

TNO en Glastuinbouw
Van Mourik Broekmanweg 6
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T 015 276 30 00
F 015 276 30 16

TNO-rapport

2006-D-R0644

Buffering van aardwarmte en andere duurzame energiebronnen

Datum 25 november 2006

Auteur(s) Egon Janssen (TNO)
Jan Ruigrok (TNO)
Bert van 't Ooster (WUR)
Jaap de Wit (WUR)

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 53

Aantal bijlagen 3

Opdrachtgever Produktschap Tuinbouw
Mevr. A. Jolman
Postbus 280
2700 AG Zoetermeer

Produktschap  Tuinbouw

Ministerie van LNV
Leo Oprel
Postbus 482
6710 BL Ede



Agriport A7
Robert Kielstra
Postbus 5
1775 ZG Middenmeer

Projectnaam Buffering aardwarmte
Projectnummer 006.53458

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

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

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

Samenvatting

In het kader van de reductie van het fossiele brandstofgebruik is door TNO onderzoek gedaan naar het gebruik van aardwarmte voor de verwarming van tuinbouwkassen. Dit onderzoek is gedaan voor het Productschap Tuinbouw (PT) en het ministerie van Landbouw, Natuur en Visserij (LNV) en past binnen het gezamenlijke programma “Kas als energiebron” van PT en LNV. Door middel van dit programma wordt getracht dat vanaf 2020 alle kassen energie neutraal zijn. Voor dit onderzoek is nauw samengewerkt met Agriport A7, waarbij de specifieke situatie van kwekerij de Wieringermeer en kwekerij Van den Ende/Van Kleef als uitgangspunten genomen zijn voor het onderzoek.

Naast het gebruik van enkel een aardwarmtebron is er ook gekeken naar combinaties van aardwarmte met andere warmtebronnen en energiebuffers. Door het gebruik van een energiebuffer kan er worden volstaan met een aardwarmte installatie met een kleinere capaciteit. Wanneer de warmtevraag hoger is dan de capaciteit van de aardwarmtebron dan kan dit worden aangevuld door warmte uit het buffer.

In het begin van het onderzoek is er gekeken naar de verschillende alternatieven voor de buffering van de warmte. Vier alternatieven zijn in meer detail beschreven:

1. De warmtetank,
2. Het kelderbuffer,
3. Het ondiepe aquifer
4. Het diepe aquifer.

Uiteindelijk is de keuze gevallen op de kelderbuffer. Het voordeel van deze variant is dat op een relatief goedkope manier een buffer kan worden gemaakt met een grote capaciteit. Andere voordelen zijn dat het buffer geen bruikbare ruimte in beslag neemt en dat het warmteverlies ten goede komt aan de kas. Ook het diepe aquifer lijkt een goede optie voor het bufferen van hoogthermische warmte maar deze techniek heeft nog veel risico's.

Daarna is in een eerste economische analyse gekeken wat de variabele en vaste kosten zijn van de ketel, de WKK en de aardwarmtebron. Hieruit is naar voren gekomen dat de WKK en de aardwarmte bron bij de huidige gasprijs en 5000 draaiuren veel goedkoper zijn dan de ketel. Bij de huidige gasprijs is de WKK nog net iets goedkoper. Ook bij nog verder stijgende gasprijzen zullen de WKK en de aardwarmtebron qua prijs dicht bij elkaar blijven liggen. Hierbij ligt het aan de ontwikkeling van de spark spread welke variant goedkoper is. De ketel is door de lage investeringskosten goedkoper bij minder dan 2000 draaiuren. Hierdoor is de ketel een goede optie voor het opvangen van de pieken in de warmtevraag.

Door middel van jaarrond simulaties is gekeken wat de warmte vraag is van twee kwekerijen en hoe deze vraag kan worden ingevuld. De simulaties zijn gedaan met verschillende configuraties van warmte-installaties, waarbij eerst een referentie situatie is bepaald waarbij zowel ketels als WKK's zijn ingezet.

Uit onderzoek is naar voren gekomen dat bij een onbelichte teelt en met de huidige gasprijs het goedkoper is om met aardwarmte te verwarmen dan door middel van een ketel. Aardwarmte is zelfs een goedkopere optie dan de WKK, het is ongeveer 10% goedkoper dan de referentie situatie. In tegenstelling tot de hypothese van het onderzoek is het met de huidige prijzen voor de buffers niet mogelijk om te besparen op de investeringskosten door de aanleg van een groter buffer. Hierbij moet worden

opgemerkt dat in de simulaties al standaard een dag buffer van 260 m³ aanwezig was. De prijs van een (semi-) seizoensbuffer moet dalen tot ongeveer 55,- €/m³ om een besparing ten opzicht van de extra investeringskosten te kunnen bereiken.

In plaats van buffering kan er ook gewerkt worden met een ketel om de pieken in de warmtevraag op te vangen. De besparing zou hierdoor oplopen tot ongeveer 22%, terwijl er de aardgasbesparing nog steeds 90% is.

Bij een kwekerij met een belichte teelt is een volledige inzet van aardwarmte niet goedkoper dan de WKK. Dit komt door de hoge elektriciteitsvraag. Met een gedeeltelijke inzet van aardwarmte is het wel mogelijk om de kosten met 22% te reduceren. Hierbij wordt tevens 62%

Tevens is uit dit onderzoek naar voren gekomen dat het gebruik van de WKK's voor ongeveer 50% in de daluren gebeurt. Omdat tijdens de daluren veel minder wordt verdiend is het aantrekkelijk om dit percentage omhoog te krijgen. Door het gebruik van een buffer met voldoende capaciteit is het mogelijk de warmte- en elektriciteitsvraag los te koppelen. Met de applicaties die gebruikt zijn in dit onderzoek is het mogelijk om te kijken wat de ideale buffercapaciteit zou zijn en of dat de extra investering zich op korte termijn terugverdiend.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	6
2	Inleiding aardwarmte	7
2.1	Aardwarmte	7
2.1.1	Energiebesparing en kosteneffectiviteit van aardwarmte	8
2.2	Toepassing van ondiepe aquifers (koude-/ warmteopslag)	8
2.2.1	Juridische aspecten en procedure	9
2.3	Naast warmtebron ook buffermogelijkheden	10
3	Energievoorzieningsstrategieën	11
3.1	Warmtebronnen	11
3.1.1	Kosten ketel	12
3.1.2	Kosten WKK	13
3.1.3	Kosten aardwarmte	13
3.1.4	Vergelijking verwarmingskosten	14
3.2	Mogelijke buffersystemen	17
3.2.1	Warmteopslag tanks	17
3.2.2	Ondiepe (200m) Aquifers	18
3.2.3	Diepe (va 500m) aquifers	19
3.2.4	'CO ₂ buffering'	20
3.3	Buffercriteria	20
3.3.1	Flexibiliteit	20
3.3.2	Energetische prestatie	21
3.3.3	Economische haalbaarheid	21
3.4	Bufferstrategieën voor aardwarmte	21
4	Jaarrond simulatie	23
4.1	Simulatie opzet	23
4.1.1	De rol van CO ₂	24
4.1.2	Overige randvoorwaarde tijdens simulatie	24
4.2	Referentie simulatie	24
4.2.1	Specificaties Case Kwekerij de Wieringermeer	25
4.2.2	Van de Ende-Van Kleef	26
4.3	Resultaten referentie situaties	26
4.3.1	Kwekerij de Wieringermeer	26
4.3.2	Kwekerij Van den Ende – Van Kleef	28
4.4	Aardwarmte simulatie	31
4.4.1	Kwekerij de Wieringermeer	31
4.4.2	Kwekerij Van den Ende - Van Kleef	39
5	Slim bufferen van andere duurzame bronnen	43
5.1	Restwarmte vanuit elektriciteitscentrales	43
5.2	Zonne-energie	43
5.3	Bio-energie	44
5.4	Conclusie	44
6	Conclusies en aanbevelingen	46
7	Referenties	49

Bijlage(n)

A Economische Analyse

B Resultaten GTa-simulatie kwekerij de Wieringermeer

C Resultaten GTa-simulatie Van den Ende – Van Kleef

1 Inleiding

In opdracht van het ministerie van LNV en het Productschap Tuinbouw is er een onderzoek gestart naar de mogelijkheid om slimme buffersystemen en aardwarmte in kassen te gebruiken om het gasverbruik voor kasverwarming te verminderen. Uit een eerder onderzoek is gebleken dat aardwarmte een interessante optie is bij een commodity gasprijs van 22,7 cent. [van de Braak et al, 2001]. Dit project wordt uitgevoerd binnen het programma “Kas als energiebron” van PT en LNV, dat als doel heeft de kassen vanaf 2020 energie neutraal te hebben.

Door het stijgen van de gasprijs wordt er meer en meer gezocht naar een alternatief voor de verwarmingsketel. Aardwarmte is een duurzaam alternatief om de kas van warmte te voorzien. Doordat ook aan de warmtevraag op de piekmomenten moet worden voldaan moet de installatie een grote capaciteit hebben. Dit heeft hoge investeringskosten en een lage benuttingsgraad van de capaciteit tot gevolg, waardoor het niet rendabel is. Er zijn ook andere ontwikkelingen gaande om de stookkosten te verlagen. Zo wordt er op veel locaties al gebruik gemaakt van een WKK, waarmee door de verkoop van elektriciteit een deel van de kosten wordt terugverdiend. De ontwikkeling vormt een concurrentie voor het gebruik van aardwarmte, maar er zijn ook andere meer duurzame initiatieven die met de aardwarmte concurreren zoals het gebruik van restwarmte voor de kasverwarming, deze bronnen zijn echter niet overal beschikbaar.

Aardwarmte kan gebruikt worden als bron voor de levering van warmte aan de kas. Om dit proces rendabel te maken is een hoge benuttingsgraad van de bron in combinatie met een hoge dekkingsgraad van de warmtevraag van de kas gewenst. Er wordt gekeken of er een systeem ontworpen kan worden waarbij de aardwarmtebron een hoge dekkingsgraad heeft en waarbij de benuttingsgraad wordt verhoogd door een slim gedimensioneerd buffer. Deze buffer kan de fluctuaties in de warmtevraag opvangen door tijdelijke warmteopslag en daarmee zowel de dekkingsgraad als de benuttingsgraad vergroten.

De haalbaarheid van aardwarmte in samenwerking met een slim gekozen buffer wordt getoetst door middel van een pilot case, hiervoor wordt Agriport A7 gebruikt. Op deze locatie wordt een nieuw glasareaal ontwikkeld en er wordt onderzocht in hoeverre het mogelijk is om aardwarmte te gebruiken als energiebron voor de verwarming. Eerst is de mogelijkheid en haalbaarheid van aardwarmte onderzocht door middel van een quickscan. Hierin is gekeken naar de technische en economische haalbaarheid van deze techniek. De resultaten kunnen worden gevonden in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 is een eerste onderzoek gedaan naar de verschillende warmtebronnen en buffermethode. In hoofdstuk 4 wordt vervolgd met een jaarrond simulatie waarmee gekeken wordt wat de beste buffermethode is voor het gebruik van aardwarmte in een glastuinbouwkas en of deze installatie kan concurreren met de ketel en WKK. Andere duurzame energiebronnen als alternatief voor aardwarmte worden besproken in hoofdstuk 5.

2 Inleiding aardwarmte

Aardwarmte wordt nog maar weinig toegepast, een reden hiervoor is dat de investeringskosten hoog zijn, ook is het niet overal beschikbaar. Momenteel wordt er in Bleiswijk de eerste kas gebouwd die volledig verwarmd zal worden door aardwarmte. Deze locatie zal als pilot case gebruikt worden voor het gebruik van aardwarmte in de glastuinbouw.

Door het gebruik van aardwarmte wordt de aanspraak op warmte van een WKK of ketel sterk verlaagd of zal het kan zelfs wegvallen. In plaats hiervan wordt warm water uit de bodem opgepompt. Dit warme water wordt gebruikt voor het verwarmen van de kas. Er is dan veel minder of geen gas nodig voor het verwarmen van de kas, maar wel zal elektriciteit gebruikt worden door de aardwarmtepompen.

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van verschillende vormen van aardwarmte. Hiervan wordt naast een technische beschrijving ook gekeken in hoeverre deze toepasbaar zou kunnen zijn voor het gebruik in de glastuinbouw.

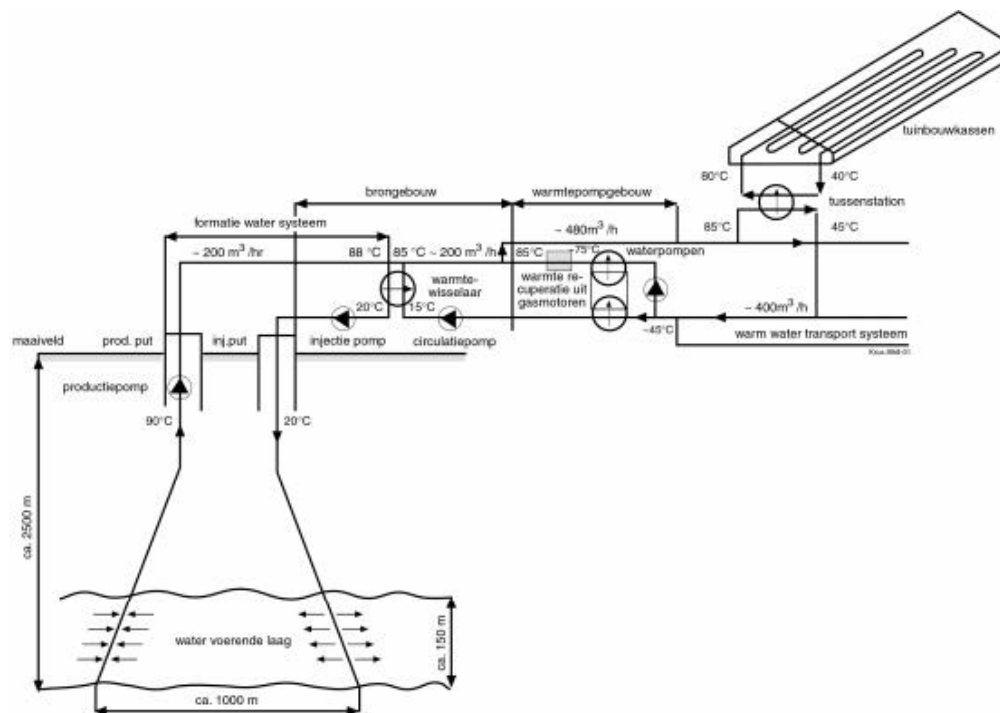
2.1 Aardwarmte

Naast de bekende warmtebronnen voor een kas (zonnestraling, verwarmingsketels en WKK's) wordt er in dit onderzoek ook gekeken of het mogelijk is om aardwarmte (ook wel geothermie genoemd) te gebruiken voor het verwarmen van de kas.

Aardwarmte wordt verkregen uit waterreservoirs die zich op een diepte van ongeveer twee kilometer bevinden. De temperatuur van het water bedraagt op de locatie Agriport A7 70 tot 90°C. Om de warmte te winnen worden er twee boringen gedaan. Eén boring voor het onttrekken van warm formatie water uit de grond en de andere voor de retourleiding van ditzelfde water. Wanneer de winbare warmte aan het water is onttrokken voor het verwarmen van de kas wordt dit teruggepompt naar de bron. Hierdoor blijft deze op de juiste druk, ook wordt het water niet vermengd met het oppervlaktewater. Doordat de pijpen ongeveer een kilometer van elkaar in de watervoerende laag uitkomen is er geen sprake van menging van het koud en warm water. De afstand tussen de putten wordt zodanig gekozen dat het koudefront rond de injectieput pas na ongeveer 30 jaar de productieput bereikt.

De warmte wordt via een warmtewisselaar overgebracht op een secundair systeem. Wanneer in het secundaire systeem ook een warmtepomp wordt ingebracht kan er meer warmte worden onttrokken uit dezelfde hoeveelheid water van de aardwarmtebron. Door de warmtepomp daalt de temperatuur van het secundaire systeem van 85°C naar 15°C, terwijl zonder warmtepomp de temperatuurdaling niet groter is dan 40°C. In Figuur 1 is de situatie met een warmtepomp schematisch weergegeven.

Nadeel van aardwarmte is dat er een risico is wat betreft de bruikbaarheid van de bron. Hoewel het mogelijk is om een schatting te maken van de dikte van de watervoerende laag, is het lastiger om de permeabiliteit (doorlaatbaarheid) van de aarde correct in te schatten. Het is hierbij niet alleen van belang dat de watervoerende laag goed waterdoorlatend is, het is ook van belang dat deze voldoende dik en homogeen is. Wanneer dit niet het geval is kunnen er stromen ontstaan waardoor het afgekoelde water eerder productieput bereikt. Hierdoor kan de levensduur van een bron teruglopen.



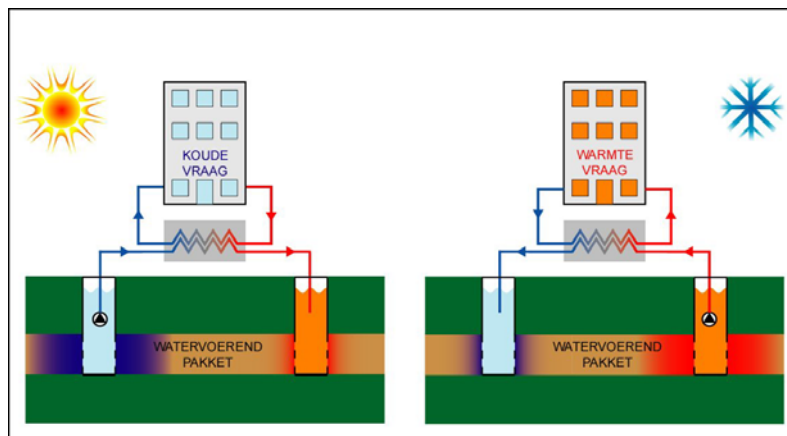
Figuur 1 - schematische weergave van een aardwarmte installatie voor het verwarmen van kassen [bron: Van de Braak *et al*, 2001]

2.1.1 Energiebesparing en kosteneffectiviteit van aardwarmte

In het rapport van Van de Braak [Van de Braak *et al*, 2001] blijkt dat voor een aardwarmtebron met een brontemperatuur van 85°C, een retour temperatuur van 40°C en een pompcapaciteit van 100 m³/uur de kostprijs equivalent te zijn met een gasprijs van 0,227 €/m³. Door prijsstijgingen is de huidige gasprijs 0,30 €/m³. Hierdoor zou het op dit moment economisch rendabel kunnen zijn om aardwarmte te gebruiken in plaats van een conventionele gasgestookte ketel. In dit onderzoek is ook rekening gehouden met het gebruik van WKK's (Warmte Kracht Koppeling). Veel tuinders gebruiken een WKK om de kosten van het verwarmen van de kas te drukken. Bij de afweging wordt ook bekeken of een aardwarmtebron kan concurreren met een WKK. Belangrijk bijkomend voordeel van aardwarmte is dat de CO₂-behoefte wordt beperkt tot de CO₂-vraag van de kas.

2.2 Toepassing van ondiepe aquifers (koude-/ warmteopslag)

Bij gesloten teeltsystemen wordt gebruik gemaakt van ondiepe aquifers en een warmtepomp. Doorgaans wordt gewerkt met bronnen van ca 8 en 18 °C. Met behulp van een warmtepomp wordt in de winter het warme water verder verwarmd en gebruikt voor het verwarmen van de kas terwijl het koudere water in de zomer gebruikt kan worden voor het koelen. Belangrijke voorwaarde is dat de aquiferbronnen energetisch in balans zijn, er moet evenveel warmte uitgehaald worden als erin gestopt wordt. Doordat bij een conventionele kas in de zomer niet actief wordt gekoeld en dus ook geen koude wordt geoogst is het gebruik van een ondiepe aquifer minder voor de hand liggend.



Figuur 2 - Werkingsprincipe van een ondiep aquifer waarin in de winter de warmte wordt gebruikt en de koude wordt opgeslagen. In de zomer wordt dit proces omgedraaid waardoor de koude wordt gebruikt en de warmte wordt opgeslagen (bron: Rapport Visie op bodemenergie; IF-technology).

2.2.1 Juridische aspecten en procedure

Wanneer een tuinder besluit aardwarmte te gebruiken moet eerst een opsporingsvergunning worden aangevraagd bij het ministerie van Economische zaken. Met zo'n vergunning kan er een proefboring gedaan worden om te bekijken of aardwarmte winning mogelijk is. Wanneer een tuinder een opsporingsvergunning heeft gekregen heeft deze een geldigheid van 2 jaar om een proefboring te doen en de resultaten te analyseren.

Naast de opsporingsvergunning moeten ook vergunningen worden aangevraagd bij de gemeente en de provincie. Hierbij wordt bijvoorbeeld gekeken naar het bestemmingsplan en de eventuele effecten op milieu en de overlast die aardwarmtewinning kan veroorzaken. De aanvraag van dergelijke vergunningen loopt via vastgestelde procedures waarbij met vooraf vastgestelde termijnen wordt gewerkt waarin bezwaren kunnen worden aangetekend.

