

Deerns Nederland B.V.

Grondbuisventilatie in kassen

Eindverslag



Mike Olsthoorn (10022716)
29-8-2014

Voorwoord

Dit onderzoek is gedaan als afstudeeropdracht voor de opleiding Technische Natuurkunde van de Haagse Hogeschool. De opdracht is afkomstig van Deerns Rijswijk, afdeling Bouwfysica en Energie.

Deerns is een Nederlands installatietechnisch ingenieursbureau en is veel betrokken bij duurzame projecten. De inzet van grondbuizen als goedkope en duurzame oplossing voor het kasklimaat zou hierop goed aansluiten. Er is nog niet veel onderzoek gedaan naar het ventileren met grondbuizen in kassen. Metingen wijzen uit dat het voor energiebesparing zorgt en dat het zou bijdragen aan een beter kasklimaat. Gedurende 17 weken heb ik onderzoek gedaan naar de werking van grondbuizen in kassen en een model gemaakt waarmee de werking kan worden gesimuleerd.

Graag wil ik dr. Ir. Peter J.W. van den Engel bedanken voor zijn tijd en begeleiding vanuit Deerns in deze periode. Ook wil ik Frans van Antwerpen bedanken voor de informatie en het mogen gebruiken van de meetgegevens uit de meetopstelling in zijn kas.

Rijswijk, 29 augustus 2014

Samenvatting

Grondbuisventilatie is een systeem waarbij lucht van boven in de kas door buizen in de grond wordt geblazen. Op deze manier kan de thermische opslagcapaciteit van de bodem worden benut om warmte op te slaan en uit te halen. Zo kan worden bespaard op de energiekosten en kan de kaslucht worden gedroogd.

Door te onderzoeken wat er precies gebeurt in de grondbuis, kunnen de warmtestromen in beeld worden gebracht. In Matlab is een model gemaakt dat alle berekeningen uitvoert en zo de werking van de grondbuis simuleert. Door parameters te veranderen kan het effect hiervan op het systeem worden bestudeerd.

Het blijkt niet uit te maken van wat voor materiaal de buis is gemaakt. De soort grond waar de buis in is gegraven heeft een klein effect. De buislengte en luchtsnelheid hebben daarentegen wel een groot effect. Door een rendement van 80 % te gebruiken kan een relatie worden gelegd tussen de buislengte en luchtsnelheid. Hieruit blijkt dat een luchtsnelheid van zo'n 2 m/s ideaal is bij de huidige buislengte van 30 m.

Inhoud

Voorwoord.....	2
Samenvatting	3
1. Inleiding	6
2. Warmtestromen in de grondbuis	7
2.1. Correcties op de warmtestroom.....	9
2.2. Convectiecoëfficiënt	10
2.3. Latente warmte.....	11
2.4. Luchtvochtigheid	13
2.5. Opwarming bodem	14
2.6. Uitblaastemperatuur	15
3. Metingen.....	17
3.1. De proefopstelling	17
3.2. De metingen	18
4. Simulatie	20
4.1. De grondbuis	20
4.2. Optimalisatie lus	22
5. Resultaten	23
6. Optimalisatie	25
6.1. Buislengte	25
6.2. Buiseigenschappen	29
6.3. Grondeigenschappen	30
6.4. Afstand tussen de buizen.....	31
6.5. Effect temperatuur op kas	32
6.6. Effect vocht op kas	33
6.7. Bodem vol met grondbuizen	34
6.8. Effect snelheid op warmtebuffering	35
7. Conclusies en aanbevelingen	37
8. Lijst met gebruikte symbolen	40
9. Literatuur.....	42
Bijlagen	43
A. Opdrachtschrijving	43
B. Uitleg werkzame grondlaag	44
C. Uitleg berekening uitblaastemperatuur.....	46

D.	Rendement grondbuis.....	47
E.	Grondeigenschappen	48
F.	Overige eigenschappen.....	49
G.	Ideale luchtsnelheid.....	50

1. Inleiding

Voor het nieuwe telen zijn veel proeven gedaan, waarbij koude lucht van boven het schermdoek wordt aangezogen en in de kas weer wordt uitgeblazen, om zo de kaslucht te drogen. Dit gaat echter fout in de winter, wanneer de aangezogen lucht van boven het schermdoek een temperatuur heeft van ongeveer 5 °C. Door te koude lucht de kas in te blazen, kan koelschade ontstaan aan de plant.

Het idee ontstond om pvc-buizen in te graven en de lucht van boven het schermdoek via verticale buizen door deze ingegraven buizen te blazen. De thermische opslagcapaciteit van de bodem kan zo worden benut om warmte af te geven of op te nemen. Afhankelijk van de temperaturen, zal bij een temperatuurverschil tussen de grond rondom de buis en de lucht in de buis een warmtestroom ontstaan van de lucht naar de grond of andersom. Door temperatuurverschillen op te vangen kan er worden bespaard op de warmtevraag.

Een voordeel van dit systeem is ook dat de luchtvochtigheid hierdoor kan dalen. Dit gebeurt door condensatie, dat op kan treden bij koeling van de aangezogen lucht, of door opwarming van de aangezogen lucht. De koude lucht boven het scherm kan minder vocht bevatten als de warme kaslucht, waardoor het ventileren een drogend effect heeft.

