

TNO-rapport

2005-BBE-R

**Nieuwe materialen voor warmteopslag bij
tuinbouwkassen**

Datum	24 januari 2005
Auteur(s)	ir. H.H.R. Spoorenberg ing. H.P. Oversloot drs. C.A.J. Nijboer ir. D.J. Naron
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	32
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Onderzoeksprogramma Energie GLAMI van het Productschap Tuinbouw Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV)
Projectnaam	Nieuwe materialen voor warmteopslag bij tuinbouwkassen (PT11468)
Projectnummer	006.30119/01.01

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

Samenvatting

De doelstelling van dit onderzoek, dat is uitgevoerd in opdracht van het Onderzoeksprogramma Energie *GLAMI* (Glastuinbouw & Milieu) van het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV), is het bepalen van de toepasbaarheid van faseovergangsmaterialen, zogeheten PCM's, voor warmteopslag in de glastuinbouwsector.

Hiertoe zijn de effecten van deze materialen onderzocht op diverse aspecten (energetisch, economisch en milieutechnisch) die van belang zijn voor de bedrijfsvoering in de glastuinbouw. De conclusies laten zich als volgt samenvatten:

- De grootste opslagcapaciteit per volume-eenheid wordt gehaald door zouthydraat PCM. Dat kan echter niet worden toegepast in microcapsules, wat bij paraffine PCM wel mogelijk is.
- De totale milieu-impact voor de grondstoffeninput en productie van zouthydraat STL capsules is aanmerkelijk kleiner dan die van paraffine microcapsules. De grootte van de microcapsules van paraffine PCM's blijkt echter een grote rol te spelen, optimalisatie van deze capsulegrootte in het productieproces lijkt daarom nuttig.
- De bijdrage uit het PCM aan de kasverwarming neemt voor hogere smelttemperatuur toe, maar loopt op een gegeven moment tegen een maximum aan. De bijdrage is in het voor- en najaar het grootst. De invloed op het afvlakken van pieken in de gasvraag in de winter is gering.
- Het beste scoren PCM's met een smelttemperatuur tussen de 35 en 52°C. De onderlinge verschillen zijn echter niet groot: ongeveer 20 MJ/m²/jaar, hetgeen overeenkomt met een verschil in gasverbruik van hooguit 0,5 m³ per m² kasoppervlakte. De gunstigste smelttemperatuur ligt ongeveer rond de 45°C; daar is het totale gasverbruik het kleinst.
- De benodigde gasbijstook neemt af met toenemend opslagvolume. De optimale opslag grootte ligt voor (zouthydraat) PCM tussen 0,0027 en 0,0040 m³ per m². Het extra energetisch voordeel neemt daarna bij vergroting van de opslag snel af.
- Om een terugverdientijd van minder dan vijf jaar te bereiken zou de gasbesparing door toepassing van het zouthydraat PCM minimaal 5,5 m³ per m² kasoppervlakte moeten zijn. Aangezien dit niet reeel is, is een kostenverlaging van zouthydraat PCM tot minimaal € 0,038/kg wenselijk.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
1.1	Doelstelling	4
1.2	Werkzaamheden	5
1.3	Rapportindeling	5
2	Buffergebruik bij tuinbouwkassen	6
3	Faseovergangsmaterialen	8
3.1	Actualisering kennis PCM's.....	8
3.2	Levenscyclusanalyse	10
3.3	Toekomstvisie	14
3.4	Conclusie.....	15
4	Rekenstudie.....	16
4.1	Inleiding	16
4.2	Modelleringen	18
4.3	Conclusie	21
5	Economisch perspectief.....	23
6	Conclusies.....	24
6.1	Conclusies	24
6.2	Aanbevelingen.....	24
7	Referenties.....	26
8	Bijlagen.....	27

1 Inleiding

Een van de reeds ingevoerde maatregelen voor een efficiëntere bedrijfsvoering in de glastuinbouw is het opslaan van warmte voor later hergebruik. Daarmee ondervangt men de ongelijktijdigheid in warmtevraag en -productie die onder meer optreedt bij inzet van warmtekracht (WK) installaties en bij CO₂ dosering. Bij CO₂ dosering is het meestal zo dat (door ruimtegebrek) de beschikbare opslagcapaciteit van de buffer beperkend is voor de 'ideale' dosering. Vergroting van de warmtecapaciteit bij gelijkblijvend ruimtebeslag kan hier dus een oplossing vormen. Grotere opslagcapaciteit met snelle onttrekking kan tevens een bijdrage leveren in het verkleinen van pieklasten.

Een grotere warmteopslagcapaciteit in bestaande buffers kan ondermeer worden gerealiseerd door inzet van faseovergangsmaterialen (PCM's). Afhankelijk van het PCM is hiermee in theorie ruwweg een verdubbeling van de opslagcapaciteit ten opzichte van water mogelijk. Bovendien zullen vanwege de lagere temperatuur de warmteverliezen naar de omgeving afnemen. De uitvoeringsvorm kan echter consequenties hebben voor de uitvoeringsvorm van de opslagtanks om goede warmte-uitwisseling te garanderen. Recente ontwikkelingen in de industrie betreffen ingekapselde faseovergangsmaterialen op submillimeterschaal die in principe verpompaar zijn, zogeheten PCM slurry, waardoor de toepassing sneller haalbaar wordt. Daarnaast zijn door nieuwe technieken andere vormen van warmte- en wateropslagtanks mogelijk, waardoor in combinatie met faseovergangsmaterialen wellicht voordelen te behalen zijn.

Omdat het hier gaat om chemische stoffen zoals zouten van chloriden, carbonaten en nitraten, bestaan er milieutechnische risico's in geval van het optreden van calamiteiten. Door de inkapseling van de materialen zijn deze risico's door de industrie beheersbaar gemaakt. Voor de onderhavige toepassing zullen deze echter in kaart dienen te worden gebracht en eventuele maatregelen bij calamiteiten dienen duidelijk te zijn. Dit kan de toepassing van bepaalde stoffen uitsluiten.

1.1 Doelstelling

Technische doelstelling van dit onderzoek is het bepalen van de toepasbaarheid van faseovergangsmaterialen in de glastuinbouwsector. Hierbij zullen de effecten van deze materialen worden onderzocht op diverse aspecten (o.a. energetisch, economisch, milieutechnisch) die van belang zijn voor de bedrijfsvoering in de glastuinbouw. Nieuwe materialen en uitvoeringen voor goedkope opslagsystemen op gedifferentieerde temperatuurniveaus vormen wellicht samen met faseovergangsmaterialen een alternatieve vorm voor uitbreiding van de beschikbare buffercapaciteit die operationeel inpasbaar zijn. Recent onderzoek duidt op een halvering van het benodigde piekvermogen van de installatie in de woningbouw door gebruik van meerdere faseovergangsmaterialen in buffers met twee temperatuurniveaus [B].

Tevens blijkt dat een toename van de buffercapaciteit bij systemen met een Wakinstallatie, de warmte die via de buffer wordt geleverd tot 30% van het totaal kan doen toenemen [A]. Dit komt overeen met een extra besparing van minimaal 4 m³ aardgas / m² kasoppervlakte. Wens is een gasverbruik van 45 m³/m². Uit diverse bronnen blijkt dat het gasverbruik inclusief CO₂ gasverbruik voor een kas met tomatenteelt op jaarbasis circa 60-65 m³/m² bedraagt []. Het totale gasverbruik van een kas met WK-systeem zal door het lagere warmtetechnische rendement van de WK-eenheid t.o.v. de ketel stijgen ten opzichte van een systeem met alleen een ketel. Verder geeft een verandering in de

buffergrootte een verandering van het gasverbruik. Onder alle omstandigheden wordt alleen de extra geleverde hoeveelheid warmte, nodig boven de reeds aanwezige warmtevrage in rekening gebracht als 'CO₂ warmte'. Uit de in dit rapport gepubliceerde getallen en grafieken kan derhalve niet de totale hoeveelheid CO₂ worden afgeleid.

Voor alleen CO₂ gebruik komt dezelfde toename in opslagcapaciteit overeen met een extra besparing van 1 m³ gas / m² kasoppervlakte. Een grotere opslagcapaciteit wordt effectiever, doordat langere termijn opslageffecten een rol gaan spelen.

1.2 Werkzaamheden

Dit onderzoek omvat een literatuurstudie met betrekking tot buffergebruik en een actuele inventarisatie van de beschikbare faseovergangsmaterialen en de vorm waarin deze beschikbaar zijn, hun producenten en hun leveranciers. Ook zijn de milieutechnische risico's in kaart gebracht. Door uitvoering van een levenscyclusanalyse (LCA) op tenminste één product kan een beoordeling worden gegeven of toepassing als een duurzame ontwikkeling kan worden gekenschetst.

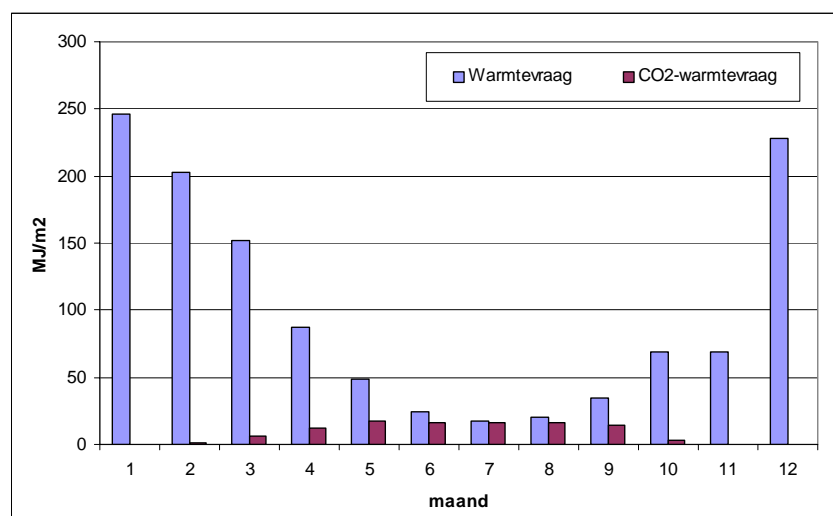
Tevens is een gevoeligheidsstudie uitgevoerd met een simulatiemodel, waarbij regelstrategie, buffergrootte en temperatuurniveaus werden gevarieerd om inzicht te verkrijgen in de besparingsmogelijkheden. Dit levert tevens een onderbouwing voor de economische berekeningen.

1.3 Rapportindeling

In dit rapport zal allereerst iets worden gezegd over buffergebruik bij tuinbouwkassen in het algemeen (hoofdstuk 2). Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de actuele kennis met betrekking tot PCM (hoofdstuk 3). Hierbij komen tevens de milieu-implicaties en levenscyclusanalyse aan bod, alsook mogelijke alternatieven. Dan volgt een gevoeligheidsstudie (hoofdstuk 4) waarin met behulp van het rekenmodel verschillende opslaggrootten en -typen worden bekeken. Gebaseerd daarop wordt in hoofdstuk 5 het economisch perspectief bepaald, waarna in hoofdstuk 6 tenslotte de conclusies worden samengevat.