Indien een tuinder na de proefboring besluit verder te willen gaan, dan dient binnen de looptijd van de opsporingsvergunning een winningsvergunning te worden aangevraagd. Indien het termijn van 2 jaar verstrijkt vervalt de voorrangsregel voor de houder van de opsporingvergunning en kunnen er ook concurrerende bedrijven een aanvraag doen voor een winningsvergunning. Wanneer een aanvraag voor een winningsvergunning wordt ingediend bij Economische zaken dan wordt eerst TNO gevraagd de onderbouwing van de aanvrager te beoordelen. Daarna wordt het voorgelegd aan de Mijnbouwraad en de commissie bodembeweging, die hun oordeel moeten geven. Daarna wordt vastgesteld of de vergunning wordt verleend.

Indien een vergunning is verleend dan heeft de aanvrager het alleenrecht om de aardwarmte te gebruiken zoals vermeld in de verstrekte vergunning. Hierbij kunnen aanvullende eisen zijn gesteld. Zoals het bijhouden en rapporteren van gegevens van het op- en teruggepompte water.

2.3 Naast warmtebron ook buffermogelijkheden

Het is ook mogelijk om dieper gelegen aquifers te gebruiken voor warmteopslag (dieper dan 500 meter). Door de diepere ligging van de aquifers is de temperatuur van het water hoger, waardoor het mogelijk is deze aquifers te gebruiken als warmwater buffers. Tevens mag na vergunningverlening door de diepere ligging water van iedere temperatuur worden geïnfiltreerd en hoeft de bron in tegenstelling tot een ondiepe aquifer niet in balans te zijn. Technisch zijn er nog wel beperkingen. Als de temperatuur in een aquifer te ver oploopt of daalt, dan kunnen er chemische reacties plaatsvinden die bijvoorbeeld de leidingen aantasten.

Ook economisch zijn er nadelen aan deze methode. Doordat het water zowel moet worden geïnfiltreerd als worden opgepompt zijn de variabele kosten voor de gebufferde warmte ca. tweemaal zo hoog als voor gewone aardwarmte. Daarnaast moet de warmte eerst worden opgewekt door bijvoorbeeld kaskoeling in de zomer, wat in de meeste gevallen ook kosten met zich meebrengt.

3 Energievoorzieningsstrategieën

Buffering van warmte is een belangrijk onderdeel in de energiehuishouding bij tuinbouwkassen. Zowel de warmtevraag als het warmteaanbod kunnen in tuinbouwkassen sterk variëren door de verschillen in buitentemperatuur, straling en gewascondities. Warmtebuffers worden ingezet om warmtevraag en –aanbod beter af te stemmen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen korte termijn buffering (één of enkele dagen) en lange termijn buffering (seizoensoverbrugging).

Om de inzet van aardwarmte rendabel te maken is het van belang dat deze continue warmte kan leveren. De fluctuaties in de energievraag moeten dan opgevangen worden door een slimme warmtebuffer. Gezocht wordt naar een optimale inzet (zowel economisch als milieuverantwoord) van de beschikbare warmte. Concreet betekent dit dat een warmtebuffer:

- Kan zorgen voor een betere inzet (hogere dekkinggraad) van aardwarmte;
- Kan zorgen voor een uitgekiende vermogensinzet van de aardwarmtebron met een hoge benuttingsgraad;
- Voldoende opslagcapaciteit heeft om te voorkomen dat de buffer vol raakt op momenten dat er warmteoverschot is en er voldoende leegloop is in tijden van warmtevraag, waardoor de buffer zelden volledig buiten werking is (goede benutting van de buffercapaciteit);
- Voldoende verwarmingsvermogen (kWth) kan leveren om onderdimensionering van andere warmtebronnen toe te staan.
- Niet alleen geschikt moet zijn voor buffering van aardwarmte maar ook van warmte uit andere (duurzame) warmtebronnen.
- Weinig warmte verliest.
- Een kleinere investering vergt dan de besparing vanwege de lagere benodigde capaciteit.

3.1 Warmtebronnen.

De warmtevraag van de kas kan worden ingevuld met verschillende warmtebronnen, zie tabel 1. Een deel van deze bronnen zijn niet regelbaar, andere bronnen kan de tuinder gebruiken voor het overbruggen van het verschil tussen de warmtevraag en het ‘natuurlijke’ aanbod.

Tabel 1. Beschikbare warmtebronnen voor tuinbouwkassen

Warmtebron	Aanbodkarakter	Warmtesoort / temperatuurniveau	Opmerking
Zon-instraling	Daglichtperiode	Stralingswarmte	Niet beïnvloedbaar, seizoensgebonden gedrag.
Verwarmingsketels	Continu, veelal ook CO ₂ gestuurd	Hoge (en lage) temperatuur warmte	In de zomer warmteoverschot door CO ₂ levering en lage warmtebehoefte.
Warmtekracht-koppeling systemen (WKK)	Continu, veelal ook elektriciteit of CO ₂ gestuurd	Hoge (en lage) temperatuur warmte	WK systemen draaien steeds vaker voor stroomproductie en/of CO ₂ productie waardoor in de zomer een warmte overschot ontstaat.
Warmte van belichtingslampen	Sper-uren (geen belichting van 20-24 uur) of schermen	Stralingswarmte en convectiewarmte	Beperkt managebaar. Lampen aan als dat voor gewasgroei en –ontwikkeling meest effectief is.
Restwarmte van derden	Afhankelijk van aanbieder, continu	Hoge of lage temperatuur warmte	Andere tuinbouwkassen (energieclustering) of restwarmte uit andere bronnen (energiecentrales).
Aardwarmte	Continu	Hoge temperatuur warmte	Beschikbare vermogen afhankelijk van clusteromvang per doublet

Voor het invullen van het verschil tussen de warmtevraag en -aanbod zijn de verwarmingsketel, de WKK, de aardwarmte en de restwarmte het meest voor de hand liggend. De andere bronnen zijn niet of slecht beïnvloedbaar. Doordat restwarmte erg afhankelijk is van de beschikbaarheid en omdat het niet relevant is voor dit deel van het onderzoek is het buiten de economische analyse gehouden. In deze analyse zijn de vaste en variabele jaarlasten per MWh van de verschillende installaties bepaald, waarbij is uitgegaan van 5000 draaiuren voor alle installaties. Bufferkosten zijn hier vooralsnog buiten beschouwing gelaten, deze zullen in de simulaties wel worden meegenomen. De afschrijving van de installaties wordt eenvoudig bepaald aan de hand van de investering en de levensduur van de verschillende installaties.

3.1.1 Kosten ketel

De ketels die worden geplaatst in de kassen uit de case studie hebben een capaciteit van 10 MW thermisch. Deze warmte wordt opgewekt door de verbranding van aardgas, met een rendement van 88%. Door een extra investering in een rookgas condensor kan de opbrengst met 6% verhoogd worden door extra warmte uit de rookgassen te halen. Per jaar (5000 draaiuren) levert een ketel plus condensor maximaal 54 GWh aan warmte. De totale kosten per jaar zijn € 1.793.925, bij een gasprijs van 0,30 €/m³.

Investeringskosten

Aanschaf prijs ketel:	€100.000
Bij afschrijving 14 jaar en 3,5% rente	€8.750 per jaar
Aanschaf condensor	€19.756
Bij afschrijving 7 jaar en 3,5% rente	€3.111 per jaar

Vaste kosten ketel en condensor

Prijs leveringscapaciteit gas:	€15+8,63 per m ³ per uur, per jaar
1.169 m ³ /uur	€27.619 per jaar
Onderhoud 1% aanschaf prijs	€1.198 per jaar

Variabele kosten

Kostprijs gas:	€0,30 per m ³ inclusief belastingen
5,84 Mm ³ /jaar	€1.753.247 per jaar

3.1.2 Kosten WKK

De WKK's die worden geplaatst in de kassen uit de case studie hebben een capaciteit van 3,04 MWe. In deze analyse wordt de geproduceerde elektriciteit verkocht. Deze opbrengsten kunnen gebruikt worden om een deel van de stookkosten te dekken. Bij 5000 vollasturen wordt per jaar 22,0 GWh aan warmte geproduceerd en 15,2 GWh aan elektriciteit verkocht. Wanneer ervan uitgegaan wordt dat de WKK goed gebufferd is dan moet het mogelijk zijn om de warmte vraag en de elektriciteitsvraag los te koppelen. Het is dan ook waarschijnlijk dat de WKK voor 85% in de piek uren elektriciteit kan leveren. De uiteindelijke jaarkosten bedragen na aftrek van de verkochte elektriciteit €422.528.

Investeringskosten

Aanschafprijs WKK	€1.200.000
Bij afschrijving 10 jaar en 3,5% rente	€141.000 per jaar
Aanschafprijs elektra aansluiting:	€70.000 per MW+50.000 voor installatie
3,04 MWe	€260.000
Bij afschrijving 10 jaar en 3,5% rente	€30.957 per jaar

Vaste kosten WKK:

Prijs leveringscapaciteit gas:	€15+8,63 per m ³ , per uur, per jaar
819 m ³ /uur	€19.350 per jaar
Vastrecht elektra aansluiting	2,9% over aansluiting per jaar
Aansluiting €260.000	€7.641 per jaar

Variabele kosten

Kostprijs gas	€0,30 per m ³ inclusief belastingen
4,1 Mm ³ /jaar	€1.234.286 per jaar
Onderhoud	€7,50 per MWh
15,2 GWh/jaar	€114.000 per jaar

Opbrengsten elektriciteit verkoop

Verkoop prijs elektra	€80 per MWh piek, €40 per MWh dal
15,2 GWh/jaar piek	€1.124.800 per jaar

3.1.3 Kosten aardwarmte

Kostprijs voor een boring op 2km is 5 miljoen euro. Samen met de variabele kosten komt aardwarmte ongeveer uit op een kostprijs van 5 à 6 euro per GJ. Hoewel de boring voor diepere bronnen duurder is hoeft dit geen effect te hebben op de kostprijs per GJ. Dit komt doordat door de hogere temperatuur de variabele kosten dalen. Omdat de permeabiliteit van de waterdragende laag moeilijk te voorspellen is loopt een tuinder een groot risico. Om toch het gebruik van aardwarmte te stimuleren en het risico voor de tuinder te verkleinen wordt er door het productschap Tuinbouw gewerkt aan een garantstellingsfonds.

De technische levensduur van de aardwarmtebron ligt rond de dertig jaar. Door de hoge risico's wordt de afschrijving momenteel op 10 jaar gesteld. Wanneer de aardwarmtebron meer gebruikt wordt zal de afschrijving meer in de richting van de levensduur van de bron gaan. Dit is ook aangenomen in de economische analyse.

In de analyse wordt uitgegaan van een opbrengst van 10MW. Wanneer deze bron 5000 uur per jaar draait dan wordt er 50 GWh aan warmte opgepompt tegen een prijs van

€980.845 per jaar. Voor dit onderzoek is uitgegaan van een gemiddelde permeabiliteit en dikte van de waterdragende laag. Hierdoor komt de COP van de installatie uit op 30, voor 1 GJ aan warmte is dus 0.033 GJ aan elektriciteit nodig. De het totale jaarlijkse elektriciteit verbruik komt hiermee op 10407 GJ (2891 MWh)

Opmerking: Afhankelijk van de situatie ter plaatse kan de COP van de installatie variëren tussen de 10 en 60.

Investeringskosten Aardwarmte

Boringen plus installatie €5.000.000
 Bij afschrijving 30 jaar en 3,5% rente **€254.167 per jaar**

Vaste kosten aardwarmte:

Onderhoud installatie **€150.678 per jaar**

Variabele kosten

Variabele kosten aardwarmte €3.20 per GJ
 Max 315360 GJ/jaar (=87.6 GWh) **€576.000 per jaar**

3.1.4 *Vergelijking verwarmingskosten*

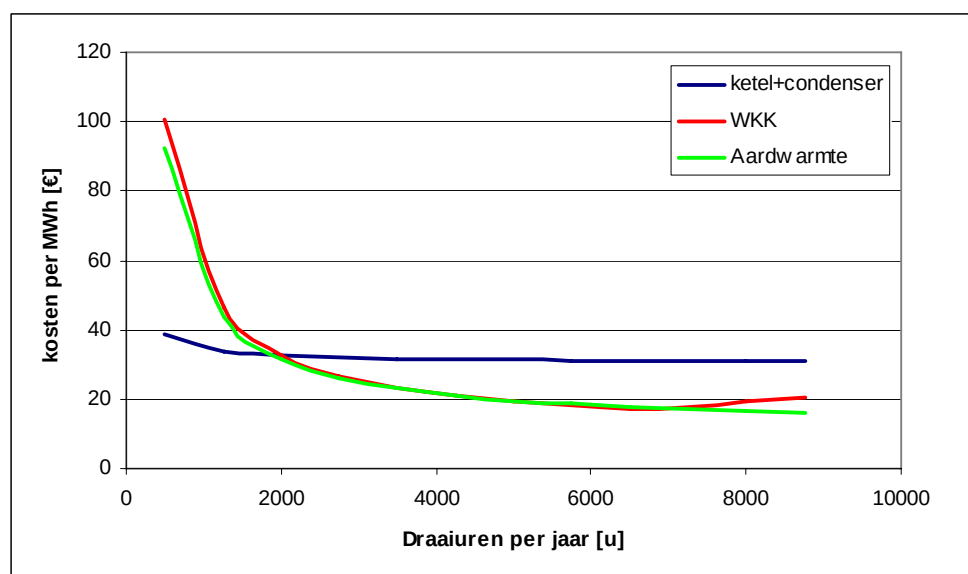
Om de kosten van de verschillende installaties te kunnen vergelijken is er een overzicht gemaakt van de prijs per MWh (aan geleverde warmte) voor de verschillende installaties. Op deze manier wordt een indicatie gegeven van wat de beste optie is voor de productie van warmte in een kas.

Installatie	Vaste kosten	Variabele kosten	Verkoop	Totaal
Ketel+condenser	0,80 €/MWh	30,49 €/MWh	0	31,30 €/MWh
WKK	10,16 €/MWh	61,29 €/MWh	51,13 €/MWh	19,21 €/MWh
Aardwarmte	8,10 €/MWh	11,52 €/MWh	0	19,62 €/MWh

Wanneer er naar de totale prijs per geleverde MWh gekeken wordt dan blijkt de WKK de goedkoopste oplossing te zijn. Hoewel de WKK qua kosten duurder is dan de aardwarmtebron, worden deze kosten gedrukt doordat de verkoop van elektriciteit inkomsten genereert. De twee installaties ontlopen elkaar niet veel. Om te kunnen bepalen welke installatie nu echt goedkoper is, is het nodig om de jaarrond simulatie te doen aan de hand van deze simulaties kan er gekeken worden of de aannames wat betreft de draaiuren in de piekuren klopt.

De ketel is de duurste installatie die gebruikt kan worden voor de verwarming van de kas. Tevens kan geconcludeerd worden dat bij de huidige gasprijs een aardwarmtebron inderdaad goedkoper is dan een verwarmingsketel. Een voordeel van de ketel is wel dat de investeringskosten erg laag zijn. Hierdoor is deze uitermate geschikt voor het invullen van de pieken in de warmtevraag van de kas.

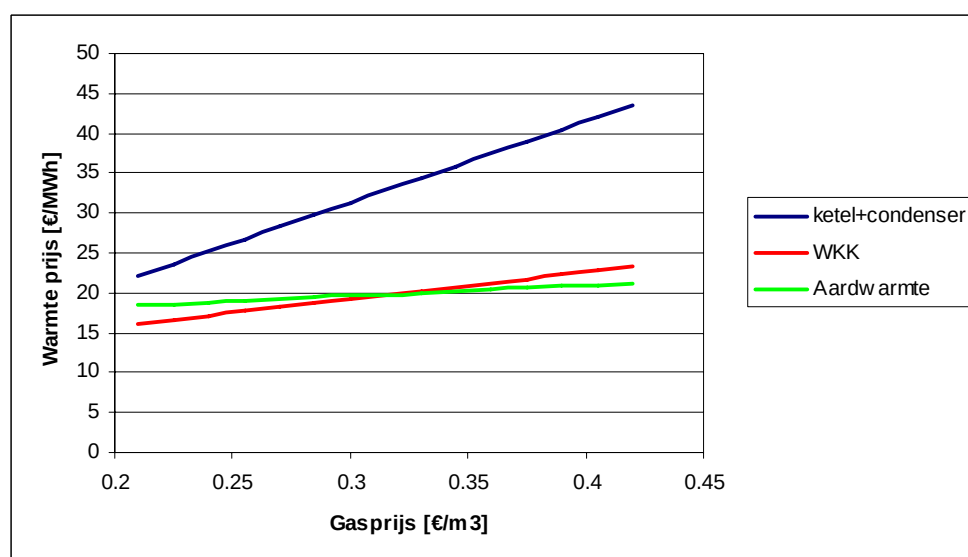
In de economische analyse van de verschillende warmtebronnen is uitgegaan van 5000 draaiuren van de installaties. Het aantal draaiuren is onder andere afhankelijk van de warmtevraag van de kas en het vermogen van de warmte installaties. Omdat deze warmtevraag kan verschillen, kan ook het aantal draaiuren van de installatie verschillen. In Figuur 3 is een grafiek te zien waarin de kostprijs van de warmte is afgezet tegen het aantal draaiuren. Dit is gedaan voor de drie verschillende installaties.



Figuur 3 - Kosten per MWh voor verwarmen als functie van het aantal draaiuren van de installatie.

Uit Figuur 3 blijkt dat de ketel de beste keuze wanneer er minder dan 2000 draaiuren nodig zijn. Dit is de reden waarom veel tuinders een extra ketel hebben staan, naast hun WKK, voor het opvangen van de piekbelastingen. De aardwarmtebron en de WKK zijn vanaf 2000 draaiuren de goedkoopste oplossing. De WKK wordt vanaf ongeveer 7000 draaiuren duurder dan de aardwarmtebron. Dit komt omdat vanaf dat moment het niet meer mogelijk is om de elektriciteit voor 85% in de piekuren te verkopen.

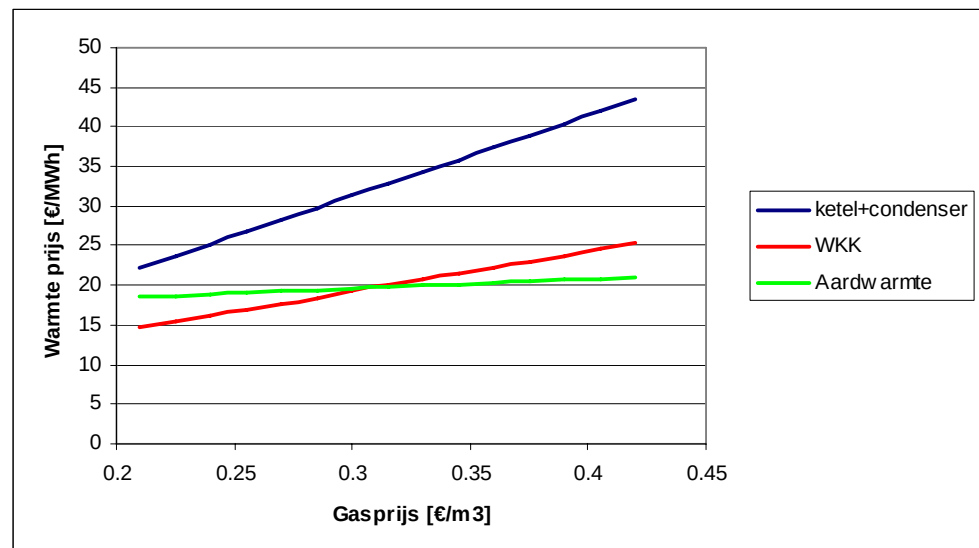
Een ander belangrijk onderdeel in de keuze voor een verwarmingsinstallatie is het effect van de gasprijs op de kosten. Het laatste jaar is de gasprijs enorm gestegen. Figuur 4 is de ontwikkeling van de kosten te zien als functie van de gasprijs. Hierbij is aangenomen dat de spark spread, en dus de elektriciteitsprijs, met dezelfde factor meestijgt. Dit lijkt overeen te komen met de huidige trend in de energiekosten.



Figuur 4 - Kosten voor de warmte als functie van de gasprijs.

In Figuur 4 is te zien dat de verwarmingskosten het sterkst stijgen met een ketel. Hoewel de WKK ook meer kosten maakt op het verstoken van gas wordt er waarschijnlijk meer verdiend door de verkoop van elektriciteit tegen een hogere prijs. De kosten van de aardwarmtebron stijgen ook, dit is het gevolg van stijgende pompkosten. In deze analyse is de procentuele stijging van de pompkosten gelijk aan die van de gasprijs. Wanneer de WKK en de aardwarmtebron met elkaar vergeleken wordt, dan is te zien dat bij een stijgende gasprijs de Aardwarmtebron bij een gasprijs van ongeveer €0,33 per m³ of hoger goedkoper wordt dan de WKK.

Het kan ook zijn dat de spark spread bij een stijgende gasprijs gelijk blijft. In dit geval blijft de winst op de variabele kosten van een elektriciteitscentrale gelijk. Dit zou betekenen dat de elektriciteitsprijs naar verhouding minder stijgt dan de gasprijs. Doordat hierdoor de kosten voor de WKK verhoudingsgewijs harder stijgen dan de kosten voor de aardwarmtebron, verdient de aardwarmte bron zich in dit geval nog eerder terug. Bij een gasprijs van ongeveer €0,30 per m³ ligt het break-evenpoint. Dit is in Figuur 5 terug te zien.



