



Grondbuisventilatie in de glastuinbouw

Marcel Raaphorst



Referaat

Met grondbuisventilatie wordt kaslucht of buitenlucht door een ondergrondse buis of gangenstelsel geleid om daar warmte aan af te geven of op te nemen. Hiermee kan de thermische opslagcapaciteit van de bodem worden benut om temperatuurschommelingen op te vangen en daardoor jaarlijks ongeveer 2 m³/m² te besparen op de warmtevraag. Bij warme teelten is het aan te raden om deze opgeslagen warmte ook te gebruiken om aangezogen buitenlucht op te warmen.

Abstract

With earth air heat exchangers, greenhouse air or outside air is led through an underground pipe or course system, to exchange heat with the soil. This exploits the thermal storage capacity of the soil to buffer temperature fluctuations, which can save approximately 2 m³/m² annually on heat demand. With high temperature crops, the heat can preferably be used to warm up injected outside air.

© 2012 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Violierenweg 1 Bleiswijk
: Postbus 20, 2265 ZG Bleiswijk
Tel. : 0317-485606
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
	1.1 Doelstelling	7
	1.2 Methode	7
2	Varianten grondbuisventilatie	9
	2.1 Ervaringen	9
	2.2 Ontwerp	10
	2.2.1 Warmte-opslagcapaciteit	10
	2.2.2 Elektriciteitsverbruik ventilatoren	11
	2.2.3 Warmte-overdracht (1 uur)	12
	2.2.4 Warmte-overdracht (1 etmaal)	13
	2.2.5 Warmte-overdracht (1 jaar)	15
	2.3 Overige ontwerpeisen	18
	2.4 Discussies	18
	2.4.1 Positief effect van ontvochtiging	18
	2.4.2 Bevorderen warmte-overdracht	19
	2.4.3 Beperking elektriciteitsverbruik	19
	2.4.4 Investeringsruimte	19
3	Conclusies en aanbevelingen	21
	3.1 Conclusies	21
	3.2 Aanbevelingen	21
4	Referenties	23

Samenvatting

Grondbuisventilatie is een techniek waarbij kaslucht (binnenlucht) of buitenlucht door een ondergrondse buis of gangenstelsel wordt geleid om daar warmte aan af te geven of op te nemen. Hiermee kan de thermische opslagcapaciteit van de bodem worden benut om temperatuurschommelingen op te vangen en daardoor te besparen op de warmtevraag. Met financiering van het programma Kas als Energiebron, is daarom onderzocht in hoeverre grondbuisventilatie kan bijdragen aan een energiezuiniger kas.

In de praktijk zijn meerdere experimenten met grondbuisventilatie uitgevoerd. Aan de hand van deze experimenten en op basis van natuurkundige wetten, is met modellen berekend hoeveel warmte met grondbuisventilatie kan worden opgeslagen en dus kan worden bespaard. De te bereiken besparingen blijken af te hangen van vele factoren, zoals de fijnmazigheid van het ondergrondse gangenstelsel, het debiet, de toegelaten temperatuurfluctuaties in de kas en de geleidbaarheid van de bodem.

Als een bodemlaag van 1 meter dikte met 1 °C kan worden afgekoeld dan is de vrijgekomen warmte ruim voldoende om een geschermd kas vrijwel iedere nacht op temperatuur te houden. Deze warmte moet dan overdag worden teruggewonnen en niet iedere dag heeft een warmte-overschot.

Voor een buis per 1,60 meter van 50 meter lengte en een diameter van 0,15 meter en een debiet van 4 m³/m².uur is voor een jaar met een onbelichte tomatenteelt berekend, dat ±1,3 m³/m² aardgasequivalenten aan warmte kan worden bespaard. Deze besparing kan met 50% worden verhoogd door de opgeslagen bodemwarmte te gebruiken om buitenlucht op te warmen. Bij een warmte-extensieve teelt zoals sla, kan door grondbuisventilatie meer warmte worden benut dan bij een warmte-intensieve teelt.

Hoewel het doorgerekende grondbuissysteem (50 meter lengte, 0,15 m diameter) voor veel Nederlandse teelten onvoldoende energie bespaart en te veel elektriciteit kost om rendabel te kunnen zijn, is het denkbaar dat een systeem met een groter wandoppervlak en kortere buizen wel rendabel is. Voor een optimalisatie hiervan zal een geavanceerder model moeten worden ontwikkeld.

1 Inleiding

De bodem kan worden gebruikt als warmtebuffer om tijdens warme perioden warmte op te slaan en tijdens koude perioden de warmte weer te onttrekken. Er zijn meerdere systemen die kunnen dienen als warmtewisselaar tussen (kas) lucht en bodem.

1. Gesloten watercircuit dat horizontaal in de bodem is geplaatst, bijvoorbeeld op een diepte net iets onder het grondwatervniveau.
2. Gesloten watercircuit dat verticaal (tot ± 50 meter diepte) in de bodem is geplaatst, bijvoorbeeld als onderdeel van de funderende heipalen van een gebouw.
3. Open watercircuit waarin water via een doublet in en uit een watervoerende zandlaag (aquifer) wordt verpompt
4. Directe ventilatie van lucht door (horizontaal geplaatste) grondbuizen.

Toepassingen van warmtebuffering in de bodem zijn onder andere ontwikkeld voor woningen en voor de varkenshouderij (zie paragraaf 2.1). In dit rapport worden de mogelijkheden van directe ventilatie via grondbuizen bij glastuinbouwbedrijven beschouwd aan de hand van voorbeelden uit de praktijk en simulaties met rekenmodellen. Dit valt in het kader van het programma Kas als Energiebron, dat beoogt om de glastuinbouwbedrijven steeds minder afhankelijk te maken van fossiele brandstoffen.

Als voorbeeld hiervoor heeft een Poolse glastuinbouwbedrijf geïnvesteerd in grondbuisventilatie. Met dit principe kan naast energiebesparing door minder warmtebehoefte in de nacht, overdag de ventilatie van de kas worden beperkt, hetgeen meer CO₂ in de kas houdt. Ook zegt deze Poolse teler de luchtvochtigheid op deze manier beter te kunnen beheersen.

1.1 Doelstelling

Over de haalbare energie besparing en de effecten op het klimaat is naast de ervaringen van de ontwikkelaar weinig bekend. Het Poolse bedrijf claimt het energieverbruik met 25% terug te hebben gebracht, maar het is niet aannemelijk dat deze energiebesparing geheel aan de grondbuisventilatie is toe te schrijven. Het systeem kan een aanvulling zijn op het aanzuigen van buitenlucht bij Het Nieuwe Telen en voorlopig wordt als doel gesteld dat het hierbij 3 m³/m².jaar aan aardgas kan besparen. Door verschillende opties te inventariseren en door te rekenen wordt een indruk verkregen hoe het principe rendabel kan worden toegepast in de glastuinbouw om energie te besparen en een beter kasklimaat te realiseren. Hierbij wordt tevens weergegeven wat de invloed is op de bodemtemperatuur, het kasklimaat, de energiebesparing, het elektriciteitsverbruik en de rentabiliteit.