2 Buffergebruik bij tuinbouwkassen

Ten behoeve van de plantengroei wil men in de kas een hoger CO₂ gehalte handhaven dan het CO₂ gehalte in de buitenlucht. Daartoe wordt in de kas CO₂ gedoseerd. De CO₂ productie vindt plaats door het verbranden van aardgas waarbij de verbrandingsgassen, die rijk zijn aan CO₂, aan de kas worden toegevoerd in plaats van via de schoorsteen te worden afgevoerd. Indien de warmtevraag te laag is, dan wordt de bij de CO₂ productie vrijkomende warmte opgeslagen in een buffer. Deze bufferwarmte wordt op een later tijdstip met warmtevraag zonder CO₂ vraag zo snel mogelijk benut, bijvoorbeeld voor ontvochtiging van de lucht aan het begin van de dag. Figuur 2.1 toont een voorbeeld van het verloop van de totale warmtevraag van de kas over het jaar alsook de warmtevraag tgv CO₂ dosering.



Figuur 2.1 Het verloop van de totale warmtevraag van de kas over het jaar alsook de warmtevraag t.g.v. CO₂ dosering.

Het LEI geeft aan dat eind 2001 op 50% van de glasgroentebedrijven een warmtebuffer aanwezig was [K]. De gemiddelde jaarlijkse toename van bedrijven met een warmtebuffer is voor deze bedrijven 3,3% per jaar. Een tweede ontwikkeling die het LEI constateert, is de toename van het gebruik van zogenaamde open buffersystemen. Bij een open buffersysteem wordt het verwarmingssysteem van de kas gevoed vanuit de buffer.

De toepassing van een warmtebuffer (met een goede regeling) kan met name bij WK-systemen een groot aantal voordelen hebben [A]:

- een groter aandeel in de dekking van de warmtebehoefte
- daardoor meer besparing van primaire energie
- lagere milieubelasting door lagere emissies
- vergroting van het aantal draaiuren (of mogelijke toepassing van een grotere WK-eenheid)
- verschuiving naar meer daguren
- optimaler motorbedrijf
- optimaler 'piekdraaien'
- financiële besparing voor de tuinder

Ook het CO₂ opwekkingsrendement van de WK-eenheid zelf is economisch (aanmerkelijk) gunstiger dan dat van een gasketel. Dit leidt namelijk, afhankelijk van het WK-vermogen, tot een toename van het aantal draaiuren met 1000 à 1500 per jaar. De CO₂ levering vond in het verleden slechts plaats met de ketel omdat de rookgassen van de WK-eenheid componenten bevatten die schade veroorzaken aan het gewas. Daarnaast werd als nadeel genoemd de mogelijk hogere warmteverliezen van de opslag dan momenteel het geval is. In de praktijk is een rookgasreiniger op de WK wel mogelijk, hretgeen tot een andere inzet leidt. In veel gevallen is er echter geen WK, maar wordt de ketelwarmte gebufferd (als de CO₂ gedoseerd wordt zonder warmtevraag, en dan wordt 's nachts verwarmd met warmte uit de buffer. Tijdens donker weer is er geen CO₂-vraag).

In de winterperiode is er weinig behoefte aan de buffer. De warmtevraag is dan zo groot dat alle warmte direct de kas in kan: de WK-eenheid staat 24 uur per dag aan. In de zomerperiode is er sprake van een overgang, waarbij de WK afhankelijk van de warmtevraag aanstaat. Doordat weersinvloeden grote schommelingen in de warmtevraag veroorzaken, zowel tussen dag en nacht als tussen opeenvolgende dagen, kan (een andere) inzet van de buffer hier uitkomst brengen. Mits deze voldoende warmte bevat, is de buffer in staat de pieken in de warmtevraag op te vangen. In de tussenliggende periode (voorjaar) zakt de warmtevraag en ontstaat er een toename in de CO₂ behoefte. Daardoor wordt het aantal uren dat de WK-eenheid draait beperkt. De buffer helpt hier wel met het piekscheren van de warmtevraag, maar de benodigde hoeveelheid warmte, boven het deel dat rechtstreeks geleverd kan worden, is beperkt. Binnen de regelstrategie ontstaat een wisselwerking tussen direct en via de buffer geleverde warmte.

Leverancier van tuinbouwcomputers PRIVA geeft ten aanzien van bufferstrategie de volgende drie opties:

- Regeling op kosten: de buffer wordt zo ver mogelijk gevuld tegen de laagst mogelijke kosten. Dit betekent dat een ruime voorraad aan 'goedkope' warmte beschikbaar is. Deze keuze is met name in de winter interessant.
- Op CO₂: er wordt door de computer zo veel mogelijk ruimte in de buffer gehouden om zo veel mogelijk CO₂ te kunnen doseren. Deze keuze garandeert dat er in de zomer optimaal CO₂ gedoseerd kan worden.
- Strategieregeling (een combinatie van regeling op kosten en op CO₂): de buffer wordt tot aan de ingestelde vullijn zo goedkoop mogelijk gevuld. Aan de hand van de vullijn wordt een gedeelte van de buffer gereserveerd om CO₂ te kunnen doseren. Deze strategie is interessant in het voor- en najaar.

De regelstrategie op buffertemperatuur kan nog verder geoptimaliseerd worden door in de winterperiode de buffer nagenoeg volledig voor WK-gebruik te reserveren en dit geleidelijk af te bouwen naar de zomer. Tijdens de zomerstop kan door observatie van de buffertemperatuur nog een kleine verbetering aan WK-inzet geboekt worden.

Er lijkt een vaste verhouding te bestaan tussen de kasoppervlakte in m² en de warmtebuffergrootte. Deze verhouding is voor tomatenteelt bijvoorbeeld 0,1 m³ per m² (1000 m³/ha) kasoppervlakte [A]. Een regelstrategie op buffertemperatuur met een zomerstop geeft het hoogste aantal draaiuren met slechts een beperkte invloed op de CO₂-strategie. Afhankelijk van de grootte van het WK-vermogen is voor deze regelstrategie minimaal een buffer van 0,0135 - 0,02 m³/m² (135-200 m³/ha) noodzakelijk.

3 Faseovergangsmaterialen

Faseovergangsmaterialen zijn de laatste 20 jaar verder ontwikkeld door de industrie en worden meestal toegepast in ingekapselde vorm. Verkleining van deze capsules is inmiddels zover gevorderd, dat bolletjes op sub-millimeterniveau kunnen worden geproduceerd. Met deze vorm is in principe een verpompbaar product verkregen, dat naar verwachting in bestaande buffers kan worden toegepast. Andere uitvoeringsvormen van deze materialen vergen wellicht aanpassingen aan de uitvoering van de opslagtanks om een goede warmte-uitwisseling te garanderen.

3.1 Actualisering kennis PCM's

In het verleden is uitgebreid onderzoek gedaan naar de karakteristieken en mogelijke toepassingen van faseovergangsmaterialen (ook aangeduid als *phase change material* of kortweg PCM). Deze materialen zijn interessant, omdat gedurende de opwarming van het materiaal een grote hoeveelheid energie kan worden geabsorbeerd in de transitie tussen de fases, die bij afkoeling van het materiaal weer vrijkomt. Deze transitiefase speelt zich af in een relatief klein temperatuurgebied. In vergelijking met een gelijk volume aan water kan op deze manier meer energie worden opgeslagen, zodat een kleiner opslagvolume benodigd is. Dit specifieke voordeel van PCM's ten opzichte van water wordt kleiner naarmate het temperatuurgebied breder wordt. Dit wordt veroorzaakt door de hoge soortelijke warmte van water t.o.v. PCM. Vanzelfsprekend kan water ook zelf als PCM worden gebruikt, zij het bij de relatief lage fase-transitietemperatuur van 0°C.

3.1.1 Eigenschappen

In uitgevoerd onderzoek naar PCM's worden voorwaarden genoemd waar de materialen aan moeten voldoen om toepassing mogelijk te maken [H]:

- De fasetransitie moet zich afspelen in een temperatuurgebied waarin het gehele systeem kan werken.
- De warmteopslagcapaciteit van het PCM (latente warmte) moet minimaal even groot zijn als de capaciteit van alternatieve opslagmedia, zoals water (voelbare warmte).
- De effectieve thermische geleiding voor het 'laden en ontladen' van het PCM moet voldoende groot zijn, zodat geen problemen optreden met warmteopname en -afgifte.
- Het PCM moet stabiel zijn, om capaciteitsafname gedurende de levensduur te voorkomen.
- Het PCM moet voldoen aan de wettelijke eisen voor brandbaarheid en toxiciteit.
- De inkapseling van het PCM moet chemisch inert zijn en voldoende sterk om lekkage te voorkomen.
- De prijs van het PCM moet overeenstemmen met de bespaarde kosten voor energie en eventuele kostenbesparing door een kleiner buffervolume per eenheid warmteopslag in vergelijking met conventionele warmteopslag met water.

PCM's worden op basis van hun chemische eigenschappen onderverdeeld in twee hoofdgroepen: de organische en de anorganische PCM's. In tabel 3.1 worden de kenmerken van beide groepen behandeld.

Tabel 3.1 Karakteristieken van organische en anorganische PCM's.

	organische PCM	anorganische PCM
voorbeeld	Shell paraffine wax 60/63	natriumacetaat-trihydraat
faseovergang	vast-vloeibaar en in enkele gevallen vast-vast	vast-vloeibaar
fasetransitie-temperatuur	langer fase-transitie temperatuurtraject	
supercooling	vertoont (meestal) geen supercooling	vertoont supercooling, dit is te voorkomen met additieven
dichtheid		kleinere dichtheid
warmteopslag capaciteit		grotere warmteopslagcapaciteit per eenheid volume
veroudering	nee	nee
stabiel zonder additieven	ja	nee (er treedt segregatie op)
overige kenmerken	<ul style="list-style-type: none"> - risico van verdampen (VOC's) - volumeverandering bij faseovergang - ontvlambaar - hydrofoob - kan toegepast in microcapsules 	<ul style="list-style-type: none"> - corrosief - kan niet in microcapsules

Diverse fabrikanten zoals Honeywell, TEAP en BASF kunnen PCM's leveren met verschillende fasetransitietemperaturen in het temperatuurgebied tussen -20 en 140°C [D, I, zie ook bijlage A]. PCM's kunnen ook 'op maat' worden gefabriceerd voor een gegeven fasetransitietemperatuur.

Voor paraffine PCM is de opslagcapaciteit 0,183 MJ/kg (zie tabel 3.2 en 3.3). Bij een dichtheid van 0,75 kg/l (zie bijlage A) geeft dat 137 MJ/m³. Voor STL PCM bedraagt de opslagcapaciteit 0,24 MJ/kg, maar omdat de dichtheid 1,45 kg/l bedraagt, geeft dat gerelateerd aan het volume een capaciteit van 170 MJ/m³. Ter vergelijking: de opslagcapaciteit van water bedraagt bij een temperatuurverschil van 30°C: 4,18 * 30 = 125 MJ/m³, nauwelijks minder dan van paraffine PCM! Merk bovendien op dat nog geen rekening is gehouden met de vergroting van het totale opslagvolume indien het PCM in bolletjes is ingekapseld.

3.1.2 Kapseling

Het gebruik van PCM's zonder kapseling is af te raden. Bij toepassing in bouwmaterialen kunnen zouthydraten (anorganische PCM's) zonder kapseling 'uitzweeten', en organische PCM's worden bij verwarming vloeibaar, en zouden zich zo door het omgevende (bouw)materiaal kunnen verspreiden. Afhankelijk van het molecuulgewicht kunnen koolwaterstoffen verdampen, en tot emissie van zogeheten Volatile Organic Compounds (VOC's) leiden. Een te hoge VOC-concentratie in het binnenmilieu geeft potentiële gezondheidsrisico's.

