



Warmtebuffering in de grond

Monitoring van de toepassing een horizontale slangenbuffer bij Teegrow

Marcel Raaphorst



Abstract NL

Van een slangenbuffer die op 4 meter diepte in de kasbodem is aangebracht om warmte tijdelijk in de bodem op te slaan, is de technische en economische rentabiliteit berekend. Technisch gezien zou de slangenbuffer het grootste effect hebben bij een combinatie met een warmtepomp, maar economisch gezien is de investering niet rendabel.

Abstract UK

For a hose pipe heat storage that has been affixed on 4 meters depth to temporarily store heat in the soil, the technical and economic feasibility has been calculated. Technically, the hose pipes would have the greatest effect at a combination with a heat pump, but economically speaking, the investment is not profitable.

© 2013 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk
: Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk
Tel. : 0317 - 48 56 06
Fax : 010 - 522 51 93
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Samenvatting	5
1	Teegrow	7
2	Koeling van rookgassen uit de WKK	9
	2.1 Tijdverschuiving van warmtevraag en -aanbod	9
	2.2 Hoeveelheid warmtevraag en -aanbod	10
	2.3 Buffer van warmte en koude	10
3	De warmtepomp-optie	13
	3.1 Drie situaties	13
	3.1.1 Voorbeeld met draaiende WKK	13
	3.1.2 Voorbeeld met draaiende WKK en warmtepomp	13
	3.1.3 Voorbeeld met warmtepomp die warmte onttrekt uit de slangenbuffer	14
	3.1.4 Samenvatting voorbeelden	14
	3.1.5 Discussie	14
	3.2 Effecten op slangenbuffer	14
4	Metingen grondtemperatuur	17
5	Conclusies	19
Bijlage I	Uitgangspunten berekeningen slangenbuffer	21

Samenvatting

Het paprikabedrijf Teegrow te Grashoek (L) heeft een nieuwe kas van 4 ha voorzien van een slangenbuffer in de bodem. Met deze slangenbuffer kan een tijdelijk warmteoverschot worden opgeslagen om later te gebruiken. Ook kunnen de rookgassen van de WKK door de slangenbuffer verder worden uitgekoeld om later weer te gebruiken.

Uit berekeningen van de opslagmogelijkheden van warmte in de slangenbuffer is gebleken dat de opgeslagen warmte nauwelijks geschikt is om direct in de kas te benutten. Zelfs niet in de luchtbehandelingskasten die slechts een temperatuur van ± 25 °C nodig hebben.

Daarom is ook berekend of met behulp van een warmtepomp de slangenbuffer rendabel kan worden benut. Deze blijkt pas rendabel te zijn als 5 kWh elektriciteit goedkoper is dan 1 kWh aardgas. Omdat hiermee de slangenbuffer nog niet is terugbetaald, lijkt een slangenbuffer voor de glastuinbouw niet rendabel.

Hoewel het systeem van de slangenbuffer nog niet in gebruik is gesteld, is wel aan de hand van temperatuursensoren in de bodem vastgesteld dat de bodemtemperatuur onder de kas ook op groter diepten ± 4 °C hoger ligt dan bij de gevel.

1 Teegrow

Teegrow is een tuinbouwbedrijf in Grashoek (L) waar onder 8,1 hectare glas paprika's worden geteeld. Ruim de helft van dit bedrijf (4,2 ha) is in 2010 nieuw gebouwd met de volgende innovaties:

- Luchtbehandelingskasten die buitenlucht en kaslucht kunnen mengen, verwarmen met laagwaardige warmte, en via luchtslurven onder het gewas kunnen distribueren. Het maximale debiet van deze luchtbehandelingskasten is $4 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{uur}$.



Figuur 1. Installatie van de luchtbehandelingskast in de gevel (Foto Cogas Zuid).

- Een slangenbuffer op 4 meter diepte. Dit betreft iedere tralie 5 groepen van 4 slangen van 25 mm diameter (zie Figuur 2). Op 4,2 hectare betekent dit dat er ongeveer 110 km slang in de bodem is aangebracht.



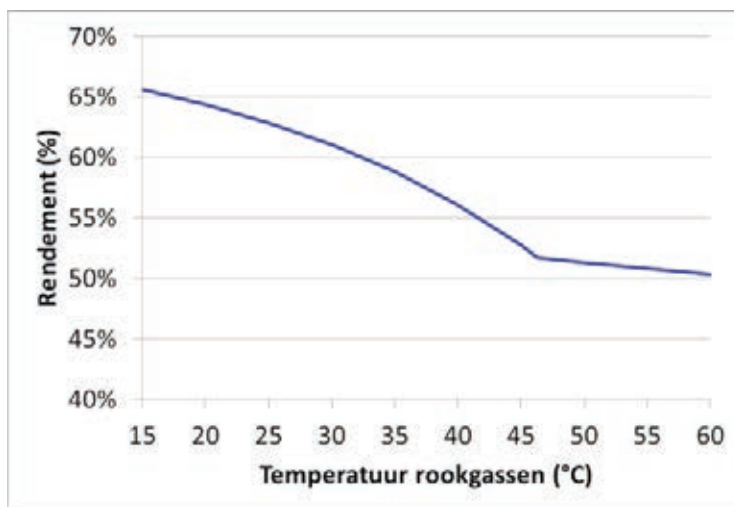
Figuur 2. Slangenbuffer en distributieleiding (Foto Cogas Zuid).

