Een voorraadje voor de winter

Mogelijkheden voor seizoensopslag van thermische energie voor de Nederlandse glastuinbouw

Kshiti Mishra, Bram van Breugel, Frank Kempkes

Rapport WPR-1286

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

KAS ALS
ENERGIEBRON

Referaat
In semi-gesloten kassystemen die zijn uitgerust met ontvochtigers op basis van een warmtepomp gaat het ontvochtigingsproces gepaard met het terugwinnen van energie, die mogelijk kan worden gebruikt om aan de warmtevraag van de kas te voldoen en het totale energieverbruik te verminderen. De periode met de hoogste ontvochtigingsvraag (dus hoogste energieterugwinning) valt echter niet samen met de periode met de hoogste warmtevraag. Deze onbalans kan worden overbrugd door lange-termijn/seizoensgebonden opslag van de gewonnen energie. In dit rapport worden enkele commercieel verkrijgbare oplossingen voor thermische energieopslag voor de lange termijn geëvalueerd op hun haalbaarheid voor gebruik in kassen. Voor twee gesimuleerde glastuinbouwsystemen is het benodigde volume voor seizoensopslag uitgerekend.

Abstract
In semi-closed greenhouse systems equipped with heat-pump dehumidifiers, dehumidification is accompanied by recovery of energy, which could potentially be used to meet the heating demand of greenhouses and reduce the total energy use. However, the period with highest dehumidification demand (thus highest energy recovery) does not coincide with the period for the highest heat demand. This imbalance can be bridged through long-term/seasonal storage of the extracted energy. In this report, some commercially available long-term thermal energy storage solutions are evaluated for their feasibility to be used in greenhouses. The required volume for seasonal storage is assessed for two simulated greenhouse cultivation systems.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1286
Projectnummer: 3742347600
DOI: https://doi.org/10.18174/647536

Dit project is tot stand gekomen door de bijdrage van Kas als Energiebron, hét innovatieprogramma dat energiebesparing en het gebruik van duurzame energie in de glastuinbouw stimuleert. Glastuinbouw Nederland en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit trekken hierin samen op.

Disclaimer

© 2024 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.
Kamer van Koophandel nr.: 09098104
BTW nr.: NL 8113.83.696.B07
Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.
Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw
Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 - 48 56 06
F +31 (0)10 - 522 51 93
glastuinbouw@wur.nl
wur.nl/glastuinbouw

Inhoud

Samenvatting **5**

Summary **7**

1 Introductie **9**

1.1 Behoefte aan seizoensopslag van energie voor kassen 9
1.2 Seizoensopslag opties voor kassen 10

2 Toepassing mogelijkheden van warmte opslagsystemen **12**

2.1 Als meerdaagse warmte buffer 12
2.2 Als vervanging van back-up boiler 12

3 Commercieel beschikbare opties voor seizoensopslag van warmte **14**

3.1 Cellcius 14
3.1.1 Potentie voor toepassing in kassen 15
3.1.2 Uitdagingen voor de toepassing in kassen 15
3.2 RIFT 16
3.2.1 Potentie voor toepassing in kassen 18
3.2.2 Uitdagingen voor de toepassing in kassen 18
3.3 SolarEis 18
3.3.1 Potentie voor toepassing in kassen 19
3.3.2 Uitdagingen voor de toepassing in kassen 19
3.4 Sunamp 20
3.4.1 Potentie voor toepassing in kassen 21
3.4.2 Uitdagingen voor de toepassing in kassen 21
3.5 Samenvatting 21

4 Energie verbruik van moderne efficiënte kassen **23**

4.1 Warmtepomp ontvochtiger met warmteterugwinning 23
4.2 Warmtevraag bij tomaat 25
4.2.1 Beschrijving van de simulatie 25
4.2.2 Simulatie resultaten 25
4.3 Warmtevraag bij potanthurium 33
4.3.1 Beschrijving van de simulatie 33
4.3.2 Resultaten van de simulatie 34
4.4 Beoordeling van de commerciële technologieën op basis van simulaties teelten 37

5 Conclusie **39**

Literatuur **40**

Samenvatting

Er is aanzienlijke vooruitgang geboekt bij het ontwerp van kassen om de warmtevraag te verminderen. In semi-gesloten kassystemen die zijn uitgerust met warmtepomp ontvochtigers gaat ontvochtiging gepaard met het terugwinnen van energie, die uiteindelijk kan worden gebruikt om aan de verwarmingsbehoefte te voldoen. De periode met de hoogste ontvochtigingsvraag (dus hoogste energieterugwinning) valt echter niet samen met de periode met de hoogste warmtevraag. Deze onbalans kan worden overbrugd door de teruggewonnen warmte op te slaan in een langetermijn-/seizoensopslag. In dit rapport worden enkele commercieel verkrijgbare oplossingen voor lange termijn thermische energieopslag geëvalueerd op hun haalbaarheid voor gebruik in kassen. Voor twee gesimuleerde glastuinbouwsystemen is het benodigde volume voor seizoensopslag beoordeeld.

Het eerste hoofdstuk introduceert kort de noodzaak van seizoensopslag in kassen en noemt verschillende categorieën opslagmedia (verstandig, latent en thermochemisch). Hoofdstuk 3 beschrijft enkele commercieel beschikbare technologieën voor seizoensopslag met betrekking tot hun energieopslagdichtheid, bedrijfstemperaturen en andere kenmerken die relevant kunnen zijn voor kassen. In hoofdstuk 4 worden twee verschillende glastuinbouwsystemen gesimuleerd. Aan de hand van de warmtevraag en de ontvochtigingsvraag (of teruggewonnen warmte) wordt de benodigde energieopslagcapaciteit geschat voor twee verschillende opslagconcepten: warmteopslag en koudeopslag. Voor twee van de in hoofdstuk 3 beschreven materialen zijn de benodigde opslagvolumes berekend. In hoofdstuk 5 worden de conclusies samengevat, waarbij de Cellcius technologie het meest belovend opslagprincipe voor kassen presenteert van de systemen die hier geanalyseerd werden.

Summary

Significant progress has been made in the design of greenhouses to reduce the heat demand. In semi-closed greenhouse systems equipped with heat pump dehumidifiers, dehumidification is accompanied by recovery of energy, which could be eventually utilized to meet their heating demands. However, the period with highest dehumidification demand (thus highest energy recovery) does not coincide with the period for the highest heat demand. This imbalance can be bridged by storing the recovered heat in a long-term/seasonal storage. In this report, some commercially available long-term thermal energy storage solutions are evaluated for their feasibility to be used in greenhouses. The required volume for seasonal storage is assessed for two simulated greenhouse cultivation systems.

The first chapter briefly introduces the need for seasonal storage in greenhouses, and mentions different categories of storage media (sensible, latent, and thermochemical). Chapter 2 describes some commercially available technologies for seasonal storage with respect to their energy storage density, operation temperatures, and other characteristics which may be relevant for greenhouses. In chapter 3, two different greenhouse cultivation systems are simulated. Using the heat demand and dehumidification demand (or recovered heat), the required energy storage capacities are estimated for two different storage concepts, heat storage and cool storage. For two of the materials described in chapter 2, the required storage volumes are calculated. In chapter 4, the conclusions are summarized, with the Cellcius technology presenting a the most promising storage principle for greenhouses among the systems analyzed.

1 Introductie

1.1 Behoefte aan seizoensopslag van energie voor kassen

Hightech kassen realiseren hoge gewasopbrengsten maar gebruiken daarvoor wel extra energie, dit wordt vooral gebruikt voor verwarming, koeling, vochtregeling en belichting. Vergeleken met deze functies worden veel kleinere hoeveelheden energie (5 – 10 kWh/m^2) gebruikt voor het aandrijven van andere kasapparatuur zoals ventilatiemotoren, schermen, pompen voor irrigatie en waterbehandeling, etc. [1]. Het absolute energieverbruik van kassen is afhankelijk van de klimaatomstandigheden buiten. In Nederland wordt het energieverbruik geschat op 1100 MJ/m^2, waarvan het merendeel wordt gebruikt voor verwarming, ontvochtiging en kunstlicht. Er is berekend dat dit 20-25% van de totale productiekosten bedraagt [1].

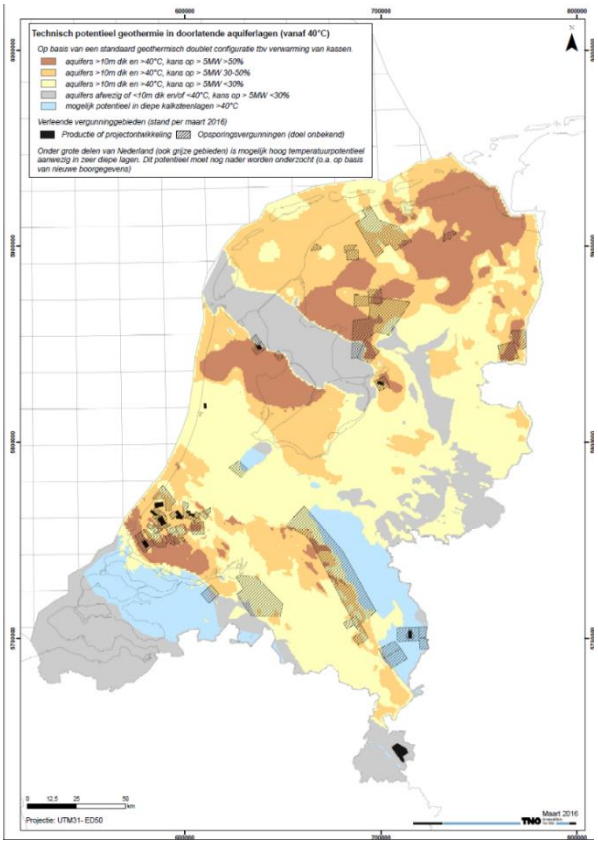
De toenemende ernst van de gevolgen van de klimaatverandering en de dringende noodzaak om de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen, maken het van groot belang om energie-efficiënte kassen te ontwerpen die afhankelijk zijn van duurzame energiebronnen. Drie principes hiervoor zijn [1]:

(i) Het verminderen van het energieverbruik van kassen – door het gebruik van natuurlijk zonlicht te maximaliseren; het maximaliseren van de isolatie om warmteverliezen te voorkomen; energiezuinige verwarmings- en koelsystemen.

(ii) Klimaat- en gewasstrategieën (Het Nieuwe Telen), zoals setpoints voor hogere luchtvochtigheid, temperatuurintegratiestrategieën, gewas- en energiebalansen, licht temperatuur verhouding etc.

(iii) Duurzame energiebronnen ter vervanging van fossiele brandstoffen (bijvoorbeeld thermische zonne-energie, windenergie, geothermische energie, biomassa, getijden-/golfenergie, enz.).

Hiervan zijn zonne- en geothermische energie direct beschikbaar in de vorm van warmte. Het geothermische potentieel in Nederland wordt weergegeven in onderstaande Figuur 1.1:



Figuur 1.1 *Potentie voor geothermische energie in Nederland.*

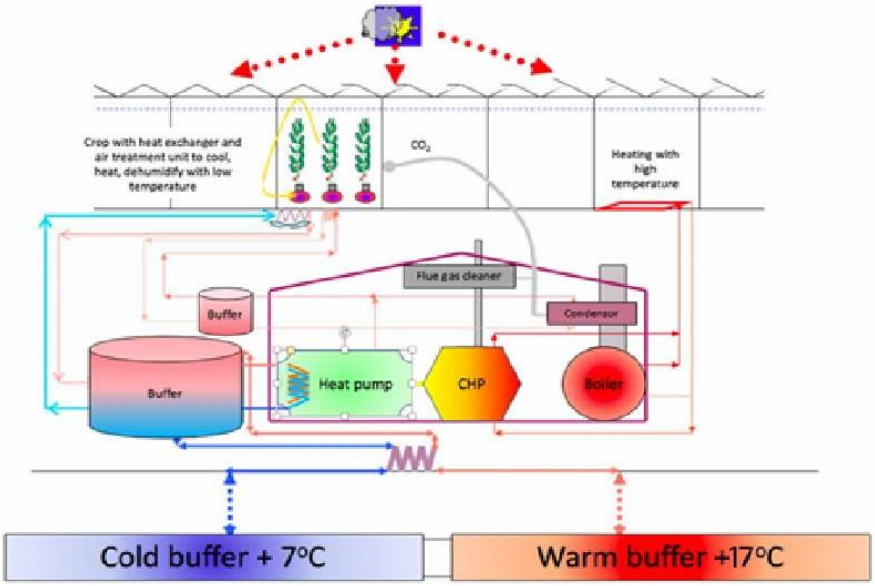
Het hoge geothermische potentieel is vrij goed benut, en geothermische watervoerende lagen zijn op grote schaal gebruikt voor seizoensopslag, ook in de glastuinbouw. Het is echter sterk afhankelijk van de geografische locatie. Bovendien zijn voor het gebruik van aardwarmte complexe installaties en vergunningen nodig.

Vergeleken hiermee is zonne-energie vrij beschikbaar en gemakkelijker te oogsten. Het voorbehoud hier is de fluctuerende beschikbaarheid van thermische zonne-energie, dagelijks en per seizoen (in tegenstelling tot de constante beschikbaarheid van geothermische energie). Deze schommelingen creëren een onevenwicht tussen periodes van overtollige thermische zonne-energie (dagelijks - overdag; seizoen afhankelijk - in de zomermaanden) en de periodes met maximale warmtevraag (dagelijks - 's nachts en seizoensgebonden - in de winterperiode). Om deze onbalans op te vangen is opslag van de thermische energie nodig.

1.2 Seizoensopslag opties voor kassen

Verschillende semi-gesloten of gesloten kassen in Nederland zijn al in staat thermische zonnewarmte op te slaan op basis van het concept van Aquifer Warmte Koude Opslag (A-WKO) (Figuur 1.2): in perioden met hoge zonnestraling wordt overtollige zonne-energie opgevangen door warmtewisselaars en opgeslagen om te worden hergebruikt voor verwarming in koude periodes – hetzij dagelijks in buffers, hetzij op seizoen basis in ondergrondse watervoerende lagen. In dit systeem wordt water als opslagmedium gebruikt vanwege de hoge soortelijke warmtecapaciteit van 1,16 kWh/m³K (4,18 MJ/m³K).

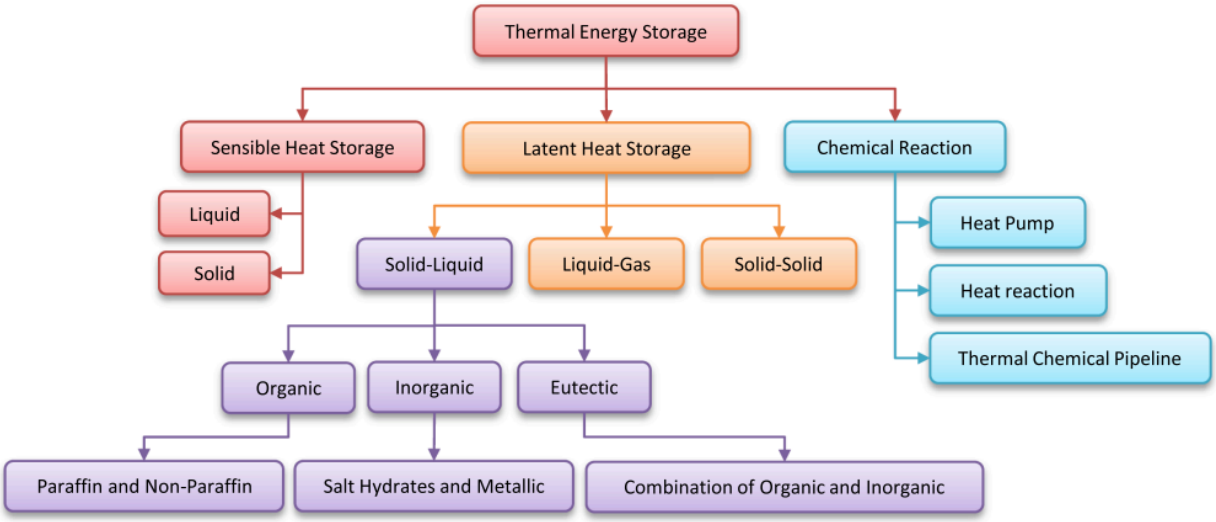
Kassen die zich boven watervoerende lagen bevinden, kunnen de watervoerende laag gebruiken om warmte op te slaan en terug te winnen, maar dit is een proces met onvoldoende efficiëntie en een aanzienlijk deel van de kassen heeft minder geluk qua locatie en kan deze optie helemaal niet gebruiken.