Veelal fungeren daarom kunststof capsules als kapseling voor het PCM. Deze capsules moeten de werking van het PCM uiteraard zo min mogelijk verstoren. Resultaten uit voorgaand onderzoek leidden tot de volgende randvoorwaarden voor PCM-capsules [H, D]:

1. Geen interactie tussen het capsulmateriaal en het PCM.
2. Geen of weinig beïnvloeding van de warmteoverdracht van het omgevende medium naar het PCM (goede thermische geleiding).
3. Een zo groot mogelijke relatieve oppervlakte¹ van de capsule.

Vooraf punt 3, een zo groot mogelijke relatieve oppervlakte, blijkt van belang. Een kleine relatieve oppervlakte leidt tot een slechte warmtegeleiding van het PCM naar het omgevende medium. Het resultaat kan zijn dat de kern van de PCM-capsule vloeibaar blijft en dus nauwelijks warmte afstaat, waardoor het rendement van het warmteopslag-systeem daalt. In de praktijk blijkt de smelttijd van PCM's hoger dan de theorie voorspelt [L], maar dat komt vooral door de lage thermische geleiding van van het omhullende materiaal, redenen om juist hier aandacht aan te besteden (materiaal zelf èn uitvoering).

3.1.2.1 *Microcapsules*

Een nieuwe ontwikkeling is die van de zogenaamde microcapsule. Dit zijn PCM-capsules met een zeer kleine diameter van 5-20 µm [D] en een kapseling van zeer hard plastic. Deze hebben twee voordelen. Ten eerste is door de kleine diameter de relatieve oppervlakte van het PCM optimaal voor warmte-uitwisseling met het omgevende medium. Ten tweede maakt de kleine diameter verpompen van PCM microcapsules in het opslagmedium mogelijk. Hun zeer geringe afmetingen maken ze vrijwel onverwoestbaar. Dit verpompbare PCM wordt PCM slurry genoemd. De microcapsules moeten wel bestand zijn tegen de mechanische belasting veroorzaakt door het verpompen gedurende de levensduur. Het temperatuurbereik waarop PCM microcapsules kunnen worden gebruikt is -10 tot 80°C. Ze zijn volkomen afgesloten, veilig te verwerken en bevatten geen formaldehyden.

Gezien de aard van het micro-encapsulatieproces kunnen alleen hydrofobe PCM's worden gebruikt als basismateriaal [D]. Dit sluit zouthydraten uit van toepassing in microcapsules. Zouthydraten kunnen wel in grotere capsules (~75 mm) worden geïnjecteerd [E].

3.2 **Levenscyclusanalyse**

In dit deel wordt het milieuprofiel van de productie van de gebruikte materialen voor warmteopslag gegeven. Dit milieuprofiel wordt gegenereerd door een zogenoemde levenscyclusanalyse (LCA) uit te voeren. Dit instrument leent zich goed voor onderlinge vergelijking van materialen op criteria als humane toxiciteit, vermindering van ecosystemkwaliteit en depletie van fossiele hulpbronnen. Harde uitspraken over de absolute milieu-impact zijn minder goed te doen op basis van de hier uitgevoerde LCA, vanwege de onzekerheden in de aannames. In deze LCA wordt bijvoorbeeld een tweede orde systeemgrens aangehouden. Dit houdt in dat enkel materialen en energiestromen voor de productie worden meegenomen en kapitaalgoederen niet.

¹ De relatieve oppervlakte is de oppervlakte per gewichtseenheid van het PCM.

Om een LCA uit te kunnen voeren, is een functionele eenheid noodzakelijk. Dit vormt de vergelijkingsbasis tussen de verschillende producten. In dit geval is de functionele eenheid gesteld op 1 MJ (latente) warmteopslag.

3.2.1 *Methodie*

Het milieuprofiel is gegenereerd met behulp van het software pakket Simapro Analyst 5.1.002 (2003). In de LCA methodiek van dit pakket wordt een vijftal productstappen onderscheiden, te weten:

1. assembly (productie)
2. life-cycle (gebruik)
3. disposal scenario (afvalscenario)
4. disassembly (demontage)
5. reuse (hergebruik)

Voor het milieuprofiel van de PCM's is enkel de productie ingevoerd. Dit komt neer op grondstofinput, productieproces en transport. Fase 2, het gebruik, is voor deze materialen niet opportuun, omdat er tijdens het gebruik geen toevoegingen aan het materiaal optreden. Deze fase zou wel kunnen worden ingevuld voor systeemvergelijkingen in warmtebuffers. Ook de afvalfase, in de LCA methodiek fase 3, 4 of 5, is niet meegenomen door gebrek aan gegevens voor de wijze van afvalverwerking voor de materialen.

Het niet meenemen van de afvalfase van de verschillende PCM's als gevolg van het ontbreken van deze gegevens t.a.v. de afvalverwerking heeft tot gevolg dat eventueel hergebruik van deze materialen (dat positief kan bijdragen aan de milieuscore) of eventuele negatieve milieueffecten door bijvoorbeeld verbranding in de afvalverwerking niet worden meegenomen. Hierdoor kan de relatieve milieuscore van de PCM's afwijken van de beoordeling inclusief afvalfase.

Simapro biedt verschillende methoden voor de beoordeling van de milieuimpact. Deze 'impact assessment methods' bevatten data voor materiaalequivalentie, normalisatie en wegingsets. Om een vergelijking van resultaten mogelijk te maken, moet dezelfde methode gebruikt worden. In deze LCA studie is de zogeheten Ecoindicator 99 (E) methode gebruikt, met de Europe EI 99 E/E normalisatie en gewichtenset.

3.2.2 *Invoergegevens*

De componenten van de PCM producten (de kapseling en het PCM zelf) zijn afzonderlijk in Simapro ingevoerd. De specifieke materiaalgegevens voor de LCA van paraffine en STL zijn verkregen uit de Ecoinvent v1.0 2003 Database van het Swiss Centre for Lifecycle Inventories. De detailinvoer van de LCA is weergegeven in een zogeheten 'networkview', te vinden in bijlage B.

De hoeveelheden van de PCM's en hun kapseling zijn berekend aan de hand van de uitgangspunten voor latente warmteopslag per gewichtseenheid PCM (Q_{tr} in [kJ/kg]), de capsulediameter, de laagdikte en de functionele eenheid. Deze uitgangspunten zijn voor de paraffine microcapsules gebaseerd op gegevens van BASF [D]. De STL capsulegegevens zijn afkomstig van TEAP [E]. Een gedetailleerde uitwerking van deze uitgangspunten staat eveneens in bijlage B. De belangrijkste materiaalgegevens voor de LCA van de twee soorten PCM staan in tabel 3.2 en 3.3:

Tabel 3.2 Materiaalgegevens en kapseling van PCM capsules.

	kapseling	capsulegrootte en laagdikte kapseling	opslagcapaciteit Q_{tr} [kJ/kg]
paraffine micro-capsule	microcapsule van melamine crosslinked resin	6 μ m capsule 1 μ m kapseling	1,8 \cdot 10 ²
natriumacetaat-trihydraat (STL)	polypropyleen (PP)	75 mm capsule 1,2 mm kapseling	2,4 \cdot 10 ²

Tabel 3.3 Vervolg materiaalgegevens en kapseling van PCM (micro)capsules.

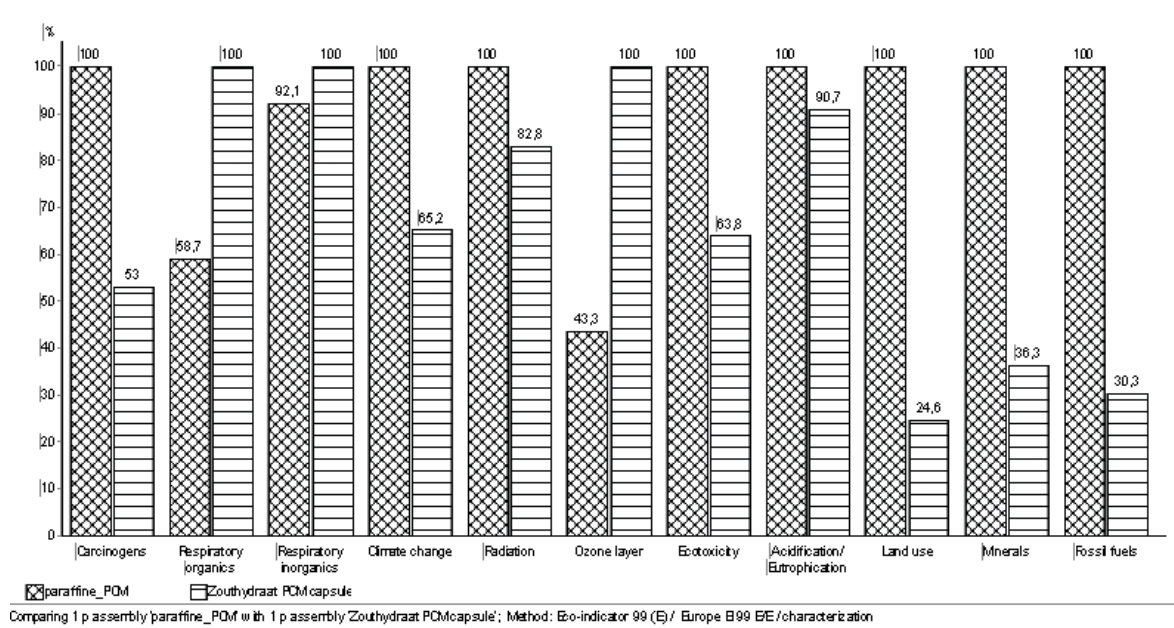
	smelt-temperatuur	capsule-diameter	laagdikte capsule-materiaal	PCM per MJ latente warmteopslag	capsule-materiaal per MJ latente warmteopslag
	°C	[m]	[m]	[kg]	[kg]
Paraffine micro-capsule	62/64	6,0 \cdot 10 ⁻⁶	1,0 \cdot 10 ⁻⁶	5,5	10,1
STL capsule	56	7,5 \cdot 10 ⁻²	1,2 \cdot 10 ⁻³	4,3	0,86

Simapro beschikt over een aantal ingebouwde databases met materialen. Deze databases bevatten per materiaal de benodigde invoergegevens voor productie en de hierbij vrijkomende emissies (naar lucht, water en bodem). De Data Quality Indicators (DQI) als criterium voor de systeemgrens zijn niet gebruikt door afwezigheid van deze gegevens in de Ecoinvent v1.0 database [F]. Data Quality Indicators worden gebruikt in Simapro om de kwaliteit van de aanwezige gegevens in de database te kunnen beoordelen (zoals geldige tijd-periode, geografische oorsprong, systeemgrens e.d.). Voor de meeste van de gebruikte data (inclusief omschrijvingen in de Eco-invent database) waren gedeeltelijke gegevens van de DQI beschikbaar, maar niet volledig. Het gebruiken van data die onbedoeld niet accuraat blijken kan de milieuimpact van de PCM's positief of negatief beïnvloeden. Een volledig 'operationeel' systeem van DQI kan de gebruiker attenderen op mogelijk niet accurate data.