Daarnaast heeft het bedrijf 2 WKK's met beide een vermogen van 2 MW_e .

Vanuit het programma Kas als Energiebron is de vraag gesteld of een investering in een slangenbuffer een interessante energiebesparende optie is voor glastuinbouwbedrijven in het algemeen en in combinatie met het inblazen van buitenlucht in het bijzonder. In dit rapport zijn berekeningen uitgevoerd met het doel deze vraag te beantwoorden.

2 Koeling van rookgassen uit de WKK

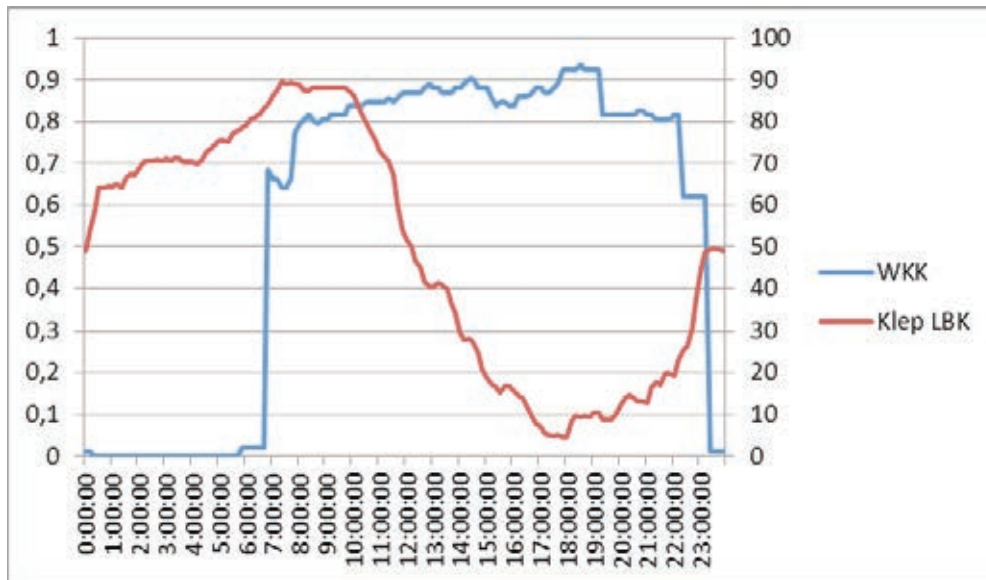
Door rookgassen af te koelen tot ver onder het dauwpunt kan veel energie worden bespaard. Dit geldt voor verwarmingsketels, maar nog veel meer voor WKK's. Bij een WKK is, door het thermische rendement van ongeveer 50%, bijna twee keer zoveel aardgas nodig als bij een ketel. Bovendien is het luchtverbruik per eenheid aardgas ongeveer 2x zo groot als bij een ketel. Hierdoor geeft een WKK bij hetzelfde thermische vermogen als een verwarmingsketel, een ongeveer vier keer zo groot volume aan rookgassen. In Figuur 3. is het thermisch rendement van de WKK weergegeven als functie van de rookgastemperatuur. Het dauwpunt van de rookgassen ligt bij 47 °C, dus wanneer de rookgassen onder deze temperatuur kunnen worden gekoeld, treedt condensatie op en komt er condensatiewarmte vrij. Zo is het thermisch rendement van de WKK 52% bij een rookgastemperatuur van 47 °C en 61% bij een temperatuur van 30°. Dat is dus $(61-52)/52=17\%$ meer warmtewinning.



Figuur 3. Thermisch rendement van een WKK als functie van de uitgaande rookgastemperatuur.

2.1 Tijdverschuiving van warmtevraag en -aanbod

De LBK's bij Teegrow zijn zeer geschikt om laagwaardige warmte toe te passen. Er wordt immers relatief koude buitenlucht opgewarmd door middel van een groot verwarmend oppervlak. De vraag naar laagwaardige warmte voor de LBK loopt echter niet synchroon met het aanbod van warmte uit de rookgassen van de WKK. In Figuur 4. is zowel de klepstand van de LBK als de stand van de WKK bij Teegrow weergegeven in een cyclisch etmaalgemiddelde over de periode 13 augustus tot 15 november. Hieruit blijkt dat de WKK alleen draait tussen 7:00 uur en 23:00 uur. De LBK zuigt hoofdzakelijk buitenlucht aan in de nacht en de morgen. 's Middags en 's avonds wordt veel minder buitenlucht aangezogen.



Figuur 4. Cyclisch gemiddelde van de klepstand van de LBK en van de WKK-stand.

Daar bovenop komt dat de WKK's in de wintermaanden meer draaiuren maken dan in de zomer, terwijl dat voor de LBK's juist andersom is.

