



Laan van Westenenk 501  
Postbus 342  
7300AH Apeldoorn

**TNO-rapport**

**2008-A-R0745/B**

**Alternatieven voor seizoenopslag in de  
glastuinbouw**

T +31 88 86 62212  
F +31 88 86 62248

info-BenO@tno.nl

Datum	maart 2008
Auteur(s)	Ing. R.A. Brand Dr. W.G. Planje Ir. J. Ruigrok
Opdrachtgever	Produktschap Tuinbouw Postbus 280 2700 AG Zoetermeer
	Ministerie van LNV Postbus 482 6710 BL Ede
Projectnummer	TNO pr.nr 78630 (PT-projectnr 12933)
Rubricering rapport Titel	Ongerubriceerd
Samenvatting Rapporttekst Bijlagen	Ongerubriceerd Ongerubriceerd Ongerubriceerd
Aantal pagina's Aantal bijlagen	71 (incl. bijlagen) 4

**Produktschap**  **Tuinbouw**



Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

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

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

## Samenvatting

Een seizoensbuffer dient voor opslag en onttrekking van zonne-energie gedurende het stookseizoen van een (semi-) gesloten kas.

Tot nu toe wordt daarvoor vaak een aquifer ingezet. Maar deze technologie kent een aantal beperkingen. Voor nu en voor de toekomst is het van belang om alternatieven voor deze technologie te kennen en af te wegen.

In dit onderzoek wordt daarvoor allereerst ingegaan op het proces van buffering en de daarin bepalende parameters.

Daaruit volgen vertrekpunten die leidend zijn bij de bufferkeuze en het bepalen van de benodigde buffercapaciteit.

In deze studie zijn binnen 3 relevante principes voor thermische opslag (voelbare warmte, latente warmte en thermo-chemisch) verschillende alternatieve buffersystemen voor seizoenopslag van beschikbare zonnewarmte beschouwd.

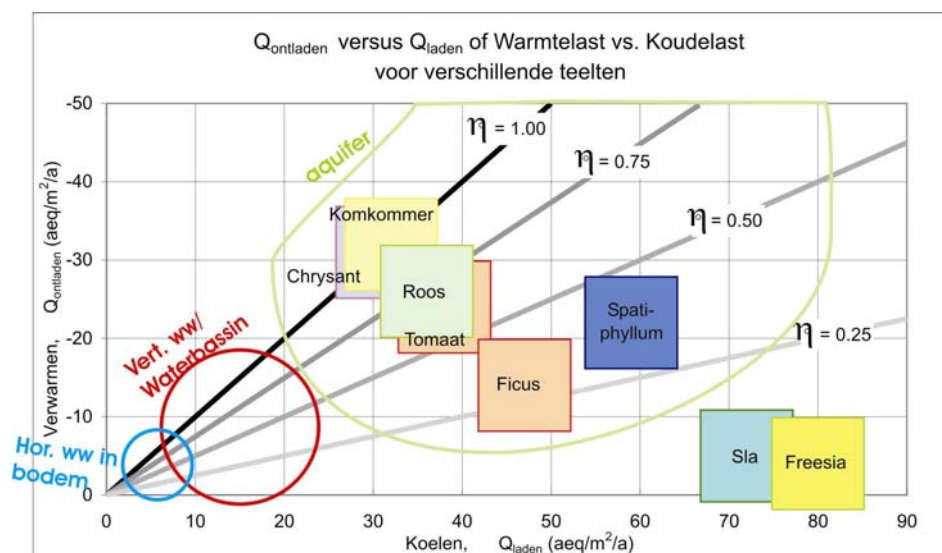
De kenmerken van principes en technologieën daarbinnen bepalen mede de criteria die men aan de toepassing in de glastuinbouw stelt.

Deze vallen uiteen in operationele criteria, gericht op het energiegebruik, en éénmalige criteria, van toepassing op de technologie als zodanig

Technologieën die momenteel marktrijp zijn, zijn in de technische analyse afgezet tegen deze criteria.

De buffertechnieken die - energetisch gezien - momenteel inpasbaar zijn voor de belangrijkste teelten blijven beperkt tot systemen met voelbare opslag in water en latente opslag met PCM's.

Wanneer uitsluitend de energetische kant van de zaak wordt belicht dan kunnen de verschillende kasteelten in Nederland in onderstaande figuur worden weergegeven.



Op de verticale as staat de jaarlijkse verwarmingsbehoefte van de teelt, op de horizontale as de overmaat aan zonnewarmte die thermisch opgeslagen zou kunnen worden (in plaats van deze weg te ventileren, dan wel te weren/reflecteren, of anderszins weg te koelen). De figuur maakt duidelijk dat gewassen die floreren bij relatief lage temperaturen (sla/freesia) een daarmee een lage energievraag voor verwarming hebben een groter potentieel aan warmteopslag hebben dan gewassen die groeien bij hogere kastemperaturen. De horizontale bodemwarmtewisselaars en ondergrond bieden een relatief lage capaciteit. De aquifer steekt daar nog duidelijk bovenuit.

De uiteindelijke keuze voor een buffer wordt sterk bepaald door de specifieke omstandigheden bij de teler. Afrondend is een benaderingsmethodiek aangegeven waarmee de energieadviseur en tuinder kan vaststellen wat de beste optie is voor seizoensbuffering.

Op de lange termijn biedt thermochemische opslag ook voor de glastuinbouw perspectieven. Dit principe is momenteel in ontwikkeling, met name voor de gebouwde omgeving. Nader onderzoek naar toepassing voor de glastuinbouw vraagt aandacht. Marktintroductie zal echter nog diverse jaren in beslag nemen.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting.....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Toegepaste selectiemethodiek .....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Buffering en bepalende grootheden .....</b>	<b>11</b>
3.1	Laden, opslag en ontladen van een buffer.....	11
3.2	De specifieke capaciteit en positionering.....	14
3.3	De koudevraag, warmtevraag en buffergrootte.....	14
<b>4</b>	<b>Opslagprincipes en hun kenmerken.....</b>	<b>19</b>
4.1	Opslagprincipes .....	19
4.2	Fysische kenmerken buffermaterialen .....	20
4.3	Algemene kenmerken van de opslagprincipes.....	21
<b>5</b>	<b>Buffertechnologieën en hun kenmerken .....</b>	<b>24</b>
5.1	Waterbassin buiten de kas.....	25
5.2	Waterbassin onder (een gedeelte van) de kas: Klimrek buffer .....	26
5.3	Waterbassin onder (een gedeelte van) de kas: Gaasboxx®-systeem .....	27
5.4	Bodemopslag ondiep via bodemwarmtewisselaars.....	27
5.5	Verticale warmtewisselaar in de bodem .....	28
5.6	Opslag in diepe ondergrond.....	28
5.7	PCM, ongekapseld.....	28
5.8	PCM als slurry, in een bassin onder de kas.....	29
<b>6</b>	<b>Criteria en input voor bufferselectie.....</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>Analyse van bufferopties .....</b>	<b>32</b>
7.1	Aquifer.....	32
7.2	Diepe aquifer .....	38
7.3	Verticale bodemwarmtewisselaar .....	40
7.4	Horizontale (ondiepe) bodemopslag.....	46
7.5	Waterbassins onder de kas.....	49
7.6	Ongekapselde en gekapselde PCM onderin de kas.....	52
<b>8</b>	<b>De vertaalslag naar een stroomschema.....</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	<b>Conclusies en discussie .....</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>Afkortingen en definities .....</b>	<b>60</b>
<b>11</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>61</b>
<b>12</b>	<b>Verantwoording .....</b>	<b>63</b>

### **Bijlagen**

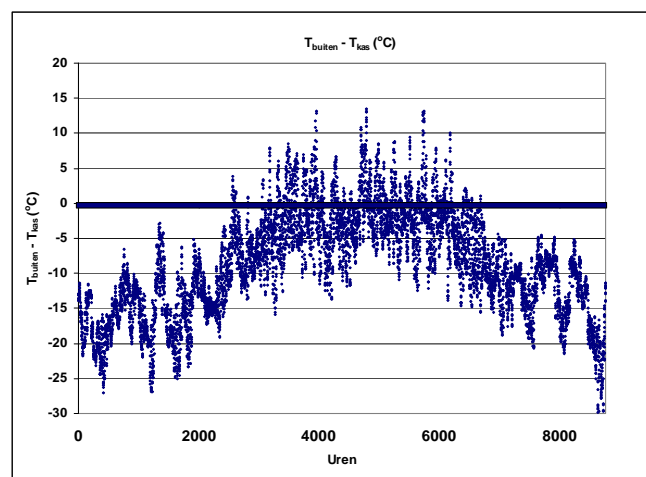
- 1 Overzicht buffermaterialen
- 2 Overzicht bufferopties
- 3 Kenmerken aquifer
4. Voorbeeldcase met stroomschema

# 1 Inleiding

Bij gesloten of semi-gesloten kassen streeft men naar een laag specifiek (fossiel) energiegebruik (per m<sup>2</sup>). Het energiegebruik van een kas wordt bepaald door de technische voorzieningen (opwekkers met hun rendementen) en de bedrijfswijze daarvan. Die bedrijfswijze is sterk afhankelijk van de teelt, groeifase van het gewas de jaarlijkse teeltfrequentie bepalen de gewenste profielen van de temperatuurniveaus in de kas, de gewenste luchtvochtigheid, benodigde CO<sub>2</sub> concentratie en de mate van zon- dan wel kunstlicht.

De gewenste binnentemperatuur in combinatie met het buitenklimaat domineren daarbij de warmte- dan wel koudebehoefte van de kas over een jaar.

In onderstaande grafiek (figuur 1) zijn ter illustratie over een jaar de uurlijkse waarden van het temperatuurverschil tussen de buitenluchttemperatuur en de gemiddelde setpoint voor de kas en weergegeven.

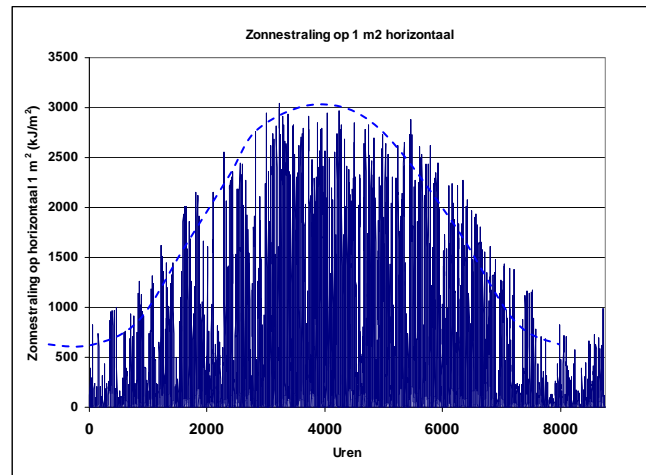


Figuur 1 Het temperatuurverschil buiten-binnen in een kas over een seizoen

Als dit verschil negatief is (de kastemperatuur is dan hoger dan de buitentemperatuur), dan is er warmtebehoefte die eventueel uit een buffer zou kunnen worden onttrokken. Is dit verschil positief (de gemiddeld gewenste kastemperatuur ligt lager dan de buitentemperatuur) dan is er een warmteoverschot of behoefte aan koeling en kan er eventueel energie aan een buffer worden toegevoerd op basis van temperatuurverschillen tussen de buitenlucht en de kas.

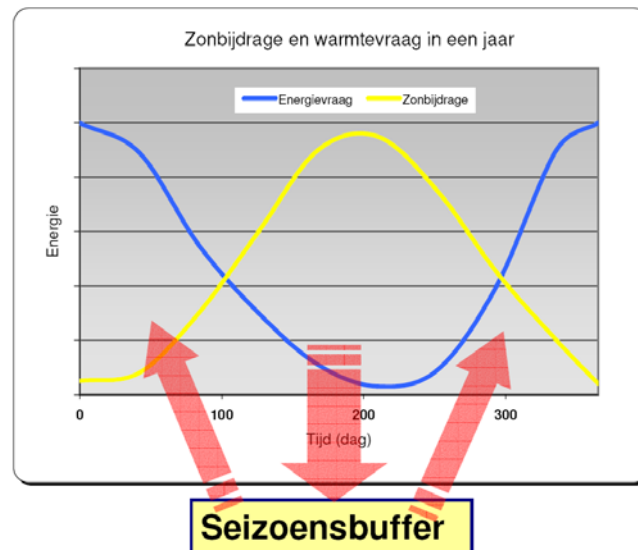
In de zomer is er naast de omgevingslucht een andere en belangrijke warmtebron: de (directe) zonnestraling.

Figuur 2 toont over een jaar de uurlijkse zonbijdrage. De fluctuaties zijn daarin uiteraard sterk en in een etmaalritme.



Figuur 2 De uurlijkse zoninstraling in een jaar in Nederland op een horizontaal vlak.

Beide effecten samen (het temperatuurverschil buiten-binnen en de zoninstraling) zijn de belangrijke ingrediënten voor de gewenste capaciteit van een seizoenbuffer van zonnewarmte, voor het patroon van laden en ontladen en van het gewenste temperatuurniveau van een buffer. In onderstaande figuur is de uitruil van warmte over een seizoen geïllustreerd in geval van toepassing van een seizoenbuffer voor zonnewarmte.



Figuur 3 Het proces van seizoensbuffering van zonnewarmte.

Een seizoenbuffer is hierbij anders dan een etmaal- of dagbuffer. Een etmaalbuffer is gespecificeerd om de overmaat aan zonnewarmte dan wel WKK-warmte voor de duur van maximaal enkele etmalen op te slaan, in tegenstelling tot een seizoenbuffer die

hiervan een veelvoud aan energie dient op te kunnen slaan. In de glastuinbouw kan overigens gewerkt worden met een combinatie van beide buffertypen.

Door het toepassen van een seizoensbuffer wordt het mogelijk te koelen zonder ventilatie (benadering gesloten kasconcept) en te verwarmen gedurende het stookseizoen. Daartegenover staan de nodige investeringen voor de aanleg van een seizoensbuffer.

Kortom, het mechanisme van opslag en gebruik van energie, gerekend over een heel seizoen, is een belangrijke pijler voor de verduurzaming van de glastuinbouw.

Momenteel is een bekende vorm van seizoensopslag in de glastuinbouw de toepassing van grondwater in een ondergrondse zandlaag: de aquifer. Het is een bewezen techniek die doorgaans zonder problemen ingezet wordt. De kosten van dergelijke systemen zijn echter hoog en de toepassing ervan kent ook beperkende factoren (geschiktheid bodem, toelaatbare temperaturen, afstand tussen koude en warme put, limitatief in het aantal gebruikers per eenheid van oppervlak).

Wanneer zich nieuwe mogelijkheden aandienen die onder bepaalde omstandigheden voor de sector voordelen bieden ten opzichte van de thans toegepaste opslagtechniek kan op dit punt de koers naar een kas die past in het streefbeeld van 2020 versterkt worden voortgezet.

Daarom is het verkennen van alternatieven voor seizoenopslag voor de (semi-) gesloten kas wenselijk.

Deze studie richt zich daar op door het inzichtelijk maken van:

- de randvoorwaarden voor energieopslag, afhankelijk van teelt en kasconcept;
- de huidige technische mogelijkheden om de voor de teelt gewenste energieopslag te realiseren;
- de haalbaarheid van de hierbij te onderscheiden opslagsystemen.

Aan de hand daarvan kunnen de in aanmerking komende alternatieven voor seizoenopslag worden aangegeven die toepasbaar zijn voor tuinders in die gevallen dat aquifers niet mogelijk of onaantrekkelijk zijn.

Op basis van de onderzoekresultaten wordt een stroomschema gegeven waarbij de tuinder op basis van zijn specifieke situatie zijn eigen buffercriteria kan toepassen. Deze methodiek kan de tuinder bij het overleg met zijn (energie)adviseur ondersteunen in de keuze van een systeem van seizoensbuffering.



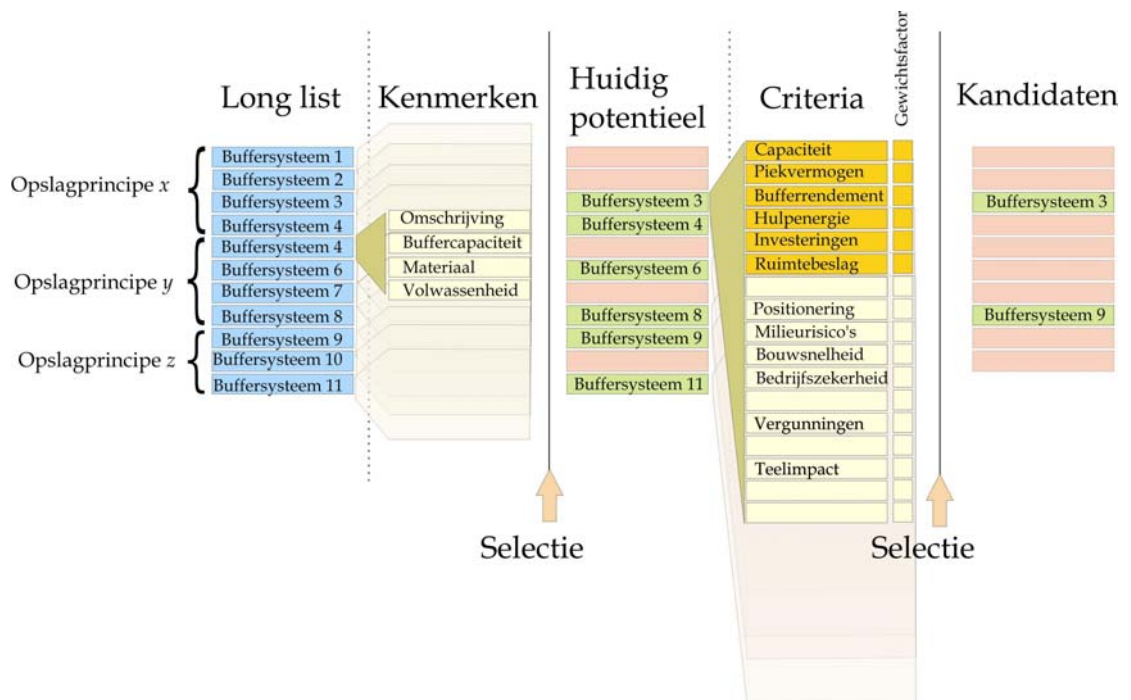
## 2 Toegepaste selectiemethodiek

Systemen voor seizoenopslag moeten worden geselecteerd vanuit verschillende invalshoeken: de energetische taakstelling (besparing), de technische mogelijkheden, de economie van het systeem en de eisen die aan het systeem moeten worden gesteld vanuit het perspectief van de tuinder en het milieu.

In eerste instantie kan een lijst van opslagmogelijkheden worden opgesteld waarbij de opslagprincipes sturend zijn in de samenstelling van deze lijst.

Uit de lijst is een eerste selectie te maken van technologieën die praktisch toepasbaar zijn en waarvan de economische haalbaarheid een redelijk perspectief heeft. Van de aldus geselecteerde beschikbare technologieën zijn de belangrijkste kenmerken van de techniek beschreven. Deze kenmerken vloeien onder andere voort uit de kenmerken van het opslagprincipe.

Voor een verdere onderbouwde keuze is het belangrijk om specifieke criteria te benoemen die een rol spelen bij de selectie van buffermogelijkheden. Per criterium kan een beoordeling gegeven worden. Afhankelijk van de individuele situatie zal de weging van de criteria variëren. Om die reden is, in de keuzemethodiek de vrijheid aanwezig, om de weegfactoren te kiezen.



Figuur 4 Illustratie gehanteerde selectiemethodiek

In het onderhavige rapport is deze methode toegepast op de huidige potentiële seizoensbuffersystemen maar kan ook worden ingezet voor nieuwe buffertechnieken.

Als vertrekpunt bij de opdracht voor dit onderzoek is gekozen voor een energieopslagcapaciteit voor de buffers die past bij een jaarlijkse energiebehoefte voor verwarming in de range van 10 tot 40 [a.e.q./m<sup>2</sup>] en bij bedrijfstemperaturen en flows die gangbaar zijn bij lage temperatuur luchtverwarmingssystemen. Dat betekent dat het temperatuurniveau bij het warmteaanbod ligt in de bandbreedte van 20 tot 50 [oC].

Voor deze studie zijn die effecten gebundeld tot het specifiek energiegebruik van een kas in aardgasequivalenten per m<sup>2</sup> kasoppervlak [a.e.q./m<sup>2</sup>].

Voor de herleiding van a.e.q. naar MJ of andersom wordt de verbrandingswaarde (bovenwaarde) van Gronings aardgas gehanteerd (ref. [24]).

Dat betekent in dat geval dus dat

- 1 [a.e.q.] overeenkomt met een energiehoeveelheid van ~35 [MJ];
- een behoefte van 1000 [MJ] ofwel 1[GJ] komt overeen met 29 [a.e.q.].

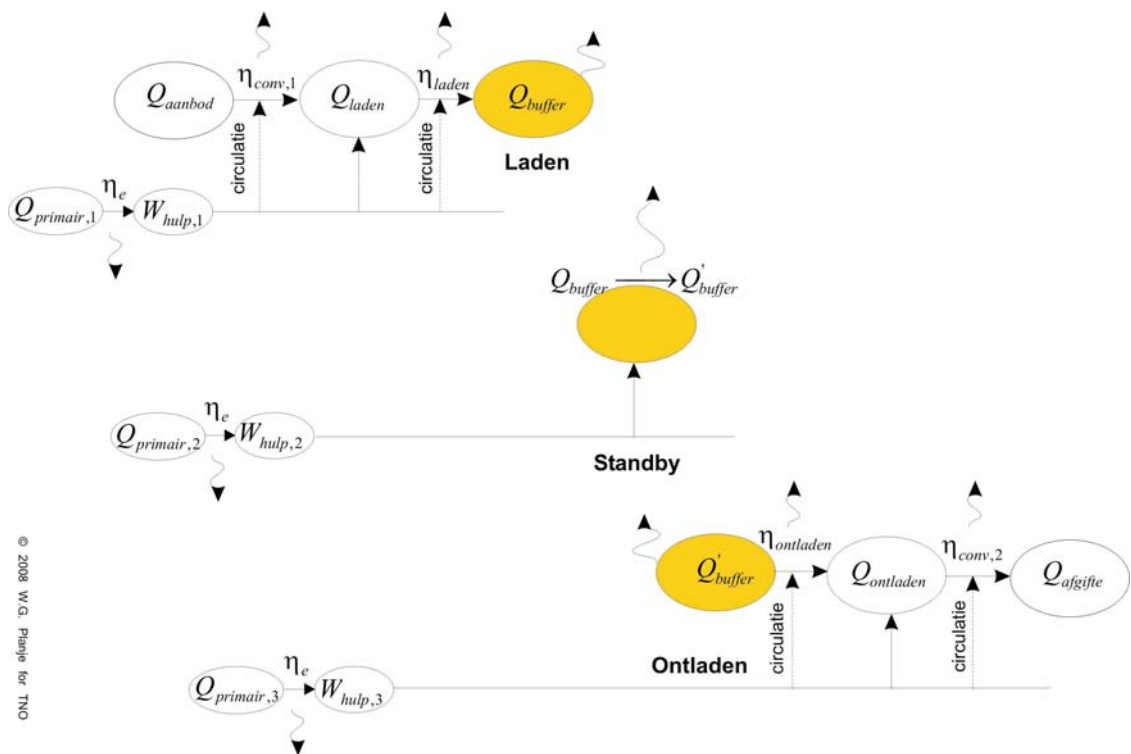
Het gebruik van alternatieve energiebronnen (bijv. geothermie) als voeding voor de energiebehoefte van de kas valt niet binnen de scope van dit onderzoek.

### 3 Buffering en bepalende grootheden

#### 3.1 Laden, opslag en ontladen van een buffer

Buffersystemen zijn divers in hun opslagvorm, zo ook de laad- dan wel ontladrendementen, standsverliezen en capaciteiten. Het is daarom noodzakelijk te definiëren hoe een buffer gespecificeerd moet worden met betrekking tot rendementen. Figuur 5 geeft schematisch en vereenvoudigd de 3 stadia van een buffer weer: het laden, de wachtstand (standby) en het ontladen en daarbij aangegeven de verschillende rendementen.

Elk stadium wordt hierna kort toegelicht. De daarin beschouwde grootheden zijn van belang voor het stroomschema dat voor de bufferkeuze van belang is



Figuur 5 De buffer in zijn verschillende stadia

**Het laden:** Gedurende het laden wordt de aangeboden zonne-energie naar de buffer gebracht. Dit vraagt mogelijk om een omzetting van de aangeboden warmte naar bijvoorbeeld mechanische of chemische energie, maar ook ‘omzetting’ naar warmte met een hoger temperatuurniveau kan noodzakelijk zijn om het laden in de buffer mogelijk te maken.