1.2 Methode

Ontwerp en simulatie van varianten. Op basis van theoretische kennis over thermisch transport in de bodem zullen enkele varianten worden opgesteld van het principe van grondbuisventilatie in combinatie met warmte buffering in de bodem. Daarbij wordt rekening gehouden met de kennis die is opgedaan bij het nieuwe telen. Ook zal worden gekeken naar een combinatie met buitenluchtaanzuiging. Daarbij wordt gezocht om de kansen van combinatie van geforceerde ventilatie en grondbuisventilatie te benutten. De verschillende toepassingswijzen worden gesimuleerd voor een tomatenteelt in een standaard klimaatjaar, zodat kan worden bepaald met welke variant de hoogste besparing en/of het hoogste rendement wordt bereikt. Bij deze simulaties wordt ook beoordeeld wat de te verwachten effecten op het kasklimaat zijn.

2 Varianten grondbuisventilatie

2.1 Ervaringen

Met ondergrondse warmteopslagsystemen met water als transportmiddel, wordt al veel toegepast, o.a. in de varkenshouderij (www.varkensinnovatiecentrum.wur.nl) en vooral in de glastuinbouw. Zo zijn er enkele tientallen semi-gesloten kassen met een open systeem (doublet) en heeft het bedrijf Teegrow in 2012 een gesloten systeem aangelegd met vele slangen op 3,5 meter diepte in de grond, waarin rookgaswarmte kan worden opgeslagen voor later gebruik. Ook heeft het bedrijf Welvaarts te Wellerlooi geïnvesteerd in warmtebuffering met slangen in het grondwater.

Ook met ondergrondse warmteopslag waarbij lucht als transportmiddel (grondbuisventilatie) wordt toegepast, is ervaring opgedaan. In deze paragraaf worden hiervan enkele voorbeelden genoemd.

Cobouw noemt op zijn site (www.cobouw.nl) een grondbuis van 20 meter lang voor de verwarming en de koeling van ingeblazen buitenlucht bij zes woningen. Deze grondbuis heeft een verwarmingsvermogen van ± 500 W.

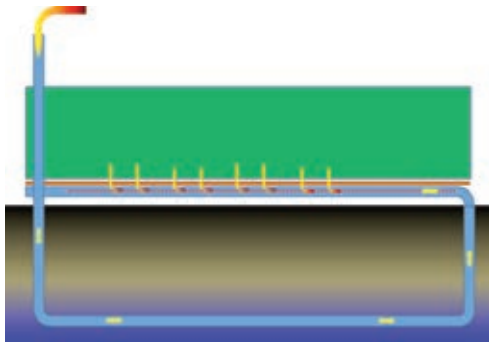
Volgens de site van Zehnder-JE StorkAir (www.zehnder-jestorkair.nl) wordt grondbuisventilatie in combinatie met een warmte-terugwinning toegepast bij woningen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van 200 mm slangen van 25 tot 50 meter lengte.

Van 't Klooster heeft in 1985 grondbuisventilatie beproefd op het proefbedrijf van het praktijkonderzoek voor de varkenshouderij [van 't Klooster, 1987a; van 't Klooster, 1987b]. Buitenlucht wordt hierbij vanaf de zolder in de stal geblazen. De aangezogen lucht is hierbij niet afkomstig van een opening in het dak, maar van een buizensysteem onder de buitenruimte naast de stal. Hierbij wordt geadviseerd gebruik te maken van korte (24 m) en wijde (0,19 m) buizen, om de luchtweerstand laag (20 Pa) te houden. De onderlinge afstand van de buizen is 0,65 m.

Een proefstelsel met grondbuisventilatie voor de varkenshouderij blijkt zowel te besparen op het energieverbruik voor ventilatie (er is immers minder lucht nodig om in de zomer te koelen) als op het verbruik van warmte. Bij de biggenopfok blijkt met het uitgezette systeem echter nauwelijks te besparen op warmte omdat daar minder warmte-overschot is dan bij bijvoorbeeld vleesvarkens [Mouwen en van Brakel, 1995].

Grondbuisventilatie in de glastuinbouw wordt in de praktijk toegepast door de Poolse ondernemer A. Walczak (Pools octrooi aanvraag PL20100390245). Schematisch ziet dit Poolse systeem er als volgt uit (zie Figuur 1.): De lucht wordt boven in de kas in een grondbuis geblazen die $\pm 1,5$ meter onder maaiveld ligt. In deze buis wordt energie uitgewisseld met de bodem. Nadat de lucht de buis is gepasseerd, wordt deze door een slang onder het gewas geblazen en verdeeld. Overdag, als warme lucht door de buis gaat, warmt de bodem op. In de nacht, als de kas kouder is dan de bodem, kan de lucht warmte opnemen.

De hierboven genoemde systemen maken gebruik van de seizoensbuffering van de grond, waarbij buitenlucht wordt aangezogen. In het "Poolse systeem" wordt de grond gebruikt als dagbuffer waardoor kaslucht wordt geblazen.



Figuur 1. 'Pools systeem' waarbij kaslucht van bovenuit de kas via de grondbuis onder in het gewas wordt geblazen.

Verscheidene uitvoeringen van warmtebuffering in de bodem onder kassen zijn onderzocht in Zwitserland [Hollmuller, 2002]. Hieronder was ook een grondbuisventilatiesysteem met op iedere 30 cm 11 meter lange PVC buizen van 16 cm diameter op 80 cm diepte. Het gebruikte luchtdebiet was ongeveer $60 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$ en er kon in $160 \text{ MJ}/\text{m}^2$ per jaar mee worden verwarmd. Dit komt neer op ongeveer $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{jaar}$ aan aardgasequivalenten, waarbij de ventilatoren een COP van 5,8 realiseerden (voor iedere kWh elektriciteit werd dus 5,8 kWh warmte benut).

Ook in een Noord-Chinees ontwerp wordt gebruik gemaakt van grondbuisventilatie met dagbuffering [Nan *et al.* 1994]. Hierbij zijn bakstenen tunnels met binnenmaten van 0,12 bij 0,14 m en een onderlinge afstand van 0,5 meter in de grond gegraven. Het warmteoverdragend oppervlak van de tunnels was hiermee bijna gelijk aan het grondoppervlak waar het tunnelsysteem was ingegraven. Door deze tunnels van 24 meter lang werd lucht geblazen met een debiet van $27 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$. De ventilator werd daarbij geregeld op het temperatuurverschil tussen grond en kaslucht. Bij een kastemperatuur tussen 15 en 18 °C ging de ventilator uit.

Het systeem biedt economische voordelen omdat het teeltseizoen er 30 dagen mee kan worden verlengd ten opzichte van een niet-gestookte kas.

2.2 Ontwerp

Bij het ontwerp van een grondbuisventilatiesysteem wordt eerst gekeken wat de potentie is van grondbuisventilatie.

1. Hoeveel warmte/koude kan in de bodem worden opgeslagen/gebufferd?
2. Welke capaciteit is nodig om het kasklimaat te regelen en welk aandeel moet de grondbuisventilatie daarin hebben?
3. Hoe kan dit systeem worden geoptimaliseerd voor wat betreft capaciteit, elektriciteitskosten en investeringen?

De potentie van de buffering van de grond kan worden vergroot door de opgeslagen warmte in de bodem te gebruiken om aangezogen buitenlucht in plaats van kaslucht op te warmen. Deze opgewarmde buitenlucht kan dan worden gebruikt om de kaslucht te ontvochtigen.

