


## OPSLAG VAN THERMISCHE ENERGIE IN EEN FLEXIBELE WATERZAK

S.F. Smeding, P.W. Bach

Revisie			
A	Maart 1999; definitieve versie		
B			
Gemaakt door:	Gecontroleerd door:	Goedgekeurd door:	ECN-Energie Efficiency
S.M. Smeding	P.W. Bach WEL/PL	P.T. Alderliesten GM/PS	 Thermal Matching

Dit rapport beschrijft de resultaten van de tweede fase van het project “Opslag van thermische energie” en omvat het meetprogramma van thermische opslag in een waterzak.

Opdrachtgever:       EnergieNed  
Studie:                G0010-4601  
Opdrachtnr.:         8074

## ABSTRACT

A cheap and flexible way to store heat from several heating installations is using a waterbag. The prime advantage of a waterbag over a conventional watertank is the ease of handling; it can be placed in less accessible spaces eg cellars. A heat exchanger, however, is necessary for pressure separation, because a waterbag can not withstand the system pressure.

A test system has been built consisting of a 100 kW heat generator and a 7 m<sup>3</sup> insulated waterbag. In order to obtain experience with this type of storage, testruns of a week with a simulated heat demand were performed for several applications. (e.g. heat pump, cogeneration unit, solar collector)

The results show that it is possible to obtain some stratification in the waterbag and to improve the utilisation of the heating installations. The power performance, however, is a function of the changing temperature during (un)loading.

In order to increase the energy density of the storage unit and to improve the power performance with a constant temperature at (un)loading, the application of phase change materials is recommended.

Keywords: waterbag, heat storage, stratification, phase change materials.

## SAMENVATTING

Als gevolg van ontwikkelingen van nieuwe apparatuur en de vraag naar energiebesparing neemt de belangstelling voor flexibele en compacte bovengrondse warmte-opslagsystemen toe. Op basis van de bevindingen van de eerste fase van het project is een testopstelling gebouwd om het waterzakprincipe als goedkoop en flexibel opslagsysteem te realiseren en te testen. Met twee CV-ketels als gesimuleerde warmtebron en een waterzak van 7 m<sup>3</sup> is de toepassing van een flexibele buffer bij een warmtenet, WKK, warmtepomp en zonnecollector onderzocht met meetseries van een week.

Voor het waterzakstelsel is het noodzakelijk een warmtewisselaar toe te passen als drukscheider tussen het CV-systeem en de waterzak. Om zowel gelijkmatige instroming als stratificatie mogelijk te maken is een sproeileiding ontwikkeld en in de waterzak geplaatst. Voor de opstelling is software ontwikkeld voor de aansturing van de installatie. Tevens is het hiermee mogelijk modelsimulaties uit te voeren voor het systeem.

Om het systeem te karakteriseren is gestart met het meten van het warmteverlies van de waterzak. Zowel in ongeïsoleerde als geïsoleerde toestand van de waterzak liggen de verliezen gedurende de meting ca. 30% hoger dan in het theoretische model. Het warmteverlies is echter slechts een kleine fractie van het ontlaadvermogen en is met extra isolatie te beperken.

Op het moment dat er met maximaal vermogen geladen kan worden, is er in de waterzak een significante stratificatie aanwezig. Tijdens de meetsessies van een week is echter nauwelijks met maximaal warmte vermogen geladen. Aangezien het debiet constant is, treedt er nauwelijks gelaagdheid op in de buffer.

De metingen tonen aan dat in de gekozen referentieweek de benutting van de zonnecollector door toepassing van een buffer met meer dan 50% stijgt. De bijdrage van de warmtepomp aan de warmtevraag stijgt met een buffer van ca. 60% naar 95%.

Doordat de testinstallatie een vast debiet heeft en de buffer in serie geschakeld is kan de buffer vooral bij de WKK en het warmtenet alleen geladen worden gedurende een periode van lage warmtevraag en met een lage temperatuur. De benutting van de buffer ligt bij deze systemen hierdoor lager dan uit de 1e fase was berekend aangezien het temperatuurniveau daar buiten beschouwing was gelaten. Aanbevolen wordt om bij dit soort installaties een debiet geregelde pomp toe te passen of de buffer bij het laden parallel te schakelen.

Tevens heeft het tamelijk vlakke warmtevraagpatroon van het referentiegebouw een grote invloed op de resultaten gehad. Bij een patroon met een grotere piekvraag zal het effect van de buffer kunnen toenemen.

De metingen komen in hoofdlijnen goed overeen met de simulaties, zodat het effect van de buffer goed voorspeld kan worden. Wel treden een paar structurele afwijkingen op. Zo is de stratificatie tijdens de metingen beperkter. Verder is het modulerende gedrag van de ketels niet in de simulaties meegenomen.

De waterzak heeft een aantal voordelen ten opzichte van een conventionele warmtebuffer (tank). Een waterzak is gemakkelijk te plaatsen in minder toegankelijke ruimtes, zoals een kelder, kruipruimte, zolder etc. Nadeel is de noodzakelijke warmtewisselaar als drukscheiding. De waterzak kan nog geoptimaliseerd worden door de isolatie te verbeteren, het oppervlak van de warmtewisselaar te vergroten en door gebruik te maken van een debietgeregelde pomp. De opslagcapaciteit van de buffer kan sterk stijgen door gebruik te maken van fase transformatie materiaal (FTM). Naast een hogere energiedichtheid maakt dit ook een constante temperatuur van laden en ontladen mogelijk. Vooruitlopend op het gebruik van FTM's is een selectie gemaakt van materialen die hiervoor in aanmerking komen.



# INHOUD

SAMENVATTING	3
1. INLEIDING	7
2. ONTWERP TESTOPSTELLING	9
2.1 Ontwerp testinstallatie	9
2.2 Bepaling warmtevraag	10
2.3 Bepaling warmteaanbod	10
2.4 Ontwerp warmtebuffer	10
2.4.1 Ontwerp diffusor	11
2.4.2 Stratificatie	12
2.4.3 Isolatie en warmteverliezen	12
2.5 Ontwerp warmtewisselaar	12
2.6 Beschrijving warmteafgiftesystemen	12
2.7 Temperatuurregeling CV-ketels	13
2.8 Ontwerp regeling systeem	13
2.8.1 Regelbaarheid warmtevraag	14
2.9 De programmatuur/software	14
2.10 Calibratie meetapparatuur	15
3. KARAKTERISERING INSTALLATIE	17
3.1 Warmteverlies waterzak	17
3.2 Overige warmteverliezen	18
3.3 Warmteoverdrachtscoëfficiënt warmtewisselaar	18
3.4 Laadgedrag waterzak	19
4. RESULTATEN SIMULATIES	21
4.1 Opzet model	21
4.2 Invloed sampletijd	21
4.3 Invloed buffer op installatie met zonnecollector	23
4.4 Invloed buffer op installatie met warmtepomp	24
4.5 Invloed buffer op installatie met WKK	25
4.6 Invloed buffer op installatie met warmtenet	28
5. RESULTATEN METINGEN	31
5.1 Opzet metingen	31
5.2 Invloed hoge sampletijd op metingen	31
5.3 Vergelijking resultaten simulaties en metingen	32
5.4 Invloed buffer op installatie met zonnecollector	33
5.5 Buffer in combinatie met een warmtepomp	34
5.6 WKK installatie met warmtebuffer	35
6. OPTIMALISATIE & VERGELIJKING WATERZAK	37
6.1 Optimalisatie waterzak	37
6.2 Verschillen waterzak en tanksysteem	38
6.3 Vergelijking resultaten met studie 1e fase	38
7. FASE TRANSFORMATIE MATERIALEN	41
7.1 Inleiding	41
7.2 Vergelijking organische en anorganische FTM's	42
7.3 Selectie	43
7.4 Ontwerpaspecten	44

8.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	47
8.1	Conclusies	47
8.2	Aanbevelingen	48
9.	LITERATUUR	49
BIJLAGEN 1	STROOMSCHEMA'S TEST-INSTALLATIE	51
BIJLAGE 2	REKENMETHODE VOOR TEMPERATUURNIVEAU	55
BIJLAGE 3	RENDEMENT ZONNECOLLECTOR	57
BIJLAGE 4	ONTWERP SPROEILEIDING/DIFFUSOR	59
BIJLAGE 5	STRATIFICATIE-MODEL	63
BIJLAGE 6	BEREKENING WARMTEVERLIEZEN	67
BIJLAGE 7	WARMTEOVERDRACHT WARMTEWISSELAAR	69
BIJLAGE 8	BESLISTABELLEN LADEN OF ONTLADEN	71
BIJLAGE 9	VOORSPELLING WARMTEVRAAG & ZONAANBOD	73
BIJLAGE 10	PRINTSCREEN VAN MEET- & REGELPROGRAMMA	77
BIJLAGE 11	SOFTWAREMATIGE CALIBRATIE	79
BIJLAGE 12	TOELICHTING SELECTIECRITERIA FTM	83
BIJLAGE 13	SPECIFICATIES THERMOKOPPELBOOM	85
BIJLAGE 14	FOTO'S VAN TESTOPSTELLING	87
BIJLAGE 15	RESULTATEN METING WARMTEVERLIEZEN	89
BIJLAGE 16	WARMTEOVERDRACHTS-COËFFICIËNT PLATENWARMTEWISSELAAR	91
BIJLAGE 17	WAARDEN DEBIET	93
BIJLAGE 18	REGELING MENGKLEP	95
BIJLAGE 19	REGELGEDRAG CV-KETELS	97
BIJLAGE 20	INVLOED SAMPLETIJD OP METINGEN & SIMULATIES	99
BIJLAGE 21	RESULTATEN MEETPROGRAMMA ZONNECOLLECTOREN	101
BIJLAGE 22	RESULTATEN MEETPROGRAMMA WARMTEPOMP	107
BIJLAGE 23	RESULTATEN MEETPROGRAMMA WKK	113
BIJLAGE 24	RESULTATEN MEETPROGRAMMA WKK (40-80)	119
BIJLAGE 25	RESULTATEN SIMULATIES WARMTENET	125

## 1. INLEIDING

Als gevolg van ontwikkelingen van nieuwe apparatuur en de vraag naar energiebesparing neemt de belangstelling voor flexibele en compacte bovengrondse warmteopslag-systemen voor de korte termijn opslag toe. Als uitvloeisel van de eerste fase van het project “Opslag van thermische energie” is een testopstelling gebouwd om het waterzakprincipe als goedkoop en flexibel opslagsysteem te realiseren en te testen voor toepassing bij een warmtenet, WKK, warmtepomp en zonnecollectoren.

Op basis van de bevindingen van de eerste fase is in overleg met fabrikanten het ontwerp van een waterzakstelsysteem en de testopstelling verder gedetailleerd. De testopstelling is ontworpen voor het leveren van een vermogen van maximaal 100 kW thermisch vermogen en het simuleren van diverse warmtevoorzieningen (hoofdstuk 2).

Na het realiseren van de testopstelling zijn de belangrijkste componenten van het systeem gekarakteriseerd om het gedrag van de installatie zoveel mogelijk te kunnen modelleren (hoofdstuk 3). Met een rekenmodel zijn simulaties uitgevoerd om de invloed van de buffer voor diverse installaties te bepalen (hoofdstuk 4). Vervolgens is het meetprogramma gestart en worden de resultaten geanalyseerd en vergeleken met de resultaten van de simulaties (hoofdstuk 5). In hoofdstuk 6 wordt bekeken hoe het ontwerp van de waterzak verder geoptimaliseerd kan worden. Met de ervaringen die zijn opgedaan met de metingen wordt ook een vergelijking gemaakt tussen de waterzak en een watertank.

Als alternatief voor water is het mogelijk om in de toekomst de waterzak te vullen met fase transformatie materialen om een hogere energiedichtheid en constante temperatuur bij opslag te verkrijgen. Vooruitlopend hierop is een selectie gemaakt van materialen die hiervoor in aanmerking komen (hoofdstuk 7).





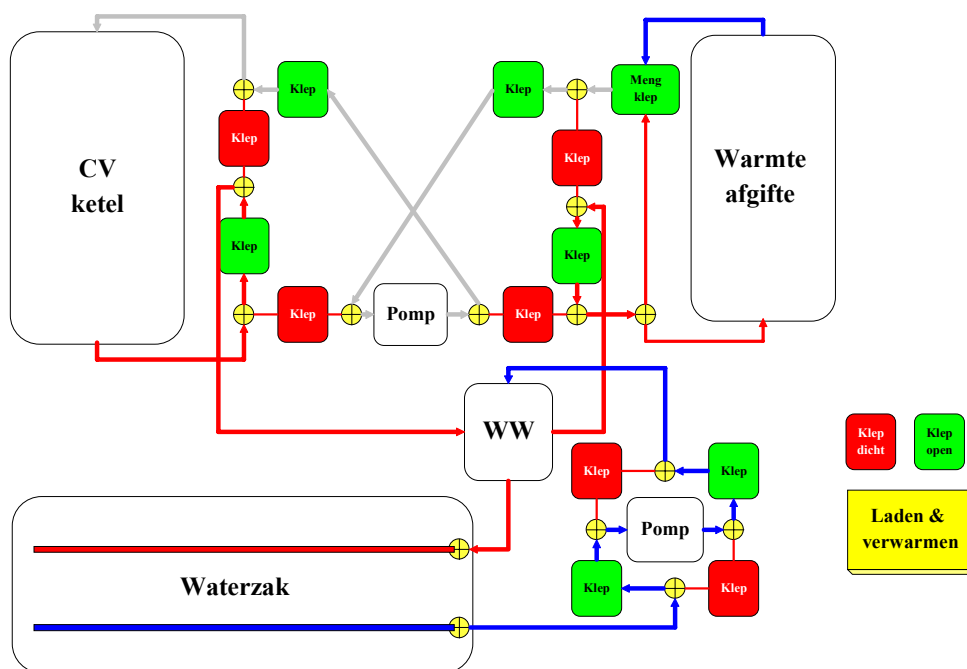
## 2. ONTWERP TESTOPSTELLING

### 2.1 Ontwerp testinstallatie

Aan het ontwerp van de installatie is een aantal eisen gesteld. Het flexibele opslagsysteem moet over een vermogen van maximaal 100 kW en een opslagcapaciteit van maximaal 300 kWh (1,08 GJ) kunnen beschikken. Het temperatuurgebied van warmteopslag ligt tussen de 35 en 85°C. De folie van de waterzak is tot maximaal 85°C gegarandeerd. In de praktijk zal dit voldoende zijn aangezien de waterzak gescheiden is met de CV-ketel door een warmtewisselaar, waardoor de maximale temperatuur in de CV-ketel niet volledig kan worden overgebracht op de waterzak.

Verder moet het mogelijk zijn om het systeem zodanig te schakelen dat het geschikt is voor zowel laden als ontladen in combinatie met warmtevraag. De stroom door de warmtewisselaar moet daarom omkeerbaar zijn, terwijl de stroom door de CV-ketel en het warmteafgiftesysteem juist in één vaste richting moet worden bedreven. Om de warmtevraag in te kunnen stellen is met behulp van een mengklep het circuit over het warmteafgiftesysteem kortgesloten. In verband met de kostprijs van het systeem is het aantal driewegkleppen beperkt. Er is gekozen voor een serieschakeling van de buffer met de warmtebron en het warmteafgiftesysteem (Figuur 2.1).

In bijlage 1 zijn in een overzicht de diverse standen van het systeem schematisch weergegeven. Daarbij is de betekenis van de afkortingen zoals gebruikt in figuren en tabellen beschreven. In Tabel 9.1 (bijlage 1) is een overzicht van de stand van de kleppen en apparaten weergegeven.



Figuur 2.1 Vereenvoudigd stroomschema waterzak, stand 2a (Ontladen & naverwarmen)

## 2.2 Bepaling warmtevraag

Voor de simulatie van de warmtevraag wordt gebruikt gemaakt van klimaat- en gebouwgegevens die met behulp van het programma TRNSYS<sup>1</sup> resulteren in een warmtevraag. Afhankelijk van de keuze van het warmte-afgiftesysteem, correspondeert een zekere warmtevraag met een specifiek temperatuurniveau. Door een groter warmtewisselend oppervlak te kiezen kan een laag-temperatuur-verwarmingssysteem worden gegenereerd. In bijlage 2 wordt de rekenmethode voor het bepalen van het temperatuurniveau weergegeven. Tevens is voor een tweetal situaties de relatie vermogen – temperatuur-niveau grafisch weergegeven (Figuur 9.7 en Figuur 9.8 in bijlage 2).

## 2.3 Bepaling warmteaanbod

Tijdens simulaties moet zowel een warmtepomp, een warmtekrachtkoppeling installatie, een warmtenet als een zonnecollector kunnen worden gesimuleerd. In Tabel 2.1 worden voor de verschillende systemen de gekozen temperaturen en vermogens aangegeven. In bijlage 3 worden de vergelijkingen gegeven voor het collectorrendement als functie van de temperatuur en de zonne-instraling.

Tabel 2.1 *Gekozen waarden per type installatie*

	CV-systeem	WP	WKK	WKK	Warmtenet	Zonnecollector
Temperatuur °C						
• Maximaal	90	50	90	80	90	90
• Bereik	40-90	35-50	70-90	40-80	70-90 (Figuur 9.11, bijlage 3)	30-90 $f(T_{\text{verw,in}}, G, m)$
Vermogen kW						
• Maximaal	100	20	30	40	75	
• Minimaal	10	10	10	15		
Collectoroppervlak m <sup>2</sup>	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	200

## 2.4 Ontwerp warmtebuffer

De vloeistofzak is gemaakt van tweezijdig butyl berubberd polyamide weefsel met een dikte van ca. 1,4 mm.

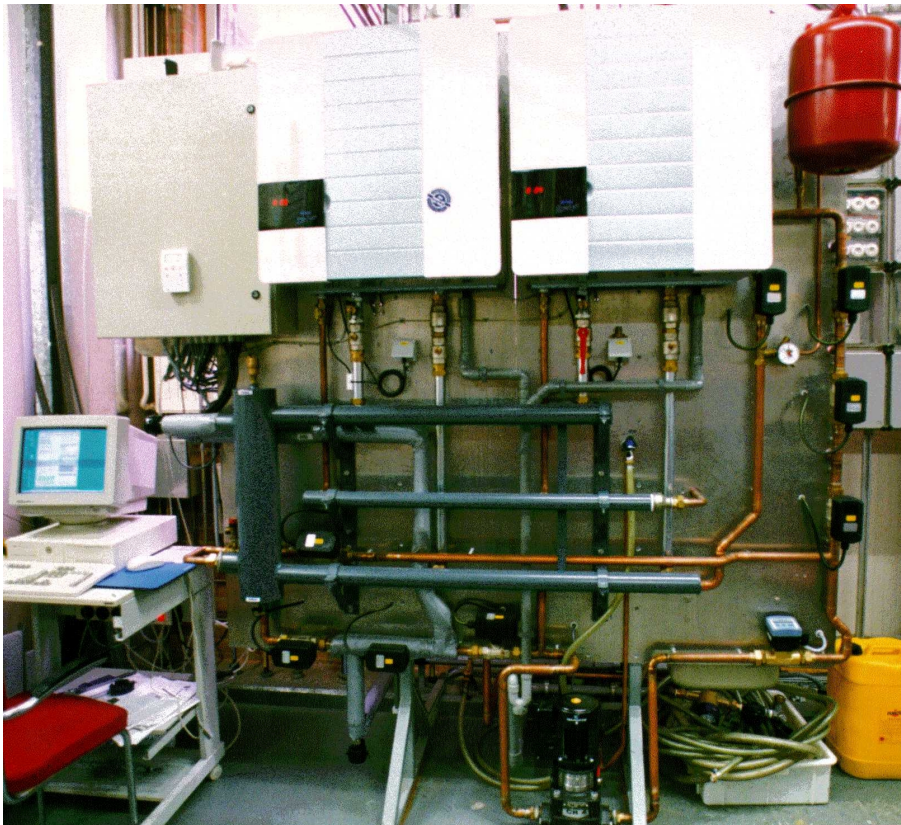
Globaal wordt gerekend met de volgende afmetingen:  $L \times b \times h = 4,4 \times 2,2 \times 0,75$  m. Het volume bedraagt 7 m<sup>3</sup>. De maximaal toelaatbare temperatuur bedraagt 85°C.

De waterzak is met de warmtewisselaar geplaatst in de kelderruimte van een laboratorium. Het CV- en warmteafgiftesysteem zijn samen met de regelunits in een bovenliggend laboratorium gesitueerd.

<sup>1</sup> TRNSYS is een simulatieprogramma voor gebouwen. (<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/default.htm>)



Figuur 2.2 *Geïsoleerde waterzak*



Figuur 2.3 *Het CV-systeem bestaande uit 2 CV-ketels, een cascade van gasaanvoer ketels, een cascade van warme- en koude zijde ketels, diverse kleppen, thermokoppels, flowmeter, expansievat, electronicakast en een PC*

#### 2.4.1 Ontwerp diffusor

Een goed ontwerp van de sproeileiding (diffusor) is om meerdere redenen van belang. Hierbij moet wel een keuze gemaakt worden aangezien een aantal eisen tegenstrijdig is. Zo is een lage drukval gewenst om een zo'n groot mogelijk debiet te krijgen bij een zo'n klein mogelijk

pomp vermogen. Anderzijds is een hoge drukval gunstig om een gelijkmatige uitstroom over de lengte van de sproeileiding te realiseren. Om een ideaal gelaagd systeem te realiseren is de uitstroomsnelheid van belang. De laatste eis is dat de diameter van de gaatjes niet te klein is in verband met verstopping/dichtslibben.

In bijlage 4 zijn de belangrijkste formules weergegeven om een sproeileiding te kunnen dimensioneren. Ook zijn schematisch enkele berekeningsresultaten weergegeven.

Aangezien verankering van de diffusor in de waterzak moeilijk is, is voor de eenvoudigste oplossing gekozen: gebruik te maken van een leidingmateriaal voor boven en onderin de waterzak dat lichter respectievelijk zwaarder is dan het opslagmedium.

De diffusorbuis is met behulp van een flexibele slang verbonden met een flens die aangesloten is op de aansluitingen van de waterzak (3 en 5 inch). Het einde van de diffusorbuis is afgesloten en is glad afgewerkt om beschadigingen aan de waterzak te voorkomen.

## 2.4.2 Stratificatie

Een goed model ontwikkelen voor de gelaagdheid (stratificatie) van een systeem is zeer complex. Voor een stationaire situatie is met behulp van de in bijlage 5 vermelde methode het effectieve opslagvolume bepaald op 99% van het totale volume. Wordt in het model uitgegaan van een bodemtemperatuur van  $25^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{koud}}$ ), een toptemperatuur van  $55^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{warm}}$ ) en de ingaande temperatuur van de diffusor bedraagt  $60^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{in}}$ ), dan wordt het rendement van opslag 69%. Wordt de entreesnelheid verlaagd van 1,15 l/s naar 0,5 l/s dan neemt het rendement toe tot 80%. De waarden in het model zijn sterk afhankelijk van zaken als diameter van en het aantal gaatjes in de sproeileiding, de temperaturen en de stroomsnelheden.

In de opstelling wordt de gelaagdheid gemeten met behulp van en vijftal thermokoppels die verticaal boven elkaar in de waterzak zijn bevestigd (zie bijlage 13).

## 2.4.3 Isolatie en warmteverliezen

Het systeem is op de grond geïsoleerd met behulp van twee lagen Styrofoam isolatieplaten. De zij- en bovenkant van de vloeistofzak is geïsoleerd met een glaswoldeken. (Voor parameters isolatie zie Tabel 9.4) In bijlage 6 worden de belangrijkste formules gegeven om het warmteverlies naar de omgeving te berekenen.

## 2.5 Ontwerp warmtewisselaar

De ontwerpdruk die in de waterzak mag optreden bedraagt 0,1 bar. Dit komt overeen met 10% van de belastbaarheid van het materiaal. Door de hoogte van een gebouw en door de werkdruk die op een CV-installatie staat is het niet mogelijk om het systeem rechtstreeks met de waterzak te verbinden. Daarom is als drukscheider voor een platenwarmte-wisselaar gekozen. Platenwisselaars zijn compact, hebben een beperkt warmteverlies, een hoge warmte-overdrachtscoëfficiënt en zijn relatief goedkoop.

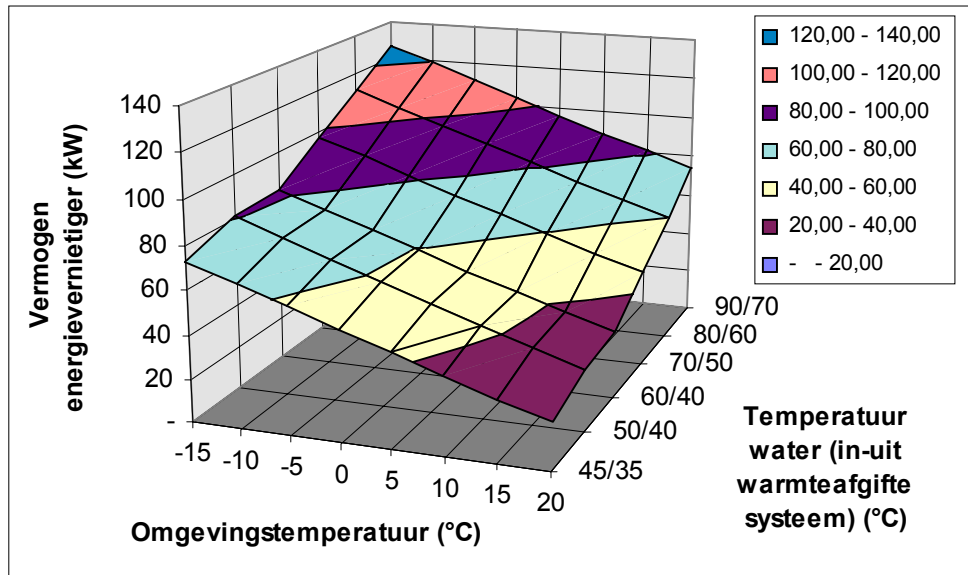
In bijlage 7 wordt beschreven hoe het vermogen dat de warmtewisselaar overdraagt gesimuleerd kan worden. In § 3.3 wordt verder ingegaan op de opgegeven en gemeten waarden van de warmte-overdrachtscoëfficiënt van de warmtewisselaar.

## 2.6 Beschrijving warmteafgiftesystemen

Om de warmtevraag te kunnen simuleren en de waterzak te kunnen ontladen wordt gebruik gemaakt van een tweetal reeds bestaande warmteafgiftesystemen. De warmteafgiftesystemen heb-

ben een betrekkelijk hoge stromingsweerstand zodat het debiet van de pomp bij het doorstromen van de warmteafgiftesystemen sterk daalt.

Uit Figuur 2.4 blijkt dat bij een hoge buitenluchttemperatuur de capaciteit sterk afneemt. Het heeft dan ook niet de voorkeur om de metingen in de zomerperiode uit te voeren. Hiernaast heeft ook de gemiddelde temperatuur van de in- en uitgaande stroom van het af te koelen medium sterk invloed op het vermogen.



Figuur 2.4 *Vermogen warmteafgiftesysteem met een nominaal vermogen van 80 kW als functie van de aangeboden water- en buitenluchttemperatuur. Debiet = ± 0,8 l/s*

## 2.7 Temperatuurregeling CV-ketels

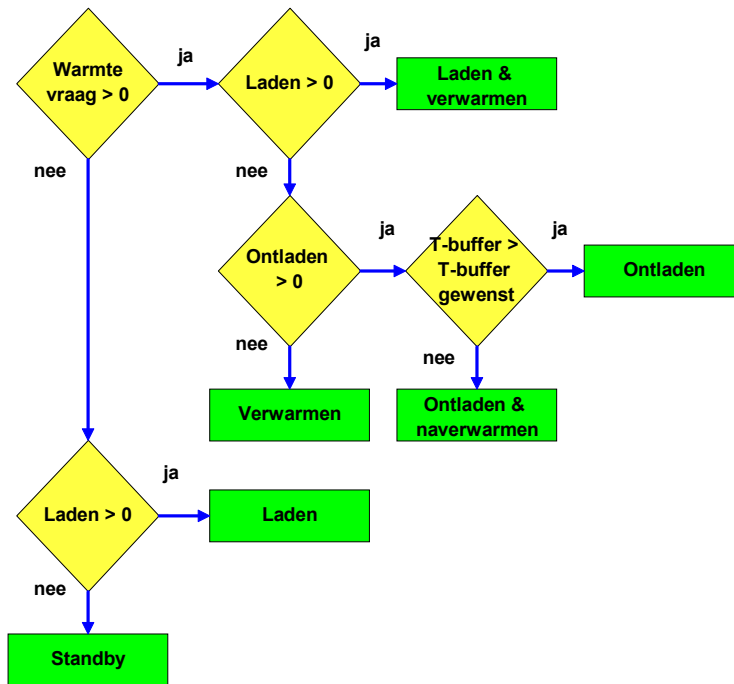
Om de verschillende warmtevoorzieningen als een warmtepomp, warmtenet, WKK en zonnecollectoren te simuleren is gekozen voor een tweetal in cascade geschakelde CV-ketels. Bij lage warmtevraag is slechts één ketel ingeschakeld, bij een hoger vermogen schakelt de tweede ketel bij.

Door het hoge modulerende karakter van de ketels was de verwachting dat door het aan en uitschakelen van de ketels de aanvoertemperatuur van het systeem binnen een aanvaardbare marge viel in te stellen. Na metingen bleek echter een zeer grote schommeling van  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  in de temperatuur aanwezig. Uiteindelijk is gekozen om via twee extra com-poorten vanuit de PC en een extra interface in de CV-ketels de ketelwatertemperatuur op te leggen. De ketels moduleren zelf op deze temperatuur. (Zie bijlage 19).

## 2.8 Ontwerp regeling systeem

De stand van de kleppen is afhankelijk van de status van het systeem. Deze status volgt door gebruik te maken van het flowschema in Figuur 2.5. De beslissing of het systeem gaat laden of ontladen hangt af van een aantal factoren: de huidige warmtevraag, het huidige opslagniveau van de buffer en het tijdstip (Tabel 9.5 en Tabel 9.6, bijlage 8). Aangezien de buffer niet verliesvrij is, is er een optimum voor energiebesparing en financiële besparing. Om deze reden doet het model een voorspelling van de toekomstige warmtevraag en -aanbod. Hieruit kan de benodigde capaciteit voor ontladen worden berekend (bijlage 9). Alleen indien er een tekort wordt voorspeld aan opslagcapaciteit wordt de buffer geladen. Afhankelijk van het type installatie (warmtepomp, WKK, warmtenet, zonnecollector), de capaciteit van de warmteafgifte

en de benodigde capaciteit voor ontladen wordt de buffer tot een bepaald temperatuurniveau geladen.



Figuur 2.5 Flowschema voor verandering status systeem

### 2.8.1 Regelbaarheid warmtevraag

Voor het gekozen ontwerp van de installatie is het slechts mogelijk bij één temperatuur van de waterzak zowel het gewenste vermogen te laden of te ontladen als te voldoen aan de warmtevraag. Om de regelbaarheid te vergroten zijn een aantal oplossingen mogelijk. Ten eerste is gekozen om over het warmteafgiftesysteem fictief kort te sluiten met de hulp van een mengklep. Fictief aangezien het voor de testopstelling niet zinvol is een tweede 'bypass' te plaatsen. De fictieve mengklep heeft als doel om het debiet door het warmte-afgiftesysteem te verlagen, zodat bij gelijkblijvende warmtevraag het temperatuurverschil over in- en uitlaat van het warmte-afgiftesysteem toeneemt.

Omdat de warmteafgifte door het vaste debiet niet te regelen valt, is een zinvolle aanvulling een frequentie geregelde pomp in het waterzakstelsel. Hiermee is het mogelijk de warmteopname of warmteafgifte over de warmtewisselaar te beperken. Er is uit praktische overwegingen gekozen om de warmtevraag op te splitsen. In situaties waar het wel mogelijk zou zijn met een geregelde debiet zowel te kunnen (ont)laden als aan de warmtevraag te voldoen, wordt gedurende iedere periode van een uur waarop de warmtevraag zich voordoet de warmtevraag opgesplitst in twee periodes. Voor deze oplossing is gekozen omdat deze manier van aansturen nauwelijks invloed heeft op de energie-inhoud van de waterzak.

## 2.9 De programmatuur/software

Om de testopstelling te kunnen aansturen is een applicatie ontwikkeld die het mogelijk maakt om de kleppen, CV-ketels en pompen aan te sturen met behulp van een datalogger. Temperatuur- en debietwaarden worden eveneens uit de datalogger gelezen. Afhankelijk van de invoer, tijd en de uitgelezen waarden van de datalogger kiest het programma zelf wanneer het

systeem gaat laden/ontladen eventueel in combinatie met een warmtevraag. Naast aansturing en meting kan het programma ook metingen simuleren.

Het programma is gekoppeld aan een spreadsheet (Excel 7.0) waar zich zowel de tijdsafhankelijke invoerwaarden bevinden als de uitvoer naar toe wordt geschreven. In de menu's en in het invoerscherm van het programma kunnen nog een aantal overige instellingen worden ingevoerd.

De belangrijkste tijdsafhankelijke invoerwaarde is de warmtevraag (kW). Bij het gebruik van zonnecollectoren is het zonaanbod ( $W/m^2$ ) nog noodzakelijk om in te voeren. Eventueel kan nog de omgevingstemperatuur ( $^{\circ}C$ ) worden meegenomen.

De lijst met uitvoerwaarden is vrij groot, zodoende worden de belangrijkste uitvoerwaarden tevens grafisch weergegeven. In bijlage 10 (Figuur 9.18) is een printscreen weergegeven van het programma dat ontwikkeld is voor de aansturing en meting van de testinstallatie.

## 2.10 Calibratie meetapparatuur

Alle weerstandthermometers (PT 100) zijn voor levering gekalibreerd op drie calibratiepunten, te weten bij 50, 75 en  $100^{\circ}C$ . De thermometers hebben een tolerantieklasse van 0,3 $^{\circ}C$ .

De debietmeters in de waterzakopstelling zijn volgens de in de handleiding aangegeven procedure gekalibreerd. De meter (Bürkert 8035) kan in een calibratie stand worden gezet waarna men een bekende hoeveelheid vloeistof door de meter laat stromen. Deze wordt in de meter ingevoerd waarna automatisch de K-waarde wordt aangepast en opgeslagen. De meetfout bedraagt 1% bij stroomsnelheden tussen de 1 en 2 m/s zoals deze in het systeem plaatsvinden.

Uit een reeks van metingen bleek dat de waarden van de thermokoppels in het meetcircuit onderling afweken. Uit een meetsessie die gecorrigeerd is voor zowel het warmteverlies als een vertraging in de tijd door de lengte van de leidingen, is het systeem tevens softwarematig gekalibreerd. Hierbij is TI\_01 als referentietemperatuur genomen (. Eveneens is de flowmeter in het CV-systeem op softwarematige wijze gekalibreerd, de verantwoording van deze keuze valt te lezen in de bijlage 11.



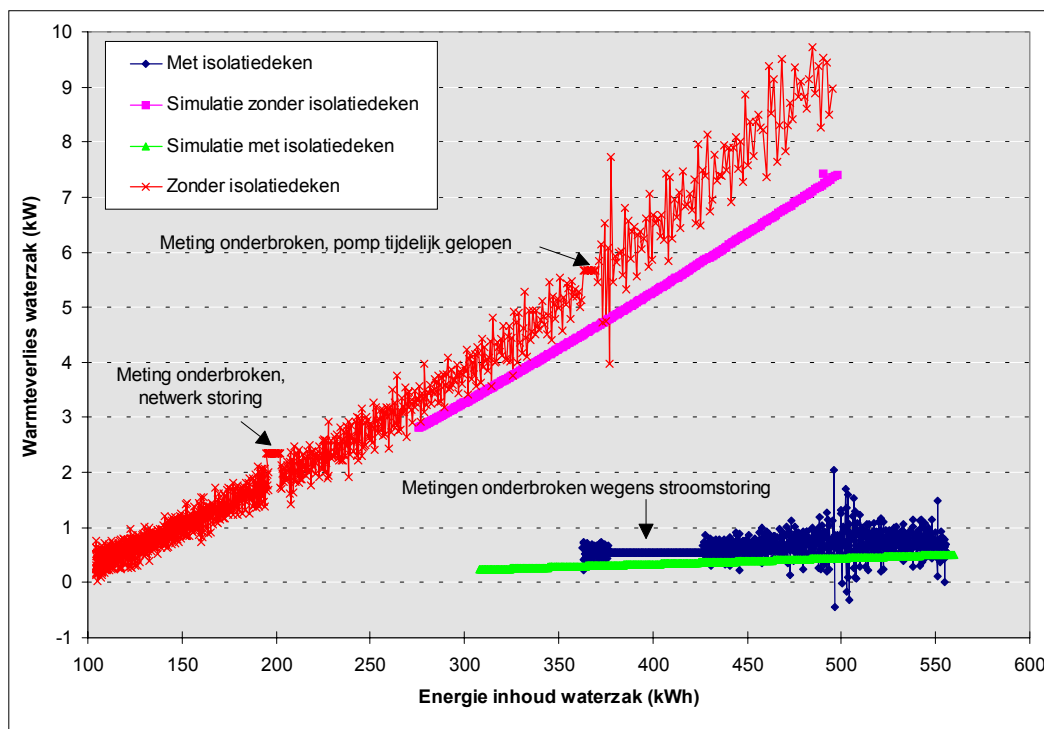


### 3. KARAKTERISERING INSTALLATIE

Voordat de meetcampagnes zijn gestart, is begonnen om het systeem te karakteriseren. De karakteristiek is noodzakelijk om een correcte aansturing van het systeem mogelijk te maken en de simulaties zo realistisch mogelijk uit te voeren. Er zijn metingen verricht naar het warmteverlies van de waterzak, de warmte-overdachtcoëfficiënt van de warmtewisselaar, het laadgedrag van de waterzak (stratificatie), het debiet door het systeem en de afwijkingen ten gevolge van de regeling van het systeem.

#### 3.1 Warmteverlies waterzak

Om het warmteverlies van de waterzak naar de omgeving te meten is de waterzak eerst zonder en vervolgens met een isolatiedeken opgewarmd naar respectievelijk 72 en 80°C. Gedurende een aantal dagen is het temperatuurverloop in de waterzak gemeten (Figuur 9.24 & Figuur 9.25 in bijlage 6) en is het vermogensverlies berekend (Figuur 3.1).



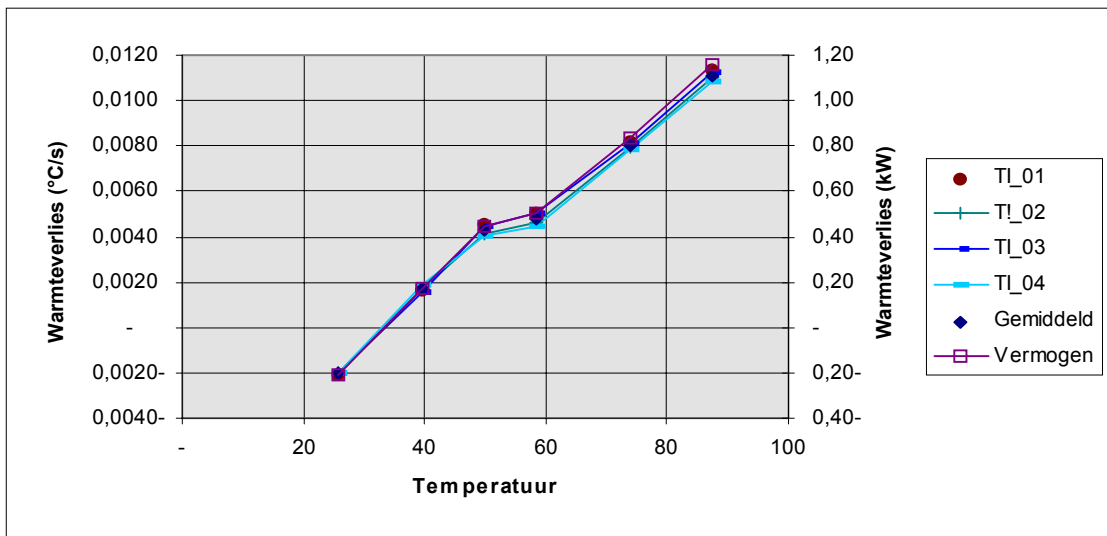
Figuur 3.1 Warmteverlies van de waterzak als functie van de energie-inhoud. Bij de energie-inhoud van de waterzak wordt uitgegaan van de initiële temperatuur van 10°C

Uit Figuur 9.25 (bijlage 6) blijkt dat de afkoeling onder in de zak groter is dan bovenin. De isolatiewaarde van de deken ligt hoger dan van de platen en de warmteafgifte naar de grond is groter dan naar de lucht. Het warmteverlies is in geïsoleerde toestand in theorie (bijlage 6) zo'n 30% lager dan in de praktijk, zonder isolatiedeken bedraagt dit verschil een kleine 20%. Verschillende oorzaken kunnen hieraan ten grondslag liggen. Zo kan de warmtegeleidingscoëfficiënt van de isolatiematerialen in de praktijk hoger liggen dan volgens opgave. Een andere mogelijkheid is dat de omgevingscondities in de kelder afwijken van de waarden in het model.

### 3.2 Overige warmteverliezen

De leidingen tussen de warmtewisselaar en de waterzak zijn allemaal geïsoleerd evenals tussen de warmtewisselaar en de thermokoppels TI-02 en TIC-03 (zie bijlage 1). De verliezen vallen binnen de meetonauwkeurigheid van de thermokoppels.

Het totale warmteverlies over de leidingen is gemeten door bij verschillende temperaturen het CV-systeem te doorstromen zonder warmteoverdracht over de warmtewisselaar, de CV-ketels zijn uitgeschakeld en het warmteafgiftesysteem is kortgesloten. In Figuur 3.2 is het warmteverlies weergegeven. Het vermogen is een schatting aangezien er eveneens een schatting is gemaakt van het doorstromende volume van het CV-systeem.



