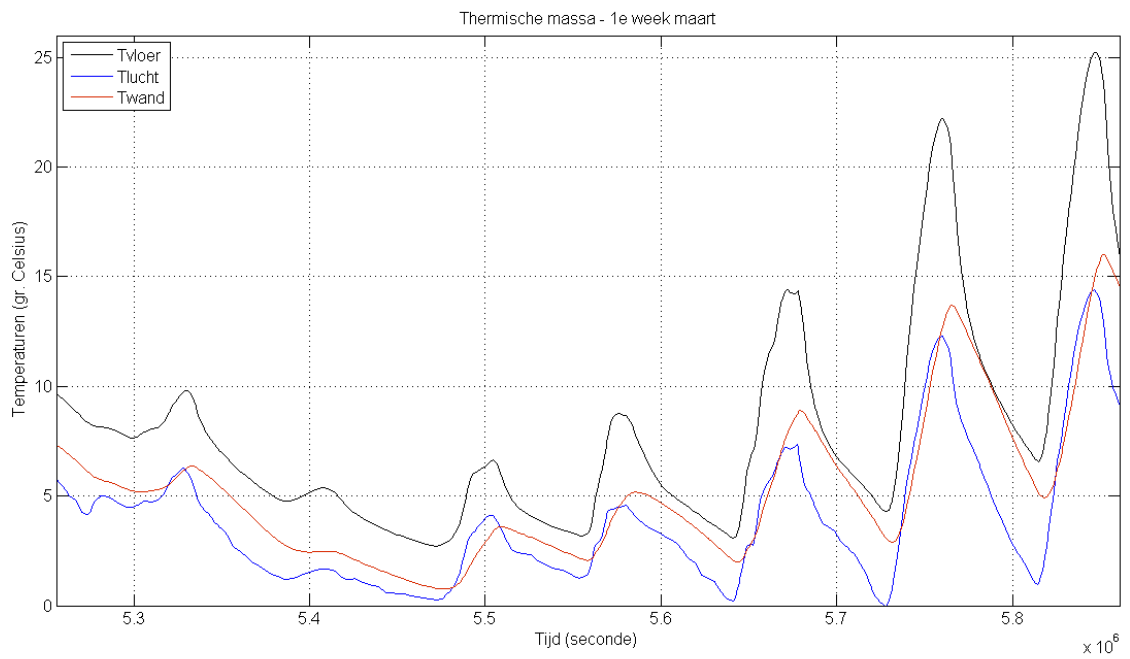
*Figuur 6.18 Energiebalans Kas over een geheel jaar (initiële temperatuur van kaslucht en constructie gelijk aan buitentemperatuur)*

### **Thermische massa**

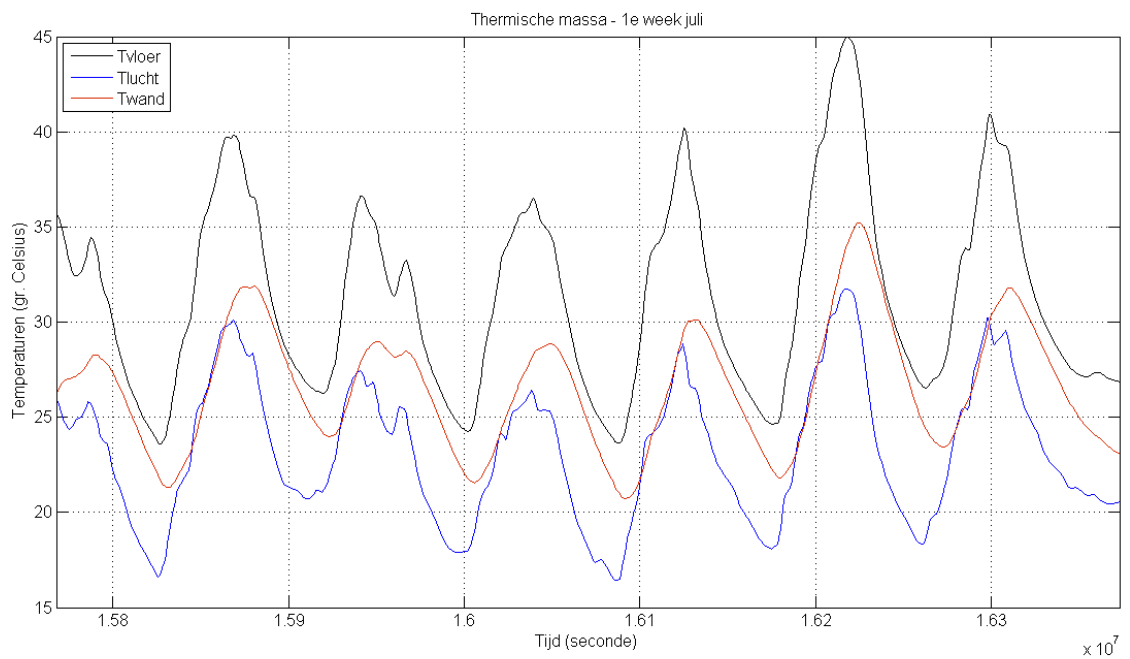
Zoals in de vorige paragraaf werd beschreven dragen de betonnen vloer en de tussenwanden bij aan de thermische massa van het systeem. Deze invloed wordt nu kort beschouwd. Grafiek 6.19, 6.20 en 6.21 geven de temperatuur van de kaslucht, de oppervlaktetemperatuur van de vloer en de oppervlaktetemperatuur van de wanden.

De zinstraling heeft veel invloed op de temperatuur van de kaslucht. De grafiek van de oppervlaktetemperatuur van de vloer heeft vrijwel dezelfde vorm als de grafiek van de luchttemperatuur. Dit is verklaarbaar doordat een groot deel van de zinstraling op de vloer valt en zorgt voor opwarming. De uitgangspunten hebben duidelijk invloed op de resultaten. Door de opwarming van de vloer is de invloed van de thermische massa niet duidelijk merkbaar aan de hand van de vloertemperaturen. De invloed van de thermische massa bleek eerder wel uit de analyse van de warmtestromen. De vloer blijkt altijd warmer te zijn dan de kaslucht. Dit komt omdat de warmte van de lucht door ventilatie snel afgevoerd kan worden.

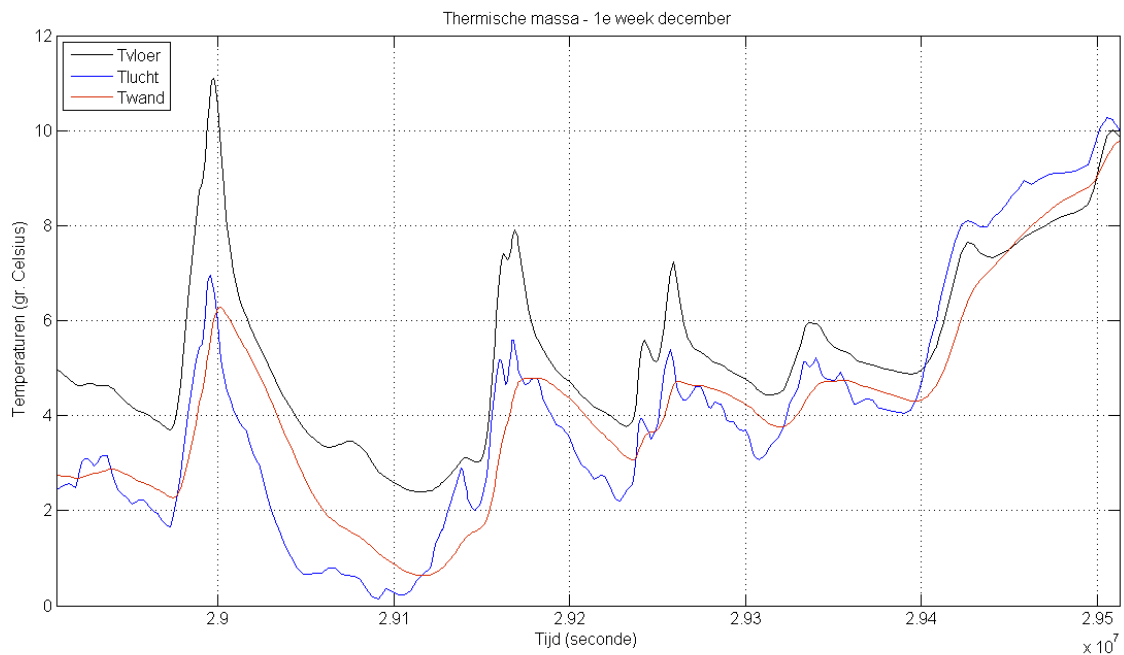
Ook de tussenwanden worden belast met veel zinstraling, maar het oppervlak is ruim drie keer zo groot als dat van de vloer. Daardoor is de meewerkende thermische massa veel groter, waardoor er duidelijk een faseverschil zit tussen de opwarming en afkoeling van de wanden enerzijds en de lucht en de vloer anderzijds. Het temperatuurverloop in de wanden is duidelijk meer geleidelijk. Dit komt overeen met de verwachting.



*Figuur 6.19 Temperatuurverloop van lucht, vloer en wanden, eerste week maart*



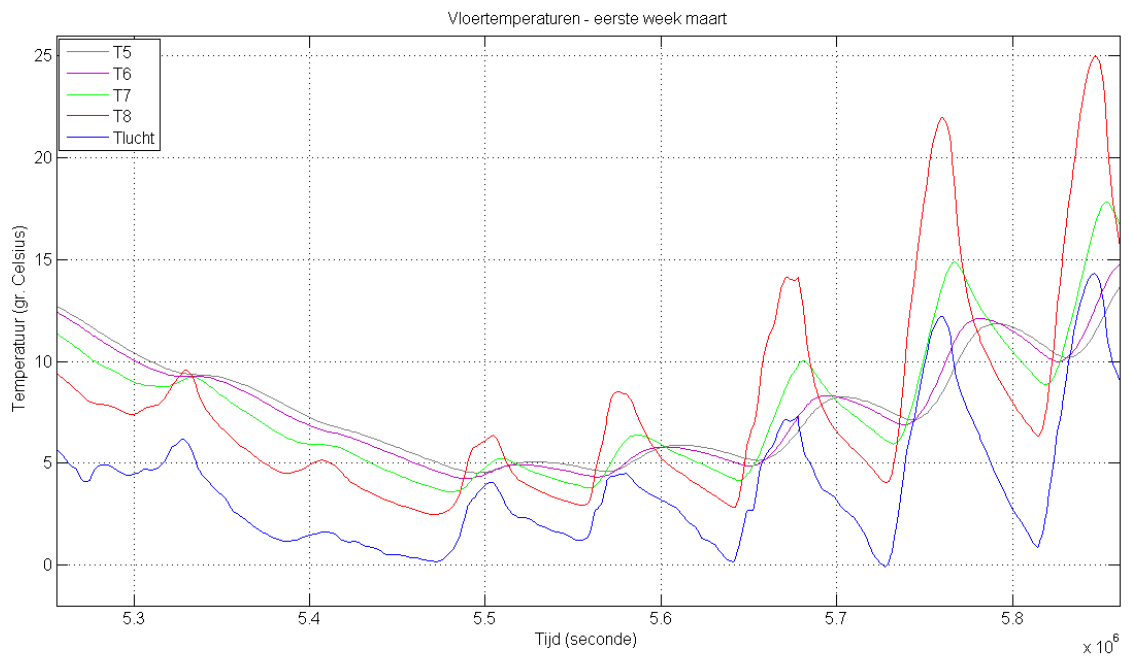
*Figuur 6.20 Temperatuurverloop van lucht, vloer en wanden, eerste week juli*



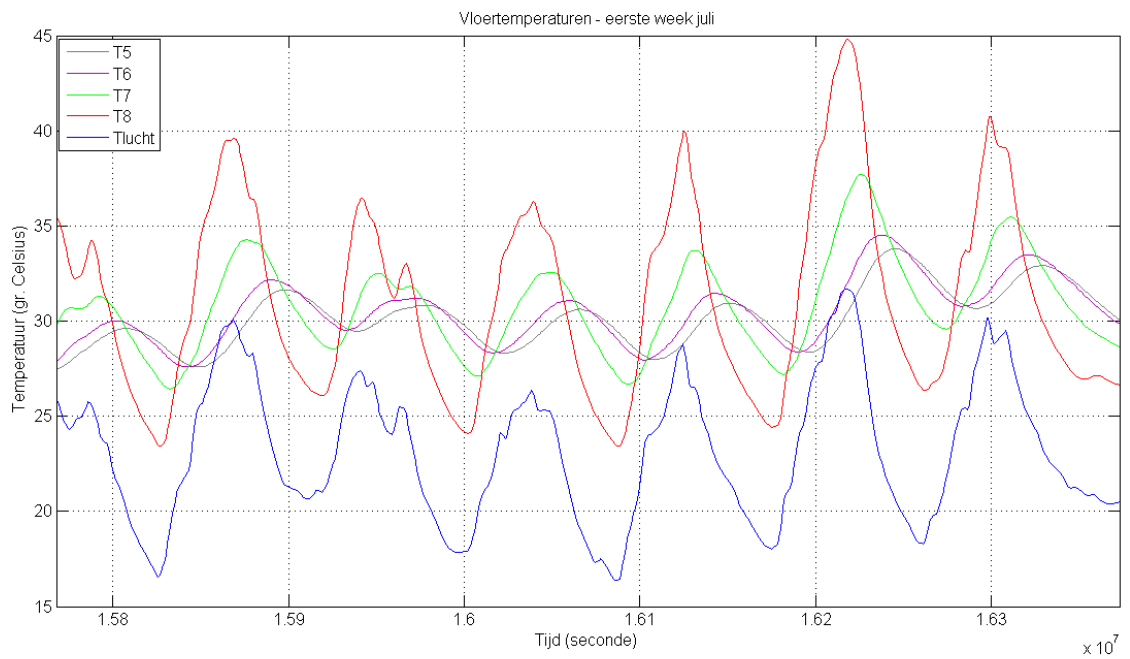
Figuur 6.21 Temperatuurverloop van lucht, vloer en wanden, eerste week december

Voor de thermische massa is ook het temperatuurverloop in de vloer van belang. De figuren 6.22, 6.23 en 6.24 geven het temperatuurverloop weer voor de verschillende knopen. Knoop 8 geeft de oppervlaktetemperatuur weer, de knopen 7, 6 en 5 liggen hier telkens circa 8 cm onder. Knoop 5 geeft de temperatuur tussen de onderzijde van de betonvloer en de isolatie weer. Ook de luchttemperatuur is weergegeven.

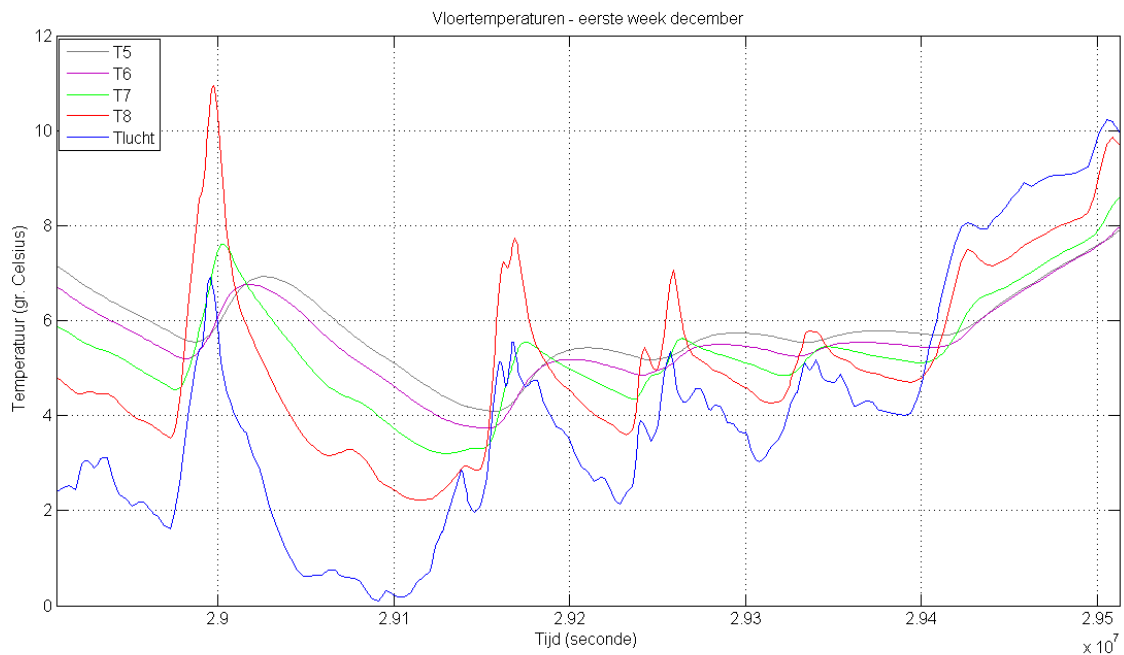
Het is weer goed te zien dat de zoninstraling grote invloed heeft op zowel de kastemperatuur als de oppervlaktetemperatuur van de vloer. Naarmate de knopen dieper in de vloer liggen zijn de temperatuurschommelingen veel kleiner. Het temperatuurverschil tussen de bovenzijde en de onderzijde van de vloer blijkt op te lopen tot 10 °C in de onderzochte periode. Ook de faseverschillen vallen op. Naar mate de knopen dieper in de vloer liggen, verschuiven de toppen en de dalen in de temperatuur naar rechts in de grafiek. Dit is een realistisch temperatuurverloop.



Figuur 6.22 Temperatuurverloop vloerknopen en lucht, eerste week maart



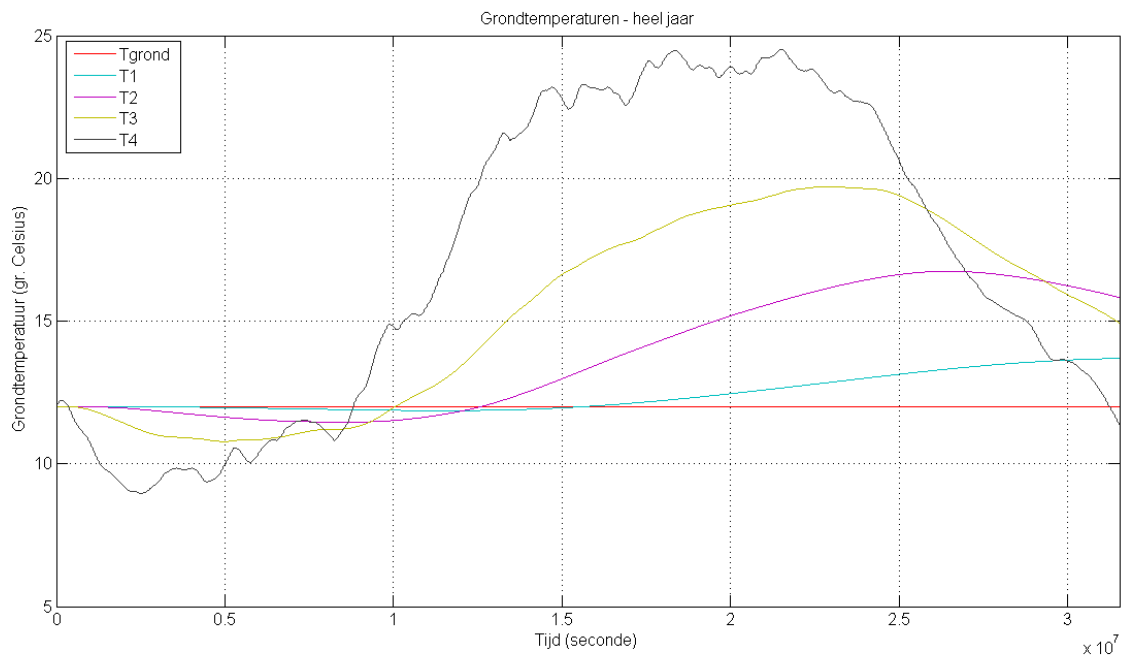
Figuur 6.23 Temperatuurverloop vloerknopen en lucht, eerste week juli



Figuur 6.24 Temperatuurverloop vloerknoppen en lucht, eerste week december

Naast de vloertemperatuur is ook de temperatuur van de grondlagen van belang. De lagen hebben een grote thermische massa en beïnvloeden op deze manier het temperatuurverloop. Figuur 6.25 geeft het temperatuurverloop in de lagen weer voor een geheel jaar. Knoop 4 bevindt zich onder de vloerconstructie, de knoppen 3, 2, 1 en 13 liggen hier onder. De temperatuur 10 m onder het maaiveld is eerder constant verondersteld. Knoop 13 is dus het gehele jaar 12 °C. Conform de aannames in paragraaf 6.2 is voor de initiële temperaturen van de constructiedelen een temperatuur van 20 °C aangenomen en voor de grondlagen een temperatuur van 12 °C.

De eerste periode blijkt de temperatuur in de grondlagen af te nemen. In de loop van het jaar warmen de lagen echter weer langzaam op. Knoop 4 geeft de temperatuur van de bovenste grondlaag weer. Het verloop van deze laag blijkt grilliger en gevoeliger voor invloeden van de kas dan de lagen daar onder. De temperatuur in deze laag loopt op tot 24 °C, terwijl de laag hieronder niet warmer wordt dan 16 °C. Naarmate de lagen dieper liggen worden de temperatuurverschillen kleiner. Dit is conform de verwachting. Het faseverschil tussen de verschillende grondlagen is aanzienlijk. Naarmate de lagen dieper liggen wordt pieken in de temperatuur later bereikt.



Figuur 6.25 Temperatuurverloop grondknopen, gehele jaar

#### 6.4.4 Evaluatie gebruikte parameters subsysteem kas

In deze paragraaf wordt de gevoeligheid voor de belangrijkste parameters beschouwd. Achtereenvolgens wordt gekeken naar het ventilatievoud, de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling en ten slotte de interne warmtelasten.

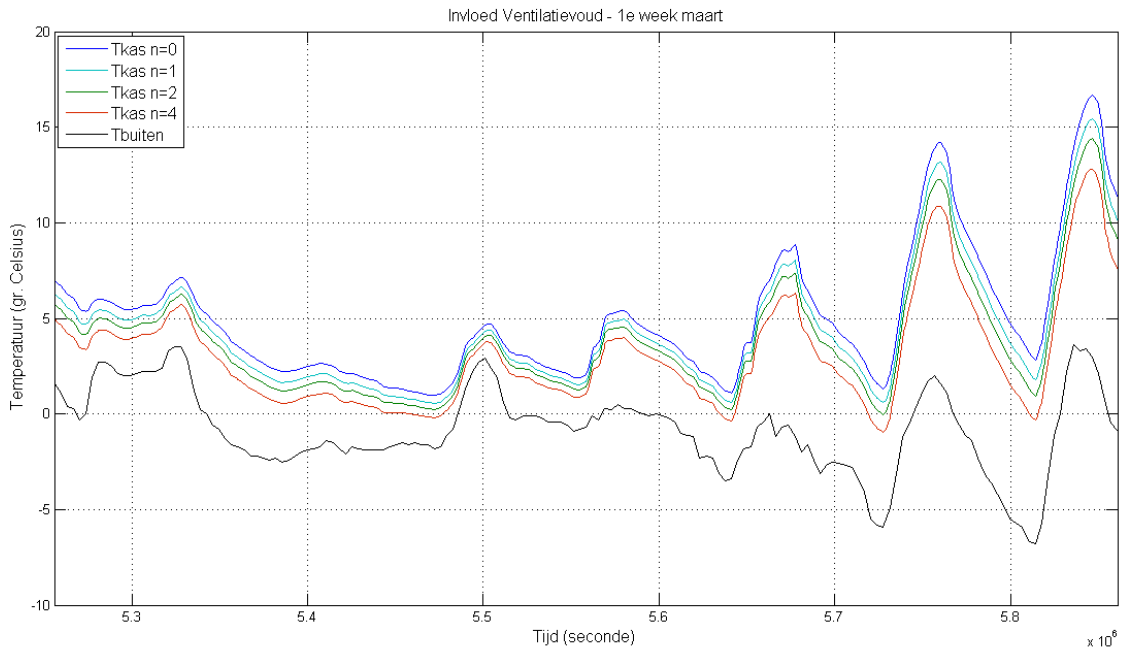
##### Invloed ventilatievoud

De ventilatie beïnvloedt de temperaturen in de kas. Enerzijds wordt er lucht met buitentemperatuur de ruimte ingebracht, anderzijds wordt lucht met de ruimtetemperatuur afgevoerd. De in de vorige paragrafen berekende resultaten gelden voor een ventilatievoud van  $2 \text{ u}^{-1}$ . Om de invloed van het ventilatievoud te onderzoeken zijn de kastemperaturen ook berekend voor verschillende andere waarden.

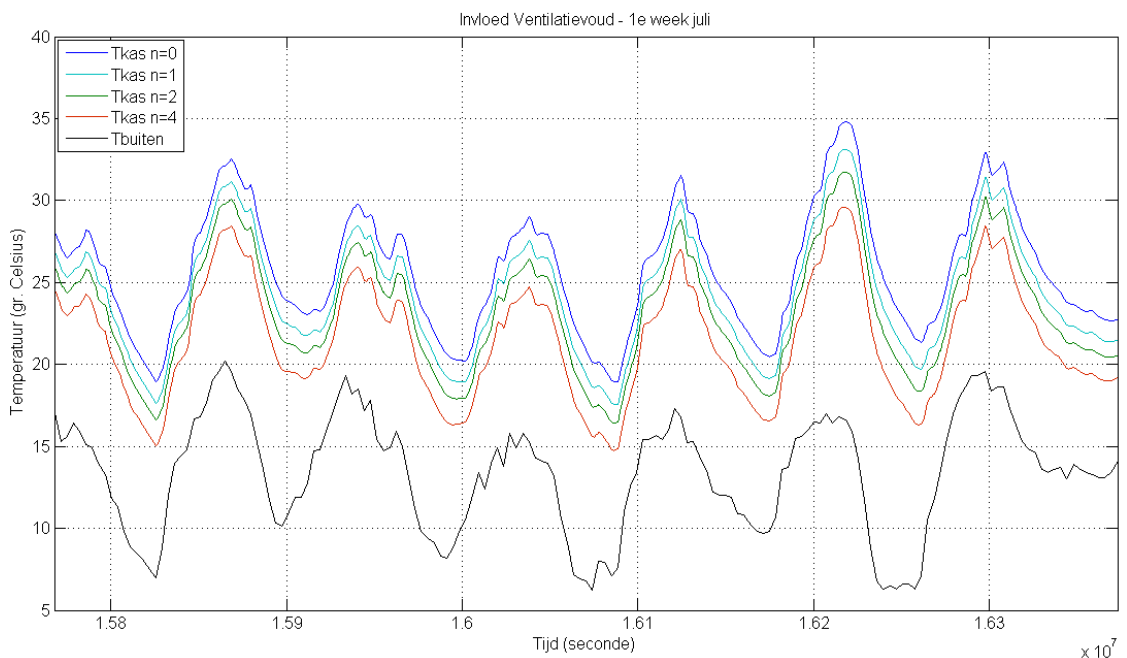
De grafieken 6.26, 6.27 en 6.28 geven de kastemperatuur voor de ventilatievouden 0 (alleen infiltratie, het ventilatievoud ten gevolge van infiltratie is circa  $2 \text{ u}^{-1}$ ), 1, 2 en  $4 \text{ u}^{-1}$ . Ook de buitentemperatuur is weergegeven. De resultaten zijn weergegeven voor een week in het tussenseizoen, een week in de zomer en een week in de winter. Interne warmtebronnen zijn meegenomen en voor  $\alpha$  is uitgegaan van  $8 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ .

Zoals eerder bleek is de kastemperatuur hoger dan de buitentemperatuur. Uit de grafieken blijkt dat de temperatuur in de kas bij een hoger ventilatievoud dichter bij de buitentemperatuur komt te liggen. In de zomer is een hoog ventilatievoud gunstig omdat de temperatuur door de zoninstraling hoog op kan lopen, in het tussenseizoen en in de winter is een laag ventilatievoud gunstig om het warmteverlies te beperken. Zoals de grafieken illustreren is de invloed van het ventilatievoud op de uitkomst duidelijk merkbaar. Deze invloed blijkt in het zomerseizoen veel groter te zijn dan in met name het winterseizoen.

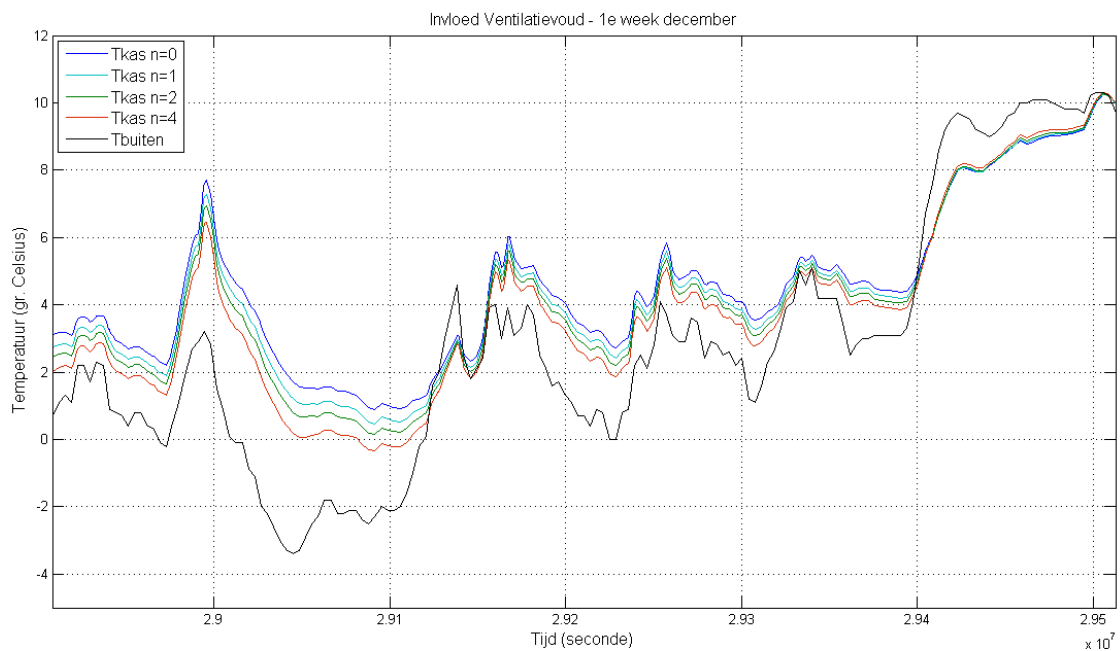
De afwijking ten aanzien van een ventilatievoud van  $0 \text{ u}^{-1}$ ;  $1 \text{ u}^{-1}$  of  $4 \text{ u}^{-1}$  blijkt in de beschouwde perioden ten hoogste enkele graden te zijn. Deze keuze heeft dus duidelijk invloed, maar deze invloed is beperkt.



*Figuur 6.26* Temperatuur van de kaslucht bij verschillende ventilatievouden, eerste week maart



*Figuur 6.27* Temperatuur van de kaslucht bij verschillende ventilatievouden, eerste week juli

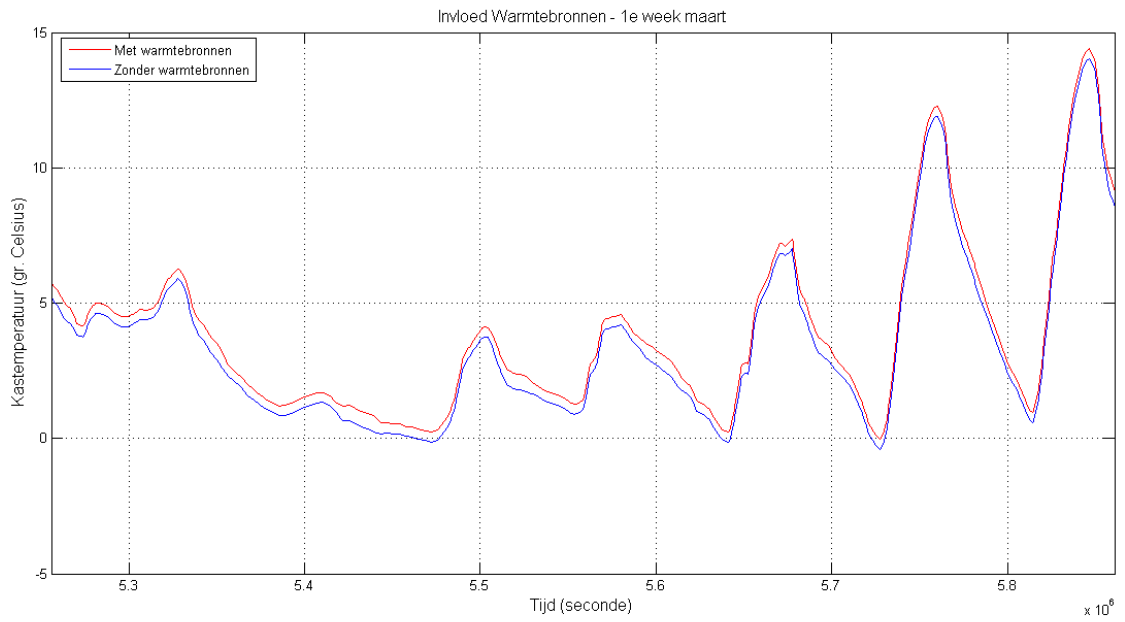


Figuur 6.28 Temperatuur van de kaslucht bij verschillende ventilatievouden, eerste week december

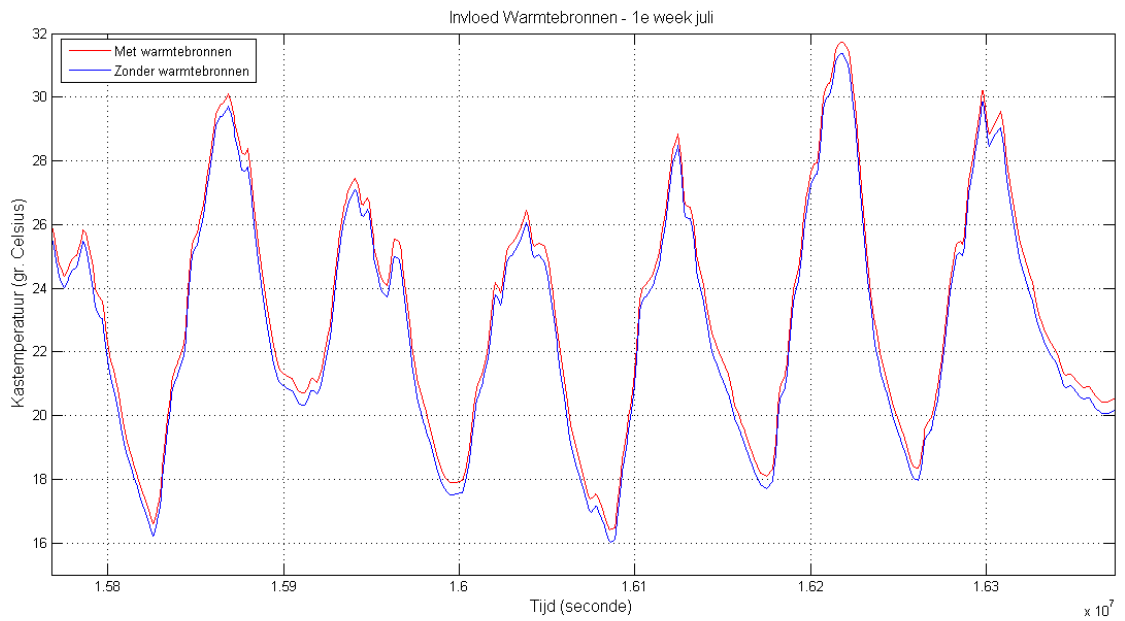
### Invloed interne warmtebronnen

Ook de interne warmteproductie is van invloed op de temperaturen in de kas. Er wordt gewerkt met de waarden die de Nederlandse norm geeft voor de verwarmde zone. De kas valt hier niet onder, maar ook hier zal een bepaalde warmteproductie plaats vinden. Deze zal vermoedelijk wel iets lager zijn. Om de invloed van deze keuze te onderzoeken is in grafiek 6.29, 6.30 en 6.31 de kastemperatuur weergegeven zonder warmtebronnen en met warmtebronnen.