2.2.1 Warmte-opslagcapaciteit

Voor de lange termijn (seizoensbuffering) is voor de glastuinbouw zoveel warmte nodig dat ook een groot bodemvolume nodig is. Daarom worden voor seizoensbuffering meestal aquifers toegepast, die vaak tientallen meters dik zijn. Voor korte termijn opslag (dagbuffering) hoeft alleen de bovenste bodemlaag en liefst ook het grondwater te worden gebruikt.

De warmte-opslagcapaciteit van de bodem is afhankelijk van:

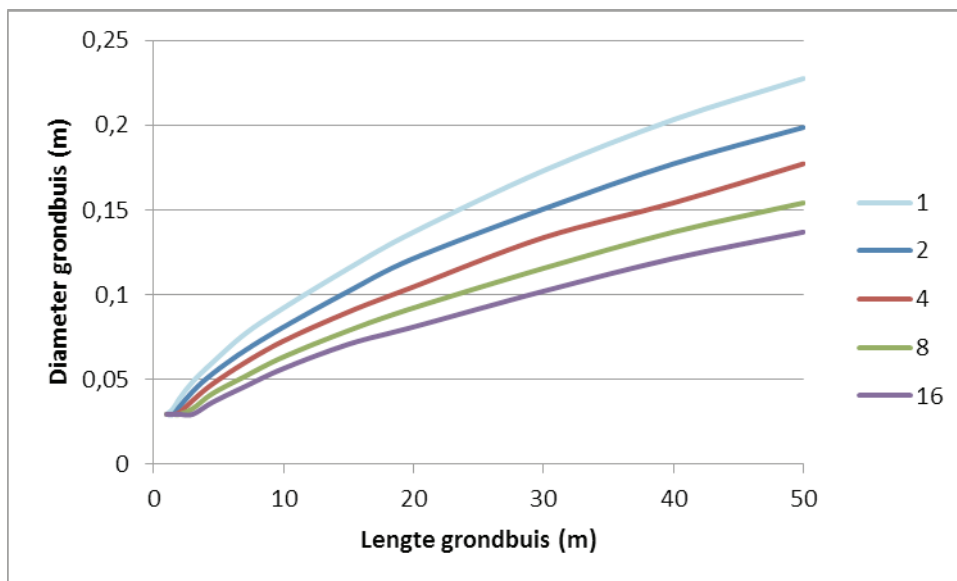
- het volume van de bodem dat warmte kan bufferen (m^3)
- de gemiddelde temperatuurverandering tijdens het bufferen ($^{\circ}\text{C}$)
- de soortelijke warmte (warmtecapaciteit) van de bodem ($\text{J}/\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$).

De soortelijke warmte van de bodem wordt grotendeels bepaald door de vochtigheid. Droge grond heeft een soortelijke warmte van 1 tot 1,6 MJ/m³.°C. Water heeft een soortelijke warmte van 4,2 MJ/m³.°C. Onder de grondwaterstand heeft grond een soortelijke warmte van 2,5 tot 3,0 MJ/m³.°C.

Stel dat een bodemlaag van een meter dikte in een etmaal gemiddeld 1 °C in temperatuur kan fluctueren. Dan is de warmteopslagcapaciteit van de bodem 2,5 tot 3 MJ per m² grond. Dit is bijna 0,1 m³/m² aardgasequivalenten, wat gedurende 12 uur neerkomt op 71 W/m². Dit is vaak voldoende om een geschermd kas een nacht lang van warmte te voorzien.

2.2.2 Elektriciteitsverbruik ventilatoren

Glastuinbouwbedrijven die buitenlucht inblazen gebruiken vaak een luchtdebiet van 4 tot 8 m³/m².uur. In de volgende berekeningen wordt uitgegaan van een luchtverplaatsing van 4 m³/m².uur door de grondbuizen. In het Poolse bedrijf zijn grondbuizen aangelegd van 50 meter lang, met een diameter van 0,15 meter, op een onderlinge afstand van 1,60 meter. Om 4 m³/m².uur te realiseren is in de buis een lichtsnelheid van 5 m/s. Dit geeft een luchtweerstand van minstens 460 Pa (Kwadratische weerstandswet), wat bij continu vollast op jaarbasis een elektriciteitsverbruik betekent van bijna 9 kWh/m². Indien de grondbuis gesplitst zou zijn in twee buizen van 25 meter lengte, zou het elektriciteitsverbruik neerkomen op 1,5 kWh/m². Dit blijkt uit Figuur 2. waarin een schatting is gegeven bij welke grondbuislengte en -diameter de elektriciteitskosten per jaar oplopen naar 1, 2, 4, 8 of 16 kWh/m². Hierbij is uitgegaan van een continu debiet van 4 m³/m².uur bij een onderlinge grondbuisafstand van 1,6 meter. In de praktijk zal de ventilator niet continu draaien, maar minder dan de helft van de tijd. Als de kasluchttemperatuur vrijwel gelijk is aan de grondtemperatuur, is de warmte-overdracht te gering om hiervoor ventilatoren te laten draaien.



Figuur 2. Diameter grondbuis afhankelijk van de grondbuislengte, indien de ventilatoren bij voltijds draaien een elektriciteitsverbruik hebben van 1, 2, 4, 8 en 16 kWh/m².jaar, bij een onderlinge afstand van 1,6 meter en luchtdebiet van 4 m³/m².uur.

Hoe langer de grondbuis is, hoe groter de diameter moet worden. Een lange grondbuis moet immers de lucht sneller verplaatsen dan twee korte grondbuizen om tot hetzelfde debiet per m² te komen. Om de elektriciteitskosten beperkt te houden is daarom een grotere buisdiameter nodig.

Het nadeel van veel korte grondbuizen is de distributie van lucht vanuit de ventilator. Het is namelijk te duur om bijvoorbeeld iedere grondbuis van 1 meter van een eigen ventilatorpje te voorzien. Een alternatief is het gebruik van een distributieleiding die vanuit een ventilator meerdere grondbuizen van lucht voorziet. Met een distributieleiding bestaat wel het risico dat de bochten voor te veel luchtweerstand zorgen.