Figuur 1.2 *Schematische weergave van warmteopslag (WKO) in een watervoerende laag of aquifer (A-WKO) in een kas.*

Het voordeel van A-WKO is goedkopere koeling en aanzienlijke energiebesparing voor verwarming. Maar een nadeel is dat de overtollige zonne-energie wordt omgezet in laagwaardige thermische energie die wordt opgeslagen bij een temperatuur van ongeveer 18 °C. Deze kan in de winter alleen worden benut voor verwarming door een warmtepomp, aangedreven door hoogwaardige energie zoals elektriciteit.

A-WKO is een vorm van voelbare warmteopslag; dat wil zeggen dat de temperatuur van het opslagmateriaal varieert met de hoeveelheid opgeslagen energie. Naast voelbare warmte opslag kan warmte ook in andere vormen worden opgeslagen: latente warmteopslag (waarbij gebruik wordt gemaakt van de energie die wordt opgeslagen wanneer een stof van de ene fase naar de andere overgaat door smelten (van ijs naar water) en thermochemische opslag (gebaseerd op over thermisch omkeerbare reacties). Op basis van deze verschillende strategieën zijn verschillende materialen potentiële kandidaten voor warmteopslagmedia. Sommige hiervan worden geëvalueerd in [2] op basis van energieverbruik, opslaggrootte en kosten.



Figuur 1.3 *Verschillende strategieën voor opslag van thermische energie [2].*

In dit rapport willen we alternatieve mogelijkheden verkennen voor seizoensopslag van thermische energie voor kassen, op basis van enkele commercieel beschikbare oplossingen, die gericht zijn op residentiële of industriële verwarming.

Opmerking1: Oplossingen voor thermische opslag worden vaak 'warmtebatterijen' genoemd. Energieopslag kan ook worden geïmplementeerd in de vorm van elektriciteit, waarbij de input en output van de batterij voor laad- en ontlaadcycli elektriciteit is. Voor dit rapport richten wij ons op warmteopslagsystemen.

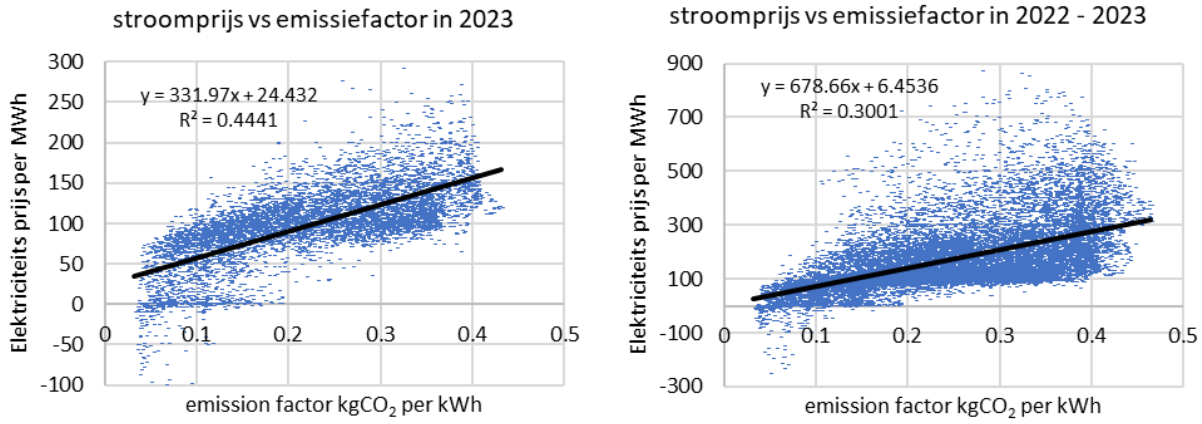
Opmerking 2: Systemen voor de lange termijn opslag van elektriciteit zoals vanadium flow batterijen, ijzer-lucht batterijen, waterstof electrolysers etc. hebben vaak thermische verliezen in de laad-ontlaad-cyclus. Deze restwarmte zou in de toekomst wel nuttig gebruikt kunnen worden door kassen voor verwarming net zoals nu gebruikelijk is met de restwarmte van WKK-installaties maar vallen buiten de scope van dit project.

2 Toepassing mogelijkheden van warmte opslagsystemen

2.1 Als meerdaagse warmte buffer

Ook in de winter kan duurzaam opgewekte elektriciteit overvloedig beschikbaar zijn in periodes van veel windenergie. Zo zijn er afgelopen december 2023 zo'n 72 uren geweest waarbij stroom vrijwel gratis (<1 euro per MWh) was en 144 uur waarop de prijs per MWh lager was dan de aardgasprijs die toen tussen de 30 en 40 euro per MWh fluctueerde waardoor zelfs warmtebuffers vullen met behulp van een elektrische boiler voordelig uit kan pakken.

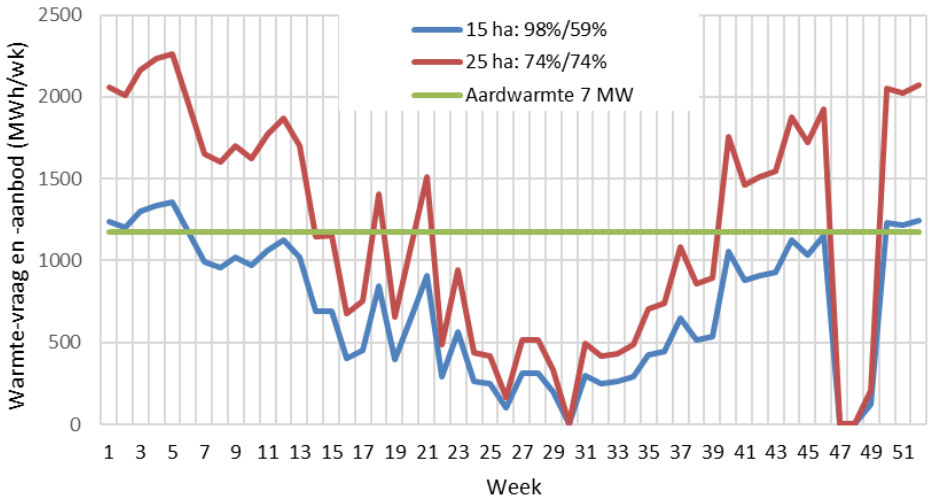
Bovendien varieert de CO_2 uitstoot per kWh elektriciteit afhankelijk van de mix van elektriciteit leverende bronnen, met meer duurzame bronnen in de mix is deze emissiefactor uiteraard lager maar is de elektriciteit vaak ook goedkoper omdat bij deze bronnen geen extra operationele kosten gepaard gaan met het leveren van elektriciteit. Optimaal gebruik maken van goedkope stroom gaat dus samen met een duurzamere teelt.



Figuur 2.1 *De elektriciteitsprijs uitgezet tegen de emissiefactor. Op momenten met meer duurzame bronnen in de mix neemt niet alleen de emissie factor van elektra af maar gaat dit ook gepaard met lagere kosten, links voor 2022 en 2023 en dus met de invloed van de energiecrises van 21-22, rechts voor alleen 2023.*

2.2 Als vervanging van back-up boiler

Veel duurzame warmtebronnen zoals een geothermiebron of warmtepomp met warmte-koude-opslag in de bodem vereisen een grote investering. Zo wordt in de KWIN voorgerekend dat een geothermiebron van beter benut wordt als deze maar een gedeelte van de warmtevraag invult. In het voorbeeld in de KWIN waarbij 98% van de warmtevraag wordt ingevuld komen de kosten op 16.47 euro/GJ en bij het scenario dat maar 74% van de warmtevraag wordt ingevuld op 12.3 euro/GJ.



Figuur 2.2 *Rekenvoorbeeld uit de KWIN voor een bedrijfsvoering waarbij aardwarmte wordt ingezet waaruit duidelijk wordt gemaakt dat een aardwarmte bron die de warmtevraag voor slechts een deel van de tijd dekt in verhouding meer vollast uren draait waardoor de bijhorende kosten voor warmte lager uitpakt.*

De restvraag aan warmte in dit voorbeeld uit de KWIN met een aardwarmtebron bedraagt ongeveer een vierder van de totale energievraag. Een warmte opslagsysteem zou dus ingezet kunnen worden om de resterende warmte vraag in te vullen waardoor deze de back-up gasketel mogelijkerwijs kan vervangen.

3 Commercieel beschikbare opties voor seizoensopslag van warmte

In dit hoofdstuk worden enkele commercieel verkrijgbare technologieën voor seizoensopslag beschreven, samen met het werkingsprincipe, en publiekelijk beschikbare gegevens over de parameters die relevant zijn voor hun toepassingen in kassen, zoals de dichtheid van energieopslag, bedrijfstemperaturen, etc. De ontwikkelingen op dit gebied gaan echter zo snel en er zijn zoveel partijen die aan dit onderwerp werken dat er inmiddels zelfs nieuws websites bestaan die volledig zijn toegewijd aan dit onderwerp zoals www.energy-storage.news.

3.1 Cellcius

Cellcius is een bedrijf dat 'warmtebatterijen' maakt op basis van het zout K_2CO_3 als warmteopslagmedium. Als er waterdamp aan de K_2CO_3 kristallen wordt toegevoegd, worden ze groter en geven ze warmte af – dit is dan de 'warmteontlading' stap voor de batterij, die kan worden gebruikt tijdens perioden met warmtevraag.

Als water uit het zout wordt gehaald met behulp van de overtollige warmte die in warmere periodes wordt gewonnen, keren de zoutkristallen terug naar hun oorspronkelijke kristalstructuur en absorberen ze de energie – deze energie wordt opgeslagen in het zout totdat het weer in contact wordt gebracht met waterdamp – dit is de 'oplaad' stap [3].

Bij dit systeem gaat de opgeslagen energie niet verloren, zolang contact van de kristallen met water kan worden vermeden, wat zorgt voor een stabiele opslag op de lange termijn. Terwijl K_2CO_3 zelf na een paar laad- en ontlaadcycli uiteen zou vallen of gaat klonteren, heeft Cellcius een composiet ontwikkeld op basis van K_2CO_3, dat stabiliteit verschaft om meer dan 20 jaar mee te gaan gedurende meerdere laad- en ontlaadcycli.

1 m^3 Cellcius zout composiet kan ~1,3 GJ energie opslaan (361 kWh of 41m^3 gas). Op basis van de korrelgrootte bestaat hun "closed loop" systeem uit een boiler met de zoutdeeltjes, een ventilator om de warmte weg te blazen, een condensor/verdamper en een warmtewisselaar. In plaats van één grote zoutcontainer (die in één keer gebruikt zou moeten worden om de warmte op te slaan/afvoeren) wordt echter een modulair systeem (Figuur 3.1) gebruikt met meerdere kleine eenheden die naar behoefte kunnen worden gecombineerd.

Figuur 3.1 *Prototype van de modulaire warmte batterij van Cellcius bestaande uit 30 'kluisjes' die gezamenlijk een opslagcapaciteit bezitten van 200 kWh thermisch [3].*

De karakteristieke ontladingstemperatuur van K_2CO_3 is 33 – 45°C [4]. De uiteindelijke temperatuur waarbij warmte wordt geleverd, is afhankelijk van de temperatuur van de bron die het water levert om de accu te ontladen. Het door Cellcius gespecificeerde temperatuurbereik is 30-150°C.

3.1.1 Potentie voor toepassing in kassen

Deze technologie heeft een aantal voordelen:

- De maximale en minimale temperaturen voor de opslag zijn vergelijkbaar met de temperaturen die gerealiseerd worden door de warmtepomp. Hierdoor kan het systeem worden opgeladen met behulp van een warmtepomp waardoor de coëfficiënt of performance (COP) van de warmtepomp ook benut wordt voor dit deel van de energievraag.
- Door het thermochemische karakter van de Cellcius opslag zullen de warmteverliezen uit de lange-termijn opslag gedurende de opslagperiode nul blijven, op voorwaarde dat contact met water wordt vermeden.
- Als het warmte opslagsysteem ingezet kan worden als open systeem waarbij de vochtige lucht uit de kas gebruikt kan worden voor het ontladen van het systeem kan deze tegelijkertijd de functie van de actieve ontvochtiger vervullen.

3.1.2 Uitdagingen voor de toepassing in kassen

De uitdaging zal de schaalgrootte zijn die nodig is om een kas van energie te voorzien en de materiaalkosten die daarmee samengaan. Op basis van de handelswebsite made-in-china.com/ worden de kosten van kaliumcarbonaat in bulk geschat tussen de € 800 en € 1400 per ton, met een dichtheid van 2.43 gram/cm^3 komt dit neer op 1900 tot 3350 euro per m^3 en tussen de € 5200 en € 9360 per MWh (of € 1460 tot € 2580 per GJ) warmte opslag.

Als dit systeem dus zuiver als seizoensopslag wordt ingezet met 1 laad en ontlaad cyclus per jaar over een periode van 20 jaar komen de kosten (van louter het kaliumcarbonaat in het systeem) neer op tussen de 260 en 470 euro per MWh, tijdens de hele energiecrises van 2022 is de prijs van gas maar een paar dagen in dezelfde orde grootte geweest.

In [5] worden de kosten voor het volledige system zelfs op zo'n € 10 euro MJ geschat, een factor 4 hoger dan louter de kosten voor het kaliumcarbonaat.

Verder wordt ingeschat dat de technologie pas in 2025 beschikbaar komt.

Het zal duidelijk zijn dat dit systeem zuiver ingezet als seizoensopslag nooit economisch rendabel zal zijn, als het systeem door meerdere laad-ontlaad cycli heen gaat per jaar zal het economisch perspectief verbeteren. Ook kan het vervoeren van restwarmte zoals door Cellcius wordt geschetst interessant zijn.

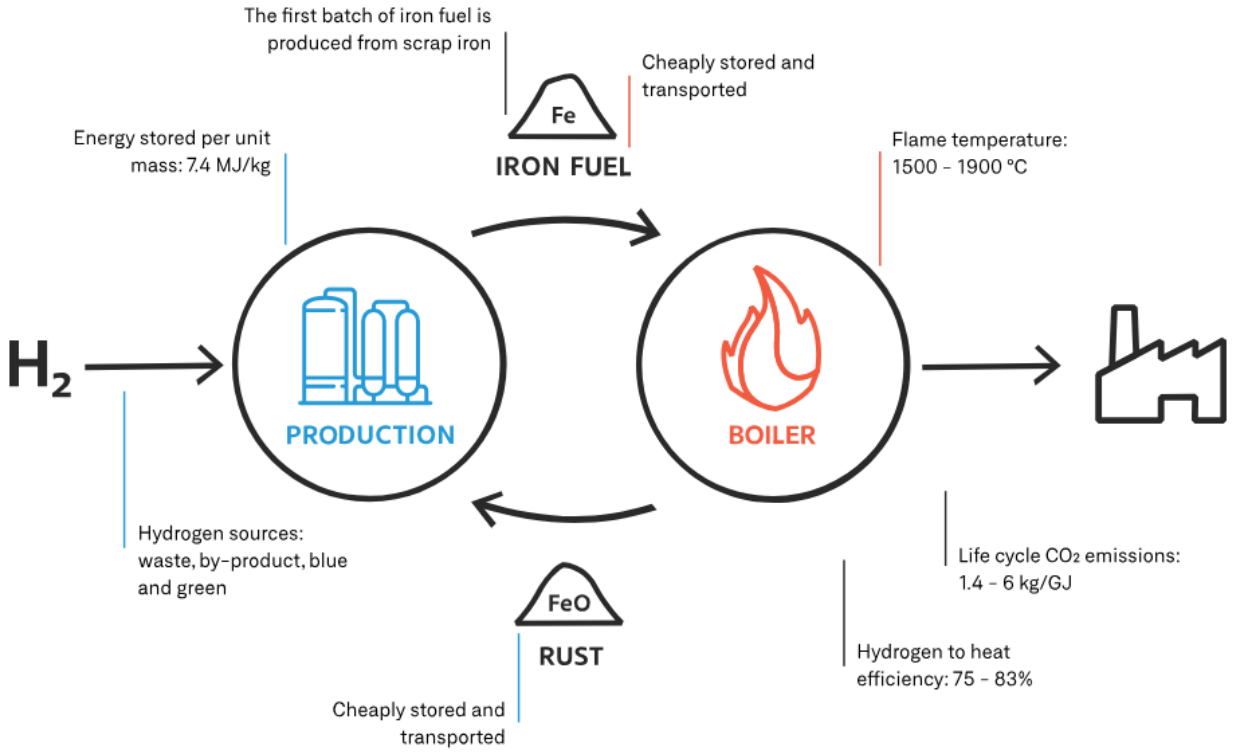
3.2 RIFT

RIFT maakt gebruik van de verbranding van metaalpoeder, met name ijzerpoeder, in een reactor om hoogwaardige warmte te genereren zonder dat er broeikasgassen vrijkomen. Het metaalpoeder wordt ontstoken bij temperaturen in de orde van 1300 – 2000°C en brandt met een vlam van dezelfde temperatuur [6]. Volgens Wikipedia is de standaard enthalpie van formatie van Fe_2O_3 is 824.2 kJ/mol – oftewel het verbranden van 1 kg ijzerpoeder levert 7.39 MJ-warmte [7].