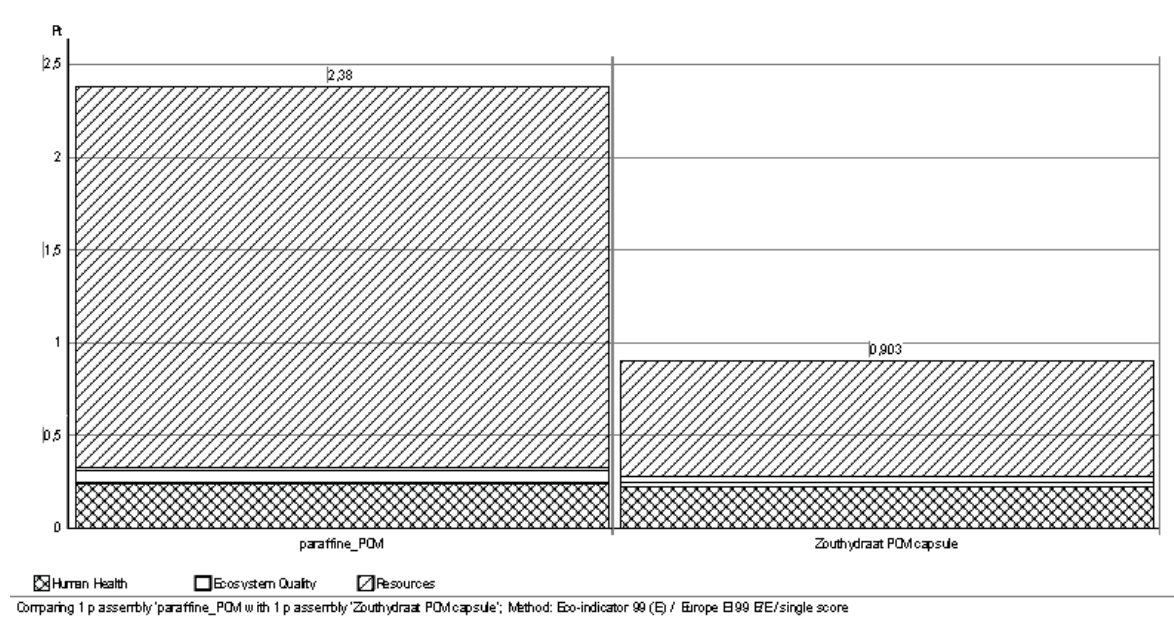
3.2.3 Resultaten

Het milieuprofiel van de productie van STL en paraffine PCM is voor de indicatoren humane toxiciteit, ecotoxiciteit en grondstoffenuitputting weergegeven in figuur 3.1. In dit staafdiagram worden de indicatoren opgesplitst in deelfactoren. De hoogste milieu-impact is op 100 gesteld.

Met de gebruikte methode en normalisatie- en gewichtenset heeft de zouthydraat STL-capsule een lagere milieu-impact in vergelijking met de paraffine microcapsule. Dit is duidelijk te zien in figuur 3.2 met de genormaliseerde en gewogen milieu-impact voor de hoofdindicatoren. In deze figuur blijkt tevens dat voor de paraffine PCM het eindige bronnengebruik (mineralen en fossiele brandstoffen) de grootste milieu-invloed heeft. Dit wordt met name veroorzaakt door de voor paraffineproductie benodigde ruwe olie en de aardgasinput voor ureumproductie. Dit ureum is een grondstof voor melamine, de hoofdcomponent van het kapselmateriaal.



Figuur 3.1 LCA profiel voor de fabricage van paraffine respectievelijk STL PCM capsules.



Figuur 3.2 Vergelijking van het genormaliseerde en gewogen milieuprofiel van paraffine en STL PCM capsules.

3.2.4 Gevoeligheidsanalyse

Het milieuprofiel van de paraffine microcapsules lijkt dus minder goed dan dat van zouthydraat PCM. Het is echter afhankelijk van de grootte van de microcapsules. In de bovenstaande resultaten is uitgegaan van een capsulediameter van 6 µm, met een kapseldikte van 1 µm. Producent BASF [D] geeft aan dat de grootte van de capsules varieert tussen 5-20 µm. Spreidingsgegevens hiervan zijn echter niet bekend.

Een capsulediameter van 6 μm komt neer op een massapercentage per microcapsule van 35% paraffine en 65% kapselmateriaal. Een grotere diameter geeft een hoger massapercentage paraffine, en dus een hogere latente warmteopslag Q_{tr} per kg microcapsules. Om de effecten hiervan op het milieuprofiel in beeld te brengen, zijn nog twee capsulediameters van respectievelijk 10 en 20 μm doorgerekend. Deze zijn weergegeven in tabel 3.4.

Tabel 3.4 Alternatieve capsulediameters voor de paraffine PCM.

Capsule-diameter	Laagdikte capsule-materiaal	Massa% paraffine in capsule	Massa% kapselmateriaal in capsule	PCM materiaal per MJ latente warmteopslag	Capsule-materiaal per MJ latente warmteopslag
[μm]	[μm]	%	%	[kg]	[kg]
10,0	1,0	58	42	5,5	4,0
20,0	1,0	75	25	5,5	1,8

Als de capsulediameter op 10 μm wordt gesteld, daalt de genormaliseerde en gewogen milieu-impact van 2,38 punten (Pt) naar 1,46. Bij een nog grotere capsulediameter van 20 μm , daalt de milieu-impact verder tot 1,12 punten (Pt).

3.3 Toekomstvisie

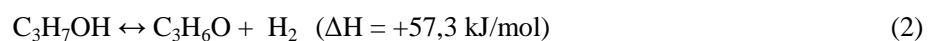
Optimaliseren van de uitvoeringsvorm van de buffer met betrekking tot de weglengte en warmteoverdracht, op zodanige wijze dat de bolletjes als opslagmiddel overbodig worden, zal de kosten voor het PCM reduceren tot de fabricageprijs. De kosten voor de buffer zullen echter stijgen. De verwachting is dat deze oplossing op iets langere termijn qua bulkfabricageprijs en gebruiksgemak zal worden voorbijgestreefd door de microcapsule oplossing.

In deze studie is uitgegaan van de kostprijs per kg van zouthydraat PCM capsules met grote diameter. De toepassing van bulkfabricage PCM microcapsules (BASF) kan de kosten voor een belangrijk deel drukken. Het probleem is dat de kostprijs van deze microcapsules (nog) niet bekend is. Op het moment dat deze microcapsules op de markt verkrijgbaar worden, zijn dit in feite de PCM's die aan de gestelde eisen voldoen (veilig, verpompbaar, goede warmtecapaciteit, etc), mits ze uiteraard verkrijgbaar zijn met het gewenste fasetransitietemperatuur.

Thermochemische opslag is een alternatieve methode voor de opslag van warmte die hier in het kort zal worden besproken. Door middel van dissociatie/recombinatie reacties kan warmte worden opgeslagen en op een ander tijdstip of locatie vrijkomen. In reactievorm kan dit als volgt worden weergegeven:



In formule 1 kan stof AB zowel een organische als een anorganische stof zijn, die onder invloed van warmte uiteenvalt in de stoffen A en B. Deze stoffen A en B kunnen weer reageren, waarbij opnieuw stof AB wordt gevormd. Bij deze reactie komt warmte vrij. Een voorbeeldreactie is de dehydrogenatie van isopropanol, waaruit aceton en waterstofgas ontstaat.



De dehydrogenatie-reactie kan geïnitieerd worden in een gesloten cyclus met restwarmte van ongeveer 80°C en de aanwezigheid van katalysatoren. De reverse reactie wordt gekatalyseerd met nikkel, en produceert warmte van ongeveer 200°C [J]. Of deze warmteopslagtechniek toepasbaar is in tuinbouwkassen, hangt sterk af van de gebruikte stoffen. Het gebruik van licht ontvlambare stoffen (H₂) is aan regelgeving gebonden. Toepassing in kassen zou grote hoeveelheden van deze stoffen vereisen.

3.4 Conclusie

De grootste opslagcapaciteit per volume-eenheid wordt gehaald door zouthydraat PCM. Dat kan echter niet worden toegepast in microcapsules.

De totale genormaliseerde en gewogen milieu-impact voor de grondstoffeninput en productie van zouthydraat STL microcapsules is kleiner dan die van paraffine capsules. De grootte van de microcapsules van paraffine PCM's blijkt hierbij echter een grote rol te spelen, optimalisatie van deze capsulegrootte in het productieproces lijkt daarom nuttig.

Voor toepassing van thermochemische opslagmethoden is nader onderzoek vereist.

4 Rekenstudie

4.1 Inleiding

Het TNO Bouw kasmodel simuleert de warmte- en vochthuishouding van een referentie tuinbouwkas op basis van de optredende warmtestromen. Het model geeft een fysische beschrijving van een kas, waarbij alle regelacties hun uitwerking kennen op de warmte-, vocht- en CO₂ balansen van de kas. Het model heeft de volgende kenmerken [A]:

- het gebruikt uurlijkse gegevens van een referentie klimaatjaar.
- de fracties van de door het kasdek doorgelaten zonnestraling, die ten goede komen aan de kas in de vorm van voelbare warmte en straling naar het kasdek en bodem, worden berekend afhankelijk van de gewasgrootte en kastemperatuur.
- de maximale gedwongen ventilatie van de kas (open ramen) wordt gebaseerd op de windsnelheid en het temperatuurverschil tussen kas en omgeving.
- de capacitaire werking van de bodem wordt in rekening gebracht.
- teelt: tomaten (teelstop in november).
- de kas beslaat een oppervlakte van 1.5 ha. Het geïnstalleerde ketelvermogen bedraagt 235 W/m². CO₂-productie bij lage warmtevraag ('s zomers) gebeurt op de laagstand (20%) van de ketel. Het temperatuurniveau van de ketel ligt vast op 90°C.
- de condensatie van vocht wordt in rekening gebracht aan de hand van de vochtigheid in de kas, de verdamping van het gewas en de vochtafvoer t.g.v. ventilatie.

De verwarmingsinstallatie is opgebouwd uit een tweetal verwarmingsnetten met verschillende bedrijfstemperaturen. Het primaire net (hoge temperatuur) wordt gevoed door een CV-ketel met daaraan parallel een tweede installatie (warmtekracht) en het secundaire net (lage temperatuur) door een ketelrookgascondensor met parallel daaraan eventueel een tweede warmtebron in de vorm van een rookgascondensor van de tweede installatie. In verband met zo gering mogelijke slijtage wordt ernaar gestreefd het aantal start/stops van de W/K installatie te minimaliseren. Hiertoe wordt een minimum draaitijd van twee uur aan en twee uur uit aangehouden.

4.1.1 WK-installatie

Door de WK-eenheid wordt lokaal elektriciteit opgewekt die aan het net wordt geleverd. Bij tuinders met een eigen WK-installatie (de zelfopwekkers) wordt de totale bedrijfsvoering geregeld door een klimaatcomputer. Bij tuinders met een WK-installatie van de nutsbedrijven regelt de klimaatcomputer de bedrijfsvoering van de CV-installatie van de tuinder. De bedrijfsvoering van de WK-installatie (warmtevraag volgend) wordt praktisch door de nutsbedrijven verzorgd (start- en draaivoorwaarden), waarbij het nutsbedrijf onder een optimum verstaat: een zo hoog mogelijke elektriciteitsproductie, met zoveel mogelijk uren op de dag met zo min mogelijk start/stops. Dit laatste om de kosten van onderhoud (slijtage e.d.) zo laag mogelijk te houden.