Deze omzetting vereist hulpenergie, die bijvoorbeeld onttrokken kan worden uit elektriciteit via fossiele brandstoffen. Echter, ook andere bronnen zijn denkbaar. Vaak is het mogelijk dat de hulpenergie in zijn geheel toegevoegd wordt aan de buffer.

In de figuur is de circulatiepompenergie apart vermeld. Dit type hulpenergie is over het algemeen relatief laag en is noodzakelijk om warmte te transporteren en over te dragen van het ene naar het andere circuit. In de regel gaat deze hulpenergie verloren en komt niet terecht in de buffer.

Het overall-laadrendement kan als volgt worden gedefinieerd

$$\eta_{\text{overall-laden}} = \frac{Q_{\text{buffer}}}{Q_{\text{aanbod}} + W_{\text{hulp},1}} \quad (1)$$

In het algemeen geldt er dat de  $W_{\text{hulp},1}$  geheel wordt toegevoegd aan de buffer, met als gevolg dat  $\eta_{\text{overall-laden}} \approx 100\%$ . Het is echter denkbaar, dat niet alle weerstandsverliezen aan de buffer ten goede komen door warmteverlies aan de omgeving gedurende de circulatie.

Deze definitie moet vergezeld worden met een andere parameter die vertelt in welke mate externe energie is toegevoerd aan de buffer.

De parameter geeft de verhouding aan tussen de aangeboden energie voor het bufferen  $Q_{\text{aanbod}}$  en de inzet van primaire energie  $Q_{\text{primair},1}$  om dit in de buffer te laden:

$$k_{\text{laden}} \equiv \frac{Q_{\text{aanbod}}}{Q_{\text{primair},1}} \quad (2)$$

Dit is een variant op de Primary Energy Ratio die aan zou geven de verhouding van de gebufferde energie en de inzet van primaire energie. Het meest optimaal is wanneer  $k \rightarrow \infty$ , dan is immers de inzet van primaire energie nul geweest. Op het moment dat  $k$  in de buurt van de 1 komt is in feite buffering niet meer nuttig, immers dan kan de primaire energie zelf als buffer bewaard worden en ingezet worden op het moment van noodzakelijk energie.

Zowel de  $\eta_{\text{overall-laden}}$  als de  $k$  waarde zijn daarom beiden van belang voor de bepaling van de kwaliteit van de buffer wat het proces van laden aangaat.

**De wachtstand:** Op het moment dat de buffer begint te laden met warmte, dan wel andere vormen van energie (chemisch, mechanisch), vindt direct het proces van weglekken naar de directe omgeving plaats: de zogenaamde bufferverliezen. Het is mogelijk dat dit verlies acceptabel is (exergetische daling, dan wel temperatuurdaling is geen probleem) en dat extern bijladen niet nodig is. Echter, er zijn ook situaties denkbaar, waarbij het wenselijk is hulpenergie toe te voegen om bijvoorbeeld het temperatuurniveau op peil te houden zodat tijdens het ontladen deze compensatie niet meer uitgevoerd hoeft te worden.

De stabiliteit van de buffer in de stand-by situatie kunnen we uitdrukken als:

$$\eta_{\text{standby}} = \frac{Q_{\text{buffer}}}{Q_{\text{buffer}} + W_{\text{hulp},2}} \quad (3)$$

conform de redentatie zoals aangegeven voor vergelijking 1.

Ook hier is verhouding tussen  $Q_{buffer} / Q_{primair,2}$  een kwaliteitsparameter in geval van bijladen met behulp van hulpenergie.

$$k_{standby} = \frac{Q_{buffer}}{Q_{primair,2}} \quad (4)$$

**Het ontladen:** Bij het ontladen wordt de gebufferde energie omgezet naar een temperatuurniveau zodat afgifte aan de kas mogelijk is. Het is mogelijk dat omzetting niet nodig is en dat direct uit de buffer energie onttrokken kan worden met slechts de hulp van energie voor de circulatiepompen. Echter, het is ook mogelijk dat de gebufferde energie bijvoorbeeld een temperatuurlift dient te krijgen voor de benodigde energie afgifte. Een dergelijke temperatuurlift kan bijvoorbeeld efficiënt gerealiseerd worden door een warmtepomp maar vraagt wel degelijk externe hoogwaardige hulpenergie. Parallel aan het verhaal van het laden kunnen we zeggen dat het overall-ontlaadrendement is gedefinieerd als:

$$\eta_{overall-ontladen} = \frac{Q_{afgifte}}{Q_{buffer} + W_{hulp,3}} \quad (5)$$

en de k-waarde

$$k_{ontladen} \equiv \frac{Q_{afgifte}}{Q_{primair,3}} \quad (6)$$

Het bovenstaande maakt duidelijk dat een buffer niet altijd direct toegankelijk is voor het laden van de overtollige zonnewarmte en extra inspanning vraagt van externe bronnen en hulpinstallaties. Ook maakt het duidelijk dat het aanbieden van bufferenergie een conversie of (exergetische) opwaardering van bufferenergie vraagt.

Het (totaal) bufferrendement definiëren we als:

$$\eta_{buffer} \equiv \frac{Q_{afgifte}}{Q_{aanbod} + \sum_i W_{hulp,i}} \quad (7)$$

Wanneer alle hulpenergie toekomt aan de buffer dan wel afgifte-energie, en bovendien er geen standsverliezen zijn dan zal  $\eta_{buffer} = 100\%$ . Dit dient vergezeld te worden van een parameter die aangeeft hoe groot de verhouding is tussen de aangeboden energie en de mate van ingezette primaire energie voor laden, compensatie en/of ontladen:

$$k_{buffer} \equiv \frac{Q_{aanbod}}{\sum_i Q_{primair,i}} \quad (8)$$

**Opmerking:**

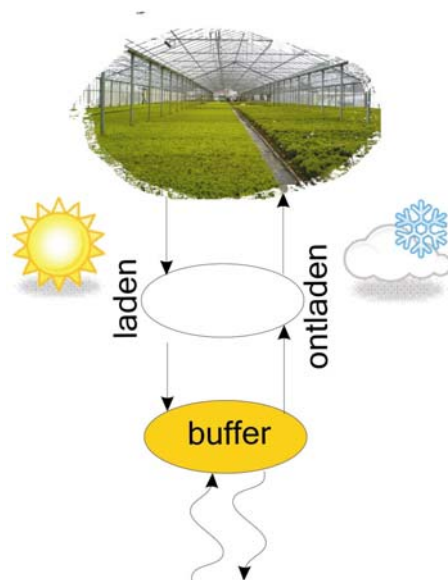
De strikte scheiding van de bovenstaande 3 stadia is een vereenvoudiging van de werkelijkheid. In de regel zullen de perioden van laden-wachtstand elkaar voortdurend afwisselen, zo ook voor de perioden wachtstand-ontladen. Bovendien dient te worden opgemerkt dat bij de verschillende stadia warmtewisselaars worden ingezet tussen de verschillende circuits. In het algemeen kan gesteld worden hoe meer circuits waarin warmte overgebracht moet worden hoe meer temperatuurverval en daarmee exergieverlies. Dit laatste heeft als gevolg dat voor het behoud van de kwaliteit van gebufferde energie er een exergiecorrectie nodig is door toepassing van warmtepompen en extra hulpenergie.

**3.2 De specifieke capaciteit en positionering**

Een relevante parameter voor energieopslag is de specifieke buffercapaciteit: deze geeft aan hoeveel energie kan opgeslagen worden per  $m^3$  buffer. Deze is ook uit te drukken in de hoeveelheid energie per massa-eenheid buffer, maar die aanduiding is voor kassen minder relevant. Samen met hoe een buffer gepositioneerd kan worden, bepaalt dit volume de hoeveelheid energie per  $m^2$  perceel.

**3.3 De koudevraag, warmtevraag en buffergrootte***Koudevraag, warmtevraag:*

Voor de omvang van een bepaald type buffer is de jaarlijkse warmtevraag of de koudevraag bepalend. De omvang van de buffer kan bepaald worden door ofwel de koudevraag in de zomer, dan wel de warmtevraag in de winter. In het meest ideale geval zal de buffer voldoende kunnen laden om aan de koudevraag te doen van de gesloten kas, om vervolgens voldoende energie te hebben opgeslagen voor de verwarming van de kas tijdens het stookseizoen.

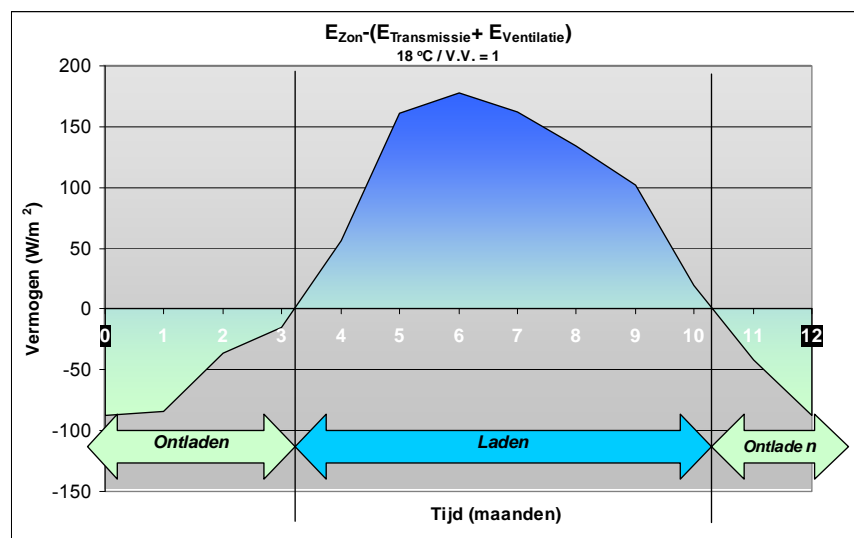


Figuur 6 De buffer dient voor zowel koeling als verwarming.

Hierbij blijft de buffer jaarlijks in balans en wordt niet ‘oververhit’ dan wel onderkoeld.

In de praktijk zal echter de koudevraag en warmtevraag (gecorrigeerd met bufferweglek, dan wel -inlek en externe hulpenergie) meestal niet aan deze ideale situatie voldoen (teeltype maar bijvoorbeeld ook door seizoenverschillen). In dat geval wordt ofwel de koudevraag dan wel de warmtevraag niet gedekt door de buffer. Bij een structureel overschot kan afgifte plaatsvinden aan andere kassen volgens het semi-gesloten concept.

Een eenvoudige uurlijkse simulatie van een kas met constant ventilatievoud, zonder zonwering en constante operationele temperatuur geeft een impressie van de verhouding tussen ingevangen zonnewarmte en transmissie- en ventilatieverliezen. Figuur 7 geeft de maandelijkse balans weer tussen zonnewarmte en de transmissie- en ventilatieverliezen van de berekening (dan wel transmissie- en ventilatiewinsten in de zomer in geval van relatief lage operationele kastemperaturen).



Figuur 7 De netto maandelijkse overschotten van zonnewarmte na correctie op transmissie en ventilatie voor een kas op een constante temperatuur en een constant ventilatievoud.

In Nederland vindt de gewasteelt plaats bij een gemiddelde dagtemperatuur in de range van 8 tot en met 21 [°C] (zie als voorbeeld de gegevens in tabel 1 voor belangrijke Nederlandse teelten – ref. [22].)

De *ficus* is een voorbeeld van een teelt bij hoge temperatuur. De *sla* en *freesia* zijn typisch teelten bij een lage kastemperatuur.

Tabel 1 Verschillende klimaatinstellingen voor belangrijke Nederlandse teelten [1]

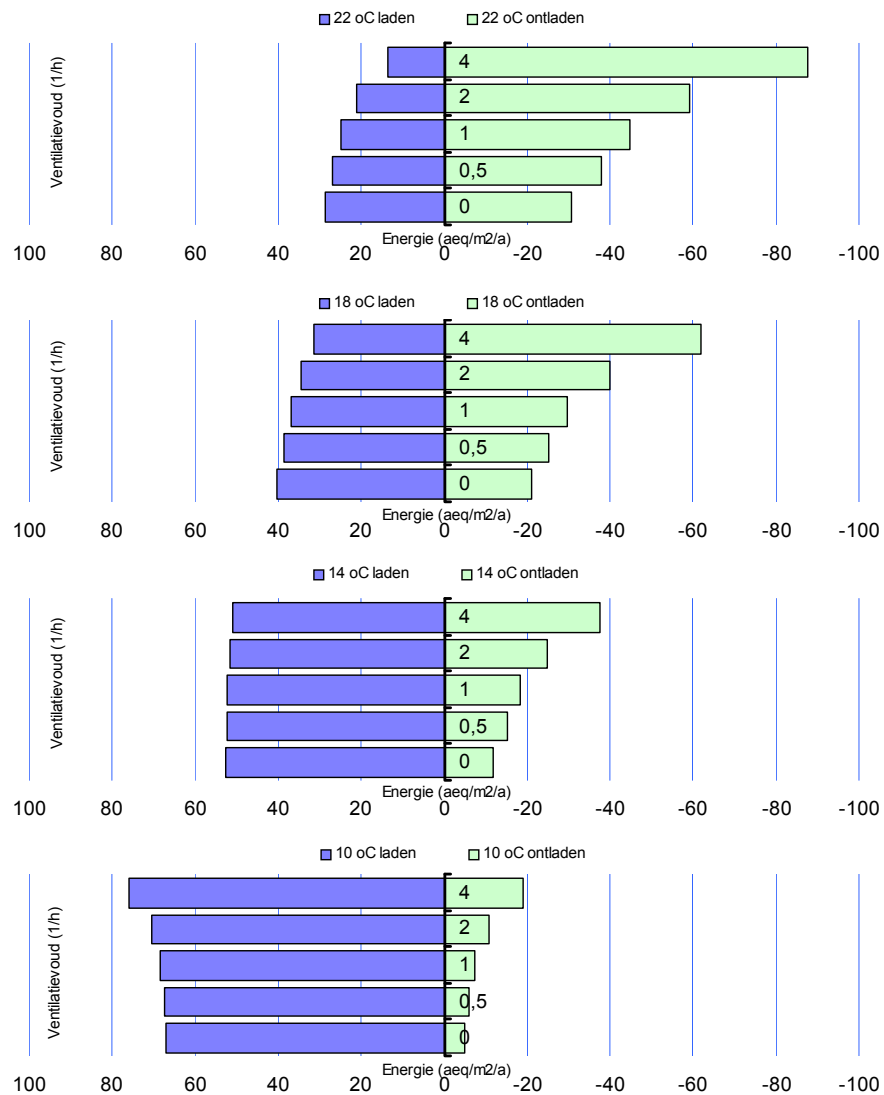
	Tomaat	Komkomme	Chrysant	Roos	Sla	Ficus	Freesia	Spatiphyllur
T_dag (oC)	19	22	18,5	19	11	21	8	7
T_nacht (oC)	16,5	17	21,5	18	7	21	7	20,5
RV sp (%)	85	85	87-90	85	95	90	87	88
CO2 sp (ppm)	1000	650	900	1000	300	500	600	500
Belichting (W/m2)			35	50			12,5	12

Op basis van die uitgangspunten geeft figuur 8 een overzicht van de maximaal aangeboden zonne-energie in [ $\text{aeq}/\text{m}^2$ ] voor het laden in de seizoensbuffer (gelijk aan blauwe oppervlak in figuur 7) en de noodzakelijke stookenergie (gelijk aan groene oppervlak in figuur 7), eveneens in [ $\text{aeq}/\text{m}^2$ ]. In feite wordt vereenvoudigd een jaarlijkse koudevraag (laden), dan wel warmtevraag (ontladen) aangegeven onder aanname van een constant ventilatievoud, constante kastemperatuur en constante transparantie van het glas voor temperaturen 10, 14, 18 en 22 [ $^{\circ}\text{C}$ ] en bij een ventilatievoud van respectievelijk 0, 0.5, 1, 2 en 4.

Voor de gesloten kas (de situatie met ventilatievoud = 0) is er meer koudebehoefte in de zomer dan warmtebehoefte in de winter, met uitzondering voor de hogere temperatuurkas (22 [ $^{\circ}\text{C}$ ]), waar de verhouding ongeveer gelijk is. Voor de situaties van  $T_{\text{kas}} = 22$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] tot en met  $T_{\text{kas}} = 14$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] heeft ventileren met buitenlucht in het koelseizoen nog zin. Voor lagere operationele temperaturen wordt er netto warmte de kas ingeblazen in plaats van eruit gebracht tijdens het koelseizoen.

Al met al geeft figuur 8 een eerste indruk van de verhouding tussen de warmte- dan wel koudevraag. Daarmee wordt enerzijds onderstreept dat er in de regel een overmaat aan zonnewarmte is. Anderzijds laat het zien dat dit de keuze van de buffergrootte beïnvloedt.





Figuur 8 De netto maandelijke overschotten van zonnewarmte na correctie op transmissie en ventilatie voor een kas op een constante temperatuur van 18 oC en een constant ventilatievoud van 1.

#### *Buffergrootte:*

In het algemeen kunnen we stellen voor een (semi)- gesloten kas de koudevraag groot is wanneer er geen zonwerende maatregelen worden getroffen.

Op basis van figuur 8 is een eerste conclusie dat voor een (semi) gesloten kas de buffergrootte het beste dusdanig gekozen worden dat de warmtevraag geleverd kan worden, en de zonwerende maatregelen in werking treden op het moment dat de buffer geladen is.

We veronderstellen verderop, mits anders vermeld, dat de **warmtevraag leidend** is. In het geval zonwerende maatregelen niet afdoende zijn om koudevraag voldoende te reduceren dient er een heroverweging plaats te vinden of de warmtevraag leidend moet zijn.

De buffergrootte wordt bepaald door:

$$\min (Q_{aanbod}, \{ Q_{afgifte} / \eta_{buffer} - \sum_i W_{hulp,i} \}) \quad (9)$$

waarbij  $Q_{aanbod}$  de optimaal haalbare aanbod aan zonnewarmte, en  $Q_{afgifte}$  de warmtevraagbehoefte is (zie ook verg. 7).

Hierbij staat **min voor het bepalen van** de minimale waarde van maximaal aan te bieden zonnewarmte dan wel de noodzakelijke zonnewarmte voor het voorzien van warmte in het stookseizoen via de seizoensbuffer.

In het geval van een laag haalbaar zonaanbod zal deze waarde de buffergrootte gaan bepalen, terwijl in het geval van voldoende zonaanbod maar een lage zonbehoefte (oftewel  $Q_{afgifte} / \eta_{buffer} - \sum_i W_{hulp,i}$  is klein) dan deze laatste waarde leidend is.

Op basis van vergelijking 1b kan vervolgens de  $Q_{buffer}$  vastgesteld worden:

$$Q_{buffer} = \eta_{overall-laden} \{ [\min (Q_{aanbod}, \{ Q_{afgifte} / \eta_{buffer} - \sum_i W_{hulp,i} \})] + W_{hulp,i} \} \quad (10)$$

Vervolgens kan op basis van de specifieke buffercapaciteit (energie-inhoud per volume-eenheid):

$$\varepsilon \equiv Q_{buffer} / V_{buffer} \quad (11)$$

het benodigd buffervolume en het bijbehorend ruimtebeslag per  $m^2$  bepaald worden.

#### Samenvattend:

De uiteindelijk buffergrootte wordt in eerste instantie bepaald door *of* de maximaal haalbaar aangeboden zonnewarmte *of* de gevraagde warmte, daarnaast door het bufferrendement, het overall-laadrendement en de specifieke buffercapaciteit [ $MJ/m^3$ ].

Op basis van het mogelijke volume per eenheid (kas)oppervlak volgt hieruit het ruimtebeslag met als eventuele limitering het totale kasareaal.

Gegeven de gewenste buffercapaciteit kan men de verschillende technologieën die daarvoor in aanmerking komen analyseren op bruikbaarheid en andere criteria.

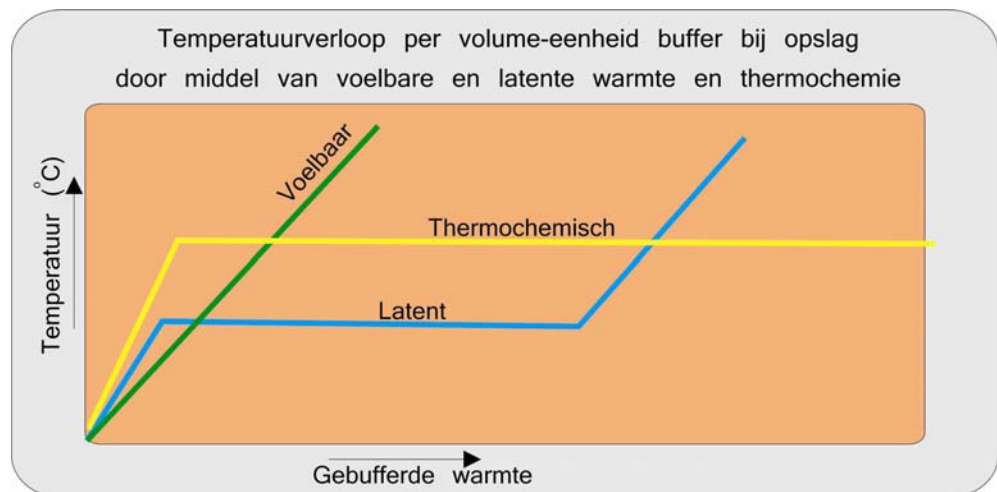
## 4 Opslagprincipes en hun kenmerken

### 4.1 Opslagprincipes

Bij de technieken voor thermische opslag (zonnewarmte) zijn voor de glastuinbouw relevante systemen drie principes te onderscheiden.

- Opslag in stoffen die qua fase onveranderd blijven maar waarvan de temperatuur door energieopslag of –onttrekking verandert. Dit principe dekt de opslag en het gebruik van voelbare warmte.
- Opslag in de faseovergang (phase change) van een materiaal, waarbij de temperatuur dan gelijk blijft. Dit principe noemen we opslag van latente warmte.
- Opslag via omkeerbare chemische (bindings)reacties waarbij warmte zorgt voor splitsing van een materiaal in twee componenten die, bij elkaar gevoegd, reageren tot het uitgangsmateriaal en weer warmte vrijgeven. Dit treedt op bij ab/adsorptie of via chemische splitsing/recombinatie.
  - Bij sorptietechnieken wordt energie opgeslagen of vrijgegeven door adsorptie of absorptie. Bij adsorptie reageert een gas of vloeistof aan het *oppervlak* van het bulkmateriaal. Bij absorptie wordt de vloeistof opgenomen *in* het bulkmateriaal en treedt er een covalente binding op. De bindingsenergie is dan hoger dan bij adsorptie.
  - Bij chemische splitsing/recombinatie worden stoffen omgezet in een andere stof met een andere chemische samenstelling.

De temperaturen in de opslag van latente en voelbare warmte of in thermochemische vorm per volume-eenheid buffermateriaal kunnen als volgt worden weergegeven (zie fig. 9).



Figuur 9 Karakteristiek temperatuurverloop bij thermische opslagprincipes

Naast bovengenoemde principes voor thermische opslag zijn er ook nog andere vormen van energieopslag die om bijgenoemde redenen niet nader beschouwd zullen worden:

- Elektrochemisch opslag, bijvoorbeeld in de vorm van batterijen. In feite fungeert elke technologie waarmee ingevangen zonnewarmte kan worden omgezet in elektriciteit als buffer zodra de levering aan het net op enig moment kan worden gecompenseerd door afname uit het net. Wegens hoge terugverdientijden van fofovoltaïsche cellen (~ 30 jaar), dan wel het hoge gewicht aan Li-ion batterijen (100 kg aan batterijen voor opslag van 1 [aeq]), dan wel eventuele waterstofopslag in combinatie met nog niet uitontwikkelde brandstofcellen maakt dat deze vorm van opslag hier buiten beschouwing wordt gelaten.
- Chemische opslag, bijvoorbeeld in de vorm van biobrandstoffen (of waterstof). Deze vorm vraagt om de aanwezigheid van koolstofhoudende brandstof, (eventueel CO<sub>2</sub> uit de lucht). Maar dergelijke processen van vergisting en vergassing behelzen een extra keten aan brandstofvoorziening wat de zonnewarmte slechts als een beperkte speler in de energieketen maakt. Om die reden wordt ook deze vorm van opslag niet nader bekeken.
- Mechanisch opslag: bijvoorbeeld door opslag in de vorm van kinetische energie (bijv. vliegwiel), potentiële energie (gecomprimeerde lucht, hydrau-elektrisch) of via veren. Echter, de energiedichtheid is zeer laag en de techniek is kostbaar: Ter illustratie :  
1 [aeq] komt overeen met:
  - een betonnen vliegwiel met een diameter van 2,6 meter en een dikte van 0,25 m met 25 rotaties per seconde,
  - met 147 betonblokken van 1 m<sup>3</sup> geheven tot op een hoogte 10 meter;
  - met een op druk gebrachte luchtcilinder van ruim 2 meter lang met een diameter van 0,5 [m] en op druk gebracht tot 200 [bar].