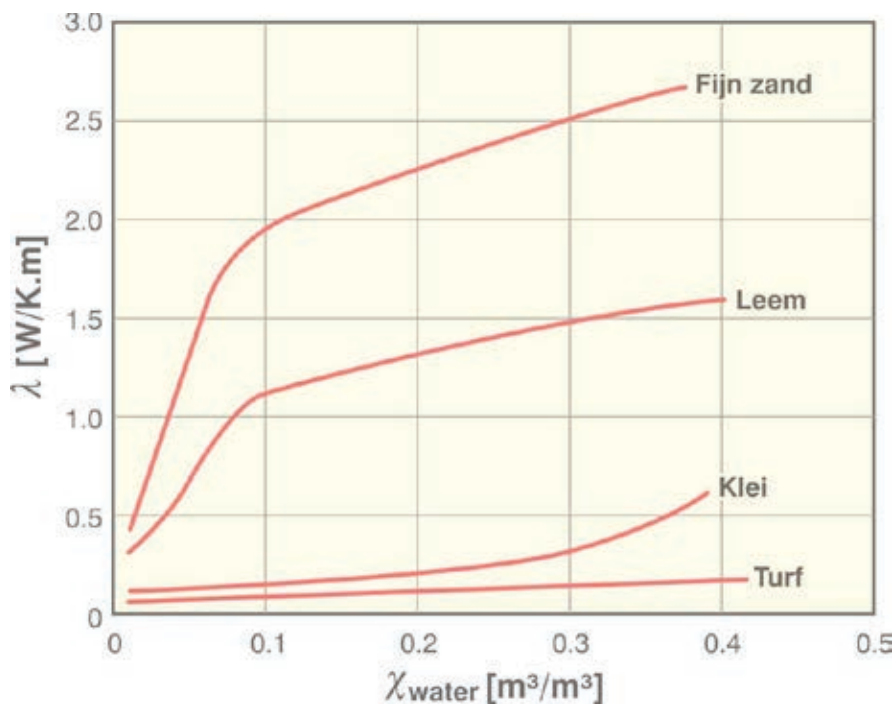
2.2.3 Warmte-overdracht (1 uur)

De snelheid van de warmte-overdracht is afhankelijk van

- het warmte-overdragend oppervlak
- de geleidbaarheid van de grondbuis
- de geleidbaarheid van de grond
- de thermische grenslaag-geleidbaarheid in de grondbuizen
- het temperatuurverschil tussen de kaslucht en de grond
- de luchtvochtigheid van de kaslucht (bij opwarmen van de bodem)

De geleidbaarheid van de grondbuis, wordt bepaald door de dikte en het gebruikte materiaal. PVC en PP hebben een geleidbaarheid van ongeveer $0,15 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$. Bij een wanddikte van 3 mm heeft het een licht isolerende eigenschap. Een materiaal dat beter geleidt (bijv. metaal) kan de warmte-overdracht verhogen met ongeveer 5%.

De geleidbaarheid van de grond is afhankelijk van de samenstelling en de vochtigheid (zie Figuur 3.). Zand geleidt beter dan klei en vochtige grond geleidt beter dan droge grond. In onderstaand rekenvoorbeeld wordt uitgegaan van een geleidbaarheid van $2 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$, wat overeenkomt met een mengsel van zand, leem en klei met een hoog vochtgehalte (onder de grondwaterstand). Bij meer kleiige en venige gronden zullen de prestaties minder groot zijn. Stilstaand water heeft overigens een warmtegeleidingscoëfficiënt van $0,6 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$. Dit is minder dan vochtig zand.



Figuur 3. Thermische geleidbaarheid van grond (λ in $\text{W/m}\cdot\text{°C}$) als functie van het watergehalte (m^3 water per m^3 grond) bij turf, klei, leem en fijn zand [Musy en Soutter, 1991].

De thermische grenslaag-geleidbaarheid bij de grondbuizen is met name afhankelijk van de luchtsnelheid door de buizen. Bij een buisdiameter van 15 cm en een luchtsnelheid van 5 m/s is deze geschat op 20 W/m².°C. Bij een twee keer zo hoge luchtsnelheid is de grenslaag-geleidbaarheid 1,7 keer zo hoog.

Rekenvoorbeeld

Kasluchttemperatuur:	25 °C
KasRV:	85%
Grondtemperatuur:	15 °C
Grondbuis wand:	3 mm PP
Geleidbaarheid grond:	2,0 W/m.°C.
Grondbuislengte:	50 m
Grondbuisdiameter:	0,15 m
Luchtsnelheid:	5 m/s.

Na 1 uur heeft de lucht aan het einde van de buis een temperatuur van 16,4 °C en is 5,6 g/m³ lucht gecondenseerd. De grond is hiermee in dat uur met 8500 kJ opgewarmd. Voor een grondbuis per 1,6*50 meter is dat 8500/(1.6*50*3,6)=30 W/m². De warmte-overdracht van warme grond (bijv. 25 °C) naar koude kaslucht (bijv. 15 °C) is veel minder groot (± 14 W/m²) omdat er geen condensatiewarmte bij komt kijken. Met een verwarmend vermogen van 14 W/m² kan een kas van 15 °C met een dubbel scherm bij een buitentemperatuur van 0 °C voor ongeveer 30% van warmte voorzien. Dit is gering, gezien het in dit voorbeeld gestelde grote temperatuurverschil tussen de bodem en kaslucht van 10 °C. Dit temperatuurverschil zal in de praktijk slechts zeer zelden voorkomen.

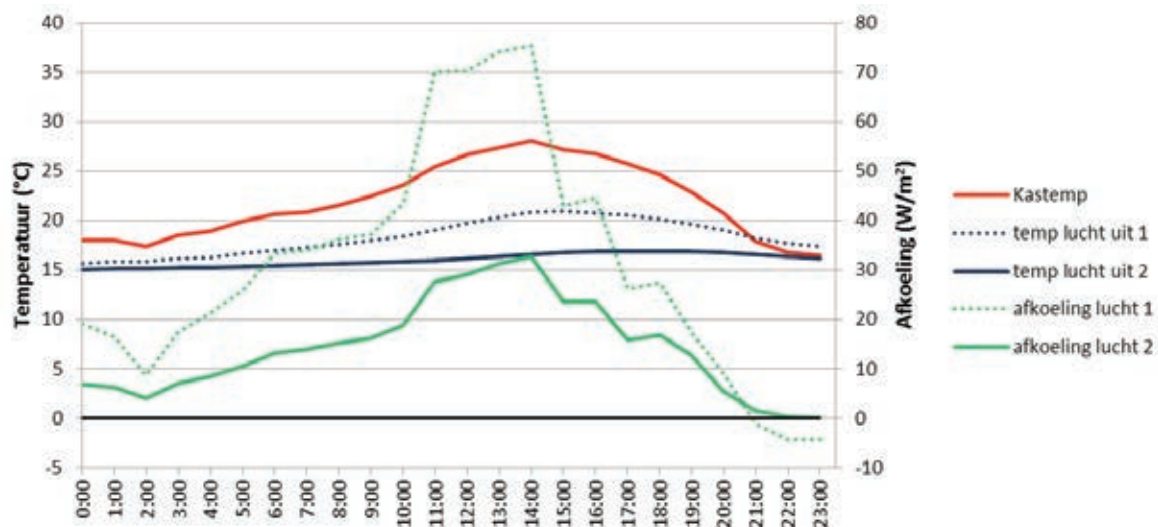
Verbetering van de warmte-overdracht kan worden gerealiseerd door meer lucht door de grondbuizen te blazen. Door bijvoorbeeld twee keer zo hard te blazen stijgt de opwarming van de kaslucht van 14 W/m² tot 24 W/m² kas. Als daarbij de buisdiameter worden vergroot van 15 tot 20 cm kan de warmte-overdracht zelfs 34 W/m² kas worden. Het elektriciteitsverbruik zal dan nog 70% hoger zijn dan in het hierboven geschetste voorbeeld (15 i.p.v. 9 kWh/m².jaar).

Met name tijdens het verwarmen van de kaslucht vanuit de bodem is het van belang om de luchtsnelheid van de lucht te verhogen. Tijdens het afkoelen van de kaslucht is een minder hoge luchtsnelheid nodig omdat dan de lucht in de grondbuis meer tijd heeft om af te koelen en er dus meer kan condenseren.