Een tomatenkweker in 's Gravenzande heeft in 2012 een test gedaan in zijn kas, met één grondbuis. In de buurt van de installatie bleken de tomaten groter te worden dan in de rest van de kas. Hierdoor zijn ze aan de slag gegaan met het aanleggen van nog 34 grondbuizen met een lengte 30 m en een diameter van 160 mm.

Het is alleen niet duidelijk wat er precies gebeurt in de grondbuizen. Er wordt energie uitgewisseld tussen de lucht en de grond, maar hoeveel precies is niet bekend. Ook bestaat de mogelijkheid dat er condensatie optreedt, maar of dit gebeurt in de praktijk en in welke mate is niet duidelijk.

Met een simulatiemodel kan worden berekend wat er gebeurt in de grondbuis, bijvoorbeeld hoeveel energie de grond opneemt en weer afstaat. Ook kan worden gekeken naar het optimaliseren van het systeem. Heeft het nut om gebruik te maken van langere buizen of is de warmtebuffering groter wanneer gebruik wordt gemaakt van andere materialen? Is het verstandig om het aantal grondbuizen te vergroten?

Eerst zal onderzoek worden gedaan naar de grondbuis. De theorie achter de grondbuis met alle relevante fysische aspecten zal worden behandeld. Vervolgens zal worden gekeken naar de proefopstelling en de bijbehorende meetgegevens. Deze meetgegevens zullen worden geanalyseerd, waardoor een beeld wordt gevormd van het effect van de grondbuis. Hierna zal het model worden beschreven en de resultaten hiervan worden vergeleken met de metingen. Er zal worden gekeken hoe het systeem geoptimaliseerd kan worden. Uiteindelijk zal een conclusie worden gevormd en aanbevelingen worden gedaan voor een eventueel vervolgonderzoek.

2. Warmtestromen in de grondbuis

In dit hoofdstuk zal de werking van de grondbuis worden beschreven. Er zal worden uitgelegd hoe de warmteoverdracht van de lucht naar de grond door middel van grondbuisventilatie plaatsvindt.

Warmteoverdracht kan plaatsvinden op drie verschillende manieren.

- Straling.

Warmteoverdracht door straling is het transport van warmte door elektromagnetische straling tussen oppervlakken van verschillende temperatuur, die gescheiden zijn door een tussenliggend medium. Dit medium is in veel gevallen lucht. Het transport van elektromagnetische golven is onafhankelijk van het tussenliggend medium, wat inhoudt dat lucht geen warmte opneemt langs elektromagnetische weg.

Warmtestraling gaat vooral een rol spelen bij grote temperatuurverschillen. Bij grondbuizen worden deze temperaturen niet bereikt en is er geen tussenliggend medium, waardoor dit effect niet meegenomen zal worden.

- Geleiding.

Warmtegeleiding, ook wel warmteconductie genoemd, is warmteoverdracht waarbij warmte stroomt van deeltjes met hogere kinetische energie naar deeltjes met lagere kinetische energie. Deze stroom wordt veroorzaakt door botsingen tussen de moleculen, waarbij een deel van de energie over wordt gedragen aan het lager energetische deeltje.

Een thermodynamisch systeem streeft altijd naar een zo groot mogelijke entropie. Dit wil zeggen dat bij een temperatuurverschil, het systeem probeert dit temperatuurverschil op te heffen. De warmte probeert zich zo gelijk mogelijk te verdelen. Er ontstaat een warmtestroom van warm naar koud.

- Convectie.

Warmtestroming door verplaatsing van materiaal wordt convectie genoemd. Er zijn twee soorten convectie: gedwongen convectie en vrije convectie.

Van gedwongen convectie is sprake als luchtstroming gedwongen plaats vindt, bijvoorbeeld door middel van een ventilator.

Vrije convectie komt spontaan op gang, bijvoorbeeld doordat een verschil in temperatuur een verschil in dichtheid veroorzaakt.

Warmtestroom is een vorm van energie-uitwisseling tussen systemen die niet in thermisch evenwicht zijn. Warmtestroom is de hoeveelheid warmte die van de ene plek naar de andere overgaat. De warmte stroomt hierbij van hogere naar lagere temperatuur. In de praktijk treden de bovenstaande warmteoverdrachten veelal gecombineerd op. De gebruikelijke vorm voor het weergeven van de warmtestroom door een plat vlak is ^{1}:

$$\Phi = U \cdot A \cdot \Delta T \quad [1]$$

waarin:

Φ	= voelbare warmtestroom	(W)
U	= warmtedoorgangscoëfficiënt	(W/(m ² ·K))
A	= warmtewisselend oppervlak	(m ²)
ΔT	= temperatuurverschil lucht en grond	(K)

Als een constructie uit meerdere lagen bestaat, heeft elke laag zijn eigen warmteweerstand. Deze warmteweerstand dient voor alle lagen apart berekend te worden. De totale warmteweerstand van deze constructie is gelijk aan de som van de weerstanden van de diverse lagen. In het geval van een grondbuis is deze constructie opgebouwd uit: de overgang van lucht naar buiswand, de overgang binnenzijde buis naar buitenzijde buis en de overgang van buitenzijde buis naar de grond.