Bovendien is de conversie van zonnewarmte naar deze vormen van opslag bijzonder kostbaar. Daarom zijn mechanische opslagstechnieken niet geschikt voor seizoensbuffering.

## 4.2 Fysische kenmerken buffermaterialen

Bij de 3 onderscheiden principes in 4.1 kunnen voor de feitelijke opslag verschillende buffermaterialen worden gebruikt. De belangrijkste kenmerken van de verschillende opslagmaterialen voor het functioneren als buffer zijn:

- De warmtecapaciteit; Deze wordt, afhankelijk van het bufferprincipe, bepaald door de enthalpie, de condensatie- of verdampingswarmte, de stollingswarmte of de ad/absorptiewarmte.
- Het temperatuurniveau waarbij de buffering (opname en afgifte) zal (kan) plaatsvinden. Naarmate deze temperatuur verder aflight van het niveau waarbij het direct kan worden toegepast zal warmtewisseling of –opwaardering nodig zijn. Daarnaast bepaalt (bij opslag van latente - / voelbare warmte) het temperatuurniveau waarbij de buffering plaatsvindt de omvang van het verlies naar de omgeving.
- De warmtegeleidingcoëfficiënt; Dit is een bepalende factor voor de momentane capaciteit (piekvermogen) van een buffer. Naarmate deze hoger is zal een energie sneller kunnen worden geladen of onttrokken aan een buffer.

- De dichtheid; naarmate de dichtheid van het buffermateriaal groter is zal de omvang van de buffer voor een bepaalde capaciteit kunnen afnemen.

De hoofdkenmerken van de verschillende opslagmaterialen voor het functioneren als buffer zijn opgenomen in de tabel in bijlage A.

Uit dit overzicht blijkt ondermeer:

- Bij de opslag als voelbare warmte ligt de opslagcapaciteit per eenheid van volume voor water het hoogst. Bijmenging van vaste stoffen verlaagt in het algemeen de opslagcapaciteit per eenheid van volume.
- Bij opslag via een faseovergang (latente warmte) hebben (mengsels van) anorganische materialen doorgaans een grotere capaciteit dan organische.
- Latente energieopslag is vergelijkbaar met een temperatuurlift van vloeibaar water van 30 – 60 [°C] (voelbare warmteopslag) in geval van PCM in zijn pure vorm (geen kapseling).
- Chemische energieopslag via sorptie heeft de hoogste energiedichtheid en ligt (theoretisch) 8 – 15 keer hoger dan bij de toepassing van latente warmteopslag.
- Chemische opslag via een reversibele reactie vraagt hoge reactietemperaturen, zeker bij hoge opslagcapaciteit.

#### 4.3 Algemene kenmerken van de opslagprincipes

Voor de onderscheiden principes kan ook een aantal algemene kenmerken worden aangegeven.

##### Voelbaar

Bij de opslag als voelbare warmte in water hebben we te maken met het medium dat normaliter voor het energievoorzieningssysteem van een kas wordt gebruikt. In de glastuinbouw is opslag in water al een standaardtechniek voor korte termijnbuffering (dag/nacht) bij gebruik van WKK's.

Bij de opslag in water is de stratificatie van temperatuur en het in stand houden ervan van belang. Op die manier kan bijvoorbeeld uit een buffer warmte dicht bij de gewenste of benodigde temperatuur worden onttrokken. Tegelijkertijd dient het water dat voor opslag wordt aangeboden aan de buffer bij voorkeur op het temperatuurniveau te worden ingebracht dat nagenoeg overeenkomt met het temperatuurniveau van het aangeboden water.

De capaciteit van opslagtechnieken volgens dit principe is vrij beperkt zodat een groot volume beschikbaar moet zijn om opslag voor een langere periode mogelijk te maken<sup>1</sup>.

Bij andere vloeistoffen zijn hogere temperaturen dan 95 – 100 [°C] denkbaar, waardoor de opslagcapaciteit kan toenemen. Maar dat stelt eisen aan het opwaarderen van door de zon geleverde warmte en de mogelijke extra inzet van fossiele brandstoffen. Bij hogere temperaturen nemen ook de verliezen toe.

<sup>1</sup> Een bassin van 3 meter diep met een aangebrachte temperatuurlift van 30 graden levert 10 [aeq/m<sup>2</sup>] aan opgeslagen warmte (zie voor meer details de criteria in hoofdstuk 6).

Er is, door de aard van dit bufferprincipe, steeds sprake van energieverlies uit het buffersysteem gedurende de periode van opslag. Om de theoretisch maximale capaciteit zoveel mogelijk te benaderen is thermische isolatie van zo'n buffer noodzakelijk. De omvang van het bufferverlies is afhankelijk van de isolatiedikte, de temperatuur van het buffermateriaal en de thermische eigenschappen en temperatuur van de omhullende omgeving gedurende de opslagperiode. Het een en ander is nader gekwantificeerd bij de criteria van waterbassins (zie hoofdstuk 7.3).

#### Latent

De opslagcapaciteit (enthalpie) in faseovergangen (smelten / kristalliseren / verdampen) wordt bepaald door de materialen die men voor de faseovergang toepast.

Het meest bekende voorbeeld van een faseovergang is die van water naar ijs.

Water heeft bij de faseovergang naar ijs (en andersom) een opslagcapaciteit die gelijk is aan de capaciteit voor het opwarmen van water met 80 graden. Op hoofdlijnen kan men zeggen dat faseovergangsmaterialen zo'n 2 keer de capaciteit van een watertank ( $\Delta T = 40$  [K]) met hetzelfde volume hebben.

De meest gebruikte faseovergangsmaterialen voor thermische opslag zijn echter paraffinen, vetzuren en zouthydraten. Deze staan ook bekend als Phase Change Materials (PCM's)

Specifieke kenmerken van deze buffermedia zijn:

- Zouthydraten
  - Hoge opslagdichtheid
  - Niet brandbaar
  - Diverse materialen bij verschillende temperaturen beschikbaar maar het is moeilijk om goed een bepaalde smelttemperatuur te realiseren
  - Diverse goedkope opties beschikbaar
  - Doorgaans erg corrosief.
- Paraffinen
  - Deze stoffen zijn niet giftig en niet corrosief maar wel erg brandbaar
  - Een precieze keuze van het gewenste temperatuurtraject is mogelijk
  - Weinig kans op onderkoeling
  - Stabiliteit voor de lange termijn.  
PCM's in bolletjes maakt het materiaal verpompbaar. Zo kan het bijvoorbeeld deel uitmaken van een watervoerend systeem. De bolvorm is voor maximalisering van de warmteoverdracht per eenheid volume ongunstig.
  - Ten opzichte van zouthydraten is de warmtegeleiding en de enthalpie van paraffinen beperkt.

De samenstelling van een eutectisch mengsel dient zodanig te zijn dat het congruent smelt. Dat wil zeggen dat ook na herhaaldelijke cycli de opslagcapaciteit onveranderd blijft. Grote temperatuurschommelingen kunnen bij zouthydraten resulteren in modificaties in (verhoudings)samenstelling waardoor de opslagcapaciteit kan afnemen.

Ook moet onderkoeling worden voorkomen omdat dan de warmte niet op het gewenste moment beschikbaar komt. Met name geldt dit voor zouthydraten. De warmteafgifte kan kristallisatie tot gevolg hebben waardoor ten gevolge van de groeiende kristallaag de warmteoverdracht van de buffer afneemt. Om die reden zijn verpompbare capsules met het medium ontwikkeld.

Wil men de PCMs direct toepassen voor opname uit en afgifte aan de kaslucht dan kan de smeltemperatuur worden gekozen tussen de gewenste instelling van de dagtemperatuur en de nachttemperatuur. Door een tijdelijk hogere temperatuur toe te laten kan de omvang van de totale opslag toenemen, maar vraagt om opwaardering van de te bufferen warmte.

Ook bij dit bufferprincipe is er steeds sprake van energieverlies gedurende de opslag. Evenals bij de opslag in bijvoorbeeld water is de omvang van dat verlies afhankelijk van de isolatiedikte, de temperatuur van het buffermateriaal en de thermische eigenschappen en temperatuur van de omhullende omgeving gedurende de opslagperiode. Meer specifieke details worden besproken bij de technische analyse van PCM in een ondergronds bassin.

#### Thermochemische opslag via sorptie

Bij thermochemische opslag kan een capaciteitsvergroting worden bereikt die een factor 10 of hoger ligt ten opzichte van PCM's. Bij dit principe gaat tussen het splitsen en recombineren van stoffen geen energie meer verloren.

De bruikbaarheid als buffermogelijkheid wordt echter gedomineerd door het temperatuurniveau waarbij de conversie (splitsing) moet plaatsvinden.

Energieopslag in adsorbentia zoals zeoliet of silica gel, wordt gekenmerkt door de te bereiken hoge energiedichtheid. Daarbij is water bij uitstek geschikt om als adsorbent te dienen vanwege zijn hoge condensatiewarmte per eenheid volume bij kamertemperatuur).

Belemmeringen bij het toepassen van adsorbentia zijn:

- dat deze in combinatie met water alleen goed werken met waterdamp. Bij aanraking met water als *vloeistof* kan na een aantal cycli de werking van de adsorbentia verloren gaan.
- De warmtegeleidingcoëfficiënt van de adsorbentia is laag en dit heeft een direct gevolg voor de snelheid van toe- en afvoer van energie. Het adsorbent dient dus in kleine bolletjes of in de vorm van een dunne laag te worden gehanteerd zodat het specifiek vermogen [W/kg] wordt gemaximaliseerd.
- Silicagel, metaalhydraten of zeolieten zijn in onderzoek op bruikbaarheid voor opslag via adsorptie. De energiedichtheid ligt in de orde van 0,5-0,9 [GJ/m<sup>3</sup>] terwijl deze systemen werken in een temperatuurrange van 20-150 [°C]. De regeneratietemperatuur van water uit silicagel ligt op 175 [°C] en voor zeoliet boven de 200 [°C].
- Chemische splitsing en recombinatie: warmte kan chemisch worden opgeslagen door metaalhydriden te ontleden in waterstof en het metaal zoals bij ijzerhydroxide of ijzercarbonaat. Dit proces is reversibel en vindt plaats op doorgaans hoge temperaturen en vraagt om een aparte reactor. Een groot voordeel van de chemisch opgeslagen energie is dat deze lang kan worden bewaard.

## 5 Buffertechnologieën en hun kenmerken

Er zijn binnen de 3 hier te beschouwen principes diverse technologieën beschikbaar of in ontwikkeling waarmee tijdelijke opslag van energie kan plaatsvinden.

Een inventarisatie van thans beschikbare technologieën binnen de hoofdprincipes en de belangrijkste karakteristieken voor wat betreft de primaire toepassingsmogelijkheden levert een overzicht op volgens bijlage 2.

De technologieën die men *uiteindelijk* voor buffering effectief kan inzetten beslaan een gebied dat allereerst wordt afgebakend door:

- de **temperatuurrange**. De buffertechnologie zal qua temperaturen zoveel mogelijk moeten zijn afgestemd op de range waarin de opgeslagen energie moet worden gebruikt. Naarmate daarvan wordt afgeweken zijn tussenstappen (warmtewisseling, opwaarderen) noodzakelijk.
- de **capaciteit**. Naarmate de capaciteit van een buffer toeneemt, zal de ook de gebruikswaarde over een groter deel van het seizoen toenemen. Die capaciteit is doorgaans gekoppeld aan het volume van de buffer. Dat volume moet worden gerelateerd aan het daarvoor beschikbare kasoppervlak.
- De mate van **volwassenheid** van de technologie. Alleen van nu op de markt zijnde technologieën kan men de kenmerken en de kosten bij toepassing redelijk vaststellen. Voor technologieën die in een demofase of wellicht zelfs nog in een experimenteel stadium zijn is dat veel moeilijker. Wel is het van belang om een doorkijkje te hebben van wat op dit gebied in de pijplijn zit om zo voor deze opties ook de mogelijkheden en eisen op de langere termijn te kennen.

Zo volgt uit het overzicht in bijlage 2 onderstaande tabel 2 met nader te analyseren alternatieven voor seizoenopslag.

Tabel 2 Overzicht marktrijpe opties voor buffering

Nr	Technologie-omschrijving	Opmerkingen
<b>Voelbare warmte</b>		
1	Waterbassin buiten de kas	Buffering op basis van water als opslagmedium
2	Klimrek warmtebuffer	Buffering op basis van water als opslagmedium onder een gedeelte van de kas
3	Gaasboxx warmtebuffer	Buffering op basis van water als opslagmedium onder de gehele kas
4	Bodemopslag - ondiep	<u>Gesloten</u> systeem met bodem op 2 – 10 meter als buffer
5	Verticale ww in de bodem	<u>Gesloten</u> systeem met de bodem tot 50 - 100 meter als buffer
6	Opslag in diepe ondergrond	Hoogtemperatuur; Gebruik van (zout)watervoerende lagen op 200 – 500 meter
<b>Latente warmte</b>		
7	Phase Change Materials, ongekapseld	Een bassin / bodem van PCM's onderin de kas
8	Phase Change Materials, slurry	Een reservoir onderin de kas met slurry voor PCM's



Van de afzonderlijke technologieën die potentieel hebben voor thermische opslag zijn in de navolgende paragrafen de kenmerken beschreven. Enerzijds geven de kenmerken indicaties voor criteria die men aan buffers kan stellen. Anderzijds bepalen de kenmerken hoe de technologie scoort op de verschillende criteria die de toepassing van de buffer stelt.

In deze studie is de aquifer als referentiepunt gehanteerd voor seizoenopslag in de glastuinbouw. De kenmerken daarvan zijn in bijlage 3 aangegeven.

*Opmerking:*

*Daar waar de kenmerken een indicatie zijn voor een toepassingscriterium is dat criterium in **vet** aangegeven.*

Elk van de in tabel 2 genoemde alternatieven heeft zijn specifieke eigenschappen en daarmee voordelen en beperkingen. De basis voor die kenmerken volgt allereerst uit de basisprincipes van voelbare warmte en de latente warmte opslag zoals aangegeven in hoofdstuk 4. Een meer uitgebreide beschrijving van de bovenstaande alternatieven volgen uit de gedetailleerdere beschrijving bij de voorbeelden van de criterialijsten in hoofdstuk 6. Hier zullen we ons beperken tot een korte omschrijving.

## **5.1 Waterbassin buiten de kas**

Met een waterbassin buiten de kas wordt bedoeld de opslag van voelbare warmte in een watertank. Deze kan bovengronds, dan wel ondergronds worden opgesteld. Hierbij wordt de stalen tank uitwendig geïsoleerd. De temperatuur kan hierbij oplopen tot 95 [°C].

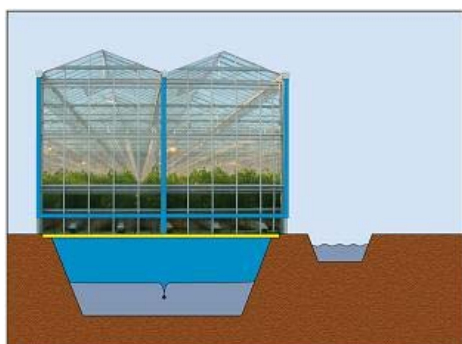
Vanwege de beperkte buffercapaciteit gerelateerd aan de m<sup>2</sup> kasoppervlak wordt deze opslagvorm vaak toegepast tot hoge temperaturen om resterend WKK warmte af te voeren in geval er noodzaak is tot elektriciteitsproductie dan wel CO<sub>2</sub> productie. Een tank volstaat voor warmte buffering in een etmaal. Voor seizoensbuffering zijn de mogelijkheden beperkt. Opslag van zonnewarmte tot hoge temperaturen is, zonder extra installaties als een warmtepomp, of zonnecollectoren, niet mogelijk en verliest een extern waterbassin zijn waarde.

## 5.2 Waterbassin onder (een gedeelte van) de kas: Klimrek buffer

Vanuit een bestaande kas is het mogelijk tot 4 meter diepte de bodem af te graven onder de kas en te voorzien van een waterdichte bekleding. Afhankelijk van de bedrijfstemperatuur van de buffer (van 5 – 95 [°C]) past men verschillende materialen toe. Voor temperaturen tot 50 C wordt PP of PE gebruikt. Voor hogere temperaturen tot 95 [°C] is alleen het synthetische rubberfolie EPBM (ethyleen-propyleen-dieenmonomeer) geschikt dat een hoge weerstand heeft tegen veroudering. Het bassin kan naast gebruik voor koude- dan wel warmteopslag ook worden ingezet voor waterberging vanuit de omgeving via omliggende sloot en de opvang van hemelwater voor latere begieting. Door het toepassen van een horizontale scheidingsfolie in het bassin is hierbij de via het dek opgevangen regenwater opgeslagen in het bovenste compartiment, het omgevingswater (via sloot ) in de onderste (zie figuur 10).

Het nadeel van toepassen van louter en alleen EPBM folie bij hogere watertemperaturen is dat de isolatie naar de omliggende bodem slecht is. Om dit te ondervangen is het eerst aanbrengen van isolatie met een optie. Dit vraagt aandacht met betrekking tot het drooghouden van het isolatiemateriaal.

De top van de buffer wordt voorzien van geschakelde sandwichplaten (geïsoleerd) als harde ondergrond die vrijelijk mee kunnen bewegen met het buffer niveau zodat de inhoud licht kan variëren. De aanleg van een buffer is vergunningsvrij.



Figuur 10 Gevulde klimrek buffer met scheiding van regenwater en omgevingswater.

Opslag van hoge temperatuurwaarden ( $> 30$  [°C]) in het bassin vraagt, in geval van zonnewarmte opslag, extra installaties zoals warmtepompen dan wel buiten de kas opgestelde zonnecollectoren.

### 5.3 Waterbassin onder (een gedeelte van) de kas: Gaasboxx®-systeem

Het Gaasboxx-systeem is bewezen techniek om een stabiele ondergrond te creëren met een vrij volume van 94 [%]. De techniek is van oorsprong ontstaan uit bij de weg- en water bouw als regeninjectiesystemen. De honingraatstructuur van de eenvoudig te stapelen polypropyleen blokken van 90 x 60 x 45 [cm<sup>3</sup>] neemt slechts 6 [%] in, maar heeft een zeer sterke structuur. Met behulp van een omhullende waterdichte folie om de gestapelde blokken wordt uiteindelijk de buffer gerealiseerd onder de kas.

Vanwege het feit dat het Gaasboxx systeem een hoge belasting kan toestaan is het ook mogelijk ook buiten de kas ondergrondse buffers aan te leggen, zonder de functionaliteit van bijvoorbeeld rijwegen te belemmeren. Met betrekking tot de warmte-opslag is de functionaliteit gelijk die aan het Klimrek buffer. Wat het de variatie van de buffergrootte aangaat dient opgemerkt te worden dat bij het klimrekbuffer ondersteuning plaatsvindt door het water zelf, terwijl bij Gaasboxx de stabiliteit vanuit de starre honingraatstructuur wordt gegeven. Door de constructie van de vaste Gaasboxx elementen heeft grondzetting mogelijk wel invloed op de buffer, bij enkel een folie (Klimrek) is de constructie flexibel.

Ook bij Gaasboxx buffers geldt dat laden van zonnearmte > 30 [°C] warmtepompen dan wel bij andere installaties nodig zijn.

### 5.4 Bodemopslag ondiep via bodemwarmtewisselaars

Met behulp van verticale dan wel horizontale bodemwarmtewisselaars is het mogelijk de eerste 2 – 10 meter van de ondergrond thermisch te activeren dan wel te ontladen met behulp van gesloten lussen. In de lussen bevindt zich in de regel een mengsel van water/glycol. Dit mengsel transporteert de warmte tussen kas en bodem, meestal met tussenkomst van een elektrische – dan wel gasaangedreven warmtepomp. Hiermee is het mogelijk de bodem op temperaturen onder 0 [°C] dan wel ver boven de 60 [°C] te brengen met behulp van warmtepompen. Hogere dan wel lagere temperaturen zijn eventueel mogelijk, maar zijn voor warmtepompen niet efficiënt realiseerbaar voor kassen die opereren op gemiddeld 20 – maximaal 30 [°C].

Echter, restwarmte van de WKK installatie is eventueel wel op te slaan in de ondergrond. Momenteel zijn er vergunningstechnische geen belemmeringen voor het toepassen voor gesloten systemen, met uitzondering van beschermde waterwingebieden en natuurgebieden. Echter, een algemeen hernieuwd beleid omtrent gesloten systemen is in ontwikkeling.

Er dienen boringen plaats te vinden van gesloten lussen om de 5 – 8 meter. In geval van de inzet van de eerste 2 meter bodem kunnen geulen gegraven worden waarin spiraalvormige leiding gelegd kan worden.

De warmtecapaciteit van de bodem (2,2 [MJ/m<sup>3</sup>.K]) is ongeveer 50 [%] lager dan die van water. Tevens is de warmtegeleiding niet zo hoog als bij het convectieve warmtetransport in water.

Een energetische vergelijking zal dus al snel uitvallen ten gunste van een op water gebaseerd systeem, temeer daar in tegenstelling tot waterbassins geen isolatie van de bodem kan plaatsvinden.

## 5.5 Verticale warmtewisselaar in de bodem

Boringen van gesloten lussen zijn in de praktijk mogelijk van 50 -100 meter (en zelfs dieper). In principe is het een vergroting van de betrokken ondergrond zoals hierboven beschreven, waarmee bij benadering de capaciteit van de bodembuffer evenredig toeneemt met de diepte. Ook hier geldt dat boringen dienen plaats te vinden om de 5 – 8 meter, waarbij er voor gezorgd dient te worden dat ondoordringbare ondergrondse kleilagen afgedicht worden na plaatsing van verticale buissystemen. Ook hiervoor geldt dat er momenteel geen vergunning noodzakelijk is wanneer het niet beschermde ondergrond betreft met betrekking tot bijv. grondwaterwinning. De overige kenmerken zijn gelijk aan die van gesloten systemen in de ondiepe ondergrond.

## 5.6 Opslag in diepe ondergrond

De aquifer in de diepe ondergrond (300 – 1000 [m]) komt in grote lijnen overeen met de gewone aquifer maar er zijn duidelijke enkele verschillen. Deze diepere ondergrond heeft in de regel hogere watertemperaturen vanaf 20 [°C] - 40 [°C] met als gevolg dat temperatuurverhogende warmtepomptechnologie tijdens het stookseizoen niet nodig is<sup>1</sup>. De haalbare debieten zijn voor buffers in de regel hoger (100-200 [m<sup>3</sup>/hr]) dan wat mogelijk is voor ondiepe aquifers (50 [m<sup>3</sup>/hr]). Daartegenover staat dat het zoutgehalte van het water op die diepten hoog is en om die reden lozing moet plaatsvinden in dezelfde laag, wat pleit voor een doublet-constructie (haalput en injecteerput). Een tweede belangrijke reden is om zo de laag op druk te houden. Bovendien is zijn niet overal in Nederland dergelijke geschikte lagen aanwezig. In het bijzonder de doorstroming van de laag is een belangrijke parameter. Deze dient voldoende hoog te zijn (> 15 Dm) om excessieve pompcapaciteiten voor zowel het onttrekken als injecteren te vermijden. Last but not least dient opgemerkt dat de diepe aquifer met temperaturen > 30-35 [°C] niet zozeer meer zal optreden als *buffer* maar als *bron*! Wanneer de diepe aquifer toegepast zal worden als buffer dan dient de zonnearmte uit de kas boven een temperatuur van > 35 [°C] gebracht te worden. Warmtepompen worden bij het laden boven deze temperatuurniveaus onrendabel.

## 5.7 PCM, ongekapseld

Phase Changing Materials (PCMs) kunnen geplaatst worden op in een ondergronds bassin. Speciale zorg dient besteed te worden in geval van organische PCM tegen het risico van verdamping van VOCs, de volumeverandering bij de faseovergang en de brandbaarheid. Anorganische PCMs hebben de neiging tot supercooling en vraagt om additieven om ongecontroleerde warmteoverdracht te voorkomen.