Figuur 5 - Kosten van de kasverwarming bij een stijgende gasprijs en een gelijkblijvende spark spread.

Wat de spark spread precies gaat doen is moeilijk te voorspellen en hangt voor een belangrijk deel af van eventuele nieuwe concurrenten en energiebronnen op de elektriciteitsmarkt.

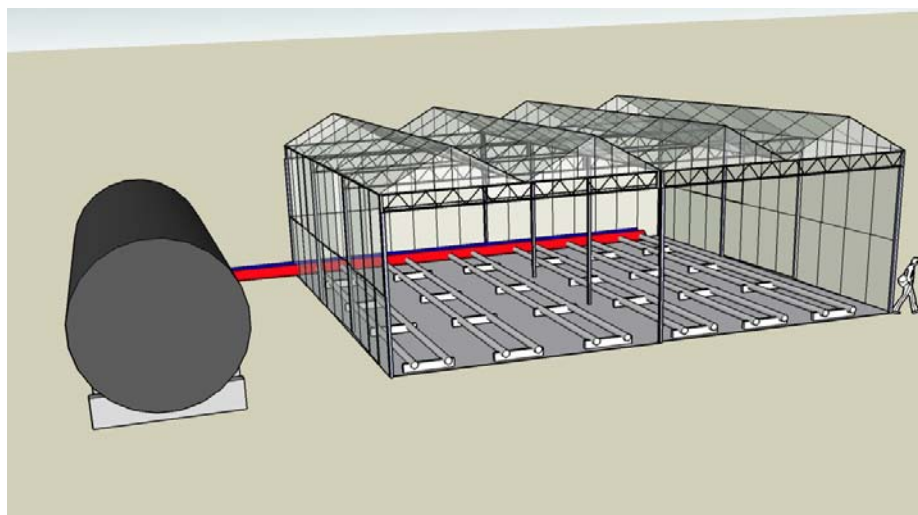
Wanneer naar de kostenopbouw van de WKK en de aardwarmtebron gekeken wordt dan kan wel geconcludeerd worden dat deze sterk overeen komen. Buffermaatregelen die de rentabiliteit van een aardwarmtebron ten goede komen zouden daarom ook best een voordeel kunnen opleveren voor een WKK installatie. Een bijkomend effect van buffering van WKK-warmte is dat de elektriciteitsvraag en de warmtevraag kunnen worden ontkoppeld en verkoop van elektra op piekuren gericht kan worden. In een kas is er namelijk 's nachts een hogere warmtevraag terwijl overdag meer verdiend kan worden aan de verkoop van elektriciteit.

3.2 Mogelijke buffersystemen

Wanneer er tijdelijk een overschot aan warmte wordt geproduceerd kan dit worden opgeslagen in een buffer. De opgeslagen warmte kan op een ander moment gebruikt worden wanneer de warmtevraag groter is dan het aanbod of gewoon in plaats van warmtebronnen aan te spreken. Een belangrijk voordeel van de buffers is dat pieken in de warmtevraag kunnen worden opgevangen, waardoor de capaciteit van de warmtebronnen kan achterblijven bij de piekvraag. Ook is het mogelijk om de elektriciteit- en CO₂-vraag los te koppelen van de warmtevraag. Wanneer een buffer in een kas wordt geplaatst is dit in de meeste gevallen een buffer met een capaciteit van ongeveer 150 m³/ha. Dit is voldoende om schommelingen in de warmtevraag tussen dag en nacht op te vangen. Bij de gesloten kas wordt gebruik gemaakt van een ondiepe aquifer, die door zijn grootte ook kan worden gebruikt als seizoensbuffer. Warmte die in de zomer wordt geoogst door middel van koeling van de kas wordt opgeslagen om in de winter gebruikt te worden voor de verwarming van de kas. Voor het opslaan van warmte zijn verschillende buffers op de markt. In de volgende paragrafen worden 4 verschillende buffersystemen beschreven.

3.2.1 Warmteopslagtanks

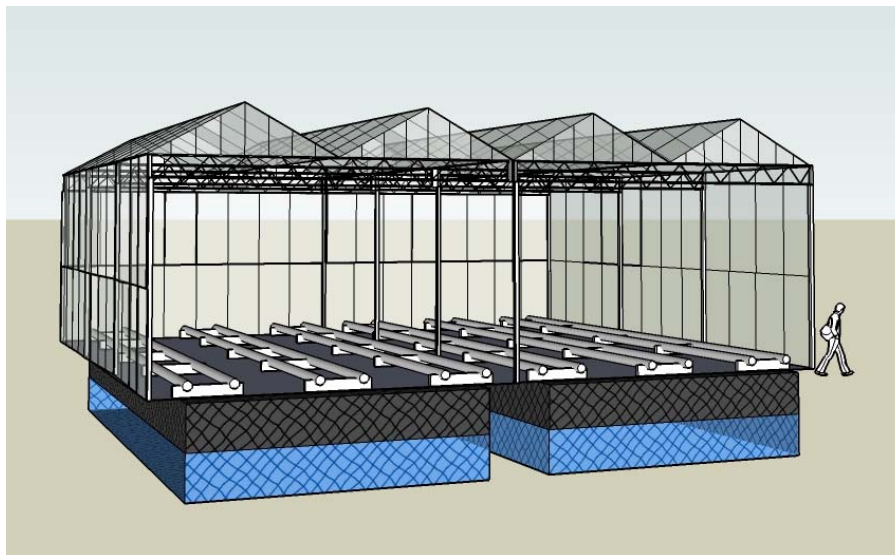
De warmteopslagtanks kunnen het extra energieverbruik door CO₂ dosering beperken en hebben hun nut en economische haalbaarheid inmiddels bewezen. Meer dan eenderde van alle glastuinbouwbedrijven heeft een warmteopslagtank. De dimensies van deze warmtebuffers worden onder meer bepaald door het type gewas dat geteeld wordt, maar ook door overeenkomsten die aangegaan zijn met de energieleverancier. In het tariefsysteem voor aardgas wordt door tuinders een afweging gemaakt tussen een zo laag mogelijke contractcapaciteit versus eventuele boetebedragen voor piekoverschrijdingen. De gemiddelde bufferinhoud neemt daardoor steeds verder toe. Eind 2001 was het gemiddelde ruim 100 m³ warmtebuffer per hectare kas terwijl een buffer van 260 m³ per hectare is gepland voor kwekerij de Wieringermeer.



Figuur 6 – traditionele warmte tank die gebruikt kan worden als dagbuffer

Warmtebuffers zijn over het algemeen ontworpen voor korte termijn opslag van warmte. Temperatuurniveaus in de buffers schommelen tussen de 60 en 95°C. Kosten bedragen ca. € 150 per m³.

Een alternatief voor de warmte opslagtank is een waterkelder onder de kas. Hierbij is het mogelijk om grote hoeveelheden (verwarmd) water op te slaan onder de vloer van een kas. Leveranciers van dit soort systemen zijn onder andere Gaasboxx, Waterblock en Klimrek. De temperatuur van het water kan worden opgevoerd tot circa 80-90°C. Het voordeel van deze alternatieven voor de warmteopslagtanks is dat ze relatief weinig extra oppervlak innemen en een grote inhoud hebben. Bovendien komt een deel van het warmteverlies ten goede aan de kas.



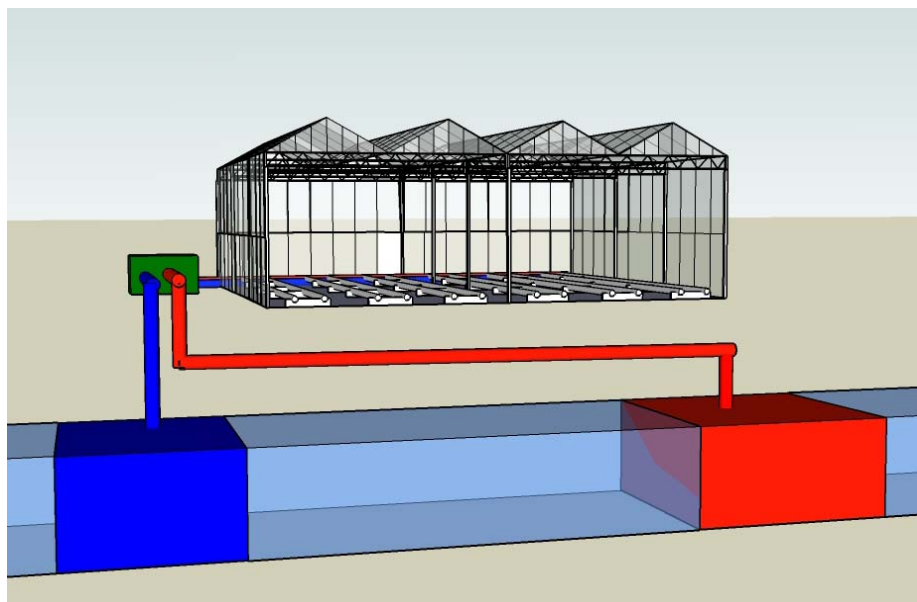
Figuur 7 – Gaasboxx als warmte buffer onder de kas.

Fase Transformatie Materialen of faseovergangsmaterialen, ook wel aangeduid met de afkorting PCM (Phase Change Material) zijn stoffen die warmte kunnen opslaan door verandering van fysische toestand (fase). Voorbeelden van faseovergangen zijn smelten en kristalliseren. Een stof die smelt heeft warmte nodig en onttrekt deze aan zijn omgeving. Bij stollen komt de warmte weer vrij. Kristallisatie van zout levert warmte terwijl de omgekeerde reactie energie kost. Onlangs is er door TNO voor het Productschap Tuinbouw [Spoorenberg, 2005] onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van deze faseovergangsmaterialen voor warmteopslag in de glastuinbouwsector. Hierbij zijn de effecten van deze materialen onderzocht op energetische, economische en milieutechnische aspecten. Met nieuwe materialen en uitvoeringen voor goedkope opslagsystemen op gedifferentieerde temperatuurniveaus zijn alternatieve combinaties denkbaar voor uitbreiding van de beschikbare buffercapaciteit. Er zijn bijvoorbeeld PCM's beschikbaar in de vorm van in hard plastic ingekapselde kleine bolletjes die kunnen worden toegevoegd aan bestaande verwarmingssystemen. Het onderzoek wees uit dat toepassing van PCM's bij warmtebuffering kan leiden tot een energiebesparing van ca. 1 m³ gas per m² per jaar. De materialen zijn nog wel duur. Om een terugverdientijd van minder dan 5 jaar te bereiken wordt gesteld dat de gasbesparing minimaal 5,5 m³ per m² moet zijn, of de prijs van PCM moet dalen naar 0,038 €/kg. Daarmee zouden de kosten meer dan gedecimeerd moeten worden, hetgeen eveneens niet reëel lijkt.

3.2.2 Ondiepe (200m) Aquifers

Ondiepe aquifers zijn watervoerende afgesloten zandlagen in de bodem op een diepte tussen 10 tot 200 meter waar warmte (en koude) kan worden opslagen. Het grondwater in deze zandafzettingen fungeert hierbij zowel als opslagmedium als transportmedium

voor warmte en koude. Een aquifer voor warmteopslag bestaat uit een tweetal putten waarbij uit één put (productieput) koud grondwater onttrokken wordt dat vervolgens via een warmtewisselaar in de andere put wordt geïnjecteerd. Bij terugwinning van de opgeslagen warmte wordt de stroomrichting omgedraaid en wordt de productieput de injectieput en omgekeerd. Er zijn verschillende systemen. Bij het gescheiden systeem is er een relatief koude (ca. 6°C) en een relatief warme (bijv. 18°C) cel.



Figuur 8 – Ondiepe aquifer die kan worden gebruikt voor de (seizoens)opslag van warmte en koude.

Omdat er bij relatief lage temperaturen wordt gewerkt in aquifers worden de systemen vaak in combinatie met een warmtepomp ingezet om warmte op te waarden naar een hogere temperatuur tot maximaal 55 °C. Ondiepe aquifers leveren 100 tot 150 m³ water per uur. Het gebruik van aquifers voor de opslag van warmte is een beproefde technologie in Nederland. Doordat ondiepe aquifers alleen rendabel zijn wanneer laagthermische restwarmte geoogst kan worden is het voor dit onderzoek niet interessant. In een niet gesloten kas wordt de kas gekoeld door middel van ventilatie wanneer de temperatuur in de kas te hoog oploopt, actief koelen en oogsten van restwarmte is daarom niet aan de orde, terwijl dit voorwaarden zijn voor ondiepe aquifer die thermisch in evenwicht moeten zijn.

3.2.3 Diepe(va 500m) aquifers

Waterreservoirs in diepere lagen kunnen ook gebruikt worden als aquifer. Wanneer deze dieper is dan 500m is de mijnbouw wet van toepassing. Dit betekent dat de invoer temperatuur in principe ongelimiteerd is en er hoeft ook geen energie-evenwicht te zijn over een jaar gezien. Praktisch gezien zijn er wel grenzen aan de maximale invoer temperatuur. Als het verschil te groot is kunnen er reacties plaatsvinden die negatieve effecten hebben op de kwaliteit van de leidingen en pompen.

Gezien het feit dat voor deze diepere aquifers hogere opslag temperaturen mogelijk zijn, maakt dit een goede optie voor het opslaan van hoogwaardige restwarmte. Deze methode wordt weinig toegepast omdat de kosten voor het opslaan van de energie hoog zijn, het thermische rendement te laag is en de bedrijfszekerheid niet gegarandeerd

(Wennekes, 2005). Daarnaast is het lastig te werken met duurzame energie, die vaak laagthermisch is.

3.2.4 'CO₂ buffering'

Bij CO₂ doserende bedrijven is het in principe ook mogelijk om, in plaats van warmte, de overtollige CO₂ op te slaan voor later gebruik. Aangezien CO₂ en warmte gelijktijdig vrijkomen uit ketel of WKK kan hierdoor een meer flexibele inzet van deze warmtebronnen worden bereikt. Tevens kan bij WKK systemen die terugleveren aan het elektriciteitsnet zowel de overtollige warmte als ook de CO₂ worden opgeslagen. Het bufferen van CO₂ kan dus voorkomen dat CO₂ wordt verspild en daarmee leiden tot verhoging van de energie efficiency. Buffering van CO₂ wordt daarom gezien als een perspectiefvolle mogelijkheid voor energiebesparing bij WKK bedrijven.

Bij gebruik van aardwarmte vullen de ketels en WKK een kleiner deel van de warmtevraag in en produceren daardoor ook minder CO₂, m.a.w. er is al een betere ontkoppeling van warmte- en CO₂-productie. Omdat er minder overschot is kan buffering van CO₂ ervoor zorgen dat de productie van CO₂ beter kan worden afgestemd op de behoefte. Evenals bij warmteopslag zijn er hierbij naast korte termijn ook lange termijn buffers denkbaar. In de winter is er door de grote warmtevraag over het algemeen sprake van een overschot aan CO₂, terwijl er in de zomer een juist een tekort zal zijn en WKK en ketels ingezet worden om in de CO₂ behoefte te voorzien.

Op dit moment zijn er echter nog geen systemen voor CO₂ buffering beschikbaar. Wel ontwikkelt TNO samen met Lek/Habo een technologie voor CO₂ buffering voor de glastuinbouw waarbij op dit moment (zomer 2006) een praktijkproef wordt voorbereid bij een rozenkwekerij. Deze technologie is gebaseerd op het principe van ad- en desorptie van CO₂ uit rookgassen op een vast adsorbent. Het adsorptieproces is omkeerbaar door het omdraaien van de CO₂ concentratiegradiënt, dat wil zeggen dat, door te spoelen met buitenlucht, de geadsorbeerde CO₂ weer wordt afgestaan zodat dit in de kas kan worden gebruikt. De ontwikkeling richt zich op korte termijn buffering.

CO₂ buffering is nog geen beschikbare technologie en de prestatiekenmerken moeten nog worden vastgesteld. Daarom wordt de invloed van deze technologie op de mogelijkheden van buffering van aardwarmte niet onderzocht in deze studie.

3.3 Buffercriteria

Uitgangspunten bij het vaststellen van geschikte buffercombinaties zijn dat de aardwarmtebron optimaal benut wordt. Daarnaast zal het warmtebuffersysteem voldoende mogelijkheden moeten bieden in combinatie met warmte van andere bronnen. In het bijzonder de door WKK en ketel opgewekte warmte voor elektriciteit en CO₂ productie.

Criteria die bij selectie van een buffersysteem gehanteerd kunnen worden zijn:

- Flexibiliteit
- Energetische prestatie
- Economische haalbaarheid

3.3.1 Flexibiliteit

Onder flexibiliteit wordt de beschikbaarheid van het buffersysteem beschreven. Wanneer een buffer voor het merendeel van de tijd volledig vol of leeg is dan kan de

buffer niet volledig worden gebruikt. Om de flexibiliteit te bepalen wordt er gekeken naar het aantal uren dat de buffer leeg dan wel vol is.

De inhoud van een buffer is hiervoor van groot belang. Warmteopslagtanks hebben een inhoud van gemiddeld 100-200 m³/ha, dit is voldoende voor het bufferen in de dag/nacht fluctuaties. Bij een kleine buffer is de kans groter dat bij een warme periode de WKK niet alle overtollige warmte kwijt kan in de buffer. Bij een groter buffer kan de warmte installatie op een lager vermogen draaien omdat de buffer de piekvragen kan opvangen tijdens koude periodes terwijl deze wordt gevuld tijdens de warme periodes waarbij de overtollige warmte wordt opgeslagen.

3.3.2 *Energetische prestatie*

Verliezen in de warmtebuffers bepalen in belangrijke mate de bruikbaarheid. Zeker bij lange termijn opslag van warmte met hoge temperaturen uit bijvoorbeeld een aardwarmtebron, WKK of een ketel zullen de verliezen gering moeten zijn. De energetische prestaties van de warmtebuffers bepalen in belangrijke mate ook de energie-efficiency van het gehele energiesysteem van de kas.

3.3.3 *Economische haalbaarheid*

Door warmtebuffering kan energie optimaal worden ingezet voor zowel CO₂ als elektriciteitsproductie en het eventueel ontstane warmte overschot worden benut in perioden van warmtevraag. De besparing op vermeden brandstofkosten moet worden afgewogen tegen de kosten van warmtebuffering.

Een warmtebuffer heeft naast de feitelijke opslag van tijdelijk overtollige warmte ook een neveneffect op kostenbesparing. Met de invoering van het CDS tariefsysteem en nu het huidige entry-exit systeem voor aardgas is ook het instrument van contractcapaciteit (basislast en additionele capaciteit) ingevoerd. Incidentele overschrijdingen van deze afgesproken contractcapaciteit kunnen tot hoge boetekosten leiden. Met gebruik van warmte uit de buffers of de inzet van andere brandstoffen zoals biogas of (bio)olie kan er een peakshavingeffect van de aardgasafname worden bereikt.

3.4 **Bufferstrategieën voor aardwarmte**

De aanwezige installaties bepalen welke bufferstrategie het meest optimaal is. Om te onderzoeken welke buffergrootte nodig is voor welke situatie wordt voor iedere situatie gekeken hoe groot de capaciteit van de buffer moet zijn. Dit wordt gedaan door een zeer groot buffer te simuleren en na de simulatie te bepalen welk volume daadwerkelijk gebruikt is. Het te leveren vermogen wordt afgestemd op de aanwezige warmtebronnen en de pieklast.

Naast het vermogen van de installaties wordt er ook gekeken naar de meest optimale inzet van de warmtebronnen. Dit wordt gedaan door de GTa-tool [De Wit, 2006] die door middel van een algoritme de meest economische keuze maakt, die voldoet aan de opgegeven randvoorwaarden.

Door de juiste bufferstrategie zal er optimaal gebruik gemaakt worden van de warmtebronnen. De buffer zal de pieken in de basisvraag opvangen waardoor de dekkingsgraad en de benuttingsgraad van de warmtebronnen verbeterd kan worden. Doordat de pieken worden opgevangen door de buffer kan de capaciteit van de warmte installaties omlaag, wat een besparing oplevert in de investeringskosten van de installaties.

In een eerder onderzoek rapport van IMAG, (van der Braak et al, 2001) wordt de mogelijkheid besproken om de belasting van de aardwarmtebron onafhankelijk te maken van de tijd van het jaar. Dit zou kunnen worden bereikt door continu het maximale debiet uit de aardwarmtebron te onttrekken en overtollige warmte op te slaan in een grote lange termijn warmte buffer, bijvoorbeeld een kelderbuffer. Het energiebesparingeffect dat daarmee zou kunnen worden bereikt als gevolg van een hogere dekkingsgraad van de verwarmingsbehoefte en een volledige benutting van de capaciteit van de aardwarmtebron wordt daarbij geschat op ongeveer 30%. Hierbij is een situatie van een glastuinbouwcluster van 30 ha en een aardwarmtebron van 200 m³/h met 85°C als voorbeeld genomen.

Afhankelijk van de benodigde grootte van de buffer kan er een keuze gemaakt worden voor een bepaald systeem. In tabel 3 zijn vier systemen met hun eigenschappen beschreven. Afhankelijk van de benodigde buffergrootte kan gekozen worden voor een van deze systemen.