Met behulp van de warmteweerstand kan de warmtedoorgangscoefficiënt worden bepaald die nodig is voor het berekenen van de warmtestroom. Voor de warmtedoorgangscoefficiënt tussen de luchtstroom en de grond geldt:

$$U = \frac{1}{R} \quad [2]$$

met:

$$R = \frac{1}{h_c} + \frac{d_b}{\lambda_b} + \frac{d_g}{\lambda_g} \quad [3]$$

waarin:

R	= totale warmteweerstand	(m ² ·K/W)
h_c	= warmteoverdrachtscoëfficiënt lucht	(W/(m ² ·K))
d_b	= dikte van de wand	(m)
λ_b	= warmtegeleidingscoëfficiënt buis	(W/(m·K))
d_g	= indringdiepte	(m)
λ_g	= warmtegeleidingscoëfficiënt grond	(W/(m·K))

De laatste term in formule [3] staat voor de warmteweerstand van de grond. Om de indringdiepte te bepalen kan gebruik gemaakt worden van de volgende vergelijkingen. Hierbij moet de indringdiepte voor dagelijks gebruik worden genomen ^{2}.

$$d_g = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_g}{\omega}} \quad [4]$$

met:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{t_p} \quad [5]$$

$$\alpha_g = \frac{\lambda_g}{\rho_g \cdot c_g} \quad [6]$$

waarin:

α_g	= warmtediffusiviteit grond	(m ² /s)
ω	= cirkelfrequentie dagelijkse gang	(Hz)
t_p	= duur van de periode	(s)
ρ_g	= dichtheid grond	(kg/m ³)
c_g	= soortelijke warmte grond	(J/kg·K)

De cirkelfrequentie voor dagelijkse gang heeft effect op de indringdiepte. Wanneer voor t_p de duur van een dag wordt ingevuld, zal de werkzame grondlaag de maximale indringdiepte na een dag verwarmen weergeven. Buiten de werkzame grondlaag kan de bodemtemperatuur constant worden beschouwd. De warmtediffusiviteit of temperatuurvereffeningscoëfficiënt is een stofeigenschap die weergeeft hoe snel een stof zich aanpast aan de temperatuur van de omgeving ^{3}.

2.1. Correcties op de warmtestroom

Formules [1] en [3] gelden alleen voor de warmtestroom door een vlakke laag. Aangezien het in dit geval om buizen met een bepaalde wanddikte d_b gaat, is er sprake van een verschil in warmtewisselend oppervlak tussen de binnen- en buitenkant van de buis.

Ook moet er een correctie worden aangebracht op de indringdiepte, aangezien het volume van de werkzame grond niet lineair toeneemt ten opzichte van de afstand tot de buis.

Het volume van een vlakke grondlaag kan worden bepaald met formule [7]. Hetzelfde volume rond de grondbuis kan worden bepaald met formule [8]. Voor verdere uitleg, zie bijlage B.

$$I_v = \pi \cdot D_e \cdot l \cdot d_g \quad [7]$$

$$I_g = \pi \cdot l \cdot (\sigma^2 \cdot d_g^2 + \sigma \cdot d_g \cdot D_e) \quad [8]$$

waarin:

I_v	= volume vlakke grondlaag	(m ³)
I_g	= volume grondlaag rondom buis	(m ³)
D_e	= buitendiameter buis	(m)
σ	= correctiefactor indringdiepte	(-)

Als formule [7] en [8] aan elkaar gelijk worden gesteld, kan de correctiefactor σ met de abc-formule worden bepaald.

$$\sigma = \frac{-D_e \pm \sqrt{D_e^2 + 4 \cdot d_g \cdot D_e}}{2 \cdot d_g} \quad [9]$$

Om te zorgen dat de correctiefactor positief is wordt de plus genomen. Als de bovenstaande formules worden samengevoegd, kan worden gezegd dat voor de warmtestroom geldt:

$$\Phi = - \frac{A \cdot \Delta T}{\frac{1}{h_c} + \frac{d_b}{\lambda_b} + \frac{\sigma \cdot d_g}{\lambda_g}} \quad [10]$$

Het minteken is geplaatst om aan te geven dat de warmtestroom van de lucht naar de grond negatief is. In deze formule wordt nu rekening gehouden met de correctie op de indringdiepte, maar nog niet met het verschil in warmtewisselend oppervlak. Deze kan worden omgeschreven tot ^{1}:

$$\Phi = - \frac{\pi \cdot l \cdot \Delta T}{\frac{1}{h_c \cdot D_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \lambda_b} + \frac{\sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e}} \quad [11]$$

waarin:

l	= lengte buis	(m)
D_i	= binnendiameter buis	(m)

Het enige in formule [11] dat nog niet klopt is de temperatuur. De ΔT geeft aan dat het temperatuurverschil tussen de lucht en de grond over de hele lengte van de buis gelijk is. In dit geval hebben we te maken met het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil. Dit logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil tussen de lucht en de grond over de hele lengte van de buis, kan worden berekend met de volgende formule:

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{l,begin} - T_{g,begin}) - (T_{l,eind} - T_{g,eind})}{\ln\left(\frac{T_{l,begin} - T_{g,begin}}{T_{l,eind} - T_{g,eind}}\right)} \quad [12]$$

waarin:

ΔT_{log}	= logaritmisch gem. temperatuurverschil	(K)
$T_{l,begin}$	= luchttemperatuur begin buis	(K)
$T_{g,begin}$	= grondtemperatuur begin buis	(K)
$T_{l,eind}$	= luchttemperatuur eind buis	(K)
$T_{g,eind}$	= grondtemperatuur eind buis	(K)

2.2. Convectiecoëfficiënt

De enige onbekende is nu nog de warmteoverdrachtscoëfficiënt h_c , ook wel convectiecoëfficiënt genoemd. Deze warmteoverdrachtscoëfficiënt bepaalt de hoeveelheid warmte die door convectie wordt overgedragen tussen de lucht en de buis en kan worden berekend met:

$$h_c = \frac{Nu \cdot \lambda_l}{D_i} \quad [13]$$

waarin:

Nu	= getal van Nusselt	(-)
λ_l	= warmtegeleidingscoëfficiënt lucht	(W/(m·K))

Het getal van Nusselt is het kengetal voor de convectieve warmteoverdracht. Dit getal geeft de verhouding aan tussen warmteoverdracht door convectie en warmteoverdracht door geleiding. Als $Nu = 1$, dan vindt de warmteoverdracht volledig plaats door geleiding.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen natuurlijke convectie en gedwongen convectie. In het geval van de grondbuis gaat het om gedwongen convectie, aangezien de lucht wordt verplaatst door middel van een ventilator.

Bij gedwongen convectie zijn de bepalende kentallen Reynolds en Prandtl.

Het getal van Reynolds wordt gebruikt om te bepalen of de luchtstroom laminair of turbulent is en kan worden berekend met:

$$Re = \frac{v_l \cdot D_i}{\nu} \quad [14]$$

waarin:

Re	= Reynolds getal	(-)
v_l	= luchtsnelheid	(m/s)
ν	= kinematische viscositeit lucht	(m ² /s)

Het getal van Prandtl is kenmerkend voor de fysische eigenschappen van het stromend medium. Voor het berekenen van α_l , kan formule [6] worden gebruikt met gegevens van lucht.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha_l} \quad [15]$$

waarin:

Pr	= getal van Prandtl	(-)
α_l	= warmtediffusiviteit lucht	(m ² /s)

Voor stroming in een buis met buisdiameter D_i geldt dat wanneer $Re < 2300$, de stroming laminair is en $Nu = 3,66$ moet worden gebruikt.

Als het Reynolds getal $Re > 10^4$, geldt dat het gaat om turbulente stroming en kan voor het getal van Nusselt worden geschreven ^{1}:

$$Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad [16]$$

Het tussengelegen gebied is een overgangsgedebied tussen laminaire en turbulente stroming. Over dit gebied is echter weinig bekend.

Over het algemeen is de stromingsweerstand voor turbulente stroming groter dan voor laminaire stroming. Om de warmteoverdracht optimaal plaats te laten vinden, dient de luchtstroom turbulent te zijn. Door de snelheid van de verplaatste lucht te verhogen, neemt het Reynolds getal toe en zo dus ook de warmte uitwisseling. Een te hoge luchtsnelheid brengt ook negatieve gevolgen met zich mee.

2.3. Latente warmte

Naast de warmtestroom die ontstaat door het temperatuurverschil tussen de lucht en de grond, kan er ook warmte vrijkomen door condensatie. Deze warmte wordt latente warmte genoemd. Wanneer de waterdamp in de lucht condenseert, wordt de opgeslagen energie als voelbare warmte aan het inwendige buisoppervlak overgedragen. De latente warmte kan worden berekend door het geproduceerde vocht te vermenigvuldigen met de verdampingswarmte van water ^{1}:

$$\Phi_{la} = f_m \cdot r_{verd} \quad [17]$$

$$\Phi_{la} = A \cdot K \cdot (x_{bg} - x_{lg}) \cdot r_{verd} \quad [18]$$

met:

$$K = \frac{h_c}{\rho_{lucht} \cdot c_{p,l}} \cdot \left[\frac{Pr}{Sc} \right]^{2/3} \quad [19]$$

waarin:

Φ_{la}	= latente warmtestroom	(W)
f_m	= dampstroom	(g/s)
r_{verd}	= verdampingswarmte van water	(J/g)
K	= stofoverdrachtscoëfficiënt	(m/s)
x_{bg}	= gemiddeld dampconcentratie buis opp.	(g/m ³)
x_{lg}	= gemiddeld dampconcentratie lucht	(g/m ³)
$c_{p,l}$	= soortelijke warmte lucht	(J/kg·K)
ρ_{lucht}	= luchtdichtheid	(kg/m ³)
Sc	= getal van Schmidt	(-)

Het getal van Schmidt wordt berekend door de kinematische viscositeit te delen door de diffusiecoëfficiënt. Voor lucht van 20 °C geldt dat $Sc = 0,63$.

