
Toepasbaarheid van aquifers in de glastuinbouw voor aardwarmtewinning en warmteopslag



N.J. van de Braak
F.L.K. Kempkes
P. Knies



A. Lokhorst



C.J.M. Vernooy

december 2001

IMAG Rapport P2001-120

Onderzoek in het kader van het
Convenant Glastuinbouw en Milieu



Gefinancierd door:



Toepasbaarheid van aquifers in de glastuinbouw voor aardwarmtewinning en warmteopslag

N.J. van de Braak (IMAG)
F.L.K. Kempkes (IMAG)
P. Knies (IMAG)
A. Lokhorst (TNO-NITG)
C.J.M. Vernooy (LEI)

© 2001

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

IMAG-Rapport. Niets uit dit rapporta 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 rapportnummer.

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 or otherwise, without the prior written permission of IMAG.

Voorwoord

Het energiegebruik in de Nederlandse glastuinbouw bedroeg in 1999 ca. 4,39 miljard m³ aardgas equivalenten en de CO₂-emissie circa 7,9 miljoen ton. Dit legt een aanzienlijk beslag op de eindige voorraden fossiele energie en draagt door de CO₂-emissie bij aan het broeikaseffect van de atmosfeer. Hiertegenover staat dat de beschermde teelten een belangrijke bijdrage leveren aan de Nederlandse economie. Zij zijn een voorbeeld van kennisintensieve bedrijvigheid met een grote spin-off voor handel en industrie en een hoge toegevoegde waarde. Alle redenen om de mogelijkheden te scheppen waardoor de beschermde teelten binnen de veranderende maatschappelijke randvoorwaarden kunnen blijven functioneren.

In het kader van het convenant Glastuinbouw en Milieu (GLAMI genoemd) hebben de overheid (ministeries van LNV en EZ) en de glastuinbouwsector (LTO Nederland) afspraken gemaakt over de maatschappelijke randvoorwaarden, met als horizon 2010. Als doelstellingen zijn geformuleerd:

“Het terugbrengen van het fossiel energiegebruik per eenheid product tot 35 % ten opzichte van dit gebruik in 1980” en “Het aandeel duurzame energie moet toegenomen zijn tot 4 %.” De overheid heeft hier recent aan toegevoegd dat de glastuinbouw haar bijdrage moet leveren aan het terugdringen van de CO₂-uitstoot.

De inzet van aardwarmte en lange termijn opslag van zomerwarmte in de bodem kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan de realisatie van die doelstellingen.

Tegen deze achtergronden is door het Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG bv), in samenwerking met TNO-NITG en het Landbouw-Economisch Instituut in opdracht van Novem bv en het Productschap Tuinbouw de toepasbaarheid van aquifers in de glastuinbouw onderzocht.

Door de specifieke disciplines van de drie uitvoerende instellingen te combineren is een goed beeld ontstaan van de huidige kennis omtrent aquifers, de potentiële besparingen op fossiele energie die er mee bereikt kunnen worden en de mogelijkheden en beperkingen om aquifers bedrijfseconomisch in te zetten.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	6
1 Inleiding	10
2 Kenmerken en stand van zaken aquifers	11
2.1 Inleiding	11
2.1.1 Thermische energieopslag in ondiepe aquifers	11
2.1.2 Thermische energie uit diepe aquifers	13
2.2 Technische kenmerken	14
2.2.1 Debieten en temperatuurniveaus	14
2.2.2 Thermisch vermogen van een doublet	15
2.2.3 Gedrag in de tijd van de bronnen	15
2.2.4 Samenstelling bronwater	16
2.2.5 Geothermisch circuit	19
2.3 Locaties van potentieel bruikbare aquifers	19
2.3.1 Inleiding	19
2.3.2 Geologische randvoorwaarden	20
2.3.3 Potentiële wingebieden voor aardwarmte	21
2.3.4 Potentiële gebieden voor energieopslag	26
2.3.5 Tuinbouwgebieden en aquiferlocaties	28
2.4 Ervaringen	30
2.4.1 Aardwarmtewinning	30
2.4.2 Warmte- en koude-opslag	30
2.4.3 Regelgeving en vergunningen	31
3 Kasverwarming met aquifers	32
3.1 Inleiding	32
3.2 Kasinstallatie en teelt	32
3.2.1 Kas en installatie	32
3.2.2 Teelten	32
3.3 Berekeningen	33
3.3.1 Installatieconfiguraties	33
3.3.2 Aquiferconfiguraties	34
3.3.3 Doorgerekende configuraties	35
3.4 Warmtevrage	35
3.5 Effect gebruik aquifers op primaire energiebehoefte	36
3.5.1 Dekkingsgraden en energiebesparing	36
3.5.2 Invloed CO ₂ -dosering	40
3.5.3 Invloed liberalisering	41
3.5.4 Verbetering van de benutting van aquifers	41
4 Economische aspecten	43

4.1	Inleiding	43
4.2	Berekeningsmethode	43
4.3	Kosten	44
4.3.1	Aardwarmtebronnen	44
4.3.2	Distributienet en aansluitkosten	45
4.3.3	Warmteopslag	46
4.4	Kosten- en batenanalyse	46
4.4.1	Inleiding	46
4.4.2	Aardwarmtelevering aan cluster glastuinbouwbedrijven	47
4.5	Aardwarmtelevering in het licht van gasprijzen	51
4.5.1	Gasprijsontwikkeling in het recente verleden	51
4.5.2	Aardgasprijs in het Commodity en Diensten Systeem	51
4.5.3	Invloed commodityprijs binnen CDS	52
4.5.4	Invloed subsidies op toepasbaarheid aardwarmte	53
4.5.5	Gecombineerde levering van warmte en CO ₂	53
4.6	Warmteopslag in ondiepe aquifers	54
4.7	Fiscale regelingen en subsidies	55
5	Conclusies en aanbevelingen	56
5.1	Kenmerken aquifers	56
5.2	Kasverwarming met aquifers	57
5.3	Bedrijfseconomische aspecten	57
5.4	Aanbevelingen	58
	Literatuur	60
	Bijlage 1 Simulatiemodel KASPRO	62
	Bijlage 2 Resultaten	64
	Bijlage 3 Effect CO ₂ -dosereren met ketel	74
	Bijlage 4 Fiscale regelingen en subsidies	75

Samenvatting

Het hier beschreven project heeft als doelstelling de toepasbaarheid te bepalen van aquifers in de glastuinbouw voor aardwarmtewinning en warmteopslag.

Achtereenvolgens zijn de kenmerken van aquifers in Nederland beschreven, met behulp van simulaties de potentiële energiebesparing door toepassing van aquifers als warmtebron en als warmteopslag berekend en de bedrijfseconomische haalbaarheid bepaald.

Resultaten in het kort

Op het gebied van aardwarmte is er nog weinig ervaring in Nederland. In het buitenland is er meer ervaring met de toepassing, maar dan met name op het gebied van stadsverwarming. In geografisch opzicht biedt de bodemstructuur van Nederland wel mogelijkheden voor toepassing in de glastuinbouw maar deze zijn beperkt tot enkele gebieden. De economische haalbaarheid is bij de huidige gasprijzen ver weg. Om aardwarmte rendabel toe te kunnen passen moet de gas(commodity)prijs stijgen tot € 0,227 of er dienen substantiële subsidies verstrekt te worden.

Met de toepassing van opslag van warmte in aquifers is ook weinig of geen ervaring in Nederland. Wel is er, met name in de utiliteitsbouw, redelijk wat ervaring met koudeopslag opgedaan. De terugverdientijd van aquiferinstallaties voor die toepassing is 5 tot 10 jaar. De reden voor deze relatief korte terugverdientijd is dat er bespaard wordt op elektriciteit, die aanzienlijk duurder is dan gas.

In het project is een goed beeld verkregen van de locaties in Zuid-Holland van geschikte aquifers voor opslag. Voor de rest van het land zijn die in principe te genereren door bewerking van gegevens uit het REGIS-systeem van TNO-NITG in combinatie met provinciale eisen.

Uit het onderzoek blijkt de economische haalbaarheid van warmteopslag dichtbij te zijn: de kostenbesparing ten gevolge van het lagere gasverbruik (€ 30.500,-) is bijna toereikend om de extra jaarkosten van warmteopslag (€ 34.341,-) te compenseren (geschatte investeringskosten op basis van een nieuw tomatenbedrijf van 3 ha). De berekende *break-even* prijs met het CDS wijst eveneens op economische haalbaarheid.

Kenmerken aquifers

Aquifers zijn watervoerende aardlagen ingesloten door lagen die geen water doorlaten. De temperatuur van het water in een aquifer is afhankelijk van de diepte. Bij aardwarmtewinning wordt warmte onttrokken aan het water van dieper dan 1000 meter gelegen aquifers met een temperatuur van 70 tot 90 °C. De temperatuur van aquifers die minder diep zijn gelegen (15 tot 300 m) is lager (ca. 10 °C), waardoor de toepassing van een warmtepomp noodzakelijk is om het temperatuurniveau aan te passen aan de eisen van tuinbouwkassen. In dat geval wordt gebruik gemaakt van overtollige zomerwarmte in de zomer om het afgekoelde aquiferwater weer in temperatuur te verhogen. Onder die omstandigheden is sprake van lange termijn warmteopslag in aquifers en niet meer van aardwarmtewinning.

Bij de toepassing van aquifers onderscheiden we twee hydraulische kringlopen; de geothermische kringloop (deze omvat het ondergrondse deel) en de warmtevraagkringloop (een eventueel distributienet en het kasverwarmingssysteem). Beide kringlopen worden altijd gescheiden door een warmtewisselaar.

Bij gebruik van een aquifer worden over het algemeen twee putten geboord (doublet) die op ruime afstand van elkaar in de aquifer uitkomen. Het warme water wordt via de productieput omhoog gepompt uit de aquifer, doorloopt vervolgens de warmtewisselaar en wordt na het afstaan van de warmte via een injectieput weer teruggepompt.

Het terugpompen van het afgekoelde water is noodzakelijk omdat het formatiewater in het algemeen een hoog zoutgehalte heeft en lozing aan het oppervlak niet wordt toegestaan. Bovendien wordt door de injectie de druk in de aquifer op peil gehouden. Bij warmteopslag wordt in de zomer de stromingsrichting omgekeerd.

Bij de ondiepe aquifers kan een goede put 50 tot 100 m³ water per uur leveren. Voor een hoger debiet moeten er extra doubletten geboord worden. Bij putten naar diepe aquifers lopen de debieten uiteen van 100 tot 200 m³ per uur.

Om een voldoende hoeveelheid water te kunnen produceren (en injecteren) zonder dat daarvoor een excessieve hoeveelheid pompenergie nodig is, moet de doorstroming van de watervoerende laag tenminste 15 Dm (Darcy meter) te bedragen. Hoewel watervoerende lagen bijna in overal in Nederland aanwezig zijn, voldoen deze lagen niet altijd aan dit criterium.

De ondergrondse kringloop moet nauwkeurig worden afgesteld op de hydrogeologische gesteldheid. De grondwatersnelheid (grootte en richting), de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket en een eventueel afdekkende laag zijn van belang. Deze gegevens kunnen worden ontleend aan het Regis systeem van TNO-NITG.

De chemische samenstelling van het grondwater is van belang, omdat ook in een gesloten systeem, temperatuurverschillen aanleiding kunnen geven tot ongewenste chemische reacties (roestvorming, calciëtnaerslag, etc). Daarnaast zal de provincie als grondwaterbeheerder het belang van koude- en warmteopslag afwegen tegen andere grondwaterbelangen. Belangrijk daarbij is dat koude- en warmteopslag thermisch en volumetrisch over het jaar in evenwicht zijn.

Het thermische vermogen van een doublet is sterk afhankelijk van het gerealiseerde debiet en verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur. Het kan variëren tussen 0,8 MW voor een ondiepe aquifer voor thermische opslag en 10 MW voor een goede aardwarmtebron.

De voor geothermie geschikte gebieden, met aquifers van een hoge permeabiliteit, voldoende dikte én een hoge temperatuur, worden met name aangetroffen in Noord- en Zuid-Holland en in Noord- en Oost-Nederland.

De bestaande glastuinbouwgebieden in de provincie Zuid-Holland liggen boven potentieel geschikte aquifers, zowel voor aardwarmtewinning als voor warmte- en koudeopslag. Van de aanbevolen tien nieuwe tuinbouwgebieden liggen alleen die in Friesland, Zuid-Holland en Noord-Brabant boven of nabij potentieel geschikte aquiferlocaties voor warmtewinning. De toekomstige locaties liggen wel bij of nabij aquifers voor warmteopslag, maar of deze aquifers in alle gevallen bruikbaar zijn is onzeker. Er is alleen voor Zuid-Holland voldoende detailinformatie beschikbaar om vast te stellen dat warmte- en koudeopslag in de tweede watervoerende laag mogelijk is. Voor de rest van het land is die in principe te genereren door bewerking van gegevens uit het REGIS-systeem van TNO-NITG in combinatie met provinciale eisen.

In Nederland is er geen ervaring met aardwarmtewinning. Toepassingen in de buitenlandse glastuinbouw zijn niet te vergelijken met de Nederlandse situatie. De ervaringen in Nederland met warmte- en koude opslag hebben voornamelijk betrekking op koeling in de utiliteitsbouw. Er is weinig of geen ervaring met de toepassing van ondiepe aquifers voor warmte- en koudeopslag in de glastuinbouw.

Energiebesparing

Met behulp van het kasklimaatmodel KASPRO van IMAG zijn de energieverbruiken berekend voor een aantal standaardteelten en een cluster bedrijven die al dan niet worden voorzien van warmte uit een aquifer. De uitrusting in de kas is van invloed op de benutting van de aangeboden warmte uit de aquifer, daarom zijn naast het standaard verwarmingssysteem opties doorgerekend die relatief eenvoudig in de praktijk zijn te implementeren:

1. buizen met diameter van 70 i.p.v. 51 mm en verdubbeling van het aantal strangen in het ondernet.
2. buizen met diameter van 70 i.p.v. 51 mm en verdubbeling van de lengte van de strangen in het ondernet.
3. ondernetbuizen met diameter van 51 mm en verdubbeling van de lengte van de strangen in het ondernet.

Bij de toepassing van de aquifer voor warmteopslag is in de zomer een vergroot oppervlak nodig voor het "oogsten" van warmte uit de kas, daarbij vervalt de optie met het standaard verwarmingssysteem (51 mm). In de standaard teelten (referenties) wordt gebruik gemaakt van een minimumbuis temperatuur. Bij de berekeningsvarianten met vergroot oppervlak is de minimumbuis uitgeschakeld, omdat dit zou leiden tot een veel te grote warmtetoevoer in de kas.

Omdat niet op voorhand bekend is wat brontemperatuur en -debiet op een bepaalde locatie zullen zijn, zijn in de berekeningen met aquifers voor warmtewinning zijn alle combinaties gebruikt van de brontemperaturen 75, 80 en 85 °C en maximale waterdebieten 100, 150 en 200 m³/h.

Het areaal dat door een aardwarmtebron wordt voorzien van warmte is gevarieerd tussen 1 en 100 hectare.

Bij de berekeningen met aquifers voor warmteopslag is gerekend met 15 °C voor de warme put en 5 °C voor de koude put. De aquifer moet thermisch in evenwicht blijven daarom is de jaaropbrengst gelijk aan de hoeveelheid warmte die in de zomer opgeslagen kan worden. Om dit te bereiken moet steeds de best passende capaciteit van de warmtepomp geselecteerd worden.

De besparingen bij toepassing van aardwarmte variëren van 0,2 miljoen tot 8 miljoen m³ aardgasequivalent. Hoe groter het aangesloten areaal op een aardwarmtebron, hoe groter de energiebesparing en hoe kleiner de dekkingsgraad. Boven 20 à 30 hectare, afhankelijk van de broncapaciteit, wordt de toename van de besparing met het areaal minder.

Bij de bron met de hoogste temperatuur en het hoogste debiet wordt het meeste gas bespaard. Bij een bron met 75 °C en 100 m³ per uur is de besparing tot 3,5 miljoen m³ aardgasequivalenten per jaar en bij een bron met 85 °C en 200 m³ per uur is dat tot 8 miljoen m³ a.e. per jaar.

In een bedrijvencluster wordt altijd meer bespaard dan in afzonderlijke bedrijven.

Door de belichting wordt bij het chrysantenbedrijf steeds het minst bespaard.

Bij dekkingsgraden van minder dan 40% (meer dan 20 ha.) is er weinig verschil in bespaarde energie tussen tomaten met en zonder scherm.

Van de beschouwde kasuitrustingen geeft de configuratie met verdubbelde lengte van de strangen de hoogste besparing.

De buizen met vergrote diameter presteren minder goed door de lange responstijd bij opwarmen. Door aanpassingen in de klimaatregelaar zou hierin verbetering kunnen worden gebracht.

De jaarlijks opgepompte hoeveelheid water uit de aardwarmtebron varieert sterk met het aangesloten areaal, het gewas en de retourtemperatuur. Bij de bron van 75 °C en 100 m³ per uur loopt dat op tot 83% van de jaarcapaciteit voor een bedrijvencluster van 100 ha. en tot 62% bij 100 ha. tomaten met scherm.

Voor de bron met 85 °C en 200 m³ per uur wijken deze benuttingspercentages weinig af (respectievelijk 81 en 61%).

Bij de warmteopslag in aquifers variëren de best passende warmtepompvermogens tussen 12 en 15 Wm². De chrysant met belichting vormt een uitzondering met 28 Wm². Voor de best presterende kasuitrusting variëren de besparingen afhankelijk van de gewassen van 56.000 tot 71.000 m³ aardgas equivalenten per hectare.

Bedrijfseconomie

Om te kunnen bepalen voor welke prijs aardwarmte aan de glastuinbouw kan worden geleverd is een aardgasequivalentieprijs berekend. De aardgasequivalentieprijs wordt verkregen door de jaarkosten van aardwarmtelevering te delen door de gasbesparing die door de levering op de glastuinbouwbedrijven wordt gerealiseerd. Dit is gedaan voor een aantal situaties met aardwarmte:

Voor de cluster van tuinbouwbedrijven voor de minst besparende optie (broncapaciteit 75 °C; 100 m³ per uur met minimum buis, de meest besparende optie (broncapaciteit 85 °C; 200 m³ per uur zonder minimumbuis met verdubbeld verwarmend oppervlak) en een zelfde configuratie met broncapaciteit 80 °C; 150 m³ per uur.

De minst besparende optie blijkt een laagste kostprijs te realiseren van ongeveer € 0,34 per bespaarde m³ aardgas bij een aangesloten glastuinbouwareaal van ongeveer 10 ha.

De optimale kostprijs is ongeveer € 0,21 per bespaarde m³ aardgas voor de meest besparende optie bij ca. 30 aangesloten hectares.

Het leveren van aardwarmte aan de glastuinbouw heeft effect op de tarieven van de gasprijzen in het Commodity en Diensten Systeem. Dat geldt met name voor de contractueel vast te leggen piekcapaciteit en de afgenomen hoeveelheid aardgas gedurende het jaar. Om te kunnen bepalen of aardwarmtelevering aantrekkelijk kan zijn voor de glastuinbouw zijn *break-even* prijzen berekend. Deze *break-even* prijzen geven het grensgebied aan waarbij warmtelevering van aardwarmte kostenneutraal kan plaatsvinden. Door de *break-even* prijzen te confronteren met de aardgas-equivalentieprijzen ontstaat inzicht in de economische mogelijkheden van aardwarmtelevering aan de glastuinbouw.

Uit de kosten- en batenanalyse van aardwarmtelevering aan een cluster van glastuinbouwbedrijven met een gemiddelde warmtevraag van ca. 30 m³ aardgas per m², blijkt dat de capaciteit van de aardwarmtebron, de vergroting van het verwarmend oppervlak, het aangesloten areaal en het percentage warmte dekking een belangrijke invloed hebben op de kostprijs van aardwarmtelevering aan de glastuinbouw.

In berekeningen waarin de verschillende factoren zoveel mogelijk gelijk zijn gehouden komt naar voren dat het percentage warmte dekking het grootste effect heeft op de prijsverschillen. Bij een warmte dekkingpercentage van 40% is de kostprijs van aardwarmte bijna het dubbele van de kostprijs die bij een dekkingpercentage van 80% wordt gerealiseerd.

De capaciteit van de warmtebron en de warmtevraag van de glastuinbouwbedrijven hebben een veel geringere invloed op de kostprijs van aardwarmte. De aardgas-equivalentieprijs van een aardwarmtebron die 200 m³ per uur levert is ongeveer 30% lager dan van een bron met de helft van die capaciteit. Een twee maal zo grote warmtevraag leidt tot een kostenbesparing van circa 20%.

Wanneer wordt uitgegaan van de lage tuinbouw aardgasprijzen van de afgelopen tien jaar dan blijkt aardwarmtelevering aan een bedrijvencuster met een gematigd gasverbruik geen rendabele optie te zijn. Voor de gasprijsontwikkeling in de toekomst zijn voor de bedrijvencuster binnen het CDS omslagpunten berekend. Deze omslagpunten geven het prijsniveau aan, waarop aardwarmtelevering kostenneutraal kan worden toegepast. Daaruit blijkt aardwarmtelevering bij lage en gematigde gasprijzen zelfs onder de gunstigste omstandigheden niet rendabel te zijn. Alleen wanneer wordt uitgegaan van een forse stijging van de aardgas-commodityprijzen naar een niveau van € 0,227 kan aardwarmtelevering bij hoge warmte dekkingpercentages rendabel zijn.

Warmteopslag in aquifers, waarbij de kassen in de zomermaanden worden gekoeld met het aquiferwater en in de wintermaanden worden verwarmd met inzet van warmtepompen, lijkt een aantrekkelijke optie zijn. Voor een optimale configuratie van 3 ha bedraagt de gasbesparing 168.000 m³ per jaar. Tegen een gemiddelde gasprijs van € 0,182 per m³ bedraagt de opbrengst van deze gasbesparing circa € 30.500 per jaar. De extra jaarkosten van warmteopslag bedragen voor 3 ha € 34.341. De extra opbrengsten van de gasbesparing zijn dus bijna toereikend om de extra jaarkosten van warmteopslag te compenseren. In het project 'Systeemontwerpen voor ontvochtigen en energievoorziening' waarin de effecten van een tomatenkas met warmteopslag in een aquifer in combinatie met een warmtepomp zijn vergeleken met een moderne referentiekas wordt per ha een investeringsruimte berekend van € 10.663 voor de warmteopslaginstallaties. Ook deze berekeningen wijzen dus uit dat warmteopslag vrijwel rendabel blijkt te zijn. De berekende *break-even* prijs met het Commodity en Diensten Systeem (ca. € 0,30) geeft dit eveneens aan.

Deze toepassing van warmteopslag grijpt echter diep in op de bestaande teeltsystemen. Naast besparingen op het gasverbruik moet rekening worden gehouden met, ontvochtiging van kaslucht, inkoop van CO₂, extra productie en/of invloeden op kwaliteit ed. Doordat de invloed van de verschillende effecten nog niet goed zijn te overzien en voor verschillende omstandigheden en gewassen sterk kunnen uiteenlopen is het nog niet goed mogelijk om de economische consequenties van warmteopslag definitief te beoordelen.

Conclusies en aanbevelingen

Met de toepassing van aardwarmte uit aquifers in de glastuinbouw kunnen aanzienlijke hoeveelheden fossiele energie worden bespaard. De economische haalbaarheid ervan komt echter mede door de invoering van het CDS pas in zicht bij een (commodity)prijs van ca. € 0,227 (NLG 0,50). Het verdient aanbeveling de toepassing van aardwarmtebronnen met subsidie te stimuleren.

Met de toepassing van aquifers voor lange termijn warmteopslag van zomerwarmte kunnen eveneens grote besparingen worden gerealiseerd. De economische haalbaarheid ervan lijkt zeer dichtbij. Om hierover meer zekerheid te verkrijgen verdient het aanbeveling een demonstratieproject van voldoende omvang in de praktijk op te zetten, in een gebied waar de geologische risico's zo laag mogelijk zijn en waarbij vooraf de gehele installatie goed wordt geoptimaliseerd.

De besparingen die worden bereikt met warmteopslag kunnen verbeterd worden, indien methoden worden ontwikkeld, die de omvang van de zomerwarmte die wordt opgeslagen, vergroten. IMAG heeft daartoe inmiddels een aantal opties onderzocht. Het verdient aanbeveling de perspectiefvolle opties verder te ontwikkelen.

1 Inleiding

Aquifers zijn watervoerende aardlagen ingesloten door lagen die geen water doorlaten. Aquifers kunnen zich op verschillende diepten bevinden. De temperatuur van het water in de aquifer is afhankelijk van de diepte. Aardwarmtewinning is de onttrekking van warmte aan het water van de aquifer.

De toepassing van aardwarmte is een duurzame energieoptie die een goede bijdrage kan leveren aan de doelstelling van de meerjarenafspraak tussen de overheid en de sector glastuinbouw. De doelstelling is een verbetering te bereiken van de energie-efficiëntie in 2010 van 65% ten opzichte van 1980 en daarnaast te komen tot een aandeel duurzame energie van 4%.

Bij winning van aardwarmte komt het water veelal van grote diepte (1 tot 2 km), waardoor het een temperatuur heeft die hoog genoeg is om direct te kunnen worden toegepast ten behoeve van verwarming van tuinbouwkassen. De temperatuur van aquifers die minder diep zijn gelegen (diepte 15 tot 150 m) is lager, waardoor de toepassing van een warmtepomp noodzakelijk is om het niveau voor verwarming aan te passen aan de eisen die tuinbouwkassen daaraan stellen. In dat geval kan gebruik gemaakt worden van overtollige warmte in de zomer om het temperatuurniveau van de aquifer te verhogen, zodat het rendement van de warmtepomp toeneemt. Onder die omstandigheden is sprake van lange termijn warmteopslag in aquifers en niet meer van aardwarmtewinning uit aquifers.

Aardwarmtewinning en warmteopslag in aquifers worden van elkaar onderscheiden omdat het verschil tussen het temperatuurniveau waarop het water beschikbaar komt bij beide vormen een verschillende aanpak vragen. In het volgende worden aardwarmte en in aquifers opgeslagen warmte samen soms kortheidshalve aangeduid als (bronnen van) bodemwarmte.

Dit project heeft als doelstelling de haalbaarheid te bepalen van de toepassing van aquifers in de glastuinbouw voor aardwarmtewinning en warmteopslag. In een haalbaarheidsstudie naar de toepassing van bodemwarmte zijn naast het temperatuurniveau nog een aantal andere elementen relevant. Zo is van belang te weten of aquifers beschikbaar gemaakt kunnen worden in de huidige en toekomstige glastuinbouwgebieden. Voorts is het voor de haalbaarheid belangrijk in welke mate (dekkingsgraad) bronnen van bodemwarmte kunnen voorzien in de warmtebehoefte van (een cluster van) tuinbouwkassen en dat vooral in relatie tot de kosten. Bij de warmtebronnen van lage temperatuur komt er nog het belangrijke aspect van het verhogen van de temperatuur door middel van een warmtepomp bij. Deze aanpassing geeft aanzienlijke extra investerings- en operationele kosten.

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt de huidige stand van zaken rond de kennis en exploitatie van aquifers besproken en aangegeven waar relevante vindplaatsen zijn.

In hoofdstuk 3 wordt bepaald welke warmtedekking te behalen is met verschillende aquifers als warmtebron voor verschillende gewassen.

Hoofdstuk 4 gaat verder in op hoe de totale investeringen en exploitatiekosten van de verschillende typen bronnen van bodemwarmte zich verhouden, en onder welke economische randvoorwaarden toepassing in de Nederlandse glastuinbouw ingang zal vinden.

2 Kenmerken en stand van zaken aquifers

2.1 Inleiding

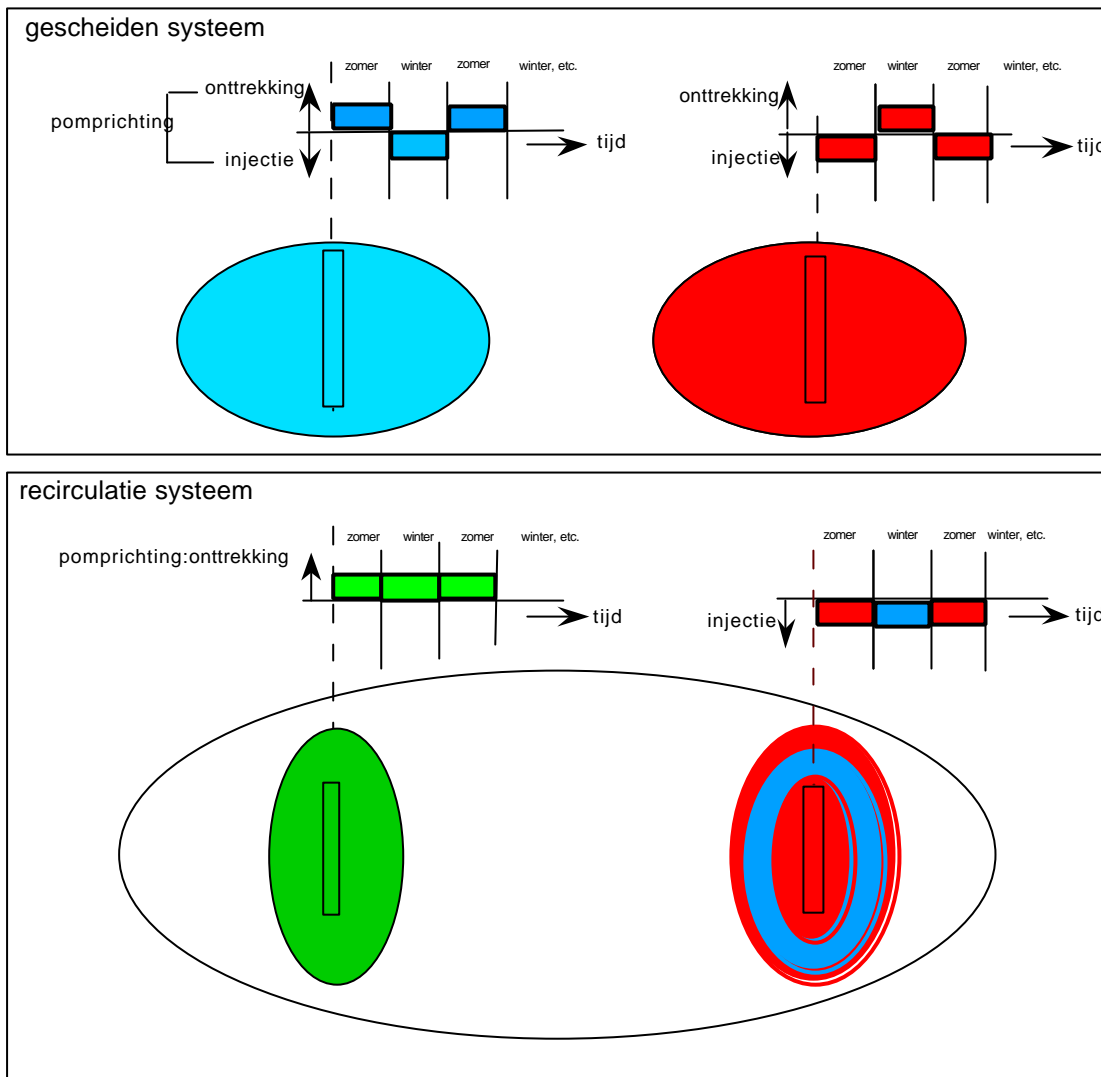
De aarde is een voortdurende warmtebron, hoofdzakelijk van radiogene oorsprong. In een aantal vulkanische gebieden, bijvoorbeeld in Italië en IJsland wordt al vele eeuwen aardwarmte gewonnen uit nabij het oppervlak voorkomende warmtebronnen. In Nederland komen dergelijke warmtebronnen niet voor. Desondanks is het mogelijk om ook in Nederland gebruik te maken van het warmtepotentieel in de ondergrond. De temperatuur in de aardkorst neemt toe met de diepte, in Nederland met zo'n 30 °C per km. Rekening houdend met een gemiddelde jaartemperatuur aan het aardoppervlak in Nederland van ongeveer 10 °C, betekent dit dat de temperatuur op 2000 m diepte over het algemeen zo'n 70 °C zal bedragen. Een tweede belangrijk kenmerk van aardlagen is dat ze isolerende eigenschappen bezitten. Deze zijn vooral belangrijk bij het opslaan van energie in de ondergrond. In de praktijk wordt onderscheid gemaakt tussen "diepe" en "ondiepe" toepassingen van de ondergrond. In Nederland zijn tot op heden alleen "ondiepe" toepassingen gerealiseerd waaronder warmte- en koude-opslag in ondiepe watervoerende lagen (aquifers). Daarbij wordt vooral gebruik gemaakt van de isolerende eigenschappen van de ondergrond. De diepte van de opslag kan tot 300 meter bedragen.

2.1.1 Thermische energieopslag in ondiepe aquifers

Bij de opslag van thermische energie gaan de gedachten uit naar afvalwarmte van centrales en installaties voor 'Warmte Kracht Koppeling' (WKK-eenheden) en de opslag van energie, zoals zonne-energie, zomerwarmte, winterkoude. Watervoerende zandafzettingen in de ondergrond van Nederland zijn in principe zeer geschikt voor de tijdelijke opslag van warmte en koude. Het grondwater in de zandafzettingen fungeert zowel als opslagmedium als transportmedium. Een opslagsysteem voor koude of warmte bestaat uit tenminste één put waaruit grondwater wordt onttrokken en één put waarin het water na opwarming of afkoeling weer in de formatie wordt geïnjecteerd voor de periode van opslag. Bij terugwinning van de opgeslagen warmte of koude wordt bij de meeste opslagsystemen de stroomrichting omgekeerd: injectieput wordt productieput en vice versa. Inmiddels bestaan er ook opslagsystemen waarbij de productie- en injectieput in één gecombineerde boring zijn geïnstalleerd en waarbij de warme en koude put zich binnen één aquifer boven elkaar bevinden.

Er kunnen twee systemen worden onderscheiden. Het meest bekende systeem is het gescheiden systeem. Bij het gescheiden systeem is sprake van een relatief warme cel en een koude cel binnen de watervoerende lagen (aquifer(s)). In de zomer wordt grondwater aan de koude cel (bijvoorbeeld 6 °C) onttrokken en na gebruik voor koeling wordt dit nu relatief warme water (bijvoorbeeld 18 °C) geïnjecteerd in de warme cel. In de winter wordt de stroomrichting omgekeerd: het relatief warme water wordt opgepompt en na koeling geïnjecteerd in de koude cel. De term gescheiden systeem is nu ook duidelijk; voor een efficiënt proces is het van belang dat de warme en koude cel strikt gescheiden blijven. Om deze scheiding te bewerkstelligen, is kennis vereist van de grondwaterstroming voor en na installatie van het opslagsysteem.

Minder bekend is het recirculatie systeem. De werking van het recirculatie systeem is juist gebaseerd op een volledige menging van geïnjecteerd en onttrokken grondwater. Zomers is de situatie gelijk aan het gescheiden systeem. Dan wordt relatief koud water (bijvoorbeeld 12 °C) opgepompt en als relatief warm water (bijvoorbeeld 18 °C) geïnjecteerd. In de winter wordt nu evenwel water uit dezelfde onttrekkingsput na afkoeling tot 6 °C geïnjecteerd in de injectieput. Bij dit systeem wordt bij de onttrekkingsput grondwater met een min of meer constante temperatuur van 12 °C opgepompt. De grondwatertemperatuur en de pomprichting zijn in Figuur 1 schematisch weergegeven.



Figuur 1 Schematische weergave van temperaturen en stromingsrichting bij gescheiden en recirculatie systemen

Als voordeel van het gescheiden systeem kan worden gezien dat zomers het grondwater voor koelingsdoeleinden een lagere temperatuur heeft. Daarentegen heeft het recirculatiesysteem een in de tijd constante stroomrichting, hetgeen geringere investeringskosten voor pompen betekent. Bij een gescheiden systeem wordt gestreefd naar volledige scheiding van de koude cel en warme cel. Hiertoe dient de denkbeeldige verbindingslijn tussen de twee putten loodrecht op de grondwaterstromingsrichting te staan.

Voor beide systemen geldt dat ze nauwkeurig moeten worden afgesteld op de hydrogeologische gesteldheid en bedrijfsgebonden randvoorwaarden. Uit hydrogeologisch oogpunt is de grondwatersnelheid (grootte en richting), de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket en een eventueel afdekkende laag van belang. Deze gegevens kunnen eenvoudig worden ontleend aan het Regis systeem van TNO-NITG. Tevens is een koppeling mogelijk met een grondwaterstromingsmodel. De chemische samenstelling van het grondwater is eveneens van belang. Ook al wordt gestreefd naar een gesloten systeem, temperatuurverschillen kunnen aanleiding geven tot ongewenste chemische reacties (roestvorming, calcietneerslag, etc). Daarnaast zal de provincie als grondwaterbeheerder het belang van koude- en warmteopslag willen afwegen tegen andere grondwaterbelangen. Een belangrijk aspect in deze is dat koude- en warmteopslag in evenwicht is: er wordt evenveel volume grondwater en warmte onttrokken als er wordt toegevoegd.