Tabel 3. Overzicht van verschillende buffersystemen die gebruikt kunnen worden voor de buffering van hoogwaardige warmte

Buffersysteem ¹⁾	Buffercapaciteit	Beschrijving
Normale warmtetank	Dag-buffer 260 m ³ /ha	Korte termijn buffer helpt met invullen van piekvragen als gevolg van dag/nacht fluctuaties. (Uitgangspunt kwekerij Wieringermeer)
Grote warmtetank	Meerdaags-buffer 500 m ³ /ha	Meerdaags buffer helpt buiten de dag/nachtfluctuaties ook voor de het opvangen van een vorstperiode van een week zonder overschrijden van de afgesproken energiecapaciteit met leverancier. (dezelfde eigenschappen als een warmteopslagtank, maar door schaalvergroting goedkoper)
Keldersysteem	Semiseizoens-buffer tot 10.000 m ³ /ha	Energie opgeslagen in de zomerperiode kan in de winter gebruikt worden als aanvulling op de verwarmingsinstallatie. (Het keldersysteem is een warm water tank (90°C) onder de kas)
Diepe aquifer	Seizoens-buffer ∞ m ³ /ha	Diepe aquifer waarin water met een hoge temperatuur wordt geïnfiltrerd. Het water wordt ook met een redelijk hoge temperatuur onttrokken (70% rendement)

¹⁾ Alle buffersystemen ondersteunen in verschillende mate de ontkoppeling van de warmte- en CO₂-productie. De beschrijving is in deze tabel alleen warmte gerelateerd.

De ideale buffergrootte is afhankelijk van de aanwezige installaties in de kas. Om de optimale combinatie te vinden tussen geïnstalleerd vermogen en buffergrootte, worden verschillende simulaties uitgevoerd. In deze simulaties wordt bij de capaciteit van de installatie de optimale buffer gekozen. Bij de minimaal vereiste capaciteit is de installatie net groot genoeg om juist voldoende warmte te produceren, wanneer de installatie heel het jaar continu draait, om aan de warmtevraag van kas te voldoen. De bovengrens van capaciteit die nodig is, is een installatie die gedurende de pieken zonder buffer aan de warmtevraag kan voldoen.

4 Jaarrond simulatie

Met de jaarrond simulatie wordt er gekeken op welke manier de warmtebronnen zo efficiënt mogelijk kunnen worden ingezet om aan de warmtevraag te voldoen. In eerste instantie wordt de warmtevraag, CO₂- en elektriciteitsvraag voor de twee referentiekassen berekend. Daarna wordt gekeken hoe, met de huidige installaties, de warmtevraag zo efficiënt mogelijk kan worden ingevuld, rekening houdend met de CO₂- en elektriciteitsvraag. De resultaten van deze simulaties dienen als referentie voor de verdere analyse. In dit hoofdstuk wordt een korte beschrijving gegeven van de Greenhouse Technology Application Tools (GTa tools) en worden de verschillende simulaties behandeld. Het simulatiemodel van de twee kwekerijen is voor een groot deel ontworpen door De Wit en Van 't Ooster (2006) in het rapport van De Wit rapport [De Wit; 2006] is de simulatie in meer detail beschreven.

4.1 Simulatie opzet

Voor de twee verschillende kassen worden twee situaties uitgewerkt. In de eerste situatie wordt er een simulatie gemaakt waarin gekeken wordt wat de warmtevraag is voor de kas. Daarna wordt gekeken op welke manier aan deze vraag voldaan kan worden met standaard apparatuur, zoals WKK's, ketels en een dagbuffer. Nadat de gegevens van de referentiesimulatie beschikbaar zijn, wordt door middel van simulaties gekeken naar de invulling van de warmtevraag met aardwarmte met verschillende bufferstrategieën.

De warmtevraag voor een kas wordt bepaald aan de hand van de plaatselijke meteogegevens en ook de gegevens van de kas en het gewas worden meegenomen. Voorbeelden zijn de lichttransmissie, ventilatiebehoefte, streeftemperatuur, randvoorwaarden voor luchtvochtigheid en CO₂-concentratie. Naast de meteogegevens heeft ook het gewas een wisselwerking met het klimaat in de kas. Enerzijds beïnvloedt het klimaat de gewasgroei via de groeifactoren licht, temperatuur en CO₂-concentratie, anderzijds beïnvloedt het gewas het klimaat via de gewasverdamping, de CO₂-uitwisseling en de lichtonderschepping. Door gewasverdamping wordt voelbare warmte omgezet naar latente warmte, wat directe gevolgen heeft voor de warmtevraag. Ook de lichtonderschepping door het gewas heeft gevolgen voor de warmtevraag. Bij CO₂-optimalisatie wordt de CO₂-dosering zodanig gekozen dat de marginale opbrengst uit gewasgroei gelijk is aan de marginale kosten van de CO₂-dosering.

In de meeste gevallen wordt bij simulaties gewerkt met de meteogegevens van het SEL jaar. Dit is een representatief jaar, samengesteld uit gegevens tussen 1970 en 1980 gemeten in De Bilt. Maar omdat de twee onderzochte kassen dicht bij de zee staan is de verwachting dat de lokale weercondities hier verschillen ten opzichte van De Bilt. Om dit te corrigeren is er gekeken naar de meteogegevens van Den Helder en De Bilt van 2001-2005. De verschillen tussen de twee locaties zijn verwerkt in een aangepast referentiejaar voor Den Helder

De kosten worden in de simulatie bepaald aan de hand van investeringskosten en het aantal draaiuren. Voor deze berekeningen zijn dezelfde uitgangspunten genomen als bij de economische analyse van hoofdstuk 3. Naast de investeringskosten zijn ook de gas- (0,30 €/m³) en de elektriciteitsprijs (piek 80 €/MWh, dal 40 €/MWh) gelijk gehouden.

4.1.1 *De rol van CO₂*

De wijze waarop CO₂ wordt gedoseerd bepaalt ondermeer de maximale dekkingsgraad van aardwarmte. CO₂ die wordt gedoseerd met behulp van ketels of WKK installaties komt tegelijk met warmte. Deze warmte wordt direct of via de warmtebuffer aan de kas geleverd. Met behulp van warmteopslag komt CO₂ beschikbaar voor doseren zonder dat de warmte hoeft te worden vernietigd. Zonder warmteopslag zijn namelijk alleen de rookgassen die overdag bij verwarming vrijkomen, voor CO₂ doseren beschikbaar. De opgeslagen warmte wordt 's nachts gebruikt voor verwarming als er geen CO₂-vraag is.

In de winterperiode wordt weinig geventileerd en is het CO₂-verlies laag. De warmtevraag is groot, zodat een klein deel van de rookgassen van WKK of ketels al volstaat om voldoende CO₂ te kunnen doseren. In de winter is dit minder dan de helft van de overdag benodigde hoeveelheid aardgas. De CO₂ in de rookgassen hoeft 's nachts niet te worden gebruikt.

In de zomerperiode wordt juist alle CO₂ die overdag bij het verwarmen van de kas vrijkomt, benut in de kas. Deze hoeveelheid is echter niet genoeg voor een optimale gewasgroei en er is meer CO₂ nodig. Zonder buffer is men aangewezen op externe CO₂ of moet een verlaagde CO₂ concentratie geaccepteerd worden. Een andere optie is om door middel van een warmtebuffer de overtollige warmte op te slaan om deze later te gebruiken.

4.1.2 *Overige randvoorwaarde tijdens simulatie*

In de Energiebijlage van de Milieu Effect Rapportage (MER) van de Agriport A7 locatie wordt gesproken om maximaal circa 10% van de basislast voor verwarming in te vullen met aardwarmte voor het hele gebied. Dit zou neerkomen op een thermisch vermogen van 10 – 20 MW_{th}. Hierbij wordt aangetekend dat er dan wel een voorwaarde is om extern CO₂ aan te leveren. De keuze voor deze relatief lage dekkingsgraad betekent dus dat men er bij Agriport A7 vanuit gaat dat er een hoge vraag naar CO₂ zal zijn. Deze CO₂ wordt over het algemeen door warmteproducerende WKK en ketels geproduceerd. Bij belichte teelten is er over het algemeen een warmteoverschot.

Op gebiedsniveau is er binnen het glastuinbouwareaal (365 ha) ruimte voor maximaal zeven aardwarmtebronnen. Verdere uitbreiding van het vermogen is alleen mogelijk als ruimte buiten dit gebied eveneens wordt benut. De natuurlijke bovengrens is dan ongeveer 35-70 MW_{th} afhankelijk van de pompcapaciteit per productieput, die capaciteit kan worden overschreden als ook buiten dit areaal bronnen geplaatst mogen worden. Dit levert de volgende opties:

- 1 Volgens van het MER rapport, 10-20 MW_{th}
- 2 maximale beschikbaarheid aardwarmte binnen het gebied voorlopig gelimiteerd op 35 MW_{th}
- 3 indien relevant keuze van een hoger vermogen.

Bij de voorbeeldcases dient nagestreefd te worden, zowel een hoge dekkingsgraad als een hoge benuttingsgraad van de bron te realiseren, rekening houdend met de randvoorwaarden op gebiedsniveau.

4.2 **Referentie simulatie**

Om de haalbaarheid van een slim gebufferd aardwarmte systeem te onderzoeken wordt in eerste instantie een uitgangssimulatie gedaan voor de twee case studies. Hierin wordt

voor iedere case een jaarronds simulatie gedaan waarin de warmte en CO₂ behoefte wordt ingevuld door WKK's, ketels en een dag/nacht buffer.

In dit rapport wordt de optimale bufferstrategie voor twee verschillende tuinders bepaald, Kwekerij de Wieringermeer met paprikateelt en Van de Ende–Van Kleef met teelt van cocktailtomaten. Daarvoor dient in eerste instantie een uitgangssituatie bepaald te worden.

4.2.1 *Specificaties Case Kwekerij de Wieringermeer*

Als eerste wordt Kwekerij de Wieringermeer beschreven (paprika). Dit is een nieuwbouwkas waar niet belicht zal worden, maar er wordt wel gebruik gemaakt van CO₂ dosering. Het complex zal in totaal 64 ha groot worden en is opgebouwd in eenheden van 10 ha die in drie fases worden gebouwd. In de simulatie zal 1 eenheid van 10 ha gesimuleerd worden met een clusteroptie voor de benutting van de aardwarmtebron.

- Fase 1: 2*10 ha
- Fase 2: uitbreiden tot 4*10 ha
- Fase 3: voltooiën tot 64 ha

De te bouwen Venlo kassen zullen een kapmaat van 4m hebben, een tralie voor drie kappen en een goothoogte van 6.4m. De totale breedte bedraagt 384m (32*12m). De lengte van een kas zal 260 m zijn waardoor het oppervlakte van een kas ongeveer 10 ha beslaat. Deze gegevens zijn meegenomen om de lichttransmissie van de kas te kunnen bepalen.

De start van een teelt is rond 5 december en het gewas wordt geruimd rond 20 november van het daaropvolgende jaar. De dag/nacht streeftemperaturen in de kas zijn resp. 20.5 en 17-19°C. Een RV-regeling heeft geen hoge prioriteit, omdat paprika daarvan weinig hinder ondervindt (voorkeur range overdag 70-80%, 's nachts oplopend tot maximaal 90%).

Target voor lekventilatie van de nieuwbouw is 0.15h⁻¹, maar bij ontwerp van de verwarming wordt rekening gehouden met 0.3 h⁻¹. CO₂-dosering wordt op de oude locatie standaard ingesteld op 1000 ppm in de kas, die wordt ingevuld door de ketel, WKK en Botlek CO₂. Voor de nieuwe locatie is tenminste 500 ppm, maar bij voorkeur (simulatie van on-line) optimalisatie voor CO₂ gewenst. Geplande CO₂-bronnen zijn ketel en WKK.

De geplande verwarmingsinstallatie heeft een totale capaciteit van 11.75 milj kcal.h⁻¹ per 10 ha (= 13600 kW/10ha) en met als energiebronnen 2 ketels (à 5800 kW) en 2 WKK's (à 4.4 MW_{th} (gasverbruik 810 m³.h⁻¹)). De warmtebuffer is een korte termijn buffer met een capaciteit van 260 m³.ha⁻¹. In de simulatie zijn de 2 ketels vervangen door 1 ketel van 9800 kW.

In de nieuwbouwkas wordt een SLS10 ultra vlakscherm en gevelscherm geïnstalleerd (40% energiebesparing). De geschetste kas geldt als referentie bij de simulaties, ofwel als 0-strategie.

4.2.2 *Van de Ende-Van Kleef*

Kwekerij Van de Ende – Van Kleef bouwt in de eerste fase twee kassen met beide een oppervlakte van 14,7 ha. In beide kassen worden cocktailtomaten geteeld en in één van de kassen wordt assimilatiebelichting toegepast. De gemodelleerde kas heeft een goothoogte van 6 meter en een kapmaat van 4,27 m.

Voor een optimale teelt wordt gestreefd naar de volgende kascondities:

- Dagtemperatuur 22°C, nachttemperatuur 14-15°C
- Relatieve vochtigheid: overdag 70%, 's nachts 80%
- Teelt jaarrond vanaf 1 november (tussenplant in week 9 en 33)
- Lekventilatie 0,25 h⁻¹
- CO₂ regulatie op 1200-1500 ppm, maar geen externe CO₂

Om dit te bereiken worden in de kas 6 WKK's ingezet met een vermogen van 3,04 MW_e en 3 ketels van 15 MW_{th} en een dagbuffer van 170 m³/ha. Tevens wordt een energiescherm (LS10, 40%) geplaatst. Ook wordt er belicht met 1000 W lampen waarvan er op iedere 8,7 m² één lamp is geplaatst, dit geeft een verlichtingssterkte van 15.000 lux.

4.3 Resultaten referentie situaties

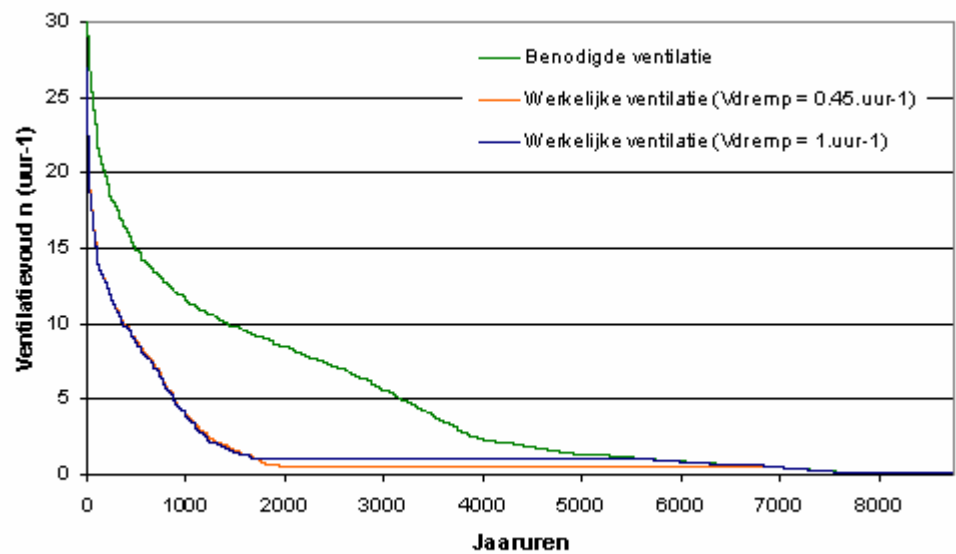
Voor de referentie simulatie is gekeken hoe de warmtevraag van de kassen wordt ingevuld met de geplande installaties. Op beide kwekerijen worden ketels, WKK's en een dagbuffer geplaatst. Ook moeten aan de teelt condities voldaan worden.

4.3.1 *Kwekerij de Wieringermeer*

Voordat de energiehuishouding van de kas is gesimuleerd is er gekeken naar de warmtevraag van de kas gedurende het jaar. In de simulatie wordt niet alleen rekening gehouden met de warmtevraag maar met het gehele klimaat. Om het klimaat voor het gewas te optimaliseren worden naast warmte ook de relatieve luchtvochtigheid en de CO₂-concentratie gestuurd. Deze parameters kunnen op de volgende wijze gestuurd worden.

Luchtvochtigheid en warmteoverschot.

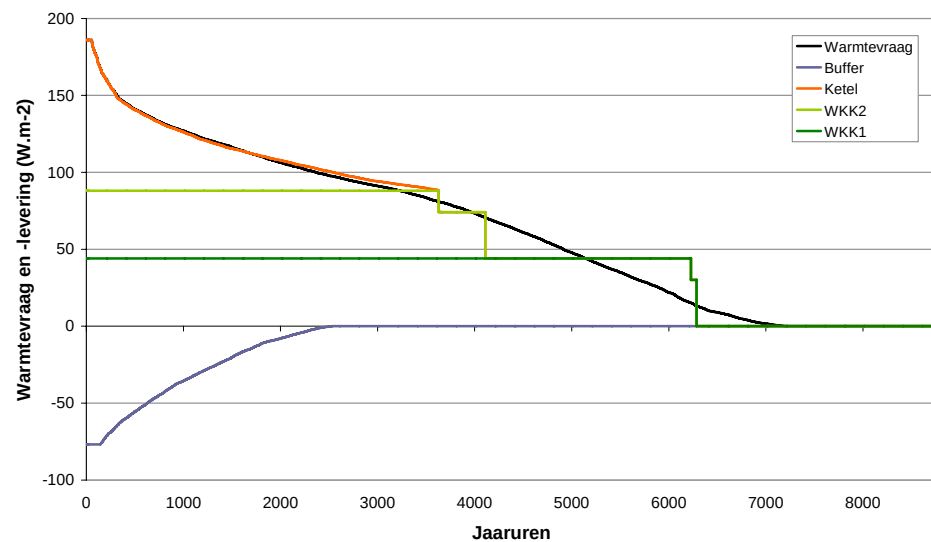
Omdat een te hoge relatieve luchtvochtigheid (RV) schadelijk is voor het gewas moet er worden gestreefd naar een luchtvochtigheid onder een bepaald maximum. Dit wordt geregeld door de kas te ventileren met buitenlucht. Doordat de buitenlucht een lager vochtgehalte heeft dan de kaslucht, kan de RV in de kas dalen. Ook wanneer de temperatuur in de kas te hoog oploopt wordt de kas geventileerd met koelere buitenlucht. In Figuur 9 is de ventilatiebehoefte weergegeven voor de kas van de Wieringermeer. In deze grafiek is ook de werkelijke ventilatie weergegeven voor twee verschillende ventilatieregimes.



Figuur 9 - Twee ventilatieregimes en het benodigde regime om de luchtvochtigheid en het warmteoverschot in de kas te regelen. De werkelijke ventilatie wordt verlaagd indien gelijktijdig sprake is van warmtevraag en ventilatievraag voor vochtregeling. De ventilatie wordt dan verlaagd tot de drempelwaarde (Vdrem)

Warmtevraag

Om de temperatuur in de kas op peil te houden wordt bij warmtevraag gestookt. In Figuur 10 is de frequentieverdeling van de warmtevraag op uurbasis weergegeven.



Figuur 10 - De frequentieverdeling van de warmtevraag in de kas (zwart) en de manier waarop deze vraag met de installaties wordt ingevuld.

Tabel 4. Jaarkosten warmte- en CO₂ –vraag voor de referentie situatie van Kwekerij de Wieringermeer

Installatie	Vaste lasten	Variabele kosten	Warmte MWh	CO ₂ Kton	Elektra MWh
WKK	371.758	2.857.427 ^{a)} -1.881.126 ^{b)} 39.867 ^{c)}	44.958	15,0	31.120
Ketel	40.940	359.647 ^{a)} 4.622 ^{c)}	10.025	2,1	-
Buffer	42.570	0	7.897*	-	-
Zuivere CO ₂	-	15.051	-	0,1	-
Totaal	455.268	1.395.488	54.983	17,2	31.120
Nodig			54.907	1,9	0
Over			76	15,3	31.120

* Telt niet mee in de warmteproductie omdat deze warmte al is opgebracht door de WKK en ketel.

^{a)} Warmte; ^{b)} elektriciteit; ^{c)} interne transport kosten CO₂

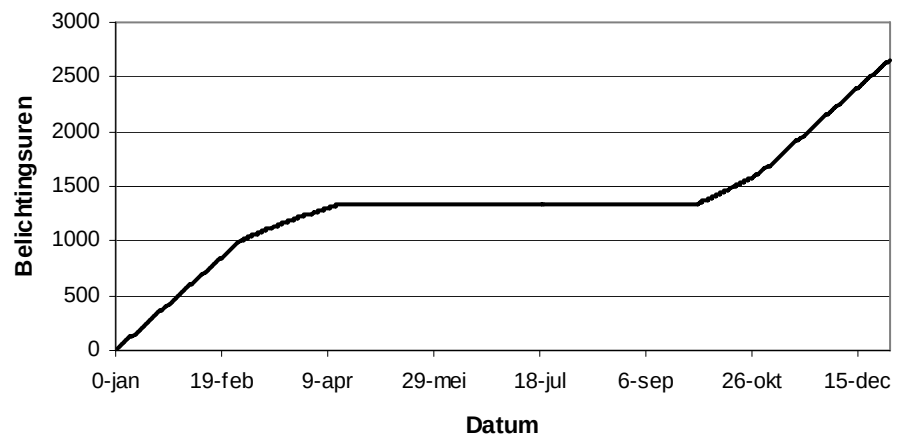
De jaarlijkse kosten om aan de warmte, CO₂ en elektriciteitsvraag te voldoen is voor kwekerij de Wieringermeer 1.850.757 euro, wanneer dit wordt ingevuld met de geplande installaties en maximaal gebruik gemaakt wordt van de mogelijkheid om elektriciteit te leveren zonder warmte te verspillen. Dit komt voor deze kas neer op een prijs van €18,54 per m² kas.

