

Rapport.

Beknopte literatuurstudie invloed bodem op kasklimaat bij energie-arme teelten

Arnhem, 15 juni 2009

50964026-PGR/PGM 12-4583

**Beknopte literatuurstudie invloed bodem
op kasklimaat bij energiearme teelten**

Arnhem, 15 juni 2009

Auteur J.A.F. de Ruijter

In opdracht van Productschap Tuinbouw en Ministerie van Economische Zaken, Landbouw
en Innovatie



Ministerie van Economische Zaken,
Landbouw en Innovatie

auteur : J.A.F. de Ruijter
B 14 blz. - bijl.

12-05
MvD

A blue ink signature, likely of the author J.A.F. de Ruijter, written in a cursive style.

beoordeeld : A. Groenevelt
goedgekeurd : F.J.J.M. van Aart

A blue ink signature, likely of A. Groenevelt, written in a cursive style.

12-05-15
12-05-15



Dit rapport is mede mogelijk gemaakt door subsidieverlening door het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie in het kader van het programma Kas als Energiebron (PT-projectnummer 13497).



Ministerie van Economische Zaken,
Landbouw en Innovatie



© KEMA Nederland B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Het is verboden om dit document op enige manier te wijzigen, het opsplitsen in delen daarbij inbegrepen. In geval van afwijkingen tussen een elektronische versie (bijv. een PDF bestand) en de originele door KEMA verstrekte papieren versie, prevaleert laatstgenoemde.

KEMA Nederland B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, toekomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

De inhoud van dit rapport mag slechts als één geheel aan derden kenbaar worden gemaakt, voorzien van bovengenoemde aanduidingen met betrekking tot auteursrechten, aansprakelijkheid, aanpassingen en rechtsgeldigheid.

INHOUD

blz.

1	Inleiding	4
2	Beknopte literatuurstudie.....	4
2.1	Energiearme teelten.....	4
2.2	Literatuurstudie “invloed bodem op kasklimaat”	5
2.2.1	Bodemtemperatuur vs. luchttemperatuur	5
2.2.2	Opwarming van de bodem / warmteflux in de bodem.....	6
2.2.3	Modellering van nachtelijke energiestromen in een onverwarmde kas	9
2.2.4	Invloed van schermen op stralingstransport	10
2.2.5	Ligging van verwarmingssysteem	11
2.3	Verdere stappen in studie	12
	LITERATUUR.....	14

1 INLEIDING

In dit verslag worden de resultaten gegeven van de (beperkte) literatuurstudie, die is uitgevoerd ten behoeve van het project "Quickscan invloed van bodem op kasklimaat bij energie-extensieve teelten. Potentie voor energiebesparing".

2 BEKNOPTE LITERATUURSTUDIE

2.1 Energiearme teelten

Uit [1] komt bijvoorbeeld radijs naar voren als een energiearme teelt. In 1998 was het areaal radijs circa 158 ha. en in 2002 circa 146 ha. (KWIN, 2003-2004, [10]). Voor de setpoints van de kastemperatuur worden in [1] de volgende waarden gegeven: 12 °C overdag en 8 °C 's nachts (jaarrond). Het verwachte brandstofverbruik bij toepassing van een gasgestookte ketel is circa 5.4 m³/m² gas per jaar. Er is alleen (significant) gasverbruik in de maanden november tot en met maart (en een heel klein beetje in april en oktober). Er is er vanuit gegaan dat er wordt gestookt met een ketel zonder rookgascondensor en dat er geen warmtebuffer en scherm wordt toegepast. Overigens geeft KWIN 2003-2004 in de saldobegrotingen voor (jaarrond) radijs een ongeveer dubbel zo groot gasverbruik, namelijk 10.6 m³/m².