De prioriteit van de tuinder ligt bij het behalen van een economisch optimale opbrengst van zijn geteelde product. Om dit te bereiken probeert hij de gunstigst mogelijke klimaatcondities te handhaven in zijn kas. Daarom regelt hij via de klimaatcomputer de

gewenste setpoints voor temperatuur, CO₂-gehalte en minimum buistemperatuur² (zie bijlage C). Omdat de warmte van een WK-installatie goedkoper is dan het bedienen van een ketel met condensor zal bij warmtelevering de WK-installatie de voorkeur krijgen, zolang de CO₂ bemesting niet in de knel komt.

Tijdens piekuren wordt de WK-installatie altijd in bedrijf gesteld. Het totale aantal piekuren dat voor deze studie is aangehouden bedraagt 288 (praktijkwaarde). Deze piekuren treden op van 9 tot 11 uur 's ochtends en van 17 tot 19h 's middags.

Het warmteopwekkingsrendement van de WK-installatie bedraagt 49% op bovenwaarde. Het elektrisch rendement 33%. De WK-installatie is afgeregeld op een vast temperatuurniveau van 90°C waarop de warmte wordt aangeboden. De koppeling van een WK-eenheid aan een verwarmingssysteem met buffer heeft een gunstige invloed op zowel het aantal draaiuren als het regelgedrag van de WK-eenheid. Een grotere WK-eenheid heeft behalve een toename in de dekkingsgraad eveneens een grotere afname van de beschikbare ruimte voor opslag van CO₂-warmte tot gevolg. Een goed gekozen zomerstop in het WK-bedrijf heeft het gewenste effect op de CO₂-warmteopslag met een beperking van het aantal draaiuren van minder dan 10%.

4.1.2 *Regeling*

De regeling van de warmteverdeling tussen de ketel- en warmtekrachtinstallatie is als volgt. Beide leveren warmte aan het primaire net. Daarnaast leveren en onttrekken ze warmte aan de buffer, afhankelijk van de CO₂ vraag. De warmtelevering kijkt eerst naar de CO₂ vraag die door de ketel gegenereerd dient te worden. Is er dan nog te weinig warmte dan gaat eerst de WK-installatie aan. Zonder CO₂ vraag ligt de prioriteit op het leegtrekken van de buffer. Pas als dat gebeurd is komt de WK eenheid aan de beurt. In beide gevallen krijgt de WK voorrang als er sprake is van een piekursituatie. Bij het aan/uitzetten van de WK installatie wordt rekening gehouden met het feit of dit wel of niet mag in verband met de schakelfrequentie of piekvoorvoorspelling.

De gevolgde regelstrategie is primair een integrale systeembenadering en gericht op het voorkomen van verspilling van energie. Dit betekent dat gestopt wordt met dosering van CO₂ indien de buffer vol is en warmtevraag ontbreekt. De geproduceerde hoeveelheid CO₂ warmte is afhankelijk van een aantal factoren. Allereerst wordt geprobeerd om het gewenste setpointniveau voor CO₂ te halen. Dit niveau wordt ontleend aan een maandtabel met uurlijkse setpoints. De dosering vindt alleen plaats bij een lichtniveau boven 30 W/m². In de maanden januari t/m mei wordt gestreefd naar een CO₂ niveau van 1000 ppm, 500 ppm in de maanden juni tot september, 340 ppm in oktober en een gemiddelde waarde van 812 ppm in december (ter simulatie van een stapsgewijs oplopende waarde). Indien zodanig geventileerd wordt (voor afvoer van overtollige warmte) dat het ventilatievoud in de kas groter is dan 5, wordt echter overgeschakeld naar een niveau van 340 ppm, overeenkomend met het buitenluchtniveau. De overige kenmerken en invoergegevens van het kasmodel zijn als volgt gekozen:

- Minimum buisverwarming alleen met het conventionele verwarmingsnet plus ketel (primair circuit). Geen minimumbuisverwarming bij kastemperaturen boven 23°C of bij maximale raamstand.

² Minimumbuis (-temperatuur): minimumtemperatuur van de buizen van het verwarmingssysteem om een zekere mate van luchtbeweging in de kas te veroorzaken/in stand te houden. Deze luchtbeweging stimuleert verdamping van het gewas.

- Keuze van stooktemperaturen³, ventilatietemperaturen⁴ en minimumbuistemperaturen zijn per maand vastgelegd. Dit geldt ook voor de stralingsafhankelijke lichtcorrectie⁵ op deze temperaturen.
- Droogstoken⁶ geschiedt als de ventilatietemperatuur onder de stooktemperatuur ligt, mits de buitenluchttemperatuur boven het vriespunt ligt en niet in de maanden december en januari. Het droogstoken is hierdoor mede afhankelijk van de zonnestraling. Zo kan vooral bij de overgang van dag- naar nachttemperaturen en andersom, mede afhankelijk van de zonnestraling, de stooktemperatuur onder de ventilatietemperatuur komen te liggen.

4.1.3 Opslag

Het model is voorzien van het TNO-opslagmodel, dat in meer uitgebreide vorm in gebruik is voor zonne-energietoepassingen. Door de manier van warmteopslag en –onttrekking kan in het vat een temperatuurgelaagdheid optreden. Deze temperatuurgelaagdheid wordt in model gebracht door het vat op te delen in segmenten van gelijk volume en uniforme temperatuur. Per segment wordt de warmtebalans berekend via de massastromen toe- en afgevoerde warmte, de geleidingsverliezen tussen de segmenten onderling en de warmteverliezen naar de omgeving. Hierbij worden alle warmtecapaciteiten e.d. in rekening gebracht. Het aantal lagen dat gemodelleerd wordt is afhankelijk van de grootte van de buffer en de debieten in het CV-systeem, om de mate van gelaagdheid in alle situaties vergelijkbaar te houden.

Variatie van de buffergrootte wees in eerder onderzoek [A] uit dat deze slechts een beperkte invloed heeft op het aantal draaiuren van de WK-eenheid. Wel is het volume van de opslag belangrijk voor CO₂-warmteopslag.

4.2 Modelleringen

Voor verschillende opslaggrootten wordt de gasbesparing bepaald. Om te beginnen wordt de invloed van de smelttemperatuur van het PCM op het gasgebruik onderzocht.

4.2.1 De invloed van de smelttemperatuur

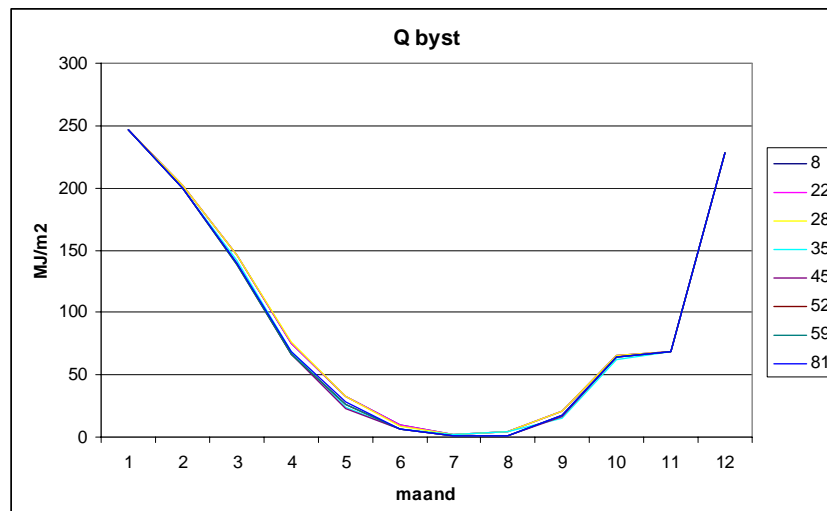
Voor acht verschillende PCM's wordt dezelfde installatie gemodelleerd. Figuur 4.1 geeft het verloop van de benodigde bijstook over het jaar.

³ Kasluchttemperatuur tot waar men verwarmt.

⁴ Kasluchttemperatuur vanaf het punt dat men gaat ventileren (ramen open).

⁵ Verhoging resp. verlaging van bijvoorbeeld stook-, ventilatie- of minimumbuistemperatuur als functie van de globale zonnestraling.

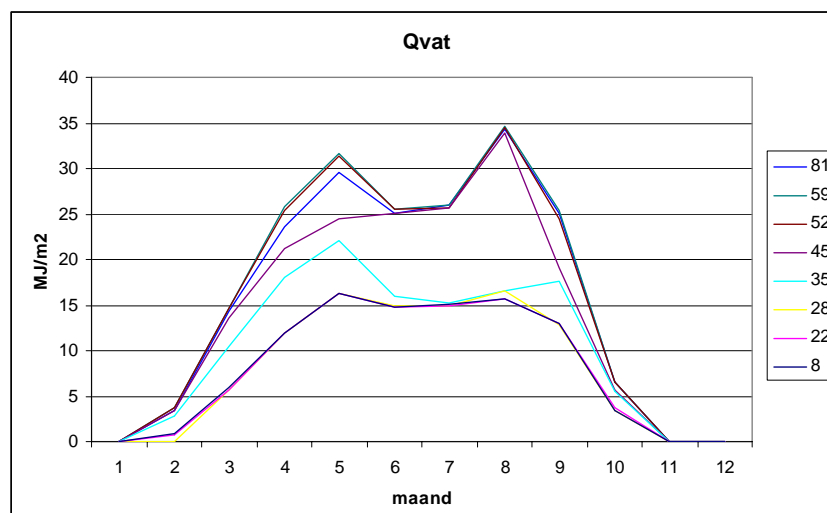
⁶ Tijdens het opstoken van nacht- naar dagniveau beginnen de planten te verdampen waardoor de absolute vochtigheid stijgt. Zwaardere plantdelen stijgen langzamer in temperatuur waardoor het gevaar van condensatie op die plantdelen toeneemt. Om dit te vermijden wordt een gedeelte van de aanwezige luchtinhoud ververst, terwijl de kastemperatuur op niveau wordt gehouden. Men verlaagt op deze manier dus de absolute vochtigheid.



Figuur 4.1 Het verloop van de hoeveelheid bijstookenergie over het jaar voor verschillende waarden van de smelttemperatuur van het PCM.

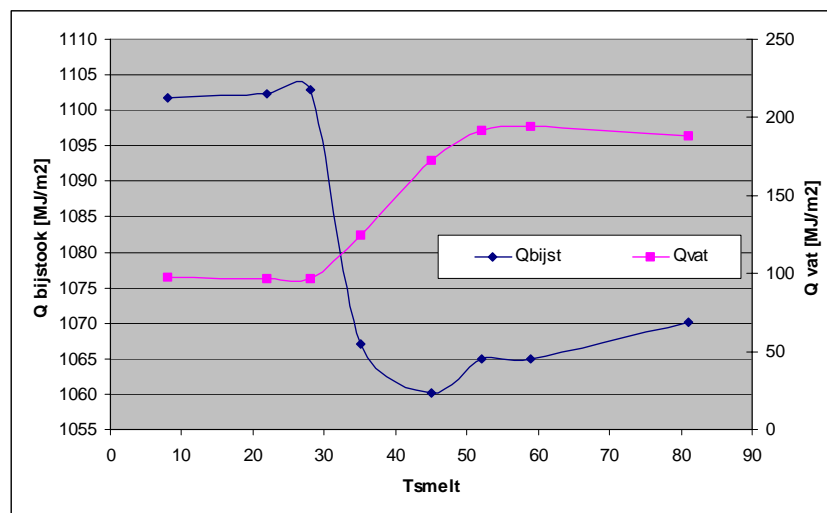
Het blijkt dat de smelttemperatuur van het PCM vooral in het voorjaar van belang is voor de hoeveelheid benodigde bijstook. Het beste scoren de PCM's met een smelttemperatuur tussen de 35 en 52°C. De onderlinge verschillen zijn echter niet zo groot: in totaal ongeveer 40 MJ/m²/jaar, hetgeen overeenkomt met een gashoeveelheid van 1m³ per m² kasoppervlakte.