De opgewekte warmte kan worden gebruikt om via een externe verbrandingsmotor elektriciteit op te wekken of direct water op te warmen dat aan woningen en mogelijk kassen wordt geleverd. RIFT technologie is in 2020 gedemonstreerd in een 100 KW systeem bij een brouwerij in Lieshout. Er werd gebruik gemaakt van een installatie van ongeveer 15 meter, waarbij het grootste deel van de lengte werd afgedekt door een lange branderbuis (Figuur 3.2). Het ijzerpoeder wordt via een luchtstroming vervoert naar de verbrandingskamer. De exotherme reactie genereerd energie die werd gebruikt om water te verwarmen en stoom te genereren, het ijzeroxide wordt gefilterd uit de uitlaatgassen voor hergebruik en de stoom werd in de brouwerij [8]. In Helmond is in 2023 verwarming van 500 huizen gedemonstreerd met behulp van een 1 MW ketel aangedreven door RIFT technologie in combinatie met een stadsverwarmingsopstelling. [9].

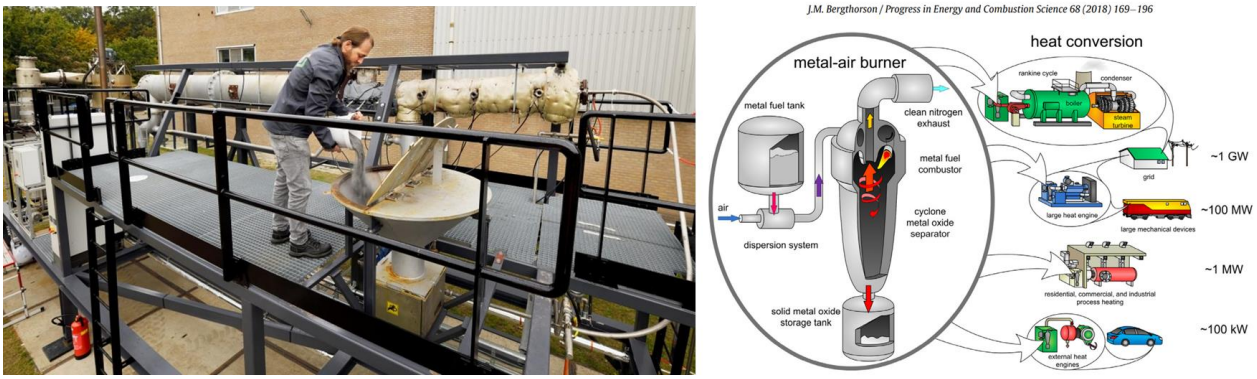
Na de verbranding blijft er ijzeroxide of roest achter. Dit kan worden gerecycled tot ijzer, zodat er een cyclisch proces ontstaat. De typische manier om dit te doen is reductie met steenkool in een oven, maar als in de toekomst duurzamere manieren kunnen worden gerealiseerd om het ijzer terug te winnen, zoals het gebruik van waterstof, biomassa of elektrolyse, dan kan het proces cyclisch worden en gebruikt worden voor de productie en opslag van hoogwaardige warmte welke nuttig gebruikt kan worden voor industrieën en mogelijk voor kassen [10].

RIFT test momenteel de productie van ijzerbrandstof op Energy Demo Field in Arnhem, waar een waterstofreactor het ijzerpoeder uit de roest kan regenereren om opnieuw als brandstof te worden hergebruikt [11].



Figuur 3.2 *Schematische illustratie van RIFT met de werking van het hele systeem voor energieopslag via ijzerpoeder [12].*

De beschikbaarheid en energiebehoefte voor het verkrijgen van groene waterstof in de benodigde hoeveelheden voor de regeneratie van ijzerbrandstof is nog steeds een uitdaging. Een andere vraag die opkomt is waarom waterstof zelf niet gebruikt kan worden voor warmteopslag. De belangrijkste voordelen van ijzerbrandstof ten opzichte van waterstof zijn: een hogere energiedichtheid, eenvoudiger opslag- en transportomstandigheden vergeleken met waterstof (dat bij hoge druk en lage temperaturen moet worden opgeslagen/getransporteerd) en minder zorgen over de veiligheid [6]. IJzerbrandstof wordt ook overwogen als een manier om waterstof op te slaan [13] en kan een aanvulling vormen op waterstof gebaseerde opslag. Technische beoordelingen door Metalot en TU Darmstadt suggereren dat de productie van ijzer uit waterstofgas efficiënter is dan de productie van vloeibare waterstof [14].



Figuur 3.3 *Links: een werknemer giet de ijzerbrandstof in de invoer voor de verbrandingskamer bij de Swinkels family brouwerij Bavaria ter demonstratie van de ijzer verbrandingstechnologie [15]; Rechts: het ontwerp van de ijzer verbrander en mogelijke toepassingen [16].*

3.2.1 Potentie voor toepassing in kassen

Er zijn voordelen van ijzerbrandstof vanuit het oogpunt van duurzaamheid [7]:
- IJzer is in grote hoeveelheden verkrijgbaar.
- Het brandt zonder CO_2 te produceren.
- Het verbrandingsproduct wordt gemakkelijk opgevangen (vast poeder met hoge dichtheid).
- Het roestpoeder kan worden geregenereerd met behulp van waterstof.
- Zowel ijzerpoeder als roestpoeder kunnen gemakkelijker vervoerd worden.
- Omdat in het proces hoogwaardige warmte vrijkomt kan dit nuttig gebruikt worden voor processen die dit daadwerkelijk nodig hebben zoals het opwekken van elektriciteit waarna de restwarmte die hierbij ontstaat benut kan worden voor het verwarmen van kassen, dit zou in potentie een vervanging kunnen worden van de WKK-installatie zonder de bijhorende CO_2 uitstoot.

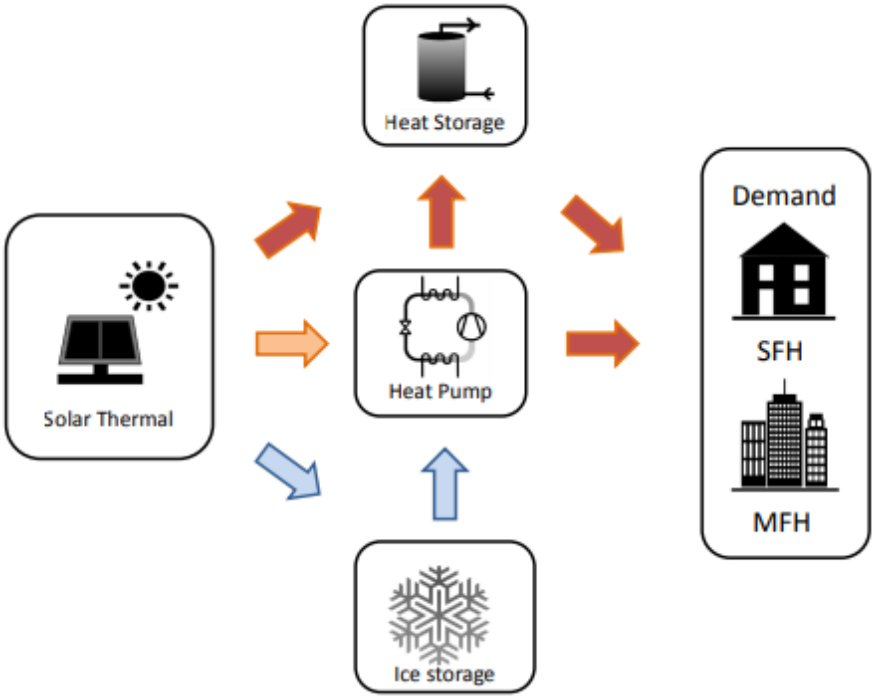
3.2.2 Uitdagingen voor de toepassing in kassen

- De technologie voor de verbranding en regeneratie (met behulp van waterstof) is nog in ontwikkeling en bevindt zich nog in de testfase.
- Er wordt zeer hoogwaardige warmte gegenereerd – dit kan gunstig zijn voor industriële processen waarbij soms stoom van 800 – 900°C nodig is. Echter, voor de verwarming van kassen volstaat laagwaardige warmte van 50 tot 100°C zoals nu gebruikelijk is in de situatie met een warmtepomp of een gasketel. Het omzetten van hoogwaardige warmte naar laagwaardige warmte voor verwarming kan dan ook als verspilling van exergie worden beschouwd (hoewel diezelfde exergieverspilling uiteraard nu ook plaats vindt bij gewone gasgestookte ketels).
- De hoge oplaad temperatuur: In [2], werd energieverbruik al veel hoger ingeschat voor een hoge temperatuur warmteopslag met $MgSO_4$ (thermochemische opslag bij 122°C) vergeleken met warmteopslag bij lagere temperaturen. Dit kwam door het elektriciteitsverbruik van de hulpwarmtepomp voor het opwekken van de hoogwaardige warmte naast het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp ontvochtiger.
- Pyrofoor ijzer wordt in het proces zoals voorgesteld door RIFT geproduceerd met behulp van waterstof, elektrolyse van water tot waterstof gebruik stroom en gaat gepaard met verliezen waardoor de algehele energie efficiëntie van de cyclus een stuk lager uit zal pakken dan bij ter plekke opgeslagen laagwaardige warmte.

3.3 SolarEis

De bedrijven Solareis en Viessmann gebruiken een ondergrondse ijscontainer als opslagmedium – dit is gebaseerd op de reductie van het benodigde opslagvolume vanwege de hoge latente warmte van de water-ijsovergang (334 kJ/kg bij 0°C). Bij het bevriezen van een specifieke hoeveelheid water van 0°C komt dezelfde energie vrij als bij het koelen van dezelfde hoeveelheid water van 80°C naar 0°C (Energiedichtheid voor verwarming/koeling 1,16 kWh/m³K).

De container met ijs/water, meestal gemaakt van beton, wordt onder de vriesdiepte van de grond geplaatst. Tijdens de zomerperiode is het water in vloeibare vorm. Aan het einde van de zomer onttrekt de warmtepomp warmte aan de ijsbuffer om aan de verwarmingsbehoefte van de kas te voldoen, waarbij het water tot ijs bevriest. De ijsbuffer fungeert dan als een vorm van koele opslag.



Figuur 3.4 *Schematische weergave van het principe van zonne-ijsopslagsystemen voor een- en meergezinswoningen [17]: de pijlen illustreren de warmtefluxen die zich op verschillende temperatuurniveaus bevinden – rood voor hoge temperaturen (> 30°C), oranje voor gemiddelde temperaturen (> 10°C) en blauw voor koude temperaturen (< 10°C).*

3.3.1 Potentie voor toepassing in kassen

Bij aanvang van de teelt werkt de warmtepomp in verwarmingsmodus, daarbij wordt door de koude warmtewisselaar geproduceerde koellast gebruikt om het water in de ijsbuffer te bevriezen. Wanneer de ontvochtigingsvraag stijgt ten opzichte van de verwarmingsvraag, wordt de koellast uit de ijsbuffer opgebruikt, waardoor het ijs in water smelt.

De buffer kan warmte afgeven aan de omringende bodem, op basis van de temperatuur van de bodem tot aan de bufferdiepte en de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor de betonbuffer. Voor de eenvoud worden de verliezen buiten beschouwing gelaten bij het modelleren van het opslagsysteem voor de kas (paragraaf 4.2.2).

- Hogere energiedichtheid dan water – minder opslagvolume vereist.
- IJsbuffers kunnen op een kleinere diepte worden geplaatst dan boorgaten/aquifer/ grondwarmtepompen. Ze vereisen hierdoor geen speciale bouwvergunningen.
- Het temperatuurverschil van het opslagvat met de omgeving is met 10 graden (verschil ondiepe bodem – ijs) kleiner dan bij een opslagtank voor warm water.

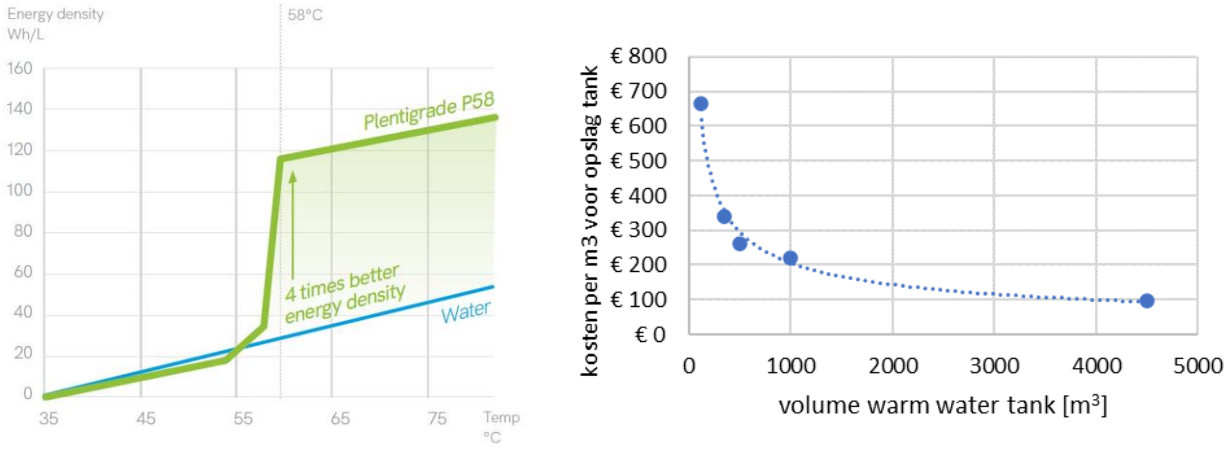
3.3.2 Uitdagingen voor de toepassing in kassen

- Er moet gezorgd worden voor een gecontroleerde en uniforme ijsvorming in de container, zodat de warmte uitwisseling nog steeds goed werkt.
- Het ingraven van een constructie van beton kan prijzig zijn.
- De temperatuur van de opslag ligt lager dan bij een WKO-doublet waardoor de COP iets lager zal uitpakken.

3.4 Sunamp

Sunamp gebruikt een faseveranderingsmateriaal (phase-change-material PCM) om de warmtecapaciteit van warmwatertanks ten opzichte van water met een factor 4 te vergroten. Het door Sunamp gebruikte materiaal ('plentigrade'-58 genoemd) is gebaseerd op natriumacetaattrihydraat (SAT). SAT ondergaat een smeltovergang bij een smeltpunt van 58°C. Voor deze transitie zijn energiedichtheidswaarden gerapporteerd in het bereik van 226–260 kJ/kg, of 63–72 Wh/kg. [18]. Het materiaal is niet giftig en heeft een geringe ontvlambaarheid.