2.1.2 Thermische energie uit diepe aquifers

Het gebruik van diepere warmtebronnen wordt in het buitenland vooral toegepast voor " *direct use*", (ruimteverwarming van huizen, kantoren en kassen). Een tweede toepassing, het opwekken van elektriciteit, komt slechts in beperkte mate voor. Het is met behulp van ORC (*Organic Rankine Cycle*) technieken mogelijk om bij een relatief lage temperatuur elektriciteit te genereren. In dit overzicht beperken we ons tot de toepassing van diepe aardwarmte mogelijkheden voor de *direct use*.

Om de warmte uit de diepe ondergrond te winnen wordt gebruik gemaakt van het warme water dat ligt opgeslagen in aquifers in de ondergrond en die voorkomen op diepten met een voldoende hoge temperatuur. Hoewel watervoerende lagen in nagenoeg de gehele ondergrond van Nederland aanwezig zijn, is het voor een economisch rendabele aardwarmte-installatie noodzakelijk dat de watervoerende lagen voldoende doorstroming hebben om de minimaal benodigde hoeveelheid water te produceren. Dit is helaas niet altijd het geval.

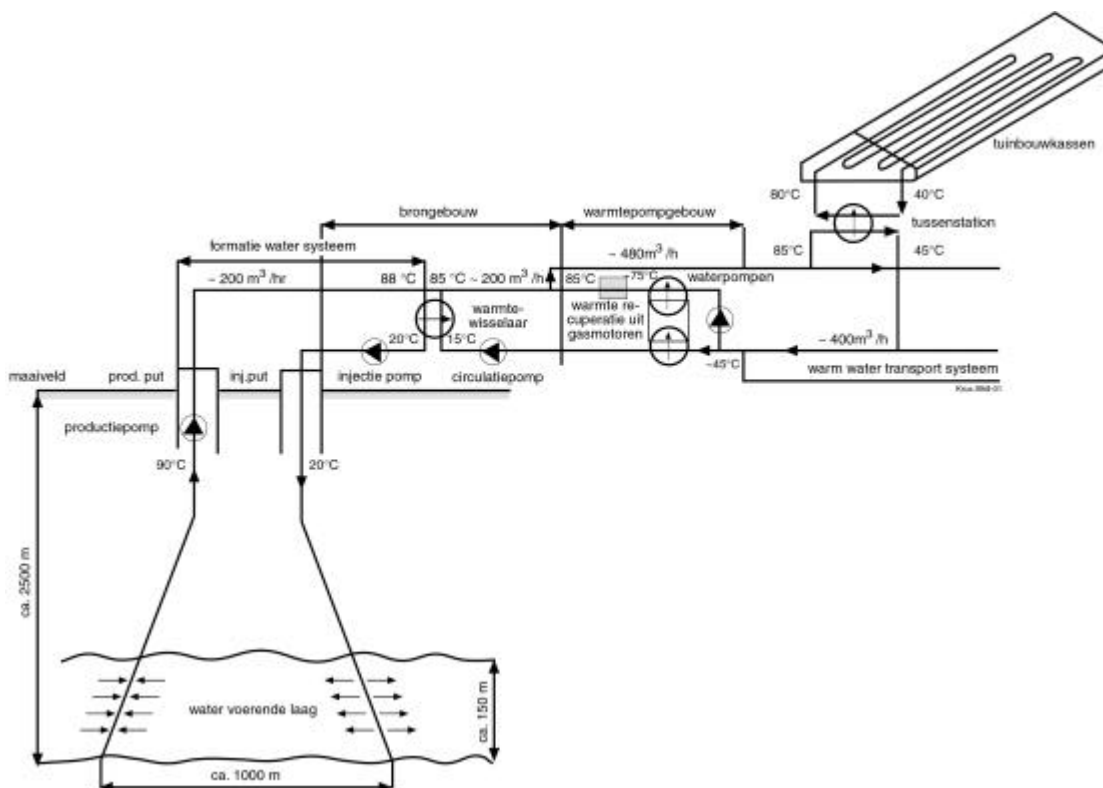
De winning van aardwarmte kan schematisch worden weergegeven in drie modules:

(1) de geothermisch kringloop (deze omvat het ondergrondse deel), (2) de warmtevraagmodule (de infrastructuur van de vraagkant en (3) de warmtewisselaar, die beide systemen verbindt.

De aardwarmte wordt meestal ingezet als basislast en wordt daarom aangevuld met een piekbelastingsmodule. Figuur 2 geeft het principe schematisch weer:

Het warme water wordt via een productieput omhoog gepompt uit de aquifer, doorloopt vervolgens een warmtewisselaar en wordt na het afstaan van de warmte via een injectieput weer teruggepompt.

Het terugpompen van het afgekoelde water is noodzakelijk omdat het geproduceerde formatiewater in het algemeen een hoog zoutgehalte heeft en om die reden lozing aan het oppervlak niet wordt toegestaan. Bovendien wordt door de injectie de druk in de aquifer op peil gehouden.



Figuur 2 Schematisch voorbeeld aardwarmtewinning met puttendoublet voor de verwarming van kassen.

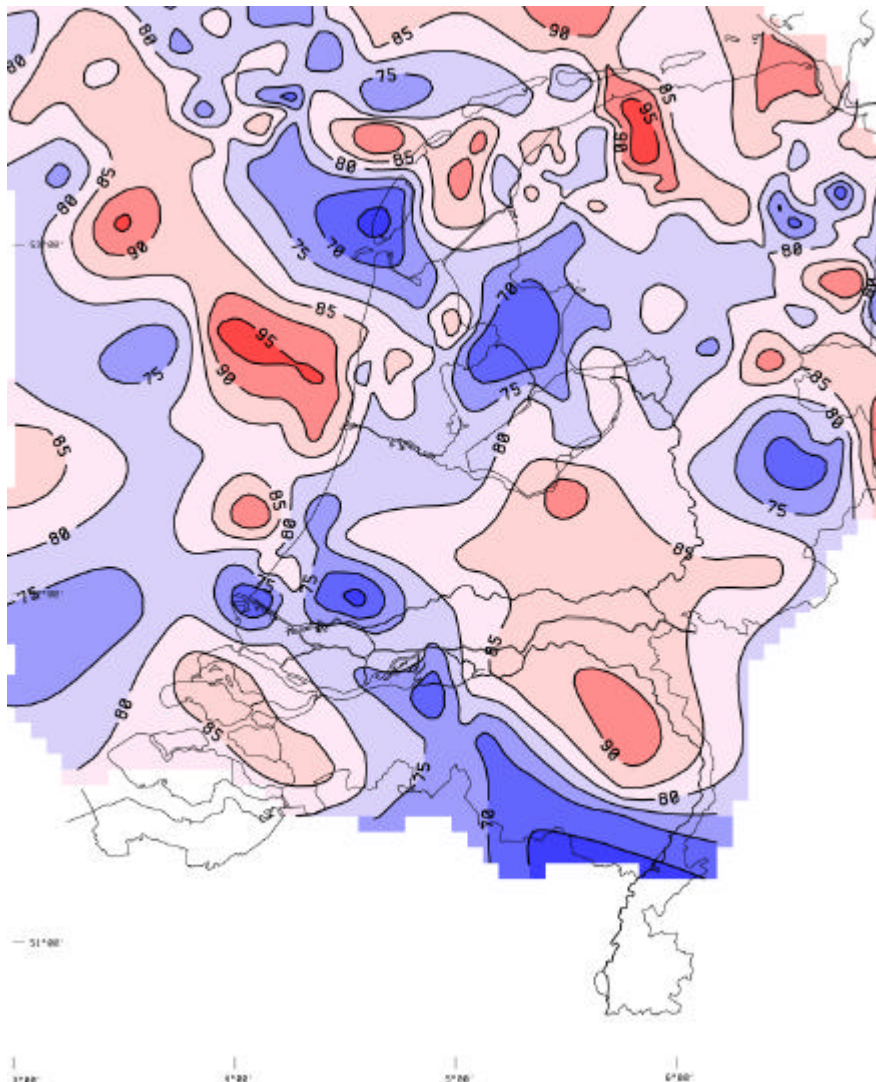
Het terugvoeren van het gewonnen water heeft echter ook een aantal nadelen. In de eerste plaats moet pompcapaciteit worden ingezet om het water terug te pompen. Het injectieproces zelf verloopt ook niet

zonder risico. Met name weinig verkitte zandsteenreservoirs die rijk zijn aan kleimineralen, zijn soms gevoelig voor verstopping tengevolge van de migratie van fijne deeltjes en verstopping door in het formatiewater gesuspendeerde deeltjes. Verstopping van een injectieput leidt tot afname van de doorlatendheid. Dit heeft weer tot gevolg dat de benodigde druk om het water te injecteren verhoogd moet worden, waardoor de elektriciteitskosten ten behoeve van de injectiepomp toenemen en de rentabiliteit van de geothermische installatie afneemt. De slaagkans van winningsprojecten van aardwarmte hangt dan ook sterk af van de injectiviteit/productiviteit op lange termijn.

2.2 Technische kenmerken

2.2.1 Debieten en temperatuurniveaus

De doorstroming of transmissiviteit van een watervoerende laag is gedefinieerd als het product van de doorlatendheid of permeabiliteit en dikte. De permeabiliteit wordt veelal uitgedrukt in Darcy (D), de dikte in meters (m). Om een voldoende hoeveelheid water ($150\text{-}250\text{ m}^3/\text{u}$) te kunnen produceren (en injecteren) zonder dat daarvoor een excessieve hoeveelheid pompenergie nodig is, dient de doorstroming van de te exploiteren watervoerende laag tenminste 15 Dm te bedragen.



Figuur 3 *Temperatuur in de Nederlandse ondergrond op een diepte van 2000 m*

Daarbij mag de transmissiviteit niet het product zijn van een onevenredig hoge permeabiliteit en een geringe dikte of andersom; de waarde van de permeabiliteit en de dikte van de formatie dienen ten opzichte van elkaar in een zeker evenwicht te zijn. Niet geheel duidelijk is waar de waarden voor het evenwicht tussen de permeabiliteit en dikte onacceptabel liggen. In Duitsland, waar geologisch vergelijkbare omstandigheden als in Nederland voorkomen, dient de dikte van de producerende laag tenminste 25 meter en de permeabiliteit van de formatie tenminste 300 mD te bedragen. Als ondergrens wordt vaak 15 Dm aan gehouden.

Paragraaf 2.3 gaat nader in op de aanwezigheid van geschikte aquifers in Nederland.

De temperatuur van het water in de aquifers is afhankelijk van de diepte waarop de aquifer wordt aangetroffen.

De ondiepe aquifers hebben in Nederland een temperatuur rond de 10 °C. In het algemeen geldt dat er in Nederland relatief weinig variatie is in de temperatuurgradiënt. Deze bedraagt ongeveer 30 °C. per km. De temperatuur op een diepte van 2000 respectievelijk 3000 meter bedraagt dan ook ongeveer 75 tot 100 °C.

De range van debieten van de putten varieert sterk. Bij diepe aquifers lopen de debieten uiteen van 100 tot 200 m³ per uur. Bij de ondiepe aquifers kan een goede put 50 tot 100 m³ per uur accommoderen. Dit is afhankelijk van de eigenschappen van de aquifer. Is er een hoger debiet nodig dan moeten er één of meer extra doubletten geboord worden.

2.2.2 Thermisch vermogen van een doublet

Het thermische vermogen van een doublet is afhankelijk van de opgeslagen hoeveelheid warmte in de aquifer: het debiet van het geproduceerde water en het verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur. Maximale uitkoeling (het verschil tussen productie- en injectietemperatuur) verhoogt derhalve de warmteopbrengst. Een optimale uitkoeling wordt bereikt door warmteafname volgens het zogenaamde cascadeprincipe waarbij men gebruik maakt van een aaneenschakeling van verschillende typen verwarmingselementen in volgorde van afnemende aanvoertemperatuur. Eventueel kan het nog relatief warme retourwater nogmaals naar een hoger temperaturniveau worden getransformeerd met behulp van een warmtepomp (zie ook Figuur 2).

Het thermische vermogen (W_{th}) van een doublet kan met de volgende formule uit het waterdebiet (q), de warmtecapaciteit van het formatiewater (het product van soortelijke warmte (c_w) en dichtheid ρ van het formatiewater bij formatietemperatuur) en de uitkoeling van het geothermische water (ΔT) worden berekend:

$$W_{th} = q \rho c \Delta T$$

met W_{th} in kW, q in m³s⁻¹, ρ in kgm⁻³, c in Jkg⁻¹K⁻¹ en ΔT in °C.

Bij een debiet van 200 m³/uur, een warmtecapaciteit van 4,452 · 10⁶ J/m³K en een uitkoeling van 80 °C naar 40 °C bedraagt het vermogen ongeveer 10 MW_{th}.

Bij ondiepe aquifers zijn de debieten en ook de temperatuurverschillen in het algemeen kleiner, zodat de vermogens hier veel lager uitpakken. Bijvoorbeeld bij een debiet van 50 m³h⁻¹, en een temperatuurverschil tussen warme en koude put van 10 °C bedraagt het vermogen voor opslag en onttrekking ca. 0,8 MW_{th}.

2.2.3 Gedrag in de tijd van de bronnen

2.2.3.1 Aquifers voor warmtewinning

Productie- en injectieput vormen tezamen een zgn. puttendoublet. Meestal worden zij vanuit een locatie schuin geboord. De ondergrondse afstand tussen productie- en injectieput ter hoogte van de te exploiteren, watervoerende, laag wordt in het algemeen zodanig gekozen dat het koudefront, dat zich vanuit de injectieput verplaatst de productieput niet eerder bereikt dan na ca 30 jaar. Het tijdstip waarop het koudefront de productieput bereikt, wordt de doorbraaktijd genoemd. Vanaf dit tijdstip zal nog niet volledig

opgewarmd injectiewater in de productieput arriveren en neemt de temperatuur van het gewonnen warme water geleidelijk aan af. De doorbraaktijd is een functie van de geproduceerde hoeveelheid water, de onderlinge afstand op einddiepte tussen productie- en injectieput, de porositeit en de dikte van de aquifer waaraan het water wordt onttrokken. In de praktijk bedraagt de afstand tussen de putten van een doublet 1200-1500 m.

Een puttendoublet beïnvloedt een veel groter deel van de ondergrond, namelijk bij benadering twee keer het kwadraat van de afstand tussen beide putten. Indien de ondergrondse afstand op einddiepte tussen injectie en productieput 1.5 km groot is, dan zal de beïnvloedingszone dientengevolge 4,5 km² beslaan.

Nadat het koudefront na ongeveer 30 jaar is doorgebroken, zal de temperatuur van het geproduceerde water heel geleidelijk afnemen (ca. 1 °C per 10 jaar); de exploitatie kan derhalve dan nog worden voortgezet totdat de productietemperatuur een kritische ondergrens bereikt heeft. De levensduur van een geothermische installatie kan daarnaast aanzienlijk verlengd worden door gebruik te maken van combinaties van productie en injectie putten door bijvoorbeeld een tweede productieput te boren en de oude productie put als injectie put te gebruiken.

Een alternatief is het toevoegen van een opslagfaciliteit aan de aquifer, waardoor gebruik makend van de bestaande geothermische voorzieningen, naast warmtewinning de opslag capaciteit van de aquifer kan worden benut.

2.2.3.2 Aquifers voor warmteopslag

Ook bij warmteopslag hebben we te maken met een puttendoublet, dat vanuit een locatie schuin geboord wordt. Gedurende het zomerseizoen wordt warm water in de "warme put" geïnjecteerd en koud water aan de "koude put" onttrokken. Tijdens het winterseizoen gebeurt het omgekeerde. De ondergrondse afstand tussen de warme en koude put ter hoogte van de te exploiteren, watervoerende, laag wordt in het algemeen zodanig gekozen dat het koudefront, dat zich vanuit de koude put verplaatst, de warme put niet bereikt gedurende het winterseizoen, tevens rekening houdend met de aanwezige grondwaterstroming. Het tijdstip waarop dit wel gebeurt, wordt de doorbraaktijd genoemd. De doorbraaktijd is een functie van de verpompte hoeveelheid water, de onderlinge afstand op einddiepte tussen de twee putten (meestal 50 tot 200 m), de porositeit en de dikte van de aquifer waaraan het water wordt onttrokken.

2.2.4 Samenstelling bronwater

2.2.4.1 Geochemische samenstelling van het formatiewater

Bij het produceren en injecteren van water uit/in de aquifer kunnen ten gevolge van de afnemende temperatuur en druk chemische evenwichten in het formatiewater veranderen. Als gevolg van deze veranderingen kan neerslag ontstaan die aanleiding geeft tot putverstopping. Om deze aspecten te onderzoeken worden geochemische modellen gebruikt om neerslag en oxidatie te onderzoeken. Het zal duidelijk zijn dat de chemische condities in Nederland locatiespecifiek zijn, dat wil zeggen afhankelijk van plaats en diepte van de aquifer. In dit hoofdstuk wordt als voorbeeld de aquifer in de Rijswijk zandsteen, een van de Onder Krijtzanden in Zuid Holland als uitgangspunt genomen.

Voor gegevens over de chemische samenstelling van de in de Rijswijk Zandsteen aanwezige formatiewater wordt in dit rapport uitgegaan van onderzoek dat is uitgevoerd in 1983 (TNO-GG, 1983). Het geochemische onderzoek is o.a. uitgevoerd door de Rijks Universiteit Utrecht (Zuurdeeg, 1983; Zuurdeeg & Van der Weiden, 1982). De analysesresultaten van de onderzochte monsters zijn weergegeven in Tabel 1. In deze tabel staan ook de resultaten van een groot aantal olievoorkomens in Onder-Krijt reservoirgesteenten (Collins, 1975) Volgens Stheeman (1962) bedraagt het (equivalent) zoutgehalte van formatiewaters in West-Nederland Bekken 110-115 g NaCl/l. Volgens opgave van de NAM (TNO-GG, 1983) bevatten de formatiewaters in West-Nederland geen H₂S.

Tabel 1 Chemische samenstelling van formatiewater (g/l)

	monster De Lier Zuurdeeg (1983)	ca. 2400 m diep W-Nederland	Onder-Krijt gesteenten Collins (1975)
Na ⁺	36,3	42,2	31
K ⁺	0,2	0,1	0,13
Ca ₂ ⁺	3,6	5,4	7
Mg ₂ ⁺	0,8	0,8	0,9
Sr ₂ ⁺	0,58	-	0,2
Ba ₂ ⁺	0,035	-	0,04
Fe ₂ ⁺	0,033	-	-
Cl	55	77,3	62
SO ₄ ²⁻	0,15	-	0,28
H ₃ PO ₄	0,02	-	-
H ₄ SiO ₄	0,06	-	-
HCO ₂	0,02	-	0,26

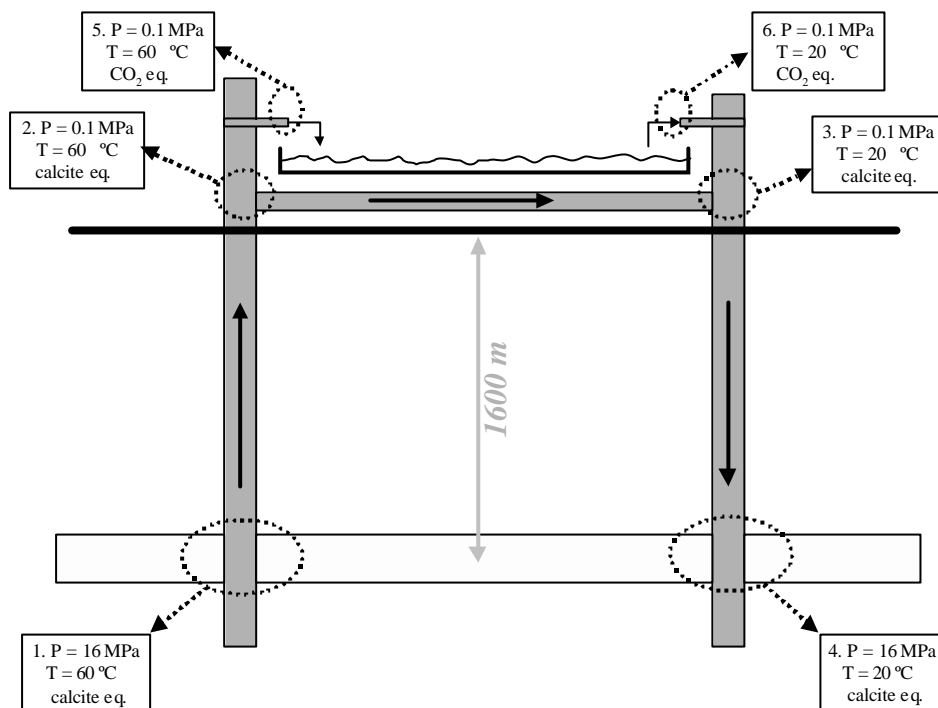
De Rijswijk Zandsteen is afgezet tijdens een transgressie en bestaat voornamelijk uit zanden met plaatselijk grofkorrelig materiaal, klei- en silthoudende lagen. Volgens Van Adrichem Boogaert and Kouwe, (1993-1997), is er in de Rijswijk Zandsteen geen sprake van calcietafzettingen. Hierdoor lijkt het onwaarschijnlijk dat het formatiewater oververzadigd is voor calciet, wat gunstig is uit het oogpunt van calcietafzetting door het water uit de productieput.

Teneinde de invloed van de chemische samenstelling op de verschillende fasen in het productieproces na te gaan zijn, uitgaande van bovengenoemde gegevens betreffende de samenstelling van het bronwater in boring de Lier, de geochemische processen numeriek gemodelleerd.

Hierbij zijn een aantal aannames gedaan:

1. Het formatiewater heeft een temperatuur T van 60 °C op een diepte van 1600 meter.
2. De meest kritieke parameters voor de neerslag van calciet, de zuurgraad pH en de partiële CO₂druk van de formatie, zijn niet gegeven voor het formatiewater van De Lier en moeten daarom geschat worden.
3. Er komt geen gasvormig CO₂ voor bij deze diepte, t.g.v. de hydrostatische druk in de boorkolom. Zolang de partiële gasdruk niet groter wordt dan de verzadigingsdruk (zgn. 'bubble point pressure') van het formatiewater zal er geen gasbel ontstaan.
4. De standaard redox-potentiaal van water, pe = 4, wordt aangehouden voor het initiële formatiewater.

Er kunnen zes verschillende situaties bij de inrichting van een bron worden gemodelleerd (zie Figuur 4). De situaties 1 tot en met 4 hebben betrekking op een gesloten systeem, dat wil zeggen dat het bronwater niet in aanraking komt met zuurstof uit de buitenlucht. In de situaties 5 en 6 is dit wel het geval.



Figuur 4 Schematische weergave van de verschillende stadia in de productie en injectie van thermaal water.

Gegeven de aangenomen randvoorwaarden (watersamenstelling, pH, $p\text{CO}_2$, etc.) kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

Voor het "gesloten" systeem (situaties 1 tot en met 4) worden er geen grote problemen verwacht met neerslag van calciet, mede omdat er in de praktijk een forse oververzadiging nodig is voor de vorming van neerslag. In dit geval zal de oververzadiging onvoldoende zijn om tot vorming van neerslag te leiden. Mogelijk kunnen kleine hoeveelheden barriet voor wat neerslag zorgen. Neerslag van kwartsmineralen is niet uit te sluiten.

Komt het systeem in aanraking met de buitenlucht dan worden er geen problemen verwacht met calciet neerslag, maar wel met neerslag van ijzer(hydr)oxides. Deze neerslag van ijzer(hydr)oxides zijn moeilijk te voorkomen bij blootstelling van het formatiewater aan de lucht (zuurstof).

Bij de inrichting van een doublet moeten dan ook maatregelen worden genomen om dit tegen te gaan.

Bovenstaande conclusies zijn getrokken op grond van modellering van de situatie bij de Lier. In alle gevallen kunnen er pas definitieve uitspraken worden gedaan na analyse van formatiewater (uit de proefboring). Mocht de samenstelling van het water dusdanig verschillen van het formatiewater van De Lier dat er toch calcietneerslag plaatsvindt, dan kan er (periodiek) zuur in de waterkolom worden gebracht dat de pH verlaagt en het calciet oplost.

Een tweede mogelijkheid om neerslag van calciet te voorkomen is het plaatsen van een ion-wisselaar waarmee het gehalte aan Calcium ionen wordt teruggebracht door uitwisseling met natriumionen. Dit werd bijvoorbeeld gedaan bij de warmteopslag in een aquifer van de Universiteit van Utrecht. Hier bleek echter dat het gehalte aan natriumionen in het injectiewater niet te hoog mocht worden, omdat dit problemen gaf met kleizwelling onder in de put.

2.2.4.2 De aanwezigheid van kleideeltjes

Naast de neerslag van mineralen kunnen er ook problemen ontstaan met de aanwezige kleideeltjes in de formatie en in suspensie. De mogelijk aanwezige klei in de formatie kan gaan zwellen door de injectie van water. Het oppervlak van kleideeltjes zijn negatief geladen, waaraan positief geladen ionen geadsorbeerd zijn. Zwelling kan veroorzaakt worden door het vervangen van één tweewaardig calcium-ion voor twee eenwaardige natrium-ion. Hierdoor kan de permeabiliteit afnemen en kan de put uiteindelijk dichtslaan. Een tweede probleem kan veroorzaakt worden door het samenklonteren van kleideeltjes in suspensie. Deze samenklonteringen kunnen in de poriën van het reservoir gaan zitten en daarmee het reservoir verstoppen.

Zo zijn in de Rijswijk Zandsteen plaatselijk kleilagen met ligniet aanwezig, met name aan de basis van het laagpakket. Indien kleideeltjes de aanwezig zijn kan er dus niet worden uitgesloten dat deze processen op zullen treden. Op dit moment zijn er echter te weinig gegevens om hier kwantitatieve uitspraken over te doen.

2.2.5 Geothermisch circuit.

Bij de aanleg van een geothermisch doublet komt eerst de keuze en aanleg van een boorlocatie plus benodigde infrastructuur aan bod, gevolgd door de constructie van een boorplatform waarop de boorinstallatie kan worden geplaatst.

Daarna start het boren van twee gedeveierde putten. De putten worden verbuisd (casing) om instorten van de boorgatwand te voorkomen. Tussen buizen en gesteente wordt een cement slurry geïnjecteerd, die uithardt. De verbuizing geschiedt telescopisch in twee of drie diameters. Vanaf de top van het reservoir worden de putten niet meer verbuisd. Beide boorgaten worden vervolgens over de gehele reservoirlengte uitgeruimd, voorzien van een gravel pack en afgewerkt met een filterscherm. In de verbuizing wordt een productiebuys (liner) neergelaten. Deze kan aan de binnenzijde voorzien zijn van een kunststof coating om corrosie te voorkomen.

Vervolgens wordt een elektrische onderwaterpomp neergelaten in de productieput, die zo'n 3-5 jaar meegaat.

Indien de chemie van het geproduceerde water daar aanleiding toe geeft, zal een leiding die reikt tot aan de bodem van de productieput ter injectie van corrosie-inhibitoren moeten worden aangebracht.

Het bovengrondse gedeelte van het geothermische circuit omvat een serie componenten. De belangrijkste hiervan zijn:

- een frequentieregelaar (variable frequency drive) ten behoeve van de elektrische onderwaterpomp die de afregeling van het putdebiet mogelijk maakt;
- filters voor de verwijdering van zand en eventuele corrosiedeeltjes uit het geothermische circuit (indien er een gereede kans is op verstopping); waar nodig een doseerinstallatie voor corrosie-inhibitoren ;
- een injectiepomp voor het geothermische circuit;

Met behulp van warmtewisselaars wordt de warmte van het geothermische circuit overgebracht op het warmtedistributienetwerk en middels pompen gedistribueerd.

Vaak worden in de aardwarmtecentrale ook een warmte/kracht-installatie, buffers, een warmtepomp en/of pieklastketels opgesteld teneinde snel aan een hoge warmtevraag te kunnen voldoen.

2.3 Locaties van potentieel bruikbare aquifers

2.3.1 Inleiding

De geologische gesteldheid van de diepe ondergrond in Nederland is op regionale schaal redelijk goed bekend door exploratie- en exploitatieactiviteiten van de olie- en gasmaatschappijen. Al sinds de jaren vijftig wordt de Nederlandse diepe ondergrond systematisch onderzocht op fossiele brandstoffen.

Omdat de olie- en gaswinning zich meestal richt op clastische of carbonaatreservoirs richt, is er inmiddels een onschatbare hoeveelheid data gegenereerd die, na toestemming van de concessiehouder(s), gebruikt zou kunnen worden voor geothermische doeleinden. Helaas voorziet de huidige mijnwet niet in de vrijgave van deze data. De nieuwe mijnwet, aangeboden aan het parlement, voorziet wel in vrijgave van data, maar het is nog niet duidelijk in hoeverre dit met terugwerkende kracht zal zijn.

Er is één markant verschil tussen geothermie en olie- en gaswinning. Exploratie- en productieboringen worden doorgaans gezet op culminaties van structuren: de hoogste punten van reservoirgesteenten waar olie en aardgas zich verzamelt. Als men de boorlocatiekaart van Nederland in ogenschouw neemt, dan ziet men clusters van boringen (in en rond de olie- en/of gasvelden) met daartussen weinig geëxploreerde gebieden: de vele honderden uitgevoerde boringen zijn geenszins gelijkmatig verdeeld. Dit duidt op bepaalde reservoirs en structuren die blijkens dit overzicht slechts in bepaalde gebieden voorkomen. In de praktijk betekent dit, dat men in de geothermie veelal dezelfde reservoirs bestudeert als in de olie- en gaswinning. Dit laat zich overigens vrij makkelijk verklaren uit het feit dat olie- en gasaccumulaties meestal voorkomen in goed doorlatende structuren die eveneens potentieel voor aardwarmte geschikt zijn. De minder onderzochte, watervoerende gesteentelagen tussen de gebieden waar olie- en gaswinning plaatsvindt zijn in principe ook voor geothermische toepassing geschikt.

Meestal zijn de voor aardwarmtewinning beoogde formaties in de olie- en gaswinning succesvolle reservoirgesteente gebleken zodat de metingen over dit interval vrijwel zonder uitzondering nauwgezet en uitvoerig aanwezig zijn.

Het is niet uit te sluiten dat de confidentialiteit van deze meetgegevens de beschikbaarheid voor onderzoek naar de geologische gesteldheid van potentieel interessante lagen voor toepassing in de aardwarmtewinning zal bemoeilijken. Hierdoor kan niet altijd een voldoende nauwkeurig geologische detaillering worden bereikt. Voor wetenschappelijke doeleinden zijn de concessionarissen vaak wel bereid om confidentiële gegevens ter beschikking te stellen, maar publicatie van genoemde gegevens in wetenschappelijke en andere tijdschriften is eerder uitzondering dan regel. Het is niet te verwachten dat op grote schaal toestemming gegeven wordt voor het gebruik van de boorgegevens.

Door TNO-NITG wordt, met speciale toestemming van de oliemaatschappijen, de ondergrond van Nederland op regionale schaal in kaart gebracht en gepubliceerd als Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland. Zeven van de vijftien kaartbladen zijn inmiddels gereed. Deze atlas biedt een goed overzicht van de aanwezigheid van aquifers in de ondergrond.

2.3.2 Geologische randvoorwaarden

Watervoerende lagen (aquifers) zijn aanwezig in de ondergrond van bijna geheel Nederland op een diepte die varieert tussen de 10 en 4000 m. Hierbij loopt de temperatuur van het formatiewater op van ca. 10 °C aan het oppervlak tot ca. 130-150 °C op een diepte van 4000 m.

Niet alleen de temperatuur is van belang, maar ook zijn bij aardwarmtewinning zeer grote volumes warm water nodig. Een geothermische energiewinnings-project zal slechts dan economisch rendabel kunnen zijn, wanneer de doorstroming van de aquifer groot genoeg is om de minimale benodigde hoeveelheid warm formatiewater te produceren (bij voorkeur tot zo'n 5000 m³/dag). Aan deze randvoorwaarde kan voldaan worden indien de eerder vermelde belangrijkste reservoirkarakteristieken als diepteligging (van belang voor de temperatuur), dikte en doorlatendheid van de aquifer voldoen aan de gestelde criteria. Daarnaast is ook de structurele ontwikkeling van de deelgebieden van belang. Compartmentalisatie, dat is de opdeling in deelreservoirs door breuken, verkleint het effectieve reservoir en heeft vaak een ongunstig effect op stromingspatronen in aanwezige aquifers. In Noord-Holland is bijvoorbeeld door opheffing- en dalingstectoniek een sterk gebroken horst-graben-systeem ontstaan. De Boven-Rotliegend aquifer is daar als gevolg van deze tektonische bewegingen opgeheven of gedaald. Sommige van deze opgeheven blokken zijn aan de randen begrensd door breuken die een verticaal verzet hebben van ca. 400 m of zelfs nog meer. In dit geval is het verticale verzet van deze breuken groter dan de maximale dikte van de aquifer (de maximale dikte van de Boven-Rotliegend Groep bedraagt in dit gebied zo'n 250 m). Dit betekent dat de aquifers in de verschillende breukblokken niet met elkaar kunnen communiceren. Dit geldt overigens ook

voor veel andere gebieden in Nederland, waaronder West-Nederland, een voor aardwarmtewinning relatief gunstig gebied. Compartmentalisatie is van belang bij de locatiebepaling van een geothermisch doublet.

2.3.3 Potentiële wingebieden voor aardwarmte

De voor geothermie geschikte gebieden, met aquifers van een hoge permeabiliteit, voldoende dikte én een hoge temperatuur, worden met name aangetroffen in Noord- en Zuid-Holland en in Noord- en Oost-Nederland. Er zijn op landelijke schaal een viertal stratigrafische eenheden aanwijsbaar die mogelijk benut kunnen worden voor de winning van aardwarmte. Deze eenheden zijn van oud naar jong (Figuur 5):

1. de Boven-Rotliegend zandstenen in Noord-Holland en Noord-Nederland (zoals Slochteren Zandsteen)
2. de Trias zandstenen in Zuid-Holland, Noord-Brabant en Oost-Nederland
3. de Onder-Krijt zandstenen in Zuid-Holland en (locaal) Zuidoost Drenthe
4. de ondiep gelegen Tertiaire zanden, verspreid door geheel Nederland

Chronostratigrafie		Aquifer	
Kenozoïcum	Kwartair		
	Tertiair	Plio	
		Mio	Zand van Breda
		Oligo	
Eo	Zand van Brussel		
Paleo			
MESOZOÏCUM	Krijt	Laat	
		Vroeg	Onder-Krijt Zanden
	Jura	Laat	
		Mid-den	
		Vroeg	
	Trias	Laat	
		Mid-den	
Vroeg		Trias Zanden	
PALEOZOÏCUM	Perm	Laat	Slochteren Zandsteen
		Vroeg	
	Carboon	Laat	
		Vroeg	

Hieronder worden de eigenschappen van deze aquifers op hoofdlijnen beschreven. De belangrijkste geologische structuren zijn geografisch weergegeven in Figuur 6.

2.3.3.1 Boven-Rotliegend

De Boven-Rotliegend Groep (Laat-Perm) laat twee gebieden zien waaruit onder de eerder genoemde voorwaarden geothermaal water winbaar is. Dit is een brede band van de Kop van Noord-Holland tot West-Friesland (Hoorn-Enkhuizen) en een gebied dat een flink stuk van Friesland en Groningen bestrijkt.

Noord-Holland

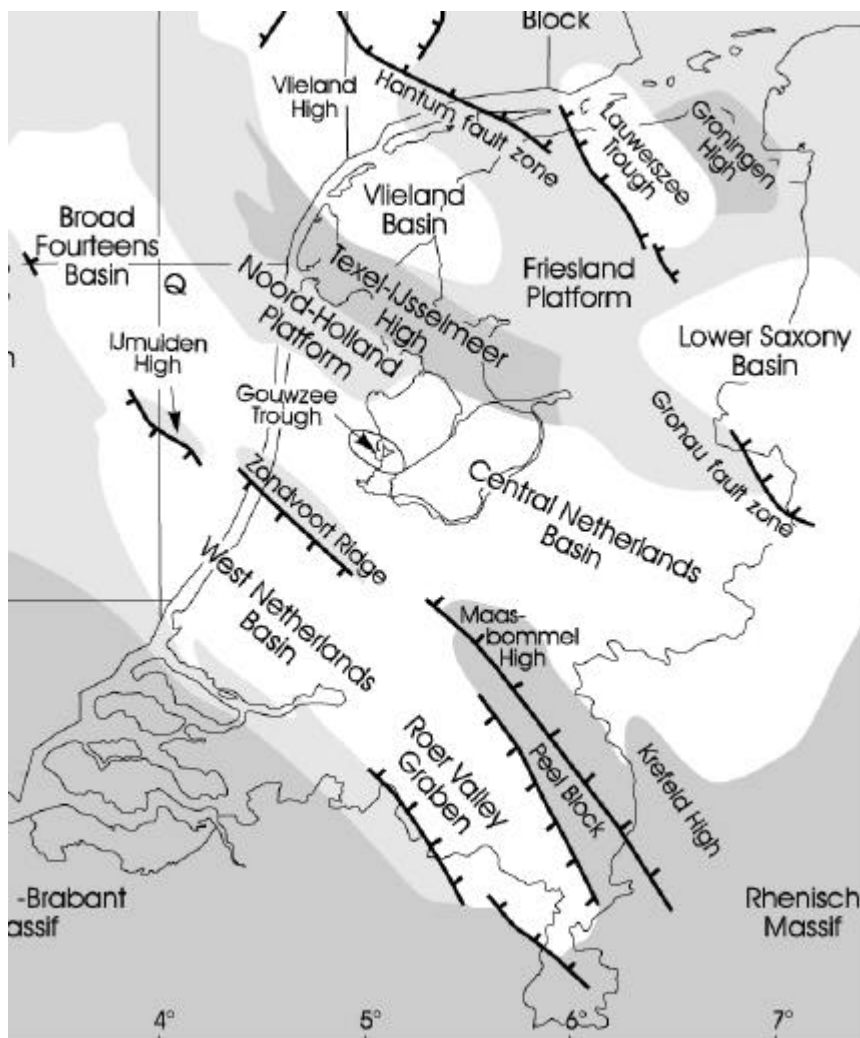
Midden en noord Noord-Holland zijn geologisch gepositioneerd in respectievelijk het Centraal-Nederland Bekken en het Noord-Holland Platform.

