

24-uurs Opslag van het Warmteoverschot van een Zonnedak

Phase Change Materials als alternatief voor Water

Jeroen Wildschut

© 2017 Wageningen University & Research

Wageningen University & Research is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Dit project is uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door de partijen in de Stuurgroep Schone en Zuinige Bloembollen / Meerjarenafspraken energie Bloembollen (KAVB, min.EZ, RVO.nl en telers).



Projectnummer: 37 361 906 00

Wageningen University & Research

Bloembollen, Boomkwekerij & Fruit

Adres : Prof. Van Slogterenweg 2
: Postbus 85, 2160 AB Lisse
Tel. : 0252 - 462121
E-mail : info.ppo@wur.nl
Internet : www.wageningenur.nl/ppo

Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	5
1 INLEIDING	7
2 WERKWIJZE.....	7
3 RESULTATEN	9
3.1 Energieprestaties zonnedak.....	9
3.2 Warmteopslagsystemen	11
3.3 Opslag in PCM.....	13
3.4 Opslag in H ₂ O.....	15
3.5 Bedrijfseconomische haalbaarheid	16
4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	18

Samenvatting

Uit eerder praktijkonderzoek naar de energie-efficiëntie van zonnedaken in de bloembollensector bleek dat de met glas afgedekte zonnedaken de meeste thermische energie opleveren. Ook bleek dat het rendement nog verder toeneemt indien de warmte die overdag niet nuttig gebruikt kan worden, opgeslagen zou kunnen worden om s'nachts te gebruiken. Met deze haalbaarheidsstudie is nagegaan of dit op rendabele wijze mogelijk is. Aan de hand van een praktijksituatie en de warmtevraag van 5 bewaarcellen met een capaciteit van elk 160 m³ bollen (hyacinten en tulpen), zijn op basis van urengegevens van 1 juli t/m 29 oktober (instraling, temperatuur van de buitenlucht, celtemperaturen en ventilatiedebieten) de energieprestaties van het zonnedak doorgerekend:

Met een gemiddelde celtemperatuur van 27 °C en een ventilatiedebiet van 66 m³/uur per m³ bollen is technisch gezien een dakoppervlak van ± 800 m² dan optimaal. Van de totale warmtevraag wordt 31% door het zonnedak geleverd. Indien de warmteovermaat wordt opgeslagen voor gebruik s'nachts, dan is een dakoppervlak van 1200 m² optimaal. Dan wordt 63% van de warmtevraag geleverd.

Voor warmteopslag in Phase Change Material (PCM) ligt de optimale smelttemperatuur op 22 – 26 °C, iets onder de gemiddelde celtemperatuur (27 °C). Er kan dan in totaal tot 450.000 MJ gedurende het bewaarseizoen worden opgeslagen. Bij een bewaar temperatuur van 22 °C ligt de optimale smelttemperatuur op 20 °C. Het ventilatiedebiet heeft hier geen invloed op.

Gezien de beschouwde bedrijfssituatie is 25 – 45 m³ PCM met een latente warmtecapaciteit van 150 MJ/m³ (paraffine) optimaal om 300.000 – 400.000 MJ op te slaan. Dit is dagelijks gemiddeld 2500 – 3330 MJ (≈ 85 – 110 m³ gas).

Met een PCM met een latente warmtecapaciteit van 250 MJ/m³ (zouhydraat) is 15 – 27 m³ optimaal. Voor het zonnedak van 1200 m² betekent dit 13 tot 23 liter PCM/m² dak: een laagdikte van 1,3 tot 2,3 cm, hetgeen vermoedelijk eenvoudig in bestaande daken te integreren is.

Het optimale volume water om in totaal 300.000 – 400.000 MJ op te kunnen slaan hangt af van de grootte van de lucht-water warmtewisselaar en het temperatuurverschil tussen het zonnedak en het water (ΔT). Wordt alleen warmte uitgewisseld wanneer $\Delta T > 5$ °C, dan kan 400.000 MJ worden opgeslagen met een volume van 100 m³. Met een $\Delta T > 10$ °C is dat respectievelijk 350.000 MJ met 80 m³.

Worden voor een periode van 15 jaar de gemiddelde vermeden kosten van gas bij een gasprijs van €0,65 vergeleken met de kosten van warmteopslag in water, dan is opslag met een volume > 50 m³ bedrijfseconomisch rendabel, maar het rendement is klein (€1200,-/jaar).

Wordt bij vermeden gaskosten ook ingeschat dat de gasprijs de komende 15 jaar mogelijk flink zal stijgen door schaarste en/of energiebelasting, en door het doorrekenen van de kosten van CO₂-uitstoot, dan kan bovenstaande vergelijking b.v. gemaakt worden met een gasprijs van €2,-/m³: Opslag is dan rendabel in volumes > 20 m³, en het jaarlijkse rendement is dan ongeveer €17.000,-.

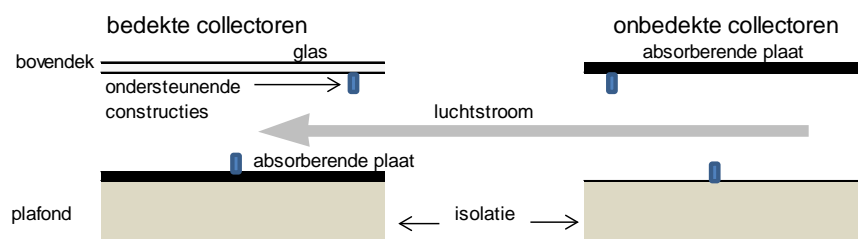
Warmteopslag in PCM (150 MJ/m³) is bij een gasprijs van € 0,65 en een PCM-prijs van €8000/m³ niet rendabel. Bij een gasprijs van €2,-/m³ is opslag rendabel tot 25 m³. Het rendement is echter heel laag. Warmteopslag in een PCM met een capaciteit van 250 MJ/m³ (zouhydraat) is rendabel tot een volume van 35m³. Het maximale rendement is dan €9000,-/jaar. Bij een PCM-prijs van €4000,- is opslag rendabel tot 40 m³, met een maximum rendement van €18.000/jaar.

Warmteopslag in PCM is technisch haalbaar en verhoogt de energieprestatie van een zonnedak. Hiermee wordt veel CO₂-uitstoot vermeden, hetgeen een hoge maatschappelijke waarde heeft. De kosten liggen nu hoog, maar m.b.v. subsidies zou een pilot-toepassing tot kostenverlaging kunnen leiden door ontwikkeling van efficiëntere installatie en inbouw.

Het is daarom aanbevolen een dergelijk gesubsidieerd pilotproject op te starten met bollenbedrijven en PCM-fabrikanten / -installateurs.

1 Inleiding

In de bloembollensector zijn de twee meest gangbare type zonnewarmtecollectoren (zonnedaken) de zogeheten bedekte en de onbedekte vlakke plaat zonnecollectoren voor opwarming van buitenlucht, schematisch voorgesteld door figuur 1.