Ongekapselde PCMs hebben een latente warmteopslag die vergelijkbaar is met een temperatuurlift van water van ongeveer 40 °C. In ongekapselde vorm is het PCM niet transporteerbaar op het moment van de gestolde toestand en is een warmtewisselend oppervlak gelijk aan de constructie als bij bodemwarmtewisselaars noodzakelijk. De bassin wand, dan wel folie dient chemisch inert te zijn voor het gebruikte PCM (en dat geldt niet voor EPDM in combinatie met oliën). Voordeel van de toepassing van PCM materiaal is dat de smeltemperatuur gekozen kan worden tussen de 7 – 100 [°C],

<sup>1</sup> Wanneer diepten van meer dan 1 km worden toegepast (we spreken dan al van geothermische energie, wordt hier niet verder uitgewerkt) dan zijn organische rankine cycles principes mogelijk om elektriciteit te genereren bij temperaturen >80 °C.

waarbij in het geval van de hogere temperaturen de smeltwarmte per kg hoger is dan bij lage temperaturen.

Het is wenselijk het bassin voldoende te isoleren om warmteverliezen te voorkomen. Bovendien moet de wand voldoende sterk zijn om het proces van stollen dan wel smelten te kunnen weerstaan. Met name tijdens uitzetting bij gestold materiaal kunnen grote krachten op de wand worden overgebracht. Omdat de ervaring met dergelijk constructies beperkt is kan het wenselijk zijn te kiezen voor PCM als slurry (zie hieronder)

De inzet van warmtepompen is niet nodig wanneer het mogelijk PCM materiaal te kiezen dat smelt rond de ideale kasttemperatuur. Dit vraagt echter de inzet van grote warmtewisselaars en de verschuiving van het ideale setpoint van de kas naar hogere temperaturen in het koelseizoen, ofwel verlaging in het warmteseizoen. Hoe groter de toelaatbare marge in ideale setpoint in de kas tijdens de seizoenen hoe kleiner het warmtewisselende oppervlak. In de praktijk zal echter de inzet van een warmtepomp, dan wel eventuele bijstook (vanuit bijv. ketel of WKK) noodzakelijk zijn.

## 5.8 PCM als slurry, in een bassin onder de kas

In plaats van PCM op zich, kan PCM ook ingekapseld worden in plastic bolletjes dan wel capsules. Tot en met dimensie van enkele centimeters zijn zowel organische (bijv. paraffine) als anorganische (bijv. natriumacetaat-trihydraat) te kapselen, maar hierbij is transport gelijk aan een slurry niet vanzelfsprekend. Micro-encapsulatie van *organische* PCM is echter enkele jaren geleden ontwikkeld waarbij plastic bolletjes van 5 – 20 [ $\mu\text{m}$ ] worden gevormd. Dit materiaal is verpompbaar met als gevolg dat een uitgebreid netwerk van warmtewisselaars (vergelijkbaar met bodemwarmtewisselaars) niet nodig en kan materiaal gedoseerd langs een speciaal daarvoor ingerichte wisselaar verplaatst worden.

De inkapseling resulteert in een gewichtsverhouding van 15 [%] polymeer (kapsel) tegen 85 [%] PCM materiaal. Wanneer in het kader van de verpompbaarheid ook water wordt toegevoegd met 20 [%] dan wordt de opslagcapaciteit van een PCM slurry gelijk een temperatuurlift van  $\sim 30$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] van water.

Ook in het geval van slurries kan gewerkt worden zonder warmtepompen, maar vraagt om relatief grote warmtewisselende oppervlakken en voldoende toelaatbare spreiding in de optimale kasttemperatuur.

## 6 Criteria en input voor bufferselectie

De criteria die men stelt aan de keuze van buffertechnologieën zijn allereerst af te leiden uit kenmerken van buffertechnologieën (Zie ondermeer de identificatie van criteria in bijlage C). Daarnaast worden ze bepaald door de eisen die vanuit tuinderperspectief worden gesteld aan de inpassing van buffers in de glastuinbouw. Dit samen leidt tot de navolgende opsomming, op grond waarvan een bepaalde buffertechnologie kan worden beoordeeld en geselecteerd:

Tabel 3 Lijst van criteria voor potentiële buffertechnologieën.

<b> criterium</b>	<b> Omschrijving</b>
Capaciteit	Welke capaciteit van de buffer is nodig/mogelijk?
Piekvermogen	Welk piekvermogen van de buffer is nodig/mogelijk?
Bufferrendement	Verhouding tussen geleverde energie en de gebufferde energie.
Hulpenergiegebruik	Welk energiegebruik is gemoeid met het laden/ontladen dan wel op peil houden van de buffer? De verhouding tussen de te bufferen energie en de benodigde primaire energie is een indicator met betrekking tot kwaliteit.
Investerings	Welke investeringen zijn er verbonden aan de buffertechnologie.
Ruimtebeslag	Hoeveel oppervlak vraagt plaatsing van de buffer, afhankelijk van positionering in of buiten de kas of in de kasschuur ?
Conditie toepasbaarheid	Kan de buffertechnologie uit oogpunt van primaire condities (beschikbaarheid bij de kas) worden toegepast?
Positionering buffer	Is er keuzevrijheid voor het plaatsen van een buffer in/rond de kas?
Levensduur	Wat is de technische levensduur van een buffer?
Milieurisico's	Heeft toepassing van de technologie risico's t.a.v.: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geluidsproductie</li> <li>- Luchtverontreiniging in/buiten de kas</li> <li>- Bodemverontreiniging</li> <li>- Anderszins (bijvoorbeeld bij sloop)</li> </ul>
Bouwsnelheid	Hoeveel tijd kost de bouw/inpassing van een buffer van besluit tot operationalisatie?
Vergunningen	Zijn voor de toepassing van de technologie specifieke vergunningen nodig?
Bedrijfszekerheid	Zal de technologie normaliter technisch ongestoord functioneren?
Flexibiliteit	Is de technologie aan te passen bij gewijzigde omstandigheden/behoefte bij de teler / kas?
Inpasbaarheid	Kan de buffertechnologie (eenvoudig) in een bestaande kassituatie worden ingepast? (temperatuurniveau, verplaatsbaarheid buffermedium, gebruiksvriendelijkheid)
Teeltimpact	Heeft de technologie door werking of positie in de kas invloed op de teelt?
Mate van autarkie / collectiviteit	Kan de technologie op zich zelf staand voor een enkele tuinder functioneren of moet de technologie worden toegepast in een collectief?
Regelbaarheid	Stelt de aard van de buffertechnologie specifieke eisen aan de regeling van de klimatiseringsinstallatie voor de kas?
Combineerbaarheid met andere functies	Leent de technologie van buffering zich voor andere vormen van buffering dan van warmte/koude?

<b> criterium</b>	<b> Omschrijving</b>
Veiligheid	Is de toegepaste technologie veilig in gebruik (brandrisico's)
Corrosiviteit	Is voor de toegepaste technologie sprake van corrosiviteit (onder invloed van de temperatuur of materiaal)

Bovenstaande criteria zijn geordend door ze rubriceren naar

- Operationele criteria (grijs in bovenstaande tabel) waarbij een beoordeling daarop afhangt van het energiegebruik voor de teelt.
- Eenmalige criteria die van toepassing zijn op de technologie als geheel. Een beoordeling daarop is feitelijk onafhankelijk van bijvoorbeeld de omvang van de te bufferen hoeveelheid energie.

Vervolgens kunnen de verschillende buffertechnologieën op basis van hun kenmerken op deze criteria worden beoordeeld.

*Opmerking:*

De onderhouds- en bedrijfskosten van alternatieven zijn sterk afhankelijk van de uiteindelijke situatie. Om die reden zijn deze onderdelen hierin niet opgenomen. De investeringskosten van aquifers zijn afhankelijk van ondergrondse condities en diepten. Vergelijking op kosten moet steeds op basis van de werkelijk optredende situatie gebeuren.

## 7 Analyse van bufferopties

Voor de technische analyse van de beschikbare bufferalternatieven worden de voor opslag en inpassing bepalende kenmerken van bufferopties gebruikt.

### 7.1 Aquifer

Voor de referentie (de aquifer) is deze analyse op de algemene criteria als volgt:

Tabel 4 Beoordeling aquifer

<b>Criterium</b>	<b>Technologie: Aquifer</b>
Capaciteit	5 – 80 [aeq/m <sup>2</sup> .a]. Zie toelichting onder tabel.
Piekvermogen	500 – 1200 [kW] per doublet. (zie toelichting onder tabel). In geval van 1 doublet per 1 hectare: 50 – 120 [W/m <sup>2</sup> ].-
Bufferrendement	~75 – 100 [%] (zie toelichting onder tabel).
Hulpenergiegebruik	$1,7 < k_{buffer} < 3,8$ (zie toelichting onder tabel)
Investeringen	30 – 45 [€/m <sup>2</sup> ] bij afgifte door buffer met 100 [W/m <sup>2</sup> ] of 450 - 300 [€/kW] ( <b>bij een dT = 10 K</b> en een bivalent systeem). Zie toelichting onder tabel.
Ruimtebeslag	Het kasoppervlak dat voor de buffer nodig is beperkt zich tot het oppervlak voor de technische installaties die voor het vullen en legen van de buffer nodig zijn. Het gebruikte bodemoppervlak onder de kas voor de bufferfunctie hangt af van de dikte van de waterlagen.
Conditie toepasbaarheid	Aquifers zijn gebonden aan de bodemsituatie ter plaatse. In Nederland zijn niet alle locaties geschikt voor inzet van aquifers (bijv. Zuid Limburg).
Positionering buffer	De locatie van de bufferaansluiting is in de nabijheid van de kas vrij te kiezen. Bij meerdere buffers voor andere kassen is er de kans op beïnvloeding. In dat geval is er geen keuzevrijheid en is men afhankelijk van vergunningverlening.
Levensduur	De technische levensduur van de buffer wordt bepaald door de levensduur van de leidingen en pompen. (15 jaar).
Milieurisico's	De technologie kent geen directe risico's t.a.v.: - Geluidsproductie - Luchtverontreiniging in/buiten de kas - Bodemverontreiniging - Anderszins (bijvoorbeeld bij sloop)
Bouwsnelheid	De benodigde tijd voor inpassing van een buffer bedraagt 4 weken. Daaraan voorafgaand is bodemonderzoek nodig. De vergunningverlening vraagt 6 maanden
Bedrijfszekerheid	De technologie zal normaliter technisch ongestoord functioneren, mits uitgevoerd volgens de richtlijnen daarvoor.
Flexibiliteit	De technologie is aan te passen aan gewijzigde omstandigheden/behoefte bij de teler binnen de capaciteitsruimte die de watervoerende laag biedt.
Inpasbaarheid	De buffertechnologie kan in een bestaande situatie worden ingepast. De temperaturen van het buffermateriaal en de transporteerbaar van het medium passen bij de in een kas gebruikelijke klimatiseringssystemen



<b>Criterium</b>	Technologie: <b>Aquifer</b>
Teeltimpact	De technologie heeft door zijn werking of positie in de kas geen invloed op de teelt.
Mate van autarkie / collectiviteit	De technologie kan op zich zelf staand functioneren voor een enkele tuinder. Alleen in geval van meerdere gebruikers in elkaars nabijheid zal de technologie moeten worden toegepast in een collectief.
Regelbaarheid	De aard van de buffertechnologie eist de toepassing van een warmtepomp waarvan de regeling moet aansluiten op die van de bestaande klimatiseringsinstallatie voor de kas.
Combineerbaarheid met andere functies	Nee
Veiligheid	Door zuurstofindringing kan uitvloeking van ijzer ontstaan met als gevolg verstopping van systeemcomponenten
Corrosiviteit	Alleen bij grondwater met een hoog chloridegehalte. Dit vraagt om aangepaste materialen

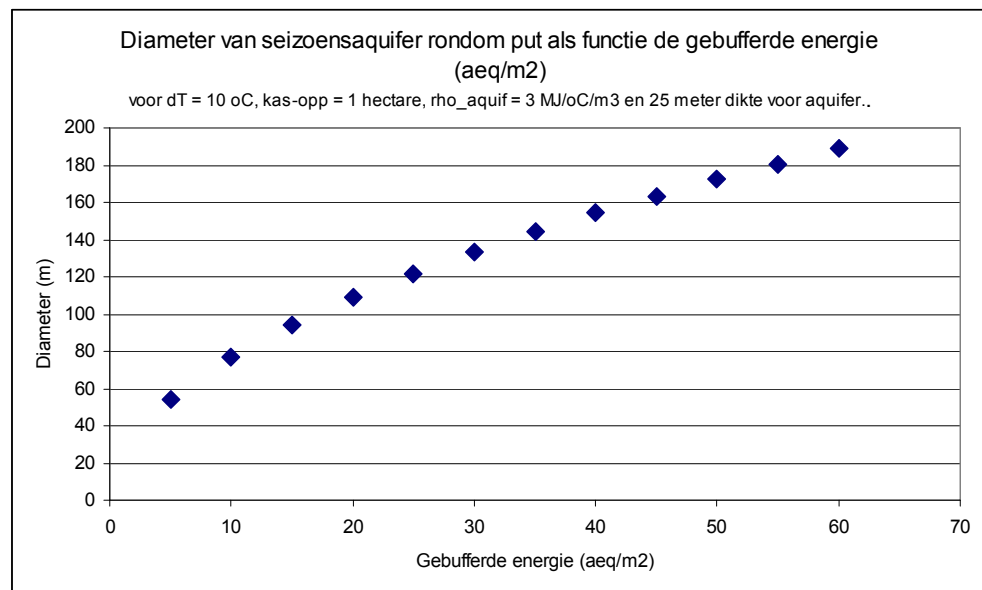
#### Buffercapaciteit aquifer:

De buffercapaciteit  $q_{buffer}$  in energie-eenheden per oppervlakte eenheid kas wordt bij benadering gegeven door:

$$q_{buffer} = \frac{h \cdot \frac{1}{4} \pi d_{aquifer}^2 \cdot \rho_{aquifer} \cdot \Delta T}{A_{kas}} \quad (12)$$

met  $d_{aquifer}$  de betrokken diameter van de aquifer,  $A_{kas}$  de oppervlakte van de kas,  $h$  de hoogte van de aquifer,  $\rho_{aquifer}$  de warmtecapaciteit en  $\Delta T$  het **instantane** (d.w.z. vlak na verlaten van warmtewisselaar) aangebrachte temperatuurverschil in de aquifer.

Ter indicatie van de benodigde diameter van een aquiferbron zie figuur 11 bij  $\Delta T = 10$  [K],  $\rho_{aquifer} = 3.0$  [MJ/m<sup>3</sup>.K] (65 [%] zand, 35 [%] water) en een hectare kas. : De warmtecapaciteit van zand ligt tussen de 2.2 en 2.9 [MJ/m<sup>3</sup>.K], dat van water ~4.2 [MJ/m<sup>3</sup>.K]. De warmtecapaciteit van een aquifer is bij een porositeit van 35 [%] zo'n 3.0 [MJ/m<sup>3</sup>.K]. De diameter van de betrokken aquifer kan eenvoudig 100 meter zijn bij een kas van 100 x 100 [m<sup>2</sup>] in 1 seizoen met een typische hoogte van 25 meter. De gegenereerde  $\Delta T$  is hierbij 10 [K].



Figuur 11 Diameter aquifer rond put

De capaciteit en specifieke capaciteit is rechtevenredig met een afwijkend temperatuurverschil of laagdikte ten opzichte van de bij de grafiek aangegeven waarden. De aquifer is in ieder geval inzetbaar in de range van 5 – 40 [aeq/m<sup>2</sup>.a] zoals voor dit onderzoek aangehouden.

#### Ruimtebeslag

Het ruimtebeslag aan kasoppervlak van de buffer is nihil omdat de buffer zich onder het maaiveld bevindt.

#### Piekvermogen:

Ondiepe aquifers kunnen 50 – 100 [m<sup>3</sup>/uur] grondwater leveren per put [2]. Met een  $\Delta T = 10$  [K] betekent dit een piekvermogen van 600 tot 1200 [kW] per put. In geval van 1 hectare kasoppervlak is het piekvermogen 60– 120 [W/m<sup>2</sup>]

Het piekvermogen is rechtevenredig met een afwijkend temperatuurverschil ten opzichte van de bij deze grafiek aangegeven waarde.

#### Rendement van de buffer

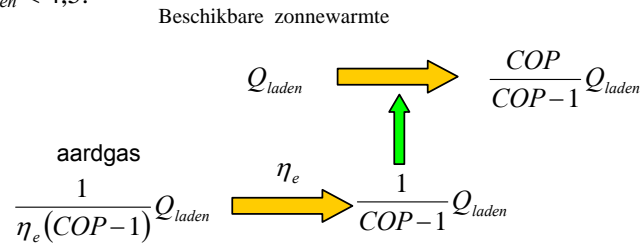
Het rendement van de buffer wordt bepaald door wijze van laden en ontladen van de buffer en de stilstandsverliezen.

#### *Laadrendement:*

In geval van aquifers zijn er 2 situaties denkbaar te weten: laden door toepassing vrije koeling in de kas met opwarming van grondwater als gevolg en laden door middel van de toepassing van een warmtepomp of een ander methode van opwerking naar het gewenste temperatuurniveau (bijvoorbeeld de ketel), we kiezen echter voor de warmtepomp.

In de eerste situatie is een maximale  $\Delta T$  van  $\sim 10$  [K] te realiseren. Dit is te realiseren met een rendement van 95 - 100 [%] waarbij toepassing van circulatiepomp noodzakelijk met een energie van ongeveer 5 [%] van de getransporteerde warmte.

In geval van het laden met een warmtepomp wordt het bufferrendement volgens vergelijking 1 (zie hoofdstuk 3) en figuur 12  $\eta_{\text{overall-laden}} = 100$  [%]. Echter, vanwege de inzet van primaire energie is de zogenaamde  $k_{\text{laden}} = \eta_e (COP - 1)$ . Voor COP waarden tijdens het laden van tussen 3 en 10, waarmee een temperatuurlift van 5 – 45 graden bereikt kan worden, en bij een 50 [%] rendement van de elektriciteitscentrale betekent dit een  $1 < k_{\text{laden}} < 4,5$ .



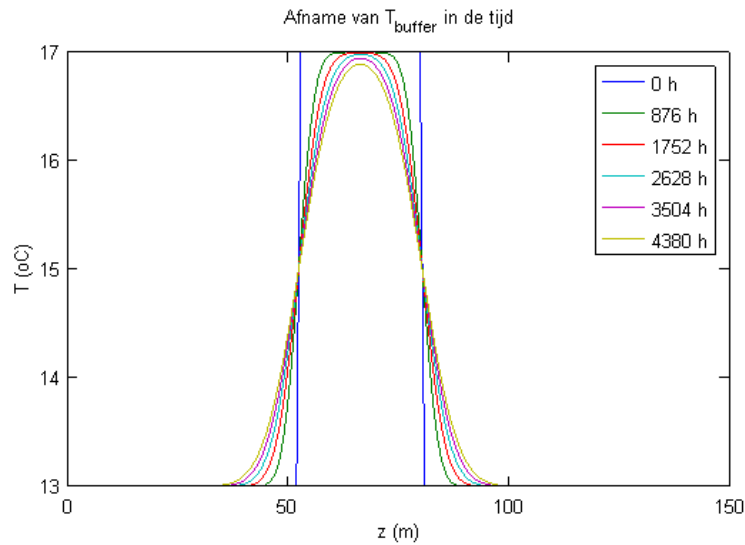
Figuur 12 Het laden met een elektrische warmtepomp in een aquifer dan wel waterbas

#### *Standverliezen:*

De aquifer is na het laden te benaderen als een schijf verwarmd water die, tussen 2 kleilagen in, langzaam via transmissie zijn warmte verliest aan de omgeving.

Onderstaand zijn resultaten van een vereenvoudigde simulatie aangegeven wanneer door middel van warmtegeleiding de verwarmde grondwaterschijf (hoogte 30 meter) afkoelt en warmte afgeeft naar boven en onderen. Hierbij is  $z$  de afstand in meters langs de verticaal, d.w.z. loodrechte richting op de aquifer. In de simulatie is te zien dat na een half jaar (4380 h) de gemiddelde temperatuur tussen de kleilagen met ongeveer 1 graad gezakt is ( $17$  [°C]  $\rightarrow$   $16$  [°C]).

Dit impliceert niet direct dat ook opslagrendement is afgenomen. Dit is afhankelijk van de uiteindelijke ontladmethode. In geval van vrije verwarming aan de kas met een gelijke warmtewisselaar tijdens laden en een vergelijkbare  $dT$  is het opslagrendement vanwege de temperatuurdaling inderdaad gezakt tot 75%. Echter, in geval van de toepassing van bijvoorbeeld een warmtepomp is door middel van dieper doorcoelen aan de warmtewisselaar de warmte terug te halen uit het grondwater, echter met wederom als prijs dat er meer aanspraak wordt gemaakt op hulpenergie. (zie bij laadrendement). Er dient echter opgemerkt te worden dat er een onderlimiet voor doorcoelen is als gevolg van het vriespunt van water.



Figuur 13 Verloop van  $T_{\text{buffer}}$  in 30 meter dikke aquifer laag (de z-waarde komt overeen met de diepte van de aquifer) van 17 °C in een warme omgeving van 13 °C.

#### Ontlaadrendement:

Ook in dit geval zijn er 2 situaties denkbaar te weten: ontladen door toepassing vrije verwarming aan de kas met afkoeling van het grondwater als gevolg, of de toepassing van de warmtepomp in de kas met opwarming van grondwater als gevolg.

In de eerste situatie is een maximale  $\Delta T$  van  $\sim 4$  [K] (denk aan toepassing in een koude kas, zoals *sla*) te realiseren. Dit is bij benadering te doen met een rendement van 100[%] waarbij toepassing van circulatiepomp noodzakelijk met een hulpenergie van ongeveer 3[%] van de getransporteerde warmte.

In geval van het ontladen met een warmtepomp blijft het rendement volgens vergelijking (5) tegen de 100[%]. De prijs die hiervoor betaald moet worden is dat er aanspraak wordt gedaan op aardgas als buffer, waarbij aardgas wordt omgezet naar elektriciteit ter aandrijving van de warmtepompcompressor.

Het verhaal is verder gelijk aan de situatie, zoals gegeven bij het laden. In de regel zullen ontladrendementen verkregen worden tussen de 95 – 100 [%] met  $1 < k_{\text{ontladen}} < 2,5$ .

In geval van temperatuurdaling van de aquifer tijdens stand dan heeft dit effect op de COP wanneer dezelfde afgiftemperatuur benaderd dient te worden. Bij benadering geldt er:

$$\frac{COP_0}{COP} = 1 + \left| \frac{\Delta T}{T_{\text{afgiftesysteem}} - T_{\text{buffer}}} \right| \quad (13)$$

waarbij  $COP_0$  de situatie indien geen temperatuurdaling had plaatsgevonden in de aquifer. In geval van 1 graad daling en  $T_{\text{afgiftesysteem}} - T_{\text{buffer}} = 10$  [K] dan is de daling in de COP waarde voor ontladen  $\sim 10$  [%].

*Bufferrendement en inzet van fossiele energie:*

Het uiteindelijke bufferrendement voor een aquifer wordt bepaald door

$$\eta_{buffer} \equiv \frac{Q_{afgifte}}{Q_{aanbod} + \sum_i W_{hulp,i}} \quad (7)$$

Wanneer alle hulpenergie toekomt aan de buffer dan wel afgifte-energie, en bovendien er geen standsverliezen zijn dan zal  $\eta_{buffer} = 100\%$ .

Dit dient vergezeld te worden met een parameter die aangeeft hoe groot de verhouding is tussen de aangeboden energie en de mate van ingezette primaire energie voor laden,

compensatie en/of ontladen:  $k_{buffer} \equiv \frac{Q_{aanbod}}{\sum_i Q_{primair,i}}$  .

De inzet van fossiele energie volgt uit vergelijking 8 (hoofdstuk 3) en bedraagt in dit geval:

$$k_{buffer} \approx \left[ \frac{1}{COP_{laden} - 1} + \left( \frac{COP_{laden}}{COP_{laden} - 1} \right) \frac{1}{COP_{ontladen} - 1} \right]^{-1} \quad (14)$$

Het is afhankelijk van de beschouwde temperatuurniveaus maar in geval van vrije koeling tijdens laden dan is  $COP_{laden} \gg 1$ , stel 20 (alleen circulatiepompen). Wanneer voor onttrekking van warmte uit buffer en het overbrengen van warmte naar de kas een  $COP_{ontladen} = 4$  geldt dan geldt er  $k_{buffer} = 2,5$ . In het algemeen zal bij het ontladen bij een aquifer de  $COP_{systeem}$  tussen de 3 en 6 liggen, overeenkomend met een  $1,7 < k_{buffer} < 3,8$

#### Investerings

De investeringen voor een aquifer zijn te relateren aan het debiet over de bronnen:

Van 75 – 200 [m<sup>3</sup>/hr]                      4000 – 2000 [€/m<sup>3</sup>.hr]

Ofwel    450 - 300 [€kW] (bij een dT = 8 tot 10 [K])

Het op te stellen vermogen voor een kas is > 200 [W/m<sup>2</sup>] afhankelijk o.a. van kastype.