Het Centraal-Nederland Bekken is een noordwest-zuidoost georiënteerd bekken. Dit bekken vertoont differentiatie daling in het Perm, Trias, Jura en Vroeg-Krijt. In deze tijdvakken zijn dikke sedimentpakketten in dit gebied afgezet.

Figuur 5 Chronostratigrafische overzicht van de voor aardwarmte geschikte aquifers

Aan de zuidkant wordt het Centraal-Nederland Bekken begrensd door het Zandvoort Hoog en aan de noordkant door het Noord-Holland Platform. Dit is een relatief hoger en stabiel gelegen element dan het Centraal-Nederland Bekken, waar afzettingen van het Onder-Krijt liggen op Perm of Trias. In de ondergrond van Noord-Holland komen een aantal watervoerende lagen voor die in aanmerking zouden kunnen komen voor wateronttrekking ten behoeve van aardwarmtewinning. Op basis van eerder verricht onderzoek door RGD en concessiehouders werd destijds voor de studies in midden en noord Noord-Holland besloten de potentiële geothermische reservoirs te beperken tot de watervoerende lagen van de Boven-Rotliegend Groep.

In Noord-Holland is de Boven-Rotliegend Groep doorsneden door een groot aantal breuken die hebben geleid tot een compartimentalisatie van de aquifer en de vorming van traps.



Figuur 6 Positionering van de geologische structuren.

In Noord-Holland is een aantal gasreservoirs in de Slochteren Formatie in productie. In de onderscheiden, veelal door breuken begrensde traps, ligt de Slochteren-aquifer naast gesteenten van de Limburg, de Zechstein, de Onder-Germaanse Trias of de Rijnland Groep. Deze eenheden bestaan grotendeels uit gesteenten met een geringe doorlatendheid die als *side-seal* fungeren. De breuken die de gasreservoirs (compartimenten) begrenzen kunnen door de opname van de kleien in het breukvlak (smering) als ondoorlatend voor gas worden beschouwd.

In het hier beschouwde gebied bestaat de Boven-Rotliegend Groep geheel uit de Slochteren Formatie opgebouwd uit massieve zandsteen. De top en de basis laten een lagere porositeit zien, hetgeen wijst op een sterkere cementatie.

Het middengedeelte bezit veelal gunstige reservoir eigenschappen, de doorlatendheid varieert hier tussen 30 en 600 mD hetgeen hoger is dan het gemiddelde van de gehele formatie dat varieert tussen 13 en 169 mD. De maximale dikte van deze hoog permeabele zone bedraagt ongeveer 200 m.

Gas wordt geproduceerd in Groet, Bergen, Bergermeer, Schermer, Rustenburg, Middenmeer en Middelle (RGD, 1993).

Noord-Nederland

De Boven-Rotliegend Groep in Noord-Nederland bestaat uit een opeenvolging van rode zandsteen en kleisteen. De Boven-Rotliegend Groep bevindt zich hier op het Friesland Platform, het Groningen Hoog en de tussenliggende Lauwerszee Trog (Figuur 6).

De Boven-Rotliegend Groep is hier onderverdeeld in 3 eenheden. Vanuit geothermisch oogpunt zijn, net als in de olie-industrie, de zandstenen uit de Slochteren Formatie van belang. De zandstenen zijn afgezet door de wind of door rivieren en de dunne kleisteen inschakelingen in deze zandstenen zijn afgezet in de tussenliggende meertjes en sabkha's.

Omdat het Friesland Platform en het Groningen Hoog in noordelijke richting hellen, neemt de diepte waarop de Slochteren Fm. voorkomt in deze richting toe van 2500 tot 3500 m. In de tussenliggende Lauwerszee Trog zijn langs de randbreuken verzetten van 1100 (plaatselijk langs de Hantum Breuk) en 300 m gemeten, waardoor de Slochteren aquifer op een diepte tussen 3000 en 4500 m voorkomt.

Voor (gedetailleerde) beschrijvingen van de geologische ontstaansgeschiedenis, stratigrafie en lithologie wordt verwezen naar de Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond, Toelichtingen bij Kaartbladen II, III en V (RGD, 1991; RGD, 1995).

In tegenstelling tot het noordelijk deel van het Centraal-Nederland Bekken zijn, met uitzondering van de aanwezige randbreuken, intern op het Friesland Platform en Groningen Hoog slechts weinig grote preferente breukstructuren aanwezig. Beide elementen worden evenwel door breuken doorsneden, maar deze hebben normaliter verzetten van minder dan 50 m. De compartimentalisatie zal hier derhalve over het algemeen vrij gering zijn.

De Slochteren Formatie bestaat uit rode kwartszanden met inschakelingen van rode kleisteen. Conglomeraten in deze formatie worden met name aan de basis aangetroffen. De netto zanddikte van de Slochteren Formatie varieert tussen 10 en 150m.

Figuur 7 geeft de locatie van de meest geschikte winningsgebieden weer.

2.3.3.2 Trias

De zandstenen uit de Trias van Nederland maken deel uit van een complexe stratigrafische en structurele bekkenopvulling.

Voor geothermische benutting, komen alleen de volgende Trias zandstenen in aanmerking:

- Nederweert Zandsteen
- Onder-Volpriehausen Zandsteen
- Boven-Volpriehausen Zandsteen
- Onder-Detfurth Zandsteen
- Boven-Detfurth Zandsteen
- Hardegse Formatie
- Röt Randzandsteen

De dikte van de Trias zandstenen kan in Noord-Brabant oplopen tot ongeveer 300m. De permeabiliteit varieert van 2 tot 200 mD in het West-Nederland Bekken, in de Roerdal Slenk van 250 tot lokaal 1000 mD. Vanwege het complexe karakter en grote regionale verschillen wordt niet verder ingegaan op de opbouw van deze zandstenen.

Figuur 7 geeft de locatie van de meest geschikte winningsgebieden weer.

2.3.3.3 Onder-Krijt

Zandstenen met reservoir eigenschappen die geschikt geacht lijken voor geothermische toepassingen in het Onder-Krijt, worden aangetroffen in Zuid-Holland en in de ondergrond van zuidoost Drenthe.

In de provincie Zuid-Holland bestaan de Onder-Krijt reservoirs uit zanden die zijn afgezet als zandbanken langs een oude kustlijn (Rijnland Groep) en uit zanden afgezet door rivieren in de vorm van geulen (Schieland Groep). In Overijssel en Drenthe bestaan deze zanden uit kust-afzettingen (Rijnland Groep).

Zuid-Holland

De provincie Zuid-Holland is geologisch gepositioneerd in het West-Nederland Bekken

In de ondergrond van Zuid-Holland komen verscheidene watervoerende lagen voor die in aanmerking zouden kunnen komen voor wateronttrekking ten behoeve van aardwarmtewinning.

De watervoerende pakketten liggen op een diepte rondom de 2000m.

De dikte van deze pakketten kan oplopen tot wel 300m (bijvoorbeeld in de omgeving van Rotterdam als van Wassenaar, heeft de sequentie een dikte van 300 m of meer) en lokaal komen doorlatendheden tot 3000mD voor.

In het West-Nederland Bekken komt een breukenpatroon voor dat ZO-NW is georiënteerd. Secundaire breuken doorkruisen deze trend via een WNW-OZO patroon. Door de vele bewegingen in de geologische geschiedenis volgens deze breukpatronen, is er een grote mate van compartimentalisatie opgetreden. Het breukenpatroon is voor de aardwarmtewinning mede van belang vanwege de omstandigheid dat breuken vaak ondoorlatende vlakken vormen, hetgeen de compartimentalisatie bepaalt.

Tijdens de afzetting van de zanden zijn breuken actief geweest met als resultaat dat bepaalde schollen tussen de breuken zakten. Deze relatieve bodembeweging maakte dat op de lager gelegen schollen veel meer sediment werd afgezet dan op andere (meer ruimte voor afzetting). Verder bepaalden de lager gelegen schollen de locatie en stromingspatronen van riviergeulen en dus de zandvoorkomens in de ondergrond.

Tijdens het Laat-Krijt veranderde de rek in druk: de lagen werden geplooid en bepaalde schollen werden opgedrukt langs zowel de oude als nieuwgevormde breukvlakken.

Behalve de grote breuken worden vele kleinere gevonden met vaak een andere oriëntatierichting dan de hoofdbreuken.

Oost-Nederland

De zandstenen van het Onder-Krijt van Oost-Nederland zijn afgezet in het Nedersaksisch Bekken. Dit is een relatief laag gelegen afzettingsgebied gedurende de Jura en het Krijt met een fase van opheffing gedurende het Laat-Krijt en het begin van het Tertiair, in grote lijnen analoog aan de geschiedenis van het West-Nederland Bekken in Zuid-Holland.

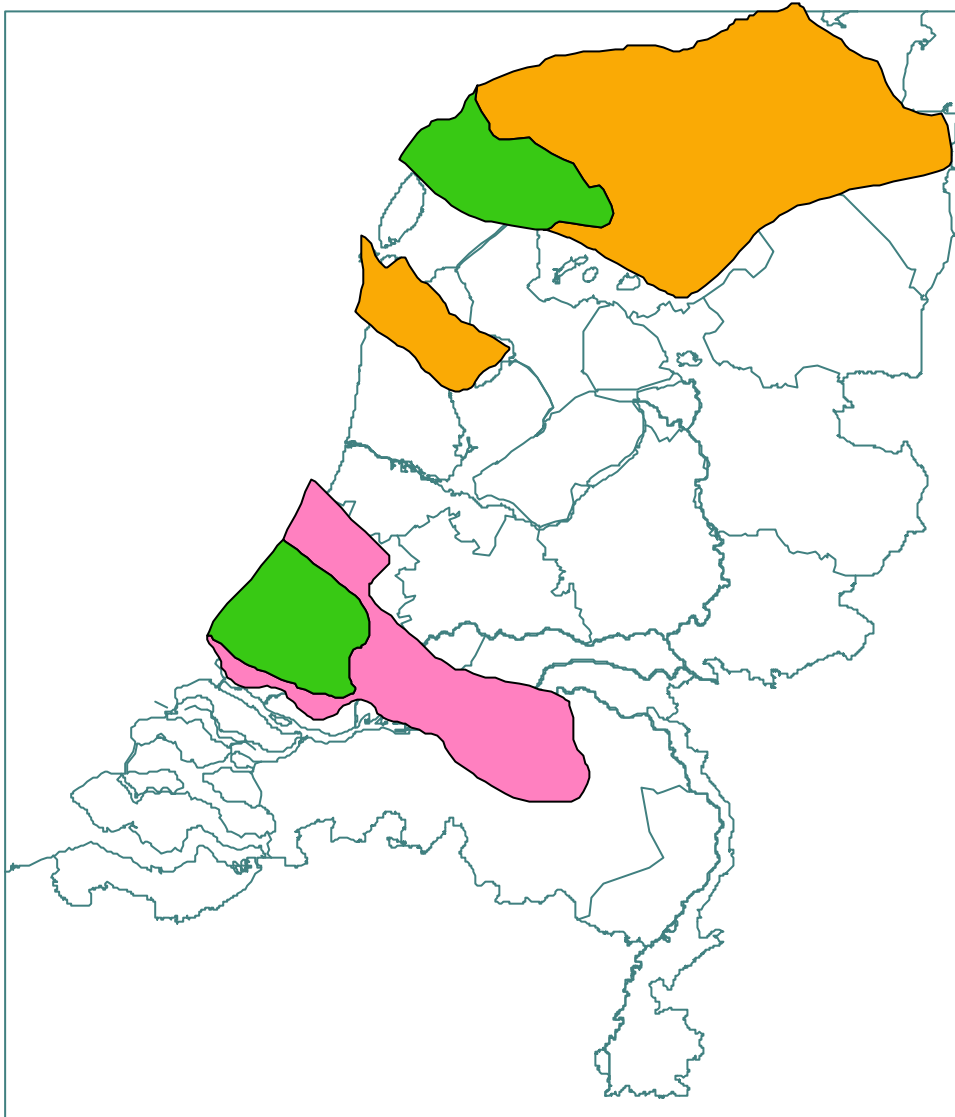
De Onder-Krijt zanden die voor geothermische doeleinden in aanmerking komen, maken deel uit van de Bentheim Zandsteen. De Bentheim Zandsteen is afgezet in een ondiep mariene omgeving als een kustbarrière. De zandsteen komt voor in het zuidoosten van Drenthe en het noordoosten van Overijssel. Deze zandstenen hebben een massief karakter en bevatten lokaal schelpfragmenten, bruinkool fragmenten en glauconiet. De korrelgrootte varieert van fijn tot middelzand en de dikte varieert tussen 3 m aan de bekkenrand tot 65 m in het depotcentrum. De porositeit van deze zanden varieert van 15 tot meer dan 25% en de permeabiliteit varieert van 220 tot 500 mD.

Noord-Nederland

De zandstenen uit het Onder-Krijt van Noord-Nederland zijn afgezet in het Vlieland Bekken (zie Figuur 6). Dit bekken werd gevormd in de Jura en bleef bestaan tot het laat Krijt, waarna het een fase van inversie onderging gelijksoortig aan de inversie die in de andere bekkens in Nederland opgetreden is in die tijd. In het Vlieland Bekken zijn in het Vroeg-Krijt zanden van het Friesland Laagpakket afgezet.

De zanden van het Friesland Laagpakket bestaan in het Vlieland Bekken uit een afwisseling van veelal goedgelaagde, weinig gelithificeerde fijne tot middelfijne kwartzandstenen met siltstenen en kleistenen. De overgang van zandstenen naar silt- en kleistenen is geleidelijk. Lokaal is de zandsteen goed gecementeerd met calciet en sideriet. De mate van cementatie neemt toe in de richting van de bekkenranden waar de zandsteen dunner wordt. De dikte van de zandstenen varieert van 10 m aan de bekkenrand tot ongeveer 200 m in het depotcentrum. Bij Harlingen ligt de top van de zandstenen op 1800 m diepte en onder Vlieland ligt de top van de zanden op 2100 m diepte beneden NAP. In het Zuidwal gasveld, midden in de Waddenzee waar de zandsteen het dikst wordt aangetroffen, is de gemiddelde porositeit van de zandstenen is 15-22%. De permeabiliteit varieert in dit veld tussen 1 en 30 mD (Cottençon et.al., 1975).

Figuur 7 geeft de locatie van de meest geschikte winningsgebieden weer.



Figuur 7 Verbreiding van de meest geschikte gebieden voor de winning van aardwarmte. Bruin: Slochteren zandstenen, Paars: Trias zandstenen. Groen: Onder-Krijt zandstenen, Onder Krijt zanden overlappen de Slochteren zandstenen resp. Trias zandstenen.

2.3.3.4 Tertiair

Tertiaire afzettingen in Nederland bestaan uit een afwisseling van kleien en zanden. De zanden die voor geothermische toepassingen interessant zijn, op grond van hun petrofysische karakteristieken, komen met name in zuidelijk Nederland voor (RGD, 1985). De volgende twee belangrijke zandige pakketten, te weten het Zand van Brussel en de Formatie van Breda, worden onderstaand beschreven.

Zand van Brussel

Het Zand van Brussel, behoort tot de Formatie van Dongen uit de Onder Noordzee Groep en is afgezet als een kustnabije afzetting uit het Midden-Eoceen (Ypresien-Lutetien). Deze zanden komen thans nog in de ondergrond voor ten noorden van de lijn Den Helder, Amersfoort, Enschede en ten zuiden van de lijn Den Haag, Rotterdam, Veldhoven.

In Zeeland komt het zand voor op een diepte tussen 100 en 700 m. De dikte varieert hier tussen 125 bij Roosendaal en 50 m richting het zuidwesten. In het noordelijke verspreidingsgebied ligt de top van het zand op 1150 m diepte onder Flevoland en de Veluwe, afnemend naar 300 m diepte onder Groningen en Drenthe. De dikte in dit gebied varieert hier tussen 135 en 0 m. Naar het noorden neemt tevens de hoeveelheid zand af en gaat mergel en klei domineren.

Het Zand van Brussel bestaat uit een afwisseling van zeer fijn zand en klei. Het kalkgehalte neemt toe naar de top van de formatie, met name in de top komen kalksteenbankjes ingeschakeld in de zandsteen voor. De gemiddelde permeabiliteit van de zanden is met 50 mD aan de lage kant. Daarentegen komen ingeschakeld tussen de kleien hoger permeabele zandbanken voor met waarden tussen 200 en 600 mD (RGD, 1985). Het Zand van Brussel wordt of is plaatselijk aangewend voor balneologische toepassingen. In Ameland, Aqua Plaza, ligt het zand op 750 m diepte en heeft het een temperatuur van 37°C. In Nieuweschans, Fontana, ligt het op 633 m diepte en heeft het een temperatuur van 28°C.

Formatie van Breda

De Formatie van Breda bestaat uit een afwisseling van zand en kleilagen. In de formatie kunnen zes verschillende zandlagen worden onderscheiden. Deze zandlagen verschillen zowel in de regionale verbreiding als in lithologische karakteristiek. De formatie is relatief dik ontwikkeld in actieve dalingsgebieden als bijvoorbeeld de Roerdal Slenk. Ook in het algemene dalingsgebied van het Zuiderzee Bekken komen relatief zandlichamen voor.

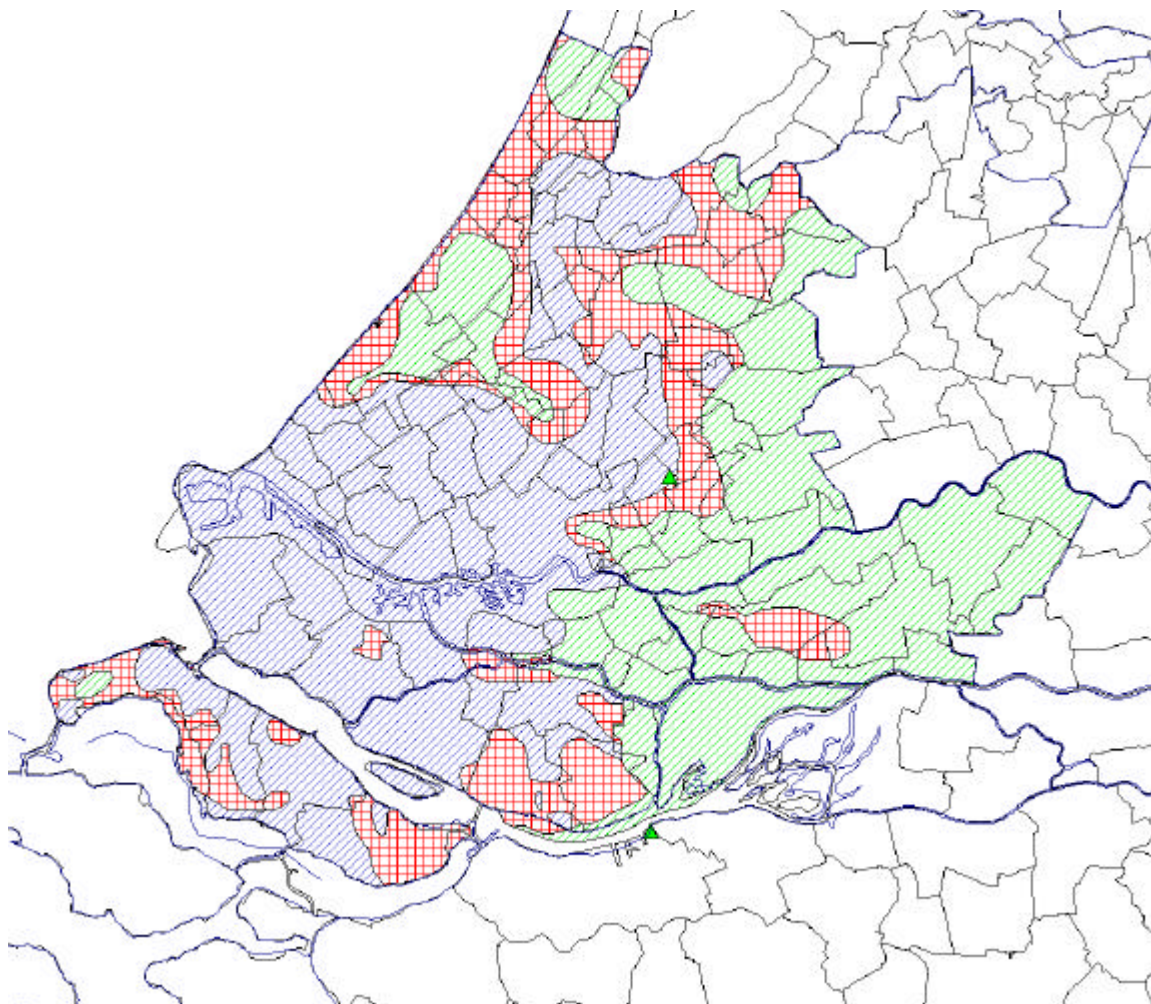
De eerste zandlaag bestaat uit zeer grof zand met laag kleigehalte, goed gesorteerd. Het zand is hier glauconietrijk, een zwaar mineraal dat een marien afzettingsmilieu karakteriseert. Dit zand is afgezet in een kustnabije tot strand omgeving. Dit resulteert in een hoge permeabiliteit (in de orde van enkele Darcy's) en porositeit. Deze laag wordt tevens bedekt door een afsluitende kleilaag, hetgeen weglekken van eventueel geïnjecteerd water voorkomt.

De andere zandlichamen bevatten relatief meer klei en zijn slechter gesorteerd. Gegevens over de porositeit en permeabiliteit zijn hier echter niet over beschikbaar. Verwacht wordt dat de gemiddelde porositeit 30-35% is en dat de permeabiliteit van de resterende zandlichamen ongeveer 50 mD is, terwijl de hoger permeabele zones in de zandlichamen permeabiliteiten van enige honderden mD kunnen bevatten.

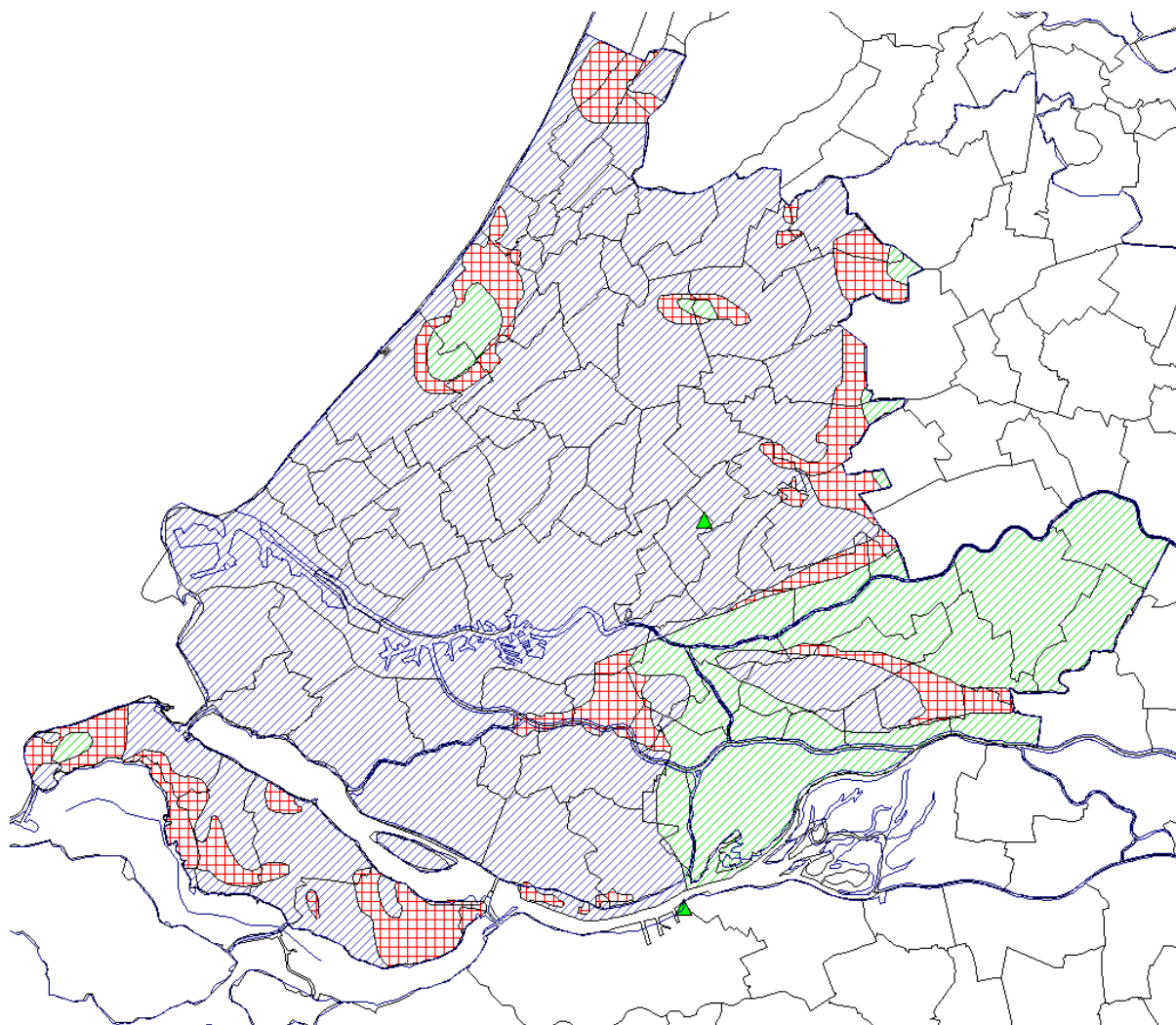
2.3.4 Potentiële gebieden voor energieopslag

Figuur 8 en Figuur 9 geven als voorbeeld een overzicht van de mogelijkheden die aanwezig zijn in het eerste en tweede watervoerende pakket in de provincie Zuid Holland. Hierbij is rekening gehouden met de beperkingen die door de provincie worden opgelegd. Binnen de in rood gearceerde gebieden is warmte- en koudeopslag niet gewenst. Binnen de groen en blauw aangegeven gebieden is opslag mogelijk. Voor de rest van het land zijn in principe ook dergelijke kaarten te genereren door bewerking van gegevens uit het REGIS-systeem van TNO-NITG in combinatie met provinciale eisen.

Uiteraard zijn er binnen de aangegeven gebieden zones aan te geven die meer of minder geschikt zijn. Dit is afhankelijk van de hydraulische en reservoir eigenschappen binnen deze zones. Ofschoon koudeopslag reeds op veel plaatsen in Nederland wordt toegepast, is voor de succesvolle toepassing van koude- en warmteopslag, in gebieden met gecompliceerde geohydrologische condities of in gebieden waar gevaar voor interactie tussen verschillende opslagsystemen bestaat, een gedegen kennis van de ondergrond en de geohydrologische condities noodzakelijk. Met behulp van het REGIS-systeem van TNO-NITG is het mogelijk dit eveneens gedetailleerd in kaart te brengen.



Figuur 8 Koude- en warmteopslagmogelijkheden in het eerste watervoerende pakket (provincie Zuid-Holland)
Rood: ongewenst; Blauw: zout water, in principe geschikt; groen, zoet water, in principe geschikt.



Figuur 9 Koude- en warmteopslagmogelijkheden in het tweede watervoerende pakket (provincie Zuid-Holland)
 Rood: ongewenst; Blauw: zout water, in principe geschikt; groen, zoet water, in principe geschikt.

2.3.5 Tuinbouwgebieden en aquiferlocaties

Figuur 10 geeft de locatie van de huidige en aanbevolen toekomstige Nederlandse tuinbouwgebieden weer. Vergelijking met Figuur 7 tot en met Figuur 9 laat zien dat de bestaande glastuinbouwgebieden in de provincie Zuid-Holland boven potentieel geschikte aquifers liggen, zowel voor warmtewinning als voor warmte- en koudeopslag. Van de aanbevolen nieuwe tuinbouw gebieden liggen alleen die in Friesland, Zuid-Holland en N-Brabant boven of nabij potentieel geschikte aquiferlocaties voor warmtewinning. Voor wat betreft warmte-opslag in aquifers bij de toekomstige locaties kan gezegd worden dat ondiepe aquifers wel bij of nabij deze gebieden voorkomen, maar of deze aquifers in alle gevallen bruikbaar zijn is onzeker. Er is alleen voor Zuid-Holland voldoende detailinformatie beschikbaar om vast te stellen dat er mogelijkheden zijn voor warmte- en koudeopslag in de tweede laag.



Figuur 10 Locaties van glastuinbouwbedrijven in Nederland; Nieuw in te richten gebieden in rood aangegeven

2.4 Ervaringen

2.4.1 Aardwarmtewinning

In Nederland is er geen ervaring met aardwarmtewinning. Ervaring opgedaan in Duitsland, Denemarken en Frankrijk heeft voornamelijk betrekking op stadsverwarming. In Hongarije waar een zeer hoge temperatuurgradiënt voorkomt, wordt wel geothermie toegepast voor de tuinbouw. De gebruikte verwarmingssystemen zijn niet te vergelijken met die in Nederland (omvangrijke luchtverhitters). Er zijn daar veel milieuproblemen omdat geen injectie wordt toegepast.

2.4.2 Warmte- en koude-opslag

In Nederland zijn inmiddels vele projecten op het gebied van koudeopslag gerealiseerd. In de loop der jaren is de terugverdientijd van koudeopslag projecten in Nederland sterk gedaald. Uit gegevens van NOVEM blijkt dat de terugverdientijd van 70% van een aantal geïnventariseerde projecten minder was dan 6 jaar. Warmteopslag is daarentegen veelal nog niet rendabel. Een technische beperking van warmteopslag is, dat als gevolg van de hogere temperatuur, in de watervoerende laag ongewenste chemische processen optreden, die verstopping kunnen veroorzaken. Om dit te voorkomen is het noodzakelijk om het injectiewater te behandelen, hetgeen de rentabiliteit nadelig beïnvloedt.

Seizoensmatige koudeopslag in watervoerende lagen is bij uitstek milieuvriendelijk en kan een aanzienlijke besparing op de energierekening opleveren. Terugverdientijden van 5 jaar zijn realistisch. De koudeopslag verzorgt zomers de koeling van het koud-watercircuit voor een aantal luchtbehandelingskasten. De koelmachines die tot de oorspronkelijke installatie behoren kunnen worden ingezet wanneer de opslag te weinig koelcapaciteit heeft. 's Winters wordt de opslag afgekoeld door het water van de opslag in de luchtbehandelingskasten te koelen met de aangezogen koude buitenlucht.

Koudeopslag is in een aanzienlijk verder gevorderd stadium van ontwikkeling dan warmteopslag. De redenen zijn van financiële aard: voor ruimteverwarming is aardgas de aangewezen energiebron, daarentegen komt voor ruimtekoeling elektriciteit het meest in aanmerking. Elektriciteit, al dan niet geproduceerd in gas gestookte elektriciteitscentrales, is relatief duur. Verder wijkt de temperatuur bij warmte-opslag veel sterker af van de temperatuur van het grondwater dan bij koudeopslag, waardoor de thermische opslagverliezen groter zijn.

In ongeveer acht jaar tijd werd een koelvermogen op basis van koudeopslag van ca 12 MW_{th} in Nederland geïnstalleerd. Dat geschiedde voornamelijk in de utiliteitsbouw.

Klopstra en Geuzendam (2001) geven twee voorbeelden van projecten in de glastuinbouw waarbij koudeopslag wordt ingezet ten behoeve van grondkoeling, een Alstroemeria bedrijf te Poeldijk en een opkweekbedrijf te Rijsenhout.

Er is weinig of geen ervaring met de toepassing van ondiepe aquifers voor warmte- en koudeopslag in de glastuinbouw. In een recente inventarisatie van IVAM Environmental Research en Novio Consult (Klopstra en Geuzendam, 2001) worden drie voorbeeldprojecten genoemd (de aangegeven referenties betreffen gesprekken van de auteurs met bij de projecten betrokkenen):

1. Open tomatenkas in Nieuwerkerk a/d IJssel; Volgens Goudswaard (2000) wordt de aquifer niet gebruikt.
2. Praktijkexperiment voor proefstation te Naaldwijk; Hier wordt de aquifer niet daadwerkelijk aangelegd maar met behulp van een warmtepomp gesimuleerd (Schoonderbeek, 2000).
3. ECOS van GGR-Gas; Een op papier uitgewerkt concept dat nog niet in concrete projecten is gerealiseerd (Hoek, 2000).

Van andere projecten (Klootwijk, 2000) hebben Klopstra en Geuzendam geen details kunnen verkrijgen in verband met vertrouwelijkheid.

2.4.3 Regelgeving en vergunningen

Voor de aanleg van aquiferputten is een vergunning nodig van de lokale overheden (provincie en gemeente). De toepassing van energieopslagsystemen met aquifers (EOS) al dan niet in combinatie met warmtepompsystemen (WPS) wordt in de praktijk bemoeilijkt, doordat enkele technisch inhoudelijke aspecten inzake de bescherming van de bodem en het grondwater onvoldoende duidelijk zijn, terwijl ook de benodigde procedures uit de Grondwaterwet (Gw) en de Wet Bodembescherming (Bww) door de daarmee gemoeide tijd en kosten remmend werken.

De belangrijkste vragen en problemen bij het huidige gebruik van de bodem liggen op het gebied van de bodem - en waterkwaliteitsbeheersing; dit zijn:

- Onvoldoende inzicht in het milieu - effect van onverhoopte lekkage – bij zowel EOS als WPS , de mogelijkheden voor de risico beperking, en - indien noodzakelijk - de sanering daarvan;
- Onvoldoende kwaliteitseisen en kwaliteitsbeheersing bij het maken van boringen;
- Onvolledige uitwerking van de Zorgplicht (Art. 1.1a Wm en art 13 Wbb) welke, gelet op het karakter van deze wetten tot onzekerheden bij eventuele problemen later kan leiden;
- Onvoldoende inzicht in de effecten van de zich wijzigende temperatuur in de bodem; vooral op langere termijn;
- Onvoldoende inzicht in de beperkingen, die een verleende vergunning op grond van de Grondwaterwet inhoudt voor systemen in de nabijheid van het vergunde systeem;
- Tijdrovende en kostbare karakter van de huidige systematiek bij het verkrijgen vergunningen, of ontheffingen voor het toepassen van de systemen mede door onderzoek voor de aanvraag. Dit leidt tot onzekerheden over het tijdig verkrijgen van deze vergunningen/ontheffingen, en soms wordt daardoor afgezien van WPS en EOS..

Voor het oplossen van deze problemen is een project (BEB, 2001) opgezet met als doel:

Het formuleren van beleidsaanbevelingen voor bodembescherming bij de toepassing van EOS en WPS in de gebouwde omgeving, en het creëren van een bestuurlijk draagvlak, en acceptatie bij de markt daarvoor¹.

¹ De informatie in deze paragraaf is tot stand gekomen door de welwillende medewerking van de heer L. Wijshoff van Novem bv te Sittard.

3 Kasverwarming met aquifers

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de berekening van de mate waarin warmte uit aquifers, hetzij via warmtewinning hetzij via warmteopslag, aan de warmtevraag van tuinbouwkassen kunnen voldoen.

In hoofdstuk 2 is aangegeven op welke locaties geschikte aquifers aanwezig zijn. Ook is aangegeven in welk bereik de temperaturen en opbrengstdebieten van die aquifers zouden kunnen liggen. Deze zijn echter niet op voorhand per locatie bekend. Om die reden zijn de berekeningen van de dekkingsgraden uitgevoerd voor combinaties van temperaturen en debieten die het gehele bereik dekken.

De dekkingsgraden en energiebesparingen zijn met behulp van een kasklimaat-simulatieprogramma bepaald, waarin kas, gewas en aquifer zijn gemodelleerd.