2.2.4 Warmte-overdracht (1 etmaal)

Om na te gaan hoe de effectiviteit van de grondbuis verloopt over een etmaal, zijn hiervan twee simulaties gemaakt (zie Figuur 4.). Simulatie 1 gaat uit van 15 cm buizen en een luchtsnelheid van 5 m/s en simulatie 2 gaat uit van 20 cm buizen en een luchtsnelheid van 10 m/s. Het debiet in simulatie 2 is daarmee ongeveer 3,5 keer zo hoog als in simulatie 1.

Bij beide simulaties is ervan uitgegaan dat op 0:00 uur de bodemtemperatuur gelijk is aan 15 °C. Deze grondtemperatuur wordt direct opgewarmd door de kaslucht omdat deze luchttemperatuur hoger is dan 15 °C. De grootste opwarming van de bodem vindt plaats tussen 10:00 en 18:00 uur. Als de kastemperatuur daarna daalt, duurt het nog tot 21:00 uur voordat de bodem warmer is dan de kaslucht en dus warmte afgeeft.

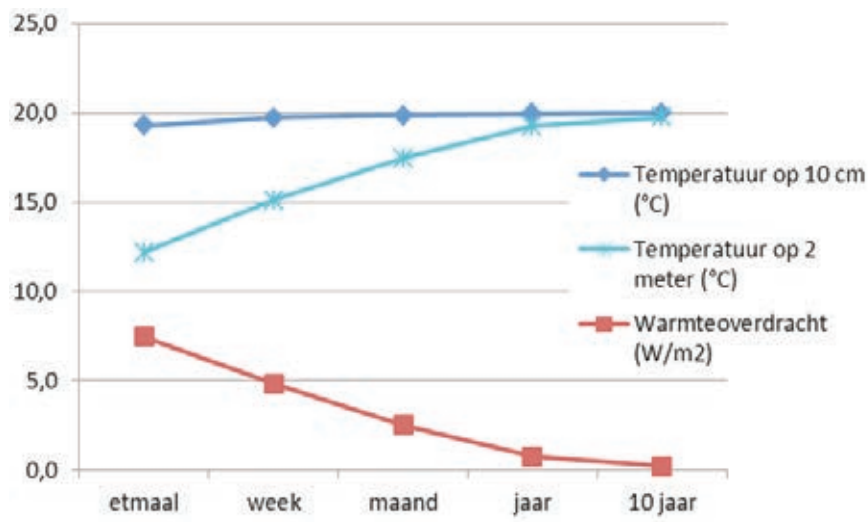


Figuur 4. Warmte-overdracht (W/m^2) en luchttemperatuur uit de grondbuis ($^{\circ}C$) gedurende een etmaal, bij een aanvangstemperatuur van $15^{\circ}C$, bij normale grondbuizen (15 cm) met 5 m/s luchtsnelheid (simulatie 1) en extra grote grondbuizen (20 cm) met 10 m/s luchtsnelheid (simulatie 2).

Per saldo heeft de bodem in dit etmaal veel meer warmte opgenomen dan afgegeven. Dit is deels veroorzaakt doordat warmteopname door de bodem wordt versneld door condensatie van de kaslucht, maar vooral doordat de gemiddelde kastemperatuur veel hoger ligt dan de gestelde bodemtemperatuur van $15^{\circ}C$. Bij een hogere aanvangsbodemtemperatuur van bijvoorbeeld $20^{\circ}C$ zou de verhouding tussen warmte-opname en warmte-afgifte tussen kaslucht en bodem veel meer in balans zijn.

Of een bodemtemperatuur van $20^{\circ}C$ ooit gehaald gaat worden bij een standaard tomatenteelt kan worden geschat met een rekenmodel, dat rekening houdt met het warmteverlies naar de diepere grondlagen. In Figuur 1. is aangegeven dat als de bodem bij aanvang van de teelt een constante temperatuur heeft van $12^{\circ}C$, deze bij 0,1 meter diepte al opwarmt tot $\pm 19^{\circ}C$ nadat het maaiveld¹ een etmaal lang op een temperatuur van $20^{\circ}C$ is gehouden. Op 2 meter diepte is er dan nog nauwelijks opwarming plaatsgevonden. Na een maand is de temperatuur op 0,1 meter diepte bij met een maaiveldtemperatuur van $20^{\circ}C$ opgewarmd tot $19,9^{\circ}C$. Op 2 meter diepte is het dan $17,4^{\circ}C$ en de warmteoverdracht tussen deze twee lagen is dan gedaald tot $2,6 W/m^2$. Na een jaar is het temperatuurverschil en het warmteverlies naar de diepere bodemlagen nog maar klein. Dit geeft aan dat, indien de thermische geleiding tussen van kaslucht en grondbuis zeer hoog is, de invloed van de aanvangstemperatuur van de bodem al binnen een jaar te verwaarlozen is.

¹ De temperatuur van het maaiveld is niet hetzelfde als de kastemperatuur. Vooral bij geringe luchtsnelheid is de thermische weerstand tussen kaslucht en maaiveld zo groot dat er grote temperatuurverschillen kunnen blijven.

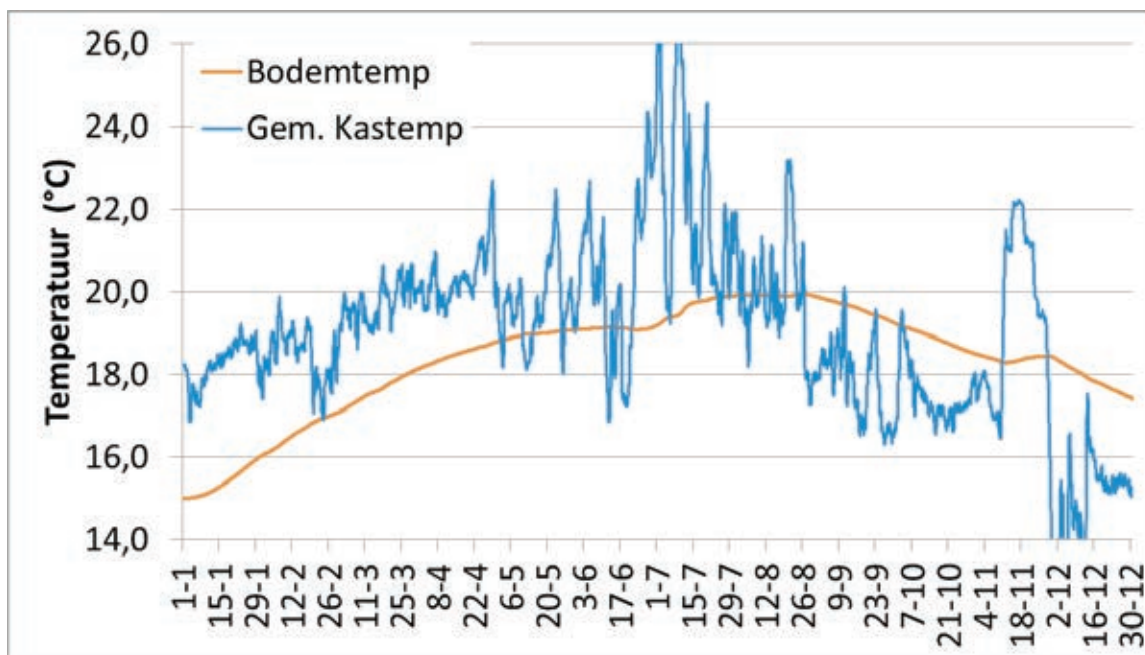


Figuur 5. Temperatuur (°C) op 0,1 en 2 meter diepte en warmteoverdracht (W/m²), nadat gedurende een etmaal, een week, een maand, een jaar en 10 jaar een constante maaiveldtemperatuur van 20 °C is aangehouden bij aanvangsbodemtemperatuur van 12 °C.