Verder kan ook de slateelt als energiearme teelt worden gezien, gezien de gehanteerde relatief lage temperaturen [10]:

	Sla (krop, licht)		Sla (krop, zwaar)	
	duur	waarde	duur	waarde
temperatuur	2 weken	nacht 10 °C, dag 10 °C	1 week	nacht 10 °C, dag 10 °C
	daarna	nacht 6 °C, dag 12 °C	10 weken	nacht 6 °C, dag 12 °C
			daarna	nacht 7 °C, dag 12 °C
Gasverbruik	8.3 m ³ /m ²	plant/oogstweek: 43/3+4	9.1 m ³ /m ²	plant/oogstweek: 42/5
	10.5 m ³ /m ²	plant/oogstweek: 47/8	11.3 m ³ /m ²	plant/oogstweek: 45/8 ¹

¹ Bij deze teelt geldt: 1 week nacht 10 °C, dag 10 °C, 7 weken nacht 7 °C, dag 10 °C, daarna nacht 6 °C, dag 10 °C, 5 m pot.

In het vervolg van de studie zullen we deze teelten als referentieteelten beschouwen.

2.2 Literatuurstudie “invloed bodem op kasklimaat”

Er is een beperkte literatuurstudie uitgevoerd, gericht op de invloed van de bodem op het kasklimaat en het energieverbruik. In deze paragraaf zijn daarvan de belangrijkste resultaten gegeven. De resultaten zijn gegroepeerd per thema. In het algemeen kan gezegd worden, dat de beschikbare literatuur over dit onderwerp tamelijk schaars is.

2.2.1 Bodemtemperatuur vs. luchttemperatuur

Limiterende factoren

Verreweg de grootste hoeveelheid energie in de glastuinbouw gaat zitten in het op temperatuur houden van de kaslucht (die is opgesloten in een optisch en thermisch transparante omhulling, de kas). Canham stelt in [2] dat de efficiëntie waarmee brandstof wordt verbruikt in het verwarmen van kassen, niet alleen afhangt van de kasluchttemperatuur, maar ook van andere beperkingen die aan de groei van het gewas worden opgelegd. Experimenten met jonge tomatenplanten hebben uitgewezen dat een reductie van de luchttemperatuur van 2,2 °C kan worden gecompenseerd door het gebruik van extra kunstlicht van 2 à 3 klux (HD-natrium- licht). Ook is vastgesteld dat een reductie in de luchttemperatuur van 5.6 °C kan worden gecompenseerd, door het opwarmen van de bodem tot ca 25 °C.

Luchttemperatuur (of beter: de planttemperatuur) is slechts één van de vele factoren die de groei van de plant beïnvloeden en kan slechts efficiënt worden gebruikt als niet één van de andere factoren beperkend is. In feite is dit een herformulering van het Liebig's “Wet van het minimum”, uit 1843, die later door diverse andere onderzoekers verder is uitgewerkt, waaronder Mitscherlich in 1909. Die suggereerde, dat een toename in elke (groei)factor een toename in de groei heeft, maar dat het effect groter is, naarmate die factor het meest ontoereikend is, en dus het meest limiterend is.

Canham stelt dat in de periode dat er verwarming nodig is, meerdere factoren zijn die mogelijk limiterend zijn:

- a) licht
- b) de temperatuur van het wortelstelsel
- c) CO₂-concentratie
- d) water en nutriënten beschikbaarheid.

Canham heeft de eerste twee onderzocht en vastgesteld, dat deze twee factoren in het verwarmingsseizoen inderdaad limiterende factoren zijn, die de respons van de plant op temperatuurconditionering (door het verwarmingsysteem) beperken. Dit betekent volgens hem dat de brandstof ineffectief wordt gebruikt. De experimenten (op tomaat) wezen uit dat een toename in de bodemtemperatuur (of van het lichtniveau) kunnen compenseren voor een afname van de kasluchttemperatuur². Volgens Canham bood een verhoogde bodemtemperatuur bij een lagere luchttemperatuur de meest aantrekkelijke weg om energie te besparen bij gelijkblijvende groei. Daarvoor is het wel nodig dat de bodemverwarming efficiënt gebeurt (en voor de bedrijfseconomie dat de kosten daarvan beperkt blijven). In deze (beperkte) literatuurstudie is niet nagegaan of Canham's ideeën verder zijn uitgewerkt en of deze strategie in de praktijk ook is (c.q. wordt) toegepast. Bodemverwarming zou bijvoorbeeld kunnen met een (extra) rookgaskoeler, waarbij de rookgassen met lage-temperatuur water (bijvoorbeeld retour kas 25 °C, aanvoer 40 °C) worden uitgeoeld (tot onder de 40 °C) en de bodem wordt opgewarmd (tot bijvoorbeeld 20 °C). Bij deze lage temperaturen kan nog relatief veel condensatiewarmte worden teruggewonnen, die normaliter verloren gaat. Heijna [5] geeft aan dat het mogelijk is om additioneel circa 10% à 14% van de ketelcapaciteit aan warmte te winnen uit de rookgassen uit de ketel door deze tot ruim onder het dauwpunt terug te koelen.

