

COMPACTE THERMISCHE ENERGIEOPSLAG BIJ KANTOORGEBOUWEN

S.F. SMEDING
P.W. BACH

Dit rapport beschrijft de resultaten van de studie naar compacte en goekope thermische opslag bij kantoorgebouwen.

INHOUD

1. INLEIDING	5
2. MARKTVERKENNING EN PRINCIPE OPLOSSINGEN	7
2.1 Marktverkenning	7
2.1.1 Energiebesparing in kantoorgebouwen	7
2.1.2 Literatuurscan	8
2.2 Principe-oplossingen	8
3. WATERZAK	11
3.1 Inleiding	11
3.2 Waterzak	11
3.3 Thermische isolatie	12
3.4 Warmtewisseling	13
3.4.1 Platenwarmtewisselaars	14
3.4.2 Warmtewisseling met slangen	14
3.5 Discussie	15
4. FASE TRANSFORMATIE MATERIALEN	19
4.1 Bouwmaterialen geïmpregneerd met Fase Transformatie Materiaal	19
4.2 Fase Transformatie Materialen in buffertanks	22
4.2.1 Natriumacetaat systeem	22
4.2.2 Galisol systeem	22
4.3 Ingekapselde Fase Transformatie Materialen	24
4.3.1 PCM ingekapseld in aluminium	24
4.3.2 Micro-ingekapselde PCM	25
4.3.3 PCM ingekapseld in nodulen	26
4.4 Discussie	26
5. MODELBEREKENINGEN	29
5.1 Inleiding	29
5.2 Beschrijving referentiegebouw	29
5.3 Warmtevraag	30
5.4 Beschrijving klimaatmodel	32
5.5 Systeem voor thermische energieopslag	32
5.6 Zonnecollectoren	33
5.6.1 Inleiding	33
5.6.2 Veronderstellingen	33
5.6.3 Resultaten	33
5.7 Warmtepomp	34
5.7.1 Inleiding	34
5.7.2 Veronderstellingen	35
5.7.3 Resultaten	35
5.8 WKK	36
5.8.1 Inleiding	36
5.8.2 Veronderstellingen	36
5.8.3 Resultaten	37

5.9 Stadsverwarming / warmtenet	38
5.9.1 Inleiding	38
5.9.2 Veronderstellingen warmtenet met piektarief	38
5.9.3 Resultaten warmtenet met piektarief	38
5.9.4 Veronderstellingen voor minimaliseren aansluitwaarde warmtenet	39
5.9.5 Resultaten voor minimaliseren aansluitwaarde warmtenet	39
5.10 HR-ketel	41
5.11 Discussie	41
6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	45
6.1 Conclusies	45
6.2 Aanbevelingen	46
7. LITERATUUROVERZICHT	49
8. BEGRIPPEN- EN AFKORTINGENLIJST	51
9. LIJST MET FIGUREN EN TABELLEN	53
9.1 Lijst met figuren	53
9.2 Lijst met tabellen	54
Bijlage 1 Zonne-energie	55
Bijlage 2 Temperatuur	59
Bijlage 3 Voorspelling warmtevraag	61
Bijlage 4 Energietarieven	63
Bijlage 5 Model voor berekening warmteverliezen	65
Bijlage 6 Warmtewisseling met behulp van slang	67
Bijlage 7 Modelberekening zonnecollectoren	69
Bijlage 8 Modelberekening warmtepomp	75
Bijlage 9 Modelberekening WKK	83
Bijlage 10 Modelberekening warmtenet	89
Bijlage 11 Relatie aansluitwaarde warmtenet-capaciteit buffer	91
Bijlage 12 Relatie oppervlak zonnecollectoren-capaciteit buffer	93
Bijlage 13 Netto Contante Waarde	95

1. INLEIDING

Energieopslag dient om ongelijktijdigheid in vraag en aanbod op te vangen. Daarbij kan onderscheid gemaakt worden naar korte perioden (piekscheren), middellange (dag/nacht, week/weekend cyclus) en lange perioden (seizoenopslag). De toelaatbare investeringen en bedrijfskosten per vermogensseenheid nemen af met toenemende periode.

Op korte termijn is in de bestaande gebouwde omgeving een winst, ecologisch en economisch, te halen met opslag van thermische energie, omdat daar het warmte- en koudeverbruik meestal enkele malen hoger is dan bij nieuwbouw.

Voor diverse toepassingen bestaat dringend behoefte aan goedkope en compacte opslagsystemen, bij voorkeur voor warmte en koude in één installatie.

Door EnergieNed is aan ECN-Energie Efficiency een opdracht verleend voor een studie naar compacte en goedkope warmte/koude-opslagconcepten (tot 100 °C) voor de gebouwde omgeving.

In het kader van deze opdracht is gestart met het uitvoeren van een globale marktverkenning naar de bestaande opslagmedia en technieken. Vervolgens is door middel van een gestructureerde aanpak met creatieve deelactiviteiten een aantal principe-oplossingen opgesteld. De resultaten van deze activiteiten zijn kort samengevat in hoofdstuk 2.

In hoofdstuk 3 is in hoofdlijnen het ontwerp van een waterzak voor de opslag van thermische energie uitgewerkt. Ingegaan is op de materiaalkeuze van de folie, de isolatie en de eventuele warmtewisseling.

Eén van de conclusies van de studie naar principe oplossingen was dat bouwmaterialen geïmpregneerd met fase transformatie materialen goed toegepast kunnen worden in muren en plafonds van bestaande bouw. In hoofdstuk 4 is de stand van zaken van deze materialen uitgewerkt. Aangezien de verwachting is dat op korte termijn andere toepassingen met fase transformatie materialen meer toepassingsmogelijkheden hebben, zijn deze tevens meegenomen in dit hoofdstuk.

Om een beter beeld te krijgen van economische- en ecologische besparingen van toepassing van een buffersysteem in combinatie met installaties als een WKK, een warmtepomp, een warmtenet of zonnecollectoren, worden in hoofdstuk 5 de resultaten van de model-berekeningen besproken.

Tenslotte worden in hoofdstuk 6 de conclusies van de eerste fase van het project vermeld. Tevens worden aanbevelingen gedaan voor een vervolg van het project.

2. MARKTVERKENNING EN PRINCIPE OPLOSSINGEN

2.1 Marktverkenning

De oriënterende marktverkenning naar bestaande opslagmedia en technieken bestond uit twee onderdelen. Enerzijds is een bereedeneerde schatting gemaakt van de haalbare energiebesparing door opslag van warmte of koude in kantoren in Nederland. Anderzijds is door middel van een literatuuronderzoek en octrooiverkenning een indruk verkregen van de huidige stand van de technologie voor compacte warmte/koude opslagsystemen.

2.1.1 Energiebesparing in kantoorgebouwen

Met thermische energieopslag is in de gebouwde omgeving een ecologische en economische besparing mogelijk op het energiegebruik [Wassenaar, 1996]. Uit deze studie volgt dat de economische besparingen in de investerings- en de exploitatiekosten zitten. De ecologische besparing zit in een beperking van het primaire energieverbruik waardoor er minder CO₂ vrijkomt.

Op basis van de meest waarschijnlijke thermische installatie gekoppeld aan de groottecategorie zijn door Wassenaar en Bach drie referentiegebouwen voorgesteld:

A: gebouw met radiatoren en natuurlijke ventilatie en een afmeting van 250 m²;

B: gebouw met radiatoren en topkoeling en een afmeting van 2.500 m²;

C: volledig geklimatiseerd gebouw met een afmeting van 25.000 m².

Er is uitgegaan van een totaal in Nederland beschikbaar bruto vloeroppervlak aan kantoorruimte van $35 \cdot 10^6$ m² (1994), ca. 30 % van het totale oppervlak aan utiliteitsgebouwen. Zowel voor koeling als verwarming geldt dat opslag voor korte duur een besparing op de investeringskosten kan leveren. Een besparing op de energiekosten is sterk afhankelijk van het type installatie. Verwarming met behulp van een (HR)ketel in combinatie met warmte-opslag levert geen besparing op. Voor koeling en verwarming met behulp van zonnecollectoren, een warmtepomp of warmte/kracht installatie is wel een aanzienlijke besparing op de exploitatiekosten mogelijk.

Met de gehanteerde cijfers¹ blijken jaarlijkse besparingen mogelijk met opslag van thermische energie voor kantoren in Nederland: maximaal 0,1 PJe bij piekscheren voor koeling, 0,5 PJe bij korte termijn koude opslag en 0,1 PJe bij koeling met behulp van een lange termijn opslag op een totaal van 1,8 PJe voor comfortkoeling. De combinatie lage temperatuur aquifer met een elektrische warmtepomp levert een besparing van 0,5 PJ op, de combinatie met een gasgestookte warmtepomp 0,6 PJ op een totaal van 2,73PJ gas.

¹ De gehanteerde cijfers geven echter slechts een indicatie. Aangezien de cijfers voor het totale bvo een factor 2 uiteenlopen en ook het specifieke energiegebruik een factor 2 kan verschillen, betekent dat voor de besparingen bij korte en lange termijn opslag dat deze er een factor 4 naast kunnen zitten.

Tabel 2.1.1 *Geschatte jaarlijkse besparingen met opslag van thermische energie voor het referentiegebouw van 2500 m².*

	koeling	verwarming (m.b.v. warmtepomp)	verwarming (m.b.v. zonnecollectoren)
Piekscheren	16 GJe	31 GJe	
Korte termijnopslag	47 GJe		700 GJ _{therm}

2.1.2 Literatuurscan

Alleen de conclusies van het rapport van Lanser en Haije worden hier aangegeven [Lanser, 1996]. Uit de beperkte zoekactie in de technisch wetenschappelijke en patent/octrooi literatuur zijn alleen al zo'n 1250 titels naar voren gekomen. Daarnaast is in andere bij ECN aanwezige bestanden, boeken en conferentieverlagen gezocht. Hieruit blijkt na lezing dat er op dit moment weinig concepten beschikbaar zijn die *zonder meer* ingezet zouden kunnen worden in de bestaande gebouwde omgeving.

Vaak worden warmteopslagsystemen in combinatie met thermische zonne-energie gebruikt. Het gaat hier dan om voelbare warmte opgeslagen in een waterreservoir. Technisch is dit concept goed te realiseren, in ieder geval in nieuwbouw.

Een ander gezichtspunt voor de (passieve) opslag van thermische energie is de gebruikmaking van bouwmaterialen met een verhoogd thermisch opslagvermogen. Hierbij wordt de warmte of koude in de vorm van latente warmte opgeslagen in bijvoorbeeld gipsplaten of beton geïmpregneerd met fase transformatie materiaal (PCM)². De manier van opslag is echter nog in ontwikkeling, maar biedt goede perspectieven voor zowel de implementatie in bestaande woningen als in nieuw te bouwen woningen.

2.2 Principe-oplossingen

Op een tweetal manieren is gericht gezocht naar oplossingsvarianten [Smeding, 1996]. Enerzijds via een creatieve sessie en anderzijds door gebruik te maken van het computerprogramma Invention MachineTM LabTM 2.11. Voor een volledige beschrijving van de gevolgde methoden, criteria en de resultaten wordt verwezen naar genoemd rapport.

Voor het project compacte goedkope warmte/koude opslag zijn in totaal 17 oplossingsalternatieven geproduceerd. De meeste oplossingen maken met betrekking tot warmte/koude wegzetten, vasthouden, isoleren en onttrekken gebruik van het resultaat van de creatieve sessie. Het resultaat van de computer applicatie Invention MachineTM heeft niet geleid tot extra oplossingsalternatieven.

² Phase Change Materials (PCM) zijn materialen die bij hun smeltemperatuur smeltwarmte (latente warmte) opnemen/afstaan. De warmte die tijdens deze fase-overgang vrijkomt ligt veelal een orde hoger dan de soortelijke warmte van het materiaal (voelbare warmte).

Tabel 2.2.1 *Overzicht oplossingsalternatieven in willekeurige volgorde voor compacte goedkope warmte/koude opslag gegroepeerd in vier categorieën.*

	Categorie A	Categorie B	Categorie C	Categorie D
	'Voelbare warmte'	'Latente warmte'	'Energie-omzetting'	'Overige'
1	Poreuze blokken	Gasbeton	potentiële energie	Warmte Weg Koppeling
2	Waterzak	Gewikkelde buis	Vliegwiel	Teruglevering aan warmtenet
3	Watertank	Warmteplafond	Vloeibaar gas	
4	Water / grond bak	Vezel muur	Waterstof	
5	Gebouwmassa		Chemische energie	
6	Serre		Thermochemische warmtepomp	

Aan de hand van diverse criteria, welke voortkomen uit de randvoorwaarden van de opdracht, zijn de oplossingsalternatieven beoordeeld. Hieruit komt één oplossingsvariant als goed naar voren, namelijk de 'waterzak' (opslagvolume voor 5 GJ energieopslag: 60 m³). Een vijftal varianten krijgt als totaal oordeel redelijk, namelijk: 'Water / grond bak' (90 m³), 'Gebouwmassa' (± 120 m³), 'Gasbeton met fase transformatie materiaal' (± 26 m³), 'Warmteplafond met fase transformatie materiaal' (± 13 m³) en 'Thermochemische warmtepomp' (opslaggewicht: ± 1250 kg).

3. WATERZAK

3.1 Inleiding

De waterzak vormt een alternatief voor een warmte-opslagtank met als medium water waarbij warmte wordt opgeslagen in voelbare warmte. Warmte-opslag tanks worden nu reeds veel toegepast in de glastuinbouw in combinatie met een WKK-installatie. Een waterzak heeft een aantal belangrijke voordelen ten opzichte van een conventioneel tanksysteem (zie Tabel 3.1.1) zodat ervoor gekozen is om dit alternatief verder uit te werken.

Tabel 3.1.1 *Voordelen waterzak t.o.v. opslagtank.*

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Plaatsing van waterzak is op veel meer locaties mogelijk dan een tank. Te denken valt aan kruipruimtes, kelders of andere niet te bereiken plaatsen voor een watertank. Deze flexibiliteit maakt vooral toepassing in bestaande (utiliteits)bouw mogelijk;2. De kosten van het totale systeem lager liggen;3. De buffer is eenvoudig in verschillende volumes te realiseren. |
|---|

Bij het eerste ontwerp van de waterzak is gekozen om te concentreren op de belangrijkste componenten, te weten de zak zelf (paragraaf 3.2), de mogelijkheden van isolatie (paragraaf 3.3) en de warmtewisseling (paragraaf 3.4). Aan de regeling van het systeem is in deze fase van het project geen aandacht besteedt.

3.2 Waterzak

Aan de zak wordt een aantal eisen gesteld (zie Tabel 3.2.1.). Bij de keuze van materialen is gedacht aan twee type van systemen. Enerzijds een waterzak vergelijkbaar met een waterbed, anderzijds een systeem gebaseerd op een vloeistofzak welke momenteel wordt gebruikt voor onder andere mestopslag en rioolwaterbuffering.

Tabel 3.2.1 *Eisen gesteld aan waterzak.*

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. Sterkte: De zak moet 'zelfdragend' zijn, dus (bij voorkeur) zonder verdere ondersteuning het gewicht van het medium kunnen dragen;2. Temperatuur: De keuze van het materiaal is afhankelijk van het maximale temperatuurniveau waarop de buffer wordt bedreven. Te denken valt aan een temperatuurniveau tot maximaal 80 °C;3. Duurzaamheid: een minimale levensduur van 20 jaar;4. Eenvoudige fabricage;5. Bij voorkeur diffusiedicht ($< 0,1 \text{ mg O}_2 / \text{liter dag}$) om corrosie in de verwarmingsinstallatie te voorkomen;6. Aansluiting mogelijk op overige systeem / warmtewisselaar. |
|--|

Aangezien het materiaal van een waterbed niet zonder extra ondersteunende constructie kan worden toegepast, is gekozen voor de (iets duurdere) vloeistofzak waarbij geen ondersteuning noodzakelijk is.

De folies voor vloeistofzakken heeft zich in diverse toepassingen de laatste twintig jaar bewezen. De toepassing van deze folies voor warmte-opslag is echter nieuw. Wezenlijke verschillen tussen gebruik van het materiaal voor een waterzak voor warmte-opslag en een mestzak die van invloed zijn op de levensduur van de zak zijn:

1. Door plaatsing van een waterzak in (utiliteits)gebouwen is er geen schadelijke invloed tengevolge van ultraviolette straling op de folie;
2. Door gebruik van water als medium in de waterzak is van chemische inwerking op de folie geen sprake;
3. Een mestzak hoeft alleen piektemperaturen te doorstaan (70-80 °C) tengevolge van zonne-straling. Een waterzak moet langdurig temperatuurniveaus tot 35-45 / 40-80 °C kunnen weerstaan.

De waterzakken worden op specificatie van de klant gemaakt. Aansluitingen van leidingsystemen of warmtewisselaar zal in principe dan ook geen probleem opleveren. De systemen worden gefabriceerd op een 6-10 voudige veiligheid betreffende sterkte. Voor de overige eigenschappen wordt verwezen naar Tabel 3.2.2.

Tabel 3.2.2 *Eigenschappen folies van vloeistofzak.*

	Folie A	Folie B	Eenheid
Materiaal folie:	PVC gecoat polyesterweefsel	-	
• dichtheid (totaal)	1.222	-	kg / m ³
• dikte	ca. 0,90	-	mm
• treksterkte	84	-	N / mm ²
• diffusiedichtheid	matig	goed	
Volume:	± 5 tot > 1000	± 5 tot > 1000	m ³
Temperatuurniveau: (langdurige belasting)	± 50	± 80	°C
Duurzaamheid:	> 20	> 20	jaar
Sterkte lasnaden:	± 90 % van moedermateriaal	± 90 % van moedermateriaal	

Een schatting van de prijs van een waterzak voor warmte-opslag is afhankelijk van het volume, de keuze van het type folie (in verband met het maximale temperatuurniveau en de diffusiedichtheid) en de keuze van het aantal en type aansluitingen. Aangezien verankeringen niet noodzakelijk zijn is de inschatting dat de waterzak van PVC gecoat polyesterweefsel zo'n 10 - 20 % goedkoper kan worden geproduceerd dan een vloeistofzak voor mestopslag (zie Tabel 3.2.3) met vergelijkbare volumes. Voor een duffusiedicht folie bestendig tot een temperatuurniveau van ± 80 °C (folie B) liggen de kosten circa 30 - 50 % hoger ten opzichte van een folie met een maximaal temperatuurniveau van ± 50 °C (folie A).

Tabel 3.2.3 *Prijs vloeistofzak bestemd voor mestopslag (excl. BTW).*

Volume (m ³)	Prijs (f / m ³)
5	190
15	180
25	176
50	117
100	97

3.3 Thermische isolatie

Aangezien in de waterzak warmte wordt opgeslagen met behulp van voelbare warmte, is er per definitie een temperatuurverschil aanwezig tussen omgeving en opslagmedium.

Tengevolge van dit temperatuurverschil zal er altijd sprake zijn van warmte-overdracht en daarmee van energieverliezen. Om de weerstand van warmte-overdracht zo groot mogelijk te maken is het noodzakelijk de waterzak te isoleren, dit aangezien de folie van de zak zelf nauwelijks enige isolerende werking heeft.

Aan de isolatie wordt een aantal eisen gesteld (Tabel 3.3.1). Aan de hand van deze eisen is een keuze gemaakt van op de markt aanwezige materialen. Voorlopig is gekozen om op de bodem en aan de zijkanten gebruik te maken van isolatieplaten en de top van de waterzak af te dekken met een isolatiedeken. Voor de materiaalgegevens van de isolatiematerialen wordt verwezen naar Tabel 3.3.2.

Tabel 3.3.1 *Eisen gesteld aan isolatie.*

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Isolatie bodem: Ondersteunende functie voor waterzak; 2. Isolatie op waterzak: Contouren van waterzak volgen; 3. Vochtbestendig; 4. Hoge isolatiegraad; 5. Goedkoop. |
|---|

Tabel 3.3.2 *Eigenschappen isolatiematerialen.*

Materiaal:	Geëxtrudeerd polystyreen hardschuim	Steenwol	Eenheid:
Afmetingen:			mm
• lengte	1200		
• breedte	600		
• dikte	20-80	<140	
Dichtheid	25	35	kg / m ³
Warmtegeleidingscoëf. k	0,030	0,035	W / m K
Druksterkte (lange termijn)	0,06	nihil	N / m ²
Temperatuurbestendigheid	-50 tot +75	goed	°C
Prijs: (excl. BTW)	398	± 120	f / m ³

Voor het model van de berekeningsmethode van de warmteverliezen zie bijlage 5.

3.4 Warmtewisseling

De toepassing van een warmtewisselaar betekent naast extra investeringskosten ook een verlies in temperatuurniveau en dus verlies van nuttig te gebruiken energie. Het toepassen van een warmtewisselaar geeft een extra drukval over het systeem, wat een extra pompinstallatie noodzakelijk kan maken of een pomp met een groter vermogen.

Het is niet strikt noodzakelijk een warmtewisselaar te gebruiken bij het ontwerp. Het toepassen van een warmtewisselaar is alleen noodzakelijk als niet aan alle onderstaande voorwaarden kan worden voldaan:

1. Het folie van de waterzak is voldoende diffusiedicht;
2. Een veiligheidsscheiding tussen de warmwater buffer en het tapwater-circuit is niet noodzakelijk;
3. De thermische gelaagdheid in de buffer, indien dit noodzakelijk is, is reeds met een alternatieve methode gerealiseerd (bijvoorbeeld door gebruik te maken van in- en uitlaatdiffusers).

Er is gekeken naar diverse systemen voor warmtewisseling, waarvan hier een tweetal worden uitgewerkt:

1. (Dubbelwandige) platenwarmtewisselaars;
2. Warmtewisseling via slangen in de buffer.

3.4.1 Platenwarmtewisselaars

Een platenwarmtewisselaar combineert een hoge warmte-overdracht met een compacte opbouw. Dit type warmtewisselaar kan goed functioneren bij kleine temperatuurverschillen zodat hij zeer geschikt is voor warmteterugwinningsinstallaties. Platenwarmtewisselaars worden reeds toegepast voor installaties voor verwarming en koeling in flatgebouwen, utiliteitsgebouwen en in stadsverwarmingsprojecten.

Tabel 3.4.1 *Specificatie platenwarmtewisselaars.*

	Type 1	Type 2	Eenheid
Vermogen:	100	100	kW
Plaatmateriaal:	AISI 316 Chroom-nikkel- molybdeen-staal	AISI 316 Chroom-nikkel- molybdeen-staal	
Pakkingsmateriaal:	Koper hard gesoldeerd	Koper hard gesoldeerd	
Primaire zijde: (buffer)			
• T	50 -> 31,5	90 -> 53,9	°C
• drukverlies	32,7	21,8	kPa
Secundaire zijde:			
• T	20 -> 45	20 -> 85	°C
• drukverlies	19,7	8,1	kPa
Prijs: (excl. BTW)	1.480	1.040	f

3.4.2 Warmtewisseling met slangen

Een alternatief voor reeds op de markt geleverde warmtewisselaars is warmte over te dragen met kunststof slangen. Gekozen is voor een type slang die ook wordt gebruikt voor vloerverwarming, dit aangezien de slang dan veelal voldoet aan de eisen betreffende diffusiedichtheid, flexibiliteit en warmte-overdracht (zie Tabel 3.4.2).

Om voor het ontwerp te komen tot de minimaal benodigde lengte van de slang is voor verschillende waarden van de uitgaande temperatuur van het water dat door de slang stroomt (T_{out}) en verschillende waarden voor de temperatuur van het opslag-medium de lengte van de slang berekend (**Error! Reference source not found.**). Voor de formules van het gebruikte rekenmodel wordt verwezen naar bijlage 6. Uit de berekeningen blijkt dat zelfs voor het gunstigste geval nog enkele honderden meters slang noodzakelijk zijn om het gewenste vermogen over te dragen. Zowel technisch als financieel zal dit geen haalbaar alternatief vormen.

Tabel 3.4.2 *Eigenschappen slangen voor warmtewisseling.*

	Type 1	Type 2	Eenheid
Materiaal:	Lineaire polyethyleen gemiddelde dichtheid	Polyethyleen gemiddelde dichtheid	
Afmetingen:			mm
• binnendiameter	16	16	
• buitendiameter	20	20	
Buigingsstraal:			x buis-doorsnede
• $T < 20\text{ °C}$	8	8	
• $T > 20\text{ °C}$	5	5	
Dichtheid:	937	937	kg / m ³
Warmtegeleidingscoëf. k:	0,33	0,30	W / m K
Druksterkte (lange termijn):	6	4	bar
Temperatuurbestendigheid:	95	60	°C
Diffusiedichtheid:	< 0,1	< 0,1	mg O ₂ /liter dag
Prijs:	2,95	1,95	f / m

Tabel 3.4.3 *Benodigde totale lengte (meters) slang type 1 voor ontladen buffer bij veronderstelling (1) $P_{thermisch} = 100\text{ kW}$, (2) $T_{in} = 20\text{ °C}$ en (3) 20 parallelle slangen.*

T_{out} (°C)	30	40	50	60	70	80
$T_{medium\ buffer}$ (°C)						
30	-	-	-	-	-	-
40	2.158	-	-	-	-	-
50	1.076	2.236	-	-	-	-
60	715	1.113	2.292	-	-	-
70	535	739	1.141	2.334	-	-
80	427	552	757	1.160	2.365	-
90	355	440	565	770	1.178	2.394

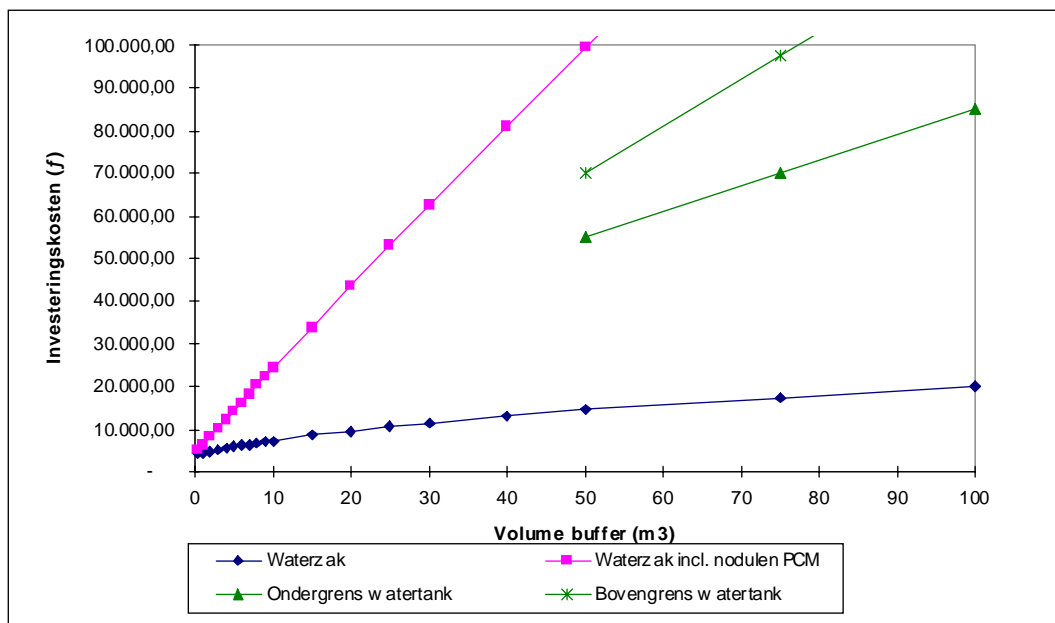
3.5 Discussie

Een waterzak blijkt bij verder onderzoek een goed alternatief voor een watertank. Het streven is om te komen tot een ontwerp met een diffusiedichte waterzak zonder warmtewisselaar. De afdeling productontwikkeling van een fabricant van de vloeistofzakken is actief op zoek gegaan naar een geschikt folie dat naast goed temperatuurbestendig ook diffusiedicht is. Er is een reeds een folie gevonden dat aan deze specificaties voldoet, alleen ontbreken momenteel gegevens van een aantal materiaaleigenschappen. Het bedrijf wil graag meewerken bij de ontwikkeling van een waterzak voor warmte-opslag.