Condensatie van lucht treedt alleen op wanneer de buistemperatuur lager is dan de dauwpunttemperatuur van de aangezogen lucht. De dauwpunttemperatuur kan als volgt worden berekend ^{6}:

$$T_d = \frac{237,7 \cdot \left(\frac{17,27 \cdot T}{237,7 + T} + \ln(RV/100) \right)}{17,27 - \left(\frac{17,27 \cdot T}{237,7 + T} + \ln(RV/100) \right)} \quad [20]$$

waarin:

T_d	= dauwpunttemperatuur	(°C)
T	= luchttemperatuur	(°C)
RV	= relatieve luchtvochtigheid	(%)

Doordat de luchttemperatuur afneemt in de buis, is de buistemperatuur ook niet overal gelijk. Het is dus mogelijk dat alleen in het laatste deel van de buis condensatie optreedt. Om te bepalen in welk deel van de buis condensatie optreedt, moeten eerst de buistemperaturen aan het begin en eind worden berekend ^{5}:

$$T_{b,begin} = T_{l,begin} - \frac{U \cdot (T_{l,begin} - T_g)}{h_c} \quad [21]$$

$$T_{b,eind} = T_{l,eind} - \frac{U \cdot (T_{l,eind} - T_g)}{h_c} \quad [22]$$

waarin:

$T_{b,begin}$	= temperatuur buiswand begin	(K)
$T_{b,eind}$	= temperatuur buiswand eind	(K)
T_g	= grondtemperatuur	(K)

Vervolgens moet de fractie van de buis worden bepaald waar condensatie optreedt. Er wordt gekeken vanaf welke positie de buistemperatuur lager is dan de dauwpunttemperatuur. Van dit punt tot het eind van de buis zal condensatie optreden. Deze $l_{fractie}$ kan worden gezien als een correctiefactor op het warmtewisselend oppervlak.

$$l_{fractie} = \left(\frac{T_{b,eind} - T_d}{T_{b,eind} - T_{b,begin}} \right) \quad [23]$$

waarin:

$l_{fractie}$	= correctiefactor warmtewisselend opp.	(-)
---------------	--	-----

Wat nog overblijft, zijn de dampconcentraties. Met formule [24] kan aan de hand van de relatieve vochtigheid en de temperatuur, de absolute dampconcentratie worden bepaald. Om de verzadigingsconcentratie bij een bepaalde temperatuur te berekenen kan $RV = 100$ % wordt ingevuld ^{7}.

$$x = \frac{6,112 \cdot e^{\left(\frac{17,67 \cdot T}{T + 243,5} \right)} \cdot 2,1674 \cdot RV}{273,15 + T} \quad [24]$$

waarin:

x	= absolute dampconcentratie	(g/m ³)
-----	-----------------------------	---------------------

Het gemiddelde concentratieverschil tussen de lucht en de buiswand in het deel van de buis waar condensatie op treedt, is de helft van het verschil met het einde van de buis en kan worden gegeven door ^{5}:

$$x_{gem} = (x_{bg} - x_{lg}) = (x_{b,eind} - x_d)/2 \quad [25]$$

waarin:

$x_{b,eind}$	= verzadigde concentratie buiswand eind	(g/m ³)
x_d	= concentratie dauwpunt	(g/m ³)
x_{gem}	= gemiddeld concentratieverschil	(g/m ³)

2.4. Luchtvochtigheid

Luchtvochtigheid is een belangrijk aspect in de tomatenteelt. Luchtvochtigheid beïnvloedt de groei, ontwikkeling en productie van een tomaat via fotosynthese, verdamping en de voedingsopname. Op korte termijn kan een hoge luchtvochtigheid gunstig zijn, maar op langere termijn zal dit de productie niet ten goede komen en vergroot het de kans op (schimmel)ziektes.

In de winter is de luchtvochtigheid over het algemeen redelijk hoog. Het meeste vocht wordt aangevoerd door transpiratie van het gewas. Als de plant niet kan verdampen, is er ook geen ruimte om voedingsstoffen op te nemen ^{12}.

Kaslucht bevat vrijwel altijd meer vocht dan buitenlucht. Het openen van de luchtramen resulteert dus meestal in het afvoeren van vocht. Aangezien in de winter de buitentemperatuur relatief laag is, zullen de luchtramen dicht zitten. Het openen van de luchtramen wordt in de zomer gebuikt om de kastemperatuur op peil te houden. Op deze manier gaat er wel energie, vocht en CO₂ verloren. Doordat de ramen open staan, kan de luchtvochtigheid ook te laag worden. De plant zou hierdoor meer water verdampen dan het op kan nemen.

Een andere manier waarop de luchtvochtigheid kan dalen, is condensatie. Het berekenen van de hoeveelheid condensatie in de grondbuis levert een hoop informatie. Als de luchtvochtigheid daalt, hoeven de ramen minder vaak open, waardoor minder warmteverlies plaatsvindt.

Uit de vorige paragraaf is gebleken dat de ontstane vochtproductie berekend kan worden door:

$$f_m = A \cdot \frac{h_c}{\rho_{lucht} \cdot c_{p,l}} \cdot \left[\frac{Pr}{Sc} \right]^{2/3} \cdot (x_{bg} - x_{lg}) \quad [26]$$

Als in de winter het schermdoek dicht zit, zal de lucht boven het schermdoek een stuk kouder zijn dan de lucht in de kas. Deze koudere lucht kan dus ook een stuk minder vocht bevatten. Door vocht kieren in het scherm en het gedeeltelijk openen van de luchtramen, kan vocht worden afgevoerd. Hierdoor daalt de temperatuur echter, waardoor er extra moet worden gestookt.