4.3.2 Kwekerij Van den Ende – Van Kleef

Het grootste verschil tussen de kwekerij Van den Ende – Van Kleef is dat bij deze kwekerij de helft van het areaal belicht wordt. Ook is hier uitgegaan het totale complex van de eerste fase, zowel het belichte als het onbelichte gedeelte. Ook is de kwekerij Van den Ende – Van Kleef groter dan kwekerij de Wieringermeer, in totaal is de eerste fase 30 ha. Hierdoor zijn er ook meer installaties ingezet om aan de warmtevraag te kunnen voldoen. Voor de dagbuffer is een streefwaarde van 50% aangehouden voor de buffervulling, als een vijfdaagse weersvoorspelling onvoldoende verwarmingscapaciteit aangaf tengevolge van een koud buitenklimaat.

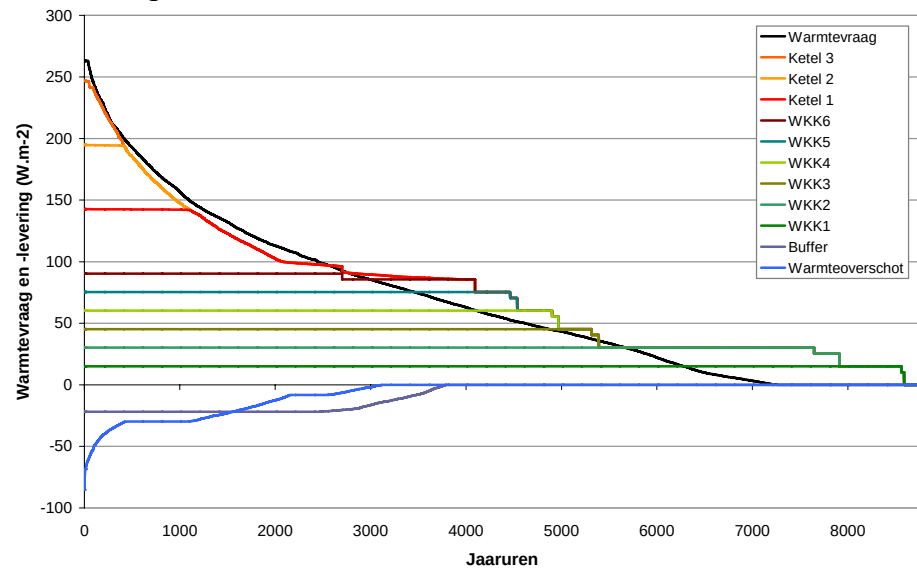
Belichting

Aan de hand van het aantal zonuren in de Wieringermeer en de nieuwbouwplanning is er een schatting gemaakt van het aantal belichtingsuren. Buiten het feit dat het gewas beter groeit, wordt door de lampen in de kas ook veel warmte geproduceerd. Voor de belichting is elektriciteit nodig. Deze elektriciteit moet geleverd worden door de WKK's, of indien nodig ingekocht worden van het elektriciteitsnet. Hierdoor is er voor deze kwekerij ook een elektriciteitsvraag naast de warmte- en CO₂-vraag.

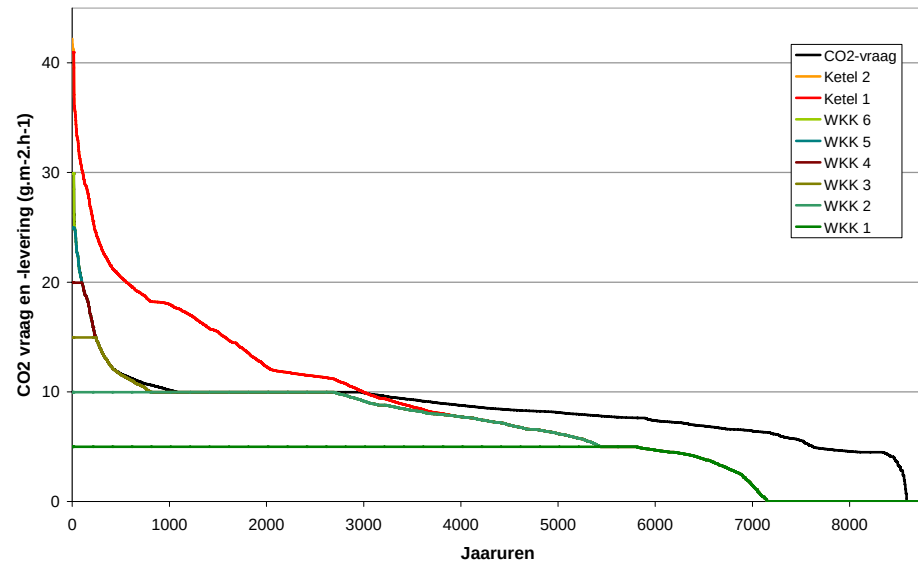


Figuur 11 - Cumulatieve aantal belichtingsuren tegen de tijd.

Warmtevraag



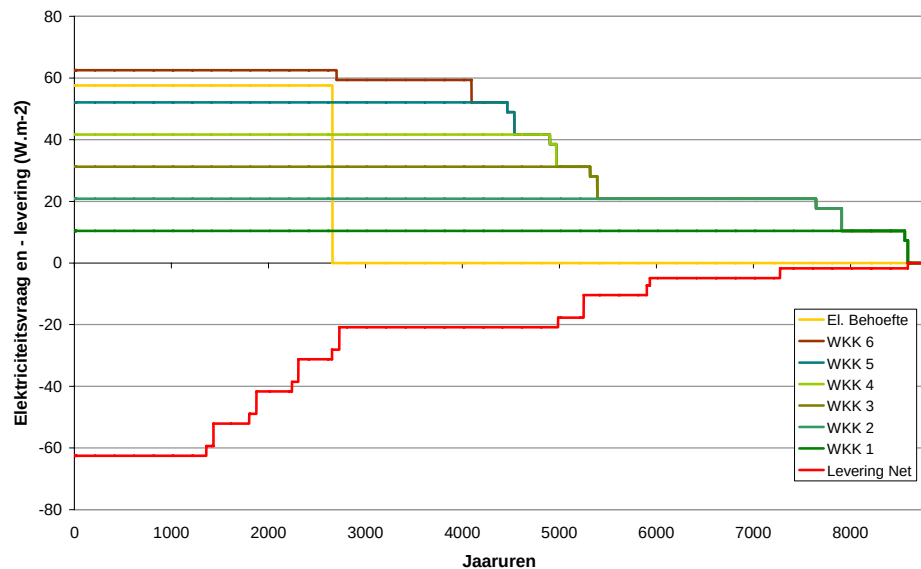
Figuur 12 - Warmtevraag van kwekerij Van den Ende – Van kleef en de manier waarop deze vraag wordt ingevuld met de installaties van de referentie situatie

CO₂-vraag

Figuur 13 - CO₂ behoefte van de kas en de manier waarop deze behoefte wordt ingevuld door de CO₂ uitstoot van de verschillende ketels en WKK's.

Elektriciteitsvraag

In Figuur 14 is de elektriciteitsvraag weergegeven in deze grafiek is het ook te zien dat de aanwezige WKK's voldoende zijn om aan deze vraag te voldoen. Tevens is het te zien dat de WKK's ook draaien wanneer er geen elektriciteit vraag is. In deze gevallen wordt er elektriciteit terug geleverd aan het elektriciteitsnet, waarvoor de tuinder een vergoeding krijgt.



Figuur 14 – Elektriciteitsvraag in de kas en het beschikbare elektrische vermogen, waarbij het overschot aan elektriciteit duidelijk zichtbaar is. Dit overschot wordt teruggeleverd aan het elektriciteitsnet.

Tabel 5. Jaarkosten warmte-, CO₂ - en elektriciteitsvraag voor de referentie situatie van Kwekerij de Van den Ende – Van Kleef.

Installatie	Vaste lasten	Variabele kosten	Warmte MWh	CO ₂ kton	Elektra MWh
WKK	1.115.300	9.750.632 ^{a)} -3.523.940 ^{b)} 345.026 ^{c)}	153.393	51,1	106.185
Ketel	167.847	523.058 ^{a)} 193.728 ^{c)}	41.668	8,8	-
Buffer	80.625	0	21.308*	-	-
Zuivere CO ₂	-	0	-	0	-
Totaal	1.363.772	7.288.504	195.061	59,9	106.185
		Nodig	175.352	21,6	44.746
		Over	19.084**	38,3	61.439

* Telt niet mee in de warmteproductie omdat deze warmte al is opgebracht door de WKK en ketel.

** Overschotwarmte, noodzakelijk om opname elektriciteit uit het net te voorkomen.

^{a)} Warmte; ^{b)} elektriciteit; ^{c)} interne transport kosten CO₂

De jaarlijkse kosten bij kwekerij Van den Ende – Van Kleef bedragen €8.652.278 om aan de warmte-, de elektriciteitsvraag en de CO₂-vraag te voldoen, daarbij is sprake van 19 GWh warmteoverschot. Dit komt neer op een prijs van €29,63 per m².

4.4 Aardwarmte simulatie

Om het effect van aardwarmte op de kosten voor de warmteproductie te bepalen worden verschillende simulaties gedaan. De simulaties zijn vergelijkbaar met de simulaties van de referentiekassen alleen is er uitgegaan van andere installaties die de warmtevraag moet voldoen.

Doordat de warmtevraag niet constant is gedurende het jaar, moet gekeken worden op welke manier de pieken in warmtevraag het beste kunnen worden opgevangen. In eerste instantie worden de twee extreme situaties aan de orde gesteld. In de eerste situatie is de capaciteit van de aardwarmtebron zo groot dat deze altijd aan de warmtevraag van de kas kan voldoen. Doordat er aardwarmtebron nodig is met een hoge capaciteit, zijn de investeringskosten ook erg hoog. In de tweede variant wordt juist de capaciteit van de aardwarmtebron geminimaliseerd, maar wordt de warmtevraag nog wel volledig ingevuld met aardwarmte. Hierdoor wordt de bron benuttingsgraad van de bron veel hoger en zomogelijk zelfs 100%, indien continu warmte wordt opgepompt en gebufferd, zodat deze gebruikt kan worden wanneer de warmtevraag groter is dan de capaciteit van de aardwarmtebron.

Nadat de twee extreme situaties zijn bepaald wordt er een optimum gezocht tussen de aardwarmtecapaciteit en de buffergrootte, waarbij de kosten voor de elektriciteits- en CO₂-vraag eveneens worden meegewogen. In de simulaties is, net zoals bij de economische analyse, gewerkt met een COP voor de aardwarmte installatie van 30.

4.4.1 Kwekerij de Wieringermeer

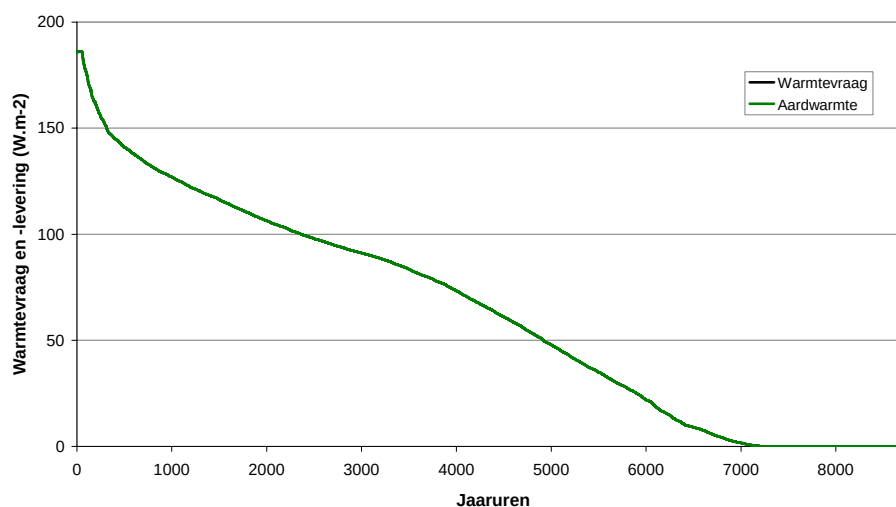
In de referentie situatie van kwekerij de Wieringermeer zijn de jaarlijkse stookkosten €18,54 per jaar. Jaarlijks wordt hiermee in totaal 54.907 MWh aan warmte geproduceerd, met één ketel en twee WKK's. In deze studie wordt gekeken of het economisch rendabel is om aardwarmte te gebruiken als warmtebron. Omdat

aardwarmte hoge investeringskosten heeft wordt er getracht met behulp van een slimme buffer de investeringskosten te reduceren.

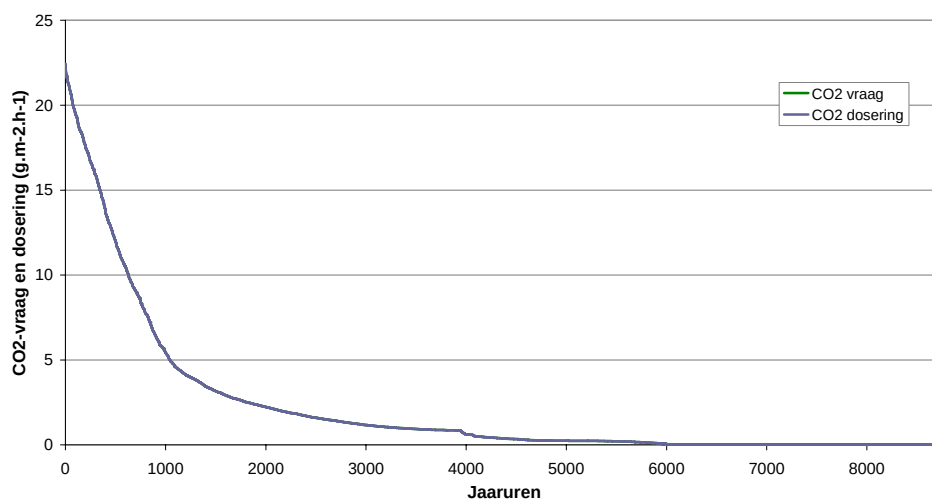
In de eerste simulatie wordt de totale warmtebehoefte van de kas ingevuld door een aardwarmtebron zonder buffer. De aardwarmtebron moet in dit geval wel een capaciteit hebben die groot genoeg is om ook tijdens de piekbelastingen aan de vraag te kunnen voldoen. In de tweede simulatie wordt er een buffer toegevoegd zodat de capaciteit van de aardwarmtebron geminimaliseerd kan worden. Hierdoor moet de bron het hele jaar warmte oppompen, die dan ofwel direct wordt gebruikt voor de verwarming van de kas of wordt opgeslagen in de buffer. In de laatste simulatie worden de buffergrootte en de aardwarmte capaciteit zodanig geoptimaliseerd dat de totale kosten voor de warmtehuishouding worden geminimaliseerd.

Aardwarmtebron en geen buffer.

De maximale warmtevraag gedurende de piekbelasting is 18.6 MW, om aan deze vraag te kunnen voldoen zijn twee aardwarmtebronnen gebruikt met een totale capaciteit van 20 MW en met de GTa-Tool is een jaarrondsimulatie gemaakt om te onderzoeken hoe de aardwarmtebron ingezet wordt. Omdat de aardwarmtebron geen CO₂ produceert als bijproduct moet er zuivere CO₂ worden ingekocht om de juiste concentratie in de kas te handhaven.



Figuur 15 - De warmtevraag wordt precies opgepompt uit de aardwarmtebron zodat altijd aan de warmtevraag wordt voldaan.



Figuur 16 - Omdat er geen CO₂ vrij komt door het stoken moet de CO₂ vraag worden ingevuld door externe CO₂. Deze is precies te doseren waardoor altijd aan de CO₂-vraag wordt voldaan.

De totale kosten voor de verwarming en CO₂ bemesting van de kas komt voor deze variant uit op €16,74 per m² per jaar. Hiermee heeft deze variant al lager jaarkosten dan de referentie situatie. Ondanks dat het investeringsbedrag ongeveer 2 maal zo hoog is en de kosten voor CO₂-dosering verviervoudigen, blijken de jaarkosten door de lage variabele kosten positief beïnvloed te worden. De terugverdientijd van de investering is echter niet goed. Deze is langer dan de voorziene levensduur van de aardwarmte bron van 30 jaar. De gemiddelde aanspraak op de beide aardwarmtebronnen is 2924 vollasturen per jaar.

Bijkomende gevolgen van de inzet van aardwarmte zijn dat 96,2 m³ gas per m² (9,6 Mm³) minder wordt verbruikt, waarvan 56,4 m³ per m² (5,6 Mm³) een besparing is op de warmtevraag. Daarnaast wordt 31 GWh elektriciteit niet meer geleverd, waarvoor het overige gas werd verbruikt en gaat de CO₂-productie voor de gehele kas terug van 17.1 productie naar 1.9 kton verbruik van geleverde (zuivere) CO₂. Hiervan 10 kton aan te merken als besparing en komt de weg vrij voor CO₂-afzet door andere producenten. Tevens moet er 1,6 GWh aan elektriciteit worden afgenomen. Voor de overige gevallen zijn de bijkomende effecten te bepalen met behulp van bijlage 2.

Minimale aardwarmtebron met buffer.

In de tweede simulatie is de capaciteit van de aardwarmtebron geminimaliseerd. Hierdoor moet de aardwarmtebron continu op vol vermogen draaien om genoeg warmte op te kunnen pompen. Eventuele overschotten worden opgeslagen in een buffer. De warmte die in de buffer is opgeslagen kan gebruikt worden op de momenten dat de aardwarmtebron onvoldoende capaciteit heeft om de kas te verwarmen.

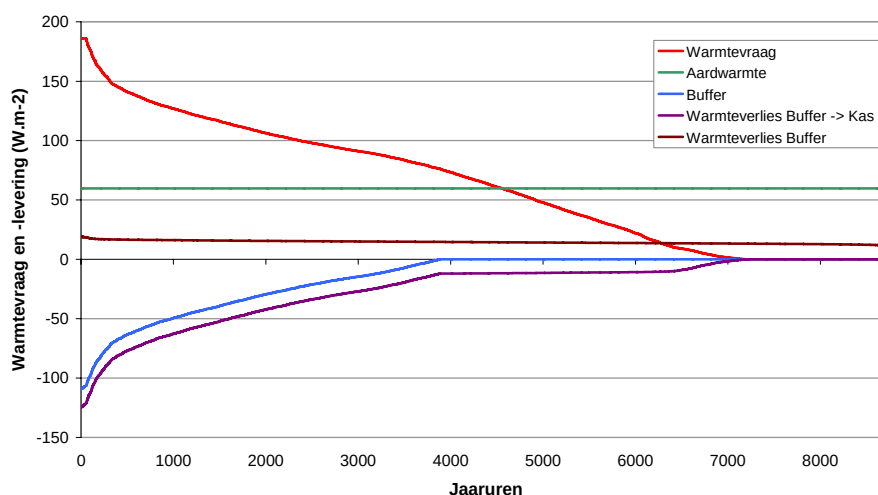
Uit analyse blijkt dat voor de kas van kwekerij de Wieringermeer een bron nodig is met een capaciteit van 6,74 MW om te voldoen aan de warmtevraag en om een buffer in thermisch evenwicht te houden. Omdat de investering van een 7MW bron ongeveer even hoog is als die voor een 10 MW bron is het lastiger een vergelijking te maken tussen de twee situaties. Om dit toch te kunnen vergelijken is de kasgrootte van kwekerij de Wieringermeer opgeschaald naar een oppervlakte van 14,8 ha in plaats van 10,0 ha, met andere woorden de clustergrootte voor een 10 MW bron wordt ingesteld

op 14,8 ha, waarvan kwekerij de Wieringermeer recht heeft op 67,5% van de broncapaciteit. In deze situatie zou de minimaal benodigde aardwarmtebron 10 MW zijn.

Doordat de aardwarmtebron het hele jaar draait wordt de bron beter benut en zijn de vaste kosten lager. Ook de jaarlijkse kosten die per m² worden gemaakt zijn hierdoor lager. In deze simulatie zijn de kosten van de aardwarmtebron €9,22 tegen €14,40 voor de eerste simulatie.