Er zijn verder voldoende typen isolatiematerialen op de markt, zodat isolatie van de buffer geen onoverbrugbare problemen kan opleveren. Als de waterzak diffusiedicht is, is een warmtewisselaar niet strikt noodzakelijk om zuurstof in de verwarmingsinstallatie te voorkomen. Mocht een warmtewisselaar wel noodzakelijk zijn, dan is een externe platenwarmtewisselaar de beste oplossing. Warmtewisseling met behulp van (vloerverwarming) slangen leidt tot een zeer groot warmtewisselend oppervlak. Een totale slang lengte van enkele honderden meters lijkt geen haalbaar alternatief.

Beperkte gelaagdheid van het water in de buffer kan waarschijnlijk gerealiseerd worden door gebruik te maken van diffusers voor in- en uitlaat.

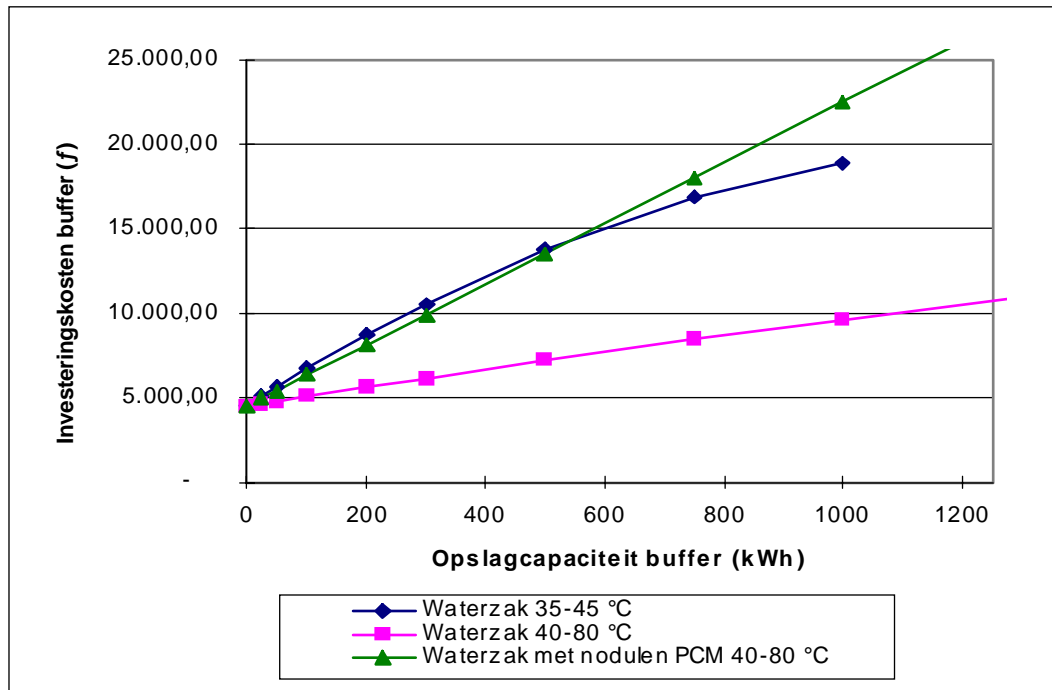
De verwachte prijs van de waterzak wordt bepaald door de kosten van het folie en de fabricage van de vloeistofzak; de isolatie; de aansluitingen, de regeling (kleppen, temperatuursensors), aanpassing software gebouwbeheerssysteem en installatie (zie bijlage 13). Een kostenindicatie van de waterzak als functie van de opslagcapaciteit is voor een tweetal temperatuurniveaus weergegeven (35-45 °C en 40-80 °C)³. Tevens zijn ter vergelijking de prijsranges van conventionele watertanks opgenomen, welke veelal worden gebruikt in tuinbouwbedrijven en van een waterzak gevuld met nodulen⁴ fase transformatie materiaal (PCM) (40-80 °C).



Figuur 3.5.1 *Indicatie prijzen waterzak en conventionele watertank per volume eenheid.*

³ Deze temperatuurniveaus is geschikt voor opslag van warmte in combinatie met zonnecollectoren (35-45 °C en warmtekrachtkoppeling, warmtenet en zonnecollectoren (40-80 °C).

⁴ Dit materiaal wordt nog besproken in hoofdstuk 4.3.3.



Figuur 3.5.2 *Indicatie prijzen waterzak per energie-inhoud.*

4. FASE TRANSFORMATIE MATERIALEN

Bij Phase Change Materials (PCM) wordt gebruik van de latente warmte van een fase-overgang. Doordat de smeltwarmte van materialen veel 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 compactere opslag. Afhankelijk van het temperatuurniveau van warmte/koude-opslag moet een geschikte PCM worden gezocht met een passende smelttemperatuur. Daarnaast zijn nog een aantal andere eigenschappen van het materiaal van belang. Onderzocht moet worden: dichtheidsveranderingen die optreden tijdens laden en ontladen van PCM's, de grote van de volumetrische smelt- en soortelijke warmte van de PCM, geleiding materiaal, smeltgedrag en chemische stabiliteit.

De meest gangbare opslagtechniek van latente warmte is ijs(slurrie)opslag, maar deze techniek wordt als bekend verondersteld. Wel wordt ingegaan op bouwmaterialen geïmpregneerd met PCM, te weten gipsplaat en beton (paragraaf 4.1). Verder zijn er systemen waarbij een opslagtank wordt gevuld met PCM (paragraaf 4.2). Tenslotte worden ingekapselde PCM's besproken (paragraaf 4.3).

In de literatuur en productspecificaties wordt de energie-inhoud veelal aangeduid met kJ of kWh. In dit hoofdstuk wordt zoveel mogelijk aangesloten op de eenheid die in de literatuur staat aangegeven. In de discussie aan het einde van dit hoofdstuk wordt alles uitgedrukt in kWh omdat dit direct inzicht geeft in de relatie tussen de energie-inhoud van een opslagsysteem en het vermogen in kW.

4.1 Bouwmaterialen geïmpregneerd met Fase Transformatie Materiaal

Fase transformatie materialen die hun smelttemperatuur hebben rondom de menselijke comforttemperatuur (16-25 °C) zijn toe te passen in passieve systemen voor opslag van warmte en koude. Het materiaal is zeer geschikt om temperatuurschommelingen in een gebouw te beperken. In de zomer neemt het materiaal overdag warmte op en door 's nachts te ventileren wordt de warmte weer afgegeven, zodat bespaard kan worden op investerings- en energiekosten van koelmachines. In de rest van het seizoen neemt het bouw materiaal geïmpregneerd met PCM passieve zonne-energie op, zodat de verwarmingskosten beperkt kunnen worden. Deze PCM's gecombineerd met bouwmaterialen zijn zeer geschikt voor muren en plafonds in de bestaande- en de nieuwbouw.

Er worden een aantal randvoorwaarden gesteld bij het gebruik van PCM in combinatie met bouwmaterialen (Tabel 4.1.1). Er moet verder onderscheid gemaakt worden tussen organische en anorganische materialen. Gehydrateerde zouten vallen onder deze laatste categorie.

Anorganische PCM's hebben een hoge warmte-opslagcapaciteit (147 tot 281 kJ/kg latente warmte), zijn niet brandbaar (ontvlambaar), hebben een breed temperatuurgebied van toepassings-mogelijkheden, zijn goedkoop en reeds beschikbaar. Een nadeel van anorganische PCM is dat de materialen corrosief zijn en daarom moeilijk te combineren met andere bouwmaterialen. Om ontvochtiging te voorkomen is hermetische afsluiting met de omgeving noodzakelijk. Mogelijkheden hiervoor zijn opslag in een tanksysteem

(paragraaf 4.2) of inkapseling (paragraaf 4.3). Verder kan onderkoeling en segregatie ontstaan.

Tabel 4.1.1 *Eisen gesteld aan materialen voor thermische energieopslag [Hawes, 1993].*

<ol style="list-style-type: none"> 1. Het absorberen en het vrijkomen van thermische energie binnen een vooraf ontworpen temperatuurbereik; 2. Bouwmateriaal blijft functie behouden; 3. Inpassing in huidige structuur; 4. Te fabriceren met huidige productiefaciliteiten; 5. Kosten op een zodanig niveau dat meer investering verantwoord is in vergelijking met de energiebesparing; 6. Duurzaamheid materiaal; 7. Geen afgifte / emissie.
--

De andere groep, de organische PCM's, heeft een aantal karakteristieken dat ze juist bij uitstek geschikt maakt voor toepassing in bouwmaterialen. De bestanddelen smelten gelijkmatig, onderkoeling is nauwelijks een probleem, ze zijn chemisch stabiel en ze zijn goed in diverse materialen te impregneren. Nadelen zijn de iets hogere kosten dan anorganische PCM, de ontvlambaarheid en uitdamping, de geur van sommige organische PCM's is niet prettig en soms kan volumeverandering optreden bij een fase-overgang. In Tabel 4.1.2 staan de materiaaleigenschappen van de belangrijkste fase transformatie materialen in combinatie met gipsplaat vermeld.

Tabel 4.1.2 *Organische PCM's verwerkt in gipsplaat, overgenomen uit [Hawes, 1993].*

PCM:	Smeltpunt (°C)	Vriespunt (°C)	Dichtheid (kg/m ³)	Smeltwarmte (kJ/kg zuiver PCM)	Gemiddelde smeltwarmte (kJ/kg bouwmat.)
butyl stearaat	18	21	855	140	30
1-dodecanol	20	21	830,9	200	47
45/55 capric-lauric acid	17	21		143	28
propyl palmitaat	16	19	845,5	186	40

Tabel 4.1.3 *Organische PCM's verwerkt in beton, overgenomen uit [Hawes, 1993]*
ABL = autoclaaf blok; REG = gewoon beton blok; PUM = puimsteen beton blok; EXS = geëxpandeerd 'kleischalie' blok; OPC = gewoon Portland cement beton.

PCM	Betonsoort	Smelt- / vriespunt (°C)	Smeltwarmte (kJ/kg puur PCM)	Gemiddelde smeltwarmte (kJ/kg mengsel)	Opslag capaciteit (MJ/m ³) (Voelbare warmte $\Delta T = 6$ °C)
butyl stearaat	ABL (18 kg)	15,2 / 19,3	140	5,7	3,8 (1,2)
	REG (26 kg)	15,4 / 20,3		5,5	4,4 (1,8)
	PUM (13,5 kg)	15,9 / 22,3		6,0	2,4 (0,9)
	EXS	14,9 / 18,3		5,5	
1-dodecanol	ABL (18 kg)	10,8 / 16,5	200	3,1	4,8 (1,2)
	REG (26 kg)	5,0 / 9,6		4,7	5,8 (1,8)
	PUM (13,5 kg)	14,9 / 12,0		12,7	4,8 (0,9)
1-tetradecanol	REG (26 kg)	26,2 / 32,0	205	5,7	
	PUM (13,5 kg)	32,2 / 35,7		12,5	
paraffine	REG (26 kg)	52,4 / 60,2	± 200	11,9	6,9 (1,8)
	ABL (18 kg)	53,2 / 60,6		18,9	6,1 (1,2)
	PUM (13,5 kg)	52,9 / 60,8		22,7	8,0 (0,9)

OPC	51,7 / 60,4	7,6
-----	-------------	-----

Om te komen tot een geschikte keuze van materialen moeten eisen gesteld worden op het vlak van:

1. Thermodynamische overwegingen (smeltwarmte, warmte-overdracht, temperatuurbereik, fase-evenwicht, dampdruk);
2. Fysische eigenschappen (uiterlijk, volumetrische veranderingen, dichtheid);
3. Kinetische overwegingen (vermijden van onderkoeling, kristallisatie snelheid);
4. Stabiliteit en verenigbaarheid (met matrixmateriaal);
5. Giftigheid, ontvlambaarheid en hinder;
6. Economische overwegingen (kostprijs, onderhoudskosten, besparing);
7. Hoge cycleerbaarheid en (100 %) recyclebaarheid [Fieback, 1993].

Uit de literatuur [Hawes, juni 1993] blijkt dat voor gips een drietal materialen redelijk aan bovenstaande criteria voldoen, te weten: 45/55 capric/lauric acid, butyl stearaat en propyl palmitaat. Voor beton zijn de volgende PCM's geschikt: butyl stearaat, 1-dodecanol, 1-tetradecanol en paraffine.

Op dit moment zijn geen van bovengenoemde materialen reeds commercieel verkrijgbaar, het gaat veelal alleen om materialen toegepast in experimenten en pilotprojecten [Setterwall, 1996] of in de fase van patent-aanvraag [Lane 1997].

Gipsplaat kan ongeveer 50 % van zijn eigen gewicht aan PCM (Tabel 4.1.2) opnemen. Maar testen hebben uitgewezen dat 25-30 % minder emissie oplevert. Na twee jaar testen vond er geen significante ontgassing plaats of verlies van vloeistof. Metingen naar vluchtige emissies in de testruimte leverde geen verschillen op met een identieke testruimte zonder PCM materiaal. Verder is het mogelijk de geïmpregneerde gipsplaat te behangen of te schilderen. Na ruim 400 temperatuurcycli tussen de -28 en +32 °C trad geen noemenswaardige 'veroudering' op.

Het gewicht van een met PCM geïmpregneerde gipsplaat ligt ± 22 % hoger dan van een vergelijkbare niet behandelde gipsplaat. Uit testen bleek verder dat de weerstand tegen vuur uitstekend is en dat de vlamdoorslag/vlamuitbreiding enigszins hoger is dan van een onbewerkte gipsplaat. Verder neemt de vochtopname met een derde af en daardoor is het materiaal duurzamer in een vochtige omgeving. De stabiliteit van met PCM geïmpregneerde gipsplaten is goed.

Bij beton gaat men uit dat tot ± 20 gewichtsprocent PCM kan worden geabsorbeerd, voor de dichtere types beton bedraagt deze waarde slechts 5 %. De energieopslag capaciteit bedraagt in de orde van 200 - 300 % ten opzichte van een conventioneel beton blok.

Tabel 4.1.4 *Overzicht voor- en nadelen gebruik PCM in bouwmaterialen.*

Voordelen:

1. Benutting van verschillende energie bronnen is mogelijk: zonne-energie (passief of actief), afvalwarmte of stadsverwarming, overige als warmte van apparatuur en bewoners;
2. Geschikt voor zowel verwarming als koeling;
3. Besparing op extra investerings- en exploitatiekosten als: apparatuur voor (warmte) opwekking, apparatuur voor distributie (pompen);
4. Groot warmtewisselend oppervlak;
5. Voor productie en verkoop kan gebruik worden gemaakt van de huidige kanalen;
6. Combinatie van functies betreffende warmte-opslag, -transport, warmtewisselaar en bouw materiaal;
7. Structuur van bouwmaterialen is zodanig dat PCM ook in vloeibare toestand in 'gast-materiaal' achterblijft.

Nadelen:

1. Keuze en ontwikkeling van PCM bouw materiaal is sterk klimaat afhankelijk (afhankelijk van het land of het gaat om voornamelijk koel- of warmtevraag);
2. Huidige beschikbaarheid van het materiaal.

Voor fabricage van geïmpregneerde gipsplaat lijkt het direct opnemen van een mengsel de meest economische methode. Voor beton kan naast directe inbrenging ook fabricage via onderdompeling plaats vinden.

4.2 Fase Transformatie Materialen in buffertanks

Om warmte op te slaan in buffertanks is het noodzakelijk op een hoger temperatuurniveau warmte op te slaan ($T > \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$), voor opslag van koude is een temperatuurniveau noodzakelijk dat juist lager ligt dan de menselijke comforttemperatuur ($T < 10\text{-}15 \text{ }^\circ\text{C}$). Voor deze toepassing zijn vooral anorganische zouthydraten geschikt. Grote beperking vormt meestal de slechte thermische geleidbaarheid van PCM's wat de laad en ontlad capaciteit van de buffer beperkt. Daarom wordt er veelal gebruik gemaakt van aparte warmtetransportmiddelen. In deze paragraaf wordt een tweetal systemen behandeld: een tank gevuld met natriumacetaat (paragraaf 4.2.1) en het zogenaamde GALISOL⁵-systeem (paragraaf 4.2.2).

4.2.1 Natriumacetaat systeem

Er is reeds een systeem op de markt gebracht waar als PCM gebruik wordt gemaakt van natriumacetaat dat volgens de fabrikant ongevaarlijk en volledig recyclebaar is. Het opslagvolume bedraagt 2 m^3 en is voor 95% gevuld met PCM. De rest van het systeem is deels gevuld met een vloeistof om de warmteoverdracht te verzorgen (een synthetische olie) en deels met lucht noodzakelijk om de volumetoename bij temperatuurstijging op te vangen. Een pomp verzorgt de stroming van de olie door het PCM. Een platenwarmtewisselaar verzorgt de warmte-opname en -afgifte van de olie naar de omgeving. De tank is geïsoleerd met cellulose vezels zodanig dat het warmteverlies van de tank van $58,5 \text{ }^\circ\text{C}$ naar omgevingstemperatuur van $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ca. 2 % / dag bedraagt (160 W).

Tabel 4.2.1 *Latente warmte opslag met met een met natriumacetaat gevulde opslagtank.*

Naam	Smelttemperatuur ($^\circ\text{C}$)	Smeltwarmte (kWh/m^3)	Max.capaciteit (kWh/m^3)	Prijs (DM / GJ)
Natriumacetaat	58,5	75	98 (bij $\Delta T 15 \text{ }^\circ\text{C}$)	22.400 (excl. BTW)

4.2.2 Galisol systeem

Het Galisol opslagsysteem is een dynamisch opslagsysteem voor latente warmte. De warmte-uitwisseling vindt plaats door gebruik te maken van drie fasen: gas, vloeibaar en vast. Het systeem heeft de volgende voordelen ten opzichte van overige warmte-opslag systemen met behulp van latente warmte:

1. Geen bewegende delen (pompen, mixers);
2. Geen stratificatie;
3. Goede warmte-overdracht;
4. Relatief hoge energie omzetting.

⁵ Galisol = Gaseous - Liquid - Solid

Het opslagsysteem is opgebouwd uit de volgende componenten:

1. Fase transformatie materiaal (Tabel 4.2.2) ;
2. Warmte transportmedium (zorgt voor goede warmtewisseling tussen PCM en input/output warmtewisselaar) (Tabel 4.2.3);
3. Surfactant (dit materiaal voorkomt klonteren PCM, een voorbeeld is een tetra-alkylammoniumzout);
4. Additieven (een voorbeeld is Borax).

Het laden van het systeem gaat als volgt: er wordt warmte aangeleverd aan de input warmtewisselaar op de bodem. Hierdoor verdampt een deel van het vloeibare transportmedium. De dampbellen die ontstaan stijgen op naar de top en transporteren hun warmte naar het vaste fase transformatie materiaal. Het PCM smelt en wordt vloeibaar. Het transportmedium condenseert en zakt door zijn grotere dichtheid naar beneden.

Het ontladen verloopt in feite andersom: de output warmtewisselaar bevindt zich in een gaskamer bovenin het systeem. Het gasvormige transportmedium dat warmte heeft onttrokken aan het fase transformatie materiaal condenseert op de warmtewisselaar. Hierdoor neemt de druk af waardoor opnieuw transportmedium verdampt. Deze onttrekt zijn warmte aan het PCM dat zodoende weer stolt. Het effectieve toepassingsbereik van een systeem met $\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ met ethanol ligt tussen de 45 en 68 °C. De opslagcapaciteit ligt in de praktijk in de orde van 36 kWh per 780 kg aan PCM.

Tabel 4.2.2 *Opslagmedia voor Galisol systemen, overgenomen uit [Biedermann, 1994].*

PCM:	Smeltpunt : (°C)	Dichtheid vast / vloeibaar: (kg/m ³)	Smeltwarmte: (kJ/kg)	Soortelijke warmte: (kJ/kgK)	Warmtegeleiding vast / vloeibaar: (W/m K)
$\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$	78	2070 / 1937	293,0		1,26 / 0,63
HDPE-granulaat	110-125	940	160	2,3	0,4

Tabel 4.2.3 *Media voor warmtetransport voor Galisol systemen, overgenomen uit [Biedermann, 1994].*

PCM:	Verdampings temperatuur : (°C)	Dichtheid vloeibaar: (kg/m ³)	Soortelijke warmte: (kJ/kgK)	Verdampingswarmte: (kJ/kg)
Ethanol	78,3	757	3,0	963
Water	100	998	4,18	2260

Tabel 4.2.4 *Overzicht van Galisol systemen [Biedermann, 1994].*

Type	X-80	X-120	Eenheid
Inhoud:	50	1.000	liter
Warmtewisselaars:	platen	platen	
• laden	0,36	0,30	m ²
• ontladen	0,36	0,54	m ²
Opslagcapaciteit:	4	53,6	kWh
Ontladingscapaciteit:	2,5 - 7,5	8 - 43	kW
Prijs			
• totaal	11.361,- (5.961,-) ⁶	36.470,-	DM
• per kWh (ΔT 10 °C)	2.840,- (1.490,-)		DM / kWh
• per kWh (ΔT 15 °C)		680,-	DM / kWh

Een overzicht van de voor- en nadelen van het systeem kunt u vinden in Tabel 4.2.5

 Tabel 4.2.5 *Overzicht voor- en nadelen Galisol-systeem.*

Voordelen:
1. Hoge opslagcapaciteit;
2. Goede warmte-overdracht prestaties;
3. Mogelijkheid van gelijktijdige warmtetoe- en afvoer.
Nadelen:
1. Er wordt in sommige gevallen nog gebruik gemaakt van CFK's;
2. Duur systeem door noodzaak van edelmetalen voor tanksysteem en hogere kosten van opslagmedium.

4.3 Ingekapselde Fase Transformatie Materialen

Om de warmtegeleiding van PCM te verbeteren is het gunstig om het oppervlak te vergroten. Eén van de mogelijkheden daartoe is het materiaal in te kapselen in kleine pakketjes van kunststof of metaal (bolletjes of blikjes). Het verpakkingsmateriaal moet naast een redelijke warmtegeleiding ook voldoende weerstand bieden tegen de volumeveranderingen die optreden bij het laden en ontladen van het fase transformatie materiaal. Op dit moment zijn een aantal ingekapselde PCM reeds commercieel leverbaar. Een drietal systemen wordt hier besproken. Ten eerste een systeem dat gebruik maakt van aluminium blikjes gevuld met PCM (4.3.1). Verder een systeem dat gebruik maakt van bolletjes gevuld met PCM van enkele microns groot (4.3.2). Tenslotte een systeem van kunststof bollen gevuld met PCM van enkele centimeters groot (4.3.3).

4.3.1 PCM ingekapseld in aluminium

Eén van de op de markt aanwezige systemen zijn aluminium blikjes van $\pm 2\frac{1}{2}$ centimeter dikte volledig gevuld met Glauber zout ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) of een mengsel van Glauber zout en KCl. Een alternatief hierop is een systeem gebaseerd op dezelfde PCM alleen nu vormgegeven in een aluminium container met koel-vinnen. Dit laatste product wordt

⁶ Bij een uitvoering zonder inkapseling van PCM

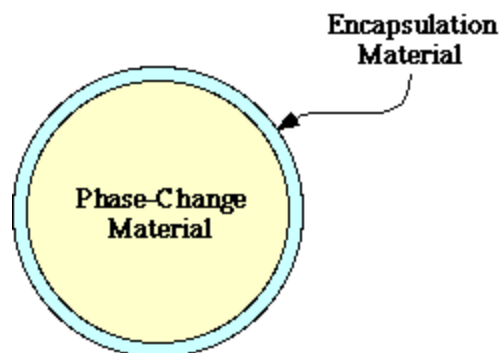
toegepast voor de koeling van telecommunicatiehuisjes. Met behulp van geforceerde (nacht)ventilatie wordt de warmte weer onttrokken uit de container met PCM.

Tabel 4.3.1 *Overzicht van PCM's ingekapseld in aluminium [Hetenyi, 1981].*

	Type 1	Type 2	Eenheid ⁷
Samenstelling materiaal:	Glauber zout	Glauber zout + KCl	
Gewicht blikje:	± 250	± 250	gram
Smelttemperatuur:	23	32	°C
Smeltwarmte:	162	215	kJ/kg
	6.480	7.200	kJ/m ³
Opslagcapaciteit: (max.) (25-45 °C)	201,6	244,8	kJ/kg
	14	17	Wh / blikje
Prijs	16,24	17,00	f / kg
	0,29	0,25	f / Wh

4.3.2 Micro-gekapselde PCM

Micro-gekapselde PCM's zijn capsules met een diameter van één tot enige honderden microns gevuld met een fase transformatie materiaal. Het materiaal kan veelal gewoon verwerkt worden in poeders of vloeistoffen. Het inkapselingsproces is een variant op het 'in situ' polymerisatie proces.



Figuur 4.3.1: *Doorsnede micro-PCM.*

Voorbeelden waar het materiaal in wordt toegepast varieert van koelvloeistoffen, verven en coatings, vloerbedekking, beschermende kleding, koeling en bescherming electronica.

Belangrijkste voordelen zijn een goede warmte-overdracht en de mogelijkheid tot menging met andere materialen, bijvoorbeeld vloeistoffen als water en bouwmaterialen. Het belangrijkste nadeel is de hoge prijs.

Tabel 4.3.2 *PCM in micro-inkapseling opgesloten.*

Naam	Smelttemp. (°C)	Smeltwarmte (kJ/kg)	Capsule diam. (microns)	Dichtheid (kg/m ³)	Prijs ⁸ (f / kg)
X-43	6	163	15-40	870	40-1200
X-65	18	173	15-40	880	40-1200
X-83	28	186	15-40	880	40-1200
X-96	36	105	15-40	900	40-1200
X-122	50	160	15-40	900	40-1200
X-190	80	200	15-40	930	40-1200
X-225	101	193	15-40	930	40-1200

⁷ Voor vergelijking met overige systemen zie tabel 4.4.1.

⁸ Prijsopgave is sterk afhankelijk van de hoeveelheid (5 kg tot 25 ton) die afgenomen wordt.

4.3.3 PCM ingekapseld in nodulen

Nodulen zijn bolvormige elementen gevuld met fase transformatie materiaal. De nodulen zijn gemaakt van polyolefine (hoge dichtheid polyethyleen) en zijn tot nog toe in twee diameters verkrijgbaar: 77 en 96 mm. De keuze van de samenstelling van het PCM is tot op heden vooral gericht op koude-opslag, de leverbare smelttemperaturen variëren tussen de min 33 en plus 27 °C. Volgens opgave van de fabrikant doet zich geen afname van de warmtecapaciteit voor na een groot aantal cycli.

Toepassingen zijn: opslag koude voor koelinstallaties slachthuizen ($T_s = -10$ tot -15 °C); koeling van zuivel en computerruimten ($T_s = 0$ tot -6 °C); voor airconditioning ($T_s = 0$ °C) en als bron voor warmtepompen ($T_s = 27$ °C). In het buitenland zijn reeds vele projecten voor koude-opslag uitgevoerd, in Nederland pas sinds kort. Binnenkort wordt een project in Amsterdam gestart voor 150 m^3 koude-opslag.

Voor warmte-opslag zijn twee temperatuurniveaus leverbaar: 57 en 64 °C, maar door de geringe vraag op dit moment naar hogere temperatuurniveaus zijn de nodulen relatief duur. De verwachting is dat als de prijs van de hogere temperatuur nodulen vergelijkbaar wordt met de prijs op dit moment van de nodulen voor lagere temperaturen.

Tabel 4.3.3 *PCM in nodulen opgesloten. Waarden gelden voor 1 m^3 tankvolume gevuld met (± 3333) nodulen.*

Naam	Smelttemp. (°C)	Smeltwarmte (kWh/m ³)	Soortelijke warmte (Vast/vloeibaar) (kW/K m ³)	Nodulen gewicht (kg)	Prijs ⁹ (f / m ³)
XX-33	-33	44,6	0,70 / 1,08	743	-
XX-6	-5,5	44,6	0,75 / 1,10	607	-
XX-3	-2,6	48,3	0,80 / 1,20	590	-
X-00	0	48,4	0,86 / 1,04	580	1.700
X-27	27	44,5	0,86 / 1,04	892	4.800
X-57	57	30	0,97 / 1,10	-	-
X-64	64	68	1,01 / 1,07	-	-

4.4 Discussie

Aangezien de ontwikkeling van geschikte PCM voor het impregneren van bouwmaterialen zich momenteel nog in de fase van patentaanvraag bevindt, kan niet op korte termijn verwacht worden dat deze optie van thermische energie opslag realiseerbaar is in de Nederlandse (utiliteits)bouw. In Nederland is de branche van zowel gips als beton niet op de hoogte van de ontwikkelingen op het gebied van bouw materiaal geïmpregneerd met PCM. Wel is er belangstelling om op de hoogte te worden gehouden van deze ontwikkelingen, voor eventuele toepassing op iets langere termijn.