In figuur 4.2 staat voor dezelfde acht modelleringen het verloop weergegeven van de energiebijdrage uit het (PCM) opslagvat.



Figuur 4.2 Het verloop van de energiebijdrage uit de PCM opslag over het jaar, voor verschillende waarden van de smelttemperatuur van het PCM.

De bijdrage uit het PCM neemt voor hogere smelttemperatuur toe, maar loopt vanwege de warmtevraag op een gegeven moment tegen een maximum aan. Hoe dan ook is de bijdrage in het voor- en najaar het grootst. Figuur 4.3 tenslotte geeft voor de verschillende smelttemperaturen van het PCM de jaartotalen voor de bijstook en de vatbijdrage.



Figuur 4.3 Vatbijdrage en bijstookhoeveelheid als functie van de smeltemperatuur van het PCM.

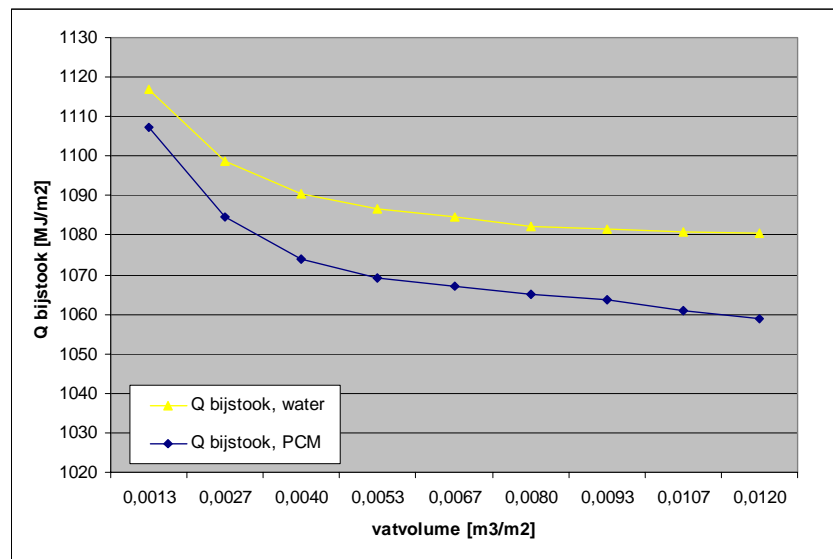
De gunstigste smeltemperatuur ligt ongeveer rond de 45°C, daar is de bijstook het kleinst en de vatbijdrage het grootst. De verschillen zijn echter niet erg groot. Het gasverbruik neemt af met toenemende smeltemperatuur van het PCM; de waarden zijn als volgt:

T smelt	m ³ gas /m ²
8	65,8
22	65,8
28	65,8
35	65,2
45	64,7
52	64,3
59	64,2
81	64,1

4.2.2 De invloed van de opslag grootte

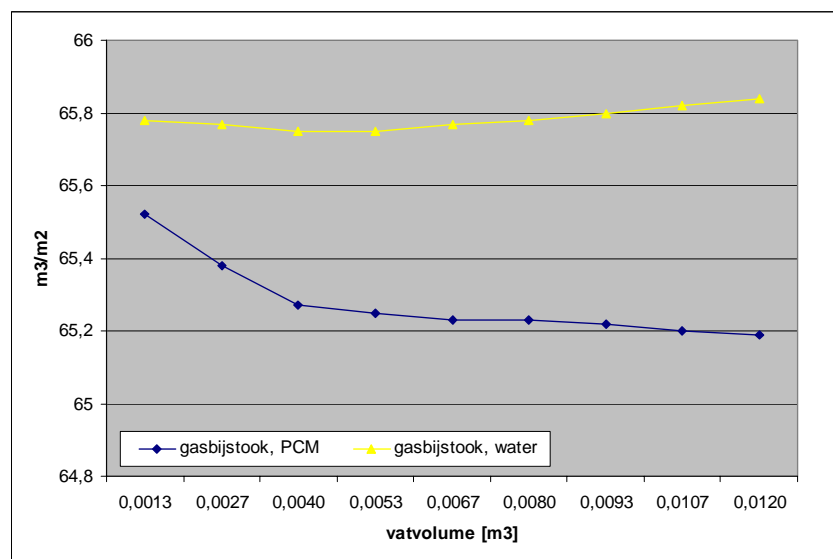
De tweede set berekeningen die is uitgevoerd betreft de invloed van het volume van de PCM opslag, en is uitgevoerd voor één type PCM, waarbij de opslag grootte is gevarieerd tussen de 0,0013 en 0,0120 m³/m² kasoppervlakte. Figuur 4.4 geeft de benodigde hoeveelheid bijstook voor variabele opslaginhoud (de blauwe lijn).

De benodigde bijstook neemt af met toenemend opslagvolume. De optimale opslag grootte ligt voor PCM tussen 0,0027 en 0,0040 m³/m². Het energetisch voordeel neemt daarna bij vergroting van de opslag snel af. Het energetische voordeel van PCM ten opzichte van water bedraagt maximaal 20 MJ/m² kasoppervlakte.



Figuur 4.4 Systeemeigenschappen bij verschillende opslaggrootten.

In figuur 4.4 is tevens voor water weergegeven hoe de hoeveelheid bijstook varieert met het opslagvolume (de gele lijn). Bij de optimale grootte van de PCM opslag is inderdaad een dubbel zo groot opslagvolume aan water nodig. In figuur 4.5 staat voor beide situaties het gasverbruik weergegeven voor variërende opslaggrootte.



Figuur 4.5 Aardgasverbruik voor de kas.

Bij inzet van PCM ligt de aardgasbesparing per eenheid opslagvolume op 0,5 - 0,6 m³/m².

4.3 Conclusie

Het beste scoren de PCM's met een smelttemperatuur tussen de 35 en 52°C. De onderlinge verschillen zijn echter niet groot: ongeveer 20 MJ/m²/jaar, hetgeen overeenkomt met een verschil in gasverbruik van hooguit 0,5 m³ per m² kasoppervlakte. De gunstig-

ste smelttemperatuur ligt ongeveer rond de 45°C; daar is de bijstook het kleinst en de vatbijdrage het grootst.

De bijdrage uit het PCM aan de kasverwarming neemt voor PCM's met een hogere smelttemperatuur toe, maar loopt op een gegeven moment tegen een maximum aan. De bijdrage is in het voor- en najaar het grootst.

De benodigde bijstook neemt af met toenemend opslagvolume. De optimale opslag-grootte ligt voor PCM tussen 0,0027 en 0,0040 m³/m². Het extra energetisch voordeel neemt daarna bij vergroting van de opslag voor de bekeken toepassing, tomatenteelt, snel af. Vooral lijkt het van belang een regelstrategie toe te passen die veel van de buffer gebruik maakt.

5 Economisch perspectief

Het economisch perspectief van warmteopslag in PCM volgt in principe uit de voorgaande berekeningen. Hoe lang het duurt voor je het PCM hebt terugverdiend is te berekenen uit de gasbesparing per m^2 kasoppervlakte.

De prijs van zouthydraat PCM capsules met grote diameter is ruwweg te stellen op € 2 per kilo. Uitgaande van een benodigd opslagvolume van $0,0034 m^3/m^2$, en een soortelijke massa voor PCM van $0,82 kg/l$, verkrijgen we een hoeveelheid van $2,75 kg$ PCM per m^2 kasoppervlakte, hetgeen zo'n €5,50 zou kosten.

Eenzelfde opslagcapaciteit in water kost € $1,32 / m^3$ en derhalve € $0,0044$ per m^2 kasoppervlakte; een verwaarloosbaar bedrag t.o.v. PCM. De energiewinst bij toepassing van PCM's in plaats van water bedraagt ongeveer $0,5 m^3$ aardgas per m^2 per jaar, hetgeen overeenkomt met zo'n € $0,10$ per m^2 . Om een terugverdientijd van minder dan 5 jaar te bereiken zou de gasbesparing door toepassing van het PCM minimaal $5,5 m^3$ per m^2 moeten zijn of de prijs van PCM moeten dalen naar € $0,038 / kg$.

De toepassing van bulkfabricage PCM microcapsules (BASF) kan de kosten voor een belangrijk deel drukken. Het probleem is dat de kostprijs van deze microcapsules (nog) niet bekend is. Op het moment dat deze microcapsules op de markt verkrijgbaar worden, zijn dit in feite de PCM's die aan de gestelde eisen voldoen (veilig, verpompbaar, goede warmtecapaciteit, etc), mits ze uiteraard verkrijgbaar zijn met het gewenste fase-transitietemperatuur. Alleen de te bereiken volumebesparing is beperkt.

Bij grootschalige toepassing van PCM kan de prijs vanzelfsprekend omlaag. Gezien dat de totale oppervlakte aan tuinbouwkassen in Nederland zo'n $10.500 ha$ ($105 km^2$) bedraagt, is een grove indicatie voor benodigde opslagcapaciteit $105 * 1000 * 1000 * 2,75 = 288.750$ ton PCM materiaal.

Voor de economische evaluatie is het wenselijk dat onderscheid wordt gemaakt tussen het effect van de inzet van PCM's op pieken in de vraag en de besparing op de commodity gas. De PCM opslag kan weliswaar een deel van de energie basislast dekken, maar zal, getuige de modelleringen, niet vanzelfsprekend een piekvraag van gas in de winter afvlakken. In die situatie zal toch veel hoogwaardige (ketel- of WK-)warmte nodig zijn en is de genoemde € $0,10 / m^3$ een te hoge prijs.

Een mogelijkheid met name voor het terugdringen van de piekvraag van warmte kan liggen in het transport van warmte. Naast introductie van warmte van elders kan dit ook door het clusteren van warmtebuffers, waarbij warmte tussen bedrijven wordt getransporteerd. Hierbij worden voorwaarden gesteld aan de verschillende teelten in verband met gelijktijdigheid van de warmtevraag.

In het verleden is gerapporteerd over materialen die na een bepaald aantal cycli verouderingsverschijnselen gaan vertonen [C], waardoor het opladen en onttrekken allengs moeizamer verloopt en de effectiviteit van de opslag vermindert. Voor gebruik van deze toepassing zal dit verschijnsel idealiter niet mogen optreden of is tenminste een garantie van de leverancier noodzakelijk, dat een minimum aantal cycli wordt behaald zodat toepassing economisch rendabel is.

6 Conclusies

In dit onderzoek is bekeken of warmteopslag in PCM, afgezien van de precieze uitvoering, interessant is voor toepassing in de glastuinbouw. Met het TNO kasmodel is bekeken wat de energetische mogelijkheden zijn. Daaruit is het economisch perspectief bepaald en tevens zijn de milieu-implicaties meegenomen.