In bivalente vorm (gasbijstook via WKK) wordt het op te stellen vermogen geschat op 100 [W/m<sup>2</sup>] voor een kas met een warmtevraag van 40 [aeq/m<sup>2</sup>.a].

Investering wordt in dat geval: 30– 45 [€/m<sup>2</sup>]. (inclusief warmtepompsysteem met COP)

## 7.2 Diepe aquifer

Voor de diepe aquifer is de analyse op algemene criteria als volgt:

Tabel 5 Beoordeling aquifer

<b>Criterion</b>	<b>Technologie: Diepe aquifer (300 m – 1000 m)</b>
Capaciteit	40 – 80 [aeq/m <sup>2</sup> .a], hoofdzakelijk werkende als bron voor verwarmingsdoeleinden!
Piekvermogen	2 – 5 [MW] per doublet, zie toelichting onder tabel bij <i>buffercapaciteit</i> .
Bufferrendement	90- 100 [%], hoofdzakelijk ontladen van bron met behulp van circulatiepompen.
Hulpenergiegebruik	Voor diepe aquifers rond is $k_{buffer}$ niet nuttig om te definiëren, de diepe aquifer dient nl. voornamelijk als bron, zodat de laadhoeveelheid gelijk nul is. Echter, hulpenergieverbruik is noodzakelijk voor halen en injecteren van brine-water.
Investerings	55 – 110 [€/m <sup>2</sup> ] bij afgifte door buffer met 100 [W/m <sup>2</sup> ], zie toelichting onder tabel.
Ruimtebeslag in kas	Het kasoppervlak dat voor de buffer nodig is beperkt zich tot het oppervlak voor de technische installaties die voor het vullen en legen van de buffer nodig zijn. Het gebruikte bodemoppervlak onder de kas voor de bufferfunctie hangt af van de dikte van de waterlagen.
Conditie toepasbaarheid	Het kasoppervlak dat voor de buffer nodig is beperkt zich tot het oppervlak voor de technische installaties die voor het vullen en legen van de buffer nodig zijn. Het gebruikte bodemoppervlak onder de kas voor de bufferfunctie hangt af van de dikte van de waterlagen.
Positionering buffer	De locatie van de bufferaansluiting is in de nabijheid van de kas vrij te kiezen. Bij meerdere buffers voor andere kassen is er de kans op beïnvloeding. In dat geval is er geen keuzevrijheid en is men afhankelijk van vergunningverlening.
Levensduur	De technische levensduur van de buffer wordt bepaald door de levensduur van de leidingen en pompen. (> 15 jaar)
Milieurisico's	De technologie kent geen directe risico's t.a.v.: - Geluidsproductie - Luchtverontreiniging in/buiten de kas - Bodemverontreiniging - Anderszins (bijvoorbeeld bij sloop)
Bouwsnelheid	De benodigde tijd voor inpassing van een buffer bedraagt 4-6 weken. Daaraan voorafgaand is bodemonderzoek nodig
Vergunningen	Er is vergunningsaanvraag nodig. Aandacht dient uit te gaan naar het nut om te voldoen aan de jaarlijkse energiebalans voor de ondergrond. Vanaf dieper dan 500 meter worden vergunningsaanvragen gekoppeld aan de mijnbouwwet.
Bedrijfszekerheid	De technologie zal normaliter technisch ongestoord functioneren, mits uitgevoerd volgens de richtlijnen daarvoor.
Flexibiliteit	De technologie is aan te passen aan gewijzigde omstandigheden/behoefte bij de teler binnen de capaciteitsruimte die de watervoerende laag biedt.
Inpasbaarheid	De buffertechnologie kan in een bestaande situatie worden ingepast. De temperaturen van de buffermateriaal en de transporteerbaar van het medium passen bij de in een kas gebruikelijke klimatiseringssystemen

<b>Criterion</b>	<b>Technologie: Diepe aquifer (300 m – 1000 m)</b>
Teeltimpact	De technologie heeft door zijn werking of positie in de kas geen invloed op de teelt.
Mate van autarkie / collectiviteit	Vanwege de hoge investeringskosten is het wenselijk dat 2 – 5 hectare kasoppervlak deelneemt aan een dergelijk systeem.
Regelbaarheid	Er is geen warmtepompsysteem noodzakelijk gezien de relatief hoge temperatuur.
Combineerbaarheid met andere functies	Nee
Veiligheid	Door zuurstofinringing kan uitvlokking van ijzer ontstaan met als gevolg verstopping van systeemcomponenten
Corrosiviteit	Alleen bij grondwater met een hoog chloridegehalte. Dit vraagt om aangepaste materialen

Toelichting bij tabel:

De buffercapaciteit is lineair met de aangebrachte  $\Delta T$ . In geval van de diepe aquifer heerst er van nature een temperatuur van 20 – 40 [°C] op diepten van 300 – 1000 m. Om daadwerkelijk de buffer te laden is het noodzakelijk warmte te injecteren met een temperatuur hoger dan de ongestoorde bodemtemperatuur en is op die diepten alleen interessant wanneer de WKK unit overtollige warmte kan bufferen. Zonnewarmte, ingevangen via de kas, heeft een te lage temperatuur en heeft een 15- 40 [K] temperatuurlift nodig om geladen te worden in de bodem. Dit is echter niet nodig, omdat er op die diepten in de regel geen energiebalans meer vereist is. Laden van zonnewarmte via de kas is dan ook niet meer zinnig. Om toch een impressie te geven van de 'buffer'- of beter broncapaciteit:  $T_{\text{bron}} - T_{\text{kas}} = \Delta T = 15$  [K] met een waterdebiet per doublet van 100 -200 [m<sup>3</sup>/hr] geeft een vermogen per doublet: 2 – 5 [MW]. Afhankelijk van de jaarlijkse warmtevraag wordt een dergelijk systeem bedreven ter voorziening van 40 – 80 [aeq/m<sup>2</sup>] aan warmtevraag, waarbij collectieve aanschaf van een dergelijk systeem door meerdere tuinders rendabeler is vanwege de hoge boringskosten (~ 2 - 3 [M€] per doublet). Er kan 2 – 5 hectare kas voorzien worden van een stookvermogen van 100 [W/m<sup>2</sup>] gedurende een stookseizoen van non-stop 6 maanden (~40 [aeq/m<sup>2</sup>.a]). De kosten zijn daarmee 55-110 [€/ m<sup>2</sup>].

Het rendement van het ontladen van de bron wordt bepaald door warmteverliezen tijdens transport en warmtewisseling. Deze verliezen zijn enkele procenten.

### 7.3 Verticale bodemwarmtewisselaar

De technische analyse voor de verticale bodemwarmtewisselaars levert het volgende resultaat op:

Tabel 6 Beoordeling verticale bodemwarmtewisselaar

<b> criterium</b>	<b>Technologie: Verticale bodemwarmtewisselaar</b>
Capaciteit	3 – 20 [aeq/m <sup>2</sup> .a], zie voor meer info onder de tabel.
Piekvermogen	50 – 200 [W/m <sup>2</sup> ] bij 50 meter diepe wisselaars met een $\Delta T \sim 5$ [K] tussen bodemwarmtewisselaar en de buffer. Zie voor meer info onder de tabel.
Bufferrendement	~85 – 100 [%] zie toelichting onder tabel
Hulpenergiegebruik	$1,7 < k_{buffer} < 3,8$ , zie toelichting onder tabel
Investerings	~75 [€/m <sup>2</sup> ] bij afgegeven vermogen door buffer met 100 [W/m <sup>2</sup> ] of ~ 750 [€/kW] (bij een $dT = 10$ [K] en bivalent systeem), zie toelichting onder deze tabel.
Ruimtebeslag	Het kasoppervlak dat voor de buffer nodig is, beperkt zich tot het oppervlak voor de technische installaties die voor het vullen en legen van de buffer nodig zijn. Het gebruikte bodemoppervlak onder de kas voor de bufferfunctie hangt af van de dikte van de waterlagen.
Conditie toepasbaarheid	Seizoensopslag in de bodem is in de regel overal mogelijk, waarbij grofzandige bodems een hogere capaciteit en onttrekkingsvermogen hebben.
Positionering buffer	De buffer zal ingericht moeten worden onder de kas met per 7 x 7 m <sup>2</sup> een bodemwarmtewisselaar van ~20 – 150 m. Deze boringen zijn lastig uit te voeren in bestaande kassen.
Levensduur	De technische levensduur van de buffer wordt bepaald door de levensduur van de leidingen en pompen. (minimaal 20 jaar voor bodemwarmtewisselaar)
Milieurisico's	De technologie kent mogelijke risico's t.a.v. lekkage van water/glycol uit de gesloten lussen. Dit vereist mogelijk toepassing milieuvriendelijk transportmedium (brine). De overige risico's met betrekking tot <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geluidsproductie</li> <li>- Luchtverontreiniging in/buiten de kas</li> </ul> spelen geen rol.
Bouwsnelheid	De benodigde tijd voor inpassing van een buffer bedraagt 4 - 8 weken, e.e.a afhankelijk met betrekking tot de mogelijkheid boringen te kunnen verrichten in de kas.
Vergunningen	Er is voor de toepassing van de technologie <u>geen</u> provinciale vergunning nodig mits er geen boringen plaatshebben in waterwingebieden en beschermde natuurgebieden.
Bedrijfszekerheid	De technologie zal normaliter technisch ongestoord functioneren, mits uitgevoerd volgens de richtlijnen daarvoor.
Flexibiliteit	De technologie is aan te passen aan gewijzigde omstandigheden/behoefte bij de teler binnen de capaciteitsruimte die de bodemlaag biedt.
Inpasbaarheid	De buffertechnologie kan in een bestaande situatie worden ingepast. De temperaturen van de buffermateriaal en de transporteerbaar van het medium passen bij de in een kas gebruikelijke klimatiseringssystemen
Teeltpact	De technologie heeft door zijn werking of positie in de kas geen invloed op de teelt.



<b>Criterium</b>	Technologie: <b>Verticale bodemwarmtewisselaar</b>
Mate van autarkie / collectiviteit	De technologie kan op zich zelf staand functioneren voor een enkele tuinder. Collectief is niet perse noodzakelijk.
Regelbaarheid	De aard van de buffertechnologie eist de toepassing van een warmtepomp waarvan de regeling moet aansluiten op die van de bestaande klimatiseringsinstallatie voor de kas.
Combineerbaarheid met andere functies	Nee
Veiligheid	In geval van lekkage ontsnapt het medium naar de bodem. In geval van ethylene glycol en water is het risico laag gezien de natuurlijke biodegradatie van ethyleen glycol. In geval van directe expansie met HFC koudemiddelen is het gevaar aanzienlijk hoger.
Corrosiviteit	Geen

### Capaciteit:

De capaciteit is afhankelijk van de warmtecapaciteit, die varieert afhankelijk van de bodemgesteldheid, zie onderste tabel. De omvang is hierbij ongeveer gelijk aan het perceel. Vanwege de geslotenheid van het systeem is de bodem vergunningstechnisch gezien toegestaan te worden geactiveerd tot hoge temperaturen.

Tabel 7 Typering bodemkwaliteit

<b>Typering</b>	<b>Warmtegeleiding (W/(m.K))</b>	<b>Warmtecapaciteit (MJ/m<sup>3</sup>.K)</b>
<b>Zeer goed:</b> zeer grof tot matig fijn zand (verzadigd)	2,4	2,5
<b>Goed:</b> slihboudend zand, zand met klei en/of leemlagen (verzadigd)	1,8	2,2
<b>Matig tot slecht:</b> klei en of leem met veenlagen (verzadigd)	1,2	1,7

De bodem is per oppervlakte-eenheid kas in principe te laden tot

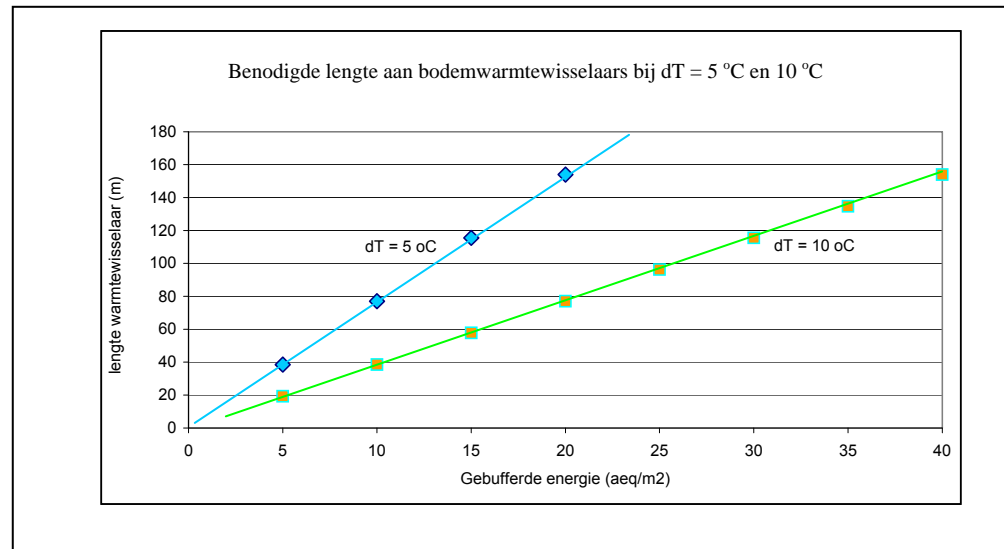
$$q_{buffer} = \frac{h \cdot A_{bodem} \cdot \rho_{bodem} \cdot \Delta T}{A_{kas}} \quad (15)$$

Hierbij is  $A_{bodem}$  het betrokken oppervlak van de bodem,  $\rho_{bodem}$  de warmtecapaciteit,  $h$  de lengte van de verticale bodemwarmtewisselaars en  $A_{kas}$  het oppervlak van de kas. Wanneer bodemwarmtewisselaars onder de kas worden geplaatst over het gehele oppervlak dan geldt bij benadering  $A_{bodem} \approx A_{kas}$  en dus:

$$q_{buffer} \approx h \cdot \rho_{bodem} \cdot \Delta T \quad (16)$$

In geval van verticale bodemwarmtewisselaars van 20 – 150 meter en een  $\Delta T$  van 5 – 10 [K] boven de ongestoorde bodemtemperatuur en een gemiddelde veronderstelde warmtecapaciteit van 2,2 [MJ/m<sup>3</sup>.K] kunnen capaciteiten variëren van 2 tot en met 20 [aeq/m<sup>2</sup>.a]. In dit laatste geval betreft het hier een  $dT = 10$  [K] en een lengte van 150 meter. Vergunningstechnisch is er een schemergebied in geval van opwarming in

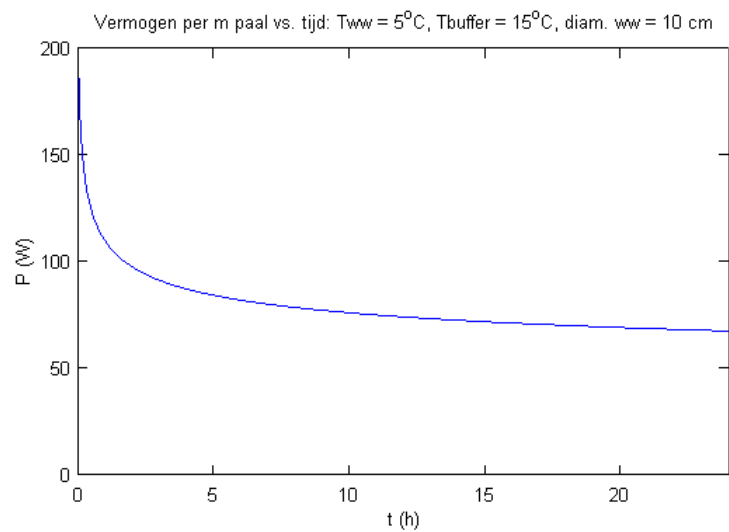
gebieden met grondwaterwinning voor drinkwaterdoeleinden. Laden naar hogere temperaturen vraagt om langere laadtijden en groter externe vermogens, zie ook toelichting *laadrendement*.



Figuur 14 Benodigde hoogte aan bodemwarmtewisselaars voor activering van ondergrond met een capaciteit van 5 – 40 [aeq/m<sup>2</sup>.a] voor een dT = 5 en 10 [K].

#### *Piekvermogen:*

Het vermogen dat maximaal per meter verticale bodemwarmtewisselaar geleverd kan worden is afhankelijk van de aangelegde  $\Delta T$ . In geval een  $\Delta T = 10$  [K] ten opzichte van de aanvangstemperatuur van de geladen buffer wordt aangehouden (stel 15 [°C]) dan ziet het vermogen gedurende 24 uur eruit als weergegeven in figuur 15. Dit laat zien een vermogen van 70 – 100 [W/m] bij  $\Delta T = 10$  [K] naar de warmtewisselaar (10 cm diameter) toe.



Figuur 15 Vermogen bij constante paaltemperatuur van  $T_{ww} = 5$  °C in een thermisch geladen ondergrond van 15 °C.

Voor de smallere wisselaars en kleinere  $\Delta T$  (~5 [K]) worden vermogens in de orde van 30 – 50 [W/m] bereikt. Elke warmtewisselaar heeft een horizontaal oppervlak nodig van 16 – 64 [m<sup>2</sup>]. Dit betekent een vermogen van 0,8 - 3,2 [W/m<sub>verticale wisselaar</sub>] per m<sup>2</sup> kasoppervlak.

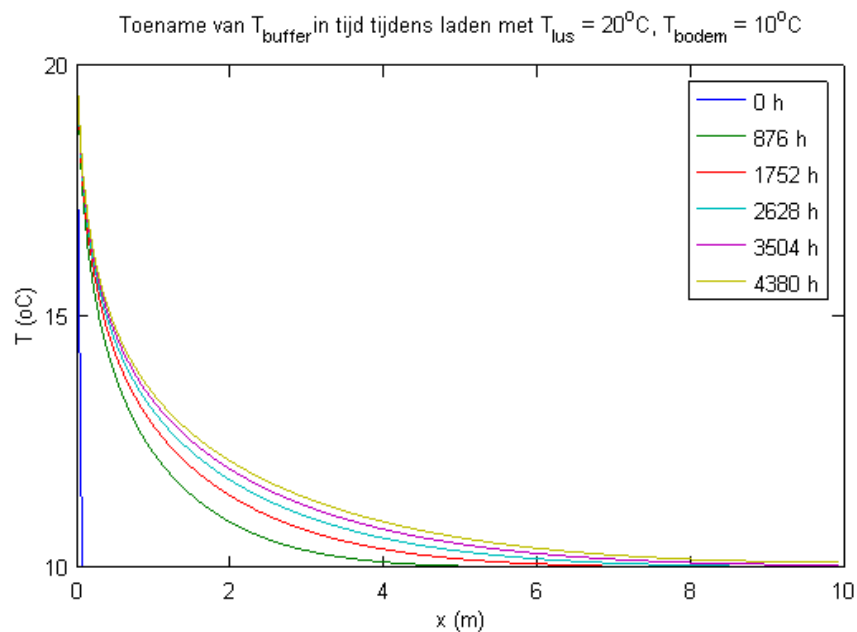
Door toepassing van een warmtepomp wordt het werkelijke vermogen vermenigvuldigd met een factor  $\sim \text{COP}_{\text{systeem}} / (\text{COP}_{\text{systeem}} - 1)$ . In geval van typische COP waarden van 3 tot 4 impliceert dit een uiteindelijk vermogen van 1 – 4 [W/m] per m<sup>2</sup> kasoppervlak. Voor 50 meter diepe wisselaars resulteert dit in karakteristieke waarde van 50 – 200 [W/m<sup>2</sup>].

#### Rendement van de buffer

Het rendement van de buffer wordt bepaald door wijze van laden en ontladen van de buffer en de stilstandsverliezen. Onderstaand bespreken we het laadrendement, standsverliezen en ontladrendement.

#### *Laadrendement:*

In geval van het laden van de bodem wordt de energie via geleiding toegevoerd via bodemwarmtewisselaars, die bestaan uit een dubbel U lus geïntegreerd in bijv. 1 buis, of 2 concentrische buizen. Deze worden in de bodem gebracht per 16 m<sup>2</sup> – 64 [m<sup>2</sup>] oppervlakte (oftewel een onderlinge afstand van 4 – 8 meter). Figuur 16 toont het laden van een bodem van 10 [°C] in het geval een bodemwarmtewisselaar op 20 [°C] wordt gehouden. In een straal van 2 meter rondom de wisselaar loopt de gemiddelde temperatuur op naar 14 [°C]. Het laden kost tijd en vraagt een behoorlijke  $\Delta T$  tussen bodem en wisselaar. Dit laatste kan worden gerealiseerd met een warmtepomp. De situatie is verder gelijk aan die voor het laadrendement van de aquifer en laadrendementen van tegen de 100[%] zijn goed mogelijk.

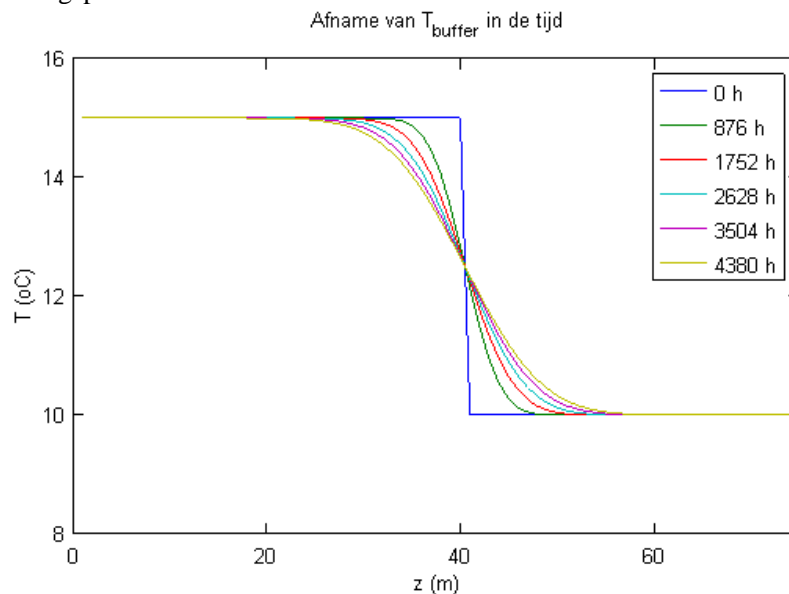


Figuur 16 Het laden van de bodem door permanent een bodemwarmtewisselaar op 20 °C te houden in een bodem met aanvangstemperatuur van 10 °C. Er zijn geen andere wisselaars in de buurt!

### Standsverliezen

Gelijk het verhaal bij de aquifer is er niet sprake van energieverlies, slechts van exergie verlies (temperatuurdaling). Door toepassing van warmtepompen is in principe de juiste hoeveelheid warmte te onttrekken uit de bodem met als prijs dat er aanspraak wordt gedaan op externe hulp energie (primaire energie). Let wel: indien temperatuurlifts niet mogelijk zijn omdat de investering in warmtepompen niet wenselijk is, dan wel omdat dieper doorcoelen ( $< 0$  [°C]) niet wenselijk is dan moeten we wel spreken van standsverliezen.

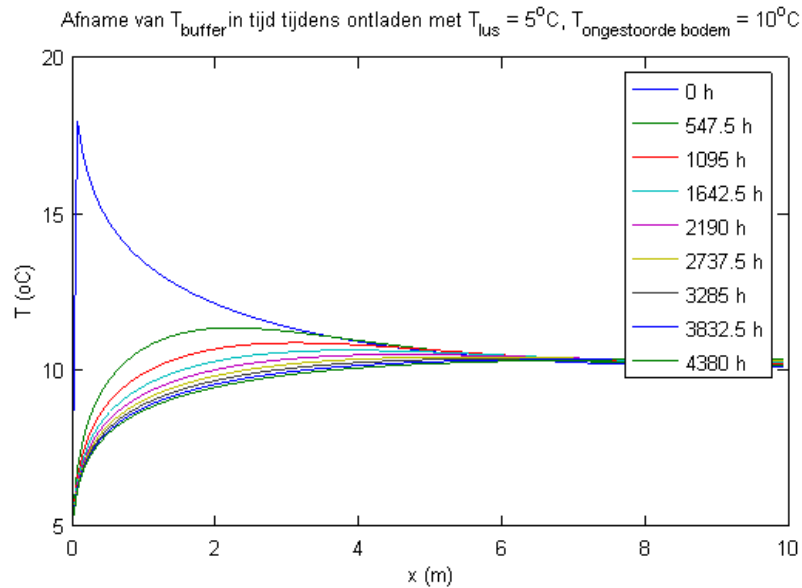
Bij toepassing van ontladen via een warmtepomp betekent de temperatuurdaling van de bodem een lagere COP waarde om dezelfde afgiftetemperatuur te bereiken (zie ook ontladrendement aquifer). Figuur 17 toont de temperatuurprofielen onder de kas gedurende een half jaar in geval een 40 meter diepe bodemlaag thermisch geactiveerd is tot 15 [°C] t.o.v. de ongestoorde bodemtemperatuur. Hier vindt de thermische degradatie richting de diepere ondergrond plaats, aan de bovenzijde is de kas als het ware 'isolatie'. Wat duidelijk wordt is dat over de eerste 30 meter diepte nauwelijks degradatie is opgetreden. Tussen de 30 en 40 meter is de temperatuur wel gemiddeld met 1,5 [°C] gezakt. Dit betekent over de eerste 40 meter een maximaal 15 [%] verlies aan voelbare warmte. Wederom dient opgemerkt dat de warmte dieper dan 40 meter 'gehaald' kan worden door dieper door te koelen met warmtepompen tijdens de ontladingsperiode.