Het Galisol systeem is relatief erg kostbaar, zeker in vergelijking met een vergelijkbaar tanksysteem gevuld met natriumacetaat dat reeds op de markt verkrijgbaar is (zie paragraaf 4.2.1). Een nadeel van tanksysteem is dat het veelal minder goed in bestaande bouw te plaatsen is dan een waterzakstelsel.

⁹ Prijs is voor 1 m^3 nodulen exclusief tanksysteem.

Tabel 4.4.1 *Vergelijkend overzicht PCM-systemen.*

Systeem:	Smeltemp.: (°C)	Maximale capaciteit: (kWh / m ³)	Prijs (excl BTW): (f / kWh)
Organische PCM's	16 - 53,2		
• puur		32,3 - 46,2 ($\Delta T=6$ °C)	-
• incl. bouw materiaal		1,2 - 12,4 ($\Delta T=6$ °C)	-
Tank met natriumacetaat	58,5	98 ($\Delta T=15$ °C)	92,3 (incl. tank)
Galisol			
• X-80	78	80 ($\Delta T=10$ °C)	1.700 - 3.250
• X-120	110-125	53,6 ($\Delta T=15$ °C)	775
PCM in aluminium			
• X-20	23	$\pm 89,6$ ($\Delta T=20$ °C)	290
• X-30	32	$\pm 108,8$ ($\Delta T=20$ °C)	250
Micro-PCM's	6 - 101	26,3 - 51,6	720 - 41.000
Nodulen	-33 - +64	30 - 68 ¹⁰	30 - 100 (excl. tank) 123-312 (incl tank ¹¹)
Referentie:			
• water	-	17,4 ($\Delta T=15$ °C)	225 (incl. systeem) ¹²
• beton(massa)	-	2,9 ($\Delta T=6$ °C)	

Van de ingekapselde PCM materialen zijn de micro-PCM's qua prijs niet geschikt voor bulkverwerking. PCM's ingekapseld in aluminium zijn relatief duurder dan nodulen met een vergelijkbaar temperatuurniveau. Voor kleinschalige toepassingen kan de hogere prijs van de aluminium blikjes opwegen tegen de grotere capaciteit van laden en ontladen.

Bij een grotere vraag naar nodulen voor hogere temperatuur opslag (27 - 64 °C) kan de prijs dalen naar het prijsniveau van het type X-00. Dit aangezien de kostprijs voornamelijk bepaald worden door het productieproces en niet door het type PCM. De fabricant is bereid onderzoek te verrichten naar PCM's met smeltemperatures tussen de 35 - 45 °C en naar kleinere diameters van de nodulen. Zeker de combinatie van de nodulen gevuld met PCM met de waterzak biedt perspectieven.

¹⁰ Capaciteit gebaseerd op 1 m³ opslagvolume gevuld met maximaal aantal gestapelde nodulen en koude/warmte-drager medium.

¹¹ Kleinste bijbehorende tanksysteem (inhoud=2 m³) kost f 6350,- excl. BTW

¹² Volgens Biedermann, VDI Berichte 1994.

5. MODELBEREKENINGEN

5.1 Inleiding

Om een betere inschatting te kunnen maken wat de besparingen zijn op brandstofkosten, investeringskosten en / of de vermindering van de milieubelasting is het noodzakelijk om naast de bereedeneerde schattingen [Wassenaar, 1996] ook dynamische simulatieberekeningen uit te voeren. Gemiddelde waarden per jaar kunnen namelijk leiden tot een vertekend beeld. Gekozen is om gedurende een jaar in stappen van een uur een systeem door te rekenen. Steeds wordt het systeem eerst doorberekend zonder buffer, waarna de besparingen worden berekend voor één of meerdere alternatieven met een opslagsysteem voor thermische energie. Voor de alternatieven is steeds getracht om een zo'n realistisch mogelijke keuze te doen betreffende temperatuurniveaus, capaciteit bufferinstallatie, vermogen installaties en regeling, maar voor een geoptimaliseerd systeem zijn nadere berekeningen noodzakelijk.

In de volgende paragrafen wordt eerst het gekozen referentiesysteem beschreven (paragraaf 5.2), de warmtevraag van het utiliteitsgebouw (paragraaf 5.3), de klimaatgegevens (paragraaf 5.4) en wordt het ontwerp van de warmte-opslag nader gespecificeerd (paragraaf 5.5). Vervolgens worden de veronderstellingen en resultaten van de modelberekeningen beschreven.

Een aantal praktijksituaties is berekend:

1. Een HR-ketelinstallatie zonder buffer (als referentie);
2. Een systeem met zonnecollectoren en een HR-ketelinstallatie (paragraaf 5.5);
3. Een warmtepomp als basislast met een HR-ketel voor de pieklast (paragraaf 5.6);
4. Een WKK-installatie met een HR-ketel voor piekbelasting (paragraaf 5.7);
5. Een warmtenet zonder extra piekinstallatie (paragraaf 5.8).

Alle resultaten worden bekeken vanuit het gezichtspunt van de gebruiker van de installatie (de gebouwbeheerder). Alleen de berekening voor de besparing op investeringskosten van een warmtenet wordt bekeken vanuit de beheerder van het warmtenet.

5.2 Beschrijving referentiegebouw

Voor de modelberekeningen is als referentie gekozen een utiliteitsgebouw op het ECN-terrein, omdat hiervan een model van de warmtevraag beschikbaar is. De warmtevraag van het gebouw is gebaseerd op de huidige situatie.

Tabel 5.2.1 *Referentiegebouw (AL-gebouw).*

Bruto vloeroppervlak (bvo)	3530	m ²
Bruto volume	13.600	m ³
Verwarmingsinstallatie ¹³		
• WKK (basislast)	250	kW _{elek}
	160-400	kW _{therm}
• HR-ketel (pieklast)	837	kW _{therm}
• VR-ketel (pieklast)	435	kW _{therm}
• Radiatoren / convectoren		

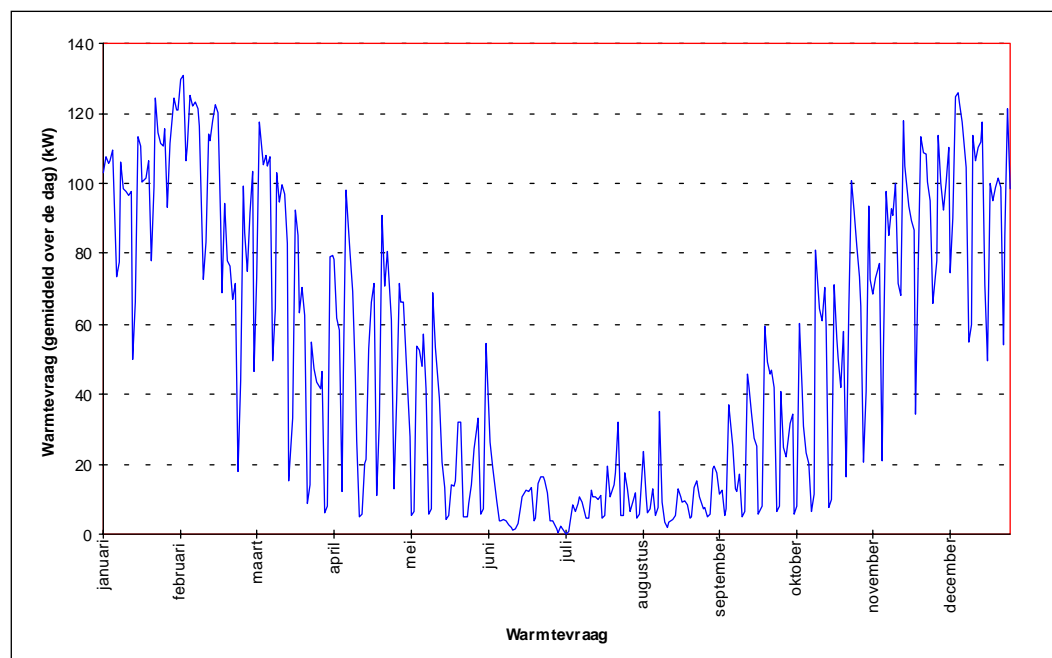
¹³ WKK- en ketelinstallaties worden benut voor meerdere gebouwen

Tabel 5.2.2 *Vergelijking uitgangswaarden referentiesysteem met richtwaarden Novem.*

	Modelberekening referentiegebouw	Richtwaarde Novem ¹⁴	Eenheid
Totaal ketelvermogen	400	462	kW
Gemiddeld specifiek vermogen	34	44	W/m ³
Totale warmtevraag	449.610	623.700	kWh/jaar
	1619	2245	GJ/jaar
Gemiddeld aantal vollasturen	1124	1100-1600	uur
Benuttingsgraad	12,8	15,7	%

5.3 Warmtevraag

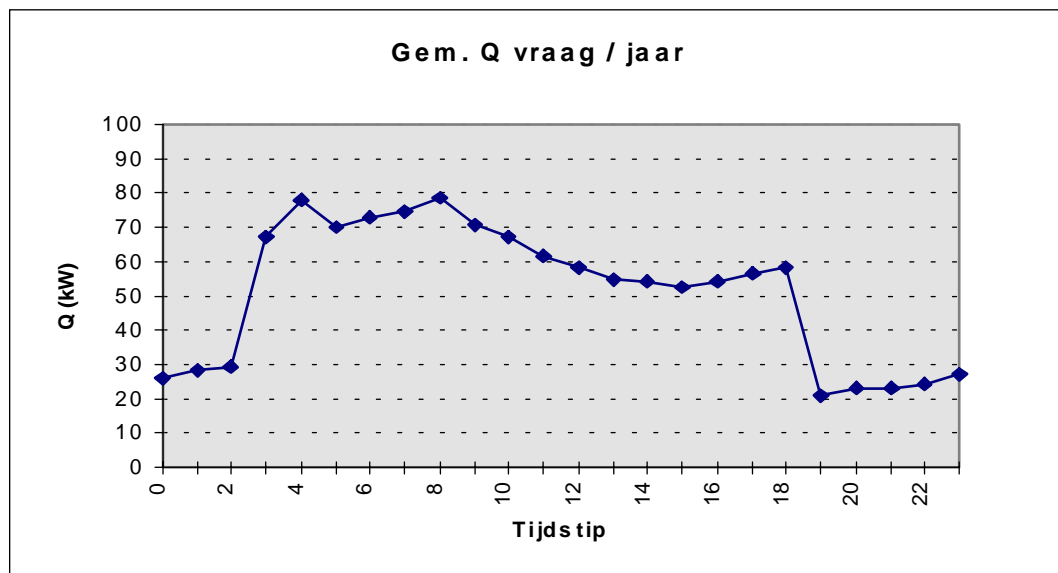
Voor de warmtevraag van het gebouw is gebruik gemaakt van een dynamische simulatieprogramma (TRNSYS¹⁵). Indien de gemiddelde vraag per dag over het jaar wordt berekend, blijkt de warmtevraag sterk te variëren. Toch is de seizoensafhankelijkheid van de warmtevraag duidelijk zichtbaar (Figuur 5.3.1).


 Figuur 5.3.1 *Gemiddelde warmtevraag van het referentiegebouw per dag.*

De warmtevraag varieert ook over de dag gezien. Gemiddeld over het jaar is de warmtevraag overdag ruim twee keer zo groot als 's nachts (Figuur 5.3.2).

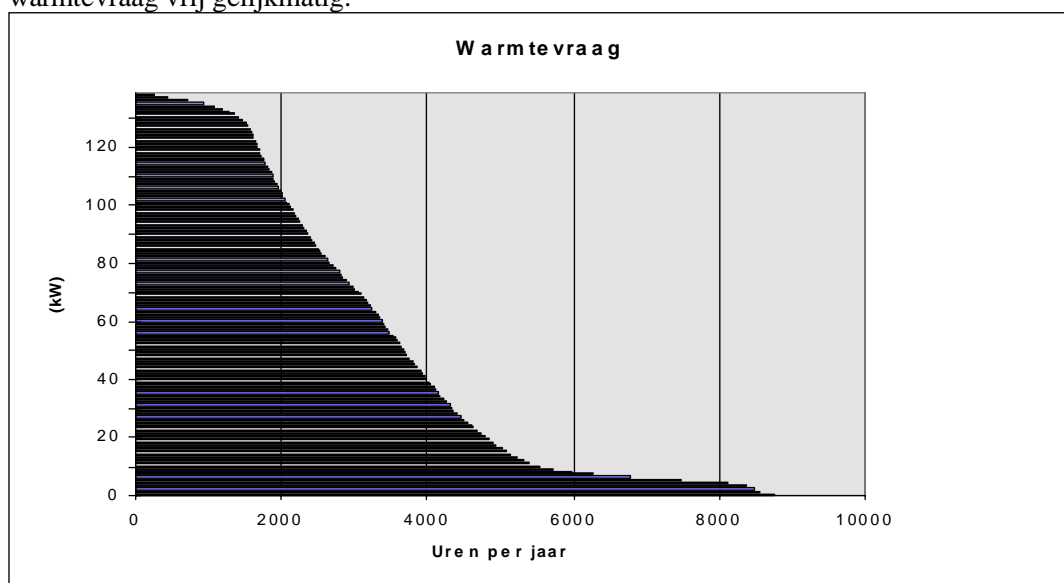
¹⁴ [T. Ruesink, 1994]

¹⁵ TRNSYS, a transient system simulation program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, USA, 1990.



Figuur 5.3.2 *Gemiddelde warmtevraag over het jaar gezien van het referentiegebouw per tijdstip.*

Een jaarbelastingduurkromme geeft een goed overzicht in hoeveel uur per jaar een bepaalde warmtevraag zich voordoet (Figuur 5.3.3). Aan de hand van deze figuur kan ook bepaald worden hoe groot het vermogen van een systeem moet zijn voor basislast en pieklast. Een echte piekvraag doet zich niet voor in dit model, mede door een relatief grote betonmassa van het gebouw is de warmtevraag vrij gelijkmatig.



Figuur 5.3.3 *Jaarbelastingduurkromme warmtevraag van het referentiegebouw.*

5.4 Beschrijving klimaatmodel

Het rekenmodel maakt voor warmte-opslag in combinatie met zonnecollectoren gebruik van een model dat het aanbod van zonne-energie berekent. Hierbij is gebruik gemaakt van een klimaatmodel waarin over een periode van 40 jaar een gemiddelde wordt berekend voor temperatuur, zonaanbod, wind en andere parameters. Voor het maandgemiddelde wordt een maand uitgezocht die het beste past bij dit gemiddelde. Het model rekt dus met werkelijk gemeten waarden, alleen met maanden uit verschillende jaren. Binnen ECN is door de unit Duurzame Energie¹⁶ een nieuw model ontwikkeld dat naast directe- en diffuse straling beter rekening houdt met reflectie dan de tot nu toe ontwikkelde modellen. De jaarlijkse hoeveelheid zonnestraling ligt hierdoor iets hoger dan andere referentiewaarden [Novem / Ecofys, 1995].

Voor een volledige beschrijving van de factoren die het aanbod van zonne-energie beïnvloeden wordt verwezen naar bijlage 1, voor het temperatuurverloop naar bijlage 2.

5.5 Systeem voor thermische energieopslag

In het rekenmodel is uitgegaan van een waterzak gevuld met water (zie ook hoofdstuk 3). Uitgegaan is van de volgende veronderstellingen:

1. Het medium in de buffer is ideaal gemengd (geen gelaagdheid);
2. De warmtecapaciteit bij het laden en ontladen bedraagt maximaal 100 kW;
3. De warmteverliezen worden bepaald door: de omgevingstemperatuur van een kruipruimte ($T_o = 10 \text{ }^\circ\text{C}$); de temperatuur van het opslagmedium; de afmetingen van de constructie; de natuurlijke convectie naar de omgeving (verticaal / horizontaal); de natuurlijke convectie in de waterzak ($h_{\text{water}} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$); de convectie naar de bodem ($h_{\text{bodem}} = 200 \text{ W/m}^2 \text{ K}$); de geleiding van het folie van de waterzak en de isolatiematerialen (zie Tabel 5.5.1);
4. Het temperatuurniveau van de buffer ligt voor warmte-opslag tussen de 35-45 °C voor een warmtepomp en tussen de 40-80 °C voor de overige systemen.
5. De buffer wordt alleen toegepast voor ruimteverwarming, niet voor het gebruik van tapwater.

Tabel 5.5.1 *Materiaaleigenschappen folie / isolatiematerialen.*

Materiaal	Dichtheid (kg/m^3)	Warmtegeleidings weerstand k (W/m K)	Dikte (mm)
PVC gecoat polyesterweefsel	1222	0,15	0,9
Polystyreen platen	-	0,027	80
Steenwol isolatiedeken	-	0,041	140

Om inzicht te bieden in de werkelijke financiële besparingen is gebruik gemaakt van de Netto Contante Waarde (NCW). Hierbij wordt gerekend met de initiële investeringen voor de buffer, de extra kosten voor onderhoud & beheer en de besparingen op energiekosten door het plaatsen van een buffer (zie bijlage 13). Uitgegaan wordt van een bedrijfstijd van 15 jaar bij een vaste rentevoet over deze periode (4 - 10 %).

Voor een warmtekracht installatie is ook gerekend met een waterzak gevuld met nodulen met fase transformatie materiaal. De warmte-overdracht vindt plaats met water. Op deze

¹⁶ Het model is ontwikkeld door dr. A. Garcia Celma, ECN-DE.

wijze kan met een kleiner volume een grotere opslagcapaciteit worden bereikt. Voor het temperatuurniveau van 40 - 80 °C neemt bij gelijk volume de opslagcapaciteit ruim een factor twee toe. Bij een smaller temperatuurgebied ligt dit een orde groter.

5.6 Zonnecollectoren

5.6.1 Inleiding

Om aan de jaarlijkse warmtevraag volledig te voldoen met de inzet van zonnecollectoren is het noodzakelijk seizoensopslag toe te passen wat buiten het kader van deze opdracht valt (figuur B11.1, bijlage 11). Maar wordt er gekozen om hoofdzakelijk in voor- en najaar zonne-energie in te zetten voor ruimteverwarming, dan kan men zich beperken tot kortetermijn warmte-opslag.

Door gebruik te maken van warmte-opslag is het mogelijk de benuttingsgraad van de zonnecollector te verhogen. Dit aangezien de warmtevraag veelal door benutting van de passieve zonne-energie lager is op het moment van aanbod zonne-energie. Door dit faseverschil tussen aanbod en vraag te bufferen is het mogelijk te besparen op gas.

Het doel van dit onderzoek is niet te bekijken of het toepassen van zonnecollectoren voor ruimteverwarming als aanvulling op een ketel-systeem zinvol of financieel haalbaar is, maar te kijken welke besparingen haalbaar zijn bij een zonnecollector met buffer in vergelijking met een systeem zonder opslag.

5.6.2 Veronderstellingen

Er is hier gebruik gemaakt van het rekenmodel voor aanbod zonne-energie zoals beschreven in paragraaf 5.4. Bij de berekeningen is gebruik gemaakt van de volgende veronderstellingen:

1. De collector met een oppervlak van 600 m² is 5 ° westelijk van het zuiden geplaatst;
2. De hellingshoek bedraagt 35 °;
3. Voor het collectorrendement is een vaste waarde gekozen, namelijk 50 %;
4. Regeling toevoegen / onttrekken warmte aan opslag volgens Tabel 5.6.1;
5. HR-ketel voor pieklast kent geen minimum vermogen en heeft een constant rendement;
6. Tarief voor aardgas is gebaseerd op kleinverbruikerstarief voor niet-huishoudelijk gebruik (zie bijlage 4);
7. Onderhoudskosten voor zonnecollectoren worden aangenomen op 1% van de investeringskosten per jaar, voor de HR-ketel op 3% van de investeringskosten per jaar.

Tabel 5.6.1 *Regeling warmte zonnecollectoren toevoegen / onttrekken aan opslag.*

Warmte toevoegen aan opslag:	Indien aanbod zonne-energie groter is dan warmtevraag
Warmte onttrekken uit opslag:	Indien aanbod zonne-energie onvoldoende is om warmtevraag te dekken

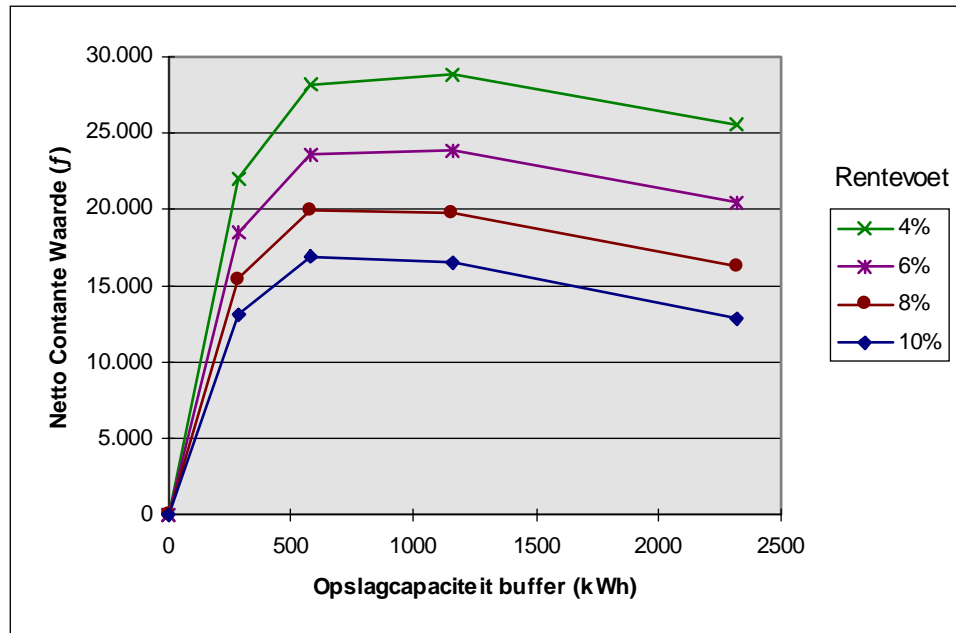
5.6.3 Resultaten

Door toepassing van een warmte-buffer met een capaciteit van 1156 kWh (4,2 GJ) gaat de benutting van de zonnecollectoren met ± 60 % omhoog. Door het toevoegen van een buffer bedraagt de besparing per jaar op brandstofkosten ruim f 3.500,-. Het is met name in het voor- en najaar dat de buffer optimaal wordt benut (figuur B7.1-B7.2, bijlage 7). Verder is aan de jaarbelastingsduurkrommes te zien dat het aantal bedrijfsuren van de

ketel bijna gehalveerd is, wat gunstig is voor de onderhoudskosten en de levensduur van de ketelinstallatie (figuur B7.3-B7.11, bijlage 7).

In

Figuur 5.6.1 zijn de berekeningsresultaten van de Netto Contante Waarde aangegeven. Het blijkt dat voor een opslagsysteem van rond de 1000 kWh (3,6 GJ) de besparingen maximaal zijn.



Figuur 5.6.1 *Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van 4, 6, 8 en 10 % in combinatie met zonnecollectoren (600 m²) gerekend over een bedrijfsperiode van 15 jaar.*

Voor een volledig overzicht van de resultaten van de modelberekening voor zonnecollectoren wordt verwezen naar tabel B7.1 in bijlage 7.

5.7 Warmtepomp

5.7.1 Inleiding

Bij deze berekeningen wordt uitgegaan van een elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp. Het vermogen van een warmtepomp moet zodanig worden gekozen dat het aantal vollasturen zo hoog mogelijk is rekening houdend met de vermogensafhankelijke COP (Coëfficiënt of Performance) en het minimale vermogen.

Is er naast de warmtepomp geen ketelinstallatie aanwezig voor het opvangen van de pieklast, dan is het mogelijk door gebruik te maken van een buffer de pieklast op te vangen. Zodoende kan eventueel bespaard worden op de (marginale) investeringskosten van de warmtepomp. Indien er een ketelinstallatie aanwezig is, dan is er veelal geen sprake van een besparing aangezien de investeringskosten van een ketel-installatie per vermogensseenheid (kW) relatief beperkt zijn.

Financieel kan er bespaard worden door warmte op te wekken met behulp van een elektrische-warmtepomp tijdens de daluren van het elektriciteitsstarief. De warmte wordt

dan tijdens laagtarief opgeslagen in de buffer en onttrokken tijdens normaal tarief. Afhankelijk van de waarde van de COP van de warmtepomp, is er sprake van een energiebesparing indien de warmtepomp meer draaiuren gaat maken en de ketel-installatie minder. Maar indien de extra warmteverliezen van de buffer naar de omgeving gaan overheersen, kan er juist sprake zijn van een toename van het energieverbruik.

5.7.2 Veronderstellingen

1. COP = 3,4 (constante waarde, onafhankelijk van ΔT en vermogen warmtepomp);
2. Regeling toevoegen / onttrekken warmte aan opslag volgens Tabel 5.7.1;
3. Voorspelling warmtevraag tot 24 uur vooruit;
4. Warmtevraag op temperatuurniveau van 35-45 °C;
5. Electriciteitstarief voor een grootverbruiker, laagspanning met aansluitwaarde van 50 kW in klasse III. Normaal tarief op werkdagen van 7.00 - 23.00 uur, overige uren laagtarief (zie bijlage 4);
6. HR-ketel voor pieklast kent geen minimum vermogen en heeft een constant rendement;
7. Tarief voor aardgas is gebaseerd op kleinverbruikerstarief voor niet-huishoudelijk gebruik (zie bijlage 4);
8. Zowel de onderhoudskosten van de warmtepomp als van de HR-ketel worden aangenomen op 3% van de investeringskosten per jaar.

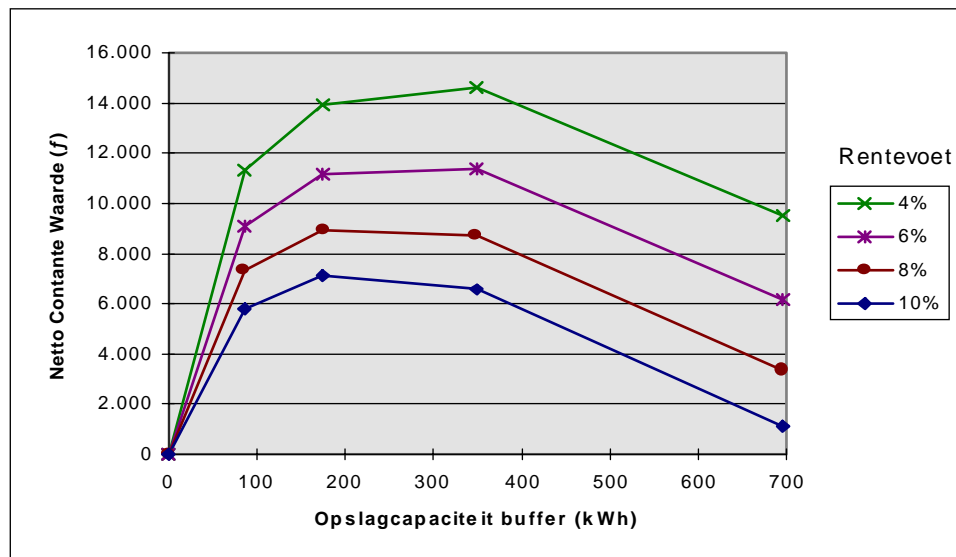
Tabel 5.7.1 *Regeling warmte toevoegen / onttrekken aan opslag vanuit elektrische warmtepomp.*

Warmte toevoegen aan opslag:	Alleen tijdens laagtarief (zie bijlage 4); Maximale opslagcapaciteit bepalen aan de hand van voorspelling warmtevraag tijdens normaal tarief en piekvraag tijdens laagtarief.
Warmte onttrekken uit opslag:	Tijdens normaal (plateau) tarief; Als capaciteitstekort warmtepomp; Als warmtevraag (incl. laden buffer) lager ligt dan minimum capaciteit warmtepomp.