Figuur 1: Schema zonnecollectoren voor opwarming van buitenlucht voor ventilatie

Onbedekte collectoren zijn het eenvoudigste type, waarbij de metalen of eternieten dakplaat als zonnestraling absorberende plaat fungeert. Deze door de zonnestraling opgewarmde collectorplaat verliest zijn warmte aan de ventilatielucht die er onderdoor stroomt door convectie, maar verliest deze in toenemende mate ook aan de buitenlucht naarmate er b.v. meer wind is. Het warmteverlies is evenredig met het temperatuurverschil tussen buitenlucht en collectorplaat. Daarnaast verliest de collectorplaat ook warmte door infrarode uitstraling.

De transparante plaat (glas of polycarbonaat) van de bedekte collectoren laat de zonnestraling door die vervolgens de collectorplaat opwarmt. De lucht stroomt er dan bovenlangs. Warmteverlies naar buiten toe is minder doordat de transparante plaat in vergelijking met de onbedekte plaat convectie beperkt, *en* omdat de glasplaat de infrarode uitstraling van de collectorplaat sterk beperkt (broeikaseffect). Plastics laten zonnestraling ook goed door, maar houden infrarode straling minder tegen dan glas.

Uit een analyse van de gegevens van 1 tot 3 jaar van 7 zonnedaken bleek dat de efficiëntie van deze techniek om Duurzame Energie op te wekken sterk kan worden verbeterd indien het teveel aan warmte van een zonnedak overdag opgeslagen zou kunnen worden voor het gebruik s' nachts. Het deel van de zonnewarmte dat nuttig gebruikt kan worden neemt dan toe van 30 – 40% naar 60 - 70%, zie het rapport "Benutting ZonneWarmte bij Drogen en Bewaren", PPO 2015. Opslag van warmte voor méér dan 24 uur (bv. 3 dagen) bleek niet veel meerwaarde op te leveren (gemiddeld 9 %).

Doel van deze haalbaarheidsstudie is daarom om na te gaan of met warmteopslag voor maximaal 24 uur op rendabele wijze het aandeel duurzame thermische energie op bloembollenbedrijven verhoogd kan worden. Bloembollenbedrijven kunnen dan beter inschatten of het bij nieuwbouw van een zonnedak rendabel is om ook voor een warmteopslagsysteem te kiezen en of dat ook aan bestaande zonnedaken een warmteopslagsysteem rendabel kan worden toegevoegd.

2 Werkwijze

Het rekenmodel dat eerder gebruikt is om het rendement van bovengenoemde zonnedaken in de praktijk te analyseren is aangepast en uitgebreid met de mogelijkheid om ook de energieprestatie van 24-uurswarmteopslag met verschillende opslagsystemen door te rekenen. Door middel van een literatuurstudie zijn gegevens verzameld over warmteopslagmethodes die op bollenbedrijven (en andere agrarische bedrijven) toegepast zouden kunnen worden.

Op basis van de praktijkgegevens (aantal bewaarcellen, hoeveelheid bewaarde bollen, hoeveelheid ventilatie met buitenlucht, celtemperaturen, etc. etc.) van één van de bedrijven uit bovengenoemd onderzoek met een zonnedak bedekt met glas (zie foto), zijn met het rekenmodel twee opslagsystemen met elkaar vergeleken: warmte opslag in water versus warmte opslag in Phase Change Materials (PCM).



Daarnaast zijn 3 bedrijven die warmteopslagsystemen ontwerpen/installeren benaderd voor informatie over o.a. de warmteopslagcapaciteit van hun systemen en de kosten daarvan.

3 Resultaten

3.1 Energieprestaties zonnedak

Op basis van de urengegevens van het praktijkbedrijf voor de bewaarperiode 1 juli t/m 29 oktober (120 dagen), zoals de instraling, de temperatuur van de buitenlucht, de celtemperatuur en het ventilatiedebiet is o.a. de totale warmtevraag berekend en welk deel daarvan door het zonnedak geleverd kan worden. De warmtevraag wordt bepaald door het temperatuursverschil tussen buitenlucht en de bewaarcellen *en* door het totale ventilatiedebiet. De warmteopbrengst van het zonnedak wordt bepaald door de grootte van het dak, en het gerealiseerde temperatuursverschil tussen het dak en de buitenlucht. Is de temperatuur van het dak hoger dan de buitenlucht, maar lager dan de vereiste celtemperatuur, dan moet bijverwarmd worden. Is het dak warmer, dan is er warmteoverschot en moet met buitenlucht worden bijgemengd. Dit warmteoverschot kan worden opgeslagen om s'nachts gebruikt te worden. Met het rekenmodel kan op basis van de warmtevraag, de nuttig gebruikte warmte van het zonnedak *en* de jaarlijkse kosten van het dak en besparingen op gas, de optimale grootte van het zonnedak berekend worden.

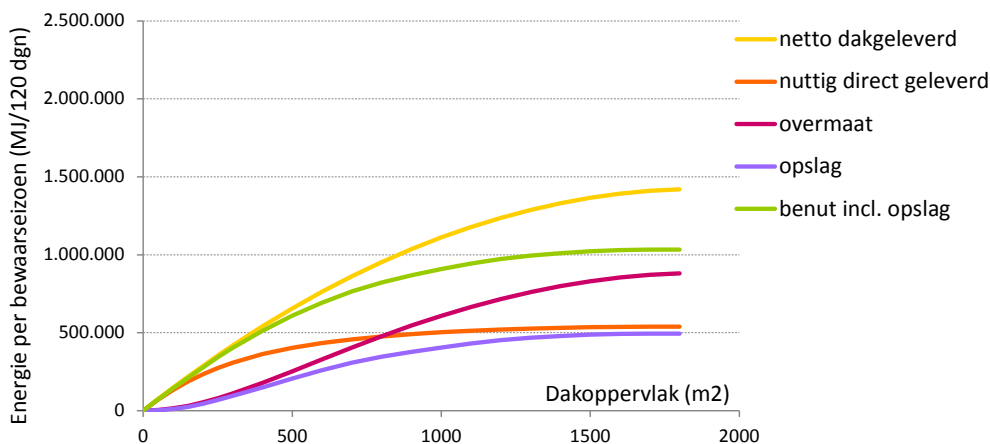
Er is uitgegaan van 5 bewaarcellen, elk met maximaal 160 m³ bollen (hyacint en tulpen) en een maximaal ventilatiedebiet van 300 m³/uur per m³ bollen (dat is bij een klepstand van 100%). De minimum, gemiddelde en maximum buitentemperatuur, de gemiddelde celtemperatuur, klepstand, het ventilatiedebiet en de resulterende gemiddelde dagelijkse warmtevraag zijn samengevat in tabel 1. De totale warmtevraag over de periode 1 juli t/m 29 oktober is hiermee ongeveer 1.580.000 MJ (\approx 52.000 m³ gas).

Tabel 1: Dagelijkse warmtevraag van de 5 bewaarcellen tijdens het bewaar seizoen.