Om het materiaal gedurende >40 000 verwarmings-/koelingscycli te stabiliseren heeft Sunamp additieven ontwikkelt om de precipitatie van watervrij natriumacetaat te voorkomen (minder dan 1%wt natriumzout van polymethacrylzuur), een voorloper van PMMA) en een tweede additief om kristalvorming te induceren en onderkoeling te voorkomen (~2%wt dinatriumsulfaat) en ~40%wt water [18]. Op basis van de handelswebsite made-in-china.com/ wordt de bulk prijs van het voornaamste ingrediënt natrium acetaat-tri-hydraat geschat op tussen de 250 en 600 euro per ton. Wat neer komt op 150 tot 360 euro per ton PCM, 2140 tot 5140 euro per MWh of 600 tot 1430 euro per GJ.

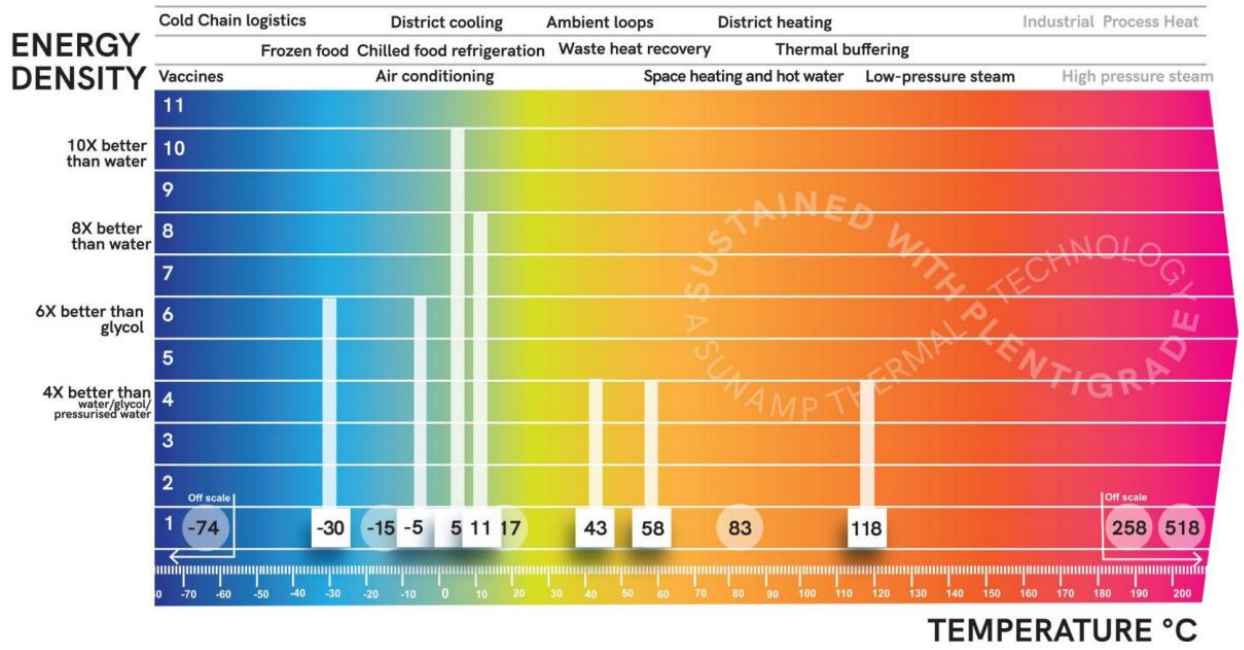


Figuur 3.5 *Links het werkingsmechanisme van Sunamp's phase change materiaal [19], rechts de kosten van een warmwater opslagtank.*

Commerciële Sunamp warmteopslag batterijen zijn verkrijgbaar in verschillende maten voor verschillende opslagcapaciteiten, met vacuümisolatiepanelen om warmteverliezen te minimaliseren [20].

Om de warmtebatterij op te laden, moet er warmte worden geleverd bij 60-62°C om het PCM te laten smelten tot de vloeibare fase. Dit gebeurt doorgaans met behulp van thermische zonnecollectoren of warmtepompen. Warmtewisselaars die in de thermische batterij zijn geplaatst, worden gebruikt om warmte aan koud water te leveren, waardoor de thermische batterij wordt ontladen.

Vanwege de primaire toepassing van Sunamp voor het leveren van warm water in huizen (naast verwarming) en de daaruit voortvloeiende noodzaak om legionella te voorkomen, gebruiken hun commerciële producten voornamelijk plentigrade-58 [21]. Ze hebben echter een breed scala aan PCM-materialen met verschillende overgangstemperaturen gepatenteerd, wat interessant zou kunnen zijn voor laagwaardige warmte-koude-opslag in kassen (Figuur 3.6). De commerciële beschikbaarheid van deze verschillende PCM's is nog niet bekend.



Figuur 3.6 *Temperatuur bereik van de verschillende PlentigradeTM phase change materialen van Sunamp [21].*

3.4.1 Potentie voor toepassing in kassen

- Faseovergangstemperatuur komt met ~60°C overeen met relevante temperaturen voor kasverwarming. Waardoor ook voor de opgeslagen warmte de efficiëntie winst van de warmtepomp benut kan worden.
- Stabiel gedurende meerdere cycli (>40.000), niet giftig.
- Zou verpakt in ballen in bestaande dagbuffers kunnen worden toegepast om de capaciteit te verhogen.

3.4.2 Uitdagingen voor de toepassing in kassen

- De energiedichtheid is relatief laag in verhouding tot de oplossingen van Cellcius en Solareis.
- Voor de warmtepomp ontvochtiger die we in dit onderzoek beschouwen, wordt de hoogste COP bereikt bij ~45 °C – de vereiste om het systeem op te laden (gebaseerd op plentigrade-58) bij 60 °C zal de prestatie-efficiëntie beïnvloeden.

3.5 Samenvatting

Er zijn vele bedrijven die werken aan oplossingen voor warmteopslag: Polar Night (op zand gebaseerde opslag van voelbare warmte), Altiro Energy (opslag op basis van ijzerpoeder), SaltX (zout met nanocoating voor warmteopslag), enz. Veel van deze oplossingen zijn echter ofwel bedoeld voor industriële toepassingen (waarbij de bedrijfstemperaturen vrij hoog zijn, vergelijkbaar met het geval van RIFT), of ze zijn ontworpen voor woningen, waar de warmtebelasting en daarmee de ontworpen opslagvolumes veel lager zijn dan die nodig zijn voor kassen, vaak zijn gegevens over de energiedichtheid en de temperaturen zijn moeilijk publiekelijk te verkrijgen.

Tabel 3.1 *Samenvatting van de meest onderscheidende karakteristieken van de in beschouwing genomen commerciële technologieën voor seizoensopslag van energie.*

Bedrijf	Seizoensopslag technologie/materiaal	Energieopslag dichtheid	Temperatuur (°C)/opslag concept	Andere eigenschappen
Cellcius	Thermochemische opslag met behulp van K_2CO_3 zout (de)hydratie	361 kWh/m^3	Afgifte temperatuur van reactie: 33 – 45°C hoger dan het aanvoer water; **lage temperatuur opslag**	• K_2CO_3 composiet ontwikkelt door Cellcius: stabiel voor 20+ jaar • Niet giftig • Geen opslagverliezen of zelfontlading
RIFT	Thermochemische opslag met behulp van de reductie en oxidatie van ijzer poeder	Vormingsenthalpie Fe_2O_3: 7.4 MJ/kg (of 2.05 kWh/kg)	Verbrandings-temperatuur: 1300 – 2000°C; **Zeer hoge temperatuur warmte opslag**	• IJzer poeder <> ijzeroxide (roest): extreem stabiel over vele laad/ontlaad cycli • Niet giftig; • Geen opslagverliezen of zelfontlading
SolarEis	Faseovergang (Latente vormingsenergie) van ijsvorming op basis van water	- Latente energie van faseovergang bij 0°C: 0.093 kWh/kg; Soortelijke warmte van verwarmen/ afkoelen: 0.0058 kWh/m³K	Water in de vorm van ijs opgeslagen iets onder 0°C; **Koudeopslag**	• Water <> ijs: oneindige laad ontlaad cycli; • Niet giftig • Klein temperatuurverschil met bodem dus weinig verlies tijdens opslag
Sunamp	Faseovergang (Latente vormingsenergie)	- Latente energie van faseovergang bij 58°C: 0.063–0.072 kWh/kg	Smelt temperatuur: 58°C; **Lage temperatuur warmteopslag**	• Stabiel >40000 cycli; • Niet giftig, niet brandgevaarlijk

Bij het merendeel van de beschreven technieken wordt de mogelijkheid voor seizoensopslag slechts voor de volledigheid benoemt en worden de systemen duidelijk ontworpen voor meerdere laad/ontlaadcycli per jaar, bij Sunamp wordt op compacte dagbuffers ingezet, bij Cellcius wordt onder andere ingezet op het mobiel maken van restwarmte en suggereren de genoemde vermogen tot capaciteitsverhoudingen dan ook eerder een cyclustijd van slechts één of enkele dagen. Enkel SolarEis lijkt echt voor seizoensopslag ontworpen te zijn.

In het volgende hoofdstuk worden twee opslagprincipes – van Cellcius en SolarEis – geëvalueerd voor de vereiste opslagvolumes om te voldoen aan de warmtebehoefte en onevenwichtigheden van twee verschillende teelten.

4 Energie verbruik van moderne efficiënte kassen

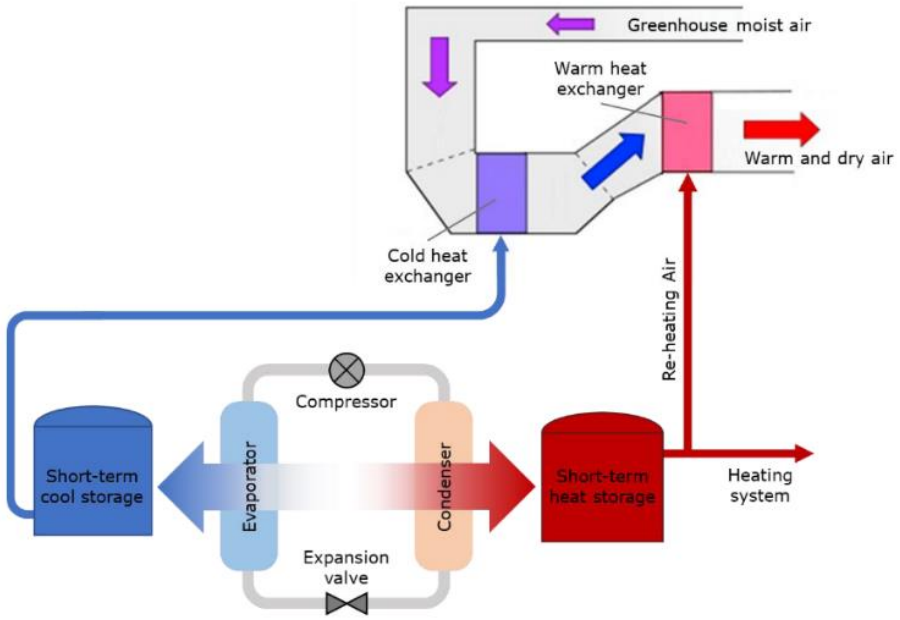
In diverse projecten is al aanzienlijke vooruitgang geboekt in het terugdringen van het warmtegebruik in kassen. Het verder verbeteren van de isolatie kan helpen, maar er zal een mismatch blijven bestaan tussen de warmtevraag en de warmteproductie door actieve ontvochtiging. In projecten als de teelt onder glas met lage thermische emissie (low-ε glas voor onbelichte teelt van tomaat en momenteel aubergine), en in de fossielvrije demokasKas2030 low-ε glas voor een belichte teelt van potanthurium) is al gebleken dat het warmteverbruik ver teruggedrongen kan worden tot minder dan 100 kWh/m^2.

Bovendien is bij deze projecten actieve ontvochtiging met warmteterugwinning aanwezig waardoor een aanzienlijk deel van de warmtevraag direct kan worden gedekt met de warmtepomp ontvochtiger. Helaas is er gedurende het seizoen nog steeds sprake van een (beperkte) onbalans tussen de warmteproductie en de warmtevraag. Als er in december een klein tomaten-, paprika- of aubergineplantje in de kas wordt geplaatst, is er warmtevraag, maar is de ontvochtigingsvraag nul. Potanthurium heeft een lage verdamping en een hoge vochttolerantie, waardoor de ontvochtigingsbehoefte beperkt blijft.

Om deze kloof tussen warmteaanbod en warmtevraag te overbruggen is seizoensopslag onmisbaar. Het kan interessant zijn om te kijken hoe de vraag naar seizoensopslag zal variëren op basis van deze verschillende omstandigheden. Er worden ook vergelijkingen gemaakt voor de commerciële oplossingen die in de vorige sectie zijn beschreven om hun haalbaarheid voor opslag te beoordelen.

4.1 Warmtepomp ontvochtiger met warmteterugwinning

In dit systeem wordt voor ontvochtiging door condensatie op een koud oppervlak gebruik gemaakt van een mechanisch koelsysteem met een warmtepomp (Figuur 4.1), de elektrisch aangedreven gesloten kringloop met koudemiddel zorgt voor koelbelasting bij de verdamper en verwarmingsbelasting bij de condensor van het systeem. De koelbelasting wordt geleverd aan de koude warmtewisselaar, waar waterdamp door condensatie uit de luchtstroom wordt verwijderd, omdat de temperatuur lager is dan het dauwpunt. Zo wordt de vochtige kaslucht na doorgang door de koude warmtewisselaar droger en kouder.

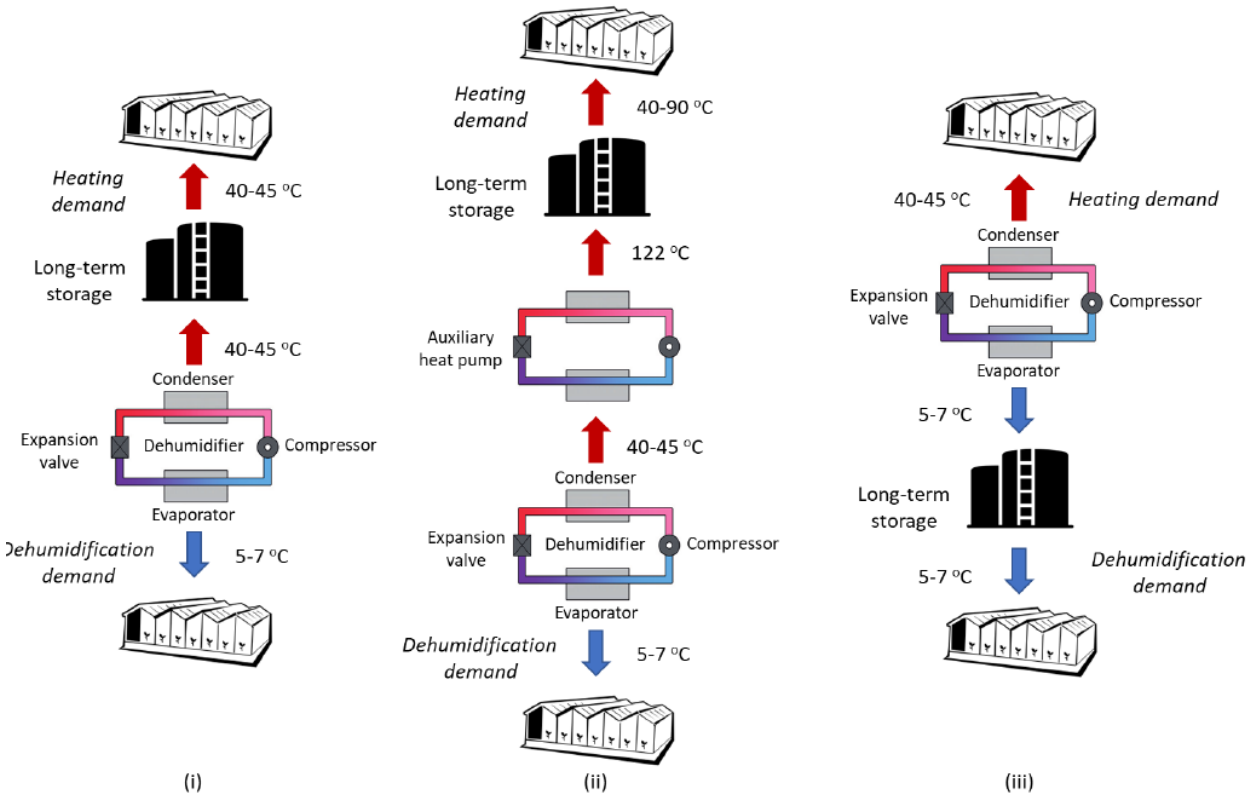


Figuur 4.1 *Schematische weergave van warmtepomp ontvochtigers [2].*

Aan de andere kant worden de verwarmingsbelastingen aan de warme warmtewisselaar geleverd. De droge maar koude lucht wordt dus weer warm voordat deze de kas binnenkomt (opwarmen van de lucht). Omdat de lucht bij de warme warmtewisselaar droger is dan bij de koude warmtewisselaar, is de benodigde thermische energie om de lucht opnieuw te verwarmen op hetzelfde temperatuurniveau (voelbare warmte) lager dan de onttrokken energie bij de koude warmtewisselaar (voelbare en latente warmte). Zo kan de gewonnen overtollige warmte worden gebruikt om aan de warmtevraag van de kas te voldoen. Omdat de latente warmte die wordt verkregen tijdens de condensatie kan worden gebruikt als extra voelbare warmte, hebben warmtepomp ontvochtigers in kassen een groot potentieel om het netto energieverbruik te verminderen.