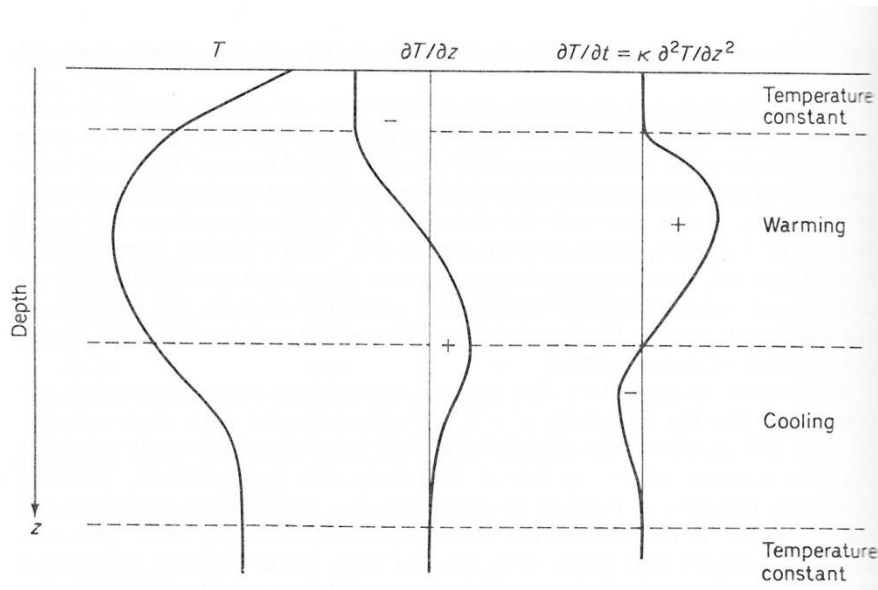
2.2.2 Opwarming van de bodem / warmteflux in de bodem

Monteith [3] heeft een verkennende analyse gemaakt van warmtestromen in de bodem en daarmee samenhangende opwarming en afkoeling daarvan onder invloed van bijvoorbeeld zoninstraling en in afhankelijkheid van de fysische kenmerken van de bodem (zoals de warmtegeleiding en de dichtheid van de bodem). Hij beschrijft de bodem als een samengesteld medium bestaande uit een vaste fractie (zand, klei e.d.), een vloeibare fractie (water) en gasvormige fractie (lucht). De respectievelijke volumeaandelen worden aangegeven met x_s , x_l , en x_g (waarin de indices staan voor: s = solid, l = liquid, g = gas). Voor veel zandige en kleibodems is X_g tussen 0.3 en 0.4 en neemt toe met de hoeveelheid organisch materiaal in de bodem (tot circa 0.8 in turfachtige bodems). De dichtheid [kg/m^3] van een (niet-zwellende) bodem, neemt (ongeveer lineair) toe met de vochtfractie. Dit geldt ook voor de volumetrische soortelijke warmte-inhoud [$\text{J/m}^3\text{K}$]. Veel bodems hebben een volumetrische soortelijke warmte-inhoud tussen circa 2 en 2.5 $\text{MJ/m}^3\text{K}$. Behalve de dichtheid en soortelijke warmte, speelt de "thermische geleiding" een belangrijke rol in de warmtehuishouding (onder andere bij de "indringdiepte" van warmte en weglekken van warmte naar diepere lagen.) De