	Temperatuur (°C)		Klepstand	Totaal debiet m ³ /uur/m ³ bollen	Warmtevraag MJ/dag
	buiten	cel			
Minimum	8,6	19,8	17%	51	4290
gemiddeld	16,7	27,0	22%	66	13238
maximum	29,2	38,6	94%	281	24384

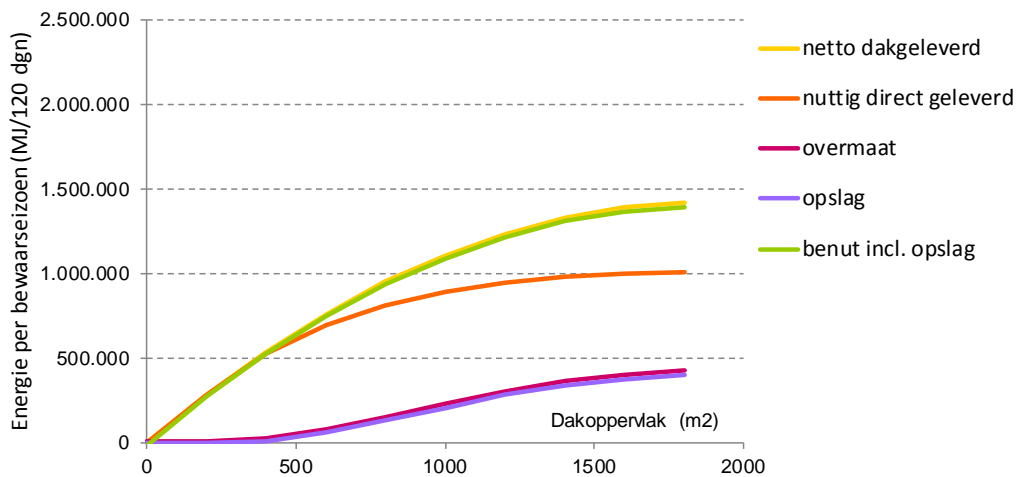
Bij deze warmtevraag zijn de energieprestaties van het zonnedak in figuur 2 samengevat als functie van het dakoppervlak. De totale warmte die tijdens het bewaar seizoen door het zonnedak netto geleverd wordt is het verschil tussen de totale instraling en de warmteverliezen van het dak naar buiten (door wind, temperatuursverschillen met de omgeving en infrarode uitstraling). Een dak van 200 m² levert vrijwel 2 maal zoveel energie aan de 5 cellen als een dak van 100 m². Maar wordt een dak groter, dan wordt door de 5 cellen per m² dak steeds minder energie aan het dak onttrokken (de warmtevraag van de cellen blijft immers gelijk, evenals het moment van de dag waarop de warmte geleverd wordt). Het gevolg is dat een groter dak, *per m²*, meer warmte verliest naar de omgeving en minder naar de 5 cellen. Een steeds groter dak levert daarom nauwelijks extra warmte.

Het teveel aan warmte op de momenten dat geleverd wordt (de overmaat) neemt dan ook toe (omdat de warmtevraag niet toeneemt) en het deel daarvan dat opgeslagen kan worden om nuttig in de nacht te gebruiken neemt aanvankelijk ook toe. Naarmate meer aan de dagelijkse warmtevraag voldaan wordt neemt de hoeveelheid direct nuttig geleverd energie *plus* de nuttig opgeslagen en in de nacht bruikbare energie steeds minder toe bij een groter dakoppervlak. Figuur 2 laat zien dat bij de warmtevraag van de 5 cellen, *zonder* warmteopslag, een dak groter dan 800 m² weinig zin meer heeft. Het dak benut dan ongeveer 475.000 MJ (\approx 16.000 m³ gas) en dat is bijna 40% van de totale zonnewarmte. *Met* 24-uurs warmteopslag zou bij deze warmtevraag het dak tot 1200 m² nog nuttig warmte leveren. Het dak benut dan ongeveer 975.000 MJ (\approx 32.500 m³ gas), een verdubbeling t.o.v. het dak van 800 m² zonder opslag, en nu bijna 55% van de totale zonnewarmte. Ten opzichte van de totale warmtevraag (1.580.000 MJ), is dat respectievelijk 31% en 63%.



Figuur 2: Energieprestaties zonnedak als functie van het oppervlak.

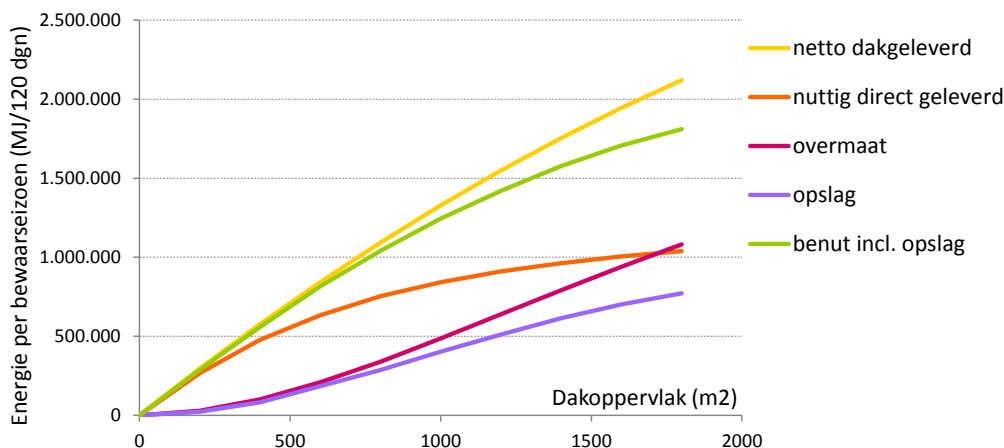
Als de vereiste celtemperatuur gedurende het bewaarperiode i.p.v. 27°C gemiddeld 38°C zou zijn, dan is de warmtevraag veel hoger: 3.347.000 MJ (\approx 112.000 m³ gas). Het zonnedak levert dan netto net zoveel warmte als wanneer de warmtevraag 1.580.000 MJ was, maar een groter deel kan nu overdag nuttig gebruikt worden. Bij een dakoppervlak tot ongeveer 500 m² wordt vrijwel alle netto geleverde warmte ook direct nuttig gebruikt, een groter dak levert overmaat, figuur 3. Wordt deze overmaat opgeslagen voor gebruik s'nachts, dan kan deze volledig nuttig gebruikt worden. Bij deze warmtevraag en instraling zou dit type zonnedak zonder 24-uursopslag niet groter dan ongeveer 1250 m² moeten zijn, en *met* warmteopslag niet groter dan 1600 m².



Figuur 3: Energieprestaties bij hogere warmtevraag door T_{cel} = 38°C.