5.7.3 Resultaten

Door het plaatsen van een buffer van 348 kWh (1,25 GJ) neemt het percentage van warmte opgewekt door de warmtepomp met 16 % toe. Het aandeel van de warmtevraag geleverd door de warmtepomp tijdens normaal tarief neemt af van 43 naar 31 % (zie tabel B8.1, bijlage 8). De financiële besparingen voor de utiliteitsbouw met een grootverbruikertarief zijn beperkt aangezien het verschil tussen het plateau- en dalurentarief beperkt is en de vaste vergoeding voor aansluiting relatief hoog is.

Een extra besparing op exploitatiekosten is mogelijk indien de waarde van de COP stijgt. De waarde van de COP kan stijgen door een gunstiger temperatuurniveau en/of een gemiddeld hoger vermogen waarop de warmtepomp draait. In de berekeningen is hier niet rekening mee gehouden.



Figuur 5.7.1 *Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van 4, 6, 8 en 10 % in combinatie met een warmtepomp 100 kW_{therm}) gerekend over een bedrijfsperiode van 15 jaar (grootverbruikerstarief).*

Uitgaande van de Netto Contante Waarde (Figuur 5.7.1) als evaluatietechniek, zijn de projecten met een buffer met een opslagcapaciteit tussen de 100 en 400 kWh het meest rendabel.

5.8 WKK

5.8.1 Inleiding

De benutting van een warmtekracht installatie (WKK) kan worden verhoogd door het overschot van de door de WKK opgewekte warmte op te slaan in een buffer en te onttrekken op momenten van piekvraag naar warmte. Tevens kan de opslag ook de warmtevraag opvangen op momenten dat deze lager is dan het minimale vermogen van de WKK. Een WKK heeft veelal een hoger elektrisch rendement als de installatie op vollast in plaats van deellast wordt bedreven. Afhankelijk van de regeling is het mogelijk met een buffer het aantal vollasturen te vergroten. Met behulp van simulatie kan worden nagegaan of er sprake is van een daling van het energieverbruik.

5.8.2 Veronderstellingen

1. Thermisch- en elektrisch rendement WKK-installatie vermogensafhankelijk;
2. Regeling toevoegen / onttrekken warmte aan opslag volgens Tabel 5.8.1;
3. Minimum vermogen WKK installatie bedraagt 35 % van pieklastermogen;
4. Voorspelling warmtevraag tot 24 uur vooruit;
5. Terugleververgoeding aan net geleverde elektriciteit is constant. Deze vergoeding wordt in de resultaten meegenomen in de energiekosten (zie bijlage 4);
6. De HR-ketel voor pieklastermogen kent geen minimum vermogen en heeft een constant rendement.
7. Het tarief voor aardgas voor WKK gebruik is gebaseerd op het WKK-tarief; het aardgastarief voor de ketel is gebaseerd op het kleinverbruikerstarief voor niet-huishoudelijk gebruik (zie bijlage 4);

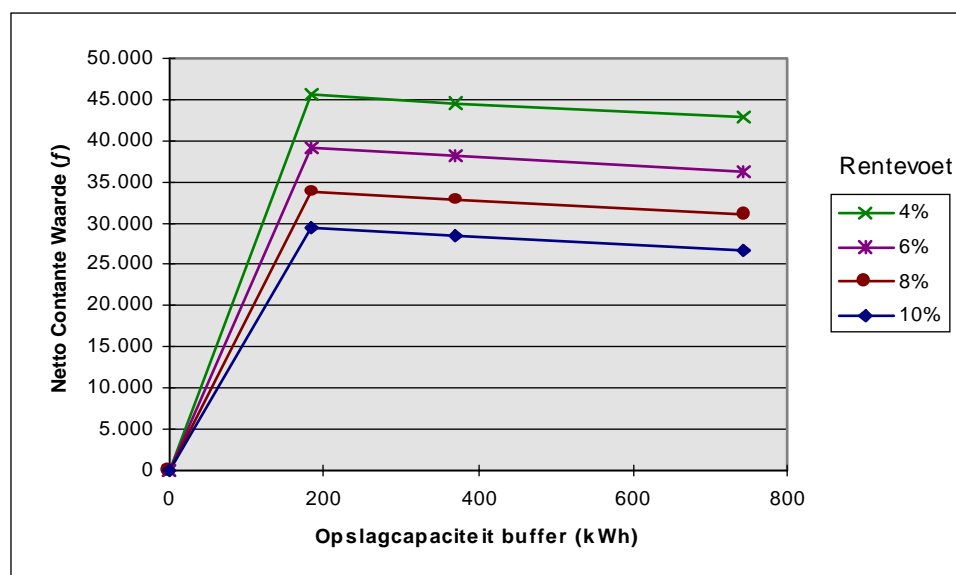
8. Onderhoudskosten voor de WKK worden aangenomen op f 0,015 / kWh_{elek}, voor de HR-ketel op 3% van de investeringskosten per jaar;
9. De WKK is warmtevraag gestuurd;
10. Resultaten bekeken vanuit gezichtspunt gebouwbeheerder.

Tabel 5.8.1 *Regeling warmte WKK-installatie toevoegen / onttrekken aan opslag.*

Warmte toevoegen aan opslag:	Altijd; Maximale opslagcapaciteit bepalen door voorspelling van piekvraag en warmtevraag indien vermogen onder minimumcapaciteit WKK komt.
Warmte onttrekken uit opslag:	Tijdens piekvraag en indien warmtevraag onder minimum vermogen WKK-installatie komt.

5.8.3 Resultaten

Met een buffersysteem zijn er aanzienlijke financiële besparingen te bereiken op energiekosten. Dit geldt zowel voor momenten van pieklust als voor die tijdstippen dat de warmtevraag lager ligt dan de minimum capaciteit van de installatie. Door op deze momenten warmte te onttrekken uit de buffer is het niet noodzakelijk over te schakelen op een ketelinstallatie. Bij een buffer van 371 kWh (1,33 GJ) neemt de totale benutting van de WKK met 24 % toe, het gebruik van de ketel met 78 % af (zie tabel B9.1, bijlage 9).



Figuur 5.8.1 *Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van 4, 6, 8 en 10 % in combinatie met een WKK-installatie (100 kW_{therm}) gerekend over een bedrijfsperiode van 15 jaar.*

De besparing op energiekosten neemt toe bij het groter worden van de opslagcapaciteit van de buffer. Om de initiële investeringskosten van de buffer te vergelijken met de besparing op exploitatiekosten is ook hier de Netto Contante Waarde berekend. Het blijkt dat voor een buffer rond de 200 kWh (0,72 GJ) de NCW het beste resultaat oplevert (Figuur 5.8.1).

Het gebruik van een waterzak gevuld met nodulen PCM levert slechts een lichte verbetering van de benutting van de buffer op. Wel zijn de warmteverliezen duidelijk

minder. Het gemiddelde temperatuurniveau waarop de warmte wordt aangeleverd ligt bij het gebruik van PCM hoger. Hier tegenover staan hogere investeringen.

5.9 Stadsverwarming / warmtenet

5.9.1 Inleiding

Er bestaat momenteel nog geen piektarief of tariefdifferentiatie tussen dag- en nachttarief voor warmte, wat het economisch gezien minder aantrekkelijk maakt om warmte op te slaan. Voor de situatie dat een piektarief voor warmte wordt ingevoerd, is in de paragrafen 5.9.2 en 5.9.3 bekeken naar de financiële besparingen die op de energiekosten bereikt kunnen worden.

Vanuit het gezichtspunt van de eigenaar van het warmtenet, veelal een energiedistributiebedrijf, is door de inzet van het bufferen van warmte om de piekvraag op te vangen mogelijk voor het gehele warmtenet een betere benutting te bereiken. Het warmtenet wordt dan gedimensioneerd op basislast waardoor de kosten per aansluiting af kunnen nemen of het aantal aansluitingen kan groeien. Er moet hier een optimum gezocht worden tussen enerzijds de maximale capaciteit van de aansluiting op het warmtenet en anderzijds de bufferopslagcapaciteit (paragrafen 5.9.4 en 5.9.5).

5.9.2 Veronderstellingen warmtenet met piektarief

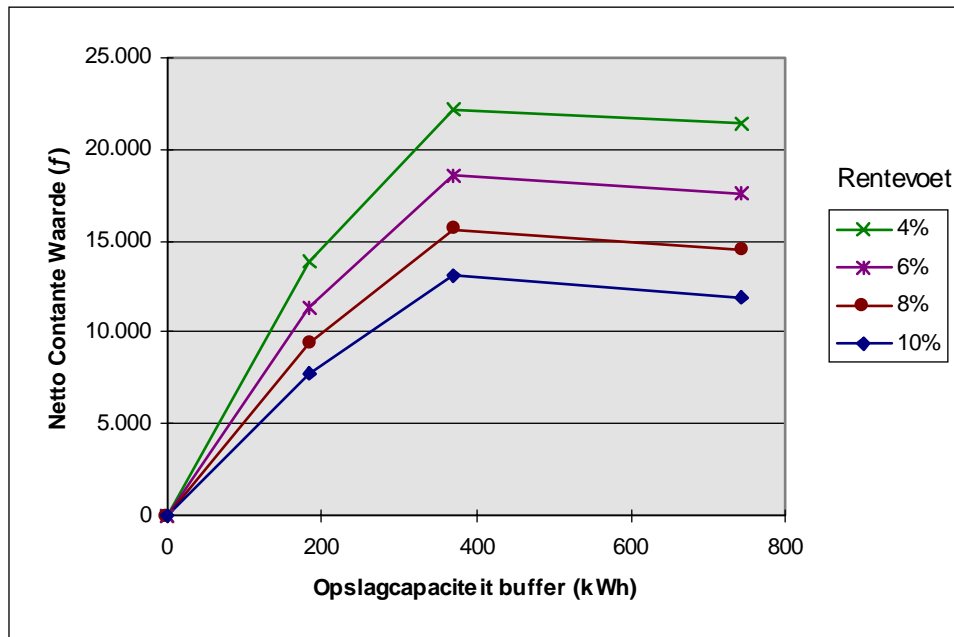
1. 100 % rendement installatie warmtenet vanaf warmtemeter;
2. Regeling toevoegen / onttrekken warmte aan opslag volgens Tabel 5.9.1;
3. Voorspelling warmtevraag tot 24 uur vooruit;
4. Tarief voor warmte is gebaseerd op grootverbruikerstarief (zie bijlage 4);
5. Toeslag voor warmtevraag boven 100 kW (piektarief) bedraagt 100 % boven op het normale tarief voor warmte;
6. Onderhouds- en investeringskosten warmtenet worden niet meegenomen in berekeningen;
7. Het warmtenet kent geen minimum vermogen;
8. Resultaten bekeken vanuit het gezichtspunt van de gebouwbeheerder.

Tabel 5.9.1 *Regeling warmtenet toevoegen / onttrekken aan opslag.*

Warmte toevoegen aan opslag:	Tijdens normaal tarief; Maximale opslagcapaciteit bepalen door voorspelling piekvraag (Warmtevraag > 100 kW).
Warmte onttrekken uit opslag:	Tijdens piekvraag.

5.9.3 Resultaten warmtenet met piektarief

Door het opslaan van warmte op momenten dat de warmtevraag kleiner is dan 100 kW (de gekozen grenswaarde voor piektarief) is het mogelijk om de piek in de warmtevraag af te vlakken. Met een buffer met een opslagcapaciteit van 371 kWh (= 1,33 GJ) is het mogelijk de piekvraag met bijna 60 % te verminderen. Bij een piektoeslag van 100 % is op energiekosten ruim f 2.500,- te besparen (zie tabel B9.2, bijlage 9). In Figuur 5.9.1 valt te zien dat een opslagcapaciteit rond de 400 kWh (1,44 GJ) de NCW de hoogste waarde oplevert. Vanuit de gebouwbeheerder bekeken neemt door warmteverliezen van de buffer het energieverbruik toe. Op het niveau van de beheerder van het warmtenet kan door de gelijkmatiger warmtevraag mogelijk wel een gunstig milieu-effect optreden.



Figuur 5.9.1 *Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van 4, 6, 8 en 10 % in combinatie met een warmtenet (400 kW_{therm}) met een peiktarief (>100 kW_{therm}) gerekend over een bedrijfsperiode van 15 jaar.*

5.9.4 Veronderstellingen voor minimaliseren aansluitwaarde warmtenet

1. 100 % rendement installatie warmtenet vanaf warmtemeter;
2. Regeling toevoegen / onttrekken warmte aan opslag volgens Tabel 5.9.1;
3. Voorspelling warmtevraag tot 365 dagen vooruit;
4. In tegenstelling tot overige berekeningen wordt er geen rekening gehouden met warmteverliezen in de buffer. Het meenemen van warmteverliezen was rekentechnisch niet haalbaar. De invloed van deze veronderstelling op het resultaat is op korte termijn (een periode van enkele dagen) zeer beperkt (1-2 %).
5. De buffer is de enige installatie voor het opvangen van piekvraag;
6. Berekeningen bekeken vanuit gezichtspunt van de beheerder van het warmtenet.

Tabel 5.9.1 *Regeling warmtenet toevoegen / onttrekken aan opslag.*

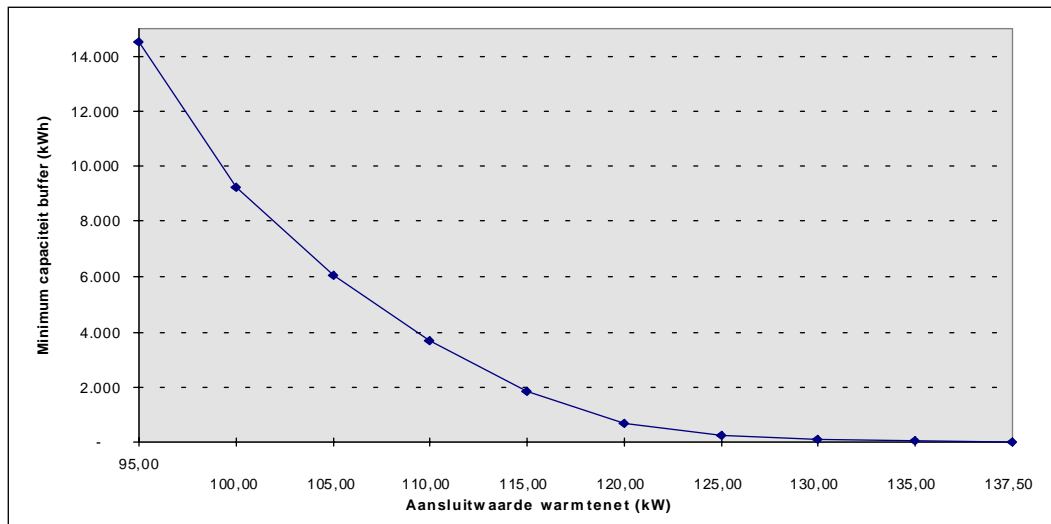
Warmte toevoegen aan opslag:	Altijd; Maximale opslagcapaciteit wordt bepaald door voorspelling van de piekvraag.
Warmte onttrekken uit opslag:	Tijdens piekvraag.

5.9.5 Resultaten voor minimaliseren aansluitwaarde warmtenet

Om het optimum te bepalen tussen enerzijds de kosten van de hoogte van de aansluitwaarde en anderzijds de kosten van de buffercapaciteit is het noodzakelijk voor de gegeven warmtevraag van het referentiegebouw te bepalen bij welke aansluitwaarde welke buffercapaciteit nodig is. In eerste instantie zijn de uitersten berekend. Voor een aansluitcapaciteit gelijk aan de piekvraag van dit warmtevraagmodel (137,5 kW) is geen

buffer noodzakelijk. Anderzijds is voor verliesvrije warmteopslag de minimale aansluitwaarde (51,4 kW), deze volgt door de totale warmtevraag per jaar (449.610 kWh) te delen door het totaal aantal uren per jaar (8760). Voor deze laatste situatie spreekt men niet meer van korte-termijn opslag maar van seizoensopslag.

In figuur B11.1 in bijlage 11 is per tijdstip in het jaar bij gegeven aansluitwaarde berekend welke minimale hoeveelheid warmte verliesvrij moet worden opgeslagen om de piekvraag voor de periode erna op te vangen. In Figuur 5.9.2. is de maximale buffercapaciteit voor de diverse aansluitwaarden uitgezet als functie van het tijdstip in het jaar (uren). Een afname

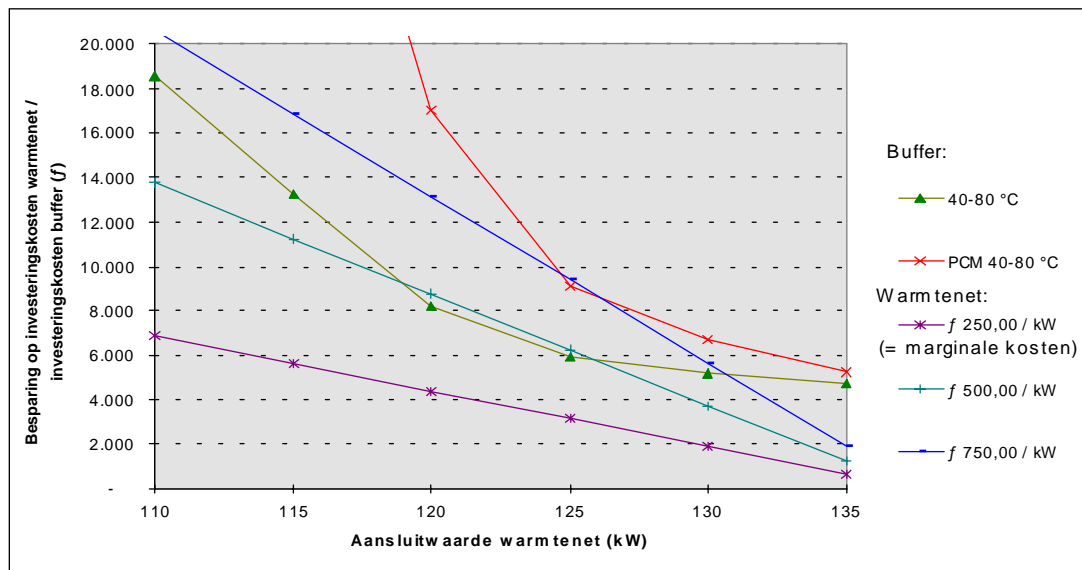


Figuur 5.9.2 *Relatie aansluitwaarde warmtenet- capaciteit buffer voor gegeven model warmtevraag.*

van de aansluitwaarde leidt tot een exponentiële groei van de benodigde opslagcapaciteit van de buffer.

Indien de investeringskosten per kW aansluitwaarde voor een warmtenet bekend zijn, kan uit Figuur 5.9.3. worden afgelezen of er voor de beheerder van het warmtenet een financiële besparing te bereiken valt. Alleen als wordt voldaan aan onderstaande punten is het mogelijk een financiële besparing te verkrijgen in dit warmtevraag model:

1. De (marginale) investeringskosten van het warmtenet liggen rond de f 500,- per kW_{therm} ;
2. De waterzak heeft een nuttige opslagcapaciteit van 6.000 - 9.000 kWh (21,6 - 32.4 GJ);
3. De aansluitwaarde wordt beperkt van 137,5 kW naar \pm 120 kW.



Figuur 5.9.3 *Relatie aansluitwaarde warmtenet - besparing op (marginale) investeringskosten en relatie aansluitwaarde warmtenet - investeringskosten buffer. Geen installatie voor pieklast.*

Voor hogere investeringskosten is over een breder bereik van nuttige opslagcapaciteit, cq. beperking van aansluitwaarde besparingen mogelijk. In een model waar veel grotere pieken optreden in de warmtevraag, zijn de besparingen relatief veel groter.

5.10 HR-ketel

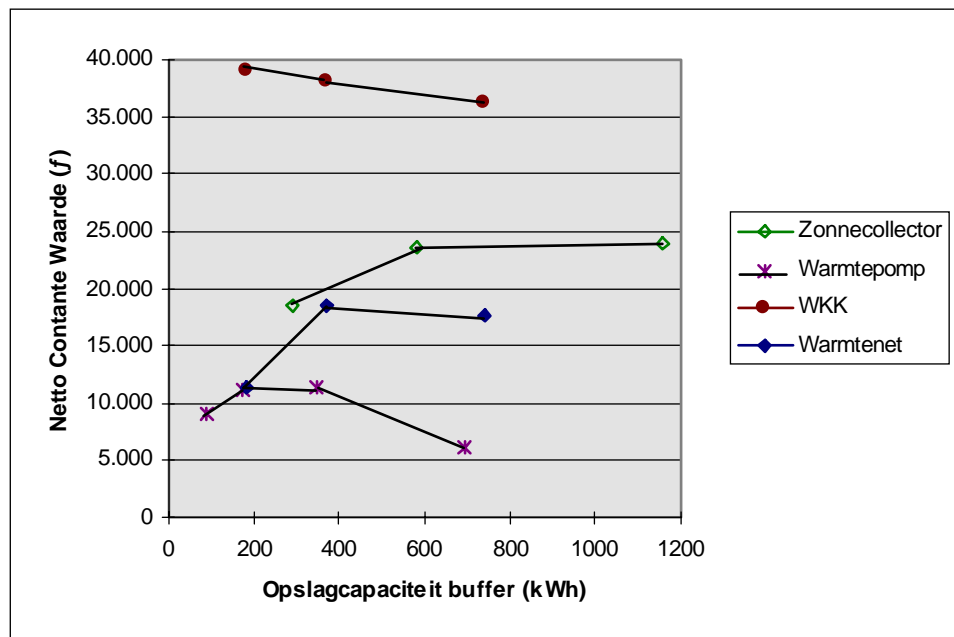
Bij een gasgestookte ketel valt nauwelijks te besparen op investeringen door de installatie niet op piekvraag te dimensioneren. Wel worden er momenteel grote bedragen in Nederland geïnvesteerd aan gasopslaginstallaties om ook bij een landelijke piekvraag naar gas de vraag te kunnen dekken. Deze kosten worden doorberekend aan de energiedistributiebedrijven. Indien deze bedrijven de kosten doorrekenen aan de gebruiker door middel van het invoeren van een piektarief of een basistarief te vragen voor de maximale capaciteit van een gasaansluiting, wordt warmte-opslag in combinatie met een gasgestookte ketel wel zinvol.

5.11 Discussie

Voor een warmtenet met een piektarief, zonnecollectoren, een warmtepomp en een warmtekracht installatie zijn de Netto Contante Waarden berekend voor een buffersysteem voor de opslag van thermische energie.

Uit

Figuur 5.11.1 blijkt dat een buffer in combinatie met een warmtekracht installatie de hoogste Netto Contante Waarde heeft. De reden hiervoor is dat door een relatief kleine buffer de benuttingsgraad van de WKK stijgt, wat gunstig is voor de exploitatiekosten. Door het lagere temperatuurniveau waar opslag van warmte plaatsvindt in een buffer in combinatie met een warmtepomp, is een relatief grote buffer noodzakelijk. De hogere initiële investering beïnvloedt de NCW ongunstig.



Figuur 5.11.1: *Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van 6 % in combinatie met een warmtenet, zonnecollector, warmtepomp en WKK gerekend over een bedrijfsperiode van 15 jaar.*

Een buffer maakt het mogelijk het vermogen van de piekinstallatie te beperken. Aangezien momenteel vrijwel altijd pieklast wordt opgevangen met een gasgestookte ketelinstallatie, die een relatief lage investering vergt per vermogenseenheid, levert een buffer nauwelijks besparings- of investeringskosten.

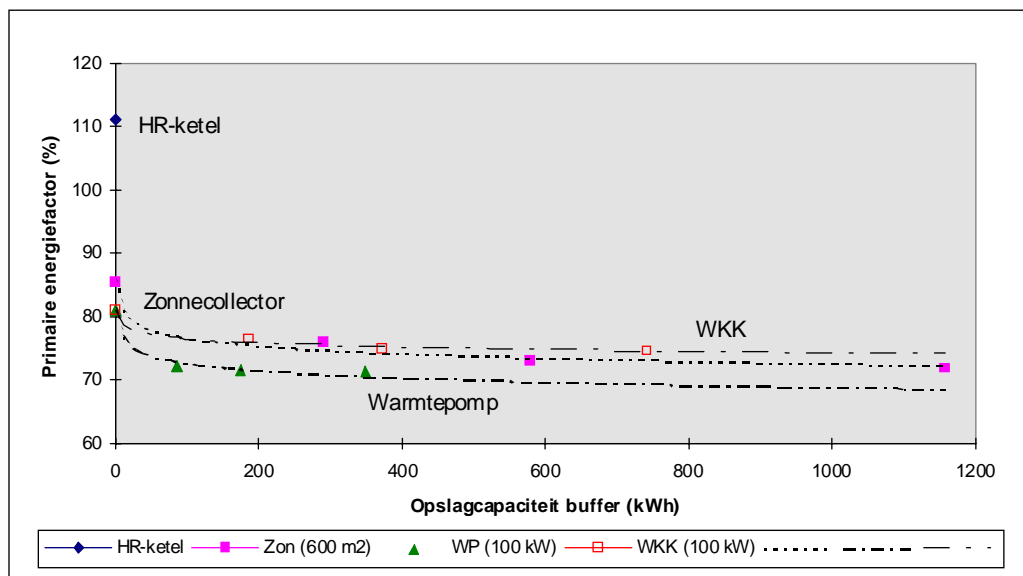
De afwijking tussen de voorspelling van de warmtevraag en de werkelijke warmtevraag (36%) die optreedt levert een beperkt lagere besparing op (3 - 8 %). De veronderstelling van een volledig gemengd opslagsysteem heeft een ongunstige invloed op de nuttige opslagcapaciteit van een buffer vergeleken met een buffer waar gelaagde opslag plaats vindt. Indien door gelaagdheid de temperatuur boven in de waterzak 5 °C hoger ligt dan de gemiddelde temperatuur, dan neemt de nuttige opslagcapaciteit voor de waterzak op het temperatuurniveau van 40-80 °C naar schatting met 2 à 3 procent toe. Voor een waterzak in combinatie met een warmtepomp (temperatuurniveau 35-45 °C) kan dit percentage oplopen tot 10 à 15 %.

Naast een financiële besparing neemt ook het primaire energieverbruik af. Deze afname is uitgedrukt in de 'primaire energie factor', gedefinieerd als de som van het gasverbruik x verbrandingswaarde gas + elektriciteitsverbruik x gemiddelde opwekkingrendement (gekozen op 50 %). Hoe lager deze waarde ligt, hoe meer het systeem bijdraagt aan een duurzame energie-opwekking.

De positieve milieu-effecten, minder gebruik primaire brandstof en minder CO₂ uitstoot, zijn voor de buffersysteem voor warmte/koude opslag in

Figuur 5.11.2 weergegeven met behulp van de 'primaire energie factor'. Deze factor is als functie van de opslagcapaciteit van de buffer weergegeven voor zowel de zonnecollector, de warmtepomp als de WKK. Hieruit blijkt dat de besparingen van een buffer een aanzienlijke bijdrage kan leveren aan de beperking van milieu-effecten van de energievoorziening.

Voor een warmtenet is de waarde van de primaire-energie-factor niet weergegeven aangezien deze sterk afhankelijk is de wijze van warmteproductie en de hoogte van de warmteverliezen in het transportnet.



Figuur 5.11.2: Weergave relatie opslagcapaciteit buffer en ‘primaire energie factor’ voor diverse modelberekeningen.

In het warmtevraag model voor het referentiegebouw ligt de maximale piekvraag op slechts 35 % van het opgestelde vermogen. Deze zeer gelijkmatige warmtevraag heeft als consequentie dat zowel de besparingen op energiekosten als de besparing op investeringskosten voor piekvraag betrekkelijk laag zijn. Hierdoor is er een conservatief beeld van de haalbare besparingen verkregen. In situaties met een hogere piekvraag kan de Netto Contante Waarde daardoor nog stijgen.