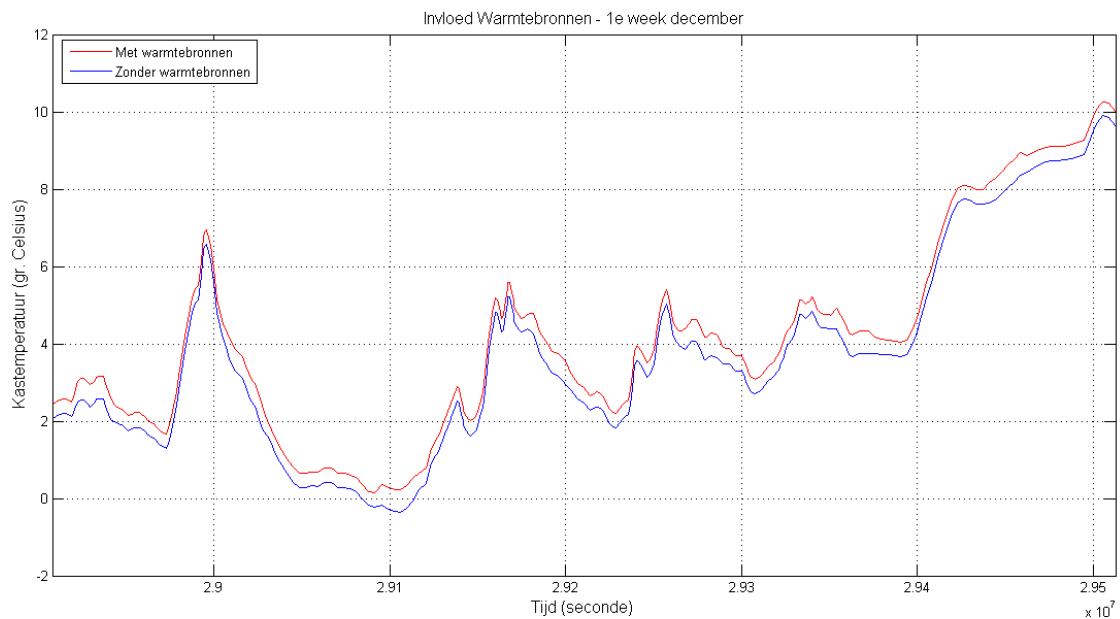
De temperaturen met warmtebronnen zijn iets hoger. De invloed op de temperatuur blijkt echter minimaal te zijn en ruim onder de 1 °C te blijven. In de grafiek met warmtestromen was al te zien dat de grootte van de warmtestroom door de interne warmteproductie verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de andere warmtestromen. De keuze voor het vermogen van de interne warmtebronnen heeft dus maar een minimale invloed.



*Figuur 6.29* *Temperatuur van de kaslucht met en zonder warmtebronnen, eerste week maart*



*Figuur 6.30* *Temperatuur van de kaslucht met en zonder warmtebronnen, eerste week juli*



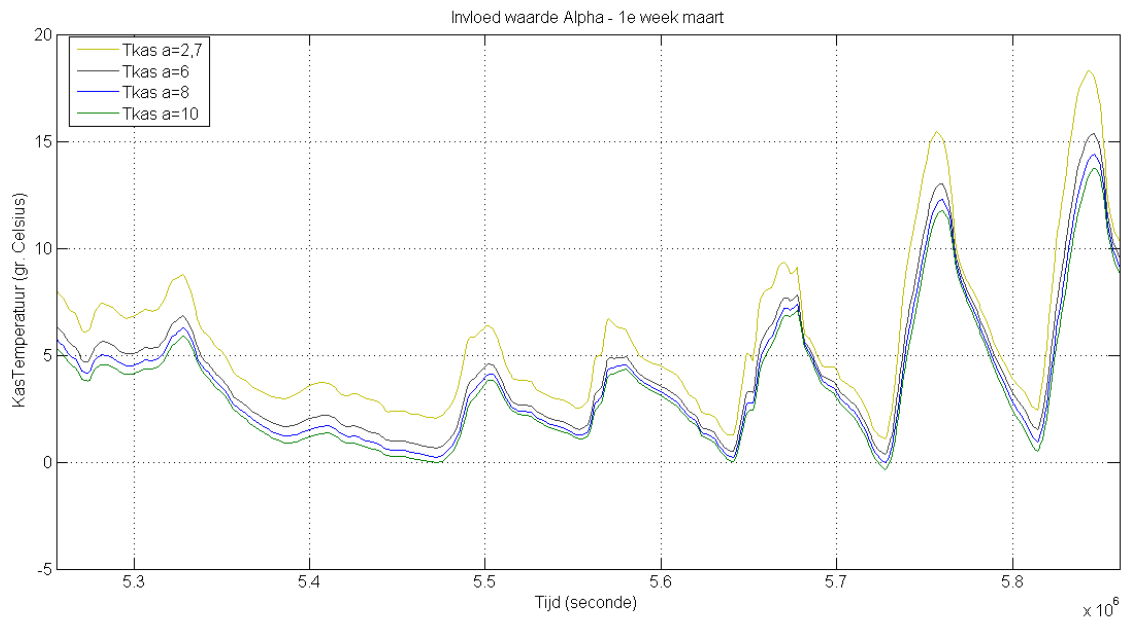
Figuur 6.31 Temperatuur van de kaslucht met en zonder warmtebronnen, eerste week december

### Invloed grote warmteoverdrachtscoëfficiënt

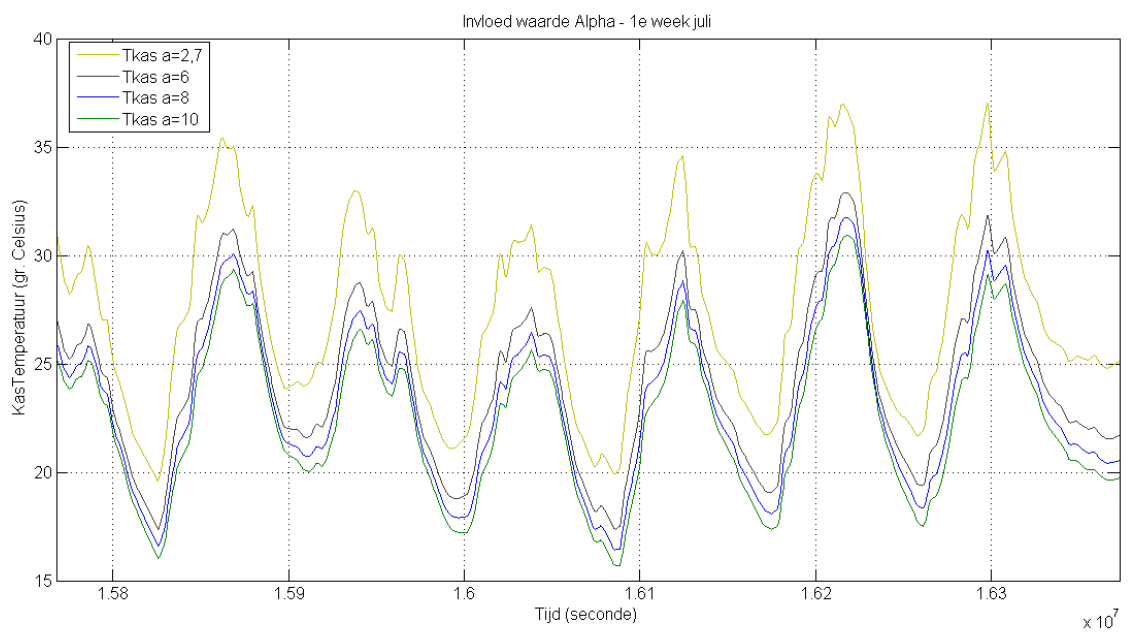
In het model wordt straling tussen de constructiedelen indirect meegenomen door te rekenen met een overdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling. De overdrachtscoëfficiënt voor alleen convectie is  $2,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , een gebruikelijke waarde voor de totale overdrachtscoëfficiënt is  $8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Omdat de waarde van de coëfficiënt invloed heeft op het resultaat wordt de invloed nu beschouwd.

In de grafieken 6.32, 6.33, 6.34 is het temperatuurverloop in de kas weergegeven voor een overdrachtcoëfficiënt van 2,7 (alleen convectie), 6, 8 en 10. De figuren 6.35, 6.36 en 6.37 geven het temperatuurverloop van de vloer. Deze wordt in grote mate bepaald door de overdrachtscoëfficiënt.

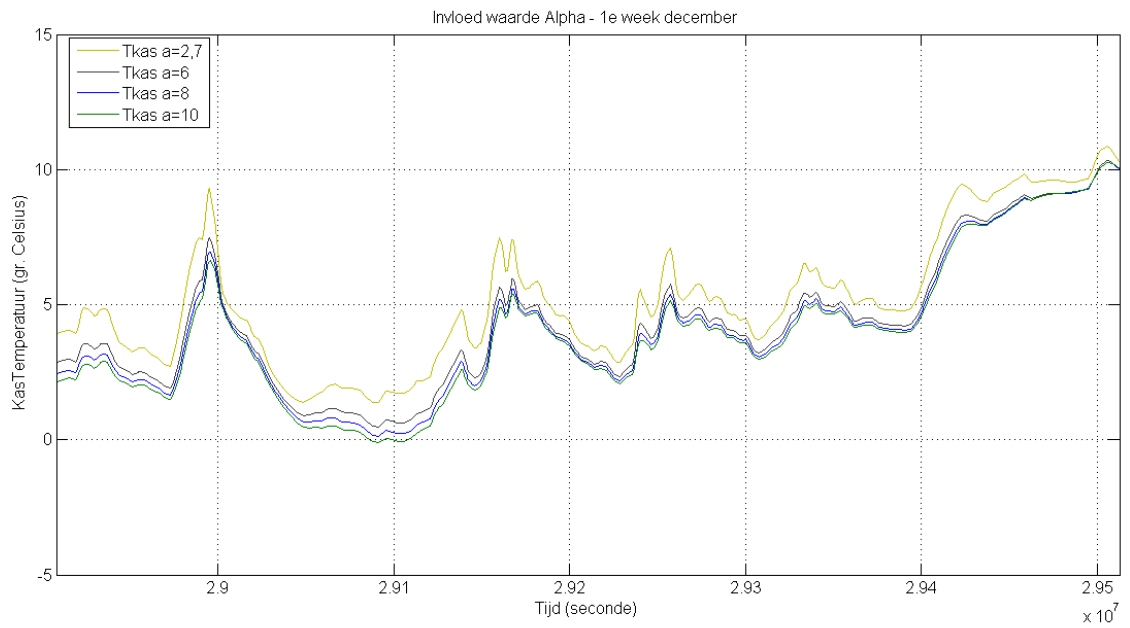
Uit de grafieken blijkt dat het verschil tussen een overdrachtscoëfficiënt van 2,7 en de andere waarden aanzienlijk is. In het eerste geval wordt de invloed van interne stralingsoverdracht helemaal niet meegenomen, in de anderen gevallen gebeurt dit indirect wel. De tweede situatie zal de waarheid dichterbij benaderen. Het blijkt dat met name de vloertemperaturen realistischer lijken. Wanneer de waarden 6, 8 en  $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  worden vergeleken blijken de verschillen gering. De meest gebruikelijke waarde voor simulatie is  $8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Deze waarde zal worden aangehouden. Het verschil in berekende temperatuur wanneer men zou rekenen met 6 of  $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  blijkt kleiner dan  $2 \text{ °C}$  te zijn.



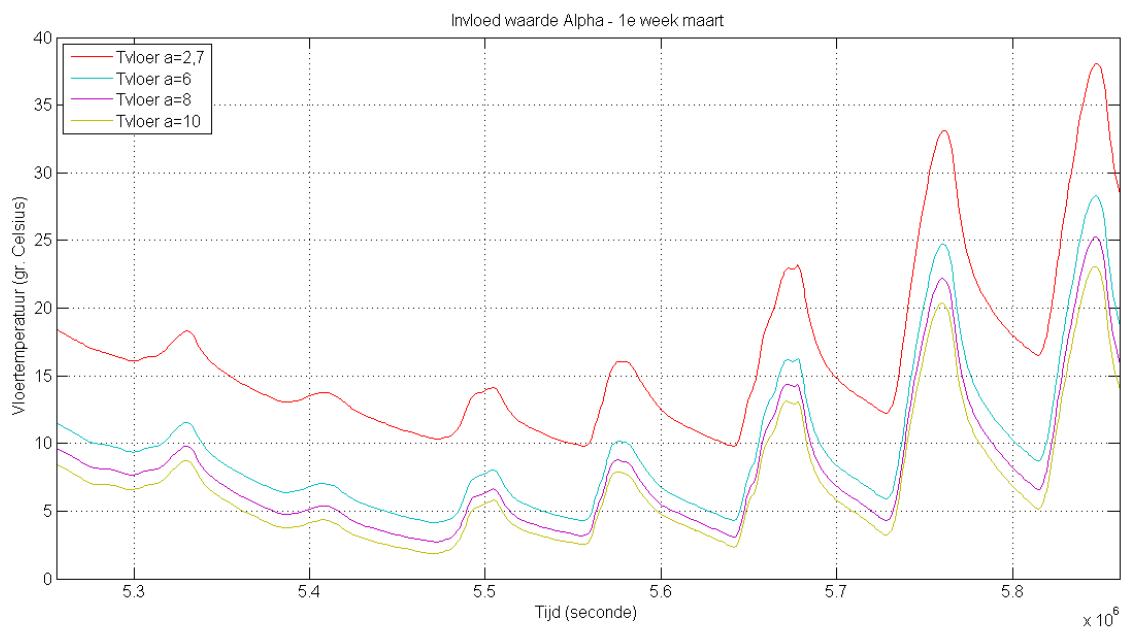
**Figuur 6.32** Kastemperatuur bij verschillende overdrachtscoëfficiënten, eerste week maart



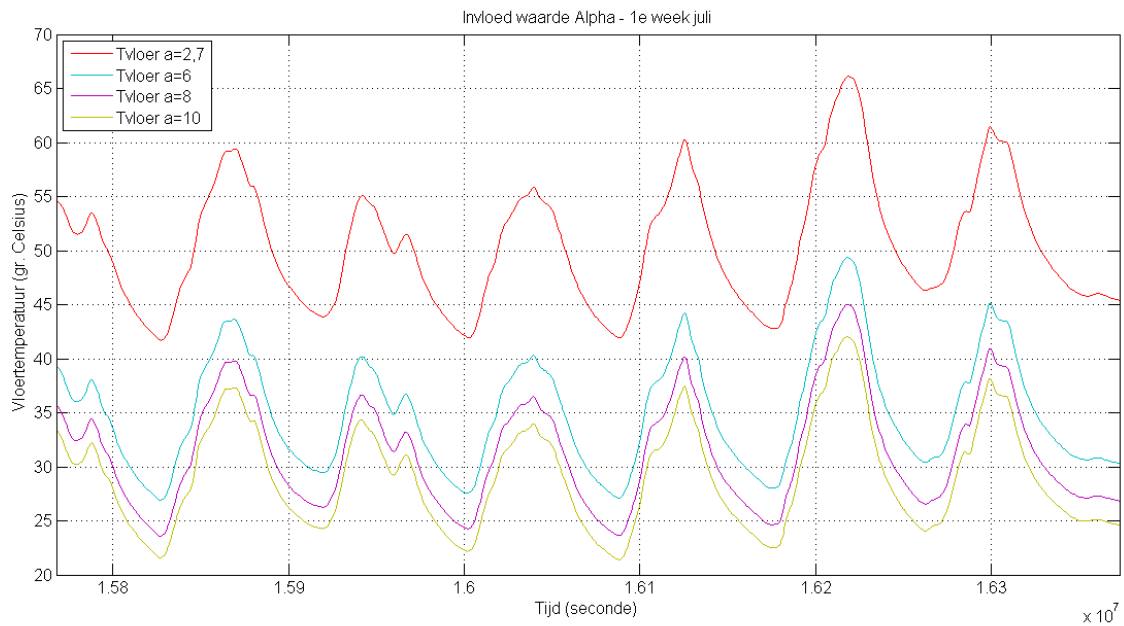
**Figuur 6.33** Kastemperatuur bij verschillende overdrachtscoëfficiënten, eerste week juli



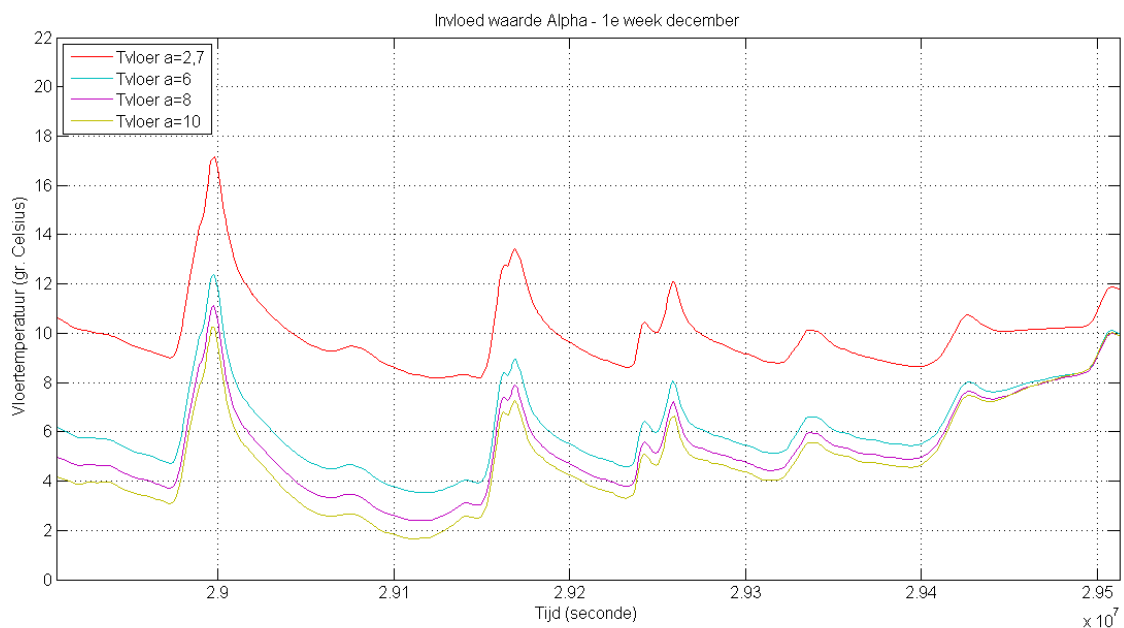
*Figuur 6.34 Kastemperatuur bij verschillende overdrachtscoëfficiënten, eerste week december*



*Figuur 6.35 Vloertemperatuur bij verschillende overdrachtscoëfficiënten, eerste week maart*



Figuur 6.36 Kastemperatuur bij verschillende overdrachtscoëfficiënten, eerste week juli



Figuur 6.37 Kastemperatuur bij verschillende overdrachtscoëfficiënten, eerste week december

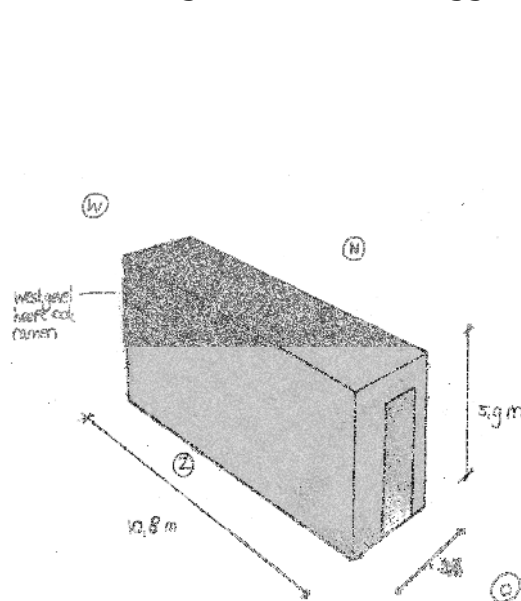
## 6.5 Substelsysteem Woning

### 6.5.1 Schematisering

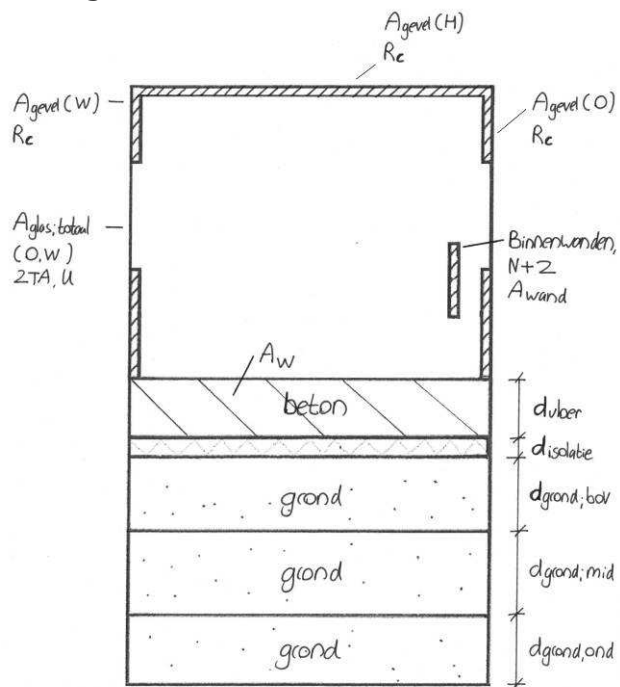
Dit model is bedoeld om een indicatie te geven voor de benodigde hoeveelheid verwarming voor de woning in de tijd. Het model voor de woning wordt opgebouwd naar analogie van het model voor de kasruimte. Belangrijk verschil is dat de woning naast glasvlakken ook dichte geveldelen bevat.

Het woninggedeelte is geschematiseerd tot een rechthoekige ruimte met plat dak. Figuur 6.38 geeft de geometrie weer. In de oost- en westgevel bevinden

zich ramen, het dak is geheel gesloten. De zuidgevel grenst aan het kasgedeelte en de noordgevel aan de aanliggende woning.



Figuur 6.38 Schematisering van de geometrie van de woning



Figuur 6.39 Zeer schematische weergave van de woning

Met betrekking tot de warmteweerstand  $R_c$  van de vloer en buitengevels wordt uitgegaan van een waarde van  $3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Dit is een algemeen geaccepteerde eis bij de bouw van nieuwe woningen. De vloer en de binnenwanden zijn net als bij de kas van beton. Voor de binnenwanden wordt evenals bij de kas uitgegaan van een meewerkende dikte van  $100 \text{ mm}$ . Ook bij de modellering van de woning worden enkele grondlagen meegenomen. Het toegepaste glas is  $\text{HR}^{++}$  glas.

De belangrijkste bouwkundige en bouwfysische gegevens van het woninggedeelte zijn weergegeven in tabel 6.4.

Bouwkundige en Bouwfysische aspecten	Symbool	Aangenomen waarde	Eenheid
Totaal volume woninggedeelte	$V$	229,4	$\text{m}^3$
Totaal gebruiksoppervlak	$A_{\text{gebruik}}$	77,8	$\text{m}^2$
Vloeroppervlak begane grond	$A_{\text{vloer}}$	38,9	$\text{m}^2$
Warmteweerstand vloerconstructie	$R_{c;\text{vloer}}$	3,5	$\text{m}^2\text{K/W}$
Totaal oppervlak dak en gevels	$A_{\text{gevel,dak;totaal}}$	62,8	$\text{m}^2$
Warmteweerstand dak en gevels	$R_{c;\text{dak,gevel}}$	3,5	$\text{m}^2\text{K/W}$
Totaal glasoppervlak	$A_{\text{glas;totaal}}$	18,6	$\text{m}^2$
Warmtedoorgangscoefficiënt glas	$U$	1,2	$\text{W/m}^2\text{K}$
ZTA glas	ZTA	0,65	-
Oppervlakte tussenwanden	$A_{\text{wand}}$	63,7	$\text{m}^2$

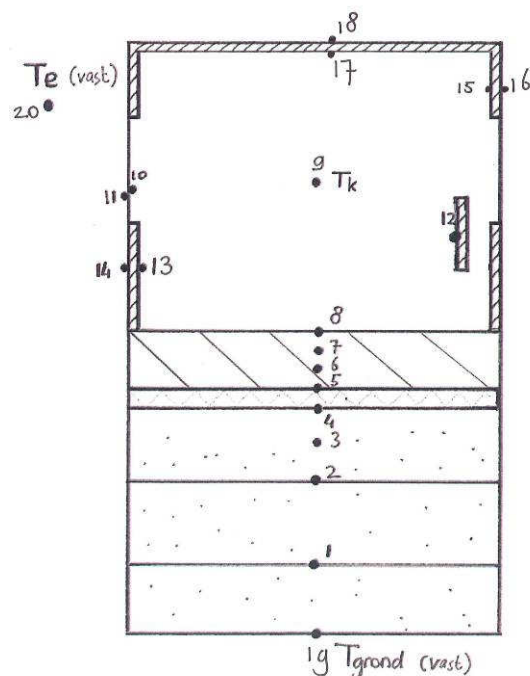
Tabel 6.4 Bouwkundige en Bouwfysische gegevens woninggedeelte

Ook het woninggedeelte wordt opgedeeld in verschillende knopen. De toewijzing van knopen is weergegeven in figuur 6.40. Net als bij het kasgedeelte zijn de grond en de vloer onderverdeeld in een aantal lagen met meerdere knopen. De totale dikte van de grondlagen is opnieuw 10 meter, de dikte van de betonplaat van de vloer 250 mm. Ook in dit subsysteem is knooppunt 9 de lucht in de woning. De knooppunten 10 en 11 liggen aan de binnen- respectievelijk buitenzijde van het glas, het enige verschil met de kas is dat in de woning HR<sup>++</sup>glas is toegepast. Knooppunt 12 ligt aan de binnenzijde van de binnenwanden en geeft evenals bij de kas de oppervlaktetemperatuur weer.

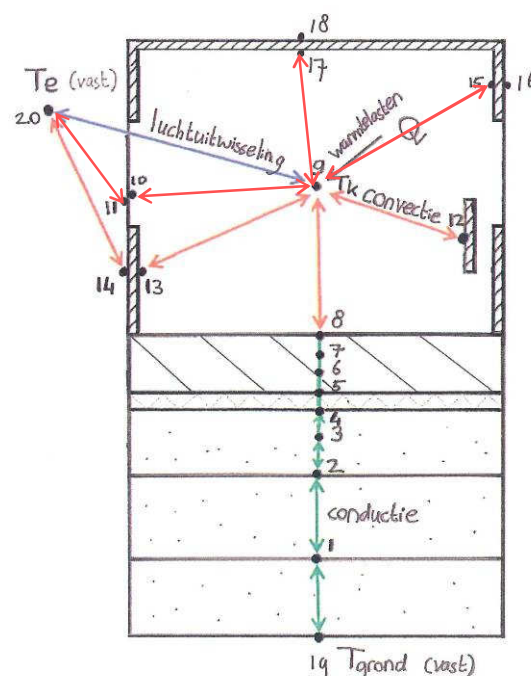
Tot zover komen de knopen overeen met het model van de kas. In tegenstelling tot bij de kas bevinden zich op het oosten en westen ook dichte geveldelen. Het dakvlak is zelfs geheel gesloten. Om de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen is bij elk dicht geveldeel een knoop aan binnen- en buitenzijde gedefinieerd. Dit zijn dus de knopen 13 en 14 (westgevel), 15 en 16 (oostgevel) en 17 en 18 (dak).

Knoop 19 ligt aan de onderkant van de onderste grondlaag en knoop 20 is de buitentemperatuur. De temperaturen van deze twee knopen worden wederom opgelegd. Met betrekking tot de grondtemperatuur en de buitentemperatuur gelden dezelfde aannames als voor het subsysteem Kas.

Voor de initiële temperatuur van alle constructieonderdelen wordt opnieuw uitgegaan van een initiële temperatuur van 20 °C. Voor de grondlagen wordt wederom gerekend met een initiële temperatuur van 12 °C.



Figuur 6.40 Toewijzing van knopen voor de modellering van de woning



Figuur 6.41 Schematische weergave verbanden knopen (convectie aan buitenzijde oostgevel en dak is niet weergegeven)

### Warmteoverdracht tussen de knopen

In het subsysteem Woning is net als bij de kas sprake van conductie, convectie in combinatie met straling en luchtuitwisseling. De warmteoverdracht tussen de knopen is vergelijkbaar met het kasmodel. Dit is schematisch weergegeven in figuur 6.41. Tussen de binnen- en buitenzijde van de dichte geveldelen vindt conductie plaats.

Met betrekking tot stralingsoverdracht tussen interne oppervlakken geldt dezelfde aanname als bij het model voor de kas. Voor het bepalen van de warmte-uitwisseling tussen de woning en de buitenlucht moeten opnieuw aannames worden gedaan met betrekking tot de hoeveelheid ventilatie en infiltratie. De waarden waarmee wordt gerekend zullen nu kort worden toegelicht.

- Ventilatie  
Zoals eerder werd gesteld wordt voor het ventilatievoud  $n$  in het model uitgegaan van een constante waarde gedurende het hele jaar. De woning zal in werkelijkheid 's zomers meer worden geventileerd dan in de winter. Voor woningen met mechanische ventilatie is de gemiddelde jaarlijkse ventilatie te bepalen uit [33]. Voor de grootte van de ventilatie in de woning zal van deze waarde worden uitgegaan. De gegeven waarde moet worden gecorrigeerd voor de verdiepinghoogte waarna met een gemiddelde ventilatie vindt van  $113 \text{ m}^3/\text{u}$ . Dit komt neer op een ventilatievoud van  $0,49 \text{ u}^{-1}$ . Er zal in het model gerekend worden met een  $n$  van  $0,5 \text{ u}^{-1}$ .
- Infiltratie  
Zoals in paragraaf 6.3.3 werd omschreven geeft het Bouwbesluit een maximale waarde voor de infiltratie in woningen. Dit is echter een bovengrens, voor nieuwbouwwoningen zal de werkelijke infiltratie veel kleiner zijn. Aan de hand van [33] kan voor woningen met mechanische ventilatie ook berekend worden hoe groot de gemiddelde infiltratie is gedurende een heel jaar. De gevonden waarde bedraagt  $0,24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  per  $\text{m}^2$  vloeroppervlak. Bij het model van de woning komt dit neer op  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  ofwel  $67 \text{ m}^3/\text{u}$ . Met deze waarde zal worden gerekend het model.

### Warmtelasten

Ook voor de woning is de instraling door de zon een belangrijke warmtelast. Van de warmte die door het glas binnen treedt, wordt aangenomen dat elke ruit 5 % van de warmte absorbeert. De hoeveelheid warmte die de woning direct weer verlaat als gevolg van kortgolvlige straling zal verwaarloosbaar zijn omdat de hoeveelheid glas veel kleiner is dan bij de kas.

De overige warmte zal zorgen voor opwarming van de wanden, de vloer en de lucht. Aan de hand van de geometrie van de woning is opnieuw geschat welk gedeelte van straling op elk constructiedeel valt. Dit is weergegeven in tabel 6.5.

In de woning is de interne warmteproductie afkomstig van personen, verlichting en elektrische apparatuur. Hiervoor worden net als bij de kas de waarden voor verblijfsgebied aangehouden, zie tabel 6.2. De oppervlakte van het gebruiksoppervlak van het woninggedeelte is  $78 \text{ m}^2$ . Dit betekent dat de totale warmtelast van de woning varieert tussen 310 en 850 W.

	Deel van binnengekomen warmte (%)
Zorgt voor opwarming wanden	20
Zorgt voor opwarming vloer	60
Zorgt voor opwarming lucht	20
<b>Totaal</b>	<b>100</b>

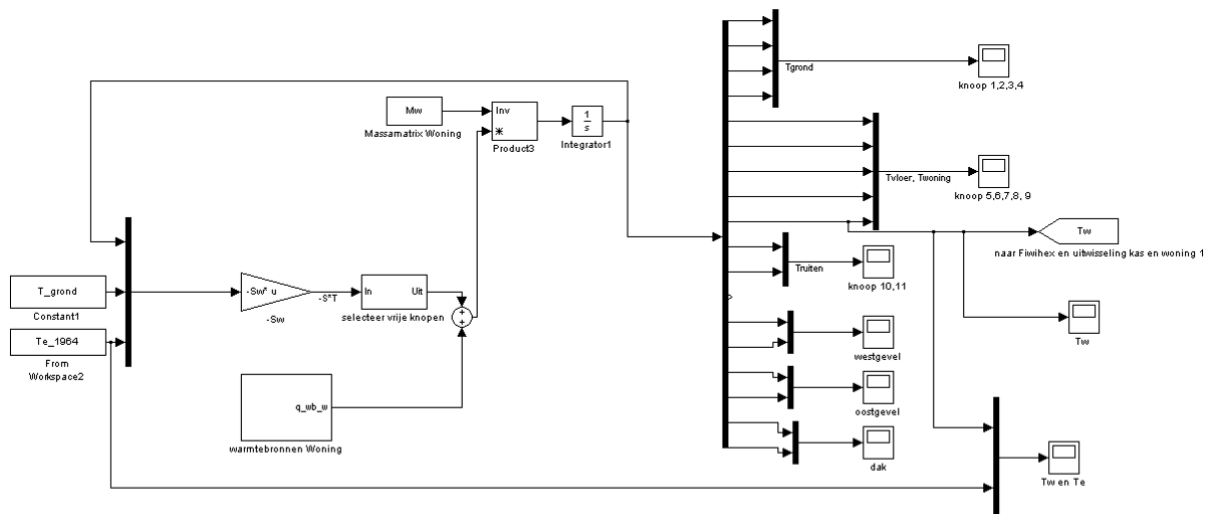
Tabel 6.5 Bestemming van de binnengekomen zonnwarmte

De zon zorgt ook voor een warmtelast op de buitenste knopen van de dichte geveldelen. Er wordt uitgegaan van een reflectie van 10 %. Via conductie komt een gedeelte van deze warmtelast de warmte de woning binnen.