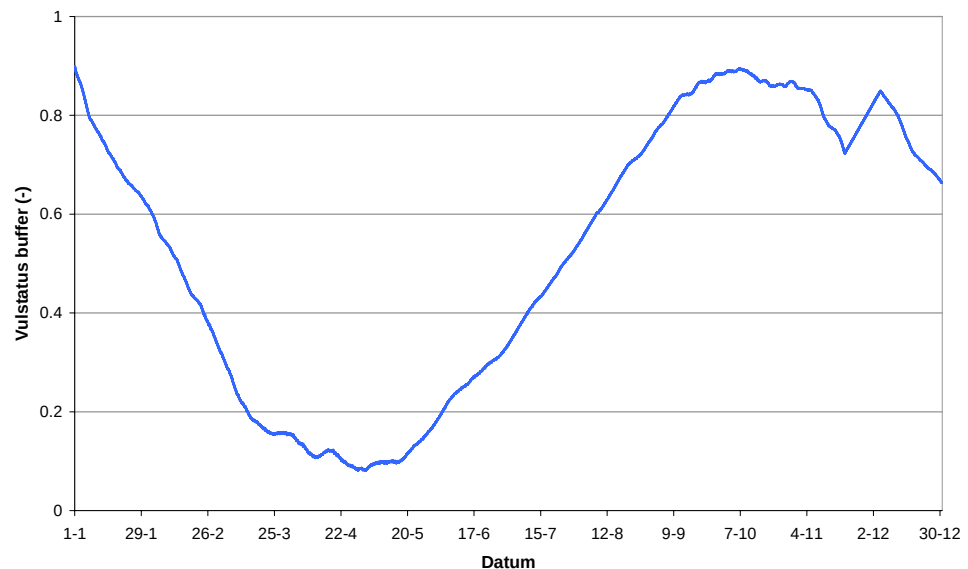
Alleen de aardwarmtebron is niet genoeg, er moet ook een groot buffer aanwezig zijn om de verschillende in de warmtevraag te nivelleren. Uit de simulaties blijkt dat een warmtebuffer van 300.000m³ nodig is. Wanneer dit als een kelderbuffer in de kas zou worden geplaatst dan zou er over de hele bodem een waterbak van 3 meter diep nodig zijn. Deze investering zou jaarlijks een lastenverzwaring van €28.30 betekenen. Dit is meer dan 3 kwart van de totale kosten voor de verwarming, terwijl het nog geen 40% van de warmtebehoefte invult als het nuttige warmteverlies van de kelderbuffer naar de kas wordt inbegrepen. De jaarkosten voor de buffer zijn ruim vijfmaal groter dan de ruimte die vrijkwam door toepassing van enkele aardwarmtebron met een maximale deellast van 67,5%.

In Figuur 17 is te zien hoe de warmtebehoefte wordt ingevuld door de aardwarmtebron en de aardwarmtebron en het buffer. De grafiek laat zien dat de aardwarmtebron continu warmte oppompt en dat wanneer het nodig is er extra verwarmd wordt met de warmte uit de buffer. Ook is te zien dat een deel van het warmteverlies alsnog gebruikt wordt voor de verwarming van de kas. Dit komt omdat de warmte via de geïsoleerde kasvloer wordt afgestaan aan de lucht in de kas. Een klein deel van het warmteverlies door de kasvloer draagt niet bij aan de kasverwarming, en moet beschouwd worden als een warmtelast. Het totale warmteverlies van de kelderbuffer naar ondergrond en kas is 12694 MWh, waarvan 8181 MWh als nuttig verlies aan de kas kan worden aangemerkt.



Figuur 17 - De warmte situatie voor de geminimaliseerde aardwarmtebron. De aardwarmtebron pompt continu warmte op. Wanneer dit niet voldoende is wordt de warmte uit het buffer gebruikt om het vermogen verhogen.

In Figuur 18 is de vulstatus van de buffer gedurende het jaar weergegeven. Hier is te zien dat gedurende de winterperiode de buffer langzaam leegloopt. Wanneer er geen of een lage warmtevraag is kan de buffer worden gevuld met de restwarmte. Uit de grafiek is het seizoenseffect duidelijk te zien, ook zijn de koudere periodes terug te zien. Gedurende de leegstand eind november kan de buffer aangevuld worden.



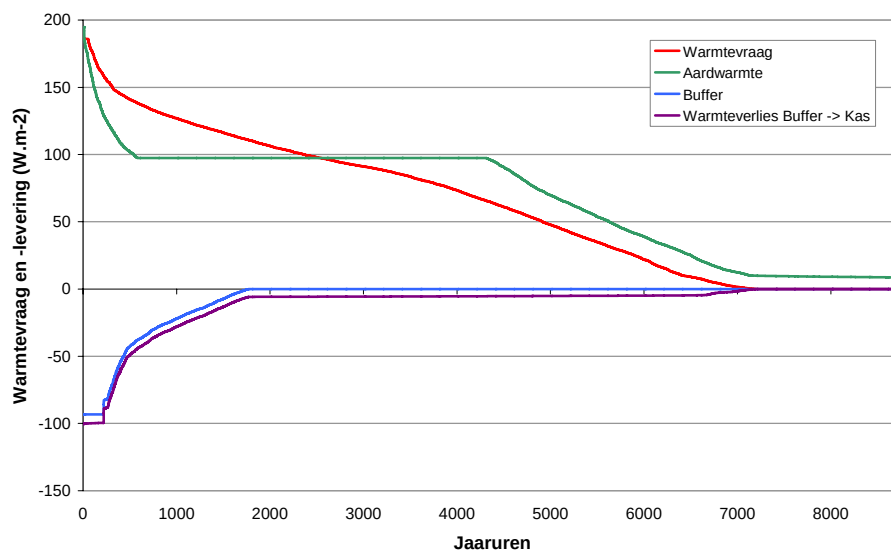
Figuur 18 – De vulstatus van het warmtebuffer.

Net als bij de eerste simulatie wordt de CO₂ dosering gedaan met externe CO₂ waardoor de CO₂ dosering precies aansluit op de vraag. Dit is al weergegeven in Figuur 14.

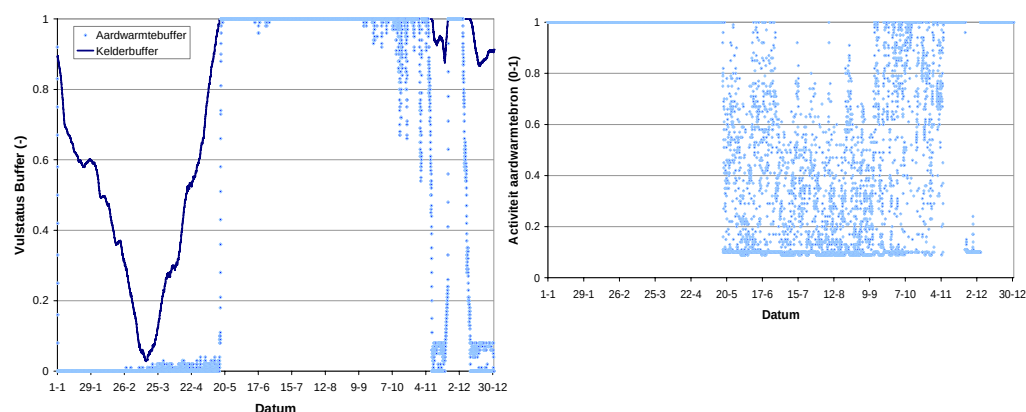
Aardwarmtebron met slim buffer

Met behulp van de simulaties is een slimmer buffersysteem ontworpen voor de aardwarmtebron. Het doel van de buffer is de benodigde capaciteit van de aardwarmtebron te verlagen door de warmtebehoefte tijdens de piekbelastingen op te vangen met warmte uit de buffer. Uit de simulaties is gebleken dat dit niet mogelijk is met minimale bron en een zeer groot kelderbuffer.

Het probleem van de buffer in deze variant is dat er maar een cyclus per jaar is. Daarom wordt er in vergelijking met een dag/nacht buffer weinig warmte omgezet per m³ buffervolume. Hierdoor worden de investeringskosten van het grote buffer niet terugverdiend, t.o.v. een aardwarmtebron zonder buffer afgestemd op de maximale warmtevraag van de kas is de buffer (300.000 m³) pas concurrerend bij een investeringsbedrag van €15,- per m³. Als tussenoplossing is er gekeken naar een kelderbuffer met een capaciteit van 100.000m³. Ook voor deze situatie zijn de jaarkosten voor warmte en CO₂-voorziening hoger dan wanneer alleen met twee aardwarmtebronnen van 10 MW gewerkt wordt, namelijk €22,34. Ook is de buffer thermisch niet in balans, omdat aan het einde van het jaar de vulstatus ruim 30 % lager is. Deze thermische balans wordt wel gevonden indien de kelderbuffer wordt verkleind naar 90.000m³ en de aardwarmtebron wordt voorzien van een tankbuffer van 2640 m³ om eerste fluctuaties in de warmtevraag op te vangen. De jaarkosten voor dit systeem zijn nagenoeg gelijk (€22,00). In dit geval kan de buffer concurreren met een aardwarmtebron zonder buffer bij een investeringsbedrag van €38,- per m³ en met de referentie bij een investeringsbedrag van €59,2 per m³.



Figuur 19 – Invulling van de warmtevraag. In het rood is de warmtevraag van de kas en deze wordt opgebracht door de aardwarmtebron en indien nodig aangevuld door het buffer.



Figuur 20 - De vulstatus van de buffers (links). In het lichtblauw is de vulstatus van het dagbuffer weergegeven (2640 m³) die ten dienste staat van de aardwarmtebron en in het donkerblauw de vulstatus van het kelderbuffer (90.000 m³). Activiteit van de aardwarmtebron (6009 vollasturen) rechts.

Als alternatief kan ook gewerkt worden met een diepe aquifer als warmtebuffer, waarbij het water met een hogere temperatuur kan worden opgeslagen dan bij een ondiep aquifer. Door de lagere investeringskosten van het aquifer is deze optie goedkoper dan een kelderbuffer, €16,22 per jaar exclusief directe productiekosten van de aquifer. Dit is nog net iets goedkoper dan de variant met alleen aardwarmtebronnen, echter bij geschatte productiekosten van de diepe aquifer van €1,60 per verplaatste GJ, lopen de kosten per m² op tot €18,47, een getal dat juist onder de kosten van de referentie ligt.

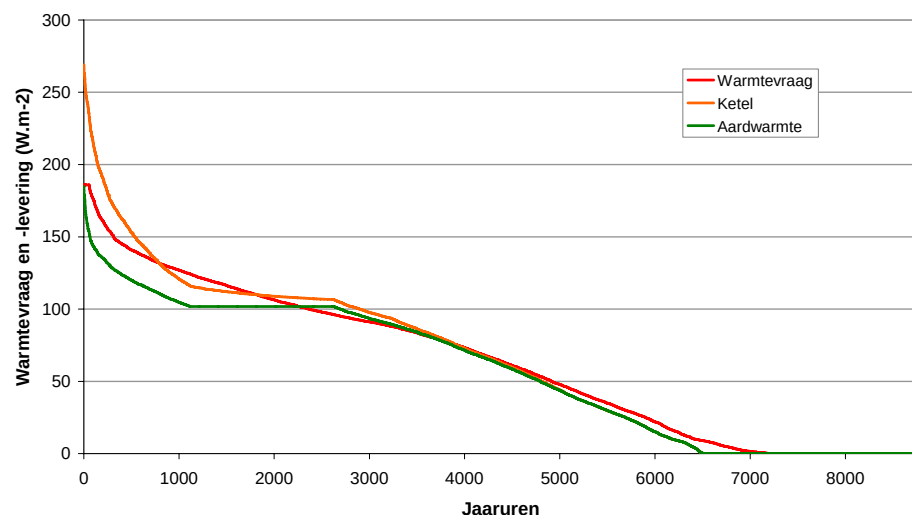
Toch kleven er risico's aan het gebruik van een extra diepe aquifer als warmtebuffer. Hoewel er wettelijk geen beperkingen zijn aan de temperatuur van het water dat wordt opgeslagen in de aquifer, kan er om praktische redenen geen water opgeslagen worden

waarvan de temperatuur veel hoger ligt dan de oorspronkelijke temperatuur in de bron. Wanneer dit wel zou gebeuren, zou er bijvoorbeeld kalk zich kunnen gaan afzetten in de componenten van het systeem, waardoor deze gaan verstopen (Van Elswijk en Willemsen, 2003). Door waterbehandeling kan dit probleem voorkomen worden, maar vormt tegelijkertijd een kwetsbaar onderdeel van de opslaginstallatie en een potentieel knelpunt bij vergunningverlening. Kosten voor waterbehandeling zijn nog niet in de berekening meegenomen.

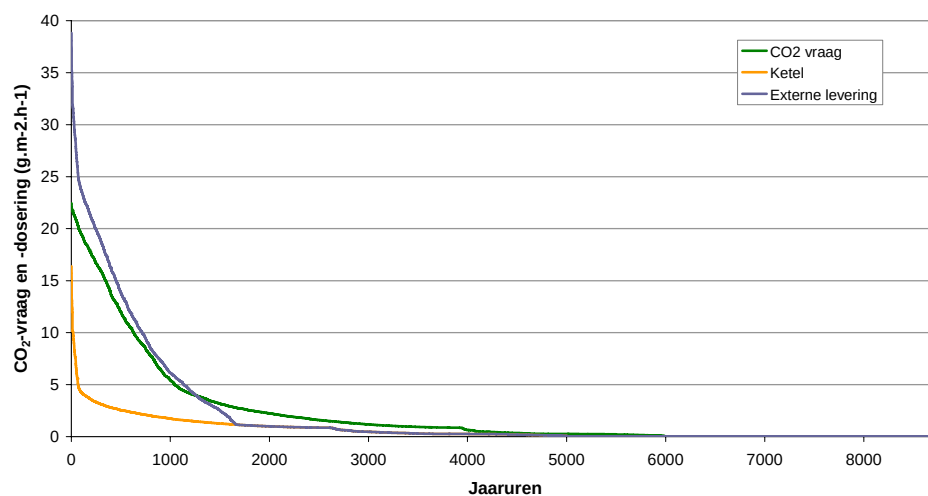
Aardwarmtebron met ketel

Oplossingen met volledige voorziening in de warmtevraag door aardwarmte, d.w.z. een dekkingsgraad van 100% zijn op grond van de jaarkosten niet of net concurrerend met de referentie. Als alternatief kan ook gebruik gemaakt worden van een combinatie van een ketel (9,8 MW) met aardwarmte (10 MW), met een buffer (2640 m³) toegewijd aan de aardwarmtebron. Omdat de investeringskosten van een ketel vele malen lager zijn dan die van een seizoensbuffer is deze variant goedkoper. Hoewel de variabele kosten voor de ketel per MWh veel hoger zijn weegt dit door zijn lage aantal draaiuren niet op tegen de hogere investeringskosten voor de seizoensbuffer. Met € 14,47 per m² aan jaarlijkse kosten is deze variant zelfs €2,27 per m² goedkoper dan de variant met alleen een aardwarmtebron en €4,07 goedkoper dan de referentie. In dit geval bedraagt het aantal vollasturen 4936 voor de aardwarmtebron en 684 voor de ketel. De dekkingsgraad aardwarmte is 87.1% en de benuttingsgraad is 56.3%.

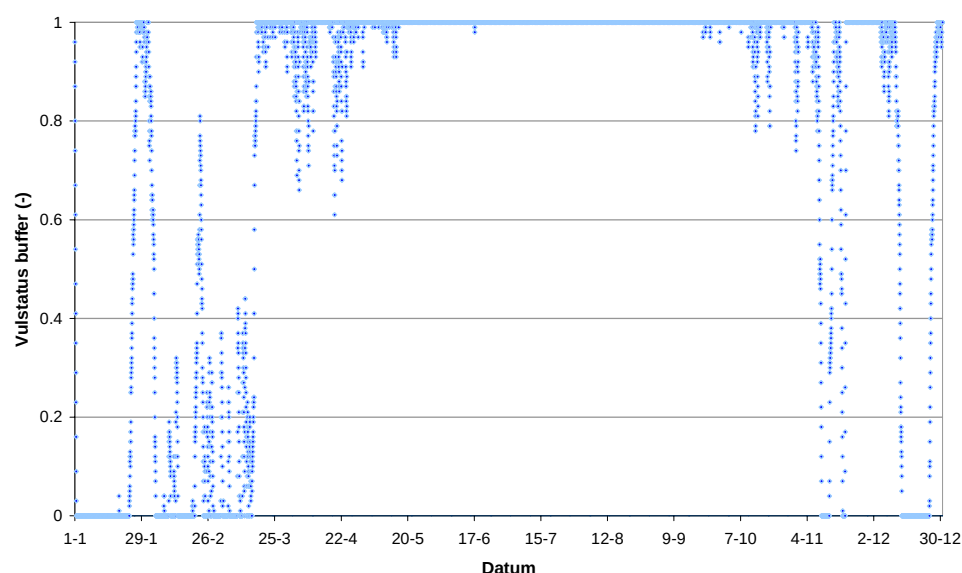
Indien de buffer op de aardwarmtebron niet wordt ingezet, dan neemt het aantal vollasturen van aardwarmtebron af met ruim 300 uur en neemt het aantal vollasturen van de ketel toe met 250. De dekkingsgraad en benuttingsgraad worden in dat geval resp. 85.6% en 52.9%. De jaarkosten verschillen nauwelijks (€ 14.46 per m²) omdat de toegenomen variabele kosten van de ketel de besparing op bufferkosten en operationele kosten van de aardwarmtebron juist compenseren. Het gasverbruik neemt toe met 2.6 m³ per m² van 6.9 naar 9.5 m³/m².



Figuur 21 - Warmtevraag van de kas (rood) die wordt ingevuld door een aardwarmtebron van 10MW met een beperkt buffer(groen) en een ketel om eventuele pieken in de warmtevraag op te vangen (oranje).



Figuur 22 – CO₂-vraag van de kas (groen) die wordt ingevuld door aangeleverde (zuivere) CO₂ (oranje) en door de ketel (grijs)



Figuur 23 - Vulstatus van de buffer behorende bij de aardwarmtebron.

Conclusie voor kwekerij de Wieringermeer

Uit de simulaties blijkt dat het economisch aantrekkelijk kan zijn om aardwarmte in te zetten als warmtebron. Als uitgangspunt voor het onderzoek is een kostprijs voor de verwarming genomen van €18,54 per m² per jaar. In deze situatie is gebruik gemaakt van twee WKK's (3,04 MW_e, 4,4 MW_{th}), die hun elektriciteit terugleveren aan het net en een ketel (9,8 MW) om de hoogste pieken in de warmtevraag op te vangen. Het totale gasverbruik voor opwekking van warmte en elektriciteit is in de referentie situatie is 96,2 m³/m² en daarbij wordt 31120 MWh elektriciteit aan het publieke net geleverd. De stroomopbrengsten zijn in de kostprijs verwerkt.

Wanneer twee aardwarmtebronnen worden gebruikt om de kas te verwarmen is er voor de Wieringermeer net voldoende capaciteit om ook aan de piekbelastingen te kunnen voldoen. In dat geval is het niet nodig een buffer te installeren. De jaarlijkse kosten voor invulling van de warmte- en CO₂-vraag in deze situatie bedragen €16,74 per m². Dit is goedkoper dan in de referentie situatie. Er is uiteraard geen sprake van elektriciteitslevering.

De inzet van een slimme buffer kan de verwarmingskosten niet verder reduceren. Hoewel de investering in de aardwarmtebronnen wel minder wordt moet er veel meer worden geïnvesteerd in de aanleg van de buffer. Het dag/nacht-buffer dat al aanwezig is heeft al voldoende capaciteit om snelle schommelingen op te vangen. Wanneer de kosten van de warmte die geleverd wordt door de buffer worden berekend, dan blijkt dat deze €137,40 kost per MWh. De oorzaak van de hoge prijs van de energie uit de buffer ligt in het feit dat er maar een cyclus per jaar optreedt, hierdoor wordt er maar weinig energie per m³ geleverd in vergelijking met een dagbuffer. Die in principe 365 cycli per jaar heeft. Daarnaast zijn de jaarkosten per m³ wel lager dan voor een tankbuffer, maar bedragen altijd nog €9,40 per m³ per jaar. Door de hoge investering op deze kelderbuffer worden de jaarlijkse kosten €22,34 per m². Indien de kosten voor een m³ kelderbuffer dalen tot ongeveer € 55 dan wordt een seizoensbuffer van 90.000 m³ economisch aantrekkelijk ten opzichte van de referentie.

Als alternatief voor een slim buffer kan er ook gewerkt worden met een ketel. De investeringskosten voor een ketel zijn laag. Hierdoor is deze installatie aantrekkelijker wanneer deze slechts een beperkt aantal draaiuren heeft, alleen tijdens piekmomenten. Een ander voordeel van deze variant is dat de aardwarmtebron minder wordt belast, deze hoeft namelijk niet het buffer te vullen. En in geval van een defect aan de aardwarmte-installatie kan de ketel als back-up fungeren. Een buffer op de aardwarmte bron draagt positief bij aan de dekkingsgraad door aardwarmte en aan de benuttingsgraad van de bron.

In tegenstelling tot de economische analyse van hoofdstuk 3 is de aardwarmtebron in deze simulaties goedkoper dan de referentie variant met WKK's, terwijl de gasprijs nog onder de 36 cent ligt. De reden hiervoor kan gevonden worden in het feit dat bij de economische analyse er uitgegaan was van een slim gebufferd systeem voor zowel de aardwarmtebron als de WKK. In de referentie situatie is dit niet het geval waardoor de WKK's niet optimaal benut kunnen worden en voor bijna 50% in de daluren opereren. Het huidige buffer in de referentiesituatie van 260 m³ is niet groot genoeg. De extra investering van een groter buffer kan terug verdiend worden wanneer daardoor het percentage draaiuren tijdens piek tarief omhoog gaat.