2.2 Hoeveelheid warmtevraag en -aanbod

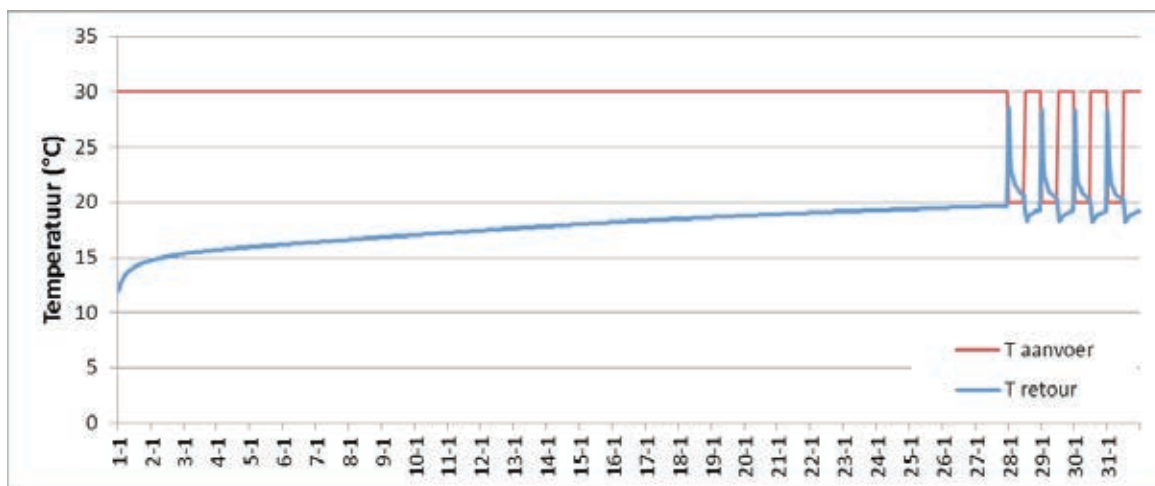
Als op jaarbasis alle rookgassen van de WKK worden afgekoeld van 45 °C naar 30 °C dan stijgt het thermisch rendement van 53% naar 61%. Indien de WKK 60 m³ aardgas per m² verbrandt dan zal de condensor $(61\%-53\%)*31.65*60= 152$ MJ/m² opleveren. Dit is ongeveer 5 m³/m² aardgasequivalenten.

De LBK's hebben een maximaal debiet van 4 m³/m².uur. Indien de buitenlucht gemiddeld met 10 °C moet worden opgewarmd, dan is 152 MJ/m² voldoende om $(152/(4*1.2*10))*1000= 3160$ uren per jaar volop buitenlucht aan te zuigen.

2.3 Buffer van warmte en koude

De warmte uit rookgassen kan bij Teegrow worden opgeslagen in een slangenbuffer in de bodem. Deze warmte kan alleen worden benut als de temperatuur hoog genoeg is. Hiervoor is een rekenmodel ontwikkeld dat kan schatten hoe de temperatuur zich in de bodem ontwikkelt onder invloed van de slangenbuffer. De belangrijkste uitgangspunten van dit model zijn weergegeven in Bijlage 1. Met dit model kan worden berekend hoe de retourtemperatuur zich gedraagt bij wisselende aanvoertemperaturen, stroomrichtingen en debieten in de slangenbuffer. Dit rekenmodel is nog niet gevalideerd op basis van praktijkgegevens.

Figuur 5. laat zien wat de retourtemperatuur uit de slangenbuffer is, als eerst 27 dagen continu water van 30 °C wordt toegevoerd bij een bodemtemperatuur van 12 °C. De retourtemperatuur loopt gestaag op tot ± 20 °C. Vervolgens wordt gedurende 1 dag vanaf de andere zijde 20 °C aangevoerd, waardoor het retourwater vanaf de warme zijde terugkomt. Het eerste uur heeft dit water een temperatuur van bijna 30 °C, maar al vrij snel daalt de retourtemperatuur naar 21 °C. Dit is nauwelijks voldoende om via de luchtbehandelingskasten de aangevoerde buitenlucht tot kasttemperatuur op te warmen. Indien vervolgens iedere dag 12 uur wordt geladen met 30 °C en ontladen met 20 °C, zal de retourtemperatuur tijdens het ontladen fluctueren tussen 30 °C en 21 °C.



Figuur 5. Berekening van de retourtemperatuur (blauw) na een aanvangstemperatuur van de bodem van 12 °C, waarbij eerst gedurende 27 dagen wordt geladen met 30 °C en vervolgens ieder etmaal 12 uur wordt ontladen met 20 °C en 12 uur geladen met 30 °C, bij een debiet van 50 m³/uur.

De slangenbuffer is in principe te gebruiken om buitenlucht op te warmen, al kent het de volgende nadelen:

- De beschikbare warmte uit de slangenbuffer geeft weinig temperatuurmarge om altijd zeker te zijn van voldoende opwarming van de buitenlucht in de LBK's.
- De slangenbuffer moet minstens een maand worden geladen voordat de warmte kan worden gebruikt.
- De beschikbare warmte uit de slangenbuffer heeft een fluctuerende temperatuur en heeft daarom extra aandacht nodig bij het regelen van de inblaastemperatuur.
- De slangenbuffer moet op een hoge temperatuur worden gehouden, waardoor relatief veel warmte verloren gaat naar de ondergrond. Als vuistregel kan worden gesteld dat voor iedere °C die de slangenbuffer gemiddeld hoger ligt dan de bodemtemperatuur, na 5 jaar 1 m³/m² aardgasequivalenten heeft gekost. Hiervan is het grootste verlies in het eerste jaar. Het opwarmen van de slangenbuffer van 12 °C naar 25 °C zal dus in de eerste 5 jaar 13 m³/m² aardgas kosten. Dit is meer dan de helft van de hoeveelheid warmte die in die 5 jaar geoogst wordt (5 jaar * 5 m³/m².jaar = 25 m³/m², zie paragraaf 2.2).
- Het retourwater van de rookgascondensator moet een temperatuur van minstens 30 °C hebben, waardoor de rookgassen niet extreem kunnen worden gekoeld.