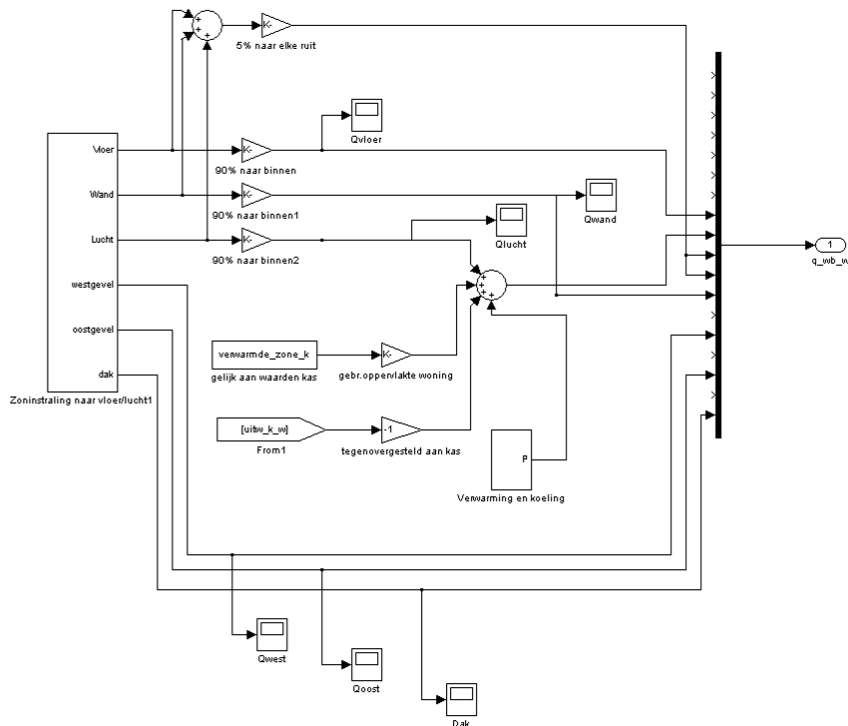
De woning kan verwarmd worden door middel van vloerverwarming. Het water voor verwarming wordt onttrokken aan de warme bron. Indien nodig wordt de temperatuur omhoog gebracht met een warmtepomp. Voor het bepalen van de benodigde opwarming van het water wordt opnieuw gerekend met een warmteoverdrachtscoëfficiënt  $\alpha_{c,s;bi}$  van  $8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Omdat het water in de leidingen van afkoelt, is aangenomen dat de aanvoertemperatuur minimaal 3 °C hoger moet zijn dan de vereiste vloertemperatuur. Na gebruik wordt het retourwater teruggevoerd naar de warme bron. Deze terugvoer is niet in het model opgenomen omdat uitgegaan is van constante brontemperaturen.

### 6.5.2 Model in Simulink

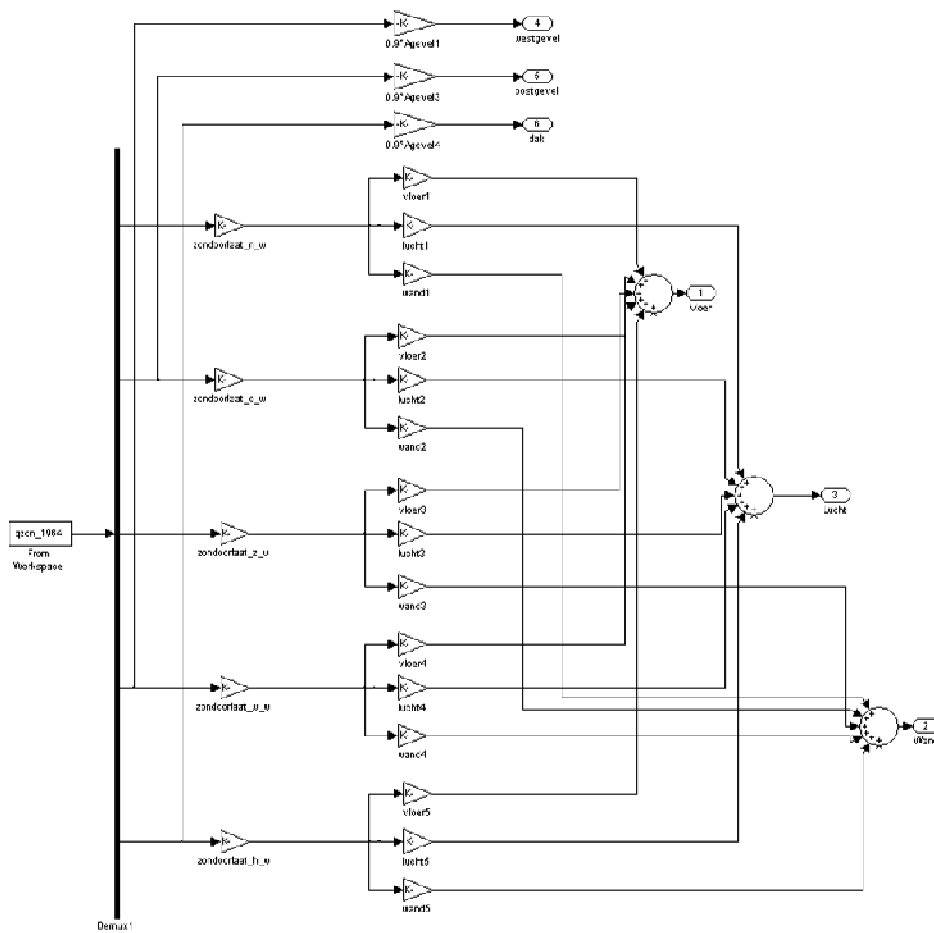
Het model van de woning is op dezelfde manier opgebouwd als het subsysteem Kas. In deze paragraaf zullen alleen de aspecten aan het model worden toegelicht die anders zijn dan bij de kas. De grafische weergave van het subsysteem Woning is weergegeven in de figuren 6.42 tot en met 6.45. Deze zal nu beknopt worden toegelicht.



Figuur 6.42 Simulink model voor het subsysteem Woning



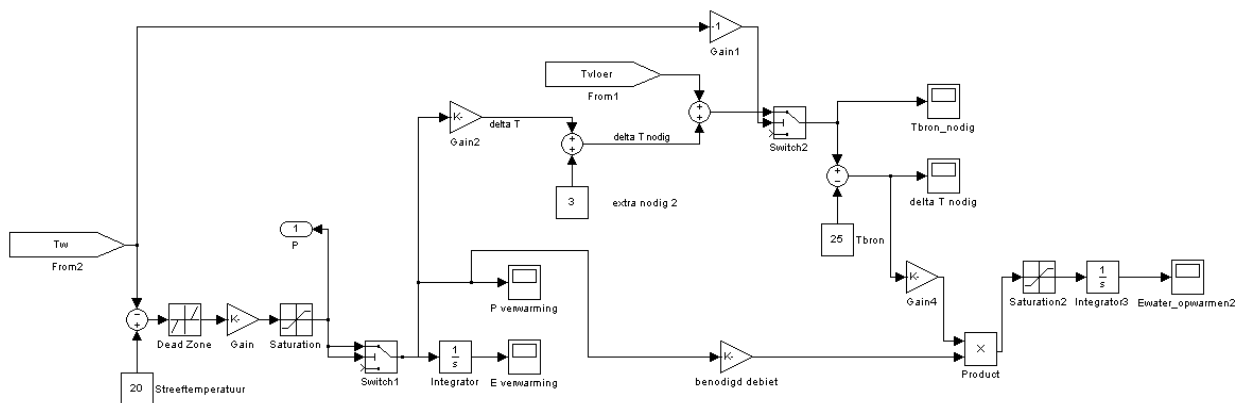
Figuur 6.43 Block Warmtebronnen, subsysteem van Woning



Figuur 6.44 Block Zoninstraling, subsysteem van Warmtebronnen

Eerder werd al opgemerkt dat de woning ook dichte geveldelen bevat. De zonnewarmte die hierop valt wordt direct op de buitenste knopen van de geveldelen gezet. Door conductie gaat een deel van de warmte de woning binnen.

Een belangrijk verschil met het subsysteem Kas is dat er in de woning een regeling zit voor verwarming. Wanneer wordt uitgegaan van een zeer groot geïnstalleerd vermogen is te bepalen welk vermogen benodigd is om de temperatuur binnen de juiste marge te houden. Aan de hand hiervan kan bepaald worden welke temperatuur water de vloerverwarming nodig heeft. Hier wordt in het volgende hoofdstuk nader op ingegaan.



Figuur 6.45 Block Vermogen koeling/verwarming, subsysteem van Warmtebronnen

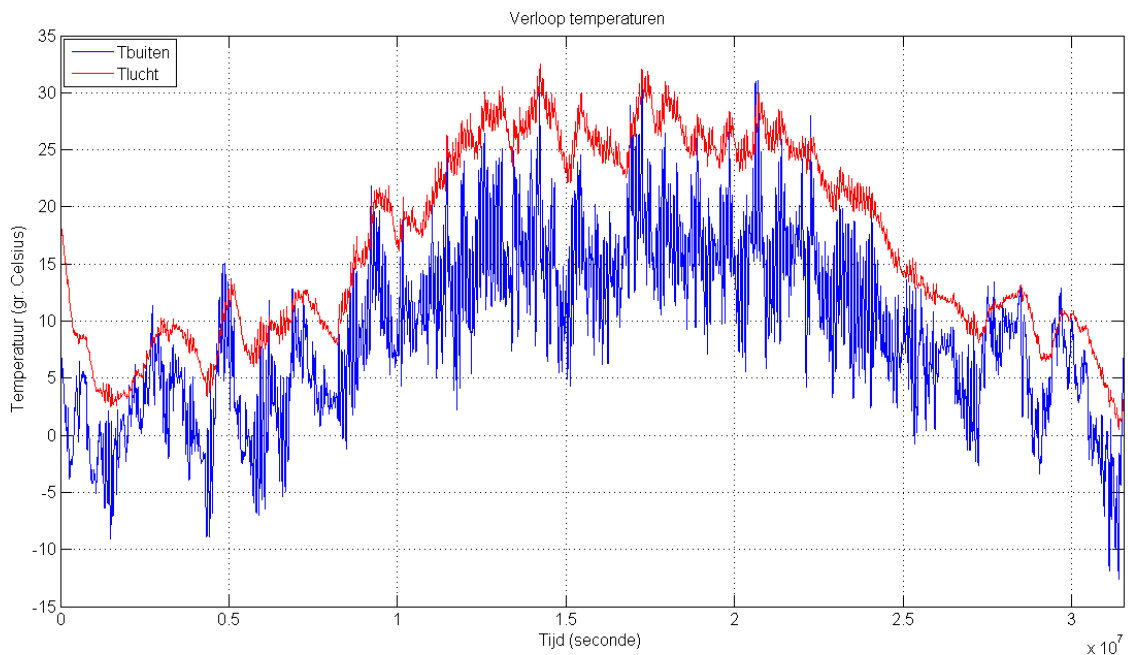
### 6.5.3 Testen

Ook het model voor de woning is onderzocht. In deze paragraaf worden de testresultaten kort beschreven en geanalyseerd. Evenals bij het subsysteem Kas worden de warmtestromen in beeld gebracht en gebruikt om het model te controleren. Dit afstudeeronderzoek richt zich voornamelijk op het kasgedeelte. Het model van de woning is bedoeld om een indicatie te geven voor de benodigde hoeveelheid verwarming in de tijd. De testen zullen hierom minder uitgebreid worden omschreven.

### Resultaten

Figuur 6.46 geeft de buitentemperatuur en de berekende gemiddelde temperatuur in de woning gedurende het gehele jaar. Voor het testen wordt de invloed van verwarming niet meegenomen. Bij de simulatie is gerekend voor de woning met warmtebronnen conform de norm, maar zonder warmte-uitwisseling met de kas. Deze wordt later in deze paragraaf beschouwd.

Er is gerekend met de waarden voor het ventilatievoud en de infiltratie zoals bepaald in paragraaf 6.5.1. Het ventilatievoud is dus  $0,5 \text{ u}^{-1}$  en de infiltratie van  $67 \text{ m}^3/\text{u}$ . De invloed van het ventilatievoud op het resultaat zal nog onderzocht worden. Voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling is opnieuw  $8 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$  aangehouden.



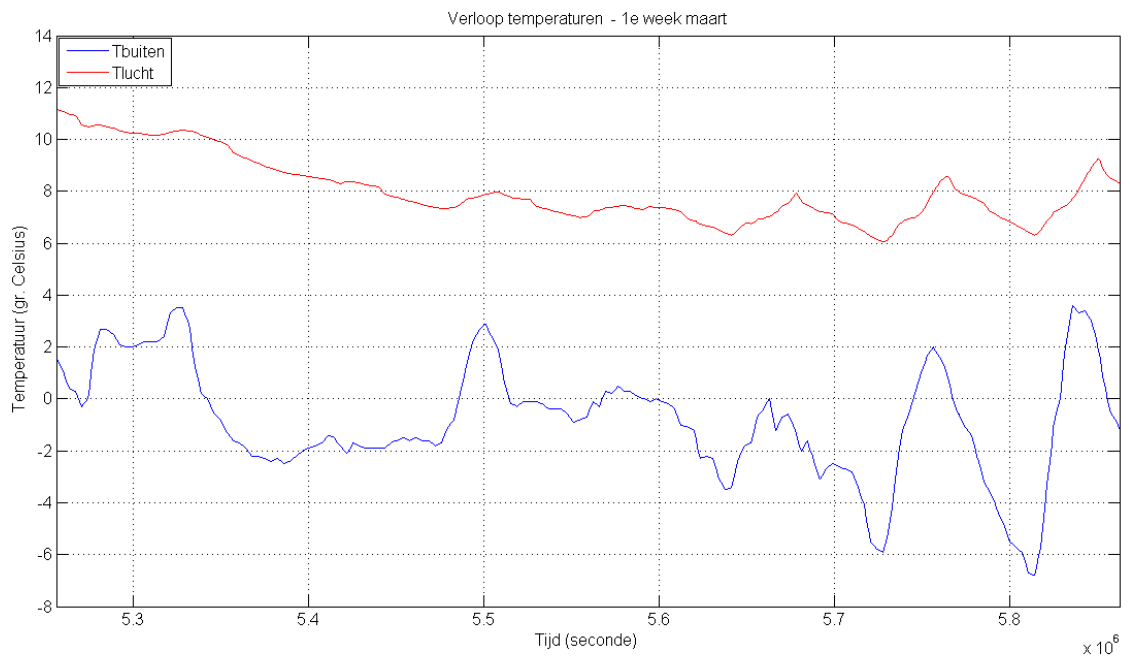
Figuur 6.46 Verloop buitentemperatuur en temperatuur in de woning ( $n = 0,5 \text{ u}^{-1}$ ,  $\alpha = 8 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$ )

De maximale temperaturen in de woning zijn duidelijk lager dan in de kas. De temperatuur in de woning ligt tussen  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ , de gemiddelde temperatuur in de woning is  $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . De temperatuur in de woning is in de figuren 6.47, 6.48 en 6.49 weergegeven voor een week in het tussenseizoen, een week in de zomer en een week in de winter.

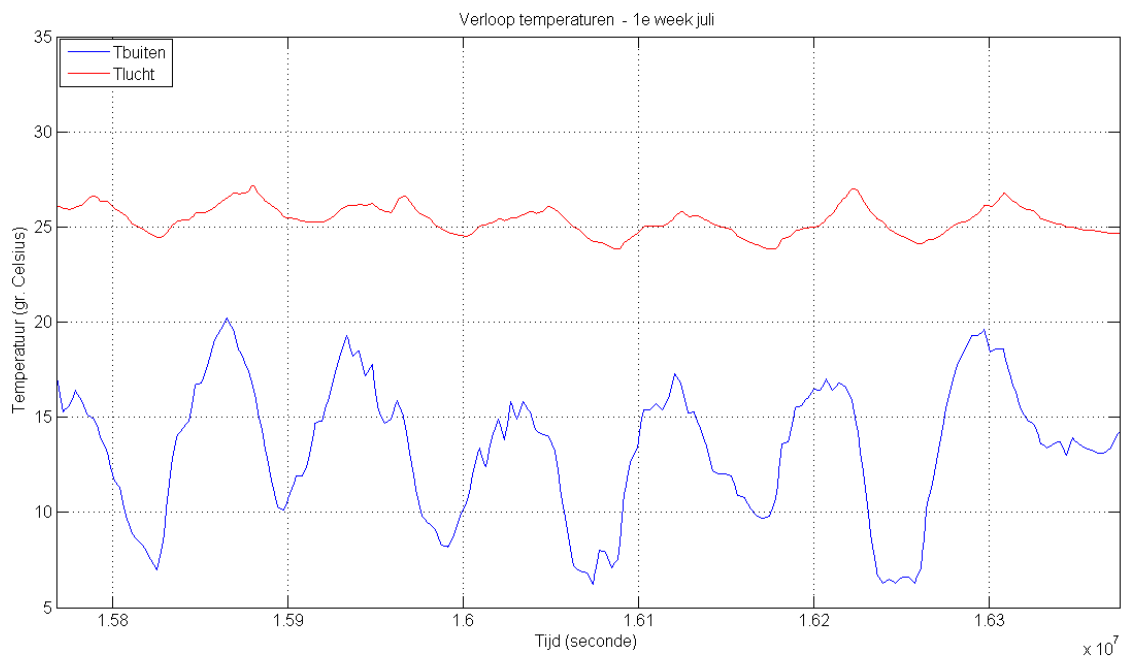
De temperatuur in de woning is net als bij de kas vrijwel altijd hoger dan de buitenlucht. Wel zijn de maximale temperaturen in de zomer aanzienlijk lager, zo is de maximale temperatuur in de kas  $11 \text{ }^\circ\text{C}$  hoger dan in de woning. Dit was te verwachten omdat de woning veel minder glasvlakken bevat en dus minder reageert op de grootte van de zoninstraling. Toch is de temperatuur in de woning in de zomer vrij. In de zomer zal men op de koelere delen van de dag extra ventileren door het openen van ramen. Hier wordt in het model echter geen rekening mee gehouden. In de winter is de lucht in de woning warmer dan in de kas. Dit komt omdat de gevels van de woning bestaan uit dubbel glas en gesloten geveldelen, terwijl de kas bestaat uit enkel glas.

Wat verder opvalt is dat het faseverschil tussen de pieken en dalen in binnen- en buitentemperatuur veel groter is dan bij de kas. Dit is te verklaren door het feit dat de thermische massa in de woning veel groter is. Daardoor komt het ook dat de temperatuurschommelingen in de woning veel kleiner zijn dan buiten. Binnen de kas is het verschil in temperatuurschommelingen veel groter

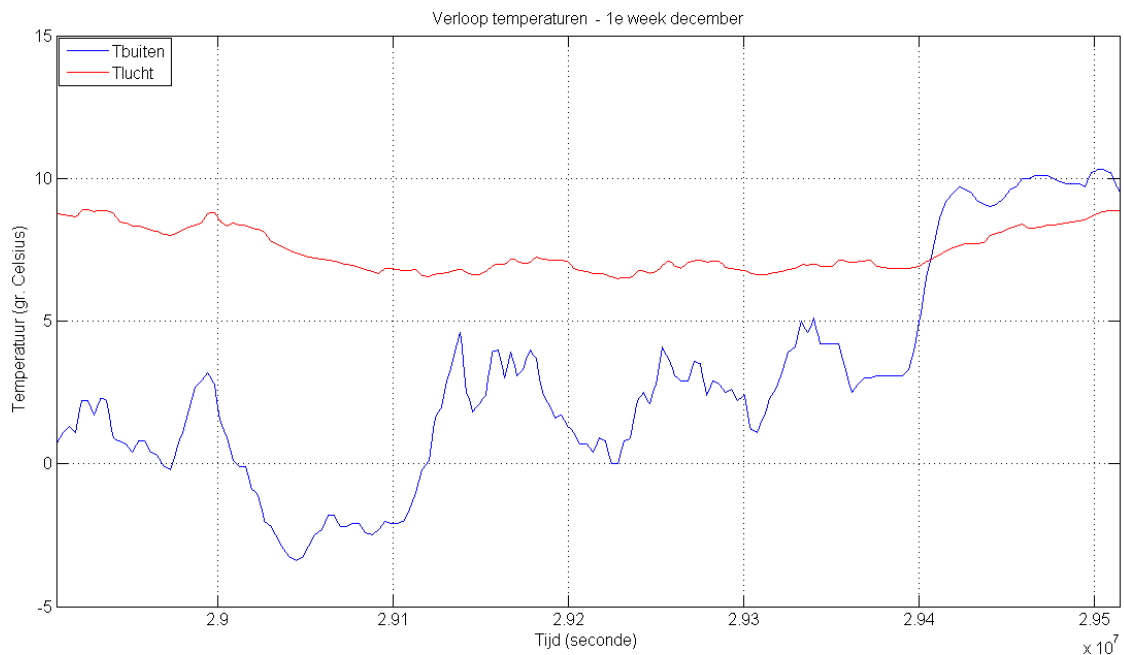
Evenals bij de kas blijkt dat de temperatuur in de woning in de eerste week van december een deel van de tijd lager is dan de buitentemperatuur. Dit omdat de buitentemperatuur snel stijgt. De lucht in de woning stijgt daardoor minder snel in temperatuur dan de lucht in de kas. Ook hierin is de invloed van de grotere thermische massa merkbaar.



*Figuur 6.47 Verloop buitentemperatuur en temperatuur woning in de eerste week van maart*



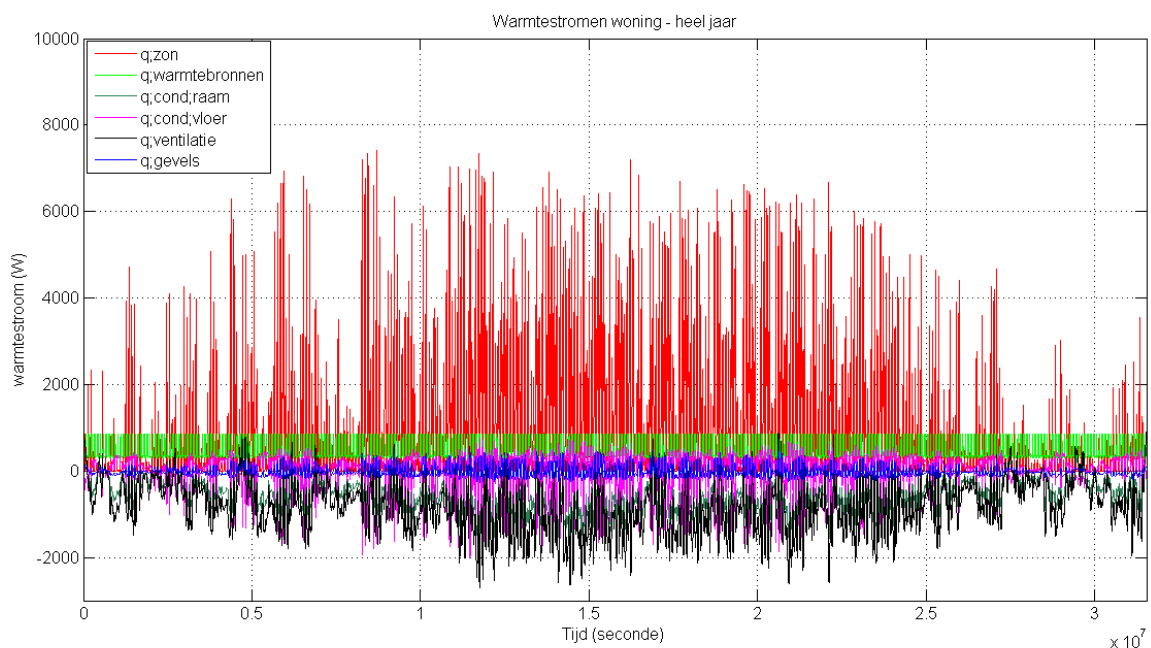
*Figuur 6.48 Verloop buitentemperatuur en temperatuur woning in de eerste week van juli*



Figuur 6.49 Verloop buitentemperatuur en temperatuur woning in de eerste week van juli

### Warmtestromen

Ook voor de woning is een warmtebalans opgesteld. De oppervlakken van de vloer en de wanden bevinden zich weer binnen de systeemgrens, evenals de binnenste glasvlakken en gevelvlakken. De energiestromen die hoeveelheid energie in de woning beïnvloeden zijn zoninstraling, interne warmtebronnen, transmissie door het glas, conductie door de vloer, conductie door de geveldelen en ventilatie. In figuur 6.50 zijn deze warmtestromen voor de woning in beeld gebracht.



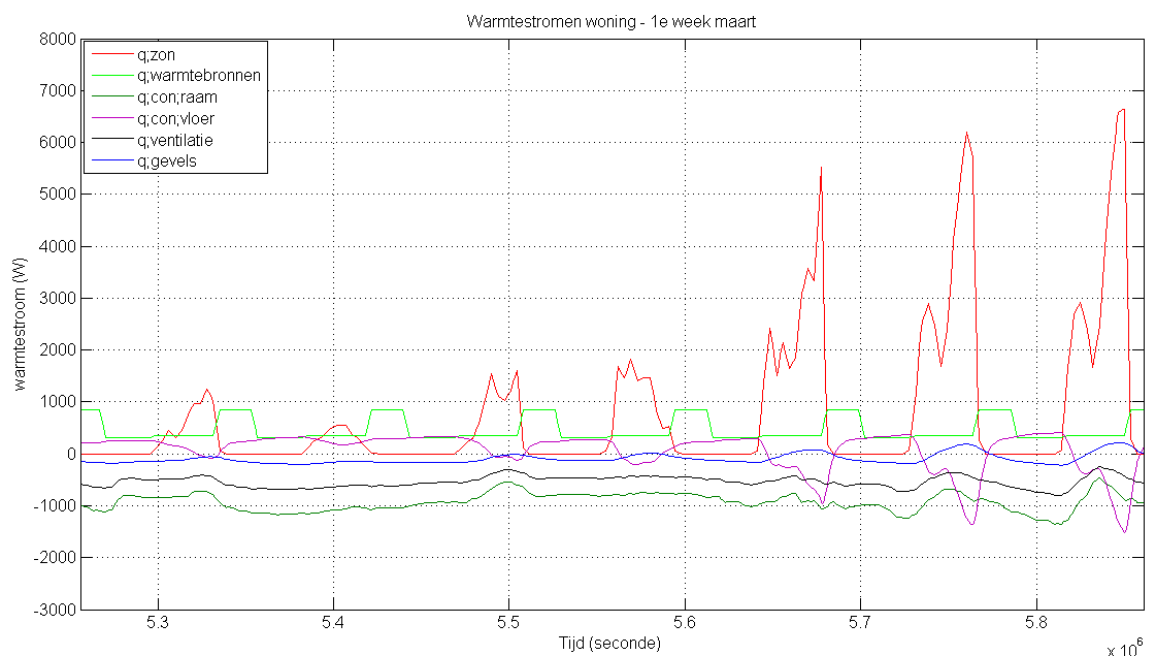
Figuur 6.50 Verloop warmtestromen woning

Om de warmtestromen beter te kunnen analyseren, zijn deze in figuur 6.51, 6.52 en 6.53 weergegeven voor drie weken gedurende het jaar.

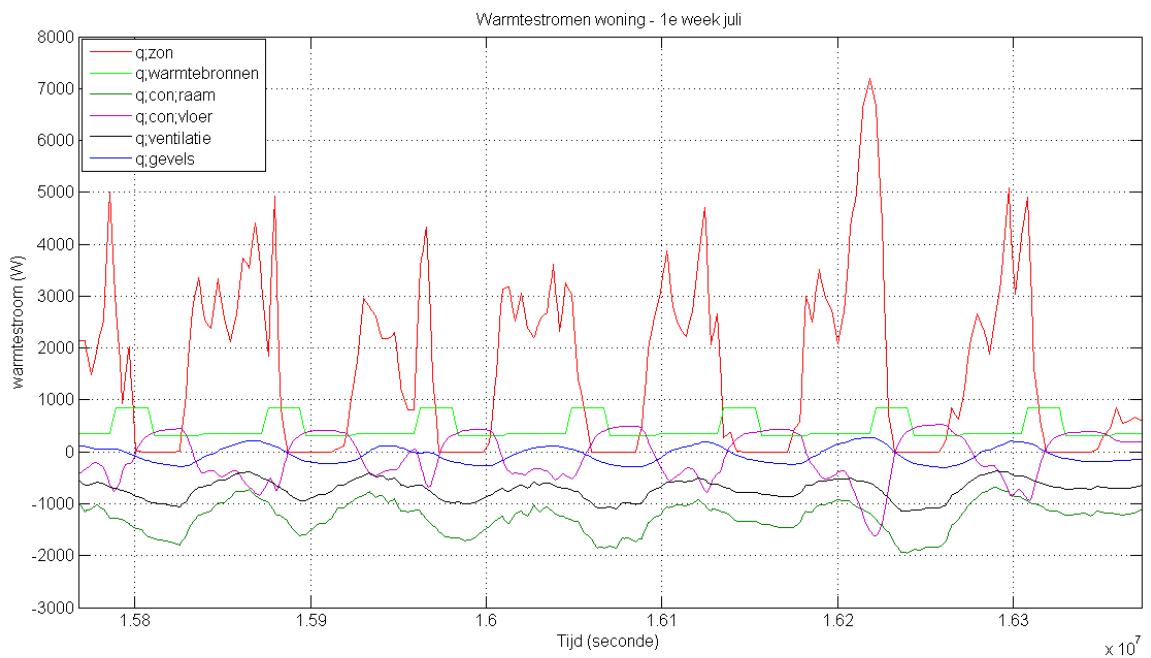
De zoninstraling is ook bij de woning gedurende een gedeelte van de dag veel groter dan de andere warmtestromen en bestaat uit relatief korte pieken. De zoninstraling is echter ruim een factor zes lager dan bij de kas, dit komt doordat de woning veel minder glas bevat en doordat HR<sup>++</sup>glas in plaats van enkel glas is toegepast.

Gedurende de momenten dat de zoninstraling groot is stroomt ook de warmte van de woning de vloer in. Wanneer er geen zoninstraling is dan keert de richting van deze stroom om en stroomt er warmte vanuit de vloer naar de woning. De massa van de vloer stabiliseert het temperatuurverloop in de woning dus. Door ventilatie en transmissie wordt gedurende het hele jaar energie aan de woning onttrokken. Dit is volgens verwachting, omdat de binnentemperatuur vrijwel het gehele jaar hoger is dan de buitentemperatuur. Er is weer een groter verschil in fase tussen de stromen te zien dan bij de kas, door de grotere thermische massa van de constructie.

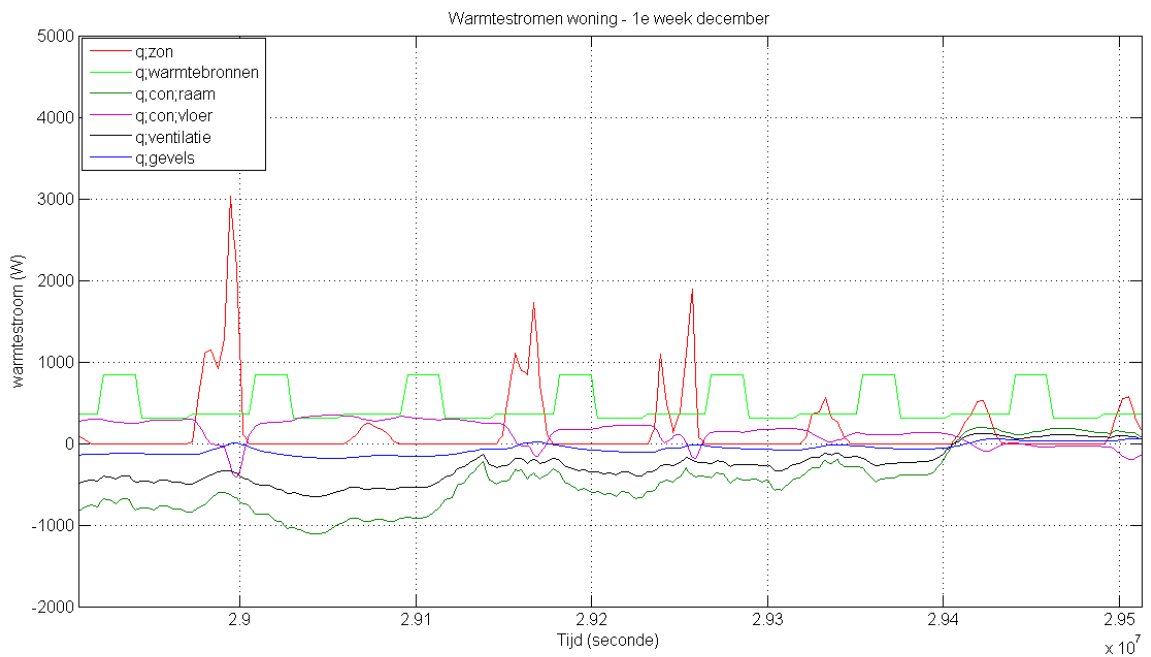
De hoeveelheid warmtetransport door ventilatie en conductie is door de lagere zoninstraling kleiner dan bij de kasruimte. De grootte van de interne warmtelasten is in het model echter onafhankelijk van de andere warmtestromen, de invloed hiervan wordt dus groter. Daarnaast is interne warmteproductie in de woning sowieso hoger dan in de kas, omdat er meer gebruiksoppervlak is.



*Figuur 6.51 Warmtestromen woning in de eerste week van maart*



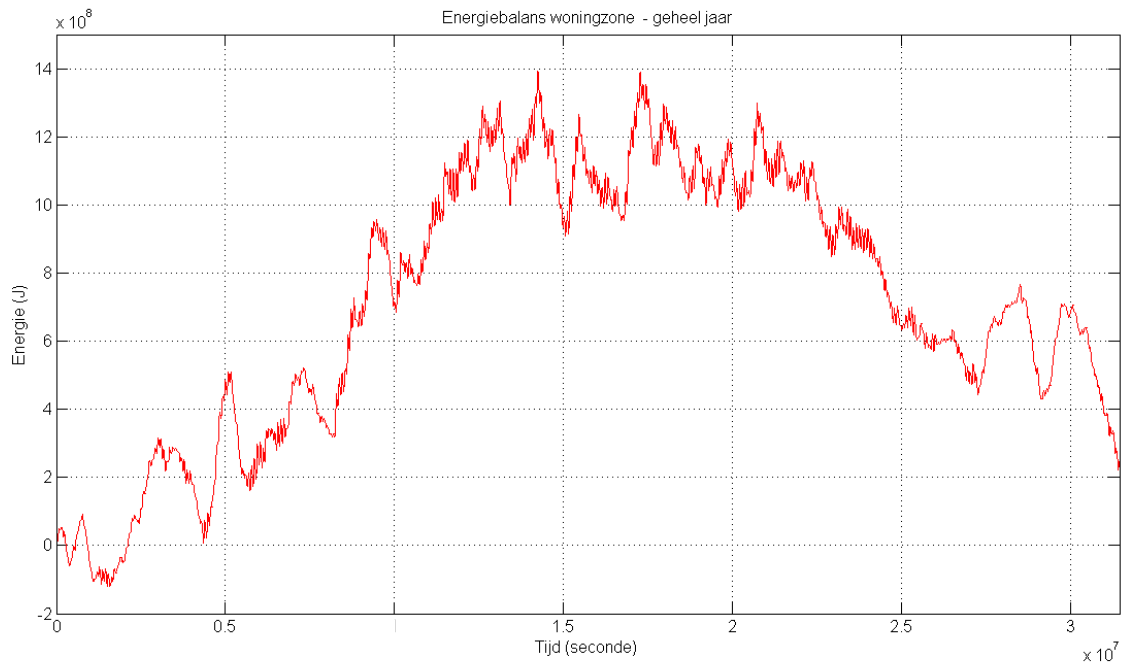
Figuur 6.52 Warmtestromen woning in de eerste week van juli



Figuur 6.53 Warmtestromen in de eerste week van december

Net als bij de kas is de totale netto warmtestroom naar de woning te bepalen. Hiermee is berekend hoeveel energie de woning over een geheel jaar binnenkomt, dan wel verlaat. De initiële temperatuur van de lucht en constructiedelen is wederom gelijk gesteld aan de buitentemperatuur. Voor de buitentemperatuur gerekend met de klimaatgegevens van 1964. Na een heel jaar zou er balans moeten zijn tussen de ingaande en de uitgaande energiestromen.