Achtereenvolgens komen in dit hoofdstuk de volgende aspecten aan de orde:

- Gemodelleerde kas, kasinstallatie en teelten (referenties),
- Beschrijving van de berekeningsgevallen,
- Berekende warmtevraag van de referenties,
- De warmtedekkingsgraad voor verschillende brontemperaturen en debieten bij warmtewinning uit aquifers, alsmede voor verschillende verwarmingsconfiguraties,
- Effecten van de toepassing van aquifers op het primaire energieverbruik,
- Invloed van CO₂-dosering,
- Invloed van liberalisering gaswet.

3.2 Kasinstallatie en teelt

3.2.1 Kas en installatie

Voor de berekening van de standaard verbruiksgegevens per teelt is gebruik gemaakt van het simulatiemodel KASPRO (zie Bijlage 1). Uitgangspunt in de berekeningen is een moderne Venlo-kas. De klimaatregelaar die in het model gebruikt wordt, is vergelijkbaar met gebruikelijke regelaars zodat het gesimuleerde kasklimaat op eenzelfde manier gerealiseerd wordt als in de huidige tuinbouwpraktijk het geval is. Details van de Kasconstructie en de kasinrichting zijn beschreven door Swinkels *et al.* (2000).

Het fossiele energiegebruik (aardgas) van kassen wordt voor een deel bepaald door de behoefte aan CO₂. Omdat bij de inzet van alternatieve warmtebronnen zoals warmte uit aquifers, geen CO₂ wordt geproduceerd, is in de uitgangssituatie gerekend met CO₂-dosering uit een externe bron.

3.2.2 Teelten

In veel onderzoeksprojecten worden berekeningen gemaakt aan de hand van praktijkgegevens met betrekking tot de bedrijfsuitrusting en het binnenklimaat van karakteristieke tuinbouwbedrijven. Het gaat dan om moderne, innovatieve bedrijven die nu de trend zetten, maar in de nabije toekomst standaard zullen zijn. Om deze gegevens te standaardiseren en toegankelijk te maken zijn door Swinkels *et al.*, (2000) elf karakteristieke teelten beschreven. Deze elf teelten staan model voor de intensieve en extensieve glasgroenten-, snijbloemen- en potplantenteelt en geven zodoende een goede doorsnede van de tuinbouwsector. Bij de belichte teelten is er een flink warmteoverschot indien de elektriciteit wordt opgewekt met een warmtekracht installatie. In het onderzoek aan de "Kas van de Toekomst" voor de Floriade in 2002 is nog eens aangetoond dat in dat geval de inzet van een aquifer voor warmteopslag in combinatie met een warmtepomp geen lagere energiebehoefte maar juist een hogere energiebehoefte oplevert (Raaphorst *et al.*, 2001). Wel zou een belichte teelt, waarbij de benodigde elektriciteit met een WK-

installatie wordt opgewekt, voor een deel in de warmtebehoefte kunnen voorzien van andere gewassen in een cluster van bedrijven. Of daarmee een gunstiger behoeftepatroon van deze cluster ten aanzien van het gebruik van bodemwarmte ontstaat is door ongelijktijdigheid van warmteoverschot en warmtevraag bij de verschillende bedrijven onzeker.

Uit de elf standaardteelten is voor dit project een selectie gemaakt bestaande uit:

- tomatenteelt met scherm
- tomatenteelt zonder scherm
- chrysantenteelt met assimilatiebelichting
- bedrijvencluster

Naarmate de warmtebehoefte van een teelt hoger is zal naar verwachting meer bespaard kunnen worden door de inzet van bodemwarmte. Omdat voor de standaardbedrijven die door Swinkels zijn beschreven, door de optimale inzet van de bedrijfsuitrusting ten opzichte van de huidige praktijk een relatief laag energiegebruik wordt bereikt, is er voor gekozen om naast de "standaardteelt tomaten" voor dit gewas tevens het energiegebruik te berekenen voor de inzet van de bedrijfsuitrusting die meer met de huidige praktijk overeenstemt. In dit specifieke geval wordt er dan geen scherm ingezet. Gebruik van energieschermen levert in het algemeen een vlakker warmtevraagpatroon op. De resultaten van de tomaten met en zonder scherm staan dan ook model voor de meeste warm gestookte teelten.

Om een beeld te krijgen van de effecten bij andere teelten is ook de "standaardteelt belichte chrysanten" geselecteerd. Bij deze teelt wordt een deel van de warmte door de lampen ingebracht.

In nieuwe tuinbouwgebieden zal clustering van bedrijven zeker als optie worden overwogen, daarom is tenslotte gekeken naar de effecten bij een cluster van bedrijven geselecteerd uit de standaardbedrijven die door Swinkels zijn beschreven. Deze cluster is gebaseerd op een representatie van de landelijk gemiddelde mix van de in Nederland geteelde tuinbouwgewassen. Deze mix wordt in essentie goed gerepresenteerd door een oppervlakteverdeling van 21% met tomaten, 21% met paprika, 18 % met komkommers, 15% met belichte rozen, 15% met belichte chrysanten en 10% met potplanten (warm geteeld) (Bakker *et al.*, 1998). Voor de belichte teelten is het uitgangspunt dat de benodigde elektriciteit middels het openbare elektriciteitsnet wordt aangeleverd, zodat er geen verstoring van de warmtevraag door een warmte/krachtinstallatie is.

3.3 Berekeningen

3.3.1 Installatieconfiguraties

Er zijn twee groepen van berekeningen uitgevoerd. De eerste groep betreft die waarbij gebruikgemaakt wordt van warmtewinning uit dieper gelegen aquifers. De tweede groep betreft de situatie waarbij een minder diep gelegen aquifer wordt gebruikt voor de opslag van overtollige zomerwarmte die in de stookperiode weer wordt onttrokken.

De technische installatie in de kas, dat wil zeggen het deel na de warmtewisselaar die is aangesloten op de putten naar de aquifer, verschilt voor beide groepen van berekeningen.

In het geval van aardwarmtewinning wordt de warmtewisselaar aan de kaszijde parallel met de ketel aangesloten op de aanvoer en retour van de verdelers van het kasverwarmingssysteem.

In het geval van warmteopslag wordt het ondernet van het kasverwarmingssysteem in de zomer gebruikt om zo veel mogelijk overtollige warmte uit de kas af te voeren naar de warme put van de aquifer. Dit kan door de verdelers van het ondernet via kleppen direct aan te sluiten op de kaszijde van de warmtewisselaar. Tijdens de stookperiode wordt de stromingsrichting in de warmtewisselaar omgekeerd, zodat warm water uit de aquifer wordt opgepompt. Het temperatuurniveau is echter te laag om direct in de kas te gebruiken. Daarom wordt dit niveau eerst verhoogd met behulp van een warmtepomp. De warme zijde van de warmtepomp wordt parallel met de ketel op de aanvoer en retour van de verdelers van de kasverwarming aangesloten.

Naarmate het verwarmingsoppervlak in de kas groter is, zal bij gelijke warmtevraag de gemiddelde watertemperatuur in de verwarmingsnetten lager worden. Ook de retourtemperatuur van de verwarmingsnetten zal in dat geval dalen. Beide effecten zijn gunstig voor de verlaging van het gebruik van fossiele energie, zowel in het geval van aardwarmtewinning als in het geval van warmteopslag. Bij de aardwarmtewinning zal namelijk bij een gegeven waterdebiet bij een lagere vraagtemperatuur en bij een lagere retourtemperatuur meer warmte geleverd kunnen worden (zie ook paragraaf 2.2.2). Bij gebruik van een aquifer als warmteopslag zal de lagere vraagtemperatuur leiden tot een hogere COP (coëfficiënt of performance) van de warmtepomp, waardoor deze minder (met fossiele brandstof opgewekte) aandrijfenergie nodig heeft.

Om deze reden is als variant voor de berekeningen met de aquifertoepassing een vergroot verwarmingsoppervlak toegepast ten opzichte van de standaardteelten, die als referentie dienen. De vergroting van het verwarmingsoppervlak kan op verschillende manieren worden gerealiseerd. In dit project zijn naast het standaard buizenet drie opties doorgerekend die relatief eenvoudig in de praktijk zijn te implementeren:

- Vergroting van de diameter van de buizen van het ondernet van 51 naar 70 mm en vergroting van het aantal buizen in het ondernet door het aantal strangen te verdubbelen.
- Vergroting van de diameter van de buizen van het ondernet van 51 naar 70 mm en vergroting van het aantal buizen in het ondernet door de lengte van de strangen te verdubbelen.
- Handhaven van de diameter van de buizen van het ondernet van 51 mm en vergroting van het aantal buizen in het ondernet door de lengte van de strangen te verdubbelen.

Bij de toepassing van de aquifer voor warmteopslag moet er in de zomer met behulp van de buizen van het ondernet van het verwarmingssysteem, warmte uit de kas worden geoogst en in de aquifer worden opgeslagen. Voor de meeste teelten is het nodig een vergroot verwarmend (in dit geval koelend) oppervlak te hebben om voldoende warmte te kunnen oogsten. In die gevallen vervalt de optie met het standaard verwarmingssysteem (\varnothing 51 mm) en zijn alleen de bovengenoemde opties met vergroot oppervlak doorgerekend.

In de standaard teelten (referenties) wordt gebruik gemaakt van een minimumbuis temperatuur. Bij de toepassing van een vergroot buisoppervlak zou dit leiden tot een veel te grote warmtetoever in de kas. Daarom is bij de berekeningsvarianten met vergroot oppervlak de minimumbuis uitgeschakeld. Om duidelijk te maken welke effecten zijn toe te schrijven aan de uitschakeling van de minimumbuis en welke aan de toepassing van de aquifer, is het energiegebruik van de standaardteelten ook nog berekend met uitgeschakelde minimumbuis.

3.3.2 Aquiferconfiguraties

In de berekeningen met aquifers voor warmtewinning zijn alle combinaties gebruikt van de brontemperaturen 75, 80 en 85 °C en maximale waterdebieten 100, 150 en 200 m³/h. Zoals in paragraaf 2.2.2 al is aangegeven, is het vermogen en de maximale warmtelevering afhankelijk van de gerealiseerde retourtemperatuur. De retourtemperatuur wordt bepaald door de gewenste kasluchttemperatuur en het aan te houden temperatuurverschil tussen verwarming en kaslucht om voldoende warmte over te dragen. Wanneer we uitgaan van een retourtemperatuur van 30 °C (10 °C boven de kasluchttemperatuur), dan kan de beste bron een vermogen van 13,6 MW_{th} leveren bij een jaaropbrengst van ca. 430 TJ en de slechtste bron een vermogen van 8,4 MW_{th} en een jaaropbrengst van ca. 265 TJ. Het areaal dat door een aardwarmtebron wordt voorzien van warmte is gevarieerd tussen 1 en 100 hectare.

Bij de berekeningen met aquifers voor warmteopslag worden de temperaturen bepaald door het ontwerp van het buizenet dat in de zomer warmte moet verzamelen en het ontwerp van de warmtepomp. In de in paragraaf 3.3.1 beschreven configuraties is dat voor de warme put 15 °C en voor de koude put 5 °C. Het maximale waterdebiet is voor deze gevallen op 50 of 75 m³/h. De slechte put heeft een maximaal vermogen van ca. 620 kW_{th} en de beste anderhalf maal zoveel. De jaaropbrengst is gelijk aan de hoeveelheid warmte die in de zomer geoogst kan worden, de aquifer moet immers thermisch in evenwicht blijven. Om dit te bereiken zijn steeds berekeningen uitgevoerd met een aantal verschillende warmtepompcapaciteiten, zodat de best passende capaciteit geselecteerd kan worden.

Bij de berekeningen met warmteopslag is de horizontale doorsnede van de aquifer steeds maximaal gelijk aan het kasareaal, zodat de uitkomsten onafhankelijk zijn van het kasoppervlak.

3.3.3 Doorgerekende configuraties

In Tabel 2 is aangegeven welke configuraties zijn doorgerekend voor de toepassing van warmtewinning uit de aquifer.

Tabel 2 Berekeningsgevallen voor warmtewinning

diameter ondernet in mm (On)	aantal strangen tov referentie (Ns)	lengte strangen tov referentie (Ls)	minimum- buistemperatuur (Mb)
51	1	1	ja
51	1	1	geen
51	1	2	geen
70	2	1	geen
70	1	2	geen

In Tabel 3 is aangegeven welke configuraties zijn doorgerekend voor de toepassing van warmteopslag in de aquifer.

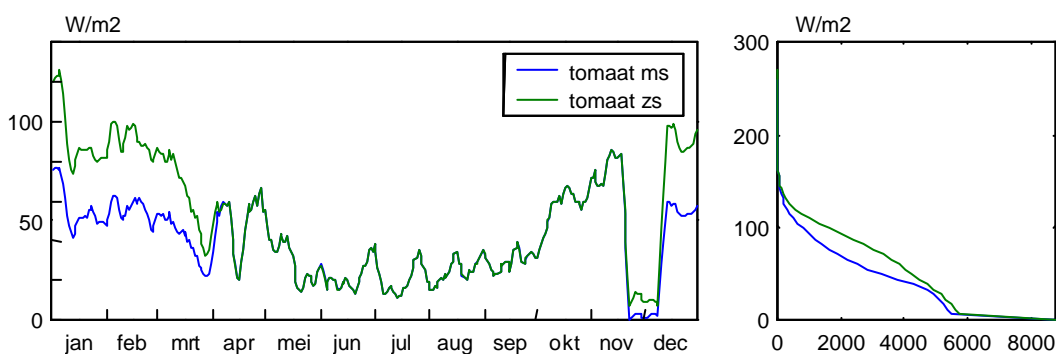
Tabel 3 Berekeningsgevallen voor warmteopslag

diameter ondernet [mm] (On)	aantal strangen tov referentie (Ns)	lengte strangen tov referentie (Ls)	aantal koelbuizen per kap *)	minimum buistemperatuur (Mb)	warmtepompvermogen [W _e m ⁻²]
70	1	1	2	geen	0; 10; 15; 20; en 30
70	2	1	2	geen	0; 10; 15; 20; en 30
70	1	2	2	geen	0; 10; 15; 20; en 30
51	1	2	2	geen	0; 10; 15; 20; en 30

*) bij chrysanten is i.v.m. de geringere warmtebehoefte steeds 1 koelbuis per kap gebruikt

3.4 Warmtevraag

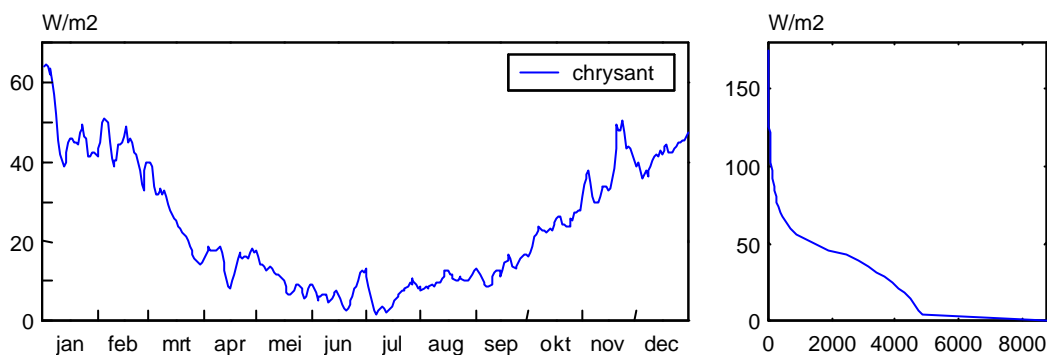
Voor de in paragraaf 3.2.2 beschreven teelten is de warmtevraag berekend. In Figuur 11 is voor de tomatenteelt met en zonder scherm de etmaalgemiddelde warmtevraag weergegeven. Doordat in de zomermaanden het scherm niet gebruikt wordt, is er in deze periode geen onderscheid in warmtevraag. In het rechterdeel van dit figuur is de jaarbelastingduurkromme van beide teelten weergegeven.



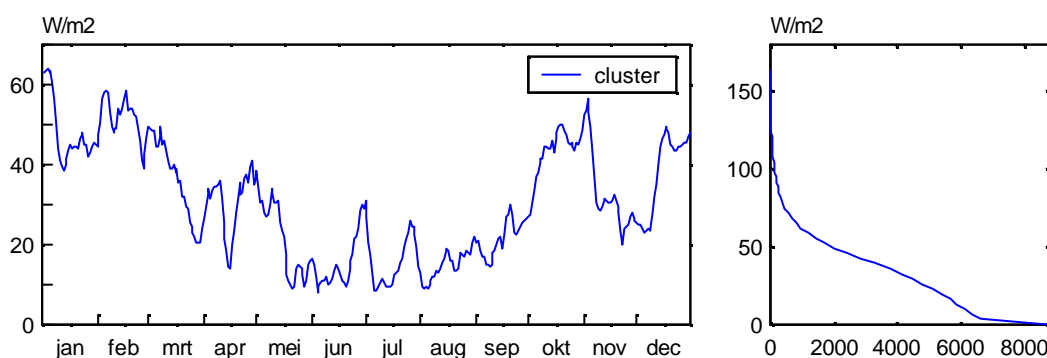
Figuur 11 Etmaalgemiddelde warmtevraag en de jaarbelastingduurkromme van een tomatenteelt met en zonder scherm.

Het effect van de teeltwisseling (eind november, begin december), wanneer de kas wordt koud gezet, is duidelijk te herkennen in het vraagpatroon.

In Figuur 12 en Figuur 13 zijn dezelfde gegevens weergegeven van respectievelijk de belichte chrysantenteelt en de cluster van bedrijven. Het effect van de teeltwisseling is bij de bedrijvencluster duidelijk minder zichtbaar dan voor het tomatenbedrijf alleen.



Figuur 12 Etmaalgemiddelde warmtevraag en de jaarbelastingduurkromme van een belichte chrysantenteelt



Figuur 13 Etmaalgemiddelde warmtevraag en de jaarbelastingduurkromme van een bedrijvencluster.

In Tabel 4 is van de 3 teelten en de bedrijvencluster de jaarlijkse warmtevraag met en zonder gebruik van minimumbuis weergegeven.

Tabel 4 Totale jaarlijkse warmtevraag in m^3 a.e. per m^2 ($35,12MJ$ per m^3) voor 3 teelten en bedrijvencluster met en zonder minimumbuis

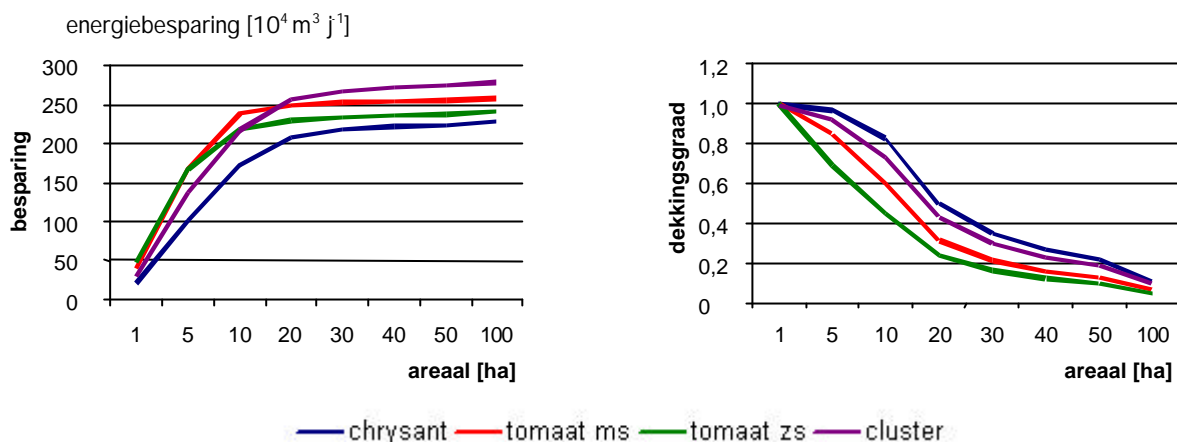
teelt	met minimumbuis	zonder minimumbuis
tomaat met scherm	39,7	35,5
tomaat zonder scherm	48,4	44,4
chrysant met belichting	n.v.t.	20,9
bedrijvencluster	29,6	27,5

3.5 Effect gebruik aquifers op primaire energiebehoefte

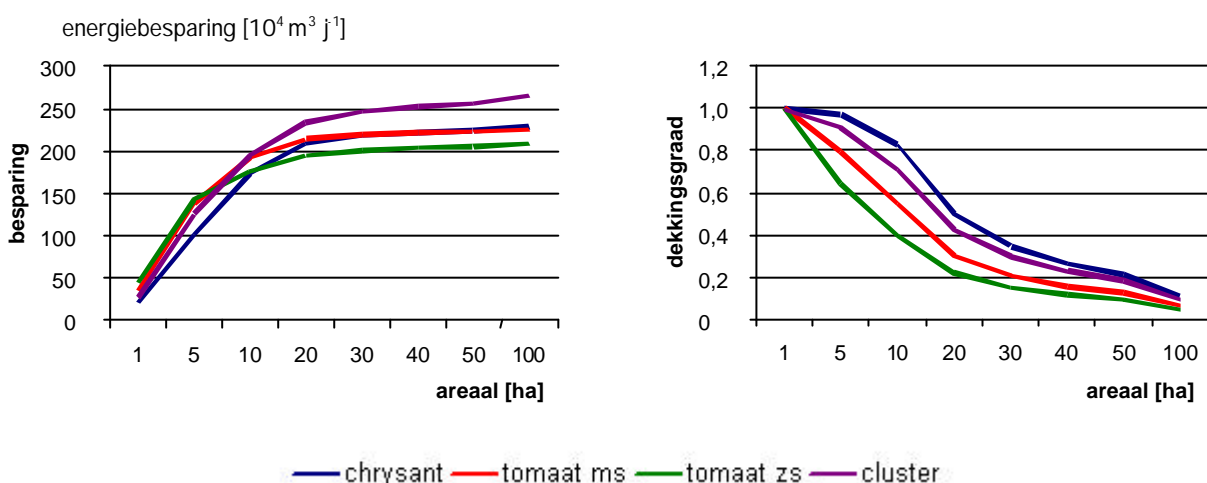
3.5.1 Dekkingsgraden en energiebesparing

De berekeningen van de in paragraaf 3.3.3 beschreven configuraties leveren een veelheid van besparingscijfers en dekkingsgraden op. Voor de overzichtelijkheid zijn de resultaten in tabelvorm opgenomen in Bijlage 2 en beperken we ons hier tot enkele hoofdlijnen. Om te beginnen geven de grafieken in Figuur 14 tot en met Figuur 18 de besparingen op ketelwarmte en de dekkingsgraden door aardwarmte

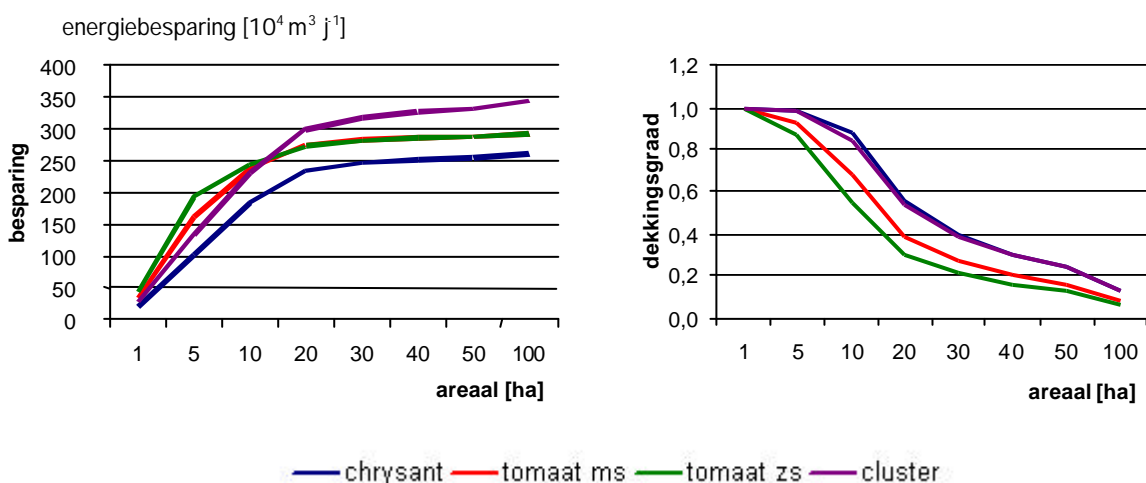
te zien bij de inzet van de slechtst leverende aardwarmte bron (75°C en 100 m³/h) als functie van het areaal dat bediend wordt voor de verschillende doorgerekende opties.



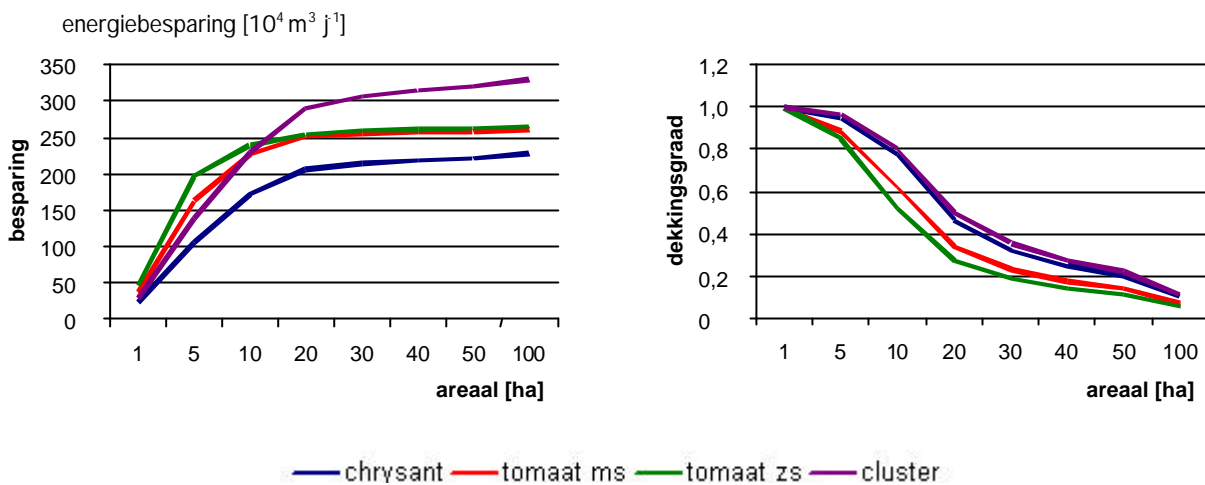
Figuur 14 Energiebesparing en dekingsgraad bij On51, Ns1, Ls1, Mb (configuratie referentie)



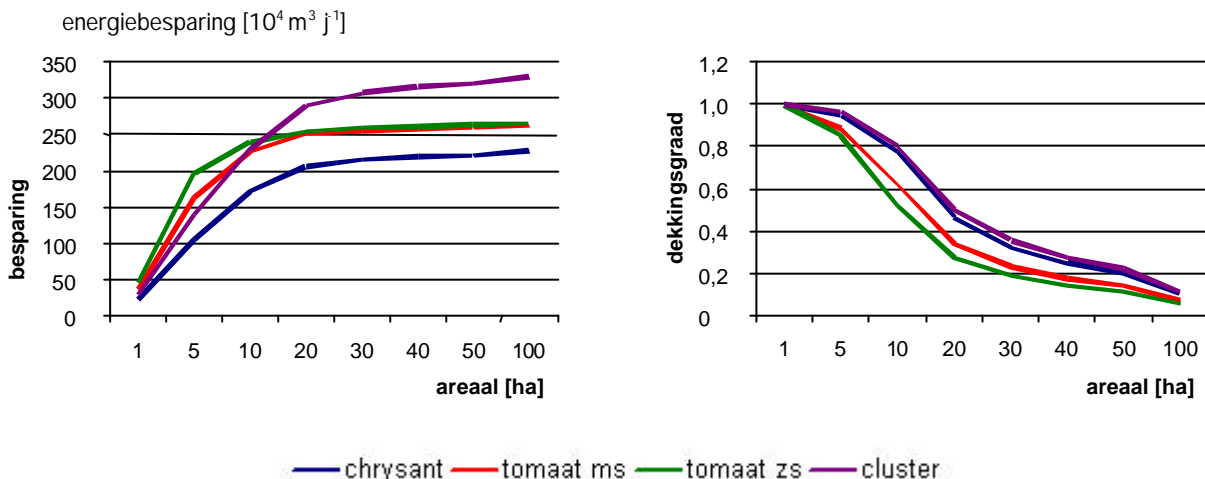
Figuur 15 Energiebesparing en dekingsgraad bij On51, Ns1, Ls1, Mbgeen



Figuur 16 Energiebesparing en dekingsgraad bij On51, Ns1, Ls2, Mbgeen



Figuur 17 Energiebesparing en dekkingsgraad bij On70, Ns2, Ls1, Mbgeen

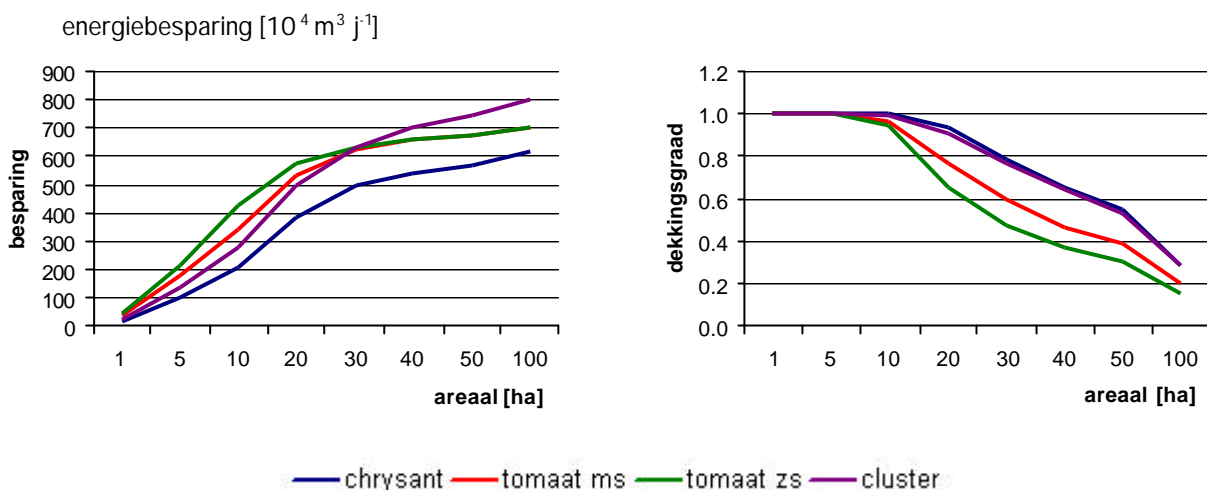


Figuur 18 Energiebesparing en dekkingsgraad bij On70, Ns1, Ls2, Mbgeen

In Figuur 19 worden de dekkingsgraad en energiebesparing getoond voor de best leverende bron (85°C en $200 \text{ m}^3/\text{h}$) bij de meest besparende configuratie van de installatie in de kas namelijk diameter verwarmingsbuizen ondermet 51 mm (On51), aantal strangen ten opzichte van de referentie 1 maal (Ns1), lengte strangen ten opzichte van de referentie 2 maal (Ls2) en geen minimum buis (Mbgeen).

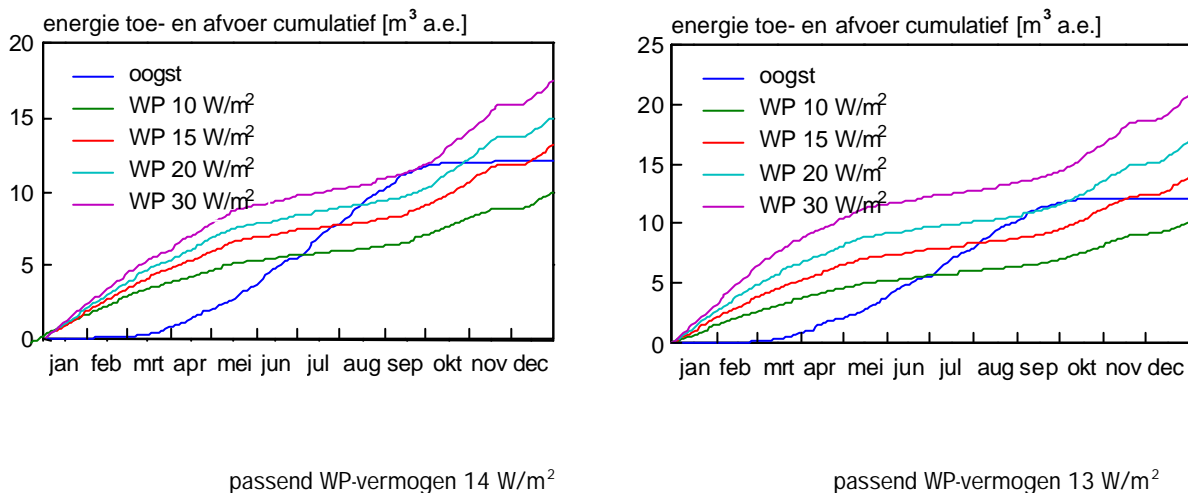
De trend is duidelijk, naarmate het aangesloten areaal toeneemt, neemt de energiebesparing toe en de dekkingsgraad uiteraard af. Boven 20 à 30 hectare, afhankelijk van de broncapaciteit, wordt de toename van de besparing met het areaal minder. In alle gevallen kan bij een bedrijvencluster meer bespaard worden dan met afzonderlijke bedrijven. Zoals verwacht, wordt door de belichting bij het chrysantenbedrijf steeds het minst bespaard. Bij dekkingsgraden van minder dan 40% (meer dan 20 ha) is er weinig verschil in de hoeveelheid bespaarde energie tussen de geschermdde en niet geschermdde tomaten.

Van de beschouwde kasuitrustingen geeft de configuratie met stranglengte twee maal die van de standaardkas de hoogste besparing. De buizen met vergrote diameter presteren minder goed door de lange responstijd bij opwarmen. Hierin zou verbetering kunnen worden gebracht door aanpassingen in de klimaatregelaar en/of toepassing van aangepaste verwarmingselementen (bijv. druppelvormige buis).



Figuur 19 Dekkingsgraad en energiebesparing bij On51, Ns1, Ls2, Mbgeen

Bij de bron met de hoogste temperatuur en het hoogste debiet wordt natuurlijk het meeste gas bespaard. Bij de bron met 75°C en 100 m^3 per uur is de besparing tot $3,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ aardgasequivalenten per jaar en bij de bron met 85°C en 200 m^3 per uur is dat tot $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ a.e. per jaar. De jaarlijks opgepompte hoeveelheid water uit de aardwarmtebron varieert uiteraard sterk met het aangesloten areaal, het gewas en de retourtemperatuur. Bij de bron van 75°C en 100 m^3 per uur loopt dat op tot 83% van de jaarcapaciteit voor een areaal van 100 ha. bedrijvencuster. Voor de bestpresterende configuratie is dat bij de zelfde bron 62% met 100 ha. tomaten met scherm. Voor de bron met 85°C en 200 m^3 per uur wijken deze benuttingspercentages weinig af (respectievelijk 81 en 61%). Deze cijfers impliceren dat er bij deze arealen door een combinatie met lange termijn warmteopslag toe te passen nog 20 tot 40 % extra energie valt te besparen.



Figuur 20 Vullen met warmte (oogst) en legen met verschillende warmtepompvermogens van de aquifer gedurende het jaar bij tomaat met scherm (links) en zonder scherm (rechts).

In Figuur 20 is voor de tomatenteelt met en zonder scherm weergegeven hoe gedurende het jaar de warme put van een (ondiep gelegen) aquifer voor warmteopslag wordt gevuld met warmte (cumulatief) en hoeveel warmte er gedurende het jaar (cumulatief) aan die put wordt onttrokken bij verschillende warmtepompcapaciteiten voor het geval met buizen in het ondernet van 70 mm diameter en standaard lengte en standaard aantal van de verwarmingsstrangen. In dit geval blijft de aquifer thermisch in evenwicht

bij een warmtepompaandrijfvermogen van 14 W/m² voor de tomaten met scherm en 13 W/m² zonder scherm.

Voor alle andere gevallen is op gelijke wijze bepaald welke warmtepompcapaciteit past bij de opgeslagen hoeveelheid warmte.

In Tabel 5 is het warmtepompvermogen en de besparing weergegeven van de bestpresterende configuratie bij toepassing van aquifers als warmteopslag.

Tabel 5 Warmtepompaandrijfvermogen in W/m² en totale jaarlijkse besparing in m³ a.e. per m² voor 3 teelten en bedrijventcluster bij de best presterende configuratie

Teelt	WP-vermogen	Besparing	Beste configuratie
tomaat met scherm	14	7,1	On70, Ns1, Ls2, Mbgeen
tomaat zonder scherm	12	6,5	On70, Ns1, Ls2, Mbgeen
chrysant met belichting	28	6,7	On70, Ns2, Ls1, Mbgeen
Bedrijventcluster	15	5,6	On70, Ns1, Ls2, Mbgeen

On=diameter ondernet, Ns=aantal strangen tov ref, Ls= lengte strangen tov ref, Mb=minimumbuis

3.5.2 Invloed CO₂-dosering

De wijze waarop de CO₂ wordt gedoseerd heeft grote invloed op de dekkingsgraad door de warmte uit de aquifers. Immers indien CO₂ door de ketel moet worden geleverd, zal er door die ketel tegelijk warmte worden geproduceerd, die direct of via een warmtebuffer aan de kas wordt geleverd. Het gevolg is dat er minder warmte aan de aquifer zal worden onttrokken.