Figuur 17 Temperatuurverandering in de bodem na laden van de eerste 40 meter onder de kas tot 15 °C. De z-waarde geeft de diepte aan onder de kas, waarbij de kas op een gemiddelde temperatuur van 15 °C is verondersteld ( $z = 0$ ).

### Ontlaadrendement

Voor het ontladen geldt dat er vrij verwarmd kan worden. Dit vraagt 'slechts' de inzet van circulatiepompen. Echter, in het algemeen zal bij een 15 -20 [°C] thermisch geactiveerde bodem niet voldoende zijn om zelf de warmte aan het binnenklimaat af te geven. Wederom is de inzet van warmtepompen een goede optie. Het ontladrendement blijft hierbij 95-100 [%], maar de inzet van externe energie is dan noodzakelijk



Figuur 18 Ontlading van bodem rondom 1 bodemwarmtewisselaar met  $T_{\text{bodemmw}} = 5^{\circ}\text{C}$  en  $T_{\text{ongestoorte bodem}} = 10^{\circ}\text{C}$ .

#### *Bufferrendement:*

Het rendement van de buffer wordt bepaald door wijze van laden en ontladen van de buffer en de stilstandsverliezen. De vergelijking met de aquifer zoals hierboven besproken kan gemaakt worden, leidend tot rendementen van 85 [%] (in geval van afwezigheid warmtepompen en gelijke laad- / ontladwarmtewisselaars) tot 100 [%] in geval van toepassen van warmtepompen tijdens het ontladproces.

#### *Investeringen:*

Per verticale wisselaar dient een ruimte te worden ingenomen van gemiddeld 40 [m<sup>2</sup>]. Wanneer we rekening houden met een investering van 30 [€/m] wisselaar, een opbrengst van 50 [W/m] en een afgiftevermogen van 100 [W/m<sup>2</sup>] na de warmtepomp met een COP = 3, dan is een lengte van 80 meter vereist voor de wisselaar, leidend tot 2400 [€] per wisselaar, oftewel 60 [€/m<sup>2</sup>]. Wanneer de warmtepompkosten geschat worden op 160 [€/kW] dan komt het geheel op ~75 [€/m<sup>2</sup>]. Dit bedient in feite de kas van 40 [aeq/m<sup>2</sup>.a]. Voor lagere warmtevragende kassen vallen de kosten lager uit.

## 7.4 Horizontale (ondiepe) bodemopslag

De technische analyse voor de horizontale bodemwarmtewisselaars levert het volgende resultaat op:

Tabel 8 Beoordeling verticale bodemwarmtewisselaar

<b> criterium</b>	Technologie: <b>Horizontale / ondiepe bodemwarmtewisselaar</b>
Capaciteit	2 – 3 [aeq/m <sup>2</sup> .a] voor dT = 10 [K], zie voor meer info onder de tabel.
Piekvermogen	25 – 50 [W/m <sup>2</sup> ] bij 1 meter diepe horizontale wisselaars met een ΔT ~ 5 [K] tussen bodemwarmtewisselaar en de bodem.
Bufferrendement	~60 – 100 [%] zie toelichting onder tabel
Hulpenergiegebruik	1,7 < $k_{buffer}$ < 3,8, zie toelichting onder tabel <i>aquifers</i>
Investerings	~5-15 [€/m <sup>2</sup> ] of ~ 200-600 [€/kW]
Ruimtebeslag in kas	Het kasoppervlak dat voor de buffer nodig is, beperkt zich tot het oppervlak voor de technische installaties die voor het vullen en legen van de buffer nodig zijn. Het gebruikte bodemoppervlak onder de kas beperkt zich tot de eerste 3 meter.
Conditie toepasbaarheid	Seizoensopslag in de bodem is in de regel overal mogelijk, waarbij grofzandige bodems een hogere capaciteit en ontrekkingsvermogen hebben.
Positionering buffer	De buffer zal ingericht moeten worden onder de kas. Hierbij is het graven van sleufen dan wel horizontaal boren/injecteren van pijpen mogelijk.
Levensduur	De technische levensduur van de buffer wordt bepaald door de levensduur van de leidingen en pompen. (minimaal 20 jaar voor bodemwarmtewisselaar)
Milieurisico's	De technologie kent mogelijke risico's t.a.v. lekkage van water/glycol uit de gesloten lussen. Dit vereist mogelijk toepassing milieuvriendelijk transportmedium (brine). De overige risico's met betrekking tot <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geluidsproductie</li> <li>- Luchtverontreiniging in/buiten de kas</li> </ul> spelen geen rol.
Bouwsnelheid	De benodigde tijd voor inpassing van een buffer bedraagt 4 - 8 weken, e.e.a afhankelijk met betrekking tot de mogelijkheid boringen te kunnen verrichten in de kas.
Vergunningen	Er is voor de toepassing van de technologie <u>geen</u> provinciale vergunning nodig mits er geen gravingen/boringe plaatshebben in waterwingebieden en beschermde natuurgebieden.
Bedrijfszekerheid	De technologie zal normaliter technisch ongestoord functioneren, mits uitgevoerd volgens de richtlijnen daarvoor.
Flexibiliteit	De technologie is aan te passen aan gewijzigde omstandigheden/behoefte bij de teler binnen de capaciteitsruimte die de bodemlaag biedt.
Inpasbaarheid	De buffertechnologie kan in een bestaande situatie worden ingepast. De temperaturen van de buffermateriaal en de transporteerbaar van het medium passen bij de in een kas gebruikelijke klimatiseringssystemen
Teeltimpact	De technologie heeft door zijn werking of positie in de kas geen invloed op de teelt.
Mate van autarkie / collectiviteit	De technologie kan op zich zelf staand functioneren voor een enkele tuinder. Collectief is niet perse noodzakelijk.

<b> criterium</b>	<b>Technologie: Horizontale / ondiepe bodemwarmtewisselaar</b>
Regelbaarheid	De aard van de buffertechnologie eist de toepassing van een warmtepomp waarvan de regeling moet aansluiten op die van de bestaande klimatiseringsinstallatie voor de kas.
Combineerbaarheid met andere functies	Nee
Veiligheid	In geval van lekkage ontsnapt het medium naar de bodem. In geval van ethylene glycol en water is het risico laag gezien de natuurlijke biodegradatie van ethyleen glycol. In geval van directe expansie met HFC koudemiddelen is het gevaar aanzienlijk hoger.
Corrosiviteit	Geen

#### Capaciteit:

De capaciteit is afhankelijk van de warmtecapaciteit, die varieert afhankelijk van de bodemgesteldheid, zie onderste tabel bij verticale bodemwarmtewisselaars (1,7 – 2,5 [MJ/m<sup>3</sup>.K]). Horizontale bodemwarmtewisselaars onder het gehele kasoppervlak liggen op zo'n 1 – 2 meter diepte en worden het meest efficiënt als spiraalvormige lussen aangebracht. De betrokken de ondergrond loopt op tot een diepte tot maximaal 4 meter. Vergunningtechnisch zijn er geen barrières. De buffercapaciteit is voor een maximaal betrokken diepte van 4 meter en een  $\Delta T = 10$  [K] gelijk aan 2 - 3 [aeq/m<sup>2</sup>]. Uiteraard is verhoging van deze temperatuur tot 70 – 90 [°C] mogelijk, maar vraagt de inzet van warmtepompen dan wel zonnecollectoren.

#### Piekvermogen:

Het vermogen dat gehanteerd wordt met betrekking tot horizontale dan wel spiraalvormige bodemwarmtewisselaars is 25 – 50 [W/m<sup>2</sup>].

#### Bufferrendementen:

Het rendement van de buffer wordt bepaald door wijze van laden en ontladen van de buffer en de stilstandsverliezen. Onderstaand bespreken we het laadrendement, standsverliezen en ontladrendement.

#### Laadrendement:

In geval van het laden van de bodem wordt de energie via geleiding toegevoerd via de bodemwarmtewisselaars. Deze worden in de bodem via gegraven sleuven op 1 a 2 meter diepte, waarbij zowel horizontale, dan wel spiraalvormige buizen worden toegepast.

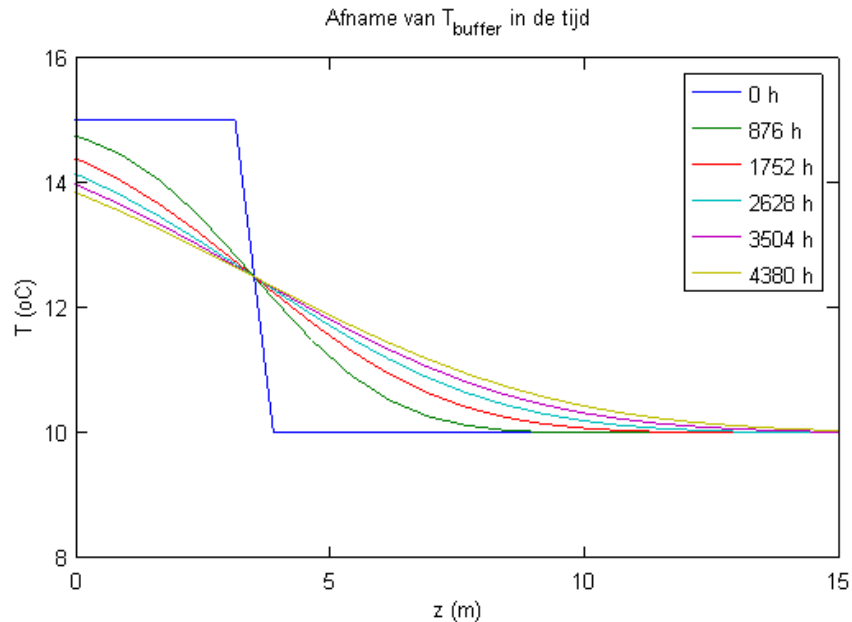
#### Standsverliezen

Gelijk het verhaal bij de aquifer is er niet sprake van energieverlies, slechts van exergie verlies (temperatuurdaling). Door toepassing van warmtepompen is in principe de juiste hoeveelheid warmte te onttrekken uit de bodem met als prijs dat er aanspraak wordt gedaan op externe hulp energie (primaire energie). Let wel: indien temperatuurlifts niet mogelijk zijn omdat de investering in warmtepompen niet wenselijk is, dan wel omdat dieper doorkoelen (< 0 [°C]) niet wenselijk is dan moeten we wel spreken van standsverliezen.

Figuur 19 geeft aan de temperatuurprofielen onder de kas gedurende een half jaar in geval een 3 meter diepe bodemlaag thermisch geactiveerd tot 15 [°C] t.o.v. de ongestoorde bodemtemperatuur. Hier vindt de thermische degradatie richting de diepere

ondergrond plaats. De temperatuur is in de eerste 3 meter gedaald van 15 [°C] naar ruim 13 [°C] in een half jaar tijd.

Wanneer de weggestroomde warmte naar de ondergrond dieper dan 3 meter beschouwd moet worden als verloren dan is het verlies 35- 40 [%]. Echter, door de inzet van warmtepompen kan de dieperliggende warmte, mits niet door grondwaterstroming verplaatst, ‘gehaald’ worden.



Figuur 19 De verandering van temperatuurprofielen als functie van de diepte gedurende een half jaar nadat de eerste 3 meter thermisch geactiveerd is tot 15 °C.

#### *Ontlaadrendement*

Voor het ontladen geldt dat er vrij verwarmd kan worden. Dit vraagt ‘slechts’ de inzet van circulatiepompen. In het algemeen zal een 15 [°C] thermisch geactiveerde bodem niet voldoende zijn om zelf de warmte aan het binnenklimaat af te geven. De inzet van warmtepompen is dan een goede optie.

Het ontladrendement blijft hierbij 95-100 [%].

#### *Bufferrendement:*

Het rendement van de buffer wordt bepaald door wijze van laden en ontladen van de buffer en de stilstandsverliezen. De vergelijking met de aquifer zoals hiervoor besproken, kan gemaakt worden, leidend tot rendementen van 60 [%] (in geval van afwezigheid warmtepompen en gelijke laad- / ontladwarmtewisselaars) tot 100 [%] (in geval van toepassen van warmtepompen tijdens het ontladproces).

#### *Investeringsen:*

Per m<sup>2</sup> kan zo'n 3 - 4 meter leiding gelegd worden. Kosten voor het graven van sleuven en materiaal zijn ~ 5 - 15 [€m<sup>2</sup>] voor grote oppervlakten.



## 7.5 Waterbassins onder de kas

De technische analyse voor waterbassins onder de kas met uitvoeringen zoals de Gaasboxx, Klimrek levert het volgende resultaat op:

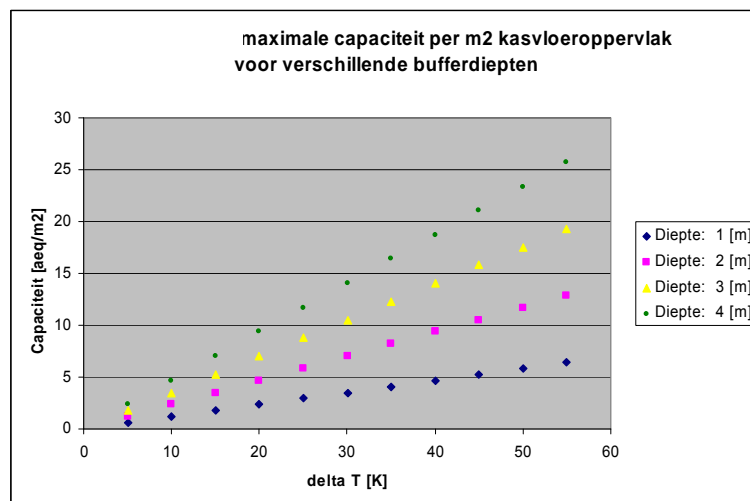
Tabel 9 Beoordeling waterbassin

<b>Criterium</b>	<b>Technologie: Waterbassin onder kas</b>
Capaciteit	10-20 [aeq/m <sup>2</sup> .a] in geval van laden tot 50 [°C] voor 5 meter diepe bakken. Zie toelichting onder aan tabel
Piekvermogen	Ontwerp op 200 [W/m <sup>2</sup> ] is eenvoudig haalbaar. Geen beperking, afhankelijk van opgestelde pompvermogen, warmtewisselend oppervlak eventuele inzet warmtepomp voor het traject 30 [°C] > T <sub>bassin</sub> > 5 [°C].
Bufferrendement	75 – 85 [%] in geval van ontladen na laden met zonnecollector. In geval van toepassing met laden van warmtepomp stijgt het rendement tot 100 [%] wegens inzet externe energie.
Hulpenergiegebruik	In geval van opwekking via zonnecollectoren en vrije verwarming in het stookseizoen dienen circulatiepompen ingezet te worden. In geval van inzet van warmtepompen voor het laden $1,7 < k_{buffer} < 3,8$
Investeringen	(100 [€/m <sup>2</sup> ] voor aanleg waterbassin (EPMD folie) of 40 [€/m <sup>2</sup> ]) + eventuele investering warmtepomp (10 – 15 [€/m <sup>2</sup> ]) + investering warmtewisselaar (5 [€/m <sup>2</sup> ]) = 55 -115 [€/m <sup>2</sup> ]
Ruimtebeslag	Het kasoppervlak dat voor de buffer nodig is beperkt zich tot het oppervlak voor de technische installaties die voor het vullen en legen van de buffer nodig zijn. Het gebruikte bodemoppervlak onder de kas voor de bufferfunctie hangt af van de dikte van de waterlagen.
Conditie toepasbaarheid	In principe overal mogelijk. Bouwvergunning vereist.
Positionering buffer	Onder de kas inclusief warmtewisselaars.
Levensduur	De technische levensduur van de buffer wordt bepaald door de levensduur van de pompen.
Milieurisico's	Er zijn geen risico's omtrent - Geluidsproductie - Luchtverontreiniging in/buiten de kas spelen geen rol.
Bouwsnelheid	De bouwperiode bedraagt 2 – 4 weken. Bij aanleg in bestaande bouw is afvoer grond nodig nieuwbouw De
Bedrijfszekerheid	De technologie zal normaliter technisch ongestoord functioneren, mits uitgevoerd volgens de richtlijnen daarvoor.
Flexibiliteit	De technologie is aan te passen aan gewijzigde omstandigheden/behoefte bij de teler binnen de capaciteitsruimte die de bodemlaag biedt.
Inpasbaarheid	De positie van de buffers kan vrij worden gekozen en daarmee kan de afstand van leidingen tot het ketelhuis worden geoptimaliseerd.
Teeltimpact	De technologie heeft door zijn werking of positie in de kas geen invloed op de teelt.
Mate van autarkie / collectiviteit	De technologie kan op zich zelf staand functioneren voor een enkele tuinder. Collectief is niet perse noodzakelijk.
Vergunningen	Bij de aanleg is een Ontgravingsvergunning nodig. Bij de aanleg onder grondwaterniveau is gedurende de bouwperiode een vergunning voor bemaling nodig. Beide vergunningen maken onderdeel uit van lokaal beleid.

<b>Criterion</b>	Technologie: <b>Waterbassin onder kas</b>
Regelbaarheid	De aard van de buffertechnologie eist de toepassing van een warmtepomp waarvan de regeling moet aansluiten op die van de bestaande klimatiseringsinstallatie voor de kas.
Combineerbaarheid met andere functies	Het bassin kan worden uitgevoerd voor regenwaterberging, bluswatervoorziening Door de meerdere gebruiksmogelijkheden van dit type buffer is het in feite een 'no regret'- investering in het geval er andere technieken voor buffering aantrekkelijker worden.
Veiligheid	Geen barrières
Corrosiviteit	Geen

### Capaciteit

Voor de systemen gebaseerd op opslag in een bassin met water wordt de *maximale* specifieke buffercapaciteit, uitgedrukt in [a.e.q./m<sup>2</sup>], bepaald door het watervolume en het te hanteren temperatuurverschil. De uiteindelijk beschikbare hoeveelheid water, c.q. volume is afhankelijk van de mogelijke bassindiepte per m<sup>2</sup> oppervlak. Het verband daartussen is in onderstaande figuur aangegeven.



Figuur 20 Buffercapaciteit water onder diverse condities

Het rendement van de buffer wordt bepaald door wijze van laden en ontladen van de buffer en de stilstandsverliezen. Onderstaand bespreken we het laadrendement, stilstandsverliezen en ontladrendement.

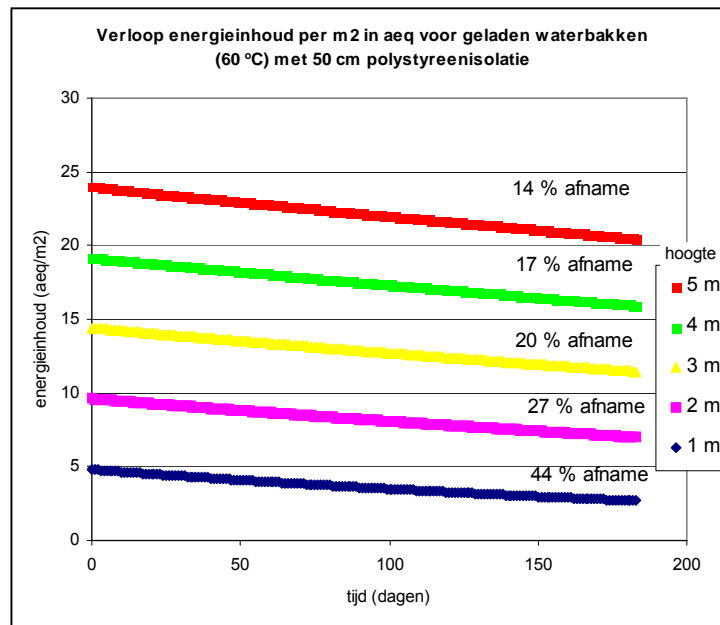
#### *Laadrendement:*

In geval van het laden van bassin wordt maximaal geladen tot 25 [°C] met behulp van overtollige zonnewarmte en zonnecollectoren (of rest van perceel). Dit kan met een hoog rendement van 95-100[%]. Laden tot 40-50 [°C] met kanttekening dat er aanspraak is op externe hoogwaardige energie via warmtepomp e.d. Ook hier is een rendement van 95-100[%] haalbaar.

### Stilstandsverliezen

Een ruwe indicatie voor het verlies van een thermisch geladen waterbak (20 m x 20 m bodemoppervlak.) met 50 cm polystyreenisolatie is gegeven voor verschillende bakhoogten in figuur 21. Deze figuur geeft aan dat de standsverliezen in een half jaar (180 dagen) 14 [%] bedragen voor een 60 [°C] lading en een bakhoogte van 5 meter. Nu wordt de warmte die de isolatie heeft verlaten als permanent verloren beschouwd..

De gegeven afnamen in een half jaar veranderen lineair met isolatiedikte. De relatieve afnamen zijn onafhankelijk van de laadtemperatuur bij aanvang van de buffering.



Figuur 21 Het energetisch verlies in een half jaar van een thermisch geladen waterbak met 50 cm polystyreenisolatie voor verschillende bakhoogten

### Ontlaadrendement:

Indien passieve ontlading zonder warmtepomp dan is ~100 [%] mogelijk waarbij op een bepaald moment het vermogen terugvalt bij afname van bassintemperatuur. Bij actieve ontlading met behulp van warmtepomp dan is een vergelijkbaar rendement mogelijk maar met de inzet van externe energie.

### Bufferrendement:

Voor het laden dient in ieder geval een warmtepomp toegepast te worden, waarbij de gemiddelde COP waarde rond de 3-4 zal zijn bij het laden met van 20 naar 50 [°C]. De  $k_{buffer}$  waarden komen hiermee in de richting van de 1,7 – 2,5. Het rendement is ~ 85 – 100 [%] bij gegeven  $k_{buffer}$ .