6.1 Conclusies

De grootste opslagcapaciteit per volume-eenheid wordt gehaald door zouthydraat PCM. Dat kan echter niet zoals paraffine PCM worden toegepast in microcapsules.

De totale milieu-impact voor de grondstoffeninput en productie van paraffine microcapsules is groter dan van de zouthydraat STL capsules. De grootte van de microcapsules van paraffine PCM's blijkt echter een grote rol te spelen, optimalisatie van deze capsulegrootte in het productieproces lijkt daarom nuttig.

De bijdrage uit het PCM aan de kasverwarming neemt voor hogere smeltemperatuur toe, maar loopt op een gegeven moment tegen een maximum aan. De bijdrage is in het voor- en najaar het grootst.

Het beste scoren PCM's met een smeltemperatuur tussen de 35 en 52°C. De onderlinge verschillen zijn echter niet groot: ongeveer 20 MJ/m²/jaar, hetgeen overeenkomt met een verschil in gasverbruik van hooguit 0,5 m³ per m² kasoppervlakte. De gunstigste smeltemperatuur ligt ongeveer rond de 45°C; daar is het totale gasverbruik het kleinst.

De benodigde gasbijstook neemt af met toenemend opslagvolume. De optimale opslag-grootte ligt voor (zouthydraat) PCM tussen 0,0027 en 0,0040 m³ per m². Het extra energetisch voordeel neemt daarna bij vergroting van de opslag snel af.

Om een terugverdientijd van minder dan vijf jaar te bereiken zou de gasbesparing door toepassing van het zouthydraat PCM minimaal 5,5 m³ per m² kasoppervlakte moeten zijn (deze bedraagt echter slechts 1 m³ per m²). Een besparing van 5,5 m³/m² door een grotere buffercapaciteit is echter niet reeel, omdat een buffer in principe geen energie bespaart maar vooral helpt het op een andere moment dan het moment van de vraag op te wekken. Alternatief is dat de prijs fors daalt. Een indicatie van de gewenste kostenverlaging voor zouthydraat PCM om een terugverdientijd van minder dan 5 jaar mogelijk te maken, is een factor 50.

6.2 Aanbevelingen

Op korte termijn zijn er de volgende mogelijkheden voor vervolgonderzoek:

- Optimalisatie van de regeling, zodat veel van de buffer gebruik wordt gemaakt
- Dimensionering van de warmtecapaciteiten

Op korte termijn kan gedacht worden aan het optimaliseren van de uitvoeringsvorm van de buffer met betrekking tot de weglengte en warmteoverdracht, op zodanige wijze dat de bolletjes als opslagmiddel overbodig worden. Dit zal de kosten voor het PCM reduceren tot de fabricageprijs, de kosten voor de buffer zullen echter stijgen. De verwachting is verder dat deze oplossing op iets langere termijn qua bulkfabricageprijs en gebruiksgemak zal worden voorbijgestreefd door de microcapsule oplossing.

Optimalisatie is van belang om de economische haalbaarheid te vergroten. Denk aan de instelling van de klimaatcomputer, die de buffer nu volledig leegtrekt en vult, waardoor er in de buffer een groot temperatuurbereik ontstaat. Dit is voor de toepassing van PCM's minder voordelig vanwege het beperkte transitiegebied; hier wil je een smaller temperatuurbereik bij een lagere temperatuur. Uit de dimensionering van de warmteopslag met PCM's ten opzichte van ene wateropslag vallen mogelijk kostenvoordelen te halen.

Voor de langere termijn zijn er de volgende mogelijkheden:

- Oplossen van de (kern)vraag hoe je bij kleine(re) ΔT 's warmteoverdracht realiseert van vloeistof naar (kas)lucht en hoe je bij lage temperatuur warmte onttrekt om te koelen. Wat is daarbij aan lage temperatuurbuffer nodig? Bij welke transitietemperatuur? Een mogelijk probleem hierbij is schimmelvorming op de warmtewisselaar.
- Prijsverlaging van PCM's of het beantwoorden van de vraag hoe je PCM's (onconventioneel) zou kunnen toepassen waardoor het prijsniveau geen belemmering vormt. Een combinatie van PCM's en luchtwarmtewisseling zou het ei van Columbus vormen.
- Van thermochemische opslag, dat een mogelijk tot 10 maal zo compacte warmteopslag kan bieden als water en waardoor energie zonder verlies te transporteren valt zodat deze elders gebruikt kan worden, zijn ondermeer de milieu-implicaties nog onbekend.

7 Referenties

- [A] *Optimale integratie van WK-systemen in bestaande verwarmingssystemen met warmtebuffers in de glastuinbouw*, H. Oversloot e.a., TNO Bouw rapport B-92-1048, 1992
- [B] *Phase change materials for space heating and cooling*, Dr. F. Bruno, University of South Australia, Sustainable Eenergy Centre, 2002
- [C] *An experimental study of thermal characteristics of phase change materials for effective utilization of urban waste heat*, K. Nagano et al, IEA annex 17 workshop Tokyo, 1-2 October 2002
- [D] *Microencapsulated Phase Change Material*, E. Jahns, Ludwigshafen, BASF AG, 2003
- [E] <http://www.teappcm.com/encapsulation.html>
- [F] Ecoinvent LCA database (<http://www.ecoinvent.ch>)
- [G] <http://www.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/latentwaermesp/latentwaermespeicher.ppt>
- [H] *Energy storage in phase change materials for solar applications*, E. van Galen en G.J. van den Brink, International Journal of Ambient Energy (7)1, 1986
- [I] *New building material with microencapsulated paraffin*, H.M. Henning, Fraunhofer ISE, Freiburg, 2001, http://www.tecnologix.com/en/news/dycnt/content_0154.html
- [J] *Techno-economic feasibility of high-temperature high-lift chemical heat pumps for upgrading industrial heat*, Spoelstra, S., Haije, W.G. en Dijkstra, J.W., ECN-rapport ECN-RX-02-031, Petten, 2002
- [K] *Energie in de glastuinbouw van Nederland; ontwikkelingen in de sector en op de bedrijven t/m 2001*, A. van der Knijff e.a., LEI-Rapportnr. 3.02.05, Den Haag, 2002
- [L] *Phase Change Energy Storage for Solar Heating Systems*, K. Kaygusuz, Energy Sources, vol.25, 2003