Figuur 6.54 geeft weer hoeveel energie er aan het systeem wordt toegevoerd en onttrokken gedurende het hele jaar. De hoeveelheid energie die netto aan het systeem wordt toegevoerd is ook in dit geval relatief klein. In het tussenseizoen en in de zomer wordt er energie toegevoerd, in de winter wordt er energie onttrokken. In het begin van het jaar is de energiebalans overwegend positief. Dit lijkt vreemd omdat het dan nog winter is, dit is echter te verklaren vanuit de lage initiële temperaturen.



Figuur 6.54 Energiebalans Woning over een geheel jaar (initiële temperatuur van lucht en constructie gelijk aan buitentemperatuur)

#### 6.5.4 Evaluatie gebruikte parameters subsysteem Woning

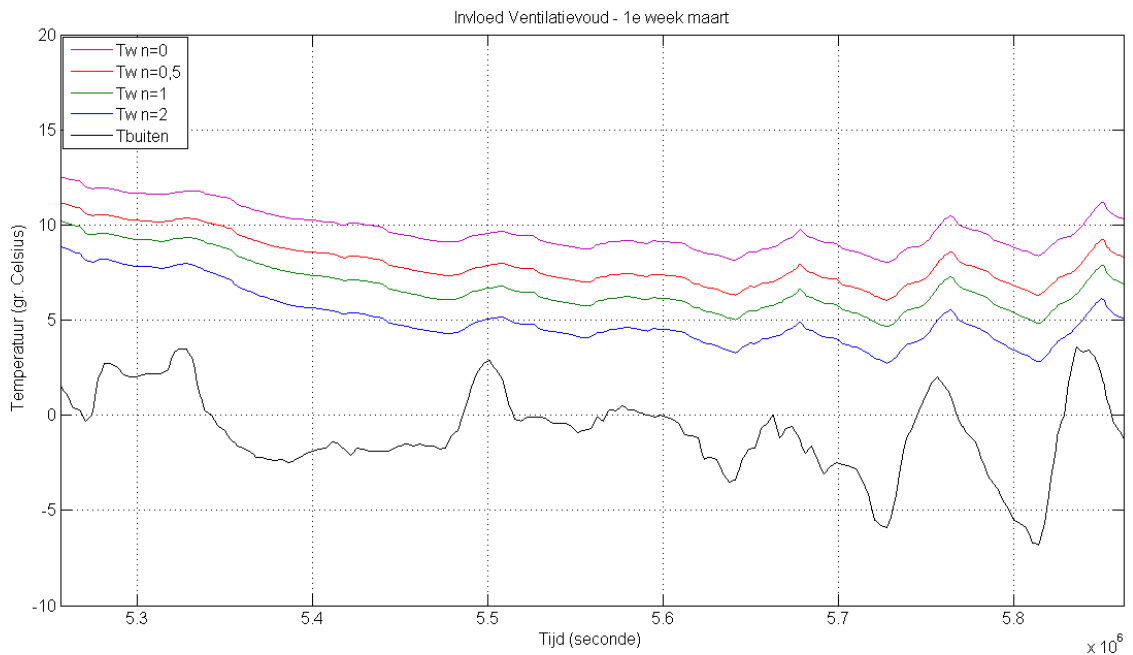
In deze paragraaf wordt de gevoeligheid voor de parameter ventilatievoud beschouwd. De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie en straling en de interne warmtelasten worden niet opnieuw beschouwd.

##### Invloed ventilatievoud

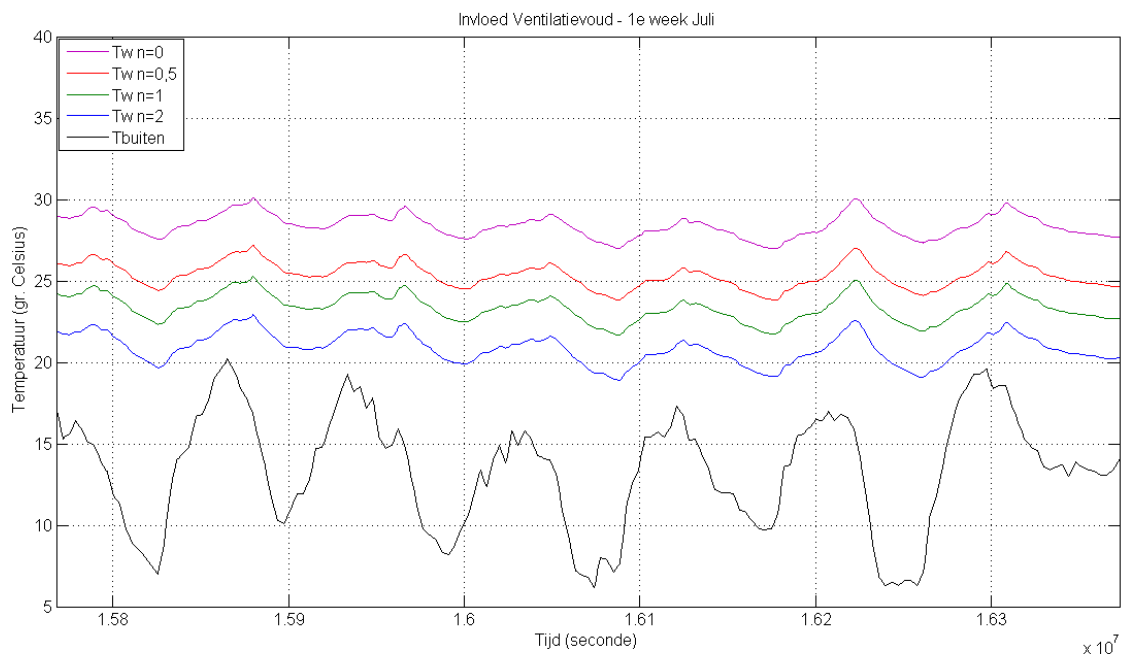
De ventilatie beïnvloedt de temperaturen in de woning. Enerzijds wordt er lucht met buitentemperatuur de ruimte ingebracht, anderzijds wordt lucht met de ruimtetemperatuur afgevoerd. Om de invloed van het ventilatievoud te onderzoeken zijn de temperaturen berekend voor verschillende waarden. De grafieken 6.55, 6.56 en 6.57 geven de gemiddelde temperatuur voor de ventilatievouden 0 (alleen infiltratie, het ventilatievoud ten gevolge van infiltratie is circa  $0,3 \text{ u}^{-1}$ ); 0,5; 1 en  $2 \text{ u}^{-1}$ . Ook de buitentemperatuur is weergegeven. Interne warmtebronnen zijn meegenomen en voor  $\alpha$  is uitgegaan van  $8 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ .

Uit de grafieken van de kasruimte bleek dat de temperatuur in de kas bij een hoger ventilatievoud dichter bij de buitentemperatuur komt te liggen. Dit is ook het geval in de woning, alleen is dit door het faseverschil tussen binnen- en buitentemperatuur lastiger te zien. Door het faseverschil wordt de binnentemperatuur soms lager dan de buitentemperatuur. In de winter is een

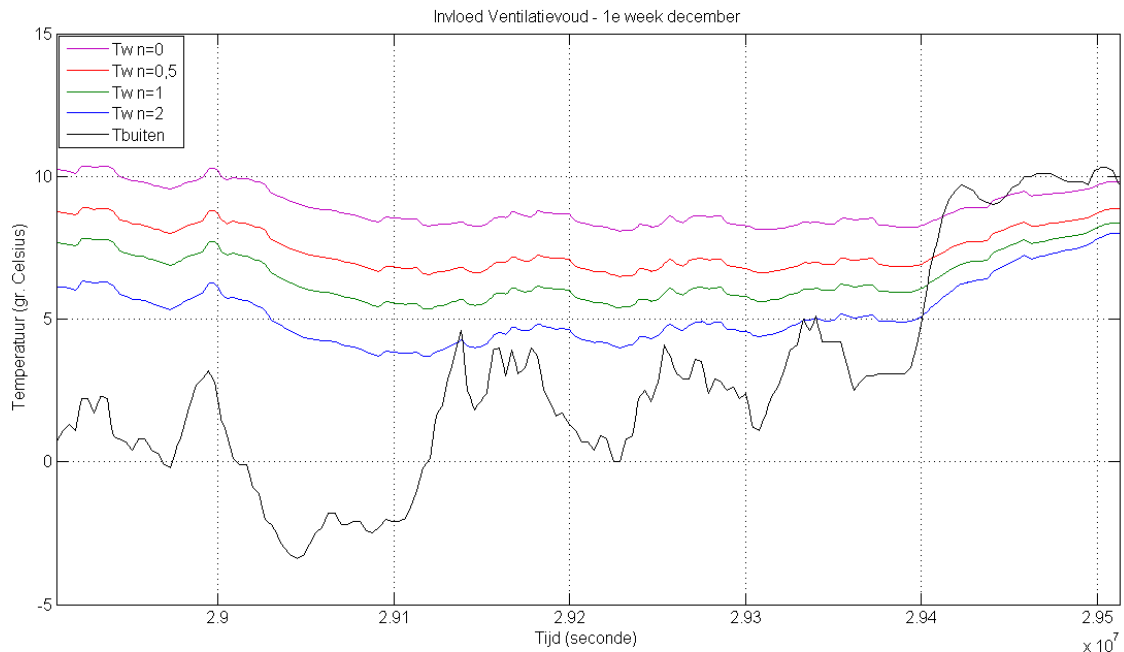
laag ventilatievoud gunstig om het warmteverlies klein te houden, in de zomer is een hoog ventilatievoud juist gunstig om de binnentemperatuur te beperken. De binnentemperaturen in de zomer blijken echter aanzienlijk lager dan in de kas.



*Figuur 6.55* Temperatuur van de lucht in de woning bij verschillende ventilatievouden, eerste week maart



*Figuur 6.56* Temperatuur van de lucht in de woning bij verschillende ventilatievouden, eerste week juli



Figuur 6.57 Temperatuur van de lucht in de woning bij verschillende ventilatievouden, eerste week december

Bij de woning blijkt de invloed van het ventilatievoud op de temperatuur groter dan bij de kas. Dit is verklaarbaar door het feit dat de infiltratie en ventilatie in de woning veel kleiner zijn. Door de grotere thermische massa en de kleinere instraling verschilt de invloed van het ventilatievoud veel minder over de seizoenen.

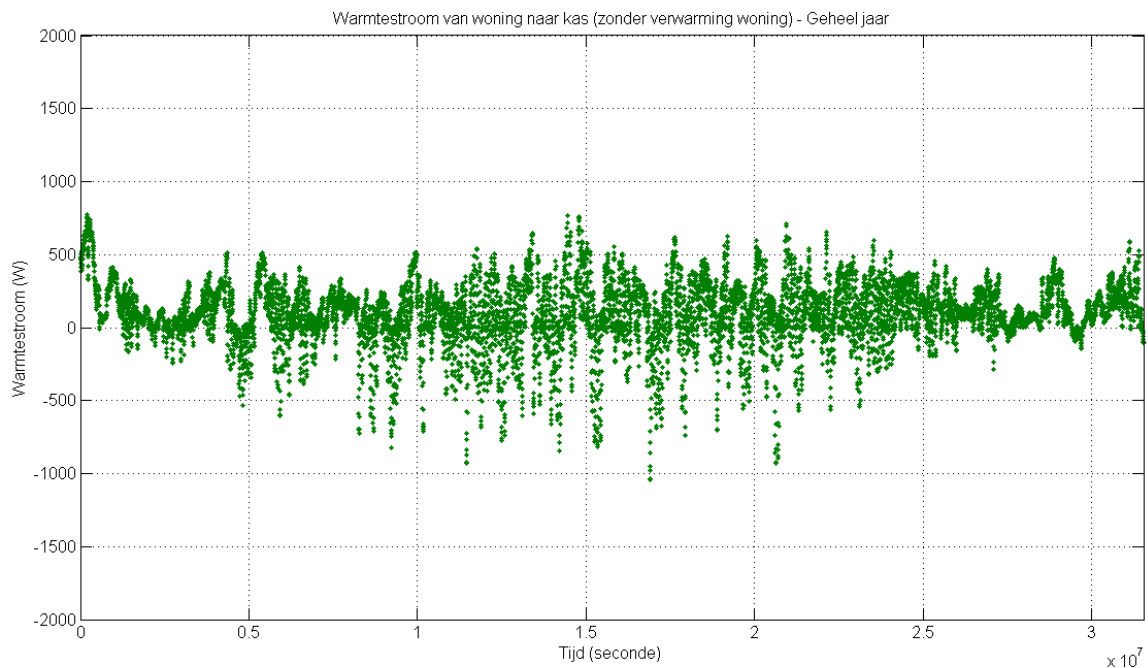
Er wordt in het model gerekend met een ventilatievoud van  $0,5 \text{ u}^{-1}$ . De afwijking ten aanzien van een ventilatievoud van  $0 \text{ u}^{-1}$  of  $1 \text{ u}^{-1}$  blijkt in de beschouwde perioden ten hoogste enkele graden te zijn. Deze keuze heeft dus duidelijk invloed, maar deze is beperkt. In het kader van het doel van dit subsysteem is dit aanvaardbaar.

### 6.5.5 Warmte-uitwisseling tussen Kas en Woning

In deze paragraaf wordt ook gekeken hoe groot de warmte-uitwisseling tussen de woning en de kas is. Het doel hiervan is een indruk te geven van de grootte van deze warmte-uitwisseling. Omdat deze erg afhankelijk is van de beschouwde situatie zal de warmte-uitwisseling tussen de twee gedeelten van de KlimaatPlusWoning in het volgende hoofdstuk niet mee worden genomen.

Er zijn simulaties uitgevoerd met de subsystemen Kas en Woning. In de kas is geen FiwiHex opgenomen. Er is gesimuleerd voor zowel de onverwarmde woning als voor de woning met verwarming. Verder wordt er met betrekking tot de vergelijking 6.8 aangenomen dat 1 % van het oppervlak van de wand tussen kas en woning bestaat uit kieren. De grootte van de fictieve opening tussen de beide ruimten is dus 1 % van het wandoppervlak, er wordt van uitgegaan dat de fictieve opening vierkant is. Met betrekking van de tussenwand wordt uitgegaan van ongeïsoleerd beton met een dikte van 200 mm. Verder zijn de parameters gebruikt zoals deze eerder bij de beide modellen beschreven zijn.

Figuur 6.58 geeft de grootte van de warmtestroom aan gedurende een geheel jaar. Er blijkt gedurende 74% van de tijd warmte overgedragen te worden van de woning naar de kas, de rest van de tijd is er warmteoverdracht in omgekeerde richting. In de meeste gevallen wordt er dus warmte overgedragen van de woning naar de kas. De temperatuur in de kas is weliswaar fors hoger dan in de woning wanneer de zoninstraling hoog is, maar als de instraling laag is daalt de temperatuur in de kas door de geringe thermische massa snel. De gemiddelde grootte van de warmtestroom van de woning naar de kas is 188 W. In omgekeerde richting is de gemiddelde grootte 209 W. In vergelijking met de andere warmtestromen in het model zijn deze warmtestroom relatief laag.

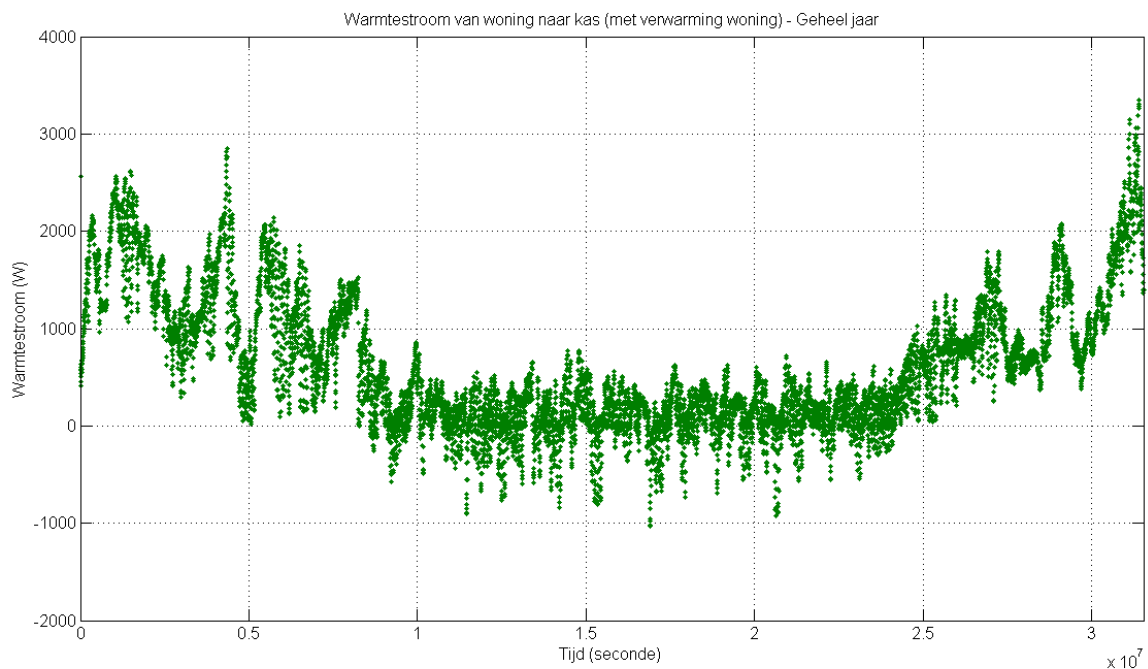


*Figuur 6.58 Warmte-uitwisseling van de woning naar de kas*

Figuur 6.59 geeft de grootte van de warmtestroom wanneer de woning het gehele jaar wordt verwarmd. Als setpoint is 20 °C ingesteld met een dode zone van 1 °C. In de winter wordt de temperatuur van de woning hierdoor aanzienlijk hoger, waardoor de warmtestroom van de woning naar de kas aanmerkelijk groter wordt. Ook is de periode waarin er warmte van de woning naar de kas wordt overgedragen langer. Gedurende 84% van de tijd gaat er warmte van de woning naar de kas. De grootte van de warmtestroom van de kas naar de woning in de zomer verandert weinig. De gemiddelde grootte van deze warmtestroom is 174 W. Dit is verklaarbaar omdat de verwarming in de zomer geen invloed heeft op de temperaturen. De grootte van de warmtestroom van de woning naar de kas is echter aanzienlijk groter. Gemiddeld wordt 787 W van de woning naar de kas overgedragen.

Wanneer de woning wordt verwarmd met als setpoint 20 °C zal de warmtestroom naar de kas dus duidelijk invloed hebben op de resultaten van het model. De temperaturen in de kas zullen in het winterseizoen hoger worden en in zomerperiode lager. Met betrekking tot het thermische comfort in de kas is dit gunstig, met betrekking tot het winnen van warmte en 'koude' in de kas is dit echter ongunstig omdat de temperatuurverschillen kleiner worden. De temperatuur in de woning zal door de warmte-uitwisseling oplopen in

zomerperiode. In winterperiode zal het benodigde vermogen voor verwarming van de woning oplopen.



*Figuur 6.59 Warmte-uitwisseling van de kas naar de woning (inclusief verwarming woning, setpoint 20 °C)*

De grootte van de warmtestroom tussen de kas en de woning is in sterke mate afhankelijk van de uitvoering van de KlimaatPlusWoning. Wanneer de woning tussen de beide delen geïsoleerd wordt en de kieren tussen de beide delen van de woning goed luchtdicht worden uitgevoerd zal warmteoverdracht tussen beide gedeelten kleiner worden. Het gebruik door de bewoners is ook erg belangrijk. Het openen van de tussendeuren tussen beide delen is van grote invloed op de warmte-uitwisseling. Het is overigens ook mogelijk om de kas en de woning ruimtelijk van elkaar gescheiden te houden. Dan zal er geen warmte-uitwisseling zijn tussen de kas en de woning.

Omdat de invloed van de uitvoering en detaillering van de tussenwand evenals de invloed van het bewonersgedrag groot is, zal de warmte-uitwisseling tussen de kas en de woning niet worden meegenomen in het model.

## 6.6 Substelsysteem FiwiHex

### 6.6.1 Schematisering

Het subsysteem verschilt van de voorgaande subsystemen. Het is een hulpsysteem en bestaat niet uit knopen. Het subsysteem bepaalt het vermogen dat de FiwiHex levert aan de hand van gegevens uit de andere subsystemen. Het systeem bevat een regeling, die bepaalt wanneer er verwarmd en gekoeld wordt.

De FiwiHex hangt boven in de kas en wordt gebruikt om de kas te koelen als de temperatuur hoger wordt dan een bepaalde waarde. Voor de gewenste temperatuur wordt uitgegaan van 20 °C. Het systeem reageert echter pas bij een marge. Er is gekozen voor een marge van 2 °C, de FiwiHex gaat dus pas koelen als de temperatuur in de kas 22 °C of hoger wordt. Het water stroomt

dan vanuit de koude bron, door de Fiwihex, naar de warme bron. Wanneer de temperatuur te laag wordt, dan zorgt de Fiwihex voor verwarming. Dit gebeurt bij een temperatuur lager dan 18 °C. Het water stroomt dan omgekeerd. Wanneer de temperatuur tussen 18 en 22 °C ligt dan is er geen stroming tussen de bronnen. De verschillen in temperatuur zijn dan zo gering dat het effect van de Fiwihex op de kastemperatuur verwaarloosbaar klein zou zijn, terwijl er wel elektrisch vermogen nodig is om de Fiwihex te laten draaien.

De luchttemperatuur die voor de kas wordt berekend is de gemiddelde temperatuur. In de kas zal een temperatuurgradiënt ontstaan. Men kan hiervan gebruik maken door de Fiwihex hoog in de kas te positioneren. Voor de waarde van deze gradiënt wordt uitgegaan van de gemeten waarde bij de kaswoningen in Culemborg [11]. Deze is afhankelijk van de zoninstraling:

$$\Delta T = 0,003 \text{ °C/m per W/m}^2.$$

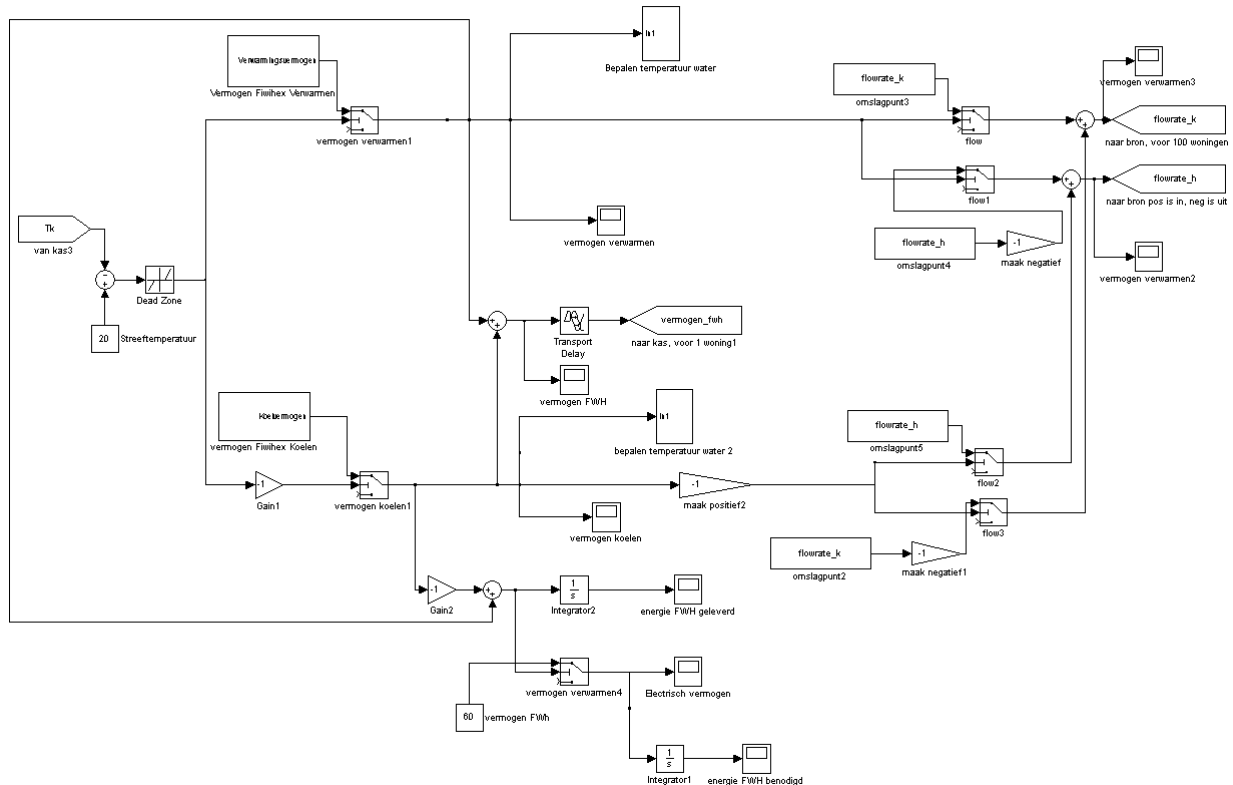
Vergelijking 6.8

De grootte van de kas in Culemborg is vergelijkbaar met het kasgedeelte van de KlimaatPlusWoning en er is in beide gevallen enkel glas toegepast. Het ventilatievoud van de woningen in Culemborg varieert sterk, maar is duidelijk hoger. Dit houdt in dat de grootte van de gradiënt in de kas in de zomer wordt onderschat. Hierbij moet rekening gehouden worden bij het interpreteren van de resultaten.

### 6.6.2 Model in Simulink

Het model Fiwihex heeft als input de kastemperatuur en de temperaturen van de bronnen. De waarde van de kastemperatuur is afkomstig uit het subsysteem Kas, de temperaturen van de koude en de warme bron zijn constant aangenomen.

Aan de hand van de kastemperatuur wordt bepaald of er wordt gekoeld of verwarmd. Het vermogen van de Fiwihex wordt berekend met vergelijking 4.3, waarvoor de parameters in hoofdstuk 4 zijn afgeleid.



Figuur 6.60 Simulink-model voor het subsysteem FiwiHex

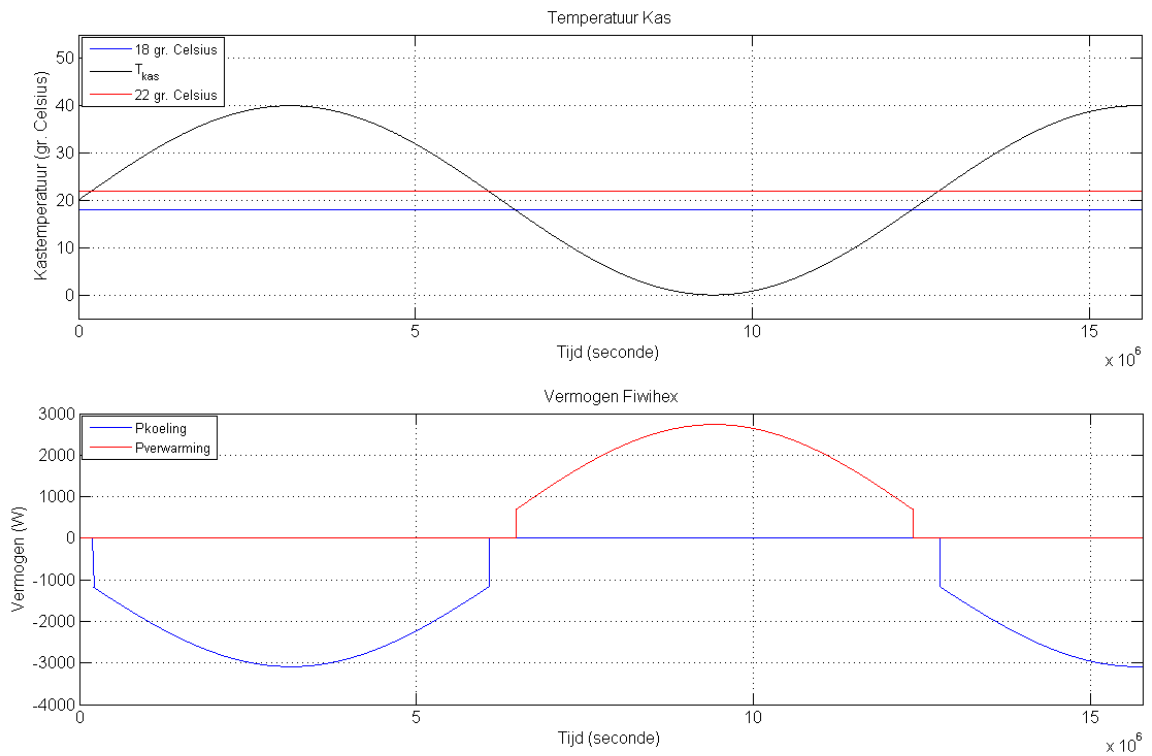
### 6.6.3 Testen

Het model dat werd beschreven in de voorgaande paragrafen is uitgebreid onderzocht. In deze paragraaf wordt de werking van het subsysteem FiwiHex geanalyseerd. Er wordt gekeken of de FiwiHex goed reageert op de temperatuur in de kas. Ook wordt het verschil tussen de gemiddelde kasttemperatuur en de temperatuur boven in de kas beschouwd.

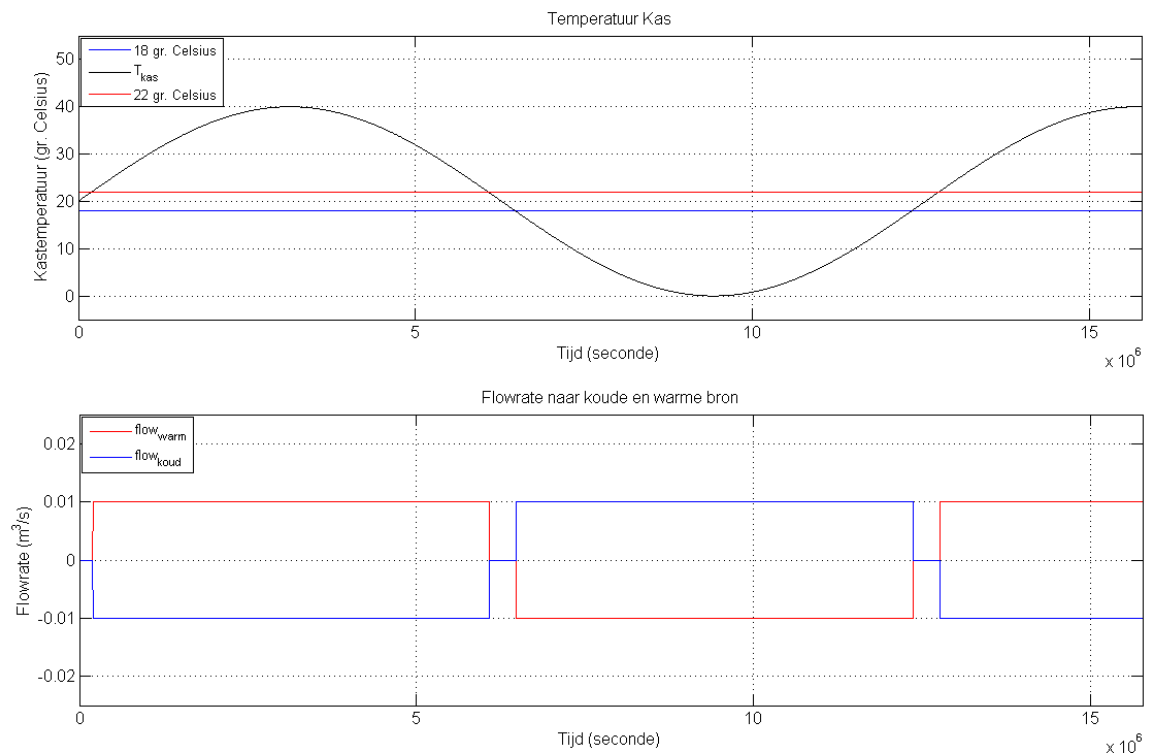
### Werking FiwiHex

De werking van het model van de FiwiHex is gecontroleerd aan de hand van een eenvoudige sinusfunctie voor de kasttemperatuur. Figuur 6.61 geeft de kasttemperatuur en daaronder het koelvermogen en warmvermogen van de FiwiHex. Er is hierbij uitgegaan van een instroomtemperatuur van 12°C bij koelen en 25 °C bij verwarmen. De temperatuurgadiënt in de kas is nog niet meegenomen.

Als de temperatuur in de kas hoger is dan 22 °C levert de FiwiHex een negatief vermogen en wanneer het koeler is dan 18 °C wordt er een positief vermogen geleverd. De grootte van het vermogen is eenvoudig te controleren met de formule  $q = \varepsilon \cdot C_{\min}(T_{w,in} - T_{k,in})$ . Bij 22 °C bedraagt het koelvermogen 1134 W, bij 18 °C is het berekende verwarmingsvermogen 748 W. Deze waarden blijken te kloppen. De tussenliggende waarden in de grafiek blijken ook aan de formule te voldoen. Overigens is in deze grafiek alleen naar positieve kasttemperaturen gekeken. Ook bij negatieve waarden blijkt het model goed te werken.



Figuur 6.61 Kastemperatuur en vermogen Fiwihex



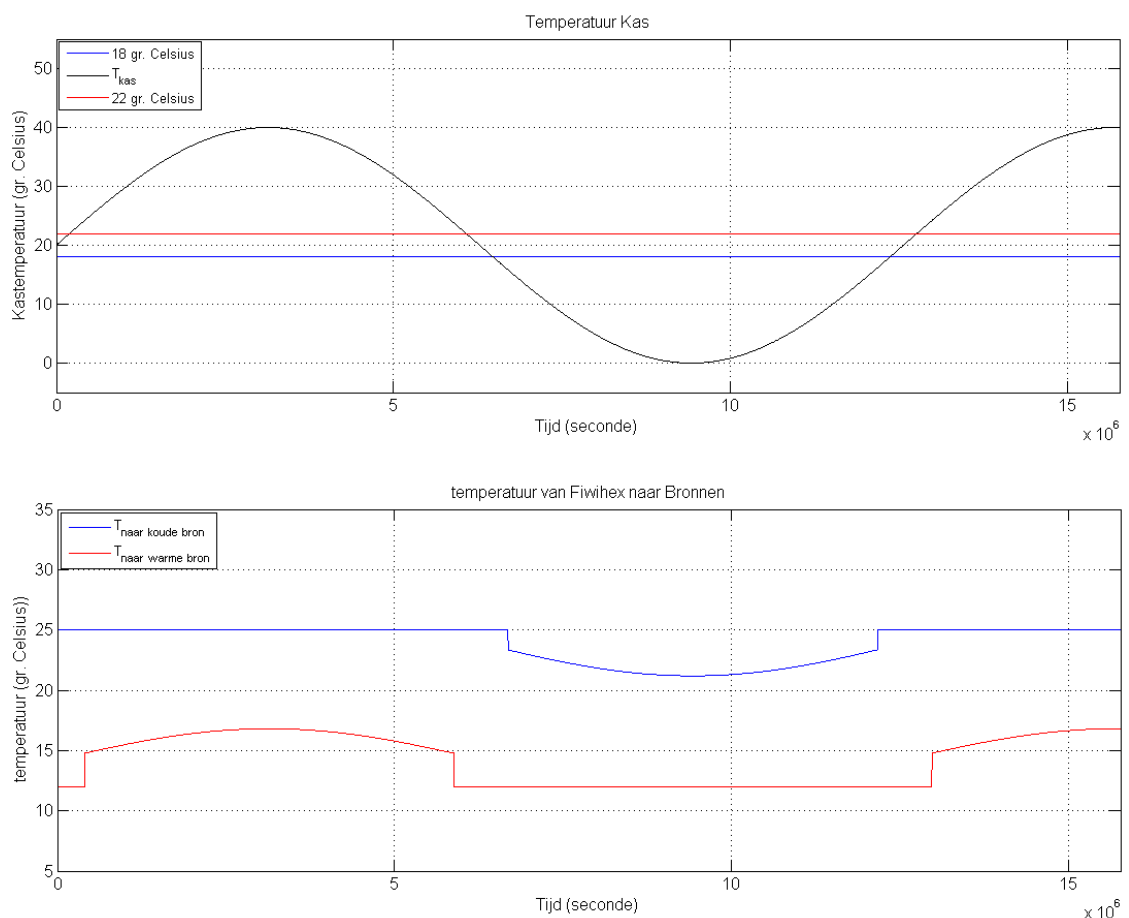
Figuur 6.62 Kastemperatuur en waterstromen

Er wordt altijd dezelfde waterstroom door de Fiwihex gevoerd. Voor 100 woningen is de grootte van de waterstroom dus honderd maal  $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . De richting van de waterstroom verschilt. Het water stroomt in het koelseizoen vanuit de koude bron, door de Fiwihex, naar de warme bron. Wanneer er wordt verwarmd is de stroomrichting omgekeerd. Het subsysteem Fiwihex bepaalt de richting aan de hand van de kastemperatuur. Een negatieve waarde betekent dat de waterstroom de betreffende bron verlaat. Figuur 6.62 geeft de kastemperatuur en de beide waterstromen weer. Te zien is dat het water bij koeling van de koude naar de warme bron stroomt en bij verwarmen van de warme naar de koude bron. Dit is juist.

De temperatuur van het retourwater dat naar de bronnen stroomt wordt bepaald door het subsysteem Fiwihex. De temperatuur van het water dat naar de beide bronnen stroomt, is weergegeven in figuur 6.63. De temperaturen kunnen gecontroleerd worden met de volgende formules:

$$\Delta T_w = \frac{q}{\dot{m}_w \cdot c_w} \text{ voor de verwarming en } \Delta T_k = \frac{q}{\dot{m}_k \cdot c_k} \text{ voor koeling.}$$

Bij  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  bedraagt het berekende verschil  $2,7 \text{ }^\circ\text{C}$  en bij  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  is het verschil  $1,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Deze waarden blijken overeen te komen met de grafieken. Ook de tussenliggende waarden in de grafieken blijken aan de formule te voldoen.



Figuur 6.63 Kastemperatuur en retourtemperatuur

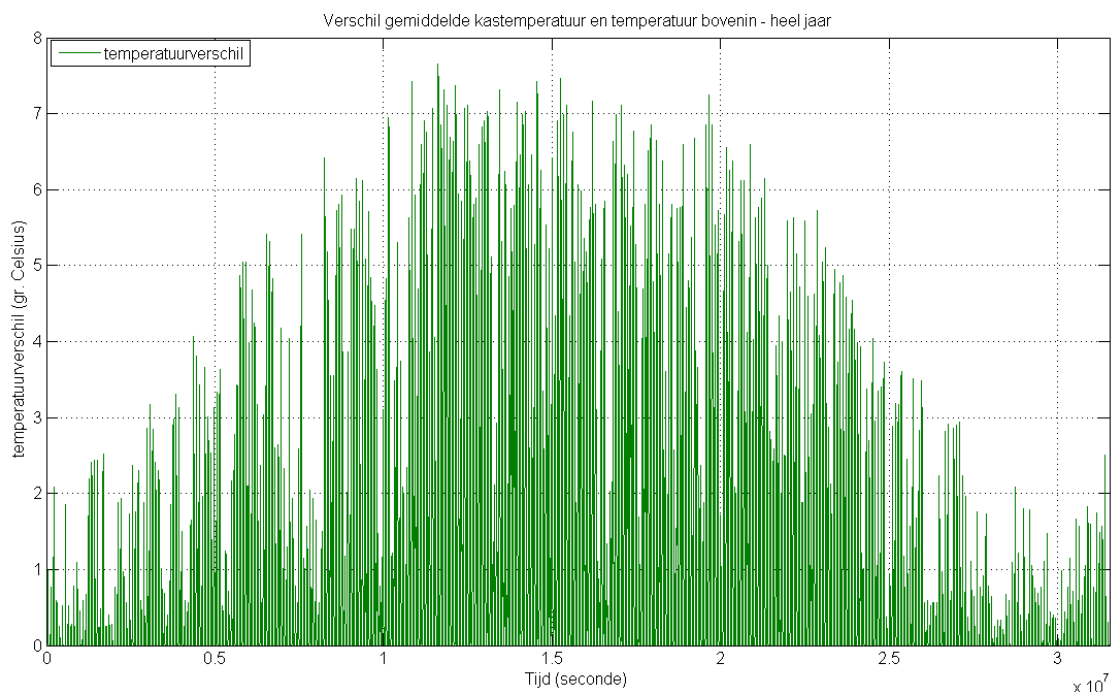
Er moet worden opgemerkt dat de temperatuurverschillen van het water maar klein zijn. Ondanks het feit dat de luchttemperatuur varieert tussen 0 en 40 °C wordt het koelwater bij hoge temperaturen maar weinig opgewarmd. Omgekeerd wordt het verwarmingswater bij lage temperaturen maar weinig in temperatuur omlaag gebracht. Hier zal in het volgende hoofdstuk op terug worden gekomen.

### Temperatuurgradiënt

In de kas zal een temperatuurgradiënt ontstaan. De Fiwihex hangt bovenin de kas, waar de luchttemperatuur dus hoger zijn dan de gemiddelde kastemperatuur. In de bovenstaande grafieken is dit temperatuurverschil niet meegenomen. Het temperatuurverschil hangt af van de instraling op het horizontale vlak en wordt berekend in het subsysteem Fiwihex. Figuur 6.64 geeft de waarden van dit verschil over een geheel jaar.

Het temperatuurverschil blijkt op te lopen tot 7,7 °C. Dit is eenvoudig te controleren. De maximale horizontale instraling in het referentiejaar is 865 W/m<sup>2</sup>, wat resulteert in een gradiënt van 2,6 °C/m. Over de halve hoogte van de kas is het temperatuurverschil dus inderdaad 7,7 m. Er zijn nog enkele andere waarden gecontroleerd, deze blijken ook te kloppen. Het temperatuurverschil kan dus substantieel zijn. De invloed op het geleverde vermogen is dat ook. Met betrekking tot de retourtemperatuur zal het effect kleiner zijn.

Zoals in paragraaf 6.6.1 werd uiteengezet wordt de grootte van de gradiënt in de zomer wordt onderschat. Hierbij moet rekening gehouden worden bij het interpreteren van de resultaten.



Figuur 6.64 Verschil tussen gemiddelde kastemperatuur en temperatuur bovenin de kas

## 6.7 Relaties tussen de subsystemen

De verschillende subsystemen kunnen worden gecombineerd tot één geheel model. Sommige subsystemen wisselen dan informatie met elkaar uit. In deze paragraaf wordt kort beschreven hoe het totale model er uitziet en welke informatie de subsystemen uitwisselen. De afzonderlijke subsystemen zijn eerder in dit hoofdstuk toegelicht.

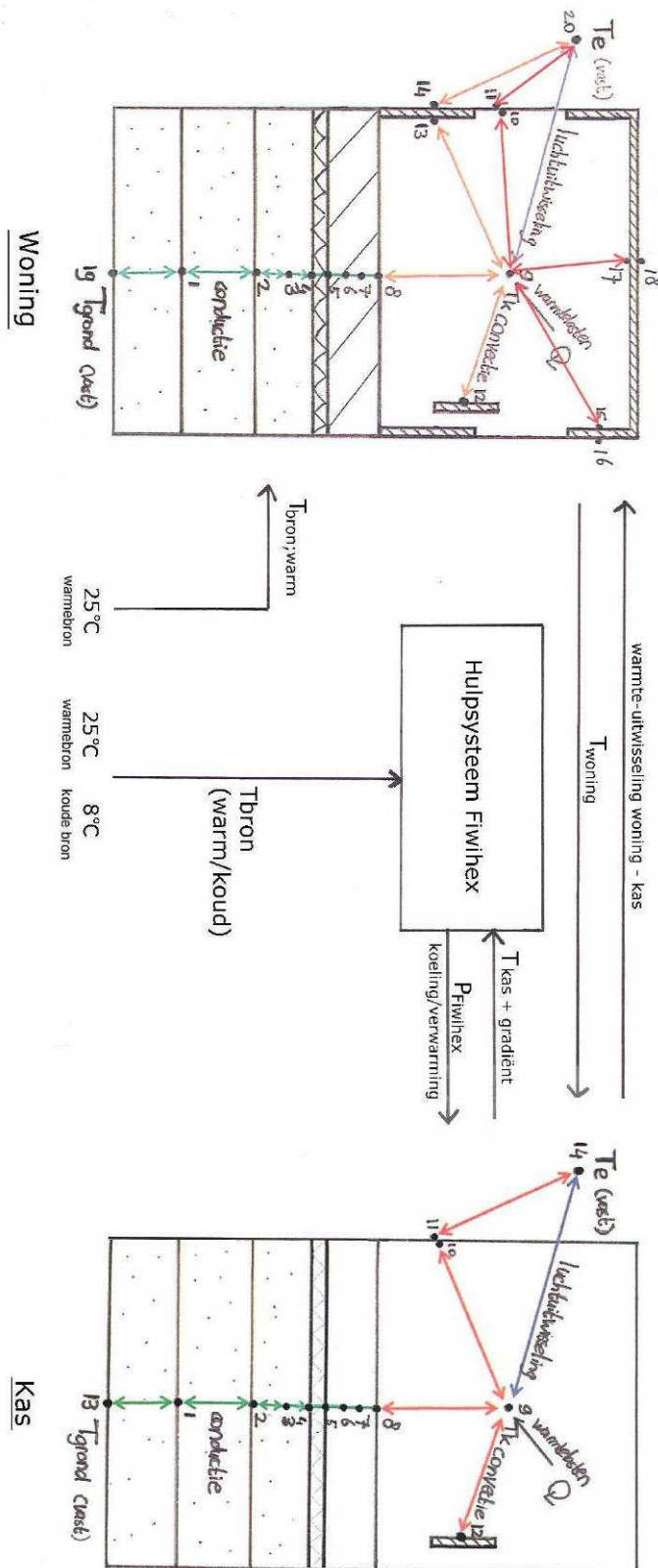
Een overzicht van de verschillende subsystemen en de mogelijke informatiestromen hiertussen is weergegeven in figuur 1.65. Deze uitwisseling van informatie wordt nu kort beschreven.

Het hulpsysteem FiwiHex bepaalt wanneer de warmtewisselaar koelt of verwarmt. Hiervoor gebruikt het systeem de temperatuur bovenin de kas. Het subsysteem Kas stuurt hiervoor de gemiddelde kastemperatuur en de temperatuurgradiënt naar het subsysteem FiwiHex.

Om het geleverde vermogen te bepalen heeft de FiwiHex ook de temperatuur van het water uit de bron nodig. Zoals eerder is beschreven wordt aangenomen dat de warme bron een constante watertemperatuur heeft van 20 °C en de koude bron van 8 °C. Met de temperatuur bovenin de kas en de temperatuur van het water uit de bron kan het Substelsysteem FiwiHex het vermogen bepalen dat de warmtewisselaar levert. Deze informatie wordt naar het subsysteem Kas gestuurd.

De temperatuur van de warme bron wordt ook gebruikt door het subsysteem Woning. Aan de hand van deze temperatuur is te bepalen hoeveel naverwarming nodig is om het gewenste verwarmingsvermogen in de woning te leveren.

Ten slotte wordt de grootte van de warmte-uitwisseling tussen kas en woning bepaald door het subsysteem Kas. Hiervoor gebruikt het subsysteem de gemiddelde temperatuur in de woning. Vervolgens zendt het de waarde van de uitgewisselde warmte naar het subsysteem Woning. In hoofdstuk 7 zal dit verband niet worden meegenomen.



Figuur 6.65 Overzicht van de verschillende subsystemen en de onderlinge verbanden

## Voetnoten hoofdstuk 6

1 De **Meerwerkende dikte** is het gedeelte van het materiaal waarvan de thermische massa het temperatuurverloop in de ruimte substantieel beïnvloedt.

## 7 Simulatie

### 7.1 Kasgedeelte met Fiwihex

#### 7.1.1 Inleiding

In deze paragrafen wordt de kas gesimuleerd, met daarin één of meer warmtewisselaars. Aan de hand hiervan kan worden gekeken naar het effect op de temperatuur in de kas, het vermogen dat de warmtewisselaars leveren en de retourtemperatuur van het water. Zoals in het vorige hoofdstuk al werd vermeld zal warmte-uitwisseling tussen de kas en de woning niet worden meegenomen.

Er wordt bij de simulaties uitgegaan van constante brontemperaturen. Deze brontemperaturen komen overeen met de temperaturen zoals beschreven voor het concept Zonneterp [9]. Voor de koude bron wordt een constante temperatuur verondersteld van 8 °C, voor de warme bron wordt uitgegaan van een constante temperatuur van 25 °C. Dit is een vereenvoudiging, want in werkelijkheid varieert de brontemperatuur onder invloed van het water dat de bron wordt ingepompt.

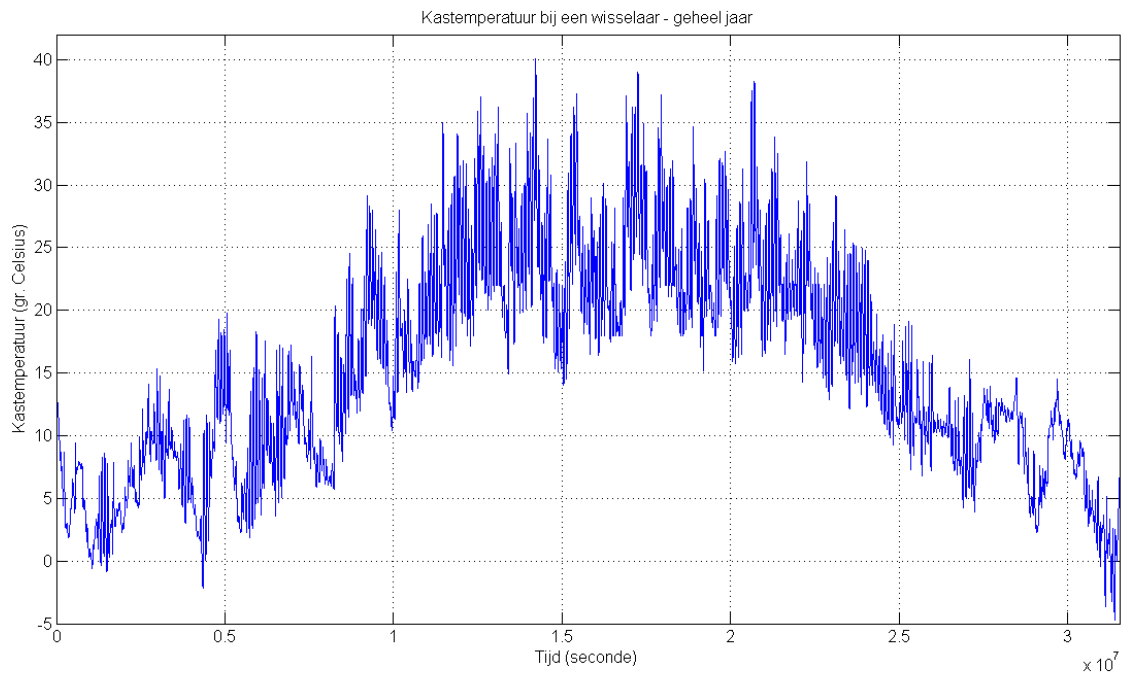
#### 7.1.2 Kas met één Fiwihex

Allereerst wordt de kasruimte gesimuleerd met één Fiwihex. Achtereenvolgens zullen in deze paragraaf het effect op de kastemperatuur, het vermogen dat de warmtewisselaars leveren en de retourtemperatuur van het water onderzocht worden.

#### Temperatuur in de kas

Het geleverde vermogen van de Fiwihex beïnvloedt de temperatuur in de kas. Figuur 7.1 geeft de kastemperatuur weer. Het effect op de temperatuur blijkt minimaal te zijn. De temperaturen in de winter komen nog steeds beneden het vriespunt en in de zomer wordt nog altijd een kastemperatuur van 40 °C bereikt. Het geleverde vermogen van de Fiwihex is blijkbaar te laag om grote verschillen in kastemperatuur te bewerkstelligen.

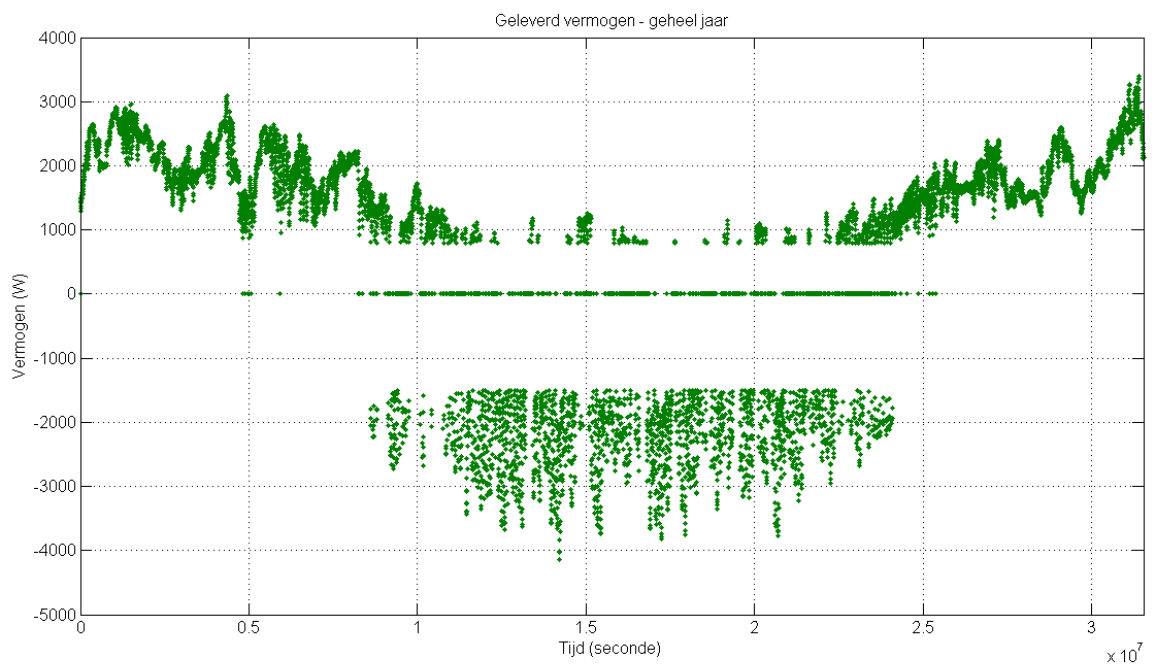
In de gebruikperiode tussen 7.00 uur en 23.00 uur is de gemiddelde temperatuur in de kas 15,7 °C als er geen Fiwihex wordt gebruikt. Wanneer een Fiwihex in de kas wordt ingezet daalt de gemiddelde temperatuur naar 16,4 °C. Zonder Fiwihex ligt de temperatuur 23% van deze tijd tussen 18 °C en 25 °C, met Fiwihex wordt dit 27% van de tijd. De toename van de tijd dat de kas te gebruiken is om te verblijven is dus gering. Hierbij moet worden opgemerkt dat de resultaten veranderen als de aannames worden gewijzigd.



Figuur 7.1 Verloop temperatuur in kas met een Fiwihex

**Geleverd vermogen**

Figuur 7.2 laat zien welk vermogen de Fiwihex levert aan de kas. Het vermogen dat de Fiwihex levert hangt af van de binnentemperatuur. Als de temperatuur in de kas lager is dan 18 °C wordt er verwarmd, als de temperatuur hoger is dan 22 °C wordt er gekoeld. Door de constante brontemperaturen zijn de minimale vermogens eenvoudig te controleren. Bij koeling is het minimale vermogen 1590 W en bij verwarmen 750 W. Als de kastemperatuur tussen 18 °C en 22 °C ligt wordt er geen vermogen geleverd.

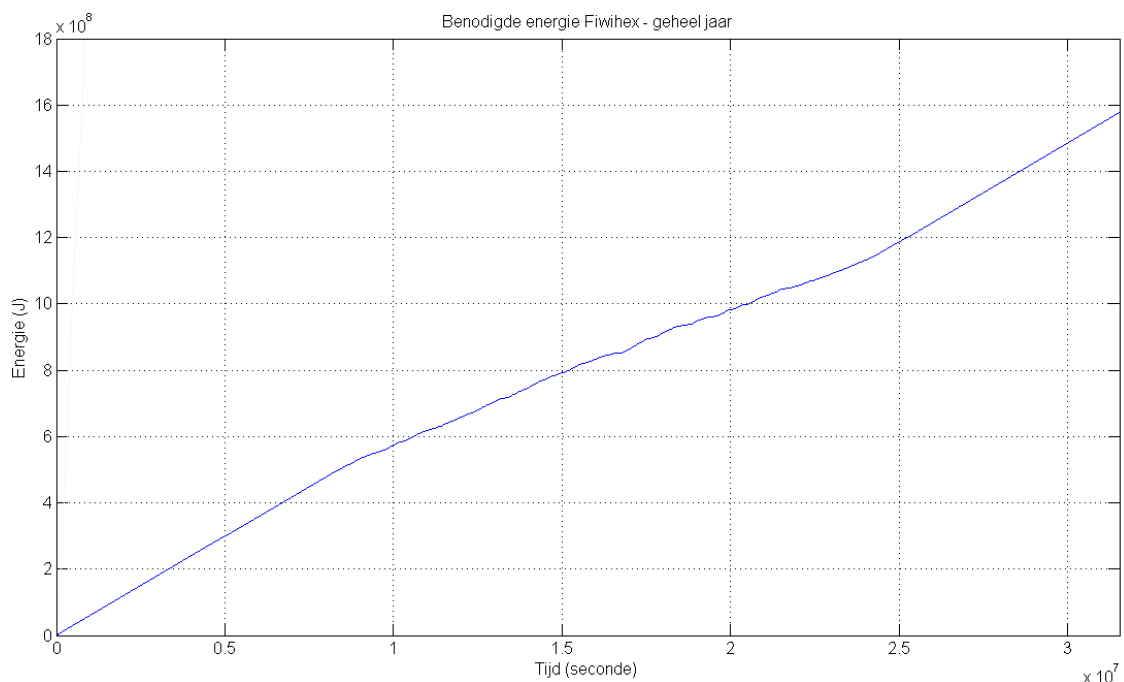


Figuur 7.2 Vermogen dat Fiwihex aan kas levert

Het maximaal optredende verwarmingsvermogen blijkt 3400 W te zijn, het maximale koelvermogen is ongeveer 4100 W. Bij koeling is het maximale vermogen dus wat hoger, dit komt omdat het temperatuurverschil tussen het water en de lucht dan groter is.

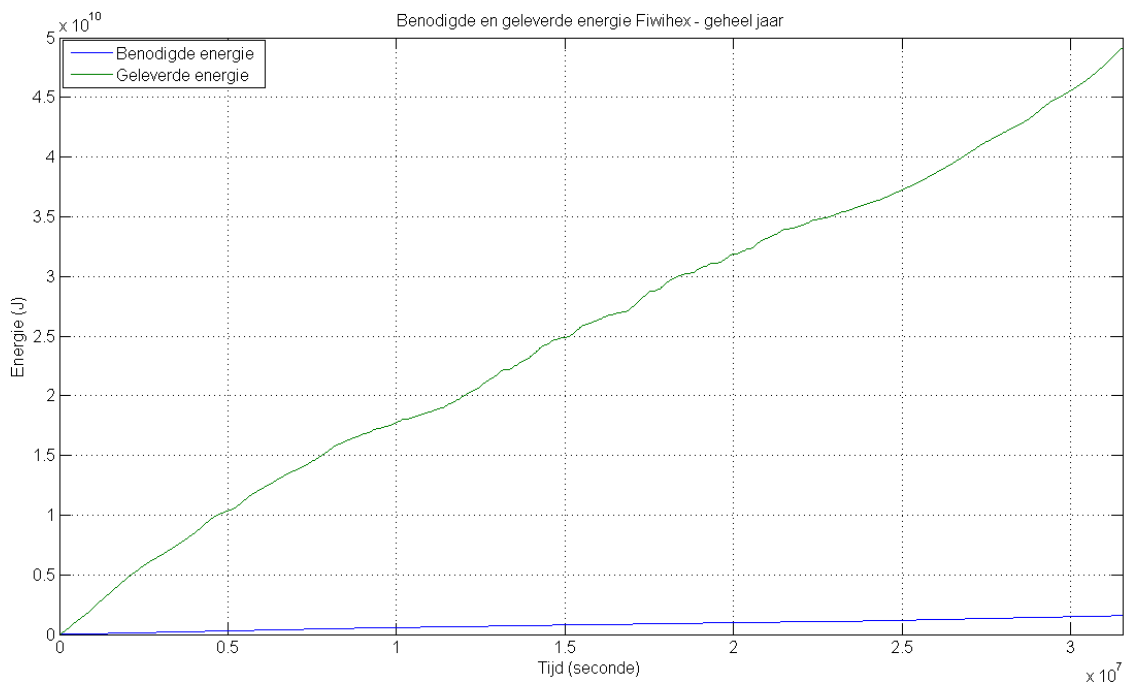
Vergeleken met de warmtestromen in de kas, die zijn bepaald in paragraaf 6.4.3, blijkt het vermogen dat de Fiwihex levert erg laag. Dit blijkt ook uit het geringe verschil tussen de kastemperaturen met Fiwihex en zonder Fiwihex. Door meer warmtewisselaars in de kas te plaatsen kan de kastemperatuur beter beheerst worden. Doordat de kastemperatuur lager wordt zal ook het geleverde vermogen per warmtewisselaar afnemen. In de volgende paragraaf wordt hier nader op ingegaan. Er zijn ook een aantal andere manieren om het geleverde vermogen te verhogen. Deze worden nog besproken.

De Fiwihex zorgt voor koeling en verwarming van de kas. Wanneer de Fiwihex in bedrijf is kost het gebruik echter ook energie. Zoals in hoofdstuk 4 is beschreven wordt het benodigde elektrische vermogen van de warmtewisselaar geschat op 60 W. Uit simulatie van de kas met Fiwihex is de benodigde hoeveelheid energie voor de Fiwihex in een geheel jaar te bepalen. Zoals uit figuur 7.3 blijkt, is deze hoeveelheid energie ongeveer 1,6 GJ. Wanneer de Fiwihex het gehele jaar in bedrijf is zou dit 1,9 GJ zijn. De Fiwihex is dus 84% van de tijd in bedrijf geweest.



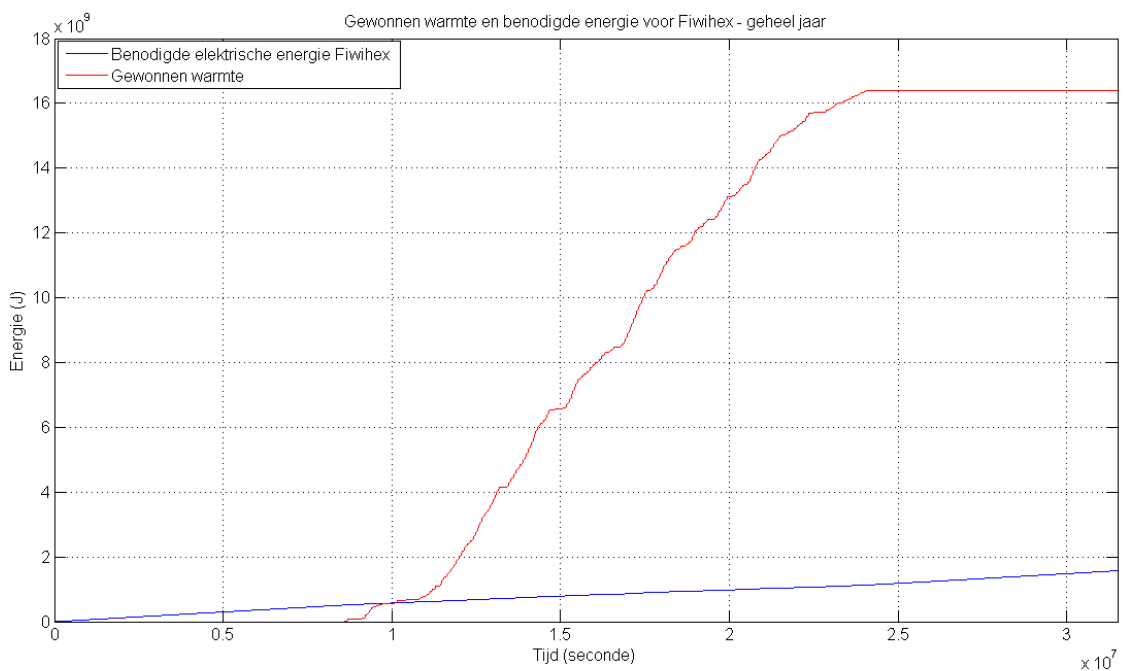
*Figuur 7.3 Voor Fiwihex benodigde energie, cumulatief voor geheel jaar*

Aan de hand van het door de Fiwihex geleverde vermogen kan worden bepaald hoeveel nuttige energie de Fiwihex over het gehele jaar aan de kas levert. Hierbij worden zowel het vermogen van verwarming en het vermogen van koeling als positieve nuttige energie opgevat. Figuur 7.4 geeft het verloop van de door de Fiwihex geleverde energie weer. De geleverde nuttige energie is 48 GJ. De benodigde hoeveelheid energie om de Fiwihex te laten draaien is opnieuw weergegeven.



*Figuur 7.4 Door Fiwhex aan kas geleverd energie, cumulatief voor geheel jaar*

De Fiwhex en de kas vormen samen een systeem, dat is bedoeld om warmte te winnen voor het verwarmen van de woning. Het koelen en verwarmen van de kas is niet het hoofddoel van toepassen van de Fiwhex. De hoeveelheid warmte die met de Fiwhex wordt gewonnen is voor het verwarmen van de woning meer van belang. De hoeveelheid gewonnen zonnewarmte is vrijwel gelijk aan de energie die aan de kas wordt onttrokken bij het koelen.



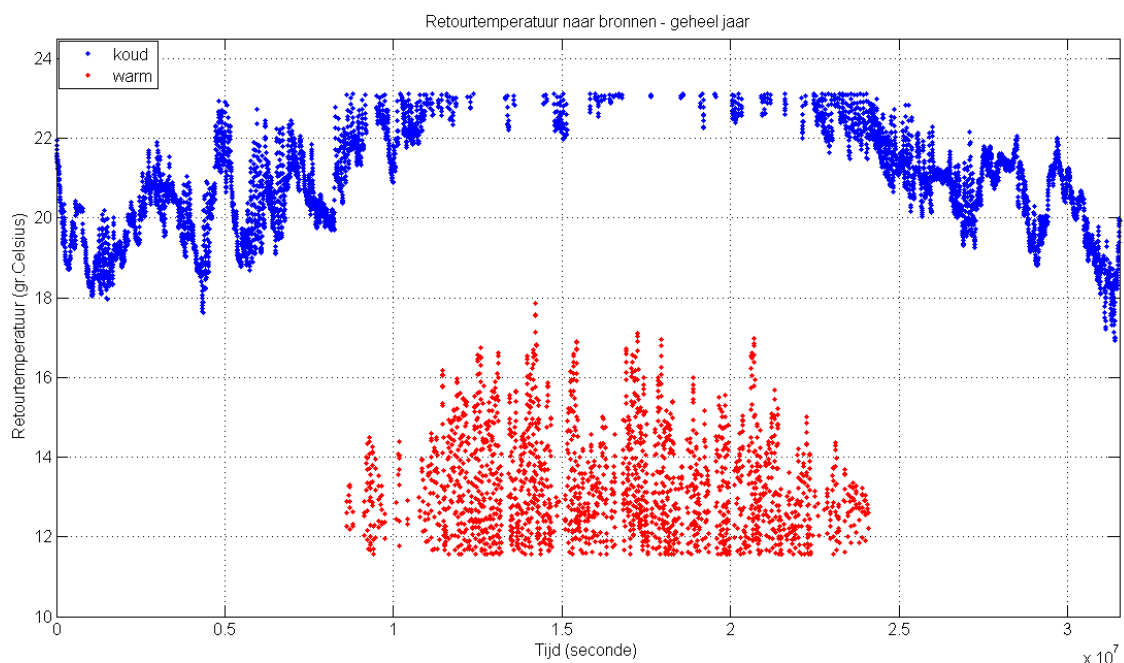
*Figuur 7.5 Door Fiwhex aan kas geleverd energie, cumulatief voor geheel jaar*

Figuur 7.5 geeft de hoeveelheid energie gedurende het hele jaar die aan het water wordt toegevoegd wanneer er wordt gekoeld. Ook de benodigde energie voor de Fiwihex is weergegeven. De Fiwihex verbruikt 1,6 GJ en de hoeveelheid gewonnen energie voor verwarming is 16,4 GJ. De hoeveelheid gewonnen energie zal in paragraaf 7.4.2 worden vergeleken met de warmtevraag van de woning. Naast de hoeveelheid gewonnen energie is echter ook de temperatuur van het gewonnen water van belang. Deze komt bij de beschouwing van de retourtemperaturen aan bod.

### Retourtemperaturen

Naast de gewonnen energie voor verwarming en het aan de kas geleverde vermogen is de retourtemperatuur van het water een zeer belangrijke parameter. Deze retourtemperatuur bepaalt de temperaturen van de bronnen.

Figuur 7.6 geeft gedurende het hele jaar de temperatuur van zowel het water dat naar de koude bron wordt gevoerd als het water dat naar de warme bron gaat.



*Figuur 7.6 Retourtemperaturen van water naar bronnen*

Wanneer er wordt gekoeld is de aanvoertemperatuur van het water 8 °C. Het retourwater warmt op en wordt naar de warme bron gevoerd. De opwarming van het water is echter kleiner dan men beoogt. De waarde van de retourtemperatuur blijkt te liggen tussen 11,8 en 17,9 °C. De minimale opwarming is weer eenvoudig te controleren. De berekende opwarming van het water is relatief klein. Het water is dus vrij koud om te worden gebruikt voor verwarming.

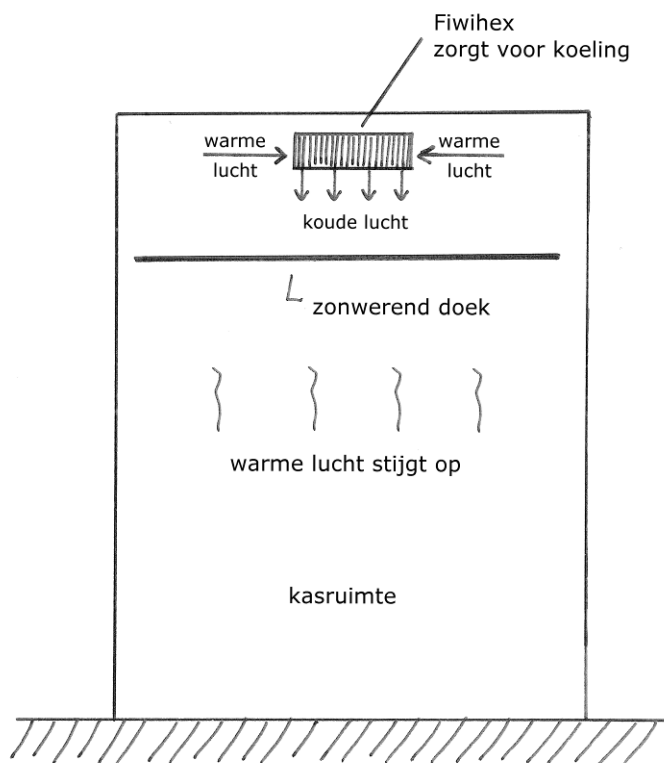
Wanneer de Fiwihex wordt gebruikt om de kas te verwarmen is de aanvoertemperatuur van het water 25 °C. Het retourwater koelt af en wordt naar de koude bron gevoerd. De afkoeling is weer relatief klein, de temperatuur ligt tussen 16,9 °C en 23,2 °C. Het water is dus erg warm om te gebruiken voor koeling.