Bij alle modelberekeningen zijn de besparingen, en hiermee de waarde van de NCW, sterk gevoelig voor de tariefstructuur van de energietarieven. Een hogere benutting van een WKK of warmtepomp leidt alleen tot een besparing op exploitatiekosten indien de exploitatiekosten per kWh_{therm} lager liggen dan de exploitatiekosten per kW_{therm} van de ketelinstallatie.

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

In deze eerste fase van het project 'Compacte en goedkope warmte/koude-opslag voor kantoorgebouwen' is het gelukt een opslagconcept te vinden dat voldoet aan de eisen die vooraf aan het project gesteld waren. Voor het project zijn in totaal 17 oplossingsalternatieven gegenereerd. Van de principe oplossingen komen er naast de waterzak als redelijk naar voren: de waterbak, gebouwmassa, gasbeton met fase transformatie materiaal (PCM), warmteplafond met PCM en een thermochemische warmtepomp.

De waterzak is geschikt voor zowel de opslag van warmte als koude in één systeem, het systeem kan worden geplaatst op minder toegankelijke locaties en de kostprijs zal lager liggen dan van een vergelijkbaar tanksysteem. Het maximaal te kiezen temperatuurniveau van het opslagsysteem en de eisen die worden gesteld aan diffusiedichtheid van de waterzak bepalen de keuze van het type folie en daarmee de prijs van de waterzak. Een hogere prijs is in veel gevallen gerechtvaardigd aangezien een diffusiedicht materiaal een extra warmtewisselaar overbodig maakt en de thermische opslagcapaciteit en het rendement van de waterzak toeneemt.

Bouwmaterialen geïmpregneerd met PCM bieden in de toekomst goede mogelijkheden om thermische energie op te slaan. Het is een goed alternatief voor het vergroten van de thermische massa in plaats van betonmassa. Op korte termijn is dit systeem niet toepasbaar aangezien het meeste onderzoek zich in de fase van patentaanvraag bevindt.

Er zijn wel reeds een aantal fase transformatie materialen in de handel verkrijgbaar. Het gaat om opslagtanks gevuld met PCM of ingekapselde PCM's. Met name nodulen gevuld met PCM zijn goed toepasbaar in opslagsystemen. De smeltemperatures van PCM's liggen in het bereik van -33 tot +63 °C. Het systeem valt goed te combineren met het ontwerp van de waterzak, eventueel voor gecombineerde opslag van warmte en koude.

De modelberekeningen tonen aan dat voor alle berekende systemen, warmtenet met piektarief, zonnecollectoren, warmtepomp en warmtekracht installatie, volgens de Netto Contante Waarde als evaluatiecriterium de investering in een waterzak als buffersysteem verantwoord is, bekeken vanuit de beheerder van de installatie. Voor een warmtepomp heeft naast de waarde van de COP met name het verschil in elektriciteitstarief tussen plateau- en daluren invloed op de exploitatiekosten. Zolang de piekvraag van warmte wordt gedekt door een ketelinstallatie zijn de financiële besparingen op investeringkosten door het plaatsen van een bufferinstallatie beperkt.

Alleen onder een aantal voorwaarden is het voor de beheerder van een warmtenet mogelijk te besparen op de investeringskosten van een warmtenet.

De financiële resultaten van de modelberekeningen, met name de NCW, tonen een aanzienlijke gevoeligheid voor de tariefstructuur van de energie. Verder is er een conservatief beeld van de haalbare besparingen verkregen doordat de warmtevraag in het model zeer gelijkmatig is. In situaties met een hogere piekvraag kan de Netto Contante Waarde daardoor nog stijgen.

Een buffer voor de opslag van thermische energie heeft voor alle installaties een gunstig effect op het primaire energieverbruik en levert daarmee een aanzienlijke bijdrage aan de beperking van de milieu-effecten van de energievoorziening.

6.2 Aanbevelingen

Als vervolg op deze eerste fase van het project compacte goedkope thermische opslag is het verstandig eerst een verdere detaillering van het ontwerp te maken, waarna een proefopstelling van de waterzak kan worden gemaakt. Vervolgens kan de waterzak voor diverse toepassingen, warmtenet, warmtekracht installatie, warmtepompen, zonnecollectoren in een demonstratie-opstelling worden getest. Daarnaast moet de toepassing van nodulen PCM in de waterzak nog nader op veiligheid en ecologische aspecten uitgewerkt worden.

In Tabel 6.2.1 worden de in de projectbegeleidingsgroep besproken mogelijkheden aangegeven die in een demonstratieproject kunnen worden meegenomen.

Tabel 6.2.1 *Mogelijkheden die in demonstratieproject kunnen worden meegenomen.*

Systeem	Waterzak	Waterzak met PCM
WKK	40-80 °C	$T_s = 64 \text{ °C}$
Warmtepomp	35-45 °C	afhankelijk van op de markt komen nodulen met PCM met smelttemperatuur rond de 40 °C
Warmtenet	40-80 °C	$T_s = 64 \text{ °C}$
Zonnecollectoren	40-80 °C	$T_s = 64 \text{ °C}$

Detaillering:

- Detaillering ontwerp waterzak (aansluitingen, afmetingen, isolatie, diffusers, regeling);
- Optimalisatie ontwerpberekeningen door meer specificaties als temperatuurniveau en massastromen van warmtevraag in simulatieberekeningen mee te nemen;
- Uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse om de invloed van de energiekosten op de NCW van de investeringen te bepalen.

Proefopstelling:

- Realisatie ontwerp waterzak;
- Metingen verrichten aan opstelling betreffende warmteverliezen, gelaagdheid, diffusiedichtheid, capaciteit en vermogen;
- Ontwerp software voor aansturing regeling laden en ontladen waterzak;
- Simulatie van diverse toepassingen: warmtenet, WKK, warmtepomp, zonnecollectoren;
- Combinatie waterzak met nodulen PCM;
- Evaluatie van de resultaten.

Demonstratieproject:

- Metingen energieverbruik uitgangssituatie zonder buffer;
- Realisatie koppeling systeem met waterzak;
- Metingen van hoeveelheid warmte die wordt opgeslagen en onttrokken, warmteverliezen, aantal cycli, energieverbruik;
- Berekening besparing op energieverbruik en exploitatiekosten;
- Opdoen praktijkervaring in bedrijfvoering met thermische opslagsystemen
- Evaluatie van de prestaties.

Hiernaast is het verstandig de ontwikkelingen (state-of-the-art) voor bouwmaterialen met PCM bij te houden.

7. LITERATUUROVERZICHT

1. Janos Hetenyi, Knut-Olof Lagerkvist, 'Long-term testing by cycling a phase-change heat store with Glauber's salt as an energy storage material', Boras, 1981.
2. D.W. Hawes, D. Feldman, D. Banu, 'Low chain esters of stearic acid as phase change materials for thermal energy storage in buildings', in: Solar Energy Materials and Solar Cells, nr. 36 (1995) p. 311-322, 20 december 1993.
3. D.W. Hawes, D. Feldman, D. Banu, 'Latent heat storage in building materials', in: Energy and buildings, nr. 20 (1993) p. 77-86, 18 juni 1993.
4. A.F. Rudd, 'Phase-change material wallboard for distributed thermal storage in buildings', ASHRAE Transactions, p. 339-346, 1993.
5. Dr. ing. K. Fieback, 'Ökologische leistungsfähige Latentwärmespeicher auf Paraffinbasis', in: VDI Berichte 1994, p. 371-385.
6. A. Biedermann, 'Entwicklung von Latentwärmespeichern für die Temperaturbereiche 50-80 °C und 110-130 ° auf der Grundlage des GALISOL-Prinzips', in: VDI Berichte, 1994, p. 387-400.
7. T. Ruesink, 'Handboek voor de Energieconsulent, deel 1: Cijfers en tabellen', Novem, Sittard, 1994.
8. Novem, Ecofys, 'De zonneboiler; Cijfers en achtergronden over zonn-energie en over de zonne-boiler', Utrecht, april 1995.
9. F.H. van Geuns, 'Afstudeeronderzoek: Warmtebufferingssystemen en op huishoudelijke schaal.', Rijksuniversiteit Groningen, augustus 1996.
10. R. Wassenaar, P.W. Bach, 'Energiebesparing in kantoorgebouwen door opslag van thermische energie', ECN-Energie Engineering, rapportnr. 7.6050.02-GR 1, november 1996.
11. Niels Lanser, Wim Haije, 'Resultaten van een literatuurscan op het gebied van goedkope, compacte warmte-/koude-opslag in de gebouwde omgeving', ECN-Energie Engineering, rapportnr. 7.6050.02.01-GR 2, november 1996.
12. S.F. Smeding, P.W. Bach, 'Principe oplossingen compacte thermische energieopslag bij kantoorgebouwen', ECN-Energie Engineering, rapportnr. 7.6050.02.01-GR 4, december 1996.
13. G.A. Lane, Faxbericht Dow Chemical, Ceramic & Advanced Materials, 27 maart 1997, Midland, USA.

8. BEGRIPPEN- EN AFKORTINGENLIJST

Toelichting:

BTW	Bruto Toegevoegde Waarde	
Bvo	Bruto vloer oppervlak	
COP	Coefficient Of Performance	Verhouding nuttig bruikbare (thermische) energie gedeeld door toegevoerde vermogen van een warmtepomp
DM	Duitse Mark	
ECN	Energieonderzoek Centrum Nederland	
HR-ketel	Hoog Rendement ketel	
NCW	Netto Contante Waarde	(Zie bijlage 13)
P	Vermogen installatie	
PCM	Phase Change Materials	Fase transformatie materialen Gebruik maken van de latente warmte van een faseovergang zoals smelten
Plateau tarief		Tarief waarop niet het daluren tarief van toepassing is (normaal tarief)
T	Temperatuur	
VR-ketel	Verhoogd Rendement ketel	
WKK	Warmte Kracht Koppeling	

Eenheden:

GJ	Giga Joule	1 GJ = 277,8 kWh
kWh	kilo Watt hour	1 kWh = 3,6 MJ
PJ	Peta Joule	

9. LIJST MET FIGUREN EN TABELLEN

9.1 Lijst met figuren

Figuur 3.5.1	<i>Indicatie prijzen waterzak en conventionele watertank per volume eenheid.</i>	16
Figuur 3.5.2	<i>Indicatie prijzen waterzak per energie-inhoud.</i>	17
Figuur 4.3.1	<i>Doorsnede micro-PCM.</i>	25
Figuur 5.3.1	<i>Gemiddelde warmtevraag van het referentiegebouw per dag</i>	30
Figuur 5.3.2	<i>Gemiddelde warmtevraag over het jaar gezien van het referentiegebouw per tijdstip.</i>	31
Figuur 5.3.3	<i>Jaarbelastingduurkromme warmtevraag van het referentiegebouw.</i>	31
Figuur 5.6.1	<i>Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van 4, 6, 8 en 10 % in combinatie met zonnecollectoren (600 m²) gerekend over een bedrijfsperiode van 15 jaar.</i>	34
Figuur 5.7.1	<i>Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van 4, 6, 8 en 10 % in combinatie met een warmtepomp (100 kW_{therm}) gerekend over een bedrijfsperiode van 15 jaar (grootverbruikerstarief).</i>	36
Figuur 5.8.1	<i>Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van 4, 6, 8 en 10 % in combinatie met een WKK-installatie (100 kW_{therm}) gerekend over een bedrijfsperiode van 15 jaar.</i>	37
Figuur 5.9.1	<i>Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van 4, 6, 8 en 10 % in combinatie met een warmtenet (400 kW_{therm}) met een piektarief (>100 kW_{therm}) gerekend over een bedrijfsperiode van 15 jaar.</i>	39
Figuur 5.9.2	<i>Relatie aansluitwaarde warmtenet- capaciteit buffer voor gegeven model warmtevraag.</i>	40
Figuur 5.9.3	<i>Relatie aansluitwaarde warmtenet - besparing op (marginale) investeringskosten en relatie aansluitwaarde warmtenet - investeringskosten buffer. Geen installatie voor pieklast.</i>	41
Figuur 5.11.1	<i>Netto Contante Waarde (NCW) als functie van de buffercapaciteit voor een rentevoet van</i>	
Figuur 5.11.2	<i>Weergave relatie opslagcapaciteit buffer en 'primaire energie factor' voor diverse mode</i>	

9.2 Lijst met tabellen

Tabel 2.1.1	<i>Geschatte jaarlijkse besparingen met opslag van thermische energie voor het referentiegebouw van 2500 m².</i>	8
Tabel 2.2.1	<i>Overzicht oplossingsalternatieven in willekeurige volgorde voor compacte goedkope warmte/koude opslag gegroepeerd in vier categorieën.</i>	9
Tabel 3.1.1	<i>Voordelen waterzak t.o.v. opslagtank.</i>	11
Tabel 3.2.1	<i>Eisen gesteld aan waterzak.</i>	11
Tabel 3.2.2	<i>Eigenschappen folies van vloeistofzak.</i>	12
Tabel 3.2.3	<i>Prijs vloeistofzak bestemd voor mestopslag (excl. BTW).</i>	12
Tabel 3.3.1	<i>Eisen gesteld aan isolatie.</i>	13
Tabel 3.3.2	<i>Eigenschappen isolatiematerialen.</i>	13
Tabel 3.4.1	<i>Specificatie platenwarmtewisselaars.</i>	14
Tabel 3.4.2	<i>Eigenschappen slangen voor warmtewisseling.</i>	15
Tabel 3.4.3	<i>Benodigde totale lengte (meters) slang type 1 voor ontladen buffer bij veronderstelling (1) $P_{thermisch} = 100$ kW, (2) $T_{in} = 20$ °C en (3) 20 parallelle slangen.</i>	15
Tabel 4.1.1	<i>Eisen gesteld aan materialen voor thermische energieopslag [Hawes, 1993].</i>	20
Tabel 4.1.2	<i>Organische PCM's verwerkt in gipsplaat, overgenomen uit [Hawes, 1993].</i>	20
Tabel 4.1.3	<i>Organische PCM's verwerkt in beton, overgenomen uit [Hawes, 1993].</i>	20
Tabel 4.1.4	<i>Overzicht voor- en nadelen gebruik PCM in bouwmaterialen.</i>	21
Tabel 4.2.1	<i>Latente warmte opslag met met een met natriumacetaat gevulde opslagtank.</i>	22
Tabel 4.2.2	<i>Opslagmedia voor Galisol systemen, overgenomen uit [Biedermann, 1994].</i>	23
Tabel 4.2.3	<i>Media voor warmtetransport voor Galisol systemen, overgenomen uit [Biedermann, 1994].</i>	23
Tabel 4.2.4	<i>Overzicht van Galisol systemen [Biedermann, 1994].</i>	24
Tabel 4.2.5	<i>Overzicht voor- en nadelen Galisol-systeem.</i>	24
Tabel 4.3.1	<i>Overzicht van PCM's ingekapseld in aluminium [Hetenyi, 1981].</i>	25
Tabel 4.3.2	<i>PCM in micro-inkapseling opgesloten.</i>	25
Tabel 4.3.3	<i>PCM in nodulen opgesloten. Waarden gelden voor 1 m³ tankvolume gevuld met (± 3333) nodulen.</i>	26
Tabel 4.4.1	<i>Vergelijkend overzicht PCM-systemen.</i>	27
Tabel 5.2.1	<i>Referentiegebouw (AL-gebouw).</i>	29
Tabel 5.2.2	<i>Vergelijking uitgangswaarden referentiesysteem met richtwaarden Novem.</i>	29
Tabel 5.5.1	<i>Materiaaleigenschappen folie / isolatiematerialen.</i>	32
Tabel 5.6.1	<i>Regeling warmte zonnecollectoren toevoegen / onttrekken aan opslag.</i>	33
Tabel 5.7.1	<i>Regeling warmte toevoegen / onttrekken aan opslag vanuit elektrische warmtepomp.</i>	35
Tabel 5.8.1	<i>Regeling warmte WKK-installatie toevoegen / onttrekken aan opslag.</i>	37
Tabel 5.9.1	<i>Regeling warmtenet toevoegen / onttrekken aan opslag.</i>	38
Tabel 5.9.1	<i>Regeling warmtenet toevoegen / onttrekken aan opslag.</i>	39
Tabel 6.2.1	<i>Mogelijkheden die in demonstratieproject kunnen worden meegenomen.</i>	46

BIJLAGE 1 Zonne-energie

Het aanbod van zonne-energie is voornamelijk afhankelijk van de hellingshoek van de collector met de aarde (Figuur B1.1), de oriëntatie ten opzichte van het zuiden (Figuur B1.3) en de lokatie in Nederland (Figuur B1.4). In het model is gekozen voor de volgende instellingen:

Tabel B1.1 *Gekozen parameters zonne-collector.*

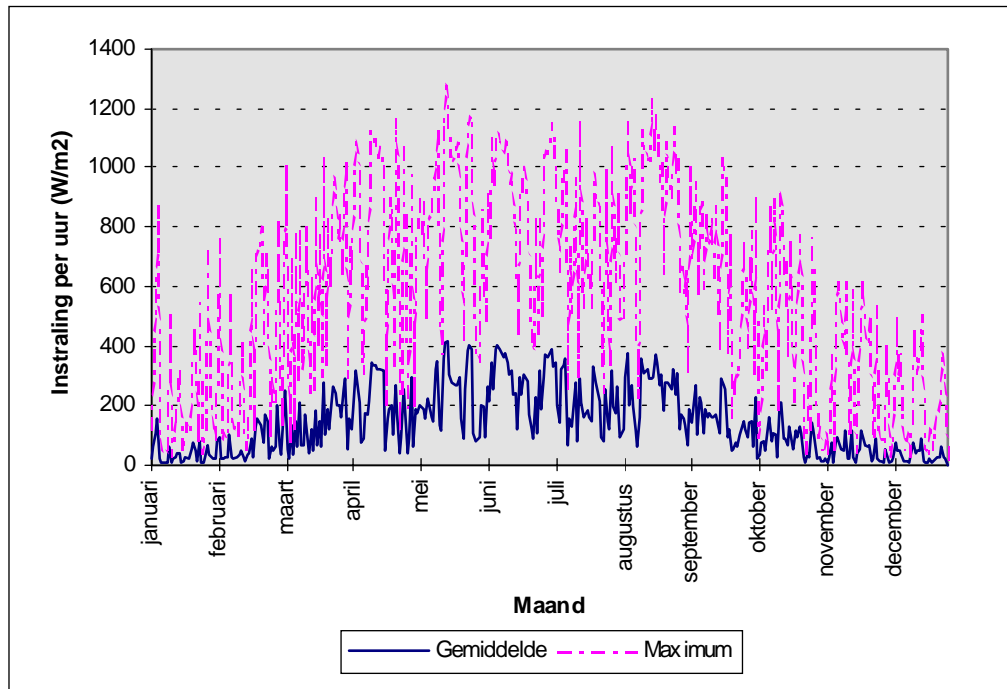
Hellingshoek:	35 °
Oriëntatie westelijk van het zuiden:	5 °
Lokatie:	Petten, Noord Holland

Figuur B1.1 *Invloed hoek op vangst zonnestraling, overgenomen uit [Novem /Ecofys, 1995].*

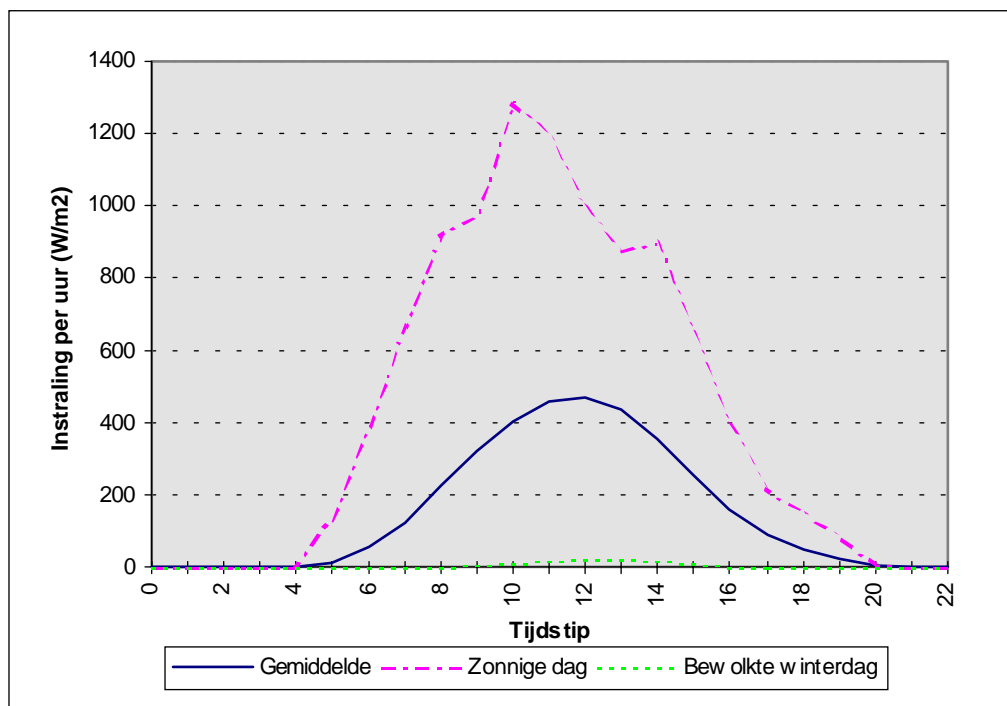
Figuur B1.2 *Voorbeeld van collectorrendement curve. Het rendement is afhankelijk van instraling G , buitenluchttemperatuur T_u , temperatuur collectorwater T_m . $T^* = (T_m - T_u)/G$. Overgenomen uit [Novem /Ecofys, 1995].*

Figuur B1.3 *Instralingsdiagram waarmee voor iedere hellingshoek en windrichting de zinstraling bepaald kan worden als percentage van de maximale jaarlijkse instraling. Overgenomen uit [Novem /Ecofys, 1995].*

Figuur B1.4 *Jaarlijkse zonnestraling (in GJ/m²) in verschillende regio's in Nederland (1 GJ = 278 kWh) Overgenomen uit [Novem /Ecofys, 1995].*



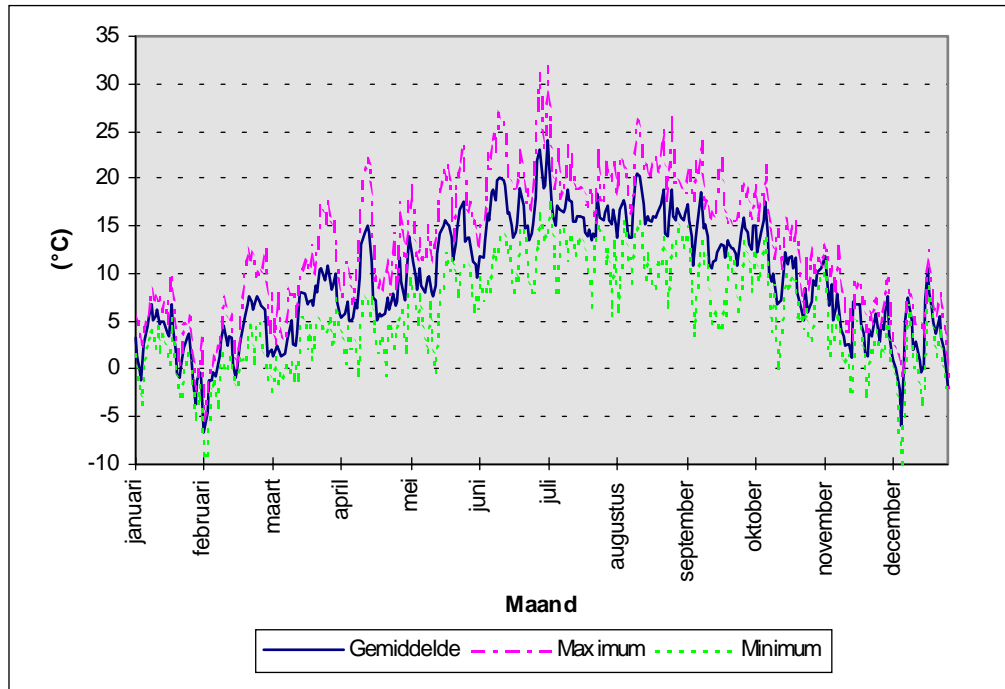
Figuur B1.5: Gemiddelde en maximum waarde zonne-energie per dag.



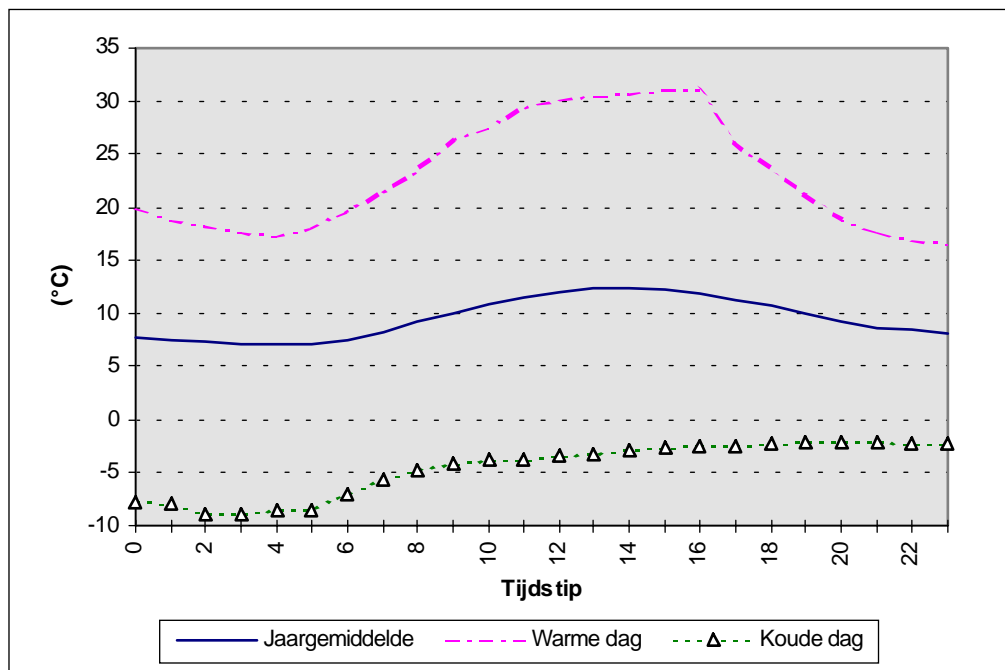
Figuur B1.6: Aanbod zonne-energie per uur. 'Gemiddelde' is de gemiddelde waarde van de instraling per uur over het jaar genomen.

BIJLAGE 2 Temperatuur

De temperatuur is met name van belang indien gebruik gemaakt wordt van het principe van nachtventilatie. Het verschil tussen dag- en nachttemperatuur is dan van belang. Gemiddeld over het jaar gezien bedraagt het verschil tussen dag- en nachttemperatuur 5,3 °C, op een warme dag liggen deze waarden in Nederland zo'n 10 °C uiteen. (Figuur B2.1).



Figuur B2.1 Gemiddelde, maximum en minimum buitentemperatuur per dag.



Figuur B2.2 Buitentemperatuur per uur.

BIJLAGE 3 Voorspelling warmtevraag

Aangezien het warmte-opslag-systeem niet verliesvrij is en de opwekking van warmte met behulp van een warmtepomp niet gratis is, wil men niet te veel warmte opslaan. Er is in feite een voorspelling van de warmtevraag noodzakelijk. In de resultaten wordt aangegeven wat de keuze van methode van voorspellen van de warmtevraag voor invloed heeft op de besparing die gerealiseerd wordt.