Ook zal er vocht condenseren tegen het dek, waardoor latente warmte verloren gaat.

Bij ventilatie waarbij de luchtramen op een kier worden gezet zal niet alleen latente warmte verloren gaan, maar ook voelbare warmte. Als door het gebruik van grondbuisventilatie de luchtvochtigheid daalt, hoeven de ramen minder vaak open, waardoor een hoop energie kan worden bespaard.

Door de luchttemperatuur boven het scherm te berekenen, kan met formule [24] de maximale dampconcentratie boven het scherm worden bepaald. Als de absolute dampconcentratie in de kas hoger is dan de maximale dampconcentratie boven het scherm, moet het verschil hiertussen wel condenseren tegen het dek of scherm. Om de temperatuur boven het scherm te kunnen berekenen, moet eerst de temperatuur van het dek worden berekend. Deze formules gelden alleen als het scherm dicht zit ^{13}.

$$T_{dek} = T_{buiten} - \frac{U \cdot (T_{buiten} - T_{kas})}{h_{dek1}} \quad [27]$$

met:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{dek1}} + \frac{1}{h_{dek2}} + \frac{1}{h_{scherm1}} + \frac{1}{h_{scherm2}}} \quad [28]$$

en:

$$T_{nok} = T_{buiten} + \frac{h_{dek1} \cdot (T_{dek} - T_{buiten})}{U} \quad [29]$$

met:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{dek1}} + \frac{1}{h_{dek2}}} \quad [30]$$

waarin:

T_{dek}	= temperatuur dek van de kas	(K)
T_{buiten}	= buitentemperatuur	(K)
T_{kas}	= temperatuur van de kas	(K)
T_{nok}	= temperatuur tussen scherm en dek	(K)
h_{dek1}	= warmteoverdrachtcoëff. dek buiten	(W/(m ² ·K))
h_{dek2}	= warmteoverdrachtcoëff. dek binnen	(W/(m ² ·K))
$h_{scherm1}$	= warmteoverdrachtcoëff. scherm boven	(W/(m ² ·K))
$h_{scherm2}$	= warmteoverdrachtcoëff. scherm onder	(W/(m ² ·K))

2.5. Opwarming bodem

Nu de voelbare warmte en de latente warmte afzonderlijk zijn berekend, kan de totale warmtestroom tussen de lucht en de bodem worden bepaald.

$$\Phi_{tot} = \Phi + \Phi_{la} \quad [31]$$

Φ_{tot} = totale warmtestroom (W)

Er is nu bepaald hoeveel J warmte per seconde wordt uitgewisseld tussen de lucht en de grond. Om de temperatuurverandering van de grond te bepalen, moet de massa van het op te warmen medium worden berekend. Met formule [8] uit paragraaf 2.1.1. wordt eerst het volume van de werkzame grondlaag bepaald. Door het volume van de werkzame grondlaag te vermenigvuldigen met de dichtheid van de grond, wordt de massa van de grond rondom de buis berekend.

$$m_g = I_g \cdot \rho_g \quad [32]$$

waarin:

$$m_g = \text{massa werkzame grond} \quad (\text{kg})$$

Door gebruik te maken van de soortelijke warmte van de grond en de totale warmtestroom, kan de temperatuurverandering van de grond worden berekend. De totale warmtestroom zal een negatief getal opleveren, aangezien het systeem deze warmte verliest aan de grond. Om geen negatieve temperatuurstijging te krijgen bij opwarming van de grond, is een minteken geplaatst.

$$\Delta T_g = -\frac{\Phi_{tot}}{c_g \cdot m_g} \quad [33]$$

waarin:

$$\Delta T_g = \text{temperatuurverandering grond per sec} \quad (\text{K/s})$$

2.6. Uitblaastemperatuur

Een andere variabele in dit systeem is de uitblaastemperatuur. De energie die wordt uitgewisseld met de grond is mede afhankelijk van de afname of toename van de temperatuur van de lucht. Hierdoor is het belangrijk dat ook de uitblaastemperatuur wordt berekend.

Een andere manier om de voelbare warmte te beschrijven is ^{9}:

$$\Phi = \dot{m}_l \cdot c_{p,l} \cdot (T_{l,eind} - T_{l,begin}) \quad [34]$$

De temperatuur aan het eind van de buis kan worden bepaald door formule [34] gelijk te stellen aan formule [1]. Het omschrijven van deze vergelijking levert een formule voor het berekenen van de uitblaastemperatuur:
Voor uitleg, zie bijlage C.

$$T_{l,eind} = T_g - (T_g - T_{l,begin}) \cdot e^{\left(-\frac{U \cdot P \cdot l}{\dot{m}_l c_{p,l}}\right)} \quad [35]$$

Waarin:

$$\begin{aligned} \dot{m}_l &= \text{massastroom lucht} & (\text{kg/s}) \\ P &= \text{omtrek buis} & (\text{m}) \end{aligned}$$