Bij eenzelfde hogere warmtevraag van 3.347.000 MJ, maar nu *niet* veroorzaakt door een hogere vereiste celtemperatuur, maar door een veel hoger vereist ventilatiedebiet (bv. bij tulpen met 5% zuur) wordt door het zonnedak per m² netto meer warmte geleverd, figuur 4: het zonnedak verliest minder warmte aan de buitenlucht omdat er door het hogere debiet meer warmte aan het dak voor celventilatie onttrokken wordt. Omdat de warmtevraag hoger is (dan zoals in figuur 2) wordt er overdag ook meer nuttig direct geleverd, maar omdat ook de netto levering hoger is, neemt bij een toenemend dakoppervlak de warmteovermaat

ook toe. Bij een dak kleiner dan 700 m² kan als alle overmaat opgeslagen wordt, dit s'nachts gebruikt worden, maar bij een groter dak kan een deel van de overmaat s'nachts ook niet gebruikt worden. Zonder opslag zou in dit geval een zonnedak niet groter dan ongeveer 1600 m² moeten zijn, met opslag zou het tot 2200 m² nog nuttig warmte kunnen leveren.

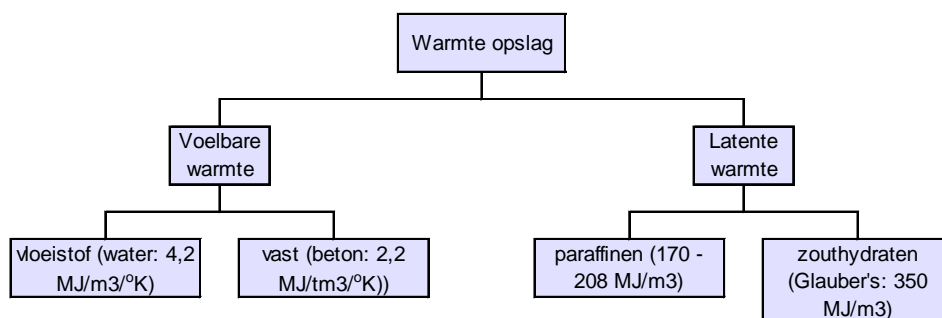


Figuur 4: Energieprestaties bij hogere warmtevraag door hoger debiet

Het optimale oppervlak van een zonnedak hangt dus af van de totale warmtevraag, *en* van de manier waarop deze vraag tot stand komt: een hogere vereiste celtemperatuur of een hoger vereist ventilatie-debiet. Dit heeft ook gevolgen voor de warmteopslagcapaciteit per m² zonnedak.

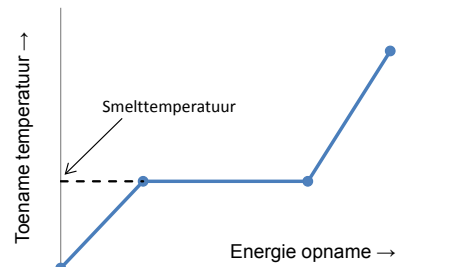
3.2 Warmteopslagsystemen

Schematisch kunnen de meest gangbare methoden van warmteopslag ingedeeld worden zoals in figuur 5. Voor warmteopslag voor de (zeer) korte termijn, maximaal 24 uur, zijn 2 systemen geschikt: opslag van voelbare warmte in water en opslag van latente warmte in zg. Phase Change Materials (PCM).



Figuur 5: Indeling meest gangbare soorten warmteopslag, plus voorbeelden met soortlijke - en smeltwarmte.

Het werkingsprincipe van warmteopslag in PCM is weergegeven in figuur 6 (naar Amy S. Fleischer, 2015, "Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials"). Bij faseverandering van i.d.g. van vast naar vloeibaar, smelten dus, wordt relatief zeer veel warmte opgenomen terwijl de temperatuur constant blijft. Pas wanneer alle PCM is gesmolten neemt bij verdere energieopname/toevoer de temperatuur toe. Daalt de omgevingstemperatuur weer onder de smelttemperatuur dan stolt het PCM waarbij de warmte weer vrij komt.



Figuur 6: Voelbare en latente warmte

Het volume en het gewicht van de warmteopslagmaterialen verschillen en de bijbehorende hoeveelheden warmte die opgeslagen kunnen worden verhouden zich grofweg zoals in tabel 2 (naar K. Kant et al, 2016). In verhouding is er voor warmteopslag in beton of water een veel groter gewicht en volume nodig dan voor opslag in PCM. Het gewicht van paraffine om 1 MJ op te slaan is iets (23%) hoger dan dat van zouthydraat, maar het volume is 2,5 keer zo groot.

Tabel 2: Volume en gewicht voor de opslag van 1 MJoule ($\Delta T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$)

	beton	H ₂ O	Paraffine	zouthydraat
Gewicht voor opslag van 1 MJ (kg)	73	16	5.3	4.3
verhouding t.o.v. zouthydraat	17	4	1.23	1
Volume voor opslag van 1 MJ (liter)	30	16	6.6	2.7
verhouding t.o.v. zouthydraat	11	6	2.4	1

Paraffinen hebben de chemische formule C_nH_{2n+2} ($n = 12 - 50$) en hoe langer de keten hoe hoger het smeltpunt (variërend van -12 tot $135 \text{ }^\circ\text{C}$) en hoe hoger de latente (smelt)warmte, Z. Khan et al, 2016. De warmtegeleiding is echter slecht ($0,2 \text{ W/m}^\circ\text{K}$). De zouthydraten geleiden warmte iets beter ($0.7 \text{ W/m}^\circ\text{K}$), maar vergeleken bij bv. koper ($390 \text{ W/m}^\circ\text{K}$) is dit bijzonder laag. Dit betekent dat PCM's in containers of capsules gedragen moeten worden die de warmteoverdracht van de omgeving naar PCM versnellen. Ook de brandgevaarlijkheid van paraffinen wordt hiermee voorkomen. Belangrijk is dus ook dat het PCM en het containermateriaal zich goed verdragen en dat de PCM stabiel is. Warmteoverdrachtseigenschappen en thermische stabiliteit worden ook verbeterd door toevoegingen. Het aantal thermische cycli waarbij smeltpunt en latente warmte niet veranderen, is bij paraffinen getest tot 5000 (b.v. bij $C_{17}H_{36}$), bij zouthydraten tot 5650 (b.v. bij $CaCl_2 \cdot 6H_2O$), M. K. Rathod and J. Banerjee, 2013. Internationaal wordt momenteel veel onderzoek gedaan naar praktische toepassingen van PCM.