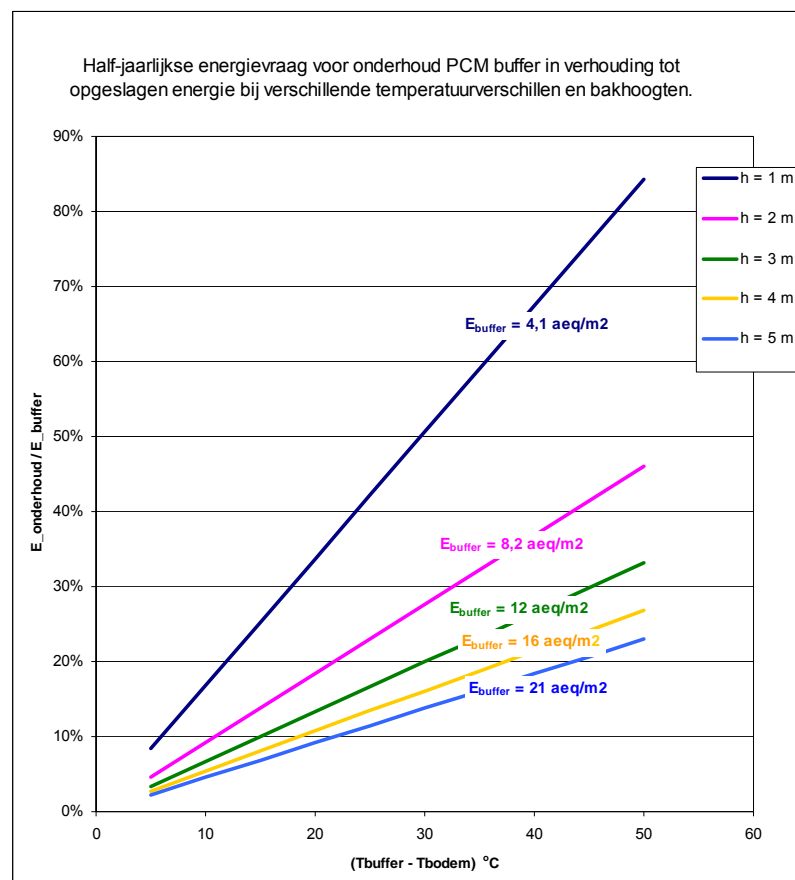
## 7.6 Ongekapselde en gekapselde PCM onderin de kas

Tabel 10 Beoordeling PCM

<b>Criterium</b>	<b>Technologie: PCM bassin onder kas</b>
Capaciteit	20 [aeq/m <sup>2</sup> .a] in geval van laden van 5 meter diepe bakken. Zie toelichting onder aan tabel. 15 [aeq/m <sup>2</sup> /a] in geval van gekapselde PCM met water.
Piekvermogen	Ontwerp op 200 [W/m <sup>2</sup> ] is eenvoudig haalbaar. Geen beperking, afhankelijk van opgestelde pompvermogen, warmtewisselend oppervlak eventuele inzet warmtepomp voor het traject 30 [°C] > T <sub>bassin</sub> > 5 [°C].
Bufferrendement	75 – 85 [%] in geval van ontladen na laden met zonnecollector. In geval van toepassing bijladen van warmtepomp tijdens met warmtepomp stijgt het rendement tot 100 [%] wegens inzet externe energie.
Hulpenergiegebruik	In geval van opwekking via zonnecollectoren en vrije verwarming in het stookseizoen dienen circulatiepompen ingezet te worden.
Investerings	40 [€/m <sup>2</sup> ] voor aanleg waterbassin (4m diep) + eventuele investering warmtepomp (10 – 15 [€/ m <sup>2</sup> ]) + investering warmtewisselaar (5 [€/m <sup>2</sup> ]) + grondafvoer (16 [€/m <sup>2</sup> ]) + PCM (200 [€/m <sup>2</sup> ]) ~ 290 [€/m <sup>2</sup> ].
Ruimtebeslag	Het kasoppervlak dat voor de buffer nodig is beperkt zich tot het oppervlak voor de technische installaties die voor het vullen en legen van de buffer nodig zijn. Het gebruikte bodemoppervlak onder de kas voor de bufferfunctie hangt af van de dikte van de waterlagen.
Conditie toepasbaarheid	In principe overal mogelijk. Bouwvergunning mogelijk vereist.
Positionering buffer	Onder de kas inclusief warmtewisselaars.
Levensduur	De technische levensduur van de buffer wordt bepaald door de levensduur van de pompen en de eventueel toegepaste folie.
Milieurisico's	Er zijn geen risico's voor wat betreft - Geluidsproductie - Luchtverontreiniging in/buiten de kas
Bouwsnelheid	De bouwperiode bedraagt 2 – 4 weken. Bij aanleg in bestaande bouw is afvoer van grond nodig.
Bedrijfszekerheid	De technologie zal normaliter technisch ongestoord functioneren. Met name de wandconstructie verdient aandacht met betrekking tot eventueel te verwachten krachten tijdens het smeltproces en daarbij behorende uitzetting.
Flexibiliteit	De technologie is aan te passen aan gewijzigde omstandigheden/behoefte bij de teler binnen de capaciteitsruimte die de bodemlaag biedt.
Inpasbaarheid	De positie van de buffers kan vrij worden gekozen en daarmee kan de afstand van leidingen tot het ketelhuis worden geoptimaliseerd.
Teeltimpact	De technologie heeft door zijn werking of positie in de kas geen invloed op de teelt.
Mate van autarkie / collectiviteit	De technologie kan op zich zelf staand functioneren voor een enkele tuinder. Collectief is niet perse noodzakelijk.

Criterion	Technologie: PCM bassin onder kas
Vergunningen	Bij de aanleg is een Ontgravingsvergunning nodig. Bij de aanleg onder grondwaterniveau is gedurende de bouwperiode een vergunning voor bemaling nodig. Beide vergunningen maken onderdeel uit van lokaal beleid.
Regelbaarheid	De aard van de buffertechnologie eist de toepassing van een warmtepomp waarvan de regeling moet aansluiten op die van de bestaande klimatiseringsinstallatie voor de kas.
Combineerbaarheid met andere functies	Nee
Veiligheid	Geen barrières
Corrosiviteit	Geen

Ter illustratie toont figuur 22 de benodigde energie om paraffine (RT54, Rubitherm, smelt temperatuur ) rond de 50 [°C] te houden ( $E_{\text{onderhoud}}$ ) voor de duur van een half jaar ten opzichte van de energetische inhoud. De labels in de grafieken geven de totale energiewaarde in [ $\text{aeq}/\text{m}^2$ ] van de buffer weer, welke direct evenredig is met de hoogte van de buffer. Hierbij is verondersteld dat alleen de latente warmte een bijdrage levert in het laad/ontlaad proces van PCM als buffer. De veronderstelde constructie is een zichzelf repeterende configuratie van ondergrondse bakken (20 m x 20 m x h m, omgeven met polystyreen isolatie van 50 cm). Verdubbeling van isolatiewaarde leidt tot halvering verliezen. Uit de figuur wordt duidelijk dat er niet gekozen moet worden voor te lage bakken aangezien dan de hulpenergie, dan wel weglek groot is.



Figuur 22 Half-jaarlijkse energievraag in relatie tot de gebufferde energie ter handhaving van PCM buffer temperatuur als functie van verschil temperatuur tussen buffer en diens omgeving.

## 8 De vertaalslag naar een stroomschema

Op basis van de voorgaande technologiebeschrijvingen en de beoordeling van de technologieën op grond van de daartoe opgestelde criteria is een keuzemodel opgezet. Daarbij wordt – gegeven de situatie bij een kas – via een keuzepad vastgesteld welke buffertechnologie voor de betreffende teler in aanmerking komt of komen en op welke manier de energieadviseur van de teler daarover kan worden geïnformeerd. In het onderstaande is verondersteld dat de verwarmingsfunctie, d.w.z. ontladen, leidend is in de bepaling van de buffer:

- 1) Bepaling van de warmtevraag van de huidige kas:  $Q_{afgifte}$
- 2) Bepaling optimaal winbare zonnewarmte op basis van maximaal **toelaatbare** lichtinval in koelseizoen:  $Q_{max.zon-aanbod}$
- 3) Bepaling van mogelijk te beschouwen buffersystemen (eventueel alle opties).
- 4) Bepaling van het kasoppervlak (footprint):  $A_{kas}$
- 5) Bepaling van omliggende bruikbare oppervlak voor bijv. zonnecollectoren, dan wel extra buffering:  $A_{overig}$
- 6) Bepaling van additioneel te bufferen seizoensenergie door middel van bijv. WKK, dan wel zonnecollectoren op  $A_{overig}$ :  $Q_{additioneel}$
- 7) Bepaling van de beschouwde buffersystemen  $i$  met bufferrendemente  $\eta_{buffer,i}$ . Dit bufferrendement is onder andere afhankelijk van de gekozen temperatuurniveaus voor kas, buffer en de benodigde temperatuurval over de warmtewisselaars. Zie als voorbeeld de technische analyse van de aquifer in hoofdstuk 7. Bovendien dient in ogenschouw te worden genomen te mate van stabiliteit van de buffer en de mate van isolatie.
- 8) Bepaling van de aangeboden warmte voor buffering door bepaling  

$$\min(Q_{aanbod}, \{Q_{afgifte}/\eta_{buffer} - \sum_i W_{hulp,i}\})$$
- 9) Bepaling van de buffercapaciteit  

$$Q_{buffer} = \eta_{overall-laden} \{[\min(Q_{aanbod}, \{Q_{afgifte}/\eta_{buffer} - \sum_i W_{hulp,i}\})] + W_{hulp,1}\}$$
- 10) Bepaling van het benodigde volume buffermateriaal m.b.v. specifieke buffercapaciteit:  

$$V_{buffer,i} = Q_{buffer,i} / \epsilon_i.$$
- 11) Bepaling van toelaatbare hoogte dan wel diepte  $h$  van (ondergrondse) buffer op basis van beschikbare oppervlakten:  $h_i = V_{buffer,i} / (A_{kas} + A_{overig})$  of  $h_i = V_{buffer,i} / A_{kas}$  of  $h_i = V_{buffer,i} / A_{overig}$
- 12) Eerste selectie van buffer op basis van berekende hoogte, eventueel neerschalen dan wel omhoogschalen van bufferhoogte met aantekening dat er extra berekening nodig zijn voor m.b.t. inzet andere (fossiele) buffers in geval van neerschalen, dan wel gunstige energielevering aan derden in geval van opschalen.
- 13) Op basis van noodzakelijk piekvermogen en gekozen potentiële buffersystemen bepaling van de noodzaak aan: warmtewisselaars, warmtepompen, zonnecollectoren, hulpketels, WKK inzet, circulatiepompen, buffermateriaal.
- 14) Opstellen van de investeringskosten, de bedrijfsvoeringskosten dan wel onderhoudskosten, eventueel verrekend in geval van teruglevering.
- 15) Bepaling financiële haalbaarheid per potentieel buffersysteem.
- 16) Weging van de overige criteria zoals: bouwsnelheid, vergunning, duurzaamheid etc, zie hoofdstuk 6.
- 17) Finale keuze systeem

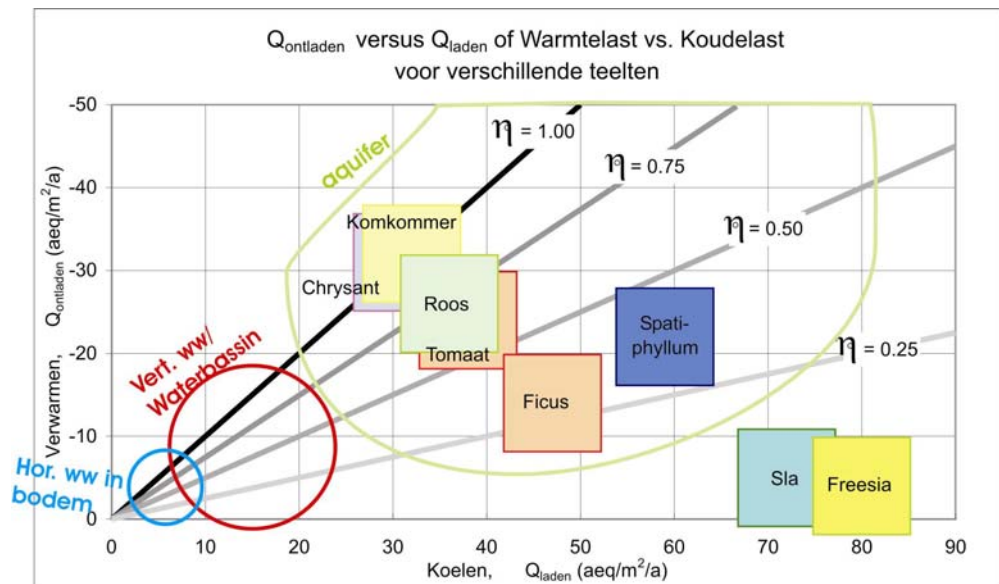
In deze aanpak zijn de overzichtstabellen 11 en 12 als handreiking beschikbaar.

Een voorbeeld van het werken met de geschetste aanpak is in bijlage 4 opgenomen.

Tabel 11 De operationele kenmerken van de beschouwde systemen:

Technologie ► Kenmerk ▼	Aquifer	Bodemww. verticaal	Bodemww. horizontaal	Waterbassin onder kas	PCM bassin onder kas
Capaciteit [aeq/m <sup>2</sup> ]	5 – 80	5-20	2 – 4	5-20	5-20
Rendement [%]	75-100%	85%-100%	60-100%	75-100%	75-100%
Piekvermogen [W/m <sup>2</sup> ]	120	100-200	100-200	100-200	100-200
Investeringskosten [€/m <sup>2</sup> ]	30-45	75	75	55-115	290

Wanneer uitsluitend de energetische kant van de zaak wordt belicht dan kunnen we voor de verschillende kasteelten in Nederland de onderstaande figuur weergeven.



Figuur 23 Berekende laadenergieën  $Q_{\text{laden}}$  in het laadseizoen en benodigde ontladenergieën  $Q_{\text{ontladen}}$  voor het ontladeseizoen voor verschillende teelt typen in Nederland. De cirkels aquifer/verticaal bodemwisselaars en waterbassin/PCM geven indicatie over de energetische haalbaarheid van een buffer voor verwarmingsdoeleinden.

Figuur 23 geeft op de  $x$ -as aan de aangeboden zonnearmte in het koelseizoen, op de  $y$ -as de benodigde warmtevraag gedurende het stookseizoen. Dit bepaald per teeltsoort de positie in deze grafiek. De diagonalen geven de isolijnen aan van bufferrendementen van respectievelijk 100, 75, 50 en 25 [%] in geval van afwezigheid van hulpenergieën. Op basis van figuur 9 zien we dat bepaalde teelten toe zouden moeten kunnen met een bufferrendement van minder dan 50 [%] (*ficus*, *spati-phyllum*, *sla*, *fresia*). Andere teelten vragen rendementen van 75 – 100 [%] om de behoefte volledig te dekken. Met de cirkels zijn ruwweg de positie van de aquifer, verticale bodemwarmtewisselaar dan wel waterbassins of horizontale bodemwarmtewisselaars aangegeven, in het geval de buffer wordt ingezet voor verwarmingsdoeleinden.

## 9 Conclusies en discussie

De uitdaging om zonnewarmte op te slaan in een seizoensbuffer en deze vervolgens in te zetten tijdens het stookseizoen wordt steeds urgenter vanwege de sterke behoefte om inzet van fossiele brandstoffen te minimaliseren. Voor dit onderzoek is een range van 10 tot 40 aeq/m<sup>2</sup> aan verwarmingsenergie aangehouden als bandbreedte waarin buffering bij voorkeur zou moeten plaatsvinden.

Voor “koele” teelten zoals sla en fresia's met een onbalans tussen de behoefte aan koelen en verwarmen moet de keuze van een buffer worden ingegeven door de koelbehoefte. Voor de meeste andere in Nederland veel voorkomende teelten is de warmtevraag leidend.

Daarbij neemt de behoefte aan een grotere buffercapaciteit toe naarmate de gewenste gemiddelde temperatuur voor de teelt hoger ligt.

Een interessante en goed bekende technologie voor thermische buffering is ondergrondse opslag van ingevangen zonnewarmte met behulp van grondwater in een aquifer. Deze technologie biedt normaliter een grote opslagcapaciteit vanwege een groot beschikbaar ondergronds volume. Er is op eenvoudige wijze een groot vermogen te realiseren vanwege de goede verpompbaarheid van het water.

Dit vereist wel dat gedurende de zomermaanden zonnewarmte zoveel als toelaatbaar wordt overgedragen naar dit grondwater op een zo hoog mogelijke temperatuur. Dit betekent bijvoorbeeld dat zonwering en ventilatie in de zomermaanden tot het toelaatbare geminimaliseerd dienen te worden en inkoppeling van de zonnewarmte gemaximaliseerd door juiste wijze van warmtewisseling in de kas. Echter, ook in suboptimale uitvoering is de aquifer een belangrijke mogelijkheid om het fossiele brandstofverbruik te verlagen voor teelten die 20 tot 40 aeq/m<sup>2</sup> aan verwarmingsenergie vragen, zoals bij de tomaat- en komkommerteelt.

Er kleven echter ook nadelen aan de inzet van deze vorm van energieopslag, zoals de onmogelijkheid voor bepaalde locaties om ondergrondse thermische opslag te realiseren, vergunningsproblematiek, de kans op interferentie met naastliggende thermische systemen e.d.

Alternatieven kunnen worden gezocht in gesloten-lus systemen, waar horizontale dan wel verticale bodemwarmtewisselaars de directe ondergrond via warmtegeleiding thermisch activeren dan wel deactiveren. Tegelijkertijd ligt hierin ook het nadeel besloten. De warmtegeleiding van de bodem verloopt daar vele malen trager dan bij het watertransport door een poreuze zandlaag zodat per m<sup>2</sup> kasoppervlak minder capaciteit betrokken kan worden. Zo'n bodemsysteem voor thermische opslag levert een range in opslagcapaciteit van 2 (horizontale bodemwarmtewisselaar) - 20 aeq/m<sup>2</sup> (verticale bodemwarmtewisselaars > 100 m) op. Dat is voor veel gewassen onder de maat. Bovendien geldt hierbij dat veel boringen met voldoende lange lussen plaats moeten vinden om voldoende energie op te kunnen slaan en te onttrekken, wat de investeringskosten sterk verhoogt en om die reden er als optie niet uitspringt.

Ook het alternatief van een waterbassin *onder* de kas, dat thermisch geladen kan worden, is een mogelijkheid. Maar deze vraagt wel om een hoge temperatuurlift ( $\Delta T \sim 40K$ ) om een energie-inhoud voor opslag tot 20 aeq/m<sup>2</sup> te bereiken.



Voor het daadwerkelijk opslaan van zonnearmte in zo'n bassin moet gedurende de zomermaanden het koelwater van een temperatuur die net iets ligt onder de kastemperatuur met behulp warmtepompen gelift worden met een  $\Delta T$  van 30 K. Dit laden kan op zich met een efficiëntie van 60-70%.<sup>1</sup>

Hetzelfde verhaal geldt voor het thermisch doorladen naar een hogere temperatuur voor een aquifer of bodemsysteem. Maar omdat zowel voor een aquifer als een bodemsysteem veel grotere volumes betrokken zijn bij de opslag is het in die gevallen niet perse noodzakelijk de  $\Delta T$  boven de gemiddelde kastemperatuur te tillen (m.u.v het systeem met de horizontale warmtewisselaar). Daartegenover staat dat ook in deze gevallen een warmtepomp noodzakelijk is om tijdens het stookseizoen de ondergrondse buffertemperaturen op te tillen naar hogere waarden zodat warmteafgifte aan de kas mogelijk wordt.

Concluderend is dat voorsnog de aquifer een sterke optie is en blijft in het geval de ondergrond dit toelaat en vergunning verkregen kan worden. Daarbij moet echter wel het maximaal inkoppelen van zonnearmte gedurende de zomermaanden een punt van aandacht zijn zodat het concept van de gesloten kas benaderd kan worden. Wanneer een geschikte ondergrond en/of een vergunningverlening voor een aquifer niet mogelijk is, dan pas komen de andere opties van de gesloten bodemwarmtewisselaar en ondergrond en onderbouwde bassins aan bod. Deze opties zijn ook interessant voor relatief kleinschalige kassen (< 1 hectare), waar de investering voor de aquifer als buffer per m<sup>2</sup> kas aanzienlijk duurder wordt.

Wil men voor de belangrijke teelten een passende opslagcapaciteit creëren, dan is het noodzakelijk om ofwel de specifieke warmtebehoefte door andere maatregelen terug te brengen tot een niveau waarin buffering onder de kas (in waterbassins / met PMC's) mogelijk is. Dat betekent echter globaal een halvering van de specifieke behoefte door andere maatregelen.

Alternatief is om in te zetten op thermochemische opslag omdat via die weg een verveelvoudiging van de opslagcapaciteit ten opzichte van bestaande technieken kan worden bereikt.

Met een dergelijke buffertechnologie komt men in de voor glastuinbouw bepalende range van energiedekking.

Momenteel is er veel gaande op het gebied van thermochemische opslag in de woningbouw met opslagcapaciteiten per m<sup>3</sup> die in theorie een factor 10 hoger zijn dan die van thermisch geactiveerd water (met een  $\Delta T = 50$  K). Voor de woningbouw zijn deze opties interessant omdat daken vol gelegd kunnen worden met noodzakelijke zonnecollectoren voor de productie van hoge temperaturen (70-160 °C) tijdens het zomerseizoen om daarmee het thermochemisch materiaal te activeren. Voor kassen is deze deels methode slecht toepasbaar omdat afscherming van licht door collectoren ongewenst is.

In ieder geval is het mogelijk dat elders geactiveerd thermochemisch materiaal getransporteerd wordt naar de kassen.

Daarbij creëren teelten van bijvoorbeeld komkommer, tomaat, chrysant en roos de meest gunstige condities. Deze teelten komen als eerste in aanmerking komen voor nieuwe buffertechnologieën voor seizoenopslag met een hogere capaciteit zoals bij thermochemische opslag omdat de beschikbare volumes buffermateriaal daar het eerst de gewenste dekking van warmte- en koudevraag zullen kunnen geven.

---

<sup>1</sup> De temperatuurlift kan deels ook worden verzorgd door restwarmte vanuit een WKK. Echter, dit betreft in dat geval niet de opslag van zonnearmte.

Het verder ontwikkelen van deze technologie specifiek voor de glastuinbouw verdient dan ook zeker de aandacht. Daarbij moet rekening worden gehouden met de eerder aangegeven criteria maar het principe van thermochemische opslag lijkt daarin geen belemmeringen te creëren.

Tabel 12. De beoordeling van de beschouwde buffertechnologieën op basis van de criteria

<b>Criterion ▼</b>	<b>Technologie ►</b>	<b>A quifer</b>	<b>Hor. Bodemw.w.</b>	<b>Vert. bodemw.w.</b>	<b>Diepe aquifer</b>	<b>Klimrek</b>	<b>Gaasboxx</b>	<b>PMC pakket</b>	<b>PMC slurry</b>
Capaciteit		Goed met aandachtspunt	Met beperkingen	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Piekvermogen		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Bufferrendement		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Hulpenergie laden/ontladen		Goed met aandachtspunt	Met beperkingen	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Investering		Goed met aandachtspunt	Met beperkingen	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Ruimtebeslag		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Conditie toepasbaarheid		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Positionering buffer		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Levensduur		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Milieu-risico's		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Bouwsnelheid		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Vergunningen		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Bedrijfszekerheid		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Flexibiliteit		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Inpasbaarheid		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Teeltpact		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Autarkie / collectiviteit		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Regelbaarheid		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Combineerbaarheid met andere functies		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Veiligheid		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed
Corrosie		Goed met aandachtspunt	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed	Goed

Legenda voor kwalificaties:

Goed  
Goed met aandachtspunt

Met beperkingen  
Slecht

## 10 Afkortingen en definities

### Seizoenopslag:

Vastleggen van energie (overaanbod van warmte) voor gebruik later in het teeltseizoen ten behoeve van kasklimatisering.

### Geconditioneerde teelt:

Teelt van gewassen in een gesloten kas

### Gesloten kas:

Glastuinbouwkas, waarbij zowel in de zomer als in de winter geen ventilatie via ramen nodig is om de klimaatcondities optimaal te houden. Dit vraagt om alternatieven voor koelingsmethoden en voor luchtontvochtiging. De inzet van een seizoensbuffer kan hierbij een grote ondersteuning zijn.

### Lange termijn (seizoen):

De duur van de periode waarin opslag dan wel onttrekking van warmte voor energievoorziening plaatsvindt, meestal enkele maanden tot hooguit een half jaar.

### Korte termijn (etmaal)

De duur van de periode waarin opslag dan wel onttrekking van warmte voor energievoorziening plaatsvindt, meestal een tot hooguit enkele etmalen

### COP:

Coëfficiënt of Performance ofwel de prestatie van een warmtepomp uitgedrukt als de verhouding tussen de hoeveelheid energie die moet worden gebruikt voor de verkregen bruikbare energie ten opzichte van die bruikbare energie.