Deze formule geldt voor buizen van alle dwarsdoorsnedenvormen. De massastroom kan worden berekend door de dichtheid te vermenigvuldigen met de luchtsnelheid en het doorstromend oppervlak van de buis. Voor een cirkelvormige buis geldt uiteindelijk de volgende formule:

$$T_{l,eind} = T_g - (T_g - T_{l,begin}) \cdot e^{\left(-\frac{U \cdot A}{\pi \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l}}\right)} \quad [36]$$

De luchtdichtheid is afhankelijk van de temperatuur en de hoeveelheid waterdamp. De luchtdichtheid kan worden berekend door ^{10}:

$$\rho_{lucht} = \frac{P_d}{R_d \cdot (T + 273,15)} + \frac{P_v}{R_v \cdot (T + 273,15)} \quad [37]$$

waarin:

P_d	= partiële druk droge lucht	(Pa)
R_d	= specifieke gas constante droge lucht	(J/kg·K)
P_v	= dampdruk water	(Pa)
R_v	= specifieke gas constante waterdamp	(J/kg·K)

met:

$$P_a = P_v + P_d \quad [38]$$

$$P_v = RV \cdot P_{sat} \quad [39]$$

$$P_{sat} = 6,112 \cdot e^{\left(\frac{17,67 \cdot T}{T+243,5}\right)} \quad [40]$$

waarin:

P_a	= de atmosferische luchtdruk	(Pa)
P_{sat}	= verzadigde dampdruk	(hPa)

3. Metingen

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten besproken. Eerst zal alles rondom de proefopstelling worden behandeld. Hierna zal worden gekeken naar de meetgegevens.

3.1. De proefopstelling

De meetopstelling ligt in de kas van de broers Frans en Piet van Antwerpen in 's-Gravenzande.

Het begon met het idee om kaslucht te drogen door koude lucht van boven het schermdoek aan te zuigen en via een lange verticale pvc-buis onder de teeltgoten weer uit te blazen. Echter zou dit in de winter niet werken, omdat de lucht boven het scherm dan rond de 5 graden zal zijn en daardoor koelschade kan veroorzaken.

Vervolgens kwamen ze tot de oplossing de buizen in te graven. Door koude lucht door deze buizen te blazen, wordt energie uit de warmere grond gehaald en wordt de koude lucht opgewarmd. Doordat de temperatuur van de lucht stijgt, zal de relatieve vochtigheid afnemen, waardoor de lucht relatief droger wordt. Door in de zomer warme lucht door de buis te blazen kan de grond worden opgewarmd, waardoor de energie in de grond wordt opgeslagen. Bij deze vorm kan ook condensatie optreden, wanneer de buistemperatuur lager ligt dan het dauwpunttemperatuur van de aangezogen lucht. Deze condensatie stroomt via gaten aan de onderkant van de buis de grond in. De absolute vochtigheid van de lucht neemt hierdoor af, waardoor de lucht ook relatief gezien droger wordt.

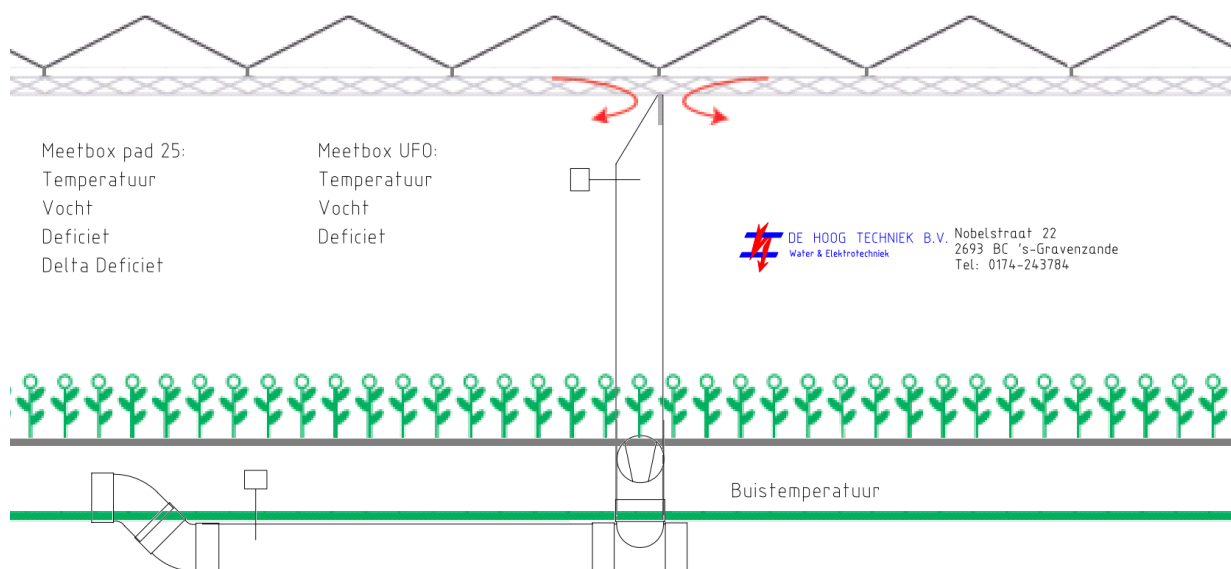


Figuur 1: door overdag kaslucht door ingegraven pvc-buizen van 30 m te blazen, wordt de warmte aan de grond afgegeven of opgenomen (links). Met behulp van badkamerventilatoren wordt de lucht door de kas verspreid (rechts) ^{11}.