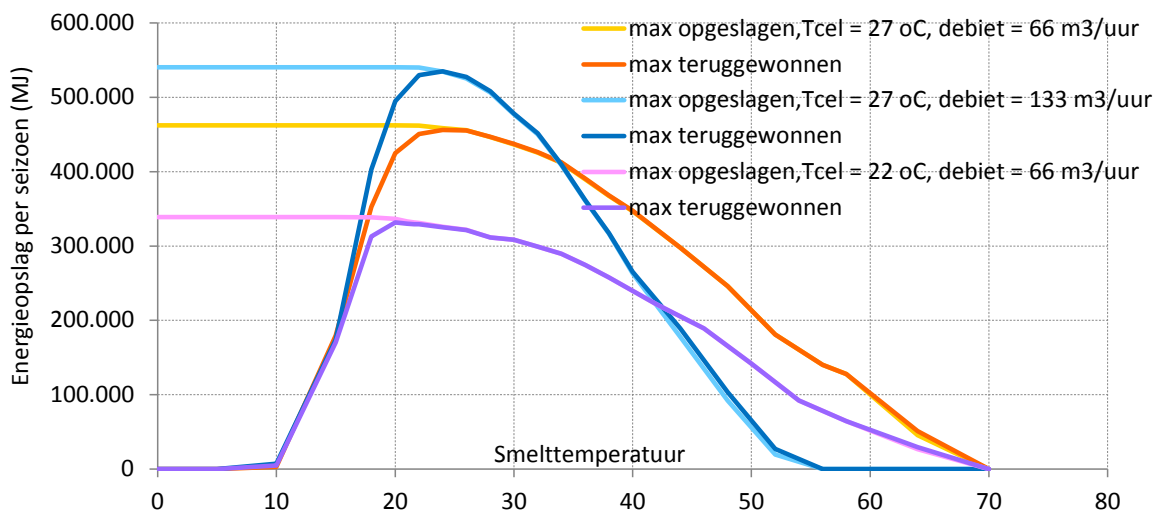
Bij warmteopslag in H_2O zijn veel grotere volumes nodig dan bij PCM, Tabel 2. Bij een simpel opslagsysteem wordt de warme lucht uit het zonedak langs een lucht-water warmtewisselaar (radiator) geleid. De warmte wordt door het water opgenomen en het water wordt een opslagtank in gepompt. Als s'nachts de temperatuur van het zonedak lager is dan de vereiste celtemperatuur, dan wordt het warmere water uit de tank weer door de warmtewisselaar gepompt om warmte terug te winnen. Hoe groter het temperatuursverschil tussen lucht en water hoe sneller warmte uitwisseling plaats vindt. En hoe groter het temperatuursverschil tussen het opgeslagen water en de vereiste celtemperatuur, hoe kleiner de opslagtank kan zijn.

Een bijzonder type warmteopslagtank is het Ecovat. Hierbij wordt het door de lucht-water warmtewisselaar opgewarmde water niet de opslagtank in gepompt, maar wordt de warmte via een water-water warmtewisselaar aan het water in de opslagtank afgegeven, zie: <http://www.ecovat.eu>. Dit type is vooral geschikt voor opslag op de langere termijn en de kleinste Ecovaten die nu geïnstalleerd gaan worden hebben een volume van 7.000 m^3 (met een capaciteit van $\pm 1.271.000 \text{ MJ}$)

3.3 Opslag in PCM

Om zoveel mogelijk warmte overdag in een m3 PCM op te slaan en s'nachts weer terug te kunnen winnen, is het van belang een PCM samenstelling te gebruiken met de juiste smeltemperatuur. Is de lucht van het zonnedak warmer dan de vereiste celtemperatuur dan moet de warmteovermaat opgeslagen worden door het smelten van het PCM, en s'nachts moet de lucht voldoende koel zijn om met het ventilatiedebiet het PCM te doen stollen en de warmte weer af te geven.

In figuur 7 is voor enkele scenario's weergegeven wat er, afhankelijk van de smeltemperatuur van het PCM, in totaal tijdens het bewaarseizoen maximaal opgeslagen kan worden, en wat er maximaal nuttig teruggewonnen kan worden. Hierbij wordt er overdag niet méér opgeslagen dan er s'nachts nuttig gebruikt kan worden. In de praktijksituatie (zie tabel 1), met een gemiddelde celtemperatuur van 27 °C, een gemiddeld ventilatiedebiet van 66 m3/uur en een dakoppervlak van 1200 m2, wordt er bij een smeltemperatuur van 0 °C maximaal ± 460.000 MJ per seizoen opgeslagen, maar het kan bij deze smeltemperatuur niet meer worden teruggewonnen. Pas als de smeltemperatuur boven de 10 °C is kan er soms iets teruggewonnen worden, maar bij een smeltemperatuur van 22 – 26 °C wordt maximaal warmte teruggewonnen.

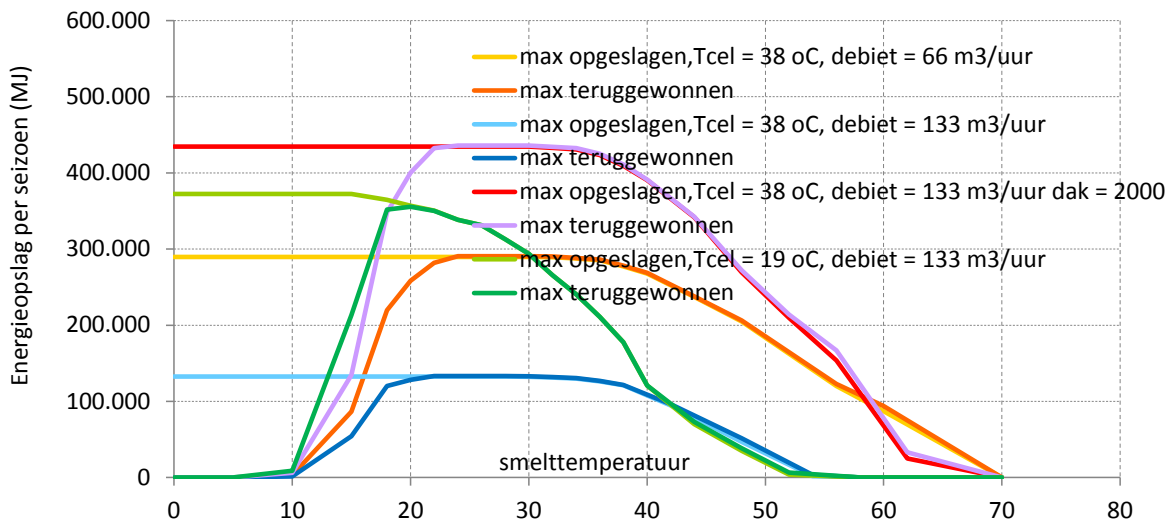


Figuur 7: PCM smeltemperatuur en warmteopslag A.

Als er twee maal zoveel geventileerd wordt, dus met een gemiddeld debiet van 133 m3/uur, kan meer warmte worden opgeslagen, maar de optimale smeltemperatuur blijft gelijk.

Wanneer de gemiddelde celtemperatuur niet 27, maar 22 °C is, wordt er minder warmte nuttig opgeslagen (de warmtevraag is lager) en de optimale smeltemperatuur ligt rond de 20 °C.

Een ander scenario is die waarbij de gemiddelde celtemperatuur 38 °C is. Met een dakoppervlak van 1200 m2 wordt dan meer warmte direct nuttig gebruikt, maar er is daarom minder overmaat waardoor er minder opgeslagen kan worden. De optimale smeltemperatuur ligt nu tussen de 24 en 36 °C, figuur 8. Wordt ook nog eens het gemiddelde ventilatiedebiet verdubbeld, dan wordt nog meer warmte direct nuttig gebruikt en is er nog minder overmaat om op te slaan. De optimale smeltemperatuur ligt dan tussen de 20 en 36 °C. Wordt het dak vergroot naar 2000 m2, dan neemt ook de maximaal op te slaan en terug te winnen warmte toe, maar de optimale smeltemperatuur blijft ongeveer gelijk: 22 tot 36 °C.