De thermische geleiding van de grenslaag op 1 cm van de binnenwand van de grondbuis is echter juist veel lager dan de thermische geleiding van 1 cm bodem. De thermische geleiding van de grenslaag kan worden verbeterd door meer luchtbeweging in de grondbuis en/of het grenslaagoppervlak te vergroten. Het grenslaagoppervlak kan worden vergroot door het gebruik van grotere buizen, meer buizen en/of het gebruik van vinnen in de binnenwand van de buis.

2.2.5 Warmte-overdracht (1 jaar)

Van een Nederlands onbelicht tomatenbedrijf is gedurende bijna 1 jaar gerekend met de urregegevens voor wat betreft de kasttemperatuur en de kasRV. Door uit te gaan van een aanvangsbodemtemperatuur van 15 °C (1 januari) en een grondbuizensysteem met dezelfde eigenschappen als in paragraaf 2.2.3 is berekend hoe de bodemtemperatuur zich ontwikkelt als het systeem continu blijft draaien. In Figuur 6. blijkt dat de bodemtemperatuur (op 0,65 meter afstand van de grondbuis) de kasttemperatuur vertraagd volgt. In de winter en het voorjaar loopt de bodemtemperatuur steeds langzamer op. Als vervolgens in juli een gemiddeld hoge kasttemperatuur wordt gerealiseerd, stijgt de bodemtemperatuur iets sneller. In augustus blijft de bodemtemperatuur stabiel en daarna wordt steeds meer warmte afgegeven aan de kaslucht en koelt de bodem af. Aan het einde van de teelt wordt een hogere kasttemperatuur aangehouden om de hangende vruchten sneller af te laten rijpen. Hiermee warmt de bodem enigszins op. Als in december de teeltwisseling plaatsvindt wordt een lage temperatuur in de kas gehouden. De bodem kan dan warmte afgeven aan de kaslucht en koelt weer af.



Figuur 6. Verloop van de kasttemperatuur (etmaal) en de bodemtemperatuur op een straal van 0,7 m van het hart van de grondbuis bij een aanvangsbodemtemperatuur van 15 °C.

Per saldo is in de periode 2,8 m³/m² ae aan warmte aan de bodem afgegeven en 1,7 m³/m² ae aan de bodem onttrokken. De condensatie in de buizen betreft in totaal 20 l/m². In de praktijk zullen deze getallen lager zijn, omdat de ventilatoren niet continu zullen draaien. Als de ventilatoren alleen draaien als de luchttemperatuur meer dan 2 °C kan worden afgekoeld of opgewarmd (4300 uur per jaar) dan dalen de warmte-afgifte en -opname aan en van de bodem naar respectievelijk 2,3 en 1,3 m³/m² ae per jaar. De condensatie in de grondbuis blijft dan wel nagenoeg gelijk.

Indien de aanvangstemperatuur van de bodem hoger is, dan zal de warmte-afgifte aan de bodem lager zijn en de warmte-onttrekking uit de bodem hoger. Verder dient te worden aangetekend dat het niet zinvol is om tijdens de teeltwisseling of tijdens een voornachtsverlaging², warmte aan de bodem te onttrekken. Ook is het aannemelijk dat de warmte die tijdens de winter uit de kaslucht onttrokken en aan de bodem is toegevoegd, vaak geen warmteoverschot betreft, maar een ongewenste afkoeling van de kaslucht.

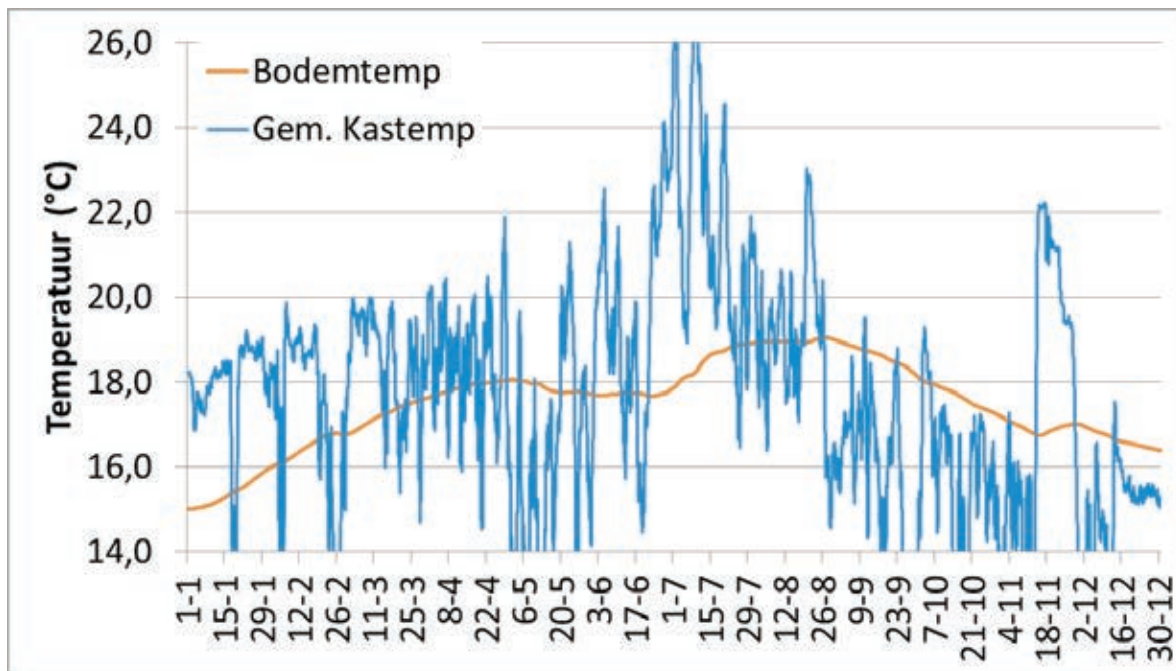
Combinatie met buitenluchtaanzuiging

Een bedrijf dat voor zijn gewas grotere verschillen tussen dag- en nachttemperatuur kan aanhouden, zal meer profijt hebben bij een grondbuisventilatiesysteem. Bij een hogere dagtemperatuur kan immers meer warmte in de bodem worden opgeslagen en bij een lage nachttemperatuur kan meer warmte uit de bodem worden onttrokken. Ook kan de opgeslagen warmte in de bodem beter worden benut door droge buitenlucht op te warmen voordat deze in de kas wordt geblazen. In Figuur 7. is dezelfde berekening weergegeven als in Figuur 6, maar dan als de ingeblazen kaslucht wordt vervangen door buitenlucht als aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- de kasRV is hoger dan 80%
- de kastemperatuur is hoger dan 22 °C
- de buitentemperatuur is hoger dan 5 °C

2 Een voornachtsverlaging is het tijdelijk sterk laten dalen van de kasttemperatuur in de avond door de ramen te openen en de buistemperatuur te verlagen. Tijdens de ze actie is opwarming van de kaslucht vanuit de grondbuizen niet gewenst.

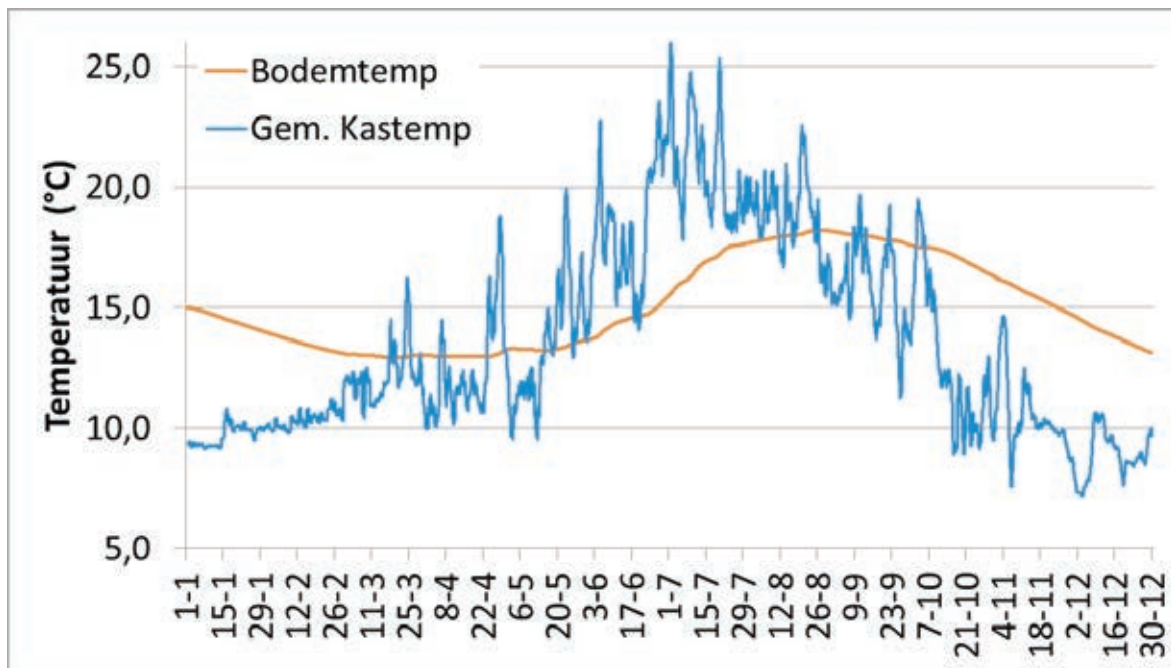
Als de ventilatoren dan alleen draaien als de ingeblazen lucht met meer dan 2 °C kan worden afgekoeld of opgewarmd (5300 uur) dan wordt hiermee 3,2 m³/m² ae warmte aan de bodem afgegeven en 2,4 m³/m² ae aan de bodem onttrokken. Er condenseert dan 30 l/m² vocht in de grondbuizen. Hiermee verbetert de prestatie van het systeem met ±50% ten opzichte van een systeem zonder buitenluchtaanzuiging, dus met alleen kasluchtaanzuiging.



Figuur 7. Verloop van de temperatuur (etmaal) van de ingeblazen lucht (kaslucht en buitenlucht) en de bodemtemperatuur op een straal van 0,7 m van het hart van de grondbuis bij een aanvangsbodemtemperatuur van 15 °C.

Warmte-extensieve teelten

Ook voor een teelt met een lage temperatuur (bladgewassen) is berekend hoeveel warmte kan worden opgeslagen en weer benut. Het verloop van de bodemtemperatuur is weergegeven in Figuur 8. Als de ventilatoren alleen draaien als de ingeblazen lucht met meer dan 2 °C kan worden afgekoeld of opgewarmd (3900 uur) dan wordt hiermee 2,6 m³/m² ae warmte aan de bodem afgegeven en 2,3 m³/m² ae aan de bodem onttrokken. De warmte-opslag en benutting zijn hiermee bij een warmte-extensieve teelt beter in balans dan een warmte-intensieve teelt. De totale warmte-overdracht is ook hoger. De implementatie van een grondbuizensysteem zal echter bij een grondteelt zoals sla meer 'voeten in de aarde' geven dan bij een gotenteelt als tomaat, omdat de distributie van de afgekoelde of opgewarmde lucht tussen het gewas moeilijker is te realiseren.



Figuur 8. Verloop van de temperatuur (etmaal) van de ingeblazen kaslucht en de bodemtemperatuur op een straal van 0,7 m van het hart van de grondbuis bij een aanvangsbodemtemperatuur van 15 °C, bij een teelt met bladgewassen (sla).

2.3 Overige ontwerpisen

Naast de hierboven genoemde afweging tussen enerzijds een hoge warmte-overdracht en anderzijds een beperkte hoeveelheid materiaal en ventilatie-energie, zijn er nog meer factoren waarmee bij het ontwerp rekening moet worden gehouden. Zo is het nodig om een afvoer te regelen voor condenswater. De grondbuizen zullen daarom enigszins af moet lopen in de stroomrichting van de afkoelende lucht. Ook dient het materiaal van de grondbuizen stevig en flexibel te zijn. Hiervoor wordt polypropyleen (PP) geadviseerd [Marivoet, 2008].

2.4 Discussies

2.4.1 Positief effect van ontvochtiging

In dit hoofdstuk is voornamelijk ingegaan op de mogelijke energiebesparing door buffering van warmte in de grond. Daarnaast kan ook energie worden bespaard door de ontvochtiging van de kaslucht. Tijdens het afkoelen van de lucht condenseert er immers vocht uit de kaslucht. Hierdoor kunnen schermen en luchtramen iets langer dicht blijven en blijft CO₂ in de kas op een hoger niveau. Het is echter de vraag of de capaciteit van het grondbuisventilatiesysteem voldoende is om de ontvochtiging in de kas zo nauwkeurig te regelen dat dit scherm- en raamkieren even goed kan beperken als systemen met buitenlucht. Kaslucht die door grondbuizen wordt geleid, kan immers niet veel verder afkoelen dan tot ±15 °C. Het is vele malen effectiever om met droge koele buitenlucht te ontvochtigen dan met deze licht gekoelde en verzadigde lucht uit de grondbuizen.

2.4.2 Bevorderen warmte-overdracht

Een grondlaag van 1 meter dik lijkt ruim voldoende te zijn om op etmaalbasis warmte te bufferen. De snelheid waarmee deze warmte wordt uitgewisseld tussen grondbuiswand en kaslucht lijkt het belangrijkste knelpunt om voldoende energie te kunnen besparen met een grondbuizensysteem. Deze snelheid wordt bevorderd door:

- een groot verschil tussen dag en nachttemperatuur in de kas
- een groot contactoppervlak tussen kaslucht en grondbuizen
- een grote luchtsnelheid langs de buiswand.

Gezien het hoge elektriciteitsverbruik van het doorgerekende systeem ligt het niet voor de hand om de luchtsnelheid te verhogen en het contactoppervlak te vergroten. Deze acties zullen namelijk leiden tot nog meer elektriciteitsverbruik. Het tolereren van een groter verschil tussen dag- en nachttemperatuur is op zich al een besparingsoptie en zal bovendien niet voor alle gewassen zijn weggelegd. In gebieden met een landklimaat komen grotere dag/nacht verschillen al van nature voor en kan het bufferen van warmte in de grond meer effect geven.

2.4.3 Beperking elektriciteitsverbruik

Zoals gemeld in paragraaf 2.2.2, kan het elektriciteitsverbruik sterk worden verlaagd door gebruik te maken van kortere grondbuizen. Om de investering in ventilatoren niet te hoog op te laten lopen, zou hierbij gebruik kunnen worden gemaakt van een distributiekanaal waarop meerdere korte buizen worden aangesloten. Voor dit onderzoek reikt het te ver om de buislengte en aantal splitsingen per ventilator zodanig op elkaar af te stemmen dat een optimum wordt gevonden tussen investeringskosten en elektriciteitsverbruik.

2.4.4 Investeringsruimte

Een grondbuissysteem gecombineerd met buitenluchtaanzuiging, dat $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$.jaar aan aardgas à $0,25 \text{ €/m}^3$ bespaart en 1 kWh/m^2 .jaar aan elektriciteit à $0,05 \text{ €/kWh}$ kost, bespaart jaarlijks $0,45 \text{ €/m}^2$. Uitgaande van een afschrijvingstermijn van 10 jaar, 1% onderhoudskosten en 5% rente is de investeringsruimte $3,25 \text{ €/m}^2$. Dit is waarschijnlijk minder dan het systeem zal kosten, dus er zullen ook andere voordelen (bijvoorbeeld een teeltvoordeel door ontvochtiging of besparing op CO_2) moeten worden verkregen voor een rendabele investering.

Bij koude teelten heeft de warmte die vrijkomt bij grondbuisventilatie een groter aandeel in de warmtevoorziening. Hierdoor kan bij koude teelten meer worden bespaard op de aardgascapaciteit. Hierdoor ontstaat meer investeringsruimte voor grondbuisventilatie.

3 Conclusies en aanbevelingen

3.1 Conclusies

Met grondbuisventilatie kan de bodem overdag worden opgewarmd met warme en vochtige kaslucht, waarna deze warmte 's nachts kan worden vrijgegeven voor de verwarming van de kas. Door gebruik te maken van rekenmodellen is berekend hoeveel warmte kan worden gebufferd in de grond om op koude momenten tot energiebesparing te komen.

Door een bodemlaag van 1 meter dikte 's nachts met 1 °C af te koelen komt voldoende warmte vrij om een geschermd kas vrijwel iedere nacht op temperatuur te houden. Voor de opwarming/afkoeling van 1 meter dikke bodemlaag met 1 °C zijn grote dag/nacht temperatuurverschillen en een groot warmte-overdragend oppervlak nodig. Naast een groot warmte-overdragend oppervlak bepaalt de thermische geleiding van de bodem de effectiviteit van de grondbuizen. Fijn zand geeft een veel snellere warmte-overdracht dan klei of turf. Natte grond geeft een betere geleiding dan droge grond.

Als bij een standaard onbelichte Nederlandse tomatenteelt iedere 1,60 meter een grondbuis van 15 cm diameter wordt geplaatst, waardoor 5 m/s (=4 m³/m².uur) lucht wordt geblazen, dan zal dit op jaarbasis ±1,3 m³/m² aardgasequivalenten aan warmte opleveren. Het voldoet daarmee niet aan de energiedoelstelling van 3 m³/m². jaar. Er wordt verder 20 l/m² vocht uit de kaslucht gecondenseerd. Als de ventilator de helft van de tijd kan worden afgeschakeld dan wordt het elektriciteitsverbruik, bij een grondbuis van 50 meter lang, geschat op 4 kWh/m². Bij gebruik van grondbuizen van 25 meter lang, is het elektriciteitsverbruik minder dan 1 kWh/m². Door bij een tomatenteelt met de grondbuisventilatie droge buitenlucht voor te verwarmen, kan de warmteafgifte vanuit de bodem met minstens 50% worden vergroot.

Bij een warmte-extensieve teelt, zoals de meeste bladgewassen, kan meer warmte worden gebufferd en benut. Bovendien heeft de vrijkomende warmte bij een warmte-extensieve teelt vaak een hogere economische waarde doordat meer kan worden bespaard op de contractcapaciteit van aardgas.

Aangezien de aanvangstemperatuur van de bodem vaak lager is dan de gemiddelde kastemperatuur, zal het enkele jaren duren voordat een grondbuisventilatiesysteem even veel warmte kan leveren aan als opnemen uit de kaslucht.

Condensatie van vocht uit de kaslucht versnelt de warmte-afgifte aan de grondbuizen. Bij afkoeling van kaslucht wordt daardoor sneller warmte overgedragen dan bij opwarming van kaslucht.

3.2 Aanbevelingen

Hoewel het doorgerekende grondbuissysteem (50 meter lengte, 0,15 m diameter) voor veel Nederlandse teelten onvoldoende energie bespaart en te veel elektriciteit kost om rendabel te kunnen zijn, is het denkbaar dat een systeem met een groter wandoppervlak en kortere buizen wel rendabel is. Voor een optimalisatie hiervan zal in overleg met leveranciers en installateurs een geavanceerder model moeten worden ontwikkeld.

4 Referenties

Hollmuller, P. (2002)

Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique, Université de Genève, Genève.

van 't Klooster, C.E. (1987a)

Ervaringen met grondbuisventilatie in een kraamafdeling = Experiences with earth-tube air inlet systems in farrowing houses. Proefverslag / Varkensproefbedrijf "Zuid- en West-Nederland";nr. P1.19. Varkensproefbedrijf "Zuid- en West-Nederland". Sterksel.

van 't Klooster, C.E. (1987b)

Grondbuisventilatie biedt mogelijkheden. Praktijkonderzoek varkenshouderij 1, 6, p. 22-24.

Marivoet, B. (2008)

De bodem-lucht warmtewisselaar: dimensionering en verificatie, pp. 77, Xios Hogeschool Limburg, Hasselt. pp. 77.

Mouwen, I., en van Brakel, C. (1995)

Grondbuisventilatie. Praktijkonderzoek varkenshouderij 9, 4, p. 16-17.

Musy, A., en Soutter, M. (1991)

Physique du sol. Lausanne.

Nan, L., Best, G., en de Carvalho Neto, C. (1994)

Integrated energy systems in China - The cold Northeastern region experience, pp. 414, Rome. pp. 414.

<http://www.cobouw.nl/nieuws/w-installatie/2011/08/12/grondbuisventilatie-werkt-boven-verwachting>

<http://www.varkensinnovatiecentrum.wur.nl/NR/rdonlyres/FCA89CEE-3602-4E1E-964E-A4D5CA9D97DD/911117/leafletopslagmedium.pdf>

<http://www.zehnder-jestorkair.nl/assets/Media-artikelen/VV+-mei-2012.pdf>