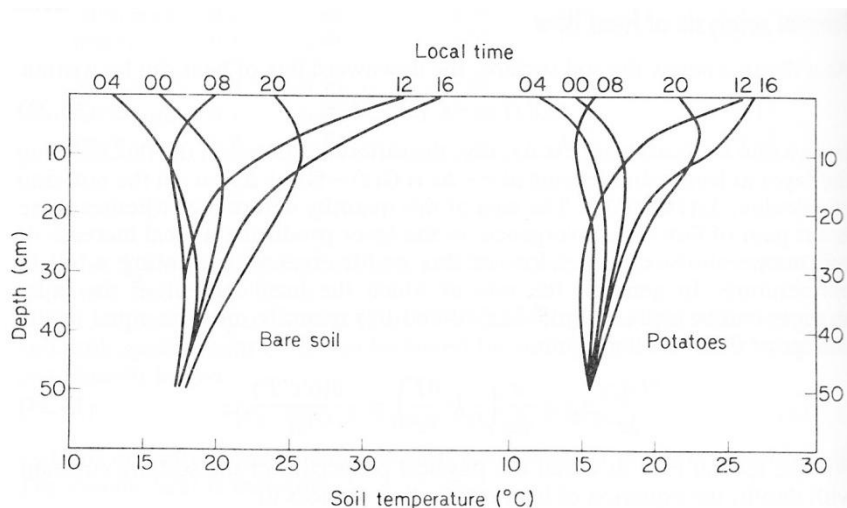
² Dit geldt in principe voor bodemgebonden teelten. Voor teelten op substraat zal het gaan om de substraattemperatuur, of beter, de worteltemperatuur.

warmtegeleiding hangt sterk af van de volumefractie vocht in de bodem en wordt groter naarmate de vochtfractie groter is. De toename is vooral sterk bij (relatief kleine) vochttoevoeging aan een droge bodem. Een ander begrip dat in de thermische analyse / warmtehuishouding van materialen een belangrijke rol speelt is de zogenaamde "thermische diffusiviteit". Deze grootheid is gedefinieerd als de verhouding van de warmtegeleiding en het product van dichtheid en soortelijke warmte (de eerder genoemde volumetrische soortelijke warmte). Ze heeft de eenheid m^2/s . De thermische diffusiviteit geeft aan hoe goed het materiaal de thermische energie geleidt in relatie tot zijn vermogen om thermische energie (warmte) op te slaan. Als het vochtgehalte van de bodem toeneemt, neemt de thermische diffusiviteit aanvankelijk ook toe, maar vanaf een bepaalde (bodemsoort afhankelijke) vochtfractie neemt deze weer af. De thermische diffusiviteit speelt een belangrijke rol in de fysische/wiskundige beschrijving van het warmtetransport en -opslag in de bodem.

Monteith gaf aan dat onder invloed van de zon aan het bodemoppervlak (mits deze door de zon beschenen wordt) een min of meer cyclische variatie van de oppervlaktetemperatuur plaatsvindt. Bij instraling door de zon neemt de bodemoppervlaktetemperatuur (in het algemeen) toe en zodra de instraling te zwak wordt, neemt die weer af. De belangrijkste cyclus is de dag/nacht cyclus met een periodetijd van 24 uur. (Daarnaast is er een jaarcyclus te onderkennen). Onder invloed van de zoninstraling neemt de temperatuur in de eerste "grondlagen" onder het oppervlak ook toe, maar minder en enigszins vertraagd. De vertraging is groter naarmate de laag dieper ligt. Beneden een bepaalde diepte raakt de temperatuurverandering zelfs in tegenfase met die van de hoger gelegen lagen (dat wil zeggen, de temperatuur neemt daar af – nog als gevolg van de afkoeling van de bovenlagen in de nachtfase). Nog dieper verandert de temperatuur onder invloed van de dag/nacht cyclus bijna niet meer. Deze effecten zijn weergegeven in figuur 2.1 en 2.2.