Tabel B3.1 *Voorspelling warmtevraag.*

Naam model	Beschrijving	Afwijking voorspelling tov. werkelijkheid (%) (Absolute waarde)			
		Gem. SD.	Max.	Min.	
1 'Ideale voorspelling'	Gaat uit van berekening achteraf. Exacte warmtevraag is dus bekend	0 (0)	0 (0)	0 (0)	- (-)
2 'Waarde vorige dag'	Gaat uit dat warmtevraag gelijk is aan warmtevraag op het zelfde tijdstip van de vorige / huidige dag	0 (42)	99 (395)	-395 (0)	57 (39)
3 'Tijdafhankelijk'	Gaat uit van de gemiddelde warmtevraag op tijdstip x in maand x	-29 (58)	95 (1804)	- 1804 (0)	129- (119)
4 'Combinatie 2 + 3'	Gaat uit van het gemiddelde van voorspelling 2 en 3	0 (36)	98 (520)	-520 (0)	57 (44)
5 'Seizoensafhankelijk'	Gaat niet uit van een voorspelling warmtevraag maar limiteerd de maximale benutting van de buffer afhankelijk van het seizoen.			onbekend	
6 'Geen voorspelling'	Gaat niet uit van een voorspelling warmtevraag maar voegt warmte aan de buffer toe tot de werkelijke maximale capaciteit.			onbekend	

Om de warmteverliezen te minimaliseren zou het gunstig zijn om de voorspelde warmtevraag tijdens normaal tarief zo laat mogelijk op te wekken tijdens laag tarief en op te slaan in de warmtebuffer. Als de voorspelde warmtevraag tijdens normaal tarief lager is dan de capaciteit die de warmtepomp tijdens laag tarief kan produceren en opslaan, dan zou het gunstig zijn om de warmtepomp de laatste uren van de laag tarief periode volledig te benutten en de eerste uren van de periode niet of gedeeltelijk te benutten.

BIJLAGE 4 Energietarieven

Aangezien in Nederland geen uniformiteit in energietarieven is, wordt in de berekening uitgegaan van gemiddelde elektriciteits- en gasprijzen.

Aardgas:

Tabel B4.1 *Tarieven aardgas voor niet-huishoudelijke kleinverbruikers (excl. BTW) (< 170.000 m³ / jaar)*

	Gemiddeld ¹	
Jaar	1997	
(100.000 m ³ / jaar)	52,0	cent / m ³

Tabel B4.2 *WKK-tarief aardgas (excl. BTW) ($P_{elek} > 60$ kW).*

	Gemiddeld ²	
Jaar	1996	
Zone d	23,581	cent / m ³

Warmte:

Tabel B4.3 *Tarieven warmte voor grootverbruikers (incl. vastrecht, GJ-prijs, MAP-toeslag, REB, excl. BTW) (aansluitwaarde > 40 kWh).*

	Gemiddeld ³	
Jaar	1997	
75 kW _{therm} , bedrijfstijd = 800 h	25,-	f / GJ
75 kW _{therm} , bedrijfstijd = 1600 h	22,-	f / GJ
150 kW _{therm} , bedrijfstijd = 800 h	26,-	f / GJ
150 kW _{therm} , bedrijfstijd = 1600 h	22,-	f / GJ

Elektriciteit:

Tabel B4.4 *Terugleververgoeding door WKK geproduceerde elektriciteit (excl. BTW).*

	Gemiddeld	
Jaar	okt. 1996	
Brandstof dag-tarief	4,9	cent / kWh
Brandstof nacht-tarief	4,4	cent / kWh
Gemiddelde totaal tarief (incl. vergoeding brandstof)	8,5	cent / kWh

¹ Bron: EnergieNed, Vergelijking verkoopprijzen op basis van standaard verbruikssituaties, 1e halfjaar 1997.

² Bron: Energie bulletin, SIGE, oktober 1996, 15e jaargang, nummer 4.

³ Bron: EnergieNed, Vergelijking verkoopprijzen op basis van standaard verbruikssituaties, 1e halfjaar 1997.

Tabel B4.5 *Tarieven elektriciteit voor grootverbruikers, laagspanning, aansluitwaarde 50 kW, klasse III (2000-4000 uur) (excl. BTW).*

	Gemiddeld ⁴	
Jaar:	1997	
Vaste vergoeding	1080	f / jaar
Vermogensvergoeding per maand	18	f / kW mnd
Dagtarief	5,4	cent / kWh
Dal-uren tarief	2,4	cent / kWh
Brandstof dag-tarief	4,9	cent / kWh
Brandstof nacht-tarief	4,4	cent / kWh
MAP	0,25	cent / kWh
ECO-tax (over 800-50.000 kWh)	2,95	cent / kWh
Transportverliezen	7,9	%

Tabel B4.6 *Tarieven elektriciteit voor kleinverbruikers (excl. BTW).*

	Gemiddeld ⁵	
Jaar:	1997	
Vaste vergoeding	89,4	f / jaar
Dagtarief	19,2	cent / kWh
Dal-uren tarief	9,68	cent / kWh
Brandstof dag-tarief	5,6	cent / kWh
Brandstof nacht-tarief	5,18	cent / kWh
MAP	0	cent / kWh
ECO-tax (over 800-50.000 kWh)	2,95	cent / kWh
Transportverliezen	5,2	%

⁴ Bron: EnergieNed, Overzicht maximum eindverbruikerstarieven 1997, 30 september 1996, bijlage bij ECO 96-2707. EnergieNed, Tarievenbladen van alle energiedistributiebedrijven (standaardgevallen), februari 1997. EnergieNed, Vergelijking verkoopprijzen op basis van standaard verbruikssituaties, 1e halfjaar 1997.

⁵ Bron: EnergieNed, Overzicht van energietarieven huishoudelijke gebruikers 1e halfjaar 1997, ECO 97-118, Vergelijking verkoopprijzen op basis van standaard verbruikssituaties, 1e halfjaar 1997.

BIJLAGE 5 Model voor 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]:

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

is specifiek voor de buffer gelijk aan:

$$q = \frac{T_{boiler} - T_{omgeving}}{R_{totaal}} [W]$$

waar bij de 'warmteweerstand' gelijk is aan:

$$R_{totaal} = \frac{1}{\alpha_{inside} A} + \sum \frac{d}{kA} + \frac{1}{\alpha_{outside} A} [K / W]$$

waar: d = dikte laag [m]
A = oppervlak [m²]
k = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/mK]
 α_{inside} = convectiecoëfficiënt binnenzijde (stilstaand water) van de constructie [W/m² K]
 $\alpha_{outside}$ = convectiecoëfficiënt buitenzijde (natuurlijke convectie van buitenlucht, bodem) van de constructie [W/m² 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]:

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

Voor horizontale warme vlakken geldt [Polytechnisch Zakboekje G1]:

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

BIJLAGE 6 Warmtewisseling met behulp van slang

Volgens [polytechnisch zakboekje G1.6] kan het warmteverlies van een leiding / slang berekend worden door:

$$\Delta T = \frac{\frac{1}{R} \cdot L(T_{inside} - T_{outside})}{\dot{m} c_p}$$

Waar R de warmteweerstandcoëfficiënt is. Voor cilindrische vlakken geldt

$$R = \frac{1}{\alpha_{inside} D_{inside}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{outside}}{D_{inside}}\right)}{2 \cdot k_{tube}} + \frac{1}{\alpha_{outside} D_{outside}} [mK / W]$$

waarbij L de lengte van de slang/buis is.

Het totale warmteverlies (W) bedraagt in de pijp bedraagt:

$$q_{tube} = \dot{m} c_p (T_{in} - T_{out}) = \frac{1}{R} L (T_{inside} - T_{outside})$$

De warmte-overdracht door convectie ($W/m^2 K$) in de slang bedraagt [Incropera, 1990]:

$$\alpha_{inside} = \frac{Nu k}{D_{inside}}$$

Waarbij voor constante wandtemperatuur geldt voor een laminaire stroom:

$$Nu = 3,66$$

en voor een turbulente stroom:

$$Nu = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n$$

waarbij $n=0,4$ indien $T_{inside} < T_{outside}$ en $n=0,3$ indien $T_{inside} > T_{outside}$.

Het drukverlies (N/m^2) bedraagt [Incropera, 1990]:

$$\Delta p = \frac{f L \rho V^2}{2 D_{inside}}$$

waarbij voor een laminaire stroom geldt:

$$f = \frac{64}{Re_D}$$

en voor een turbulente stroom:

$$f = 0,316 Re_D^{-1/4} \quad Re_D \leq 20.000$$

$$f = 0,184 Re_c^{-1/5} \quad Re_D \geq 20.000$$

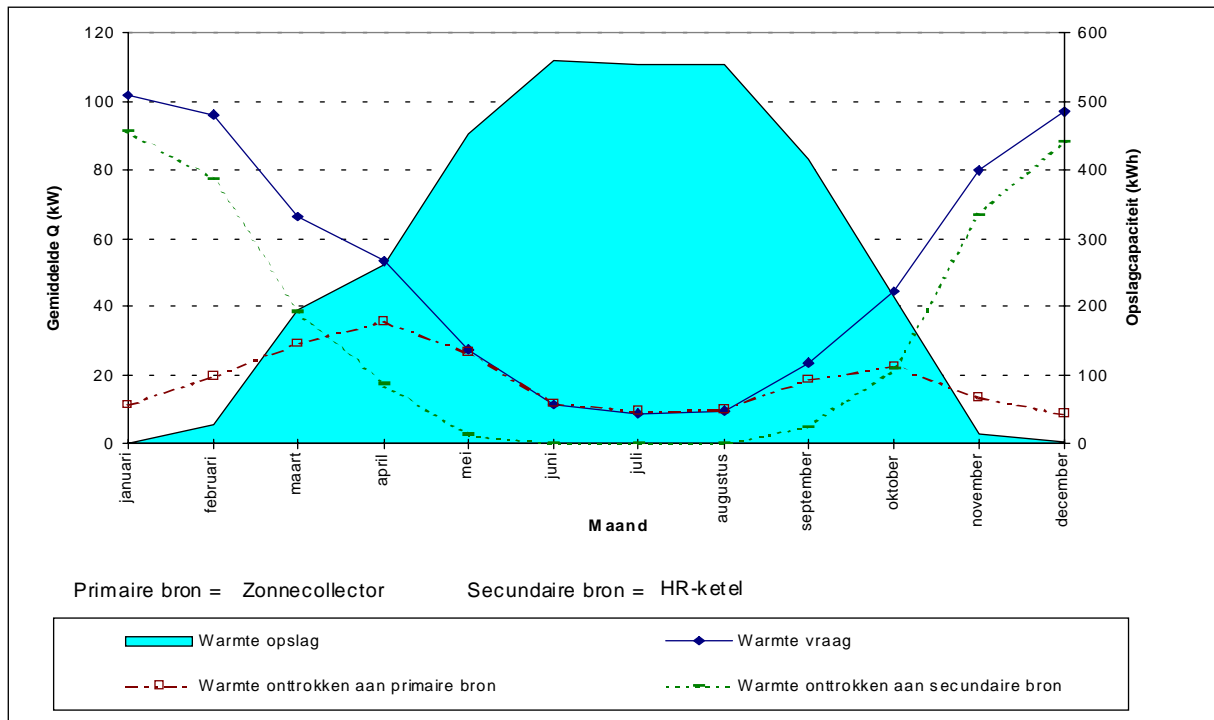
BIJLAGE 7 Modelberekening zonnecollectoren

Tabel B7.1 *Overzicht resultaat berekeningen voor zonnecollectoren-systemen.*

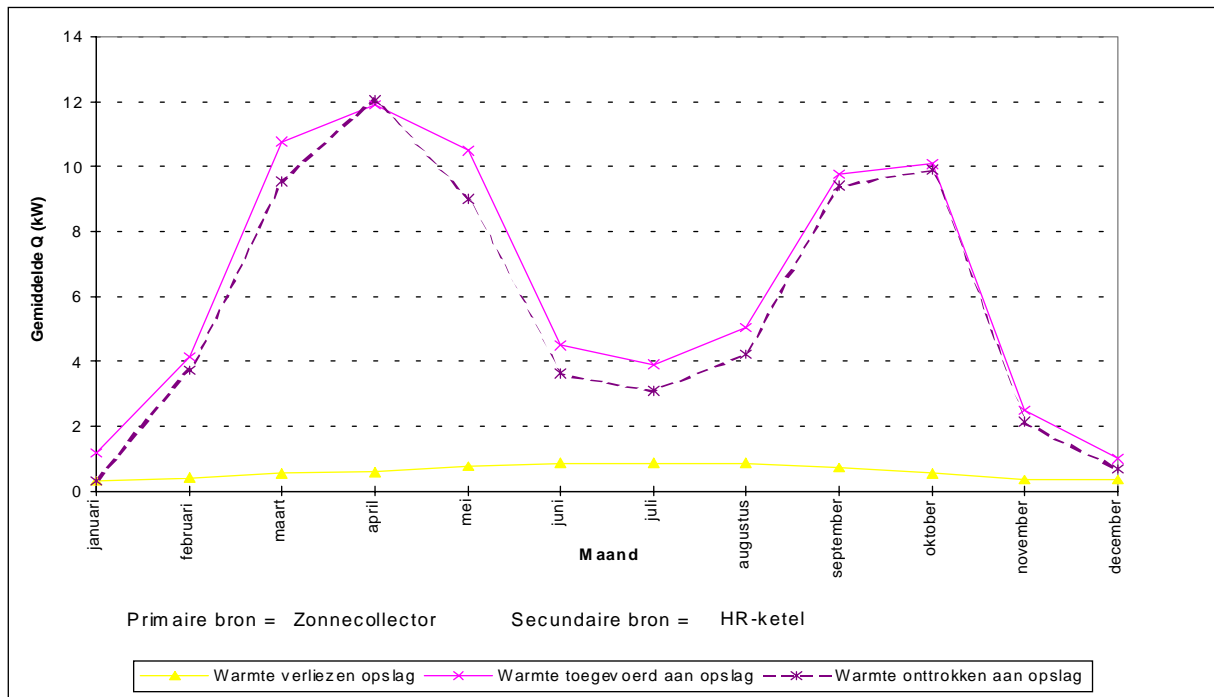
	Referentie	Zon-0	Zon-1	Zon-2	Zon-3	Zon-4
Installatie 1: Zonnecollectoren						
• Collector-oppervlak (m ²)	0	600	600	600	600	600
Installatie 2: HR-ketel						
• P-thermisch (kW)	400	400	400	400	400	400
Warmte-opslag-systeem:						
• Nuttige opslagcapaciteit (kWh)	geen	geen	waterzak	waterzak	waterzak	waterzak
• Nuttige opslagcapaciteit (GJ)			290	579	1.159	2318
• Volume (m ³)			1,04	2,09	4,17	8,34
• Temperatuurniveau (°C)			6,25	12,5	25	50
			40-80	40-80	40-80	40-80
Warmte-ontrokken: (kWh/jaar)						
• Installatie 1	-	103.913	146.219	159.064	167.487	174.971
• Installatie 2	449.610	345.697	306.810	296.207	291.341	289.597
• Buffer	--	-	38.886	49.487	54.351	56.090
• Totaal (excl. buffer)	449.610	449.610	453.029	455.271	458.829	464.569
Benutting warmte-opslag:						
• Maximum (%)	-	-	100	100	100	100
• Gemiddeld (%)	-	-	46,1	46,9	46,1	44,3
Warmteverlies buffer:						
• (kWh/jaar)	-	-	3.215	5.249	8.388	13.371
• % van onttrokken Q	-	-	8,3	10,6	15,4	23,8
Aanbod zonne-energie: (GJ / m ² jaar)						
	n.v.t.					
• max. haalbaar		4,52	4,52	4,52	4,52	4,52
• totaal		0,62	0,88	0,95	1,00	1,05
• opslag onttrokken		-	0,23	0,30	0,33	0,34
Energieverbruik:						
• Gas (m ³ /jaar)	56.194	43.207	38.346	37.021	36.413	36.195
• Primaire-energie-factor ⁶ (%)	111,1	85,4	75,8	73,2	72,0	71,6
Investeringskosten: (f) (excl. BTW)						
• Installatie 1	-	360.000	360.000	360.000	360.000	360.000
• Installatie 2	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
• Buffer	-	-	6.119	7.632	10.405	14.944
• Totaal	30.000	390.000	396.119	397.632	404.405	404.944
Exploitatiekosten: (f/jaar) (excl. BTW)						
• Energie ⁷	29.221	22.468	19.940	19.251	18.935	18.821
• Onderhoud	900	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500
• Beheerskosten	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
• Totaal	33.121	29.968	27.440	26.751	26.435	26.321
Besparingen op kosten brandstof: (f/jaar) (excl. BTW)						
• Zonnecollector	-	6.753	6.753	6.753	6.753	6.753
• Buffer	-	-	2.528	3.217	3.533	3.647
Netto Contante Waarde (buffer) (f)						
• 4 %	-	-	21.987	28.138	28.876	25.603
• 6 %	-	-	18.432	23.615	23.908	20.475
• 8 %	-	-	15.517	19.906	19.834	16.270
• 10 %	-	-	13.105	16.837	16.464	12.792

⁶ De primaire-energie-factor is de verhouding tussen gebruik primaire energie (fossiele brandstoffen) gedeeld door de warmtevraag. (Er is geen exergie berekening uitgevoerd.)

⁷ Bron: EnergieNed, Kleinverbruikerstarief niet-huishoudelijke gebruiker, 1997 (Bijlage4).

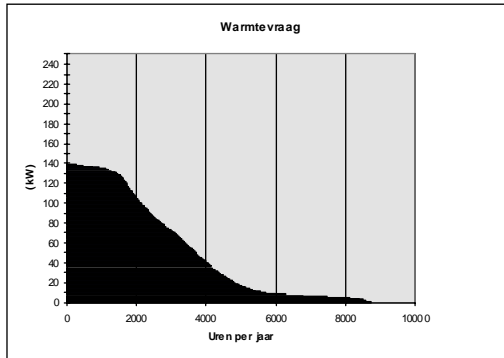


Figuur B7.1 Jaaroverzicht warmtevraag en -aanbod (zon-2).

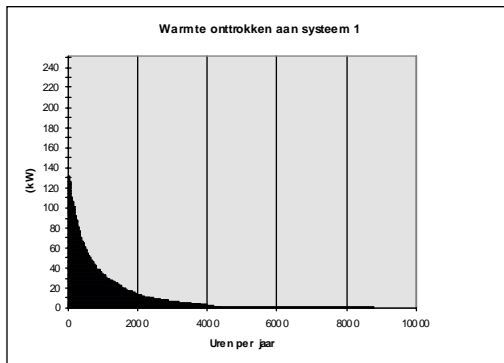


Figuur B7.2 Jaaroverzicht opslag (zon-2).

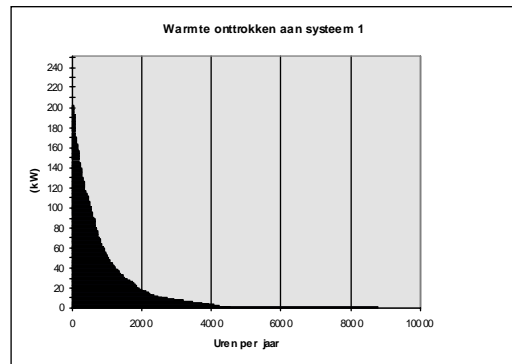
Jaarbelastingduurkrommes:



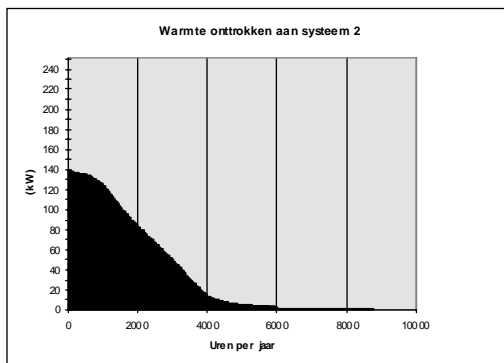
Figuur B7.3 Warmtevraag (zon-0).



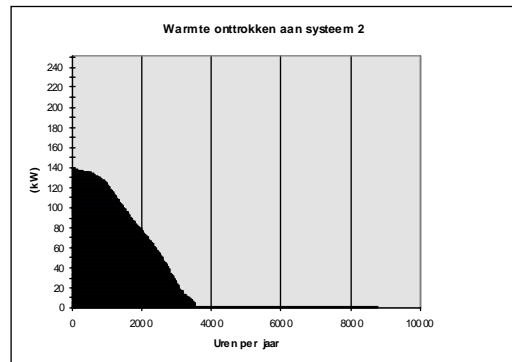
Figuur B7.4 Aanbod zonnecollector (zon-0).



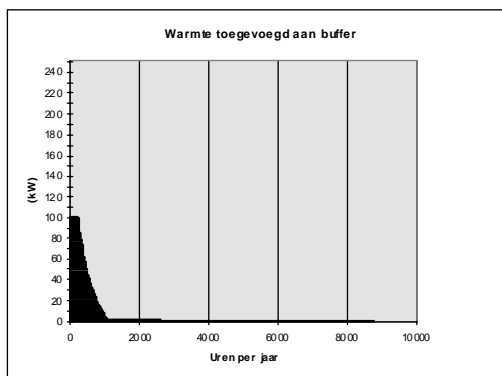
Figuur B7.6 Aanbod zonnecollector (zon-2).



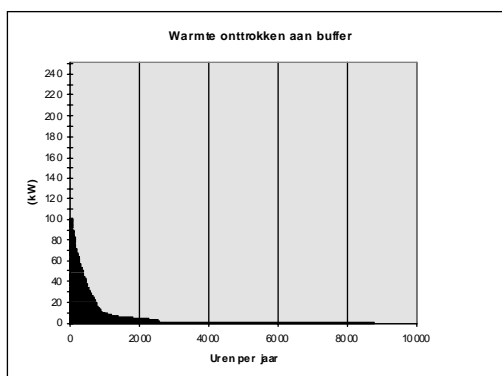
Figuur B7.5 Aanbod HR-ketel (zon-0).



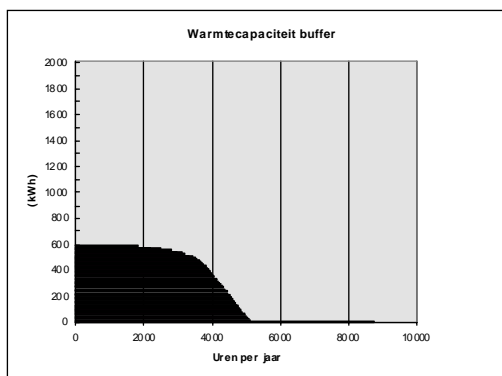
Figuur B7.7 Aanbod HR-ketel (zon-2).



Figuur B7.8 *Laden buffer (zon-2).*

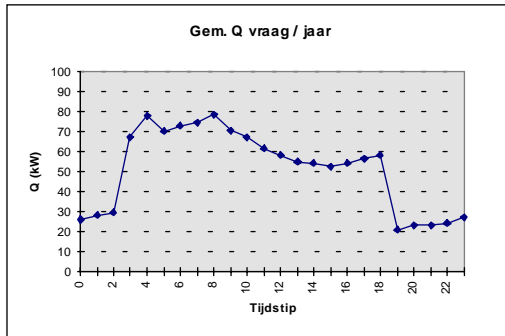


Figuur B7.9 *Ontladen buffer (zon-2).*

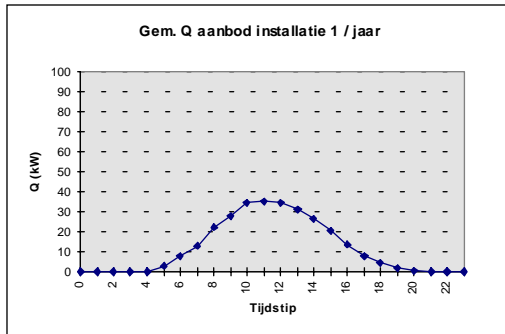


Figuur B7.10 *Opslagcapaciteit buffer (zon-2).*

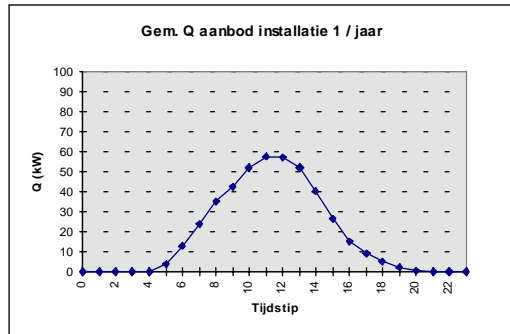
Gemiddelde dagbelasting:



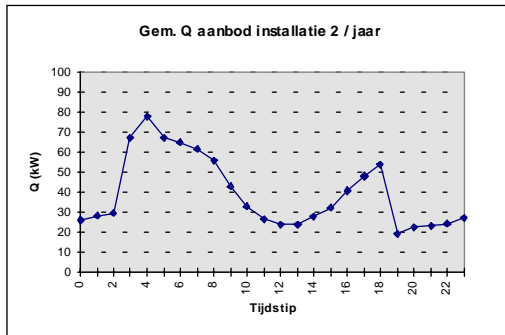
Figuur B7.11 Warmtevraag (zon-0).



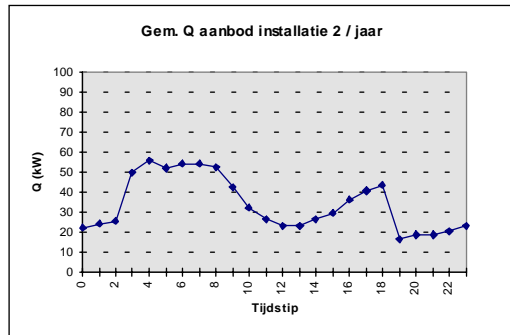
Figuur B7.12 Aanbod zonnecollector (zon-0).



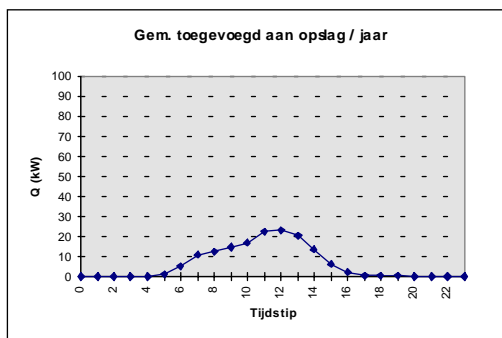
Figuur B7.14 Aanbod zonnecollector (zon-2).



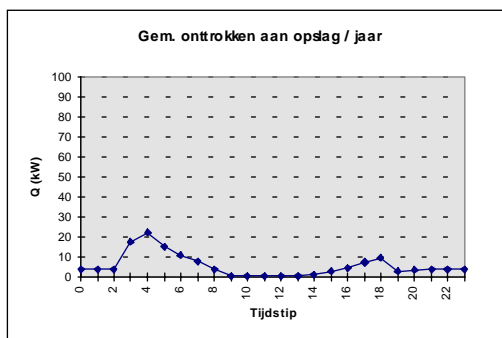
Figuur B7.13 Aanbod HR-ketel (zon-0).



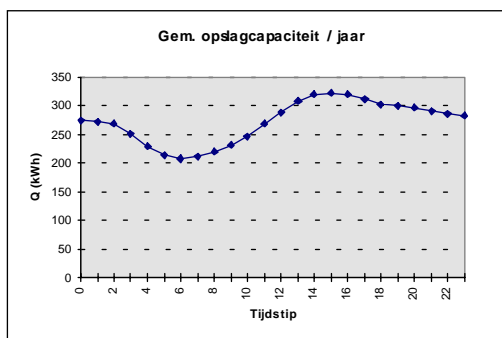
Figuur B7.15 Aanbod HR-ketel (zon-2).



Figuur B7.16 Laden buffer (zon-2).



Figuur B7.17 Ontladen buffer (zon-2).



Figuur B7.18 Opslagcapaciteit buffer (zon-2).