De prestatiecoëfficiënt (COP) van een warmtepomp wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de aangevoerde nuttige warmte (verwarmingsproces) of afgevoerde (koelproces) en de input (elektriciteit). Hierbij wordt gedacht aan een warmtepomp met een typische COP van 4 voor verwarming en 3 voor koeling. In dit systeem werkt de koude warmtewisselaar op zo'n 5-7 °C en de warme warmtewisselaar op 40-45 °C, een ander werkgebied zal invloed hebben op de prestaties van het systeem en met name een groter temperatuurverschil tussen de koude en warme zijde zullen de prestaties negatief beïnvloeden.

Op basis van de bedrijfstemperatuur van de opslagsystemen kunnen drie verschillende energieopslagconcepten worden gedefinieerd, zoals weergegeven in Figuur 4.2. Dit zijn:
- Lage temperatuur warmteopslag (oftewel de condensor temperatuur)
- Hoge temperatuur warmteopslag
- Koudeopslag



Figuur 4.2 *Schematische weergave van drie verschillende warmte opslag concepten. – (i) warmte opslag bij lage temperatuur, (ii) warmteopslag bij hoge temperatuur, en (iii) koudeopslag [2].*

4.2 Warmtevraag bij tomaat

Zoals eerder toegelicht kan de warmtevraag van moderne en toekomstige kassen aanzienlijk worden verminderd. Om dit te bereiken zijn meerdere schermen, actieve ontvochtiging, telen volgens de regels van Het Nieuwe Telen (HNT) en glas met lage thermische emissie (low-ε glas) beschikbaar om de energieverliezen van de kas zo ver mogelijk te verlagen. Met modelsimulaties wordt de warmtevraag van verschillende gewassen met een lage warmtevraag berekend.

4.2.1 Beschrijving van de simulatie

Het buitenklimaat dat voor de simulaties wordt gebruikt, is het werkelijke klimaat in deze berekeningsperiode. Andere parameters worden weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 *Samenvatting van de simulatieparameters gebruikt voor de teelt van tomaten.*

Kas structuur	**Venlo-type**
Grootte	4 ha
Kasdek	Low-ε coating op enkel glas
Schermen	Verduisteringsscherm en transparant energiescherm
Ontvochtigingsysteem en setpoints	Warmtepomp ontvochtiger, RV setpoint overdag: 87%, nacht: 90%
Kunstlicht	Nee
Gewas	Tomaat
Teelt periode	27 December 2021 – 7 November 2022

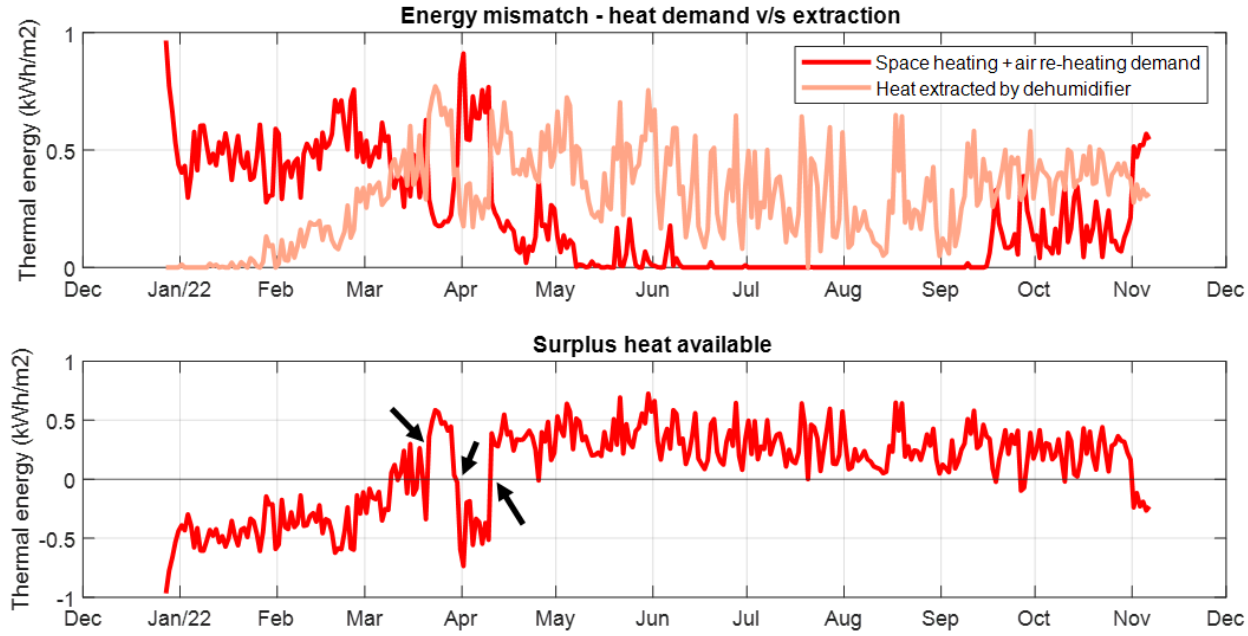
4.2.2 Simulatie resultaten

4.2.2.1 Warmteopslag

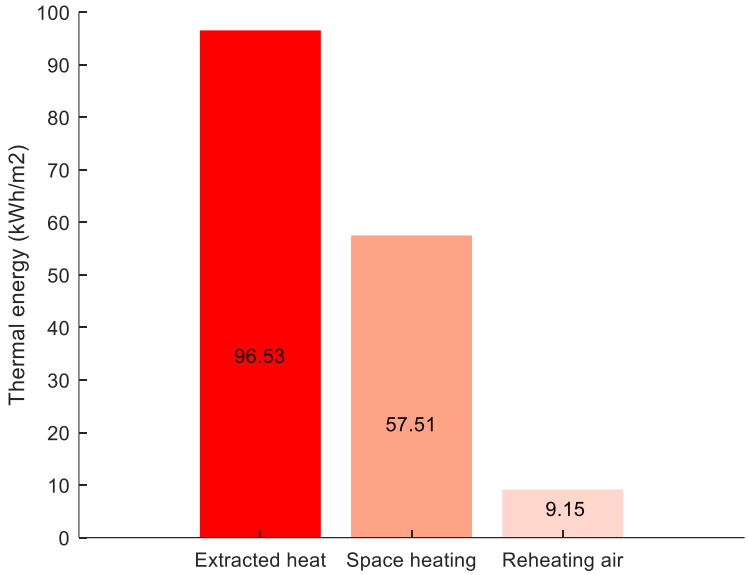
Figuur 4.3 toont de totale warmtevraag (kasluchtverwarming + opwarmen van de lucht na de condensatiefase van de luchtontvochtiger) versus de warmte die door de warmtepomp ontvochtiger wordt onttrokken.

Er is vooral in de winter en het vroege voorjaar een hoge verwarmingsvraag van de kas. In die periode is de ontvochtigingsvraag vanwege de ontwikkelingsfase van het gewas relatief laag en is de onttrokken warmte nog steeds niet voldoende om aan de warmtevraag te voldoen. In de zomer is de ontvochtigingsvraag hoog en is de teruggewonnen latente warmte uit de kaslucht veel hoger dan de verwarmingsvraag.

Het gebruik van de overtollige energie door deze aan de kas te leveren om aan de verwarmingsvraag te voldoen, vereist de implementatie van een lange-termijn opslag die thermische energie kan opslaan van de zomer tot de lente van het volgende groeiseizoen.



Figuur 4.3 *Boven: Verwarmingsvraag van de gesimuleerde kas van 4 ha met low-ε kasdek over de teeltperiode (donkerrode curve) en warmte onttrokken door de warmtepomp ontvochtiger (lichtrode curve) over dezelfde periode; Onder: De onttrokken energie minus de energievraag (voor kasluchtverwarming en de totale energie die wordt gebruikt voor het opnieuw verwarmen van de ontvochtigde lucht), d.w.z. de overtollige warmte die beschikbaar is gedurende de teeltperiode.*

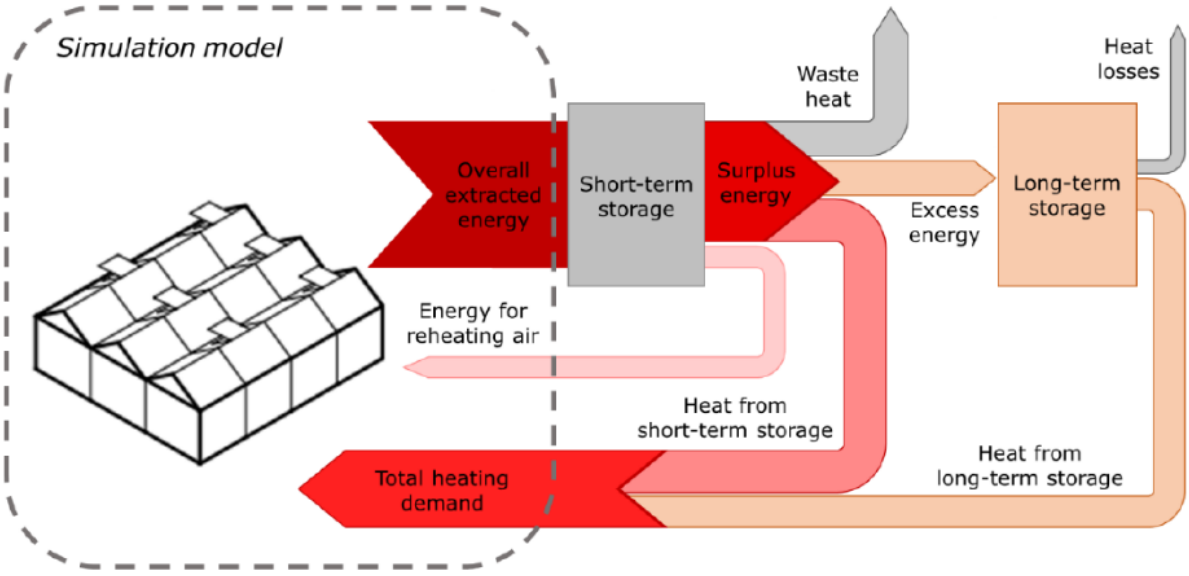


Figuur 4.4 *Totaal onttrokken warmte door warmtepomp ontvochtiger, en de warmtevraag voor kasluchtverwarming en het opnieuw verwarmen van lucht.*

De totale onttrokken warmte over de teeltperiode is ruim voldoende om in de totale warmtevraag van de kas te voorzien en een aanzienlijk deel van de overtollige warmte zal als restwarmte moeten worden afgevoerd. Dit betekent dat de regeling kan worden geoptimaliseerd; in de zomer kan het bijvoorbeeld in bepaalde mate goedkoper zijn om meer via de ramen te ontvochtigen om zo in balans te komen.

Enkele belangrijke aandachtspunten voor de potanthurium teelt zijn:

- Figuur 4.3 laat zien dat tussen 21-29 maart en na 10 april (aangegeven door de zwarte pijlen) de onttrokken warmte hoger is dan de benodigde warmte – dit betekent dat de dagelijkse buffer voldoende energie input krijgt om aan de dagelijkse warmtevraag te voldoen, en lange-termijn opslag is niet nodig.
- Vóór 21 maart en tussen 29 maart en 10 april kan de warmtepomp ontvochtiger niet voldoende warmte onttrekken om aan de warmtevraag te voldoen. In de warmtevraag moet dan worden voorzien door de lange-termijn energieopslag. De lange-termijn opslag moet dus voldoende opslagcapaciteit hebben om in de warmtevraag in deze periode te kunnen voorzien.
- Van 10 april tot het einde van de teeltperiode (7 november) wordt overtollige warmte (onttrokken warmte minus de warmtevraag) naar de lange-termijn opslag geleid zodat deze bij de volgende teelt volledig 'opgeladen' de nieuwe cyclus zal beginnen.
- Ondertussen moet de dagbuffer in staat zijn om de hoogste waarde van de dagelijks onttrokken energie door de warmtepomp ontvochtiger op één dag op te slaan. De dagelijkse buffer zou wat warmte kunnen vasthouden na het leveren van de vraag naar ontvochtigde lucht voor kasluchtverwarming/opwarming, die zal worden overgedragen naar de volgende dag. Zo kunnen er meerdere dagen zijn dat er meer warmte beschikbaar is dan de opslagcapaciteit van de dagbuffer. Deze warmte wordt ofwel afgevoerd als restwarmte, ofwel tegen het einde van de teeltperiode doorgestuurd naar de lange-termijn opslag om deze op te laden voor het volgende teeltseizoen.
- Daarnaast zullen beide buffers warmte afgeven aan de omgeving, op basis van het temperatuurverschil tussen de buffertemperatuur en de omgevingstemperatuur, en de isolatie van de buffer die de warmte opslaat.



Figuur 4.5 *Diagram van de warmtestroom in de kas en de warmteopslag [2].*

Op basis van de aanpak uit [2] is het systeem uit Figuur 4.5 gebruikt om de warmtestromen tussen de kas en de warmteopslag op korte en lange termijn in de tijd (t) te modelleren.

Lange termijn warmteopslag (TES):

- Opslagmedium, energiedichtheid en maximale temperatuur van de TES zijn gebaseerd op de commerciële technologieën voor evaluatie (paragraaf 3.4).
- De warmteverliezen uit de TES zijn nul in het geval van thermochemische opslag in K_2CO_3 en worden voor de ijsbuffer genegeerd om de modellering te vereenvoudigen.
- Volledig opgeladen aan het begin van de teelt.
- Voor de 4 ha kas met low-ε glas met tomaten op basis van de buitenweersomstandigheden in 2021-2022 (die de warmtevraag, ontvochtigingsvraag en bufferverliezen bepalen) komt de maximaal benodigde capaciteit van de lange-termijn opslag uit op 1,84 GWh voor 4 ha.

Korte termijn/dagelijkse buffer:

- Bevat water als opslagmedium (energieopslagdichtheid = 1,16 kWh/m³K).
- Moet voldoende opslagcapaciteit bevatten om de maximale hoeveelheid dagelijks onttrokken warmte op te vangen – dit bepaalt het volume van de buffer. Er wordt aangenomen dat het een cilindrische vorm heeft met een hoogte van 10 meter.
- Max. watertemperatuur in buffer = 45°C, min. watertemperatuur = 30°C (voor optimale werking van de warmtepomp ontvochtiger).
- De buffer verliest warmte aan de omgeving op basis van de omgevingstemperatuur en de thermische overdrachtscoëfficiënt van het materiaal van de tank. Een mogelijk materiaal voor de buffer (200 mm dik glasvezel) en de bijbehorende waarden voor de thermische overdrachtscoëfficiënt (~0,19 W/m^{2}K) zijn afkomstig uit [2].