Figuur 2.1 Imaginaire temperatuurgrediënt (linker curve) in de bodem ((bij een dagcyclische verandering van de temperatuur van het oppervlak). Tevens zijn de eerste en de tweede afgeleiden naar de bodemdpte (z) aangegeven (dT/dz , en d^2T/dz^2). De (verticale) warmtestroom in de bodem is evenredig met dT/dz (met minteken). De tweede afgeleide is evenredig met de mate van verandering van de temperatuur dT/dt . Als de tweede afgeleide positief is, dan warmt de bodem daar op. Als de tweede afgeleide negatief is dan koelt hij daar af (bron Monteith, [3]).



Figuur 2.2 Temperatuurverloop in de bodem als functie van de diepte op verschillende uren van de dag ((bij een dagcyclische verandering van de temperatuur van het oppervlak). De linker set curven geldt voor braakliggende grond, de rechter set onder een aardappelteelt (bron: van Eimern 1964, genoemd in Monteith, [3]).

Monteith definieert voor de dagcyclische variaties een soort “effectieve diepte” D_{eff} voor de indringende warmtestroom. De hoeveelheid warmte die bij een (sinusvormige) variatie van de bodemoppervlaktetemperatuur (met amplitude A_0) over een halve cyclus (12 uur) in de bodem stroomt, is gelijk aan de warmte die nodig is om een laag grond ter dikte van D_{eff} een temperatuurverandering van A_0 Kelvin te geven.

De jaarcyclische variaties dringen verder de bodem in dan de dag/nachtcyclische (effectief tot circa 5 m bij jaarcyclische en 25 cm bij etmaalcyclische variaties), een en andere afhankelijk van bodemsoort, porositeit en vochtgehalte van de bodem.

Dag/nacht cyclische variaties van de bodemtemperatuur spelen een rol in de energiehuis-houding in de kas. Om optimaal hiervan te profiteren, zou de bodem maximaal bufferend moeten zijn. Dat wil zeggen dat de bodem warmte opneemt gedurende het warme deel van de dag (bij hoge instraling) en die warmte weer zoveel mogelijk aan de kas afgeeft in het koude (donkere) deel van het etmaal. De theorie van Monteith lijkt voldoende aangrijpingspunten te bieden, om in kaart te brengen welke bodemcondities hiervoor optimaal zijn (dichtheid, soort bodem, vochtfractie, e.d.) c.q. welke kunstmatige aanpassingen mogelijk/gewenst zijn, om het bufferende gedrag te optimaliseren.

Er wordt voorgesteld dit in het vervolg van de studie verder uit te werken.

2.2.3 Modellerings van nachtelijke energiestromen in een onverwarmde kas

In [4] is een CFD (computer fluid dynamics) studie beschreven betreffende het nachtklimaat van een onverwarmde kas. De onderzochte kas bestond uit een 3 kass kas met in eerste instantie een enkele laag kasbedekking (polyethyleen met een dikte van 0.2 mm) met een dakhelling van circa 22°. In het model zat onder meer een stralingssubmodel om de stralingsuitwisseling tussen de kas en de “hemel” te kunnen simuleren. De bodemtemperatuur buiten de kas werd verondersteld 10 °C te zijn, terwijl in de kas een constante warmtestroom van de bodem naar de kaslucht van 20 W/m² werd aangenomen (die volgens de schrijvers in het bereik ligt, dat normaliter gevonden wordt voor onverwarmde kassen in zuid Spanje). Tijdens heldere nachten (met een hemeltemperatuur van -10 °C) bleek de kasluchttemperatuur 2.5 K lager te liggen dan de buitenluchttemperatuur (van 10 °C). Dit wordt het “thermische inversie effect” genoemd en wordt veroorzaakt door het feit dat de dakbedekking meer langgolvlige straling uitzendt dan het van de hemel ontvangt. De daktemperatuur is daardoor in de geschetste situatie circa 4.4 K lager dan de buitenluchttemperatuur. Tijdens bewolkte nachten (met een hemeltemperatuur van 10 °C) was de kaslucht 3.6 K warmer dan de buitenlucht.