BIJLAGE 8: Modelberekening warmtepomp

Tabel B8.1 *Overzicht resultaat berekeningen voor warmtepomp-systemen voor grootverbruikers.*

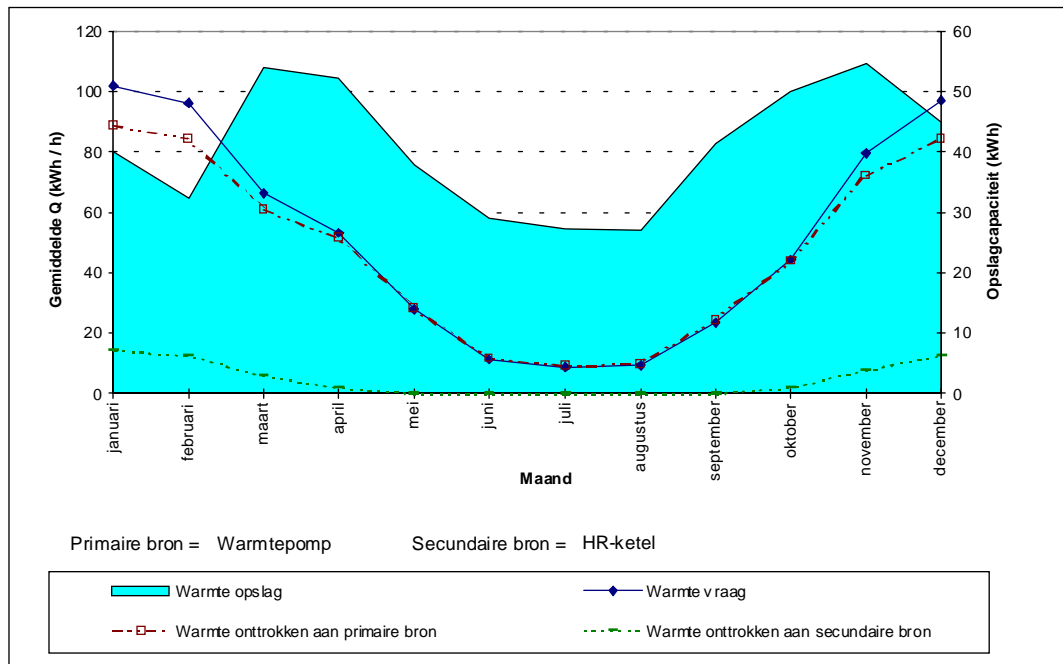
	Referentie	WP-0	WP-1	WP-2	WP-3	WP-4
Installatie 1: Warmtepomp						
• P-thermisch (kW)	0	100	100	100	100	100
Installatie 2: HR-ketel						
• P-thermisch (kW)	400	300	300	300	300	300
Warmte-opslag-systeem:						
• (kWh)	geen	geen	waterzak	waterzak	waterzak	waterzak
• (GJ)			87	174	348	696
• Volume (m ³)			0,31	0,63	1,25	2,50
• Temperatuurniveau (°C)			7,5	15	30	60
			35-45	35-45	35-45	35-45
Warmte-ontrokken: (kWh/jaar)						
• Installatie 1 (incl. laden)	-	362.721	406.411	413.722	419.892	424.951
• Installatie 2	449.610	86.889	48.256	41.639	36.842	35.222
• Buffer	-	-	39.157	53.708	73.544	86.418
• Totaal (excl. buffer)	449.610	449.610	454.696	455.361	456.734	460.173
Specificatie energieverbruik installatie 1						
• tijdens normaal tarief						
- (kWh/jaar)	-	51.628	51.457	48.133	42.928	39.349
- (%)	-	42,7	38,0	34,9	30,7	27,8
• tijdens laagtarief						
- (kWh/jaar)	-	69.279	84.023	89.774	97.036	102.301
- (%)	-	57,3	62,0	65,1	69,3	72,2
Benutting warmte-opslag:						
• Maximum (%)	-	-	100	100	100	100
• Gemiddeld (%)	-	-	27,5	23,5	18,4	11,6
Warmteverlies buffer:						
• (kWh/jaar)	-	-	2.110	3.383	5.427	8.840
• % van onttrokken Q	-	-	5,4	6,3	7,4	10,2
Energieverbruik:						
• Gas (m ³ /jaar)	56.194	10.861	6.032	5.205	4.605	4.403
• Elektrisch (kWh / jaar)	-	96.544	135.480	137.907	139.964	141.650
• 'Primaire-energie-factor' (%)	111,1	75,3	72,2	71,6	71,4	71,7
Investeringskosten: (f)						
• Installatie 1	-	52.478	52.478	52.478	52.478	52.478
• Installatie 2	30.000	22.500	22.500	22.500	22.500	22.500
• Buffer	-	-	6.426	8.204	11.384	17.010
• Totaal	30.000	74.978	81.404	83.182	86.362	91.988
Exploitatiekosten:(f/jaar) (excl. BTW)						
• Energie ⁸	29.221	28.403	26.838	26.462	26.122	26.020
• Onderhoud	900	2.249	2.249	2.249	2.249	2.249
• Beheer	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
• Totaal	33.121	33.652	32.087	31.711	31.371	31.296
Besparingen op kosten brandstof: (f/jaar) (excl. BTW)						
• Warmtepomp	-	818	818	818	818	818
• Buffer	-	-	1.565	1.940	2.280	2.383
Netto Contante Waarde (buffer) (f)						
• 4 %	-	-	11.317	13.936	14.594	9.485
• 6 %	-	-	9.116	11.207	11.387	6.134
• 8 %	-	-	7.312	8.969	8.758	3.387
• 10 %	-	-	5.820	7.119	6.583	1.115

⁸ Bron: EnergieNed, Kleinverbruikerstarief niet-huishoudelijke gebruiker, 1997; SIGE, oktober 1996 (Bijlage4).

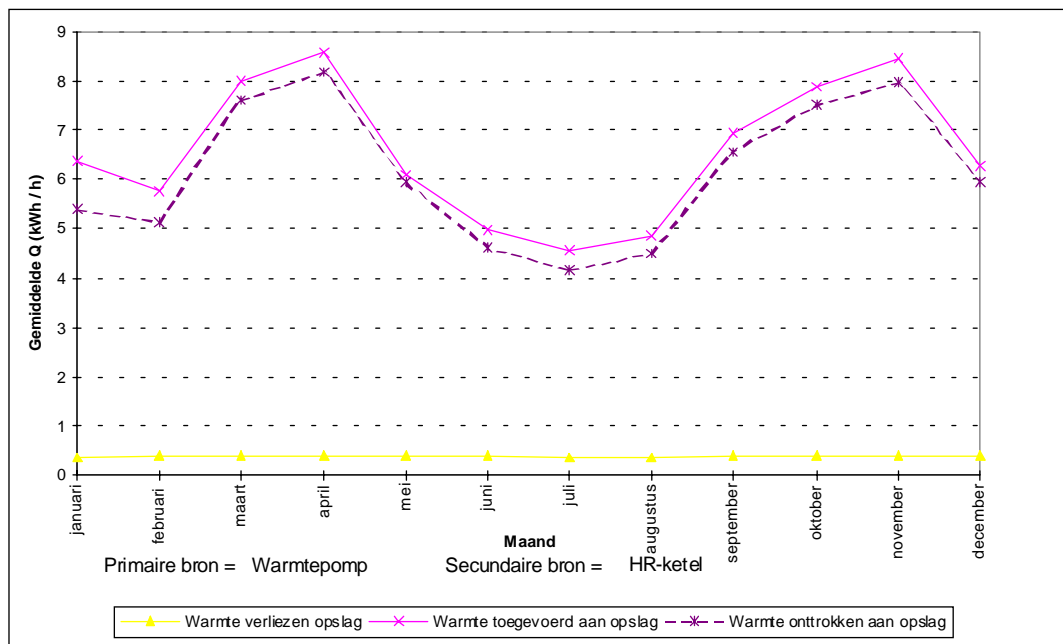
Tabel B8.2 Overzicht resultaat berekeningen voor warmtepomp-systemen voor kleinverbruikers.

	Referentie	WP-0	WP-1	WP-2	WP-3	WP-4
Installatie 1: Warmtepomp						
• P-thermisch (kW)	0	100	100	100	100	100
Installatie 2: HR-ketel						
• P-thermisch (kW)	400	300	300	300	300	300
Warmte-opslag-systeem:						
• (kWh)	geen	geen	waterzak	waterzak	waterzak	waterzak
• (GJ)			87	174	348	696
• Volume water (m ³)			0,31	0,63	1,25	2,50
• Temp. niveau (°C)			7,5	15	30	60
			35-45	35-45	35-45	35-45
Warmte-ontrokken: (thermisch) (kWh/jaar)						
• Installatie 1 (incl. laden)	-	362.721	406.411	413.722	419.892	424.951
• Installatie 2	449.610	86.889	48.256	41.639	36.842	35.222
• Buffer	-	-	39.157	53.708	73.544	86.418
• Totaal (excl. buffer)	449.610	449.610	454.696	455.361	456.734	460.173
Specificatie energieverbruik installatie 1						
• tijdens normaal tarief						
- (kWh/jaar)	-	51.628	51.457	48.133	42.928	39.349
(%)	-	42,7	38,0	34,9	30,7	27,8
• tijdens laagtarief						
- (kWh/jaar)	-	69.279	84.023	89.774	97.036	102.301
- (%)	-	57,3	62,0	65,1	69,3	72,2
Benutting warmte-opslag:						
• Maximum (%)	-	-	100	100	100	100
• Gemiddeld (%)	-	-	27,5	23,5	18,4	11,6
Warmteverlies buffer:						
• (kWh/jaar)	-	-	2.110	3.383	5.427	8.840
• % van onttrokken Q	-	-	5,4	6,3	7,4	10,2
Energieverbruik:						
• Gas (m ³ /jaar)	56.194	10.861	6.032	5.205	4.605	4.403
• Elektrisch (kWh / jaar)	-	96.544	135.480	137.907	139.964	141.650
'Primaire-energie-factor' (%)	111,1	75,3	72,2	71,6	71,4	71,7
Investeringskosten: (f)						
• Installatie 1	-	52.478	52.478	52.478	52.478	52.478
• Installatie 2	30.000	22.500	22.500	22.500	22.500	22.500
• Buffer	-	-	6.426	8.204	11.384	17.010
• Totaal	30.000	74.978	81404	83.182	86.362	91.988
Exploitatiekosten:(f/jaar) (excl. BTW)						
• Energie ⁹	29.221	27.866	27.286	26.888	26.393	26.209
• Onderhoud	900	2.249	2.249	2.249	2.249	2.249
• Beheer	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
• Totaal	33.121	33.115	32.535	32.137	31.642	31.458
Besparingen op kosten brandstof: (f/jaar) (excl. BTW)						
• Warmtepomp	-	1.335	1.335	1.335	1.335	1.335
• Buffer	-	-	580	979	1.473	1.657
Netto Contante waarde (buffer) (f)						
• 4 %	-	-	365	3.229	5.611	1.413
• 6 %	-	-	-451	1.854	3.540	-917
• 8 %	-	-	-1.119	726	1.842	-2.827
• 10 %	-	-	-1.672	-206	437	-4.407

⁹ Bron: EnergieNed, Overzicht maximum eindverbruikerstarieven 1997, 30 september 1996, bijlage bij ECO 96-2707. EnergieNed, Tarievenbladen van alle energiedistributiebedrijven (standaardgevallen), februari 1997. EnergieNed, Vergelijking verkoopprijzen op basis van standaard verbruikssituaties, 1e halfjaar 1997. (zie Bijlage4)

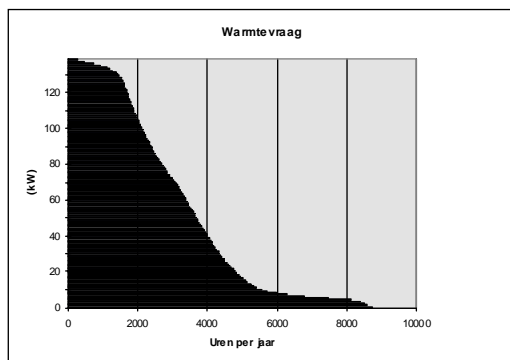


Figuur B8.1 Jaaroverzicht warmtevraag en -aanbod (wp-2).

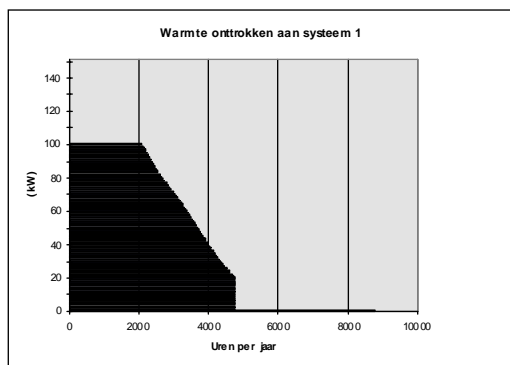


Figuur B8.2 Jaaroverzicht opslag (wp-2).

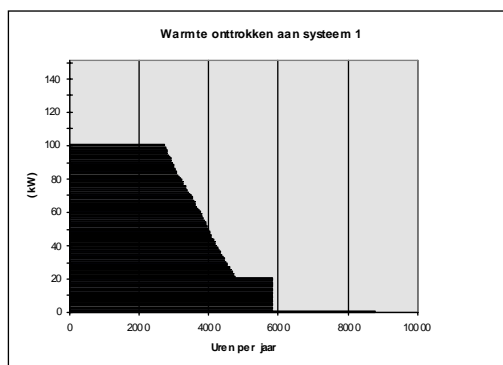
Jaarbelastingduurkrommes:



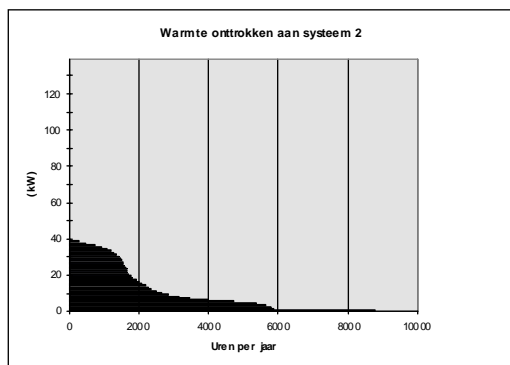
Figuur B8.3 Warmtevraag (wp-0).



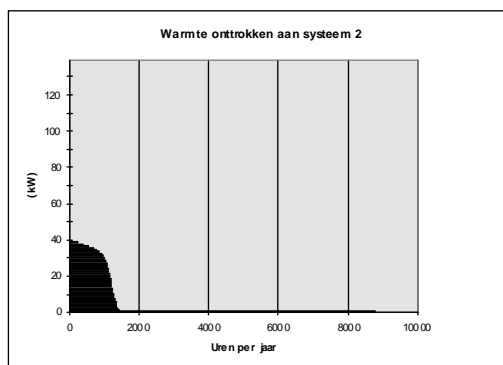
Figuur B8.4 Aanbod warmtepomp (wp-0).



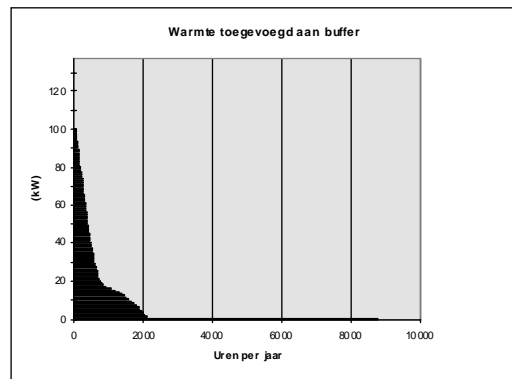
Figuur B8.6 Aanbod warmtepomp (wp-2).



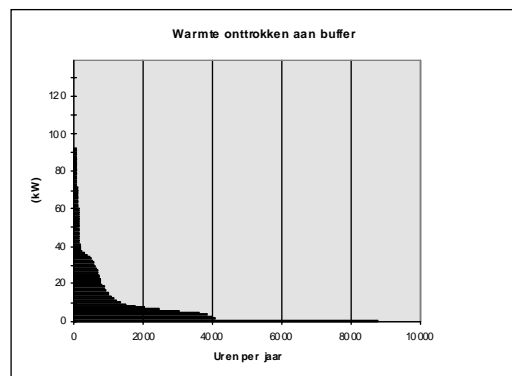
Figuur B8.5 Aanbod HR-ketel (wp-0)



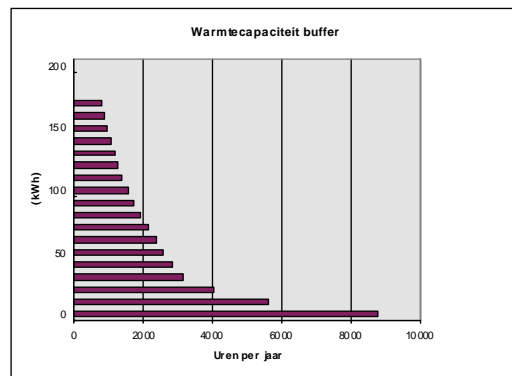
Figuur B8.7 Aanbod HR-ketel (wp-2).



Figuur B8.8 *Laden buffer (wp-2).*

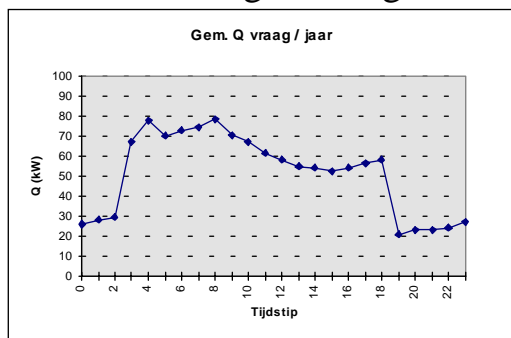


Figuur B8.9 *Ontladen buffer (wp-2).*

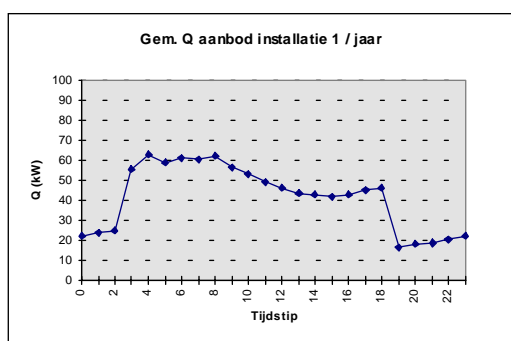


Figuur B8.10 *Nuttige opslagcapaciteit buffer (wp-2).*

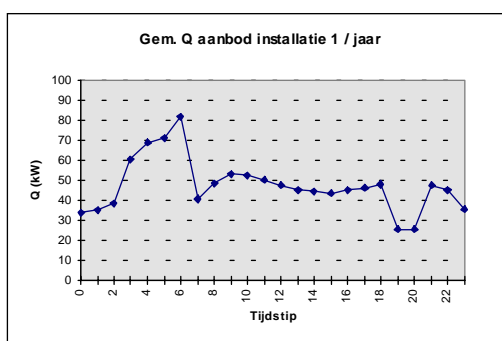
Gemiddelde dagbelasting:



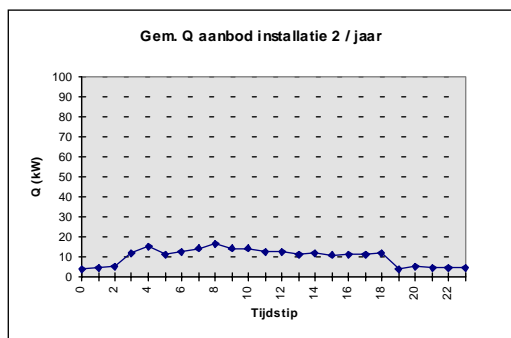
Figuur B8.11 Warmtevraag (wp-0).



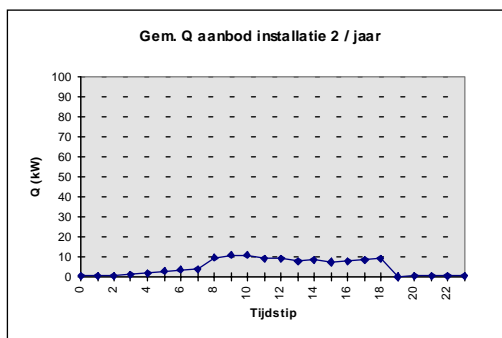
Figuur B8.12 Aanbod warmtepomp (wp-0).



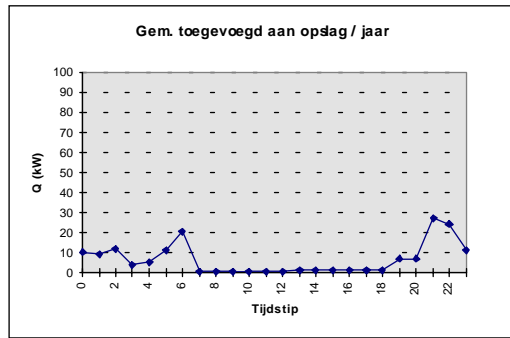
Figuur B8.14 Aanbod warmtepomp (wp-2).



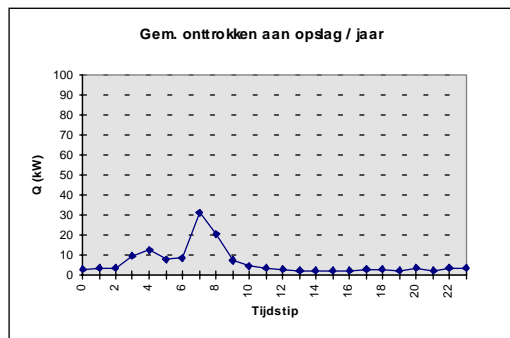
Figuur B8.13 Aanbod HR-ketel (wp-0).



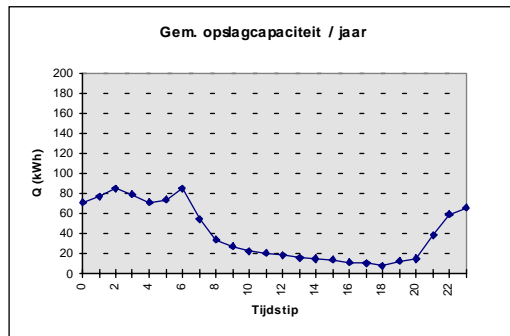
Figuur B8.15 Aanbod HR-ketel (wp-2).



Figuur B8.16 Laden buffer (wp-2).



Figuur B8.17 Ontladen buffer (wp-2).



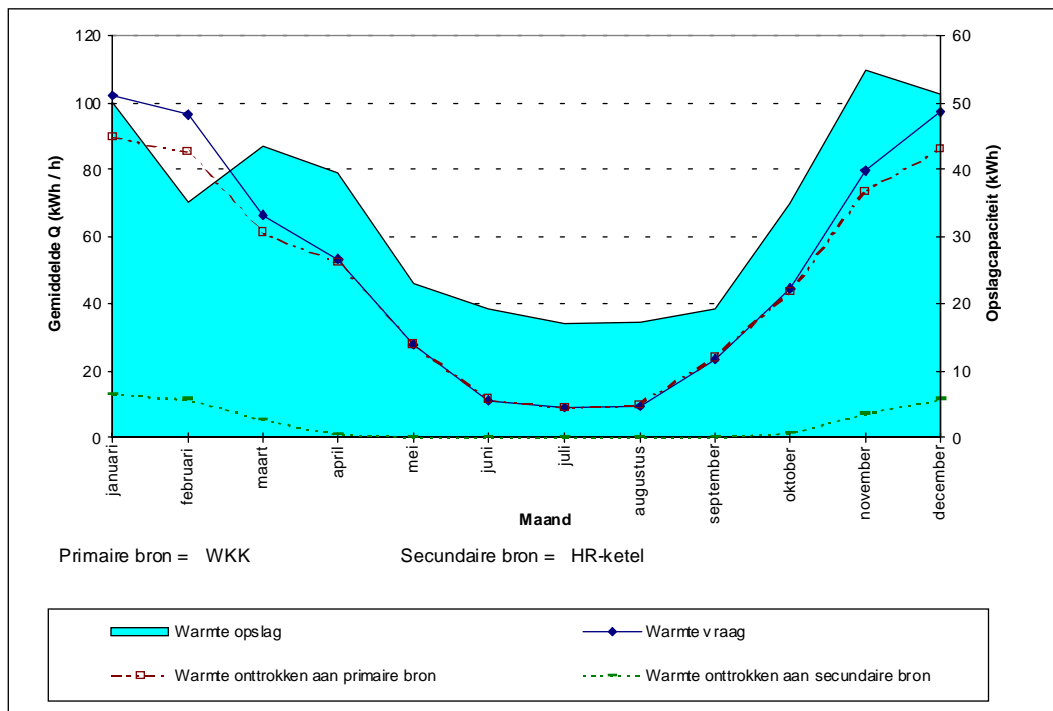
Figuur B8.18 Opslagcapaciteit buffer (wp-2).

BIJLAGE 9: Modelberekening WKK

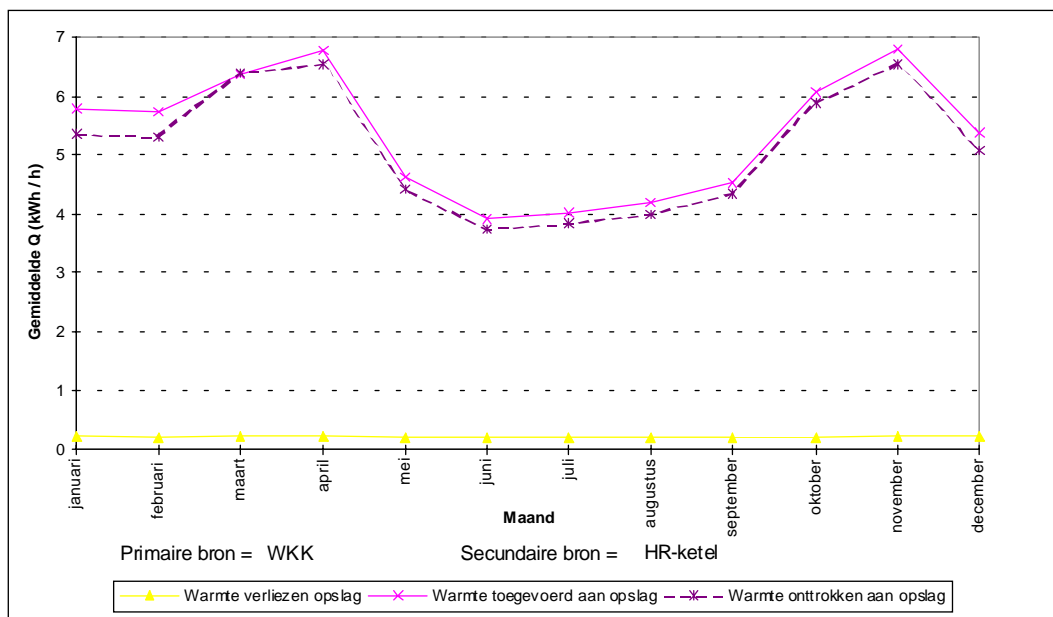
Tabel B9.1 *Overzicht resultaat berekeningen voor WKK-systemen.*

	Referentie	WKK-0	WKK-1	WKK-2	WKK-3	WKK-4	WKK-5
Installatie 1: WKK							
• P-thermisch (kW)	0	100	100	100	100	100	75
Installatie 2: HR-ketel							
• P-thermisch (kW)	400	300	300	300	300	300	300
Warmte-opslag-systeem:							
	geen	geen	waterzak	waterzak	waterzak	PCM	PCM
• (kWh)			185	371	742	371	371
• (GJ)			0,67	1,33	2,66	1,33	1,33
• Volume (m ³)			4,0	8,0	16,0	3,4	3,4
• Temperatuurniveau (°C)			40-80	40-80	40-80	40-80	40-80
Warmte-onttrokken: (thermisch) (kWh/jaar)							
• Installatie 1 (incl. laden)	-	346.311	416.205	428.737	433.654	427.682	371.515
• Installatie 2	449.610	103.299	36.260	24.353	20.849	23.939	80.687
• Buffer	-	-	48.805	61.032	63.982	61.439	60.854
• Totaal (excl. buffer)	449.610	449.610	452.666	453.096	454.503	451.621	451.889
Benutting warmte-opslag:							
• Maximum (%)	-	-	100	100	78,4	100	100
• Gemiddeld (%)	-	-	18,1	13,6	7,6	13,95	12,8
Warmteverlies buffer:							
• (kWh/jaar)	-	-	1.846	2.827	4.289	1.699	1.646
• % van onttrokken Q	-	-	3,8	4,6	6,7	2,8	2,7
Energieverbruik:							
• Gas (m ³ /jaar)		86.958	93.184	94.565	95.285	94.337	89.719
Energieproductie: (kWh/jaar)	56.194	204.389	242.293	251.877	255.533	251.439	221.702
'Primaire-energie-factor' (%)	111,1	81,0	76,4	74,9	74,7	74,7	78,8
Investeringskosten: (f)							
• Installatie 1	-	96.727	96.727	96.727	96.727	96.727	72.545
• Installatie 2	30.000	22.500	22.500	22.500	22.500	22.500	24.375
• Buffer	-	-	5.554	6.551	8.442	11.157	11.157
• Totaal	30.000	119.227	124.781	124.278	125.669	130.384	108.077
Exploitatiekosten:(f/jaar) (excl. BTW)							
• Energie ¹⁰ (incl. terugleverg.)	29.221	6.802	2.667	1.755	1.490	1.724	5.178
• Onderhoud	900	3.797	4.309	4.453	4508	4.447	4.001
• Beheerskosten	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
• Totaal	33.121	13.599	9.976	9.208	8.998	9.171	12.179
Besparingen op kosten brandstof: (f/jaar) (excl. BTW)							
• WKK	-	22.419	22.419	22.419	22.419	22.419	
• Buffer	-	-	4.135	5.047	5.312	5.078	
Netto Contante Waarde (buffer) (f)							
• 4 %	-	-	45.605	44.604	42.713	36.831	
• 6 %	-	-	39.134	38.135	36.243	30.762	
• 8 %	-	-	33.831	32.831	30.937	25.786	
• 10 %	-	-	29.444	28.444	26.552	21.671	

¹⁰ Bron: EnergieNed, Kleinverbruikerstarief niet-huishoudelijke gebruiker, 1997; SIGE, oktober 1996 (Bijlage4).