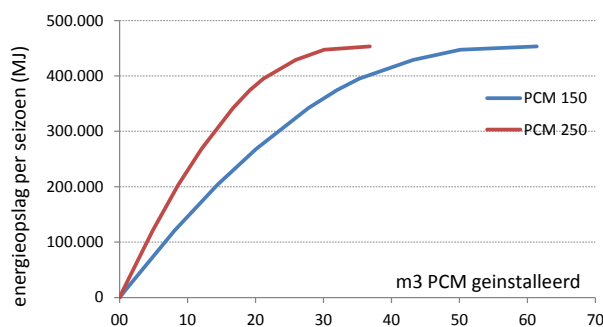
Figuur 8: PCM smelttemperatuur en warmteopslag B.

Bij een veel lagere gemiddelde celtemperatuur van 19 °C, wordt minder warmte nuttig opgeslagen (er is minder nodig), en de optimale smelttemperatuur ligt rond de 20 °C. Bij een te hoge smelttemperatuur neemt in alle gevallen de maximaal teruggewonnen warmte fors af.

De optimale smelttemperatuur van het PCM hangt dus vooral af van de vereiste celtemperatuur, het ventilatie-debiet heeft hier nauwelijks invloed op. Ook de temperatuur van de buitenlucht heeft weinig invloed: zowel bij een gemiddelde buitentemperatuur van 13,4 °C, i.p.v. gemiddeld 16,7 °C, als bij een buitentemperatuur van 20.6 °C graden is de optimale smelttemperatuur 24 tot 26 °C.

De totale maximale warmte die s'nachts uit opslag teruggewonnen kan worden is berekend door per dag de uurlijkse warmteoverschotten bij elkaar op te tellen tot er genoeg is om het tekort s'nachts te compenseren. Hieruit wordt de seizoensopbrengst van warmteopslag berekend door de dagelijkse totalen bij elkaar op te tellen. Uit dit dagelijkse totaal aan warmte wordt ook berekend hoeveel m3 PCM er die dag voor deze opslag nodig is. Hieruit wordt b.v. de maximaal te installeren hoeveelheid PCM afgeleid. Er is hierbij uitgegaan van een opslagcapaciteit van 150 MJ / m3 PCM (paraffinen), warmteopslag in de vorm van voelbare warmte is niet meegerekend.

Om *alle* dagen de volledige hoeveelheid terugwinbare warmte op te kunnen slaan zou dus de maximale hoeveelheid PCM geïnstalleerd moeten zijn. In figuur 9 is de totale terugwinbare opgeslagen warmte per seizoen uitgezet tegen de hoeveelheid geïnstalleerd PCM, afhankelijk van de warmteopslagcapaciteit (150 of 250 MJ/m3).



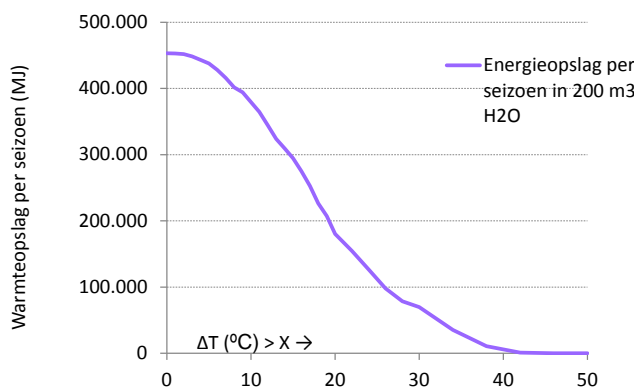
Figuur 9: Energieopslag en hoeveelheid PCM

De figuur laat zien dat met 25 m3 PCM met een capaciteit van 150 MJ in totaal ongeveer ruim 300.000 MJ per seizoen opgeslagen en teruggewonnen kan worden. Tot ongeveer 45 m3 neemt de energieopslag nog

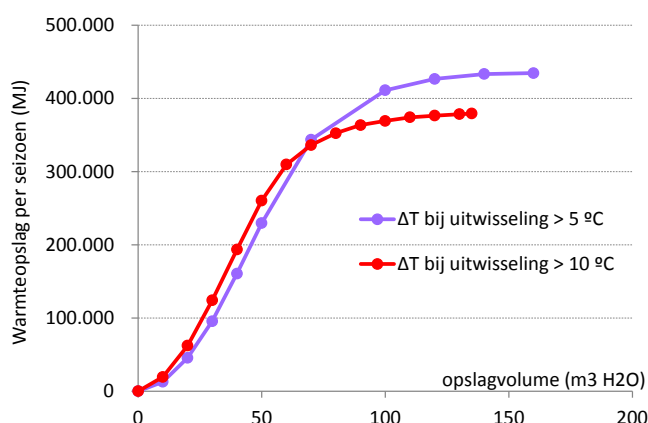
toe tot bijna 450.000 MJ, maar meer m³ PCM installeren heeft nut meer. Met een PCM met een opslagcapaciteit van 250 MJ/m³ wordt met respectievelijk 15 m³ en 27 m³ net zoveel warmte opgeslagen. Voor het zonnedak van 1200 m² betekent dit 13 tot 23 liter/m² dak: een laagdikte van 1,3 tot 2,3 cm, hetgeen vermoedelijk eenvoudig in bestaande daken te integreren is.

3.4 Opslag in H₂O

Warmteopslag in water gebeurt in de vorm van voelbare warmte: per °C is de soortelijke warmte van water 4,186 MJ per m³, zodat bv. in 10 m³ water dat door het zonnedak 10 °C wordt opgewarmd 418,6 MJ wordt opgeslagen. Hiervoor is een warmtewisselaar (radiator) nodig en een goed geïsoleerde wateropslagtank en een pompsysteem. Het opslaan en weer terugwinnen van warmte gaat sneller naarmate het temperatuurverschil (ΔT) van het zonnedak en het water (op celtemperatuur) groter is, en naarmate het warmte uitwisselend oppervlak van de warmtewisselaar groter is. Met een warmtewisselaar met een “oneindig” oppervlak en opslag vanaf een minimale ΔT (en zonder warmteverliezen) zou van het warmteoverschot van een zonnedak van 1200 m² onder de eerder beschreven omstandigheden (tabel 1) per seizoen ± 460.000 MJ kunnen worden opgeslagen. In de praktijk wordt warmte bij een grotere ΔT uitgewisseld, waardoor er gedurende het seizoen minder wordt opgeslagen, figuur 10.



Figuur 10: Energieopslag alleen als ΔT groter is dan x.



Figuur 11: Warmteopslag en het volume H₂O

De hoeveelheid warmte die per seizoen opgeslagen kan worden neemt bij volumes tot 70 - 80 m³ flink toe indien alleen bij een $\Delta T > 10$ °C wordt opgeslagen, en tot ongeveer 100 m³ indien alleen bij een $\Delta T > 5$ °C wordt opgeslagen. Nog grotere volumes dragen relatief weinig bij tot warmteopslag, figuur 11.