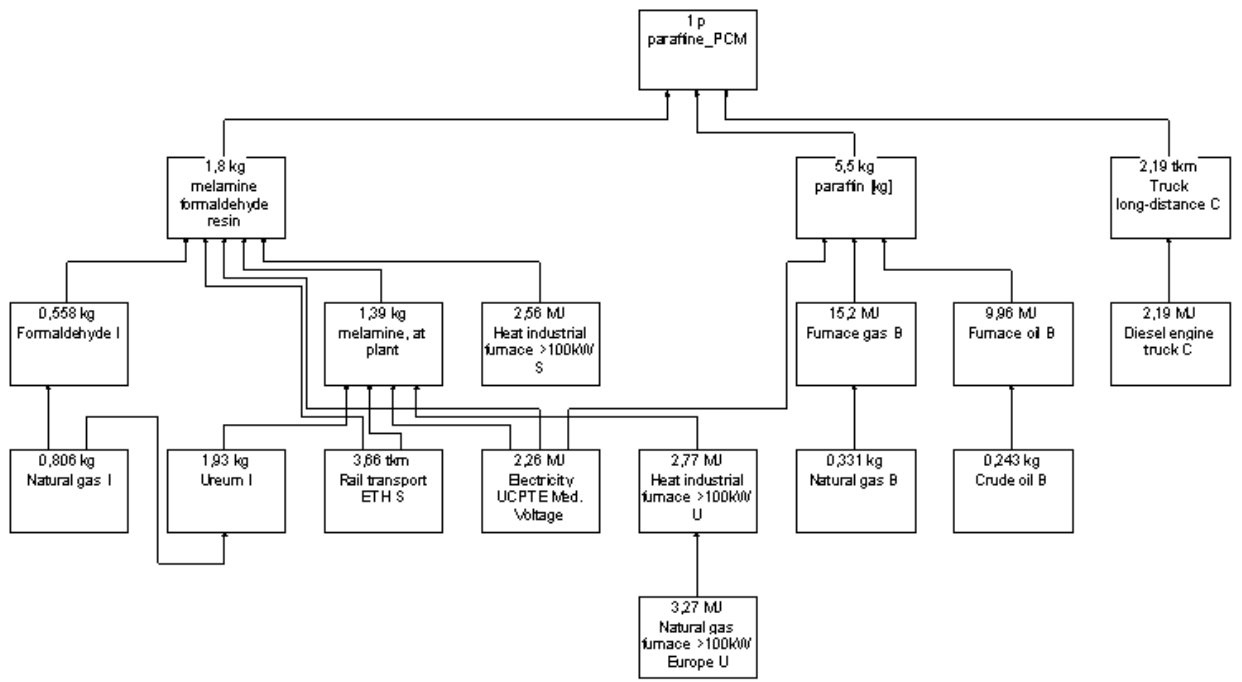
8 Bijlagen

A PCM gegevens

PCM name	type	T _{smelt} °C	T _{max} °C	H kJ/kg	H °C	H kJ/l	solid		liq.		liq.		Source	URL
							density kg/l	°C	density kg/l	°C	Cp kJ/kgK	Cp kJ/kgK		
E117		117		169		245	1,45						EPS Ltd	
RUBITHERM® RT 100	latent heat paraffin	99		168	91/106	158	0,94	15	0,77	130	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® RT 90	latent heat paraffin	90		194	82/97	180	0,93	15	0,77	100	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
E89		89		163		253	1,55						EPS Ltd	
TH89	Salthydrate	89		149		229	1,54						TEAP	www.teappcm.com
RUBITHERM® RT 80	latent heat paraffin	81		175	71/86	161	0,92	15	0,77	100	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
Rubitherm PK 80 A6	latent heat compound	81	100	149		134	0,90	20			2,0		RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® GR 80	latent heat granulate	81	110	70	71/86	53	0,75	15			1,5		RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® FB 80	latent heat fibre board	79		132	71/86	99	0,75	15					RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® PX 80	latent heat powder	77		91	70/85	58	0,64	15					RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
PCM72	Eutektikum	72		0		290	0						Merck KGaA	
ClimSel C 70		70	85	280,8	50/85		1,7						Climator	www.climator.com
RUBITHERM® RT 65	latent heat paraffin	64		173	56/71	157	0,91	15	0,79	70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® RT 58	latent heat paraffin	59		181		163	0,90	15	0,78	70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
ClimSel C 58		58	80	255,6	45/75		1,46						Climator	www.climator.com
E58		58		226		289	1,28						EPS Ltd	
TH58	Salthydrate	58		226		291	1,29						TEAP	www.teappcm.com
STL55 (Sodiumacetatetrihydrate)	Salthydrate	55		242		312	1,29						Mitsubishi Chemical	
??? (Mitsubishi license)	Salthydrate	55		242		312	1,29						Cristopia	
RUBITHERM® FB 54	latent heat fibre board	55		135	46/61	101	0,75	15					RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® RT 54	latent heat paraffin	55		179	46/61	161	0,90	15	0,77	70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® PX 52	latent heat powder	52	80	105	45/60	66	0,64				1,6		RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® RT 52	latent heat paraffin	52		167		66	0,90	15	0,77	70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
STL52 (Sodiumacetatetrihydrate)	Salthydrate	52		201		261	1,3						Mitsubishi Chemical	
E48		48		201		336	1,67						EPS Ltd	
ClimSel C 48		48	80	226,8	35/65		1,36						Climator	www.climator.com
eut.)	Salthydrate	47		221		297	1,34						Mitsubishi Chemical	
??? (Mitsubishi license)	Salthydrate	47		221		297	1,34						Cristopia	
RUBITHERM® GR 41	latent heat granulate	45	70	64	35/50	48	0,75	15			1,5		RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® RT 41	latent heat paraffin	45		155	35/50	136	0,88	15	0,76	70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® PX 41	latent heat powder	45	70	98	35/50	63	0,64	15			1,6		RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® RT 42	latent heat paraffin	43		174	36/51	153	0,88	15	0,76	70			RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® FB 41	latent heat fibre board	43		117	35/50	88	0,75	15					RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® RT 36	latent heat paraffin	36		159	27/42	140	0,88	15	0,76	70			RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® RT 35	latent heat paraffin	35		157	27/42	138	0,88	15	0,76	70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
ClimSel C 32	salthydrate	32	60	194,4	20/40		1,45						Climator	www.climator.com
E32		32		186		272	1,46						EPS Ltd	
RUBITHERM® RT 31	latent heat paraffin	31		169	23/38	147	0,87	15	0,76	70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
E30		30		201		262	1,3						EPS Ltd	
TH29	salthydrate	29		188		290	1,54						TEAP	www.teappcm.com
RUBITHERM® RT 27	latent heat paraffin	28		179	19/34	156	0,87	15	0,75	70			RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® GR 27	latent heat granulate	28	50	72	19/34	54	0,75	15					RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
RUBITHERM® PX 27	latent heat powder	28	50	112	19/34	72	0,64	15			1,6		RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
A28		28		245		193	0,79						EPS Ltd	
RUBITHERM® RT 27	latent heat paraffin	28		179	15/30	156	0,87	15	0,75	70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
Climsel C28		28	60	126	18/38									
S27	Salthydrate	27		207		304	1,47						Cristopia	
hexahydrate)	Salthydrate	27		213		232	1,09						Mitsubishi Chemical	
Rubitherm SP 25 A8	latent heat blend	26		180		248	1,38	-15			2,5			
Rubitherm Sp 22 A4	latent heat blend	24		165		228	1,38	-15			2,5			
ClimSel C 24	salthydrate	24	60	129,6	14/34		1,48						Climator	www.climator.com
A22		22		220		171	0,775						EPS Ltd	
RUBITHERM® RT 20	latent heat paraffin	22		172	11/26	150	0,87	15	0,75	70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
E21		21		150		222	1,48						EPS Ltd	
Climsel C21		21	40	50	11tot31									
		20											TEAP	
ClimSel C 15		15		130		0	0						Climator	www.climator.com
E13		13		140		245	1,78						EPS Ltd	
??? (Mitsubishi license)		13		0		0	0						Cristopia	
E10		10		140		213	1,52						EPS Ltd	
??? (Mitsubishi license)		9		0		0	0						Cristopia	
RUBITHERM® RT 6	latent heat paraffin	8		174	-3/12	150	0,86	-15	0,75	15/70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
E8		8		140		206	1,47						EPS Ltd	
A8		8		220		170	0,77						EPS Ltd	
RUBITHERM® RT 5	latent heat paraffin	7		156	-5/10	134	0,86	-15	0,75	15/70	1,8	2,4	RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
E7		7		120		185	1,54						EPS Ltd	

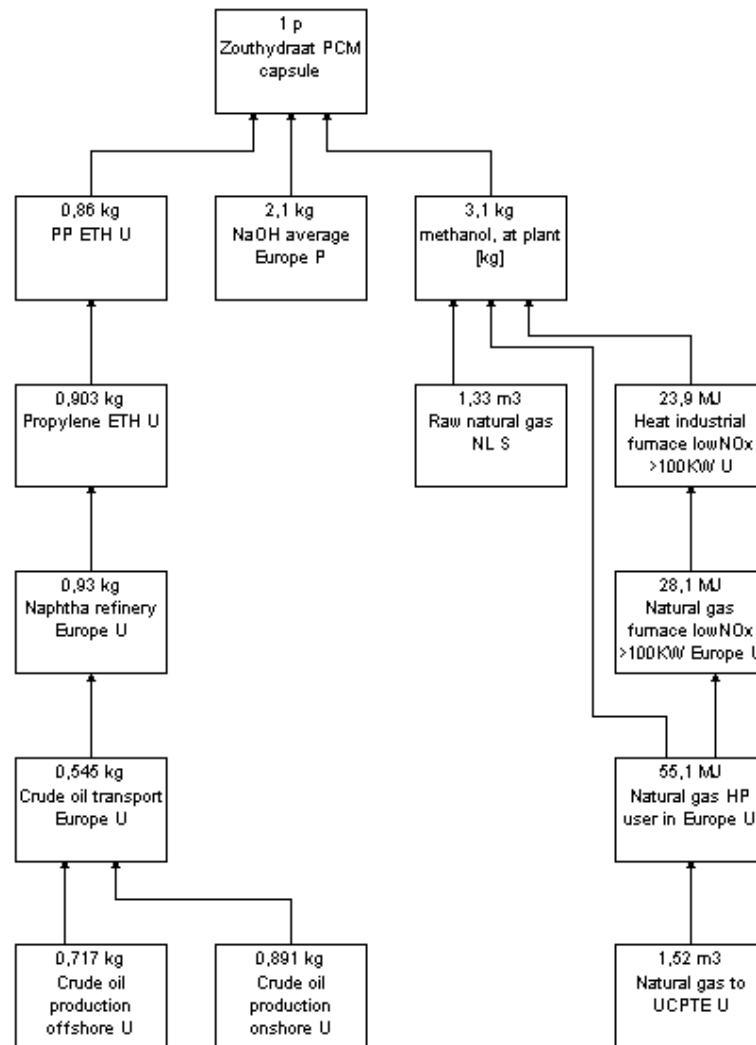
ClimSel C 7		7	40	54	11tot31		1,42						Climator	www.climator.com
TH 7		7		189									TEAP	www.teappcm.com
RUBITHERM® RT -2	latent heat paraffin	6		214	-10/5	184	0,86	-15	0,75	15/70			RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
A4		4		227		174	0,766						EPS Ltd	
TH 0		0		334									TEAP	www.teappcm.com
RUBITHERM® RT -7	latent heat paraffin	-3		165	-15/0	142	0,86	-15	0,75	15/70			RUBITHERM GmbH	www.rubitherm.com
SN03	Saltsolution	-3		328		331	1,01						Cristopia	
STL-3 (sodiumcarbonate sol)	Saltsolution	-3		328		331	1,01						Mitsubishi Chemical	
TH-4		-4		286									TEAP	www.teappcm.com
SN06	Saltsolution	-6		284		304	1,07						Cristopia	
sol)	Saltsolution	-6		284		304	1,07						Mitsubishi Chemical	
TH-10		-10		283									TEAP	www.teappcm.com
SN10	Saltsolution	-11		310		341	1,11						Cristopia	
solution)	Saltsolution	-11		271		284	1,05						Mitsubishi Chemical	
SN12	Saltsolution	-12		306		324	1,06						Cristopia	
SN15	Saltsolution	-15		311		317	1,02						Cristopia	
solution)	Saltsolution	-16		0		0	0						Mitsubishi Chemical	
TH-16		-16		289									TEAP	www.teappcm.com
SN18	Saltsolution	-18		268		324	1,21						Cristopia	
STL-21 (sodiumchloride solution)	Saltsolution	-21		240		269	1,12						Mitsubishi Chemical	
SN21	Saltsolution	-21		240		269	1,12						Cristopia	
TH-21		-21		222									TEAP	www.teappcm.com
SN26	Saltsolution	-26		268		324	1,21						Cristopia	
SN29	Saltsolution	-29		233		268	1,15						Cristopia	
TH-31		-31		131									TEAP	www.teappcm.com
SN33	Saltsolution	-33		245		304	1,24						Cristopia	

B LCA van PCM



Figuur B.1 Networkview van de hoofdbestanddelen van de LCA-invoer voor de paraffine microcapsule. De waarden gelden voor een capsulediameter van 20 μm .

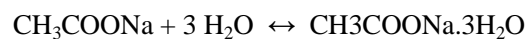
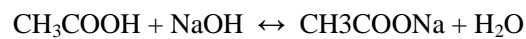
Voor een beschrijving van het chemische proces waarin paraffine microcapsules in-situ worden gevormd met de basisbestanddelen paraffine en kapselmaterialen uit aminohars wordt verwezen naar [D].



Figuur B.2 Networkview van de hoofdbestanddelen van de LCA-invoer voor de zouthydraat STL-capsule.

De basisreacties voor natriumacetaat trihydraat (STL) capsules zijn afgeleid uit [G]:

Productie:



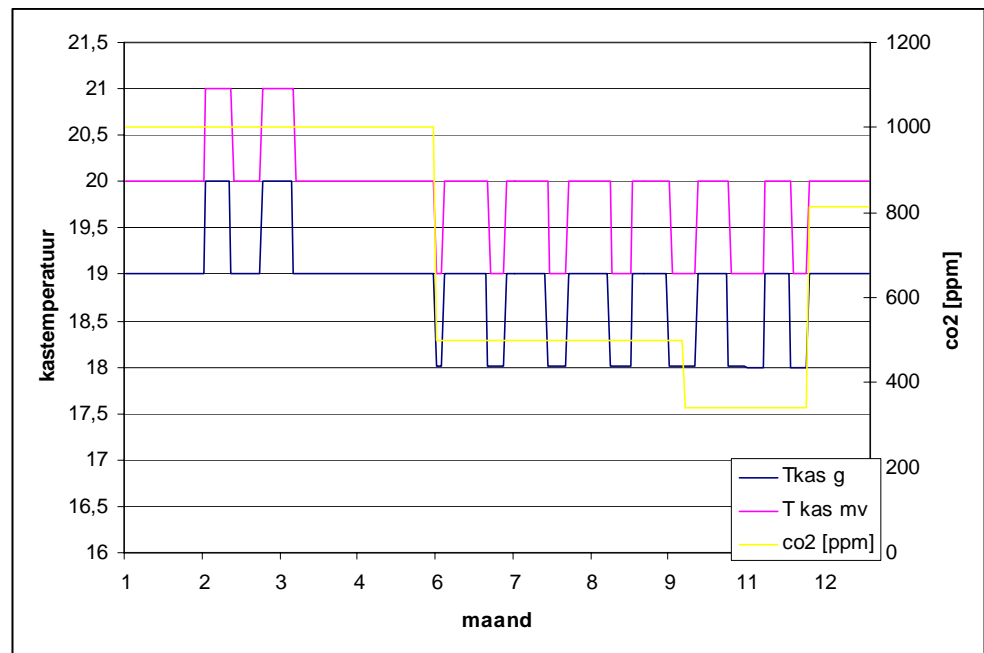
Laden van PCM:



Ontladen van PCM:



C Setpoints



Figuur C.1 Gebruikte setpoints in het kasmodel.