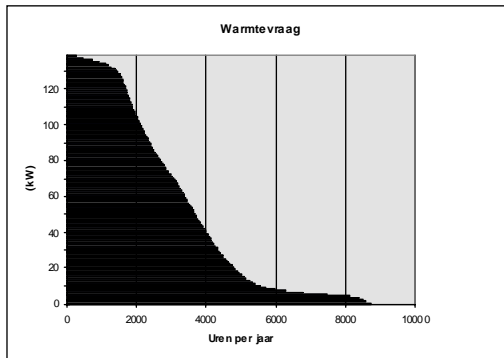


Figuur B9.1 Jaaroverzicht warmtevraag en -aanbod (wkk-1).

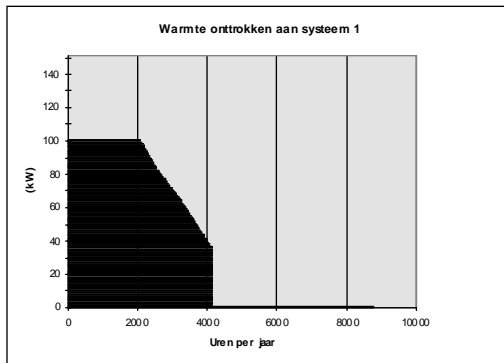


Figuur B9.2 Jaaroverzicht opslag (wkk-1).

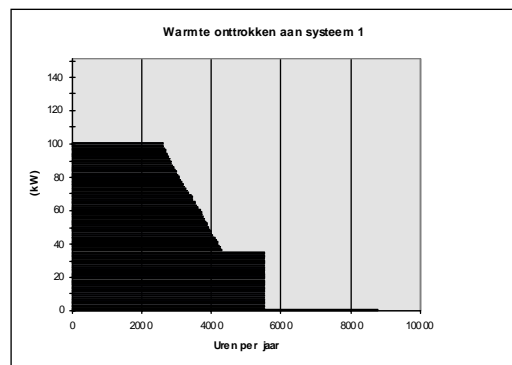
Jaarbelastingduurkrommes:



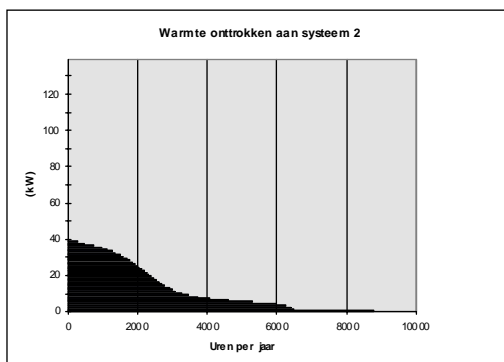
Figuur B9.3 Warmtevraag (wkk-0).



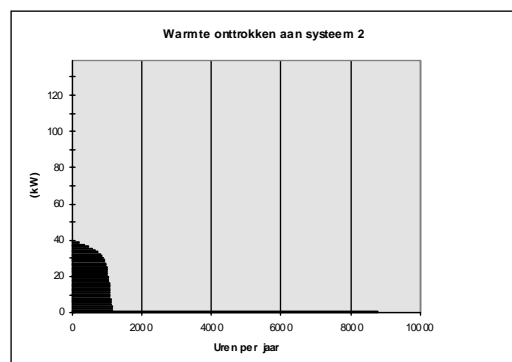
Figuur B9.4 Aanbod wkk (wkk-0).



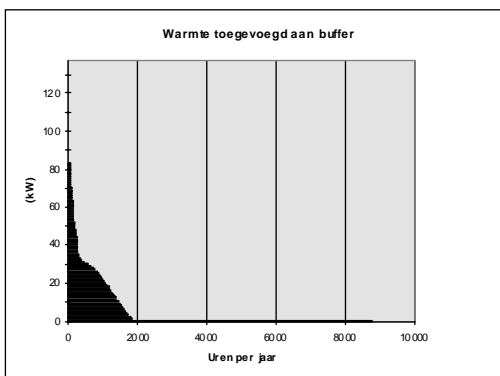
Figuur B9.6 Aanbod wkk (wkk-1).



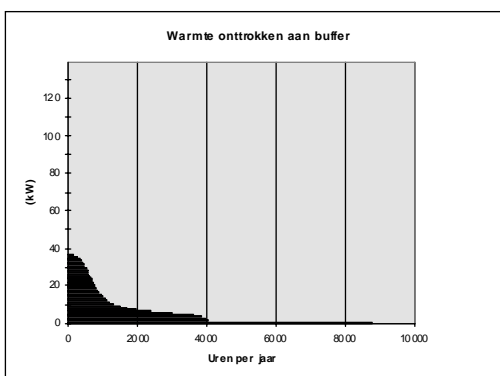
Figuur B9.5 Aanbod HR-ketel (wkk-0)



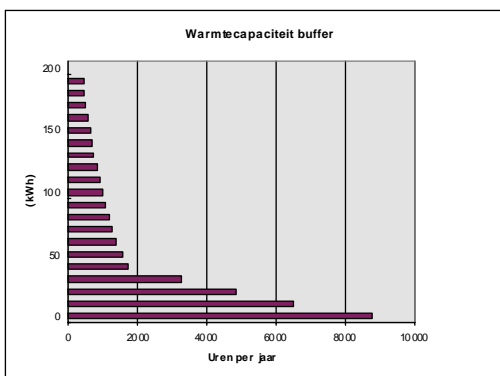
Figuur B9.7 Aanbod HR-ketel (wkk-1).



Figuur B9. 8 Laden buffer (wkk-1).

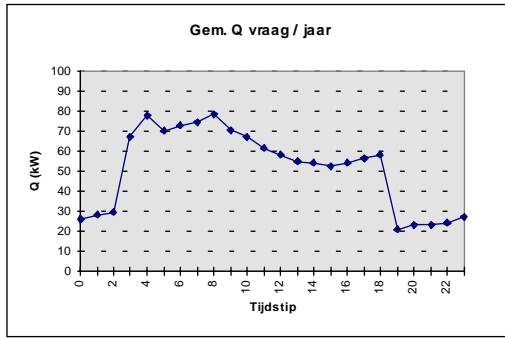


Figuur B9. 9 Ontladen buffer (wkk-1).

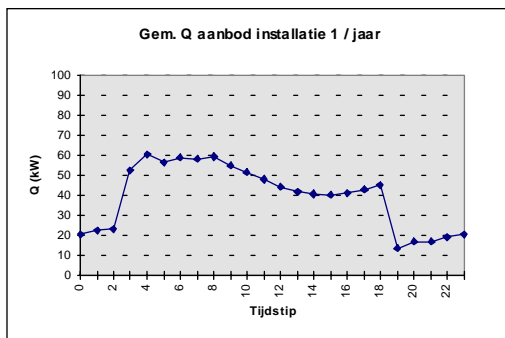


Figuur B9. 10 Opslagcapaciteit buffer (wkk-1).

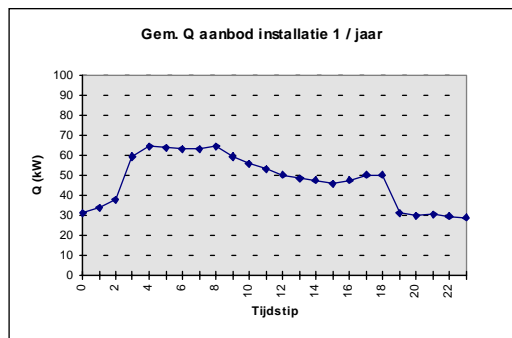
Gemiddelde dagbelasting:



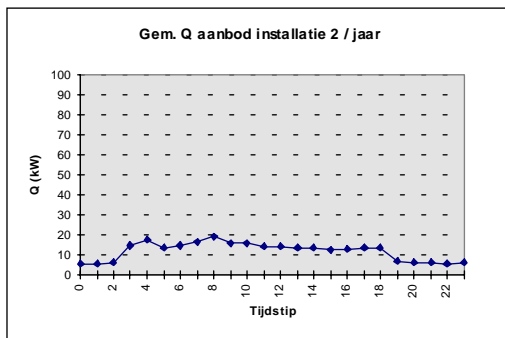
Figuur B9. 11 Warmtevraag (wkk-0).



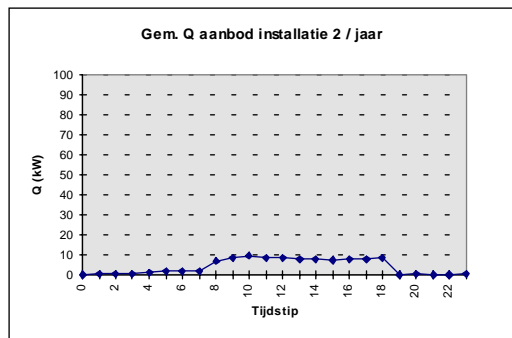
Figuur B9. 12 Aanbod wkk (wkk-0).



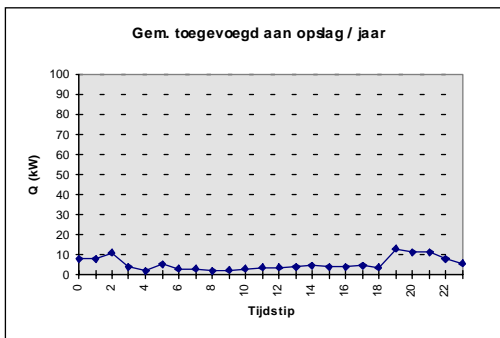
Figuur B9. 14 Aanbod wkk (wkk-1).



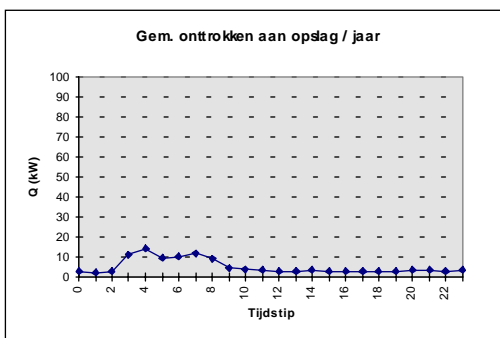
Figuur B9. 13 Aanbod HR-ketel (wkk-0).



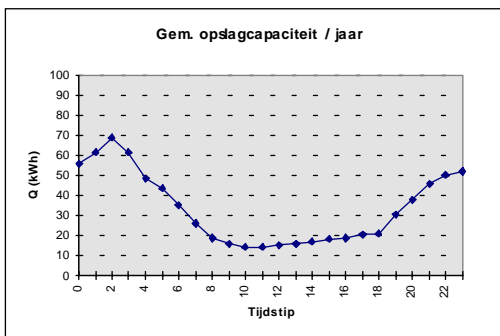
Figuur B9. 15 Aanbod HR-ketel (wkk-1).



Figuur B9. 16 Laden buffer (wkk-1).



Figuur B9. 17 Ontladen buffer (wkk-1).



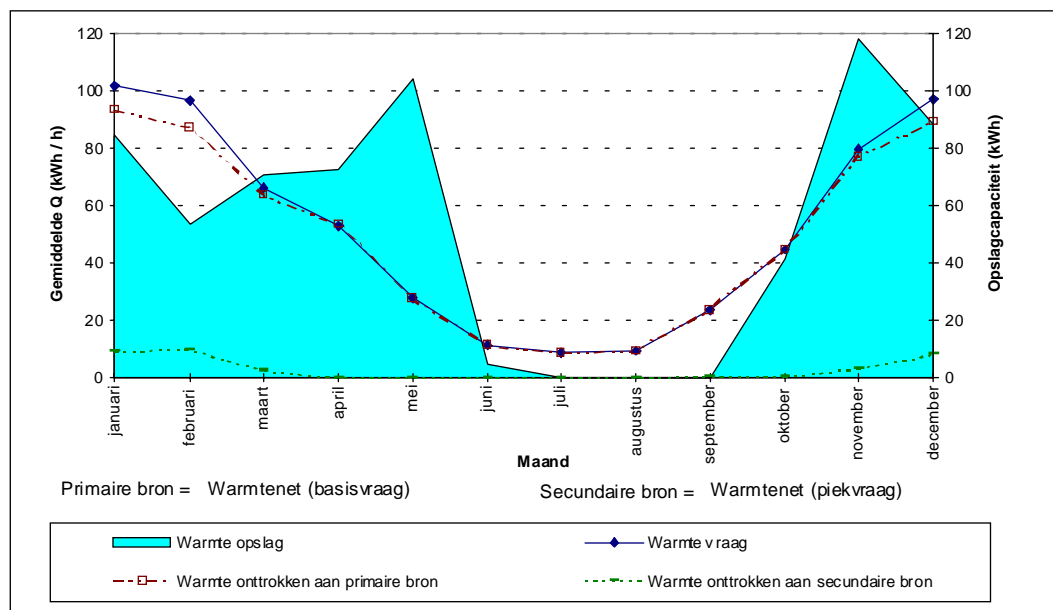
Figuur B9. 18 Opslagcapaciteit buffer (wkk-1).

BIJLAGE 10 Modelberekening warmtenet

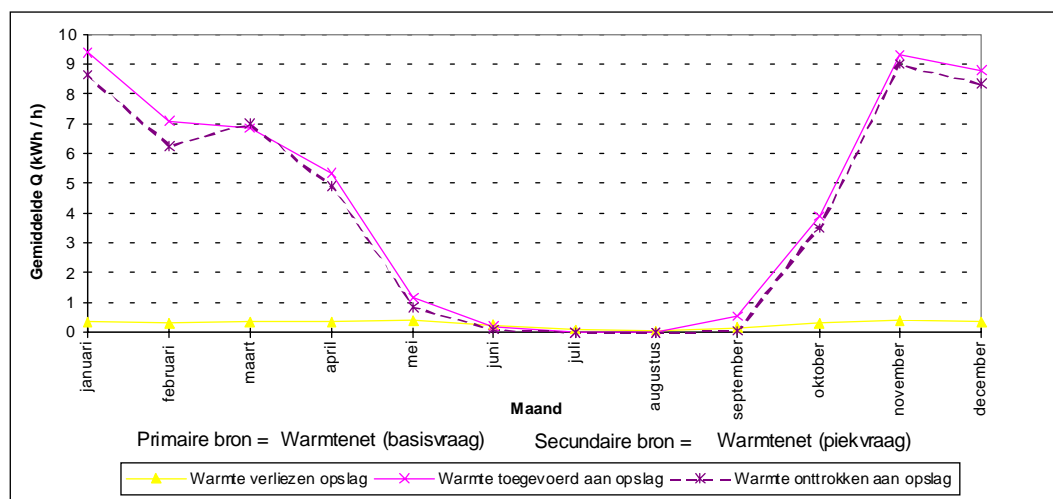
Tabel B9.2 *Overzicht resultaat berekeningen voor warmtenet.*

	Referentie	Warmte-0	Warmte-1	Warmte-2	Warmte-3
Installatie 1: Warmtenet					
• P-thermisch (kW)	0	400	400	400	400
Installatie 2: HR-ketel					
• P-thermisch (kW)	400	0	0	0	0
Warmte-opslag-systeem:					
• (kWh)	geen	geen	waterzak	waterzak	waterzak
• (GJ)			185	371	742
• Volume (m ³)			0,67	1,33	2,66
• Temperatuurniveau (°C)			4,0	8,0	16,0
			40-80	40-80	40-80
Warmte-ontrokken: (thermisch) (kWh/jaar)					
• Installatie 1					
- basislast (incl laden)	-	389.426	414.982	427.626	430.269
- pieklast	-	60.185	36.390	24.761	22.841
• Installatie 2	449.610	-	-	-	-
• Buffer	-	-	23.792	35.420	37.338
• Totaal (excl. buffer)	449.610	449.610	451.373	452.387	453.111
Benutting warmte-opslag:					
• Maximum (%)	-	-	100	100	84,3
• Gemiddeld (%)	-	-	17,2	14,3	7,0
Warmteverlies buffer:					
• (kWh/jaar)	-	-	1.572	2.449	2.899
• % van onttrokken Q	-	-	6,6	6,9	7,8
Energieverbruik:					
• Gas (m ³ /jaar)	56.194	-	-	-	-
• Warmte (GJ/jaar)	-	1619	1625	1629	1631
Investeringskosten: (f)					
• Installatie 1	-	-	-	-	-
• Installatie 2	30.000	-	-	-	-
• Buffer	-	-	5.554	6.551	8.442
• Totaal	30.000	-	5.554	6.551	8.442
Exploitatiekosten:(f/jaar) (excl. BTW)					
• Energie ¹¹	29.221	40.376	38.631	37.790	37.695
• Onderhoud	900	-	-	-	-
• Beheer	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
• Totaal	33.121	43.376	41.631	40.790	40.695
Besparingen op kosten brandstof: (f/jaar) (excl. BTW)					
• Warmtenet	-	-11.155	-11.155	-11.155	-11.155
• Buffer	-	-	1.745	2.586	2.681
Netto Contante Waarde (buffer) (f)					
• 4 %	-	-	13.850	22.200	21.365
• 6 %	-	-	11.396	18.864	17.595
• 8 %	-	-	9.384	15.863	14.504
• 10 %	-	-	7.721	13.117	11.948

¹¹ Bron: zie Bijlage4.

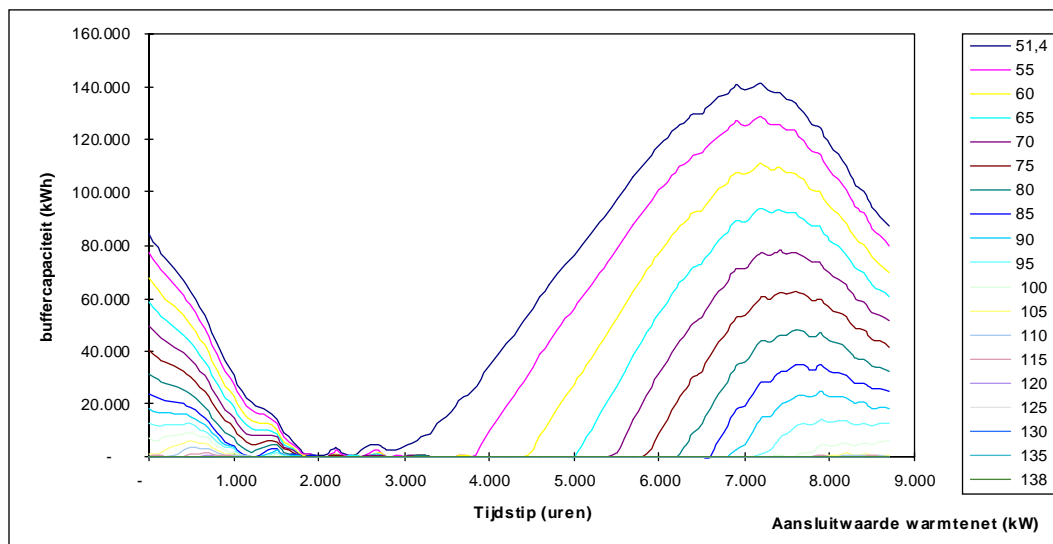


Figuur B10.1 Jaaroverzicht warmtevraag en -aanbod (warmte-2).



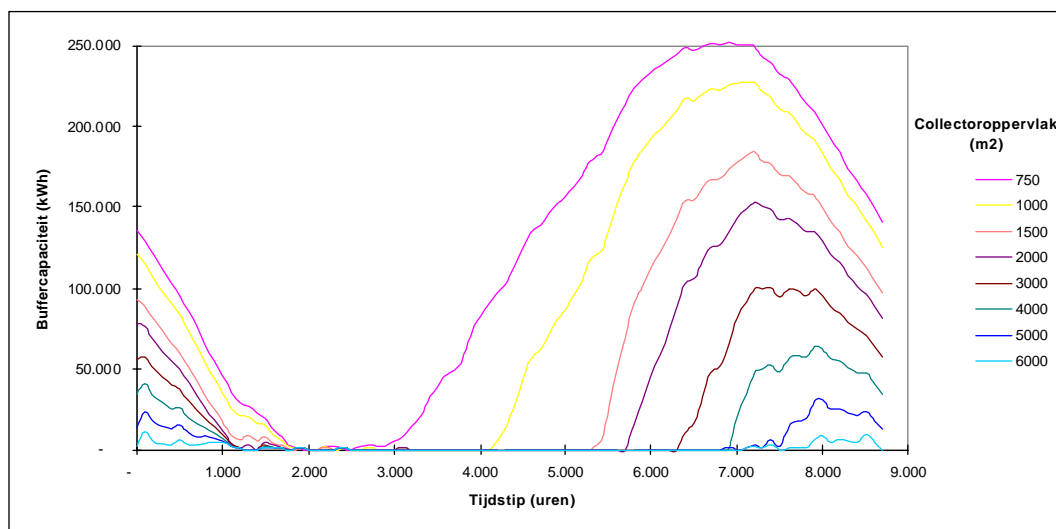
Figuur B10.2 Jaaroverzicht opslag (warmte-2).

BIJLAGE 11 Relatie aansluitwaarde warmtenet - capaciteit buffer

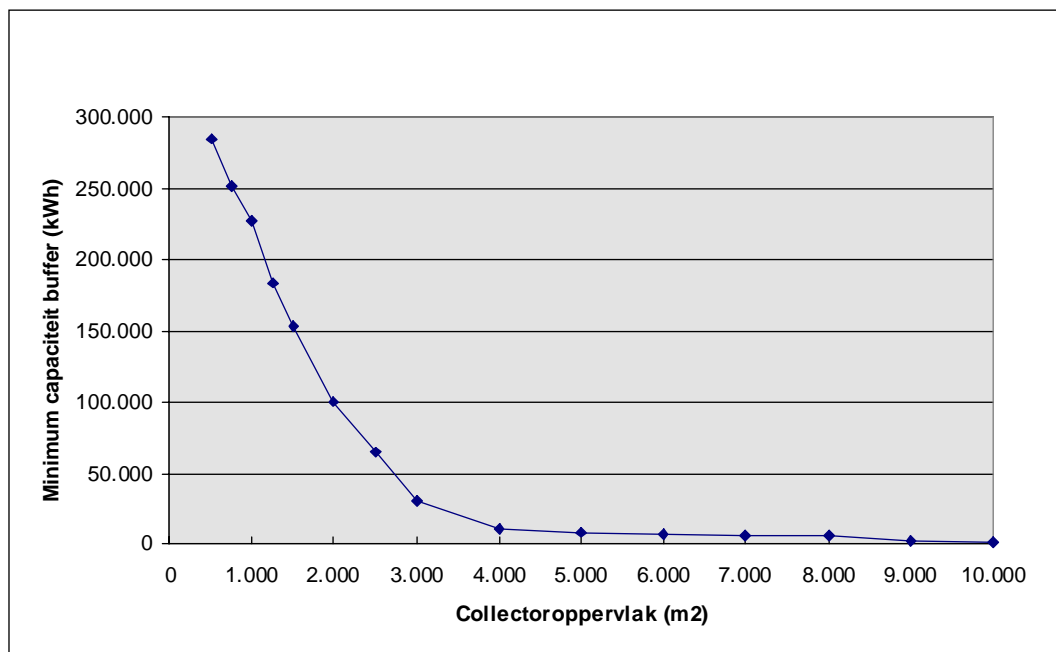


Figuur B11.1 *Minimale hoeveelheid warmte die per tijdstip en bij gegeven aansluitwaarde warmtenet moet worden opgeslagen om piekvraag voor de periode erna op te vangen indien niet gebruik wordt gemaakt van een ketelinstallatie voor het opvangen van pieklast.*

BIJLAGE 12 Relatie oppervlak zonnecollectoren - capaciteit buffer



Figuur B12. 1: *Minimale hoeveelheid warmte die per tijdstip en bij gegeven collectoroppervlak moet worden opgeslagen om de warmtevraag voor de periode erna op te vangen (verliesvrije opslag).*



Figuur B12. 2: *Minimale hoeveelheid warmte die per collectoroppervlak moet worden opgeslagen om de warmtevraag voor de periode erna op te vangen (verliesvrije opslag).*

BIJLAGE 13 Netto Contante Waarde

De Netto Contante Waarde¹² (NCW) is een methode om te komen tot een investeringsselectie waarbij de tijdsvoorkeur wordt meegenomen. Om de economische waarde van het project in zijn geheel te bekijken brengt men op de contante waarde van de toekomstige kasstromen (besparingen op energiekosten) de initiële investering in mindering.

$$NCW = CW - I_0 = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r_t)^t} - I_0$$

Investeringsperiode $t = 15$ jaar

Rente-of disconteringsvoet $r = 4, 6, 8$ of 10%

I_0 is totaal van initiële investeringen

CW is totaal van toekomstige kasstromen gecorrigeerd voor de tijdsvoorkeur

C_t is een toekomstige kastroom (besparing op energiekosten) per tijdseenheid (jaar)

Een investeringsproject zal op basis van de NCW-methode worden geaccepteerd als de NCW groter is dan nul. Gaat het om een selectie tussen meerdere elkaar uitsluitende projecten, dan zal het project met de hoogste NCW de voorkeur hebben.

In de modelberekeningen worden meegenomen:

1. De initiële investeringskosten van de buffer;
2. De besparingen op energiekosten;
3. Eventuele extra investeringskosten;
4. Eventuele extra beheer- en onderhoudskosten.

De kosten van de buffer zijn als volgt opgebouwd:

Waterzak:

De kostprijs van folie en fabricage van de waterzak is vergelijkbaar met de kostprijs van een vloeistof of mestzak. De kosten zijn gerelateerd aan het volume. Aangezien er geen verankeringen noodzakelijk zijn, maar wel gekozen is voor een duurder type folie is de verwachting dat de kosten $\pm 35\%$ duurder zijn dan van de mestzak (zie tabel 3.2.3).

Isolatie:

Om het volume van de isolatie te bepalen wordt in de berekeningen uitgegaan van een rechthoekige waterzak. De hoogte, breedte en lengte van de waterzak wordt berekend als functie van het volume van de waterzak:

$$h = 0,25x \ln(\text{Volume}) + 0,5$$

$$b = l = \sqrt{\frac{\text{Volume}}{h}}$$

Kosten van isolatiematerialen zijn gegeven in tabel 3.3.2.

Regeling & installatie:

Voor regeling, waarbij moet worden gedacht als temperatuuropnemers, vlinderkleppen en aanpassen software gebouwbeheerssysteem wordt een vast bedrag van f 3000,- gerekend. Installatiekosten worden vastgelegd op f 1000,-.

¹² Bron: Dr. A.B. Dorsman, drs. A.J.C. de Ruiter, *Handboek Management Accounting*, augustus 1993. A.M.M. Blommaert, e.a., *Bedrijfseconomische Grondslagen*, 1994, Delwel, Den Haag.

Nodulen PCM:

Uitgaande dat de prijs van de nodulen PCM met een smeltemperatuur van 63 °C bij een grotere vraag vergelijkbaar wordt met de prijs van de nodulen PCM met een smeltemperatuur van 0 °C, bedraagt dit f 1.700,- / m³.