Daarna is eenzelfde set simulaties uitgevoerd voor dezelfde situatie, maar nu met een horizontaal scherm in de kas (van 0.2 mm dik PE). Het effect van het PE-scherf was aanzienlijk. In alle situaties was de kasluchttemperatuur nu hoger dan de buitenluchttemperatuur (bij een heldere nacht 0.34 °C en bij een bewolkte nacht 5.49 °C). Volgens de simulaties kan het scherm in de nacht de kasluchttemperatuur in de onverwarmde kas met circa 2.8 K verhogen bij een heldere nacht en bij een bewolkte hemel met circa 1.9 K.

De studie maakt duidelijk dat een scherm bij niet-verwarmde kassen een nuttige rol speelt om een (te) lage kasluchttemperatuur te voorkomen. Naar verwachting zal een scherm ook bij lichtgestookte kassen behulpzaam zijn om de kas een groter deel van de tijd, zonder stoken op een voldoende hoge temperatuur te houden, waardoor schermen potentieel biedt voor een significante energiebesparing.

2.2.4 Invloed van schermen op stralingstransport

De kwantitatieve invloed van een scherm op de (reductie van) stralingsverliezen vanuit een kas gedurende de nacht is onder andere onderzocht door Amsen [6]. Hij stelt dat de netto³ straling die het gewas in de kas uitzendt, afhangt van vooral de doorlatendheid (transmissiviteit) van het kasdek voor langgolvige straling (LWR), de transmissiviteit van een (eventueel) scherm en de reflectiviteit hiervan (eveneens voor LWR). Hij definieerde verder het zogenaamde "gordijneffect" (of "schermeffect") als het relatieve verschil tussen het netto stralingsverlies van een gewas in een kas zonder respectievelijk met scherm in de kas. Verder werd het hulpbegrip "gordijnfactor" (of schermfactor) c_s geïntroduceerd, gedefinieerd als $c_s = t_s - r_s$ (met t_s = de transmissiviteit van het scherm en r_s de reflectiviteit ervan). c_s ligt tussen -1 en 1. Een 100% (LWR-)transparant scherm heeft een schermfactor van 1, een 100% reflecterend scherm een factor van -1. Het schermeffect is door Amsen berekend als:

$$C_{h,s} = \frac{1 - c_s}{2 \frac{1 + c_s}{1 + t_h} + 1 - c_s}$$

Bij een zuiver reflecterend scherm ($c_s = -1$) wordt het schermeffect $C_{h,s} = 1$. Dit wil zeggen dat de netto straling van het gewas dan 0 is (alle plantstraling wordt dan gereflecteerd en het scherm zendt zelf niets uit. In de praktijk is dat niet haalbaar, maar met bijvoorbeeld aluminium kan de reflectiviteit van het scherm wel hoog zijn (circa 0.95) en de emissiviteit laag (circa 0.05).

³ De netto straling is het verschil aan straling dat het gewas zelf uitzendt en straling die het van andere stralende oppervlakken (zoals scherm, kasdek en 'hemel' ontvangt)

De bovenstaande formule geldt in principe ook voor delen van de bodem die niet door het gewas bedekt worden en dus het kasdek (en/of scherm) "zien". Stralingstransport speelt dus ook een rol bij afkoeling van de bodem in de nacht. Straling naar buiten dient in de nacht zoveel mogelijk te worden voorkomen. Ook hier kan een scherm boven in de kas een belangrijke rol spelen. Mogelijk kan ook het uitzenden van straling door de bodem zoveel mogelijk worden tegengegaan door een gronddoek met een lage emissiviteit van straling. Dit dient in het projectvervolg nader te worden onderzocht (en ook wat dit betekent voor het opslaan van warmte in de bodem).