Deze nadelen kunnen worden verholpen door gebruik te maken van een warmtepomp. Een warmtepomp kan bijvoorbeeld een temperatuur van 30 °C leveren om de kas mee te verwarmen, terwijl de rookgassen met water van 10 °C dieper kunnen worden gekoeld. Bij deze temperaturen zou een warmtepomp een COP van 7 moeten kunnen bereiken.

3 De warmtepomp-optie

3.1 Drie situaties

Als een warmtepomp wordt toegevoegd, zijn er drie mogelijkheden waarop gebruik kan worden gemaakt van het systeem met de slangenbuffer:

1. De buffer levert koud water om warmte te onttrekken aan de rookgassen van de WKK.
2. De buffer en de warmtepomp leveren samen koud water aan de rookgassen van de WKK.
3. De buffer krijgt koud water van, en levert warmer water aan de warmtepomp.

In de onderstaande paragrafen wordt berekend hoeveel debiet er door de slangenbuffer nodig is om voldoende warmte op te slaan of te onttrekken. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Rookgassen van de WKK worden afgekoeld van 45 °C naar 20 °C.
- Warmtepomp levert hiervoor koud water van iets meer dan 16 °C en warm water van 50 °C.
- Als de WKK niet draait, en de warmtepomp wel, dan levert de warmtepomp water van 10 °C aan de buffer.
- Het warme water uit de warmtepomp wordt direct gebruikt om de kas te verwarmen.
- Als de warmte van de rookgassen niet direct nodig is, dan kan de WP uit en wordt de slangenbuffer opgewarmd door de rookgassen.

3.1.1 Voorbeeld met draaiende WKK

Een WKK van 2 MW_e levert op 4,2 ha een thermisch vermogen van 60 W/m².

Door het afkoelen van de rookgassen wordt nog 18% (10,8 W/m²) extra aan de WKK onttrokken.

De slangenbuffer slaat deze warmte (10,8 W/m²) op in de bodem.

Als de slangenbuffer 12 °C is en wordt gevuld met water van 17 °C, dan is een debiet van ongeveer 100 m³/h nodig.



3.1.2 Voorbeeld met draaiende WKK en warmtepomp

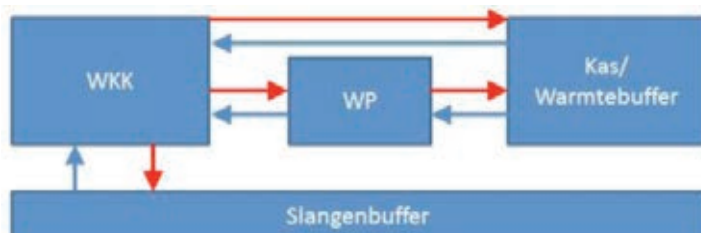
Een WKK van 2 MW_e levert op 4,2 ha een thermisch vermogen van 60 W/m².

Door het afkoelen van de rookgassen wordt nog 18% (10,8 W/m²) extra aan de WKK onttrokken.

Een warmtepomp van 80 kW_e en een COP van 5,1 kan 7,9 W/m² onttrekken aan de rookgassen en 9,9 W/m² warmte (50 °C) leveren aan de kas.

De slangenbuffer slaat de overige warmte (10,8-7,9 = 2,9 W/m²) op in de bodem.

Als de slangenbuffer 12 °C is en wordt gevuld met water van 16 °C, dan is een debiet nodig van ongeveer 23 m³/h.



3.1.3 Voorbeeld met warmtepomp die warmte onttrekt uit de slangenbuffer

Een warmtepomp van 80 kW_e die koud water moet leveren aan de bodem (10 °C) en warm water aan de kas (50 °C) zal een COP van 4,2 kunnen bereiken. Hiermee kan de WP 6,2 W/m² onttrekken aan de slangenbuffer en 8,1 W/m² warmte leveren aan de kas. Een slangenbuffer met een retourtemperatuur van 14 °C, die gevuld wordt met water van 10 °C heeft hiervoor een debiet nodig van 62 m³/h.



3.1.4 Samenvatting voorbeelden

	Naar kas	Naar bodem	Naar bodem	Retour	Debiet
	W/m ²	W/m ²	°C	°C	m ³ /uur
alleen WKK	60,0	10,8	17	12	100
WKK +WP	69,9	2,9	16	12	23
alleen WP	8,1	-6,2	10	14	62

3.1.5 Discussie

In bovenstaande berekeningen is uitgegaan van de koeling van een van de twee WKK's. Indien de rookgassen beide WKK's worden gekoeld zal meer warmte beschikbaar komen voor de slangenbuffer en/of kan worden volstaan met een hogere retourtemperatuur uit de WKK-condensoren.