3.5 Bedrijfseconomische haalbaarheid

Technisch is warmteopslag voor 24 uur haalbaar, maar omdat warmteopslag in PCM nog in ontwikkeling is, is nog onduidelijk hoe in de toekomst de prijzen voor PCM, methoden van toepassing en installatie zich zullen ontwikkelen.

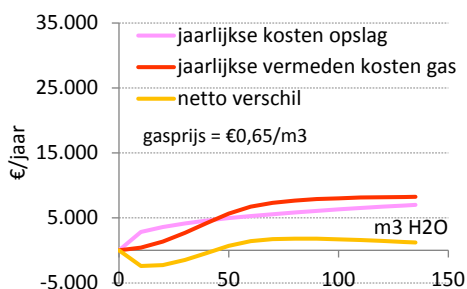
Voor de kosten van warmteopslag in water(tanks) is gebruik gemaakt van de "Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw 2012 – 2013", WUR Glastuinbouw Rapport GTB-5032. Hierin zijn de aanschafkosten van tanks voor warmteopslag in water (incl. aansluiting, regeling, expansie-uitbreiding, beton en isolatie) zoals in tabel 3. Op basis van 7% afschrijving, 2% onderhoud en een rente van 3% zijn hiervan de jaarlijkse kosten per m³ berekend. Grotere tanks zijn per m³ fors goedkoper dan kleinere.

Tabel 3: kosten warmte opslagtank water

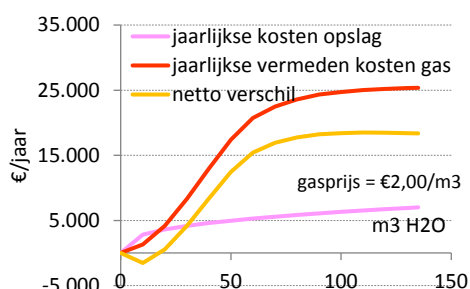
m ³	€	prijs/m ³ /jaar
90	52000 - 58000	68
120	57500 - 64000	56
350	85000 - 95000	29
500	95000 - 104000	22
1000	18000 - 200000	21

Voor PCM zijn volume-afhankelijke kosten niet bekend. Een prijsindicatie van één van de benaderde bedrijven die PCM installeren (222 MJ/m³) gaf aan dat als het gaat om meer dan 25 m³, de kosten rond de €8000/m³ zullen zijn. Bij kleinere volumes zal de prijs per m³ dus hoger zijn, bij grotere volumes lager, maar hiermee kon dus niet gerekend worden.

In figuur 12 zijn de jaarlijkse kosten en besparingen uitgezet bij een zonnedak van 1200 m² waarbij alleen warmte in H₂O wordt opgeslagen wanneer de temperatuur van het zonnedak 10 °C hoger is dan de celtemperatuur (zie ook figuur 11). Er wordt dan per seizoen voor ongeveer 375.000 MJ (12.000 m³ gas) per seizoen opgeslagen.



Figuur 12: Kosten en besparingen

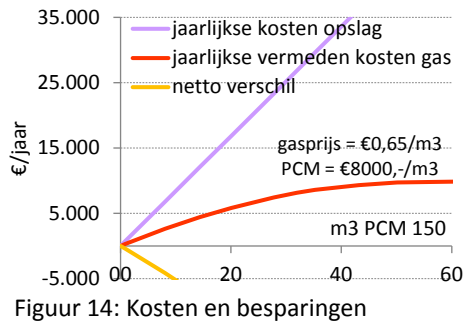


Figuur 13: Kosten en besparingen

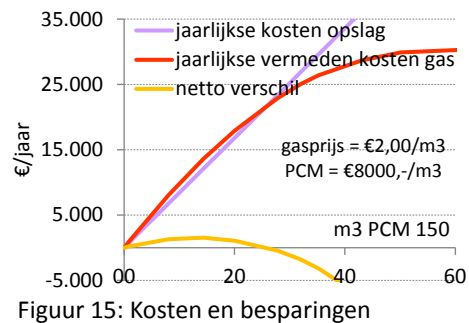
Bij de huidige gasprijs van € 0,65/m³ is warmteopslag rendabel bij een wateropslagvolume > 50 m³. Het verschil tussen de kosten voor opslag en de vermeden gaskosten, het rendement, is echter laag: ongeveer €1200,-/jaar.

De gemiddelde gasprijs voor de komende 15 jaar (tot/met 2032) zal vermoedelijk echter fors hoger liggen, door schaarste of door belastingen. Bovendien zouden de kosten van CO₂-uitstoot hier nog bij opgeteld moeten worden. Deze zijn moeilijk in te schatten, maar een schaduwprijs van b.v. € 100 tot € 200/ton CO₂ zou bij een uitstoot van 1,78 kg CO₂/m³ aardgas een tot prijsverhoging leiden van €0,18 tot €0,35 per m³. Ter indicatie is daarom ook gerekend met een gasprijs van €2,-/m³ en de resultaten hiervan zijn samengevat in figuur 13. Warmteopslag in water is dan rendabel in volumes > 20 m³, en bij 90 m³ is het verschil tussen de kosten voor opslag en de vermeden gaskosten dan minstens €17.000/jaar.

Bij de berekeningen voor warmteopslag in PCM is ook uitgegaan van afschrijvingskosten van 7%, onderhoud 2% en rente van 3%. De technische levensduur is echter vermoedelijk veel hoger dan 15 jaar. Bij een gasprijs van €0,65 en kosten van €8000/m³ PCM (150 MJ/m³, paraffine, smeltemperatuur = 27 °C), zijn jaarlijkse kosten voor warmteopslag en de vermeden kosten voor gas samengevat in figuur 14. Bij deze kosten is warmteopslag in PCM op geen enkele manier rendabel. Bij een gasprijs van €2,- is warmteopslag in dit PCM tot maximaal 25 m³ rendabel, maar het verschil tussen de kosten voor opslag en de vermeden gaskosten is heel klein, figuur 15.

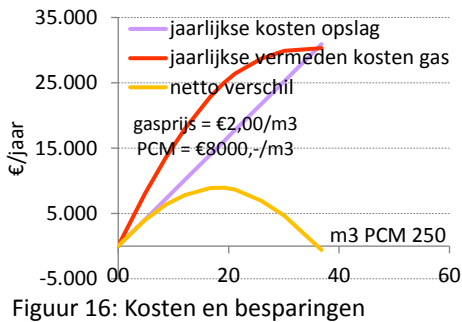


Figuur 14: Kosten en besparingen

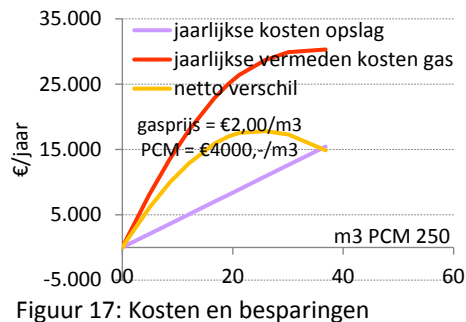


Figuur 15: Kosten en besparingen

Voor warmteopslag in een PCM met een capaciteit van 250 MJ/m³ (zouthydraat) geeft figuur 16 het resultaat: tot een toegepast volume van ruim 35 m³ PCM is warmteopslag in PCM rendabel, maar het grootste verschil tussen de kosten voor opslag en de vermeden gaskosten wordt gevonden bij 17 m³ PCM. Wordt daarnaast het PCM 50% goedkoper tot €4000,-/m³, dan wordt het grootste verschil tussen de kosten voor opslag en de vermeden gaskosten gevonden bij 27 m³ PCM en dat bedraagt dan ongeveer €17.000/jaar.