4.4.2 *Kwekerij Van den Ende - Van Kleef*

Net zoals bij de simulaties voor kwekerij de Wieringermeer is eerst gekeken naar de kosten voor de twee uiterste situaties. In variant één is de capaciteit van de aardwarmtebronnen zo groot, dat er geen buffer nodig is om de pieken op te vangen. In de tweede variant is de capaciteit van de aardwarmtebron geminimaliseerd. Hierdoor moet de aardwarmtebron continu draaien en worden de fluctuaties in de warmtevraag opgevangen door een buffer.

Aardwarmtebron zonder buffer

Om aan de warmtevraag tijdens de piekmomenten te kunnen voldoen moet de aardwarmtebron een capaciteit hebben van minstens 75 MW. Om hieraan te voldoen zijn in de simulatie 8 bronnen gebruikt van ieder 10 MW. Praktisch is dit al moeilijk uitvoerbaar. Iedere warmtebron heeft namelijk een beïnvloedingszone van ongeveer 4km². Om aan voldoende capaciteit te komen moeten dus ook putten buiten het areaal van Agriport A7 geboord worden. Ook het feit dat de transportkosten hierdoor hoger worden is een groot nadeel.

Omdat alle WKK's en ketels zijn vervangen door de aardwarmtebronnen wordt er geen elektriciteit en CO₂ meer geproduceerd. Zowel de elektriciteit als de CO₂ moeten hierdoor worden ingekocht tegen een hogere prijs. In totaal komt de prijs voor verwarming, elektriciteit en CO₂ op €40,60 per m² te liggen, hierin is begrepen een meerprijs per m² van €7,01 voor dosering met zuivere CO₂ en van €9,70 voor inkoop van elektriciteit van het net. De totale prijs is ruim €10 per m² duurder dan de referentiesituatie met 6 WKK's en 3 ketels.

Minimale aardwarmtebron met buffer

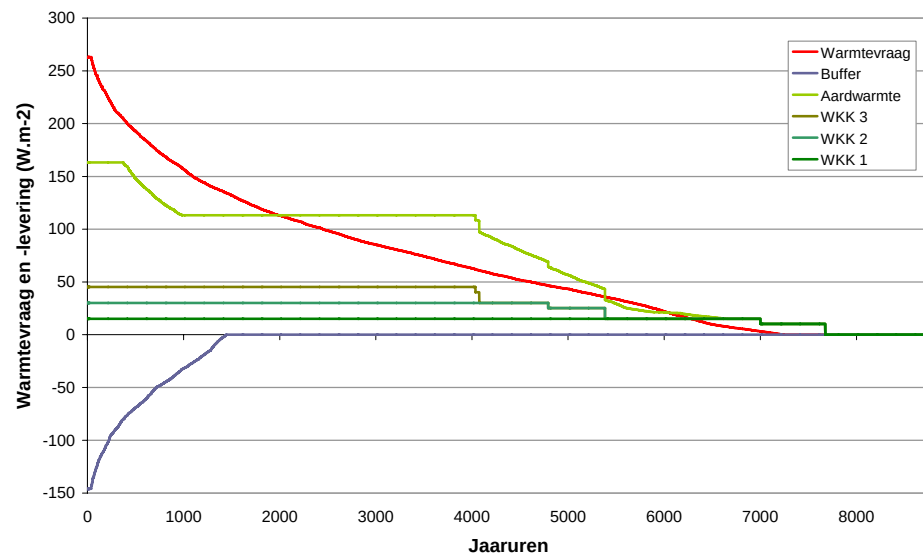
In de tweede variant is de aardwarmtebron geminimaliseerd en moeten de fluctuaties in de warmtevraag worden opgevangen door de buffer. Voor deze situatie is een broncapaciteit van 22,5 MW nodig. Er zijn twee verschillende buffers gesimuleerd. Wanneer de warmte wordt opgeslagen in een ondergrondse kelderbuffer dan zijn de totale kosten €54,10 per m² en voor buffering in een diep aquifer zijn de kosten €40,83 per m². Ook hierin zijn dezelfde meerprijzen voor CO₂ en elektra verwerkt.

Optimale inzet aardwarmte

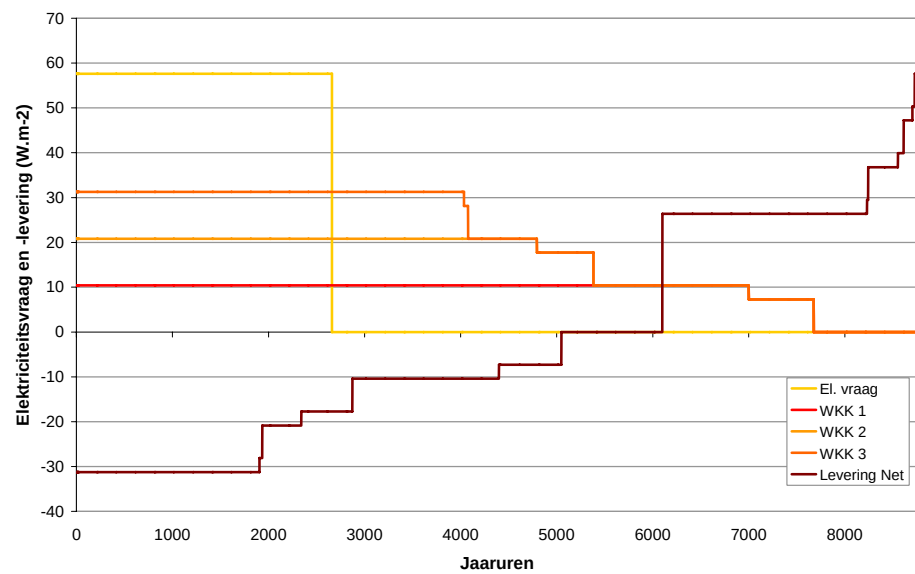
Omdat het gezien de warmtevraag onmogelijk is de capaciteit van de aardwarmtebron boven de 20MW te krijgen is er gekeken naar verschillende oplossingen om de beschikbare aardwarmte zo efficiënt mogelijk in te zetten. Om dat de aardwarmtebron alleen niet voldoende capaciteit heeft om aan de gehele warmtevraag te voldoen is het noodzakelijk dat er in de vorm van een ketel of een WKK capaciteit bij komt.

Door de elektriciteitsvraag van de kas is de voordeligste optie een aardwarmtebron gecombineerd met 3 WKK's en een totale buffercapaciteit van 85000m³. Met deze variant wordt voor invulling van de warmtevraag 42,6 m³/m² bespaard aan aardgas, het totaal gebruik is hiermee 25,8 m³/m². Ook wat betreft de elektriciteitsinkoop is deze variant erg gunstig. Er hoeft maar 22.696 MWh aan elektriciteit te worden opgenomen van het net, op een totaal gebruikt van 44.746 MWh. Tevens wordt er nog eens 28.862 MWh aan elektriciteit teruggeleverd aan het net. Het totale gasverbruik inclusief elektriciteitsproductie is voor deze variant 47.1 m³/m².

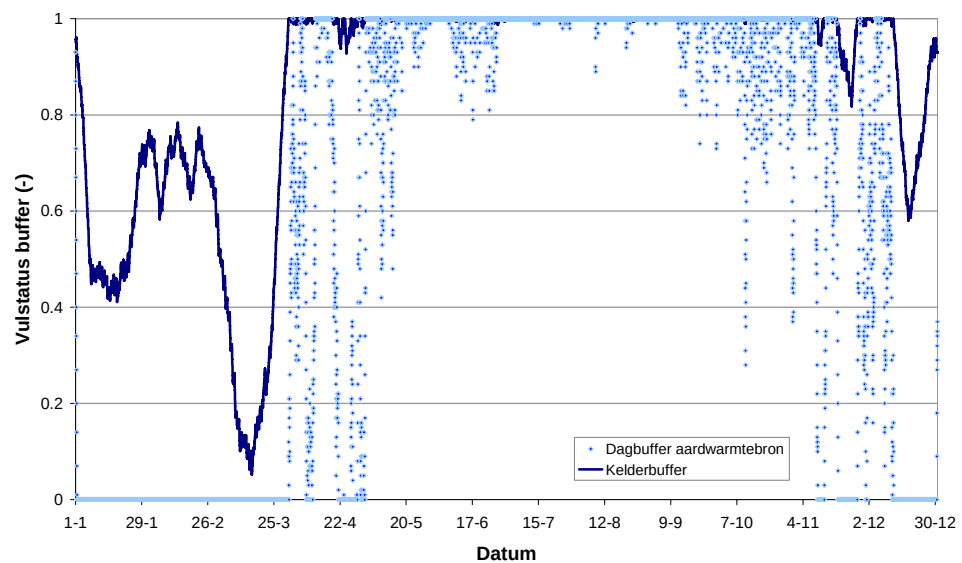
De kosten voor deze variant is echter nog wel iets hoger dan de referentie situatie €32,16 per m². De hogere kosten zitten voornamelijk in de hogere investeringskosten die gemaakt moeten worden. Maar de besparing op de gasrekening kan bij een stijgende gasprijs voordeel opleveren voor deze variant met aardwarmte.



Figuur 24 - Invulling van de warmtevraag (rood) met een aardwarmtebron (lichtgroen), een buffer (grijs) en drie WKK's (groentinten).



Figuur 25 - De elektriciteitsvraag kan gedeeltelijk worden ingevuld door de WKK's opgewekte stroom. Het gedeelte dat niet kan worden ingevuld door de WKK's moet worden ingekocht (levering net positief). Gedurende de uren dat er niet belicht wordt maar wel WKK's draaien wordt de elektriciteit verkocht (negatieve waarden levering net).



Figuur 26 - De vulstatus van het dagbuffer (5.000 m³, lichtblauw) en het kelderbuffer (80.000 m³, donker blauw).

Conclusie kwekerij Van den Ende – van Kleef

Met de huidige gasprijs is het voor kwekerij Van den Ende – Van Kleef niet mogelijk kosten te besparen door de inzet van aardwarmte. In de referentie situatie zijn de kosten voor het invullen van de warmte- elektriciteits- en CO₂-vraag €29,63 per m². Voor de geoptimaliseerde situatie met 20 MW aardwarmte, 3 WKK's en een kelderbuffer zijn de jaarlijkse kosten €32,16 per m².

De reden dat het voor deze situatie niet mogelijk is om de kosten met de aardwarmtebron onder de referentie situatie te krijgen ligt voornamelijk in het feit dat er belicht wordt. Hierdoor is er een aanzienlijke elektriciteitsvraag, welke in de referentie situatie wordt vervuld door de WKK's. Hierdoor kan de elektriciteit op een goedkope manier worden opgewekt en wordt er bespaard op de inkoop van elektriciteit. Door het gebruik van de aardwarmtebron zijn drie WKK's voldoende aanvulling om in de warmtevraag te voorzien, echter niet voldoende om in de elektriciteitsvraag te voorzien. Hierdoor wordt ook elektriciteit ingekocht. Op jaarbasis leveren de WKK's 50.912 MWh elektriciteit, dat is meer dan de elektriciteitsvraag van 44.746 MWh, toch is 22.969 MWh opname uit het net nodig. Het aantal vollasturen voor de 3 WKK's en de aardwarmtebron is voor deze variant resp. 7512, 5241, 4066 en 5462 uur. Alle installaties worden voldoende benut.

De variant met de aardwarmtebron heeft als voordelen dat het gebruik van fossiele brandstoffen meer dan 60% minder is, dat er netto wordt meer elektriciteit wordt geproduceerd dan gebruikt. Naast milieutechnische voordelen kan deze optie ook economische voordelen opleveren. Doordat door de groeiende schaarste de gasprijzen stijgen, kan in de toekomst de variant met aardwarmte goedkoper worden dan de referentie situatie. Dit hangt echter wel mede af van de ontwikkeling van de spark spread.

5 Slim bufferen van andere duurzame bronnen

In plaats van aardwarmte kunnen ook andere duurzame energiebronnen warmte leveren aan de warmtebuffer. In deze paragraaf wordt voor verschillende duurzame energiebronnen bekeken of ze kunnen samenwerken met de slimme buffer. Daartoe wordt eerst voor iedere energiebron het aanbodkarakter bepaald (wisselend, continue en al dan niet regelbaar). Ook is bekeken of het gebruik van buffers de inzetbaarheid van de duurzame warmtebron kan verhogen.

5.1 Restwarmte vanuit elektriciteitscentrales

Bij het opwekken van elektriciteit in een energiecentrale blijft restwarmte over in de vorm van warm water met een temperatuur van circa 30°C. Deze temperatuur kan hoger zijn bij kleinere energiecentrales, zoals de al behandelde WKK installaties die veel tuinders gebruiken. In veel gevallen wordt dit warme water geloosd in het oppervlakte water. Tegenwoordig wordt meer en meer geprobeerd deze restwarmte te gebruiken voor andere doeleinden. De hoeveelheid restwarmte die beschikbaar is ruwweg evenredig met de opgewekte hoeveelheid elektriciteit door de centrale. Basislast centrales zoals kerncentrales en kolencentrales worden continue bedreven. Aardgas gestookte centrales zijn sneller regelbaar en vangen pieken in de elektriciteitsvraag op. Afhankelijk van het type centrale zal deze restwarmte dus een continue stroom zijn die weinig fluctueert of een sterk wisselende warmtestroom.

Wanneer er tijdelijk meer warmte nodig is dan kan dit niet altijd vanuit de energiecentrale geleverd worden, hoewel landelijk gezien de hoeveelheid laagwaardige restwarmte enorm is. Toepassing van het buffersysteem is relevant voor afstemming van het aanbod op de warmtevraag, maar wordt vooral begrensd door de lage aanbodtemperatuur. Deze temperatuur kan wel verhoogd worden binnen de energiecentrale. Dit gaat ten koste van het elektrische rendement, maar dat kan toch interessant zijn door de betere benutting van de totale warmtestroom. Alleen als de watertemperaturen voldoende passend zijn, kan een zelfde buffer worden gebruikt voor buffering van beide bronnen. In de situatie waar een diep aquifer gebruikt wordt als buffer,

Een andere optie kan zijn om de transportleidingen over te dimensioneren zodat er meer warm water door kan. Door dat de investeringskosten voor het aanleggen van transportleidingen waarschijnlijk lager is dan de kosten van een aquifer, zou dit in dit geval goedkoper kunnen zijn dan een groot buffer. In dit geval moet er wel voldoende aanbod zijn van warmwater uit de energiecentrale en moeten de kosten voor de extra capaciteit niet te hoog zijn.

5.2 Zonne-energie

Zonne-energie kan door middel van zonnecollectoren worden geoogst. Bij een zonnecollector wordt de stralingswarmte van de zon geabsorbeerd door water. Dit warme water kan later gebruikt worden voor bijvoorbeeld verwarming. In de tussentijd kan de warmte tijdelijk worden opgeslagen in een buffer cq. boiler, zoals gedaan wordt bij zonneboilers die voor huiselijk gebruik worden ingezet. Zonnecollectoren op het kasdek worden niet veel gebruikt omdat ze veel licht onderscheppen. Blijven voor direct toepassing van zonnecollectoren alleen dichte dakdelen van bewerkingsruimten over. De warmte-opbrengst bedraagt 350-400 kWh per m² collector. Daarnaast

functioneert de kas zelf ook als een grote zonnecollector, al vanaf februari kunnen er warmte overschotten optreden. Door middel van warmtepompen is het mogelijk de warmte uit de kas te oogsten. Wanneer deze warmte in de vorm van warm water wordt opgeslagen in een seizoensbuffer, kan wanneer er een warmtevraag in de kas is deze energie gebruikt worden voor verwarming. De toepasbaarheid van dit idee wordt beperkt door de winbaarheid van het warmteoverschot, door de conversie van voelbare naar latente warmte door het gewas en door het effect van de warmteverliezen door de lange opslagtermijn. De winbaarheid neemt toe als gewerkt wordt met gesloten kassen. Een zeer grote buffer heeft relatief geringe verliezen door de kleine verhouding tussen buitenoppervlakte en inhoud en een zeer grote buffer kan een voldoende relevante hoeveelheid warmte bevatten. Dit is een van de redenen waarom tot nu toe WKO (Warmte Koude Opslag) in de bodem wordt gebruikt voor warmteopslag uit kaskoelende warmtepompen. WKO in de bodem wordt echter toch gekenmerkt door een vrij groot warmteverlies (20-30%) ook al als WKO wordt toegepast bij temperaturen rond de natuurlijke grondwatertemperatuur van 10°C (normaal 6-18 °C). Combinatie van bufferfuncties is bij toepassing van zonnecollectoren goed mogelijk en bij toepassing van oogsten van warmte in de kas is gecombineerde opslag niet aan de orde.

5.3 Bio-energie

Onder bio-energie wordt energie verstaan die afkomstig is uit biomassa. Volgens de Europese regelgeving is biomassa “De biologisch afbreekbare fractie van producten, afvalstoffen en residuen van de landbouw (met inbegrip van plantaardige en dierlijke stoffen), de bosbouw en aanverwante bedrijfstakken, evenals de biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval.” Enkele voorbeelden hiervan zijn mest, snoeihout en bijproducten van de levensmiddelenindustrie. Er zijn drie beproefde methoden die kunnen worden gebruikt voor het omzetten van bio-producten in energie:

- 1 Verbranding
- 2 Vergassing
- 3 Vergisting

Van een biomassacentrale kan, net zoals bij een gewone energiecentrale, naast de opgewekte elektriciteit ook de restwarmte gebruikt worden. Het is ook mogelijk gebruik te maken van kleine installaties, vergelijkbaar met WKK's, voor het opwekken van energie en warmte. Het voordeel hiervan is dat hoogwaardige warmte vrijkomt, waarmee beter kan worden ingespeeld op de fluctuaties in de vraag.

Biomassa heeft als belangrijk voordeel boven andere duurzame energiebronnen dat ze relatief gemakkelijk kan worden opgeslagen en gebruikt wanneer ze nodig is. Door dit specifieke voordeel te benutten is biomassa in bepaalde situaties interessant, zoals bijvoorbeeld het piek-shaven van het aardgasgebruik met bio-olie. Warmteopslag in een slimme buffer is dan niet nodig.

5.4 Conclusie

Wanneer er een energie centrale in de buurt is zou er gebruikt gemaakt kunnen worden van de restwarmte. De investeringskosten hiervoor zullen lager zijn dan bij aardwarmte. Wel is het van belang te kijken naar de capaciteit van de centrale, het temperatuurniveau van de restwarmte en of eventuele pieken in de warmtevraag kunnen worden opgevangen door een buffer.

Het opslaan van de door een warmtepomp afgevoerde overtollige warmte is een andere optie. Hierbij moet gelet worden op de investeringskosten van de warmtepomp en de benodigde buffercapaciteit. Ook moet gekeken worden wat het rendement van de gehele installatie is, verliezen in de buffer en efficiëntie van de warmtepomp. Op dit moment is een ondiepe aquifer de goedkoopste manier voor het opslaan van warmte en koude. Een variant met een kelderbuffer is minder interessant omdat door de hoge investeringskosten per m³ de bufferkosten te zeer oplopen. Hierdoor valt op dit moment het kelderbuffer nog af als (semi-)seizoensbuffer, maar als de prijzen van de kelderbuffers verder dalen kunnen deze alsnog interessant worden.

De laatste optie is het al dan niet in eigen beheer omzetten van biomassa in warmte. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden. Vergisting is hierbij economisch het meest haalbaar. Het proces van vergisting van biomassa verloopt eigenlijk in twee stappen. Eerst wordt de biomassa door middel van vergisting omgezet in een brandstof en een meststof. Waarna de brandstof in een ketel of een WKK wordt verbrand. Omdat de brandstof goedkoop is op te slaan en een ketel een grote capaciteit heeft is het voor de vergisting rendabeler om de brandstof te bufferen dan het plaatsen van een warmtebuffer. Bij toepassing van een WKK kan weer een afstemmingsprobleem ontstaan tussen de elektriciteitsvraag en de warmtevraag, waardoor buffering wel relevant wordt. Een buffer in het circuit kan de warmte van deze en andere bronnen bufferen.

6 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport is onderzoek gedaan naar de inzet van aardwarmte in tuinbouwkassen en manieren waarop het rendement door middel van slim bufferen verhoogd kan worden. In eerste instantie is er onderzocht welke buffermethodes beschikbaar zijn en welke geschikt zouden kunnen zijn voor de buffering van aardwarmte. Daarna zijn jaarrond simulaties gemaakt voor twee verschillende kwekerijen, één met een onbelichte kas en één met een deels belichte kas. Met deze simulaties is gekeken naar de beste manier om de aardwarmte in te zetten en hoe dit zich verhoudt met de referentie situatie. Tevens is er gekeken of er andere duurzame energiebronnen zijn waarbij het mogelijk is om met een slim buffersysteem het rendement te verhogen.