Om de invloed van eigen CO₂-voorziening met de ketel op de energiebesparing inzichtelijk te maken, zijn een aantal extra simulaties uitgevoerd, waarin de ketel in combinatie met een warmtebuffer wordt gebruikt om in de CO₂-vraag te voorzien.

In de simulaties wordt noch bij CO₂-doseren met zuivere CO₂, noch bij doseren met de ketel, warmte vernietigd (afluchten), daarom is er geen effect op het absolute niveau van de warmtevraag, maar wel een groot verschil in hoeveelheid gedoseerde CO₂ en daarmee in gewasproductie, afhankelijk van de bereikte concentratie. In Tabel 6 is de hoeveelheid gedoseerde CO₂ bij de drie teelten en de bedrijventcluster voor doseren met de ketel, en voor doseren met zuiver CO₂ opgenomen. Dat er geen verschil in hoeveelheid gedoseerde CO₂ is tussen de tomatenteelt met en zonder scherm is logisch omdat de CO₂-dosering in principe overdag plaatsvindt wanneer het scherm geopend is, zodat er op die momenten geen verschil is tussen de teelten. De resultaten zijn vergelijkbaar met een praktijkevaluatie van het gebruik van warmtebuffers (De Zwart *et al.*, 1999). Dat er bij het doseren van zuiver CO₂ meer gedoseerd wordt komt doordat hierbij nooit gestopt hoeft te worden in verband met een volle warmtebuffer. De dosering van zuivere CO₂ wordt alleen gestopt bij het bereiken van het setpoint CO₂. Een nadere analyse van de productiever verschillen vergt beschouwing van de gerealiseerde CO₂-concentraties en vertaling van de verschillen in assimilatie naar producten, hetgeen buiten het kader van dit project valt.

Tabel 6 Jaarlijks gedoseerde hoeveelheid CO₂ bij 3 teelten en bedrijventcluster bij doseren met een ketel met buffer en bij doseren met zuiver CO₂.

teelt	ketel met buffer kg/m ²	zuiver CO ₂ kg/m ²
tomaat zonder scherm	38,6	47,0
tomaat met scherm	38,6	47,0
chrysant met belichting	23,2	44,8
cluster	27,8	43,7

De met de ketel gedoseerde CO₂ gaat gepaard met warmteproductie die niet uit de aquifer geleverd wordt. In Bijlage 3 zijn de besparingen op gas voor de teelt van tomaten met en zonder scherm voor een aantal configuraties beschreven indien met de ketel wordt gedoseerd. In Tabel 7 zijn die gegevens voor één

specifiek geval omgerekend naar niet benutte aardwarmte per m² kas met de best presterende configuratie (On51, Ls2, Ns1; het verlengde standaard ondernet).

Tabel 7 Jaarlijkse besparing door aardwarmte in m³ a.e. per m² bij CO₂-dosering met zuivere CO₂ en bij dosering met ketelrookgassen en de verdrongen aardwarmtelevering bij keteldosering voor 20 hectare tomaat met warmtelevering uit een aardwarmtebron van 85 °C en 200 m³/h bij de best presterende configuratie

	besparing bij doseren met zuiver CO ₂	besparing bij doseren met ketel met buffer	verdrongen aardwarmte door doseren met ketel
tomaat zonder scherm	28,9	27,5	1,4
tomaat met scherm	26,8	25,5	1,3

In dit specifieke geval wordt de besparing door gebruik van aardwarmte dus met ca. 5% verminderd indien ketelrookgasen worden gebruikt voor CO₂-dosering.

3.5.3 Invloed liberalisering

Tot voor kort was de gasprijs voor alle verbruikers in Nederland op hetzelfde gestaffelde systeem gebaseerd. Kleinverbruikers betaalden wel een hogere prijs dan grootverbruikers maar de prijs per m³ was alleen afhankelijk van de afgenomen hoeveelheid en de olieprijs op de wereldmarkt. Hier komt echter verandering in door de liberalisering van de energiemarkt. In een vrije energiemarkt is de klant vrij in het kiezen van een leverancier. De Gasunie zal de nieuwe gasprijs baseren op het Commodity/Diensten Systeem (CDS). Hierbij is er een gescheiden prijs voor gas (commodity) en transportcapaciteit (diensten). Voor de bepaling van de dienstprijs wordt o.a. de piekafname zeer belangrijk. In Tabel 8 zijn voor de teelt van tomaat met en zonder scherm (zonder minimum buis) de kengetallen weergegeven die van belang zijn voor de gasprijs in het CDS. In het geval van aardwarmtelevering is gekozen voor dezelfde configuratie als in Tabel 7.

Tabel 8 Kengetallen van belang voor gasprijs in het CDS voor 20 hectare tomaat met warmtelevering uit een aardwarmtebron van 85 °C en 200 m³/h bij de best presterende configuratie

Teelt	Jaarlijkse aardwarmtelevering m ³ a.e. per m ²	Piekvraag ketel m ³ a.e. per uur per ha	Jaarvraag ketel m ³ a.e. per m ²
tomaat zonder scherm	0	241	44,4
tomaat met scherm	0	240	35,5
tomaat zonder scherm	28,9	200	15,5
tomaat met scherm	26,8	195	8,3

In dit specifieke geval daalt door de inzet van aardwarmte de piekvraag duidelijk minder ten opzichte van de jaarvraag. In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op de bedrijfseconomische consequenties hiervan.

3.5.4 Verbetering van de benutting van aquifers

In de voorgaande paragrafen is besproken hoeveel energie bespaard kan worden met de toepassing van aardwarmte. De aanpassing van het verwarmingssysteem in de kas is daarbij beperkt gebleven tot oppervlaktevergroting. Daarbij hebben we enerzijds kunnen vaststellen dat niet alle vergrotingen van het verwarmingsoppervlak leiden tot het gewenste effect en anderzijds dat gedurende de zomerperiode de capaciteit van de aquifer in beperkte mate benut wordt.

Het is zeker mogelijk de benutting van de beschikbare aardwarmtecapaciteit te vergroten door een aantal aanvullende aanpassingen aan de kasuitrusting.

Het geringe of soms negatieve effect van vergroting van het verwarmingsoppervlak valt geheel toe te schrijven aan de respons van het verwarmingssysteem op de regelacties. Optimaliseren van temperatuurintegratie en toepassing van verbeterde regeltechnieken en of gebruik van aangepaste

verwarmingselementen zullen de negatieve effecten voor een zeer groot deel te niet doen, zodat ten volle kan worden geprofiteerd van de lagere retourtemperaturen die bij toepassing van vergrote verwarmingsoppervlakken worden gerealiseerd. In Tabel 9 is een indicatie gegeven van de mate van verbetering van de benutting van de aquifer die dan behaald zou kunnen worden.

Een tweede mogelijkheid om de beschikbare aardwarmte beter te benutten is door een verdere verlaging van de retourtemperatuur te bewerkstelligen. Dit kan niet passief in de kas zelf gebeuren, zoals in paragraaf 3.3.2 is aangegeven. Met behulp van naschakelen van een warmtepomp kan de retourtemperatuur echter wel worden verlaagd. De warmte die daarbij op een hoger temperatuurniveau vrijkomt, kan dan in de kas worden gebracht, waardoor het gevraagde waterdebiet uit de aquifer afneemt. Hierdoor kan weer een groter kasareaal op de aquifer worden aangesloten. Op welke wijze de extra warmte energetisch en economisch het voordeligst in de kas kan worden gebracht, vereist een optimalisatie die buiten het kader van dit project valt. We volstaan hier met aan te geven dat hierbij afgewogen moet worden: het temperatuurniveau aan de warme kant van de warmtepomp en het temperatuurniveau van de retourtemperatuur die beide van invloed zijn op de COP, parallel aansluiting op het aanwezige verwarmingssysteem of aanleggen van een extra verwarmingsnet. In Tabel 9 is een indicatie gegeven van de extra besparing die dan behaald zou kunnen worden.

Tenslotte willen we een optie aangeven om de belasting van de aardwarmtebron onafhankelijk te maken van de tijd van het jaar. Dit kan bereikt worden door continu met het maximale debiet warmte aan de aquifer te onttrekken en de warmte die in de kas niet nodig is, op te slaan in een grote lange termijn warmtebuffer. In perioden dat de capaciteit van de aardwarmtebron te kort schiet wordt de opgeslagen warmte uit deze buffer onttrokken. Hierbij moet wel bedacht worden dat de warmte uit de bron bij een relatief hoog temperatuurniveau vrij komt en dat opslag bij die temperatuur in een lange termijn buffer lastig is. De opslag zal dan bij een veel lager niveau moeten plaatsvinden, waardoor bij gebruik van de opgeslagen warmte weer een warmtepomp nodig is om het juiste temperatuurniveau te realiseren. De opslag kan bovengronds worden uitgevoerd, maar gebruik van een ondiep gelegen aquifer om de warmte in op te slaan is ook een mogelijkheid.

In Tabel 9 is een indicatie gegeven van de extra besparing die dan behaald zou kunnen worden.

Tabel 9 *Effect van opties voor betere benutting van aardwarmte bij een bron van 85°C en 200 m³/h uitgaand van een bedrijvencluster van 30 hectare met de best presterende configuratie (dekkingsgraad 77%)*

optie	benutting debiet	energiebesparing
beter regeling bij vergroot VO	57%	+3%
verlaging retourtemperatuur met WP naar 20°C	57%	+18%
verlaging retourtemperatuur met WP naar 5°C	57%	+45%
seizoensopslag	100%	+30%

De besparingen die worden bereikt met warmteopslag kunnen alleen verbeterd worden, indien methoden worden ontwikkeld, die de omvang van de zomerwarmte die wordt opgeslagen, vergroten. IMAG heeft daartoe inmiddels onderzoek verricht (Campen *et al.*, 2001) en voorstellen voor verdere ontwikkeling gedaan.

4 Economische aspecten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de bedrijfseconomische aspecten van de toepassing van aquifers in de glastuinbouw besproken. Daartoe worden in de volgende paragrafen zowel de kosten als de besparingen van aquifertoepassing beschouwd.

De toepassing van aardwarmte of energieopslag in de glastuinbouw hebben net als andere vormen van energievoorziening te maken met de liberalisering van de energiemarkt. In het Commodity en Diensten Systeem (CDS) wordt de gasprijs gesplitst in twee onderdelen: een prijs voor geleverde aardgas (commodity) en een aparte prijs voor het distributienet (diensten). Doordat de prijs voor de diensten min of meer als een vaste kostenpost (afhankelijk van een contractueel vastgelegde piekcapaciteit) moet worden gezien wordt het minder aantrekkelijk om te besparen op het gasverbruik. Levering van aardwarmte of opgeslagen warmte aan de glastuinbouw grijpt in op het verwarmen van de kassen met aardgas en op de CO₂ voorziening van de bedrijven.

In de praktijk valt ongeveer tweederde deel van de gedoseerde CO₂ samen met de warmtevraag op de glastuinbouwbedrijven. Dit deel van de warmtevraag kan niet worden opgevuld door levering van aardwarmte (of restwarmte) aan de glastuinbouw wanneer niet tegelijk externe CO₂ wordt geleverd. In de bedrijfseconomische berekeningen is dit een bijzonder complicerende factor. De teler moet een afweging maken tussen de kosten van externe warmtelevering, de kosten van externe CO₂-voorziening en de kosten van een complex intern bedrijfsproces waarbij beide zaken door elkaar heenlopen. De nieuwe CDS-gasprijs maakt het er niet eenvoudiger op om de zaken goed te kunnen overzien.

4.2 Berekeningsmethode

Om te kunnen bepalen voor welke prijs aardwarmte aan de glastuinbouw kan worden geleverd is in eerste instantie een aardgasequivalentieprij berekend. De aardgasequivalentieprij wordt verkregen door de jaarkosten van aardwarmtelevering te delen door de gasbesparing die door de levering op de glastuinbouwbedrijven wordt gerealiseerd. Dit is gedaan voor twee situaties.

In de eerste (verder AW (= aardwarmte) genoemd) is uitgegaan van de slechtste bron die 100 m³ warm water per uur met een temperatuur van 75 °C direct aan glastuinbouwbedrijven levert. Het warme water gaat de warmtewisselaar in en wordt daar door het retourwater van de kassen afgekoeld om met een temperatuur van circa 40 °C via een injectieput weer in de ondergrond te worden teruggepompt.

In de tweede situatie (verder AW + VVO (= vergroot verwarmend oppervlak) genoemd) wordt op de glastuinbouwbedrijven het verwarmend oppervlak verdubbeld, waardoor de retourtemperatuur van het water lager wordt en bij de injectieput van de aardwarmtebron een injectietemperatuur van circa 30 °C kan worden gerealiseerd.

Het verzorgingsgebied en de benutting van aardwarmte vanuit de aardwarmtebron kan door toepassing van warmtepompen om de injectietemperatuur van de aardwarmtebron verder te verlagen en warmteopslag van aardwarmte tijdens de zomermaanden in ondiepe aquifers om de opgeslagen warmte in de wintermaanden met behulp van warmtepompen weer bruikbaar te maken voor het verwarmen van de kassen ruim twee maal zo groot worden. Uiteraard heeft dit consequenties voor de investeringen in uitbreiding van het leidingennet op glastuinbouwbedrijven, warmtepompen, distributienet en aansluitkosten van de glastuinbouwbedrijven. Deze mogelijkheden vergen een uitgebreide optimalisatie en zijn in het kader van dit project niet doorgerekend.

Voor het gebruik van aquifers als energieopslagmedium is wel de combinatie van warmtepompen en warmteopslag (verder WO + WP genoemd) bekeken. Daarbij zijn de bedrijfseconomische aspecten onderzocht van de situatie dat water uit ondiepe aquifers in de zomermaanden wordt gebruikt voor het

koelen van de kassen, het in de kas opgewarmde water in ondiepe aquifers wordt opgeslagen en in de wintermaanden met warmtepompen weer bruikbaar wordt gemaakt voor het verwarmen van de kassen.

In alle situaties is uitgegaan van een aardwarmtelevering van ongeveer 30% van het piekvermogen. Wanneer op een gemiddeld glastuinbouwbedrijf een ketelinstallatie van 3,0 tot 3,5 MW per ha voorkomt dan ligt de warmtelevering via aardwarmte op een niveau van circa 1 MW per ha.

De berekeningen monden uit in een 'aardgas-equivalentieprijs' per bespaarde m³ aardgas. Hiervoor worden de jaarkosten van investeringen en exploitatie gedeeld door de berekende gasbesparing. Voorts is berekend wat het effect is van eventueel tegenvallende prestatie van de aardwarmtebron en de verschillen die ontstaan door uiteenlopende warmtedekking.

Het leveren van aardwarmte aan de glastuinbouw grijpt in op bedrijfsprocessen en op de tarieven van de gasprijzen in het CDS. Dat geldt met name voor de contractueel vast te leggen piekcapaciteit en de afgenomen hoeveelheid aardgas gedurende het jaar. Om te kunnen bepalen of aardwarmtelevering aantrekkelijk kan zijn voor de glastuinbouw zijn voor enkele standaardsituaties *break-even* prijzen berekend. Deze *break-even* prijzen geven het grensgebied aan waarbij warmtelevering van aardwarmte kostenneutraal kan plaatsvinden. Door de *break-even* prijzen te confronteren met de aardgas-equivalentieprijzen ontstaat inzicht in de economische mogelijkheden van aardwarmtelevering aan de glastuinbouw.

4.3 Kosten

4.3.1 Aardwarmtebronnen

4.3.1.1 Investeringskosten

Kenmerkend voor aardwarmtewinning zijn de hoge investeringskosten, vooral veroorzaakt door de hoge boorkosten gecombineerd met relatief lage exploitatiekosten.

In deze paragraaf wordt een voorbeeld gegeven van een kostenberekening. Voor meer gegevens zij verwezen naar TNO-NITG (2000).

De totale investeringskosten voor het geothermisch circuit bestaan uit een drietal componenten:

- de ondergrondse investeringen
- de bovengrondse investeringen
- de operationele kosten en onderhoudskosten

Hoewel ieder doublet uniek is in zijn ontwerp en hiermee in zijn kosten, kan men toch twee componenten aanwijzen die van zeer grote invloed zijn op de uiteindelijke kostprijs van het doublet. Deze twee zwaarstwegende factoren zijn de boorlengte en de diameter van de productie- *liner*. De kosten van de aanleg van een put zullen buitenproportioneel toenemen met de toename van een of beide van deze parameters.

Indien men de productieput afwerkt met een 7 inch productie- *liner*, en de diepte van het reservoir ca. 2000 meter bedraagt (voor Nederlandse omstandigheden een realistische aanname), en de totale boorlengte inclusief deviatie dientengevolge zo'n 2300 meter bedraagt, dan zal de totale ondergrondse investering zonder onderzoekskosten van de ondergrond ongeveer € 3,86 miljoen bedragen, hetgeen redelijk overeenkomt met de gemiddelde ondergrondse kosten, zoals die bekend zijn uit Duitsland en Frankrijk. Naast de ondergrondse investeringen moet gerekend worden met een bedrag van € 1,17 miljoen aan bovengrondse investeringen. Belangrijke onderdelen hierbij zijn de elektrische onderwaterpomp van de productieput, het geothermische circuit, de titanium warmtewisselaars, de supervisiekosten en dergelijke. De operationele kosten betreffen voornamelijk het energiegebruik dat nodig is voor de aandrijving van de productiepomp en de injectiepomp van een doublet. Om een indruk te geven van deze kosten is een standaard voorbeeld doorgerekend. Uitgaande van een kWh-prijs van € 0,113 en 5000 vollasturen, zullen

de totale pompkosten bij een debiet van 200 m³/uur ongeveer € 159.000 per jaar bedragen. Bij een debiet van 100 m³/uur moet worden uitgegaan van ongeveer € 72.000.

De praktijk (in Frankrijk en Duitsland) heeft verder uitgewezen dat voor bediening en onderhoud 3% van het totale investeringsbedrag per jaar in rekening moet worden gebracht.

4.3.1.2 Jaarlijkse kosten van aardwarmtewinning

De jaarlijkse kosten van de aardwarmtebron bestaan uit de afschrijvingen en de rentekosten. Bij een levensduur van 30 jaar en een lineair afschrijvingsverloop bedragen de afschrijvingen € 167.521 per jaar. De rentekosten worden berekend over 50% van het geïnvesteerde bedrag. Bij 6% rente bedragen de jaarlijkse rentekosten € 150.768.

Voor een bron met een opbrengst van 150 m³ per uur wordt uitgegaan van € 115.260 voor de operationele kosten (Tabel 10). In de berekeningen zijn voor bronopbrengsten van 100 tot 200 m³ per uur jaarlijkse exploitatiekosten van € 72.000 tot € 159.000 in rekening gebracht.

Tabel 10 Kosten aardwarmte per doublet in Euro (€) bij een bronopbrengst van 150 m³ per uur

	investeringskosten	levensduur jaren	jaarkosten			jaarkosten totaal
			rente	afschrijvingen	operationeel + onderhoud	
Investeringskosten	5 025 616	30	150 768	167 521		318 289
Operationele kosten					115 260	115 260
Onderhoudskosten					150 768	150 768
Totaal bron	5 025 616		150 768	167 521	266 029	584 318

4.3.2 Distributienet en aansluitkosten

De investeringen en de jaarkosten van het distributienet en de aansluitkosten van de bedrijven kunnen in de praktijk sterk uiteenlopen. De laagste kosten ontstaan wanneer een aardwarmtebron zich in de directe nabijheid van een aaneengesloten tuinbouwgebied bevindt dat alle aardwarmte met een hoog dekkingspercentage kan opnemen.

Bij een uitgebreid distributienet waarbij meerdere bedrijven met geringe dekkingspercentages moeten worden aangesloten nemen de kosten toe. Omdat bij de toepassing van aardwarmte in de glastuinbouw wordt uitgegaan van een bedrijvencluster met een beperkte warmtevraag en wisselende dekkingspercentages wordt in de berekeningen uitgegaan van vaste investerings- en jaarkosten per ha aangesloten glastuinbouw. Wanneer een groter areaal op de aardwarmtebron wordt aangesloten dan nemen de kosten dus lineair toe.

Tabel 11 Kosten distributienet en bedrijfsaansluitingen per ha in Euro (€)

	investeringskosten	levensduur jaren	jaarkosten			jaarkosten totaal
			rente	afschrijvingen	operationeel + onderhoud	
Distributienet	226 890	30	6 807	7 563		14 370
Aansluitkosten	45 378	30	1 361	1 513		2 874
Expl. + ond.kosten					1 815	1 815
Totaal	272 268		8 168	9 076	1 815	19 059

De jaarkosten om een hectare glastuinbouw op een aardwarmtebron aan te sluiten bedragen € 19.059 per ha. (Tabel 11)

Naast de distributie en aansluitkosten krijgen de glastuinbouwbedrijven nog te maken met de kosten die samenhangen met het vergroten van het verwarmend oppervlak. Door het vergroten van het verwarmend oppervlak wordt de warmte van de aardwarmtebron beter benut en dat leidt tot een lagere

injectietemperatuur. In de berekeningen is uitgegaan van een verdubbeling van het ondernet. Voor het verdubbelen van het ondernet worden jaarkosten van € 0,454 per m² aangehouden.

4.3.3 Warmteopslag

In de berekeningen is uitgegaan van een optimale configuratie van 3 ha glastuinbouw die met een doublet wordt aangesloten op een ondiepe aquifer met een gemiddeld te leveren thermisch vermogen van ca. 450kW/ha en een opslagcapaciteit van ca. 56.000 m³ aardgasequivalent per ha. De dimensionering van de warmtepomp en de gasmotor (150 kW/ha; zie ook Tabel 5) sluiten hierop aan. In de onderstaande tabel zijn de extra investeringen per ha vermeld die volgens het rapport 'Evaluatie systeemontwerpen voor ontvochtiging en energievoorziening' (Raaphorst *et al.*, 2001) bij investering in een nieuw te bouwen tomatenkas (niet volledig gesloten) nodig zijn bij toepassing van warmteopslag. In het genoemde rapport zijn de jaarkosten berekend door over alle investeringen 10% afschrijvingen en 2 % onderhoudskosten te rekenen. De totale jaarkosten komen dan uit op € 16.185. Bij toepassing van de in "Kwantitatieve Informatie voor de glastuinbouw 2000-2001" vermelde percentages voor afschrijving en onderhoudskosten komen de jaarkosten uit op € 11.447 per ha. (Tabel 12)

Tabel 12 Berekende jaarkosten van investeringen in warmteopslag voor 1 ha glastuinbouw in Euro (€)

investeringskosten	afschrijvingspercentage	jaarkosten			jaarkosten totaal	
		rente	afschrijving	onderhoud		
Aquifer	53 796	3	1 614	1 791	538	3 943
Vergroten koelnet	27 227	7	817	1 906	136	2 859
WP+GM+rookgasreiniger	47 324	10	1 420	4 732	946	7 099
Ketelinstallatie	-28 543	7	-856	-1 998	-571	-3 425
LT-buffers	8 092	7	243	566	162	971
Totaal	107 896		3 237	6 998	1 212	11 447

Deze jaarkosten betreffen uitsluitend de investeringskosten en de onderhoudskosten. Daarnaast moet rekening worden gehouden met de exploitatiekosten. Hierop wordt in paragraaf 4.6 dieper ingegaan.

4.4 Kosten- en batenanalyse

4.4.1 Inleiding

Alle kosten die gemoeid zijn met de levering van aardwarmte aan de glastuinbouw zijn toegerekend naar de jaarkosten die daarvoor gemaakt moeten worden. De kosten van de aardwarmtebron (doublet) liggen vrij vast met de kosten van het boren, de afwerking van de putten, infrastructuur, warmtewisselaars ed. De kosten van het distributienet en de aansluitingen van de bedrijven variëren met het areaal dat wordt aangesloten.

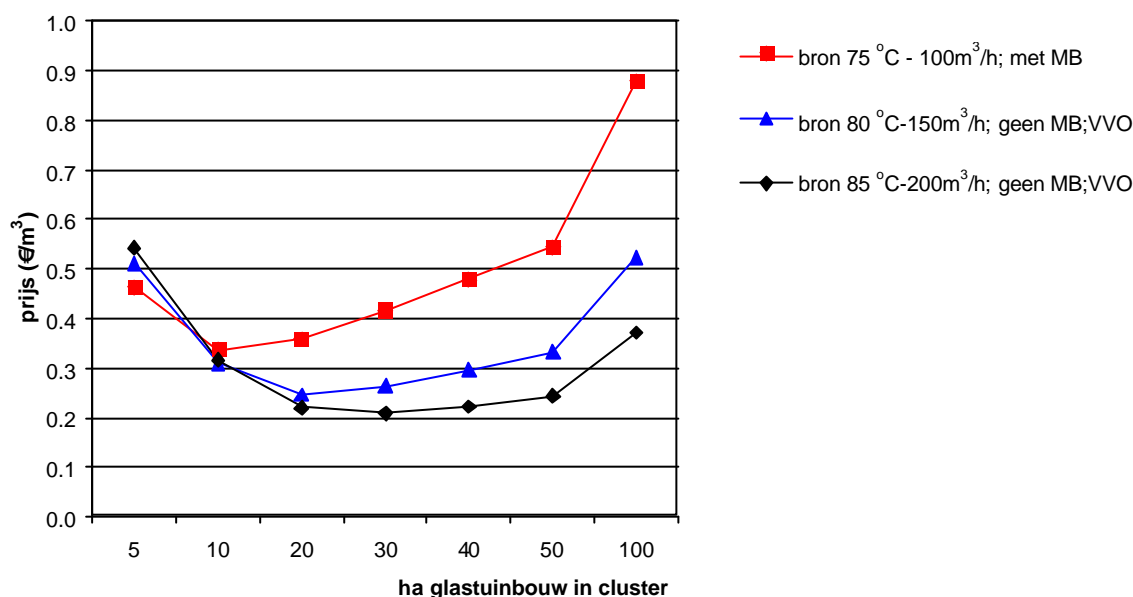
Tegenover de jaarlijkse kosten staan de jaarlijkse opbrengsten. De opbrengst van de aardwarmtebron kan worden gezien als een hoeveelheid warm water die gedurende een bepaalde tijd wordt geleverd en door de glastuinbouw tot een bepaald niveau wordt teruggekoeld. De opbrengsten van deze (aard)warmtelevering kan worden omgerekend in besparingen op de gasverbruiken, die anders met de normale ketelinstallatie zouden zijn gerealiseerd. Alle kosten van de opties aardwarmte (AW) en aardwarmte met vergroot (AW + VVO) worden uitgedrukt per m³ bespaarde aardgas.

In het Commodity en Diensten Systeem is het noodzakelijk om voor de volledige piekbelasting een leveringscontract af te sluiten, teneinde ook leveringsgarantie te krijgen voor het geval de aardwarmtelevering uitvalt. Dit werkt bijzonder nadelig voor externe warmtelevering. In de praktijk betekent dit dat ondanks de levering van aardwarmte aan glastuinbouwbedrijven de verwarmingsinstallaties als

reserv capaciteit aanwezig moet blijven. Misschien dat bij nieuwe vestigingen van bedrijven rekening gehouden kan worden met de warmtelevering door de ketelinstallatie af te stemmen op de aansluitwaarde van de aardwarmtebron of warmteopslag in de aquifer. In dat geval moet een verzekering worden afgesloten voor onverhoopte calamiteiten bij de warmtelevering.

4.4.2 Aardwarmtelevering aan cluster glastuinbouwbedrijven

Uit de tabellen van Bijlage 2 is de kostprijs per bespaarde m³ aardgas berekend voor de cluster van tuinbouwbedrijven voor de minst besparende optie (brongcapaciteit 75 °C; 100 m³ per uur met minimum buis (MB)), de meest besparende optie (brongcapaciteit 85 °C; 200 m³ per uur zonder MB met verdubbeld verwarmend oppervlak) en een zelfde configuratie met brongcapaciteit 80 °C; 150 m³ per uur



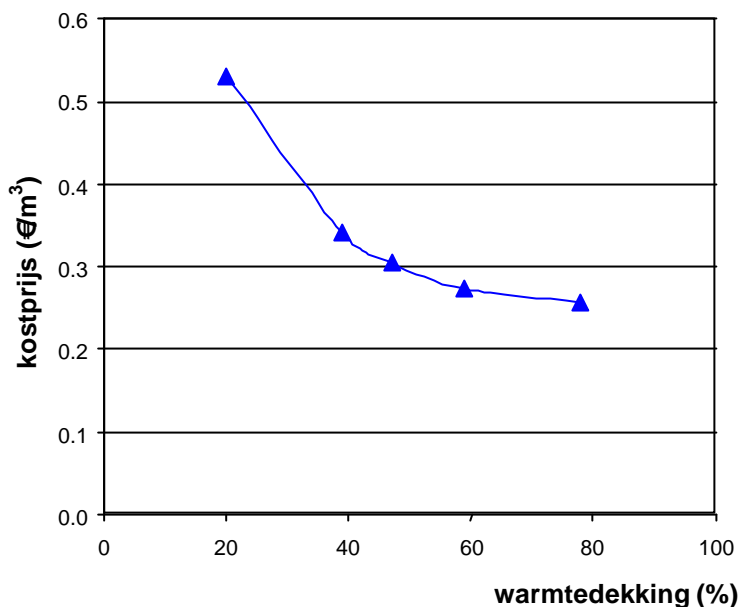
Figuur 21 Berekende 'kostprijs' van aardwarmtelevering (in Euro per bespaarde m³ aardgas) bij levering aan een uiteenlopend areaal glastuinbouw in een bedrijvencluster met een gemiddeld gasverbruik van 30 m³ per m² weergegeven voor drie verschillende bronopbrengsten

De minst besparende optie - die in Figuur 21 is weergegeven door een rode lijn - blijkt een laagste kostprijs te realiseren van ongeveer € 0,34 per bespaarde m³ aardgas bij een aangesloten areaal van ongeveer 10 ha glastuinbouw. Wanneer de capaciteit van de bron toeneemt en door een vergroot verwarmend oppervlak meer warmte aan de aardwarmtebron kan worden onttrokken – weergegeven door de blauwe en de zwarte lijn - daalt de kostprijs en kan er tevens een groter areaal op de aardwarmtebron worden aangesloten.

Uit Figuur 21 blijkt dat de optimale kostprijs van ongeveer € 0,21 per bespaarde m³ aardgas van de meest besparende optie bij ongeveer 30 ha ligt. Bij een kleiner aangesloten areaal drukken de kosten van de aardwarmtebron te zwaar op de gerealiseerde gasbesparingen. Wanneer meer areaal wordt aangesloten dan gaan de extra distributie- en aansluitkosten zwaarder doortikken dan de extra gasbesparingen die dan nog wordt behaald. Het gevolg is dat de kostprijs geleidelijk gaat stijgen.

Van de middelste optie (brongcapaciteit 80 °C; 150 m³/uur; geen MB) zijn de berekende kostprijzen uitgezet tegen de percentages warmte dekking die bij deze bedrijvencluster worden gerealiseerd. Bij een hoger dekkingspercentage, dus wanneer aardwarmte in een groter deel van de warmtebehoefte kan voorzien, daalt de kostprijs (Figuur 22). In Figuur 22 treedt nog wel een verstoring op doordat de waterafname van

aardwarmte niet in alle gevallen dezelfde is. Zo wordt bij 80% warmte dekking – wanneer een kleiner areaal op de warmtebron is aangesloten - slechts 45% van de beschikbare aardwarmte benut, terwijl dat in het geval van 20% warmte dekking – wanneer de aardwarmte over een groter areaal wordt verdeeld - 72% van de aardwarmte wordt benut (zie Bijlage 2).



Figuur 22 Berekende 'kostprijs' van aardwarmtelevering (aan een bedrijvencluster met een gemiddeld gasverbruik van 30 m³/m² bij een bronproductie van 150 m³ per uur) weergegeven voor uiteenlopende percentages warmte dekking

Uit het voorgaande wordt duidelijk dat factoren zoals de broncapaciteit en het percentage warmte dekking een grote invloed hebben op de kostprijs per bespaarde m³ aardgas bij de levering van aardwarmte. Daarnaast heeft de omvang van warmtevraag van glastuinbouwbedrijven invloed. In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de invloed die deze factoren afzonderlijk op de kostprijs hebben. Om hierbij een juist beeld te krijgen worden de overige omstandigheden zoveel mogelijk gelijk gehouden. Zoveel mogelijk is daarbij uitgegaan van een broncapaciteit van 80 °C; 150 m³/uur; een verdubbeld verwarmd oppervlak; 80% warmte dekking en 66% benutting van de aardwarmte die maximaal per jaar kan worden geleverd.

4.4.2.1 Uiteenlopende bronopbrengsten

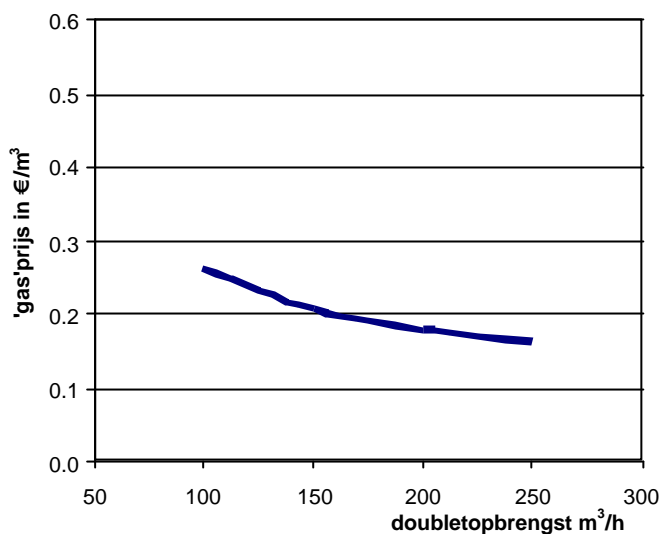
Een eerste belangrijke factor bij de kosten en opbrengsten van de aardwarmtelevering is de warmteopbrengst die met een doublet kan worden gerealiseerd. Bij een bron die per uur slechts 100 m³ i.p.v. de verwachte 200 m³ warm water produceert kan slechts de helft van het areaal van warmte voorzien worden. De distributie en aansluitkosten bedragen dan ook slechts de helft, maar de kosten van de bron blijven vrijwel gelijk. Uiteraard heeft dit zijn consequenties voor de 'kostprijs' van de bespaarde hoeveelheid aardgas zoals Figuur 23 aangeeft.

De doubletopbrengst van de aardwarmtebron blijft erg onzeker. Dat geldt zowel voor de temperatuur van het water als voor de hoeveelheid die per uur kan worden opgepompt. Om de verwachtingen rond aardwarmtewinning niet al te optimistisch voor te stellen is in de verdere berekeningen uitgegaan van een doubletcapaciteit van 150 m³ warm water per uur met een temperatuur van 80 °C.

4.4.2.2 Uiteenlopende warmte dekking percentages

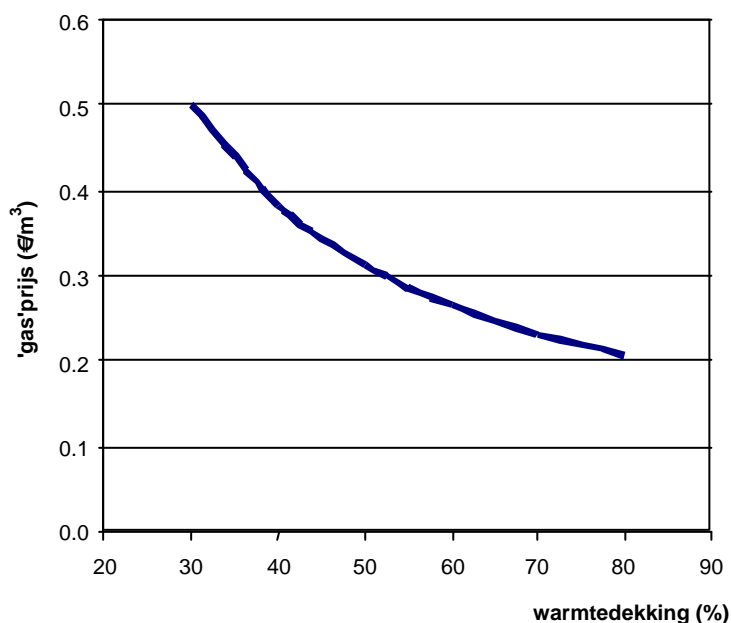
De tweede belangrijke factor is het percentage warmte dekking dat op glastuinbouwbedrijven bij aardwarmtelevering kan worden gerealiseerd. In theorie is het mogelijk om de volledige warmtebehoefte van een glastuinbouwbedrijf met aardwarmte te dekken. Dat vraagt echter een grote aansluitcapaciteit. Een bedrijf met een aansluitcapaciteit van 3 MW per ha kan ook bij extreem koud weer de kassen met aardwarmte verwarmen. Dat is niet efficiënt, want bij een bronopbrengst van 8,7 MW (150 m³ warm water

van 80 °C per uur dat na afkoeling met een temperatuur van 30 °C in de injectieput wordt teruggepompt) kan nog geen 3 ha op de bron worden aangesloten.