Figuur 16: Kosten en besparingen



Figuur 17: Kosten en besparingen

Afhankelijk van de gasprijs (+ energiebelastingen, + CO₂-uitstoot, etc.) en de prijzen voor PCM (afhankelijk van productietechnische ontwikkelingen, stimuleringsubsidies, etc.) geeft installatie van 20 – 30 m³ het hoogste rendement. Dit betekent voor een zonnedak van 1200 m² 17 tot 34 liter per m² zonnedak, ofwel een laag van 1,7 tot 3,4 cm.

4 Conclusies en aanbevelingen

Aan de hand van een praktijksituatie van een met glas bedekt zonnedak en de warmtevraag van 5 bewaarcellen met een capaciteit van elk 160 m³ bollen (hyacinten en tulpen), zijn op basis van uurgegevens van het bewaarperiode van 1 juli t/m 29 oktober (instraling, temperatuur van de buitenlucht, gewogen gemiddelde celtemperaturen en ventilatiedebiet) de energieprestaties van het zonnedak doorgerekend:

- Met een gewogen gemiddelde celtemperatuur van 27 °C, een ventilatiedebiet van 66 m³/uur per m³ bollen en een gemiddelde warmtevraag van ongeveer 13.000 MJ/dag is technisch gezien een dakoppervlak van ± 800 m² optimaal.
- Indien de warmteovermaat wordt opgeslagen voor gebruik s'nachts, dan is een dakoppervlak van 1200 m² optimaal.
- Zonder warmteopslag wordt door een dak van 800 m² ongeveer 475.000 MJ (≈ 16.000 m³ gas) benut. Dat is 40% van de totale zonnewarmte.
- Met 24-uurs warmteopslag benut het dak van 1200 m² ongeveer 975.000 MJ (≈ 32.500 m³ gas), een verdubbeling t.o.v. het dak van 800 m² zonder opslag, en nu bijna 55% van de totale zonnewarmte.
- Ten opzichte van de totale warmtevraag (1.580.000 MJ), is dat respectievelijk 31% en 63%.

- Bij een grotere warmtevraag door een veel hogere celtemperatuur levert een dak zonder warmteopslag tot ongeveer 1250 m² nog nuttig warmte, met opslag tot ongeveer 1600 m²
- Wordt eenzelfde grotere warmtevraag veroorzaakt door een fors hoger ventilatiedebiet, dan is zonder opslag een dak grootte van 1600 m² optimaal en met opslag is dat 2200 m².

- Voor warmteopslag in Phase Change Material (PCM) ligt de optimale smelttemperatuur op 22 – 26 °C, iets onder de gemiddelde celtemperatuur, i.d.g. 27 °C. Er kan dan tot 450.000 MJ worden opgeslagen.
- Bij een gemiddelde bewaarperiode van 22 °C ligt de optimale smelttemperatuur op 20 °C.
- Bij een gemiddelde celtemperatuur van 38 °C ligt de optimale smelttemperatuur op 24 – 38 °C.
- Het ventilatiedebiet heeft hier geen invloed op.

- Gezien de beschouwde bedrijfssituatie is 25 – 45 m³ PCM met een latente warmtecapaciteit van 150 MJ/m³ optimaal om opgeteld gedurende het bewaarperiode 300.000 – 400.000 MJ op te slaan. Dit is dagelijks gemiddeld 2500 – 3330 MJ (≈ 85 – 110 m³ gas).
- Met een PCM met een latente warmtecapaciteit van 250 MJ/m³ is 15 – 27 m³ optimaal.
- Voor het zonnedak van 1200 m² betekent dit 13 tot 23 liter PCM/m² dak: een laagdikte van 1,3 tot 2,3 cm, hetgeen vermoedelijk eenvoudig in bestaande daken te integreren is.

- Het optimale volume water om in totaal 300.000 – 400.000 MJ gedurende het bewaarperiode op te slaan hangt af van de grootte van de lucht-water warmtewisselaar en het temperatuursverschil tussen het zonnedak en het water (ΔT).
- Wordt alleen warmte uitgewisseld wanneer $\Delta T > 5$ °C, dan kan 400.000 MJ worden opgeslagen met een volume van 100 m³.
- Met een $\Delta T > 10$ °C is dat respectievelijk 350.000 MJ met 80 m³.

- Worden voor een periode van 15 jaar de gemiddelde vermeden kosten van gas bij een gasprijs van €0,65 vergeleken met de kosten van warmteopslag in water, dan is opslag met een volume > 50 m³ bedrijfseconomisch rendabel, maar het jaarlijkse verschil tussen de vermeden gaskosten en de kosten voor opslag, het rendement, is klein (€1200,-/jaar).
- Wordt bij vermeden gaskosten ook ingeschat dat de gasprijs de komende 15 jaar mogelijk flink zal stijgen door schaarste en/of energiebelasting, en door het doorrekenen van de kosten van CO₂-uitstoot, dan kan bovenstaande vergelijking b.v. gemaakt worden met een gasprijs van €2,-/m³: Opslag is dan rendabel in volumes > 20 m³, en de jaarlijkse rendement is dan ongeveer €17.000,-.

- Warmteopslag in PCM (150 MJ/m³, paraffine) is bij een gasprijs van € 0,65 en een PCM-prijs van €8000/m³ niet rendabel.
- Bij een gasprijs van €2,-/m³ is warmteopslag rendabel tot maximaal 25 m³. Het rendement is echter heel laag.
- Warmteopslag in een PCM met een capaciteit van 250 MJ/m³ (zouthydraat) is rendabel tot een volume van 35m³. Het maximale rendement is dan €9000,-/jaar.
- Bij een PCM-prijs van €4000,- is opslag rendabel tot 40 m³, met een maximum rendement van €18.000/jaar.

Samenvattend: Warmteopslag in PCM is technisch haalbaar en verhoogt het rendement van een zonnedak. Hiermee wordt veel CO₂-uitstoot vermeden, hetgeen een hoge maatschappelijke waarde heeft. De kosten liggen nu erg hoog, maar m.b.v. subsidies zou een pilot-toepassing tot kostenverlaging kunnen leiden door ontwikkeling van efficiëntere installatie en inbouw. Hierbij belangrijke subsidiemogelijkheden die door de overheid geboden worden zijn o.a. [SDE+](#), [EIA](#), [MIA/Vamil](#), [DEI](#), etc., te vinden op de website www.rvo.nl.

Het is daarom aanbevolen een dergelijk gesubsidieerd pilotproject op te starten met bollenbedrijven en PCM-fabrikanten / -installateurs.