2.2.5 Ligging van verwarmingssysteem

Ten aanzien van de efficiëntie van de verwarming van gewassen in kassen speelt het warmteafgiftesysteem en de ligging daarvan in de kas een belangrijke rol. In [7] is het effect van de ligging van verwarmingssystemen op de verticale temperatuurgradiënt in verwarmde kassen nader onderzocht voor de volgende verwarmingssystemen:

- hoog gelegen verwarmingspijpen (stoom)
- grondniveau heetwaterpijpen
- luchtverwarming met en zonder verdeling met luchtslangen (op verschillende hoogten).

Systemen die een grote verticale temperatuurgradiënt geven (dat wil zeggen een relatief hoge temperatuur boven in de kas en een relatief lage bij/tussen het gewas), zijn minder efficiënt, dan systemen die een vrij kleine verticale temperatuurgradiënt met zich mee brengen. Conclusie van de studie was, dat "grond-niveau" verwarmingssystemen (stalen pijpen, warme luchtunits of warme luchttoevoer via geperforeerde luchtslangen), een (veel) betere uniforme verticale temperatuurdeling gaven dan hoog in de kas gelegen systemen.

Ook Meyer [8] heeft verschillende warmteafgiftesystemen voor kassen onderzocht met het oog op energiebesparing. Hij drukte de kwaliteit van het verwarmingssysteem uit in een zogenaamde warmteverbruikscoefficiënt k' (in $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), geldend bij een windsnelheid van 4 m/s, en berekende verder ook het relatieve warmteverbruik ten opzichte van een referentiesysteem. Hiervoor gebruikt hij een hooggelegen buisverwarmingssysteem, waarvan hij het gebruik op 100% stelde. Het laag (maar iets boven de grond) gelegen buisverwarmingssysteem kwam als energiezuinigste systeem uit de bus (met een relatief verbruik van 82%). Tweede was een luchtverwarmingssysteem met geperforeerde polyethyleenluchtslangen boven het gewas (maar niet te hoog in het dak), met een relatief verbruik van 85%. Op basis van deze resultaten verwachtte Meyer dat ook een laag tussen het gewas gelegen luchtverwarmingssysteem met slangen goed zou scoren. Hij onderzocht dit voor tomaten, maar vond tegen zijn verwachting in een relatief hoog verbruik van 96% ten opzichte van de hoogge-

legen pijpverwarming. Hij weet dit relatief hoge verbruik aan extra verdamping (evapotranspiratie), die de warme droge lucht vlak bij de tomatenplanten veroorzaakt, waarvoor extra warmte nodig is om de latente warmte hiervoor te leveren.

Uit het bovenstaande is het duidelijk dat het belangrijk is voor een zo laag mogelijk verbruik aandacht te besteden aan het warmteafgiftesysteem in de kas. Een laaggelegen (buisrail) systeem is in het algemeen (zowel energietechnisch als logistiek) een goede keus. Wel kan in verband met het weglekken van warmte naar de bodem nog aandacht worden besteed aan straling van het net naar de bodem en getracht worden dit zoveel mogelijk te voorkomen (bijvoorbeeld door emissiviteit van pijpen aan de onderzijde te verminderen door een speciale verf of door een reflecterend doek onder de pijpen aan te brengen). Hierdoor kan waarschijnlijk ook (energieverslindende) verdamping vanuit de bodem wordt gereduceerd.

Indien er in een bestaande kas een niet-optimale ligging van het verwarmingssysteem is en het niet eenvoudig mogelijk is dit te veranderen, kan met behulp van ventilatoren de verticale temperatuurgradiënten kunstmatig worden verminderd en de warmte boven in de kas beter bij het gewas worden gebracht. Dit zal in het algemeen een reducerend effect hebben op het energiegebruik [9].

2.3 Verdere stappen in studie

De hiervoor genoemde studies bieden aanknopingspunten om de energiehuishouding van energiearme teelten te verbeteren:

1. een hogere bodemtemperatuur (c.q. worteltemperatuur) kan een compensatie bieden voor een lagere kastemperatuur. Mogelijk kan hiervoor (extra) lage-temperatuurwarmte uit de ketel worden gebruikt. Er wordt gekeken hoeveel "ruimte" hiervoor nog is (door verdere uitkoeling van de rookgassen met lage-temperatuur water dat gekoeld wordt in een eenvoudige slangen (bodem-)warmtewisselaar)
2. in de bovenste laag van de bodem kan (passief, o.a. door zoninstraling of actief met bijvoorbeeld slangen) een aanzienlijke hoeveelheid warmte worden opgeslagen. Er wordt onderzocht hoe/bij welke bodemcondities zoveel mogelijk warmte kan worden opgeslagen en hoe ook weer een zo groot mogelijk deel hiervan kan worden teruggewonnen in de kaslucht (onderzoeken van effect van specifieke bodemcondities, eventueel kunstmatige bodems zoals betonvloer, isolerende lagen om weglekken naar dieper gelegen lagen te voorkomen, stralingsreflectie, etc.)
3. een scherm helpt tegen het weglekken van (vooral stralings)warmte en dus ook tegen het weglekken van warmte die overdag in de bodem is opgeslagen en die in de nacht uit de bodem komt.

4. er wordt gekeken naar mogelijkheden/maatregelen om de stralingsverliezen van het buis-railnet naar de bodem te reduceren (om de efficiëntie van het verwarmingssysteem te verhogen en eventuele onnodige bodemverdamping te vermijden).

Voor het projectvervolg is beoogd de hiervoor beschreven aandachtspunten nader uit te werken en te onderzoeken (met het accent op punt 2 en 4). Daarbij wordt ook getracht een schatting – "educated guess" – te maken welke energetische winst er mogelijk is door "optimalisatie van de bodem" (bijvoorbeeld effect van vochtfractie van bodem op warmte-bufferwerking, of optimale dikte van een bufferende betonvloer, wel of geen isolatie hieronder etc.) en door andere op de bodemwarmtehuishouding gerichte maatregelen (zoals bijvoorbeeld stralingsreductie van buisrailnet).

LITERATUUR

- [1] Swinkels, G.L.A.M., "Standaard Teelten", IMAG, maart 2000.
- [2] Canham A.E., "Alternative pathways to fuel economy", Department of Agriculture and Horticulture, Shinfield, UK, ISHS Acta Horticulturae70, "Technical and Physical Aspects of Energy Savings in Greenhouses, 1978?
- [3] Monteith, J.L., M. Unsworth, Principles of Environmental Physics, 2-ed. 1992, H13
- [4] Montero, J.I., P Munoz, A. Antón and N. Iglesias, "Computational Fluid Dynamic Modelling of Night-time Energy Fluxes in Unheated Greenhouses, Acta Hort. 691, ISHS 2005.
- [5] Heijna, B.J., "Application of condensing heat exchangers in the stack o natural gas fired boilers for soil heating in greenhouses, ISHS Acta Horticulturae70, Technical and Physical Aspects of Energy Savings in Greenhouses, 1978?
- [6] Amsen, M.G., "Heat radiation phenomena from a greenhouse crop canopy at night: the curtaineffect in a greenhouse covered with transmittive material", Horticulture Department, Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, ISHS Acta Horticulturae70, Technical and Physical Aspects of Energy Savings in Greenhouses, 1977?
- [7] Winspear, K.W. "Vertical temperature gradients in heated greenhouses", National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedfordshire, UK, ISHS Acta Horticulturae70, Technical and Physical Aspects of Energy Savings in Greenhouses, 1977?
- [8] Meyer, J. "Reducing energy consumption of greenhouses by the choice of the heating system", Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft der Technischen Universität Hannover. ISHS Acta Horticulturae70, Technical and Physical Aspects of Energy Savings in Greenhouses, 1977?
- [9] Boonekamp, G., "Verticale ventilatoren werken klimaatverschillen weg.", Groenten en Fruit, week 12, 2009.
- [10] Woerden, S.C. van, "Kwantitatieve informatie voor de Glastuinbouw 2003-2004", PPO-WUR, sept. 2003.