Figuur 3.2 *Gemeten warmteverlies CV-systeem. Bij berekening van het vermogen is uitgegaan van een doorstroomde inhoud van het leidingsysteem van 25 liter (excl. inhoud warmteafgiftesysteem, expansievat)*

Voor de leidingen kan de geschatte waarde van het leidingverlies gecontroleerd worden door het warmteverlies te berekenen met als basis een praktijkwaarde voor de warmte-overdracht. Voor een ongeïsoleerde buis wordt deze genomen op  $10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Voor een buisdiameter van 1 inch met een temperatuur van  $70^\circ\text{C}$  en een omgevingstemperatuur van  $20^\circ\text{C}$  volgt een warmteverlies van  $44 \text{ W/m}$ . Gebruikmakend van de geschatte vermogen uit Figuur 3.2 levert een ongeïsoleerde leidinglengte van 18 meter op. Deze lengte komt goed overeen met de werkelijke lengte van de installatie.

### 3.3 Warmteoverdrachtscoëfficiënt warmtewisselaar

Bij bestelling van de warmtewisselaar is uitgegaan van één specifieke bedrijfstoestand. Verder is hier bij de offerte uitgegaan dat glycol aan het CV-systeem zou worden toegevoegd. In verband met de oplevering van de installatie na de vorst periode is hier tot het najaar van 1998 van afgezien.

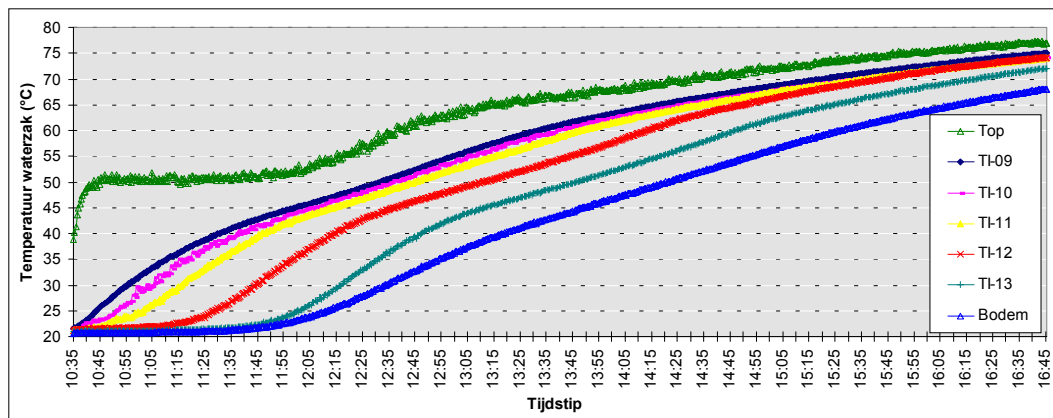
Tabel 3.1 *Waarden volgens opgave leverancier warmtewisselaar*

Debiet CV-systeem	1,15	l/s
Debiet waterzakstelsysteem	1,20	l/s
UA-schoon	4201	$\text{W/m}^2 \text{ K}$

Om de warmte-overdrachtscoëfficiënt van de warmtewisselaar te bepalen als functie van het doorstroomde debiet is voor zowel laden als ontladen het debiet gevarieerd en steeds het thermisch vermogen en de in- en uitgaande temperaturen van de warmtewisselaar gemeten/berekend. Uit de metingen (zie Figuur 9.26 en Figuur 9.27 in bijlage 16) blijkt dat de maximum  $UA^2$  overeenkomt met de opgegeven waarde. Het debiet heeft een zeer sterke invloed op de warmte-overdrachtscoëfficiënt.

### 3.4 Laadgedrag waterzak

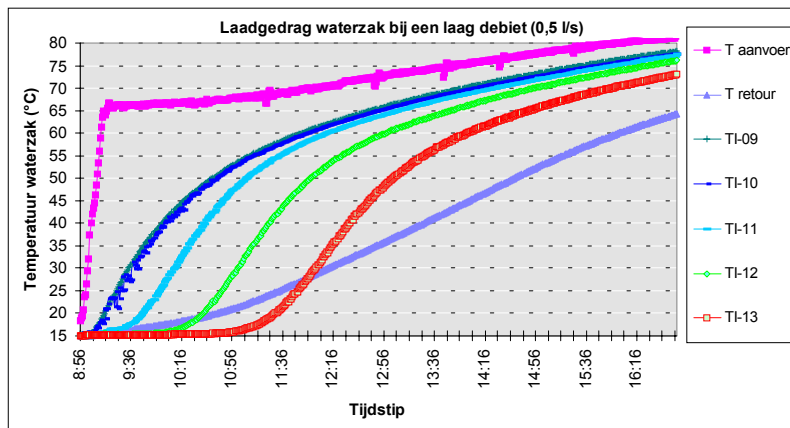
Voor de opbouw van stratificatie is het temperatuurverschil van het medium tussen het laden en onttrekken van de buffer van belang. Uit Figuur 3.3 blijkt dat de starttemperatuur in de gehele waterzak gelijk was. Tijdens het laden is in de warmtewisselaar het onttrokken water  $\pm 30^\circ\text{C}$  opgewarmd. Deze stijging in temperatuur hangt mede af van het debiet en het aangeboden vermogen. Na verloop van tijd is de het gehele volume van de waterzak doorstroomd en gaat ook onder in de waterzak de temperatuur omhoog. Op den duur neemt het thermisch vermogen af doordat het gemiddelde temperatuurverschil over de warmtewisselaar afneemt. Het temperatuurverschil tussen top en bodem neemt af tot onder de  $10^\circ\text{C}$ . Evenredig neemt over de tijd de gelaagdheid af.



Figuur 3.3 *Laden van waterzak met isolatie op 23 april 1998. Fl-02 =  $\pm 0,8$  l/s; Fl-01 =  $\pm 1,15$  l/s*

Bij een lager debiet, maar bij een gelijk vermogen, is het temperatuurverschil nog beduidend groter (Figuur 3.4). Ook valt op dat de eerste paar uur de retour temperatuur hoger ligt dan van het onderste thermokoppel in de waterzak. Dit valt alleen te verklaren als er toch enige ‘kortsluiting’ optreedt. Dus bij een lager debiet is de sproeileiding, die voor een hoger debiet ontworpen is, niet optimaal. De horizontale temperatuurverdeling over de waterzak is dan niet meer gelijkmatig.

<sup>2</sup>  $UA$  is het product van de warmteoverdrachtscoëfficiënt en het warmtewisselende oppervlak. Het is een maat voor de prestatie van warmtewisselaars.



Figuur 3.4 *Laden van waterzak met isolatie op 21 december 1998.*  
*Fl-02 = ± 0,47 l/s; Fl-01 = ± 1,15 l/s*

## 4. RESULTATEN SIMULATIES

### 4.1 Opzet model

Met de programmatuur die is ontwikkeld voor de aansturing van het systeem is het ook mogelijk simulaties uit te voeren. De regeling van het model is vergelijkbaar met de regeling van de werkelijke testinstallatie. Voor de waarden van het debiet wordt gebruik gemaakt van resultaten van de metingen zoals vermeld in bijlage 17. Het debiet is afhankelijk van de stand van de kleppen. Het debiet in het waterzakstelsel is verder afhankelijk van de instelling van de pomp.

Voor het warmteverlies in de waterzak is bij de eerste berekeningen gebruik gemaakt van het theoretische model zoals beschreven in bijlage 6. Aangezien dit model zo'n 30% afwijkt van de werkelijke waarde, is in de resterende simulaties gebruik gemaakt van de meetwaarden voor het stationaire warmteverlies als functie van de temperatuur van de waterzak.

Het stratificatiegedrag in de waterzak kan worden bepaald door de waterzak in een vijftal segmenten op te delen. In elk segment wordt ideale menging verondersteld. Gerelateerd aan het debiet door de waterzak schuift steeds een pakketje van een bepaalde temperatuur van het ene naar het andere segment. Voor laden van de waterzak wordt er warmte boven in de waterzak toegevoerd, bij ontladen wordt onder in de waterzak koude gepompt. Samen met het berekende warmteverlies zijn de waarden van de thermokoppelboom nu te bepalen.

Het door de warmtewisselaar overgedragen vermogen is een functie van het debiet en de ingaande temperaturen (zie bijlage 7 en 16). Het vermogen van het warmteafgiftesysteem wordt opgelegd door de invoer. Het vermogen van de CV-ketels volgt uit de sommatie van het vermogen van de warmtewisselaar en het warmteafgiftesysteem. De waarden voor de overige thermokoppels kunnen nu bepaald worden indien de stand van de kleppen bekend is.

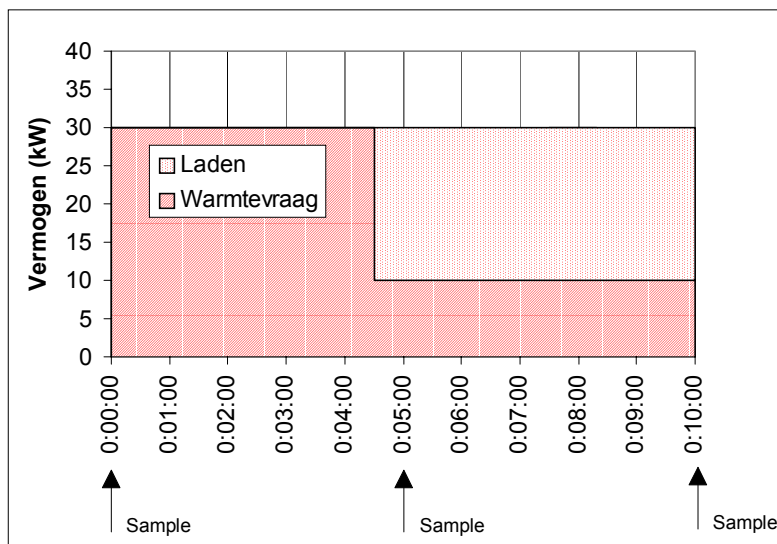
### 4.2 Invloed sampletijd

Om de rekentijd en het aantal meetwaarden dat tijdens de simulaties naar een bestand wordt weggeschreven enigszins te beperken is gekozen voor een sampletijd van 5 minuten. Deze sampletijd levert in een meetcampagne van een week een datatabel op ruim 2000 rijen bij 40 kolommen. Achteraf gezien heeft deze keuze relatief veel invloed op de hoogte van het berekende warmteverlies. De oorzaak hiervan is dat de sampletijd veelal niet samenvalt met het tijdstip waarop de warmtevraag wordt opgesplitst. Het gevolg is dat een groter aandeel aan het laden van de waterzak en een kleiner aandeel aan de warmtevraag wordt toegewezen (Figuur 4.1). Voor ontladen wordt een kleiner gedeelte toegewezen aan het ontladen van de waterzak en een groter aandeel aan de CV-ketel (Figuur 4.2).

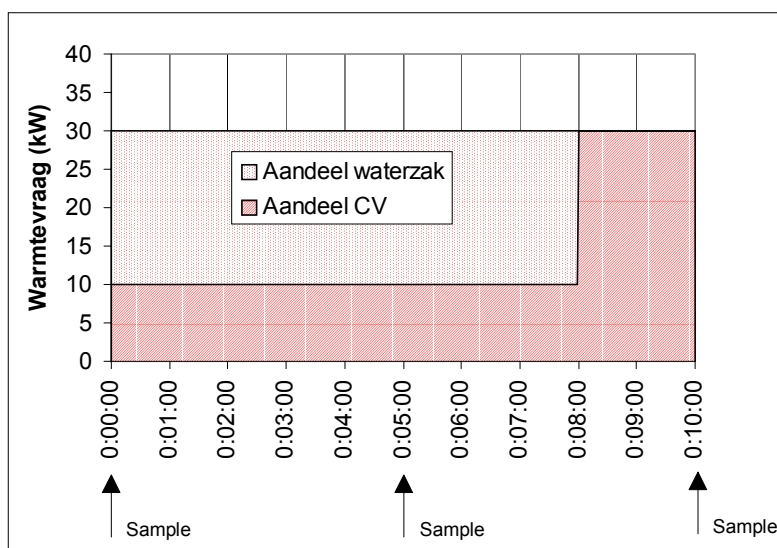
Aangezien het totale warmteverlies van een meting gelijk is aan:

$$\text{Warmteverlies} = \text{Laden} - \text{Ontladen} - \text{Toename energieinhoud waterzak}$$

heeft het warmteverlies een hogere waarde bij een hogere sampletijd dan bij een oneindig kleine sampletijd.



Figuur 4.1 *Invloed sampletijd op simulaties. Als tijdens het laden bij een sampletijd van 5 minuten een splitsing van de warmtevraag optreedt na  $\pm 4\frac{1}{2}$  minuten, heeft dit als gevolg dat voor bovenstaande periode er schijnbaar 3,3 kWh geladen wordt in plaats van 1,8 kWh in werkelijkheid*



Figuur 4.2 *Invloed sampletijd op simulaties. Als tijdens het ontladen bij een sampletijd van 5 minuten een splitsing van de warmtevraag optreedt na  $\pm 8$  minuten, heeft dit als gevolg dat voor bovenstaande periode er schijnbaar 1,7 kWh ontladen wordt in plaats van 2,7 kWh in werkelijkheid*

Om bovengenoemde problemen in te schatten zijn enkele simulaties opnieuw uitgevoerd met een sampletijd van 50 seconden (zie bijlage 21-25). Uit deze metingen volgt dat indien de sampletijd kleiner wordt genomen, het warmteverlies vrijwel overeenkomt met de waarden die volgden uit het stationaire warmteverlies. Ook de waarden voor de warmtevraag en het afgegeven vermogen aan het warmteafgiftesysteem komen vrijwel overeen met de theoretische waarde.

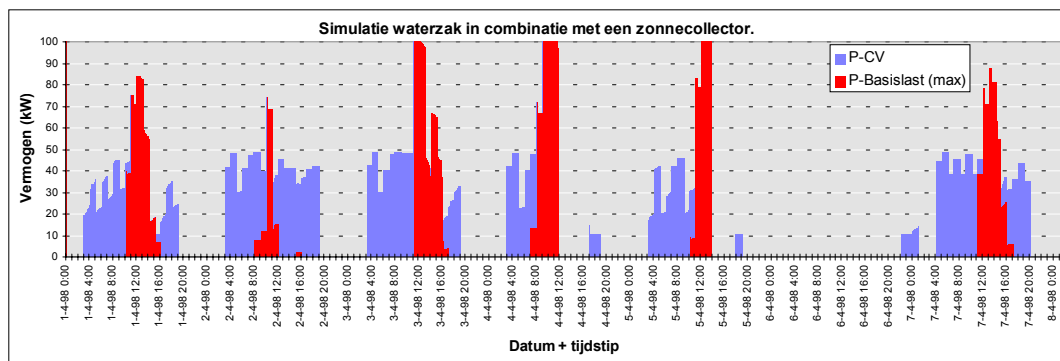
### 4.3 Invloed buffer op installatie met zonnecollector

Het aanbod van warmte door de zonnecollector loopt in veel gevallen uit fase met de warmtevraag. Daardoor is het gebruik van een warmtebuffer noodzakelijk. In het gebruikte warmtevraagpatroon neemt de warmtevraag gedurende zonnige perioden echter nauwelijks af. Desondanks heeft de waterzak ook hier een duidelijk gunstige invloed op de installatie.

Vermogen warmtevraag (kW)	Warmteafgiftesysteem afgestemd op temperatuur (°C):	Vermogen installatie (kW)	Temperatuurbereik installatie (°C)	Collectoroppervlak (m <sup>2</sup> )	Periode
50	40-50	Nvt.	30-90	200	Begin april

In de simulaties wordt uitgegaan van bovenstaande tabel genoemde randvoorwaarden. Door het toevoegen van een buffer aan de zonnecollectors neemt de benutting sterk toe van  $\pm 50$  naar ruim 90%. In Figuur 4.3 is duidelijk zichtbaar dat in perioden van zonaanbod een groot vermogen aan de zonnecollector onttrokken kan worden. Aangezien dit vermogen boven de waarde van de warmtevraag ligt, kan nog een aanzienlijk vermogen geladen worden.

Belangrijk voordeel is echter ook het feit dat perioden met een lage warmtevraag zonder zonaanbod overbrugd kunnen worden zonder dat de CV-ketel ingeschakeld hoeft te worden. Dit is met name gunstig voor installaties met een hoog minimaal vermogen. Het aantal starts – stops van de CV-installatie neemt dan sterk af. Ongeveer 15% van de warmtevraag in de referentieweek wordt onttrokken uit de buffer (zie Tabel 4.1). Het verschil tussen de minimum en maximum temperatuur in de waterzak bedraagt over de week gezien ruim 30°C.



Figuur 4.3 *Vermogen ketel onderverdeeld in basislast (zonnecollector) en pieklast (simulatie)*

Het rendement van de zonnecollector neemt echter kunstmatig af door het gemiddeld hogere temperatuurniveau van de aanvoertemperatuur van de collector. Het gemiddelde temperatuurniveau ligt hoger door het opsplitsen van de warmtevraag. Door van een langere periode met een lage warmtevraag naar een kortere periode met een hogere warmtevraag te transformeren is een hoger temperatuurniveau nodig om het gewenste vermogen te kunnen leveren.

Tabel 4.1 *Samenvatting van resultaten simulaties zonnecollector. Percentages zijn tenzij anders aangegeven als percentage van de warmtevraag (3935 kWh). Sampletijd = 50 seconden*

	Geen opslag	Simulatie Nieuwe versie
<b>Max. aanbod zonnecollector</b>	57,5 %	41,4 %
<b>Benutting zonnecollector</b>	28,5 %	37,9 %
- als % van aanbod	49,5 %	91,5 %
<b>Door CV geleverde energie</b>		
- $P_{\text{minimaal}}=0$ kW	71,2 %	57,4 %
<b>Geladen</b>	0 %	14,7 %
<b>Ontladen</b>	0 %	16,8 %
<b>Netto opwarming</b>	0 %	-4,0 %
<b>Warmteverlies</b>	0 %	1,9 %

Voor een volledig overzicht van de simulatieresultaten wordt verwezen naar bijlage 21.

#### 4.4 Invloed buffer op installatie met warmtepomp

Het gebruik van een thermische energie buffer in combinatie met een warmtepomp heeft een drietal functies:

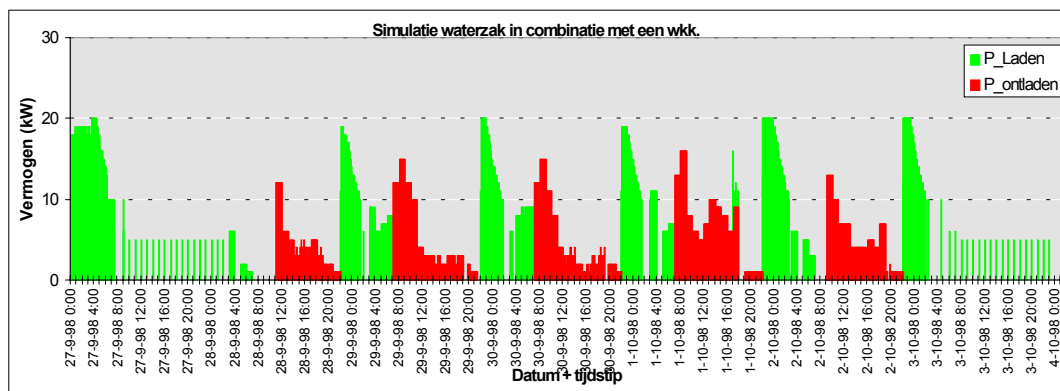
1. Benutting elektriciteit tegen daltarief te verhogen;
2. Pieken in warmtevraag op te vangen;
3. Periodes waar de warmtevraag lager ligt dan de minimum capaciteit van installatie op te vangen;
4. Aantal starts – stops van de installatie te beperken.

Vermogen warmtevraag (kW)	Warmteafgiftesysteem afgestemd op temperatuur (°C):	Vermogen basislast (kW)	Temperatuurbereik installatie (°C)	Periode
30	40-50	Max: 20 Min: 10	35-50	Eind september – begin oktober

Belangrijk kenmerk van een installatie met een warmtepomp is het lage temperatuurniveau waarop de warmte wordt aangeboden. Het gevolg is dat maar met een klein temperatuurverschil de warmte kan worden opgeslagen in de waterzak. Door de noodzaak van een warmtewisselaar in het systeem wordt het bereik nog met een paar graden verder beperkt. De schommeling in temperatuur in de waterzak ligt in de orde van 10°C.

Uit Figuur 4.4 blijkt duidelijk dat het goed mogelijk is om in perioden van daltarief warmte op te slaan in de buffer. Op werkdagen wordt de warmte weer onttrokken. Zowel het laad- als het ontladvermogen nemen echter relatief snel af. De opslagcapaciteit van de buffer is niet voldoende. Deze valt te vergroten door het opslagvolume te vergroten of gebruik te maken van Fase Transformatie Materialen (zie hoofdstuk 7). Met FTM's is het mogelijk het laad- en ontladvermogen constant te houden.





Figuur 4.4 Vermogen laden en ontladen waterzak (simulatie)

Uit de metingen van een representatieve week in het najaar blijkt dat ruim 35% van de warmtevraag wordt onttrokken uit de waterzak. Het aandeel van de CV-ketel daalt van  $\pm 37$  naar  $\pm 1\%$  van de totale warmtevraag. De warmtepomp neemt vrijwel de volledige warmtevraag voor haar rekening (Tabel 4.2).

Het aandeel warmte geproduceerd in de periode van daltarief stijgt sterk. Wordt zonder opslag de helft van de warmte geleverd door de warmtepomp gedurende daltarief, met een buffer stijgt deze waarde naar ruim 90%. Hier staat wel een verlies van warmte tegenover. Het gemiddelde stationaire warmteverlies bedraagt  $\pm 0,40$  kW, ongeveer een kleine 8% van de warmtevraag.

Tabel 4.2 Samenvatting van resultaten metingen en simulaties warmtepomp. Percentages zijn tenzij anders aangegeven als percentage van de warmtevraag (877 kWh)

Warmte inhoud (kWh)	Geen opslag	Simulatie
<b>Max. aanbod warmtepomp</b>	383 %	383 %
<b>Benutting warmtepomp</b>		
- Daltarief	30 %	95,7%
- Piek tarief	31 %	16,3 %
- Totaal	61 %	111,9 %
- Totaal als % van aanbod	15,8 %	29,2 %
<b>Door CV geleverde energie</b>	37 %	1,5 %
<b>Geladen</b>	0 %	61,3 %
<b>Ontladen</b>	0 %	40,1 %
<b>Netto opwarming</b>	0 %	13,0 %
<b>Warmteverlies</b>	0 %	8,2 %

Voor een volledig overzicht van de simulatieresultaten wordt verwezen naar bijlage 22.

#### 4.5 Invloed buffer op installatie met WKK

Warmtekracht installaties vormen een belangrijke toepassing van warmteopslag. Het plaatsen van een warmteopslagsysteem in combinatie met een WKK heeft een aantal redenen:

1. De installatiekosten van een WKK liggen vele malen hoger dan van een CV-systeem. Om deze investeringskosten terug te verdienen dient een zo hoog mogelijk aandeel van de warmtevraag te worden opgevangen door de WKK. Dit kan alleen indien de WKK installatie wordt gedimensioneerd op basislast. Om de piekvraag op te vangen is een buffer noodzakelijk.
2. Om gedurende de warmtevraag lager dan de minimum capaciteit van de WKK de WKK te benutten kan met het gebruik van een buffer het aantal starts - stops beperkt worden.

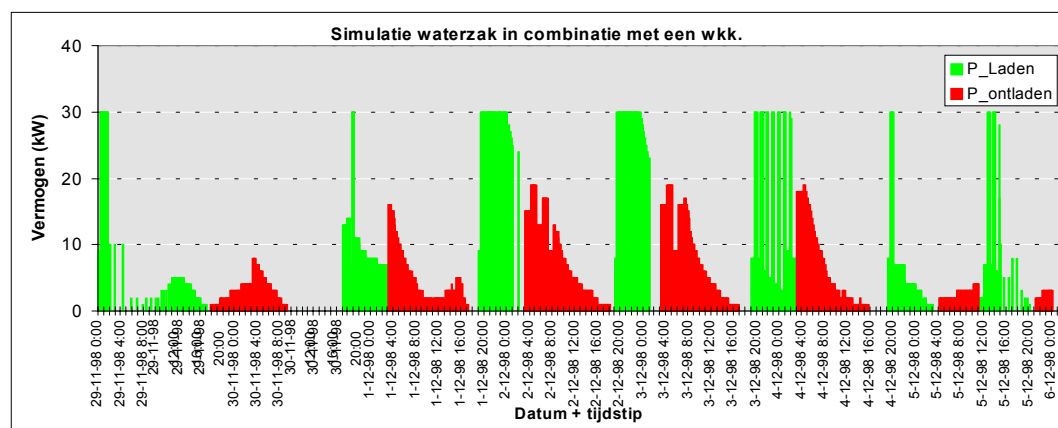
3. Regeling WKK kan ontkoppeld worden van warmtevraag zodat WKK geregeld kan worden op de elektriciteitsvraag. Dit voordeel is echter in de simulaties en metingen buiten beschouwing gelaten.
4. Ontkoppeling van de warmtevraag maakt het ook mogelijk het WKK systeem te laten draaien op het meest gunstige rendement.

Om deze redenen is hier in het meetprogramma meer aandacht aan besteed door een tweetal meetsessies uit te voeren met een tweetal temperatuurniveaus en een afwijkend debiet in het waterzakstelsel. De benutting van de WKK kan worden vergroot door ook warmte van de WKK te kunnen leveren tijdens piekvraag en in periodes waar de warmtevraag lager ligt dan de minimum capaciteit van installatie. Er wordt niet geregeld op tariefverschillen in de terugleververgoeding van de geproduceerde elektriciteit. Met tariefverschillen zal er een vergelijkbare situatie optreden als bij de warmtepomp.

Vermogen warmtevraag (kW)	Warmteafgiftesysteem afgestemd op temperatuur (°C):	Vermogen basislast (kW)	Temperatuurbereik installatie (°C)	Periode
50	70-90	Max: 30 Min: 10	Max. 90	Eind november – begin december

Uit Figuur 4.5 blijkt dat op momenten dat de warmtevraag hoger ligt dan het vermogen van de WKK de buffer ontladen wordt. Door het hoge temperatuurniveau waarop zich de warmtevraag op dat moment voordoet, is het alleen de eerste ogenblikken mogelijk de piekvraag op te vangen. Al snel is het temperatuurniveau van de waterzak dermate gedaald dat de CV-ketel noodzakelijk is om aan de volledige warmtevraag te voldoen. Deze daling in temperatuur kan sterk worden beperkt door FTM's toe te passen. De waterzak varieert in temperatuur van  $\pm 65$  tot  $\pm 78^\circ\text{C}$ .

Naast het voldoen aan de warmtevraag is voor het laden van de waterzak in deze periode van het jaar niet altijd voldoende vermogen van de WKK beschikbaar. Aangezien de regeling het opvangen van piekvraag een hogere prioriteit geeft dan het benutten van de buffer op momenten dat de warmtevraag kleiner is dan de minimum capaciteit van de WKK-installatie, is het in deze referentie week in z'n geheel niet mogelijk om de waterzak te gebruiken voor het opvangen van minimum warmtevraag.



Figuur 4.5 Vermogen laden en ontladen waterzak (simulatie)

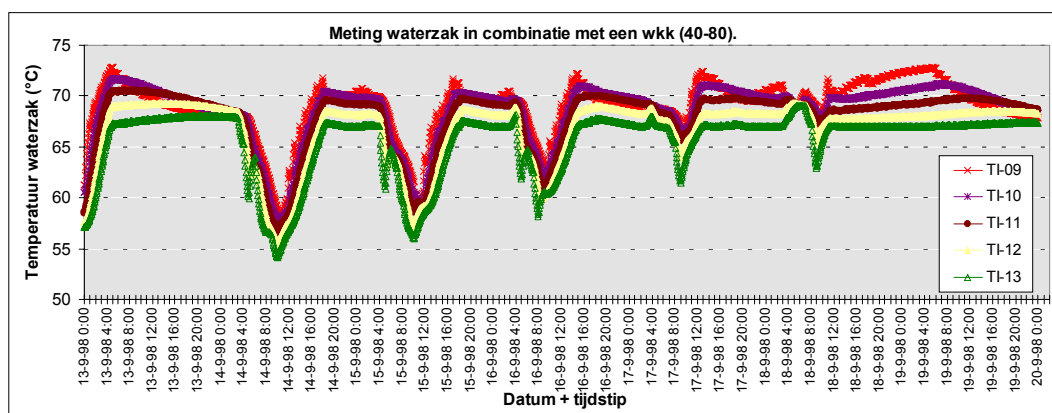
Door het gemiddeld hoge temperatuurniveau waarop zich de buffer bevindt, gaat  $\pm 20\%$  van de geladen warmte in de buffer verloren. De benutting van de WKK (aandeel van het vollastvermogen) stijgt van zo'n 81% naar  $\pm 93\%$ . Het aandeel van de WKK in de totale warmtevraag stijgt van 71 naar  $\pm 82\%$ . Het aandeel van de CV-ketel daalt minder door de warmteverliezen die optreden in de waterzak (Tabel 4.3).

Tabel 4.3 *Samenvatting van resultaten simulaties WKK (70-90). Percentages zijn tenzij anders vermeld aangegeven als percentage van de warmtevraag (5.741 kWh)*

Warmte inhoud (kWh)	Geen opslag	Simulatie
Max. aanbod WKK	87,8 %	87,9 %
Benutting WKK	71 %	81,4 %
- Als % van aanbod	80,8 %	92,6 %
Door CV geleverde energie	29 %	18,6 %
Geladen	0 %	8,0 %
Ontladen	0 %	5,0 %
Opwarming	0 %	0,9 %
Warmteverlies	0 %	2,1 %

Vermogen warmtevraag (kW)	Warmteafgiftesysteem afgestemd op temperatuur (°C):	Vermogen basislast (kW)	Temperatuurbereik installatie (°C)	Periode
75	40-80	Max: 50 Min: 15	Max. 80	Half september

Om met een groter temperatuurverschil de buffer te kunnen laden/ontladen is een lager debiet noodzakelijk. De verwachting was dat een lager debiet in het waterzak-systeem een hogere geïsoleerdheid in de waterzak als gevolg heeft. In Figuur 4.6 is de bandbreedte van de temperaturen van de thermokoppelboom inderdaad breder dan bij een hoger debiet. Aangezien het maximale laadvermogen beperkt blijft tot 25 kW, worden temperatuurverschillen zoals gemeten in § 3.4 niet gesignaleerd.



Figuur 4.6 *Temperatuurverloop waterzak (simulatie)*

Aangezien de warmtevraag in september beperkter is, ligt de benutting van de WKK ook met buffer laag. De benutting van de WKK, gedefinieerd als het quotiënt van het werkelijke vollastvermogen en het maximale vollastvermogen, stijgt met bijna 50% van 25 naar 36%. Het aandeel van de WKK in de warmtevraag stijgt van 67 naar 106%. Een waarde van boven de 100% houdt in dat de WKK meer warmte leverde dan de warmtevraag. Dit is mogelijk door de netto opwarming van de waterzak en de warmteverliezen die optreden. Het aandeel van de CV-installatie is sterk gereduceerd van ± 33% naar 2% (Tabel 4.4).

Tabel 4.4 *Samenvatting van resultaten simulaties WKK (40-80). Percentages zijn tenzij anders vermeld aangegeven als percentage van de warmtevraag (2.475 kWh)*

Warmte inhoud (kWh)	Geen opslag	Simulatie
---------------------	-------------	-----------

<b>Max. aanbod WKK</b>	272 %	271,6 %
<b>Benutting WKK</b>	67,2 %	106,4 %
- als % van aanbod	24,8 %	39,2 %
<b>Door CV geleverde energie</b>	32,8 %	1,7 %
<b>Geladen</b>	0 %	20,4 %
<b>Ontladen</b>	0 %	11,5 %
<b>Opwarming</b>	0 %	3,7 %
<b>Warmteverlies</b>	0 %	5,2 %

Voor een volledig overzicht van de simulatieresultaten wordt verwezen naar bijlage 23 en 24.

#### 4.6 Invloed buffer op installatie met warmtenet

Dimensionering van een warmtenet voor huishoudens en utiliteitsbouw vindt nu veelal plaats op basis van de maximale warmtevraag die zich voordoet. Om de benutting van een warmtenet te vergroten, cq. het aantal aansluitingen op een bestaand warmtenet uit te breiden is het nodig pieken in de warmtevraag op te vangen. Stimulatie van het beperken van pieken in de warmtevraag kan plaatsvinden door het invoeren van een piektarief of de gebruiker te laten betalen voor het maximaal gewenste thermische vermogen van de aansluiting met het warmtenet. Bij het invoeren van een tariefdifferentiatie wordt het zinvol een warmtebuffer te plaatsen bij de eindgebruiker.

In hoofdlijnen komt een warmtenet qua temperatuurniveau overeen met een WKK installatie. Ook de perioden van laden met als doel de piekvraag te kunnen opvangen komt overeen met een WKK in een winterperiode waar nauwelijks sprake is van warmte onttrekken voor minimumlast. Het belangrijkste verschil is dan ook van prijstechnische aard. Daarom zijn voor het warmtenet geen aanvullende metingen verricht maar zijn wel simulaties verricht over een langere periode.

Vermogen warmtevraag (kW)	Warmteafgiftesysteem afgestemd op temperatuur (°C):	Vermogen (kW)	Temperatuurbereik installatie (°C)	Periode
75	60-80	Max: 75 Piektarief grens: 50	Max. 80	16 september – 24 april

Aangezien in de zomerperiode nauwelijks of geen piekvraag voorkomt, is het niet zinvol om in deze periode van het jaar warmte op te slaan. De warmteverliezen die optreden wegen niet op tegen de economische voordelen. Voor de periode bestaande uit het najaar, de winter en het vroege voorjaar is een simulatie uitgevoerd en zijn de gegevens geanalyseerd.

Uit de simulaties volgt dat er maar een beperkt lagere piekvraag van warmte voordoet. Het aandeel van het piektarief in de warmtevraag daalt beperkt van 19,3 naar 16,3% (Tabel 4.5). Hier staat wel een extra warmteverlies van 2,2% van de warmtevraag tegenover. Deze beperkte daling is mede te wijten aan het zeer afgevlakte warmtevraagmodel van het referentie gebouw. Aangezien in de winterperiode de maximale warmtevraag zich over een aantal uren voordoet, kan in feite niet worden gesproken over een echte piekvraag. Pieken in de warmtevraag van een beperkte tijd zijn beter op te vangen dan de 'pieken' van enige uren.

Het onevenwichtig warmtevraagpatroon met een zeer groot aandeel van vermogens tussen de 70 en 75 kW heeft ook een negatieve invloed op het temperatuurniveau. Deze maximale warmtevraag komt overeen met een zeer hoog temperatuurniveau. Het gevolg van dit hoge temperatuurniveau is dat zelfs de temperatuur van de retourstroom van het warmteafgiftesysteem reeds dermate hoog ligt dat er nog nauwelijks warmte uit de waterzak kan worden onttrokken. Het

gewenste hoge temperatuurniveau van de buffer heeft ook een relatief hoog aandeel warmteverlies ten opzichte van hoeveelheid onttrokken uit buffer als gevolg.

Om een buffer in combinatie met een warmtenet beter te benutten is het noodzakelijk het laden van de buffer te ontkoppelen van de warmtevraag. Door de serie schakeling van de warmtewisselaar voor het laden van de waterzak en het warmteafgiftesysteem is ontkoppeling van het temperatuurniveau niet mogelijk. Dit is wel noodzakelijk om de buffer tot een hoog temperatuurniveau te laden.

Een andere optie die tot verbetering kan leiden is een lage temperatuur verwarmingssysteem toe te passen zodat de verschillen tussen de temperatuur van laden en warmtevraag meer in overeenstemming zijn.

Tabel 4.5 *Samenvatting van resultaten simulaties warmtenet. Percentages zijn tenzij anders vermeld aangegeven als percentage van de warmtevraag (214.206 kWh)*

<b>Warmte inhoud (kWh)</b>	<b>Geen opslag</b>	<b>Simulatie met opslag</b>
<b>Max. aanbod basislast warmtenet</b>	123,8 %	123,8 %
<b>Benutting basislast warmtenet</b>	80,7 %	84,7 %
<b>- als % van aanbod</b>	65,2 %	68,4 %
<b>Pieklast warmtenet</b>	19,3 %	16,3 %
<b>Geladen</b>	0 %	5,2 %
<b>Ontladen</b>	0 %	3,0 %
<b>Opwarming</b>	0 %	0,0 %
<b>Warmteverlies</b>	0 %	2,2 %

Voor een volledig overzicht van de simulatieresultaten wordt verwezen naar bijlage 25.



## 5. RESULTATEN METINGEN

### 5.1 Opzet metingen

Naast de modelberekeningen is het belangrijk om ervaring op te doen met het gebruik van de waterzak in een situatie die dicht bij het gebruik in de praktijk ligt. Gekozen is om voor een aantal verschillende installaties (zonnecollector, warmtepomp en WKK) waarmee een warmtebuffer gecombineerd kan worden met een opgelegd gedrag met de testopstelling meetcampagnes uit te voeren. Deze testen vinden plaats door een warmtevraag op te leggen. Bij elke installatie hoort een specifiek warmtewisselend oppervlak (radiatoroppervlak) overeenkomstig met het temperatuurniveau waarop de installatie wordt bedreven. Afhankelijk van het debiet door het warmteafgiftesysteem ligt de aanvoer- en retourtemperatuur van het warmtevraag vast.

De meetsessies beslaan steeds een week aangezien hiermee een representatieve periode kan worden bekeken met zowel dag/nacht en werkweek/weekend effecten. De resultaten van de metingen staan per installatie beschreven in bijlage 21 tot en met bijlage 25. Vooraf gaand aan de resultaten wordt in de bijlagen aangegeven voor welk weekpatroon van de warmtevraag is gekozen. Een week is niet representatief voor het gehele jaar, maar geeft wel een indicatie of het gebruik van een buffer onder de genoemde voorwaarden wel of niet zinvol is.

### 5.2 Invloed hoge sampletijd op metingen

In verband met de hoeveelheid te verwerken data is voor een sampletijd van 5 minuten gekozen. Deze lange sampletijd heeft op de metingen een belangrijke invloed. Naast de invloed die het reeds had op de simulaties, wordt de afwijking voor metingen verder bepaald doordat de regeling van de CV-ketel (modulerend karakter) en de regeling van de mengklep traag zijn. De snelheid waarmee ontladen kan worden ligt een factor hoger en heeft zodoende minder invloed.

Gevolgen:

- Er wordt een hogere waarde voor het laadvermogen gemeten dan in werkelijkheid gerealiseerd kan worden;
- De waarde van ontladen komt redelijk overeen met de werkelijke waarde aangezien de waterzak zeer snel zijn warmte kan leveren;
- Uit de berekeningen en de testen komt daarom een veel hoger warmteverlies naar voren dan in werkelijkheid.

Om het effect van de sampletijd te controleren is voor gelijke omstandigheden een simulatie en een meting uitgevoerd met een hogere sampletijd (om de 50 seconden in plaats van om de 5 minuten). Vergelijking van de simulaties leert dat het meten van de warmtevraag met een kleine sampletijd nauwkeuriger wordt (zie § 4.2). Het gevolg is dat het warmteverlies afneemt. Vergelijkingen van de metingen leert dat zoals was te verwachten nu ook het modulerende karakter van de ketel nauwkeuriger wordt gemeten. De gemeten waarde voor het warmteverlies neemt af van 2,4 naar 1,0 kW. In geval van ideale meetapparatuur met een oneindig hoge samplefrequentie kan berekend worden dat het warmteverlies in werkelijkheid rond de 0,8 kW ligt. Deze waarde komt goed overeen met het stationaire warmteverlies van 0,76 kW bij een temperatuur van 70°C.

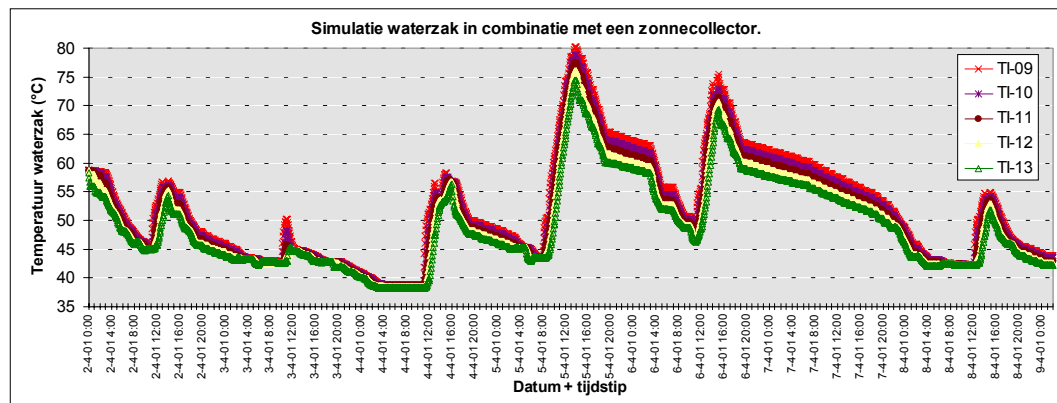
De sampletijd heeft nauwelijks tot geen invloed gehad op de software matige calibratie van het systeem (zie § 2.10) aangezien deze metingen hebben plaatsgevonden met een sampletijd van 10 seconden en onder constante ketelwatertemperaturen.