## 11 Referenties

- [1] Haalbaarheidsonderzoek thermochemische opslag van zonnewarmte; (TNO-2003)
- [2] Toepasbaarheid van aquifers in de glastuinbouw voor aardwarmtewinning en warmteopslag (GLAMI 2001)
- [3] Low-cost kanalsysteem – Verkenning van laagwaardig energietransport en opslag voor de kassenbouw. (TNO-2006)
- [4] Buffering van aardwarmte en andere duurzame energiebronnen (TNO 2006)
- [5] Nieuwe materialen voor warmte-opslag bij tuinbouwkassen (TNO-2005)
- [6] Compacte chemische seizoenopslag van zonnewarmte (ECN – 2004)
- [7] Concepten voor een energieproducerende kas – deelstudies (Kas als energiebron - 2004)
- [8] Toepasbaarheid van aquifers in de glastuinbouw voor aardwarmtewinning en warmteopslag (IMAG – 2001)
- [9] Kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en ondergrondse energie-opslag bij (bijna)gesloten kassen. (KEMA – 2002)
- [10] Warmteopslag onmisbaar voor duurzame toekomst. (VV+ - 2006)
- [11] Warmteopslag voor systeemoptimalisatie (VV+ - 2005)
- [12] Hoge temperatuur warmteopslag in de bodem (VV+ - 2005)
- [13] Gesloten, verticale bodemwarmtewisselaars (VV+ - 2007)
- [14] Toepassing van verticale bodemwarmtewisselaars (VV+ - 2006)
- [15] Verwarmen en koelen met de bodem (VV+ - 2005)
- [16] Warmteopslag met adsorbentia met de nadruk op zeoliet en silica. (TNO-2000)
- [17] Warmteopslag met adsorbentia – Warmteopslagsystemen en toepassingen (TNO- 2000)
- [18] NVOE-richtlijnen Ondergrondse Energieopslag (Novem 2001)
- [19] Standaardcijfers voor de energiebehoefte van teelten
- [20] Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudeopslagsystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw (IMAG – 2002)

- [21] Haalbaarheidsstudie naar gebruik van faseovergangsmateriaal (PCM) in de kas; (PPO 2004).
- [22] Energie in kengetallen: op zoek naar een nieuwe balans (PRI 2004)
- [23] ISSO 73 – Verticale bodemwarmtewisselaars
- [24] Basisgegevens aardgassen, Gasunie

## 12 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Produktschap Tuinbouw  
Postbus 280  
2700 AG Zoetermeer

Ministerie van LNV

Postbus 482  
6710 BL Ede

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Ing. R.A. Brand  
Dr. W.G. Planje  
Ir. J. Ruigrok

Ondertekening:



Ing. R.A. Brand  
projectleider



Ing. A.A.L. Traversari MBA  
afdelingshoofd

# 1 Overzicht buffermaterialen

Opslagprincipe / Materiaal	Warmtecapaciteit via: - Condensatiewarmte - Enthalpie - Verdampingswarmte - Adsorptiewarmte	Temperatuurrange bufferproces gebaseerd op: - Smeltpunt/kookpunt - Desorptietemperatuur - Bedrijfstemperatuur	Warmtegeleiding t.b.v. piekvraag	Dichtheid (tbv capaciteit per m <sup>3</sup> )
<b>Voelbare warmte</b>				
<u>Vloeistoffen</u>				
Water	4,2[kJ/kg/K]	0 → 100 [°C]	0,6 [W/m.K]	0,998 [kg/dm <sup>3</sup> ]
(thermische) olie	2,1[kJ/kg/K]	0 → 350 [°C]	0,135 – 0,11 [W/m.K]	0,85 – 0,60 [kg/dm <sup>3</sup> ]
<u>Vaste stoffen</u>				
Steen/beton	0,7 – 1,1 [kJ/kg/K]	0 → 1100 [°C]	1,7 [W/m.K]	1,8 – 2,6 [kg/dm <sup>3</sup> ]
Aluminium	0,3[kJ/kg/K]	0 → 660 [°C]	235 [W/m.K]	2,6 – 2,8 [kg/dm <sup>3</sup> ]
Ijzer	0,45 [kJ/kg.K]	0 → 1100 [°C]	80 [W/m.K]	7,0 – 7,9 [kg/dm <sup>3</sup> ]
Zand	0,8[kJ/kg.K]	0 → 1100 [°C]	0,15 – 4 [W/m.K]	1,6 – 2,1[kg/dm <sup>3</sup> ]
<b>Latente warmte</b>				
<u>Eutectische mengsels</u>				
Organisch	160 – 250 [kJ/kg]	- 60 → 130 [°C]	0,2 – 0,6 [W/mK]	0,7 – 0,9 [kg/dm <sup>3</sup> ]
– Paraffinen	130 – 190 [kJ/kg]	22 – 64 [°C]	0,25 (s) [W/mK]	0,7 – 0,9 [kg/dm <sup>3</sup> ]
– Zouthydraten	188 – 242 [kJ/kg]	27 – 55 [°C]	1,3 (l)/0,6 (s) [W/mK]	1,9-2,1 [kg/dm <sup>3</sup> ]
<u>Verdamping</u>				
Water / damp	2100 [kJ/kg]	5 → 95 [°C]	Convectief bepaald	0,998 [kg/dm <sup>3</sup> ]
Kristallisatie Water → ijs	334 [kJ/kg]	0 [°C]	2,0 [W/m.K]	0,92 [kg/dm <sup>3</sup> ]
Overig anorganisch (w.o. metalen)	80 – 1900 [kJ/kg]	- 30 → 1400 [°C]	10-250 [W/mK]	1-12 [kg/dm <sup>3</sup> ]
<b>Thermochemisch - Sorptie</b>				
<u>Adsorptie</u>				
Zeoliet	950 – 1300 [kJ/kg]	200 → 350 [°C]	0,4 [W/m.K]	Bulk: 670 [kg/m <sup>3</sup> ]
Silicagel	0.92 [kJ/kg]	120 → 250 [°C]	0,4 [W/m.K]	Mat:600 – 1100[kg/m <sup>3</sup> ] Bulk:700 – 800[kg/m <sup>3</sup> ]
<u>Absorptie</u>				
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	1700 [kJ/kg]	122 [°C]	0.175 [W/mK]	1,7 [kg/dm <sup>3</sup> ]
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	300 [kJ/kg]	89 [°C]	0,5 [W/mK]	0,6 [kg/dm <sup>3</sup> ]
<b>Chemische reversibele reactie</b>				
FeCO <sub>3</sub>	2,6 [GJ/m <sup>3</sup> ]	180 [°C]		3,8 [kg/dm <sup>3</sup> ]
Fe(OH) <sub>3</sub>	2,2 [GJ/m <sup>3</sup> ]	150 [°C]		3,9 [kg/dm <sup>3</sup> ]
NaOH	2,6 [GJ/m <sup>3</sup> ]	300 [°C]		
SiO <sub>2</sub>	37,9 [GJ/m <sup>3</sup> ]	4000 [°C]		



## 2 Overzicht bufferopties

Tabel B2.1 Overzicht van buffertechnologieën, ingedeeld naar opslagprincipe.

Nr	Technologie	Korte omschrijving	Temperatuur- range	Mate van volwassenheid			Capaciteit (MJ/m <sup>3</sup> )	Potentiële optie nu
				Bewezen	In demofase	In ontwikkeling		
	<b>Thermische opslag (voelbaar)</b>							
1	Aquifer (ondiep)	Opslag van energie in de watervoerende bodem op 50 – 250 m diepte. (geldt als basisconcept)	8 - 20°C	x			22 bij dT = 10°C	Ja
2	Aquifer (diep)	Directe opslag en onttrekking van warmte in (zout)watervoerende bodem lagen op 200 – 500 meter diepte	15 - 95 °C	x			22 bij dT = 10°C	Ja
3	Bodemopslag in ondiepe ondergrond	Een <u>verticale</u> warmtewisselaar in de bodem door een gesloten systeem tot 50-100 meter diepte met de bodem als buffer. De (zonne)warmte wordt via een buizenstelsel aan de bodem afgegeven en weer teruggewonnen.	8 – 50 °C	x			17 – 25 bij dT = 10°C	Ja
4	Bodemopslag in zeer ondiepe ondergrond	Een gesloten warmtewisselaarsysteem <u>horizontaal</u> op 2 – 10 meter diepte met de bodem als buffer. De (zonne)warmte wordt via een buizenstelsel aan de bodem afgegeven en weer teruggewonnen., Commercieel verkrijgbaar	10 - 80°C		x		17 – 25 bij dT = 10°C	Ja
5	Klimrek warmtebuffer	Buffering in een volume onder de kas op basis van water als opslagmedium onder atmosferische omstandigheden	15 - 95°C	x			41 bij dT = 10°C	Ja
6	Gaasboxx warmtebuffer	Buffering in een volume onder de kas op basis van water als opslagmedium onder atmosferische omstandigheden	15 - 95°C	x			41 bij dT = 10°C	Ja
7	Watertank buiten de kas	Buffering in een tank op basis van water als opslagmedium onder atmosferische omstandigheden	15 - 95°C	x			41 bij dT = 10°C	Ja
8	Materiaal van de bouwconstructie	Opslag in de bouwconstructie (massa), Een kas heeft echter door zijn aard maar een beperkte bouwmassa.	5 - 25°C	x			15-24 bij dT = 10°C	Nee
	<b>Thermische opslag (latent)</b>	<b>De faseovergang van stoffen (organisch, anorganisch, eutektische mengsels) biedt de mogelijkheid om energie op te slaan en te onttrekken.</b>		x				
9	Phase Change Materials	Een bodem van PCM's in de kas zorgt voor een opslagmogelijkheid waarbij ook de temperatuur geëgaliseerd wordt	35 – 55 °C	x			120-160	Ja

Nr	Technologie	Korte omschrijving	Temperatuur- range	Mate van volwassenheid			Capaciteit (MJ/m <sup>3</sup> )	Potentiële optie nu
				Bewezen	In demofase	In ontwikkeling		
10	PCM als slurry	PCM's worden door het inkapselen in bolletjes verpompaar in een wateremulsie en deze "vloeistof" zorgt voor een opslagmogelijkheid in een tank of bassin (onder of naast de kas)	35 – 55 °C	x			100-130	Ja
11	IJs	Ook hier is de vorm van energieopslag gebaseerd op faseovergang (smelt- en stollingswarmte van water) voor het opslaan van warmte en koude. Het temperatuurniveau is alleen bruikbaar voor koeling	0 °C	x			300	Nee
	<b>(Thermo)chemisch</b>	<b>Thermochemische binding geeft mogelijkheden tot overbruggen tijd en/of afstand via diverse reversibele chemische reactiekoppels.</b> Opslag kan relatief eenvoudig plaatsvinden in folie zakken die bijv. in een ondergrondse ruimte kunnen worden geplaatst. Tijdens opslag treedt geen warmteverlies op wanneer waterdamp niet in de gelegenheid is om zich te binden.				x		
12	Hydraatsuspensie	Bij het regenereren wordt hydraat gedroogd (met zonnewarmte). De vrijkomende warmte kan worden afgegeven aan water (uit een aquifer). Bij genereren wordt hydraat bevochtigd waardoor warmte vrijkomt. De hiervoor benodigde warmte wordt onttrokken aan bronwater (uit een aquifer).	20-150 °C			x	600 - 2800	Nee
13	Hot CO <sub>2</sub> -technologie	Gebruik van redoxreactie voor de opslag en benutting van warmte of CO <sub>2</sub> . Buffermateriaal in de vorm van metaaloxide kan compact en vrij worden opgeslagen.	200-700 °C			x	800	Nee
	<b>Elektrochemisch</b>	Elke technologie waarmee ingevangen zonnewarmte kan worden omgezet in elektriciteit fungeert als buffer zodra de levering aan het net op enig moment kan worden gecompenseerd door afname uit het net.						
14	Batterijen / Accu's	Deze vorm is enkel gericht op het afstemmen van vraag en aanbod over een dagcyclus. Batterijen hebben echter een lage energiedichtheid	omgeving	x			1-1,2	Nee
15	Opslag van energie door het vormen van biomassa	Door energie te gebruiken voor het laten groeien van algen kan biomassa worden geproduceerd die op een later moment kan worden ingezet voor energielevering. De eerste generatie biomassa benut het zonlicht maar voor ca 0.5%. Algen kunnen nu zonlicht wel tot 20 [%] in biomassa omzetten. (factor 40 efficiënter.	omgeving			x	30-35	Nee

### 3 Kenmerken aquifer

#### *Werking*

Lange termijn koude-/warmteopslag kan plaatsvinden in een aquifer. Deze worden momenteel toegepast in de glastuinbouw maar bijvoorbeeld ook in de gebouwde omgeving.

Een voor warmteopslag geschikte aquifer bestaat meestal uit een watervoerende zandlaag die is omgeven door 'waterdichte' (horizontale) lagen klei. Zo ontstaat een bodemlaag (zandpakket) in de bodem onder de kas met een – door het daar beschikbare volume - grote warmte**capaciteit**. De buffer vraagt zo geen **ruimtebeslag** in de kas. Aquifers bevinden zich, afhankelijk van de bodemgesteldheid, op een diepte variërend van 50 tot 250 meter. De natuurlijke grondwatertemperatuur daar is over het jaar nagenoeg constant (10-12 [°C]). Deze temperatuur heerst bij aanvang van het opslagproces.

Vervolgens kan in zo'n aquifer energie worden opgeslagen door in de watervoerende laag één of meerdere koude en warme bronnen te creëren op een onderlinge afstand van elkaar die beïnvloeding voorkomt. Zo'n combinatie van een warme en een koude put noemt men een doublet.

Het grondwater wordt opgepompt, opgewarmd of afgekoeld, en vervolgens enkele tientallen meters verder weer in dezelfde bodemlaag ingebracht. Op die manier ontstaat geleidelijk een warme put door het infiltreren van door de zon opgewarmd water en een koude put door het inbrengen van door de warmteafgifte afgekoeld water.

Bij het oppompen uit de watervoerende bodemlaag is het van belang dat de capaciteit (het product van doorlatendheid en dikte) van de betreffende bodemlaag voldoende groot is om de vereiste hoeveelheid grondwater te kunnen onttrekken.

Onttrekken en injecteren vindt plaats via zgn. filters. Dit zijn buizen met perforaties ter plaatse van de watervoerende bodemlaag.

Zijn eenmaal de putten gevormd dan wordt in de winter water met een temperatuur van 14 tot 20 [°C], maximaal 25 [°C] opgepompt. Dit wordt gebruikt voor de voorverwarming van lucht of, na opwaardering door een warmtepomp, als warme bron voor het verwarmingssysteem. Het water koelt af en wordt met een temperatuur van 6 tot 10 [°C] weer geïnjecteerd in de koude bron. Water op deze temperatuur kan tijdens het koelseizoen, zonder tussenkomst van de warmtepomp worden gebruikt voor het koelen van de kaslucht en/of kasbodem.

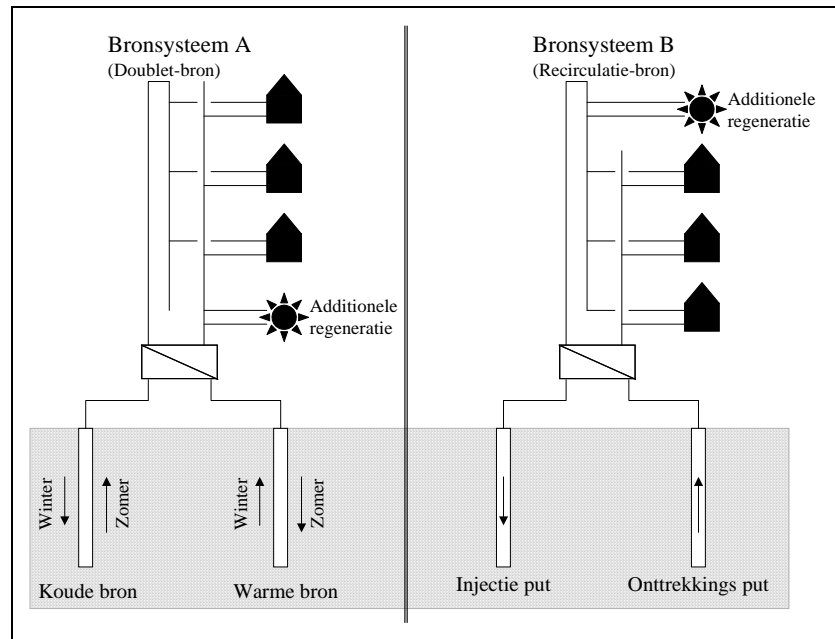
Deze cyclus kan in principe oneindig worden herhaald. In dat opzicht is de **levensduur** van de aquifer oneindig.

De maximale doorstroming in combinatie met het beschikbaar temperatuurverschil bepaalt het **piekvermogen** van de buffer. Dit piekvermogen kan, om overdimensionering, te voorkomen worden afgestemd op een energievraag van 80 [%] van het maximum.

Naarmate de gewenste opslagcapaciteit groter is zijn er meer doubletten nodig.

Ook zijn er systemen met een enkele bron (monobron), voor relatief kleine projecten. Hierbij wordt (vanwege de **investeringen**) van één bron gebruik gemaakt waarin het koude en het warme deel van de opslag boven elkaar liggen.

Voorwaarde in dat geval is dat de aquifer dik genoeg is om twee bronnen boven elkaar te kunnen bevatten. De bodemgesteldheid bepaalt dus de **condities** voor **toepasbaarheid**.



Figuur B3.1 Grondwater als bron in warmte/koudeopslag (doublet) en recirculatie systeem

#### *Gebruik bronwater*

In principe is onttrekking en lozing of injectie (weer terugvoeren in de bodem) van grondwater boven de grens van 10 [m<sup>3</sup>/h] altijd aan een **vergunning** gebonden. In een aantal provincies volstaat melding, wanneer de onttrekking kleiner is dan [10 m<sup>3</sup>/uur] en indien er geen sprake is van directe lozing op het rioleringsstelsel.

Vooral wanneer de toepassing van aquifers zou worden uitgebreid (in termen van grote aantallen) dan zou dit kunnen leiden tot een extra daling van de grondwaterstand (vandaar de verplichting om het afgekoelde/opgewarmde water in dezelfde bodemlaag terug te voeren).

Overigens zal bij de vergunningverlening worden getoetst of een nieuw geplande aquifer niet conflicteert met al bestaande aquifer in de omgeving. In zo'n geval is zo'n buffer voor de aanvragende tuinder niet meer **autonoom** inzetbaar maar is wellicht alleen toepasbaar als **collectieve** voorziening voor meerdere tuinders.

Men dient voor verontreinigingen van Het grondwater op dit niveau speelt in Nederland een belangrijke rol bij de drinkwatervoorziening. Het is noodzakelijk om rekening te houden met maatregelen ter beperking van **milieurisico's**.

#### *Verandering van bodemtemperatuur*

Door de (provinciale) overheid wordt in vrijwel alle gevallen (boven 10 [m<sup>3</sup>/h]) de verplichting opgelegd de warmte en koudeonttrekking aantoonbaar (middels monitoring) uit de bodem in evenwicht te houden.

#### *Waterkwaliteit*

Bij de grondwaterkwaliteit spelen zout- en ijzergehalte een rol.

Technisch is het van groot belang om te garanderen dat het grondwater niet met lucht in aanraking komt. Omdat het vaak ijzerhoudend is zou contact met zuurstof leiden tot het uitvlokken van ijzer met als gevolg het verstopt raken van de retourput.

Het grondwatersysteem dient dan luchtdicht te worden gemaakt en moet op een lichte overdruk worden gehouden van bijv. 0,2 [bar] tijdens bedrijfsvoering, dit om beluchting van het grondwater te voorkomen

Bij de toepassing van een warmtepomp is er een scheidingswarmtewisselaar mogelijk om grondwater en systeemwater te scheiden en zo de verdamper te beschermen tegen mogelijk **corrosief** grondwater. Een eventueel probleem door uitvloeking wordt zo echter niet opgelost maar verplaatst zich naar die scheidingswarmtewisselaar. En in die laatste situatie is er ook nog extra verlies.

Bij watervoerende lagen moet – waar relevant - bij het ontwerp van het ondergrondse circuit rekening worden gehouden met materiaal dat bestendig is tegen zout grondwater. Ter voorkoming van corrosie is het aan te bevelen de waterkwaliteit periodiek te monitoren.

De grens tussen zoet en zout grondwater ligt op een chloridegehalte van circa 150 [mg/l].

#### *Overige kenmerken*

Een aquifer houdt de warmte, bij niet al te hoge temperatuurverschillen en stroomsnelheden in de bodem, goed vast. Doordat het grondwater zich op grotere diepte nauwelijks verplaatst, zal de opgeslagen warmte in de buurt van de infiltratiebron(nen) blijven. Een **rendement** van 70 [%] is geen uitzondering. De grondwaterstromen in de zandlaag mogen echter maar een beperkte snelheid hebben om zo deze afstroomverliezen te beperken. Die stroming wordt uitgedrukt in meters per jaar [m/jr] en kan nogal uiteenlopen. Een grondwaterstroming van minder dan 10 [m/jr] wordt beoordeeld als laag: de ondergrondse afstroomverliezen zullen daarbij gering zijn. Een grondwaterstroming hoger dan 25 [m/jr] geldt als zeer hoog. Zo'n bron is niet meer geschikt voor energieopslag.

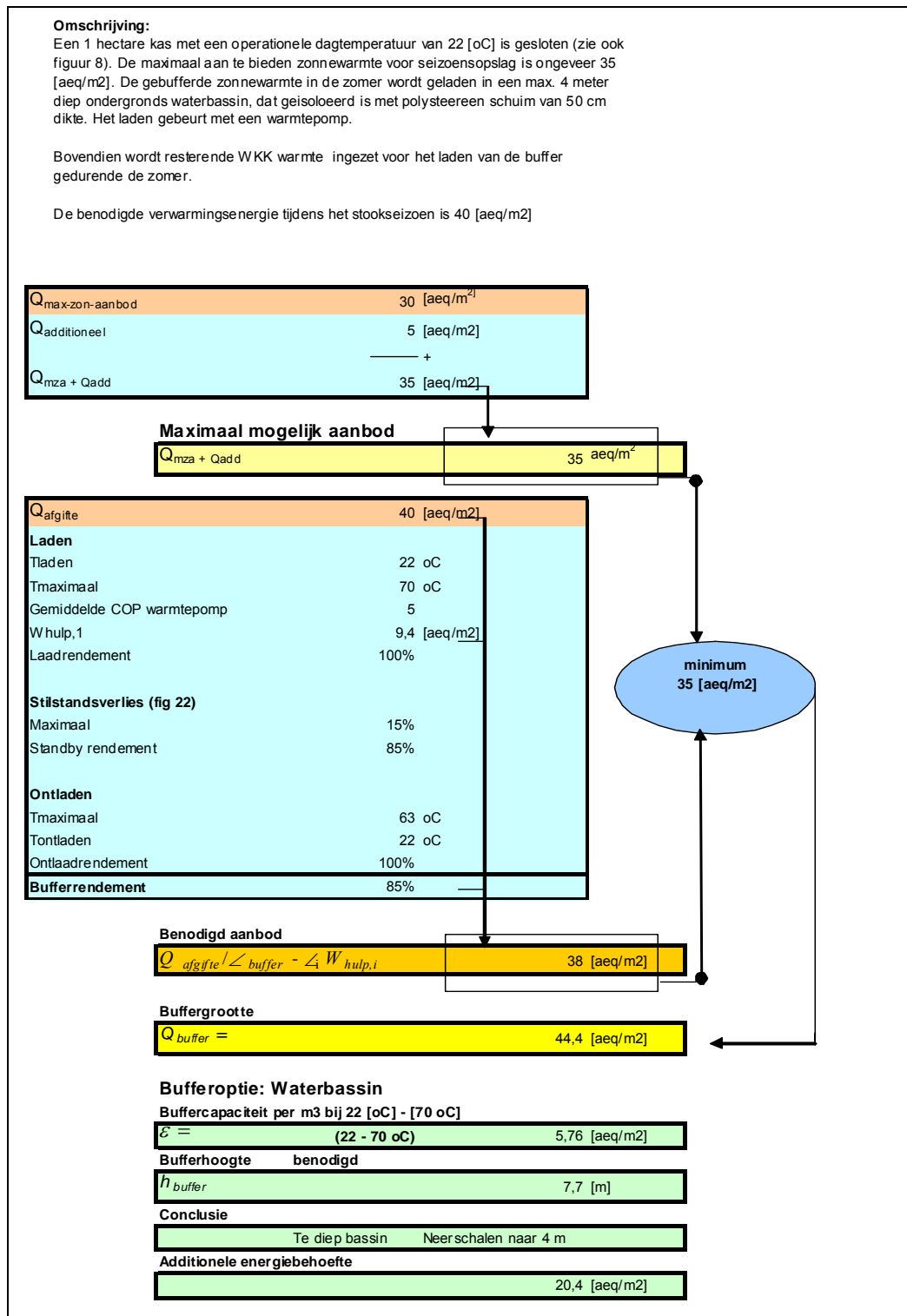
Samenvattend kan worden gesteld dat de condities voor het bedrijven van een aquifer zijn:

- Gemeten over meerdere jaren mag er in de bodem netto geen warmte worden opgeslagen. Ook dient de hoeveelheid geïnjecteerd water gelijk te zijn aan de hoeveelheid onttrokken grondwater.
- De Provincie moet een vergunning verstrekken voor de energieopslag in een aquifer. Hiervoor is een technisch rapport nodig. De procedure voor het verkrijgen van die vergunning duurt ca. 3 tot 6 maanden. Op grond van de berekeningen uit een haalbaarheidsstudie verleent de Provincie normaliter vergunning tot het plaatsen van dit type energieopslag.
- Periodiek zijn debiet- en temperatuurmetingen vereist.

Voor de keuze en uitvoering van een aquifer zijn richtlijnen ontwikkeld. Volgens die richtlijnen dienen voor de implementatie een aantal kenmerken beschikbaar te komen (Zie ref. [18]).

## 4 Voorbeeldcase met stroomschema

Een voorbeeld van het werken met de geschetste aanpak is in onderstaand overzicht weergegeven.



Voor deze case zijn de berekeningswaarden weergegeven in onderstaand diagram met energiestromen:

