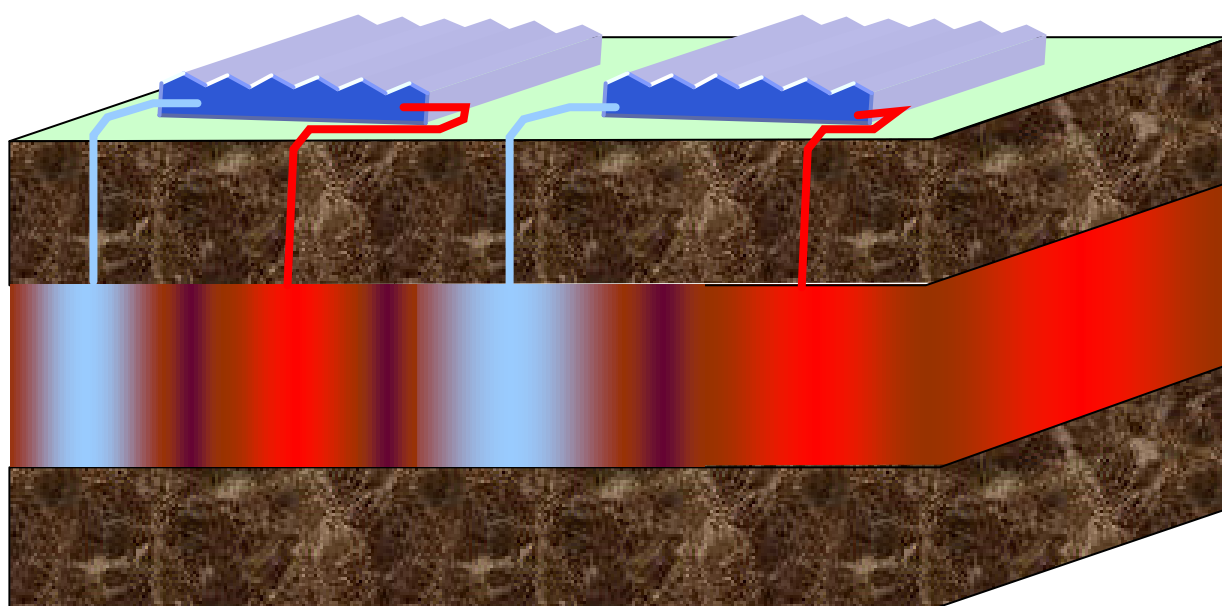


Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagsystemen voor tuinbouwkassen



H.F. de Zwart
R.C. van Elswijk

IMAG Rapport P2002-64



Gefinancierd door:



Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagsystemen voor tuinbouwkassen

H.F. de Zwart
R.C. van Elswijk

september 2002

Prijs: € 20,-

© 2002

Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)
Mansholtlaan 10-12
Postbus 43, 6700 AA Wageningen
Telefoon 0317 - 476300
Telefax 0317 - 425670
www.imag.wageningen-ur.nl

Niets uit deze nota mag elders worden vermeld, of worden vermenigvuldigd op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van IMAG.

Bronvermelding zonder weergave van de feitelijke inhoud is evenwel toegestaan, op voorwaarde van de volledige vermelding van: auteursnaam, jaartal, titel, instituut en notanummer en de toevoeging: 'niet gepubliceerd'.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, in any form of by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording of otherwise, without the prior written permission of IMAG.

Inhoud

1	Inleiding.....	2
2	Algemeen schema van het energieopslag-systeem	3
3	Kenschets van de drie toepassingsintensiteiten.....	5
3.1	Gesloten kas	5
3.2	Minder geventileerde kas	6
3.3	Teeltsystemen met grondkoeling.....	7
4	Resultaten.....	9
4.1	Gesloten kas	9
4.2	Minder geventileerde kas	10
4.3	Kas met grondkoeling	12
4.4	Resumé.....	14
5	Minimale hart-op-hart afstanden tussen bronnen.....	15
6	Grondwaterstandveranderingen.....	21
7	Invloed aquifer-eigenschappen op pompenergie	23
8	Conclusies.....	25
	Bijlage 1 Kasklimaat- en regelaar instellingen	27

1 Inleiding

De toepassing van ondergrondse energieopslagsystemen voor energiezuinige klimaatbeheersingsinstallaties voor de tuinbouw biedt grote perspectieven. De koelmogelijkheden van dit systeem geeft zicht op de mogelijkheid een belangrijke productiestijging in kassen te realiseren zonder dat hier veel CO₂ voor moet worden gedoseerd. Daarnaast biedt de voorraad opgewarmd water in het opslagsysteem de mogelijkheid om in de winter de kas middels een warmtepomp te verwarmen. Hiermee wordt een substantiële primaire energiebesparing gerealiseerd.

De vraag is echter of de techniek niet aan zijn eigen succes ten onder zal gaan indien tuinders massaal van deze opslagsystemen gebruik gaan maken. Het opslagsysteem gebruikt immers grote volumina in ondergrondse watervoerende lagen. In opdracht van het ministerie van LNV heeft IMAG met medewerking van IF-Technology een korte studie uitgevoerd om deze vraag te beantwoorden.

In deze globale scan wordt zonder al te veel in detail te treden een inschatting gemaakt van de omvang van het ruimtebeslag dat een ondergronds energieopslag systeem zal innemen. Hierbij wordt gekeken naar drie gradaties in toepassingsintensiteit van zo'n opslagsysteem. Voor elk van deze drie toepassingsintensiteiten wordt de hart-op-hart afstand tussen een koude bel (=opgeslagen koude in de bodem rond een bron) en een warme bel (=opgeslagen warmte rond een bron) bepaald waarop geen invloed, een beetje invloed en een hoge mate van beïnvloeding verwacht mag worden.

In de zijlijn worden nog enkele meer algemene opmerkingen over de werking en de perspectieven van verwarming en koeling met ondergrondse energieopslagsystemen geplaatst.

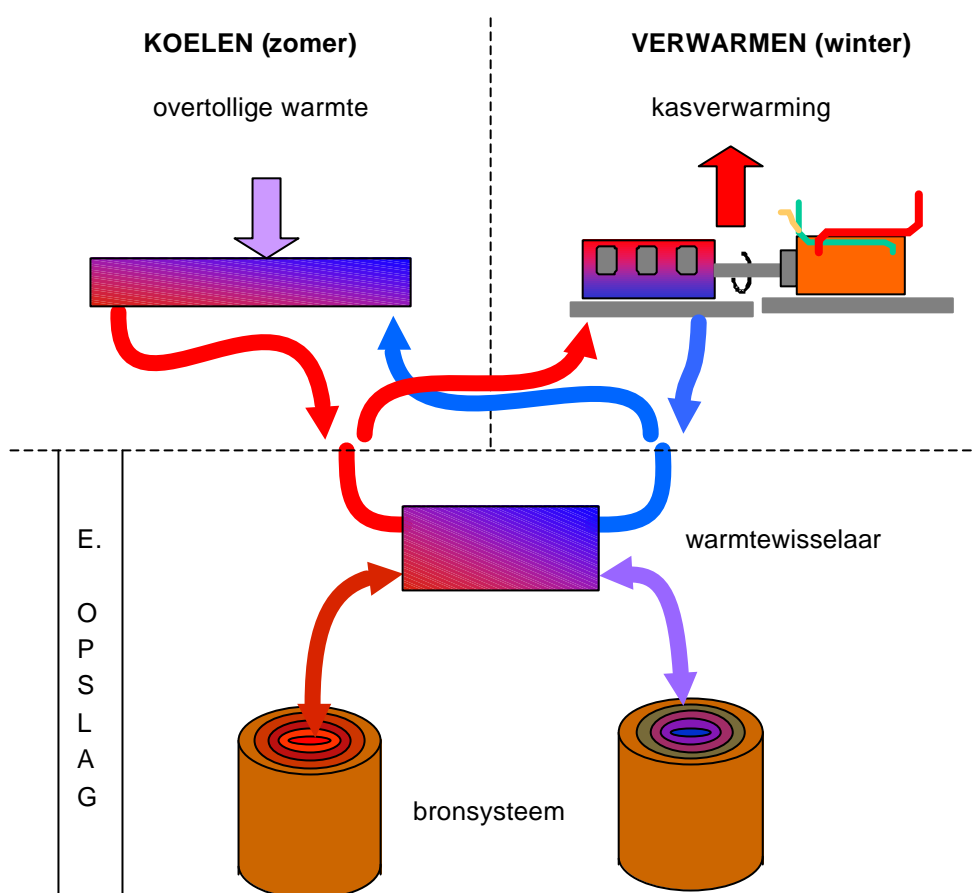
2 Algemeen schema van het energieopslag-systeem

Een ondergronds energieopslagsysteem kan worden opgedeeld in drie hoofdcomponenten

1. Het systeem waarmee opgeslagen warmte wordt benut
2. Het systeem waarmee de vrijgekomen koude wordt benut.
3. Het ondergronds energieopslagsysteem

De hoofdcomponenten zijn schematisch afgebeeld in onderstaande figuur. In de figuur zijn het koelsysteem en de warmtepomp via een scheidingswisselaar aangesloten op een opslagsysteem dat uit een warme en een koude put bestaat.

Het is de warmtepomp die het water uit de warme put in de winter afkoelt, waarna het in de koude put wordt gepompt, zodat op die manier duurzame energie in de kas wordt gebracht. Om de warmtevoorraad in de aquifer gedurende de zomer weer op peil te brengen zal het koelsysteem in de zomer water uit de koude put oppompen en na opwarming in de warme put infiltreren.



Figuur 1 Schematisch van de drie hoofdcomponenten van een ondergronds energieopslagsysteem voor de glastuinbouw. Met regeneratie wordt het weer opwarmen van de aquifer in de zomer bedoeld.

De scheidingswisselaar zorgt er voor dat het aquiferwater onder druk gehouden kan worden en dat de chemische bestanddelen niet vrij kunnen komen.

Teneinde het systeem ook op langere termijn te kunnen laten functioneren dient de hoeveelheid warmte die in de winter aan de bodem onttrokken wordt ongeveer in balans te zijn met de hoeveelheid warmte die er in de zomer weer wordt ingebracht.

3 Kenschets van de drie toepassingsintensiteiten

3.1 Gesloten kas

De ontwikkeling van een gesloten kas is gericht op de energie-intensieve tuinbouw. De kern van het systeem bestaat uit het creëren van een grote hoeveelheid koud water in de winter, opdat de kas in de zomer zodanig gekoeld kan worden dat de ramen gesloten kunnen blijven. Het koude water wordt geproduceerd door de kas in de winter door middel van een warmtepomp te verwarmen. Hierdoor ontstaat er een relatie tussen warmtevraag en koudeproductie in de winter. De toepassing van gesloten kassen lijkt dus vooral aan de orde voor de zwaar gestookte teelten zonder belichting. Belichte teelten zullen immers veelal gebruik maken van WKK, waardoor op deze bedrijven geen ruimte is voor een substantiële inzet van een warmtepomp (zodat er geen koudeproductie plaatsvindt).

Op grond van bovenstaande overwegingen wordt de tomatenteelt als modelgewas gehanteerd voor de berekening van de debieten die over de twee aquiferbronnen heen en weer worden gepompt. Het hierbij in de kas gewenste klimaat en de instellingen van de kasklimaatregelaar die daar bij horen staan beschreven in bijlage I.

Tijdens het koelen wordt het luchtdebiet door de luchtbehandelingsinstallatie zodanig geregeld dat de temperatuur van het water dat uit de luchtbehandelingskast terug komt tenminste 17 °C is. Omdat er bij de scheidingswisselaar 2 °C als drijvende kracht voor de warmteoverdracht wordt aangehouden zal er tijdens het koelen van de kas water van 15 °C in de warme put geïnfiltreerd kunnen worden.

Bij het verwarmen van de kas met de warmtepomp wordt het water uit de warme put opgepompt en bij de scheidingswisselaar afgekoeld naar 7 °C. Om dit te kunnen doen dient de warmtepomp water van 5 °C te maken. In de simulatie wordt de COP van de warmtepomp dan ook berekend voor een verdampertemperatuur van 5 °C.

Door de toepassing van koude oppervlakken in de luchtbehandelingskasten vindt een substantiële ontvochtiging plaats. Er zijn echter momenten waarop deze ontvochtiging tekort schiet en er zijn momenten waarop er geen koelbehoefte, maar wel een ontvochtigingsbehoefte is. In die gevallen wordt in de bij dit project gekozen uitgangspunten additioneel ontvochtigd met behulp van de ramen. De gesloten kas is op die momenten dus niet meer geheel gesloten.

Een gesloten kas verzamelt in de zomer aanzienlijk meer warmte dan er voor diezelfde kas in de winter nodig is als laagwaardige warmte-input voor de warmtepomp. Onder de uitgangspunten die in dit rapport gehanteerd worden, waarbij de luchtvochtigheidsbeheersing voor een belangrijk deel nog steeds via de ramen plaatsvindt, wordt levert de sluiting van de kas een koudevraag van 1200 MJ/m² op, terwijl in de winter slechts 650 MJ/m² aan de aquifer wordt onttrokken.

Om warmteaanbod en warmteonttrekking in de aquifer meer op elkaar af te stemmen wordt er in dit rapport vanuit gegaan dat een tuinder zijn kas niet geheel kan sluiten, maar slechts 50% van zijn tuin als gesloten kas zal uitvoeren. Dit betekent dat wanneer bij het koelen een pompdebiet van bijvoorbeeld 200 m³/(ha uur) wordt gehanteerd, dit water gebruikt wordt voor het koelen van slechts 5000 m². Wordt bij het verwarmen een debiet van bijvoorbeeld 100 m³/(m² uur) onttrokken, dan wordt deze warmte (na tussenkomst van de warmtepomp) op de volle hectare benut.

Daar waar er in dit rapport wordt gesproken over het concept 'gesloten kas' wordt er dus bedoeld op een kas die slechts op 50% van het oppervlak gesloten is en op het overige oppervlak net als een huidige standaardkas wordt bedreven.

De energiebesparing van de gesloten kas wordt gerealiseerd door de warmtepomp. deze levert een besparing van ongeveer 20 m^3 . Het opslagsysteem impliceert echter dat er water heen en weer wordt gepompt. Uitgaande van de aanwezigheid van een etmaalbuffer betreft dit op jaarbasis zo'n $23 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$, waarbij zoals gezegd in de zomer het opgepompte koude water op slechts de helft van het bedrijf wordt gebruikt). Uitgaande van de stelregel dat het rondpompen van water door een ondergronds energieopslagsysteem 1 MJ per m^3 vraagt betekent dit een primair energiebeslag van 1.5 m^3 a.e. (uitgaande van een centralerendement van 43%). Er moet ook nog elektriciteit worden verbruikt voor de luchtcirculatie door de kas. Op dit moment ontbreekt het aan informatie over het elektriciteitsgebruik dat daarmee gemoeid is, maar dit zal niet hoger dan 1 m^3 a.e. per m^2 per jaar zijn. Al met al zal de gesloten kas tot een energiebesparing leiden van rond de 18 m^3 per m^2 per jaar.

Naast de energiebesparing geeft de gesloten kas ook een vermindering van het CO_2 gebruik. Deze vermindering vindt uiteraard alleen plaats op het gesloten deel van de kas. Het is reeel te veronderstellen dat de afname van het CO_2 verbruik in het gesloten deel in de orde van 25 kg/m^2 per jaar zal liggen. De netto afname van het CO_2 verbruik komt daarmee op zo'n 12 kg/m^2 per jaar.

3.2 Minder geventileerde kas

In de minder geventileerde kas worden geen extra koelende oppervlakken toegepast en wordt geen geforceerde ventilatie ingezet, maar fungeert het kasdek door middel van bevoeiing met koud water als passief koeloppervlak. Het koelvermogen is hierdoor aanzienlijk lager dan dat van luchtbehandelingssystemen in de gesloten kas. De kas zal dan ook nog vaak de ramen open moeten zetten om overtollige warmte af te voeren.

Door de vermindering van het koelvermogen is de warmtevoorraad in het ondergronds energie opslagsysteem aan het eind van de zomer echter goed in overeenstemming met de warmtevraag van de warmtepomp. In de minder geventileerde kas is er dus sprake van (beperkte) koeling van het gehele oppervlak van de kas en inzet van de warmtepomp, eveneens voor het gehele kasoppervlak.

De temperatuur van het water dat het kasdek afstroomt wordt door de klimaatregelaar geregeld en op een minimale temperatuur van $17 \text{ }^\circ\text{C}$ gehouden. Hierdoor zijn de temperatuurcondities waaronder het water naar het opslagsysteem wordt gevoerd gelijk aan die bij de gesloten kas. Ook de ontlading van het opslagsysteem verloopt op temperatuurniveau's die vergelijkbaar zijn met de situatie van de gesloten kas in de winter.

Door het gebruik van een gasmotor aangedreven warmtepomp daalt het energieverbruik voor de verwarming met ongeveer $20 \text{ m}^3/\text{ha}$ per jaar. Met het verpompen van water over het opslagsysteem (in totaal $32 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$) is echter nog 32 MJ elektriciteit nodig, wat met een

gemiddeld centralerendement van 43% neerkomt op zo'n 2 m³ a.e.. De netto energiebesparing die met de minder geventileerde kas door toepassing van de warmtepomp kan worden gerealiseerd bedraagt dus zo'n 18 m³ a.e. per m² per jaar. Berekeningen geven aan dat het CO₂ verbruik van de kas met ongeveer 10 kg per m² per jaar afneemt.

De energiebesparingspotentie van de minder geventileerde kas ligt daarmee in dezelfde orde van grootte als de energiebesparingspotentie van de gesloten kas (onder de aanname dat de gesloten kas impliceert dat slechts 50% van de kas daadwerkelijk gesloten wordt, maar dat alle vochtafvoer die de ontvochtiging van de luchtbehandelingskast te boven gaat via de ramen plaatsvindt).

3.3 Teeltsystemen met grondkoeling

Bij teeltsystemen met grondkoeling wordt vaak gebruik gemaakt van koelmachines die in de zomer koud water maken en de warmte die daarbij vrijkomt vernietigen. Vanuit het oogpunt van energiebesparing zou het echter gunstiger zijn om in het stookseizoen door middel van een warmtepomp koud water te maken, dit water op te slaan in een aquifer voor koel-doeleinden in de zomer.

Grondkoeling vindt echter plaats met water van lage temperatuur. Een streefwaarde voor de grondtemperatuur bij bijvoorbeeld de fresiateelt ligt rond de 15 °C. Wanneer deze teelt als voorbeeld wordt genomen zal het water dat vanuit het grondkoelings-systeem terugstroomt niet warmer zijn dan 14.5 °C, zodat bij grondkoeling de warme put van de aquifer rond de 13 °C zal kunnen worden.

Het gebruik van de warmtepomp installatie in de winter is vergelijkbaar met die in de andere twee systemen zodat de koude put in de winter naar 7 °C teruggekoeld kan worden.

Berekeningen laten zien dat bij de koeling in de zomer zo'n 250 MJ/m² aan de grond wordt onttrokken. Dit betekent dat het potentieel voor de benutting van duurzame energie $250/31 = 8$ m³ a.e. per m² per jaar bedraagt. Wanneer daarnaast het voordeel van het uitgespaarde energieverbruik van een koelmachine wordt meegenomen loopt het besparingspotentieel op naar 14 m³ a.e. per m² per jaar.

In het voorliggende project wordt de fresiateelt als voorbeeld voor een teeltsysteem met grondkoeling gebruikt.

4 Resultaten

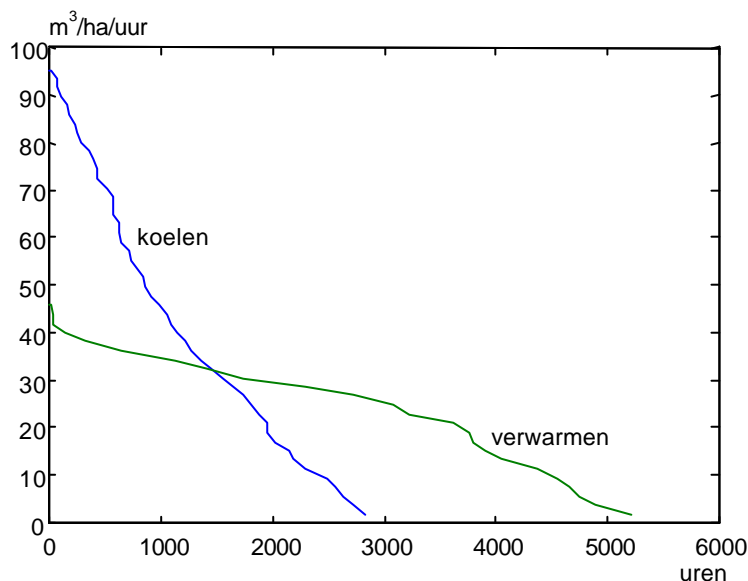
In dit hoofdstuk worden de resultaten gepresenteerd van de simulatieberekeningen aan de drie verschillende teeltsystemen. Deze berekeningen leiden tot gegevens over de hoeveelheid water die voor langere tijd moet worden opgeslagen en over de debieten waarmee dat plaatsvindt. Met name het eerste getal vormt input voor de inschatting van de onderlinge beïnvloeding van opslagsystemen. Deze inschatting wordt gegeven in hoofdstuk 5.

4.1 Gesloten kas

In de gesloten kas wordt onder de gestelde installatiebeschrijving op jaarbasis 560 MJ/m^2 aan de kaslucht onttrokken (dus 1120 MJ/m^2 op het gesloten gedeelte dat de helft van het bedrijfsareaal beslaat).

In de winter wordt met behulp van een gasmotor aangedreven warmtepomp met een asvermogen van 20 W/m^2 550 MJ/m^2 aan het opslagsysteem onttrokken zodat het geheel goed in evenwicht is.

In onderstaande figuur is de jaarbelastingduurkromme voor de waterdebieten bij het koelen en het verwarmen getekend.



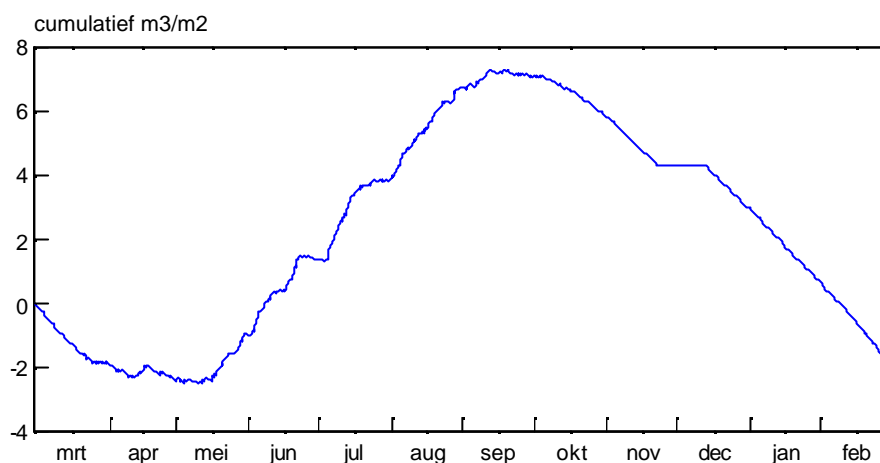
Figuur 2 Jaarbelastingduurkromme van de pompdebieten die nodig zijn in het gesloten kasconcept (waarbij slechts de helft van het bedrijfsareaal in de zomer met luchtbehandelingssystemen gekoeld wordt, en dus de helft echt gesloten is)

De debieten zijn daggemiddelden. Er is dus uitgegaan van een etmaalbuffer, zodat in de zomer 24 uur per dag koud water naar boven kan worden gehaald terwijl dit water in ongeveer slechts 14 uur wordt gebruikt voor koeling (en ook nog eens op slechts de helft van het bedrijfsoppervlak).

Wanneer binnen het etmaal zowel gekoeld als verwarmd wordt zal dit water niet uit de aquifer hoeven te worden gepompt, maar kan de korte termijn buffer worden aangesproken.

Onderstaande grafiek laat het cumulatief aantal m^3 zien die van de koude naar de warme put moet worden gepompt. Ook hierbij is er weer van uitgegaan dat het concept gesloten kas

wordt beschreven met een bedrijf dat slechts voor de helft door luchtbehandelingssystemen wordt gekoeld.



Figuur 3 Cumulatief verloop van de hoeveelheid m^3 die van de koude naar de warme put wordt gepompt in de gesloten kas (waarbij slechts de helft van het bedrijfsareaal in de zomer met luchtbehandelingssystemen gekoeld wordt)

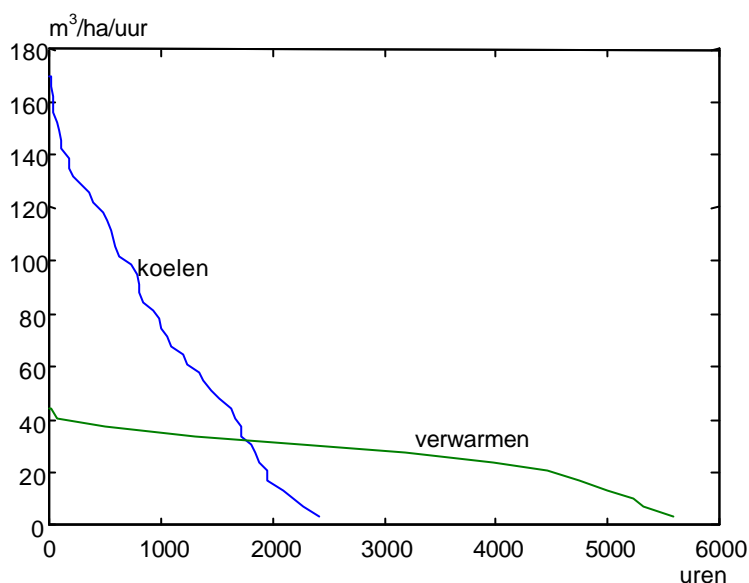
De figuur laat zien dat het dal en de top ongeveer $10 m^3$ uit elkaar liggen. De lang termijn opslagbehoefte is dus $10 m^3/m^2$.

De cumulatie van de verpompte debieten op uurbasis laat echter zien dat er $33 m^3/m^2$ verpompt wordt. Kennelijk wordt $13 m^3$ (berekend uit $33 - 2 \times 10$) op een kortere tijdsbasis heen en weer gepompt. Wanneer de etmaalfluctuaties (daarmee wordt bedoeld op het water wat binnen het etmaal heen en weer gepompt wordt) worden geëlimineerd blijkt dat er $23 m^3$ heen en weer gepompt moet worden voor de opslag van de warmte en de koude. Dit is nog steeds iets meer dan $20 m^3$. Dit verschil is consistent met figuur 5, waarin kan worden geconstateerd dat er een aantal stukjes zijn (bijvoorbeeld begin mei en begin juli) waar een periode van laden van de aquifer wordt afgewisseld met een netto ontlading. Ten behoeve van de berekening van het elektriciteitsverbruik van de pompen in het opslagsysteem moet uitgegaan worden met de verplaatsing van $23 m^3$ water.

4.2 Minder geventileerde kas

In de minder geventileerde kas wordt op jaarbasis $600 MJ/m^2$ aan de kaslucht onttrokken. In de winter wordt met behulp van een gasmotor aangedreven warmtepomp met een asvermogen van $20 W/m^2$ $550 MJ/m^2$ aan het opslagsysteem onttrokken zodat het geheel redelijk goed in evenwicht is.

In Figuur 4 is de jaarbelastingduurkromme voor de waterdebieten bij het koelen en het verwarmen getekend.

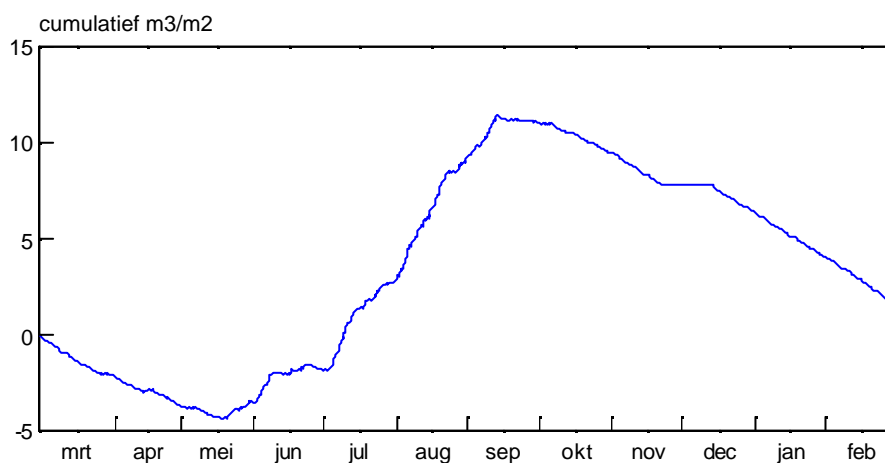


Figuur 4 Jaarbelastingduurkromme van de pompdebieten die nodig zijn in de minder geventileerde kas volgens het in dit rapport beschreven concept.

Ook in deze grafiek is uitgegaan van etmaalbuffers.

De grafiek laat in vergelijking met figuur 2 zien dat er voor het koelen grotere volumina gebruikt worden. Dit komt voornamelijk doordat in de gesloten kas de retourtemperatuur uit de warmtewisselaarsystemen vaak wat hoger dan de ingestelde 17 °C uitkomt, maar ook omdat het dekbevoeiingssysteem op de gehele kas wordt toegepast.

In Figuur 5 wordt het cumulatief verloop van het aantal opgeslagen m³ getoond. Een opgaande lijn betekent dat er water van de koude naar de warme put wordt gepompt.



Figuur 5 Cumulatief verloop van de hoeveelheid m³ die van de koude naar de warme put wordt gepompt in de minder geventileerde kas.

De figuur laat zien dat het dal en de top ongeveer 16 m³ uit elkaar liggen. De lange termijn opslagbehoefte is dus 16 m³/m².

De cumulatie van de verpompte debieten op uurbasis laat echter zien dat er $40 \text{ m}^3/\text{m}^2$ verpompt wordt. Kennelijk wordt 8 m^3 (berekend uit $40 - 2 \times 16$) op een kortere tijdsbasis heen en weer gepompt. Wanneer de etmaalfluctuaties (daarmee wordt bedoeld op het water wat binnen het etmaal heen en weer gepompt wordt) worden geëlimineerd blijkt dat er 32 m^3 verpompt moet worden voor de opslag van de warmte en de koude. Er wordt binnen de koelperiode (van half mei tot half september) dus nauwelijks water voor kortere termijn opgeslagen.

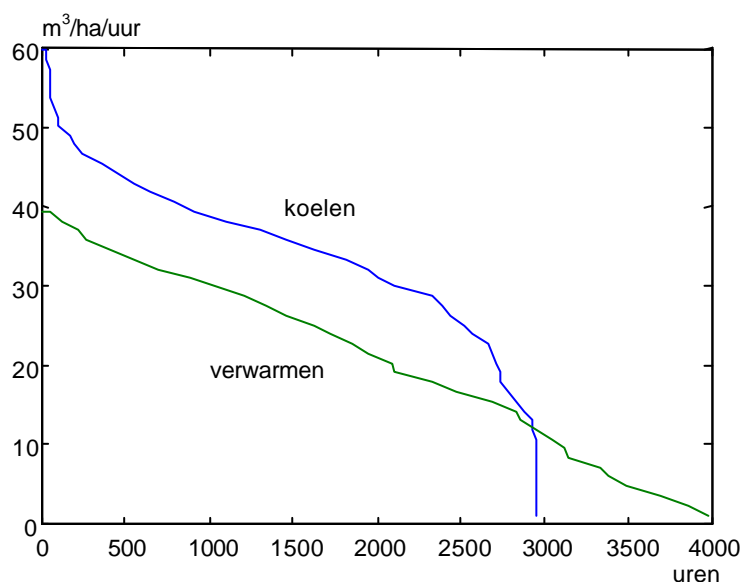
Het verplaatste watervolume is groter dan bij het gesloten kasconcept (zoals dat in dit rapport is gedefinieerd), wat vooral komt doordat het temperatuurverschil tussen warme en koude put bij de minder geventileerde kas wat groter is.

Ten behoeve van de berekening van het elektriciteitsverbruik van de pompen in het opslagsysteem moet uitgegaan worden met de verplaatsing van 32 m^3 water.

4.3 Kas met grondkoeling

In de kas met grondkoeling wordt $250 \text{ MJ}/\text{m}^2$ aan de grond onttrokken. In de winter wordt met behulp van een gasmotor aangedreven warmtepomp met een asvermogen van $6 \text{ W}/\text{m}^2$ $240 \text{ MJ}/\text{m}^2$ aan het opslagsysteem onttrokken zodat het geheel goed redelijk in evenwicht is.

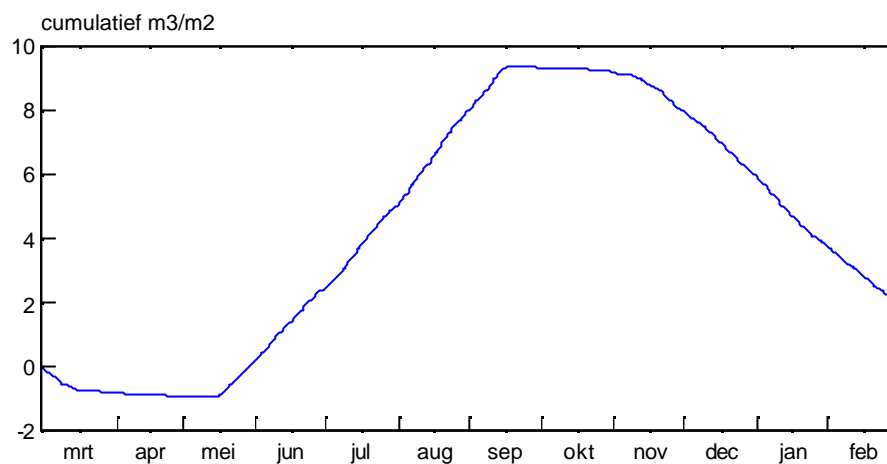
In Figuur 6 is de jaarbelastingduurkromme voor de waterdebieten bij het koelen en het verwarmen getekend.



Figuur 6 Jaarbelastingduurkromme van de pompdebieten die nodig zijn in de kas waar grondkoeling wordt toegepast en waarbij de koude in de winter wordt aangemaakt met een warmtepomp.

Ook hier is weer uitgegaan van het gebruik van etmaalbuffers om de grootste pieken in de pompvolumina te voorkomen.

In Figuur 7 wordt het cumulatief verloop van het aantal opgeslagen m^3 getoond.



Figuur 7 Cumulatief verloop van de hoeveelheid m^3 die van de koude naar de warme put wordt gepompt in de kas met grondkoeling.

De figuur laat zien dat het dal en de top ongeveer $10 m^3$ uit elkaar liggen.

Het gladde verloop van de curve laat zien dat heen en weer pompen van water op korte termijn niet aan de orde is.

Ten behoeve van de berekening van het elektriciteitsverbruik van de pompen in het opslagsysteem moet uitgegaan worden van de verplaatsing van $20 m^3$ water per jaar.

4.4 Resumé

Wanneer de belangrijkste gegevens over de drie verschillende toepassingsintensiteiten van ondergrondse energieopslagsystemen op een rijtje worden gezet ontstaat de volgende tabel

Tabel 1 *Overzicht van de karakteristieken van drie toepassingsintensiteiten*

	gesloten kas	minder geventileerde kas	kas met grondkoeling
algemene opmerkingen	slechts de helft van het bedrijfspervlak wordt gekoeld. De andere helft van de kas wordt met ventilatie gekoeld.	Op veel dagen levert het koelsysteem slechts de helft van de koudevraag. De rest wordt middels ventilatie afgevoerd	
maximaal debiet	90 m ³ /(ha uur)	160 m ³ /(ha uur)	50 m ³ /(ha uur)
maximaal opslagvolume	10 m ³ /(m ² jaar)	16 m ³ /(m ² jaar)	10 m ³ /(m ² jaar)
totale water-verplaatsing	23 m ³ /(m ² jaar)	32 m ³ /(m ² jaar)	20 m ³ /(m ² jaar)
energiebesparings-potentieel	17 m ³ a.e./ (m ² jaar)	17 m ³ a.e./ (m ² jaar)	14 m ³ a.e./ (m ² jaar)

Het eerste wat opvalt is dat de kas met grondkoeling dezelfde opslagbehoefte heeft als de gesloten kas. Dit komt enerzijds omdat bij de gesloten kas slechts de helft van het bedrijf gekoeld wordt en anderzijds omdat het temperatuurverschil tussen warme en koude put bij de gesloten kas groter is dan in de kas met grondkoeling.

Een andere opvallende zaak is dat de minder geventileerde kas een grotere opslagbehoefte heeft dan de gesloten kas, terwijl de energiebesparingsperspectieven gelijk zijn. Ook hier speelt het feit dat de minder geventileerde kas op het totale kasoppervlak gebruikt wordt en de gesloten kas slechts op de helft van het bedrijf weer een rol. Daarnaast is er een effect van een kleiner temperatuurverschil tussen warme en koude bron. Tenslotte heeft de gesloten kas in het voorjaar de mogelijkheid overdag warmte te verzamelen die 's nachts weer gebruikt kan worden. De minder geventileerde kas kan in het voorjaar nauwelijks warmte verzamelen (vanwege de eis dat de kasdektemperatuur boven de 17 °C moet blijven), zodat minder geventileerde kas in het voorjaar nog steeds moet teren op de voorraad van de voorgaande zomer.

5 Minimale hart-op-hart afstanden tussen bronnen

De grootte van de koude en warme bel rond een bron kan worden beschreven aan de hand van de thermische straal: d.w.z. de afstand tot waar het geïnfiltreerde grondwater reikt vanaf de bron. De thermische straal van opgeslagen koude of warmte rond een bron wordt bepaald door de geïnfiltreerde waterhoeveelheid, de filterlengte van de bron en de warmtecapaciteit van de aquifer en het grondwater. Bij gebruik van een representatieve waarde voor de warmtecapaciteit van Nederlandse aquifers is de thermische straal als volgt te berekenen:

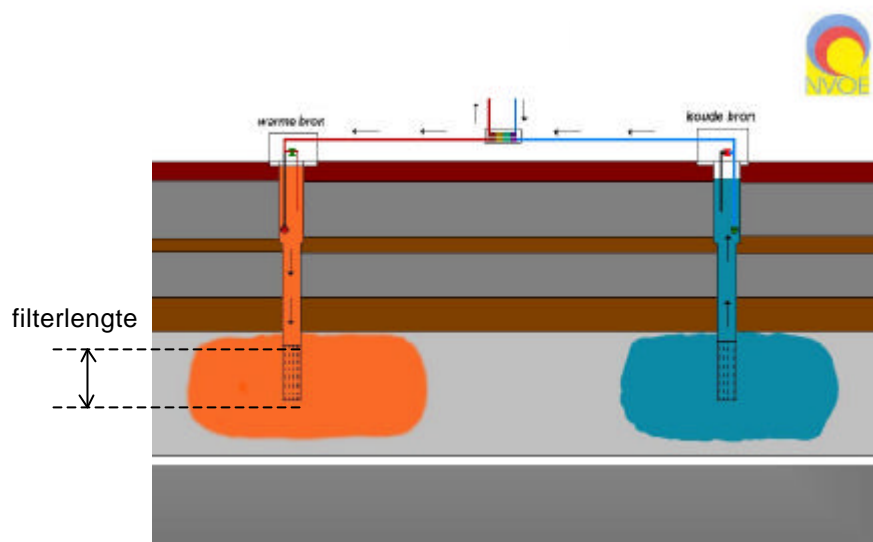
$$r_{th} = \sqrt{\frac{1,55Q}{Hp}}$$

r_{th} : thermische straal van de opgeslagen koude of warmte [m]

Q: de onttrokken of geïnjecteerde hoeveelheid water per seizoen [m³]

H: filterlengte [m]

Bij deze benadering wordt geen rekening gehouden met grondwaterstroming, warmtegeleiding en dispersie, en is aangenomen dat de hoogte van de koude/warme bel gelijk is aan de filterlengte. Het begrip *filterlengte* wordt verduidelijkt in Figuur 8.



Figuur 8 Grafische weergave van het begrip filterlengte in ondergrondse energieopslagsystemen

Bij de meeste grootschalige opslagsystemen wordt om economische redenen gestreefd naar het plaatsen van een zo lang mogelijk filter. De filterlengte van bronnen voor energieopslagsystemen ligt in Nederland globaal tussen 15 en 85 m. Op grond van de filterlengte kan er onderscheid gemaakt worden tussen opslagsystemen in dikke aquifers, middelmatig dikke aquifers en aquifers met een beperkte dikte (zie Tabel 2).

Tabel 2 Indeling van aquifers in Nederland

filterlengte [m]	omschrijving	voorbeeld locaties
60 – 85	dikke aquifer	Amsterdam, Schiphol, delen van de Veluwe
40 – 60	middelmatig dikke aquifer	centrale deel van Noord-Brabant (bv. Eindhoven en omgeving)
< 40	aquifer met beperkte dikte	Zuid-Holland, Zeeland

In het algemeen wordt gesteld dat koude en warme bronnen elkaar niet significant beïnvloeden als de afstand tussen beide bronnen minimaal 3 keer de thermische straal van de opgeslagen koude of warmte bedraagt. Bij een afstand van 3 keer de thermische straal bevindt zich tussen de koude en warme bron een ruimte van 1 keer de thermische straal. Door het gebruik van deze extra ruimte kunnen warmte- en koudeverliezen door warmtegeleiding, dispersie en eventueel grondwaterstroming tijdens het onttrekken van grondwater uit de bronnen beperkt blijven. Een belangrijke voorwaarde voor deze vuistregel is dat de energieopslag bij benadering thermisch in balans is.

Als de koude en warme bronnen dicht bij elkaar worden geplaatst zal de onttrekkingstemperatuur in de koude bron verhoogd worden en de temperatuur in de warme bron verlaagd worden. Met name aan het einde van het onttrekkingsseizoen zal dit effect zichtbaar zijn. Dit effect uit zich met name in een toename van de waterverplaatsing die nodig is om eenzelfde koel- of verwarmingscapaciteit te hebben. De mate van beïnvloeding kan berekend worden met een thermisch computermodel zoals bijvoorbeeld HST2D.

Uit ervaringen met energieopslagsystemen is gebleken dat bij een bronafstand van twee tot drie maal de thermische straal de interactie tussen de koude en warme bron in een aantal gevallen acceptabel is. Dit is afhankelijk of de beïnvloede onttrekkingstemperatuur binnen de temperatuurniveaus van de installatie valt en de mate waarin extra water verpompt moet worden om de gevraagde hoeveelheid koude of warmte te kunnen leveren. Bij een vergunningaanvraag voor energieopslag moet de beïnvloeding gekwantificeerd worden.

Bij onderlinge afstanden die minder dan 2 maal de thermische straal zijn leidt de interactie tussen de koude en warme bron in de regel tot een onacceptabele situatie.

In deze studie wordt daarom aangehouden dat:

- $3 \cdot r_{th}$: geen (significante) invloed tussen koude en warme bronnen oplevert;
- $2 \cdot r_{th} - 3 \cdot r_{th}$: een acceptabele invloed tussen de koude en warme bronnen oplevert;
- $< 2 \cdot r_{th}$: tot onacceptabele invloed tussen de koude en warme bronnen leidt.

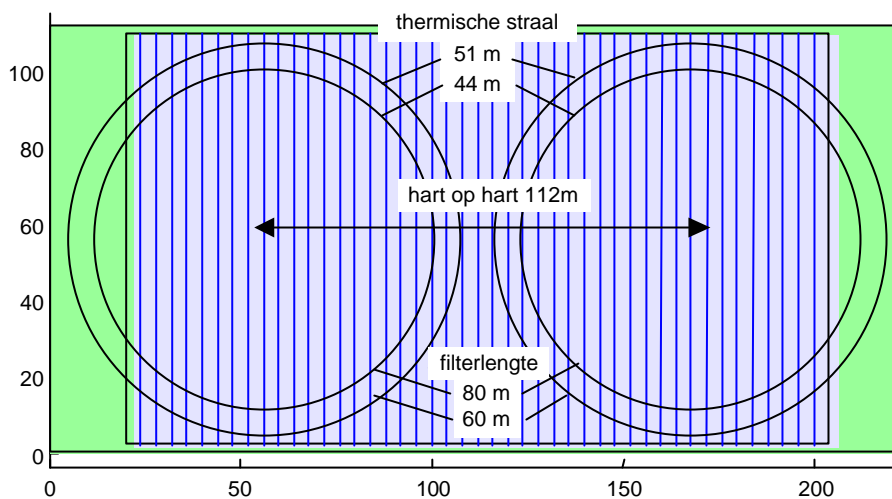
Door nu de opslagvolumina die in § 4.4 genoemd zijn uit te rekenen voor een kas van 2 ha en vervolgens bij verschillende filterlengtes de thermische straal te berekenen kan worden bepaald bij welke filterlengtes een onacceptabele beïnvloeding plaatsvindt.

In 0 is voor een minder geventileerde kas grafisch weergegeven hoe groot de thermische straal als functie van de filterlengte is. De maatvoering geldt voor een kas van 2 hectare op een perceel van 2,5 hectare. De totale hoeveelheid water die opgeslagen moet worden is volgens § 4.4 320 duizend m^3 ($16 m^3/m^2$ op $20.000 m^2$).

De hart-op-hart afstand in de tekening is 112 meter. De figuur laat zien dat bij een filterlengte van 60 meter de hart op hart afstand 2,2 keer de thermische straal bedraagt. Dit betekent dat er mogelijk een beïnvloeding tussen de bellen bestaat. Bij een filterlengte van 80 meter neemt de hart op hart afstand toe tot 2,5 keer de thermische straal. Hierbij wordt de kans op onderlinge beïnvloeding dus kleiner.

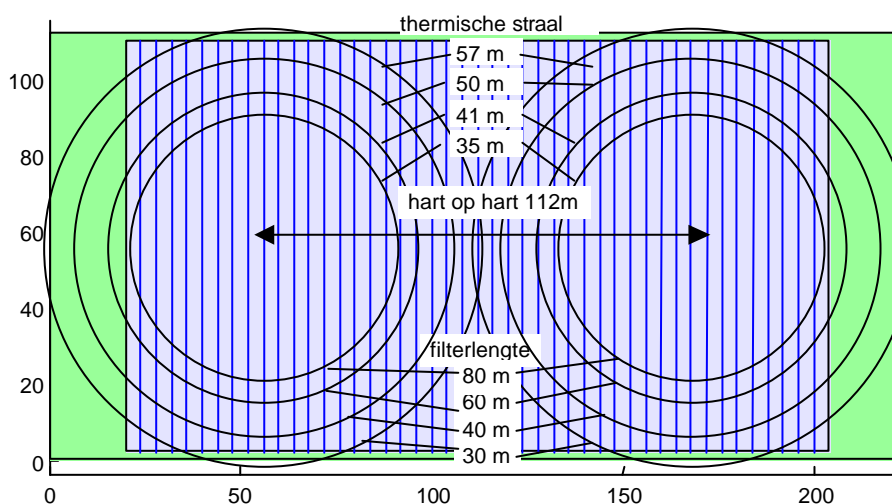
Als ook het buurbedrijf eenzelfde opslagcapaciteit nodig zou hebben en zijn putten op dezelfde manier plaatst zal de hart-op-hart afstand met de buurman eveneens 112 meter zijn. Dit betekent dat in dat geval de thermische straal van opslagsystemen die elkaar niet

beïnvloeden maximaal 37 meter is. Indien beide bedrijven op het volledige kasoppervlak gebruik willen maken van een dakbevoeiingssysteem zal ter plaatse een filterlengte van meer dan 80 meter aangehouden moeten worden.



Figuur 9 Bovenaanzicht van de invloedssfeer van een ondergronds energieopslagsysteem onder een kas van 2 hectare (paars gekleurd) die met behulp van dakbevoeiing in de zomer gekoeld wordt bij een filterlengte van 80 en van 60 meter.

In Figuur 10 is eenzelfde plaatje geschetst, maar dan voor een kas die voor de helft gesloten wordt gehouden, of voor een kas met grondkoeling.



Figuur 10 Bovenaanzicht van de invloedssfeer van een ondergronds energieopslagsysteem onder een kas van 2 hectare die ofwel voor de helft gesloten wordt gehouden, ofwel gebruik maakt van grondkoeling. De cirkels geven de thermische straal van het gebied waarvan de temperatuur in de aquifer door de infiltratie beïnvloed wordt bij een filterlengte van 80, 60, 40 en 30 meter.

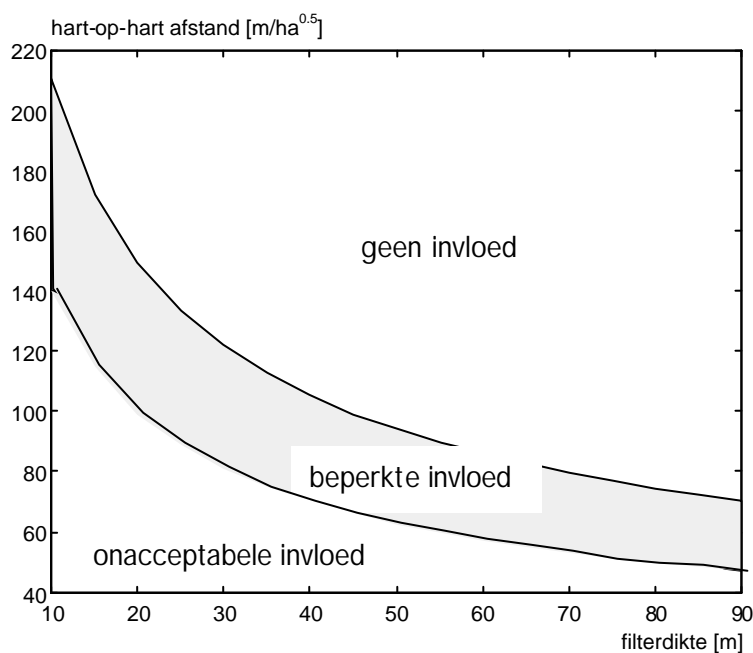
Figuur 10 laat zien dat bij een opslagvolume van $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{jaar}$ bedrijven elkaar niet beïnvloeden indien er een filterlengte van circa 70 meter geplaatst kan worden. Immers, bij

een filterlengte van 80 meter is de thermische straal ruim onder 38 meter (1/3 van de hart-op-hart afstand tussen putten op bedrijven die een zelfde lay-out hanteren).

Voor de filterlengte van 30 meter laat de figuur zien dat de beide thermische stralen in elkaars invloedssfeer komen, en er derhalve sterke (onacceptabele) onderlinge beïnvloeding

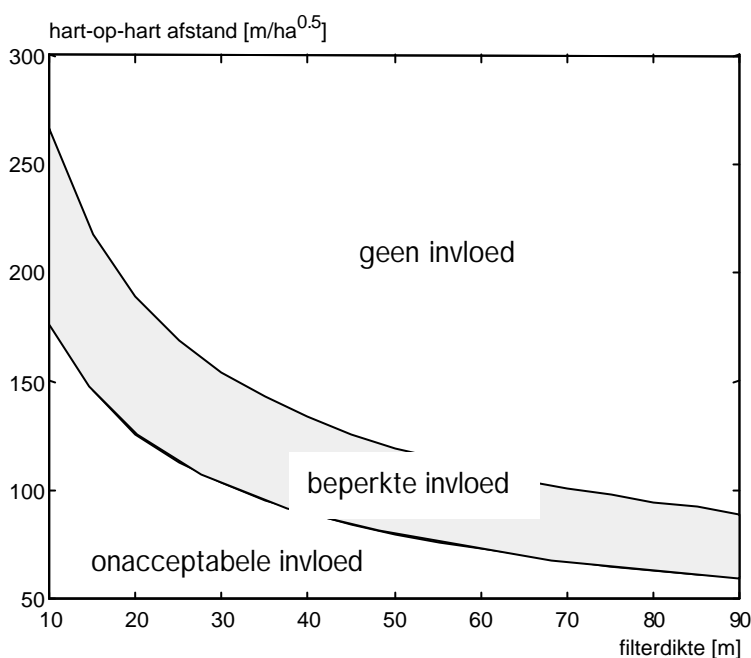
De relaties tussen de hart-op-hart afstand, beïnvloeding en filterlengte kunnen ook direct afgelezen worden in een grafiek. In figuur 11 worden deze afstanden gegeven voor een tuinbouwsituatie met een opslagbehoefte van $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Op de y-as staat hierin de hart op hart afstand gedeeld door de wortel van het bedrijfsoppervlak. Dit betekent dat de minimale hart-op-hart afstand van twee bedrijven die elk $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ willen opslaan bij een filterlengte van 30 meter en elkaar niet mogen beïnvloeden 125 meter uit elkaar moeten liggen indien die bedrijven 1 ha groot zijn. Als deze bedrijven 2 ha groot zijn moet de hart-op-hart afstand $125 \sqrt{2} = 176$ meter bedragen. Zijn de bedrijven elk 4 ha dan moeten de putten 250 meter uit elkaar liggen.

Bovenstaande berekeningen wekken de indruk dat het onderbrengen van opslagsystemen makkelijker wordt naarmate de bedrijven groter worden. Immers, voor een 4 maal zo groot bedrijf verdubbelt slechts de hart-op-hart afstand. Dit is echter maar schijn, omdat de lengtematen van percelen minder sterk groeien dan het oppervlak (namelijk met de wortel van het oppervlak).



Figuur 11 Hart-op-hart afstanden als functie van de filterdikte waarbij er geen, beperkte of onacceptabele invloed tussen verschillende putten zal ontstaan bij een opslagbehoefte van $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$. De y-as is genormeerd met de wortel van het bedrijfsoppervlak. Voor uitleg: zie bovenstaande tekst.

Eenzelfde figuur kan ook worden gemaakt voor het geval de opslagbehoefte 16 m^3 per m^2 bedraagt (zoals voor de kas met dakbevoeiing). Dit is afgebeeld in Figuur 12. Deze heeft dezelfde vorm, maar uiteraard wat grotere waarden op de y-as



Figuur 12 Hart-op-hart afstanden als functie van de filterdikte waarbij er geen, beperkte of onacceptabele invloed tussen verschillende putten zal ontstaan bij een opslagbehoefte van $16 m^3/m^2$. De y-as is genormeerd met de wortel van het bedrijfsoppervlak. Voor uitleg over het gebruik van deze y-as wordt verwezen naar de tekst boven Figuur 11.

Uit bovenstaande grafieken kan afgeleid worden dat een minimale filterlengte van 35 à 50 m nodig is om de warme en koude bel binnen het terrein van de glastuinder te houden (uitgaande van een netto/bruto glasoppervlak verhouding van 80%). Bij 35 m filter bestaat er nog een (beperkte) invloed op eventueel omliggende systemen; bij een filterlengte van 50 m is er geen significante invloed meer. Bij de berekeningen is gekozen voor optimale bronlocaties en is aangenomen dat de bronnen op deze locaties geplaatst kunnen worden.

Geconcludeerd wordt dat het in grote gebieden in Nederland mogelijk is om de gevraagde koude en warmte binnen de grenzen van het tuinbouwbedrijf op te slaan. Belangrijke randvoorwaarden hierbij zijn de hoeveelheid filter dat geplaatst kan worden, en de inpasbaarheid van de bronnen in het terrein.

6 Grondwaterstandveranderingen

Het onttrekken en infiltreren van grondwater leidt tot veranderingen van de stijghoogten in de watervoerende pakketten en kan leiden tot veranderingen van de grondwaterstand. De invloed op de grondwaterstand is afhankelijk van de diepte van de opslag (hoe dieper, des te kleiner het effect), de aanwezigheid van kleilagen tussen opslagpakket en het freatische pakket (hoe meer kleilagen, des te minder effect op de grondwaterstand), de bronconfiguratie en het maximale debiet van de opslag.

De invloed op de stijghoogte en de grondwaterstand moet gekwantificeerd worden bij een vergunningaanvraag voor energieopslag in het kader van de Grondwaterwet. Hierbij wordt beoordeeld of de veranderingen nadelige invloed hebben op belangen van derden (bijvoorbeeld landbouw, natuur, infrastructuur etc.). Afhankelijk van de belangen in de omgeving van de locatie kan de toelaatbare grondwaterstandsveranderingen variëren van enkele centimeters tot enkele decimeters.

Het ontwerp van het grondwatersysteem biedt in veel gevallen voldoende mogelijkheden om de grondwaterstandsveranderingen te beperken. Een veel toegepaste techniek is om het aantal bronnen te vergroten (d.w.z. het verlagen van het debiet per bron) en de locaties van de koude en warme bronnen af te wisselen. Hierdoor wordt het effect van een onttrekking bij de koude bron gedeeltelijk gecompenseerd door het infiltreren bij de warme bron en visa versa. Voor een dergelijke configuratie is echter meer ruimte nodig en is vaak duurder.

7 Invloed aquifer-eigenschappen op pompenergie

Het energieverbruik van een bronpomp wordt met name bepaald door de opvoerhoogte die nodig is. De opvoerhoogte is opgebouwd uit verschillende weerstandscomponenten: de afpomping in de bronnen ten gevolge van het onttrekken/infiltreren van het grondwater en de weerstand in het systeem (leidingen, kleppen, hanteren overdruk, etc.). De afpomping in de bronnen (ΔH) is afhankelijk van de eigenschappen van de aquifer en het maximale debiet. Bij 90% van de gerealiseerde energieopslagprojecten in Nederland ligt de afpomping bij maximaal debiet tussen 1 en 6 m. In Tabel 3 is weergegeven welke invloed de afpomping heeft op de totale opvoerhoogte.

Tabel 3 Opvoerhoogte bij een "standaard"opslagsysteem

	component	opvoerhoogte [kPa] bij $\Delta H = 1$ m	opvoerhoogte [kPa] bij $\Delta H = 6$ m
1.	weerstand bronnen (afhankelijk van bronontwerp en eigenschappen van de aquifer)	20	120
2.	leidingwerk nabij bronnen (overdruk handhaving om ontgassing te voorkomen)	100	100
3.	transportleidingen (leidingwerk tussen bronnen)	80	80
4.	technische ruimte/kassen (weerstand over TSA)	100	100
5.	overdimensionering (15% i.v.m. eventuele verslechtering van de bronnen)	45	60
	totaal	345	460

Uitgaande van bovenstaande opvoerhoogten is het energieverbruik voor het verplaatsten van 1 m³ water berekend. Voor de bronpomp is uitgegaan van een motorrendement van circa 80% (incl. frequentieregelaar) en een pompendement van circa 60%, in totaal dus een rendement van 50%. Het energieverbruik bij een kleine afpomping van 1 m bedraagt ongeveer 0,7 MJ (= 0,19 kWh_e) en bij een grote afpomping van 6 m ongeveer 0,9 MJ (= 0,25 kWh_e).

Opgemerkt wordt dat het energieverbruik van de bronpompen is berekend voor de situatie dat de pompen continu op maximaal debiet draaien. Uit de berekende jaarbelastingduurkrommen (figuur 2, 4 en 6) blijkt dat er veel uren zijn waarop het systeem met een veel lager grondwaterdebiet draait. Een gemiddeld verbruik van 0,4 MJ/m³ lijkt dan een goede vuistregel.

8 Conclusies

- Bij toepassing van een gesloten kas is de warmtebalans over langere tijd in evenwicht wanneer slechts de helft van het bedrijf gekoeld wordt en de warmte in de winter over het totale bedrijf wordt benut.
- Het energiebesparingspotentieel in de hier gehanteerde definitie van de gesloten kas is gelijk aan die van de en de minder geventileerde kas, namelijk rond de 17 m^3 a.e. per m^2 per jaar.
- Het energiebesparingspotentieel van de toepassing van ondergrondse energieopslagsystemen in teelten met grondkoeling bedraagt ca. 14 m^3 a.e. per m^2 per jaar, waarbij 6 m^3 a.e. voortkomen uit de besparing op elektriciteitsverbruik van een koelmachine en 8 m^3 a.e. bespaard kunnen worden door de inzet van een warmtepomp. De inzet van duurzame energie bedraagt hierbij dus 8 m^3 a.e.
- Voor de gekozen koelsystemen van de kassen varieert de minimale bronafstand waarbij geen significante invloed plaatsvindt tussen een koude en warme bron tussen 75 en 225 m, afhankelijk van de beschikbare filterlengte (tussen 15 en 85 m) en het koelsysteem van de kas.
- Bij een minder geventileerde kas is de benodigde bronafstand 26% groter dan bij een gesloten kas of een kas met grondkoeling.
- Als een beperkte beïnvloeding toelaatbaar wordt geacht kan de bronafstand met maximaal $1/3$ verkleind worden ten opzichte van de situatie dat er geen significante beïnvloeding is.
- Bij het verkleinen van de bronafstand zal het oppervlak dat de opslag inneemt verkleind worden, waardoor daarbuiten meer ruimte beschikbaar is om bijvoorbeeld de opslag uit te breiden of een andere opslag te maken. Indien deze ruimte benut kan worden zal de opslagcapaciteit onder een glastuinbouwgebied kunnen toenemen. De energieopbrengst per m^3 verpompt water zal afnemen doordat het temperatuurverschil tussen de koude en warme bron kleiner wordt ten gevolge van een grotere thermische interactie tussen de bronnen.
- Uit oriënterende berekeningen met een glas/perceel verhouding van 80% blijkt dat het mogelijk is om in de meeste gebieden in Nederland de gevraagde koude en warmte binnen de grenzen van een tuinbouwbedrijf te houden. Hierbij is een minimale filterlengte nodig van 35 à 50 m.
- De bovenstaande conclusies zijn gebaseerd op vuistregels. Om de exacte thermische beïnvloeding te bepalen kan gebruik gemaakt worden van thermisch computermodellen. Daarnaast zal de ernst van een eventuele beïnvloeding bepaald moeten worden (afhankelijk van temperatuurniveaus van de koel- en verwarmingssystemen etc.). Aanbevolen wordt om dit te doen voor een specifieke locatie.

- Grondwaterstandveranderingen ten gevolge van het onttrekken en infiltreren van grondwater worden beoordeeld door de Provincie bij een vergunningaanvraag voor de energieopslag in het kader van de Grondwaterwet. In het algemeen mag de grondwaterstand enkele centimeters tot enkele decimeters beïnvloed worden, afhankelijk van de belangen van derden in de omgeving van de locatie. In veel gevallen kan een beperking van de invloed op de grondwaterstand door een goed ontwerp van het opslagsysteem worden gegarandeerd.
- De afpompings in de bron heeft invloed op het energieverbruik van de bronpomp. Uit een globale berekening voor een standaard energieopslagsysteem blijkt dat bij een relatieve kleine afpompings het verbruik ongeveer 0,7 MJ per m³ waterverplaatsing bedraagt en bij een grote afpompings ongeveer 0,9 MJ per m³ waterverplaatsing. Deze verbruiken worden sterk gereduceerd als het systeem niet continu op het maximale debiet draait. Aangezien de jaarbelastingduurkrommen laten zien dat er erg veel uren zijn waarop het systeem met een kleinere capaciteit wordt gebruikt is een gemiddeld verbruik van 0,4 MJ/m³ waterverplaatsing een goede vuistregel.

Bijlage 1 Kasklimaat- en regelaar instellingen

Tomaat

Voor de gesloten en de minder geventileerde kas worden de berekeningen gemaakt voor een tomatengewas. Het gewas wordt begin december geplant en wordt bijna een jaarrond geteeld. Op 20 november wordt het gewas geruimd, zodat in de bedrijfsvoering ruim 2 weken de tijd wordt genomen om de kas op te ruimen en klaar te maken voor de nieuwe teelt. Tijdens de teeltperiode wordt de kas koud gezet (temperatuur setpoint is 5 °C, ventilatie setpoint is 25 °C, geen minimumbuis en geen luchtvochtigheidsbeheersing).

stooklijn (temperatuur setpoint)

Bij het begin van de teelt wordt een temperatuur van 19 °C overdag en 18 °C 's nachts aangehouden. Na een maand (dus vanaf half januari worden beide setpoints een graad verlaagd. en vanaf april weer een graad verhoogd.

Er wordt een sterke lichtafhankelijke setpointverhoging aangehouden. Dit betekent dat in het stralingstraject van 100 tot 500 W/m² de stooklijn met 7 °C wordt verhoogd. Effectief betekent dit dat de ventilatie behoorlijk wordt uitgesteld. in vergelijking met de gangbare praktijk. Omdat er echter een aanzienlijke koelcapaciteit beschikbaar is zal de kaslucht temperatuur vanaf het moment dat de ventilatielijn wordt overschreden niet veel meer toenemen.

ventilatielijn

Tijdens het teeltseizoen staat de ventilatielijn één graad boven de stooklijn

minimumbuis

Teneinde de afrijping van de vruchten te stimuleren wordt een minimumbuis temperatuur ingezet. 's Nachts is deze 40 °C en overdag wordt 45 °C aangehouden. Indien de globale straling echter boven de 100 W/m² uitkomt wordt de minimumbuis temperatuur afgebouwd. Het eindpunt van het afbouwtraject ligt bij 300 W/m².

energiescherm

Indien de buitentemperatuur 's avonds en 's nachts onder de 10 °C zakt wordt het energiescherm gesloten. Wanneer dit tot gevolg heeft dat de luchtvochtigheid of de temperatuur te hoog oplopen wordt het scherm in een kierstand gezet.

luchtvochtigheidsbeheersing

Indien de luchtvochtigheid van de kas boven de 85% komt worden de ramen geopend. Dit geldt zowel voor de gesloten kas (die daarmee dus niet geheel gesloten is), als voor de minder geventileerde kas.

koelregeling

Zodra de kasluchttemperatuur boven de ventilatielijn uitkomt treedt het koelsysteem in werking. Bij het dakbevoeiingssysteem dat in de minder geventileerde kas wordt gebruikt hoort hier echter nog een overweging bij, namelijk dat de kasdek-temperatuur boven de 17 °C moet liggen. Tijdens koude dagen, waarop de kasluchttemperatuur evengoed flink kan oplopen, kan dit betekenen dat er niet met het dakkoelingssysteem gewerkt kan worden. In die gevallen zal dus onverhoopt toch met de ramen gekoeld moeten worden.

Freesia

De fresiateelt is een koude teelt die jaarrond wordt bedreven.

stooklijn (temperatuur setpoint)

Het temperatuursetpoint is ingesteld op 12 °C 's nachts en 13.5 °C overdag. In het zonstralingstraject van 100 tot 300 W/m² wordt een lichtafhankelijke setpointverhoging van 2 °C aangehouden.

ventilatielijn

De ventilatielijn twee graden boven de stooklijn

minimumbuis

De minimumbuis wordt alleen 's nachts in de periode van september t/m april gebruikt. Het ondernet, bestaande uit 5 28 mm buizen per kap van 4 meter, wordt dan op 40 °C gehouden.

energiescherm

In de fresiateelt wordt geen energiescherm gebruikt.

luchtvochtigheidsbeheersing

Indien de luchtvochtigheid van de kas boven de 85% komt worden de ramen geopend.

koelregeling

De grondkoeling wordt gebruikt in de periode mei t/m september. Indien de grondtemperatuur 10 cm onder het bodemoppervlak in die periode boven de 14.5 °C komt wordt het koelsysteem in werking gezet. De koeling wordt dan middels een PI-regelaar zodanig geregeld dat de bodemtemperatuur op deze 14.5 °C wordt gehouden. Het koelsysteem heeft een maximale koelcapaciteit van 40 W/m².