### 5.3 Vergelijking resultaten simulaties en metingen

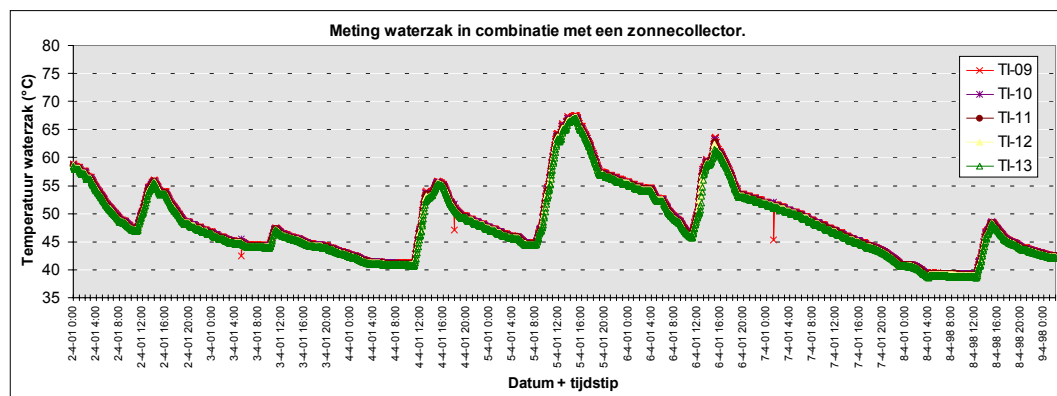
Van alle metingen zijn eveneens simulaties uitgevoerd. In hoofdlijnen komen de simulaties goed overeen met de werkelijkheid. Het patroon van de warmtevraag dat wordt opgelegd komt goed overeen met het vermogen van het warmteafgiftesysteem. Het temperatuurverloop van de waterzak tijdens de simulaties is goed gelijkend met het patroon van de metingen. De momenten en de vermogens van laden en ontladen van de waterzak vertoont een zeer grote overlap tussen metingen en simulaties. Om vergelijking van de metingen met de resultaten goed mogelijk te maken is in de bijlagen 21 tot en met 24 een groot aantal figuren weergegeven waar steeds de resultaten van simulaties en metingen bij elkaar zijn geplaatst.

Incidentele verschillen worden behandeld in de beschrijving van de metingen in de bijlagen. Structurele verschillen tussen meet- en simulatiewaarden die optreden zijn:

1. Vergelikt men het **stratificatiegedrag**, dan wordt in werkelijkheid een minder gelaagd temperatuurprofiel gemeten dan tijdens de simulaties (vergelijk Figuur 5.1 met Figuur 5.2). Alleen gedurende de meting met een WKK installatie met een laag debiet in het waterzak-systeem is een paar graden temperatuur stratificatie zichtbaar. Doordat het systeem in principe was ontworpen voor een warmtevraag van maximaal 100 kW maar tijdens de metingen slechts gebruikt wordt voor vermogens tussen de 30 en 75 kW is over het algemeen de verhouding laadvermogen ten opzichte van het debiet minder gunstig. Het gevolg is dat met slechts enkele graden temperatuurverschil wordt geladen. Een lager debiet heeft momenteel als nadeel dat de warmteoverdracht door de warmtewisselaar eveneens daalt en dat de diffusor niet optimaal werkt..



Figuur 5.1 *Temperatuurverloop waterzak voor een simulatie met een zonnecollector*



Figuur 5.2 *Temperatuurverloop waterzak voor een meting met een zonnecollector*



2. In het model wordt er vanuit gegaan dat de ketel direct zijn volledige hoeveelheid warmte kan leveren. Tijdens de meting moet rekening gehouden worden met een maximale temperatuurstijging van de CV-ketels van 4 °C per minuut (zie bijlage 19). Het duurt tijdens de metingen dus enige minuten voordat het gewenste vermogen wordt bereikt. Het sterk **modulerende gedrag** van de ketel geeft een vertraagde reactie op het blokvormige vraagpatroon waardoor de hoeveelheid warmte die afgegeven kan worden lager is dan de warmtevraag. Dit geldt ook voor de hoeveelheid warmte die geladen kan worden.

Bij de eerste berekeningen is in het model nog uitgegaan van de theoretische waarde van het warmteverlies (zie bijlage 6). Aangezien deze waarde teveel afwijkt van de werkelijkheid, is in het vervolg van de metingen gebruik gemaakt van de waarden van de meting van het stationaire warmteverlies (zie paragraaf 3.1). Het hogere warmteverlies gaat met name ten koste van de hoeveelheid warmte die ontladen kan worden.

De structurele verschillen hebben het minste effect op de warmtepompmetingen en het meeste op de WKK (40-80).

#### 5.4 Invloed buffer op installatie met zonnecollector

Naast een tweetal incidentele afwijkingen tussen simulatie en meting kwamen de resultaten onderling goed overeen. De afwijkingen die tijdens de meting op treden waren goed te kwantificeren en zijn alsnog meegenomen in de meetresultaten. Het vermogen van ontladen lag gedurende een aantal tijdstippen van de meting lager dan in de simulaties was verwacht. De oorzaak hiervan was de gemiddeld iets lagere waterzaktemperatuur doordat er minder geladen kon worden dan gedurende de simulatie.

In Tabel 5.1 worden de resultaten tussen meting en simulatie vergeleken. Hierbij valt op dat de warmteafgifte gedurende de meting lager ligt dan de simulaties. De belangrijkste oorzaak hiervan is het modulerende gedrag van de ketel. Direct gevolg van deze lagere warmteafgifte is de beperktere benutting van het zonaanbod. Het grote verschil in warmteverlies wordt veroorzaakt doordat de simulatie niet is uitgevoerd in de nieuwste versie waarin voor het warmteverlies wordt uitgegaan van de meetresultaten van het stationaire warmteverlies. In de tabel vermelde waarde voor het warmteverlies wordt uitgegaan van het theoretische model van het warmteverlies. Het warmteverlies voor de metingen ligt hoog tengevolge van de hoge sampletijd. Het werkelijke warmteverlies zal met een waarde van  $\pm 0,57$  kW tussen de meet- en simulatiewaarden in liggen.

Tabel 5.1 *Vergelijking van resultaten metingen en simulaties voor een zonnecollector.*  
*Theoretische warmtevraag = 3.935 kWh*

Warmte inhoud (kWh)	Simulatie	Meting <sup>3</sup>
Sampletijd (sec)	300	300
Warmtevraag	3.851	3.849
Warmteafgifte	3.760	3.544
Aanbod zonnecollector	1.799	1.823
Benutting zonnecollector	1.749	1.594
Door CV geleverde energie	1.928	1.974
Geladen	829	805
Ontladen	913	794
Netto opwarming	123-	-135
<b>Warmteverlies</b>		
- Totaal	39	146
- P-gem (kW)	0,23 <sup>4</sup>	0,87 <sup>5</sup>

Voor een volledig overzicht van de meetresultaten wordt verwezen naar bijlage 21.

## 5.5 Buffer in combinatie met een warmtepomp

De meetresultaten komen goed overeen met de simulatiewaarden. Belangrijkste verschil is dat, op het moment dat de waterzak een temperatuur heeft van  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ , de warmtewisselaar in de simulatie een iets hoger vermogen kan laden (20 kW) dan tijdens de meting (16 kW). De warmteoverdrachtcoëfficiënt van de warmtewisselaar ligt in werkelijkheid mogelijk iets lager dan waarmee in het model wordt gerekend. Het gevolg is dat de laadtijd iets toeneemt voordat de waterzak zijn maximale temperatuur heeft bereikt. Gekoppeld aan het lagere vermogen over de warmtewisselaar ligt ook het vermogen van de warmtepomp op deze momenten iets lager.

De warmteafgifte ligt ook bij simulatie van de warmtepomp hoger dan gedurende de meting ten gevolge van het modulerende karakter van de ketel. Hierdoor ligt de totale benutting van de warmtepomp lager. Er is zowel minder ontladen als geladen. Deze zijn sterk aan elkaar gekoppeld. Indien er minder warmte wordt geladen, ligt de temperatuur van de waterzak iets lager. Tengevolge hiervan ligt ook het vermogen dat ontladen kan worden lager. Het werkelijke warmteverlies zal dicht in de buurt liggen bij het stationaire warmteverlies van 0,45 kW. De afwijking met de gemeten waarde is te wijten aan de sampletijd.

<sup>3</sup> Meetwaarden gecorrigeerd voor storing CV-ketel (zie bijlage 21).

<sup>4</sup> Warmteverlies berekend met behulp van theoretisch model

<sup>5</sup> Warmteverlies tijdens meting ligt hoger dan in werkelijkheid tengevolge van invloed sampletijd en modulerend gedrag ketel. Werkelijke warmteverlies ligt in de buurt van 0,57 kW.

Tabel 5.2 *Vergelijking van resultaten metingen en simulaties voor een warmtepomp. Theoretische warmtevraag = 877 kWh*

Warmte inhoud (kWh)	Simulatie	Meting
<b>Sampletijd (sec)</b>	300	300
<b>Warmtevraag</b>	835	842
<b>Warmteafgifte</b>	809	752
<b>Aanbod warmtepomp</b>	3.360	3.362
<b>Benutting warmtepomp</b>		
- Daltarief	839	782
- Piek tarief	143	151
- Totaal	982	932
<b>Door CV geleverde energie</b>	13	28
<b>Geladen</b>	538	483
<b>Ontladen</b>	352	304
<b>Netto opwarming</b>	113	67
<b>Warmteverlies</b>		
- totaal	72 <sup>6</sup>	112
- P-gem (kW)	0,43	0,67 <sup>7</sup>

Voor een volledig overzicht van de meetresultaten wordt verwezen naar bijlage 22.

## 5.6 WKK installatie met warmtebuffer

Terwijl in de simulatie (WKK 70-90) nog gedurende een tweetal nachten een duidelijk temperatuurverschil optreedt tussen de verschillende thermokoppels in de waterzak, blijft dit effect in de meting nog maar beperkt zichtbaar. Stratificatie treedt in werkelijkheid iets minder op dan in het model. Desondanks komt het temperatuurverloop van de meting goed overeen met de meting. Alleen is in theorie een fractie hogere temperatuur haalbaar (Figuur 9.58 en Figuur 9.59, bijlage 23). Dit is aan twee effecten te wijten. Enerzijds ten gevolge van een iets hoger warmteverlies dan in het theoretische model. Anderzijds kan er in het simulatiemodel meer warmte geladen worden aangezien er geen sprake is van een modulerende ketel.

De traag reagerende ketel is ook de oorzaak van de lagere warmteafgifte gedurende de meting (5.419 kW) in vergelijking met de simulatie (5.715 kW). Als gevolg hiervan ligt de benutting van de WKK evenredig lager. Met name op de tweede en derde dag van de meetsessie ligt de temperatuur van de waterzak met de meting een paar graden lager. Als gevolg hiervan is op die dagen minder warmte onttrokken uit de waterzak. Het aandeel door de CV-ketel geleverde warmte neemt hierdoor toe.

Uit de metingen voor de correctie van de sampletijd volgt dat in werkelijkheid het geladen vermogen hoger ligt, waardoor ook het warmteverlies lager ligt dan de zeer hoge waarde die volgt uit de meting (1,68 kW). Uit de meting met een hogere sampletijd volgde dat het werkelijk warmteverlies op 0,80 kW ligt. Deze waarde komt goed overeen met de waarde van het stationaire warmteverlies (0,75 kW).

<sup>6</sup> Gebruik gemaakt van meetwaarden stationaire warmteverlies.

<sup>7</sup> Warmteverlies tijdens meting ligt hoger dan in werkelijkheid tengevolge van invloed sampletijd en modulerend gedrag ketel. Werkelijke warmteverlies ligt in de buurt van 0,45 kW.

Tabel 5.3 *Vergelijking van resultaten metingen en simulaties voor een WKK (70-90).  
Theoretische warmtevraag = 5741 kWh*

Warmte inhoud (kWh)	Simulatie	Meting <sup>8</sup>
Sampletijd (sec)	300	300
Warmtevraag	5.711	5.706
Warmteafgifte	5.715	5.419
Aanbod WKK	5.040	5.043
Benutting WKK	4.804	4.661
Door CV geleverde energie	1.073	1.157
Geladen	615	675
Ontladen	453	315
Netto opwarming	40	77
<b>Warmteverlies</b>		
- Totaal	122	283
- P-gem (kW)	0,72	1,68 <sup>9</sup>

Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk is vermeld zijn de verschillen tussen simulatie en meting voor de WKK (40-80°C) groter. Tijdens de metingen moet de CV-ketel vaker worden ingeschakeld om de piekvraag op te vangen. Het profiel van het temperatuurverloop in de waterzak van respectievelijk de simulatie en de meting komt qua pieken en dalen overeen (Figuur 9.67 en Figuur 9.68, bijlage 24). Alleen ligt het vermogen dat wordt onttrokken uit de waterzak gedurende de meting lager. Uit nadere analyse van de meting blijkt dat de ingaande temperatuur aan de ‘koude’ zijde van de warmtewisselaar gemiddeld ruim 3°C hoger ligt. Dit scheelt een paar kW aan vermogen. Zowel gedurende de meting als de simulatie is er wel meer sprake van stratificatie dan tijdens metingen met een hoger debiet in het waterzakstelsel.

Tabel 5.4 *Vergelijking van resultaten metingen en simulaties voor een WKK (40-80).  
Theoretische warmtevraag = 2.475 kWh*

Warmte inhoud (kWh)	Simulatie	Meting <sup>10</sup>
Sampletijd (sec)	300	300
Warmtevraag	2.260	2.376
Warmteafgifte	2.260	2.546
Aanbod WKK	6.723	6.723
Benutting WKK	2.428	2.600
Door CV geleverde energie	53	333
Geladen	493	652
Ontladen	273	264
Netto opwarming	91	104
<b>Warmteverlies</b>		
- Totaal	129 <sup>11</sup>	284
- P-gem (kW)	0,77	1,7 <sup>12</sup>

Voor een volledig overzicht van de meetresultaten wordt verwezen naar bijlage 23 en 24.

<sup>8</sup> Meetwaarden gecorrigeerd voor storing CV ketel en door een foutieve aansturing van de CV-ketel in een procedure waar het vermogen van laden wordt aangepast, is ± 92 kWh minder geladen tijdens de meting.

<sup>9</sup> Warmteverlies tijdens meting ligt hoger dan in werkelijkheid tengevolge van invloed sampletijd en modulerend gedrag ketel. Werkelijke warmteverlies ligt in de buurt van 0,75 kW.

<sup>10</sup> Meetwaarden gecorrigeerd voor storing CV ketel. Door een foutieve aansturing van de CV-ketel in een procedure waar het vermogen van laden wordt aangepast, is ± 92 kWh minder geladen tijdens de meting.

<sup>11</sup> Hoogte warmteverlies volgt uit gemeten waarde stationair warmteverlies.

<sup>12</sup> Warmteverlies tijdens meting ligt hoger dan in werkelijkheid tengevolge van invloed sampletijd en modulerend gedrag ketel. Werkelijke warmteverlies ligt in de buurt van 0,76 kW.

## 6. OPTIMALISATIE & VERGELIJKING WATERZAK

### 6.1 Optimalisatie waterzak

Na afloop van een jaar waarin de testinstallatie is gebouwd en waarin simulaties en metingen zijn verricht blijkt dat een aantal componenten verbeterd kunnen worden. Het waterzakstelsel kan op de volgende punten geoptimaliseerd worden:

1. Het warmteverlies kan verder beperkt worden door eenvoudigweg de laagdikte van de **isolatie** te vergroten. Uiteindelijk betreft het hier een economische optimalisatie tussen de prijs van isolatie en de kosten van het warmteverlies.
2. De keuze van de **warmtewisselaar** is een afweging tussen enerzijds een groter vermogen en een kleiner temperatuurverlies en anderzijds een hogere kostprijs en een grotere drukval. De huidige platenwarmtewisselaar is gekozen voor een ontwerpdebiet door het CV-systeem van 1,2 l/s. Tijdens de metingen is dit debiet meestal niet gehaald. Het gevolg was dat het vermogen over de warmtewisselaar daarmee ook lager lag. Een warmtewisselaar met een groter warmte-uitwisselend oppervlak is in het algemeen gunstig.
3. Zoals wel eerder is aangegeven kan het gebruik van **debietgerregelde pompen** een belangrijke bijdrage leveren aan een verbetering van de regeling van het systeem. In de huidige opstelling is er maar één werkpunt waarop bij gegeven waterzaktemperatuur aan de warmtevraag kan worden voldaan. Om dit probleem te omzeilen is voor de testen gekozen om de warmtevraag op te splitsen om toch een vergelijkbare hoeveelheid warmte te kunnen laden/ontladen alsof er wel een regelbare pomp in het systeem aanwezig zou zijn.
4. Voor de meeste toepassingen is de temperatuurschommeling in de waterzak 10 tot 15°C, alleen voor de zonnecollector loopt deze waarde op tot 30°C. Als de temperatuur in de waterzak teveel zakt, is het niet meer mogelijk nuttige warmte te onttrekken. Voor laden geldt het omgekeerde. Door gebruik te maken van **fase transformatie materialen** (afgekort als PCM's of FTM's, zie ook hoofdstuk 7) kan de warmteopslagcapaciteit aanzienlijk toenemen met als groot voordeel dat dit binnen een zeer smal temperatuurtraject kan. Laden en ontladen kan dus met een vrijwel constante temperatuur. Dit heeft significante voordelen. Zo kan de dimensionering van apparatuur beter plaatsvinden omdat het werkgebied van de temperatuur beter te voorspellen valt en met een constant vermogen geladen en ontladen kan worden. Nadeel is wel dat er enige temperatuur 'overshoot' nodig is om warmte-uitwisseling tussen het transportmedium en de FTM mogelijk te maken.
5. Binnen deze opdracht is de nodige aandacht aan de **regeling** van de installatie besteedt. Toch is de verwachting dat er nog verschillende opties zijn om de regeling te optimaliseren. Hierbij wordt gedacht aan de berekening van de hoogte van de nuttige waterzaktemperatuur. Deze temperatuur is de ondergrens waarbij nog warmte uit het systeem kan worden onttrokken voor de betreffende installatie. Deze waarde is niet alleen systeem- maar ook seizoensafhankelijk. In de zomer kan de benutting van de waterzak soms zo laag liggen dat de warmteverliezen groter zijn dan de benutting. Bij de voorspelling van de warmtevraag wordt nu gebruik gemaakt van de gemiddelde waarde van de warmtevraag in een bepaalde maand op een zeker tijdstip. Hierbij wordt nog onderscheid gemaakt tussen werkdagen en weekenden. In de voorspelling wordt geen rekening gehouden met het werkelijke weertype. Tenslotte kan gedacht worden aan een verbeterde regeling voor keuze tussen laden en ontladen. Nu wordt er voorrang aan laden boven ontladen gegeven bij een warmtevraag die lager ligt dan de minimum last van de installatie. De verwachting is dat een zekere verfijning tot iets betere resultaten kan leiden.

## 6.2 Verschillen waterzak en tanksysteem

Er zijn in de eerste fase al gegevens vermeld over tanksystemen voor warmte-opslag. Tanksystemen worden voorlopig met name gebruikt voor huishoudelijke toepassing in combinatie met een zonnecollector. Hier is het volume veelal beperkt tot  $\pm 200$  liter. Het gaat dan om een verticale tank, soms geïntegreerd met een ketelinstallatie. Stratificatie is in deze verticale tanks goed mogelijk, met name als er gebruik wordt gemaakt van spiralen als warmtewisselaar om de stroming van het water te beperken.

Andere veel voorkomende tanksystemen worden toegepast bij glastuinbouwbedrijven. Het gaat hier om horizontale tanks variërend van 50 tot meer dan  $150 \text{ m}^3$  inhoud. De tanks worden gebruikt voor korte termijn warmteopslag om de periode tussen  $\text{CO}_2$ - en warmtevraag op te vangen. Hier is geen drukscheiding noodzakelijk, de buffer is rechtstreeks aan het systeem gekoppeld. Veelal worden deze buffers met maximaal vermogen geladen, zodat opbouw van stratificatie mogelijk is.

Tanksystemen met een inhoud vergelijkbaar met de waterzak worden nog niet op grote schaal toegepast. Hieronder een lijstje met de belangrijkste verschillen:

- De waterzak is flexibel en in lege toestand tot een zeer compact pakket op te vouwen. Dit maakt plaatsing mogelijk in ruimtes als kelder, kruipruimte, zolder, etc. waar een star tanksysteem niet mogelijk is.
- Doordat de waterzak geen hoge druk kan verdragen, is een drukscheiding met behulp van een warmtewisselaar noodzakelijk. Het gevolg is dat enig temperatuurverlies geaccepteerd moet worden. Dit betekent overigens niet dat er veel warmteverlies optreedt. Een goed geïsoleerde compacte platenwarmtewisselaar levert nauwelijks energieverlies op.
- Een waterzak stelt minder hoge eisen aan de fundering aangezien het gewicht van het opslagmedium over een groot oppervlak wordt verspreid.
- Verankering van de sproeileiding is niet goed mogelijk in de waterzak. Maar een zwevende of zinkende diffusor blijkt goed te werken.
- Een verticaal tanksysteem heeft een betere stratificatiegedrag dan een horizontale tank. Een waterzak kan alleen horizontaal worden geplaatst.
- De waterzak is per volume-eenheid goedkoper dan een watertank. Ook kunnen de installatiekosten lager liggen.

## 6.3 Vergelijking resultaten met studie 1e fase

Vergelijking van resultaten tussen de resultaten van de 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> fase is slechts beperkt mogelijk aangezien voor de eerste fase berekeningen over een geheel jaar zijn uitgevoerd en in de 2<sup>e</sup> fase is gekozen om alleen een aantal referentieweken te berekenen/meten (zie Tabel 6.1).

Het warmteverlies ligt in deze studie hoger dan de waarden waar van uit was gegaan in de 1<sup>e</sup> fase. Om aan de warmtevraag te kunnen voldoen moet het temperatuurniveau hoger liggen dan in de 1<sup>e</sup> fase was aangenomen. Hierbij moet wel worden vermeld dat in de 1<sup>e</sup> fase de dikte van de isolatiedeken op 140 mm was verondersteld met een warmtegeleidingscoëfficiënt van 0,041 W/m K. In de opstelling zijn deze waarden gelijk aan respectievelijk 100 mm en 0,035 W/m K.

In de 1<sup>e</sup> fase waren de temperatuurniveaus van de buffer en de warmtevraag niet expliciet meegenomen en is gerekend met vermogens voor vraag en aanbod. Met name voor de installaties waarbij de temperatuurniveaus tijdens laden en ontladen niet overeenkomen zijn de afwijkingen tussen de resultaten van de 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> fase groter. Kwam in de modelberekeningen van de 1<sup>e</sup> fase de WKK als beste uit de bus, in de 2<sup>e</sup> fase zijn de resultaten voor WKK minder gunstig. De serieschakeling van het warmteafgiftesysteem en de warmtewisselaar maken het moeilijk om aan zowel de warmtevraag als aan het laden van de buffer te voldoen. Een benutting van de buffer van 14% zoals in de 1<sup>e</sup> fase berekend wordt niet meer gehaald. De reden van de verschillen in benutting tussen het WKK systeem (70–90) en (40–80) moet echter eerder gezocht worden in de

verschillende keuze van de referentieweek en de hogere vermogens van de warmtevraag en WKK-installatie dan in het verschil in het debiet van het waterzakstelsel en het afwijkende temperatuurniveau (zie Tabel 6.1).

De stijging van de benutting van de warmtepomp ligt voor de metingen in de 2<sup>e</sup> fase juist hoger dan de modelberekening in de 1<sup>e</sup> fase. Ook hier ontstaat het verschil doordat één referentieweek in het voorjaar niet volledig representatief is voor het hele jaar. De veel beperktere stijging van de benutting van het warmtenet in de 2<sup>e</sup> fase is vrijwel volledig toe te schrijven aan het grote temperatuurverschil tussen laden en ontladen van de buffer.

Tabel 6.1 *Vergelijking<sup>13</sup> resultaten 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> fase. 1<sup>e</sup> fase zijn gemiddelden over het gehele jaar. 2<sup>e</sup> fase zijn gemiddelden over een week*

Type apparaat	Zonnecollector		Warmtepomp		WKK (70-90)		WKK (40-80)	Warmtenet	
	1 <sup>e</sup>	2 <sup>e</sup>	1 <sup>e</sup>	2 <sup>e</sup>	1 <sup>e</sup>	2 <sup>e</sup>	2 <sup>e</sup>	1 <sup>e</sup>	2 <sup>e</sup>
<b>Warmteverlies buffer</b>									
- (kW)	0,44	0,57	0,24	0,45	0,30	0,75	0,77	0,28	0,90
- (% van warmtevraag)	0,86	1,8	0,47	2,1	0,63	2,1	5,2	0,55	2,2
<b>Benutting buffer (%)</b>	12,0	14,3	16,4	36,3	14,2 <sup>14</sup>	5,0	11,5	8,3	3,0

<sup>13</sup> Vergelijking is een indicatie. Randvoorwaarden van de berekeningen komen in hoofdlijnen overeen, maar vertonen wel verschillen.

<sup>14</sup> In 1<sup>e</sup> fase was het vermogen van de WKK, buffer en warmtevraag een factor 2 groter dan in systeem 2<sup>e</sup> fase.





## 7. FASE TRANSFORMATIE MATERIALEN

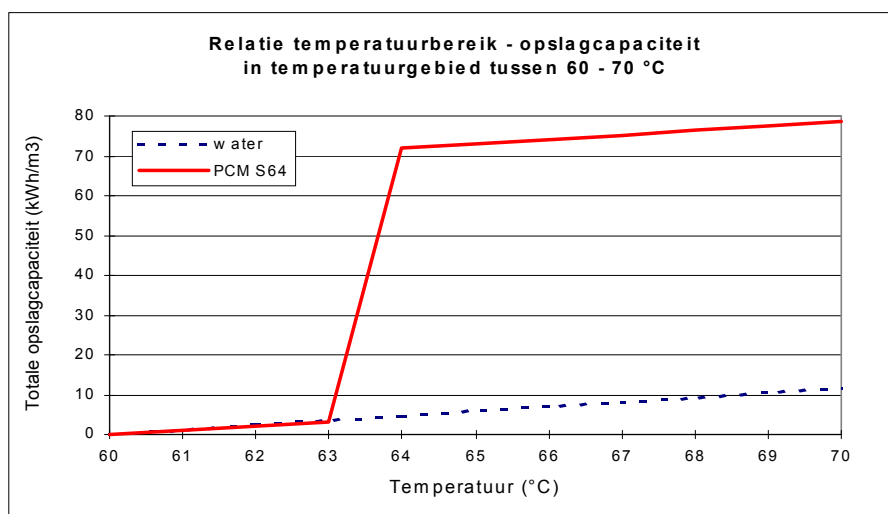
### 7.1 Inleiding

Bij Fase Transformatie Materialen (FTM) wordt gebruik gemaakt van de latente warmte van de faseovergang vloeibaar-vast. Doordat de smeltwarmte van materialen een orde hoger ligt dan de soortelijke warmte, is een veel hogere specifieke energiedichtheid te bereiken door gebruik te maken van latente warmte dan opslag met behulp van voelbare warmte. Dit resulteert in een aanzienlijk compactere opslag waarbij een volumevermindering met een factor 5 à 10 haalbaar is. Dit voordeel is met name interessant indien warmte slechts over een temperatuurtraject van enkele graden kan worden opgeslagen (Figuur 7.1 en Figuur 7.3). Hierbij kan men denken aan koudeopslag, opslag van tapwater en warmteopslag in combinatie met gebruik van warmtepompen, WKK, etc.

FTM's zullen vooral daar toegepast worden waar:

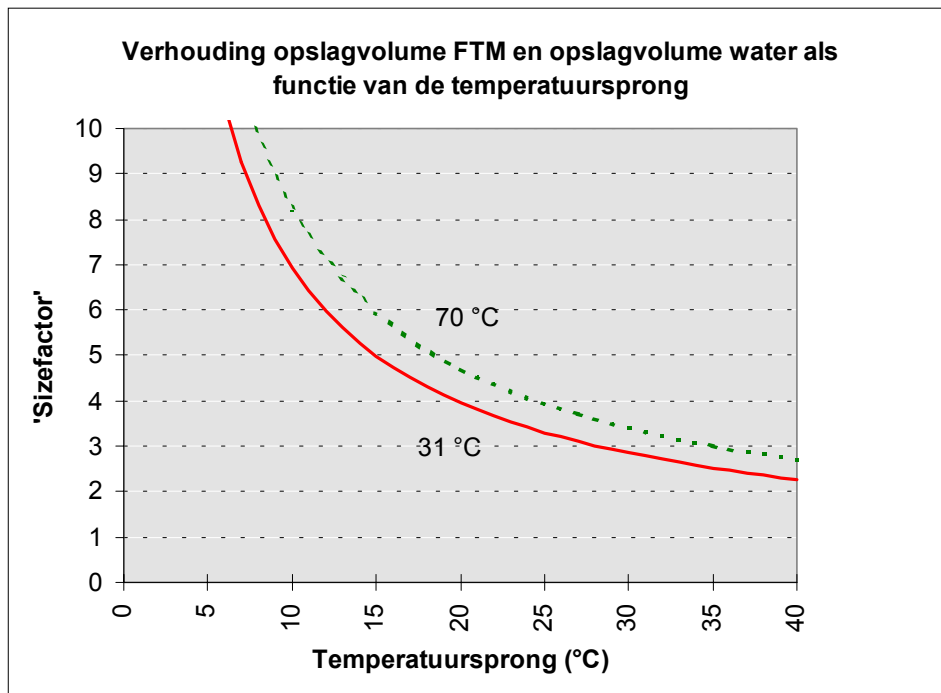
- een klein temperatuurtraject
- een beperkt inbouwwolume
- een beperkte vloerbelasting beschikbaar is.

Daarnaast kan er door de vrijwel constante temperatuur met een constant vermogen geladen en ontladen worden, wat de regeling van een buffer eenvoudiger maakt.



Figuur 7.1 *Vergelijking warmte-opslagcapaciteit latente warmte (FTM) met voelbare warmte (water) over een kleine temperatuursprong*

Afhankelijk van het temperatuurniveau van warmte-/koudevraag moet een geschikte FTM worden gezocht met een bijpassende smelttemperatuur. Daarnaast zijn nog een aantal andere eigenschappen van het materiaal van belang: onder andere de smelt- en soortelijke warmte van de FTM; warmtegeleiding van het materiaal; dichtheidsveranderingen tijdens laden en ontladen van FTM's; kristallisatiegedrag; giftigheid en chemische stabiliteit.



Figuur 7.2 *Volumeverhouding opslag in FTM ten opzichte van opslag in voelbare warmte in water*

## 7.2 Vergelijking organische en anorganische FTM's

Fase transformatie materialen kunnen in twee hoofdgroepen worden opgesplitst: organische (paraffines, polymeren) en anorganische (meestal zouthydraten). Zouthydraten vertonen een vrijwel constante smelttemperatuur. Organische FTM's hebben echter, afhankelijk van de ketenlengteverdeling, een breed overgangsgebied (smelt/stol traject). De smelttemperatuur voor paraffines neemt lineair toe met de ketenlengte. De warmtecapaciteit van paraffines is veelal hoger dan van zouthydraten. De warmtecapaciteit van zouthydraten stijgt met de graad van hydratatie, maar een hogere hydratatiegraad gaat veelal gepaard met ontmengingsverschijnselen (incongruent smelten). De warmtegeleiding in vaste vorm is van zouten veelal beter dan van paraffines, in vloeibare vorm zijn de verschillen kleiner. De dichtheid van zouthydraten ligt hoger dan de dichtheid van paraffines. De beperkende factor voor het laadvermogen van warmteopslag wordt door zouten gevormd door de kristallisatiesnelheid, bij paraffines is dit de warmtegeleiding. Paraffines hebben nauwelijks last van onderkoeling, zouthydraten wel, zodat er additieven toegevoegd moeten worden. Door de corrosiviteit de hygroscopische werking en de ontmengingsverschijnselen van zouthydraten worden deze met additieven in een container ingekapseld. Hierdoor wordt tevens oppervlak gecreëerd voor de warmteuitwisseling bij het laden van de FTM.

Tabel 7.1 *Vergelijking van de twee belangrijkste categorieën ftm's. [Bron: Jean Paris, 1993]*

	<b>Paraffines en organische materialen</b>	<b>Zouthydraten</b>
<b>Smelttemperatuur</b>	Is functie van ketenlengte	
<b>Smeltwarmte/warmtecapaciteit</b>	Hoger dan zouthydraten	Is functie van hydratatiegraad
<b>Dichtheid</b>	Lager dan zouthydraten	Hoger dan paraffines
<b>Warmtegeleiding</b>	Beperkt	Beter dan paraffines
<b>Incongruent smelten</b>	Stijgt met hydratatiegraad	
<b>Kristallisatiesnelheid</b>	Laag	
<b>Onderkoeling</b>	Nauwelijks	Belangrijk
<b>Dampdruk</b>	Laag	Significant hoger
<b>Vlambaarheid</b>	Laag	Niet
<b>Chemische stabiliteit</b>	Erg stabiel	
• <b>Corrosie</b>	Niet	Soms corrosief voor metalen
<b>Giftigheid</b>	Niet	Meestal niet
<b>Irritatie (ogen/huid)</b>	Niet	Is mogelijk
<b>Prijs</b>	Hoger dan van zouthydraten	Lager dan paraffines
<b>Inkapseling</b>	Noodzakelijk	

### 7.3 Selectie

De eerste selectie van Fase Transformatie Materialen vindt plaats door een geschikt smeltgebied te bepalen voor de specifieke toepassing. Zouten hebben over het algemeen een hogere opslagcapaciteit dan organische materialen. Met name zouten met een hoge hydratatiegraad hebben in het algemeen een hoge smeltwarmte.

Vervolgens is het belangrijk dat FTM's voldoen aan veiligheidseisen, bijvoorbeeld een lage ontvlambaarheid of niet oxideren, en niet of nauwelijks degraderen in gebruik.

In bijlage 12 staat een tabel met een overzicht van de belangrijkste criteria bij de selectie van FTM's. Er kan naast veiligheids- en levensduuraspecten geselecteerd worden op o.a. opslagcapaciteit, warmtegeleiding, dampspanning, volumeveranderingen, lage dichtheid etc.

Hieronder zijn in Tabel 7.2 per temperatuurverschil van 10°C één à twee FTM's geselecteerd uit een database met meer dan 200 FTM's met kort de belangrijkste voor- en nadelen. De belangrijkste selectiecriteria waren:

- Warmteopslagcapaciteit
- Dichtheid
- Hoeveelheid onderzoek verricht
- Veiligheidsaspecten

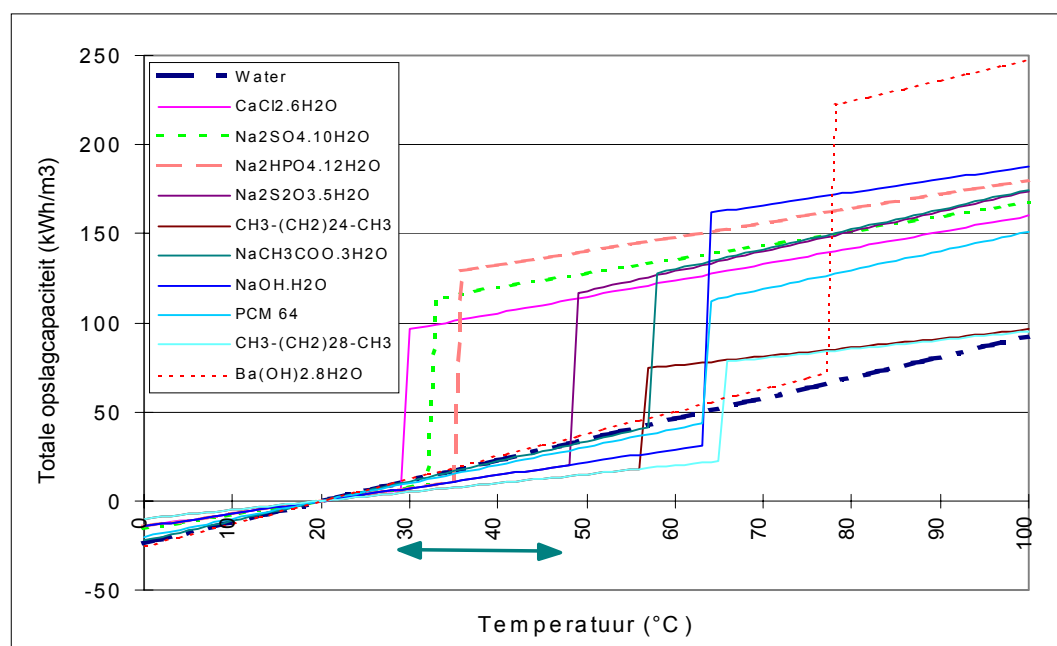
De commerciële verkrijgbaarheid geldt alleen ten tijde van de bronvermelding. In Figuur 7.3 zijn deze stoffen betreffende warmtecapaciteit vergeleken met water.

Commerciële zouthydraat FTM's worden meestal ingekapseld in containers geleverd met additieven voor een stabiel cyclegedrag en tegen onderkoeling. De kosten worden niet zozeer door het materiaal bepaald, maar vooral beïnvloed door de ontwikkel- en productiekosten voor de op-

slag in containers. Momenteel liggen de kosten op ca. f 200,- per kWh voor kleine series. Bij massaproductie kunnen deze kosten aanzienlijk dalen.

Tabel 7.2 *Waardering van geselecteerde stoffen.* ++ = uitstekend, + = goed, +/- = matig, - = onvoldoende, -- = slecht, ? = onbekend

Naam:	Thermodynamische aspecten				Economische aspecten		Veiligheid Giftigheid	Overige Additieven
	T-smelt	Warmte Capaciteit	Dicht heid	$\Delta V$	Commercieel verkrijgbaar	Prijs		
Calcium chloride hexahydraat	29,6	+	++	--	+	+	+	+/-
Natrium sulfaat Decahydraat / 'Glauber zout'	32,4	++	+	?	++	++	+	+/-
Dinatrium fosfaat dodecahydraat	36	++	+	-	?	+	+	+/-
Natrium Thiosulfaat pentahydraat	48,5-55,2	+	++	-	+	+/-	+/-	+/-
Hexacosaan	56,3	++	-	-	+/-	+/-	++	++
Natrium acetaat Trihydraat	58	+	+	--	+	-	+	?
Natrium hydroxide monohydraat (SHM)	64	++	+	?	?	?	?	?
Triacotaan	65,4	++	--	-	+	+/-	++	++
Barium hydroxide octahydraat	78	++	+	-	+	+/-	?	?

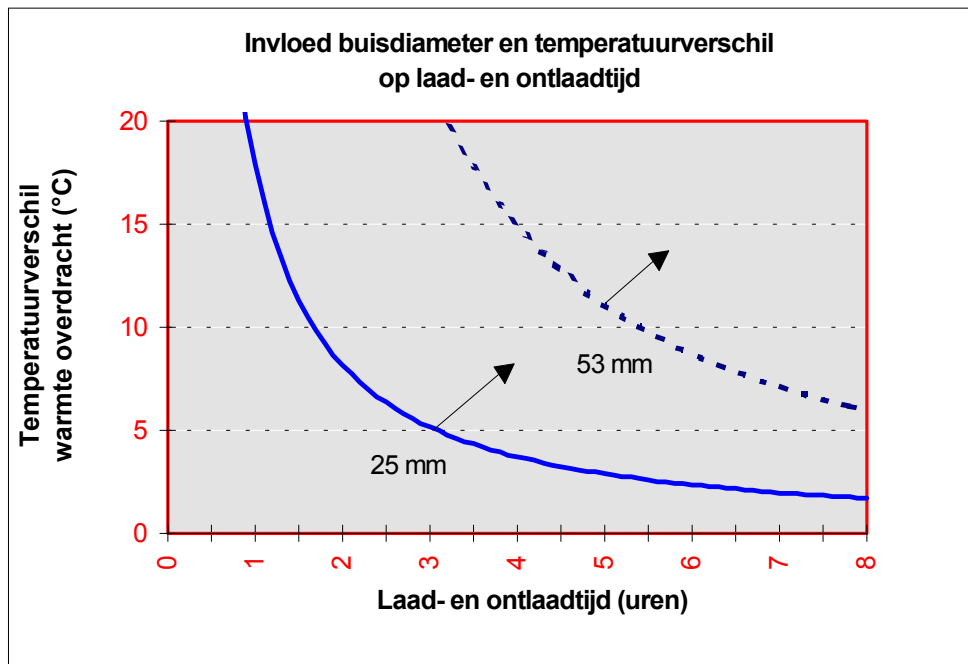


Figuur 7.3 *Vergelijking warmte-opslagcapaciteit latente warmte (FTM) met voelbare warmte (water) voor de geselecteerde FTM's. In volgorde van legenda: Water, Calcium chloride hexahydraat, Glauber zout, Dinatrium fosfaat dodecahydraat (pijl geeft smelgebied aan), Natrium Thiosulfaat pentahydraat, Hexacosaan, Natrium acetaat trihydraat, Natrium hydroxide monohydraat, Cristopia 64, Triacotaan en Barium hydroxide octahydraat*

## 7.4 Ontwerpaspecten

Na de keuze van een geschikte FTM is de in- en uitkoppeling van de warmte een belangrijk ontwerpaspect. Voor de warmteoverdracht is een bepaald temperatuurverschil nodig die voor een groot deel bepaald wordt door de toepassing. Bij een warmtepomp is er in verband met het

rendement slechts een kleine  $\Delta T$  beschikbaar terwijl voor een WKK er meestal een ruimer temperatuurtraject acceptabel is. Naast de  $\Delta T$  is ook het beschikbare warmtewisselend oppervlak van belang. Deze aspecten bepalen het vermogen waarmee geladen en ontladen kan worden. De warmtevraagperiode en het vereiste vermogen is van belang voor de warmte-inhoud en dus voor het volume van de buffer en is toepassingsgebonden. Meestal betreft het een dag/nacht cyclus zodat laad- en onlaadtijden van ca. 6 uur acceptabel zijn. In figuur 7.4 is een voorbeeld gegeven van een zouthydraat dat is ingekapseld in een buis. De gewenste onlaadtijd en beschikbare  $\Delta T$  voor warmteoverdracht bepalen uiteindelijk de buisdiameter. Over het algemeen is voor onlaadtijden van 6 uur door de beperkte warmtegeleiding in zouthydraten een verplaatsing van het smeltfront van ca. 20 mm mogelijk. Fabrikanten leveren de FTM's dan ook meestal ingekapseld in containers (bollen, buizen, blikken) die aan deze dimensie voldoen.



Figuur 7.4 *Relatie tussen de  $\Delta T$  voor warmteoverdracht, de buisdiameter en de (ont)laadtijd van een zouthydraat FTM*



## 8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 8.1 Conclusies

Op basis van de bevindingen van de eerste fase van het project is een testopstelling gebouwd om het waterzakprincipe als goedkoop en flexibel opslagsysteem te realiseren en te testen. Met twee CV-ketels als gesimuleerde warmtebron en een waterzak van 7 m<sup>3</sup> is de toepassing van een flexibele buffer bij een warmtenet, WKK, warmtepomp en zonnecollector onderzocht met meetsessies van een week.

Voor de opstelling is software ontwikkeld voor de aansturing van de installatie. Tevens is het hiermee mogelijk modelsimulaties uit te voeren voor het systeem.

Uit de karakterisering van het systeem blijkt dat de gemeten stationaire warmteverliezen zowel in ongeïsoleerde als geïsoleerde toestand van de waterzak  $\pm 30\%$  hoger liggen dan in het theoretische model. Het warmteverlies is echter slechts een kleine fractie van het ontlaadvermogen en is door betere isolatie te beperken. In de simulaties zijn de waarden van de stationaire metingen als basis genomen voor het warmteverlies. Het warmteoverdrachtsproces van de warmtewisselaar is goed te beschrijven met de ingaande temperaturen en debieten.

Het is gelukt een sproeileiding te ontwerpen die zowel gelijkmatige instroming als stratificatie in de waterzak mogelijk maakt. In de waterzak is het bij maximaal laadvermogen mogelijk stratificatie op te bouwen. In de meetsessies is de gelaagdheid van temperatuur echter beperkt. Oorzaak hiervan is het naar verhoudingsgewijs lage thermische vermogen in relatie met het debiet.

De sampletijd van 5 minuten bij de simulaties en metingen veroorzaakt een vertekend beeld van met name de hoogte van het warmteverlies. De oorzaak hiervan is dat de sampletijd veelal niet overeenkomt met het tijdstip waarop de warmtevraag wordt opgesplitst. Deze opsplitsing van warmtevraag is noodzakelijk aangezien het debiet van het systeem niet regelbaar is. Tijdens metingen neemt deze ogenschijnlijke fout ten gevolge van de sampletijd verder toe door het sterk modulerende karakter van de CV-ketels.

De metingen tonen aan dat in de gekozen referentieweek de benutting van de zonnecollector door toepassing van een buffer met meer dan 50% stijgt. De bijdrage van de warmtepomp aan de warmtevraag stijgt met een buffer van ca. 60% naar 95%.

Doordat de testinstallatie een vast debiet heeft en de buffer in serie geschakeld is kan de buffer vooral bij de WKK en het warmtenet alleen geladen worden gedurende een periode van lage warmtevraag en met een lage temperatuur. De benutting van de buffer ligt bij deze systemen hierdoor lager dan uit de 1e fase was berekend aangezien het temperatuurniveau daar buiten beschouwing was gelaten.

Tevens heeft het specifieke warmtevraagpatroon van het referentiegebouw met een tamelijk vlakke vraag een grote invloed op de resultaten gehad. Bij een patroon met een grotere piekvraag zal het effect van een buffer kunnen toenemen

De metingen komen in hoofdlijnen goed overeen met de simulaties. Wel treden een paar structurele afwijkingen op. Zo is de stratificatie tijdens de metingen beperkter doordat de diffusor niet optimaal werkt bij lage laadvermogens. Verder is het modulerende gedrag van de ketels niet in de simulaties meegenomen.

De waterzak heeft een aantal voordelen ten opzichte van een conventionele warmtebuffer (tank). Een waterzak is gemakkelijker te plaatsen in slecht toegankelijke ruimtes, zoals een kelder, kruipruimte, zolder, etc. Nadeel is de noodzakelijke warmtewisselaar als drukscheiding.

Als alternatief voor water is het mogelijk om in de toekomst de waterzak tevens te vullen met fase transformatie materialen (FTM) om een hogere energiedichtheid en constante temperatuur bij opslag te verkrijgen. Een bijkomend voordeel is dat er met een constant vermogen ge- en ontladen kan worden. Vooruitlopend hierop is een selectie gemaakt van materialen die hiervoor in aanmerking komen

Met name voor toepassingen waar het temperatuurniveau van laden en ontladen goed met elkaar overeen stemmen (warmtepomp en zonnecollector) is het gebruik van een warmtebuffer in het algemeen en de waterzak specifiek goed toepasbaar.

## 8.2 Aanbevelingen

Tijdens de metingen zijn een aantal opties voor verbeteringen van het ontwerp aan het licht gekomen. Zowel een betere isolatie van de waterzak als een warmtewisselaar met een groter warmtewisselend oppervlak hebben een gunstige invloed op de benutting van de buffer. Aangezien de huidige opstelling in principe maar één werkpunt heeft bij gegeven waterzaktemperatuur, neemt de vrijheid in regelen sterk toe door het toepassen van een debietgeregelde pomp.

De sproeileiding is geoptimaliseerd voor het maximale debiet van de huidige pomp. Bij het aanpassen van het werkgebied van het debiet dient ook de sproeileiding hierop te worden geoptimaliseerd.

Laad- en ontladvermogens dalen in de meetsessies relatief snel door temperatuurverandering in de waterzak. Het gebruik van fase transformatie materialen maakt het mogelijk de warmtecapaciteit te vergroten bij een constante temperatuur. Dit kan door ingekapselde FTM in de waterzak te plaatsen en het water te gebruiken voor de warmte-uitwisseling. Voor voldoende vermogen is het nodig om een geschikte oppervlakte/volume verhouding van de inkapseling te kiezen. Nader onderzoek en metingen naar FTM's om warmte op te slaan, eventueel in combinatie met een waterzak, is nog noodzakelijk.

De resultaten van de WKK en het warmtenet zijn ten opzichte van de 1e fase minder gunstig, doordat bij de WKK en het warmtenet alleen geladen kon worden gedurende een periode van lage warmtevraag en met een lage temperatuur. Dit kan verbeterd worden door een debiet geregelde pomp te plaatsen of de buffer te ontkoppelen van de warmtevraag, bijvoorbeeld door de warmtewisselaar en het warmteafgiftesysteem niet in serie te plaatsen.



## 9. LITERATUUR

### ◆ Algemeen:

1. *VDI-Wärmeatlas*, Auflage 1988.
2. R.W. Fox, A.T. McDonalds, *Introduction to fluid mechanics*, 3e edition, 1985.
3. *PolyInstallatie zakboekje*, 1996.
4. D. Steen, R.J.M. Kee, *Energiebesparing door Korte Termijn Opslag van Warmte/Koude, haalbaarheidsstudie naar techniek en toepassing*, IHN, 9 oktober 1996.
5. *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 7th edition, 1997.
6. Jacob van Berkel, *Thermocline entrainment in stratified energy stores*, Proefschrift, Faculty of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, 9/1997.

### ◆ Fase Transformatie Materialen:

7. R. Jank, *Thermochemische Speicherung von Wärme und Kälte - prinzipielle Möglichkeiten und Diskussion einer ausgeführten Anlage*, in: VDI berichte, nr. 652, 1987, p. 163-175.
8. J.K. Jotshi, R.B. Huddle, *Thermal energy storage in phase change materials for heating applications*, in: IECEC 95, juli 1995, p. 207-212.
9. George Lane, John Clark, Roger Cole, Paul Moses, *Solar heat storage: Latent heat materials (Volume 1), Background and scientific principles*, The Dow Chemical Company, Ceramic & Advanced Materials, 1983.
10. George Lane, John Clark, Roger Cole, Paul Moses, *Solar heat storage: Latent heat materials (Volume 2), Technology*, The Dow Chemical Company, Ceramic & Advanced Materials, 1986.
11. Jan Andersson, Michel Azoulay, Joan de Pablo, *Chemical heat pumping - a rapid experimental procedure for investigating the suitability of salt hydrates under dynamic conditions*, in: International Journal of Energy Research, volume 12, nr. 1, jan-mar 1988, p. 137-145.
12. R. Jadot, *Latent and chemical storage*, in: Heat exchange and solar energy, volume 2, 1980.
13. S. Krause, Rainer Tamme, *Operation of a 25 kWh Barium Hydroxide latent heat storage unit in the power range 2-6 kW*, in: Journal of Solar Energy Engineering, volume 108, nr. 3, 1986, p. 226-229.
14. D.K. Benson, C.B. Christensen, R.W. Burrows, Y.D. Shinton, *New phase-change thermal energy storage materials for buildings*, in: Enerstock '85 - Int. Conf. on energy storage for building heating, Toronto, 22/9/1985, sept 1985, p. 416-420.

15. Wayne Wentworth, D. Johnston, G. Roewer, Chemical heat pumps using a dispersion of a metal salt ammoniate in an inert solvent, in: Solar Energy, volume 26, 1981, p. 141-146.
16. G.J. van den Brink, E. van Galen, *Thermal energy storage system using organic phase change materials with improved thermal conductivity for storage temperatures between 35° and 120 °C*, Energy, TNO-Technisch physische dienst, 1984.
17. J. Schröder, K. Gawron, *Latent heat storage*, in: Energy Research, volume 5, 1981, p. 103-109.
18. George Lane, *Low temperature heat storage with phase change materials*, in: The International Journal of Ambient Energy, volume 1, nr. 3, July 1980, p. 155-168.
19. M. El-Sayed, Hans Martin Henning, M.A. Mohamed, A. Abdel Raouf, Experimental and Theoretical Study of a New Phase Change Material, in: EuroSun, 1996, p. 505-509.
20. Jean Paris, Michel Fardeau, Cécile Villeneuve, in: Energy sources, volume 15, 1993, p. 85-93.
21. Bart, *Thermal Conduction in Non Homogenous and Phase Change Media*, Proefschrift, TU -Delft, Department of Applied Physics, december 1994.
22. Bram Vermeer, *Voorverwarmde auto*, Het Ontwerp, in: Intermediair, volume 33,nr. 51, 1997.

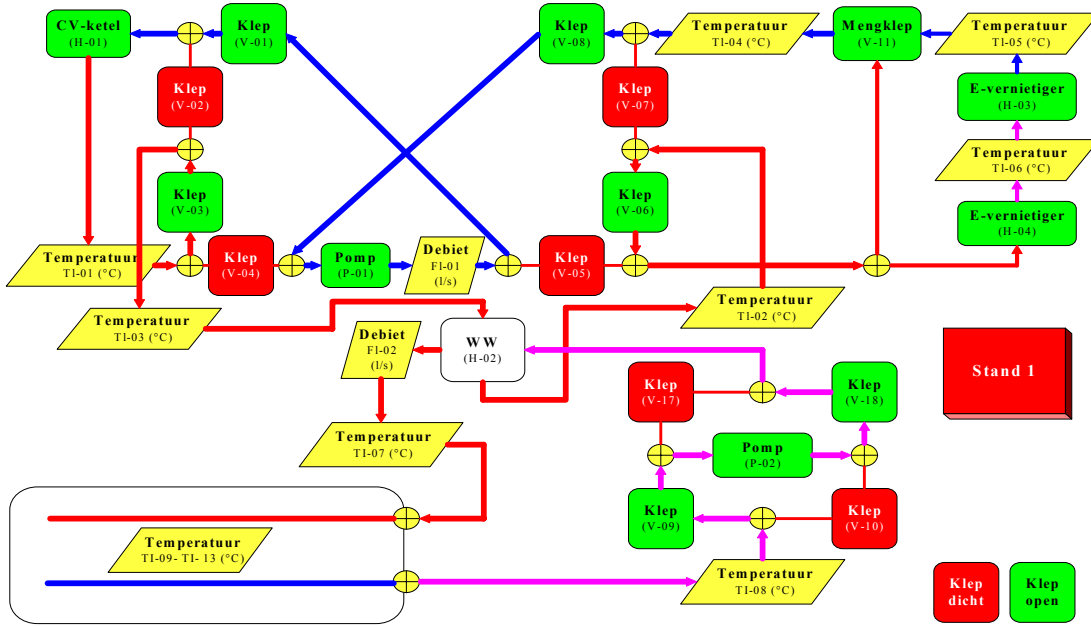
## BIJLAGEN 1 STROOMSCHEMA'S TEST-INSTALLATIE

In het rapport wordt een aantal afkortingen om debieten en temperaturen van het systeem aan te geven. Deze afkortingen komen overeen met de in de bijlage weergegeven schematische afbeeldingen van de testopstelling.

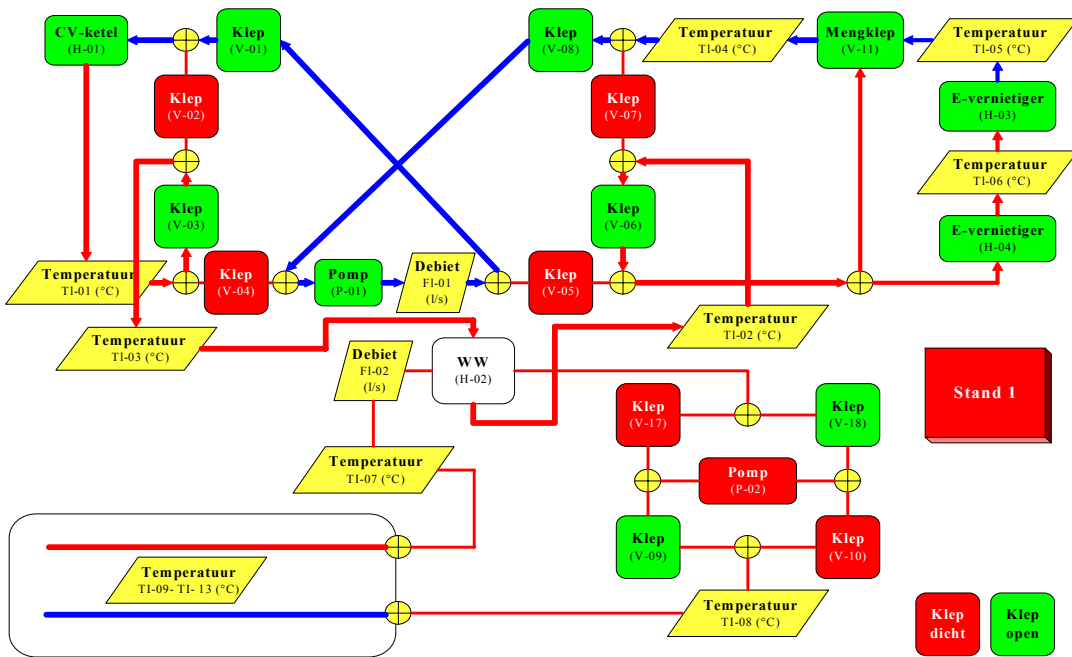
Afkorting:	Verklaring:
FL-01	Debiet van het CV-systeem
FL-02	Debiet in het waterzak systeem
TI-01, TI-02, TIC-03 en TIC-04	Waarden thermokoppels CV-systeem
TI-07 en TI-08	Waarden thermokoppels waterzak systeem
TI-09 tot en met TI-13	Waarden thermokoppels in waterzak
V-11	Stand mengklep over warmteafgiftesysteem
V-??	Overige kleppen

Tabel 9.1 *Status totale systeem. (P = Pomp, H-01 = CV installatie, H-02 & H-03 zijn warmteafgiftesystemen, V = klep)*

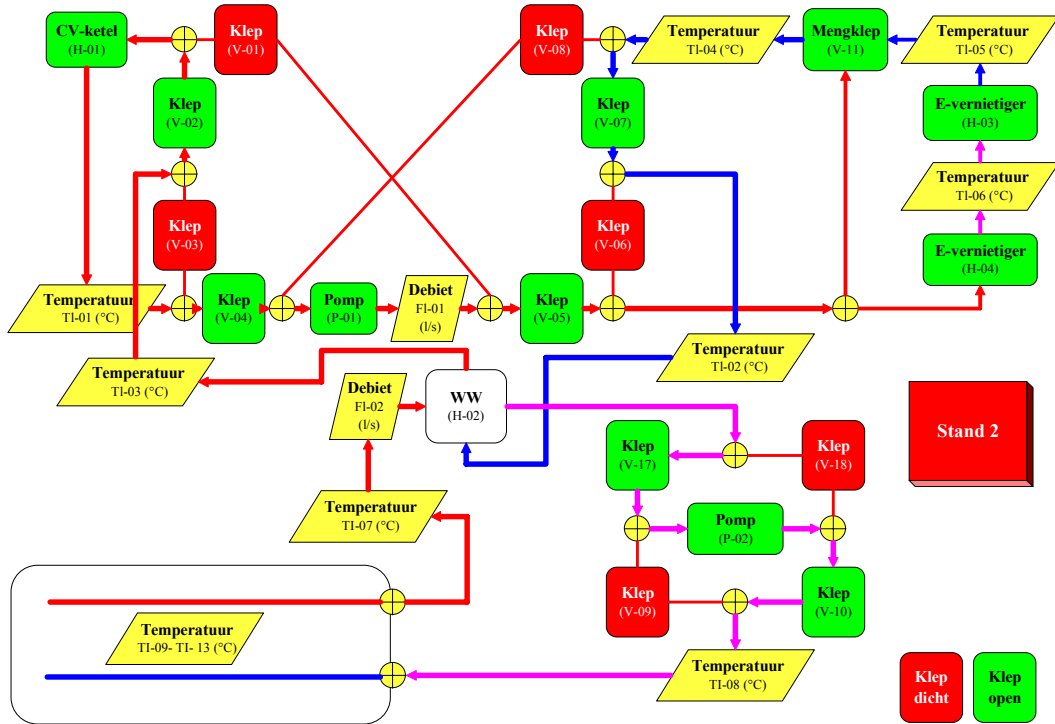
Status	Standby	Verwarmen type L+V	Laden + verwarmen	Verwarmen type O+N	Ontladen + navermarmen	Laden	Ontladen
Stand	5	1a	1b	2a	2b	3	1c 4 2c
P-01	uit	aan			Aan	aan	aan
P-02	uit	uit	aan	uit	Aan	aan	aan
H-01	standby	aan			Aan	aan	standby
H-03	standby	aan			Aan	standby	aan
H-04	standby	aan			Aan	standby	aan
V-01		open			Dicht	open	dicht
V-02		dicht			Open	dicht	dicht open
V-03		open			Dicht	open	open dicht
V-04		dicht			Open	dicht	open
V-05		dicht			Open	dicht	open
V-06		open			Dicht	dicht open	dicht
V-07		dicht			Open	open dicht	open
V-08		open			Dicht	open	dicht
V-09		open	open	dicht	Dicht	open	dicht
V-10		dicht	dicht	open	Open	dicht	open
V-17		open	dicht	open	Open	dicht	open
V-18		dicht	open	dicht	Dicht	open	dicht
V-11	0,5	aan			Aan	0,5 1	aan
V-13					Dicht		
V-14					Dicht		
V-16					Dicht		



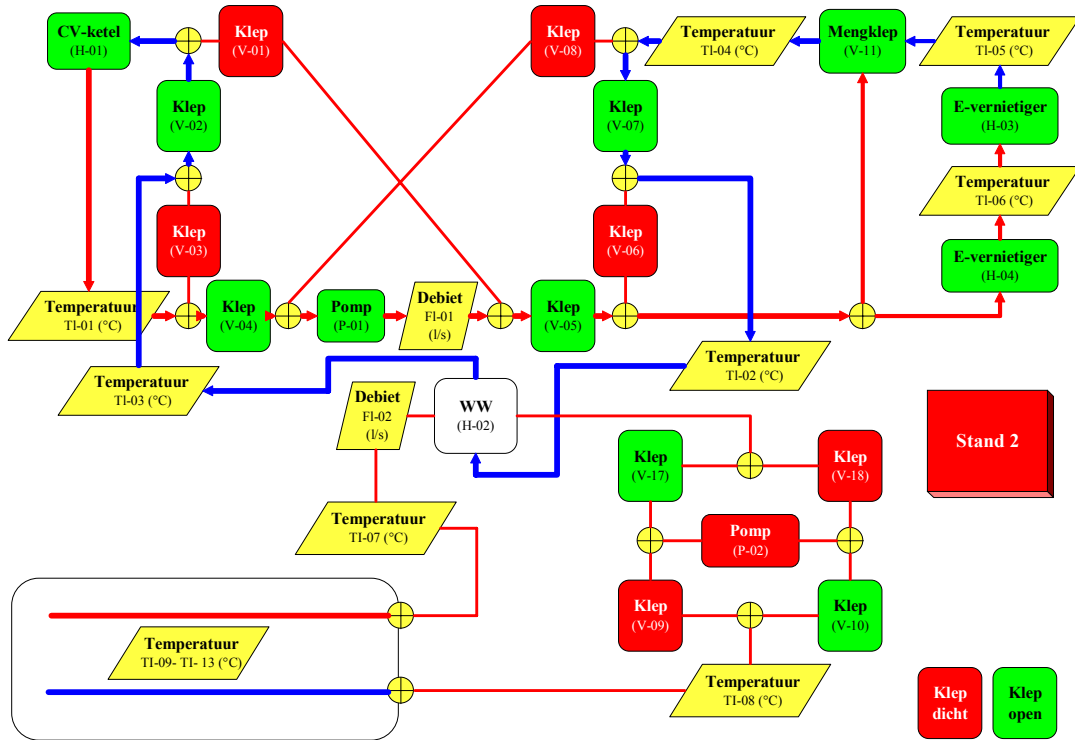
Figuur 9.1 *Stroomschema waterzak, stand 1a (Laden & verwarmen)*



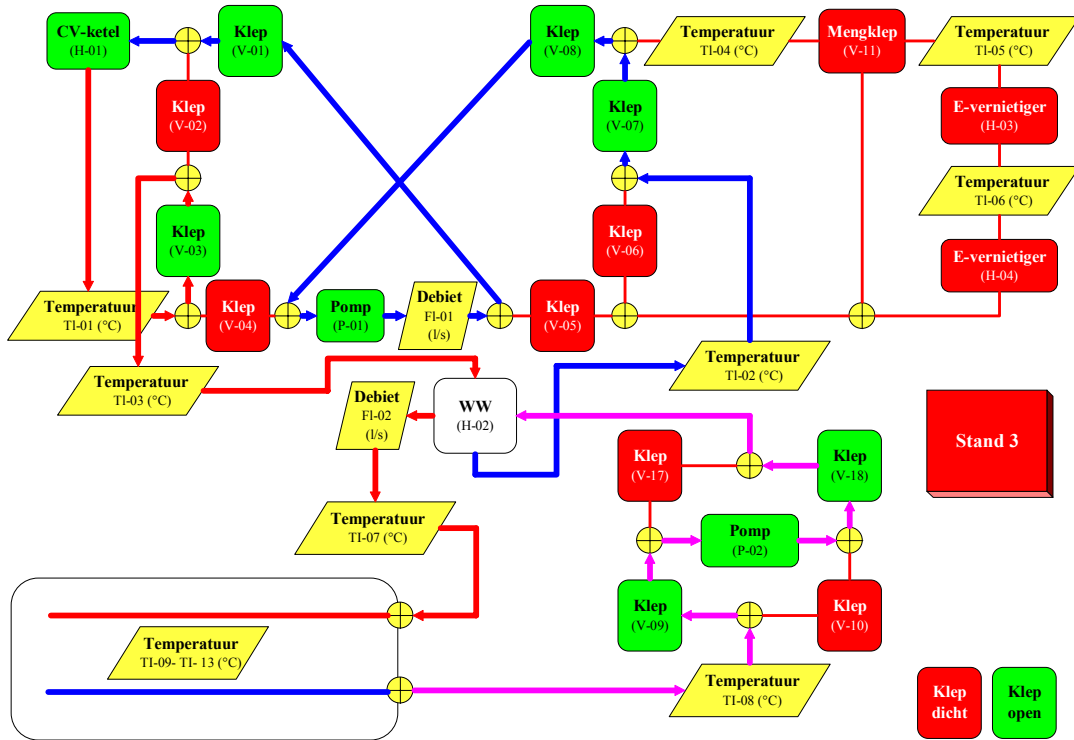
Figuur 9.2 *Stroomschema waterzak, stand 1b (Verwarmen type L & V)*



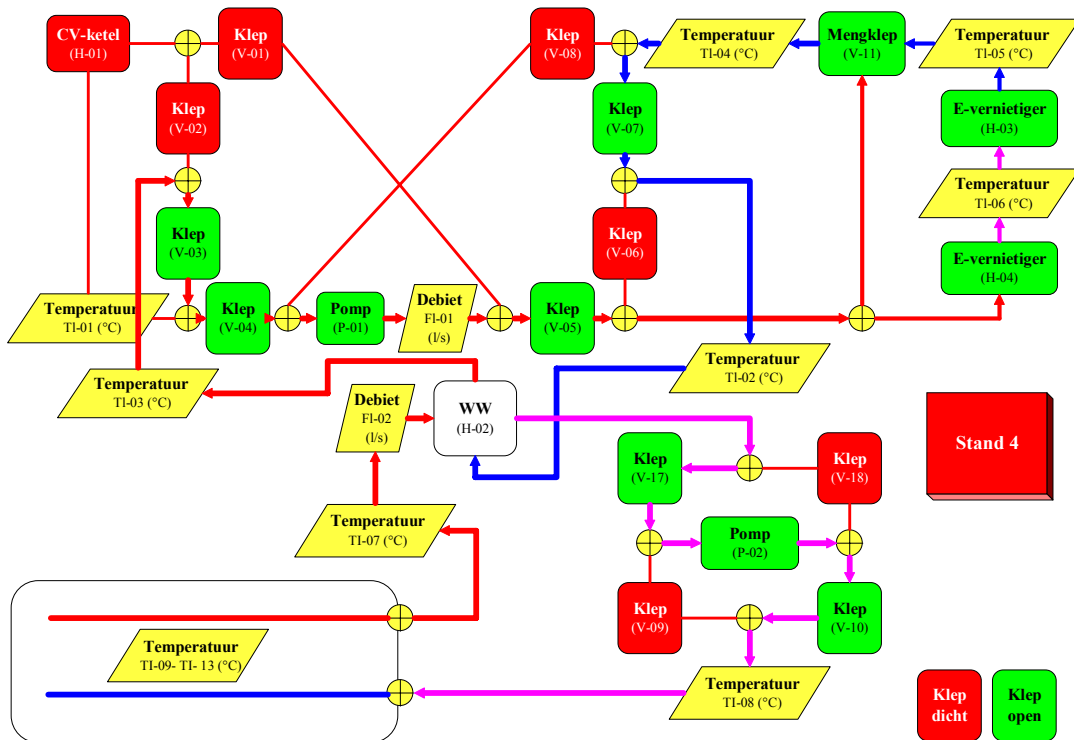
Figuur 9.3 *Stroomschema waterzak, stand 2a (Ontladen & naverwarmen)*



Figuur 9.4 *Stroomschema waterzak, stand 2b (Verwarmen type O+N)*



Figuur 9.5 *Stroomschema waterzak, stand 3(Laden)*



Figuur 9.6 *Stroomschema waterzak, stand 4(Ontladen)*

## BIJLAGE 2 REKENMETHODE VOOR TEMPERATUURNIVEAU

Volgens [Polytechnisch Zakboekje, G1] geldt voor de warmte-afgifte bij radiatoren:

$$\dot{Q} = k \cdot f \cdot A \cdot T_{over} \quad (1)$$

waarin:

Q	warmteverlies voor de ruimte (warmtevraag) (kW)
k	warmte-overdrachtsgetal van verwarmingslichamen
f	correctiefactor voor werkelijke over-temperatuur
A	(radiator)oppervlak (m <sup>2</sup> )
T <sub>over</sub>	over-temperatuur (°C) en heeft in deze vergelijking een constante waarde van 60 °C

De correctiefactor volgt uit:

$$f = 0,02 \cdot T_{over} - 0,2 \quad (2)$$

De over-temperatuur is hier gelijk aan:

$$T_{over} = \frac{T_{verw,in} + T_{verw,uit}}{2} - T_{ruimte} \quad (3)$$

waarin:

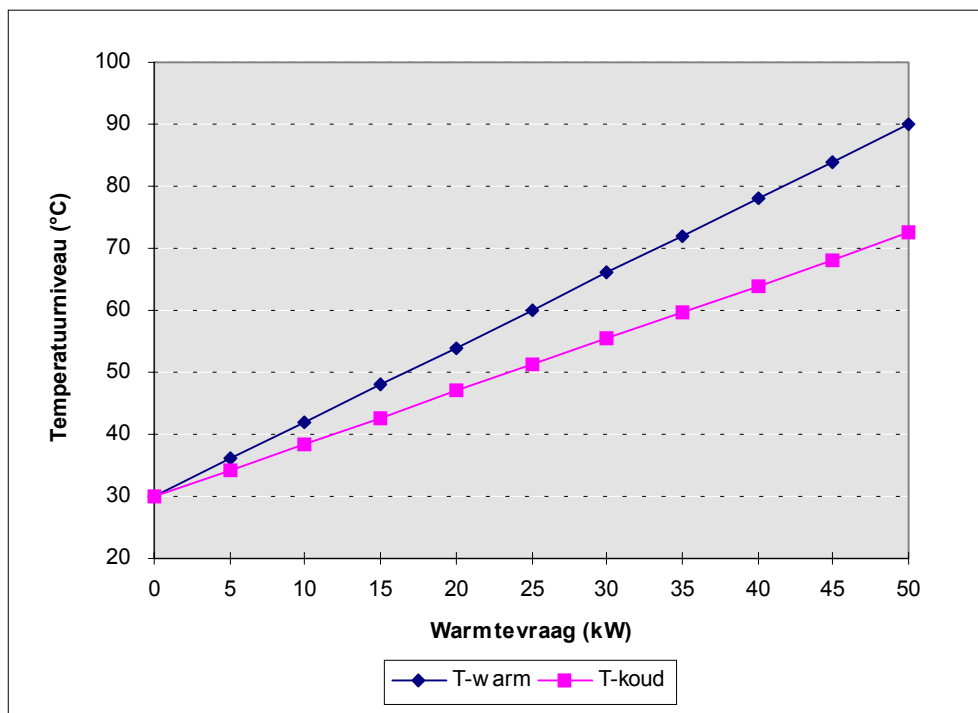
T <sub>verw,in</sub>	ingående temperatuur van het verwarmingsnet (=T <sub>warm</sub> )
T <sub>verw,uit</sub>	uitgaande temperatuur van het verwarmingsnet (=T <sub>koud</sub> )
T <sub>ruimte</sub>	ruimtetemperatuur (=20 °C voor een kantoorgebouw)

De warmte-doorgangscoefficiënt is afhankelijk van het type en hoogte van de radiator en varieert tussen de 4 en de 8. In een gebouw ligt met de keuze van het type radiator en het oppervlak van het verwarmingssysteem het product kA vast.

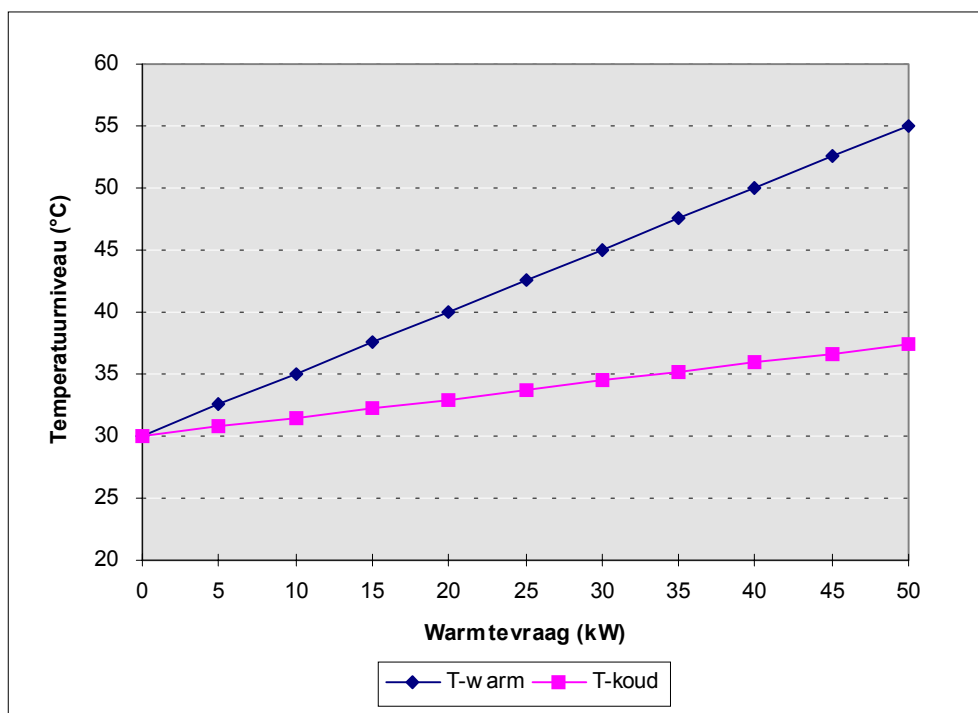
Aangezien het toegevoerde vermogen van het verwarmingssysteem gelijk is aan:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{verw,in} - T_{verw,uit}) = \rho \phi c_p (T_{verw,in} - T_{verw,uit}) \quad (4)$$

kan per type installatie een temperatuurprofiel worden berekend als functie van de warmtevraag (Figuur 9.7 en Figuur 9.8).



Figuur 9.7 *Relatie vermogen - temperatuurniveau warmtevraag testopstelling voor CV-systeem, WKK of warmtenet voor een debiet van 0,75 l/s,  $kA = 814 \text{ W/K}$ , radiatoroppervlak =  $154 \text{ m}^2$*



Figuur 9.8 *Relatie vermogen - temperatuurniveau warmtevraag testopstelling voor WP-systeem of zonnecollector voor een debiet van 0,75 l/s,  $kA = 2570 \text{ W/K}$ , radiatoroppervlak =  $485 \text{ m}^2$*



## BIJLAGE 3 RENDEMENT ZONNECOLLECTOR

Het rendement van een zonnecollector is een functie van de buitentemperatuur, de zonneinstraling, van het water in de absorberplaat en van het type zonnecollector. Het collectorrendement is nu gekozen als:

$$\eta_{collector} \approx 0,8 - 5,2T^* \quad (5)$$

waar de parameter  $T^*$  gelijk is aan:

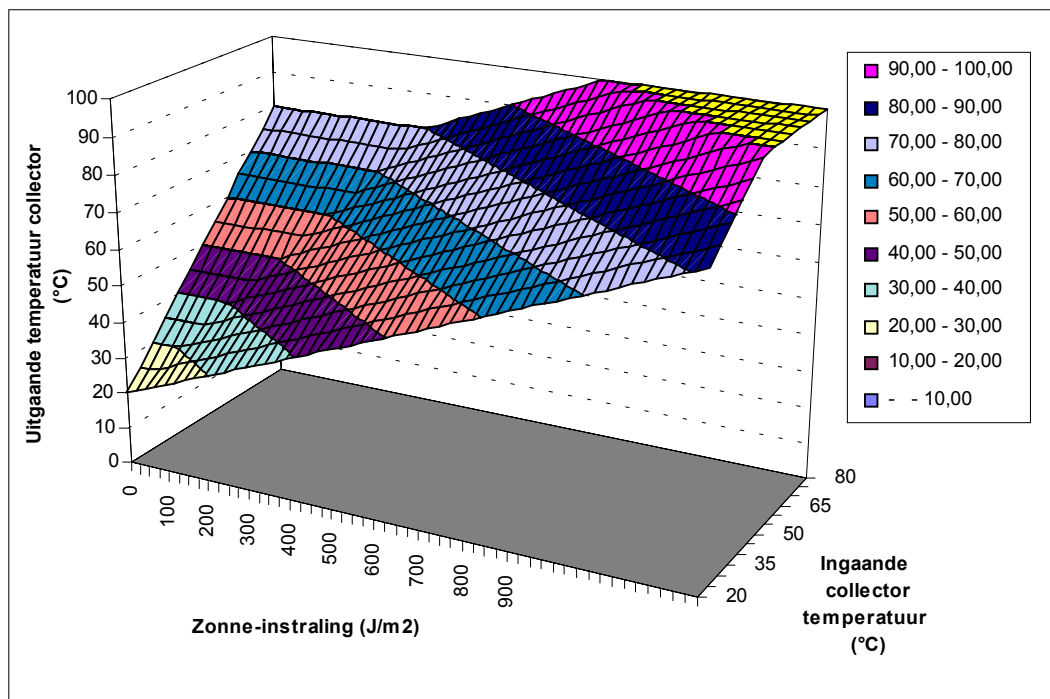
$$T^* = \frac{T_{collector,in} + T_{collector,uit} - T_{buitenlucht}}{2G} \quad (6)$$

waarin:

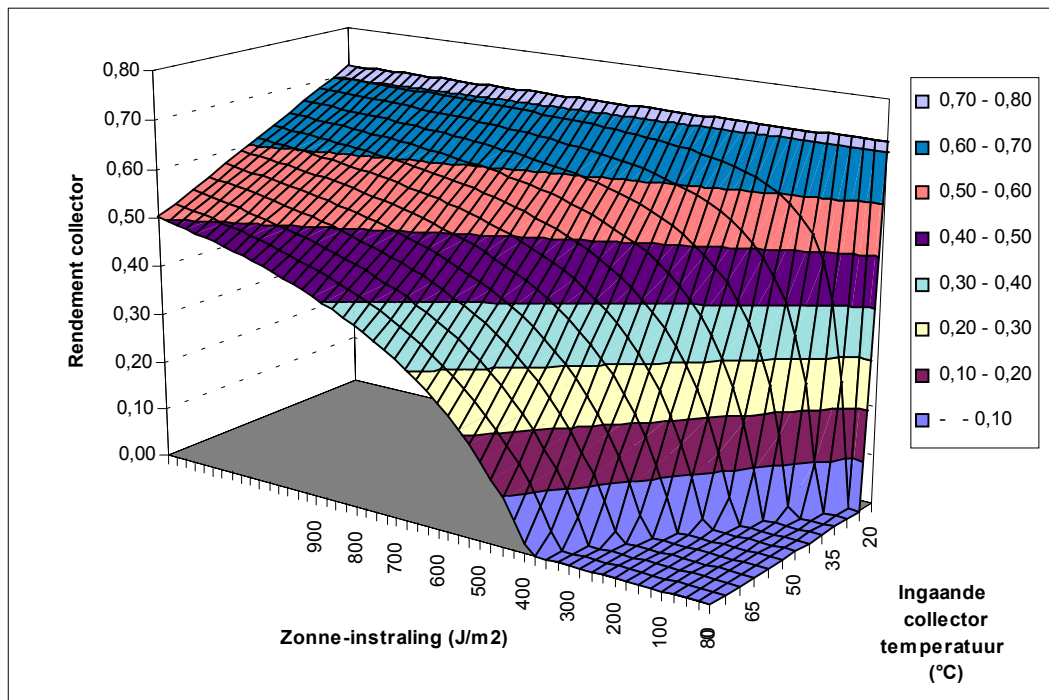
$G$  zonne-instraling ( $J/m^2$ )

Uit een energiebalans over de zonnecollector volgt:

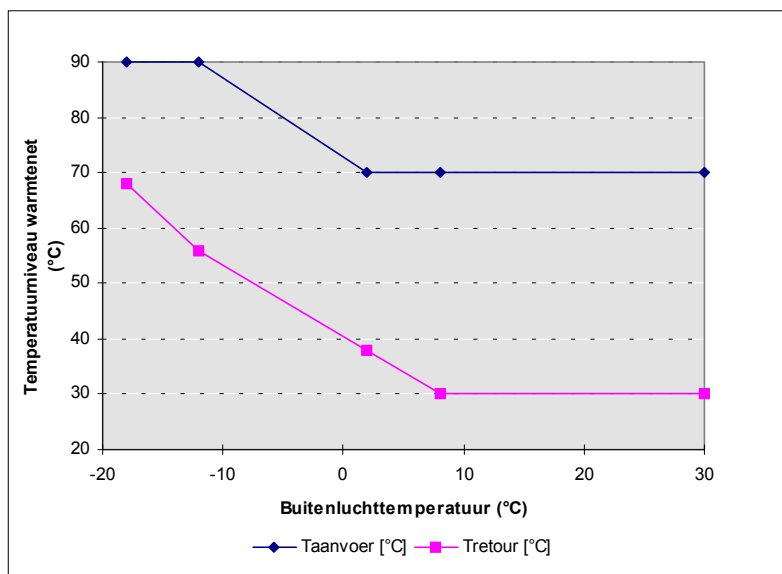
$$T_{collector,uit} = T_{collector,in} + \frac{\eta_{collector} A_{collector} G}{\dot{m} c_p} \quad (7)$$



Figuur 9.9 Relatie collectortemperatuur - zonne-instraling ( $T_{buitenlucht}=20^{\circ}C$ ,  $A_{collector}=200 m^2$ , debiet systeem =0,75 l/s)



Figuur 9.10 Rendement collector als functie van ingaande collectortemperatuur en de zonne-instraling ( $T_{\text{buitenlucht}}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{\text{collector}}=200\text{ m}^2$ , debiet systeem = 0,75 l/s)



Figuur 9.11 Relatie aanvoer en retour warmtenettemperatuur - buitenluchttemperatuur [Gastec]

## BIJLAGE 4 ONTWERP SPROEILEIDING/DIFFUSOR

De massabalans over de diffusor is gelijk aan de sommatie van de massabalansen over de gaatjes van de diffusor:

$$\Phi_{diffusor} = \sum_{i=1}^n \phi_i \quad (8)$$

oftewel:

$$A_{diffusor} V_{diffusor} = \sum_{i=1}^n a_i v_i \quad (9)$$

Over i-de segment is massabalans gelijk aan:

$$A_{in,i} V_{in,i} = A_{uit,i} V_{uit,i} + a_i v_i \quad (10)$$

waarbij  $A_{in,i} = A_{uit,i} = A = \text{cst}$  en aangezien water onsamendrukbaar is geldt:

$$V_{in,i+1} = V_{uit,i} \quad (11)$$

De drukval over de leiding volgt uit:

$$\Delta p = K \frac{\rho V_i^2}{2} \quad (12)$$

waarbij de K de verliescoëfficiënt is.

Voor een leiding van lengte L geldt dat:

$$K_l = f \frac{L}{D} \quad (13)$$

waarbij f de wrijvingscoëfficiënt is.

Voor een laminaire stroming ( $Re < 2300$ ) geldt:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (14)$$

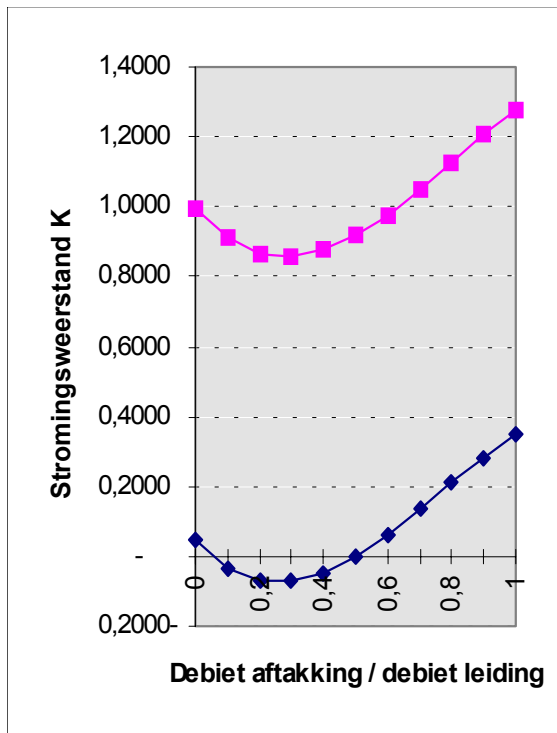
en volgens de Blasius correlatie geldt voor een turbulente stroming voor gladde pijpen:

$$f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (15)$$

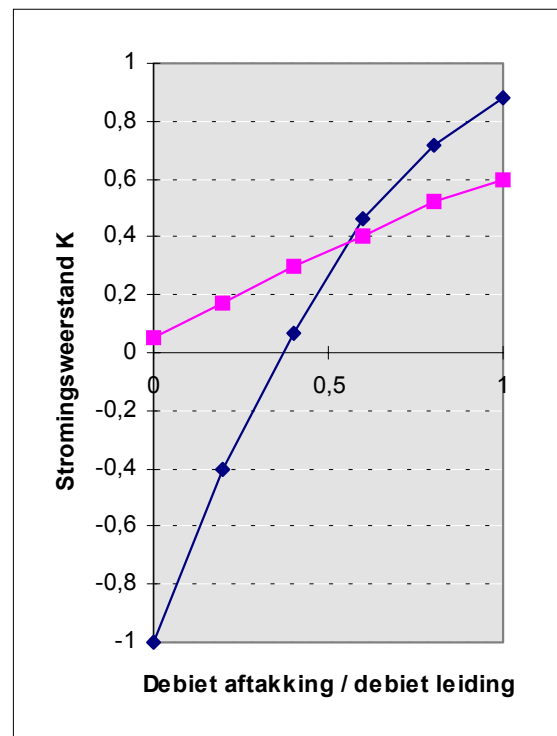
en voor niet gladde pijpen volgens Miller/Colebrook:

$$f = 0.25 \left[ \log \left( \frac{e/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (16)$$

De drukval berekening over een ‘T-stuk’ volgt uit voor de K-waarde voor de hoofdstroom en de afgetakte stroom dat deze een functie zijn van de verhouding  $\phi_i / \Phi_{in,i}$ . Hierin wordt geen



Figuur 9.12 Drukval voor aftakkingen [VDI, 1988]



Figuur 9.13 Drukval voor aftakkingen (aanzuigen) [VDI, 1988]

onderscheid gemaakt tussen de verhouding van het doorstroom oppervlak leiding/diffusor. (Zie Figuur 9.12).

Voor plotselinge verwijding geldt dat  $K_{\text{expansion}}$  gelijk is aan 1 aangezien de oppervlakteverandering oneindig groot is (zie fig. 9.17) [Fox, 1985] en voor instroming van waterzak naar diffusor wordt 0,5 genomen.

Als het aantal segmenten groter is dan 1, dan is de snelheid  $v_i$  onbekend. Maar het debiet in het systeem is te vergelijken met een stroom van elektriciteit.

Voor de n-de uitstroomopening is de weerstand in de leiding oneindig groot aangezien hij is afgesloten aan het uiteinde van de buis.

$$\phi_i = \Phi_{in,i} \frac{R_{\text{totaal},i \rightarrow n}}{R_{\text{totaal},i \rightarrow n} + r_n} \quad (17)$$

waarbij:

$$r_i = \frac{1}{h_{sq \text{ edge},i} + h_{\text{expansie},i}} \quad (18)$$

en de totale weerstand van de rest van leiding en gaatjes volgt uit:

$$R_{\text{totaal},i \rightarrow n} = R_{l,i \rightarrow i+1} + \left( \frac{1}{r_{i+1}} + \frac{1}{R_{\text{totaal},i+1 \rightarrow n}} \right)^{-1} \quad (19)$$

Via een iteratieproces kan nu voor elk segment  $\phi$  worden bepaald.

Als ontwerpeis voor gelijkmatige uitstroming over de gaatjes wordt nu gewenst:

1.  $h_{\text{gaatje}} > 10 \times h_{\text{leiding}}$ ;
2.  $Re_{\text{gaatje}} < 1750$  (om vermenging te onderdrukken) [Steen, 1996];
3. Drukval diffusor-koud + diffusor-warm + drukval leiding + drukval warmtewisselaar < opvoerhoogte pomp (= 5 mwk bij  $\geq 1,2$  l/s).

Bovenstaande iteratieproces convergeert niet voor 100 achtereenvolgende gaatjes, aangezien elke weerstand tevens weer afhankelijk is van de stroming.

Een alternatieve methode is gezocht door het debiet gelijk te nemen aan:

$$\phi_{i \text{ gaatje},i} = \Phi_{\text{totaal}} \frac{1}{\Delta p_{\text{gaatje},i} + \sum_{x=1}^i \left( \frac{\phi_{\text{gaatje},i}}{\Phi_x} \Delta p_{\text{leiding},x} \right)} \cdot \frac{1}{\sum_{y=1}^n \left( \frac{1}{\Delta p_{\text{gaatje},y} + \sum_{x=1}^y \left( \frac{\phi_{\text{gaatje},y}}{\Phi_x} \Delta p_{\text{leiding},x} \right)} \right)} \quad (20)$$

Deze methode is niet realiseerbaar voor negatieve drukval (= drukopbouw) zoals bij aanzuigen plaats vindt.

Uiteindelijk is gekozen voor een zeer eenvoudig model volgens Perry. Uit Perry volgt dat de 'maldistribution' gelijk is aan:

$$1 - \sqrt{1 - \frac{|\Delta p_{\text{leiding}}|}{\Delta p_{\text{gaatjes}}}} \quad (21)$$

met:

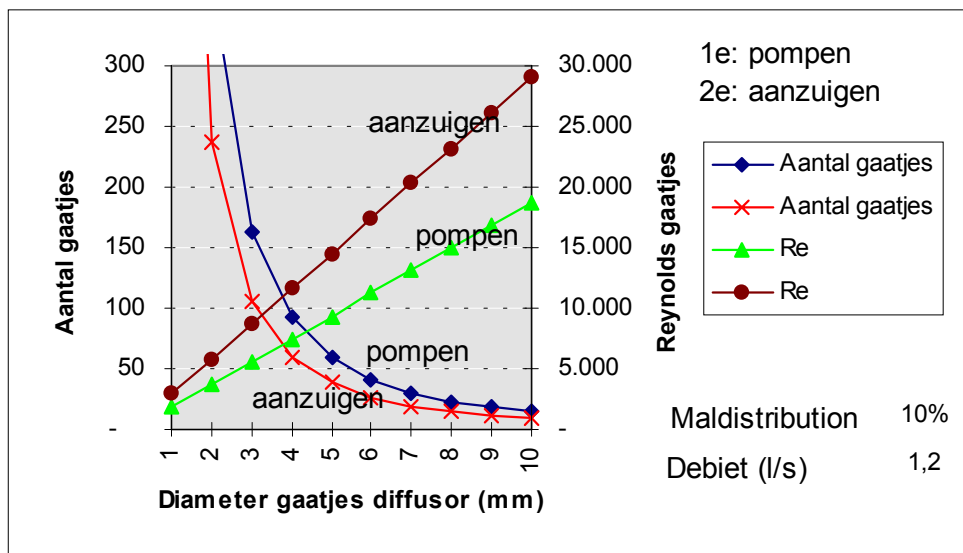
$$\Delta p_{\text{gaatjes}} = \frac{1}{C_{\text{gaatje}}^2} \frac{\rho V_{\text{gaatje}}^2}{2} \quad (22)$$

waar  $C_{\text{gaatje}}$  de ontladingscoëfficiënt is (gelijk aan 0,62 voor ontladen) en:

$$\Delta p_{\text{leiding,pompen}} = \left( \frac{4fL}{3D} - 2K \right) \frac{\rho V_{\text{leiding,in}}^2}{2} \quad (23)$$

$$\Delta p_{\text{leiding,aanzuigen}} = \left( \frac{4fL}{3D} + 2K \right) \frac{\rho V_{\text{leiding,in}}^2}{2} \quad (24)$$

Bij de keuze van een 'maldistribution' van 10%, een leidingdiameter van 50 mm, een debiet van 1,2 l/s wordt uiteindelijk gekozen voor twee rijen van 40 gaatjes met een diameter van 4 mm.



Figuur 9.14 Aantal gaatjes en Reynoldswaarde als functie van diameter gaatjes diffusor

Tabel 9.2 Eigenschappen buismateriaal van de sproeileidingen

	PP (Polypropyleen)	PVC (Polyvinylchloride)	
Dichtheid	910	± 1300	Kg/m <sup>3</sup>
Temperatuur			°C
- max, continu	100	80	
- max, piek			
Lasbaarheid	ja		
Leidingweerstand			kPa/m
- 2 m/s, d=40/26,6 mm, T <sub>water</sub> = 10°C	1,729		
- 2 m/s, d=40/26,6 mm, T <sub>water</sub> = 60°C	1,442		
- 2 m/s, d=32/24,8 mm, T <sub>water</sub> = 10°C		1,886	
- 2 m/s, d=32/24,8 mm, T <sub>water</sub> = 60°C		1,572	

In Tabel 9.3 zijn de waarden weergegeven voor de sproeileidingen zoals die uit de ontwerpberekeningen volgen.

Tabel 9.3 Parameters sproeileidingen in testinstallatie

Diameter diffusor:	2 inch
Aantal rijen gaatjes:	2
Aantal gaatjes per rij:	40
Diameter gaatjes:	4 mm
Positie:	Horizontale uitstroming

## BIJLAGE 5 STRATIFICATIE-MODEL

Het onderstaande model is gebaseerd op de theorie van Van Berkel<sup>15</sup>.

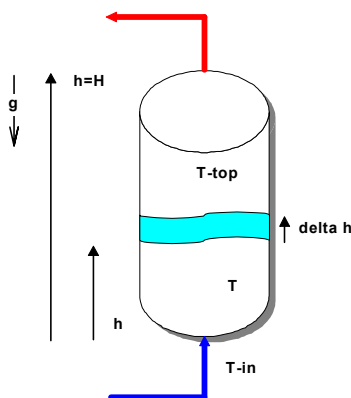
Instroming vanaf bodem:

Om de thermocline (=scheidingslaag) dikte te kunnen berekenen is een iteratieproces noodzakelijk. De snelheid waarmee de thermocline zich verplaatst is gelijk aan:

$$u_{th} = \frac{dh}{dt} = u_e + \frac{\Phi}{A_{buffer}} \quad (25)$$

met:

h                    hoogte van de thermocline als functie van de tijd (m); ( $0,1 H < h < 0,9 H$ )  
t                    tijd (sec);  
 $u_e$                 de entrainment snelheid als functie van de tijd (m/s);  
 $\Phi$                 het debiet ( $m^3/s$ );  
 $A_{buffer}$         het horizontale dwarsdoorsnee oppervlak van de tank ( $m^2$ )  
 $A_{buffer} = cst$  voor vierkante bak, = functie van de hoogte voor een horizontale cilindrische tank.



Aangezien het om een gesloten systeem gaat, volgt uit behoud van massa:

$$d(h\rho) = \left( \frac{\Phi}{A_{buffer}} \rho_{in} + u_e \rho_{top} \right) dt$$

of:

$$\frac{d(h\rho)}{dt} = \frac{\Phi}{A_{buffer}} \rho_{in} + u_e \rho_{top}$$

De 'entrainment' snelheid  $u_e$  volgt uit de balans voor de mechanische energie.

Figuur 9.15 Ontladen warmte-opslag

Voor mechanisch evenwicht van een systeem geldt:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \left( \frac{1}{2} U^2 + gz \right) dV = -\Phi \rho_{top} gH + \Phi (p_{in} - p_{uit}) \quad (28)$$

waarin het drukverschil gelijk is aan:

$$p_{in} - p_{uit} = \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho_{top} gH + (\rho - \rho_{top}) gh \quad (29)$$

zodat geldt:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \left( \frac{1}{2} U^2 + gz \right) dV = \Phi \left( \frac{1}{2} \rho u^2 + (\rho - \rho_{top}) gh \right) \quad (30)$$

Door instroming verandert de potentiële energie van de buffer ten gunste van drie effecten:

1. Doordat de thermocline (met dichtheid  $\rho$ ) opschuift en daarmee het medium (met dichtheid  $\rho_{top}$ ) verdringt;

<sup>15</sup> Bron: [Jacob van Berkel, *Thermocline entrainment in stratified energy stores*, Proefschrift, Faculty of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, 9/1997.]

2. Doordat het instromende medium (met dichtheid  $\rho_{in}$ ) zich vermengt met het medium onder de thermocline (met dichtheid  $\rho$ ) waardoor het totale volume onder de thermocline een afwijkende dichtheid krijgt;
3. Door ‘entrainment’ schuift een smalle laag  $u_e dt$  op en gaat over van dichtheid  $\rho_{top}$  naar  $\rho$  die zich vermengt met de laag onder de thermocline.

oftewel:

$$\frac{dE_{pot}}{dt} = \Phi(\rho - \rho_{top})gh + \Phi(\rho_{in} - \rho)g\frac{h}{2} + (\rho - \rho_{top})u_e A_{buffer}g\frac{h}{2} \quad (31)$$

Uit vergelijkingen (30) en (31) volgt nu de balans voor de mechanische energie:

$$\Phi(\rho_{in} - \rho) + u_e A_{buffer}(\rho - \rho_{top}) = \frac{\rho u^2}{gh} \Phi \quad (32)$$

Met de introductie van een kinetische energie conversie rendement  $\eta$  volgt uit vergelijking (32):

$$\Phi(\rho_{in} - \rho) + u_e A_{buffer}(\rho - \rho_{top}) = \eta \frac{\rho u^2}{gh} \Phi \quad (33)$$

Het Richardson kental relateert twee effecten: een stratificatie-effect en een meng-effect wat kan optreden bij instroming. Het overal Richardson getal is gelijk aan:

$$Ri_h = \frac{g\beta \Delta TH}{u^2} = \frac{g\Delta\rho H}{\rho u^2} \quad (34)$$

waar:

$\beta$  uitzettingscoëfficiënt ( $K^{-1}$ )

Waar het Reynoldsgetal wordt gedefinieerd als:

$$Re_h = \frac{uH}{\nu} \quad (35)$$

Voor de lokale gradient van het Richardson getal in verticale richting z geldt:

$$Ri_g = \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} = \frac{g \frac{\Delta \rho}{\delta}}{\rho \left( \frac{u}{\delta} \right)^2} = \frac{g\Delta\rho}{\rho u^2} \delta = Ri_H \frac{\delta}{H} \quad (36)$$

waarbij:

$\Lambda$  de thermocline dikte  
 $H$  hoogte opslagtank  
 $h$  hoogte thermocline

Het rendement wordt  $CTE = \frac{Q_{ontladen}}{Q_{laden}}$  genoemd (‘Cycle Thermal Efficiency’), welke gerelateerd is aan het Richardson getal [Berkel, 1997]. De onttrekkingstemperatuur volgt nu rechtstreeks uit CTE.

De verhouding tussen de thermocline dikte en de hoogte van de tank ligt in werkelijkheid tussen de 0,05-0,1.



De 'entrainment' verhouding E wordt gedefinieerd als:

$$E = \frac{u_e A}{\Phi} \quad (37)$$

De dikte van een thermocline is gelijk aan (indien  $Pe_\lambda=1$ ):

$$\delta = \frac{\alpha}{u_e} \quad (38)$$

De thermocline dikte wil men zo dun mogelijk houden om het effectief opslagvolume zo groot mogelijk te houden. De optimalisatie van de instroomsnelheid bepaald dus voor een belangrijk deel de CTE en de thermocline dikte.



## BIJLAGE 6 BEREKENING WARMTEVERLIEZEN

Het warmtetransport ('stationaire warmtestroomdichtheid') van het medium in de buffer naar de omgeving kan worden berekend door het temperatuurverschil tussen het opslagmedium en de omgeving gedeeld door de som van warmte-weerstanden [Incropera, 1990]:

$$q = \frac{T_{inside} - T_{outside}}{R_{constructie}} [W] \quad (39)$$

is specifiek voor de buffer gelijk aan:

$$q = \frac{T_{systeem} - T_{omgeving}}{R_{totaal}} [W] \quad (40)$$

waar bij de 'warmteweerstand' gelijk is aan:

$$R_{totaal} = \frac{l}{\alpha_{inside} A} + \sum \frac{d}{kA} + \frac{l}{\alpha_{outside} A} [K / W] \quad (41)$$

waar: d = dikte laag [m]  
 A = oppervlak [m<sup>2</sup>]  
 k = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/mK]  
 I<sub>inside</sub> = convectiecoëfficiënt binnenzijde (stilstaand water) van de constructie [W/m<sup>2</sup> K]  
 I<sub>outside</sub> = convectiecoëfficiënt buitenzijde (natuurlijke convectie van buitenlucht, bodem) van de constructie [W/m<sup>2</sup> K]

Warmte-uitwisseling door middel van straling wordt verwaarloosd aangezien het temperatuurverschil relatief zeer beperkt is.

*Natuurlijke convectie:*

Voor verticale vlakken waarbij temperatuurverschil kleiner is dan 15°C geldt [Polytechnisch Zakboekje G1]:

$$\alpha_{outside,vert} = 2,6 * (T_{outside} - T_{omgeving})^{\frac{1}{4}} [W / m^2 K] \quad (42)$$

Voor horizontale warme vlakken geldt [Polytechnisch Zakboekje G1]:

$$\alpha_{outside,hor} = 3,3 * (T_{outside} - T_{omgeving})^{\frac{1}{4}} [W / m^2 K] \quad (43)$$

Tabel 9.4 *Parameters isolatie waterzak*

Naam:	Glaswoldeken	Styrofoam isolatieplaten
Dikte (mm)	100	40
Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK)	0,035	0,030



## BIJLAGE 7 WARMTEOVERDRACHT WARMTEWISSELAAR

Algemeen geldt dat de totaal overgedragen warmte gelijk is aan:

$$Q = UA\Delta T_{in} \quad (44)$$

met:

$$U = f(a_{\text{primair}}, \alpha_{\text{wand}}, \alpha_{\text{secundair}}) \quad (45)$$

De warmte-overdrachtscoëfficiënt is een functie van de stromingstoestand, de fysische eigenschappen van de media en van het type apparaat.

$$\Delta T_{in} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (46)$$

met:

$$\Delta T_1 = T_{\text{primair},in} - T_{\text{secundair},uit} \quad (47)$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{primair},uit} - T_{\text{secundair},in} \quad (48)$$

en voor de warmtewisselaar geldt:

$$Q = mc_p (T_{uit} - T_{in}) \Big|_{\text{secundair}} = \eta_{ww} mc_p (T_{in} - T_{uit}) \Big|_{\text{primair}} \quad (49)$$

Indien er geen warmtevraag is en leidingverliezen verwaarloosd worden, geldt in principe:

$$Q_{\text{laden}} = \eta_{ww} P_{CV} \quad (50)$$

Het warmteverlies van de warmtewisselaar volgt uit de energiebalans:

$$\rho_{\text{glycol}} FL_{01} c_{p,\text{glycol}} (TI_{02} - TIC_{03}) = \rho_{\text{water}} FL_{02} c_{p,\text{water}} (TI_{07} - TI_{08}) + Q_{\text{verlies,omgeving}} \quad (51)$$



## BIJLAGE 8 BESLISTABELLEN LADEN OF ONTLADEN

Tabel 9.5 *Beslistabel wanneer warmte ontladen kan worden*

	$Q_{vspl, piek} \geq 0$		$Q_{vspl, piek} < 0$	
	Normaaltarief	Daltarief <sup>16</sup>	Normaaltarief	Daltarief
Zonnecollector <sup>17</sup>	$P_{zon} < P_{vraag}$			
WKK	$P_{WKK} < P_{vraag}$			
	$P_{WKK, min} > P_{vraag}$ En $Q_{vspl} > 0$		$P_{WKK, min} > P_{vraag}$	
Warmtepomp	$P_{WP} < P_{vraag}$			
	altijd	-	-	-
	-	$P_{WP, min} > P_{vraag}$ en $Q_{vspl} > 0$	-	$P_{WP, min} > P_{vraag}$
Warmtenet (aansluitwaarde)	$P_{warmtenet, aansluitwaarde} < P_{vraag}$			
CV	-	-	-	-

Tabel 9.6 *Beslistabel wanneer warmte geladen kan worden*

	$Q_{vspl, piek} \geq 0$		$Q_{vspl, piek} < 0$	
	Normaaltarief	Daltarief <sup>18</sup>	Normaaltarief	Daltarief
Zonnecollector <sup>19</sup>	$P_{zon} > P_{vraag}$			
WKK	$P_{WKK} > P_{vraag}$ En $Q_{vspl, min, piek} < 0$		$P_{WKK} > P_{vraag}$	
Warmtepomp	$P_{WP} < P_{vraag}$			
	$P_{WP} > P_{vraag}$ En $Q_{vspl, min, piek} < 0$		$P_{WP} > P_{vraag}$	
	-	$P_{WP} > P_{vraag}$ en $Q_{vspl, min, piek, piektarief} < 0$	-	-
Warmtenet (aansluitwaarde)	-		$P_{warmtenet, aansluitwaarde} > P_{vraag}$	
CV	-	-	-	-

<sup>16</sup> Werkdagen van 21.00 - 7.00 uur en weekenden.

<sup>17</sup> Piekvermogen kan volledig worden opgevangen door CV-ketel.

<sup>18</sup> Werkdagen van 21.00 - 7.00 uur en weekenden.

<sup>19</sup> Piekvermogen kan volledig worden opgevangen door CV-ketel.

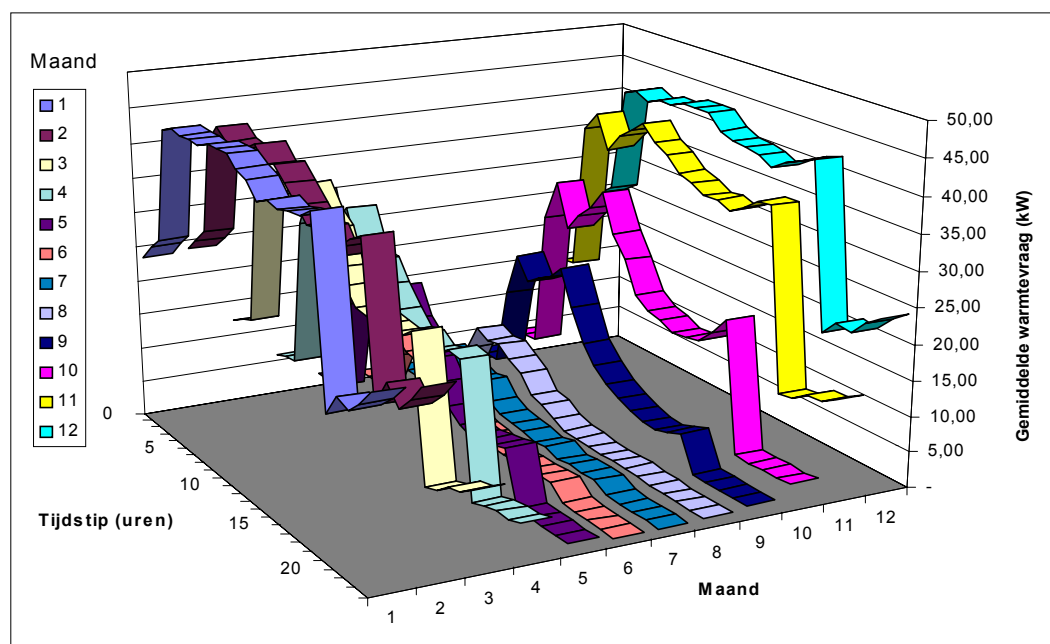




## BIJLAGE 9 VOORSPELLING WARMTEVRAAG & ZONAANBOD

### Voorspelling warmtevraag

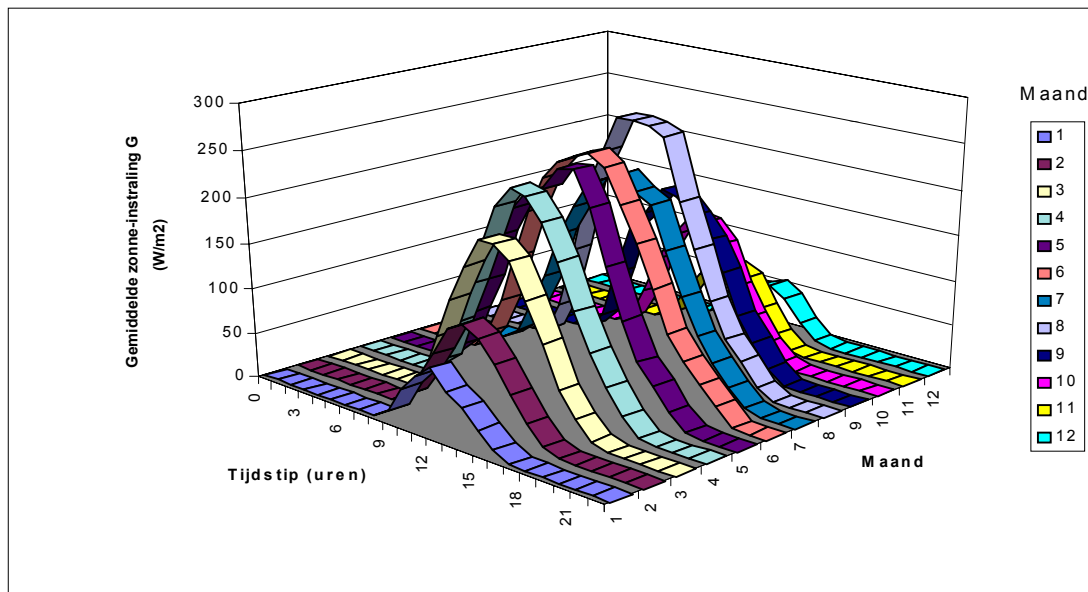
Per maand kan er een dagpatroon worden gegenereerd. Hierbij kan worden gebruik gemaakt van een tabel of van een ‘vergelijking van de trendlijn’ per maand. In **Figuur 9.16** is gebruik gemaakt van het warmtevraag patroon van het referentiegebouw uit de het onderzoek van de 1e fase (AL-gebouw). Met behulp van een schaalfactor wordt van het zelfde patroon gebruik gemaakt.



Figuur 9.16 *Gemiddelde warmtevraagpatroon over een etmaal per maand*

### Voorspelling warmte-aanbod zonnecollector

Per maand kan er een dagpatroon worden gegenereerd. Hierbij kan worden gebruik gemaakt van een tabel of van een ‘vergelijking van de trendlijn’ per maand.



Figuur 9.17 Gemiddelde zonaanbodpatroon over een etmaal per maand

### Voorspelling benodigde ontladcapaciteit

- Q voorspelling ontladen voor piekvraag

$$Q_{piek} = Q_{opslag,0} - \sum_{i=0}^{24uur} \left[ \min\left\{ \left( P_{vspl, warmtevraag,i} - P_{basislast} \right); P_{WW} \right\} dt + P_{opslag,verlies,i} dt \right] \quad (52)$$

Het vermogen van de warmtewisselaar ( $P_{ww}$ ) is een functie van het temperatuurniveau van de buffer en het temperatuurniveau waarop de warmtevraag zich voordoet. De temperatuur van de buffer kan worden geschat aan de hand van de voorspelling van de opslagcapaciteit van de buffer. Vergelijking 52 kan gebruikt worden voor een HR-ketel/warmtenet met piektarief.

- Q voorspelling ontladen voor piek- en minimumlastvraag

Indien er voor wordt gekozen om niet te laden, aangezien de warmtevraag kleiner wordt dan de minimumlast, geldt:

$$Q_{min,piek} = Q_{opslag,0} - \sum_{i=0}^{24uur} \left[ \begin{array}{l} \min\left\{ \left( P_{warmtevraag,i} \right); P_{WW} \right\} dt \Big|_{P_{vr} < P_{min}} \\ + \min\left\{ \left( P_{warmtevraag,i} - P_{basislast,i} \right); P_{WW} \right\} dt \Big|_{P_{vr} \geq P_{min}} \\ + P_{opslag,verlies,i} \end{array} \right] \quad (53)$$

Als ook de buffer wordt geladen tijdens minimumlast geldt dezelfde vergelijking als alleen voorspelling voor pieklast:

$$Q_{min,piek} = Q_{opslag,0} - \sum_{i=0}^{24uur} \left[ \min\left\{ \left( P_{warmtevraag,i} - P_{basislast,i} \right); P_{WW} \right\} dt + Q_{opslag,verlies,i} \right] \quad (54)$$

Bovenstaande twee vergelijkingen kunnen worden gebruikt voor een WP-systeem of warmtenet met tariefdifferentiatie.

- Q voorspelling ontladen voor piek- en minimumlastvraag en tijdens piektarief

Indien er voor wordt gekozen om niet te laden indien de warmtevraag kleiner wordt, dan geldt voor de minimumlast:

$$Q_{\min, \text{piek}, \text{piektarief}} = Q_{\text{opslag}, 0} - \sum_{i=0}^{24 \text{uur}} \left[ \begin{array}{l} \min\{P_{\text{warmtevraag}, i}; P_{\text{WW}}\} dt \Big|_{P_{\text{vr}} < P_{\min}} \\ + \min\{P_{\text{warmtevraag}, i}; P_{\text{WW}}\} dt \Big|_{P_{\text{vr}} \geq P_{\min}, \text{piektarief}} \\ + \min\{P_{\text{warmtevraag}, i} - P_{\text{basislast}, i}; P_{\text{WW}}\} dt \Big|_{P_{\text{vr}} \geq P_{\min}, \text{daltarief}} \\ + P_{\text{opslag}, \text{verlies}, i} dt \end{array} \right] \quad (55)$$

of als ook de buffer wordt geladen tijdens minimumlast geldt:

$$Q_{\min, \text{piek}, \text{piektarief}} = Q_{\text{opslag}, 0} - \sum_{i=0}^{24 \text{uur}} \left[ \begin{array}{l} \min\{P_{\text{warmtevraag}, i}; P_{\text{WW}}\} dt \Big|_{P_{\text{vr}} < P_{\min}, \text{piektarief}} \\ + \min\{P_{\text{warmtevraag}, i} - P_{\text{basislast}, i}; P_{\text{WW}}\} dt \Big|_{\text{daltarief}} \\ + P_{\text{opslag}, \text{verlies}, i} dt \end{array} \right] \quad (56)$$

Bovenstaande twee vergelijkingen kunnen worden gebruikt voor een warmtepomp-systeem of warmtenet met tariefdifferentiatie.

Algemeen geldt nu:  $Q_{\text{vspl}, \min, \text{piek}, \text{piektarief}} \leq Q_{\text{vspl}, \min, \text{piek}} \leq Q_{\text{vspl}, \text{piek}}$



## BIJLAGE 10 PRINTSCREEN VAN MEET- & REGELPROGRAMMA

The screenshot shows a control software interface for a water tank system. The main window title is "Waterzak - excel-bestand: P:\SMEDING\VISUALBA.SIC\WATERZAK.95\DATA\ZON...". The interface is divided into several sections:

- Menu and Status:** Includes a menu bar (Bestand, Figuur, Meting, Excel versie, Instellingen, Venster, Help) and a status bar at the bottom showing "Stand 1a: Verwarmen" and the time "10:50:34".
- Control Panels:**
  - Start/Stop:** Starttijd: 0:00:00 uur, Startdatum: Woensdag 1-4-98.
  - Sampling:** Sampletijd meting: 0:20:00 uur, Sampletijd voorspel: 1:00:00 uur, Samplestappen voorspel: 10.
  - Control:** Controletijd meting: 0:00:10 uur, Controletijd mengklep: 0:00:05 uur.
  - Power:** Huidige warmtevraag: 41,1 kW, Nu laden: 42,3 kW, Nu ontladen: 0 kW.
  - Temperature:** Ketelwatertemp.: 56,28 °C, Stand mengklep\_EV: 0V, Nu laden: 10 kW, Dempingsfactor mengklep: 0,02.
  - Energy Saving:** Checked options for "Grote Energievermietiger" and "Kleine Energievermietiger".
  - Water Temperature:** "Temperatuur waterzak:" section with initial and current temperatures for various sensors (TI\_09 to TI\_13).
  - CV Regulation:** "CV regeling" section with "Thermostaat Aan/Uitf" and "Overschakel T-ketel setpoint (°C)" set to 20.
  - Data Logging:** "Aansturing datalogger" section with checkboxes for various sensors (V\_01 to V\_18) and actuators (P\_01, P\_02, CV).
- Measurement and Alarm Panels:**
  - Uitvoer metingen:** "Meting afgebroken" table showing data for "Warmtevraag" and "T buitenlucht" from 13:00:00 to 5:00:00 on 1-4-98.
  - Meting afgebroken:** Table showing "Sample" data for "FI-01", "FI-02", "TI-01", "TI-02", and "TIC-03" from sample 1 to 4.
  - Alarm melding:** "Geen bijzonderheden" (No special circumstances).
  - Informatie datalogger:** "Geen bijzonderheden" (No special circumstances).

Figuur 9.18 *Printscreen van programma om installatie van de waterzak aan te sturen*



## BIJLAGE 11 SOFTWAREMATIGE CALIBRATIE

### Softwarematige calibratie thermokoppels

Tijdens de vermogenmetingen is niet het verschil tussen de gemeten en de werkelijke waarde van een thermokoppel van belang, maar de afwijking tussen de thermokoppels onderling. Daarom zijn voor zowel het CV- als het waterzakstelsysteem op 18 augustus metingen verricht waarbij:

- het debiet constant is
- de CV-ketel uit staat
- het warmteafgiftesysteem uit staat (en de mengklep volledig staat kortgesloten)
- geen warmte over de warmtewisselaar wordt overgedragen doordat de andere pomp stil staat
- de waarde van TI-01 wordt als referentie gekozen

### *Meting CV-systeem:*

Bij hogere temperaturen dan omgevingstemperatuur treedt er warmteverlies op. Zie Figuur 3.1. Doordat er warmteverlies optreedt is het niet mogelijk dat op één tijdstip van meten dat alle thermokoppels dezelfde waarde aangeven. Ook moet rekening worden gehouden met een vertraging die optreedt in het systeem doordat de stromingssnelheid gelimiteerd is.

Veronderstelling:

Debiet	0,8 l/s
Diameter leiding	0,025 m
Volume WW	1 l
Cascade (verticaal)	5 l

Tijdsvertraging voor leiding (stand 1):

	Afstand (m)	Volume (l)	Vertraging (s)
TI-01 -> TI-03	2,25	1,10	1,38
TI-03 -> TI-02	6,00	2,95	3,68
TI-02 -> TI-04	6,70	3,29	4,11
TI-04 -> TI-01	7,10	3,49	4,36
Totaal	22,05	10,82	13,53

Tijdsvertraging voor cascade, ww, CV, warmteafgiftesysteem:

	Afstand (m)	Volume (l)	Vertraging (s)
TI-01 -> TI-03	-	-	-
TI-03 -> TI-02	-	1,00	1,25
TI-02 -> TI-04	-	-	-
TI-04 -> TI-01	0,50	4,75	5,94
Totaal	0,50	5,75	7,19

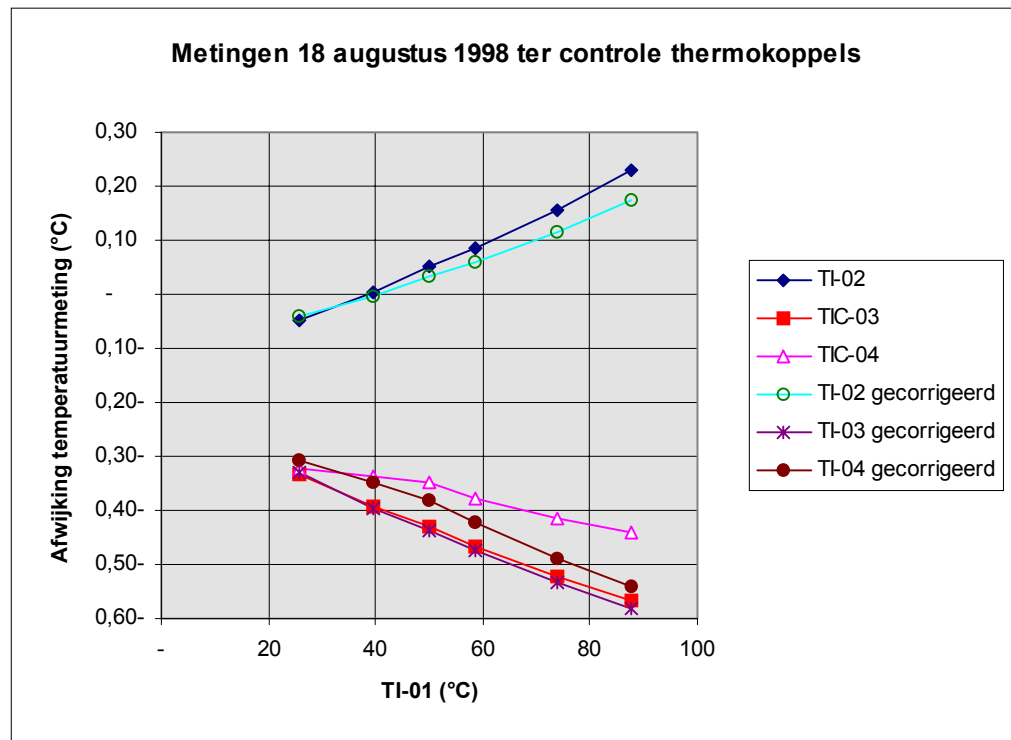
Totale tijdsvertraging:

	Volume (l)	Vertraging (s)
TI-01 -> TI-03	1,10	1,38
TI-03 -> TI-02	3,95	4,93
TI-02 -> TI-04	3,29	4,11
TI-04 -> TI-01	8,24	10,30
Totaal	16,58	20,72

Er zijn twee uitersten om te corrigeren voor het warmteverlies:

1. De leidingen zijn volledig geïsoleerd en het warmteverlies treedt volledig op in het cascadesysteem. TI-03, TI-02 en TI-04 moeten voor de verschuiving in de tijd gecorrigeerd worden. Aangezien het niet mogelijk is om elke seconde een meting te verrichten, is het niet mogelijk om de meting daadwerkelijk in de tijd te verschuiven.
2. Het warmteverlies treedt gelijkmatig over de lengte van het leidingsysteem op.

Het is niet mogelijk om het warmteverlies van beide afzonderlijke bijdragen te meten. De verwachting is dat het verschil tussen de twee methoden van corrigeren onderling nauwelijks verschil uitmaakt.



Figuur 9.19 Afwijking thermokoppels met en zonder correctie voor warmteverlies. Afwijking  $TI-02 = 0,0035 * TI-02 - 0,1396$ , Afwijking  $TI-03 = - 0,0041$

### Softwarematige calibratie flowmeter

Tijdens het laden en ontladen van de waterzak zijn metingen verricht om de correcte werking van de flowmeters te controleren. Hierbij zijn een viertal onafhankelijke gegevens naast elkaar gezet.

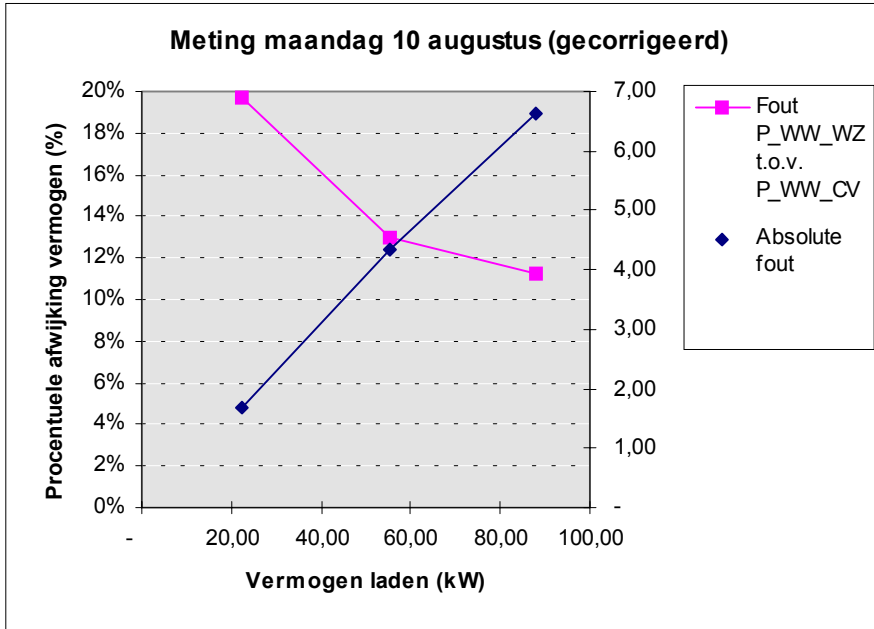
- Vermogen ketel gemeten door thermokoppels en flowmeter, met behulp van datalogger en PC;
- Vermogen waterzak gemeten door thermokoppels en flowmeter, met behulp van datalogger en PC;
- Gasverbruik (in m<sup>3</sup>) gedurende een vaste tijd (10 minuten) of vaker;
- Belasting ketel uitgelezen via display (meting om de minuut).

Het moet steeds gaan om stationaire waarden. Opwarming van de waterzak is echter niet geheel te verwaarlozen. Er zijn metingen verricht bij drie vermogen standen: ± 20 kW, 55 en 90 kW (maximaal vermogen laden).

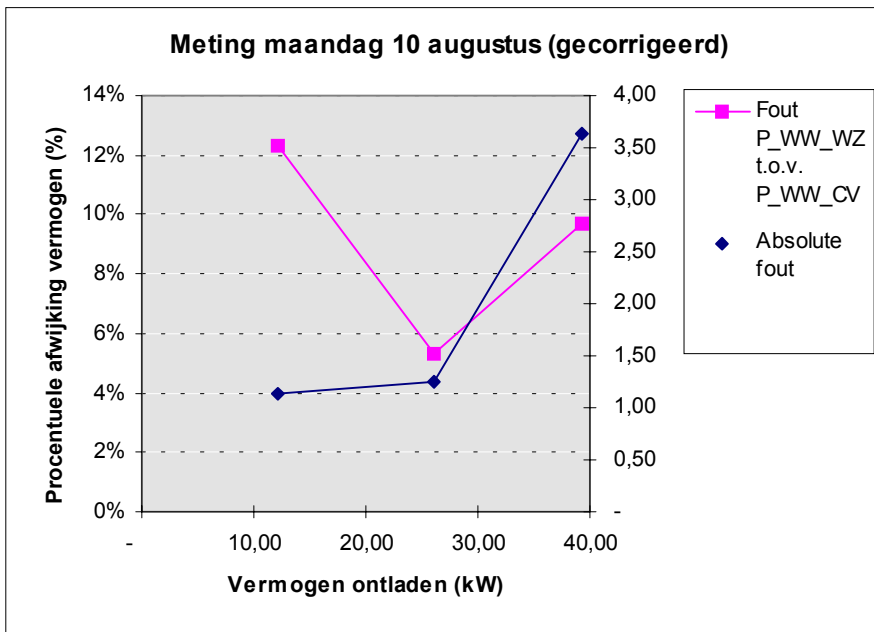
Aangezien het warmteverlies over de geïsoleerde warmtewisselaar vrijwel verwaarloosbaar is, moet het vermogen over de warmtewisselaar aan de CV-ketel zijde (P\_WW\_CV) vrijwel gelijk



zijn aan het vermogen aan de waterzakzijde ( $P_{WW\_WZ}$ ). In eerste instantie zat hier een duidelijk verschil in (Figuur 9.20 en Figuur 9.21). Aangezien de meetgegevens van het gasverbruik en de belasting van de ketel er op duiden dat het vermogen over de warmtewisselaar gemeten aan de waterzakzijde wel correct was, zijn de waarden van de flowmeter in het CV-systeem bijgesteld.



Figuur 9.20 *Gecorrigeerd overzicht van afwijking in gemeten gemiddelde vermogens over CV-ketel en warmtewisselaar tijdens laden*



Figuur 9.21 *Gecorrigeerd overzicht van afwijking in gemeten gemiddelde vermogens over CV-ketel en warmtewisselaar tijdens ontladen*

Tabel 9.7      *Softwarematige calibratie van uitgelezen waarden datalogger*

Thermokoppels:	TI_02 = Waarde datalogger van kanaal 304 * (1 - 0.0035) + 0.1396
	TIC_03 = Waarde datalogger van kanaal 305 * (1 + 0.0041) + 0.3307
	TIC_04 = Waarde datalogger van kanaal 306 * (1 + 0.0039) + 0.1976
Flowmeter:	FI_01 = Waarde datalogger van kanaal 301 * (1 + 0.0895)

## BIJLAGE 12 TOELICHTING SELECTIECRITERIA FTM

Tabel 9.8 *Toelichting bij de lijst met selectiecriteria en eigenschappen voor fase transformatie materialen*

Selectiecriteria/ eigenschappen:	Eenheid:	Opmerkingen:
Smeltpunt	°C	
Smeltwarmte	kJ/kg kJ/m <sup>3</sup>	
Soortelijke warmte (vast/vloeibaar)	kJ/kg K	
Dichtheid (vast/vloeibaar)	kg/m <sup>3</sup>	Bepaalt mede de volumetrische opslagcapaciteit.
Volumeverandering	%	Een lage volumeverandering is gunstig indien van inkapseling gebruik wordt gemaakt.
Warmtegeleidings- coëfficiënt	W/m K	
Moleculair gewicht	kg/kmol	
Dampspanning		De druk van een gas in evenwicht met een vloeistof of vaste stof bij een specifieke temperatuur. Een hoge dampspanning maakt inkapseling noodzakelijk.
Viscositeit	kg/m/sec	
Gewichtspercentage zout/water	%	
Kostprijs	f/kWh f/kg f/m <sup>3</sup>	Voor vergelijking is uitgegaan van een wisselkoers: 1\$=f2,-. Tevens is het referentiejaar vermeld van het jaar waarop deze kostprijs is gebaseerd. De bulkprijs van het ruwe product (grondstof) ligt lager dan de prijs van de FTM (incl. additieven). De kosten van inkapseling zijn hoog. Het gevolg hiervan is dat de prijs van het eindproduct beduidend hoger ligt dan de bulkprijs.
Veroudering/ degradatie		Na een groot aantal cycli van laden en ontladen kan de opslagcapaciteit afnemen door mechanisch en/of chemisch permanente verandering.
Ontwikkelingsfase		Uiteenlopend van laboratoriumschaal (experimenten), praktijktesten tot commercieel verkrijgbare FTM's
Corrosie		Oxidatie kan voorkomen worden door materiaal in te kapselen. Het opslagmateriaal moet dan wel inert zijn ten opzichte van het materiaal van de mantel.
Ontvlambaarheid/ explosieveiligheid Giftigheid		Niet alleen de samenstelling van het primaire opslagmateriaal is van belang, maar ook de additieven. Met name bij de productie- en afdankfase is dit een belangrijk criterium. Hier moet men denken aan irritatie van huid, ogen, luchtwegen. Verder moeten de risico's meegenomen worden lekkage van FTM uit de inkapseling in het transportmedium. Dit geldt met name voor tapwater toepassingen. Een (dubbel)gescheiden systeem zal daarom veelal de voorkeur genieten.
Emissie Geur		Sterk gerelateerd aan de dampspanning
Recyclebaarheid		Aangezien veel literatuur afkomstig is uit de jaren tachtig, komt dit aspect niet of nauwelijks aan bod
Smeltgedrag		Congruent of incongruent smelten

Onderkoeling	De vloeistof begint bij een lagere temperatuur, tot 40 °C en meer, dan het werkelijke smeltpunt te stollen. Geldt met name voor zouthydraten. Kan worden opgelost door goede kiemvormer toe te voegen. Onderkoeling kan reden zijn om voor toepassing een stof te kiezen met een 5 – 10 °C hoger smeltpunt.
Segregatie	Klontering (niet homogeen)
Additieven	Additieven worden gebruikt om het smeltpunt te verhogen/verlagen. Maar ook met name om onderkoeling te beperken, cq. om de kiemvorming te verhogen.
Transportmedium	Het medium dat de warmte-overdracht verzorgt tussen de FTM en de toepassing
Opslagsysteem	Veelal is inkapseling van de FTM noodzakelijk. Hierin wordt kort aangegeven welke materialen hiervoor in aanmerking komen. De sterkte van het materiaal wordt bepaald door volumeverandering.

## BIJLAGE 13 SPECIFICATIES THERMOKOPPELBOOM

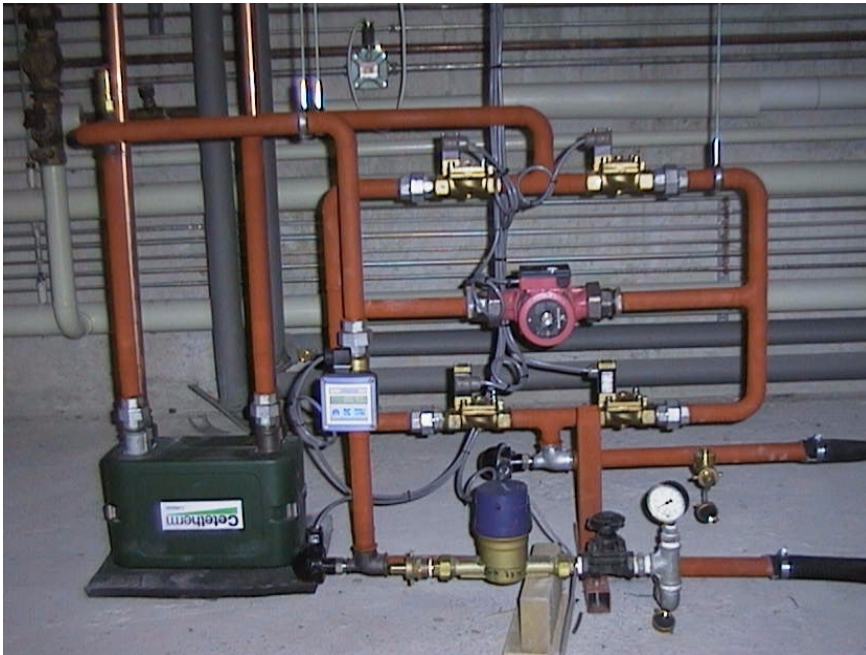
Bij het ontwerp van de onderlinge afstand van de thermokoppels in de waterzak is uitgegaan van de minimale hoogte van de waterzak van 700 mm. Gekozen is voor een onderlinge afstand van 115 mm zodat de thermokoppels gelijkmatig over de hoogte zijn verdeeld.

In de praktijk blijkt dat waterzak tot zijn maximale waarde van 850 mm te zijn gevuld. Zodanig is volgens onderstaand patroon de thermokoppels verdeeld:

	<b>Afstand ten opzichte van bodem (mm)</b>
<b>Top waterzak</b>	850
<b>TI-09</b>	735
<b>TI-10</b>	620
<b>TI-11</b>	505
<b>TI-12</b>	390
<b>TI-13</b>	275



## BIJLAGE 14 FOTO'S VAN TESTOPSTELLING



Figuur 9.22 *Warmtewisselaar en systeem van kleppen, pomp, thermokoppels en flowmeter gekoppeld aan waterzak*

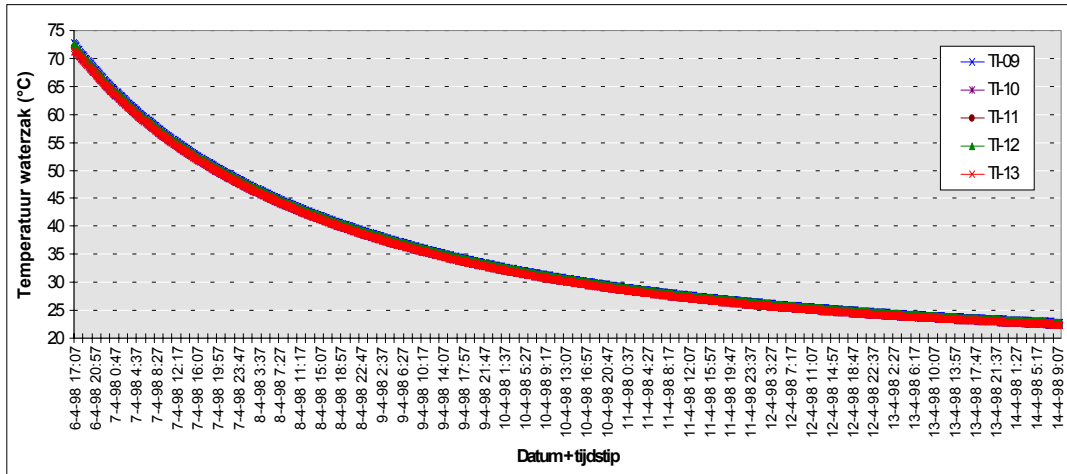


Figuur 9.23 *Waterzak in ongeïsoleerde toestand met flenzen voor het inbrengen van de sproeileidingen. Verder is boven in de waterzak een thermokoppelboom geplaatst voor het meten van de stratificatie*

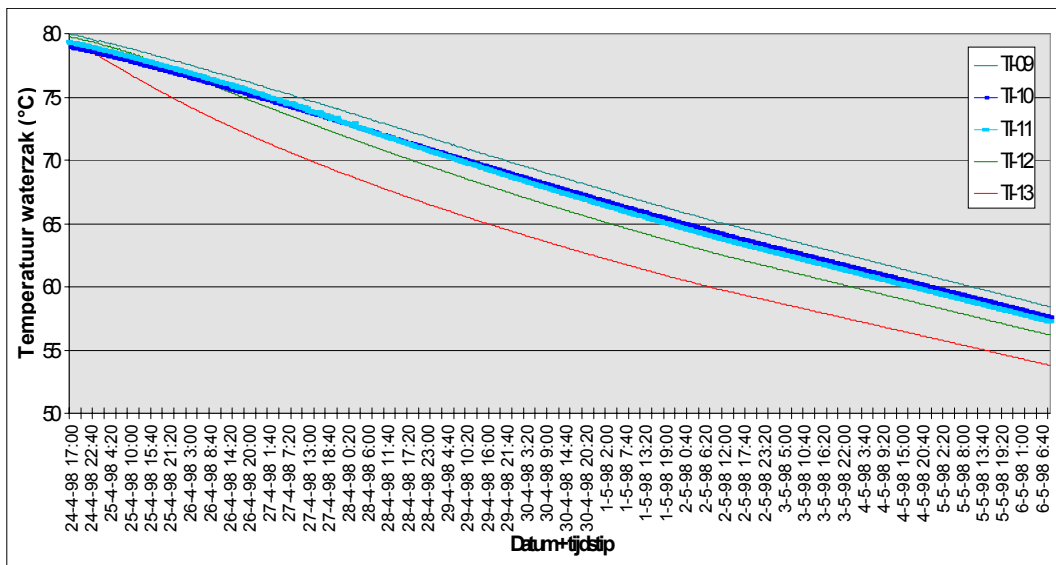




## BIJLAGE 15 RESULTATEN METING WARMTEVERLIEZEN



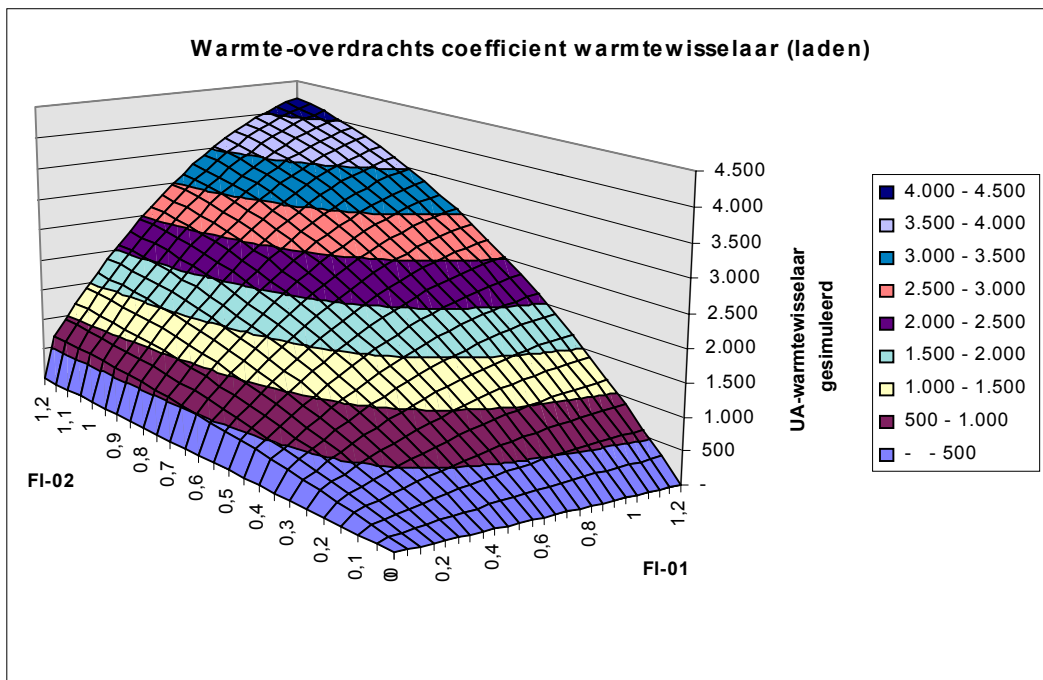
Figuur 9.24 Afkoeling van de waterzak zonder isolatiedeken in de periode van 6 tot 14 april 1998



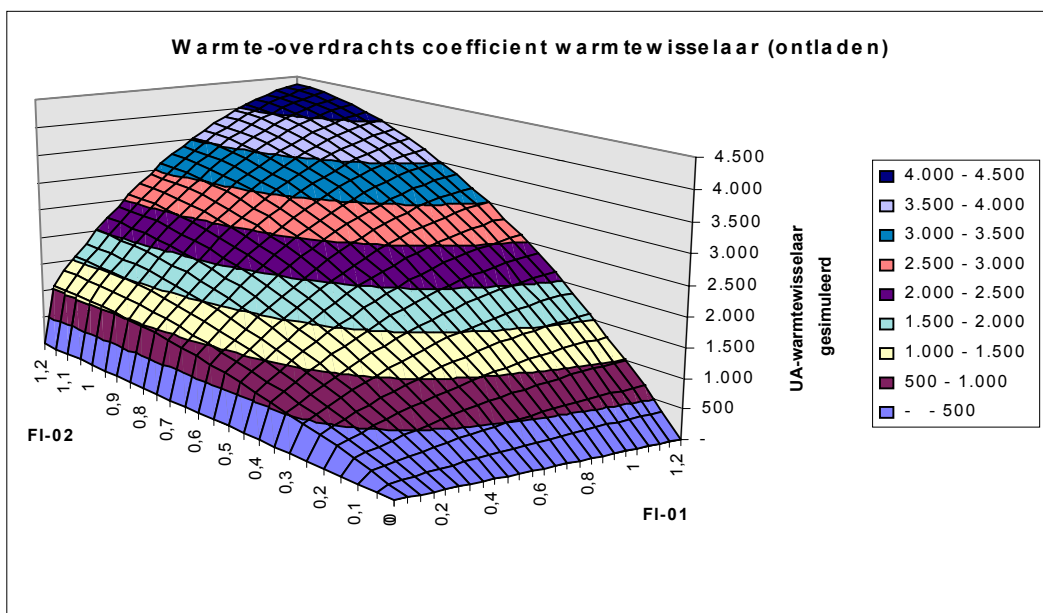
Figuur 9.25 Afkoeling van de waterzak met isolatiedeken in de periode van 24 april tot 6 mei 1998



## BIJLAGE 16 WARMTEOVERDRACHTS-COËFFICIËNT PLATENWARMTEWISSELAAR



Figuur 9.26 *Warmte-overdrachtscoëfficiënt voor de warmtewisselaar. Metingen verricht tijdens het laden van de waterzak*



Figuur 9.27 *Warmte-overdrachtscoëfficiënt voor de warmtewisselaar. Metingen verricht tijdens het ontladen van de waterzak*



## BIJLAGE 17 WAARDEN DEBIET

Met de pomp in het CV-systeem is het slechts mogelijk in één stand te verpompen. De stromingsweerstand door het warmteafgiftesysteem is relatief groot zodat het debiet in het CV-systeem hier in sterke mate van afhankelijk is. Om toch een stabiele regeling over de mengklep mogelijk te maken is in de bypass van het warmteafgiftesysteem een handmatig in te stellen 'weerstand' gebouwd. Deze wordt zodanig ingesteld dat de stromingsweerstand gelijk is aan de weerstand door het warmteafgiftesysteem. Hieronder wordt in een drietal tabellen de gemeten waarden weergegeven van het debiet van zowel het CV- als waterzakstelsel voor de verschillende standen van de kleppen. De waarden worden onder andere gebruikt bij de simulatieberekeningen.

Tabel 9.9 *Werkelijke debiet door het CV-systeem als functie van de stand van de kleppen waarbij mengklep volledig is kortgesloten*

	<b>Kleppen stand 1 (Laden)</b>	<b>Kleppen stand 2 (Ontladen)</b>	<b>Kleppen stand 3 (Laden)</b>	<b>Kleppen stand 4 (Ontladen zonder na-verwarming)</b>
<b>Stand mengklep V-11</b>	1	1	nvt.	1
<b>Warmteafgiftesysteem</b>	nvt.	nvt.	nvt.	nvt.
<b>Handmatige weerstand (kogelkraan)</b>	open	open	nvt.	Open
<b>Debiet (l/s)</b>	1,11	1,26	1,24	1,26

Tabel 9.10 *Werkelijke debiet door het CV-systeem als functie van de stand van de kleppen waarbij mengklep volledig is geopend*

	<b>Kleppen stand 1 (Laden)</b>	<b>Kleppen stand 2 (Ontladen)</b>	<b>Kleppen stand 3 (Laden)</b>	<b>Kleppen stand 4 (Ontladen zonder na-verwarming)</b>
<b>Stand mengklep V-11</b>	0	0	nvt.	0
<b>Warmteafgiftesysteem</b>	groot	groot	nvt.	Groot
<b>Handmatige weerstand (kogelkraan)</b>	nvt.	nvt.	nvt.	nvt.
<b>Debiet (l/s)</b>	0,94	0,96	1,24	1,26

Tabel 9.11 *Werkelijke debiet door het waterzak-systeem als functie van de stand van de pomp en de stand van de kleppen (status systeem)*

	<b>Kleppen stand 1 (Status 1, laden)</b>	<b>Kleppen stand 2 (Status 2, ontladen)</b>
<b>Stand pomp = 1</b>	0,51	0,50
<b>Stand pomp = 2</b>	0,79	0,76
<b>Stand pomp = 3</b>	1,14	1,08

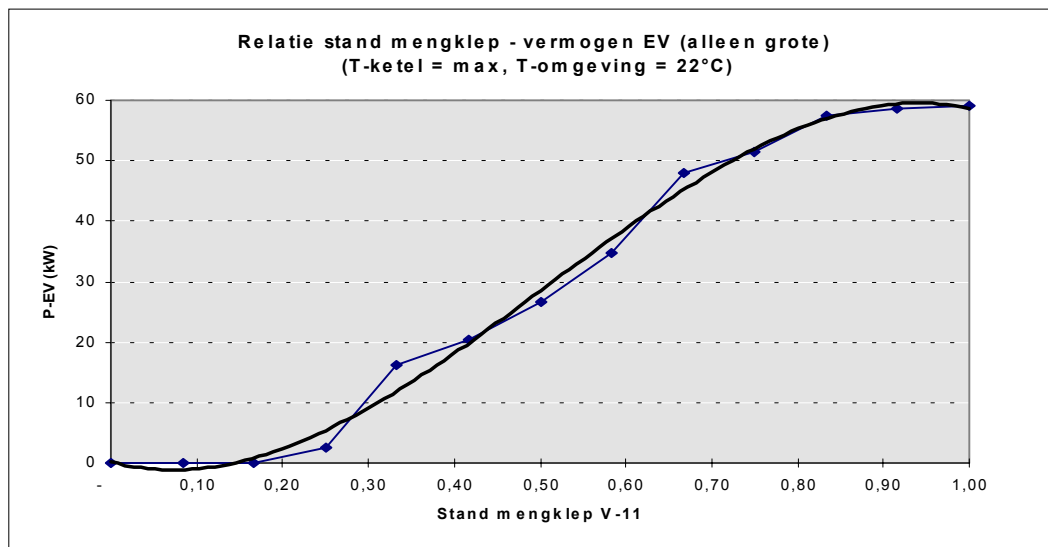


## BIJLAGE 18 REGELING MENGKLEP

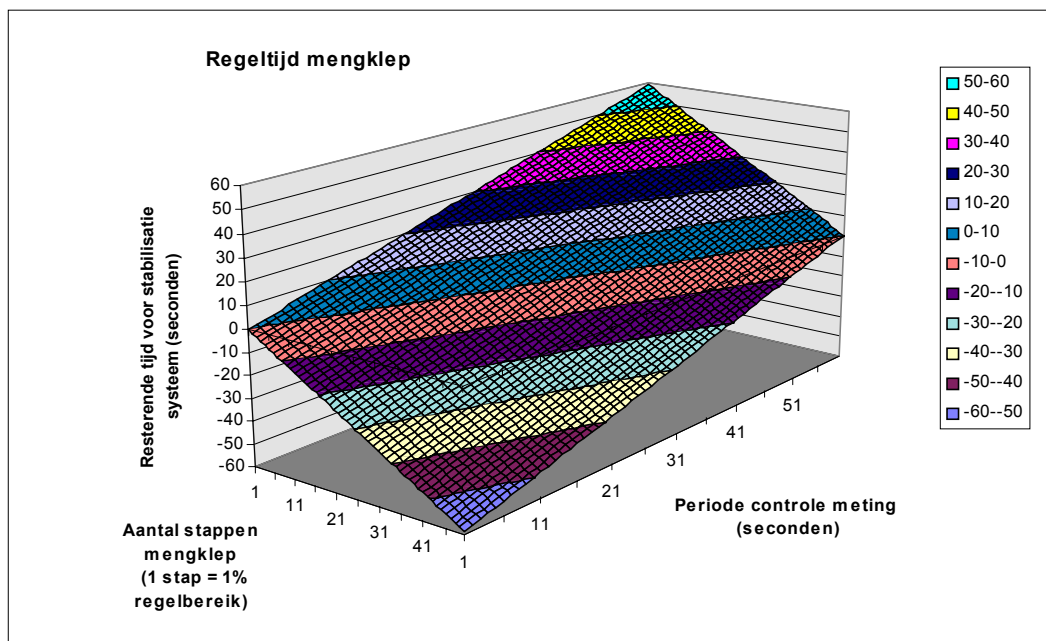
Na het in gebruik nemen van de installatie waren er problemen om de temperatuur met behulp van de mengklep in te stellen. Door het grote verschil in stromingsweerstand tussen stroming door het warmteafgiftesysteem en de bypass was het regelbereik slechts over een zeer smal traject mogelijk. Om de regelbaarheid te vergroten is een handmatige regelafsluiter gemonteerd in de bypass van het systeem om de stromingsweerstand over de bypass van warmteafgiftesysteem vergelijkbaar te maken met de weerstand door het warmteafgiftesysteem zelf.

Om een stabiele regeling te ontwikkelen was het noodzakelijk de minimale regeltijd van de mengklep te weten. Aangezien het reeds twee minuten duurt voordat de mengklep van helemaal open naar volledig gesloten gaat, is een snel regelend systeem niet mogelijk. Door een juiste keuze van de frequentie van controle van het systeem en een bijpassende stapgrote (zie Figuur 9.29), is het mogelijk te optimaliseren tussen enerzijds een korte regeltijd en anderzijds een stabiel systeem.

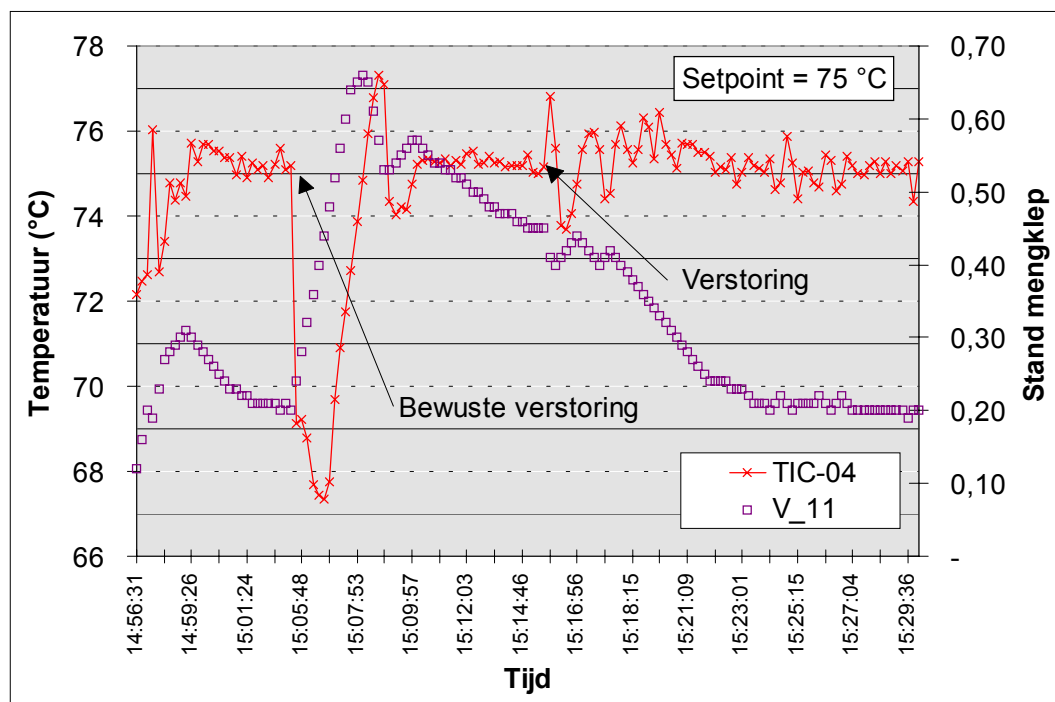
De regeling van het systeem is voor meerdere situaties getest. In Figuur 9.30 is te zien hoe het systeem de mengklep regelt na een zware verstoring in de ketelwatertemperatuur. Na ruim 6 minuten is de temperatuur van de TIC-04 weer gelijk aan de ingestelde waarde. Toch duurt het zo'n 15 minuten voordat het gehele systeem weer op de oorspronkelijke waarde (stand mengklep = 0,20) heeft gestabiliseerd. Met name het sterk modulerende karakter van de ketel draagt hier aan bij.



Figuur 9.28 *Regelbereik vermogen warmteafgiftesysteem als functie van de stand van de mengklep*



Figuur 9.29 *Regeltijd mengklep: Indien in een te hoge frequentie de mengklep met te grote stappen wordt bijgesteld is de resterende tijd voor stabilisatie van het systeem te beperkt (negatieve vlak) om een stabiel systeem te realiseren*



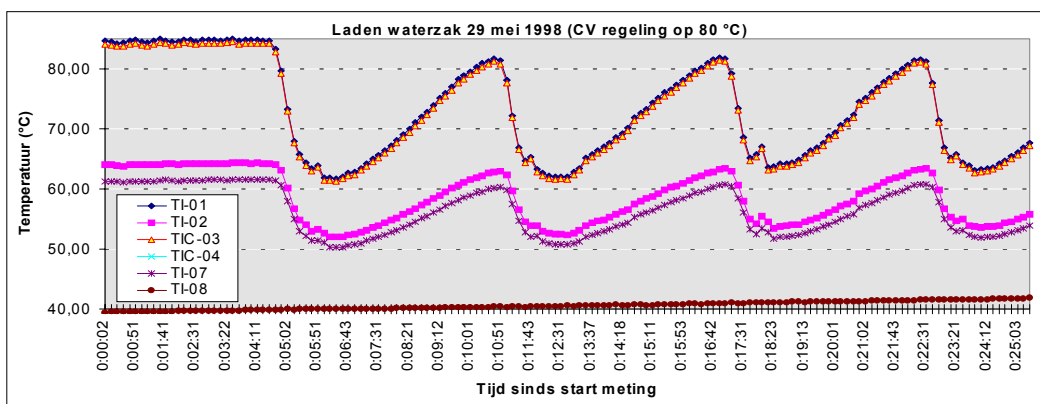
Figuur 9.30 *Controlemeting stabiliteit automatische regeling mengklep. Het setpoint van TIC-04 bedraagt 75°C. (Meting verricht op 13 augustus 1998, controletijd = 5 seconden)*



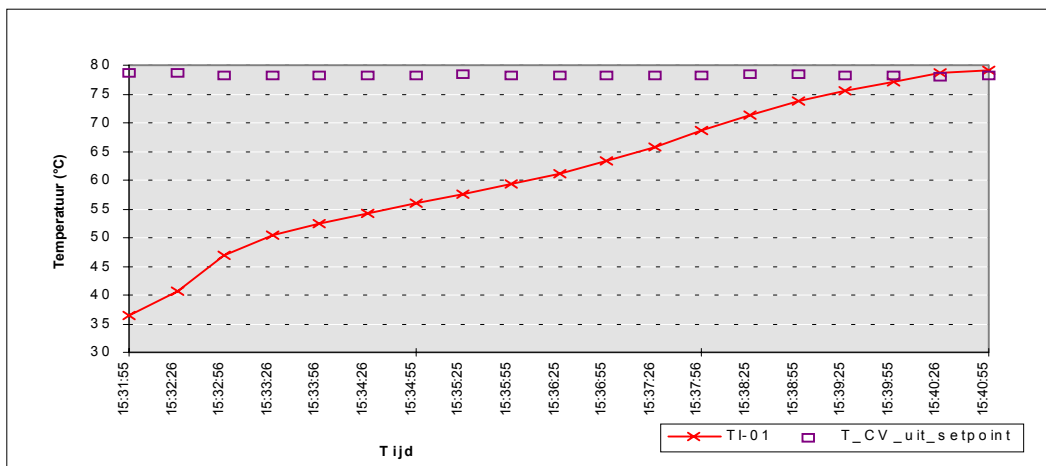
## BIJLAGE 19 REGELGEDRAG CV-KETELS

In eerste instantie was het niet mogelijk om de ketel in te stellen met de computer op een ketelwatertemperatuur. Het instellen van de gewenste temperatuur was alleen mogelijk door een aan/uit regeling van het CV-systeem. Het gevolg was dat in meest extreme situatie een schommeling van 20°C wordt gemeten, wat ontoelaatbaar is (Figuur 9.31).

Om de regeling van de ketelwatertemperatuur te verbeteren is het systeem aangepast middels een intelligente adaptieve regeling. Hiervoor is een nieuwe interface geplaatst en is nieuwe software ontwikkeld om met het meetsysteem te communiceren. Sindsdien is het mogelijk de beide CV-ketels onafhankelijk van elkaar te regelen. De snelheid waarmee de modulerende ketel het gewenste temperatuurniveau bereikt is gemeten en weergegeven in Figuur 9.32. De temperatuurstijging van de ketels bedraagt maximaal 4°C per minuut.



Figuur 9.31 *Uit en ingaande temperatuur van CV-ketel en waterzak. Meting is uitgevoerd met een debiet van FI-01 van 1,16 l/s en FI-02 van 1.2 l/s. Frequentie van metingen is om de tien seconden, van controle op TI-01 om de seconden. Ruim 4 minuten na start meting is setpoint TI-01 ingesteld op 80°C*



Figuur 9.32 *Modulerend karakter CV-ketel. Setpoint ketelwatertemperatuur = ± 79°C (Laden waterzak). In de eerste minuut treedt een snellere stijging op van de temperatuur doordat de waterzak reeds op 50°C bevond*



## BIJLAGE 20 INVLOED SAMPLETIJD OP METINGEN & SIMULATIES

Tabel 9.12 *Samenvatting van resultaten simulaties*

Warmte inhoud (kWh)	Simulatie sampletijd = 5 minuten	Simulatie sampletijd = 50 seconden	Vershil	Theoretische waarde
<b>Warmtevraag</b>	573,81	599,85	26,04	602,3
<b>Warmteafgiftesys- teem</b>	573,82	599,85	26,03	602,3
<b>Benutting WKK</b>	560,03	583,90	23,87	587,8
<b>Door CV geleverde energie</b>	35,21	33,71	1,5	33,5
<b>Geladen</b>	110,18	108,03	2,15	107,5
<b>Ontladen</b>	88,77	90,27	1,5	91,0
<b>Opwarming</b>	0,49	3,6	3,11	3,60
<b>Warmteverlies</b>				
- totaal	20,92 <sup>20</sup>	14,16	6,76	12,9
- P-gem (kW)	0,87	0,59	-0,26	0,54

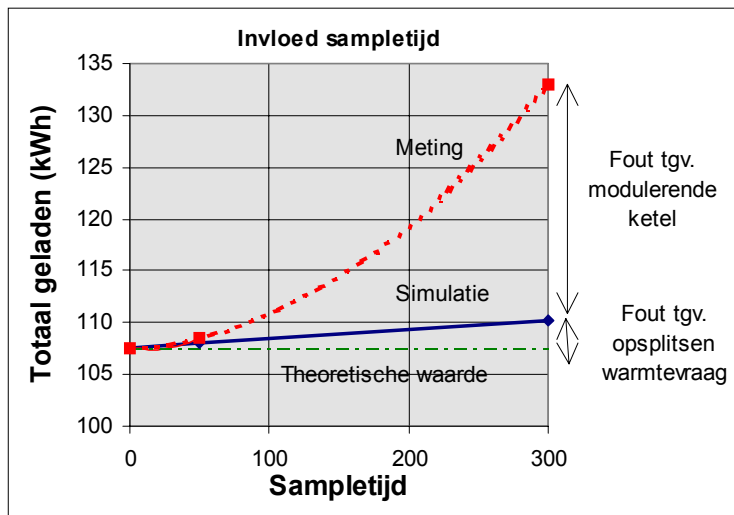
De resultaten kunnen worden geëxtrapoleerd tot de theoretische waarde (oneindig kleine sampletijd). Hieruit volgt dat het werkelijke warmteverlies voor simulatie aanmerkelijk kleiner is dan de waarde die volgt uit een sampletijd van 5 minuten (Tabel 9.12).

Tabel 9.13 *Samenvatting van resultaten metingen*

Warmte inhoud (kWh)	Meting sampletijd = 5 minuten	Meting sampletijd = 50 seconden	Vershil	Theoretische waarde (extrapolatie)
<b>Warmtevraag</b>	582	601	19	602,3
<b>Warmteafgiftesysteem</b>	633	618	-15	615
<b>Benutting WKK</b>	585	558	-27	554
<b>Door CV geleverde energie</b>	113	86	-27	81
<b>Geladen</b>	133	108	-25	104
<b>Ontladen</b>	75	77	2	77,3
<b>Opwarming</b>	0,3	7,3	7	7,5
<b>Warmteverlies</b>				
- totaal	57,7	23,7	-34	19,2
- P-gem (kW)	2,40	1,0	-1,4	0,8

Gedurende de metingen geeft een hogere samplefrequentie ook minder afwijkingen ten gevolge van het modulerende gedrag van de CV ketel en andere inschakeleffecten. Het warmteverlies is aanzienlijk lager en ligt met een waarde van 0,8 kW redelijk in de orde van de gemeten stationaire waarde van  $\pm 0,76$  kW.

<sup>20</sup> Hoogte warmteverlies volgt uit gemeten waarde stationair warmteverlies.

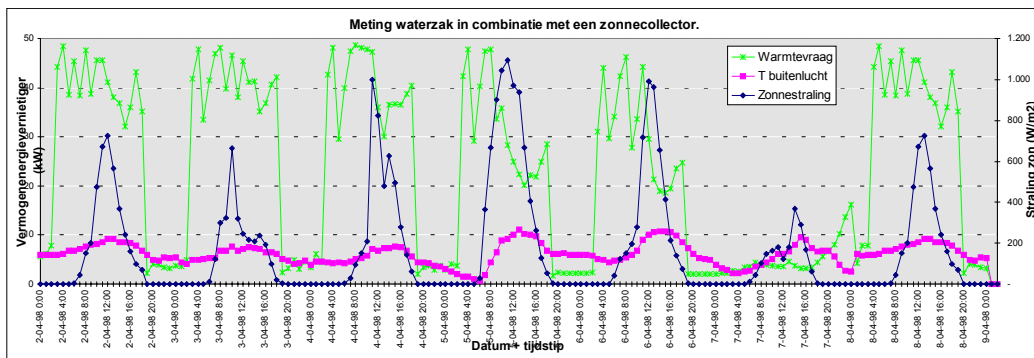


Figuur 9.33 *Invloed sampletijd op resultaat meting en simulatie*

# BIJLAGE 21 RESULTATEN MEETPROGRAMMA ZONNECOLLECTOREN

## ◆ Omschrijving meting

Het meetprogramma is gestart met de simulatie van een systeem waarbij voor ruimteverwarming gebruik wordt gemaakt van zonnecollectoren. Als periode van het jaar is gekozen voor een zonnige week in begin april (zie Figuur 9.34). Het voor- en najaar heeft als voordeel dat enerzijds de warmtevraag nog redelijk hoog ligt en anderzijds het zonaanbod reeds wat hogere waarden kan hebben.



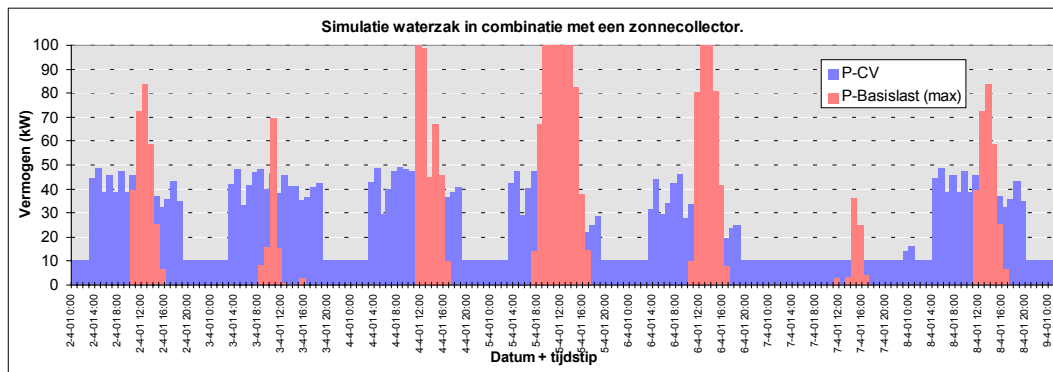
Figuur 9.34 *Warmtevraag referentiesituatie, tevens zonaanbod en buitentemperatuur*

Vooraf aan de metingen is de referentiesituatie gesimuleerd. In deze paragraaf worden naast de resultaten van de metingen ook steeds de overeenkomsten en verschillen met de simulaties vermeld. Verder is in sommige situaties een figuur van de referentiesituatie vermeld zonder warmteopslagmogelijkheid.

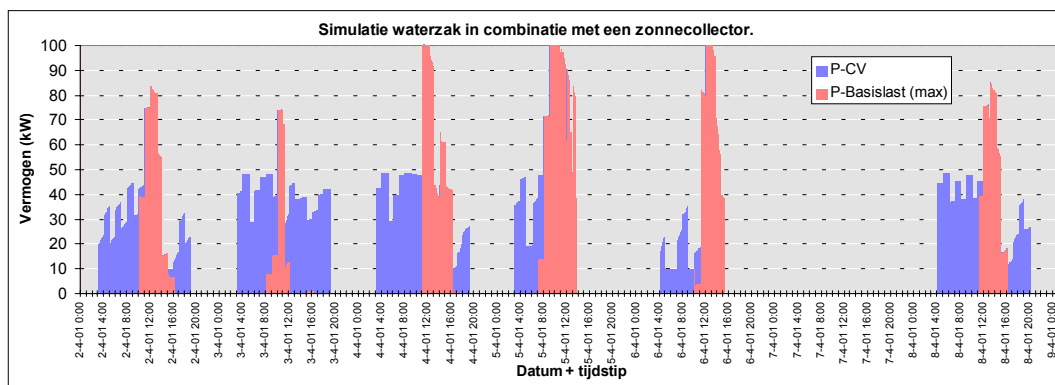
## ◆ Resultaten

De hoogte van het vermogen van de ketel is duidelijk gekoppeld aan het warmtevraagpatroon. Door de opslag van warmte is het mogelijk 's nachts en in het weekeinde bij lage warmtevraag de ketel uit te schakelen en alle warmte aan de buffer te onttrekken. Ook ligt het vermogen van de CV-ketel op tijdstippen dat de zon niet schijnt veelal lager doordat een deel van de warmtevraag gedekt wordt door ontladen van de waterzak. Duidelijk is ook te zien (zie Figuur 9.36 en Figuur 9.37) dat de bijdrage in het vermogen van de zonnecollectoren correspondeert met het zonaanbod. Een stralingsniveau van onder de  $250 \text{ W/m}^2$  levert hierbij nauwelijks een bijdrage.

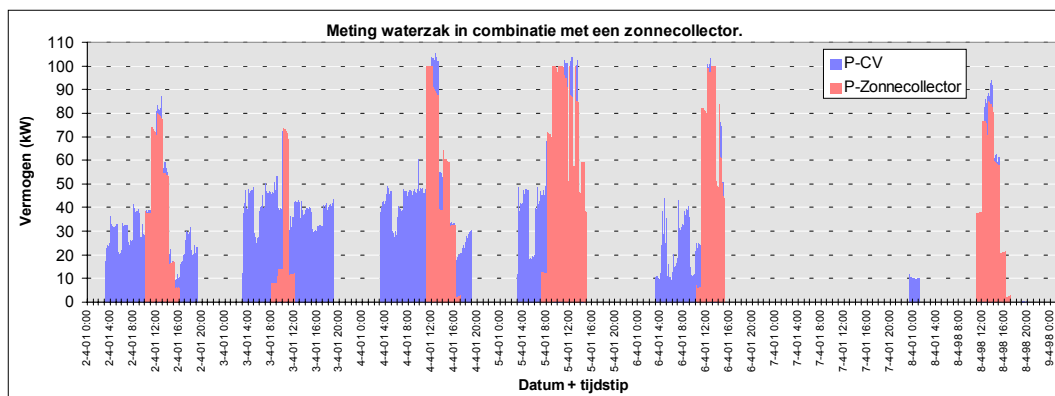
Opvallend incidenteel verschil is aanwezig op de laatste dag van de meting. Door een te laag drukkiveau in het CV-systeem als gevolg van een defect overdrukventiel, leverde de CV-ketel niet in alle situaties warmte (Figuur 9.37). In geval van verwarmen zonder laden of ontladen in combinatie met naverwarmen is het vermogen van de CV-ketel 'gefilterd'. Gedurende laden van de waterzak functioneerde de CV-ketel normaal. Omdat dit geen invloed heeft gehad op het laden en ontladen van de waterzak is besloten de meting niet opnieuw te verrichten.



Figuur 9.35 Vermogen ketel onderverdeeld in basislast (zonnecollector) en pieklast **zonder** opslag van warmte (simulatie). Minimum vermogen ketel bedraagt 10 kW



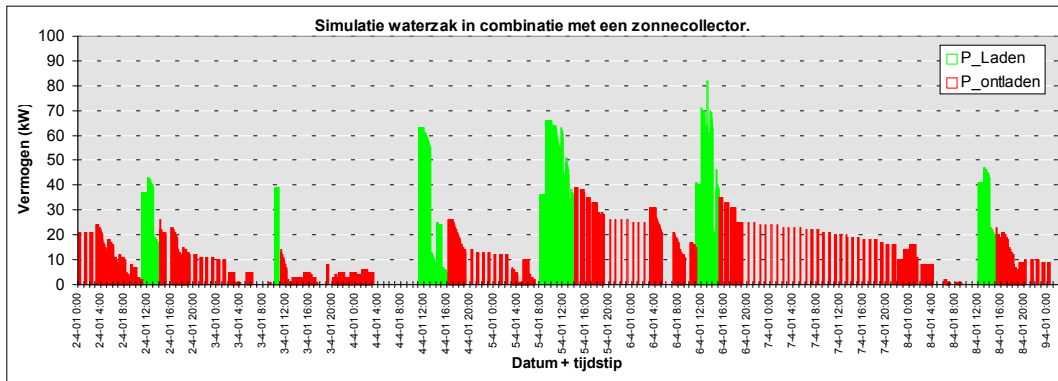
Figuur 9.36 Vermogen ketel onderverdeeld in basislast (zonnecollector) en pieklast (simulatie).



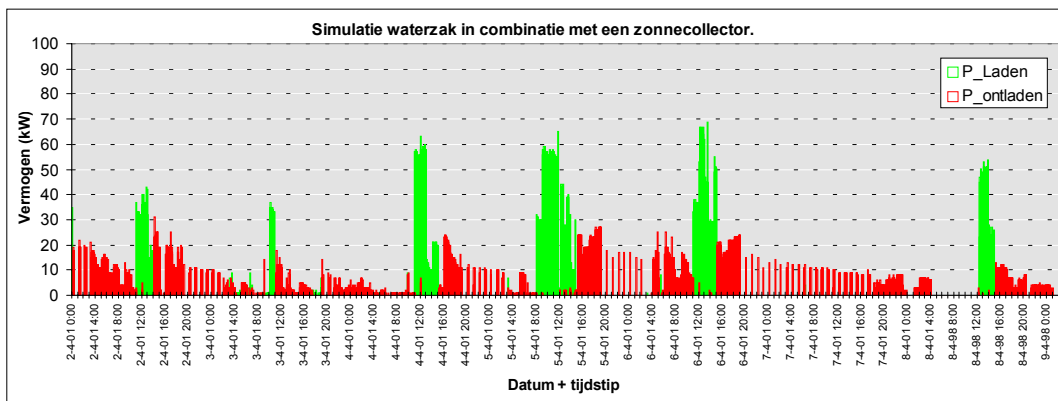
Figuur 9.37 Vermogen ketel onderverdeeld in basislast (zonnecollector) en pieklast (meting)

Het overschot aan warmte van de zonnecollectoren wordt zoveel mogelijk opgeslagen. Op de vierde dag van de meting (5 april) ligt het vermogen van laden fractioneel lager dan tijdens de simulatie berekend, deze afwijking is vrijwel volledig te verklaren met een niet optimale regeling van de CV-temperatuur gedurende deze specifieke situatie. Mede als gevolg hiervan is de waterzak ook minder in temperatuur gestegen. Hierdoor lag ook het vermogen van ontladen in de namiddag van 5 april lager dan in de simulatie.

Aangezien er geen frequentie geregelde pomp in het waterzakstelsel aanwezig is, ligt tijdens ontladen van de waterzak het vermogen hoger dan de warmtevraag. Om deze reden wordt de warmtevraag in tweeën gesplitst (zie § 2.8.1).

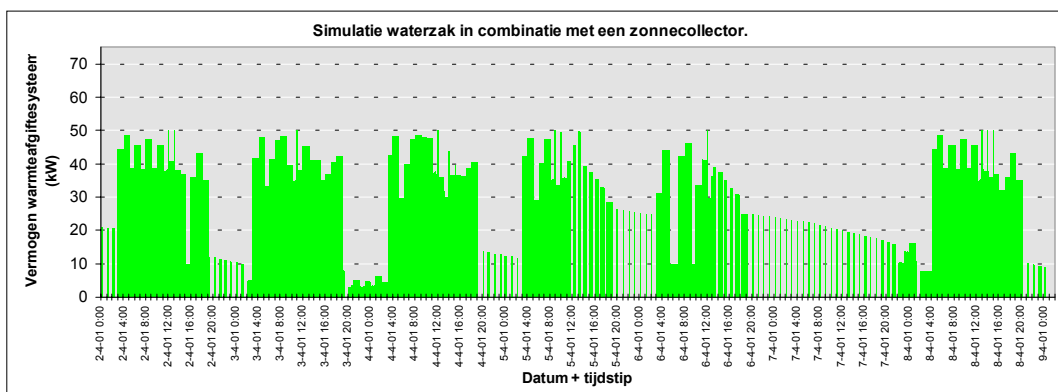


Figuur 9.38 *Vermogen laden en ontladen waterzak (simulatie)*

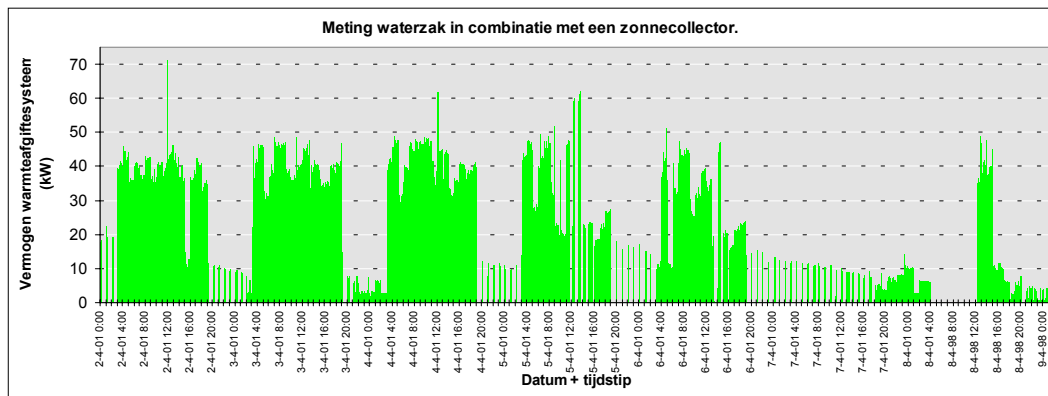


Figuur 9.39 *Vermogen laden en ontladen waterzak (meting)*

Het vermogen van de warmteafgifte komt in hoofdlijnen overeen met het warmtevraag patroon. Hierbij vallen een aantal zaken op die ook reeds in eerdere figuren zijn weergegeven: De 'gefilterde' warmtevraag door het defecte drukventiel van de laatste dag en het 'kam-achtige' patroon ten gevolge van het opsplitsen van de warmtevraag gedurende perioden van lage warmtevraag (zie § 2.8.1).



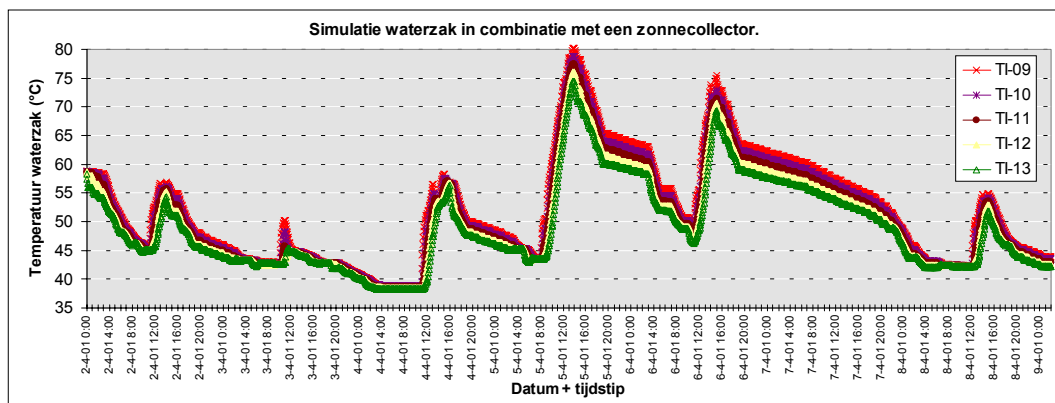
Figuur 9.40 *Vermogen warmteafgifte (simulatie)*



Figuur 9.41 *Vermogen warmteafgifte (meting)*

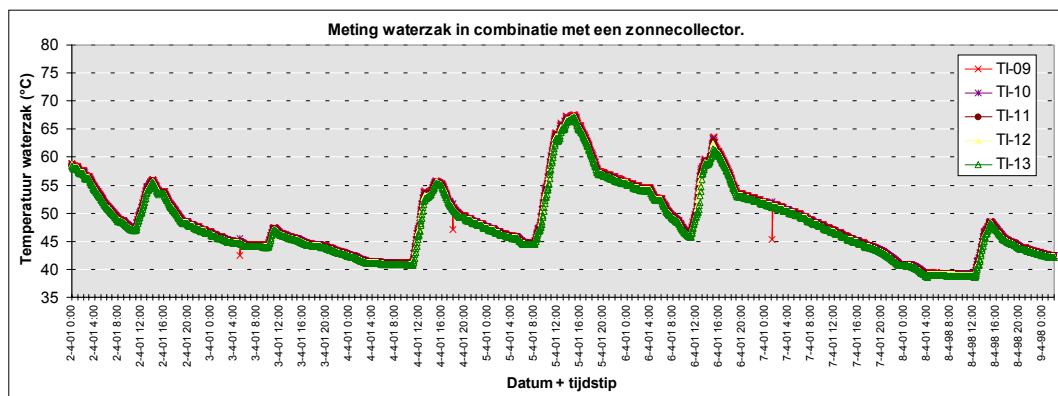
De schommeling van de temperatuur van de waterzak, een maat voor de energie-inhoud, komt overeen met het vermogen van het laden en ontladen. In de modelberekeningen wordt de waterzak in vijf segmenten verdeeld. Aangezien de waterzak ovaal van vorm is en de thermokoppelboom enigszins naar de top van de waterzak is geplaatst, is het volume van het bovenste segment kleiner dan van de overige segmenten. In het model wordt er vanuit gegaan dat in een segment volledige menging optreedt en dat tussen de segmenten onderling volledige stratificatie optreedt. Deze vereenvoudiging van het model is mogelijk de oorzaak dat in theorie de stratificatie groter is dan tijdens de metingen.

Het temperatuurniveau van de metingen blijft met name op de vierde dag (5 april) achter bij de waarde van de simulaties. Belangrijkste oorzaak is dat er minder energie geladen kon worden (217,4 kWh tegen 275,5 kWh), dit verklaart  $\pm 7^{\circ}\text{C}$ . Het verschil in energie-inhoud bedraagt 79,5 kWh, dit komt overeen met een temperatuurverschil van  $\pm 9,8^{\circ}\text{C}$ . Tenslotte zijn in de metingen een drietal meetfouten te signaleren waar de datalogger een foutieve waarde van het voltsignaal van de thermokoppels meet (zie Figuur 9.43), dit heeft verder geen enkel effect op de meetresultaten.



Figuur 9.42 *Temperatuurverloop waterzak (simulatie)*





Figuur 9.43 *Temperatuurverloop waterzak (meting)*

De extra benutting van de zonnecollectors volgt in feite uit het vermogen van het laden van de waterzak. Een maat voor de besparing van energie ten gevolge van een buffer komt overeen met de warmte die onttrokken (ontladen) is uit de buffer. De afwijking van het vermogen van de CV-ketel en de warmtevraag komt weer door de niet volledig correcte werking van de CV-ketel op de laatste dag. In Tabel 9.14 zijn alle belangrijkste waarden nog eens in een tabel samengevat. Hierbij is voor de meetwaarden een correctie toegepast op de gefilterde warmtevraag van de laatste dag van de meting en een correctie voor het te beperkt laden door een verkeerde setpointwaarde van de ketel op de vierde dag.

Tabel 9.14 *Samenvatting van resultaten metingen en simulaties. Percentages zijn tenzij anders aangegeven als percentage van de warmtevraag (3935 kWh)*

Warmte inhoud (kWh)	Geen opslag		Simulatie		Simulatie Nieuwe versie		Simulatie Nieuwe versie		Meting <sup>21</sup>	
	Sampletijd (sec)	300		300		300		50		300
Warmtevraag	3.935	100 %	3.851	97,9%	3.918	99,6%	3.930	99,9%	3.849	97,8 %
Warmteafgifte	3.935	100 %	3.760	95,6%	3.890	98,9%	3.907	99,3%	3.544	90,1 %
Aanbod zonnecollector	2.258	57,5 %	1.799	45,7%	1.623	41,2%	1.626	41,4%	1.823	46,3 %
Benutting zonnecollector	1.118	28,5 %	1.749	44,4%	1.475	37,5%	1.490	37,9%	1.594	40,5 %
- als % van aanbod		49,5%				90,9%		91,5%		87,4 %
Door CV geleverde energie										
- P <sub>minimaal</sub> =10 kW	3.260	82,7 %	1.928	49,0%	2.326	59,1%	2.257	57,4%	1.974	50,1 %
- P <sub>minimaal</sub> =0 kW	2.805	71,2 %								
Geladen	0	0 %	829	21,1%	562	14,3%	578	14,7%	805	20,5 %
- als % van zonaanbod										44,2 %
Ontladen	0	0 %	913	23,2%	651	16,5%	663	16,8%	794	20,2 %
Netto opwarming	0	0 %	123-	-3,1%	-159	-4,0%	-159	-4,0%	-135	-3,4 %
Warmteverlies										
- Totaal	0	0 %	39	1,0%	70	1,8%	74 <sup>23</sup>	1,9%	146	3,7 %
- P-gem (kW)			0,23 <sup>22</sup>		0,42		0,44		0,87 <sup>24</sup>	

Aangezien de gemiddelde temperatuur van de waterzak 51°C bedroeg, is de verwachting dat het stationaire warmteverlies  $\pm 0,57$  kW bedraagt (=96 kWh). Aangezien tijdens de meting voor de warmteafgifte een lagere waarde wordt aangeboden (3.544 kWh) dan gevraagd (3.935 kWh), lijkt de afname van het door de CV geleverde vermogen (2.805 naar 1.974 kWh) groter dan in werkelijkheid (2.805 naar  $\pm 2.200$  kWh).

In Tabel 9.14 zijn een aantal simulaties en de meting met elkaar vergeleken. Om het model te controleren op juistheid moet de simulatie met een sampletijd van 300 seconden worden verge-

<sup>21</sup> Meetwaarden gecorrigeerd voor storing CV ketel en door een foutieve aansturing van de CV-ketel in een procedure waar het vermogen van laden wordt aangepast, is  $\pm 92$  kWh minder geladen tijdens de meting.

<sup>22</sup> Warmteverlies berekent met behulp van theoretisch model

<sup>23</sup> In de berekening van het warmteverlies wordt in de simulatie gebruik gemaakt van de meetresultaten voor het stationaire warmteverlies.

<sup>24</sup> Warmteverlies tijdens meting ligt hoger dan in werkelijkheid tengevolge van invloed sampletijd en modulerend gedrag ketel. Werkelijke warmteverlies ligt in de buurt van 0,57 kW.

leken met de meting. De overige twee simulaties zijn met een nieuwere versie berekend dan waar de meting ook mee is verricht. De simulatie met een sampletijd van 50 seconden kan gezien worden als de beste benadering voor wat verwacht mag worden voor het gebruik van een zonnecollector met een buffer.

## BIJLAGE 22 RESULTATEN MEETPROGRAMMA WARMTEPOMP

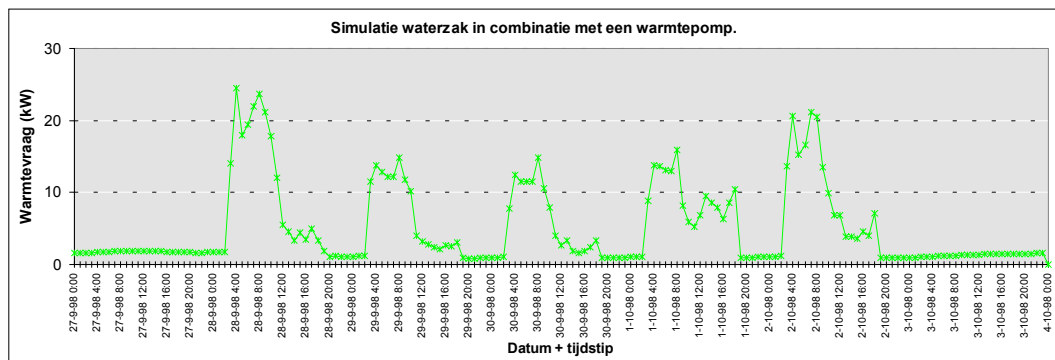
### ◆ Omschrijving meting

Om een tweetal redenen is voor het meetprogramma van de warmtepomp gekozen voor een laag maximaal vermogen van de warmtevraag (30 kW). Ten eerste omdat ten gevolge van het lage temperatuurverwarmingssysteem de warmtebuffer slechts over een klein temperatuurverschil benut kan worden. Gunstig is dat de verhouding van opslagvolume en vermogen warmtevraag groot is. Ten tweede is de capaciteit van de warmteafgifte bij lage ingaande temperatuur (lage temperatuurverwarmingssysteem) beperkt.

Opslag van warmte in een buffer in combinatie met een warmtepomp heeft een drietal doelen:

1. De benutting van de warmtepomp gedurende de daluren te vergroten;
2. Het opvangen van pieken in de warmtevraag;
3. Het opvangen van momenten waarop de warmtevraag lager is dan de minimum capaciteit van de warmtepomp.

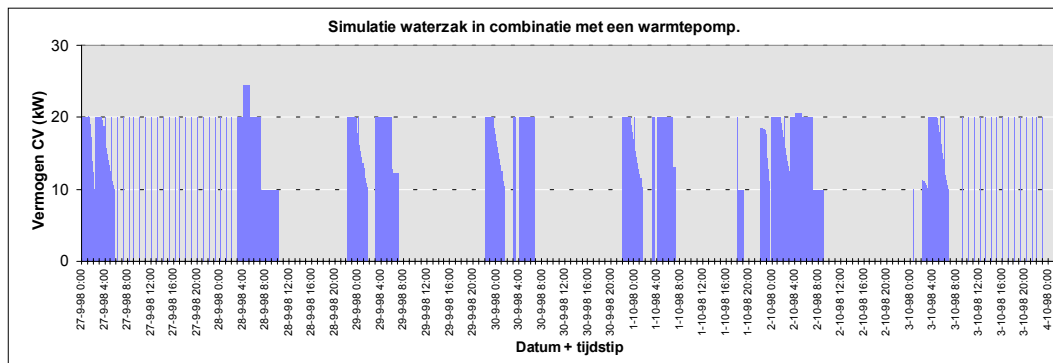
Gekozen is voor een periode in het najaar met een gemiddelde warmtevraag (Figuur 9.44). Duidelijk zijn hier de werkdagen te onderscheiden (hoge warmtevraag) van het weekend (lage warmtevraag).



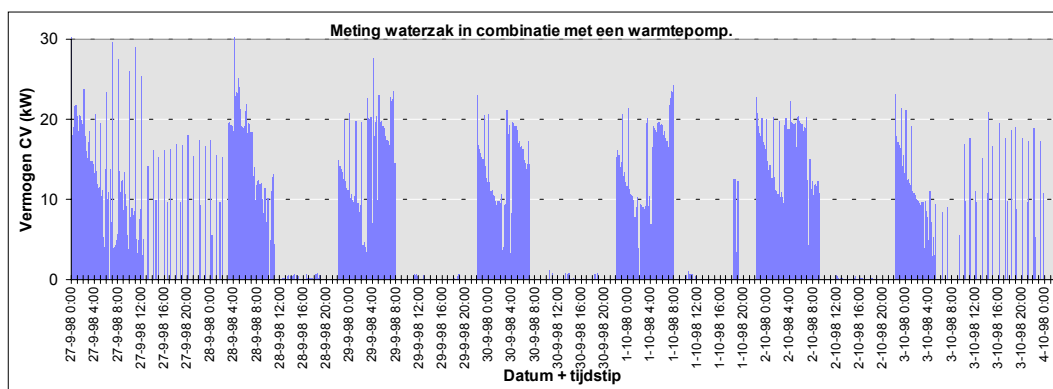
Figuur 9.44 Warmtevraag referentiesituatie. Piekvraag bedraagt 30 kW

### ◆ Resultaten

Uit de simulatie en meting volgt een duidelijke verschuiving van het aanbod van warmte ten opzichte van de warmtevraag (Figuur 9.45 en Figuur 9.46). In de nacht wordt de waterzak geladen totdat deze het minimum vermogen van de warmtepomp niet meer kan afstaan aan de warmtebuffer. Vervolgens treedt er een periode op waar de warmtepomp kort aanslaat om voor een deel aan de warmtevraag te voldoen en verder met een beperkt vermogen de warmtebuffer laadt. Eventueel kan om het aantal starts-stops te beperken ook gedurende de daluren de waterzak ontladen worden door de minimumvraag een hogere prioriteit te geven dan het laden van de waterzak. Aangezien de warmtevraag op werkdagen reeds gedurende de daluren sterk stijgt, wordt het vermogen van de warmtepomp gebruikt om rechtstreeks aan de warmtevraag te voldoen. Op het moment dat het normale elektriciteitsstarief in werking treedt, schakelt het systeem op ontladen van de waterzak. Indien de ontladcapaciteit niet toereikend is, wordt het water naverwarmd.

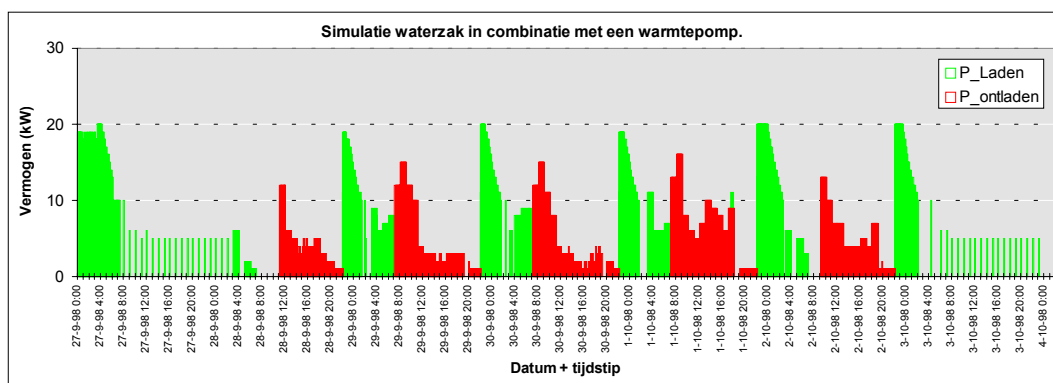


Figuur 9.45 *Vermogen ketel onderverdeelt in basislast en pieklast (> 20 kW) (simulatie)*

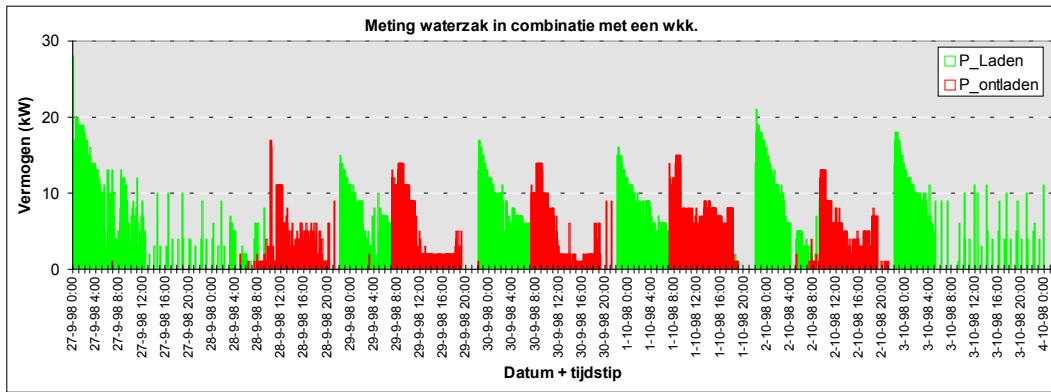


Figuur 9.46 *Vermogen ketel onderverdeelt in basislast en pieklast (> 20 kW) (meting)*

In de simulatie komt een vrijwel strikt gescheiden patroon voor van laden van warmte in de daluren en ontladen gedurende normaal tarief (Figuur 9.48). In de figuur is ook duidelijk te zien dat het vermogen van laden en ontladen na verloop van tijd sterk afneemt doordat de buffer respectievelijk bijna volledig is geladen/ontladen is.

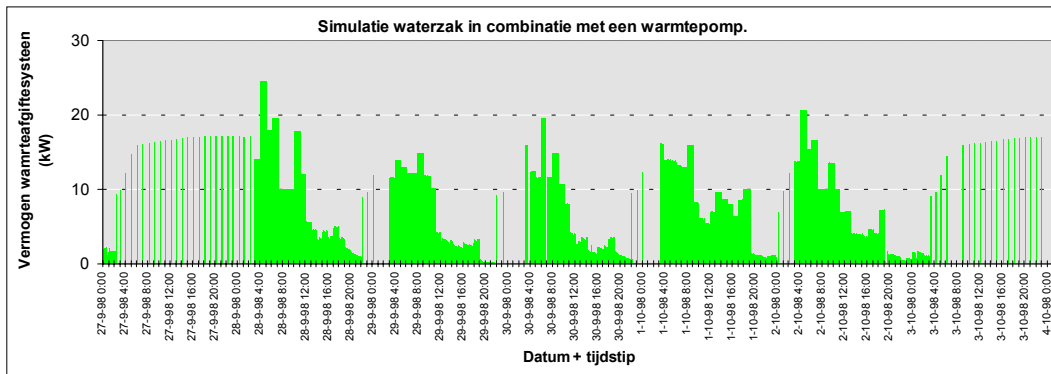


Figuur 9.47 *Vermogen laden en ontladen waterzak (simulatie)*

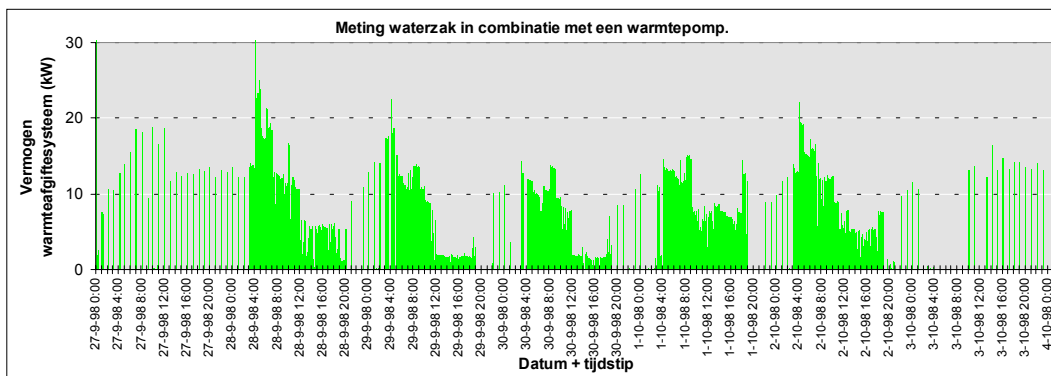


Figuur 9.48 Vermogen laden en ontladen waterzak (meting)

Het warmtevraagpatroon komt redelijk overeen met het patroon van het vermogen van de warmteafgifte. Gedurende lage warmtevraag wordt de warmtevraag opgesplitst (zie 'kam-achtige patroon'). Indien de warmtevraag zeer klein is, dan kan het voorkomen dat reeds binnen de periode van de meetperiode aan de warmtevraag kan worden voldaan. Grafisch valt nu ook het 'kam-achtige patroon' weg (Figuur 9.49).

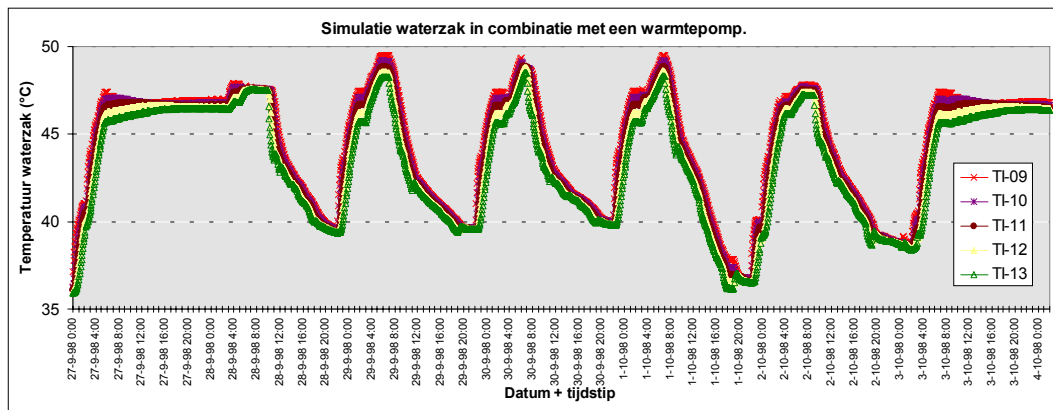


Figuur 9.49 Vermogen warmteafgifte (simulatie)

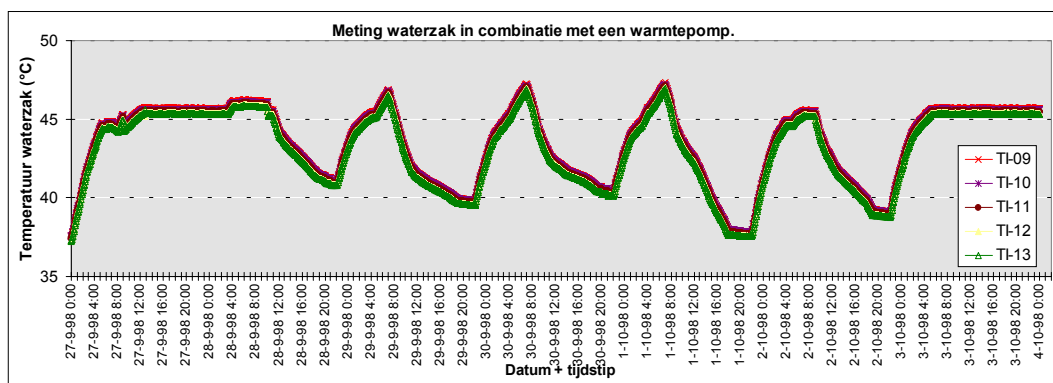


Figuur 9.50 Vermogen warmteafgifte (meting)

De temperatuur van de waterzak schommelt tussen de 38 en 47°C. Indien de temperatuur boven de 44 °C komt neemt het laadvermogen sterk af, indien de temperatuur beneden de 42°C komt neemt het ontladvermogen sterk af. Een fase transformatiemateriaal met een temperatuur tussen deze twee temperaturen zou ideaal zijn. Verder kan het laad en ontladgedrag verder geoptimaliseerd worden door een grotere warmtewisselend oppervlak van de warmtewisselaar te kiezen zodat bij een kleine logaritmisches temperatuurverschil toch een redelijk vermogen haalbaar is.



Figuur 9.51 *Temperatuurverloop waterzak (simulatie)*



Figuur 9.52 *Temperatuurverloop waterzak (meting)*

In Tabel 9.15 zijn de resultaten van de simulaties en metingen nog eens samengevat. Hierbij is de warmteafgifte beduidend lager dan de warmtevraag. Belangrijkste oorzaken zijn het modulerende karakter van de ketel en de vrij lange sampletijd van 5 minuten die in onvoldoende mate compenseert voor het opsplitsen van de warmtevraag (zie § 2.8.1). Het hoge warmteverlies gedurende de meting ten opzichte van de waarde van simulatie is eveneens voor het overgrote deel aan bovenstaande effecten te wijten.

Tabel 9.15 *Samenvatting van resultaten metingen en simulaties. Percentages zijn tenzij anders aangegeven als percentage van de warmtevraag (877 kWh)*

Warmte inhoud (kWh)	Geen opslag		Simulatie		Simulatie		Meting	
Sampletijd (seconden)	Nvt.		300		50		300	
Warmtevraag	877	100 %	835	95,2%	875	100 %	842	96,0 %
Warmteafgifte	877	100 %	809	92,2%	875	100 %	752	85,7 %
Aanbod warmtepomp	3360	383 %	3.360	383,1%	3360	384 %	3362	383 %
<b>Benutting warmtepomp</b>								
- Daltarief	263	30 %	839	95,7%	842	96,0%	782	89,1 %
- Piekstarief	269	31 %	143	16,3%	241	24,4 %	151	17,2 %
- Totaal	532	61 %	982	111,9%	1056	120,4 %	932	106,3 %
- Totaal als % van aanbod		15,8 %		29,2 %		31,4 %		27,7 %
<b>Door CV geleverde energie</b>								
- P <sub>minimaal</sub> =0 kW	345	37 %	13	1,5%	5	0,6 %	28	3,2 %
Geladen	0	0 %	538	61,3%	499	57,0 %	483	55,1 %
Ontladen	0	0 %	352	40,1%	318	36,3 %	304	34,7 %
Netto opwarming	0	0 %	114	13,0%	114	13,0 %	67	7,6 %
<b>Warmteverlies</b>								
- totaal	0	0 %	72	8,2%	67	7,7 %	112	12,8 %
- P-gem (kW)			0,43		0,40		0,67 <sup>25</sup>	

Aangezien de gemiddelde temperatuur van de waterzak 43°C bedroeg, is de verwachting dat het stationaire warmteverlies ± 0,45 kW bedraagt (=75,6 kWh). Aangezien tijdens de meting voor de warmteafgifte een lagere waarde wordt aangeboden (752 kWh) dan gevraagd (877 kWh), ligt de benutting van de warmtepomp in werkelijkheid hoger (± 1050 kWh) dan in de tabel vermelde waarde (932 kWh).

<sup>25</sup> Warmteverlies tijdens meting ligt hoger dan in werkelijkheid tengevolge van invloed sampletijd en modulerend gedrag ketel. Werkelijke warmteverlies ligt in de buurt van 0,45 kW.

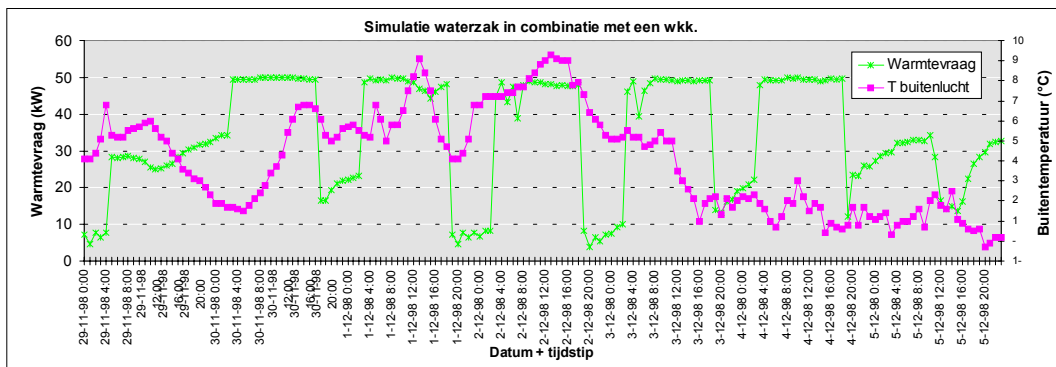




## BIJLAGE 23 RESULTATEN MEETPROGRAMMA WKK

### ◆ Omschrijving meting

Warmtekracht installaties vormen een belangrijke toepassing van warmteopslag. Om deze reden is in het meetprogramma hier iets meer aandacht aan besteedt door een tweetal meetsessies uit te voeren. In de eerste meting is gekozen voor een temperatuurniveau van de warmtevraag van 70-90°C en is gekozen voor een week in december. In het warmtevraagpatroon zijn de werkdagen duidelijk herkenbaar (Figuur 9.53). De maximum piekvraag (50 kW) doet zich gedurende langere tijd voor, alleen in het weekeinde en in de nachten is ruimte om de buffer te laden. Warmte onttrekken uit de buffer op momenten dat de warmtevraag kleiner is dan het minimum vermogen van de WKK is niet of nauwelijks mogelijk. In deze periode van het jaar gaat het puur om de benutting van de WKK te vergroten door ook warmte van de WKK te kunnen leveren tijdens piekvraag.

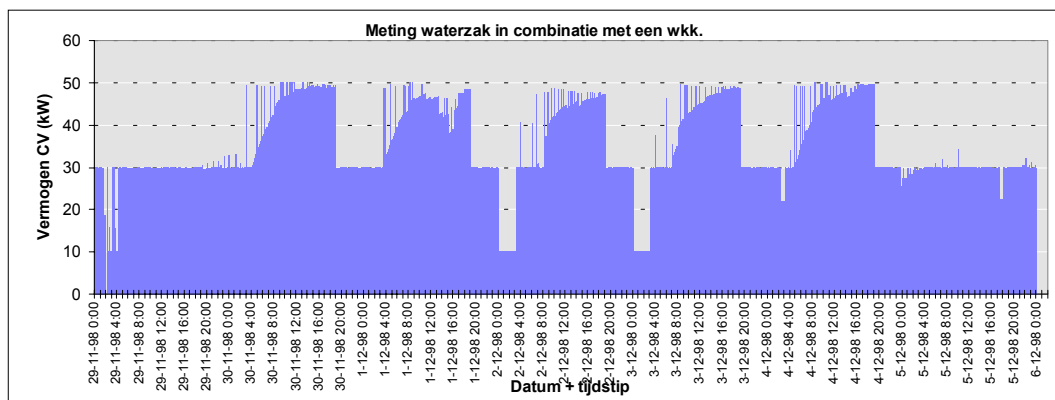


Figuur 9.53 Referentiesituatie voor de metingen van een WKK. Weergegeven zijn de warmtevraag en de buitentemperatuur

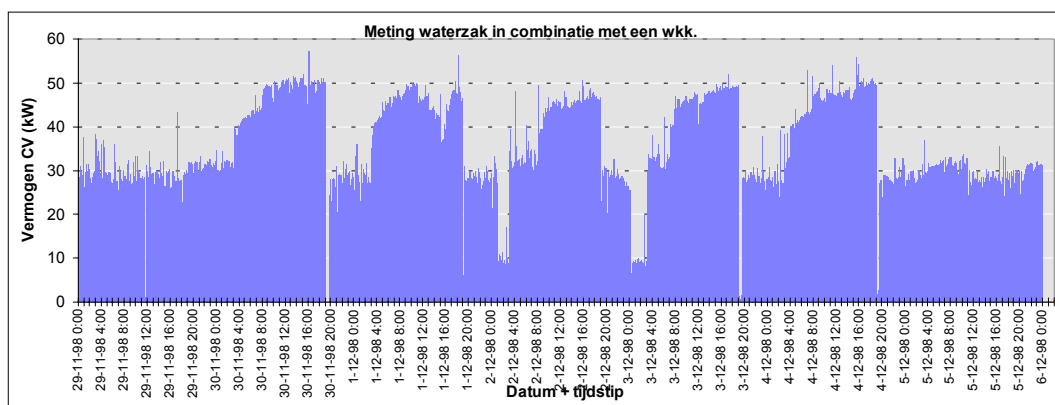
### ◆ Resultaten

In de onderstaande figuren (Figuur 9.54 en Figuur 9.55) is het vermogen van de ketel weergegeven voor respectievelijk een simulatie en de meting met waterzak. Het vermogen van de ketel is de som van het vermogen van de WKK en de CV. De basislast (30 kW) wordt opgevangen door de WKK, en is in de figuren duidelijk herkenbaar, het overige vermogen wordt gerealiseerd door de CV. In hoofdlijnen komt het vermogenspatroon van de simulatie overeen met de meting.

Halverwege de week zijn twee korte periodes aanwezig dat de WKK niet op basislast draait. De verklaring hiervoor is van regeltechnische aard. De computer voorspelt dat in de naderende periode een grote ontladcapaciteit nodig is. Maximale vulling van de buffer is gewenst. Het gewenste vermogen om te laden blijkt echter niet haalbaar door de beperking van het warmtewisselende oppervlak en het beperkte temperatuurverschil over de platenwarmtewisselaar. Het systeem schakelt over op minimumlast om de warmtevraag te dekken. Een aanpassing van de regeling zou het mogelijk maken om op deze momenten warmte te onttrekken uit het systeem.

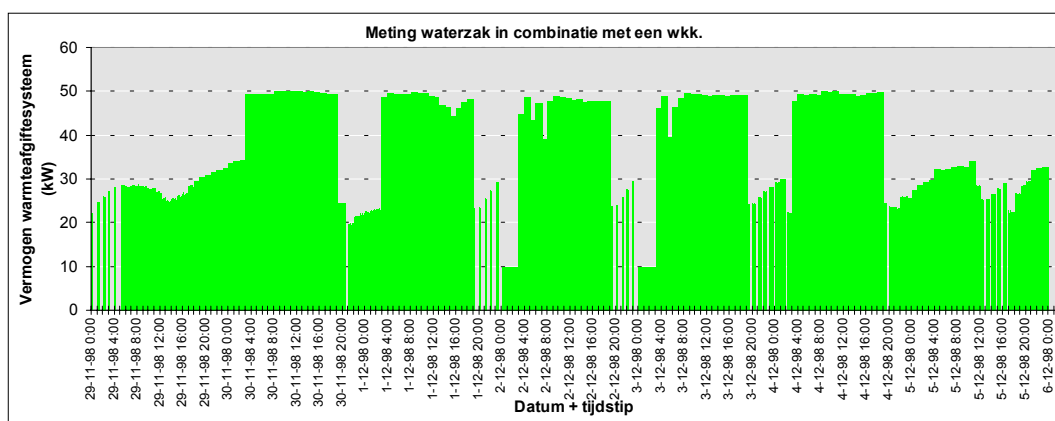


Figuur 9.54 Vermogen ketel. Basislast WKK bedraagt 30 kW. Overige vermogen wordt opgevangen door de piekbrander (CV). (simulatie)

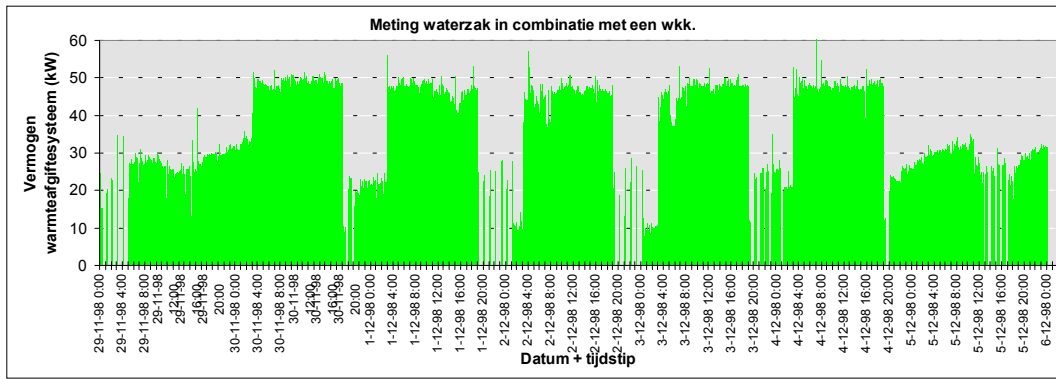


Figuur 9.55 Vermogen ketel. Basislast WKK bedraagt 30 kW. Overige vermogen wordt opgevangen door de piekbrander (CV). (meting)

Het patroon van de warmteafgifte (Figuur 9.56 en Figuur 9.57) komt overeen met de warmtevraag (Figuur 9.53). Alleen in periodes van lage warmtevraag is de warmtevraag in een tijdsblok van een uur zodanig opgesplitst dat zowel aan de warmtevraag kan worden voldaan als de buffer geladen kan worden. Het opsplitsen is noodzakelijk door de serieschakeling van de warmtewisselaar en het warmteafgiftesysteem in combinatie met niet debietgerегelde pompen.

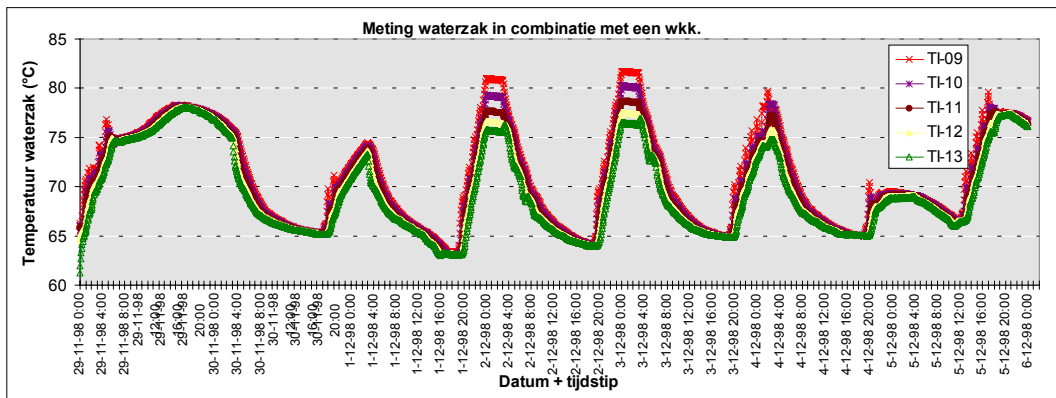


Figuur 9.56 Vermogen warmteafgifte (simulatie)

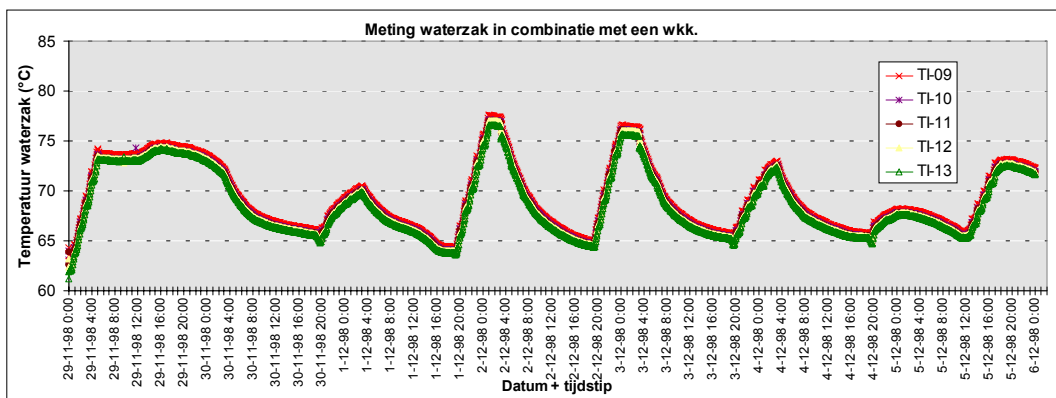


Figuur 9.57 *Vermogen warmteafgifte (meting)*

Stratificatie is beperkt haalbaar. Mede oorzaak hiervan is het beperkte vermogen in relatie met het debiet door het waterzakstelsel. Terwijl in de simulatie nog gedurende een tweetal nachten een duidelijk temperatuurverschil optreedt tussen de verschillende thermokoppels in de waterzak, blijft dit effect in de meting nog maar beperkt zichtbaar. Desondanks komt het temperatuurverloop van de meting goed overeen met de meting, alleen is in theorie een fractie hogere temperatuur haalbaar (Figuur 9.58 en Figuur 9.59). Dit is aan twee effecten te wijten. Enerzijds ten gevolge van een iets hoger warmteverlies dan in het theoretische model. Anderzijds kan er meer warmte geladen worden aangezien er geen sprake is van een modulerende ketel.



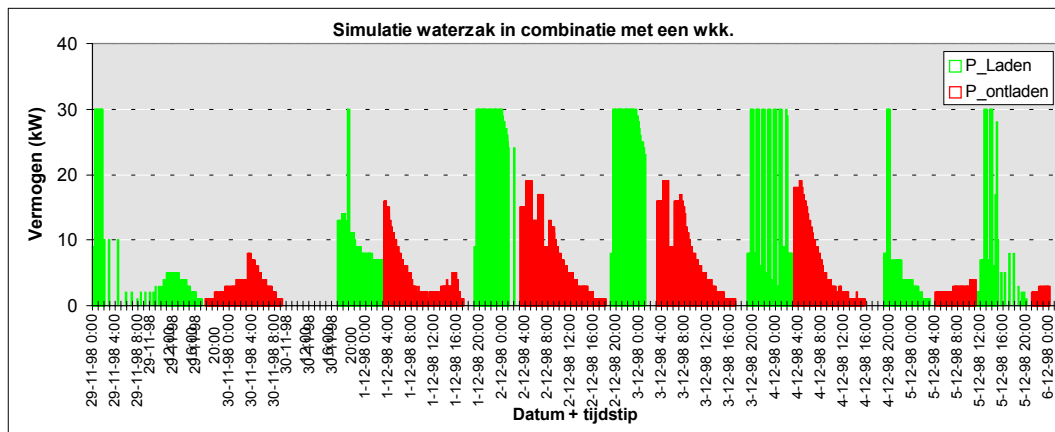
Figuur 9.58 *Temperatuurverloop waterzak (simulatie)*



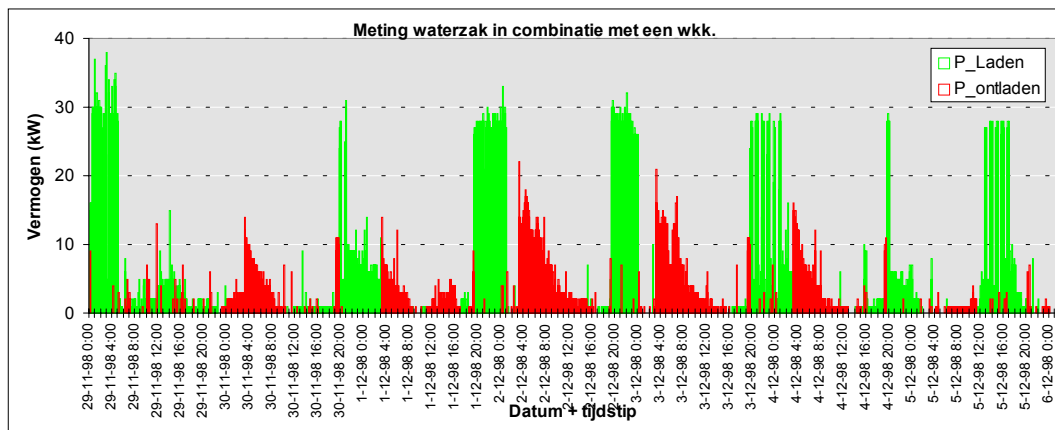
Figuur 9.59 *Temperatuurverloop waterzak (meting)*

Het laad- en ontladgedrag tijdens de meting wijkt op een beperkt aantal punten af van de simulatie waarde. Zo heeft de lagere maximum waterzaktemperatuur invloed op de hoeveelheid warmte die kan worden onttrokken. De eerste twee werkdagen is er significant minder warmte onttrokken. Verder is er ongewenst warmte ontladen ten gevolge van een tijdelijk lagere tempe-

atuur aan CV-zijde. Dit mede als gevolg van het modulerend karakter van de ketel (Figuur 9.60 en Figuur 9.61).



Figuur 9.60 Vermogen laden en ontladen waterzak (simulatie)



Figuur 9.61 Vermogen laden en ontladen waterzak (meting)

In Tabel 9.16 zijn voor de metingen van opslag behorende bij een WKK systeem de totalen van een week meten weergegeven. Ook hier ligt de warmteafgifte lager dan in de ideale situatie. Doordat er minder warmte is opgeslagen is tijdens de meting dan berekend in de simulatie ligt de benutting van de WKK lager. Grootste verschil zit echter in de hoeveelheid warmte die onttrokken is uit de waterzak en de grote warmteverliezen. Dit verschil wordt in een aparte paragraaf (zie § 4.2 en bijlage 20) beschreven. Aangezien het gemiddelde temperatuurniveau van de waterzak lag op 69°C (of te wel 474 kWh) ligt het stationaire warmteverlies op 0,75 kW (= 126 kWh).

Tabel 9.16 *Samenvatting van resultaten metingen en simulaties. Percentages zijn tenzij anders vermeld aangegeven als percentage van de warmtevraag (5741 kWh)*

Warmte inhoud (kWh)	Geen opslag		Simulatie		Simulatie		Meting	
Sampletijd (seconden)	nvt		300		50		300	
Warmtevraag	5741	100 %	5.711	99,5%	5.734	100 %	5706	99,4 %
Warmteafgifte	5741	100 %	5.715	99,5%	5.734	100 %	5419	94,4 %
Aanbod WKK	5040	87,8 %	5.040	87,8%	5.040	87,9 %	5043	87,8 %
Benutting WKK	4074	71 %	4.804	83,7%	4.665	81,4 %	4661	81,2 %
- als % van aanbod		80,8 %		95,3%		92,6 %		92,4%
Door CV geleverde energie	1667	29 %	1.073	18,7%	1.069	18,6 %	1157	20,2 %
- $P_{\text{minimaal}}=0$ kW								
Geladen	0	0 %	615	10,7%	457	8,0 %	675	11,8 %
Ontladen	0	0 %	453	7,9%	284	5,0 %	315	5,5 %
Opwarming	0	0 %	40	0,7%	50	0,9 %	77	1,3 %
Warmteverlies								
- totaal	0	0 %	122	2,1%	123	2,1 %	283	4,9 %
- P-gem (kW)	0	0 %	0,72		0,73		1,68 <sup>26</sup>	

<sup>26</sup> Warmteverlies tijdens meting ligt hoger dan in werkelijkheid tengevolge van invloed sampletijd en modulerend gedrag ketel. Werkelijke warmteverlies ligt in de buurt van 0,75 kW.

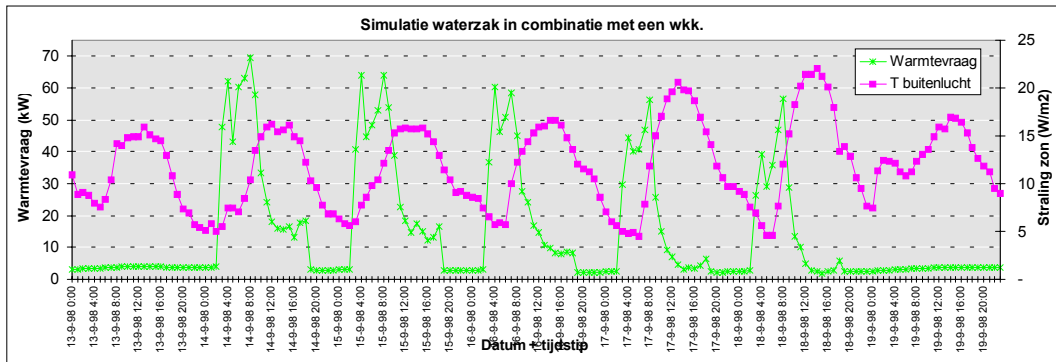


## BIJLAGE 24 RESULTATEN MEETPROGRAMMA WKK (40-80)

### ◆ Omschrijving meting

Naast een WKK met een temperatuurniveau werkend op 70-90 °C was er nog de vraag naar een meting waarop de installatie wordt bedreven op een breder temperatuurgebied (40-80 °C). Het maximale vermogen van het warmte-afgiftesysteem ligt in de periode van meten op ± 75 kW. Het gevolg is dat het debiet sterk gereduceerd moet worden. Dit is in het huidige systeem niet haalbaar doordat de pomp slechts op één stand kan verpompen. Het verder ‘afknijpen’ van leidingen om het debiet te verminderen leidt tot een onaanvaardbaar hoge druk in de CV-ketels. Daarom is gekozen om met name het debiet in het waterzakstelsel te beperken en te bekijken wat de invloed hiervan is op bijvoorbeeld de stratificatie.

Voor de test is gekozen voor een week in september van het warmtevraagpatroon. Hierin bevinden zich relatief kleine pieken in de warmtevraag (Figuur 9.62). In de weekeinden en de nachten ligt de warmtevraag op een laag niveau.

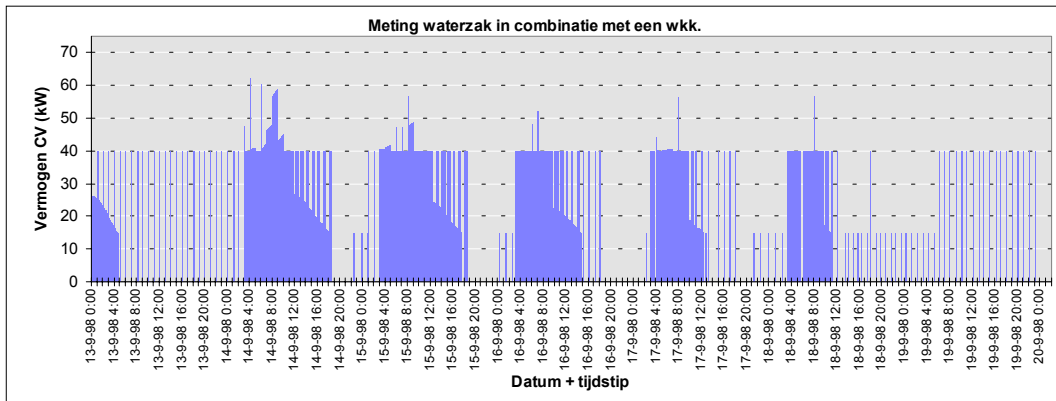


Figuur 9.62 Referentiesituatie voor de metingen van een WKK (40–80°C). Weergegeven zijn de warmtevraag en de buitentemperatuur

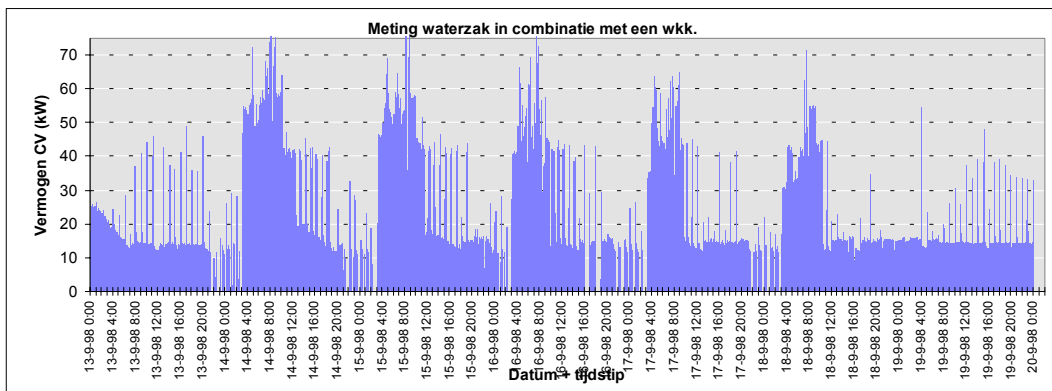
### ◆ Resultaten

De WKK heeft een maximum vermogen van 40 kW. De pieken in warmtevraag worden aanzienlijk afgetopt, het aandeel geleverd door de piekinstallatie (CV) is beperkt (Figuur 9.63). Bij de meting is echter het aandeel van de CV aanzienlijk groter. Ook in periodes dat de warmtevraag onder het minimumvermogen van de WKK (15 kW) bevindt, moet gedurende de meting de ketel vaker worden ingeschakeld (Figuur 9.64).

De oorzaak ligt waarschijnlijk aan het feit dat het debiet in het CV-systeem gedurende metingen bijna 20% hoger ligt dan in de simulaties. Bij het overschakelen van de éne naar een andere stand gaat de aansturing bij de eerste stap niet uit van de gemeten maar van een gesimuleerde waarde. Het gevolg is dat er aan de CV-ketel een hogere temperatuur wordt opgelegd dan noodzakelijk is om aan de warmtevraag te voldoen. Dit hogere temperatuurniveau is ongunstig voor het te ontladen vermogen uit de buffer. Een ander gevolg is dat er meer warmte wordt afgegeven door het warmteafgiftesysteem dan noodzakelijk.

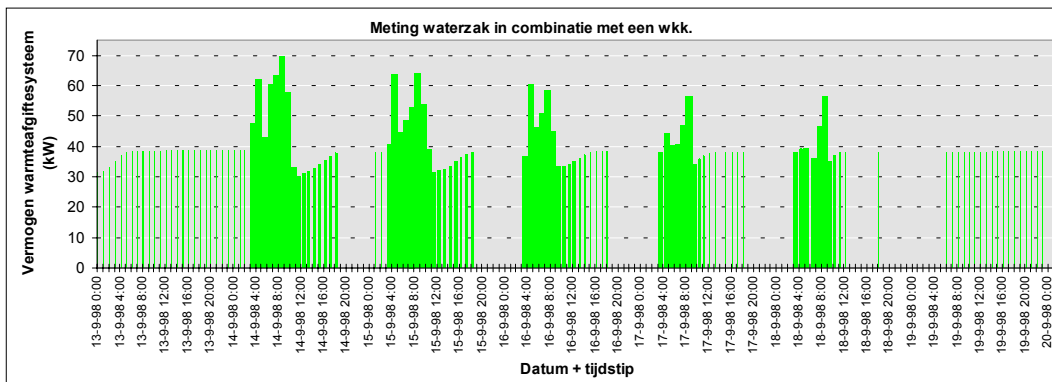


Figuur 9.63 *Vermogen ketel (simulatie)*



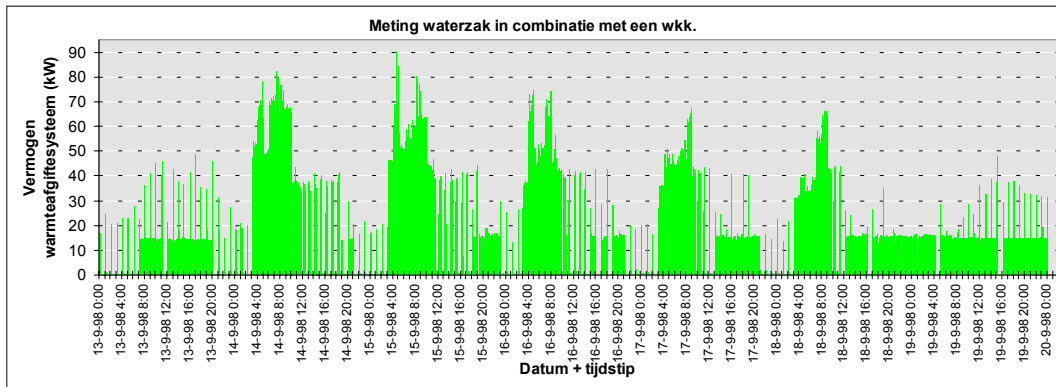
Figuur 9.64 *Vermogen ketel (meting)*

Het vermogen van de warmteafgifte toont een beperkt aantal verschillen tussen het warmtevraagpatroon (Figuur 9.62), de simulatie (Figuur 9.65) en de meting (Figuur 9.66). Op een aantal plaatsen komt het 'kam-patroon' terug ten gevolge van het opsplitsen van de warmtevraag.



Figuur 9.65 *Vermogen warmteafgifte (simulatie)*

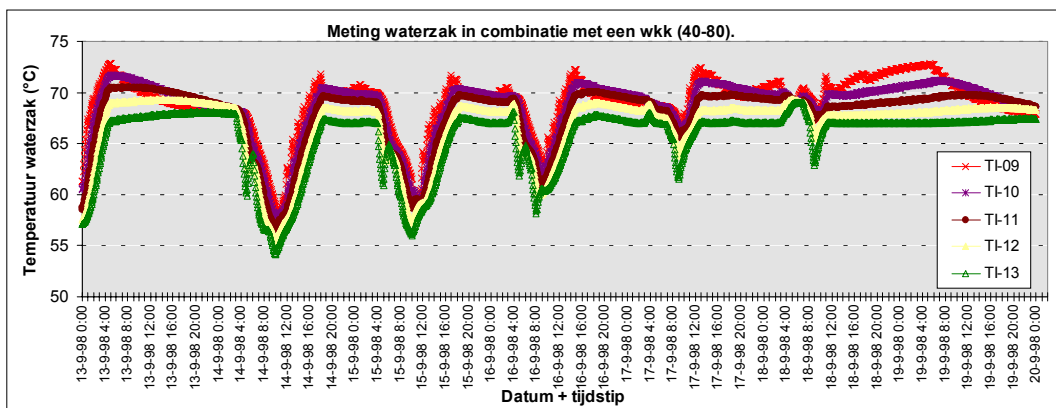




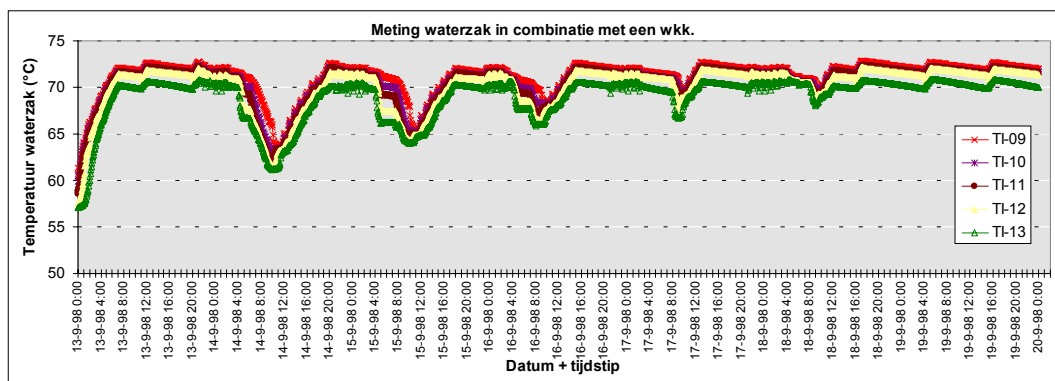
Figuur 9.66 *Vermogen warmteafgifte (meting)*

Het profiel van het temperatuurverloop in de waterzak van respectievelijk de simulatie en de meting komt qua pieken en dalen overeen (Figuur 9.67 en Figuur 9.68). Alleen ligt de hoeveelheid warmte die wordt onttrokken gedurende de meting beduidend lager. Zowel gedurende de meting als de simulatie is er wel meer sprake van stratificatie dan tijdens metingen met een hoger debiet in het waterzakstelsel. Door het beperkte vermogen van laden (maximaal 20 kW) blijft het temperatuurverschil tussen de uiterste twee thermokoppels in de waterzak beperkt tot enkele graden.

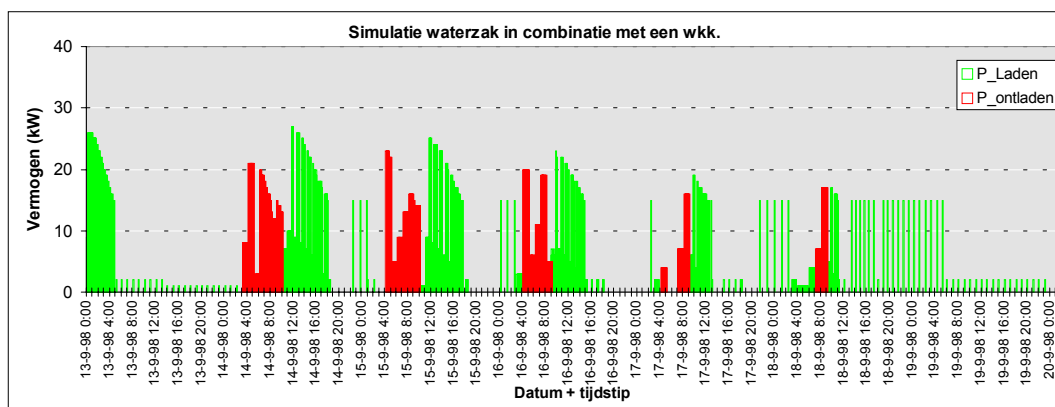
Het ontladgedrag wijkt tijdens de meting (Figuur 9.70) ook af van de waarden tijdens simulatie (Figuur 9.69). De oorzaak ligt in een combinatie van effecten. Belangrijke invloed is de gemiddeld hogere temperatuur uit het warmteafgiftesysteem.



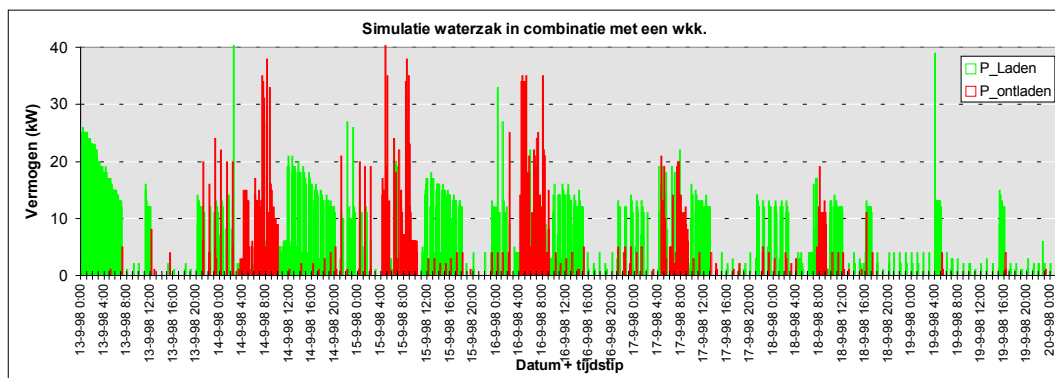
Figuur 9.67 *Temperatuurverloop waterzak (simulatie)*



Figuur 9.68 *Temperatuurverloop waterzak (meting)*



Figuur 9.69 *Vermogen laden en ontladen waterzak (simulatie)*



Figuur 9.70 *Vermogen laden en ontladen waterzak (meting)*

In deze meting komen grotere afwijkingen tussen model en meting boven tafel dan in voorgaande metingen. Een combinatie van een periode met sterk wisselende warmtevraag, een beperktere warmteoverdrachtscoëfficiënt in de warmtewisselaar door het lagere debiet, het modulerende karakter van de ketel en de iets te lage samplefrequentie zijn effecten die de metingen ongunstig beïnvloeden. Met name het warmteverlies tijdens de metingen ligt hierdoor hoger dan het werkelijke warmteverlies.

Om het effect van de hoge sampletijd te bekijken is voor zowel de simulatie als voor de meting één dag uit bovenstaande metingen herhaald met zes keer hogere samplefrequentie. (zie § 5.2 en bijlage 20). Het effect is dat bij een ideale sampletijd het warmteverlies vrijwel gelijk is aan het stationaire warmteverlies van 0,76 kW (= 128 kWh).

Tabel 9.17 *Samenvatting van resultaten metingen en simulaties. Percentages zijn tenzij anders vermeld aangegeven als percentage van de warmtevraag (2.475 kWh)*

Warmte inhoud (kWh)	Geen opslag		Simulatie		Simulatie		Meting	
Smpletijd (seconden)	Nvt		3.00		50		3.00	
Warmtevraag	2.475	100 %	2.260	92 %	2.453	99,1 %	2.376	96 %
Warmteafgifte	2.475	100 %	2.260	92 %	2.453	99,1 %	2.546	103 %
Aanbod WKK	6.720	272 %	6.723	272 %	6.720	271,6 %	6.723	272 %
Benutting WKK	1.664	67,2 %	2.428	98,4 %	2.633	106,4 %	2.600	105 %
- als % van aanbod		24,8 %		36,2 %		39,2 %		38,7 %
Door CV geleverde energie	811	32,8 %	53	2,1 %	42	1,7 %	333	13,5 %
- $P_{\text{minimaal}}=0$ kW								
Geladen	0	0 %	493	19,6 %	505	20,4 %	652	26,3 %
Ontladen	0	0 %	273	11,0 %	284	11,5 %	264	10,7 %
Opwarming	0	0 %	91	3,2 %	92	3,7 %	104	4,2 %
Warmteverlies								
- totaal	0	0 %	129 <sup>27</sup>	5,2 %	130	5,2 %	284	11,5 %
- P-gem (kW)	0		0,77		0,77		1,7 <sup>28</sup>	

<sup>27</sup> Hoogte warmteverlies volgt uit gemeten waarde stationair warmteverlies.

<sup>28</sup> Warmteverlies tijdens meting ligt hoger dan in werkelijkheid tengevolge van invloed sampletijd en modulerend gedrag ketel. Werkelijke warmteverlies ligt in de buurt van 0,76 kW.

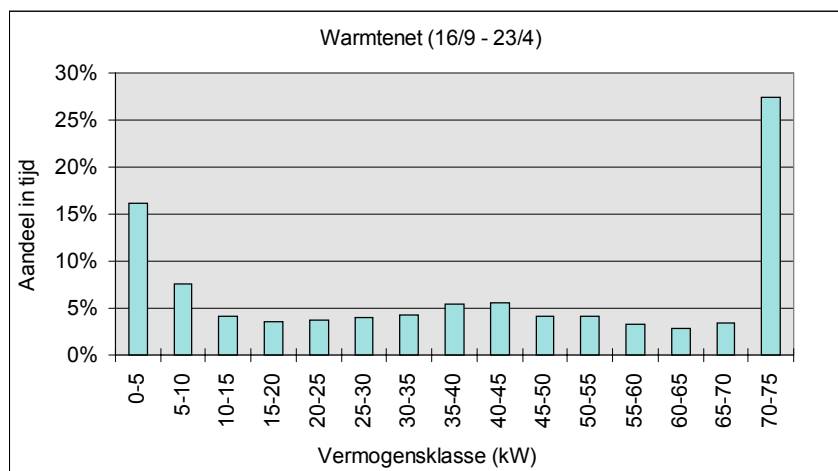


## BIJLAGE 25 RESULTATEN SIMULATIES WARMTENET

### ◆ Omschrijving simulatie

Voor het warmtenet is voor een langere periode van het jaar een simulatie uitgevoerd naar de mogelijkheid om een warmtebuffer te gebruiken in combinatie met een warmtenet. Alleen voor de situatie dat er een tariefdifferentiatie komt tussen basis- en pieklast, wordt het zinvol een buffer te gebruiken.

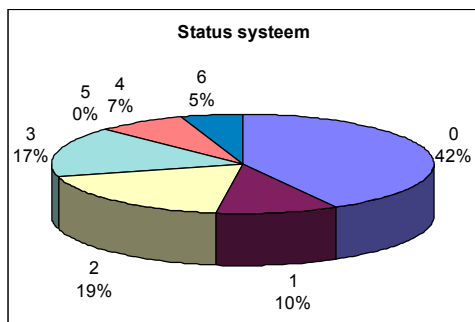
Als periode van het jaar is gekozen voor de herfst, winter en het vroege voorjaar. Voor de rest van het jaar zijn er dermate weinig pieken in de warmtevraag dat het niet zinvol is een buffer hiervoor op temperatuur te houden. Het warmtevraag patroon is niet gelijkmatig verdeeld. Met name piekvermogens en zeer lage vermogens leveren een grote bijdrage in de warmtevraag (zie Figuur 9.71).



Figuur 9.71 Warmtevraag verdeling voor de periode 16 september tot 24 april

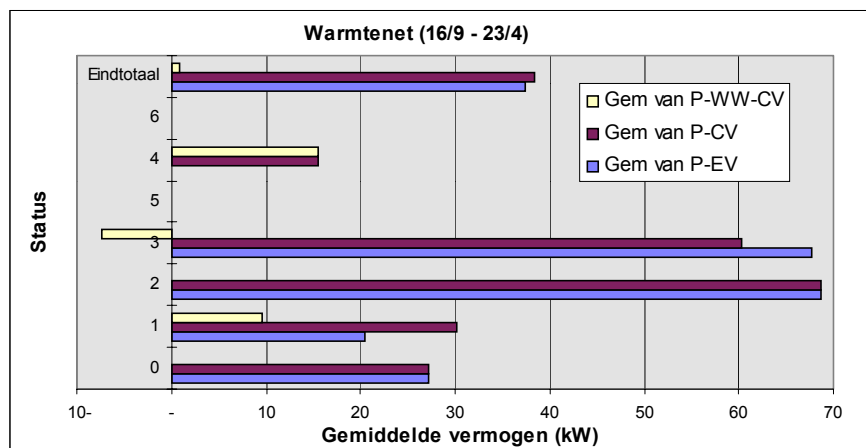
### ◆ Resultaten

Uit de simulaties volgt dat het nooit mogelijk is om aan de volledige warmtevraag te voldoen door warmte uit de buffer te onttrekken. 17% van de tijd wordt warmte uit de buffer onttrokken. Een vergelijkbare tijd wordt er warmte geladen, waarvan 7% volledig (zie Figuur 9.72).

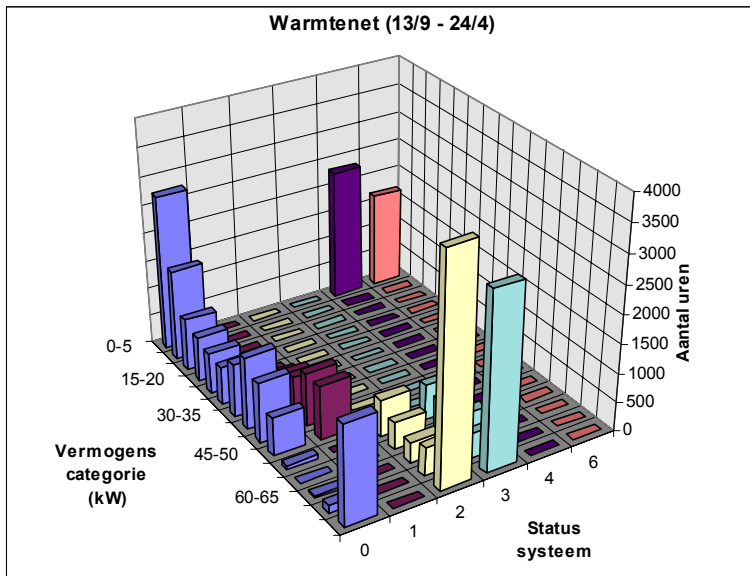


Figuur 9.72 Verdeling statusstelsysteem warmtenet voor de periode 16 september tot 24 april. (0 & 2 = verwarmen, 1 = laden & verwarmen, 3 = ontladen & naverwarmen, 4 = laden, 5 = ontladen, 6 = standby)

Wordt er echter gekeken naar het vermogen dat wordt geladen en onttrokken aan de waterzak, dan liggen deze percentages nog een stuk lager (Figuur 9.73). Voor stand 4 ligt het percentage warmte-uitwisseling met de waterzak logische wijs op 100%. Maar voor stand 1 is het aandeel warmte dat wordt geladen nog maar 1/3 van het totale vermogen. Voor ontladen in combinatie met naverwarmen (stand 3) ligt het aandeel onttrokken warmte uit de waterzak nog maar op ruim 10%. Het gemiddelde warmteverlies van de buffer komt overeen met het verschil tussen het gemiddelde vermogen van het warmteafgiftesysteem (P-EV) en van de warmtebron (P-CV).



Figuur 9.73 Gemiddelde vermogen per stand voor de periode 16 september tot 24 april. (0 & 2 = verwarmen, 1 = laden & verwarmen, 3 = ontladen & naverwarmen, 4 = laden, 5 = ontladen, 6 = standby) (P-WW-CV = vermogen van CV-systeem overgedragen aan waterzakstelsysteem; P-CV = vermogen warmtebron; P-EV = vermogen warmteafgiftesysteem)



Figuur 9.74 Warmtevraag verdeling voor de periode 16 september tot 24 april

Ten gevolge van de relatief grote sampletijd van 10 minuten treedt er in Tabel 9.18 een verschil van ruim 1% op tussen de waarde van de warmtevraag voor de simulatie en de referentie situatie zonder opslag. Uit de simulaties volgt dat de pieklast van het warmtenet afneemt van 19,3 tot 16,3% van de totale warmtevraag. Tegenover deze beperkte afname staat een extra warmteverlies van 2,2%. Hierbij zijn de waarden nog niet gecorrigeerd voor de fout tengevolge van de sampletijd.

Tabel 9.18 Samenvatting van resultaten simulaties. Percentages zijn tenzij anders vermeld aangegeven als percentage van de warmtevraag (214.206 kWh)

Warmte inhoud (kWh)	Geen opslag		Simulatie	
Smpletijd (seconden)	Nvt		600	
Warmtevraag	214.206	100,0%	211.427	98,7%
Warmteafgifte	214.206	100,0%	211.427	98,7%
Aanbod basislast warmtenet	265.250	123,8%	265.250	123,8%
Benutting basislast warmtenet	172.867	80,7%	181.428	84,7%
- als % van aanbod		65,2%		68,4 %
Pieklast warmtenet	41.339	19,3%	34.837	16,3%
Geladen	0	0 %	11.205	5,2%
Ontladen	0	0 %	6.367	3,0%
Opwarming	0	0 %	38	0,0%
Warmteverlies				
- totaal	0	0 %	4.800	2,2%
- gemiddelde verm (kW)			0,90	