TES Ontlaadfase:

- Lange-termijn warmteopslag (TES) levert warmte om aan de vraag naar kasluchtverwarming te voldoen.
- De warmtepomp ontvochtiger werkt in de ontvochtigingsmodus.
- De energie die uit de ontvochtiging wordt gehaald, wordt opgeslagen in een dagelijkse buffer en gebruikt om ontvochtigde lucht opnieuw te verwarmen (indien nodig).

In deze fase geldt:

- **Warmtetoevoer naar TES**:
  - Geen
- **Warmteverliezen uit TES**:
  - Verwarmingsvraag van de kas (Q_{heat})
  - Warmteverliezen uit de TES (Q_{TES}-verliezen): 0 voor thermochemische opslag, verondersteld nul te zijn voor de SolarEis opslag (voor de eenvoud)
- **Warmtetoevoer naar dagbuffer**:
  - Warmte onttrokken door warmtepomp ontvochtiger ($Q_{extracted}$)
- **Warmteverliezen uit dagbuffer**:
  - Warmtevraag voor het opwarmen van ontvochtigde kaslucht (Q_{reheat})
  - Warmteverliezen uit de dagbuffer (Q_{buffer_losses}), zoals hieronder berekend:

$$Q_{\text{buffer_losses}} = U * A_{buffer} * (T_{buffer} - T_{amb})$$

  - U : warmteoverdrachtscoëfficiënt genomen uit [2]
  - A_{buffer} : oppervlak van de buffer, genomen door het buffervolume te verkrijgen (uit de maximaal onttrokken warmte) en uit te gaan van een cilinder met een hoogte van 10 m
  - T_{buffer} : effectieve buffertemperatuur geschat op basis van de hoeveelheid buffer die gevuld is, met behulp van de maximale en minimale watertemperatuur
  - T_{amb} : dagelijkse gemiddelde omgevingstemperatuur

De warmtestromen worden als volgt gemodelleerd:

$$Q_{buffer}(t_i) = Q_{buffer}(t_{i-1}) + Q_{extracted}(t_i) - Q_{reheat}(t_i) - Q_{buffer_losses}(t_{i-1})$$

$$Q_{TES}(t_i) = Q_{TES}(t_{i-1}) - Q_{heating}(t_i) - Q_{TES_losses}(t_i)$$

Voor de eerste dag worden de bufferverliezen op 0 gezet.

$$Q_{\text{buffer_losses}}(t_0) = 0$$

$$Q_{\text{buffer}}(t_0) = 0$$

Zodra de lange-termijn opslag leeg is, gaat het systeem over naar de fase met een warmteoverschot, waarbij de onttrokken warmte door de warmtepomp ontvochtiger voldoende is om aan de warmtevraag voor zowel kasluchtverwarming als het opnieuw opwarmen van ontvochtigde lucht te voldoen.

TES Oplaadfase:

- Lange-termijn warmteopslag (TES) start volledig ontladen.
- Kasluchtverwarming en het opwarmen van ontvochtigde lucht gebeurt met behulp van warmte uit de dagbuffer.
- Overtollige energie uit dagbuffer wordt in eerste instantie afgevoerd als restwarmte. Dichter bij het einde van de teelt wordt overtollige warmte aan TES geleverd (dit wordt gedaan om de tijd dat de TES volledig is opgeladen te minimaliseren en eventuele warmteverliezen vóór de volgende teeltcyclus te minimaliseren).

In deze fase geldt:

- **Warmtetoevoer naar TES**:
  - 0 in het begin
  - Tegen het einde van de teelt wordt deze opgeladen met overtollige warmte, $Q_{surplus}$, uit de dagbuffer (dit is de overtollige warmte over de totale warmteopslagcapaciteit van de dagbuffer, nadat de dagwaarde ($Q_{extracted} - Q_{heating} - Q_{reheat}$) is toegevoegd aan de buffer)
- **Warmteverliezen uit TES:**
  - Geen, in het begin, omdat het geen warmte bevat
  - Nadat TES begint met opladen voor de volgende cyclus, Q_{TES_losses} (gebaseerd op de warmteoverdrachtscoëfficiënt van het geselecteerde opslagmateriaal, omgevingstemperaturen en u-waarde van de container)
- **Warmtetoevoer naar dagbuffer**:
  - Warmte onttrokken door warmtepomp ontvochtiger ($Q_{extracted}$)
- **Warmteverliezen uit dagbuffer**:
  - Vraag naar verwarming van kaslucht (Q_{heat})
  - Warmtevraag voor het opwarmen van ontvochtigde kaslucht (Q_{reheat})
  - Warmteverliezen uit de dagbuffer (Q_{buffer_losses}), zoals eerder berekend

De warmtestromen worden als volgt gemodelleerd:

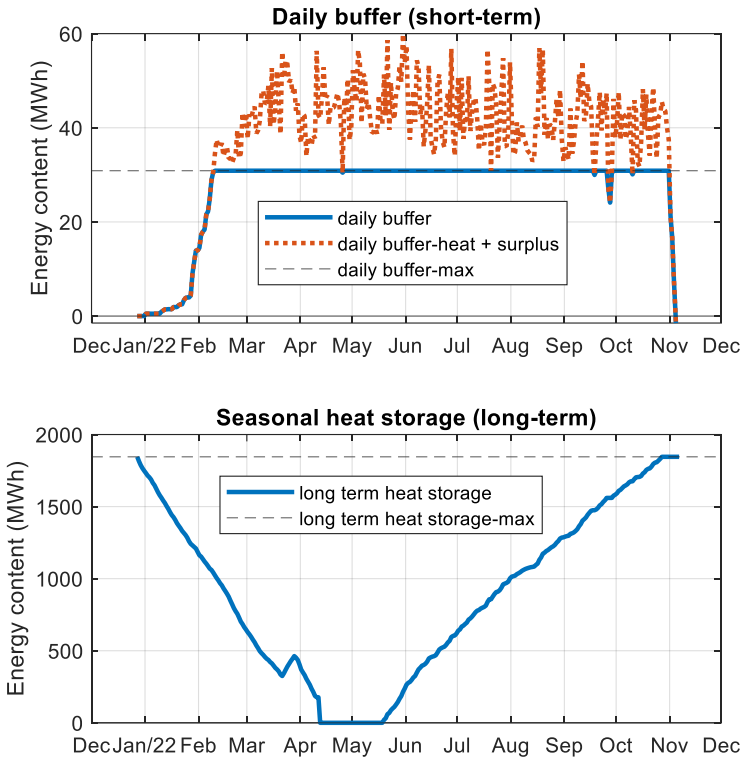
$$Q_{buffer}(t_i) = Q_{buffer}(t_{i-1}) + Q_{extracted}(t_i) - Q_{reheat}(t_i) - Q_{heating}(t_i) - Q_{buffer_losses}(t_{i-1})$$

$Q_{surplus}(t_i) = Q_{buffer}(t_i) - Q_{buffer_{max}}$ (om eerst ontladen en later naar de TES gestuurd te worden)

Wanneer het opladen van de TES begint (startdatum zodanig genomen dat de maximale opslagcapaciteit tegen het einde van het teeltseizoen wordt bereikt):

$$Q_{TES}(t_i) = Q_{TES}(t_{i-1}) + Q_{surplus}(t_i) - Q_{TES_losses}(t_i)$$

De resulterende warmtestromen van/naar de dagbuffer en TES zijn weergegeven in Figuur 4.6.



Figuur 4.6 *Energieniveau in de korte- en lange-termijn warmteopslag voor een tomaten kas van 4 hectare.*

Het bovenste deel van Figuur 4.6 toont de warmtetoevoer naar de dagbuffer – de grijze stippellijn geeft de maximale capaciteit van de dagbuffer aan. Rond februari, wanneer de ontvochtigingsvraag van de kas begint toe te nemen, wordt er een aanzienlijke hoeveelheid energie aan de kas onttrokken. Eventuele energie boven de maximale capaciteit van de dagbuffer (aangegeven met de rood gestippelde lijnen) zal tijdens de laadperiode ofwel naar de lange-termijn opslag (TES) moeten worden geleid, ofwel als restwarmte moeten worden afgevoerd.

De in de TES opgeslagen warmte wordt uiterlijk 10 april benut, waarna de warmtevraag dagelijks kan worden ingevuld door de dagbuffer.

Om de TES tegen het einde van de teeltperiode op de maximale opslagcapaciteit te brengen, begint het opladen eind mei.

Voor thermochemische opslagmedia kan de TES aan het begin van de volgende teeltcyclus precies op het gewenste niveau worden geladen. Bij latente warmteopslag zal ook rekening gehouden moeten worden met de verliezen uit de TES tussen twee teeltcycli. De buffercapaciteit zou dan groter moeten zijn om de overtollige warmte op te slaan die tijdens de leegstand periode verloren gaat.

Het benodigde opslagvolume wordt sterk beïnvloed door de ontvochtigingsinstellingen en capaciteit en de isolatiegraad van de kas, waardoor de onttrokken hoeveelheid warmte uit de kas verandert.

De maximaal benodigde opslagcapaciteit van de lange-termijn warmteopslag (TES) komt voor de 4 ha grote tomatenkas uit op 1.8 GWh.

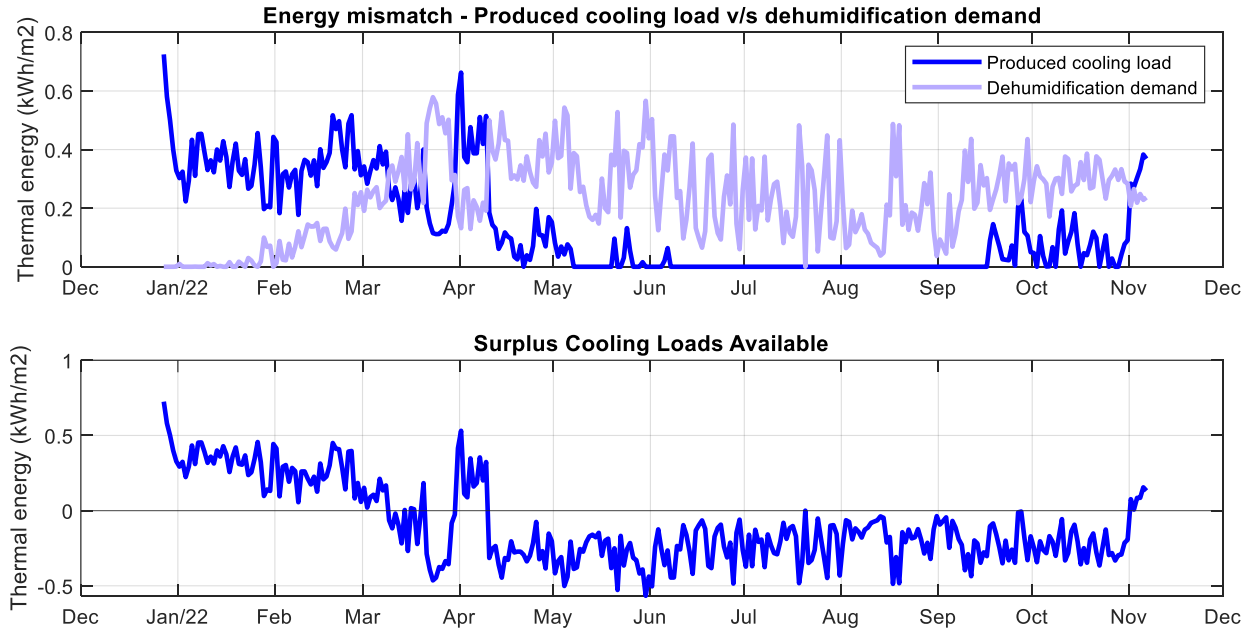
De genoemde opslag, wordt tussen teeltstart en medio april ontladen. In de ontlaadfase zou dit een continue capaciteitsvraag van ca. 20 W/m^2 betekenen. Een horizontale bodemwarmtewisselaar onder de kas, zelfs de ongunstige situatie waarin de bodem bestaat uit droge zandgrond waar in de literatuur over 10 tot 15 W/m^2 wordt gesproken (Ricardo, n.d.) [22], kan dan in beeld komen. Bij andere situaties kan gemiddeld zo'n 22 W/m^2 uit een horizontale warmtewisselaar worden onttrokken met kortstondige piekvermogens tot 80 W/m^2 (Hu, Rizvi, Tobber, & Wuttke, 2023) [23]. Hierbij wordt uitgegaan dat de temperatuur van die bodem ca. 10 °C is, dit is het langjarige gemiddelde buiten. Onder de kas zal dit dus hoger liggen. In dit rapport wordt niet verder ingegaan op dergelijke opslagsystemen.

4.2.2.2 Koudeopslag

Een alternatieve benadering om energie op lange-termijn op te slaan, is het gebruik van een koudeopslag. In dit geval geldt:

- De warmtepomp ontvochtiger begint aan het begin van de teeltcyclus in de verwarmingsmodus te werken, d.w.z. op basis van de verwarmingsvraag van de kas. Op dit moment is er geen ontvochtigingsvraag. De warmte die door de warmtepomp ontvochtiger ($Qheating$) aan de kas wordt geleverd, creëert een koelbelasting op de koude warmtewisselaar van de warmtepomp.

Op basis van de veronderstelde COP van 3 voor koeling en 4 voor verwarming (paragraaf 4.1) is voor een gegeven hoeveelheid thermische energie die door de warmtepomp aan de warme warmtewisselaar wordt geleverd, de gegenereerde koellast bij de koude warmtewisselaar een factor ¾ lager per eenheid elektrisch vermogen die door de warmtepomp wordt verbruikt. De temperaturen bij de koude warmtewisselaar zijn 5-7°C (Figuur 4.2); wanneer de warmtepomp wordt gebruikt voor ontvochtiging, wordt een koud oppervlak op deze temperatuur gebruikt om waterdamp te condenseren. De koellast die nodig is voor ontvochtiging, ook wel de ontvochtigingsvraag genoemd, kan worden verkregen (met behulp van een vergelijkbare redenering over de COP voor verwarmen en koelen) door dezelfde factor ¾ toe te passen op de onttrokken warmte ($Qextracted$) verkregen uit de simulatie (Figuur 4.7).



Figuur 4.7 *Boven: Geproduceerde koellast (gebaseerd op warmtevraag) in de gesimuleerde kas van 4 ha met een low-ε kasdek over de teeltperiode (donkerblauwe curve) en ontvochtigingsvraag in de warmtepomp ontvochtiger (lichtblauwe curve) over dezelfde periode; Onder: De koellast minus de ontvochtigingsvraag (d.w.z. overtollige beschikbare koellast) over één teeltperiode.*

- De koellast die wordt gegenereerd wanneer de warmtepomp in de verwarmingsmodus werkt, kan worden opgeslagen in een lange-termijn koudeopslag (CES) en aan de kas worden geleverd wanneer de behoefte aan ontvochtiging begint te ontstaan.
- De koudeopslag is in eerste instantie leeg en wordt opgeladen met de koellast omdat er in het begin geen ontvochtigingsvraag is.
- Naarmate de gewassen groeien en de buitentemperatuur warmer wordt, neemt de warmtevraag af en neemt de ontvochtigingsvraag toe. De ontvochtigingsvraag wordt in eerste instantie ingevuld met de koellast die in de koudeopslag is opgeslagen.
- Wanneer de ontvochtigingsvraag de beschikbare koelbehoefte in de koudeopslag begint te overschrijden, schakelt de warmtepomp ontvochtiger over van verwarmingsmodus naar ontvochtigingsmodus, waarbij hij ook een aanzienlijke hoeveelheid energie uit de kas haalt. Door de regeling te optimaliseren door een evenwicht te vinden tussen ontvochtiging door de warmtepomp en door de ventilatieopeningen, kan de input van energie worden verminderd.
- Vanaf dit moment kan de dagbuffer gebruikt worden om de onttrokken warmte op te slaan en om te voorzien in de veel kleinere warmtevraag (voor kasluchtverwarming en het opnieuw opwarmen van ontvochtigde lucht).
- Het benodigde volume van de lange-termijn koudeopslag wordt bepaald door de energie die overeenkomt met de maximale koellast die in de lange-termijn koudeopslag wordt opgeslagen.
- Het volume van de dagbuffer moet voldoende zijn om de hoogste dagwaarde aan onttrokken warmte op te slaan nadat de warmtepomp ontvochtiger overschakelt naar de ontvochtigingsmodus.