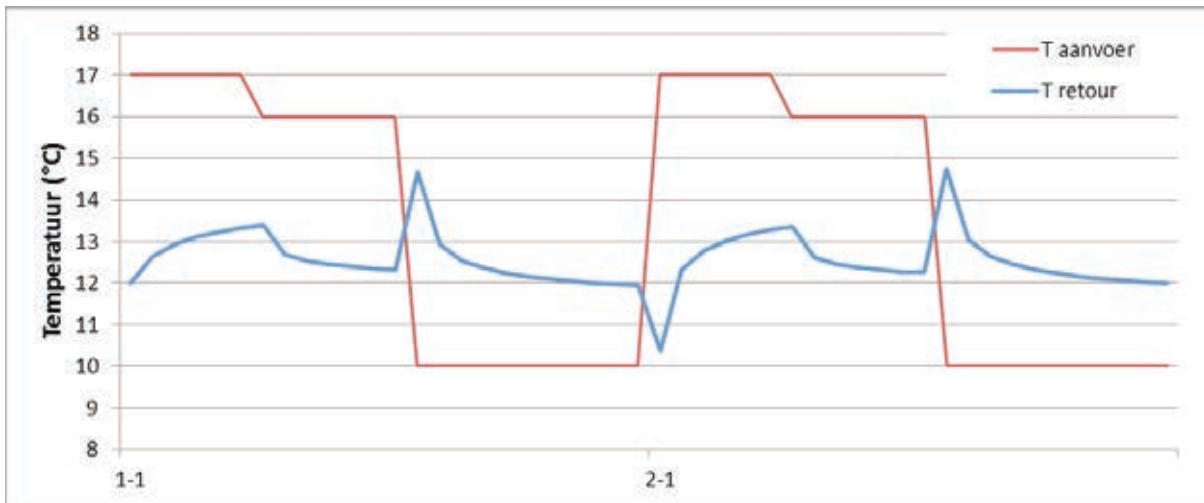
3.2 Effecten op slangenbuffer

In Figuur 7. is de watertemperatuur in de slangenbuffer weergegeven als iedere dag 6 uur wordt verwarmd met een WKK (1), daarna 6 uur in combinatie met een WP (2) en vervolgens 12 uur ontladen met alleen met een WP (3).

Bij de eerste fase stijgt de retourtemperatuur in zes uur van 12 naar 13,5 °C. Er is dan dus een iets hoger debiet nodig dan berekend in paragraaf 3.1.1 om de gestelde hoeveelheid condensatorwarmte op te kunnen slaan.

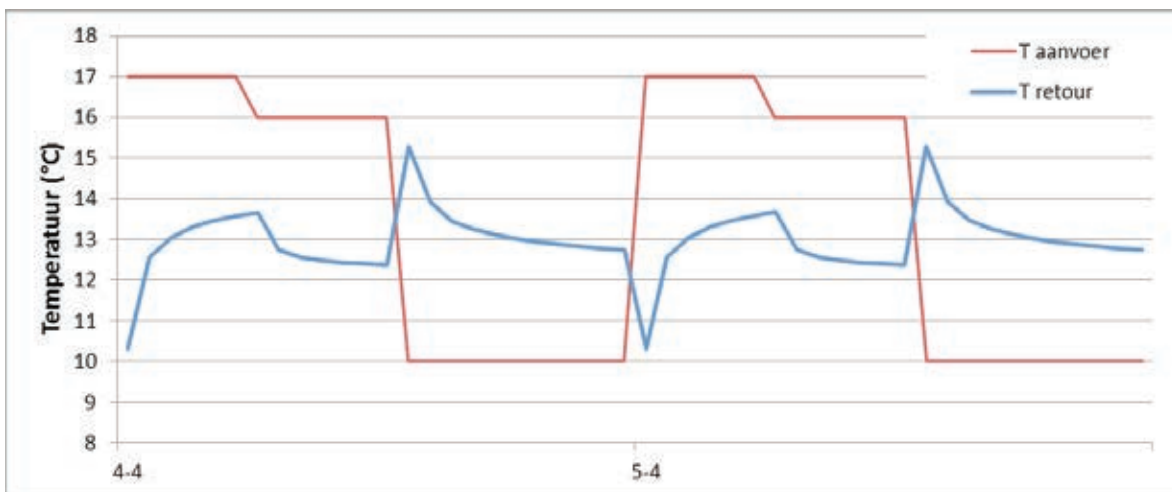
De volgende zes uur wordt een iets lagere aanvoertemperatuur geleverd, maar vooral een veel lager debiet, waardoor het water in de slangenbuffer meer tijd krijgt om af te koelen. Ook hier is de retourtemperatuur hoger dan 12 °C, waardoor het geschatte debiet van paragraaf 3.1.2 iets omhoog zal moeten worden geschroefd.

Na weer 6 uur draait de stroomrichting. Het zojuist aangevoerde water van 17 °C komt weer naar buiten bij een temperatuur van nog bijna 15 °C. Na verloop van tijd wordt het koelwater van de warmtepomp nog maar tot 12° opgewarmd. Het geschatte debiet van paragraaf 3.1.3 zal dan vrijwel moeten worden verdubbeld om voldoende warmte aan de bodem te onttrekken.