De retourtemperatuur van het water na koeling van de kas blijkt in de beschouwde situatie dus relatief om mee te verwarmen. Omgekeerd is de temperatuur van het water dat naar de koude bron gevoerd moet worden relatief hoog. In de beschouwde situatie zijn er een aantal manieren om het temperatuurverschil dat het water ondergaat te verhogen. Deze worden nu kort toegelicht.

Het verlagen van de stroomsnelheid van het water is de eerste optie. Deze optie heeft een negatieve invloed op het vermogen dat in de kas geleverd wordt.

Ten tweede is het verhogen van de stroomsnelheid van de lucht in de Fiwihex een optie. Hiervoor is het wel noodzakelijk om een andere ventilator in de Fiwihex toe passen. Te hoge luchtsnelheden kunnen wel comfortproblemen opleveren. De Fiwihex is echter ontworpen voor verdiepinghoge ruimtes, omdat de Fiwihex bovenin hoge kasruimte is geplaatst zullen wat hogere luchtsnelheden geen problemen geven. Daarnaast is de kas geen permanente verblijfsruimte.

De temperatuur van het retourwater naar de warme bron kan worden verhoogd door het toepassen van een zonwerend doek bovenin de kas. De warmtewisselaar wordt dan boven dit doek aangebracht. De temperaturen boven het doek zullen hierdoor in de zomer aanzienlijk hoger worden dan de in de rest van de kas. Het temperatuurverschil met het water wordt dan groter, waardoor de opwarming van het water stijgt. Op deze wijze kan dus meer zonnewarmte worden gewonnen. Daarnaast zullen de temperaturen beneden in de kas door deze maatregel lager zijn, waardoor het zomercomfort lager in de kas beter wordt.



Figuur 7.7 Schetsmatige weergave van toepassing zonwerend doek

Er zijn ook combinaties mogelijk van de voorgaande opties.

Er moet worden opgemerkt dat de resultaten alleen gelden voor de aannames die zijn gedaan. De uitgangspunten en aannames zijn van invloed op de resultaten

### **7.1.3 Kas met meerdere warmtewisselaars**

In deze paragraaf wordt het effect van het aantal warmtewisselaars op de kastemperatuur. Hoe meer warmtewisselaars, hoe groter het totale vermogen dat aan de kas wordt geleverd. De kastemperatuur zal hierdoor dalen, waardoor het vermogen per warmtewisselaar en de temperatuurverandering van het water dat naar de bronnen gaat ook zullen dalen.

Opgemerkt moet worden dat er naast het toepassen van meer warmtewisselaars ook andere opties zijn om het geleverde vermogen te verhogen. Dit zijn het verhogen van de stroomsnelheid van het water, het verhogen van de luchtsnelheid en het aanbrengen van een zonwerend doek. Combinaties van deze maatregelen zijn ook mogelijk.

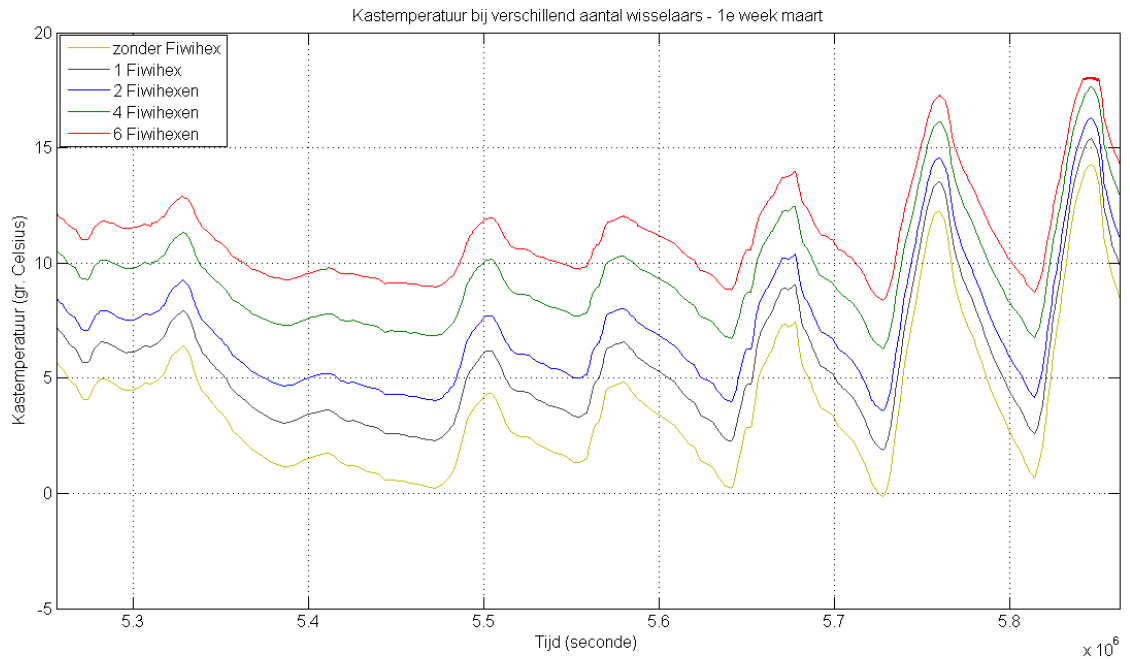
#### **Kastemperatuur**

Figuur 7.8, 7.9 en 7.10 laten het verloop van de kastemperatuur zien in drie verschillende weken in het beschouwde jaar. Uit de grafieken blijkt dat de invloed van het aantal warmtewisselaars aanzienlijk is.

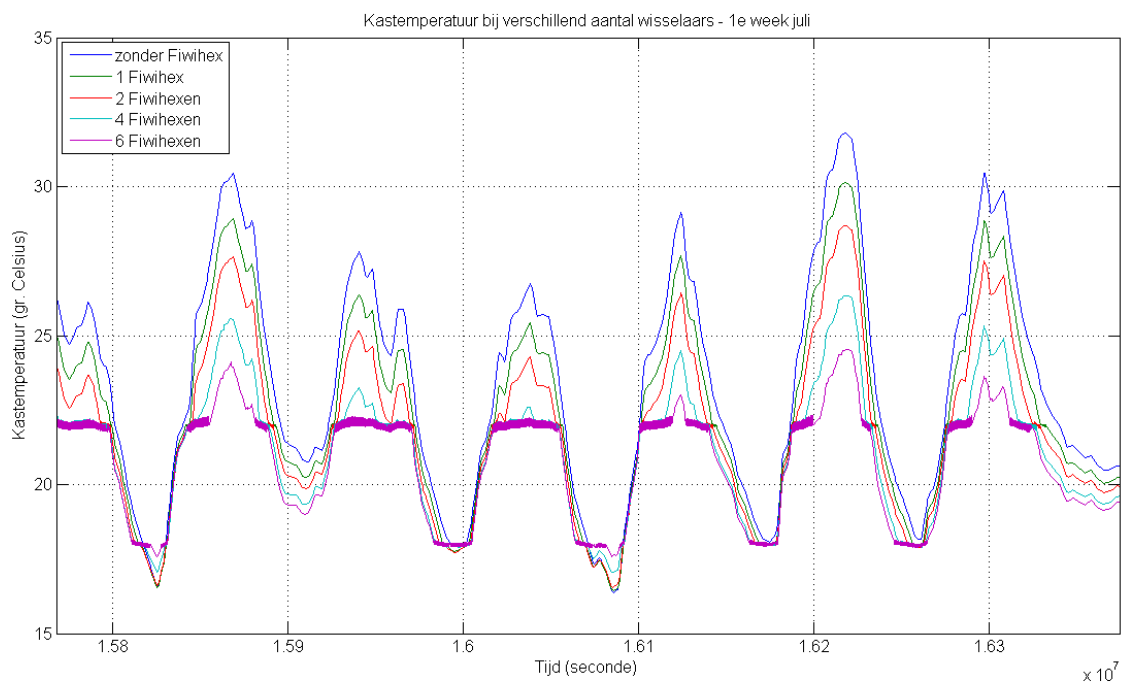
Bij de lage temperaturen in maart is de kastemperatuur laag. Wanneer men een FiwiHex inzet wordt de temperatuur iets hoger, maar dit scheelt niet veel. Wanneer men twee wisselaars in de kas plaatst wordt de temperatuur gemiddeld 4 °C hoger, met vier warmtewisselaars 6 °C en bij zes warmtewisselaars scheelt het gemiddeld 8 °C. Toch blijven de temperaturen in de kas laag.

In juli kan de kastemperatuur in een kas zonder FiwiHex op sommige momenten zeer hoog zijn. Het laten draaien van een FiwiHex scheelt gemiddeld ongeveer 1 °C. Wanneer men twee warmtewisselaars in de kas plaatst, is de temperatuur bij deze piekmomenten 2 °C lager, met vier warmtewisselaars kan het verschil oplopen tot ruim 5 °C en bij zes tot 7 °C. 's Nachts zijn de verschillen in temperatuur aanmerkelijk kleiner. De temperatuur bij vier wisselaars komt in de beschouwde week weinig boven 25 °C. Wanneer zes warmtewisselaars worden aangebracht in de kas blijft de temperatuur zelfs gedurende de hele week tussen 18 en 25 °C. Zes is wisselaars in de kasruimte is echter wel erg veel. De kasruimte is in de basis ook niet bedoeld als permanent verblijfsgebied, overschrijdingen zijn dus aanvaardbaar.

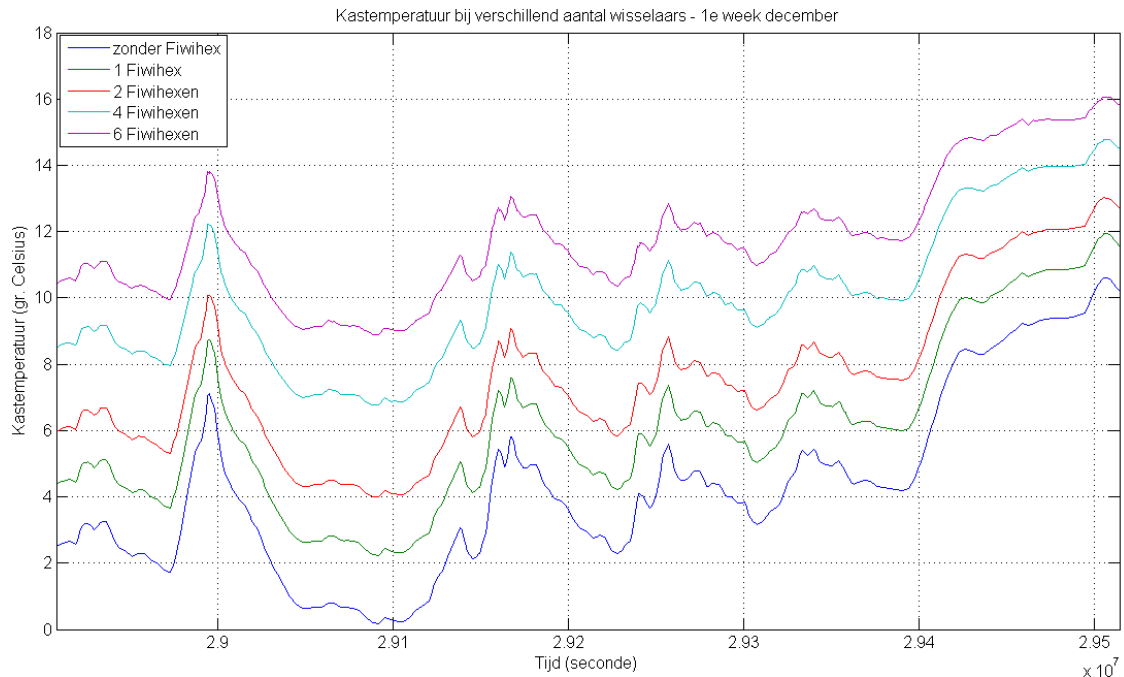
De temperaturen in de eerste week van december zijn net als in maart laag. Het effect op de binnentemperatuur van één FiwiHex is maximaal 2 °C. Twee FiwiHexen zorgen voor maximaal 4 °C lagere temperaturen, vier voor 6°C en zes voor 8 °C. De temperatuur wordt bij meer warmtewisselaars dus hoger, maar de kasruimte zal toch relatief koud blijven.



*Figuur 7.8 Kasttemperaturen bij een verschillende aantallen warmtewisselaars, maart*



*Figuur 7.9 Kasttemperaturen bij een verschillende aantallen warmtewisselaars, juli*



*Figuur 7.10 Kastemperaturen bij een verschillende aantallen warmtewisselaars, december*

In bijlage 13 is de temperatuur in de kas weergegeven gedurende een geheel jaar bij verschillende aantallen warmtewisselaars. Naar mate men meer warmtewisselaars toepast, daalt de temperatuur in de kas in warme perioden. In de grafieken is te zien dat er gedurende het jaar verschillende hoge pieken blijven in de kastemperatuur. Ook met zes warmtewisselaars komt de temperatuur incidenteel boven de 30 °C. Men zal incidentele pieken in de temperatuur dus moeten accepteren. Wanneer het buiten koud is stijgt de kastemperatuur als men meer warmtewisselaars gebruikt. Ook hiervoor geldt dat de incidentele dalen in de temperatuur geaccepteerd zullen moeten worden.

Met name de temperaturen tijdens de gebruikperiode zijn van belang. Bij de kas zonder FiwiHex is dit de gemiddelde temperatuur tussen 7.00 uur en 23.00 uur 15,7 °C. De temperatuur ligt 23% van deze tijd tussen 18 °C en 25 °C. In tabel 7.1 is het effect van het aantal warmtewisselaars te zien met betrekking tot de gemiddelde temperatuur tijdens de gebruikperiode en het percentage van deze tijd dat de temperatuur tussen 18 °C en 25 °C ligt.

Aantal warmtewisselaars	Gemiddelde temperatuur gebruikperiode (°C)	Percentage van gebruikperiode dat $18^{\circ}\text{C} \leq T_k \leq 25^{\circ}\text{C}$
1	16,4	27
2	16,6	31
4	17,2	39
6	17,7	46

*Tabel 7.1 Warmtewinst bij verschillende aantallen warmtewisselaars*

Eerder werd al geconcludeerd dat incidentele pieken in de kastemperatuur niet te voorkomen zijn. Uit tabel 7.1 blijkt dat het ook het percentage van de gebruikperiode dat de temperaturen in de kas tussen 18 °C en 25 °C beperkt is. De invloed van het aantal warmtewisselaars op de tijd dat de temperaturen

binnen de genoemde marge liggen is duidelijk merkbaar. Toch liggen de kastemperaturen in de beschouwde situatie in alle gevallen minder dan de helft van jaar binnen de genoemde marge.

Er moet worden opgemerkt dat het inzetten van één of meerdere warmtewisselaars in de kas gecombineerd kan worden met andere maatregelen. Het aanpassen van de stroomsnelheden van water en lucht werden al eerder genoemd, evenals het toepassen van een zonwerend doek. Boven het doek zal de temperatuur stijgen, maar de verblijfsruimte onder het doek zal koeler worden.

Een andere optie om de temperatuur van de kas te beïnvloeden is het aanpassen van het ventilatievoud. Wanneer het ventilatievoud in de winter laag wordt gehouden en in de zomer wordt verhoogd, zullen de kastemperaturen in de winter hoger zijn en in de zomer juist lager. Op de winning van warmte en 'koude' heeft deze maatregel echter een negatieve invloed.

### **Vermogen per warmtewisselaar**

Wanneer men meer warmtewisselaars in de kas plaatst wordt het totale vermogen groter, waardoor de temperatuur in de kas daalt. Hierdoor wordt echter ook het temperatuurverschil tussen het water en de kaslucht kleiner. Het geleverde vermogen aan de kas per warmtewisselaar neemt dus af, evenals de opwarming of afkoeling van het water.

Bijlage 14 geeft het vermogen per warmtewisselaar weer bij verschillende aantallen warmtewisselaars. Wanneer in plaats van één Fiwihex twee warmtewisselaars worden toegepast is het gemiddelde vermogen per Fiwihex nog 90% van de eerder bepaalde waarde. Wanneer men vier warmtewisselaars toepast is dit nog maar 80% van de oorspronkelijke waarde. Bij zes warmtewisselaars leveren de Fiwihexen nog maar 61 % van het vermogen dat eerder werd bepaald.

Het effect hiervan is vooral belangrijk voor de winning van warmte. Naar mate men meer warmtewisselaars in de kas plaatst wordt de warmtewinst per wisselaar kleiner. Het energieverbruik per Fiwihex daalt echter ook iets, omdat de wisselaars samen meer vermogen leveren en ze dus een kleiner deel van de tijd in bedrijf hoeven te zijn. De lagere warmteoverdracht per warmtewisselaar heeft ook invloed op de retourtemperaturen van het water. Het gerealiseerde temperatuurverschil van het water daalt. Hier wordt op teruggekomen.

Tabel 7.2 geeft de hoeveelheid gewonnen warmte bij meerdere warmtewisselaars. Tabel 7.3 geeft het benodigde elektrische vermogen voor het laten draaien van de warmtewisselaars.

Aantal warmtewisselaars	Gewonnen warmte per warmtewisselaar (GJ/jaar)	Totaal gewonnen warmte (GJ/jaar)
1	16,4	16,4
2	14,5	29,0
4	11,5	46,1
6	9,3	57,6

*Tabel 7.2 Warmtewinst bij verschillende aantallen warmtewisselaars*

Aantal warmtewisselaars	Benodigde hulpenergie per warmtewisselaar (GJ/jaar)	Totaal benodigde hulpenergie (GJ/jaar)
1	1,6	1,6
2	1,5	3,0
4	1,4	5,6
6	1,2	7,3

Tabel 7.3 Benodigde hulpenergie bij verschillende aantallen warmtewisselaars

Wanneer de FiwiHex alleen wordt gebruikt om de kas te koelen is de verhouding tussen gewonnen warmte en benodigde hulpenergie overigens gunstiger. De benodigde hulpenergie voor verschillende aantallen warmtewisselaars is gegeven in tabel 7.4.

Aantal warmtewisselaars	Benodigde hulpenergie per warmtewisselaar (GJ/jaar)	Totaal benodigde hulpenergie (GJ/jaar)
1	0,4	0,4
2	0,4	0,8
4	0,3	1,3
6	0,3	1,6

Tabel 7.4 Benodigde hulpenergie voor het koelen van de kas

### Retourtemperaturen

Naar mate men meer warmtewisselaars in de kas plaats daalt ook het temperatuurverschil dat het water ondergaat. Bijlage 15 geeft de retourtemperaturen naar de beide bronnen bij verschillende aantallen FiwiHexen.

Wanneer één FiwiHex in de kas wordt toegepast is het water dat naar de warme bron gaat maximaal 17,9 °C. Het water dat naar de koude bron gaat koelt maximaal af tot 16,9 °C. De maximale temperatuurverschillen die het water ondergaat ten opzichte van de instroomtemperatuur zijn dus 9,9 °C respectievelijk 8,1 °C. Tabel 7.3 geeft de maximale verschillen weer voor meerdere warmtewisselaars. De retourtemperaturen worden duidelijk minder gunstig bij meerdere warmtewisselaars.

Aantal warmtewisselaars	$T_{\max}$ naar warme bron (°C)	$T_{\min}$ naar koude bron (°C)
1	9,9	8,1
2	9,3	7,5
4	8,3	6,5
6	7,5	5,8

Tabel 7.5 Maximale en minimale retourtemperatuur naar warme respectievelijk koude bron, voor verschillende aantallen warmtewisselaars

## 7.2 Alleen woninggedeelte

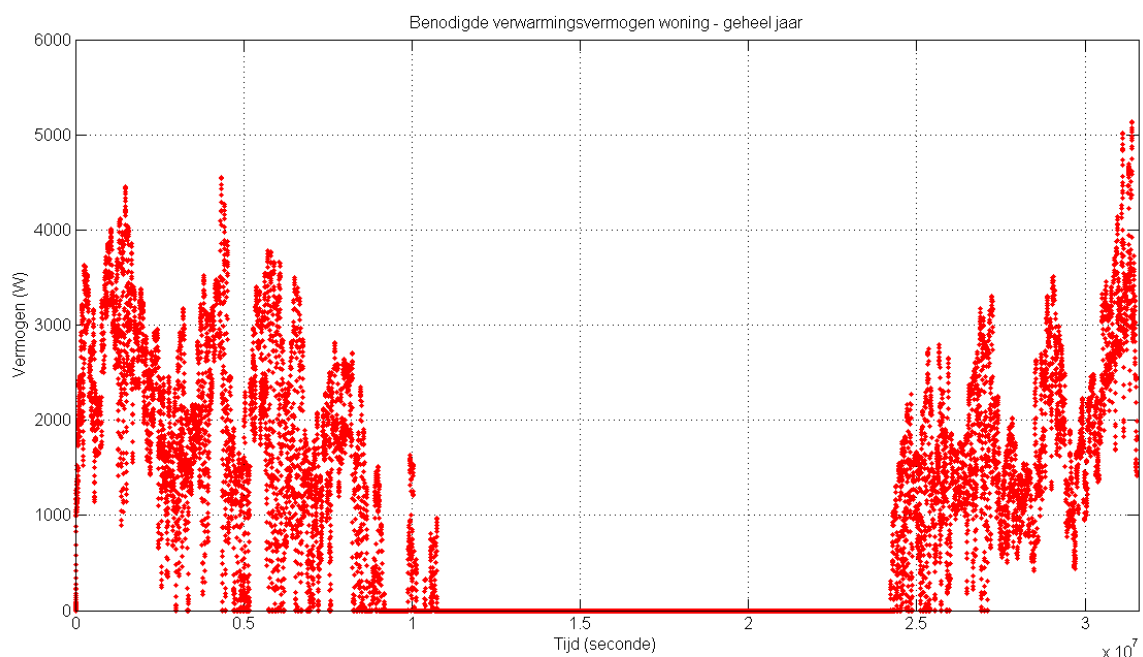
### 7.2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het woongedeelte van de KlimaatPlusWoning beschouwd. Aan de hand van simulatie wordt bepaald hoeveel verwarmingsvermogen er gedurende een jaar benodigd is. Deze informatie is van belang omdat hiermee bepaald kan worden welke temperatuur het water in de warme bron zou moeten hebben om te kunnen voorzien in deze warmtebehoefte.

### 7.2.2 Benodigde verwarming

Het is dus van belang te bepalen hoeveel verwarmingsvermogen er gedurende een geheel jaar benodigd is. Hiervoor is het model van de woning gebruikt met de parameters zoals deze in het testgedeelte zijn beschreven. Er is ook bij deze simulaties geen rekening gehouden met warmte-uitwisseling met het kasgedeelte.

In het model is een regeling toegevoegd die zorgt voor verwarming als de temperatuur lager wordt dan 20 °C. Hierbij is een zogenaamde dode zone ingesteld van 1 °C, om te voorkomen dat de regeling de verwarming voortdurend aan en uit schakelt. De regeling bepaalt welk verwarmingsvermogen benodigd is om de woning op de gewenste temperatuur te houden. De benodigde vermogens zijn weergegeven in figuur 7.11. Er is 30% van de tijd verwarming nodig, dit komt overeen met 110 dagen in het jaar.



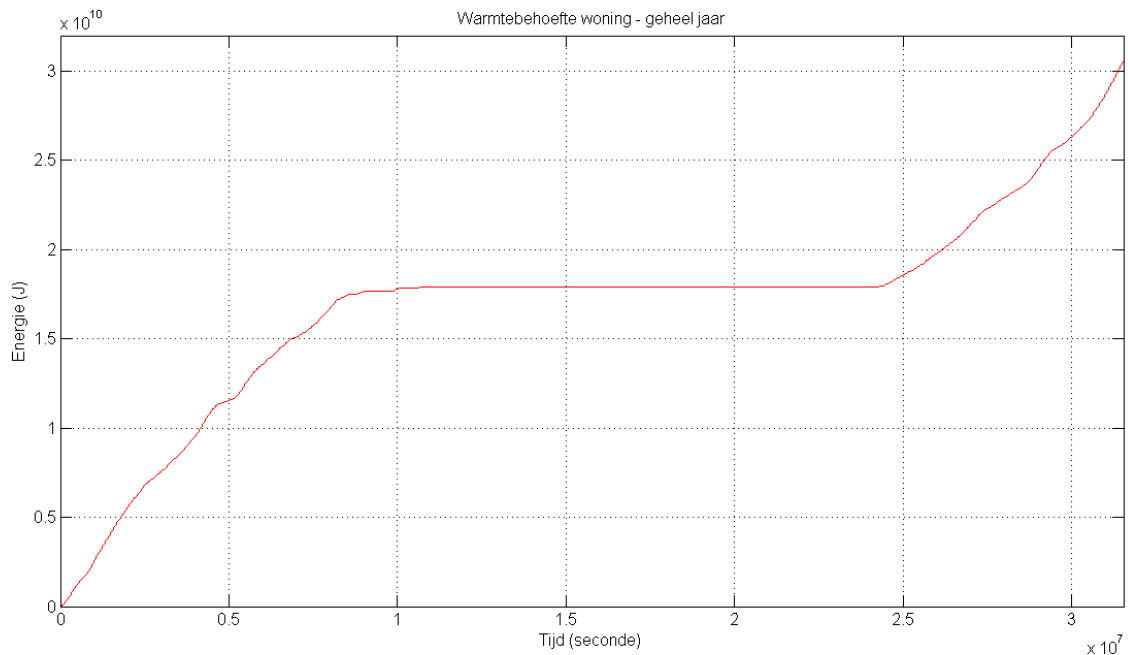
Figuur 7.11 Benodigd verwarmingsvermogen Woning (setpoint 20 °C)

Aan de hand van het bepaalde vermogen, kan de warmtevraag van de woning gedurende een geheel jaar worden berekend. Het resultaat is weergegeven in figuur 7.12, de warmtevraag in een heel jaar is ongeveer 30 GJ.

Om een indruk te krijgen of deze waarde realistisch is, kan deze worden verleden met één van de referentiewoningen zoals gedefinieerd door SenterNovem. In bijlage 16 is een door Cauberg-Huygen uitgevoerde berekening opgenomen voor de SenterNovem tussenwoning met zelfregelende roosters. In het referentiejaar 1964 heeft deze woning een jaarlijkse warmtevraag van 19 GJ. Dit is duidelijk lager dan de waarde die voor de KlimaatPlusWoning is berekend.

Het volume van de referentiewoning is groter, maar daar staat tegenover dat de woning minder glasvlakken bevat en dat de warmteweerstand van de dakconstructie groter is. Verder wordt de hoeveelheid ventilatie door de roosters geregeld, waardoor het ventilatievoud in de winter lager zal zijn. Het grootste verschil is echter dat bij de simulatie met Simulink uitgegaan is van een setpoint

van 20 °C voor zowel dag als nacht. In werkelijkheid zullen de meeste ruimtes 's nachts niet tot 20 °C worden verwarmd. Bij de berekening van de referentiewoning is het setpoint 's nachts 16 °C. Dit kan het verschil verklaren. Er wordt in dit rapport niet nader ingegaan op de oorzaak van het verschil. Er zal met de warmtevraag worden gerekend die uit het Simulink model volgt. De totale hoeveelheid benodigde energie is afhankelijk van het systeemrendement van het verwarmingssysteem. Bij vloerverwarming is dit rendement 1,0.



Figuur 7.12 Warmtebehoefte voor de woning, cumulatief voor geheel jaar

### 7.2.3 Benodigde aanvoertemperatuur

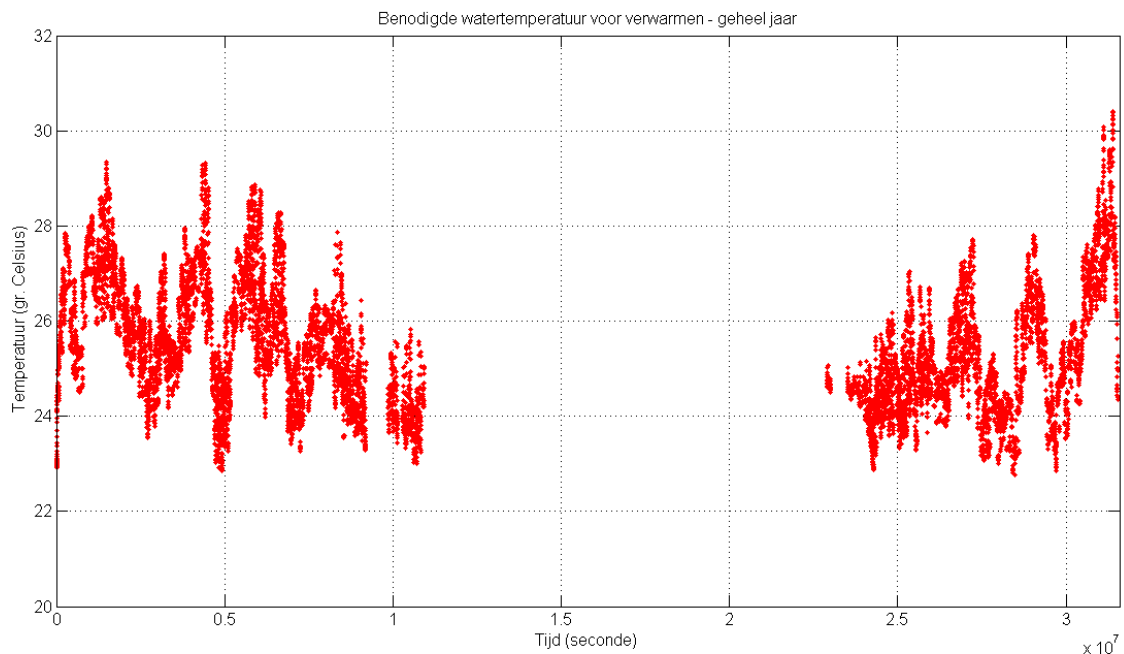
De woning wordt verwarmd door middel van vloerverwarming. Aan de hand van het berekende benodigde vermogen is te bepalen welke temperatuur het water uit de warme bron moet hebben om het benodigde vermogen te kunnen leveren.

In de vorige paragraaf is bepaald hoe groot het verwarmingsvermogen op elk tijdstip moet zijn. Aan de hand hiervan is te bepalen hoe warm de vloer minimaal moet zijn om het benodigde vermogen te kunnen leveren. Zoals eerder beschreven zal weer worden gerekend met een warmteoverdrachtscoëfficiënt  $\alpha_{c,s}$  bi van  $8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Omdat het water in de leidingen van de vloerverwarming afkoelt, is aangenomen dat de aanvoertemperatuur minimaal 3 °C hoger moet zijn dan de vereiste vloertemperatuur. De resultaten zijn weergegeven in figuur 7.13.

De vereiste watertemperaturen variëren tussen 22,8 °C en 31,4 en de gemiddelde benodigde temperatuur is 25,5 °C. De benodigde brontemperatuur is 62 dagen hoger dan de aangenomen temperatuur van 25 °C, dit is 56 % van de tijd dat de woning wordt verwarmd. In deze gevallen zal het water moeten worden naverwarmd met een warmtepomp.

De hoeveelheid energie die hiervoor nodig is kan worden bepaald middels het verschil tussen het de benodigde watertemperatuur en de brontemperatuur. Hiervoor moet men tevens de benodigde volumestroom van het water in de

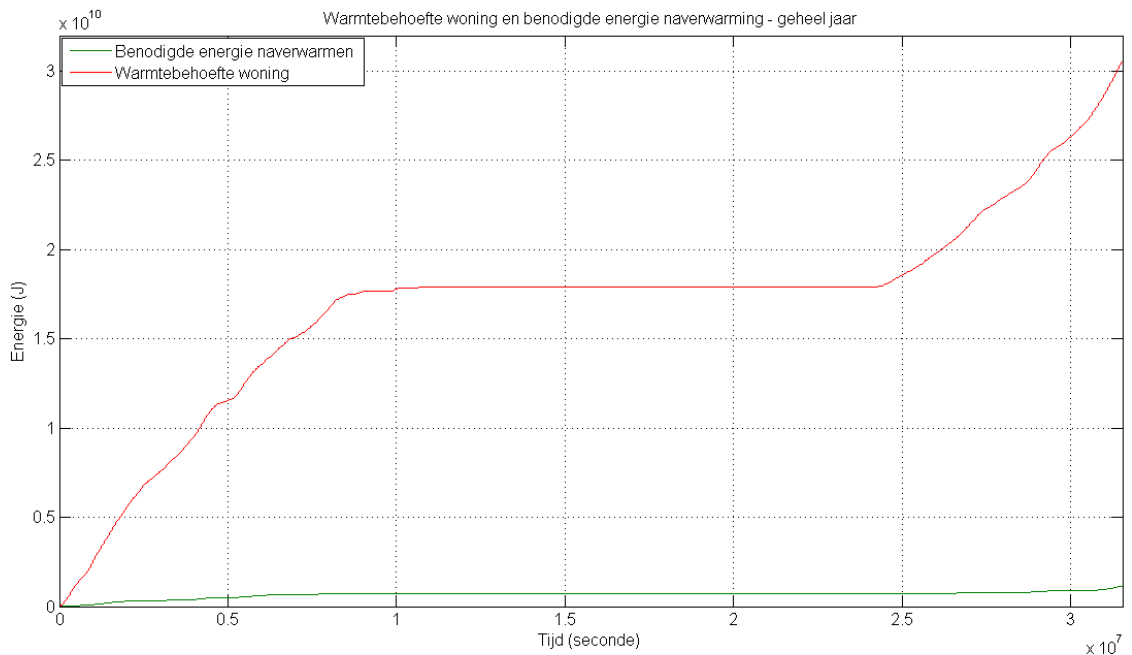
leidingen weten. Deze kan worden bepaald uit het benodigde vermogen. Het Simulink-model voert deze berekeningen uit, zie paragraaf 6.4.2. Er wordt uitgegaan van een warmtepomp met een COP van 6. Dit betekent dat er met een bepaalde hoeveelheid hulpenergie zes maal zoveel energie aan het water kan worden toegevoegd.



Figuur 7.13 Minimaal vereiste aanvoertemperatuur water voor verwarming

Figuur 7.14 geeft de benodigde hoeveelheid elektrische energie voor het naverwarmen over een geheel jaar. Hierbij is ook de warmtevraag van de woning opnieuw opgenomen. De berekende hoeveelheid benodigde elektrische energie is ongeveer 1,1 GJ. De aan het water toegevoerde hoeveelheid energie is dus 6,6 GJ.

Bij de bepaling van de benodigde energie voor naverwarming is uitgegaan van constante brontemperaturen. Bij de berekende retourtemperaturen in paragraaf 7.1.2 en 7.1.3 zal de temperatuur van de warme bron in werkelijkheid lager worden. De benodigde hoeveelheid energie voor naverwarmen zal dan groter zijn. Wanneer het onttrokken water na verwarming van de woning weer naar de bron wordt teruggevoerd, kan deze extra hoeveelheid energie beperkt blijven. Het water wordt namelijk voorverwarmd en afhankelijk van de hoeveelheid toegevoerde energie is het retourwater naar de bron mogelijk warmer dan het water in de warme bron.