Figuur 23 Berekende 'kostprijs' van aardwarmtelevering (in € per m³ bespaarde aardgas) bij uiteenlopende doubletopbrengsten (m³ water per uur) van de aardwarmtebron en bij 80% warmte dekking en 66% warmte benutting

In de praktijk zal de bron dan slechts een zeer korte periode in het jaar zijn warmte optimaal kwijt kunnen. De meeste tijd wordt in deellast geproduceerd of moet de productie van de bron worden stopgezet. Wanneer de totale jaarkosten van de verschillende opties worden gedeeld door de in paragraaf 3.5 berekende gasbesparing dan ontstaat het beeld uit Figuur 24 .



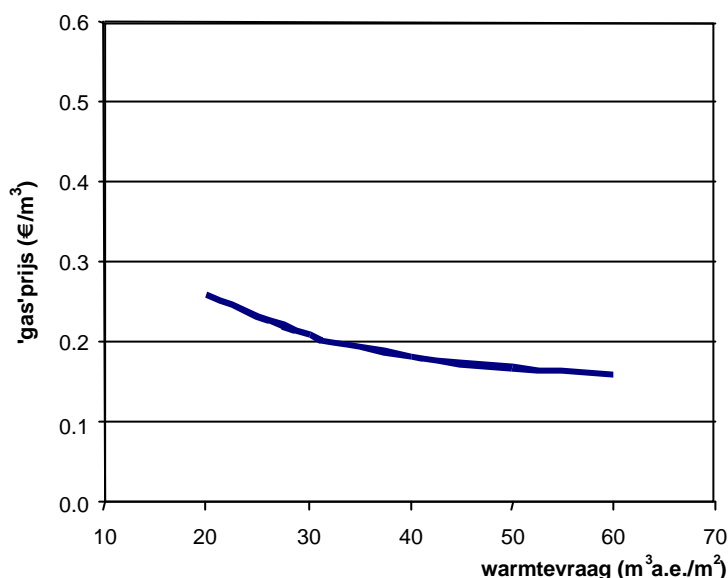
Figuur 24 Berekende 'kostprijs' van aardwarmtelevering (in € per m³ bespaarde aardgas) bij uiteenlopende percentages warmte dekking op glastuinbouwbedrijven en bij 66% warmte benutting van de aardwarmtebron

Afhankelijk van het warmte dekkingspercentage kan de aardwarmte worden geleverd voor een kostprijs (aardgas-equivalentieprijs) van circa € 0,20 (bij 80% warmte dekking) tot ruim € 0,49 (bij 30% warmte dekking) per bespaarde m³ aardgas. Uitgaande van een aansluitwaarde van circa 30% van het

piekvermogen kan een warmtedekking van ongeveer 80% worden gerealiseerd. Belangrijke voorwaarde om dat te kunnen bereiken is dat de CO₂-voorziening niet mag plaatsvinden met de rookgassen van de ketelinstallaties.

4.4.2.3 Uiteenlopende warmtevraag

Wanneer glastuinbouwbedrijven met een grotere warmtevraag op de aardwarmtebron worden aangesloten dan kan, uitgaande van een zelfde warmtedekkingspercentage (80%) en een gelijke benutting van de warmte van de aardwarmtebron (66%), een kostenbesparing worden gerealiseerd doordat met een kleiner distributienet kan worden volstaan en doordat minder bedrijfsaansluitingen nodig zijn.



Figuur 25 Berekende 'kostprijs' van aardwarmtelevering (in € per m³ bespaarde aardgas) bij uiteenlopende warmtevraag van glastuinbouwbedrijven

Bij een warmtevraag van 60 m³/m² bedraagt de gasprijs van de aardwarmte ongeveer € 0,16 en bij een warmtevraag van 30 m³/m² moet van een aardgas-equivalentieprijs van ongeveer € 0,20 worden uitgegaan (Figuur 25).

4.4.2.4 Onderling belang van invloedsfactoren

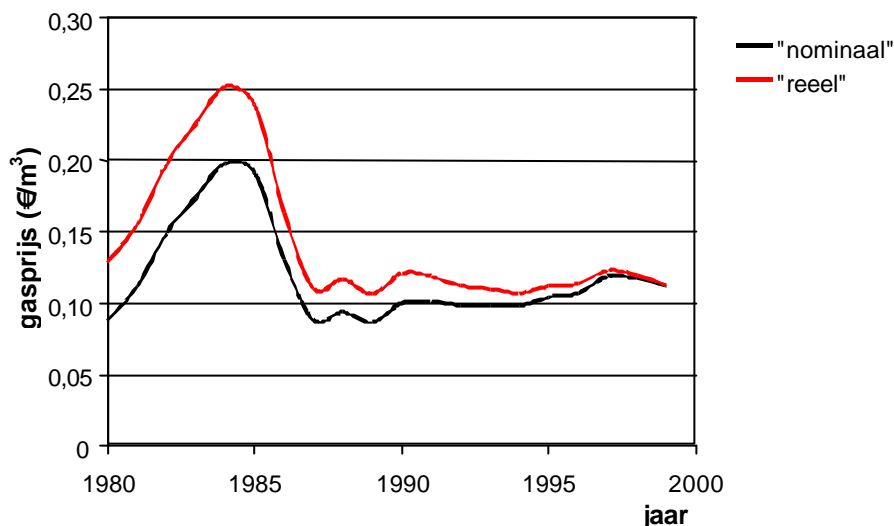
Wanneer de drie belangrijkste factoren die invloed hebben op de hoogte van de aardgas-equivalentieprijs met elkaar worden vergeleken dan blijkt het percentage warmtedekking veruit de grootste invloed te hebben. Bij een warmtedekkingspercentage van 80% bedraagt de gasprijs van de aardwarmte ongeveer € 0,20 en bij een dekkingspercentage van 40% moet van een aardgas-equivalentieprijs van ongeveer € 0,37 worden uitgegaan. Dat is bijna het dubbele.

De invloed van de doubletopbrengst van de warmtebron en van de warmtevraag van de glastuinbouwbedrijven op de aardgas-equivalentieprijs is veel geringer.

4.5 Aardwarmtelevering in het licht van gasprijzen

4.5.1 Gasprijsontwikkeling in het recente verleden

De berekende aardgas-equivalentieprijsen die in de vorige paragrafen zijn berekend, kunnen worden vergeleken met de huidige en de toekomstige gasprijzen. In Figuur 26 zijn de gasprijzen weergegeven die een ondernemer in de glastuinbouw in de afgelopen decennia voor aardgas moest betalen.



Figuur 26 Nominale en reële (index gecorrigeerd; 1999=100%) gasprijzen in € per m³ in de glastuinbouw in Nederland over de afgelopen twintig jaar.

Op basis van de tuindersgasprijs van de afgelopen twintig jaar, die weergegeven is in Figuur 26, blijkt dat aardwarmte zelfs in de meest gunstige optie gedurende de laatste 13 jaren geen haalbare zaak is geweest. Daarbij moet tevens bedacht worden dat externe warmtelevering een duidelijk prijsvoordeel moet geven om tuinders over de streep te trekken. De recente prijsstijgingen zouden gunstig kunnen uitpakken voor aardwarmtelevering. Met ingang van het jaar 2000 zijn de olieprijsen en de daaraan gekoppelde gasprijzen gestegen naar een niveau van ongeveer € 0,18 per m³, zodat aardwarmtelevering bij hoge percentages warmte dekking aantrekkelijk zou kunnen worden.

4.5.2 Aardgasprijs in het Commodity en Diensten Systeem.

In het CDS is de (diensten)prijs is mede afhankelijk van het maximale uurverbruik in een jaar en van het totale aantal m³ dat in een jaar wordt afgenomen. Een zo laag mogelijk piekverbruik en een verbruik dat gelijkmatig verdeeld is over het jaar is gunstig voor de hoogte van de dienstenprijs. Met name de dienstenprijs gaat grote verschillen in gasprijs tussen de bedrijven teweegbrengen. Voor individuele telers is het een kwestie van passen en meten hoe daar het beste op kan worden ingespeeld. In voorbeeldberekeningen zijn de vier situaties die in Tabel 8 zijn weergegeven doorgerekend binnen het nieuwe CDS. In Tabel 13 zijn de situaties uitgezet.

In situatie A1 is uitgegaan van tomatenbedrijven met energieschermen en een jaarverbruik van 35,5 m³a.e. per m² en een contractueel vastgelegd maximaal uurverbruik van 240 m³.

Situatie A2 geeft weer wat gebeurt wanneer deze bedrijven nog slechts 8,3 m³ per m² via de ketel verstoken en 26,8 m³ aardgasequivalenten via externe warmtelevering (aardwarmte) krijgen geleverd. De maximale piekcapaciteit wordt nu 195 m³ per uur per ha.

In de situaties B1 en B2 zijn op vergelijkbare wijze de veranderingen voor tomatenbedrijven zonder schermgebruik weergegeven. In situatie B1 wordt 44,4 m³ aardgas per m² volledig via de ketelinstallatie

verstoekt en in situatie B2 is dat nog 15,5 m³ en wordt 28,9 m³ aardgasequivalent via aardwarmte geleverd.

Voor het benodigde aardgas zijn de prijzen en de gaskosten in het CDS, op basis van de informatie die op 1-3-2001 over het CDS beschikbaar was en de toen geldende gasprijzen, ook in Tabel 13 weergegeven.

Tabel 13 Berekende CDS-prijzen (1-3-2001), gaskosten en break-even prijzen voor aardwarmtelevering bij uiteenlopende opties

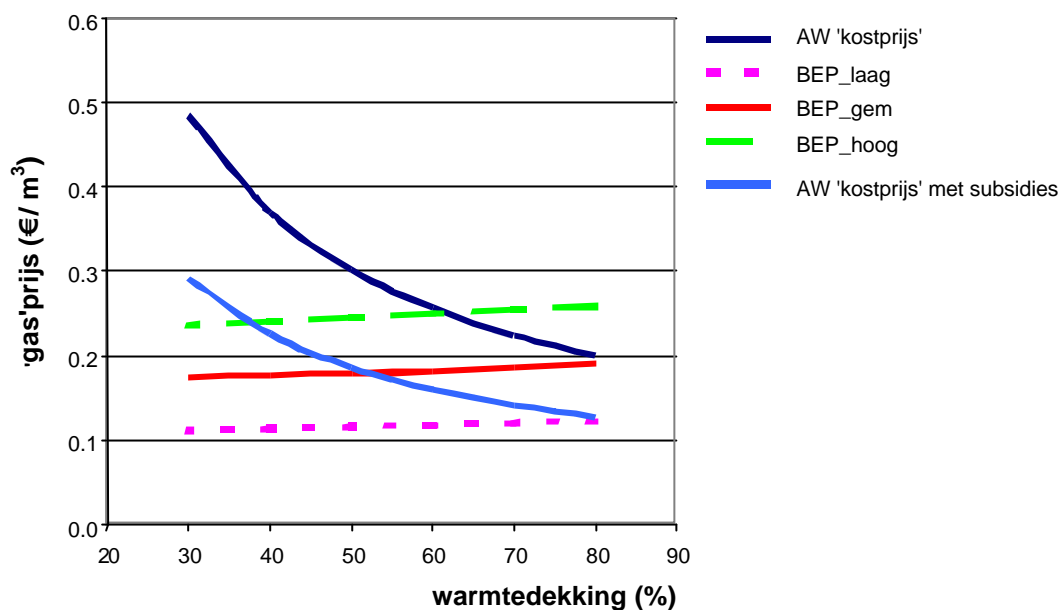
	Tomaat met scherm		Tomaat zonder scherm	
	A1	A2	B1	B2
Piekcapaciteit m ³ a.e./(h.ha)	240	195	241	200
Gasverbruik m ³ /(m ² .j)	35,5	8,3	44,4	15,5
Warmtelevering m ³ a.e./(m ² .j)	-	26,8	-	28,9
Dienstenprijs €/m ³	0,111	0,389	0,089	0,213
Commodityprijs €/m ³	0,159	0,159	0,159	0,159
Gasprijs €/m ³	0,269	0,548	0,247	0,372
Gaskosten € per m ²	9,57	4,55	10,98	5,76
break-even prijs €/m ³		0,187		0,186

In Tabel 13 is te zien dat de dienstenprijs in situatie A2 (en B2) erg ongunstig uitpakt binnen het CDS. De maximale piekcapaciteit is door de warmtelevering afgenomen. Dat zou gunstig moeten zijn voor de dienstenprijs, maar het gasverbruik via de ketel is zoveel afgenomen dat de dienstenprijs vooral in situatie A2 (€ 0,389/m³) juist heel ongunstig wordt. De totale gasprijs komt uit op € 0,548 per m³. Om het ongunstige effect van deze CDS-prijs ten opzichte van de standaardsituatie (A1) te compenseren mag voor de 26,8 m³ aardgasequivalenten aardwarmtelevering een *break-even* prijs (BEP) betaald worden van maximaal $(9,57 - 4,55) / 26,8 = € 0,187$ per m³. Bij een hogere prijs blijft optie A1 aantrekkelijker, bij een lagere prijs wordt aardwarmtelevering gunstiger.

In situatie B2 wordt vrijwel eenzelfde *break-even* prijs gerealiseerd voor de aardwarmtelevering als in situatie A2. Dat is opmerkelijk omdat er toch een groot verschil in warmtedekking van respectievelijk 65% (B2) t.o.v. 75% (A2) bestaat. Ook wanneer het maximale piekverbruik per uur gelijk wordt gehouden dan wijzen de berekeningen uit dat de *break-even* prijzen bij uiteenlopende warmtedekkingspercentages slechts geringe verschillen vertonen.

4.5.3 Invloed commodityprijs binnen CDS

In de berekeningen voor het bepalen van de *break-even* prijs in Tabel 13 is uitgegaan van een commodityprijs van € 0,159 (NLG 0,35) per m³ aardgas (BEP_gem in Figuur 27). Dat is ongeveer het niveau van de gasprijs in 2000/2001 (Figuur 26). De ontwikkeling van de gasprijzen in de toekomst blijft onzeker. Daarom zijn ook *break-even* prijsberekeningen uitgevoerd waarbij commodityprijzen van € 0,097 en 0,227 (NLG 0,20 en NLG 0,50) per m³ aardgas zijn aangehouden. Bij een commodityprijs van € 0,097 per m³ (BEP_laag in Figuur 27) blijkt aardwarmtelevering zelfs bij de hoogste warmtedekkingspercentages geen economisch haalbare zaak meer te zijn. Wordt de commodityprijs € 0,227 per m³ aardgas (BEP_hoog in Figuur 27) dan kan aardwarmtelevering aantrekkelijk worden bij warmtedekkingspercentages vanaf circa 62% (daar wordt de kostprijs lager en de break-even prijs hoger dan ca. € 0,25). Het is echter twijfelachtig of bij een dergelijke commodityprijs glastuinbouwbedrijven nog kunnen overleven.



Figuur 27 Berekende 'kostprijs' van aardwarmtelevering met en zonder 50% investeringssubsidies en break-even prijzen bij verschillende Commodity-gasprijsniveaus als functie van uiteenlopende warmte dekkingpercentages

4.5.4 Invloed subsidies op toepasbaarheid aardwarmte

Figuur 27 geeft tevens aan dat subsidies een belangrijke bijdrage kunnen leveren om toepassing van aardwarmte in de glastuinbouw aantrekkelijk te maken. Zonder subsidies is aardwarmte alleen aantrekkelijk bij hoge gasprijzen en hoge warmte dekkingpercentages.

Met subsidies blijkt aardwarmte bij een commodityprijs op een gemiddeld niveau van € 0,159 (NLG 0,35) per m³ aardgas al bij warmte dekkingpercentages van minder dan 60% rendabel te kunnen zijn.

4.5.5 Gecombineerde levering van warmte en CO₂

Uit de berekeningen wordt duidelijk dat aardwarmtelevering alleen haalbaar is bij hogere gasprijzen en bij hoge percentages warmte dekking. Om een hoog warmte dekkingpercentage te kunnen halen is externe CO₂-levering binnen de warmtevraag een essentiële voorwaarde.

De berekende break-even prijzen voor warmtelevering komen dus op losse schroeven te staan, wanneer de gecombineerde levering van warmte en CO₂ geen duidelijk economisch voordeel oplevert.

Voor het doseren van CO₂ buiten de warmtevraag met de eigen ketelinstallatie (ongeveer eenderde deel van de totale CO₂-voorziening) wordt nu de gasprijs betaald. In het CDS kan die prijs, afhankelijk van contractcapaciteit en gasverbruik, bij de huidige commodityprijs uiteenlopen van € 0,068 tot 0,136 (NLG 0,15 tot NLG 0,30) per kg CO₂.

Wanneer CO₂ wordt gedoseerd binnen de warmtevraag van glastuinbouwbedrijven dan wordt de CO₂ als een gratis bijproduct van de warmteproductie gezien. Als de warmteproductie via de eigen ketelinstallatie wordt verdrongen door warmtelevering door derden dan moet de teler ook de CO₂ door derden laten aanleveren. In dit geval zijn de prijs van warmtelevering, de prijs van de geleverde CO₂ en de gevolgen van de veranderingen voor de CDS gasprijzen voor de teler van belang om te kunnen beslissen of het aantrekkelijk is de eigen ketelinstallatie buiten gebruik te stellen.

4.6 Warmteopslag in ondiepe aquifers

In het project 'Evaluatie systeemontwerpen voor ontvochtigen en energievoorziening' zijn door Praktijkonderzoek Plant & Omgeving (PPO) in samenwerking met IMAG en Ecofys voor vijf gewassen (tomaat, paprika, chrysant, belichte roos en belichte Kalanchoe) systeemontwerpen gemaakt (Raaphorst *et al.*, 2001). Dat is gedaan voor twee typen nieuwe kassen (met dubbelkunststofdek en met enkelglasdek dat is voorzien van reflecterend folie) en beide typen geheel gesloten of onder minimale ventilatiecondities. Uit deze evaluatie blijkt dat warmteopslag in ondiepe aquifers niet een simpele energiebesparende techniek is, maar diep ingrijpt in de bestaande teeltsystemen. Koeling van de kaslucht in de zomermaanden met behulp van het koude water uit de ondiepe aquifer, tijdelijke warmteopslag van het opgewarmde water in dagbuffers en in ondiepe aquifer en energieneutrale terugwinning in de wintermaanden heeft consequenties voor de vochthuishouding, de CO₂-voorziening, de opbrengsten, de verwarmingssystemen en de energieverbruiken.

Omdat deze aspecten diep op elkaar ingrijpen en de effecten voor de uiteenlopende gewassen verschillend zijn, is bij toepassing van warmteopslag in ondiepe aquifers sprake van geheel nieuwe teeltsystemen. De genoemde evaluatie is een waardevolle theoretische studie, die helaas nog niet door praktijkgegevens aan de werkelijkheid kon worden getoetst. Toetsing aan de praktijk wordt daarbij nog bemoeilijkt doordat de nieuwe kastypen en het systeem van koeling/ontvochtiging samen veranderingen teweegbrengen, waarvan de effecten moeilijk uit elkaar zijn te houden.

Een eenvoudige berekening waarbij de opbrengsten (de gerealiseerde energiebesparing) en de kosten (jaarkosten van de investeringen) tegen elkaar worden afgezet is daarom ontoereikend om inzicht te krijgen in de economische haalbaarheid. Ook wanneer een koelingsysteem wordt toegepast in bestaande kassen moet rekening worden gehouden met effecten die zijn te voorzien (betere benutting van gedoseerde CO₂ geeft hogere productie en/of verbetering van de kwaliteit) en onvoorziene effecten (verandering van het kasklimaat en de reactie daarvan op de gewassen).

Volgens Tabel 5 kan in een bedrijvenscluster een gasbesparing van 5,6 m³/m² worden gerealiseerd wanneer in de zomermaanden de overtollige warmte in ondiepe aquifers wordt opgeslagen en met warmtepompen in de winterperiode weer op de gewenste temperatuur wordt gebracht. In deze gasbesparing is rekening gehouden met het extra elektriciteitsverbruik en het extra gasverbruik dat nodig is voor het aandrijven van de pompen voor de warmteopslag en van de warmtepompen om de opgeslagen warmte in de wintermaanden weer geschikt te maken voor het verwarmen van de kassen.

Uitgaande van een optimale configuratie van 3 ha bedraagt de totale gasbesparing dus 168.000 m³ per jaar. Gerekend tegen een gemiddelde gasprijs van € 0,182 per m³ bedraagt de totale opbrengst van deze gasbesparing circa € 30.500 per jaar. Uit Tabel 12 bleek reeds dat de extra jaarkosten van warmteopslag voor 3 ha glastuinbouw (11.447 x 3) € 34.341 bedragen. De extra opbrengsten van de gasbesparing zijn dus bijna toereikend om de extra jaarkosten van warmteopslag te compenseren.

De bedrijfseconomische analyse van het project 'Evaluatie systeemontwerpen voor ontvochtigen en energievoorziening' (Raaphorst *et al.*, 2001) wijst uit dat de gerealiseerde gasbesparing slechts een beperkt onderdeel uitmaakt van de opbrengsteffecten. In berekeningen waarin de effecten van een minimaal geventileerde tomatenkas (met warmteopslag in een aquifer) zijn vergeleken met die van een moderne referentiekas wordt uiteindelijk per ha een investeringsruimte berekend van € 10.663 voor de warmteopslaginstallaties. Ook deze berekeningen wijzen dus uit dat warmteopslag vrijwel rendabel blijkt te zijn.

Ook in het geval van warmteopslag zal het CDS invloed hebben op de rentabiliteit.

Op dezelfde wijze als voor de aardwarmtebron (Tabel 13) is voor tomaten met en zonder scherm de *break-even* prijs berekend. Deze blijkt 0,29 €/ m³ te zijn voor de tomaten met scherm en 0,306 €/ m³ voor de situatie zonder scherm. Dit betekent dat voor het aardgas dat door de warmteopslag en warmtepomp wordt bespaard een prijs betaald mag worden van maximaal € 0,30 per m³. Bij een hogere prijs blijft optie zonder warmteopslag aantrekkelijker, bij een lagere prijs is warmteopslag met een warmtepomp gunstiger.

Uit de genoemde extra jaarkosten en bespaarde hoeveelheid aardgas is af te leiden dat de aardgasequivalentieprijs uitkomt op $34.341/168.000 = 0,20 \text{ €/ m}^3$. Deze berekening met CDS prijzen wijst er dus eveneens op dat warmteopslag in aquifers rendabel kan zijn.

In de berekeningen is uitgegaan van een optimaal presterende configuratie. Deze configuratie moet zich in de praktijk echter nog wel bewijzen. Zowel ten aanzien van de opbrengsten als van de kosten bestaan veel onzekerheden. Bij deze toepassing van warmteopslag worden immers nieuwe teeltsystemen geïntroduceerd waarvan de effecten nog niet in de praktijk zijn getoetst. Zo kan door koeling van de kassen in de zomermaanden de ventilatie van enkele kassen sterk worden beperkt. Dit zorgt ervoor dat de gedoseerde CO₂ beter kan worden benut en een extra positief effect op de gerealiseerde opbrengsten mag worden verwacht. Aan de andere kant zal er op het bedrijf minder CO₂ beschikbaar zijn, zodat het van elders moet worden betrokken. Doordat de invloed van de verschillende effecten nog niet goed zijn te overzien en voor verschillende omstandigheden en gewassen sterk kunnen uiteenlopen is het nog niet mogelijk om de economische consequenties van warmteopslag in ondiepe aquifers definitief te beoordelen.

4.7 Fiscale regelingen en subsidies

Voor de toepassing van aardwarmte gelden zowel nationaal (in Nederland) als internationaal (in de Europese Unie) een groot aantal fiscale regelingen en subsidies. Bijlage 4 geeft hiervan een uitgebreide beschrijving.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Kenmerken aquifers

Aquifers zijn watervoerende aardlagen ingesloten door lagen die geen water doorlaten. De temperatuur van het water in een aquifer is afhankelijk van de diepte (in Nederland een toename van ca. 30 °C per km).

Bij aardwarmtewinning wordt warmte onttrokken aan het water van diep gelegen (1000 tot 2000 m) aquifers met een temperatuur van 70 tot 90 °C.

De temperatuur van aquifers die minder diep zijn gelegen (15 tot 300 m) is lager (ca. 10 °C), en kunnen worden gebruikt voor lange termijn warmte- (en koude)opslag, waarbij gebruik gemaakt wordt van overtollige warmte in de zomer om het temperatuurniveau van de aquifer te verhogen en van een warmtepomp om het temperatuurniveau bij ontladen van de aquifer aan te passen aan de eisen van tuinbouwkassen.

Bij de toepassing van aquifers onderscheiden we twee hydraulische kringlopen; de ondergrondse kringloop en de warmtevraagkringloop (een eventueel distributienet en het kasverwarmingssysteem). Beide kringlopen worden altijd gescheiden door een warmtewisselaar.

Bij gebruik van een aquifer worden over het algemeen twee putten geboord (doublet) die op ruime afstand van elkaar in de aquifer uitkomen. Het warme water wordt via de productieput omhoog gepompt uit de aquifer, doorloopt vervolgens de warmtewisselaar en wordt na het afstaan van de warmte via een injectieput weer teruggepompt.

Het terugpompen van het afgekoelde water is noodzakelijk omdat het formatiewater in het algemeen een hoog zoutgehalte heeft en lozing aan het oppervlak niet wordt toegestaan. Bovendien wordt door de injectie de druk in de aquifer op peil gehouden. Bij gebruik van aquifers voor warmteopslag wordt in de zomer de stromingsrichting omgekeerd om de warme put te regenereren.

Bij de ondiepe aquifers kan een goede put 50 tot 100 m³ water per uur leveren. Voor een hoger debiet moeten er extra doubletten geboord worden. Bij putten naar diepe aquifers lopen de debieten uiteen van 100 tot 200 m³ per uur.

Om een voldoende hoeveelheid water te kunnen produceren (en injecteren) met geringe pompenergie, moet de doorstroming van de watervoerende laag tenminste 15 Dm (Darcy meter) te bedragen. Hoewel watervoerende lagen bijna in overal in Nederland aanwezig zijn, voldoen deze lagen niet altijd aan dit criterium.

De ondergrondse kringloop moet nauwkeurig worden afgesteld op de hydrogeologische gesteldheid. De grondwatersnelheid (grootte en richting), de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket en een eventueel afdekkende laag zijn van belang. Deze gegevens zijn aanwezig in het Regis-systeem van TNO-NITG.

De chemische samenstelling van het grondwater is van belang, omdat ook in een gesloten systeem, temperatuurverschillen aanleiding kunnen geven tot ongewenste chemische reacties (roestvorming, calcietneerslag, etc). Bij vergunningverlening zal de provincie het belang van energieopslag afwegen tegen andere grondwaterbelangen. Belangrijk daarbij is dat de opslag thermisch en volumetrisch jaarlijks in evenwicht blijft.

Het thermische vermogen van een doublet is afhankelijk van het gerealiseerde debiet en verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur. Het kan variëren tussen 0,8 MW voor ondiepe aquifers voor thermische opslag tot 10 MW voor een goede aardwarmtebron in een diepe aquifer.

De voor geothermie geschikte gebieden worden met name aangetroffen in Noord- en Zuid-Holland en in Noord-Nederland.

De bestaande glastuinbouwgebieden in de provincie Zuid-Holland liggen boven potentieel geschikte aquifers, zowel voor warmtewinning als voor thermische opslag. Van de aanbevolen nieuwe tuinbouwgebieden liggen alleen die in Friesland, Zuid-Holland en N-Brabant boven of nabij potentieel geschikte aquiferlocaties voor warmtewinning. De toekomstige gebieden liggen wel boven of nabij aquifers voor warmteopslag, maar of deze aquifers in alle gevallen bruikbaar zijn is onzeker. Er is alleen voor Zuid-Holland voldoende

detailinformatie beschikbaar om vast te stellen dat energieopslag in de tweede watervoerende laag mogelijk is.

In Nederland is er geen ervaring met aardwarmtewinning. Toepassingen in de buitenlandse glastuinbouw zijn niet te vergelijken met de Nederlandse situatie. De ervaringen in Nederland met warmte- en koude opslag hebben voornamelijk betrekking op koeling in de utiliteitsbouw. Er is weinig of geen ervaring met de toepassing van ondiepe aquifers voor warmteopslag in de glastuinbouw.

5.2 Kasverwarming met aquifers

De energiebesparingen bij toepassing van aardwarmte variëren van 0,2 miljoen tot 8 miljoen m³ aardgasequivalent. Hoe groter het aangesloten areaal op een aardwarmtebron, hoe groter de energiebesparing en hoe kleiner de dekkingsgraad. Boven 20 à 30 hectare, afhankelijk van de broncapaciteit, wordt de toename van de besparing met de toename van het areaal minder.

De bron met de hoogste temperatuur en hoogste debiet bespaart het meeste energie. De bron van 75°C en 100 m³ per uur bespaart tot 3,5 miljoen m³ aardgasequivalenten per jaar en de bron met 85°C en 200 m³ per uur tot 8 miljoen m³ a.e. per jaar.

In een bedrijvencluster wordt altijd meer bespaard dan in afzonderlijke bedrijven en als gevolg van de belichting wordt bij het chrysantenbedrijf het minst bespaard. Er is weinig verschil in bespaarde energie tussen tomaten met en zonder scherm bij dekkingsgraden van minder dan 40% (meer dan 20 ha).

Van de beschouwde kasuitrustingen geeft de configuratie met verdubbelde lengte van de strangen van het ondernet de hoogste besparing. Buizen met vergrote diameter presteren minder goed door de lange responstijd bij opwarmen.

De jaarlijks opgepompte hoeveelheid water uit de aardwarmtebron varieert sterk met het aangesloten areaal, het gewas en de retourtemperatuur. Bij de bron van 75°C en 100 m³ per uur loopt dat op tot 83% van de jaarcapaciteit voor een bedrijvencluster van 100 ha en tot 62% bij 100 ha tomaten met scherm. Voor de bron met 85°C en 200 m³ per uur wijken deze benuttingspercentages weinig af (respectievelijk 81 en 61%).

Bij de toepassing van warmteopslag in aquifers variëren de best passende warmtepompvermogens tussen 12 en 15 Wm⁻². De chrysant met belichting vormt een uitzondering met 28 Wm⁻². Voor de best presterende kasuitrusting variëren de besparingen afhankelijk van de gewassen van 56.000 tot 71.000 m³ a.e. per ha.

5.3 Bedrijfseconomische aspecten

Uit de kosten- en batenanalyse van aardwarmtelevering aan een cluster van glastuinbouwbedrijven met een gemiddelde warmtevraag van ca. 30 m³ aardgasequivalent per m² blijkt dat de capaciteit van de aardwarmtebron, de betere benutting van bronwarmte door vergroting van het verwarmend oppervlak in de kassen, het areaal glastuinbouw waaraan aardwarmte wordt geleverd en het percentage warmtedekking een belangrijke invloed hebben op de kostprijs van aardwarmtelevering.

In berekeningen waarin de verschillende factoren zoveel mogelijk gelijk zijn gehouden komt naar voren dat het percentage warmtedekking het grootste effect heeft op de prijsverschillen. Bij een warmtedekkingspercentage van 40% is de kostprijs van aardwarmte bijna het dubbele van de kostprijs die bij een dekkingspercentage van 80% wordt gerealiseerd.

De capaciteit van de warmtebron en de warmtevraag van de glastuinbouwbedrijven hebben een veel geringere invloed op de kostprijs van aardwarmte. De aardgas-equivalentieprijs van een aardwarmtebron die 200 m³ per uur levert is ongeveer 30% lager dan van een bron met de helft van die capaciteit. Een twee maal zo grote warmtevraag (bijvoorbeeld 60 m³ a.e. t.o.v. 30 m³ a.e. per m²) leidt tot een kostenbesparing van circa 20%.

Wanneer wordt uitgegaan van de lage tuinbouw aardgasprijzen van de afgelopen dertien jaar dan blijkt aardwarmtelevering aan een bedrijvencluster met een gematigd gasverbruik geen rendabele optie te zijn. Voor de gasprijsontwikkeling in de toekomst zijn voor de bedrijvencluster binnen het CDS omslagpunten

(*break-even* prijzen) berekend. Deze omslagpunten geven het prijsniveau aan, waarop aardwarmtelevering kostenneutraal kan worden toegepast. Onder de meest gunstige condities blijft de kostprijs voor aardwarmte enkele Eurocenten boven de *break-even* prijs. Alleen wanneer wordt uitgegaan van een forse stijging van de aardgas-commodityprijzen naar een niveau van € 0,227 (NLG 0,50), kan aardwarmtelevering bij hoge warmtedekkingspercentages rendabel zijn. Met een investeringssubsidie van 50% blijkt aardwarmte bij een commodityprijs van € 0,159 (NLG 0,35) per m³ aardgas al bij warmtedekkingspercentages van minder dan 60% rendabel te kunnen zijn.

Warmteopslag in ondiepe aquifers, waarbij de kassen in de zomermaanden worden gekoeld met het aquiferwater en in de wintermaanden worden verwarmd met inzet van warmtepompen, lijkt een aantrekkelijke optie zijn.

Voor een optimale configuratie van 3 ha bedraagt de gasbesparing 168.000 m³ per jaar. Tegen een gemiddelde gasprijs van € 0,182 per m³ bedraagt de opbrengst van deze gasbesparing circa € 30.500 per jaar. De extra jaarkosten van warmteopslag bedragen voor 3 ha € 34.341. De extra opbrengsten van de gasbesparing zijn dus bijna toereikend om de extra jaarkosten van warmteopslag te compenseren. In het project 'Evaluatie systeemontwerpen voor ontvochtigen en energievoorziening' (Raaphorst *et al.*, 2001) waarin de effecten van een minimaal geventileerde tomatenkas (met warmteopslag in een aquifer) zijn vergeleken met die van een moderne referentiekas wordt per ha een investeringsruimte berekend van € 10.663 voor de warmteopslaginstallaties. Ook deze berekeningen wijzen dus uit dat warmteopslag vrijwel rendabel blijkt te zijn. De berekende *break-even* prijs van ca. € 0,30 wijst hier eveneens op.

De toepassing van warmteopslag grijpt diep in op de bestaande teeltsystemen. Naast besparingen op het gasverbruik moet rekening worden gehouden met, ontvochtiging van kaslucht, inkoop van CO₂, extra productie en/of invloeden op kwaliteit ed. Doordat de invloed van de verschillende effecten nog niet goed zijn te overzien en voor verschillende omstandigheden en gewassen sterk kunnen uiteenlopen is het nog niet goed mogelijk om de economische consequenties van warmteopslag definitief te beoordelen.

5.4 Aanbevelingen

Het is zeker mogelijk de benutting van de beschikbare aardwarmte capaciteit te vergroten door een aantal aanvullende aanpassingen aan de kasuitrusting ten opzichte van de in dit project onderzochte opties. Het geringe of soms negatieve effect van vergroting van het verwarmingsoppervlak door de respons van het verwarmingssysteem op de regelacties kan door optimaliseren van temperatuurintegratie en toepassing van verbeterde regeltechnieken voor een zeer groot deel te niet gedaan worden en een extra energiebesparing van ca. 3% opleveren. Een verdere verlaging van de retourtemperatuur met behulp van naschakelen van een warmtepomp leidt tot betere benutting van de aardwarmte. Op welke wijze de extra warmte energetisch en economisch het voordeligst in de kas kan worden gebracht, vereist een optimalisatiestudie, waarbij temperatuurniveaus en hydraulische aansluiting van verwarmingsnetten afgewogen moet worden. Dit kan een extra energiebesparing van 18 tot 45% opleveren ten opzichte van de in dit project berekende besparingen.

Om de belasting van de aardwarmtebron onafhankelijk te maken van de tijd van het jaar, kan continu met het maximale debiet warmte aan de aquifer onttrokken worden en de warmte die in de kas niet nodig is, worden opgeslagen in een warmtebuffer. In perioden dat de capaciteit van de aardwarmtebron te kort schiet, wordt de opgeslagen warmte uit de buffer onttrokken. De opslag kan bovengronds worden uitgevoerd, maar gebruik van een ondiep gelegen aquifer om de warmte in op te slaan is ook een mogelijkheid. Dit kan een extra energiebesparing van ca. 30% opleveren ten opzichte van de in dit project berekende besparingen.

Aardwarmtelevering aan een cluster van glastuinbouwbedrijven met een gematigde warmtevraag is niet de meest aantrekkelijke optie. Omdat de perspectieven van aardwarmtelevering het gunstigst zijn bij een grote warmtevraag, een hoog warmtedekkingspercentage en warmtelevering in de directe omgeving van de aardwarmtebron moet de aandacht vooral op de combinatie van deze factoren worden gericht.