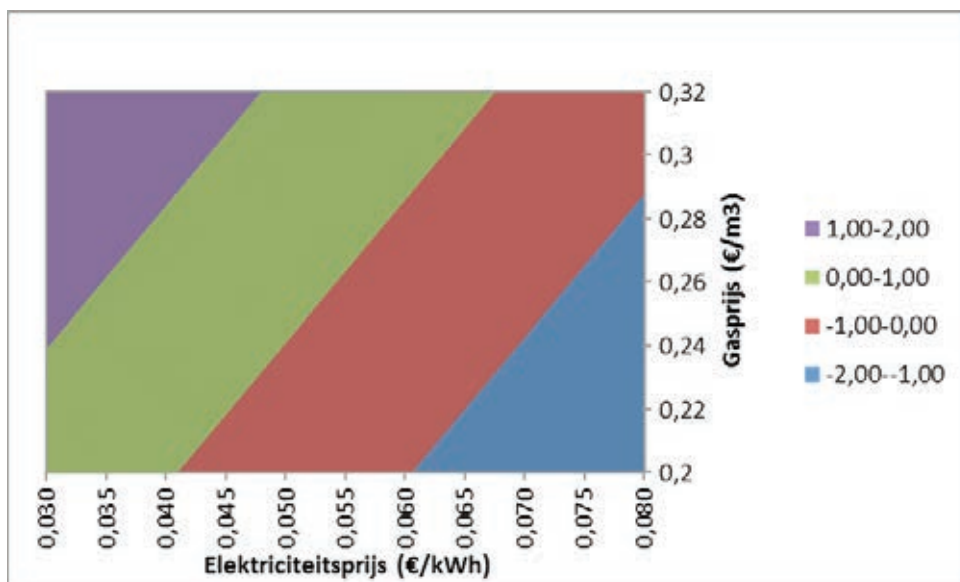
Figuur 6. Berekening van de retourtemperatuur (blauw) na een aanvangstemperatuur van de bodem van 12 °C, waarbij ieder etmaal gedurende 6 uur wordt geladen met 17 °C, 6 uur met 16 °C en 12 uur ontladen met 12 °C water, met debieten van respectievelijk 100, 23 en 62 m³/uur.

Per saldo wordt iets meer warmte aangevoerd dan afgevoerd, waardoor de temperatuur van de bodem iets stijgt. In Figuur 7. blijkt dat na een maand de retourtemperatuur gemiddeld nog geen °C is gestegen. Hierdoor wordt de WKK met een iets hogere temperatuur gekoeld en de warmtepomp met een iets hogere temperatuur gevoed. Dit betekent dat de debieten in situatie (1) en (2) zullen moeten stijgen om voldoende warmte op te kunnen slaan, en het debiet in situatie (3) weer kan dalen omdat er weer meer warmte vrijkomt uit de slangenbuffer.



Figuur 7. Berekening van de retourtemperatuur na 95 dagen.

De aanschaf van een warmtepomp van 2 W_g/m² kost ongeveer 1 €/m². Hiermee kan alle rookgaswarmte (± 5 m³/m².jaar) worden benut, al is hier wel elektriciteit voor nodig. In Figuur 8. is het jaarlijkse economische resultaat weergegeven als een warmtepomppoptie wordt toegevoegd aan de slangenbuffer. Deze blijkt pas rendabel te zijn als de elektriciteitsprijs lager ligt dan 1/5^e van de gasprijs, dus bijvoorbeeld bij een elektriciteitsprijs van minder dan 5 ct/kWh bij een gasprijs van 25 ct/m³.



Figuur 8. Berekening van het jaarlijkse voordeel (€/m².jaar) of nadeel bij de aanschaf en toepassing van een warmtepomp bij de slangenbuffer, als functie van de elektriciteitsprijs en de gasprijs.

4 Metingen grondtemperatuur

Op verschillende plaatsen en op verschillende diepten zijn bodemtemperatuurmeters geplaatst, waarbij gedurende ruim een half jaar de temperaturen zijn gelogd. Hoewel geen gebruik is gemaakt van de slangenbuffer, is wel de invloed van bovengrondse temperatuurschommelingen op de bodemtemperatuur te meten.

In Figuur 9. zijn de bodemtemperatuur bij een buitengevel en bij de bedrijfsruimte weergegeven op 2,5 tot 4,5 meter diepte. Duidelijk is te zien dat de bodemtemperatuur bij de buitengevel veel lager ligt dan bij de bedrijfsruimte. Ook is te zien dat de bodemtemperaturen minder fluctueren naarmate de sensor dieper liggen. Aan het verschil in de fluctuaties kan worden geschat hoe sterk warmte door de bodem wordt geleid. Zo is de bodemtemperatuur op 1 april vrijwel onafhankelijk van de diepte, maar wordt half juli een temperatuurverschil van ruim 1 °C per meter gemeten nadat de temperatuur op 2,5 meter diepte bijna 4 °C is gestegen.

Voor de meting bij de bedrijfsruimte geldt tussen 1 april en 11 juli:

Op 2,5 meter diepte stijgt de temperatuur van 17,2 naar 20,9 °C = 3,7 °C stijging

Op 3,5 meter diepte stijgt de temperatuur van 17,1 naar 19,5 °C = 2,4 °C stijging

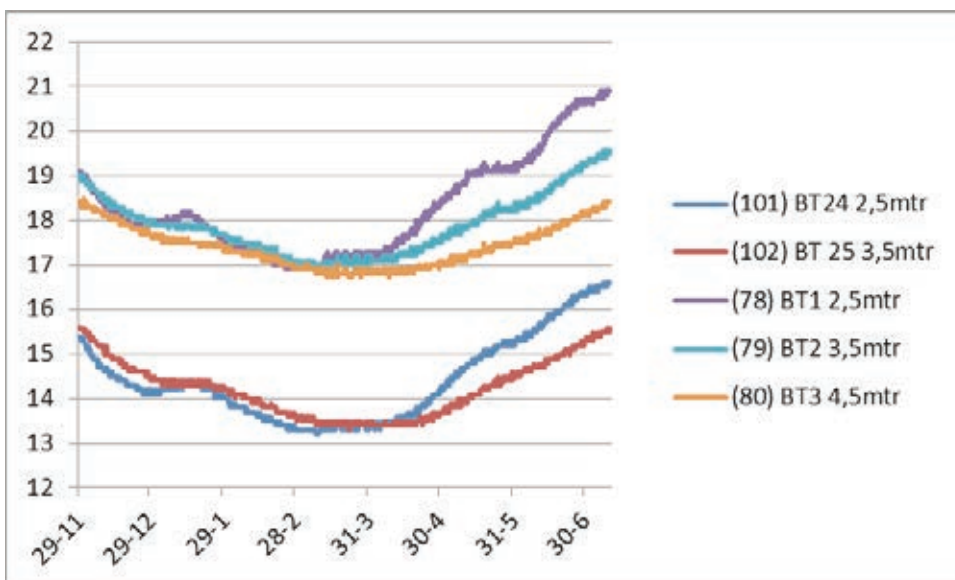
Op 4,5 meter diepte stijgt de temperatuur van 16,8 naar 18,4 °C = 1,6 °C stijging

De temperatuur op 3,5 meter diepte stijgt dus 2,4 °C terwijl de temperatuur op 2,5 meter diepte gemiddeld 0,93 °C hoger ligt en de temperatuur op 4,5 meter diepte gemiddeld 0,71 °C lager ligt.

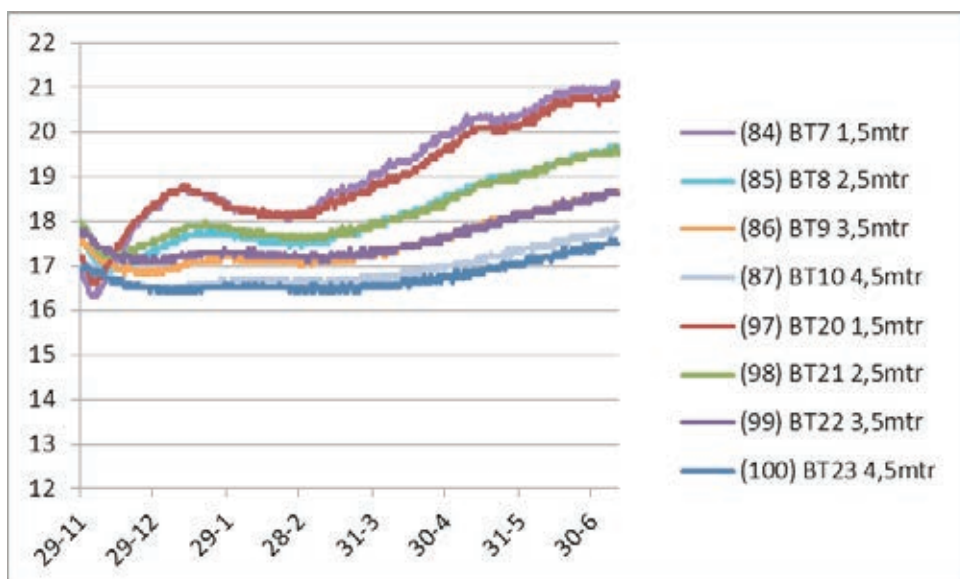
Tussen 3,5 en 2,5 meter diepte vindt dus een opwarming van gemiddeld 3,05 °C plaats bij een temperatuurverschil van gemiddeld 0,93 °C. Aan 1 m³ grond tussen 2,5 en 3,5 meter diepte, wordt dus 3,05 °C * 2000 kg/m³ * 2,2 J/g.°C = 13,4 MJ toegevoerd in 101 * 24 * 3600 = 8,7 Msec. Dit komt neer op 1,5 W/m², ofwel 1,6 W/m.°C.

Tussen 4,5 en 3,5 meter diepte vindt een opwarming van gemiddeld 2,0 °C plaats bij een temperatuurverschil van gemiddeld 0,71 °C. Aan 1 m³ grond tussen 3,5 en 4,5 meter diepte, wordt dus 2 °C * 2000 kg/m³ * 2,2 J/g.°C = 8,8 MJ toegevoerd in 101 * 24 * 3600 = 8,7 Msec. Dit komt neer op 1 W/m², ofwel 1,4 W/m.°C.

Gemiddeld komt de warmtegeleiding dus neer op (1,6+1,4)/2 = 1,5 W/m.°C, hetgeen minder is dan de in Bijlage 1 veronderstelde 2 W/m.°C.



Figuur 9. Metingen bij buitengevel (101-102) en bij bedrijfsruimte (78-80) op verschillende diepten.

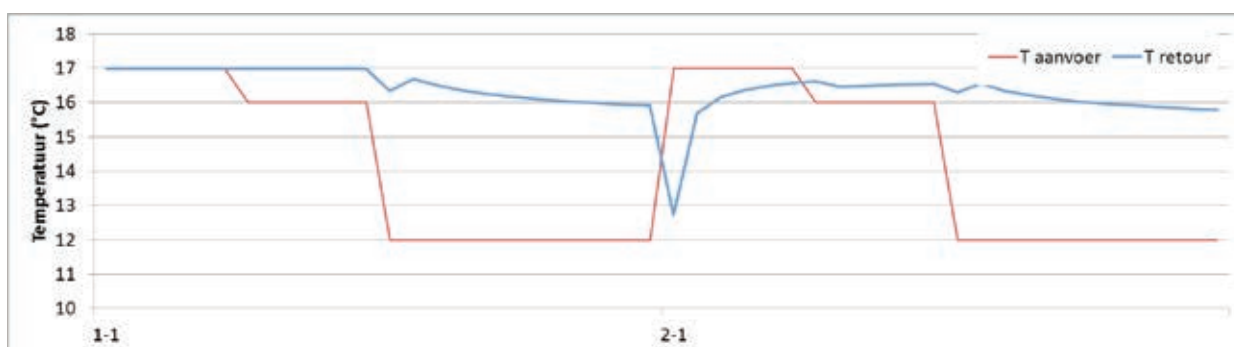


Figuur 10. Metingen op twee plaatsen in het midden van de kas op verschillende diepten.

In het midden van de kas is de temperatuur ook op verschillende diepten gemeten. Hieruit blijkt dat de temperatuur daar eerder in het seizoen stijgt. Dit komt door de kastemperatuur die al sinds het begin van het teeltseizoen op ongeveer 20 °C wordt gehouden. Daardoor moet het uitgangspunt worden bijgesteld, dat de aanvangstemperatuur van de slangenbuffer 12 °C zou zijn. Gezien de hogere temperaturen in de kasbodem (zie Figuur 10.) zou eerder moeten worden uitgegaan van 17 °C als aanvangstemperatuur.

Uitgaande van een hogere aanvangstemperatuur zou het bufferen van WKK-warmte ten behoeve van de luchtbehandelingskasten sneller een evenwichtstemperatuur verkrijgen dan zoals weergegeven in Figuur 5.

Bij toepassing van een warmtepomp zou een hogere aanvangstemperatuur aan Figuur 6. een ander beeld geven. Dit is weergegeven in Figuur 11. De slangenbuffer levert minder koeling aan de rookgassen van de WKK, en levert meer warmte aan de warmtepomp.



Figuur 11. Berekening van de retourtemperatuur (blauw) na een aanvangstemperatuur van de bodem van 17 °C, waarbij ieder etmaal gedurende 6 uur wordt geladen met 17 °C, 6 uur met 16 °C en 12 uur ontladen met 12 °C water, met debieten van respectievelijk 100, 23 en 62 m³/uur.

5 Conclusies

Een slangenbuffer is geen rendabele investering om te besparen op de warmtevraag. De warmte die in een slangenbuffer kan worden opgeslagen is niet geschikt om direct buitenlucht in de LBK's tot kasttemperatuur op te warmen. Aangezien hiervoor een watertemperatuur van minstens 25 °C nodig is, moet de slangenbuffer ook warm worden en zal het lekverlies van de slangenbuffer naar de bodem gedurende de eerste 5 jaar ongeveer 50% zijn, als wordt uitgegaan van een aanvangstemperatuur van 12 °C. Bij een aanvangstemperatuur van 17 °C is dat nog steeds 30% lekverlies in de eerste 5 jaar.

Door gebruik te maken van een warmtepomp ($2 \text{ W}/\text{m}^2$) hoeft de slangenbuffer een minder hoge temperatuur aan te nemen om de gebufferde warmte te gebruiken voor de verwarming van de kas. Hierdoor blijven de lekverliezen beperkt en kan vrijwel alle geoogste warmte uit de rookgassen ($\pm 5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{jaar}$ aan aardgasequivalenten) worden benut. De aanschaf van een warmtepomp is pas rendabel als een 5 kWh elektriciteit goedkoper is dan 1 m³ aardgas, maar hierbij is nog geen rekening gehouden met de kosten van de slangenbuffer.

Bijlage I Uitgangspunten berekeningen slangenbuffer

Berekening beïnvloeding temperatuur op grotere diepte

Onderstaande formules zijn gebruikt om de bodemtemperatuur te berekenen op meer dan 1 meter afstand van de slangenbuffer. Verondersteld is, dat de horizontale temperatuurverdeling op 1 meter afstand van de slangenbuffer egaal is.

$$a = \frac{\lambda}{\rho * c_p}$$
$$\xi = (T_x - T_1) / (T_2 - T_1)$$
$$\xi = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 * \sqrt{a * t}}\right)$$

Hierbij is

x: Afstand vanaf slangbuffer		m
T _x : Temperatuur op de afstand x		°C
T ₁ : Temperatuur op grote diepte		°C
T ₂ : Temperatuur bij slangenbuffer		°C
λ: Geleidbaarheid bodem	2	W/m.°C
ρ: Soortelijke massa bodem	2000	kg/m ³
c _p : Warmtecapaciteit bodem	2,2	J/g.°C
t: Tijd		sec

Op kortere afstand van de slangenbuffer (straal van minder dan 1 meter) is de bodemtemperatuur berekend door de slang in 10 segmenten en de bodem in 10 cirkels rondom de slangen te verdelen. Door de warmtestromen tussen de segmenten en cirkels iedere 150 seconden te berekenen op basis van de temperatuurverschillen, geleidbaarheid, contactoppervlak en warmtecapaciteit, worden ook iedere 150 seconden de temperatuurveranderingen in de bodem berekend.

Per tralie van 8 meter zijn 5 groepen van 4 slangen in de bodem aangebracht. De 4 slangen liggen zo dicht bij elkaar dat deze 4 slangen in het model als 1 slang met een dubbele diameter en een vierdubbele omtrek zijn beschouwd.