Figuur 7.14 Warmtebehoefte en benodigde energie voor naverwarming

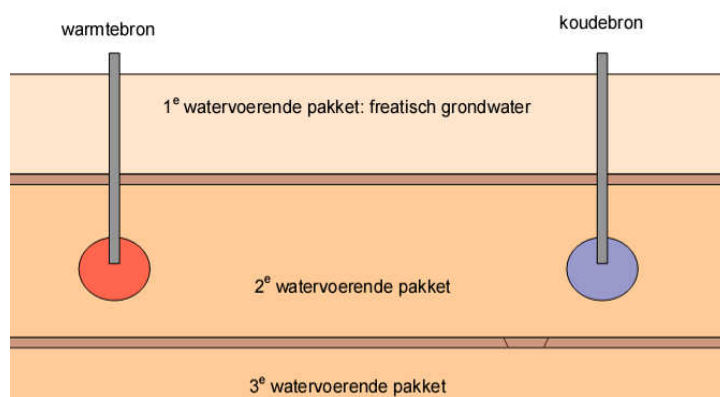
## 7.3 Energieverlies bij warmteopslag

### 7.3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de hoeveelheid gewonnen warmte in de kas en de benodigde hoeveelheid verwarmingsenergie voor de woning gekwantificeerd. Naast deze twee energiestromen is er een derde energiestroom die beschouwd moet worden, dit is het warmteverlies bij bodemopslag. In deze paragraaf wordt hiervoor een schatting gedaan.

### 7.3.2 Verliezen bij warmteopslag

Warmteopslag vindt plaats door middel van grondopslag in een aquifer. Figuur 7.14 geeft een zeer schematische weergave van een mogelijke installatie voor warmte/koudeopslag (WKO).



Figuur 7.15 Schematische weergave van WKO-installatie [5]

Omdat zowel warmte en 'koude' worden opgeslagen bestaat de installatie uit een warme en een koude bron. Als de kas een temperatuur heeft van meer dan 22 °C wordt er water uit de koude bron gebruikt voor koeling van de kas. Het water warmt op en wordt vervolgens naar de warme bron gevoerd. Wanneer de temperatuur lager is dan 18 °C wordt dit proces omgedraaid.

Het onttrekken en terugvoeren van water vindt plaats door middel van de bronnen. Het geperforeerde gedeelte van elke bron wordt in een watervoerend pakket geplaatst. Het bovenste watervoerende pakket is hier meestal niet geschikt voor, in verband met grote invloed van regenwater. Het tweede watervoerende pakket is in vrijwel heel Nederland goed bruikbaar voor bodemopslag. De beide bronnen moeten op voldoende onderlinge afstand liggen om warmte-uitwisseling tussen beide bronnen te beperken.

Voor het bepalen van de energieverliezen wordt een model gebruikt dat is opgesteld door Willem van der Spoel van de faculteit Bouwkunde van de TU Delft. Het model is een eenvoudige weergave van de werkelijkheid, het doel van het model is het geven van een schatting voor de energieverliezen bij opslag van warm water. In bijlage 17 is dit model beschreven. Het model is gevalideerd aan de hand van de gegevens van een voorbeeldproject [34].

Aan de hand van de in de bijlage afgeleide parameters kan worden onderzocht hoe groot de verliezen zijn bij warmteopslag in de aquifer. Voor de grondtemperatuur wordt net als bij de kas en de woning uitgegaan van 12 °C. Er zullen in werkelijkheid meerdere woningen worden aangesloten op dezelfde WKO-installatie. Met dit schaaleffect moet rekening worden gehouden. Zoals werd vermeld in hoofdstuk 3, wordt uitgegaan van een verhouding van 100 woningen op één aquifer. De verhouding tussen het debiet van de FiwiHex in de beschouwde woning en het debiet dat de bronnen in of uit wordt gepompt is dus 1:100.

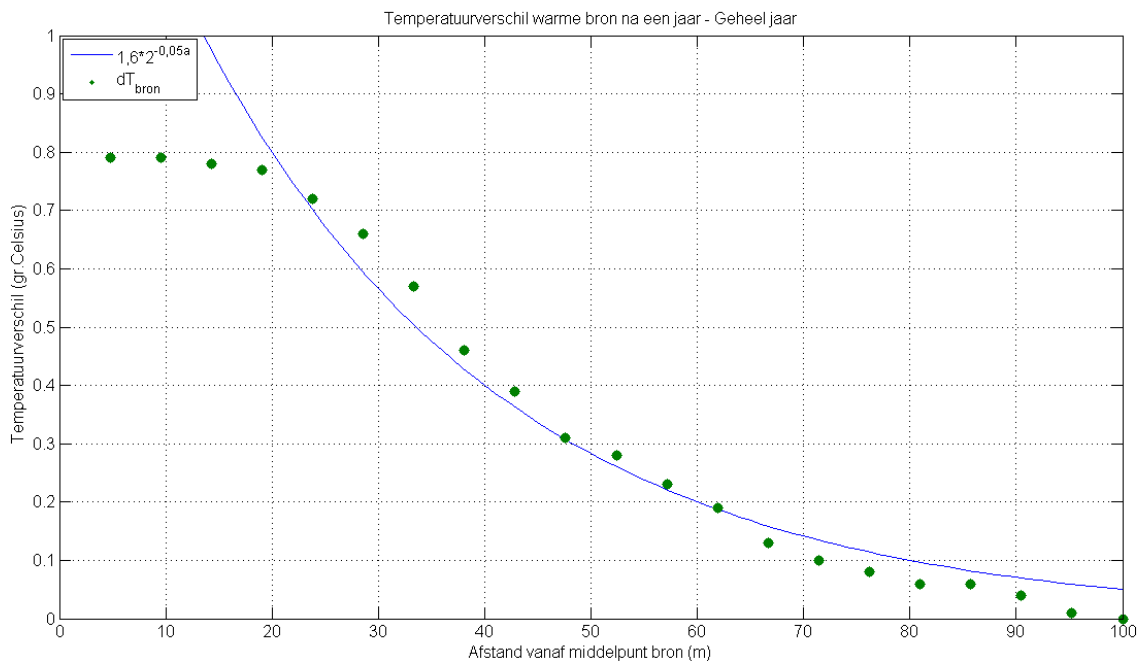
Het energieverlies wordt uitgerekend voor de situatie dat de bron 20 jaar in bedrijf is geweest. Er wordt aangenomen dat zich na deze periode een evenwichtsituatie heeft ingesteld, waarbij de netto jaarlijkse opwarming van de warme bron minimaal is. Met de in bijlage 17 bepaalde parameters is het temperatuurverloop over de bron berekend na 20 jaar bedrijf. Hierbij is uitgegaan van drie maanden winterbedrijf en drie maanden zomerbedrijf per jaar. De berekende eindtemperaturen van alle knopen worden gebruikt als initiële temperaturen voor de berekening van het energieverlies.

Aan de hand van deze initiële temperaturen is gesimuleerd gedurende een heel jaar. Er wordt vanuit gegaan dat er dit jaar geen water aan de bron wordt toegevoerd of onttrokken. De verschillen die na een jaar optreden in het temperatuurverloop over de bron zijn weergegeven in figuur 7.16.

Van 0 tot 20 m van de bron is het temperatuurverschil gemiddeld 0,8 °C. Het verloop in temperatuurverschil tussen 20 en 90 meter van het middelpunt van de bron kan benaderd worden met de volgende formule:

$$\Delta T = 1,6 \cdot 2^{\frac{d}{20}}.$$

Hierbij is  $d$  de afstand vanaf de bron in meters. Deze benaderingsformule is eveneens weergegeven in figuur 7.16.



Figuur 7.16 Verschillen in het temperatuurverloop van de bron na een jaar zonder toevoeren of onttrekken van water

Aan de hand van deze temperatuurverschillen is het energieverlies in het beschouwde jaar te bepalen. Hiervoor moet het eerst het product  $V_{bron} \cdot \Delta T$  worden bepaald. Dit kan door de grafiek in figuur 7.16 te wentelen om de y-as en te integreren. Wanneer men vermenigvuldigd met de hoogte van de bron vindt men:

$$V_{bron} \cdot \Delta T = z_{bron} \cdot \frac{400 \cdot \pi}{\ln^2 2} \cdot \int_{0,08}^{0,8} (\ln^2 x - 2 \ln 1,6 \cdot \ln x + \ln^2 1,6) \cdot dx$$

De oplossing hiervan kan worden benaderd. Het energieverlies kan men vervolgens vinden met de volgende formule:

$$\Delta E = V_{bron} \cdot \Delta T \cdot (\eta \cdot C_{water} \cdot \rho_{water} + (1 - \eta) \cdot C_{grond} \cdot \rho_{grond})$$

waarbij

$z_{bron}$  = hoogte van de bron in m

$\eta$  = porositeit van de grond

Hieruit vindt men dat het energieverlies van 180 GJ in een geheel jaar. Dit energieverlies geldt voor 100 woningen. Per woning is het verlies aan warmte door opslag in een jaar dus 1,8 GJ.

In verhouding met de andere stromen is het warmteverlies per woning dus beperkt, maar er moet bij de energiebeschouwing wel rekening gehouden worden met dit energieverlies. Als men in elke kaswoning twee Fiwihexen

toepast wordt de hoeveelheid opgeslagen energie in de bron groter. Het warmteverlies wordt ook groter en bedraagt per woning 5,1 GJ. De bepaalde waarden gelden als de koude bron het hele jaar 8 °C is en de warme bron 25 °C.

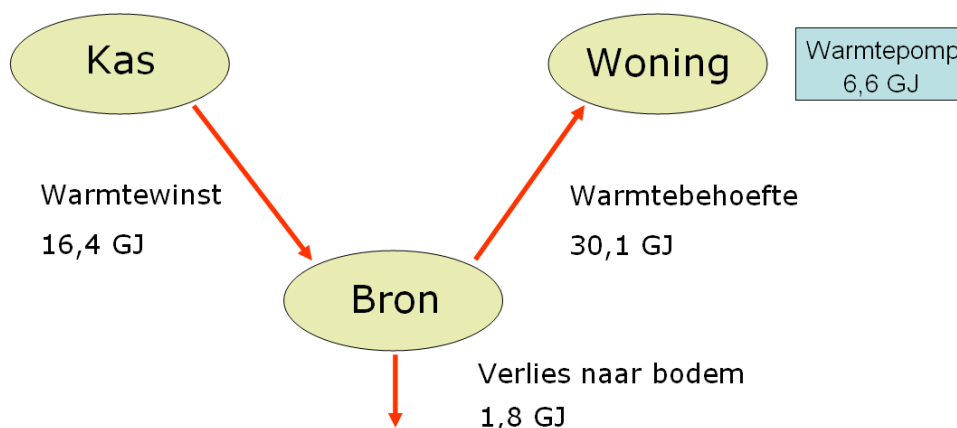
## 7.4 Efficiëntie van het systeem

In deze paragraaf worden de energiestromen tussen de verschillende subsystemen van de KlimaatPlusWoning met elkaar vergeleken. Vervolgens worden de opbrengst en het energiegebruik van het systeem bepaald. Ten slotte wordt dit vergeleken met de efficiëntie van thermische zonnecollectoren.

### 7.4.1 Analyse energiestromen

Eerder in dit hoofdstuk zijn de energiewinst in de kas, de warmtevraag van de woning en de energieverliezen in de bron bepaald. Figuur 7.17 geeft deze energiestromen grafisch weer. De waarden zijn per jaar en gelden voor een woning met één Fiwihex.

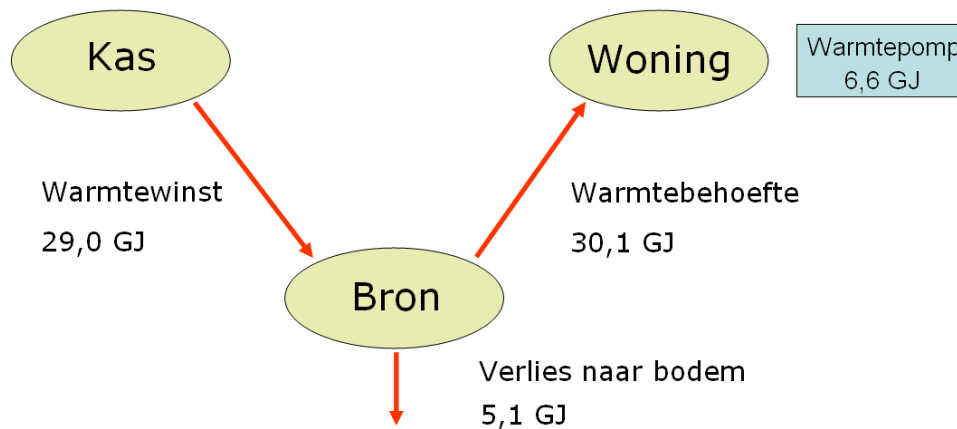
Uit de figuur blijkt dat de warmtevraag in de woning hoger is dan de warmtewinst die in de kas wordt gerealiseerd met één Fiwihex. Daarnaast treedt ook energieverlies op bij bodemopslag. Dit verlies is ongeveer 11% van de gewonnen warmte. De warmtewinst in de kas verminderd met het verlies bij opslag wordt in het vervolg aangeduid als netto warmtewinst.



Figuur 7.17 Warmtestromen per woning in een heel jaar, bij één Fiwihex

Om de woning te verwarmen moet er aan het water uit de bron 15,3 GJ aan warmte worden toegevoerd. In paragraaf 7.2.3 bleek dat naverwarming van het water uit het oogpunt van de benodigde aanvoertemperaturen noodzakelijk is. Hierbij wordt energie aan het water toegevoerd, voor het op temperatuur brengen van het water moet jaarlijks in totaal 6,6 GJ worden toegevoerd. Bij de aannames en uitgangspunten die zijn gedaan is er dus geen balans tussen de energiestromen. Er is 8,7 GJ te weinig aan warmte gewonnen om de woning volledig met het systeem te verwarmen.

Om de stromen in balans te brengen moeten meerdere warmtewisselaars per kas worden ingezet. Figuur 7.18 geeft de warmtestromen weer voor een kaswoning met twee warmtewisselaars.



Figuur 7.18 Warmtestromen per woning in een heel jaar, bij één

In paragraaf 7.1.3 werd berekend dat de warmtewinst in de kas gelijk is aan 29,0 GJ wanneer twee warmtewisselaars in de kas worden geplaatst. De warmtewinst in de kas is dan bijna gelijk aan de warmtebehoefte in de woning. Zoals werd beschreven in paragraaf 7.3.2 neemt het verlies van warmte bij bodemopslag toe als meer warmtewisselaars worden ingezet. Bij twee Fiwihexen is het verlies 5,1 GJ. Dit is 17% van de gewonnen zonnewarmte.

De netto warmtewinst is dus ook bij twee warmtewisselaars lager dan de warmtevraag in de woning. Er moet echter ook rekening worden gehouden met de hoeveelheid energie die door de warmtepomp aan het water wordt toegevoerd. Omdat de temperatuur van de warme bron constant is aangenomen is dit ook in deze situatie 6,6 GJ. Wanneer deze hoeveelheid warmte in de balans wordt meegenomen kan in de warmtevraag van de woning worden voorzien. Het verschil tussen vraag en aanbod van energie is met 0,4 GJ maar gering.

Wanneer men twee warmtewisselaars in de kas toepast wordt er dus genoeg warmte gewonnen als voor de woning nodig is. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat alleen geldt bij de aannames en uitgangspunten zoals in dit rapport beschreven. Zo is warmte-uitwisseling tussen de kas en de woning niet meegenomen. De warmtebehoefte van de woning kan hierdoor aanzienlijk groter worden. De foutmarges in de bepaling van de warmtevraag in de woning en het warmteverlies bij opslag zijn ook van invloed.

Er zijn in dit hoofdstuk verschillende manieren beschreven om de warmteoverdracht per FiwiHex te verhogen.

#### 7.4.2 Warmtewinst in verhouding tot oppervlak

Aan de hand van de berekende warmtewinst is de jaarlijkse warmtewinst per vierkante meter kas te bepalen. Als er één FiwiHex in de kas staat dan heeft men jaarlijks een opbrengst van 0,33 GJ/m<sup>2</sup> kasoppervlak. Als meer warmtewisselaars worden ingezet neemt deze verhouding toe. De toename is wel minder dan evenredig. Tabel 7.5 geeft de opbrengst per vierkante meter kasoppervlak voor verschillende aantallen warmtewisselaars.

Aantal warmtewisselaars	Jaarlijkse warmtewinst per m <sup>2</sup> kasoppervlak (GJ/m <sup>2</sup> )
1	0,33
2	0,62
4	0,99
6	1,23

Tabel 7.6 *Winning van zonnewarmte per vierkante meter kasoppervlak per jaar*

Hierbij moet worden opgemerkt dat bij één warmtewisselaar in de kas te weinig warmte wordt gewonnen om de woning volledig te voorzien in de warmtebehoefte. Bij twee warmtewisselaars zijn de netto winning van zonnewarmte en de warmtebehoefte vrijwel gelijk. Alle energie die wordt gewonnen kan nuttig worden gebruikt. Als meer warmtewisselaars worden ingezet is de warmtewinst hoger dan de warmtebehoefte. De bepaalde opbrengsten zijn alleen nuttig wanneer deze energie ook daadwerkelijk gebruikt kan worden.

#### 7.4.3 Warmtewinst in verhouding tot benodigde elektrische energie

De Fiwihex en de kas vormen samen met de warmtepomp het systeem dat zorgt voor verwarming van de woning. In paragraaf 4.5.7 werd de Primary Energy Ratio (PER) geïntroduceerd. De PER geeft de verhouding tussen het geleverde vermogen voor verwarming en de benodigde primaire energie. Met de benodigde elektrische energie voor de Fiwihex en de warmtepomp is de PER van het totale verwarmingssysteem van de woning te bepalen.

De benodigde hulpenergie voor de Fiwihex is bepaald in paragraaf 7.1.3. Voor de warmtepomp is bij de aangenomen brontemperaturen 1,1 GJ aan elektrische energie benodigd. Het energiegebruik voor het pompen van het water naar de bronnen en terug is niet meegenomen. Om de benodigde primaire energie te vinden moet men deze waarden nog delen door het rendement van de elektriciteitscentrale.

Tabel 7.6 geeft de PER van het systeem weer voor verschillende aantallen warmtewisselaars. Ook de benodigde hoeveelheid primaire energie is weergegeven. Hierbij is weer uitgegaan van een rendement van de energiecentrale van 0,39.

Aantal warmtewisselaars	Benodigde primaire hulpenergie (GJ per jaar)	PER
1	6,9	2,1
2	10,5	2,3
4	17,2	1,7
6	21,5	1,3

Tabel 7.7 *PER bij verschillende aantallen warmtewisselaars*

Met één Fiwihex kan de benodigde energie voor verwarming van de woning worden geleverd. Bij meerdere warmtewisselaars is de netto energiewinst hoger dan de warmtevraag in de woning. Voor het bepalen van de PER is alleen de nuttige warmtewinst meegenomen. Dit is dus het gedeelte van de warmtewinst die wordt gebruikt voor het verwarmen van de woning.

Het inzetten van twee warmtewisselaars blijkt bij de aangenomen uitgangspunten en aannames het meest voordelig qua gebruik van fossiele

brandstoffen. Hierbij moet wel worden opgemerkt de berekende PER alleen geldt bij de aangenomen brontemperaturen.

Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de kas in de zomer wordt gekoeld en in de winter wordt verwarmd. Als de FiwiHex alleen wordt gebruikt om de kas in de zomer te koelen, dan is de verhouding tussen het gebruik van fossiele brandstoffen en de gewonnen warmte gunstiger. De PER voor het systeem van de KlimaatPlusWoning is in dat geval maximaal 4,9.

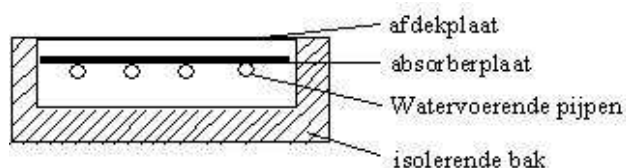
#### 7.4.4 Vergelijking met thermische zonnecollectoren

In plaats van gebruik te maken van kas en FiwiHex kan men ook zonnewarmte winnen met behulp van thermische zonnecollectoren. In deze paragraaf wordt kort beschreven hoe thermische zonnecollectoren werken. Vervolgens wordt het winnen van warmte met kas en FiwiHex vergeleken met de winning door middel van thermische zonnecollectoren. Er wordt hierbij gekeken naar de opbrengst en het gebruik van fossiele brandstoffen.

##### Werking thermische zonnecollectoren

Een zonnecollector is een metalen voorwerp waar een vloeistof doorheen stroomt. Het metalen voorwerp wordt door de zon aangestraald en warmt op, waardoor ook het stromende medium opwarmt. Er zijn verschillende typen zonnecollectoren, waarvan de werking in de basis gelijk is. Het meest toegepaste type zonnecollector is de vlakke-plaat zonnecollector. De werking hiervan wordt nu kort beschreven

De zonnewarmte wordt bij dit type collector opgevangen met een vlakke, absorberende plaat. Om ervoor te zorgen dat de plaat meer warmte opneemt dan ze afgeeft aan de omgeving wordt de plaat in een isolerende bak geplaatst. Wanneer er veel zoninstraling is dan stijgt de temperatuur van de plaat en wordt hoger dan de omgevingstemperatuur. Aan de achterzijde van de absorberende plaat lopen leidingen waardoor het water stroomt. Doordat de plaat warm wordt zal ook het water opwarmen. Op deze wijze wordt zonnewarmte gewonnen.

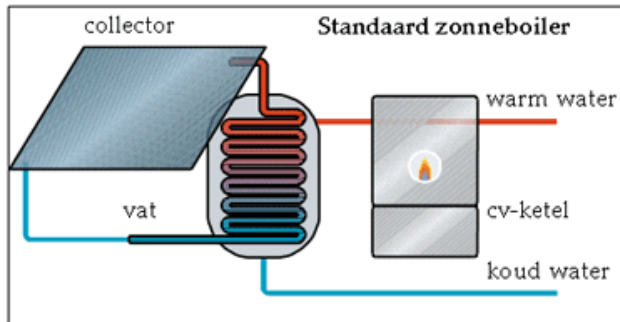


Figuur 7.19 Schematische weergave thermische zonnecollector [35]

Wanneer zonnecollectoren worden gecombineerd met een voorraadvat ontstaat een systeem dat een zonneboiler wordt genoemd. Er circuleert water tussen de collector en de boiler. Doordat de plaat warmer wordt dan de omgevingstemperatuur wordt het water opgewarmd. Het opgewarmde water wordt bewaard in het voorraadvat en kan worden gebruikt voor het verwarmen van tapwater of voor ruimteverwarming. Als het water niet warm genoeg is dan wordt het naverwarmd. Dit kan gebeuren door middel van een CV-ketel of warmtepomp. Figuur 7.20 geeft de werking van een zonneboiler schematisch weer.

### Vergelijking van beide systemen

In [37] wordt de opbrengst voor verschillende zonneboilersystemen gegeven. De waarden zijn gebaseerd op onderzoek van het Technisch Nederlands Onderzoeksinstituut (TNO). In bijlage 18 zijn de gegevens van één van de onderzochte zonneboilers weergegeven. Zonneboiler type DSS ZB 95 TX horizontaal met een voorraadvat van 110 liter heeft voor een zonneboiler een redelijk hoge opbrengst.



Figuur 7.20 Schematische weergave zonneboiler [36]

De beschouwde zonnecollector heeft een collectoroppervlak van  $2,37 \text{ m}^2$ . Hiermee kan jaarlijks  $4,1 \text{ GJ}$  gewonnen worden. Dit is dus  $1,7 \text{ GJ/m}^2$  per jaar. Bij een vat van 200 liter wordt de opbrengst hoger, namelijk  $2,1 \text{ GJ/m}^2$ . Zoals werd beschreven in paragraaf 6.4.2 varieert de warmtewinst in de kas bij verschillende aantallen warmtewisselaars. De warmtewinst in de kas varieert tussen  $0,33$  en  $1,23 \text{ GJ/m}^2$  per jaar. De opbrengst per vierkante meter is bij de zonneboiler duidelijk hoger.

De benodigde hulpenergie voor de zonneboiler is bij een vat van 110 liter  $0,2 \text{ GJ}$  per jaar. Dit komt overeen met  $0,5 \text{ GJ}$  aan primaire energie. De opbrengst is  $4,1 \text{ GJ}$ , dus de PER van dit systeem bedraagt  $8,2$ . Voor de kas en Fiwihex werd bepaald dat de PER in de beschouwde situatie niet hoger is dan  $2,3$ . Dit is duidelijk lager dan de PER die gehaald kan worden met de zonneboiler. Zoals in de vorige paragraaf werd vermeld wordt de PER gunstiger als de Fiwihex alleen wordt gebruikt om de kas te koelen. De PER voor het systeem van de KlimaatPlusWoning is in dat geval  $4,9$ . Dit is echter nog altijd minder hoog dan bij de zonneboiler.

Zowel de opbrengst per vierkante meter als de PER van de beschouwde zonneboiler zijn dus hoger dan de waarden die door middel van simulatie zijn bepaald voor de KlimaatPlusWoning. De oppervlakte van de thermische zonnecollectoren is veel lager dan van de kas, bij een groter systeem met thermische zonnecollectoren kunnen de verhoudingen iets veranderen. Toch is de KlimaatPlusWoning bij de aangenomen aannames en uitgangspunten minder effectief dan het gebruik van thermische zonnecollectoren.

Opgemerkt moet worden dat de kosten van beide systemen ook een belangrijk aspect zijn. De vergelijking met betrekking van tot de kosten is in dit rapport niet uitgevoerd. Naast de kosten van de Fiwihex zouden ook de kosten van de kasconstructie in de vergelijking moeten worden meegenomen. De kasconstructie wordt echter niet alleen gebruikt voor de winning van warmte, maar heeft ook waarde heeft als onderdeel is van de woning.

## 8 Conclusies en aanbevelingen

### 8.1 Conclusies

#### 8.1.1 Fiwihex

De Fiwihex is te classificeren als een individueel gevinde buiswarmtewisselaar met als stroomtype crossflow. Er is een formule afgeleid om het vermogen dat de Fiwihex levert te berekenen. Er zijn geen gegevens beschikbaar over de gevolgen van vervuiling en de snelheid waarmee dit gebeurt. Ook over condensvorming op de koperen draden is weinig bekend. In deze gevallen zal de warmteoverdracht minder goed zijn.

De Fiwihex is vergeleken met twee andere warmtewisselaars. De warmteoverdracht van de ene warmtewisselaar is ongeveer even efficiënt, wel is de Fiwihex compacter en het verbruik van fossiele brandstoffen lager. De andere wisselaar blijkt efficiënter dan de Fiwihex en de geleverde vermogens zijn groter. Het stroomtype van deze warmtewisselaar is te schematiseren is als counterflow, wat efficiënter is dan crossflow. Het verbruik van fossiele brandstoffen van de Fiwihex is minder gunstig, maar de verschillen zijn beperkt.

Vergeleken met andere warmtewisselaars is de Fiwihex dus niet efficiënter. Wel is de verhouding tussen de hoeveelheid geleverde hulpenergie en het geleverde vermogen redelijk gunstig. Het geringe geluidsniveau, kostenoverwegingen en comfort kunnen redenen om toch te kiezen voor de Fiwihex. Deze aspecten zijn in dit rapport echter niet nader onderzocht.

#### 8.1.2 Smart Skin

De Smart Skin is nog in ontwikkeling. Uit de beschikbare meetgegevens is het gedrag van de Smart Skin lastig te analyseren. Op dit moment werkt de regeling nog niet optimaal. De opwarming en afkoeling van het water in de beide spouwen is hierdoor kleiner dan gewenst.

Ondanks de relatief lage temperatuurverschillen is het geleverde koelvermogen behoorlijk. Op de beschouwde dag is het gemiddelde koelvermogen  $80 \text{ W/m}^2$  Smart Skin, daarbij komt nog de indirecte bijdrage van de middelste spouw. In de beschouwde nacht is de ruimteverwarming gemiddeld  $120 \text{ W/m}^2$  Smart Skin. Aan de hand van de beschikbare gegevens is niet te beoordelen hoe groot de vermogens op andere dagen zijn.

Ook de energie die wordt gewonnen door middel van opwarming of afkoeling van het water is behoorlijk. Op de beschouwde zomerdag wordt gemiddeld  $144 \text{ W/m}^2$  Smart Skin aan warmte gewonnen. In de beschouwde nacht wordt gemiddeld  $120 \text{ W/m}^2$  Smart Skin aan koude gewonnen. Het is op basis van de beschikbare gegevens niet te beoordelen hoe groot de opwarming en afkoeling op andere momenten is.

De temperatuur van het water in de buisjes heeft maar een beperkte invloedslengte over het glas. Als men de warmteoverdracht tussen het water en de lucht effectiever wil maken, zal men de tussenafstand kleiner moeten maken, bij voorkeur kleiner dan 60 mm. Dit is van belang voor het effectief verwarmen en koelen van de binnenruimte, maar ook voor het effectief koelen en

verwarmen van het water in de leidingen. Het optreden van oppervlaktecondensatie op het glas is zeer waarschijnlijk. Het is de vraag of dit vanuit esthetisch oogpunt wenselijk is. Men zal hier bij het ontwerpen en maken van details rekening mee moeten houden.

Daarnaast zijn er nog een aantal zaken waar men rekening mee dient te houden. Zo is de Smart Skin erg bepalend voor het gevelbeeld. Dit hoeft geen nadeel te zijn, maar dit is wel een overweging die gemaakt moet worden. Ten tweede bevat het systeem veel aansluitingen. Het maken van aansluitingen tussen de verschillende elementen kost tijd en geld. Ook kunnen de verschillende elementen of de aansluitingen falen. Ten derde is het regelsysteem erg complex. In de praktijk zal de afstelling van de regeling nauwkeuriger moeten zijn dan bij de meetopstelling.

### **8.1.3 KlimaatPlusWoning**

Als er geen warmtewisselaars in de kas worden ingezet is de gemiddelde temperatuur in de kas vrijwel altijd hoger dan de buitentemperatuur. Op momenten dat de instraling in de zomer groot is worden er relatief hoge temperaturen bereikt. In de winter kunnen de temperaturen erg laag worden. Met name de temperaturen tijdens de gebruikperiode zijn van belang. In het beschouwde jaar ligt de gemiddelde temperatuur tijdens de gebruikperiode 23 % van de tijd tussen 18 °C en 25 °C.

Als er één Fiwihex in de kas wordt ingezet is het geleverde vermogen onder de gegeven uitgangspunten en aannames laag in verhouding met de andere warmtestromen in de kas. Het effect op de kastemperatuur is daardoor relatief klein. De kas is tijdens de gebruikperiode 27 % van de tijd bruikbaar als verblijfsgebied.

Als meer warmtewisselaars in de kas worden geplaatst kan de kastemperatuur beter beheerst worden. Toch blijven er in de onderzochte situatie incidentele pieken en dalen in de kastemperatuur. Het percentage van de gebruikperiode dat de gemiddelde kastemperatuur tussen 18 °C en 25 °C ligt, varieert van 31% bij twee warmtewisselaars tot 46% bij zes warmtewisselaars. Dit is dus maar een beperkt deel van het jaar. Als er meer warmtewisselaars worden ingezet stijgt de totale hoeveelheid gewonnen energie, maar het temperatuurverschil dat het water ondergaat neemt af.

Er is in dit onderzoek aangenomen dat het ventilatievoud in de kas gedurende het hele jaar constant is. Het thermisch binnenklimaat kan worden verbeterd door het ventilatievoud in de zomer te verhogen en in de winter te verlagen. De gemiddelde kastemperatuur zal in de zomer lager worden en in de winter hoger. Op de hoeveelheid zonnewarmte die in de zomer gewonnen wordt gewonnen heeft het verhogen van het ventilatievoud een negatieve invloed.

### **Winning van zonnewarmte**

Uit analyse van de warmtestromen blijkt dat bij de uitgangspunten en aannames van dit onderzoek kan worden voorzien in de warmtevraag van de woning als twee warmtewisselaars in de kas worden ingezet.

Het temperatuurverschil dat het water in de Fiwihex ondergaat is relatief klein. De retourtemperaturen van het water dat naar de warme bron gaat, variëren

tussen 11,8 en 17,9 °C bij één FiwiHex in de kas. Dit water moet later worden gebruikt om te verwarmen, dus de temperatuur is relatief laag. Als er meer warmtewisselaars worden ingezet wordt deze retourtemperatuur lager. Met betrekking tot de brontemperaturen is aangenomen dat de warme bron constant 25 °C is en de koude bron 8°C. Bij de berekende retourtemperaturen zullen de brontemperaturen in werkelijkheid lager respectievelijk hoger worden.

Er zijn een aantal manieren om het temperatuurverschil dat het water ondergaat te verhogen. Het verlagen van de stroomsnelheid van het water is de eerste optie. Hierdoor wordt het vermogen dat aan de kas wordt geleverd wel lager. Een tweede optie is het verhogen van de stroomsnelheid van de lucht. Hierdoor neemt ook het aan de kas geleverde vermogen toe. Er zal in dit geval wel een andere ventilator in de FiwiHex moeten worden toegepast. Te hoge luchtsnelheden kunnen comfortproblemen opleveren, maar omdat de FiwiHex bovenin de kasruimte wordt geplaatst zullen wat hogere luchtsnelheden geen problemen geven. Een derde optie is het toepassen van een zonwerend doek bovenin de kas. De FiwiHex wordt dan boven dit doek aangebracht, waar de temperaturen in de zomer aanzienlijk hoger worden dan de in de rest van de kas. Het temperatuurverschil met het water wordt groter, waardoor de opwarming van het water stijgt. Net als het temperatuurverschil van het water neemt ook het door de FiwiHex geleverde vermogen toe. Daarnaast worden de temperaturen beneden in de kas hierdoor lager, waardoor het zomercomfort lager in de kas beter wordt. Er zijn ook combinaties mogelijk van de voorgaande opties.

### **Efficiëntie**

De jaarlijkse hoeveelheid zonnewarmte die bij de aangenomen uitgangspunten en aannames wordt gewonnen varieert van 16,1 GJ bij één FiwiHex tot 56,6 GJ bij zes warmtewisselaars. De jaarlijkse warmtewinst varieert hiermee van 0,33 GJ/m<sup>2</sup> kasoppervlak tot 1,23 GJ/m<sup>2</sup> kasoppervlak. De bepaalde opbrengsten zijn alleen nuttig wanneer de energie ook daadwerkelijk gebruikt kan worden voor het verwarmen van de woning.

De FiwiHex en de kas vormen samen met de warmtepomp het systeem dat zorgt voor verwarming van de woning. Bij één FiwiHex is de PER van het systeem 2,1. De warmtewinst is in dit geval kleiner dan de warmtevraag van de woning. Bij twee warmtewisselaars is de netto warmtewinst hoger dan de warmtevraag. De PER bedraagt dan 2,3. Het inzetten van twee warmtewisselaars is het meest voordelig qua gebruik van fossiele brandstoffen. Hierbij is er vanuit gegaan dat de FiwiHex in de zomer wordt gebruikt om de kas te koelen en in de winter om de kas te verwarmen. Als de kas in de winter niet wordt verwarmd is de PER gunstiger. De maximale PER is dan 4,9.

In plaats van gebruik te maken van kas en FiwiHex kan men ook zonnewarmte winnen met behulp van thermische zonnecollectoren. Bij de aangenomen aannames en uitgangspunten is met een zonneboiler een hogere opbrengst per vierkante meter te behalen dan met de kas en FiwiHex. De PER van het systeem met kas en FiwiHex is in de beschouwde situatie lager dan de PER die gehaald kan worden met zonneboilers. Ook als de FiwiHex in de winter niet wordt gebruikt om de kas te verwarmen is de PER minder gunstig dan bij zonneboilers.