In de studie is gekeken naar de verschillende buffertypes, de inzetbaarheid van aardwarmte en de effecten van buffering op de kosten. Als laatste zijn de mogelijkheden van alternatieve energiebronnen bekeken. De conclusies zijn hieronder gegeven. Onder de aanbevelingen wordt beschreven welke ontwikkelingen van belang zijn om de inzet van aardwarmte in de glastuinbouw te bevorderen en wat er moet gebeuren om de slimme buffers meer toepasbaar te maken of te optimaliseren.

Conclusies

Algemeen:

- Toepassing van aardwarmte heeft gevolgen voor de invulling van de CO₂- en elektriciteitsvraag. Veranderingen dienen daarom integraal te worden beoordeeld.
- In dit rapport zijn 4 verschillende buffers geanalyseerd op hun bruikbaarheid voor het bufferen van aardwarmte. Hieruit is naar voren gekomen dat een kelderbuffer technisch gezien het meest geschikt is door z'n hoge betrouwbaarheid, lage variabele kosten en aanvaardbare warmteverliezen, mede omdat deze deels ten goede komen aan de kas. Met een kelderbuffer is het mogelijk een zeer grote buffer te realiseren zonder dat dit ten koste gaat van het areaal. Een ander voordeel is dat er hoge temperaturen in opgeslagen kunnen worden. Door de hoge investering zijn oplossingen met grote kelderbuffers echter nog niet rendabel.
- Een andere optie voor de warmte buffering is het diepe aquifer. Voordelen zijn deels gelijk aan die van een kelderbuffer: geen aanspraak op extra areaal, hoge temperaturen. Nadelen van dit buffertype is dat deze minder betrouwbaar is, er veel warmte verloren gaat, de operationele kosten aanzienlijk zijn en waterbehandeling nodig is als de opslagtemperatuur aanmerkelijk hoger is dan de normale bodemtemperatuur ter plaatse. Waterbehandeling vormt een kwetsbaar onderdeel van de opslaginstallatie en een potentieel knelpunt bij vergunningverlening. Waterbehandeling is niet meegenomen in de kostenberekeningen. Voordat deze optie gebruikt kan worden moet er eerst een goed onderzoek gedaan worden naar de (lange termijn) effecten van het infiltreren van warmer water in een diep aquifer. In vergelijking met de investeringsbehoefte voor grote kelderbuffers zijn de investeringskosten van een diepe aquifer lager.
- Een tankbuffer ter grootte van een dagbuffer die is toegewijd aan de aardwarmtebron draagt positief bij aan de dekkingsgraad van de warmtevraag door aardwarmte en aan de benuttingsgraad van de aardwarmtebron.
- Bij stijgende gasprijzen wordt het gebruik van de aardwarmtebron gunstiger. Afhankelijk van het effect van de spark-spread zal dit effect groter of kleiner zijn.

Specifiek casus Kwekerij de Wieringermeer

- In de referentie situatie zijn de jaarlijkse kosten voor invulling van de warmte en CO₂-vraag voor kwekerij de Wieringermeer €18,54 per m². Wanneer de kas geheel wordt verwarmd met aardwarmte zonder extra buffers, dan kunnen de kosten gereduceerd worden tot €16,74 per m² bij een benuttingsgraad van 33%. Naast een besparing van 10% in de kosten wordt er ook 5,6 Mm³ gas bespaard op de warmtevraag en de CO₂-uitstoot wordt effectief verminderd met 10 kton. Daar tegen over staat wel dat er nu voor 1812 MWh aan elektriciteit wordt ingekocht.
- Het is niet mogelijk om door middel van minimalisatie van de aardwarmtebron en 100% benuttingsgraad, door middel van bufferen de jaarlijkse kosten te verlagen, vergroting van de capaciteit van het al aanwezige dag/nachtbuffer heeft geen zin. Doordat er maar een beperkt aantal MWh aan warmte uit een m³ buffer kan worden gehaald zijn de investeringskosten voor de slimme seizoensbuffers te hoog. Dag/Nacht buffers worden dagelijks geladen en ontladen waardoor de kosten per MWh veel lager zijn. In vergelijking met de referentie moeten de investeringskosten van een kelderbuffer (100.000m³) minstens dalen tot €55,- per m³ voordat het gebruikt kan worden als slim buffer bij een hoge benuttingsgraad (69%) van de aardwarmtebron van 10 MW.
- Als alternatief voor het slimme buffer is gekeken of het mogelijk is om de kosten te verlagen door het inzetten van een ketel. De ketel wordt dan gebruikt om tijdens piekmomenten extra capaciteit te leveren. Hierdoor kan er bespaard worden op de aardwarmte installatie. De aardwarmtebron verzorgt dan ongeveer 90% van de warmtevraag en voor de overige 10% wordt de ketel bijgeschakeld. Door de besparing op de investering en slechts een lichte stijging van de variabele kosten kunnen de jaarkosten gereduceerd worden tot € 14,47 per m². Op jaarbasis is deze optie voor de kwekerij de Wieringermeer dus 22% goedkoper dan de referentie situatie, waarin één ketel en twee WKK's worden gebruikt. Een tweede alternatief met inzet van 2 WKK's in plaats van de ketel toonde netto jaarkosten (incl. opbrengst verkoop elektriciteit) van € 16,03.

Specifiek casus Van den Ende – Van Kleef

- Voor de belichte teelt is het niet goedkoper om de gehele warmtevraag in te vullen met aardwarmte. De reden hiervoor is ondermeer dat de kosten voor CO₂ en elektriciteit sterk oplopen met in totaal € 16,71 per m². Dit staat toepassing van aardwarmte bij (zwaar) belichte teelten in de weg.
- Wanneer een deel van de warmtevraag wordt ingevuld met aardwarmte zijn de jaarlijkse kosten €32,16 per m² tegen € 29,63 voor de referentie situatie, een stijging van 8,5%. Wel wordt er in de situatie met aardwarmte 42,6 m³/m² (62%) aan aardgas bespaard. Bij deze tussenoplossing met aardwarmte en WKK's leveren de WKK's op jaarbasis meer elektriciteit dan nodig voor de belichting, maar niet genoeg elektriciteit om op ieder moment aan de vraag te voldoen. Hierdoor moet er extra elektriciteit worden ingekocht tegen en hogere prijs en zijn er ook capaciteitskosten voor levering, netto wordt nog 6.2 GWh geleverd, maar zijn de kosten €1,75 per m². De veranderde invulling van de CO₂-vraag zorgt voor een kostenstijging van €1,70 per m².

Aanbevelingen

- In de referentie situatie van kwekerij de Wieringermeer draaien de WKK's voor ongeveer 50% in de daluren. Slim bufferen kan dit percentage omlaag brengen door het ontkoppelen van de warmte- en elektriciteitsvraag. Hierdoor kan er meer verdiend worden met de verkoop van elektriciteit waardoor de stookkosten gereduceerd kunnen worden. Wanneer er door middel van een onderzoek een optimaal buffer gezocht wordt bij een WKK installatie, moet het mogelijk zijn om een aanzienlijke besparing in de stookkosten te realiseren.
- Voor het slim bufferen zijn grote buffers waarin hoogthermisch warmte kan worden opgeslagen ideaal, benodigde capaciteit is ca 1 m³ per m² kas. Met de huidige prijzen voor een buffer is het nog niet mogelijk om de kosten voor invulling van de warmte-, CO₂- en elektriciteitsvraag te verlagen door middel van een buffer. Om dit te kunnen bereiken moet de kostprijs van een dergelijke buffer dalen tot ongeveer €55 per m³. Aangezien het om zeer grote buffers gaat moet het door schaalvergroting mogelijk zijn de kosten per m³ te verlagen. Deze buffers zijn op dit moment nog niet beschikbaar. Een andere optie is het opslaan van warmte in diepe aquifers. Naast het voordeel dat het vrij goedkope grote opslag capaciteit heeft de diepe aquifer ook nadelen en risico's. Zo is de maximale invoertemperatuur beperkt, zijn er aanmerkelijke verliezen, zijn er hoge operationele kosten en is het risico op defecten groot. Er zijn alternatieven zoals waterkelders die als warmtebuffer kunnen worden gebruikt. Het nadeel van deze buffers is dat ze nog te duur zijn om als seizoensbuffer te worden ingezet.
- Hoewel het bij de huidige prijs van buffers nog niet haalbaar lijkt, kan het model om het slimme buffersysteem te ontwerpen en te evalueren verder geoptimaliseerd worden. Wanneer met behulp van statistiek en weersscenario's over meerdere jaren wordt gekeken, moet het mogelijk zijn een scherpere voorspelling te doen. Hierbij kan ook gekeken worden naar de optimalisatie van de bufferstrategie, zodat de buffer per jaar meerdere cycli doorloopt, ofwel meerdere malen (gedeeltelijk) kan worden gevuld en geleegd.
- Om de investeringsrisico's bij toepassing van aardwarmte te verlagen is een financieel vangnet zinvol, zoals een garantstellingsfonds, mede omdat toepassing van geothermische energie bijdraagt aan de duurzame energie doelstellingen en de CO₂-uitstoot verlaagt.

7 Referenties

- Nieuwe materialen voor warmte-opslag bij tuinbouwkassen, H.H.R. Spoorenberg et. al. , TNO rapport 2005-BEE-R, januari 2005
- Multifunctioneel gebruik van een tuinbouwkas met kelder, A&F, Campen en De Zwart, rapport 272, november 2004
- Afstudeerrapport Edward Dekker, WUR Agrarische Bedrijfstechnologie, augustus 2005
- Hoge temperatuur warmteopslag in de bodem, ing. R.G.A. Wennekes, Verwarming & Ventilatie +, december 2005
- Kwantitatieve informatie voor de Glastuinbouw 2003- 2004, Groenten – Snijbloemen – Potplanten, S.C. Van Woerden, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, 2003
- N. J. van de Braak, F.L.K. Kempkes, P. Knies, A. Lokhorst, C.J.M. Vernooy, 2001, Toepasbaarheid aquifers in de glastuinbouw voor aardwarmtewinning en warmteopslag
- J. de Wit, WUR Afstudeerrapport Agrarische Bedrijfstechnologie, augustus 2006
- Visie op bodemenergie, IF-technology, mei 2005
- P. Ravensbergen en C.J.M. Vernooy, Energie in balans, WUR LEI, december 2003
- R.C. van Elswijk, A. Willemsen. Optimalisatie van het temperatuurniveau bij warmteopslag. Warmte en koude in de bodem. TVVL magazine 7-8/2003. p24-28.

A Economische Analyse

Aantal draaiuren	5 000	uur
Persentase in piek	85	%
Rente percentage	3.5	%

Verbruik per jaar

Ketel

Vermogen ketel	10	MW
rendament ketel	88	%
Investeringskosten	100 000	€
Afschrijftermijn	14	jaar
Onderhoud	1	%
jaarlast	9 750	euro

ketel

gas	5 844 156	m3
Variabele kosten	1 753 247	€
Max capaciteit	1 169	m3/h
capaciteitskosten	27 619	€
vaste kosten	37 369	€
	1 790 616	

Condenser ketel

Vermogen	8	milj. Kcal/uur
extra rendament	6	%
investering	19 756	€
afschrijving	7	jaar
onderhoud	1	%
jaarlast	3 309	euro

Condenser ketel

vaste kosten	3 309
	3 309

WKK

elektrische vermogen WKK	3	MWe
persentase electrisch	38	%
percentage warmte	55	%
percentage verlies	7	%
investeringskosten	1 200 000	€
Afschrijftermijn	10	jaar
onderhoud	7.50	€/MWh
jaarlast	141 000	euro

WKK

gas	4 114 286	m3
kosten	1 234 286	€
Onderhoud	114 000	€
Variabele kosten	1 348 286	€
max capaciteit gas	823	m3/h
cap. Kosten gas	19 444	€
max capaciteit electra	3	MW
cap kosten electra	0	€
vaste kosten	199 042	€
Opbrengst verkoop	1 124 800	€
	422 528	€

Aardwarmte

Vermogen aardwarmtebron	10	MW
pompkosten	3.20	€/GJ
Investeringskosten	5 000 000	€
Afschrijftermijn	30	jaar
onderhoud	150678	€
jaarlast	404 845	€

Aardwarmte

variabele kosten	576 000	€
Vaste kosten	404 845	€
	980 845	€

Aardgas

verbrandingswaarde	35	MJ/m3
comodityprijs	0.3000	€/m3
capaciteit	24	€/m3/h/j

Elektriciteit

comodity (dal)	40	€/MWh
comodity (piek)	80	€/MWh
capaciteit (jaar)	25	€/kW/jaar
capaciteit (maand)	2	€/kW/maand
Aansluiting	86 667	€/MW
afschrijving aansluiting	10	jaar
vastrecht aansluiting	2.9	%
jaarlast bij WKK	38 598	

Kosten per MWh th voor de verschillende installaties bij 5000 draaiure per jaar

Ketel		Condenser ketel	
Variabel	35.06	(6 % extra rendement op ketel)	
Vast	0.75	Variabel	0.00
totaal	35.81 €/MWh	Vast	1.19
		totaal	1.19 €/MWj

Ketel+condenser	
variabel	30.49
vast	0.80
totaal	31.30 €/MWh

WKK	
Variabel	61.29
Opbrengst	51.13
	10.16
Vast	9.05
totaal	19.21 €/MWh

Aardwarmte	
Variabel	11.52
vast	8.10
totaal	19.62 €/MWh

B Resultaten GTa-simulatie kwekerij de Wieringermeer

Samenvattend economisch overzicht		Referentie elektriciteit levering is doel				
		1309R	1909A Ketel (9.8MW) + 1x Aardwarmte (10 MW) sp buffer 2640m3	2509A2 Aardwarmte max. (2 bronnen)	2509B2a Aardwarmte min. (6.74 MW) + klimrek c buffer (300000 m3)	2509C3 aw bron (10.2MW (+2640m3 sp T buffer)). klimrek c buffer 90000m3. 200 m3.h-1, 160x165x4m).
Ketel						
Vaste kosten	€/jr	40940	37038	-	-	-
Variabele kosten	€/jr	359647	208087	-	-	-
gasverbruik	m3/m2	12.0	6.9	-	-	-
geleverde warmte	MWh	10025	5806	-	-	-
Totale kosten	€/MWh	40.0	42.2	-	-	-
	€/m2	4.0	2.5	-	-	-
	€	400587	245126	0	0	0
WKK 1						
Vaste kosten	€/jr	185879	-	-	-	-
Variabele kosten	€/jr	1746551	-	-	-	-
Opbrengst verkoop elektriciteit	€/jr	1193374	-	-	-	-
gasverbruik	m3/m2	51.4	-	-	-	-
geleverde warmte	MWh	27560	-	-	-	-
geleverde elektriciteit	MWh	19063	-	-	-	-
Kosten kengetallen	€/MWh	26.8	-	-	-	-
	€/m2	7.4	-	-	-	-
bruto kosten	€	1932430	0	0	0	0
WKK 2						
Vaste kosten	€/jr	185879	-	-	-	-
Variabele kosten	€/jr	1110876	-	-	-	-
Opbrengst verkoop elektriciteit	€/jr	687753	-	-	-	-
gasverbruik	m3/m2	32.7	-	-	-	-
geleverde warmte	MWh	17398	-	-	-	-
geleverde elektriciteit	MWh	12058	-	-	-	-
Kosten kengetallen	€/MWh	35.0	-	-	-	-
	€/m2	6.1	-	-	-	-
bruto kosten	€	1296756	0	0	0	0
Aardwarmte bron (incl buffer)						
Vaste kosten	€/jr	-	447505	809885	404935	447505
Variabele kosten	€/jr	-	577728	632538	646866	673013
Aardwarmte aan kas geleverd front end	MWh	-	50043	54907	56123	58420
Elektriciteitsverbruik	MWh	-	1668	1830	1871	1947
Totale kosten	€/MWh	-	20.5	26.3	18.7	19.2
	€/m2	-	10.3	14.4	10.5	11.2
	€	-	1025232	1442423	1051801	1120518
Buffer						
Vaste kosten	€/jr	42570	0	-	2825000	890070
Variabele kosten	€/jr	pm	pm	pm	pm	pm
aan kas geleverde bufferwarmte	MWh	7897	0	-	-	6169
	€/MWh	5.4	-	-	-	144.3
Kosten totaal						
Totale kosten verwarmingssysteem (in €		3672343	1270358	1442423	3876801	2010588
Variabele kosten CO2 (zuiver + transpō		59540	175195	228597	228597	228597
Totale kosten netto	€	1850757	1445553	1671020	4105398	2239185
	€·m ⁻²	18.54	14.48	16.74	41.12	22.43
Greenhouse area		99840 m2				
Gewasopbrengsten		3953664				
Gewas opbrengsten (€/m-2)		39.6				

C Resultaten GTa-simulatie Van den Ende – Van Kleef

Samenvattend economisch overzicht

		0210Ra	0610A1	0610A2	0610A3	0610B2
Ketels totaal						
Vaste kosten	€/jr	167847	-	-	-	-
Variabele kosten	€/jr	523059	-	-	-	-
gasverbruik	m3/m2	17	-	-	-	-
geleverde warmte	MWh	41668	-	-	-	-
Totale kosten	€/MWh	17	-	-	-	-
	€/m2	2	-	-	-	-
	€	690906	0	0	0	0
WKK totaal						
Vaste kosten	€/jr	1115300	-	-	-	634286
Variabele kosten	€/jr	9750632	-	-	-	4680600
Marktwaaarde elektriciteitsproductie	€/jr	6550154	-	-	-	3116283
gasverbruik	m3/m2	98	-	-	-	47
geleverde warmte	MWh	153393	-	-	-	73516
geleverde elektriciteit	MWh	106185	-	-	-	50912
Totale kosten	€/MWh	28	-	-	-	30
	€/m2	15	-	-	-	8
bruto kosten	€	10865932	0	0	0	5314886
Aardwarmte bron (incl buffer)						
Vaste kosten	€/jr	-	3239477	809869	809869	852439
Variabele kosten	€/jr	-	2020049	2268879	2273619	1252240
geleverde warmte	MWh	-	175357	196983	197395	108533
Elektriciteitsverbruik aardwarmtebron	MWh	-	5845	6566	6580	3618
Totale kosten	€/MWh	-	30.0	15.6	15.6	19.4
	€/m2	-	18.0	10.5	10.6	7.2
bruto kosten	€	-	5259526	3078748	3083489	2104680
Buffer						
Vaste kosten	€/jr	80625	0	6120833	1224194	423750
Variabele kosten	€/jr	pm	pm	pm	1016788.813	pm
aan kas geleverde bufferwarmte	MWh	-	-	42499	58150	24143
Totale kosten	€/MWh	-	-	144.0	21.1	17.6
	€	-	-	-	2240982.688	-
Elektra opname						
Vaste kosten	€/jr	-	767989	767989	767989	607392
Variabele kosten	€/jr	-	3242558	3242558	3242558	1603979
Geleverde elektra	MWh	-	44746	44746	44746	22696
Totale kosten	€/MWh	-	89.6	89.6	89.6	97.4
	€/m2	-	13.7	13.7	13.7	7.6
	€	-	4010548	4010548	4010548	2211371
Elektra productie						
Marktwaaarde elektriciteitsproductie	€/jr	6977020	-	-	-	3116283
Verkoop elektriciteit	€/jr	3523940	-	-	-	1698204
Vaste kosten netwerk	€/jr	153272	-	-	-	153272
Variabele kosten netwerk	€/jr	zie WKK's	-	-	-	zie WKK's
Verkochte elektriciteit	MWh	61439	-	-	-	28862
Aan lampen geleverd	MWh	44746	-	-	-	22050
Netto opbrengst	€/MWh	55	-	-	-	54
	€/m2	11.5	-	-	-	5.3
	€	3370668	-	-	-	1544932
Totale kosten warmte	€	11637463	5259526	9199582	5324471	7843315
Variabele kosten CO2 (zuiver + transport)	€	538755	2586023	2586023	2586023	1035546
Totale kosten elektra (opname)	€	-	4010548	4010548	4010548	2211371
Bruto opbrengst verkoop elektra	€	3523940	-	-	-	1698204
Totale kosten netto	€	8652278	11856097	15796152	11921042	9392029
	€/m2	29.63	40.60	54.10	40.83	32.16
Greenhouse area		m2				
Tomaten		€/jr				
Gewas opbrengsten (€/m.2)						

Referentie 3cB 15MW, 6WKK 3MWe, c T Buffer 5000m3, HeatSinc elektriciteit levering is WEL doel, geen ei, opname uit net, geforceerd belichting NIET toegestaan, geen zuivere CO2

Aardwarmte maximaal (81.4 MW, 76.8 MW effectief) + zuiver CO2 + elektra uit het net. (8 aw bronnen NIET REEEL)

Aardwarmte minimaal (23.7 MW, 22.5 MW effectief) + circuit klimrek buffer (650000m3) + zuiver CO2 + elektra uit het net.

Aardwarmte minimaal (23.7 MW, 22.5 MW effectief) + circuit aquifer buffer (1.54 miljoen m3) + zuiver CO2 + elektra uit het net.

3 WKK's (13.2 MWh) + Aardwarmte (20 MW, 450 m3.h-1) + buffer (5000m3, 330 m3.h-1) + B c buffer (80000 m3 750 m3.h-1) + opname volledig elektrisch vermogen uit het net. 19 MW + zuivere CO2