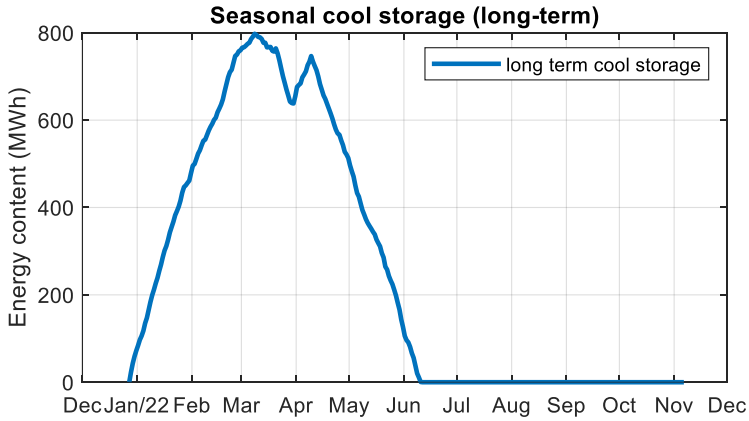
Het koudeopslag concept wordt als volgt gemodelleerd:

Bij start teelt:
- Lange-termijn koudeopslag (CES) laadt op
- Warmtevraag ($Q_{heating}$) wordt ingevuld met warmtepomp, koude ($Q_{cooling\ load}$) wordt opgeslagen in lange termijn koudeopslag (CES)
- Ontvochtigingsvraag ($Q_{dehumidification}$) wordt ingevuld door koude uit lange-termijn koudeopslag (CES)

Voor dag i:

$$Q_{CES}(t_i) = Q_{CES}(t_{i-1}) + Q_{cooling\ load}(t_i) - Q_{dehumidification}(t_i) - Q_{CES_losses}(t_i)$$

Zodra de koudeopslag op raakt:
- Warmtepomp schakelt naar ontvochtigingsmodus
- Onttrokken warmte gaat naar de dagbuffer
- Opnieuw opwarmen van ontvochtigde lucht en overige kasluchtverwarming komt vanuit de dagbuffer
- Hierna wordt de warmte uit de korte termijn opslag bijgevuld of geleegd op dezelfde manier als in verwarmingsmodus



Figuur 4.8 *Energieniveau in de lange-termijn koudeopslag (CES) over de teelt periode voor een tomaten kas van 4 ha.*

Hierop gebaseerd wordt de maximale opslagcapaciteit van de lange-termijn koudeopslag (CES) voor een kas van 4 ha 0.8 GWh. De benadering van koudeopslag vereist dus een veel kleinere opslagcapaciteit dan de benadering van warmteopslag, maar het effectieve vereiste opslagvolume zal ook afhangen van de materialen die worden gebruikt voor de warmte-/koudeopslag en hun energiedichtheid.

4.3 Warmtevraag bij potanthurium

Vergeleken met de tomatenteelt uit paragraaf 4.2 heeft de potanthurium een veel lagere verdamping. Net als bij het eerder beschreven systeem is er gebruik gemaakt van meerdere energieschermen, actieve ontvochtiging en telen volgens de regels van Het Nieuwe Telen om de warmtevraag terug te dringen. In plaats van glas met een lage emissie (low-ε glas) is gedurende de berekende periode echter diffuus glas als kasdekmateriaal gebruikt. Natuurlijk zonlicht werd aangevuld met LED-belichting en een schaduwscherm; de lichtsturing zorgt ervoor dat het totale PAR licht op het gewas de drempel van 400 µmol/s niet overschrijdt. Vernevelen wordt gebruikt om de optimale vocht- en temperatuurniveaus te behouden, gezien de lage gewasverdamping.

4.3.1 Beschrijving van de simulatie

Het gesimuleerde buitenklimaat is gelijk aan het daadwerkelijk gemeten buitenklimaat over de simulatieperiode. Overige parameters staan in Tabel 4.2.

Tabel 4.2 *Samenvatting van de simulatie parameters voor pot anthurium teelt.*

Kas structuur	**Venlo-type**
Grootte	4 ha
Kasdek	Diffuus enkel glas
Schermen	2 energieschermen, 1 verduisteringsscherm, 1 schaduwscherm
Ontvochtiging systeem en setpoint	Warmtepomp ontvochtiger; Vochtsetpoint: 92% RV; (Additioneel ventilatie en verneveling)
Verwarming setpoint	Nacht: 18°C, overdag: 21°C (winter – vanaf 15 September) Nacht: 15°C, overdag 21°C (zomer – vanaf 10 Mei)
Ventilatie setpoint	2°C offset boven verwarming setpoint in de zomer, 6°C offset in de winter
Hoge druk verneveling systeem en setpoint	Capaciteit: 300 g/m^2/h; Vochtsetpoint: actief onder 80% RV
Kunstlicht systeem en setpoint	LEDs capaciteit 200 µmol/m^2/s), tot 12 uur per dag; Max. PAR op gewasniveau 400 µmol/m^{2}s; Dagsom PAR 8 mol/m^2/d
Gewas	Potanthurium (lage verdamping)
Teelt periode	1 September 2022 – 1 September 2023

Enkele belangrijke aandachtspunten voor de teelt van potanthurium zijn:

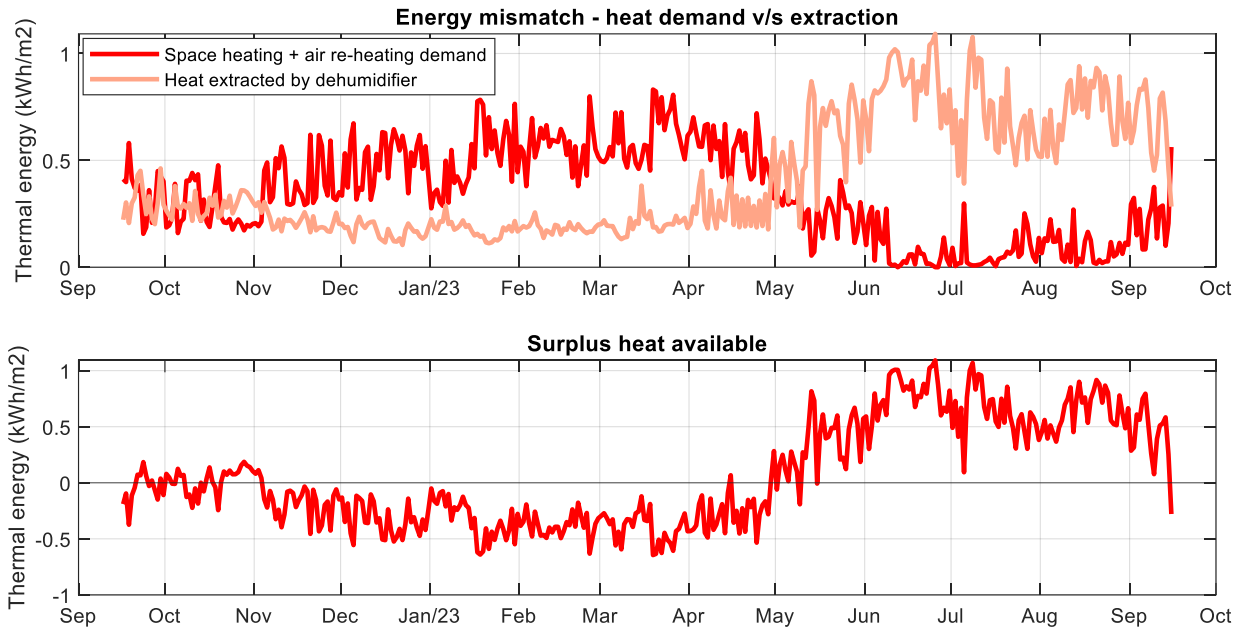
- In tegenstelling tot de tomatenteelt zoals beschreven in paragraaf 4.2 kent de potanthurium een doorlopende teelt, in plaats van een start- en einddatum met daartussen een interval. Op elk moment van het jaar zijn er dus enkele volledig volwassen planten in de kas, terwijl sommige nog worden opgekweekt. De vraag naar ontvochtiging hangt dan vooral af van de buitenklimaatomstandigheden.
- De potanthurium heeft een lage verdamping, maar het gebruik van verneveling om de temperatuur op peil te houden draagt iets bij aan de ontvochtigingsvraag.
- Er wordt gebruik gemaakt van LED-belichting, welke warmte de kas in brengt, maar om het licht over het gewas op het gewenste niveau te houden wordt er ook gebruik gemaakt van schaduwschermen. Ook zijn de setpoints voor verwarming hoger ingesteld in vergelijking met de tomatenteelt, vooral in de winter (minimaal 18 °C). Dit zou kunnen leiden tot een grotere warmtevraag om de kastemperatuur op peil te houden.

De resultaten van de simulatie worden in de volgende sectie besproken. Let op: hoewel voor de simulatieperiode 1 september 2022-2023 is gekozen, werd gezien dat er tussen mei en oktober een warmteoverschot is, en tussen november en mei de kas een warmtetekort had. Omdat er doorlopend wordt geteeld, zijn het begin en einde bij het modelleren van zowel warmte- als koudeopslagconcepten van de cyclus verschoven, zo werd de warmteopslag cyclus gestart als er sprake was van een warmtetekort (in te vullen door de lange-termijn warmteopslag TES), en werd de koudeopslag gestart als er een begin was van een koude-overschot. Een constant overschot aan koellast is niet helemaal accuraat, omdat de klimaatomstandigheden voor dezelfde maand in verschillende jaren aanzienlijk kunnen verschillen, maar een dergelijke benadering kan toch een goede schatting geven van de benodigde lange-termijn opslagcapaciteit.

4.3.2 Resultaten van de simulatie

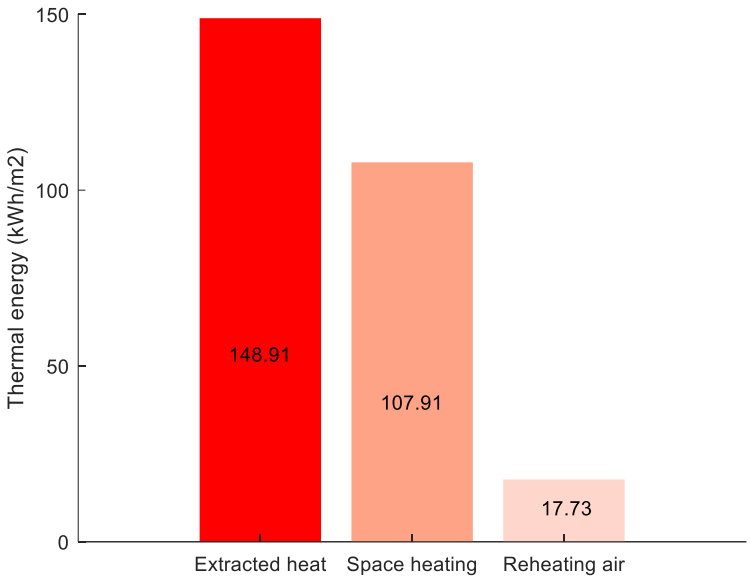
4.3.2.1 Warmteopslag

Hieronder staan de resultaten voor de potanthurium samengevat. De mismatch tussen de warmtevraag en de onttrokken warmte is weergegeven in Figuur 4.9.



Figuur 4.9 *Boven: Warmtevraag van de gesimuleerde potanthurium kas (donkerrode curve), warmte onttrokken door de warmtepomp ontvochtiger (lichtrode curve) over de teeltperiode; Onder: Geëxtraheerde energie minus de energievraag (voor kasluchtverwarming, opnieuw opwarmen van ontvochtigde lucht), d.w.z. de overtollige warmte die beschikbaar is gedurende één teeltperiode.*

De cumulatieve warmtevraag over de teeltperiode staat weergegeven in Figuur 4.10.

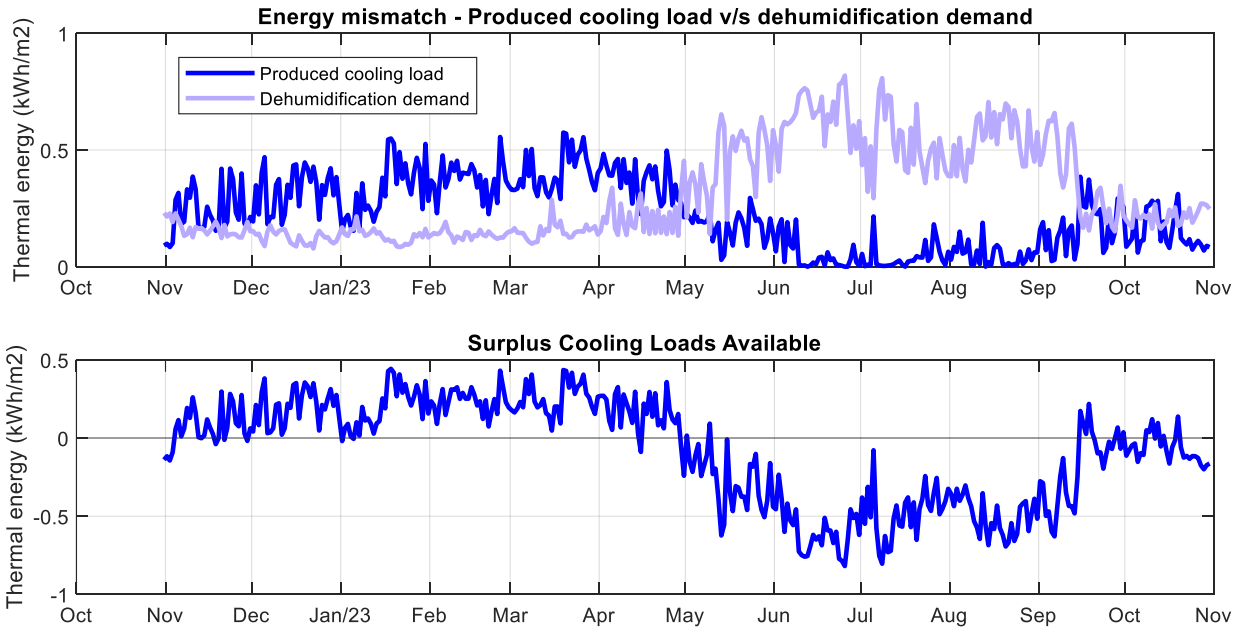


Figuur 4.10 *Totaal onttrokken warmte door warmtepomp ontvochtiger, warmtevraag voor kasluchtverwarming en opnieuw opwarmen van gedroogde lucht.*

Als we de samenvatting voor een potanthurium gewas in Figuur 4.10 vergelijken met dezelfde samenvatting voor het tomaten gewas (Figuur 4.4), wordt er aanzienlijk meer warmte onttrokken aan de potanthurium kas, waarschijnlijk als gevolg van de hogere temperaturen en het hogere setpoint voor luchtvochtigheid, wat resulteert in een efficiëntere warmteoogst uit de kas.