De kosten van beide systemen zijn niet vergeleken. Naast de kosten van de FiwiHex zouden ook de kosten van de kasconstructie in een vergelijking moeten worden meegenomen. Dit is echter lastig omdat de kasconstructie niet alleen wordt gebruikt voor de winning van warmte, maar ook waarde heeft als onderdeel is van de woning.

### **Aannames**

De resultaten van het model gelden alleen voor de beschreven aannames en uitgangspunten. Deze hebben duidelijk invloed op de resultaten. Naast de constante brontemperaturen en het constante ventilatievoud is ook de grootte van de gradiënt in de kas een belangrijke aanname. Het ventilatievoud van de woningen in Culemborg varieert sterk, maar is duidelijk hoger. Hierdoor is de grootte van de gradiënt in de kas in de zomer onderschat.

Er is bij de simulaties gerekend met klimaatgegevens uit het referentiejaar 1964. Dit is een gebruikelijk jaar bij gebouwsimulaties. Toen dit jaar werd gekozen als referentiejaar werd het als representatief beschouwd voor het klimaat in Nederland. De laatste decennia zijn de gemiddelde temperaturen echter behoorlijk gestegen, tegenwoordig rekent men steeds vaker met andere referentie jaren. Het uitvoeren van de simulaties met andere referentie jaren kan leiden tot andere resultaten.

Warmte-uitwisseling tussen kas en woning is niet meegenomen in de simulaties. Als deze warmtestroom wel wordt meegenomen heeft deze invloed op de resultaten. Deze invloed is afhankelijk van de uitvoering van de tussenwand en de openingen tussen de beide delen. Als de kas en de woning ruimtelijk van elkaar gescheiden blijven vindt er geen warmte-uitwisseling plaats.

### **Resumé**

Concluderend kan worden gesteld dat er bij de aangenomen uitgangspunten en aannames minstens twee warmtewisselaars nodig zijn om te kunnen voorzien in de warmtebehoefte van de woning. De periode dat de kas gebruikt kan worden als verblijfsruimte is beperkt. De efficiëntie van het systeem is in de beschouwde situatie lager dan bij toepassing van thermische zonnecollectoren.

De basisgedachte achter de KlimaatPlusWoningen is dat het gebruik van primaire energie voor ruimteverwarming in de woning door kas en FiwiHex drastisch wordt teruggebracht. De benodigde energie voor verwarming van de woning kan door de kas inderdaad worden gereduceerd. Zowel de opbrengst als de PER van het systeem zijn in de beschouwde situatie echter lager dan bij toepassing van thermische zonnecollectoren. De opwekking van duurzame elektrische energie moet dus aanzienlijk zijn om met de KlimaatPlusWoning netto elektrische energie te produceren.

De efficiëntie van het systeem kan worden verhoogd door het verlagen van de stroomsnelheid van het water in de FiwiHex, het verhogen van de luchtsnelheid of het toepassen van een zonwerend doek bovenin de kas. De laatste twee opties genieten de voorkeur omdat deze een positieve invloed hebben op het zomercomfort in de kas. Door deze maatregelen kan mogelijk worden volstaan met één warmtewisselaar in de kas. Er zijn ook combinaties mogelijk.

## 8.2 Aanbevelingen

### 8.2.1 Fiwihex

- De Fiwihex is in dit rapport niet vergeleken met andere warmtewisselaars op het gebied van geluidsniveau, kosten en comfort. Om de vergelijking tussen deze warmtewisselaars vollediger te maken is onderzoek naar deze aspecten aan te bevelen.
- Het is aan te raden te onderzoeken of andere warmtewisselaars geschikter zijn voor toepassing in de kas. De voorkeur gaat uit naar een warmtewisselaar waarvan het stroomtype te schematiseren is als counterflow.
- Indien men de Fiwihex wil toepassen, moet onderzocht worden wat de effecten zijn van vervuiling en condensvorming in de tijd.

### 8.2.2 Smart Skin

- De Smart Skin is nog in ontwikkeling. Het concept lijkt te kunnen werken, maar voor toepassing is nader onderzoek is noodzakelijk.
- Het verdient aanbeveling nieuwe metingen uit te voeren met de Smart Skin en bij deze metingen slechts een beperkt aantal parameters per meting te variëren. Voor deze metingen zal de regeling beter moeten functioneren.
- Voor effectievere warmteoverdracht zal men de tussenafstand tussen de leidingen kleiner moeten maken, bij voorkeur kleiner dan 60 mm.
- Er is geen analyse uitgevoerd met betrekking tot de economische haalbaarheid van Smart Skin. Als er meer bekend is over het gedrag van de Smart Skin kan dit worden onderzocht.

### 8.2.3 KlimaatPlusWoning

- Wanneer men het systeem met kaswoning en Fiwihex in praktijk wil brengen is een hoger luchtdebiet aan te bevelen.
- Ook het toepassen van een zonwerend doek bovenin de kasruimte verdient aanbeveling.
- Het effect van het verlagen van de stroomsnelheid op de retourtemperaturen en het comfort in de kas kan nader worden onderzocht.
- Het verwarmen van de kas in winterperiode kost veel energie. Het is aan te bevelen om de gewonnen zonnewarmte alleen te gebruiken om de woning te verwarmen.
- Alleen de Fiwihex is onderzocht als mogelijke warmtewisselaar. Er kan onderzoek worden uitgevoerd naar de resultaten bij het gebruik van andere warmtewisselaars.
- Bij simulatie is het referentiejaar 1964 gebruikt. Om meer betrouwbare resultaten te krijgen kan men ook simulaties uit te voeren met klimaatdata van andere jaren.
- Op de invloed van de detaillering van de tussenwand op de warmte-uitwisseling met de kas is in dit rapport niet nader ingegaan. Dit zou in de toekomst onderzocht kunnen worden.
- Een meer uitgebreide bepaling van de temperatuurgradiënt in de kas zal resulteren in meer betrouwbare resultaten.

## Lijst van figuren

FIGUUR 1.1 VOORSPELD WERLDENERGIEVERBRUIK IN BTU <sup>1</sup> .....	1
FIGUUR 1.2 VERLOOP GEMIDDELTE TEMPERATUUR OP AARDE EN VERLOOP ZEESPIEGEL .....	2
FIGUUR 1.3 VOORSPELDE CO <sub>2</sub> -EMISSION IN MILJARDEN TONNEN .....	3
FIGUUR 1.4 BINNENLANDS ENERGIEVERBRUIK PER SECTOR .....	4
FIGUUR 1.5 LINKS: LINEAIRE FIWIHEX IN ENERGIEPRODUCERENDE KAS TE HUISSEN .....	5
FIGUUR 1.6 IN DE KAS IN HUISSEN ZIJN DE TWEE VLOEISTOF-CIRCULATIESYSTEMEN VERBONDEN DOOR EEN WARMTEWISSELAAR .....	6
FIGUUR 1.7 PRIMAIR ENERGIEGEBRUIK ZUINIGE NIEUWBOUWWONING .....	7
FIGUUR 1.8 TRIAS ENERGETICA: ONTWERPASPECTEN MET PLAATS VAN VERSCHILLENDE CONCEPTEN .....	8
FIGUUR 1.9 DALING VAN ENERGIEGEBRUIK FOSSIELE BRANDSTOFFEN DOOR KAS ALS ENERGIEBRON .....	8
FIGUUR 1.10 KOPPELINGS-PRINCIPES TUINBOUWKASSEN EN GEBOUWEN .....	9
FIGUUR 1.11 SCHEMATISCHE WEERGAVE HET WARMTESYSTEEM ZONNETERP .....	10
FIGUUR 1.12 IMPRESSIE VILA FLORA .....	10
FIGUUR 1.13 IMPRESSIE INTERIEUR VILA FLORA .....	11
FIGUUR 1.14 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET ONTWERP VOOR DE KLIMAATPLUSWONINGEN .....	13
FIGUUR 1.15 GLOBALE ZONINSTRALING NAAR REGIO .....	13
FIGUUR 3.1 ARTISTIEKE IMPRESSIE VAN DE KLIMAATPLUSWONINGEN .....	18
FIGUUR 3.2 SITUATIESCHETS PROJECT KLIMAATPLUSWONEN .....	19
FIGUUR 3.3 PLATTEGROND VAN DE WONINGEN, BEGANE GROND .....	20
FIGUUR 3.4 PLATTEGROND VAN DE WONINGEN, EERSTE VERDIEPING .....	21
FIGUUR 3.5 DOORSNEDEN: DWARSDOORSNEDE TER PLAATSTE VAN BERGING; DWARSDOORSNEDE TER PLAATSE VAN KAS EN WOONGEDEELTE; LENGTEDOORSNEDE TER PLAATSE VAN KAS .....	21
FIGUUR 3.6 AANZICHT VORGEVEL, OP HET OOSTEN .....	22
FIGUUR 4.1 FIWIHEX PLAFONDFAN.....	25
FIGUUR 4.2 PLASTIC SCHOEPENRAD DAT ZORGT .....	25
FIGUUR 4.3 VOORAANZICHT MATJE VAN WATERVOERENDE BUISJES MET GEWEVEN DRAADJES .....	26
FIGUUR 4.4 HORIZONTALE DOORSNEDE OVER DE FIWIHEX (KIJKRICHTING OMLAAG) .....	26
FIGUUR 4.5 ZIJAAANZICHT VAN DE MATJES, DE LUCHT STROOMT IN TEGENGESTELDE RICHTING DAN DE KIJKRICHTING .....	27
FIGUUR 4.6 SCHEMATISERING VAN DE STROMEN .....	27
FIGUUR 4.7 VERSCHILLENDE TYPEN GEVINDE BUISWISSELAARS .....	29
FIGUUR 4.8 PARALLELFLOW .....	30
FIGUUR 4.9 COUNTERFLOW .....	30
FIGUUR 4.10 CROSSFLOW .....	30
FIGUUR 4.11 SCHEMATISERING CROSSFLOW .....	30
FIGUUR 4.12 WARMTESTROMEN .....	31
FIGUUR 4.13 SCHEMATISERING .....	31
FIGUUR 4.14 VENKON VENTILATOR CONVECTOR .....	37
FIGUUR 4.15 JAGA MINI LUCHTVERHITTER .....	37
FIGUUR 4.16 COMPACTHEID VAN VERSCHILLENDE WARMTEWISSELAARS .....	41
FIGUUR 5.1 PROTOTYPE SMART SKIN GLAS .....	45
FIGUUR 5.2 PROTOTYPE SMART SKIN MATGLAS .....	45
FIGUUR 5.3 VOORAANZICHT SMART SKIN.....	46
FIGUUR 5.4 HORIZONTALE DOORSNEDE AA' .....	46
FIGUUR 5.5 VERTICALE DOORSNEDE BB'.....	47
FIGUUR 5.6 IN- EN UITSTROOMTEMPERATUREN VAN DE BUISJES IN WINTER EN ZOMER. ....	48
FIGUUR 5.7 STUKJE POLICARBONAAT MET ENKELE POLYETHEEN SLANGETJES. ....	49
FIGUUR 5.8 SECTIE SMART SKIN VAN POLICARBONAAT .....	50
FIGUUR 5.9 SECTIE SMART SKIN MET AANDUIDING CONFIGURATIE VAN BUISJES.....	50
FIGUUR 5.10 VOORZIJDE PROEFOPSTELLING .....	52
FIGUUR 5.11 ACHTERZIJDE PROEFOPSTELLING .....	52
FIGUUR 5.12 DETAIL VAN AANSLUITING LINKERBOVENZIJDE.....	52
FIGUUR 5.13 BINNENZIJDE VAN DE KAST. DE FIWIHEX WARMTEWISSELAAR .....	53
FIGUUR 5.14 IN- EN UITSTROOMTEMPERATUREN VAN DE BUISJES IN ZOMER EN WINTER.....	54
FIGUUR 5.15 SCHEMATISCHE WEERGAVE MEETOPSTELLING FIWIHEX BV IN ALMELO .....	55
FIGUUR 5.16 MEETOPSTELLING FIWIHEX BV .....	56
FIGUUR 5.17 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE WATERSTROMEN IN ZOMERSITUATIE .....	56
FIGUUR 5.18 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE WATERSTROMEN IN WINTERSITUATIE.....	57
FIGUUR 5.19 DE TOEGEPASTE REGELKNOPPEN MET PTC-WEERSTANDEN .....	58
FIGUUR 5.20 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE WATERSTROMEN IN ZOMERSITUATIE .....	59

FIGUUR 5.21 SCHEMATISERING VAN DE BESCHOUWDE SITUATIE .....	63
FIGUUR 5.22 SCHEMATISERING VAN DE BESCHOUWING VAN DE SMART SKIN .....	64
FIGUUR 5.23 GLASTEMPATUREN IN WINTER MET 15 °C BUITENZIJD E EN 21,5 °C BINNENZIJD E .....	65
FIGUUR 5.24 GLASTEMPATUREN IN ZOMER MET 21,5 °C BUITENZIJD E EN 15 °C BINNENZIJD E .....	66
FIGUUR 5.25 BEPALING VAN RELATIEVE LUCHTVOCHTIGHEID .....	67
FIGUUR 6.1 SCHEMATISERING VAN DE KAS .....	76
FIGUUR 6.2 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET MODEL .....	76
FIGUUR 6.3 TOEWIJZING VAN KNOPEN .....	78
FIGUUR 6.4 SCHEMATISCHE WEERGAVE MODELLERING VAN HET KASGEDEELTE .....	78
FIGUUR 6.5 SIMULINK-MODEL VOOR HET SUBSISTEEM KAS .....	80
FIGUUR 6.6 BLOCK WARMTEBRONNEN, SUBSISTEEM VAN KAS .....	81
FIGUUR 6.7 BLOCK ZONINSTRALING, SUBSISTEEM VAN WARMTEBRONNEN .....	81
FIGUUR 6.8 BLOCK WARMTE-UITWISSELING KAS EN WONING, SUBSISTEEM VAN WARMTEBRONNEN .....	82
FIGUUR 6.9 VERLOOP BUITENTEMPERATUUR EN KASTEMPERATUUR .....	83
FIGUUR 6.10 VERSCHIL TUSSEN KASTEMPERATUUR EN BUITENTEMPERATUUR.....	83
FIGUUR 6.11 VERLOOP BUITENTEMPERATUUR EN KASTEMPERATUUR IN DE EERSTE WEEK VAN MAART .....	84
FIGUUR 6.12 VERLOOP BUITENTEMPERATUUR EN KASTEMPERATUUR IN DE EERSTE WEEK VAN JULI .....	84
FIGUUR 6.13 VERLOOP BUITENTEMPERATUUR EN KASTEMPERATUUR IN DE EERSTE WEEK VAN JULI .....	85
FIGUUR 6.14 VERLOOP WARMTESTROMEN KASGEDEELTE .....	86
FIGUUR 6.15 WARMTESTROMEN IN DE EERSTE WEEK VAN MAART .....	87
FIGUUR 6.16 WARMTESTROMEN IN DE EERSTE WEEK VAN JULI .....	87
FIGUUR 6.17 WARMTESTROMEN IN DE EERSTE WEEK VAN DECEMBER .....	88
FIGUUR 6.18 ENERGIEBALANS KAS OVER EEN GEHEEL JAAR .....	89
FIGUUR 6.19 TEMPERATUURVERLOOP VAN LUCHT, VLOER EN WANDEN, EERSTE WEEK MAART .....	90
FIGUUR 6.20 TEMPERATUURVERLOOP VAN LUCHT, VLOER EN WANDEN, EERSTE WEEK JULI .....	90
FIGUUR 6.21 TEMPERATUURVERLOOP VAN LUCHT, VLOER EN WANDEN, EERSTE WEEK DECEMBER .....	91
FIGUUR 6.22 TEMPERATUURVERLOOP VLOERKNOPEN EN LUCHT, EERSTE WEEK MAART .....	92
FIGUUR 6.23 TEMPERATUURVERLOOP VLOERKNOPEN EN LUCHT, EERSTE WEEK JULI .....	92
FIGUUR 6.24 TEMPERATUURVERLOOP VLOERKNOPEN EN LUCHT, EERSTE WEEK DECEMBER .....	93
FIGUUR 6.25 TEMPERATUURVERLOOP GRONDKNOPEN, GEHELE JAAR .....	94
FIGUUR 6.26 TEMPERATUUR VAN DE KASLUCHT BIJ VERSCHILLENDE VENTILATIEVOUDEN, EERSTE WEEK MAART .....	95
FIGUUR 6.27 TEMPERATUUR VAN DE KASLUCHT BIJ VERSCHILLENDE VENTILATIEVOUDEN, EERSTE WEEK JULI .....	95
FIGUUR 6.28 TEMPERATUUR VAN DE KASLUCHT BIJ VERSCHILLENDE VENTILATIEVOUDEN, EERSTE WEEK DECEMBER .....	96
FIGUUR 6.29 TEMPERATUUR VAN DE KASLUCHT MET EN ZONDER WARMTEBRONNEN, EERSTE WEEK MAART .....	97
FIGUUR 6.30 TEMPERATUUR VAN DE KASLUCHT MET EN ZONDER WARMTEBRONNEN, EERSTE WEEK JULI .....	97
FIGUUR 6.31 TEMPERATUUR VAN DE KASLUCHT MET EN ZONDER WARMTEBRONNEN, EERSTE WEEK DECEMBER.....	98
FIGUUR 6.32 KASTEMPERATUUR BIJ VERSCHILLENDE OVERDRACHTSCOËFFICIËNTEN, EERSTE WEEK MAART .....	99
FIGUUR 6.33 KASTEMPERATUUR BIJ VERSCHILLENDE OVERDRACHTSCOËFFICIËNTEN, EERSTE WEEK JULI .....	99
FIGUUR 6.34 KASTEMPERATUUR BIJ VERSCHILLENDE OVERDRACHTSCOËFFICIËNTEN, EERSTE WEEK DECEMBER .....	100
FIGUUR 6.35 VLOERTEMPERATUUR BIJ VERSCHILLENDE OVERDRACHTSCOËFFICIËNTEN, EERSTE WEEK MAART.....	100
FIGUUR 6.36 KASTEMPERATUUR BIJ VERSCHILLENDE OVERDRACHTSCOËFFICIËNTEN, EERSTE WEEK JULI .....	101
FIGUUR 6.37 KASTEMPERATUUR BIJ VERSCHILLENDE OVERDRACHTSCOËFFICIËNTEN, EERSTE WEEK DECEMBER .....	101
FIGUUR 6.38 SCHEMATISERING VAN DE WONING .....	102
FIGUUR 6.39 ZEER SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET MODEL .....	102
FIGUUR 6.40 TOEWIJZING VAN KNOPEN .....	103
FIGUUR 6.41 SCHEMATISCHE WEERGAVE .....	103
FIGUUR 6.42 SIMULINK MODEL VOOR HET SUBSISTEEM WONING .....	105
FIGUUR 6.43 BLOCK WARMTEBRONNEN, SUBSISTEEM VAN WONING .....	106
FIGUUR 6.44 BLOCK ZONINSTRALING, SUBSISTEEM VAN WARMTEBRONNEN .....	106
FIGUUR 6.45 BLOCK VERMOGEN KOELING/VERWARMING, SUBSISTEEM VAN WARMTEBRONNEN .....	107
FIGUUR 6.46 VERLOOP BUITENTEMPERATUUR EN TEMPERATUUR IN DE WONING .....	108
FIGUUR 6.47 VERLOOP BUITENTEMPERATUUR EN TEMPERATUUR WONING IN DE EERSTE WEEK VAN MAART .....	109
FIGUUR 6.48 VERLOOP BUITENTEMPERATUUR EN TEMPERATUUR WONING IN DE EERSTE WEEK VAN JULI .....	109
FIGUUR 6.49 VERLOOP BUITENTEMPERATUUR EN TEMPERATUUR WONING IN DE EERSTE WEEK VAN JULI .....	110
FIGUUR 6.50 VERLOOP WARMTESTROMEN WONING.....	110
FIGUUR 6.51 WARMTESTROMEN WONING IN DE EERSTE WEEK VAN MAART .....	111
FIGUUR 6.52 WARMTESTROMEN WONING IN DE EERSTE WEEK VAN JULI .....	112
FIGUUR 6.53 WARMTESTROMEN IN DE EERSTE WEEK VAN DECEMBER .....	112
FIGUUR 6.54 ENERGIEBALANS WONING OVER EEN GEHEEL JAAR .....	113
FIGUUR 6.55 TEMPERATUUR VAN DE LUCHT IN DE WONING BIJ VERSCHILLENDE VENTILATIEVOUDEN, EERSTE WEEK MAART .....	114
FIGUUR 6.56 TEMPERATUUR VAN DE LUCHT IN DE WONING BIJ VERSCHILLENDE VENTILATIEVOUDEN, EERSTE WEEK JULI .....	114

FIGUUR 6.57 TEMPERAATUUR VAN DE LUCHT IN DE WONING BIJ VERSCHILLENDE VENTILATIEVOUDEN, EERSTE WEEK DECEMBER .....	115
FIGUUR 6.58 WARMTE-UITWISSELING VAN DE WONING NAAR DE KAS .....	116
FIGUUR 6.59 WARMTE-UITWISSELING VAN DE KAS NAAR DE WONING .....	117
FIGUUR 6.60 SIMULINK-MODEL VOOR HET SUBSISTEEM FIWIHEX .....	119
FIGUUR 6.61 KASTEMPERAATUUR EN VERMOGEN FIWIHEX .....	120
FIGUUR 6.62 KASTEMPERAATUUR EN WATERSTROMEN .....	120
FIGUUR 6.63 KASTEMPERAATUUR EN RETOURTEMPERATUUR .....	121
FIGUUR 6.64 VERSCHIL TUSSEN GEMIDDELDE KASTEMPERAATUUR EN TEMPERAATUUR BOVENIN DE KAS .....	122
FIGUUR 6.65 OVERZICHT VAN DE VERSCHILLENDE SUBSYSTEMEN EN DE ONDERLINGE VERBANDEN .....	124
FIGUUR 7.1 VERLOOP TEMPERAATUUR IN KAS MET EEN FIWIHEX .....	127
FIGUUR 7.2 VERMOGEN DAT FIWIHEX AAN KAS LEVERT .....	127
FIGUUR 7.3 VOOR FIWIHEX BENODIGDE ENERGIE, CUMULATIEF VOOR GEHEEL JAAR .....	128
FIGUUR 7.4 DOOR FIWIHEX AAN KAS GELEVERD ENERGIE, CUMULATIEF VOOR GEHEEL JAAR .....	129
FIGUUR 7.5 DOOR FIWIHEX AAN KAS GELEVERD ENERGIE, CUMULATIEF VOOR GEHEEL JAAR .....	129
FIGUUR 7.6 RETOURTEMPERATUREN VAN WATER NAAR BRONNEN .....	130
FIGUUR 7.7 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN TOEPASSING ZONWEREND DOEK .....	131
FIGUUR 7.8 KASTEMPERATUREN BIJ EEN VERSCHILLENDE AANTALLEN WARMTEWISSELAARS, MAART .....	133
FIGUUR 7.9 KASTEMPERATUREN BIJ EEN VERSCHILLENDE AANTALLEN WARMTEWISSELAARS, JULI .....	133
FIGUUR 7.10 KASTEMPERATUREN BIJ EEN VERSCHILLENDE AANTALLEN WARMTEWISSELAARS, DECEMBER .....	134
FIGUUR 7.11 BENODIGD VERWARMINGSVERMOGEN WONING .....	137
FIGUUR 7.12 WARMTEBEHOEFTE VOOR DE WONING, CUMULATIEF VOOR GEHEEL JAAR .....	138
FIGUUR 7.13 MINIMAAL VEREISTE AANVOERTEMPERAATUUR WATER VOOR VERWARMING .....	139
FIGUUR 7.14 WARMTEBEHOEFTE EN BENODIGDE ENERGIE VOOR NAVERWARMEN .....	140
FIGUUR 7.15 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN WKO-INSTALLATIE .....	140
FIGUUR 7.16 VERSCHILLEN IN HET TEMPERAATUURVERLOOP VAN DE BRON NA EEN JAAR ZONDER TOEVOEREN OF ONTTREKKEN VAN WATER .....	142
FIGUUR 7.17 WARMTESTROMEN PER WONING IN EEN HEEL JAAR, BIJ ÉÉN FIWIHEX .....	143
FIGUUR 7.18 WARMTESTROMEN PER WONING IN EEN HEEL JAAR, BIJ ÉÉN .....	144
FIGUUR 7.19 SCHEMATISCHE WEERGAVE THERMISCHE ZONNECOLLECTOR .....	146
FIGUUR 7.20 SCHEMATISCHE WEERGAVE ZONNEBOILER .....	147

## Lijst van tabellen

TABEL 4.1 CLASSIFICATIE VAN DE FIWIHEX.....	31
TABEL 4.2 GEGEVENS WATERVOERENDE BUISJES .....	32
TABEL 4.3 BEPALING VAN $C_{\text{MIN}}$ , WAARDEN VOLGENS [20] .....	34
TABEL 4.4 BEPALING VAN DE WAARDE VAN $UA$ .....	35
TABEL 4.5 VERGELIJKING VAN DE E-NTU METHODE EN DE ITERATIEMETHODE VAN FIWIHEX BIJ $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ LUCHTSTROOM .....	35
TABEL 4.6 $U \cdot A$ BEPAALD UIT METINGEN EN BEPAALD DOOR TERUGREKENEN .....	36
TABEL 4.7 WARMTEOVERDRACHT EN LUCHTDEBIET VOOR DE BESCHOUWDE VENTILATORCONVECTORS .....	37
TABEL 4.8 BEPAALDE WAARDEN VOOR $U \cdot A$ .....	38
TABEL 4.9 BEPAALDE WAARDEN VOOR $U \cdot A$ .....	38
TABEL 4.10 BEPAALDE WAARDEN VOOR $E$ .....	39
TABEL 4.11 BEPAALDE WAARDEN VOOR $E$ .....	39
TABEL 4.12 BEPAALDE $PR$ .....	40
TABEL 4.13 BEPAALDE $PR$ .....	40
TABEL 4.14 BEPAALDE WAARDEN VOOR $H_{\text{TEMP}}$ .....	41
TABEL 4.15 BEPAALDE WAARDEN VOOR $H_{\text{TEMP}}$ .....	42
TABEL 4.16 BEPAALDE $PER$ .....	42
TABEL 4.17 BEPAALDE $PER$ .....	43
TABEL 6.1 BOUWKUNDIGE EN BOUWFYSISCHE GEGEVENS KASGEDEELTE .....	77
TABEL 6.2 BESTEMMING VAN DE BINNENGEKOMEN ZONNEWARMTE.....	79
TABEL 6.3 GEMIDDELDE WARMTELAST TEN GEVOLGE VAN PERSONEN, APPARATEN EN VERLICHTING].....	80
TABEL 6.4 BOUWKUNDIGE EN BOUWFYSISCHE GEGEVENS WONINGGEDEELTE .....	102
TABEL 6.5 BESTEMMING VAN DE BINNENGEKOMEN ZONNEWARMTE.....	105
TABEL 7.1 WARMTEWINST BIJ VERSCHILLENDE AANTALLEN WARMTEWISSELAARS.....	134
TABEL 7.2 WARMTEWINST BIJ VERSCHILLENDE AANTALLEN WARMTEWISSELAARS.....	135
TABEL 7.3 BENODIGDE HULPENERGIE BIJ VERSCHILLENDE AANTALLEN WARMTEWISSELAARS.....	136
TABEL 7.4 BENODIGDE HULPENERGIE VOOR HET KOELEN VAN DE KAS.....	136
TABEL 7.5 MAXIMALE EN MINIMALE RETOURTEMPERATUUR NAAR WARME RESPECTIEVELIJK KOUDE BRON, VOOR VERSCHILLENDE AANTALLEN WARMTEWISSELAARS.....	136
TABEL 7.6 WINNING VAN ZONNEWARMTE PER VIERKANTE METER KASOPPERVLAK PER JAAR .....	145
TABEL 7.7 $PER$ BIJ VERSCHILLENDE AANTALLEN WARMTEWISSELAARS.....	145

## Literatuurlijst

- [1] World Energie Outlook 2006  
International Energy Agency / Organisation for Economical Co-operation and Development  
Juni 2006  
ISBN 92-64-10989-7-2006
- [2] International Energy Outlook 2007  
Energy Information Administration - Office of Integrated Analysis and Forecasting  
U.S. Department of Energy, Washington DC  
Mei 2007  
DOE/EIA-0484 (2007)
- [3] Climate Change 2007: Synthesis Report  
Intergovernmental Panel on Climate Change  
November 2007
- [4] Kas als Energiebron – Keerpunt en katalysator  
Corianne Roza  
InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster, Stichting Innovatie  
Glastuinbouw  
Utrecht / Bleiswijk, mei 2006  
ISBN 90-5059-298-8
- [5] Glastuinbouw en Energie: van Grootverbruiker tot Leverancier  
Ongeredigeerde eindversie Module NLT3-H017  
Hoofdredacteur Theo Neessen  
Landelijk Ontwikkelpunt NLT  
[www.betavak-nlt.nl](http://www.betavak-nlt.nl)  
19 december 2008
- [6] Een kas voor elke woonwijk – Duurzame energie voor de Gebouwde Omgeving uit de Glastuinbouw  
InnovatieNetwerk, Stichting Innovatie Glastuinbouw  
Utrecht, december 2006  
ISBN 90-5059-314-3
- [7] Vergelijking en Casestudie Exergie- en Energieanalyse van Gebouwen  
dr. L. Itard  
TVVL Magazine, jaargang 35 nummer.  
februari 2006
- [8] Kas als Warmtebron – Glastuinbouw en Stad in een Nieuwe Alliantie  
Mecanoo Architecten B.V., Stichting Innovatie Glastuinbouw, InnovatieNetwerk  
Groene Ruimte en Agrocluster  
Den Haag, mei 2003  
ISBN 90-5059-170-1  
Rapportnummer 03.2.033
- [9] De Zonneterp – Een Grootschalig Zonproject  
mr. E.J.S.A. Wortmann (Elannet B.V.), I.E.L.Kruseman (Bureau ASK)  
InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster  
Utrecht, juni 2005  
ISBN 90-5059-260-0  
Rapportnummer 05.2.101.
- [10] Villa Flora – Het Groenste Kantoor van Nederland, Floriade 2012  
Floris Klunder  
Architecten- en Ingenieursbureau Kristinsson  
Deventer, oktober 2007
- [11] Eindrapport Monitoring Zonnewoningen te Culemborg  
ir. A.J. Kalkman, ir. E.M.M.Willems  
Cauberg-Huygen Raadgevend Ingenieurs BV  
Rapportnummer 20022184-10

- [12] Die Verwendung Von Pflanzen zur Klimatisierung und all Lärmschutz  
P.R. Costa, R.W. James – South Bank University  
Glasforum nummer 6, 1999
- [13] KlimaatPlusWonen Locatie Scheepsbouwweg Conceptversie 2.0  
AM Noord-Holland, Inbo Architecten Woudenberg, InnovatieNetwerk Groene  
Ruimte en Agrocluster, Stichting Innovatie Glastuinbouw  
29 januari 2008
- [14] [www.hollandsolar.nl/uploads/werking\\_van\\_zonnepanelen](http://www.hollandsolar.nl/uploads/werking_van_zonnepanelen)
- [15] Desiccant Climate Control Unit for Greenhouses, driven by cogeneration  
C.Arentsen, prof. dr. ir. A.H.V. van Paasen  
Technische Universiteit Delft  
Delft, oktober 2008
- [16] [www.fiwihex.nl](http://www.fiwihex.nl)
- [17] Fundamentals of Heat Exchanger Design  
Ramesh K. Shah, Dušan O. Sekulić  
John Wiley & Sons, Inc  
New Jersey 2003  
ISBN 0-471-32171-0
- [18] [www.cemr.wvu.edu](http://www.cemr.wvu.edu)  
Andrei Smirnov  
Collegestof ma-320  
West Virginia University – College of Engineering and Mineral Resources
- [19] Notitie 20089999-65  
Fiwihex als Warmtewisselaar  
prof. ir. J.J.M.Cauberg  
10 juni 2008
- [20] Bouwfysisch en Brandfysisch Tabellarium – Tabellarium Warmte  
Stichting Kennisbank Bouwfysica  
[www.kennisbankbouwfysica.nl](http://www.kennisbankbouwfysica.nl)
- [21] Fundamentals of heat and Mass transfer  
F.P. Incropera, D.P. de Wit  
2007  
ISBN: 978-0-471-45728-2
- [22] Brochure Kampmann – Systemen voor Verwarming, Koeling en Ventilatie voor  
Woningbouw  
Kampmann GmbH  
November 2006
- [23] Brochure Jaga AVS Luchtverhitter  
Jaga Konvektco Nederland B.V.  
[www.theradiatorfactory.com](http://www.theradiatorfactory.com)
- [24] Overzicht Commercieel Verkrijgbare Warmtewisselaars – Technische en  
economische kentallen  
S.F.Smeding  
ECN Energie Efficiency in de Industrie Restwarmtetechnologie  
6 juli 2001  
ECN-I--01-009
- [25] Monitoring Nederlandse elektriciteitscentrales 2000-2004  
A.J. Seebregts C.H. Volkers  
Energy research Centre of the Netherlands (ECN)  
November 2005  
ECN-C--05-090
- [26] Diamond4Ever - Een CO2 Neutraal Monument voor Innovatief Amsterdam  
Corinne Cornelisse MSc, dr. Matthijs Hisschemöller  
Instituut voor Milieuvraagstukken, Dienst Milieu en Bouwtoezicht Amsterdam  
28 april 2008  
Rapportnummer W-08/09

- [27] Kalzip Felsdak levert Energie – Geïntegreerde Lamellen met Glycol  
Henk Wind  
Bouwwereld nr. 16 jaargang 2006
- [28] Analytical Model for Predicting Thermal Bridge Effects due to Vacuum Insulation  
Panel Barrier Envelopes  
M.J. Tenpierik MSc, prof. ir. J.J.M. Cauberg, dr. ir. W.H. van der Spoel  
Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Climate Design &  
Sustainability Group  
Januari 2007
- [29] Bouwfysica  
ir. A.C. van der Linden e.a.  
Mei 2000  
ISBN 90-212-9114-2
- [30] Warmteoverdracht door Convectorie  
ir. E.H. Tumbuan, prof. ir. J.J.M. Cauberg  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU Delft  
Augustus 2005  
[www.kennisbankbouwfysica.nl](http://www.kennisbankbouwfysica.nl)
- [31] [www.bouwbesluitonline.nl](http://www.bouwbesluitonline.nl)
- [32] Nederlandse norm NEN 5128  
Energieprestatie van woonfuncties en woongebouwen – Bepalingsmethode  
Nederlands Normalisatie-instituut  
Maart 2004  
ICS 91.120.10
- [33] Notitie 20071853-03  
Bepaling Infiltratievoud voor TRNSYS Simulaties  
ir. J.W. van Laer  
21 december 2007
- [34] De Ark te Dronten; Effectenstudie WKO-installatie  
ing. W.J. Eschbach, ir. B.J.M. Slot, ing. J. Kuiper  
Cauberg-Huygen Raadgevende Ingenieurs BV  
20 juli 2007  
Referentienummer 20042422-07
- [35] [nl.wikipedia.org/wiki/Zonnecollector](http://nl.wikipedia.org/wiki/Zonnecollector)
- [36] [www.vrom.nl](http://www.vrom.nl)
- [37] DSS Zonnewarmtesystemen  
Gelijkwaardigheidsverklaringen, stappenplan en STABU bestektekst - volgens  
versie 2.03  
Brouwer Energie Consult BV  
6 mei 2008, Apeldoorn