Voor het realiseren van een hoog warmtedekkingspercentage is externe levering van CO₂ een vereiste. Daarom moet aardwarmtelevering altijd gekoppeld worden aan gelijktijdige levering van zuivere CO₂. Als niet wordt uitgegaan van de meest gunstige omstandigheden (hoge broncapaciteit van hoge temperatuur, hoge warmtevraag enz.) is met de huidige gasprijzen toepassing van warmtewinning uit aquifers niet rendabel.

De Nederlandse overheid streeft echter naar een vergroting van het aandeel duurzame energie in de glastuinbouw. Aardwarmte is daarvoor een uitstekende optie. Ervaringen in het buitenland leren dat boringen naar thermaal water goedkoper kunnen dan die naar olie en gas. Indien het gebruik van aardwarmte in Nederland van de grond komt, zullen de prijzen van boringen waarschijnlijk dalen. Het verdient daarom aanbeveling met subsidie de toepassing te stimuleren.

De toepassing van lange termijn warmteopslag in aquifers lijkt daarentegen wel rendabel te kunnen zijn, maar is nog omgeven met tal van onzekerheden. Het verdient daarom aanbeveling deze onzekerheden weg te nemen door een gesubsidieerd demonstratieproject van voldoende grote schaal uit te voeren in een gebied waar de geologische risico's zo laag mogelijk zijn en waarbij vooraf de gehele installatie goed wordt geoptimaliseerd.

De besparingen die worden bereikt met warmteopslag kunnen alleen verbeterd worden, indien methoden worden ontwikkeld, die de omvang van de zomerwarmte die wordt opgeslagen, vergroten. IMAG heeft daartoe inmiddels een aantal opties onderzocht. Het verdient aanbeveling de perspectiefvolle opties verder te ontwikkelen.

Literatuur

- Adrichem Boogaert, H.A. & W.F.P. Kouwe (1993-1997) Stratigraphic nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGEP, Mededelingen RGD nr. 50.
- Bakker *et al.*, 1998. Kas van de Toekomst; Eindrapportage haalbaarheidsstudie.
- BEB. Projectplan Bodem als Energiebron en –Buffer, Juli 2001 Novem, Sittard
- Campen J.B., De Zwart H.F., Van de Braak N.J., Kool H.D.M., Janssen E.G.O.N., 2001. Koeling en Ontvochtiging in de Floriadekas IMAG Rapport P2001-102
- Collins, A.G. (1975) Geochemistry of oilfields waters. Elsevier, Amsterdam
- Cottençon, A., B. Parant & G. Flaceliere, (1975) Lower Cretaceous Gas Fields in the Netherlands. In: Petroleum and the Continental Shelf of North-West Europe, Vol. I, Geology, Barking.
- Klopstra A en Geuzendam C, 2001. De boer op met energieopslag in de bodem; inventarisatie van energieopslag voor de land en tuinbouw t.b.v. promotie, IVAM doc. nr. 0113 (O) Universiteit van Amsterdam bv, Amsterdam
- Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw 2000-2001; groenten – snijbloemen - potplanten IKC glasgroenten, Naaldwijk, 2000.
- De Zwart, 2001. Interne communicatie
- De Zwart, H.F., G.L.A.M. Swinkels en C.J.M. Vernooij, 1999. Praktijk evaluatie van het gebruik van warmtebuffers in de tomaten- en paprikateelt, IMAG Nota P99-99, 60pp.
- Raaphorst M.G.M., Ruijs M.N.A., Nienhuis J.K., van de Braak N.J., de Zwart H.F., Schoonderbeek G.G., Heller E.M.B. en Opdam J.J.G., 2001. Evaluatie systeemontwerpen voor ontvochtigen en energievoorziening, Rapport PPO 521, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. Sector glastuinbouw.
- RGD (1985) Aardwarmtewinning en grootschalige warmteopslag in tertiaire en kwartaire afzettingen. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- RGD (1991) Geological Atlas of the subsurface of The Netherlands, Explanation to map sheet II: Ameland - Leeuwarden. Rijks Geologische Dienst, Haarlem: 87 pp.
- RGD (1993) Geological Atlas of the Subsurface of the Netherlands, Explanations to map sheet IV: Texel- Purmerend. Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 126 pp.
- RGD (1993) Geological Atlas of the Subsurface of the Netherlands, Explanations to map sheet V: Sneek- Zwolle. Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 127 pp.
- RGD (1995) Geological Atlas of the Subsurface of the Netherlands, Explanations to map sheet III: Rotumeroog-Groningen. Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 113 pp.
- Steehman, H.A. (1962) Petroleum development in the Netherlands, with special reference to the origin, subsurface migration and geological history of the country's oil and gas resources. Verhand. KNGMG, deel 21-1

Swinkels G.L.A.M., J.P.G. Huijs en H.F. D Zwart, 2000. Standaardteelten, IMAG Nota P2000-85, 44pp

TNO-GG (1983) Voorbereiding aardwarmteproject Delfland, Deel 1 (ed. Dufour & Vierhout), Delft, rap. nr.OS 83-29

TNO-NITG (2000), Aardwarmte in Nederland. Verslag van het onderzoekprogramma "Instandhouding kennis Aardwarmte Exploratie en Exploitatie in Nederland (1997-2000)", rap. nr. NITG 00-331-A.

Zuurdeeg, B.W. (1983) Chemische samenstelling van formatiewatermonsters afkomstig uit het olieveld De Lier, RUU-IVAU

Zuurdeeg B.W. & Van der Weiden, M.J.J. (1982) Hydrochemie van het diepre water in Nederland. In: Cursus Aardwarmte in Nederland' Stichting Postakademiale Vorming Gezondheidstechniek, Delft.

Bijlage 1 Simulatiemodel KASPRO

Het simulatiemodel (KASPRO) is een uit diverse parameters samengesteld model van de eigenschappen van een kas, gewasgegevens, ingestelde setpoints en buitenklimaat, dat de relevante variabelen berekent als functie van tijd. Dit maakt berekening van de energieconsumptie en gewasproductie mogelijk.

De basis van het model wordt gevormd door de energie-, water- en CO₂-balansen van de in beschouwing genomen samenhangende onderdelen van het systeem. Het resulteert in een set van niet lineaire, eerste orde differentiaalvergelijkingen die numeriek worden opgelost.

Het kasklimaatmodel heeft als startpunt de kasklimaatregelaar.

Kaslucht bevat samenhangende componenten waarvan de temperatuur, vochtigheid en CO₂-concentratie als primaire variabelen worden beschouwd. De kasklimaatregelaar vergelijkt deze waarden met setpoints. De setpoints zijn functies van tijd en buitenklimaat en aangenomen wordt dat de teler ze van parameters voorziet.

Op grond van de vergelijkingen zal de regelaar het volgende acties uitvoeren:

- past de stand van de mengklep van de warmwatertoevoer aan, ten einde de temperatuur van de verwarmingbuizen te wijzigen. Meestal wordt de temperatuur van twee afzonderlijke verwarmingssystemen, waarvan één met pijpen dicht bij de grond en één met pijpen in of boven het gewas.
- past de stand van de luchtramen aan voor warmte- en vochtuitwisseling tussen de kas- en buitenlucht.
- start en stopt de CO₂-gift naar de kas.

Naast het kasklimaat, stuurt de regelaar de apparaten aan die van belang zijn voor de warmtevoorziening (ketel, warmtepomp, WKK en opslagtank) en de CO₂-productie van de ketel. De regelactiviteiten hebben direct of indirect invloed op het brandstofverbruik. Dit is duidelijk het geval bij verhoging van de buistemperatuur, hoewel de brandstof om in de warmtebehoefte te voorzien, al uren eerder opgewekt kan worden en tijdelijk worden opgeslagen in een warmteopslagtank.

Geopende ramen hebben een effect op de energieconsumptie wanneer de regelactiviteiten worden uitgevoerd op grond van het setpoint luchtvochtigheid gedurende perioden van energievraag. De CO₂-gift veroorzaakt een brandstofverbruik indien CO₂ wordt verkregen uit uitlaatgassen van de ketel of de WK-installatie tijdens perioden zonder energievraag.

Omdat het warmtedistributiesysteem in kassen gewoonlijk bestaat uit een warm-watercircuit van pijpen met een groot thermisch vermogen met typische afkoelingseigenschappen, wordt extra aandacht besteed aan de beschrijving van het dynamisch gedrag (De Zwart, 1996). De tank voor korte termijn warmteopslag met zijn grote thermische vermogen is gemodelleerd met een uitgebreid gelaagd model overeenkomstig de uitgangspunten gepresenteerd door Yoo en Pak (1993). Naast de kasklimaatregelaar zijn de kasluchtomstandigheden ook afhankelijk van de warmte, vocht en CO₂-uitwisseling tussen de kaslucht en zijn directe omgeving. Om deze interacties te beschrijven onderscheidt het model samenhangende componenten voor het gewas, de bodem en het kasdek.

De grond onder de kas vertegenwoordigt een grote warmteopslagcapaciteit met een sterk dempend effect op fluctuaties van de kasluchttemperatuur. Om een goede afspiegeling van dit effect te verkrijgen is de grond onderverdeeld in 7 lagen.

Het kasdek vormt een belangrijke belemmering voor warmteverlies naar de buitenlucht. Indien de temperatuur van het dek echter onder het dauwpunt van de kaslucht komt, veroorzaakt het dekoppervlak ontvochtiging van de kas.

De buitenomstandigheden dienen als omgevingsfactoren voor het model. De buitenluchttemperatuur en de hemeltemperatuur beïnvloeden de warmteverliezen door convectie en straling bij het kasdek en daardoor de temperatuur van het dek. De buitentemperatuur, vochtigheid en CO₂-concentratie hebben een directe invloed op de primaire toestandsvariabelen via luchtuitwisseling door geopende ramen of kieren. De windsnelheid is een belangrijke indirecte weerconditie omdat deze invloed heeft op de convectieve warmte-uitwisseling aan het dek en in belangrijke mate de luchtuitwisseling door de ramen bepaalt.

Een belangrijk weergegeven is de globale straling. Directe en diffuse straling wordt geabsorbeerd, gereflecteerd en doorgelaten door het dek, het gewas en de grondoppervlakte. Bovendien is straling op gewashoogte belangrijk voor de fotosynthese. Voor de berekening van de warmte-, vocht- en CO₂-stromen

tussen de samenhangende componenten, zijn de relaties voor de warmtestroming ontleend aan een aantal auteurs. De warmtestraling is berekend met gebruikmaking van relaties gebaseerd op de wet van Stefan-Boltzmann, en bevat "view factoren", absorptie en emissie. Interceptie van de straling door het gewas is behandeld in overeenstemming met Goudriaan (1988). De transmissie van licht door het dek is berekend middels een methode beschreven door Bot (1983). De convectieve warmte-uitwisseling aan de binnen en buitenkant van het dek is beschreven in de relaties eveneens gepresenteerd door Bot. De ventilatiestromen, in tuinbouwkundige context is gebaseerd op natuurlijke ventilatie, en is berekend op basis van de theorie gepresenteerd door De Jong (1990). De gewasverdamping, een belangrijk onderdeel van het model, is afgeleid van het werk van Stanghellini (1987). De convectieve warmteoverdracht van verwarmingsbuizen en convectieve warmte uitwisseling van de bodem is eveneens beschreven door Bot. De warmtegeleiding in de grond is benaderd vanuit de algemene warmtegeleidingstheorie.

Ten gevolge van de complexiteit en de niet lineairiteit van het model, is de integratie van differentiaal vergelijkingen uitgevoerd in numerieke voorwaartse integratie. De stapgrootte is zodanig gekozen dat de temperatuurverandering van de toestandsvariabelen minder is dan 0.1 °C. Dat betekent dat het tijdsduur per integratiestap vaak niet meer dan 15 sec bedraagt. Wanneer het buitenklimaat en de klimaatregelaar activiteiten stabiel zijn, neemt de stapgrootte toe tot 2 minuten, hetgeen overeen komt met de meetfrequentie van de klimaatregelaar.

Vergelijking van de resultaten van het model met metingen in een semi-praktijk kas (4 afdelingen van 200 m² elk) toonden een zeer goede overeenkomst. Absolute verschillen tussen model en metingen voor de luchttemperatuur voor gemiddelde 10 minuten waarden bedroegen minder dan 0.5 °C in 90% van de tijd. De warmteconsumptie werd gesimuleerd met een nauwkeurigheid van 95% en de regelactiviteiten m.b.t. ramen open/dicht controle en de CO₂-gift toonden een goede gelijkheid. (de Zwart, 1996).

De beschrijving van het buitenklimaat gaat uit van typisch Nederlandse weersomstandigheden. Deze dataset is weergegeven in het SEL-jaar (Breuer en Van de Braak, 1989).

Litteratuur

- Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak, 1989 Reference Year for Dutch Greenhouses, Acta Horticulturae 248, 1989
- Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Ph. D. dissertation Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Goudriaan, J., 1988. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. Agricultural and forest meteorology, 43:155-169.
- Jong, T., de, 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Ph. D. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Ph. D. dissertation, Landbouwniversiteit, Wageningen.
- Yoo H. en E. Pak, 1993. Theoretical model of the charging process for stratified thermal storage tanks. Solar Energy, 51(1993)6 pp. 513-519.
- Zwart H.F., de, 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. IMAG-DLO rapport 96-05, 236 blz.

Bijlage 2 Resultaten

Resultaten bij toepassing aquifer als aardwarmtebron

In de volgende tabellen worden voor de berekende configuraties van broncapaciteit en kasinrichting bij verschillende aangesloten arealen achtereenvolgens de bespaarde hoeveelheid aardgas, de fractie van de totale gevraagde warmte die door de aardwarmtebron wordt geleverd (dekkingsgraad) en de mate van gebruik van het beschikbare brondebiet weergegeven. Tevens is voor elke configuratie aangegeven wat de resulterende gemiddelde retourtemperatuur van het verwarmingssysteem is

75 °C; 100 m3/uur		876000 m3/jaar							
REFERENTIE (standaard verwarming met minimumbuis(MB))									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	101.5	173.3	208.3	217.9	221.9	224.0	228.4	30.7
tomaat met scherm	39.7	168.4	238.9	249.3	252.6	254.3	255.4	258.3	37.9
tomaat zonder scherm	48.4	167.5	217.8	229.5	234.0	236.5	238.1	241.9	40.6
cluster	29.4	137.3	217.1	256.2	267.4	272.2	274.2	278.1	40.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.97	0.83	0.50	0.35	0.26	0.21	0.11	
tomaat met scherm	1.00	0.85	0.60	0.31	0.21	0.16	0.13	0.07	
tomaat zonder scherm	1.00	0.69	0.45	0.24	0.16	0.12	0.10	0.05	
cluster	0.99	0.93	0.73	0.43	0.30	0.23	0.19	0.09	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	5	26	43	51	53	54	55	56	
tomaat met scherm	13	52	72	74	75	75	76	76	
tomaat zonder scherm	19	59	73	75	76	77	77	78	
cluster	10	44	66	77	80	81	82	83	
VARIANT (standaard verwarming, geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	101.5	173.3	208.3	217.9	221.9	224.0	228.4	30.7
tomaat met scherm	35.5	138.8	192.2	214.1	218.8	221.0	222.3	225.2	34.5
tomaat zonder scherm	44.3	142.9	175.7	194.8	200.5	203.4	205.1	208.9	37.8
cluster	27.3	125.3	194.7	233.9	245.9	252.3	256.3	265.0	38.5
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.97	0.83	0.50	0.35	0.26	0.21	0.11	
tomaat met scherm	1.00	0.79	0.55	0.31	0.21	0.16	0.13	0.06	
tomaat zonder scherm	1.00	0.64	0.40	0.22	0.15	0.11	0.09	0.05	
cluster	0.99	0.91	0.71	0.42	0.30	0.23	0.19	0.10	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	5	26	43	51	53	54	55	56	
tomaat met scherm	12	43	56	61	62	63	63	64	
tomaat zonder scherm	18	51	59	63	65	65	65	66	
cluster	9	40	59	69	72	74	75	77	
VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	103.4	183.2	233.4	246.5	251.9	255.0	261.3	26.4
tomaat met scherm	35.0	162.3	237.6	274.9	282.3	285.7	287.7	292.2	27.0
tomaat zonder scherm	44.4	193.5	244.3	272.5	281.1	285.1	287.4	292.4	28.8
cluster	27.5	134.4	231.9	299.1	317.3	326.5	332.4	345.0	30.0
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.99	0.88	0.56	0.39	0.30	0.24	0.13	
tomaat met scherm	1.00	0.93	0.68	0.39	0.27	0.20	0.16	0.08	
tomaat zonder scherm	1.00	0.87	0.55	0.31	0.21	0.16	0.13	0.07	
cluster	1.00	0.98	0.84	0.54	0.39	0.30	0.24	0.13	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	4	22	38	49	51	52	53	54	
tomaat met scherm	8	36	52	59	61	61	62	62	
tomaat zonder scherm	11	46	56	62	64	64	65	66	
cluster	6	30	52	66	70	72	73	75	
VARIANT (ondernet 70 mm; L-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	21.5	104.3	176.5	218.2	228.4	233.9	237.5	244.6	25.7
tomaat met scherm	36.0	163.3	232.1	262.8	268.3	271.0	272.7	276.7	25.4
tomaat zonder scherm	45.5	198.8	247.1	267.3	273.4	276.4	278.4	282.5	27.0
cluster	28.4	138.2	233.6	298.4	316.8	326.1	331.9	344.1	28.5
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.97	0.82	0.51	0.35	0.27	0.22	0.11	
tomaat met scherm	1.00	0.91	0.64	0.36	0.25	0.19	0.15	0.08	
tomaat zonder scherm	1.00	0.87	0.54	0.29	0.20	0.15	0.12	0.06	
cluster	1.00	0.97	0.82	0.53	0.37	0.29	0.23	0.12	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	4	21	36	44	46	47	48	49	
tomaat met scherm	8	34	48	54	55	56	56	57	
tomaat zonder scherm	10	44	54	58	59	59	60	60	
cluster	6	30	50	63	67	69	70	72	
VARIANT (ondernet 70 mm; N-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	22.2	105.3	172.1	206.7	214.7	218.9	221.7	228.2	25.9
tomaat met scherm	36.6	162.7	227.0	251.9	255.8	257.6	258.7	261.6	25.9
tomaat zonder scherm	46.0	196.8	239.3	254.3	259.0	261.4	262.7	265.8	27.6
cluster	28.8	138.9	230.3	289.8	306.9	315.3	320.2	329.2	29.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.95	0.78	0.47	0.32	0.25	0.20	0.10	
tomaat met scherm	1.00	0.89	0.62	0.34	0.23	0.18	0.14	0.07	
tomaat zonder scherm	1.00	0.85	0.52	0.28	0.19	0.14	0.11	0.06	
cluster	1.00	0.97	0.80	0.50	0.36	0.27	0.22	0.11	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	5	22	35	42	44	45	45	46	
tomaat met scherm	8	35	48	53	54	54	54	55	
tomaat zonder scherm	11	45	53	56	57	58	58	59	
cluster	6	31	50	63	67	68	69	71	

75 °C; 150 m³/uur 1314000 m³/jaar

REFERENTIE (standaard verwarming met minimubuis(MB))									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m³ ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	103.4	197.5	287.1	312.4	323.6	329.3	339.2	30.7
tomaat met scherm	39.7	185.3	306.5	366.4	374.0	377.6	379.9	385.1	37.9
tomaat zonder scherm	48.4	201.3	288.3	335.4	344.3	349.3	352.5	359.8	40.6
cluster	29.4	144.1	256.7	356.7	384.2	397.0	404.4	414.1	40.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.99	0.94	0.69	0.50	0.39	0.31	0.16	
tomaat met scherm	1.00	0.93	0.77	0.46	0.31	0.24	0.19	0.10	
tomaat zonder scherm	1.00	0.83	0.60	0.35	0.24	0.18	0.15	0.07	
cluster	0.99	0.97	0.87	0.60	0.43	0.33	0.27	0.14	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	4	18	33	47	51	53	54	55	
tomaat met scherm	9	39	62	73	74	75	75	76	
tomaat zonder scherm	13	49	66	74	75	76	76	77	
cluster	6	31	54	72	77	79	81	82	

VARIANT (standaard verwarming, geen MB)								
1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
20.9	103.4	197.5	287.1	312.4	323.6	329.3	339.2	30.7
35.5	158.7	243.9	307.6	321.1	326.4	329.5	335.3	34.5
44.4	179.0	236.4	278.3	292.2	298.7	302.5	310.3	37.8
27.3	132.7	232.2	322.8	350.8	364.2	372.6	390.8	38.5
1.00	0.99	0.94	0.69	0.50	0.39	0.31	0.16	
1.00	0.91	0.70	0.44	0.31	0.23	0.19	0.10	
1.00	0.81	0.53	0.31	0.22	0.17	0.14	0.07	
0.99	0.96	0.84	0.59	0.42	0.33	0.27	0.14	
4	18	33	47	51	53	54	55	
8	34	49	59	61	62	62	63	
12	45	55	61	63	64	65	66	
6	29	49	65	69	71	73	76	

VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m³ ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.3	201.4	315.6	350.1	365.2	373.0	387.3	26.4
tomaat met scherm	35.0	173.3	292.9	390.0	412.4	421.0	425.5	434.7	27.0
tomaat zonder scherm	44.4	217.3	327.5	387.8	408.7	418.6	424.0	434.7	28.8
cluster	27.5	136.9	259.7	401.8	448.6	469.3	481.4	507.6	30.0
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.96	0.76	0.56	0.44	0.36	0.19	
tomaat met scherm	1.00	0.99	0.84	0.56	0.39	0.30	0.24	0.12	
tomaat zonder scherm	1.00	0.98	0.74	0.44	0.31	0.24	0.19	0.10	
cluster	1.00	1.00	0.95	0.73	0.54	0.43	0.35	0.18	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	3	15	28	44	49	51	52	53	
tomaat met scherm	5	26	43	56	59	60	61	62	
tomaat zonder scherm	7	35	51	59	62	63	64	65	
cluster	4	21	39	59	66	69	70	74	

VARIANT (ondernet 70mm; L-strang 2x; geen MB)								
1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
21.5	107.3	199.4	300.5	327.3	338.9	345.8	361.7	25.7
36.0	177.0	291.7	376.5	394.1	400.5	404.0	411.8	25.4
45.5	222.6	336.0	386.4	401.0	407.8	411.8	420.5	27.0
28.4	141.6	264.7	401.6	447.6	468.4	480.8	506.8	28.5
1.00	1.00	0.93	0.70	0.51	0.39	0.32	0.17	
1.00	0.98	0.81	0.52	0.36	0.28	0.22	0.11	
1.00	0.98	0.74	0.42	0.29	0.22	0.18	0.09	
1.00	1.00	0.93	0.71	0.53	0.41	0.34	0.18	
3	14	27	40	44	45	46	48	
5	25	41	52	54	55	55	56	
7	33	49	56	58	58	59	60	
4	20	38	57	63	66	67	71	

VARIANT (ondernet 70 mm; N-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m³ ae per jaar									
chrysant met belichting	22.2	110.2	198.1	288.3	310.0	319.1	324.5	337.1	25.9
tomaat met scherm	36.6	179.0	288.3	364.2	377.8	382.3	384.9	390.1	25.9
tomaat zonder scherm	46.0	224.0	329.5	370.9	381.5	386.7	389.9	396.2	27.6
cluster	28.8	143.1	264.1	392.9	434.7	454.0	465.3	487.4	29.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.99	0.89	0.65	0.47	0.36	0.29	0.15	
tomaat met scherm	1.00	0.97	0.78	0.50	0.34	0.26	0.21	0.11	
tomaat zonder scherm	1.00	0.97	0.71	0.40	0.28	0.21	0.17	0.09	
cluster	1.00	0.99	0.92	0.68	0.50	0.39	0.32	0.17	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	3	15	27	39	42	43	44	46	
tomaat met scherm	5	26	41	51	53	54	54	55	
tomaat zonder scherm	7	34	50	55	56	57	57	58	
cluster	4	21	39	57	63	66	67	70	

75 °C; 200 m3/uur 1752000 m3/jaar

REFERENTIE (standaard verwarming met minimumbuis(MB))									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.0	203.0	346.6	394.4	416.6	428.8	448.0	30.7
tomaat met scherm	39.7	193.1	336.7	477.9	491.9	498.6	502.5	510.9	37.9
tomaat zonder scherm	48.4	221.6	334.9	435.7	451.0	459.1	464.3	476.3	40.6
cluster	29.4	146.3	274.6	434.3	488.5	512.3	526.0	548.4	40.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.99	0.97	0.83	0.63	0.50	0.41	0.21	
tomaat met scherm	1.00	0.97	0.85	0.60	0.41	0.31	0.25	0.13	
tomaat zonder scherm	1.00	0.92	0.69	0.45	0.31	0.24	0.19	0.10	
cluster	0.99	0.99	0.93	0.73	0.55	0.43	0.35	0.19	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	3	13	26	43	49	51	53	55	
tomaat met scherm	7	31	52	72	73	74	75	76	
tomaat zonder scherm	10	42	59	73	74	75	76	77	
cluster	5	24	44	66	74	77	79	82	

VARIANT (standaard verwarming, geen MB)									
1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
20.9	104.0	203.0	346.6	394.4	416.6	428.8	448.0	30.7	
35.5	168.7	277.6	384.5	416.8	428.1	433.9	444.5	34.5	
44.4	200.7	285.7	351.4	377.5	389.5	396.5	410.1	37.8	
27.3	135.3	250.6	389.4	443.1	467.7	482.0	512.6	38.5	
1.00	0.99	0.97	0.83	0.63	0.50	0.41	0.21		
1.00	0.96	0.79	0.55	0.40	0.31	0.25	0.13		
1.00	0.90	0.64	0.40	0.28	0.22	0.18	0.09		
0.99	0.98	0.91	0.71	0.54	0.42	0.35	0.19		
3	13	26	43	49	51	53	55		
6	28	43	56	60	61	62	63		
9	39	51	59	62	63	64	65		
5	22	40	59	66	69	71	75		

VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.4	206.9	366.4	436.9	466.8	483.2	510.0	26.4
tomaat met scherm	35.0	175.0	324.7	475.2	531.8	549.8	559.2	575.3	27.0
tomaat zonder scherm	44.4	221.3	387.1	488.5	526.7	544.9	555.6	574.9	28.8
cluster	27.5	137.3	268.8	463.9	557.8	598.2	620.4	664.7	30.0
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.99	0.88	0.70	0.56	0.46	0.24	
tomaat met scherm	1.00	1.00	0.93	0.68	0.51	0.39	0.32	0.16	
tomaat zonder scherm	1.00	1.00	0.87	0.55	0.40	0.31	0.25	0.13	
cluster	1.00	1.00	0.98	0.84	0.68	0.54	0.45	0.24	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	11	22	38	46	49	50	53	
tomaat met scherm	4	20	36	52	57	59	60	62	
tomaat zonder scherm	5	27	46	56	60	62	63	65	
cluster	3	16	30	52	62	66	68	73	

VARIANT (ondernet 70mm; L-strang 2x; geen MB)									
1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
21.5	107.6	208.7	353.1	413.8	436.4	448.7	475.0	25.7	
36.0	179.7	326.6	464.2	511.7	525.5	532.4	545.5	25.4	
45.5	226.8	397.6	494.2	522.1	534.7	542.0	556.9	27.0	
28.4	142.0	276.4	467.1	556.7	596.8	619.2	663.8	28.5	
1.00	1.00	0.97	0.82	0.64	0.51	0.42	0.22		
1.00	1.00	0.91	0.64	0.47	0.36	0.30	0.15		
1.00	1.00	0.87	0.54	0.38	0.29	0.24	0.12		
1.00	1.00	0.97	0.82	0.65	0.53	0.44	0.23		
2	11	21	36	42	44	45	48		
4	19	34	48	53	54	55	56		
5	25	44	54	56	58	58	60		
3	15	30	50	59	63	65	70		

VARIANT (ondernet 70 mm; N-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	22.2	110.8	210.6	344.3	395.0	413.4	423.1	443.4	25.9
tomaat met scherm	36.6	182.6	325.5	453.9	492.9	503.7	508.6	517.5	25.9
tomaat zonder scherm	46.0	229.4	393.5	478.6	499.3	508.7	514.2	525.5	27.6
cluster	28.8	143.8	277.9	460.7	543.4	579.6	600.3	640.4	29.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.95	0.78	0.59	0.47	0.38	0.20	
tomaat met scherm	1.00	0.99	0.89	0.62	0.45	0.34	0.28	0.14	
tomaat zonder scherm	1.00	0.99	0.85	0.52	0.36	0.28	0.22	0.11	
cluster	1.00	1.00	0.97	0.80	0.63	0.50	0.42	0.22	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	11	22	35	40	42	43	45	
tomaat met scherm	4	20	35	48	52	53	53	54	
tomaat zonder scherm	5	26	45	53	56	56	57	58	
cluster	3	16	31	50	59	63	65	69	

80 °C; 100 m3/uur 876000 m3/jaar

REFERENTIE (standaard verwarming met minimumbuis(MB))										
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar										
chrysant met belichting	20.9	102.5	184.3	230.8	243.5	248.6	251.4	256.8	30.7	
tomaat met scherm	39.7	177.1	271.8	286.5	290.7	292.9	294.2	297.6	37.9	
tomaat zonder scherm	48.4	185.1	251.3	267.1	272.6	275.6	277.5	281.9	40.6	
cluster	29.6	141.7	235.9	290.6	305.6	312.6	315.7	320.6	40.3	
dekkingsgraad										
chrysant met belichting	1.00	0.98	0.88	0.55	0.39	0.30	0.24	0.12		
tomaat met scherm	1.00	0.89	0.68	0.36	0.24	0.18	0.15	0.08		
tomaat zonder scherm	1.00	0.76	0.52	0.28	0.19	0.14	0.11	0.06		
cluster	1.00	0.96	0.80	0.49	0.34	0.26	0.21	0.11		
aardwarmte waterafname per jaar %										
chrysant met belichting	5	23	41	50	53	54	54	56		
tomaat met scherm	11	48	71	74	75	75	76	76		
tomaat zonder scherm	16	56	72	75	76	77	77	78		
cluster	8	39	63	76	79	81	82	83		

VARIANT (standaard verwarming, geen MB)										
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar										
chrysant met belichting	20.9	102.5	184.3	230.8	243.5	248.6	251.4	256.8	30.7	
tomaat met scherm	35.5	148.8	212.9	243.8	249.9	252.7	254.3	257.8	34.5	
tomaat zonder scherm	44.4	161.6	201.4	225.6	232.8	236.3	238.4	242.9	37.8	
cluster	27.5	130.0	211.8	264.6	279.9	287.9	292.9	303.6	38.5	
dekkingsgraad										
chrysant met belichting	1.00	0.98	0.88	0.55	0.39	0.30	0.24	0.12		
tomaat met scherm	1.00	0.85	0.61	0.35	0.24	0.18	0.15	0.07		
tomaat zonder scherm	1.00	0.73	0.45	0.25	0.17	0.13	0.11	0.05		
cluster	1.00	0.94	0.77	0.48	0.34	0.26	0.21	0.11		
aardwarmte waterafname per jaar %										
chrysant met belichting	5	23	41	50	53	54	54	56		
tomaat met scherm	10	40	54	61	62	62	63	63		
tomaat zonder scherm	15	49	58	63	64	65	65	66		
cluster	8	36	56	68	71	73	74	76		

VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)										
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar										
chrysant met belichting	20.9	103.9	189.7	253.7	270.4	277.3	281.1	288.8	26.4	
tomaat met scherm	35.0	167.2	253.7	302.8	312.3	316.4	318.8	324.2	27.0	
tomaat zonder scherm	44.4	204.0	267.4	301.7	312.4	317.2	320.1	326.0	28.8	
cluster	27.5	135.6	242.1	326.2	349.3	360.4	367.4	382.6	30.0	
dekkingsgraad										
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.91	0.61	0.43	0.33	0.27	0.14		
tomaat met scherm	1.00	0.95	0.72	0.43	0.30	0.23	0.18	0.09		
tomaat zonder scherm	1.00	0.92	0.60	0.34	0.23	0.18	0.14	0.07		
cluster	1.00	0.99	0.88	0.59	0.42	0.33	0.27	0.14		
aardwarmte waterafname per jaar %										
chrysant met belichting	4	20	36	48	51	52	53	54		
tomaat met scherm	7	33	50	59	60	61	61	62		
tomaat zonder scherm	10	43	55	61	63	64	65	66		
cluster	6	27	48	64	69	71	72	75		

VARIANT (ondernet 70mm; L-strang 2x; geen MB)										
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar										
chrysant met belichting	21.5	105.4	183.6	237.5	250.0	256.4	260.6	269.4	25.7	
tomaat met scherm	36.0	168.4	248.2	288.8	295.8	299.0	301.1	305.7	25.4	
tomaat zonder scherm	45.5	208.2	270.1	295.4	302.7	306.3	308.7	313.4	27.0	
cluster	28.4	139.6	243.8	324.1	347.2	358.4	365.4	380.2	28.5	
dekkingsgraad										
chrysant met belichting	1.00	0.98	0.85	0.55	0.39	0.30	0.24	0.13		
tomaat met scherm	1.00	0.93	0.69	0.40	0.27	0.21	0.17	0.08		
tomaat zonder scherm	1.00	0.91	0.59	0.32	0.22	0.17	0.14	0.07		
cluster	1.00	0.98	0.86	0.57	0.41	0.32	0.26	0.13		
aardwarmte waterafname per jaar %										
chrysant met belichting	4	19	34	43	45	47	47	49		
tomaat met scherm	7	32	46	54	55	55	56	57		
tomaat zonder scherm	9	41	53	57	59	59	60	60		
cluster	5	27	47	62	66	68	69	72		

VARIANT (ondernet 70 mm; N-strang 2x; geen MB)										
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar										
chrysant met belichting	22.2	107.0	180.0	225.7	235.7	240.6	243.9	251.6	25.9	
tomaat met scherm	36.6	168.7	243.9	277.8	282.9	285.2	286.5	289.8	25.9	
tomaat zonder scherm	46.0	207.4	263.1	282.2	287.8	290.6	292.3	295.9	27.6	
cluster	28.8	140.7	241.7	316.1	337.4	347.7	353.9	365.3	29.3	
dekkingsgraad										
chrysant met belichting	1.00	0.96	0.81	0.51	0.35	0.27	0.22	0.11		
tomaat met scherm	1.00	0.92	0.66	0.38	0.26	0.19	0.16	0.08		
tomaat zonder scherm	1.00	0.90	0.57	0.31	0.21	0.16	0.13	0.06		
cluster	1.00	0.98	0.84	0.55	0.39	0.30	0.25	0.13		
aardwarmte waterafname per jaar %										
chrysant met belichting	4	20	33	42	43	44	45	46		
tomaat met scherm	7	33	47	53	54	54	54	55		
tomaat zonder scherm	9	42	53	56	57	58	58	59		
cluster	6	28	48	62	66	68	69	71		

80 °C; 150 m3/uur 1314000 m3/jaar

REFERENTIE (standaard verwarming met minimumbuis(MB))

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m³ ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	103.9	200.7	313.4	346.1	360.9	368.4	381.0	30.7
tomaat met scherm	39.7	191.4	325.4	419.8	429.7	434.5	437.3	443.6	37.9
tomaat zonder scherm	48.4	218.2	319.8	389.6	400.7	406.7	410.6	419.3	40.6
cluster	29.6	146.3	269.5	398.2	435.9	452.8	462.7	477.2	40.3
dekingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.99	0.96	0.75	0.55	0.43	0.35	0.18	
tomaat met scherm	1.00	0.96	0.82	0.53	0.36	0.27	0.22	0.11	
tomaat zonder scherm	1.00	0.90	0.66	0.40	0.28	0.21	0.17	0.09	
cluster	1.00	0.99	0.91	0.67	0.49	0.38	0.31	0.16	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	3	16	30	46	50	52	53	55	
tomaat met scherm	7	35	57	72	74	75	75	76	
tomaat zonder scherm	10	45	63	73	75	76	76	77	
cluster	6	27	49	70	76	78	80	82	

VARIANT (standaard verwarming, geen MB)

1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
20.9	103.9	200.7	313.4	346.1	360.9	368.4	381.0	30.7
35.5	166.6	264.7	346.7	365.7	372.6	376.5	383.9	34.5
44.4	197.1	269.2	320.6	338.5	346.6	351.3	360.8	37.8
27.5	135.2	245.4	359.7	396.9	414.1	424.6	447.2	38.5
1.00	0.99	0.96	0.75	0.55	0.43	0.35	0.18	
1.00	0.95	0.75	0.49	0.35	0.27	0.21	0.11	
1.00	0.89	0.61	0.36	0.25	0.20	0.16	0.08	
1.00	0.98	0.89	0.65	0.48	0.38	0.31	0.16	
3	16	30	46	50	52	53	55	
7	31	46	58	61	62	62	63	
10	42	54	61	63	64	65	66	
5	25	44	62	68	71	72	75	

VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m³ ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.4	204.0	336.2	380.5	399.8	409.9	427.5	26.4
tomaat met scherm	35.0	174.4	307.1	423.1	454.2	465.2	470.9	481.9	27.0
tomaat zonder scherm	44.4	220.0	354.1	426.7	452.6	464.8	471.5	484.3	28.8
cluster	27.5	137.2	264.5	428.4	489.3	515.7	530.5	562.1	30.0
dekingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.98	0.81	0.61	0.48	0.39	0.20	
tomaat met scherm	1.00	1.00	0.88	0.60	0.43	0.33	0.27	0.14	
tomaat zonder scherm	1.00	0.99	0.80	0.48	0.34	0.26	0.21	0.11	
cluster	1.00	1.00	0.96	0.78	0.59	0.47	0.39	0.20	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	3	13	26	42	48	50	51	53	
tomaat met scherm	5	23	41	55	59	60	61	62	
tomaat zonder scherm	6	31	49	58	61	63	64	65	
cluster	4	19	35	57	64	68	70	74	

VARIANT (ondernet 70mm; L-strang 2x; geen MB)

1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
21.5	107.5	203.1	320.4	356.2	370.3	378.8	397.7	25.7
36.0	178.5	305.8	408.1	433.3	441.2	445.6	454.8	25.4
45.5	225.1	361.5	424.8	443.0	451.3	456.1	466.4	27.0
28.4	141.9	270.2	427.6	486.2	512.5	527.4	559.0	28.5
1.00	1.00	0.94	0.74	0.55	0.43	0.35	0.18	
1.00	0.99	0.85	0.57	0.40	0.31	0.25	0.13	
1.00	0.99	0.79	0.47	0.32	0.25	0.20	0.10	
1.00	1.00	0.95	0.75	0.57	0.45	0.37	0.20	
0	0	0	0	0	0	0	0	
2	11	21	33	39	42	43	45	
5	23	38	51	54	55	55	56	
6	30	48	55	57	58	59	60	

VARIANT (ondernet 70 mm; N-strang 2x; geen MB)

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m³ ae per jaar									
chrysant met belichting	22.2	110.6	203.0	309.6	338.5	350.0	356.5	371.3	25.9
tomaat met scherm	36.6	181.1	303.6	397.2	416.7	422.7	425.8	432.0	25.9
tomaat zonder scherm	46.0	227.3	356.2	410.0	423.3	429.6	433.4	441.0	27.6
cluster	28.8	143.6	270.6	420.4	474.1	498.3	512.3	539.8	29.3
dekingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.91	0.70	0.51	0.39	0.32	0.17	
tomaat met scherm	1.00	0.99	0.83	0.54	0.38	0.29	0.23	0.12	
tomaat zonder scherm	1.00	0.98	0.77	0.44	0.31	0.23	0.19	0.10	
cluster	1.00	1.00	0.94	0.73	0.55	0.43	0.36	0.19	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	3	14	25	38	42	43	44	46	
tomaat met scherm	5	23	39	50	53	53	54	54	
tomaat zonder scherm	6	31	48	55	56	57	57	58	
cluster	4	19	36	55	62	65	67	70	

80 °C; 200 m3/uur 1752000 m3/jaar

REFERENTIE (standaard verwarming met minimumbuis(MB))									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.4	205.0	368.6	433.0	461.5	477.5	502.9	30.7
tomaat met scherm	39.7	196.7	354.1	543.6	564.3	573.0	578.1	588.4	37.9
tomaat zonder scherm	48.4	234.2	370.2	502.7	524.3	534.2	540.7	555.0	40.6
cluster	29.6	147.6	283.3	471.8	548.5	581.2	599.3	631.3	40.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.98	0.88	0.69	0.55	0.46	0.24	
tomaat met scherm	1.00	0.99	0.89	0.68	0.47	0.36	0.29	0.15	
tomaat zonder scherm	1.00	0.97	0.76	0.52	0.36	0.28	0.22	0.11	
cluster	1.00	1.00	0.96	0.80	0.62	0.49	0.40	0.21	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	12	23	41	48	50	52	54	
tomaat met scherm	6	27	48	71	73	74	74	76	
tomaat zonder scherm	8	37	56	72	74	75	76	77	
cluster	4	21	39	63	72	76	78	82	

VARIANT (standaard verwarming, geen MB)									
1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
20.9	104.4	205.0	368.6	433.0	461.5	477.5	502.9	30.7	
35.5	173.3	297.7	425.8	471.9	487.5	495.1	508.6	34.5	
44.4	213.8	323.1	402.9	435.6	451.3	459.9	476.8	37.8	
27.5	136.9	259.9	423.6	496.6	529.2	547.6	585.8	38.5	
1.00	1.00	0.98	0.88	0.69	0.55	0.46	0.24		
1.00	0.99	0.85	0.61	0.45	0.35	0.28	0.15		
1.00	0.96	0.73	0.45	0.33	0.25	0.21	0.11		
1.00	0.99	0.94	0.77	0.60	0.48	0.40	0.21		
2	12	23	41	48	50	52	54		
5	24	40	54	59	61	61	63		
7	35	49	58	61	63	64	65		
4	19	36	56	64	68	70	74		

VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.4	207.9	379.5	469.3	507.3	528.2	562.1	26.4
tomaat met scherm	35.0	175.1	334.5	507.4	580.9	605.6	617.5	637.6	27.0
tomaat zonder scherm	44.4	221.9	408.0	534.7	580.9	603.5	616.5	640.2	28.8
cluster	27.5	137.3	271.1	484.2	600.4	652.4	680.9	734.8	30.0
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	1.00	0.91	0.75	0.61	0.51	0.27	
tomaat met scherm	1.00	1.00	0.95	0.72	0.55	0.43	0.35	0.18	
tomaat zonder scherm	1.00	1.00	0.92	0.60	0.44	0.34	0.28	0.14	
cluster	1.00	1.00	0.99	0.88	0.73	0.59	0.50	0.27	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	10	20	36	44	48	50	53	
tomaat met scherm	4	18	33	50	56	59	60	61	
tomaat zonder scherm	5	24	43	55	59	61	62	65	
cluster	3	14	27	48	60	64	67	72	

VARIANT (ondernet 70mm; L-strang 2x; geen MB)									
1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
21.5	107.6	210.8	367.1	445.3	475.0	490.0	521.3	25.7	
36.0	180.0	336.8	496.4	558.1	577.7	586.2	602.1	25.4	
45.5	227.3	416.3	540.3	574.8	590.7	599.6	617.3	27.0	
28.4	142.1	279.2	487.6	597.8	648.2	676.6	730.8	28.5	
1.00	1.00	0.98	0.85	0.69	0.55	0.46	0.24		
1.00	1.00	0.93	0.69	0.52	0.40	0.33	0.17		
1.00	1.00	0.91	0.59	0.42	0.32	0.26	0.14		
1.00	1.00	0.98	0.86	0.70	0.57	0.48	0.26		
2	10	19	34	41	43	45	47		
3	17	32	46	52	54	54	56		
5	23	41	53	56	57	58	60		
3	14	27	47	57	62	64	69		

VARIANT (ondernet 70 mm; N-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	22.2	110.8	214.1	360.0	427.4	451.3	463.7	487.8	25.9
tomaat met scherm	36.6	182.9	337.4	487.7	540.4	555.7	562.1	572.9	25.9
tomaat zonder scherm	46.0	230.1	414.7	526.1	552.8	564.4	571.1	584.7	27.6
cluster	28.8	143.9	281.4	483.3	586.1	632.1	658.0	707.8	29.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.96	0.81	0.64	0.51	0.42	0.22	
tomaat met scherm	1.00	0.99	0.92	0.66	0.49	0.38	0.31	0.16	
tomaat zonder scherm	1.00	1.00	0.90	0.57	0.40	0.31	0.25	0.13	
cluster	1.00	1.00	0.98	0.84	0.68	0.55	0.46	0.25	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	10	20	33	40	42	43	45	
tomaat met scherm	4	18	33	47	51	53	53	54	
tomaat zonder scherm	5	24	42	53	55	56	57	58	
cluster	3	14	28	48	57	62	64	69	

85 °C; 100 m3/uur 876000 m3/jaar

REFERENTIE (standaard verwarming met minimumbuis(MB))

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	103.2	191.4	252.2	268.4	275.0	278.6	285.1	30.7
tomaat met scherm	39.7	183.8	295.3	323.3	328.6	331.2	332.9	336.9	37.9
tomaat zonder scherm	48.4	200.5	278.5	304.3	310.9	314.5	316.7	321.9	40.6
cluster	29.6	144.3	250.0	323.4	342.7	352.0	356.7	363.0	40.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.99	0.91	0.60	0.43	0.33	0.27	0.14	
tomaat met scherm	1.00	0.93	0.74	0.41	0.28	0.21	0.17	0.08	
tomaat zonder scherm	1.00	0.83	0.58	0.31	0.21	0.16	0.13	0.07	
cluster	1.00	0.97	0.84	0.55	0.39	0.30	0.24	0.12	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	4	21	38	50	52	54	54	55	
tomaat met scherm	10	44	68	74	75	75	75	76	
tomaat zonder scherm	13	53	69	75	76	76	77	78	
cluster	7	35	59	74	78	80	81	83	

VARIANT (standaard verwarming, geen MB)

1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
20.9								
103.2	191.4	252.2	268.4	275.0	278.6	285.1	30.7	
35.5	157.0	231.3	272.8	280.7	284.2	286.2	290.3	34.5
44.4	178.0	226.0	255.9	264.8	269.0	271.6	276.8	37.8
27.5	132.9	225.8	293.8	313.2	322.9	329.0	342.0	38.5
1.00								
0.99	0.91	0.60	0.43	0.33	0.27	0.14		
1.00	0.90	0.66	0.39	0.27	0.20	0.16	0.08	
1.00	0.80	0.51	0.29	0.20	0.15	0.12	0.06	
1.00	0.97	0.82	0.53	0.38	0.29	0.24	0.12	
4								
21	38	50	52	54	54	55		
9	37	52	60	62	62	63	63	
12	47	57	63	64	65	65	66	
7	32	53	67	71	72	74	76	

VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.2	194.4	272.9	293.6	302.2	306.9	316.1	26.4
tomaat met scherm	35.0	170.4	268.2	330.0	341.9	346.9	349.8	356.0	27.0
tomaat zonder scherm	44.4	211.1	289.4	330.4	343.3	349.2	352.6	359.5	28.8
cluster	27.5	136.3	250.0	351.6	380.4	393.7	402.0	419.9	30.0
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.93	0.65	0.47	0.36	0.29	0.15	
tomaat met scherm	1.00	0.97	0.77	0.47	0.33	0.25	0.20	0.10	
tomaat zonder scherm	1.00	0.95	0.65	0.37	0.26	0.20	0.16	0.08	
cluster	1.00	0.99	0.91	0.64	0.46	0.36	0.29	0.15	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	4	18	33	47	50	52	52	54	
tomaat met scherm	6	31	48	58	60	61	61	62	
tomaat zonder scherm	9	40	54	61	63	64	64	65	
cluster	5	25	45	63	68	70	72	75	

VARIANT (ondernet 70mm; L-strang 2x; geen MB)

1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
21.5								
106.2	189.0	255.8	271.2	278.7	283.5	294.0	25.7	
36.0	172.0	262.7	314.3	323.0	326.9	329.3	334.6	25.4
45.5	214.8	291.9	322.9	331.8	336.0	338.7	344.3	27.0
28.4	140.6	252.0	348.3	376.8	390.2	398.5	416.1	28.5
1.00								
0.99	0.88	0.59	0.42	0.32	0.26	0.14		
1.00	0.95	0.73	0.44	0.30	0.23	0.18	0.09	
1.00	0.94	0.64	0.35	0.24	0.18	0.15	0.08	
1.00	0.99	0.89	0.61	0.44	0.34	0.28	0.15	
4								
18	32	43	45	46	47	49		
6	30	45	53	55	55	56	57	
8	39	52	57	58	59	59	60	
5	25	44	60	65	67	69	72	

VARIANT (ondernet 70 mm; N-strang 2x; geen MB)

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	22.2	108.4	186.2	244.0	256.4	262.2	265.9	274.8	25.9
tomaat met scherm	36.6	173.0	259.1	303.3	309.9	312.6	314.2	318.0	25.9
tomaat zonder scherm	46.0	215.0	285.7	309.7	316.4	319.8	321.8	326.0	27.6
cluster	28.8	141.9	250.7	340.9	367.1	379.6	387.1	401.1	29.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	0.98	0.84	0.55	0.39	0.30	0.24	0.12	
tomaat met scherm	1.00	0.94	0.70	0.41	0.28	0.21	0.17	0.09	
tomaat zonder scherm	1.00	0.93	0.62	0.34	0.23	0.17	0.14	0.07	
cluster	1.00	0.99	0.87	0.59	0.43	0.33	0.27	0.14	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	4	18	31	41	43	44	45	46	
tomaat met scherm	6	30	45	52	53	54	54	55	
tomaat zonder scherm	9	40	52	56	57	57	58	58	
cluster	5	26	45	60	65	67	68	71	

85 °C; 150 m3/uur 1314000 m3/jaar

REFERENTIE (standaard verwarming met minimumbuis(MB))									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.2	202.9	337.1	378.3	397.0	406.8	422.6	30.7
tomaat met scherm	39.7	195.3	341.4	472.1	484.9	490.9	494.4	502.0	37.9
tomaat zonder scherm	48.4	230.1	348.9	442.7	456.5	463.8	468.4	478.7	40.6
cluster	29.6	147.4	278.4	435.3	485.1	507.1	519.7	539.9	40.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.97	0.81	0.60	0.47	0.39	0.20	
tomaat met scherm	1.00	0.98	0.86	0.59	0.41	0.31	0.25	0.13	
tomaat zonder scherm	1.00	0.95	0.72	0.46	0.31	0.24	0.19	0.10	
cluster	1.00	0.99	0.94	0.73	0.55	0.43	0.35	0.18	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	3	14	27	44	50	52	53	55	
tomaat met scherm	6	31	53	72	74	74	75	76	
tomaat zonder scherm	9	41	60	73	75	75	76	77	
cluster	5	24	44	67	74	77	79	82	

VARIANT (standaard verwarming, geen MB)									
1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
20.9	104.2	202.9	337.1	378.3	397.0	406.8	422.6	30.7	
35.5	171.5	282.7	383.0	409.2	418.4	423.2	432.3	34.5	
44.4	209.6	299.9	361.5	383.9	393.9	399.8	411.1	37.8	
27.5	136.5	254.8	392.0	440.6	462.7	475.5	503.0	38.5	
1.00	1.00	0.97	0.81	0.60	0.47	0.39	0.20		
1.00	0.98	0.81	0.55	0.39	0.30	0.24	0.12		
1.00	0.94	0.68	0.41	0.29	0.22	0.18	0.09		
1.00	0.99	0.93	0.71	0.53	0.42	0.35	0.18		
3	14	27	44	50	52	53	55		
6	28	44	57	60	61	62	63		
8	38	52	60	63	64	64	66		
4	22	40	60	67	70	71	75		

VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.4	205.8	352.9	409.3	433.0	445.8	467.3	26.4
tomaat met scherm	35.0	174.9	318.7	452.9	495.0	508.7	515.9	529.1	27.0
tomaat zonder scherm	44.4	221.2	377.0	464.3	495.6	510.3	518.6	533.8	28.8
cluster	27.5	137.3	267.7	450.3	527.4	560.4	578.5	616.0	30.0
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.99	0.85	0.65	0.52	0.43	0.22	
tomaat met scherm	1.00	1.00	0.91	0.65	0.47	0.36	0.29	0.15	
tomaat zonder scherm	1.00	1.00	0.85	0.52	0.37	0.29	0.23	0.12	
cluster	1.00	1.00	0.97	0.82	0.64	0.51	0.42	0.22	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	12	24	40	47	49	51	53	
tomaat met scherm	4	21	38	53	58	59	60	62	
tomaat zonder scherm	6	28	48	57	61	62	63	65	
cluster	3	17	33	54	63	67	69	73	

VARIANT (ondernet 70mm; L-strang 2x; geen MB)									
1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp	
21.5	107.6	206.1	337.2	383.8	401.1	411.2	433.3	25.7	
36.0	179.3	317.8	437.2	471.5	481.5	486.9	497.7	25.4	
45.5	226.4	383.4	462.1	484.4	494.4	500.2	512.2	27.0	
28.4	142.0	274.2	449.8	522.5	555.0	573.1	610.6	28.5	
1.00	1.00	0.96	0.78	0.59	0.47	0.38	0.20		
1.00	1.00	0.88	0.61	0.44	0.33	0.27	0.14		
1.00	1.00	0.84	0.51	0.35	0.27	0.22	0.11		
1.00	1.00	0.96	0.79	0.61	0.49	0.40	0.21		
2	12	23	37	43	44	46	48		
4	21	36	50	53	54	55	56		
5	27	46	55	57	58	59	60		
3	17	32	52	60	64	66	70		

VARIANT (ondernet 70 mm; N-strang 2x; geen MB)									
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	22.2	110.8	207.0	327.8	365.9	380.2	388.1	405.2	25.9
tomaat met scherm	36.6	182.2	316.5	427.6	455.0	462.6	466.4	473.8	25.9
tomaat zonder scherm	46.0	229.0	379.6	448.2	464.6	472.1	476.7	485.7	27.6
cluster	28.8	143.8	275.5	443.9	511.4	541.1	558.2	591.6	29.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.93	0.74	0.55	0.43	0.35	0.18	
tomaat met scherm	1.00	0.99	0.86	0.58	0.41	0.31	0.25	0.13	
tomaat zonder scherm	1.00	0.99	0.82	0.48	0.34	0.26	0.21	0.11	
cluster	1.00	1.00	0.96	0.77	0.59	0.47	0.39	0.21	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	12	23	37	41	43	44	45	
tomaat met scherm	4	21	37	49	52	53	54	54	
tomaat zonder scherm	6	28	46	54	56	57	57	58	
cluster	3	17	33	53	60	64	66	70	

85 °C; 200 m3/uur 1752000 m3/jaar

REFERENTIE (standaard verwarming met minimumbuis(MB))

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.6	206.4	382.8	468.2	504.4	524.5	557.2	30.7
tomaat met scherm	39.7	197.9	367.6	590.6	635.4	646.5	652.9	665.7	37.9
tomaat zonder scherm	48.4	239.7	401.0	557.0	596.4	608.6	616.3	633.4	40.6
cluster	29.6	148.0	288.6	500.1	603.4	646.8	670.4	713.3	40.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.99	0.91	0.75	0.60	0.50	0.27	
komkommer	1.00	0.99	0.88	0.67	0.51	0.40	0.33	0.17	
paprika	1.00	0.99	0.93	0.75	0.57	0.44	0.36	0.19	
potplant koud	1.00	1.00	0.96	0.84	0.74	0.65	0.57	0.33	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	11	21	38	46	50	51	54	
komkommer	4	19	33	47	53	55	56	58	
paprika	4	19	34	54	60	62	63	65	
potplant koud	1	7	12	21	27	31	34	38	

VARIANT (standaard verwarming, geen MB)

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.6	206.4	382.8	468.2	504.4	524.5	557.2	30.7
tomaat met scherm	35.5	174.8	314.0	462.6	524.4	545.6	555.6	572.3	34.5
tomaat zonder scherm	44.4	219.4	356.0	452.0	492.2	511.8	522.7	543.2	37.8
cluster	27.5	137.5	265.8	451.5	545.5	587.5	611.3	657.9	38.5
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.99	0.91	0.75	0.60	0.50	0.27	
komkommer	1.00	0.99	0.88	0.67	0.51	0.40	0.33	0.17	
paprika	1.00	0.98	0.91	0.71	0.54	0.43	0.35	0.18	
potplant koud	1.00	1.00	0.96	0.84	0.74	0.65	0.57	0.33	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	11	21	38	46	50	51	54	
komkommer	4	19	33	47	53	55	56	58	
paprika	4	18	33	49	55	58	59	61	
potplant koud	1	7	12	21	27	31	34	38	

VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	20.9	104.4	208.4	388.8	497.7	545.7	571.3	613.8	26.4
tomaat met scherm	35.0	175.1	340.9	536.3	626.0	660.0	674.8	699.6	27.0
tomaat zonder scherm	44.4	222.1	422.2	578.7	633.1	660.8	676.6	705.2	28.8
cluster	27.5	137.3	272.6	499.9	637.0	703.2	738.7	803.9	30.0
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	1.00	0.93	0.79	0.65	0.55	0.29	
tomaat met scherm	1.00	1.00	0.97	0.77	0.60	0.47	0.39	0.20	
tomaat zonder scherm	1.00	1.00	0.95	0.65	0.47	0.37	0.30	0.16	
cluster	1.00	1.00	0.99	0.91	0.77	0.64	0.54	0.29	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	9	18	33	43	47	49	52	
tomaat met scherm	3	16	31	48	55	58	59	61	
tomaat zonder scherm	4	21	40	54	59	61	62	64	
cluster	3	13	25	45	57	63	66	72	

VARIANT (ondernet 70mm; L-strang 2x; geen MB)

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	21.5	107.6	212.4	378.0	473.0	511.7	530.4	567.0	25.7
tomaat met scherm	36.0	180.1	344.0	525.5	601.2	628.6	639.4	658.5	25.4
tomaat zonder scherm	45.5	227.5	429.6	583.8	626.3	645.9	656.5	677.4	27.0
cluster	28.4	142.1	281.2	504.1	633.7	696.7	731.6	796.9	28.5
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.99	0.88	0.73	0.59	0.49	0.26	
tomaat met scherm	1.00	1.00	0.95	0.73	0.56	0.44	0.35	0.18	
tomaat zonder scherm	1.00	1.00	0.94	0.64	0.46	0.35	0.29	0.15	
cluster	1.00	1.00	0.99	0.89	0.74	0.61	0.51	0.28	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	9	18	32	39	43	44	47	
tomaat met scherm	3	16	30	45	51	53	54	56	
tomaat zonder scherm	4	21	39	52	55	57	58	59	
cluster	2	12	25	44	55	60	63	69	


VARIANT (ondernet 70 mm; N-strang 2x; geen MB)

areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100	retour temp
besparing gasgebruik 10⁴ m3 ae per jaar									
chrysant met belichting	22.2	110.8	216.8	372.4	456.7	487.9	503.4	531.8	25.9
tomaat met scherm	36.6	182.9	346.0	518.3	585.3	606.6	615.0	628.3	25.9
tomaat zonder scherm	46.0	230.2	429.9	571.4	605.3	619.4	627.5	643.6	27.6
cluster	28.8	143.9	283.8	501.4	623.7	681.9	713.7	774.2	29.3
dekkingsgraad									
chrysant met belichting	1.00	1.00	0.98	0.84	0.69	0.55	0.45	0.24	
tomaat met scherm	1.00	1.00	0.94	0.70	0.53	0.41	0.33	0.17	
tomaat zonder scherm	1.00	1.00	0.93	0.62	0.44	0.34	0.27	0.14	
cluster	1.00	1.00	0.99	0.87	0.72	0.59	0.50	0.27	
aardwarmte waterafname per jaar %									
chrysant met belichting	2	9	18	31	39	41	42	45	
tomaat met scherm	3	16	30	45	51	52	53	54	
tomaat zonder scherm	4	21	40	52	55	56	57	58	
cluster	3	13	26	45	55	60	63	68	

Resultaten bij toepassing aquifer als warmteopslag

De onderstaande tabel geeft voor de berekende configuraties van kasinrichting de capaciteit van de warmtepomp waarbij de aquifer in thermisch evenwicht blijft, de jaarlijks bespaarde hoeveelheid aardgas per m² kas en de jaarlijks opgeslagen hoeveelheid warmte in de aquifer uitgedrukt in aardgasequivalenten.

	A			B			C			D		
	cap. WP [W/m ²]	besp [m ³ a.e. /m ² j]	bijdr. aquif [m ³ a.e. /m ² j]	cap. WP [W/m ²]	besp [m ³ a.e. /m ² j]	bijdr. aquif [m ³ a.e. /m ² j]	cap. WP [W/m ²]	besp [m ³ a.e. /m ² j]	bijdr. aquif [m ³ a.e. /m ² j]	cap. WP [W/m ²]	besp [m ³ a.e. /m ² j]	bijdr. aquif [m ³ a.e. /m ² j]
chrysant met belichting	17	4,9	11,0	28	6,7	11,8	20	6,6	11,1	17	6,0	10,8
tomaat met scherm	14	5,4	12,5	13	6,3	13,1	14	7,1	12,5	13	6,9	11,8
tomaat zonder scherm	13	3,8	12,3	10	4,9	12,9	12	6,5	13,0	12	6,4	12,5
cluster	14	4,0	11,3	15	5,1	12,0	15	5,6	11,5	14	5,4	11,2

 = best presterend

Configuratie	On	Ns	Ls	Mb
A	70	1	1	geen
B	70	2	1	geen
C	70	1	2	geen
D	51	1	2	geen

On=diameter ondernet, Ns=aantal strangen tov ref, Ls=lengte strangen tov ref, Mb=minimumbuis

Bijlage 3 Effect CO₂-dosereren met ketel

In onderstaande tabel is voor twee broncapaciteiten en verschillende arealen de energiebesparing gegeven voor tomaat met en zonder scherm, indien CO₂ wordt gedoseerd met de eigen ketelrookgassen. Tevens is aangegeven hoeveel minder aardwarmte er wordt gebruikt dan in het geval dat er met zuivere CO₂ wordt gedoseerd.

Bron: 75 °C; 100 m3/uur; 876000 m3/jaar								
REFERENTIE (met minimumbuis(MB))								
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100
besparing 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	0.0	134.7	215.1	236.9	244.3	248.1	250.5	256.1
tomaat zonder scherm	0.0	134.0	196.1	218.2	226.4	230.8	233.6	240.0
vedrongen aardwarmte 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	39.7	33.7	23.9	12.4	8.3	6.2	4.9	2.2
tomaat zonder scherm	48.4	33.5	21.7	11.4	7.7	5.7	4.5	1.9
VARIANT (standaard verwarming, geen MB)								
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100
besparing 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	0.0	111.1	173.0	203.4	211.6	215.6	218.0	223.3
tomaat zonder scherm	0.0	114.3	158.2	185.1	194.0	198.5	201.2	207.2
vedrongen aardwarmte 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	35.1	27.7	19.2	10.6	7.2	5.4	4.3	1.9
tomaat zonder scherm	44.3	28.5	17.5	9.7	6.6	4.9	3.9	1.7
VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)								
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100
besparing 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	0.0	129.9	213.9	261.2	273.0	278.7	282.1	289.7
tomaat zonder scherm	0.0	154.8	219.9	258.9	271.8	278.1	281.8	289.8
vedrongen aardwarmte 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	35.0	32.5	23.7	13.7	9.3	7.0	5.6	2.6
tomaat zonder scherm	44.4	38.7	24.4	13.6	9.3	7.0	5.6	2.6
Bron: 85 °C; 200 m3/uur; 1752000 m3/jaar								
REFERENTIE (met minimumbuis(MB))								
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100
besparing 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	0.0	158.3	330.9	561.1	614.3	630.5	640.1	659.4
tomaat zonder scherm	0.0	191.8	361.0	529.3	576.7	593.6	604.2	627.6
vedrongen aardwarmte 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	39.7	39.6	36.7	29.5	21.1	16.0	12.9	6.3
tomaat zonder scherm	48.4	47.9	40.1	27.8	19.7	15.0	12.1	5.9
VARIANT (standaard verwarming, geen MB)								
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100
besparing 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	0.0	139.9	282.6	439.5	507.0	532.1	544.7	567.0
tomaat zonder scherm	0.0	175.5	320.4	429.5	475.9	499.2	512.4	538.2
vedrongen aardwarmte 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	35.1	34.9	31.4	23.1	17.4	13.5	11.0	5.4
tomaat zonder scherm	44.4	43.9	35.6	22.5	16.3	12.6	10.2	5.0
VARIANT (standaard verwarming; L-strang 2x; geen MB)								
areaal in hectare	1	5	10	20	30	40	50	100
besparing 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	0.0	140.1	306.8	509.6	605.2	643.6	661.5	693.0
tomaat zonder scherm	0.0	177.7	380.0	549.9	612.1	644.4	663.2	698.5
vedrongen aardwarmte 10⁴ m3 ae per jaar								
tomaat met scherm	35.0	35.0	34.1	26.8	20.8	16.4	13.3	6.7
tomaat zonder scherm	44.4	44.4	42.2	28.9	21.0	16.4	13.4	6.7

Bijlage 4 Fiscale regelingen en subsidies

Voor de toepassing van aardwarmte gelden zowel nationaal (in Nederland) als internationaal (in de Europese Unie) een groot aantal fiscale regelingen en subsidies.

Op de website van het Projectbureau Duurzame Energie (PDE) <http://www.pde.nl/downloads/FSDEnat.PDF> zijn de financiële stimuleringsregelingen voor duurzame energie in Nederland weergegeven. De meeste regelingen hebben betrekking op uiteenlopende vormen van duurzame energie.

Naast de nationale stimuleringsregelingen zijn ook internationale regelingen van kracht, waarvoor informatie kan worden ingewonnen bij Senter (internationale samenwerking; tel. 038-4553553, <http://www.senter.nl>) of bij EG-Liaison (Europese subsidies; tel. 070-3610250, <http://www.egl.nl>).

De meeste regelingen zijn gericht op energiebesparing of energie-efficiency verbeterende maatregelen, maar enkele zijn specifiek bedoeld voor initiatieven die tot doel hebben de CO₂-emissie te beperken. In onderstaande paragrafen worden de diverse regelingen kort toegelicht. Een belangrijke regeling die niet is opgenomen is het Technisch Ontwikkeling Krediet (TOK), die 40% van de projectkosten voor zijn rekening neemt met een maximum bedrag van 25 miljoen gulden.

B4.1 Energie InvesteringsAftrek (EIA)

De Energie Investeringsaftrek (EIA) is een fiscale regeling die als doel heeft energiebesparing en de inzet van duurzame energie door het Nederlandse bedrijfsleven te stimuleren. Bepaalde investeringen vermeld op de energielijst komen in aanmerking voor de energie investeringsaftrek tot 55% van het investeringsbedrag voor dat apparaat. Ondernemers die belastingplichtig zijn voor de inkomsten- en vennootschapsbelasting kunnen voor investeringen van meer dan 503000 gulden tot 55% van de fiscale winst aftrekken. De EIA is een EZ-regeling.

B4.2 Willekeurige afschrijving Milieu-investeringen in de landbouw (VAMIL)

Deze regeling is opgezet om de marktintroductie van milieuvriendelijke bedrijfsmiddelen te stimuleren. Binnen de VAMIL regeling is het mogelijk om milieu-investeringen op een zelf gekozen moment af te schrijven. Deze afschrijving hoeft dus niet gelijk te zijn aan de waardevermindering van de goederen op het bedrijf. Door de VAMIL regeling kan een liquiditeits- en rentevoordeel worden gerealiseerd door op het financieel gezien meest gunstige moment af te schrijven op de investering. Daarnaast kan door de VAMIL regeling aftopping van hoge inkomens plaatsvinden. Dit is echter ook mogelijk via middeling. VROM-regeling.

B4.3 Regeling Groenprojecten, w.o. Groene financiering

Bedrijven met milieuvriendelijke investeringen komen in aanmerking voor groenfinanciering. Dit betekent voor de tuinders dat ze hypotheek kunnen afsluiten tegen een gunstiger rentetarief. Gangbare bedrijven komen niet in aanmerking voor deze regeling. Het rentevoordeel in absolute zin is circa 1,2%. De groenfinanciering heeft een looptijd van maximaal 10 jaar. Regeling van VROM, Financien en LNV.

B4.4 Regeling Structuurverbetering Glastuinbouw (RSG)

De Regeling Structuurverbetering Glastuinbouw (RSG) is in het leven geroepen om enerzijds tuinders te stimuleren hun bedrijf te verplaatsen dan wel te stoppen en anderzijds om investeringen in groen label kassen te stimuleren en de daarmee samenhangende energiebesparende maatregelen. In de regeling is een aantal grenzen opgenomen wat betreft de hoogte van het subsidiebedrag en de voorwaarden om in aanmerking te kunnen komen.

B4.5 Milieu InvesteringsAftrek (MIA)

De Milieu Investeringsaftrek (MIA) is een fiscale regeling die als doel heeft investeringen in milieuvriendelijke apparatuur door het Nederlandse bedrijfsleven te stimuleren. De MIA bedraagt 30% voor een groen label kas en diverse milieu-investeringen waaronder duurzame energie. Het percentage mag worden toegepast op de totale investering in kas en apparatuur. Investeringen die in aanmerking komen voor de duurzame energie investeringsaftrek vallen onder de Energie Investeringsaftrek (EIA). Omdat het percentage onder EIA 40 tot 52% bedraagt, is het voordeel voor de tuinder groter dan wanneer de investering onder MIA zou vallen. MIA is dan alleen interessant wanneer duurzame energieinvesteringen gecombineerd zijn met andere niet duurzame milieuvriendelijke investeringen.

B4.6 CO2-reductieplan

Voor (grootschalige) projecten op het gebied van benutting van industriële en niet industriële restwarmte, warmtepomp en duurzame energie is een subsidiemogelijkheid voorzien in het kader van het CO₂-reductieplan. Voor duurzame energie wordt maximaal 45% van de gemaakte projectkosten gesubsidieerd. Deze VROM en EZ-regelingen stellen een aantal voorwaarden om in aanmerking te komen voor subsidie en kennen een maximum subsidiebedrag. Deze voorwaarden lijken niet beperkend te zijn voor de diverse projecten in de glastuinbouw. Beperkender voor de bruikbaarheid van de regelingen is de systematiek op basis waarvan subsidie wordt toegekend. Gekeken wordt naar de kosteneffectiviteit (Ke) waarbij voor duurzame energiebronnen zoals aardwarmtewinning geldt: Ke is maximaal f 50,-/ton CO₂. Bij warmtepompen geldt een Ke van maximaal f 100,-/ton CO₂ en een CO₂ reductie van tenminste 1 kton per jaar.

B4.7 Besluit Subsidies Energieprogramma's (BSE)

Dit programma heeft als doel het stimuleren van energiebesparing, duurzame energie en milieuvriendelijke energietechnieken. Subsidies zijn mogelijk voor haalbaarheidsprojecten, onderzoek- of ontwikkelingsprojecten, praktijkexperimenten en voor projecten gericht op kennisoverdracht, demonstratie en marktintroductie. Als onderzoek- of ontwikkelingsproject zou de combinatie van aardwarmte, warmtepompen en warmteopslag in aanmerking kunnen komen voor 50% subsidie. EZ-regeling, uitvoering Novem.

B4.8 Besluit Subsidies Economie, Ecologie en Technologie (EET)

Projecten uitgevoerd door een samenwerkingsverband dat bestaat uit tenminste twee niet verbonden natuurlijke (rechts) personen, onder wie ten minste één ondernemer, kunnen maximaal 40% van de kosten vergoed krijgen bij industrieel onderzoek.

B4.9 Regulerende Energiebelasting (REB)

Het primaire doel van de REB is het terugdringen van het energieverbruik bij huishoudens en bedrijven. De REB wordt door energiebedrijven geïnd bij gebruikers en daarna doorgesluisd naar de overheid (ministerie van financiën). De overheid (fiscus) sluisd de REB weer door naar producenten van duurzame energie die hun elektriciteit, aardgas en warmte aan het energiebedrijf leveren. Voor de producenten van warmte geldt in 2001 per GJ warmte een doorsluiting van f 3,91. Helaas is de REB-doorsluiting niet van toepassing op producenten van aardwarmte, alleen biomassa-warmtekrachtinstallaties die hun warmte aan het energiebedrijf leveren komen in aanmerking.

B4.10 Programma Schoner Producteren (SP)

Doel is het stimuleren van maatregelen ter verbetering van de milieu- en energiehuishouding in het MKB en de non-profitsector door middel van subsidiëring van milieuadviezen, voorlichting en doorlichting schoner produceren. De subsidie bedraagt maximaal tweederde van de projectkosten tot een maximum van f 250.000,-.

De verschillende regelingen kunnen worden onderscheiden in fiscale regelingen en subsidies. Bij de fiscale regelingen (zoals EIA, VAMIL en MIA) is sprake van indirecte regelingen om investeringskosten of afschrijvingen van de fiscale winst te kunnen aftrekken. Wanneer geen winst wordt gemaakt – doordat aardwarmte vanuit een stichting tegen kostprijs aan de glastuinbouw wordt geleverd - dan zijn deze fiscale regelingen niet interessant.

Subsidies zijn directe bijdragen om door middel van kostenverlaging investeringen in duurzame energie aantrekkelijk te maken (Groenfinanciering, CO₂ reductieplan en BSE) of van activiteiten om tot realisering van energiebesparende projecten te komen (EET, SP). De subsidies kunnen aardig oplopen. Dat geldt bijvoorbeeld wanneer voor de gecombineerde investeringen in aardwarmtewinning, warmtepompen en warmteopslag 50% BSE wordt toegekend op basis van onderzoeks- of ontwikkelingsprojecten. Daarnaast kan over het resterende investeringsbedrag via de groenfinanciering 1,2% rentevoordeel wordt verkregen. De subsidies via het CO₂ reductieplan, die toegekend worden op basis van de kosteneffectiviteit, bedragen maximaal 45% voor duurzame energie-investeringen. Zij vallen dus lager uit dan subsidies via het BSE.