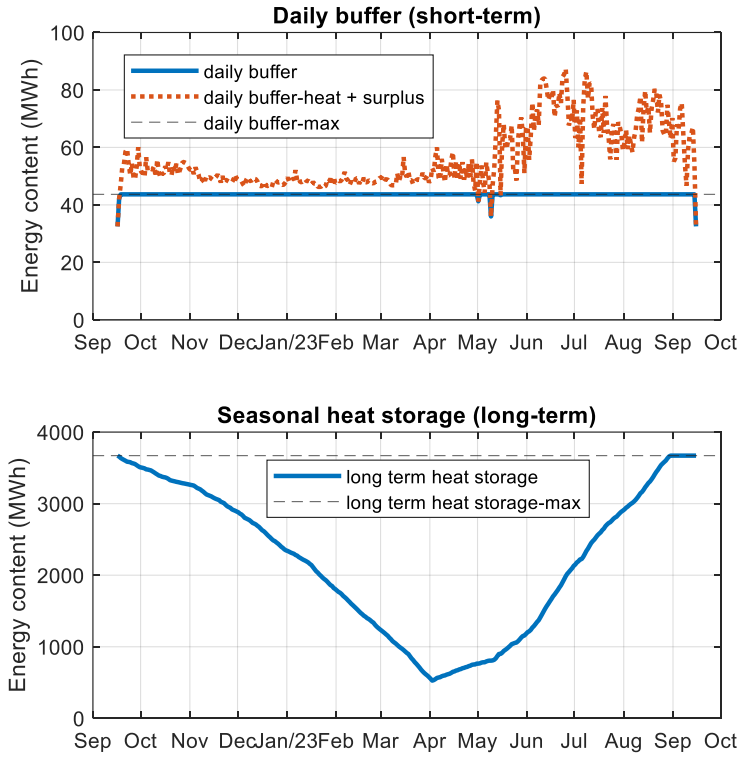
De verschillende warmtebehoefte en variatie in warmte-/koelingsvraag ten opzichte van de tomaat resulteert dus in verschillende eisen voor de lange-termijn energieopslag.

Figuur 4.11 toont de gegenereerde koellast vergeleken met de ontvochtigingsvraag – tussen mei en september de ontvochtigingsvraag en de daaruit voortvloeiende onttrokken warmtepieken.



Figuur 4.11 *Boven: Koellast geproduceerd in de gesimuleerde potanthurium kas over de teeltperiode (donkerblauwe curve) en warmte onttrokken door de warmtepomp ontvochtiger (lichtblauwe curve) over dezelfde periode; Onder: De overtollige koellast die beschikbaar is over één teeltperiode.*

Er wordt een vergelijkbare modelleringsaanpak gebruikt als voor het tomaten gewas in de vorige sectie. De lange-termijn warmteopslag (TES) ontlaadt tussen september en mei en voorziet in de warmtevraag van de kas. Om de volledige capaciteit die nodig is in de daaropvolgende september op te laden, moet de TES echter in mei beginnen met opladen, dat wil zeggen dat hij niet leeg raakt tijdens de continue teeltcyclus (Figuur 4.12).

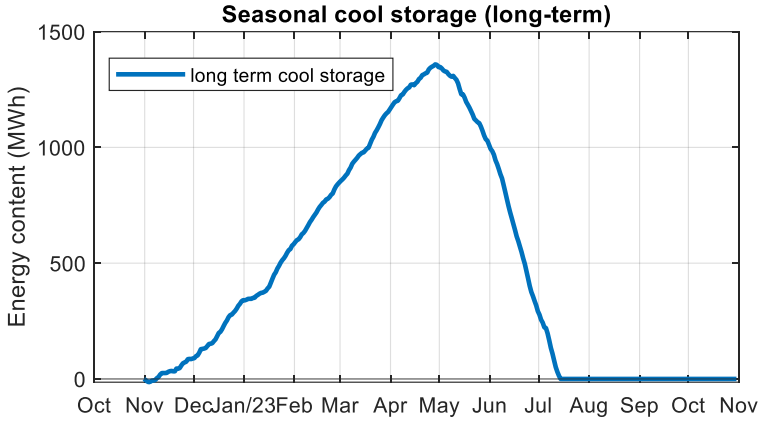


Figuur 4.12 *Energieniveau in de korte en lange-termijn warmte opslag (TES) in de tijd voor een potanthurium kas van 4 ha.*

De maximaal benodigde opslagcapaciteit van de lange-termijn warmteopslag (TES) komt voor de 4 ha grote potanthurium kas uit op 3,67 GWh. Dit is een veel grotere waarde vergeleken met de tomatenkas (1,84 GWh), ondanks veel meer warmteonttrekking (Figuur 4.9 vergeleken met Figuur 4.3). Voor de tomatenkas is overtollige warmte voor een langere periode (eind maart/begin april tot en met november) beschikbaar, waarbij geen beroep wordt gedaan op de TES. Bij de anthurium is het warmteoverschot korter aanwezig van mei tot half oktober. De langere beschikbaarheidsperiode van overtollige warmte om aan de dagelijkse warmtevraag te voldoen is een gevolg van de hogere ontvochtigingsvraag van tomaat vergeleken met de potanthurium.

4.3.2.2 Koudeopslag

De lange-termijn koudeopslag (CES) aanpak zoals beschreven in 4.2 kan ook worden gemodelleerd voor de potanthurium kas, waarbij de energie-inhoud van de CES wordt weergegeven in Figuur 4.13. **De maximale opslagcapaciteit bedraagt van de lange-termijn koudeopslag (CES) 1,4 GWh voor de potanthurium kas van 4 ha.** Hoewel de opslagbehoefte in de CES lager is dan in de TES, is het over het geheel genomen nog steeds een zeer grote capaciteitsbehoefte.



Figuur 4.13 *Energetisch vulniveau van de lange-termijn koudeopslag (CES) in de tijd voor een potanthurium kas van 4 ha.*

4.4 Beoordeling van de commerciële technologieën op basis van simulaties teelten

Op basis van de berekende scenario's van de verschillende thermische energieopslag systemen (warmteopslag vergelijkbaar met Cellcius en koudeopslag vergelijkbaar met SolarEis) voor de twee geanalyseerde teelten (tomaat, potanthurium) kunnen wij de nodige energie opslagcapaciteit en de daarbij horende benodigde opslagvolumes vaststellen.

Tabel 4.3 *Benodigde lange-termijn energie opslagcapaciteit voor de twee gewassen (tomaat en potanthurium) onder de twee verschillende concepten (warmteopslag vergelijkbaar met Cellcius en koudeopslag vergelijkbaar met SolarEis).*

Teeltsysteem	Opslagcapaciteit benodigd voor warmteopslag	Opslagcapaciteit benodigd voor koudeopslag
Tomaat (4 ha)	1845 MWh	798 MWh
Potanthurium (4 ha)	3671 MWh	1359 MWh

Om een dergelijke grote hoeveelheid warmte op te slaan, is het benodigde volume van de opslagmaterialen weergegeven in Tabel 4.4. Voor een eenvoudige schatting van de afmetingen van de opslagstructuren wordt in bovenstaande tabel tussen haakjes naast de benodigde opslagvolumes de derdemachtswortel weergegeven, waarbij wordt uitgegaan van een kubieke opslagstructuur.

Tabel 4.4 *Benodigde opslagvolumes voor warmteopslag (Cellcius technologie) en koudeopslag (SolarEis technologie) om te voldoen aan de behoefte aan thermische energieopslag voor de twee gewassen (tomaat en potanthurium).*

Materiaal/ bedrijf	**Energiedichtheid opslag**	**Opslag volume benodigd voor warmteopslag (m^3)**		**Opslag volume benodigd voor koudeopslag (m^3)**	
		Tomaat (4 ha)	**Potanthurium (4 ha)**	**Tomaat (4 ha)**	**Potanthurium (4 ha)**
K_2CO_3/Cellcius	361 kWh/m^3	5112 ($V^{1/3}$~17.2 m)	10169 ($V^{1/3}$~21.7 m)	N/A	N/A
Ijs/SolarEis	Soortelijke warmte bij koelen van 5°C naar 0°C: 0.0058 kWh/m^3K Latente warmte bij faseovergang bij 0 °C: 0.093 kWh/kg	N/A	N/A	9320 ($V^{1/3}$~21m)	15784 ($V^{1/3}$~25.1m)

Typische opslagstructuren zijn meestal cilindrisch van vorm om het oppervlak voor een bepaald volume, en dus het warmteverlies door het oppervlak, te minimaliseren. Voor constructies hoger dan 5-10 m zijn speciale vergunningen vereist van de autoriteiten voor opslagconstructies. Bij beperkingen tot bijvoorbeeld 10 m hoogte zal een groter oppervlak op de grond in beslag worden genomen.

5 Conclusie

In semi-gesloten kassystemen die zijn uitgerust met ontvochtigers op basis van een warmtepomp gaat het ontvochtigingsproces gepaard met het terugwinnen van energie, die mogelijk kan worden gebruikt om aan de warmtevraag van de kas te voldoen en daarmee het totale energieverbruik te verminderen. De periode met de hoogste ontvochtigingsvraag (dus hoogste energieterugwinning) valt echter niet samen met de periode met de hoogste warmtevraag. Deze onbalans kan worden overbrugd door lange-termijn/seizoensgebonden opslag van de gewonnen energie. Dit rapport probeert het potentieel te identificeren van commerciële beschikbare oplossingen voor seizoensopslag in kassen met warmtepomp ontvochtigers met warmteterugwinning.

Voor twee verschillende teeltsystemen zijn de warmtebehoefte en de onbalans in de tijd geanalyseerd: een onbelichte tomatenkas met een low-ε kasdek voor energiebesparing, en een potanthurium kas met LED-belichting.

Op basis hiervan zijn de benodigde warmteopslagcapaciteiten geanalyseerd gebaseerd op twee concepten: lange-termijn warmteopslag en lange-termijn koudeopslag. Met behulp van twee van de commercieel verkrijgbare technologieën, met een vrij hoge opslagcapaciteit per volume-eenheid, werden de benodigde opslagvolumes berekend. Voor een kas van 4 ha komen de benodigde volumes vrij groot uit, variërend van 5000 – 10000 m^3 voor warmte opslag in zout en 9000 - 16000 m^3 voor koudeopslag in ijs voor respectievelijk een tomaten en pot anthurium teelt.

Economisch gezien zal een opslagsysteem wat gebruik maakt van zout zoals dat van Cellcius te duur uitpakken om voor louter 1 laad/ontlaad cyclus per jaar in te zetten, fundamenteel hieraan zijn de materiaalkosten van het zout zelf. Hierbij moet worden opgemerkt dat alleen het gebruik van dit systeem voor zuivere seizoensopslag moet worden afgeschreven, eventuele andere functies van een dergelijk systeem zoals een meerdaagse warmte opslag met meerdere cycli per jaar zijn niet geëvalueerd. Ook het ontsluiten van nuttig gebruik van restwarmte door dit te vervoeren in dit systeem zoals Cellcius voor ogen heeft is in dit project niet geëvalueerd.

Over het algemeen moeten we concluderen dan voor seizoensopslag louter zeer goedkope materialen gebruikt kunnen worden vanwege de lage frequentie waarmee het wordt gebruikt. Hierdoor zal een oplossing zoals die van SolarEis ondanks het grote volume van de buffer toch eerder positief uitpakken. Gezien de lage vraag per m^2 van moderne teeltsystemen kan ondiepe bodem energie zoals horizontale bodem warmtewisselaars ook in overweging genomen worden.

Bij een technologie als die van Rift spreken we technisch gezien nog steeds over energieopslag, echter kan hierbij de laagwaardige warmte die in de kas beschikbaar is niet worden benut voor het regenereren van de energiedrager, het 'energieopslag' proces zal dan ook buiten het teelt systeem plaatsvinden waarbij de rol van de teler is gereduceerd tot die van afnemer. Vanwege de hoge exergie zal elektriciteit opwekken de hoofdtaak zijn van een dergelijk systeem en zou de restwarmte benut kunnen worden voor de verwarming van de kas, hiermee is de technologie van Rift een kandidaat om op termijn de WKK te vervangen door een CO_2 arm alternatief.

Literatuur

[1] L. Marcelis and E. Heuvelink, *Achieving sustainable greenhouse cultivation*. Burleigh Dodds Science Publishing, 2019. doi: 10.1201/9780429266744.

[2] S. Pyretzidis, "Seasonal storage of latent heat in Greenhouses with a heat pump dehumidifier," Wageningen University and Research, 2023.

[3] "How the Eindhoven heat battery can quickly make millions of homes gas-free - Cellcius." Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: https://cellcius.com/en/how-the-eindhoven-heat-battery-can-quickly-make-millions-of-homes-gas-free/.

[4] L. C. Sögütoglu, P. A. J. Donkers, H. R. Fischer, H. P. Huinink, and O. C. G. Adan, "In-depth investigation of thermochemical performance in a heat battery: Cyclic analysis of K2CO3, MgCl2 and Na2S," *Appl Energy*, vol. 215, pp. 159–173, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.01.083.

[5] "FAQ | HEAT-INSYDE." Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: https://www.heat-insyde.eu/faq/.

[6] "Burning Metal to Make Clean Energy - World Bio Market Insights." Accessed: Dec. 17, 2023. [Online]. Available: https://worldbiomarketinsights.com/burning-metal-to-make-clean-energy/.

[7] "Power from Powder: is Iron the new Hydrogen? | Reden." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: https://www.reden.nl/our-work/power-from-powder-is-iron-the-new-hydrogen.

[8] "Burning metal to make clean energy | Research | Chemistry World." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: https://www.chemistryworld.com/news/burning-metal-to-make-clean-energy/4014723.article.

[9] "RIFT raises EUR 2 million to use iron fuel as new renewable energy carrier." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: https://brainporteindhoven.com/en/news/rift-raises-eur-2-million-to-use-iron-fuel-as-new-renewable-energy-carrier.

[10] "Philip de Goey receives ERC Proof of Concept Grant for research into metal fuels." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: https://www.tue.nl/en/news-and-events/news-overview/05-05-2023-philip-de-goey-receives-erc-proof-of-concept-grant-for-research-into-metal-fuels.

[11] "Wereldprimeur: IJzerbrandstof als bron voor het warmtenet in Helmond | Ennatuurlijk." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: https://ennatuurlijk.nl/zakelijk/blogs/wereldprimeur-ijzerbrandstof-als-bron-voor-het-warmtenet-in-helmond.

[12] "Technology | RIFT | Enabling 100% sustainable heat." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: https://www.ironfueltechnology.com/technology/.

[13] "This iron reactor could play a crucial role in hydrogen storage and transportation - IO." Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: https://innovationorigins.com/en/this-iron-reactor-should-become-crucial-puzzle-piece-in-hydrogen-storage-and-transportation/.

[14] "Iron Fuel Shows Its Mettle - IEEE Spectrum." Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: https://spectrum.ieee.org/iron-fuel.

[15] "World first: Dutch brewery burns iron as a clean, recyclable fuel." Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: https://newatlas.com/energy/bavarian-brewery-carbon-free-renewable-iron-fuel/.

[16] J. M. Bergthorson, "Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power," *Prog Energy Combust Sci*, vol. 68, pp. 169–196, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.PECS.2018.05.001.

[17] D. Carbonell, M. Battaglia, D. Philippen, M. Haller, and M. Y. Haller, "Cost-Energetic Analyses of Ice Storage Heat Exchangers in Solar-Ice Systems Cost energetic analyses of ice storage heat exchangers in solar-ice systems," 2017, doi: 10.18086/swc.2017.33.02.

[18] D. E. Oliver, A. J. Bissell, X. Liu, C. C. Tang, and C. R. Pulham, "Crystallisation studies of sodium acetate trihydrate – suppression of incongruent melting and sub-cooling to produce a reliable, high-performance phase-change material," *CrystEngComm*, vol. 23, no. 3, pp. 700–706, Jan. 2021, doi: 10.1039/D0CE01454K.

[19] "How Heat Batteries Work - Sunamp UK." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: https://sunamp.com/en-gb/how-thermal-batteries-work/.

[20] "How the Sunamp PCM heat battery compares to other hydronic heat batteries - Sunamp Global." Accessed: Dec. 28, 2023.
[Online]. Available: https://sunamp.com/blog/how-the-sunamp-pcm-heat-battery-compares-to-other-hydronic-heat-batteries/.
[21] "What is a phase change material and why is it important - Sunamp Global." Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: https://sunamp.com/blog/what-is-a-phase-change-material-and-why-is-it-important/.
[22] "Bodemenergie warmtepomp" Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. https://warmtepomp-weetjes.nl/soorten/bodemenergie-warmtepomp/.
[23] Hu L, Rizvi ZH, Tobber L and Wuttke F (2023), Thermal performance of three horizontal ground heat exchanger systems: comparison of linear-loop, spiral-coil and slinky-coil arrangements. Front. Energy Res. 11:1188506. doi: 10.3389/fenrg.2023.1188506.

To explore the potential of nature to improve the quality of life

Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-1286

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.