De opstelling bestaat momenteel uit 35 grondbuizen, ieder 30 meter lang. De buizen zijn van pvc met een buitendiameter van 160 mm en een wanddikte van 4 mm. De buizen liggen vlak onder de grond en zijn afgedekt met noppenfolie, zodat de warmtestroom tussen de grond en de kaslucht verwaarloosd kan worden.

3.2. De metingen

Door De Hoog Techniek en Greenspec is een speciaal programma ontwikkeld, waarmee het luchtcirculatiesysteem wordt geregeld. Aangezien de zomer en winter om verschillende instellingen vragen, is hier rekening mee gehouden. Het hoofdscherm van dit programma is te zien in figuur 2 en is tevens een schematische weergave van het systeem.



Figuur 2: schematische weergave van de grondbuis. Tevens is dit het hoofdscherm van het programma dat is ontwikkeld door Greenspec.

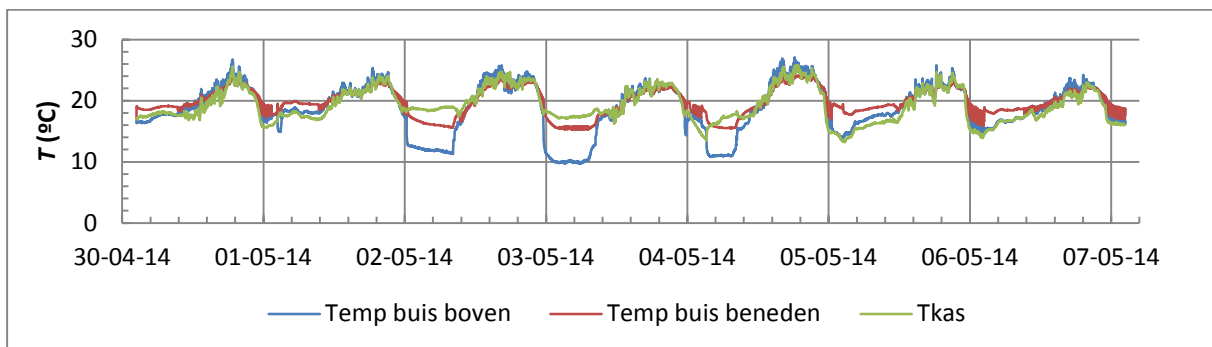
Met dit programma wordt het systeem ook gemonitord. Dat wil zeggen dat er allerlei meetsensoren in het systeem zitten, die bijvoorbeeld de begin- en eindtemperatuur en de luchtsnelheid in de buis meten. Deze gegevens zijn vervolgens zichtbaar voor de gebruiker en worden continue geüpdatet. Indien gewenst kunnen gegevens van een langere periode worden geplot.

Als er wordt gekeken naar de meetgegevens uit de week van 1 mei t/m 7 mei, kan een indicatie worden gegeven over de werking van de grondbuis. Deze week is een willekeurig gekozen week uit de meetgeschiedenis.

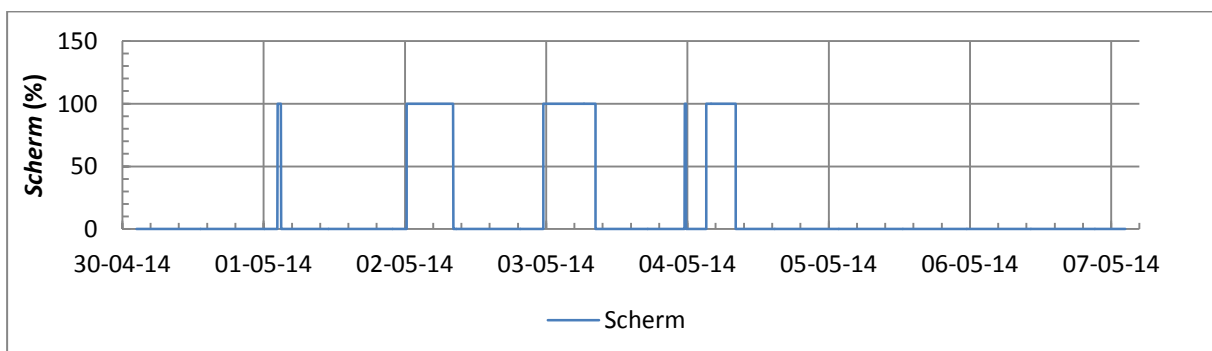
Uit figuur 3 blijkt dat de aanzuigtemperatuur redelijk goed overeenkomt met de gemeten kasttemperatuur. Echter zijn er een aantal momenten waar de aanzuigtemperatuur een graad of 6 á 7 lager is dan de kasttemperatuur. Als dit wordt vergeleken met schermstand in figuur 4, valt op dat deze dalen overeenkomen met periodes waarin het scherm dicht is.

Op het moment dat het temperatuurverschil tussen buiten en binnen te groot is zal het scherm dicht gaan, zodat het warmteverlies wordt beperkt. De lucht tussen het scherm en het dek zal een stuk lager zijn dan de kasttemperatuur, waardoor de gemeten aanzuigtemperatuur daalt.

Ook laat figuur 3 het gemeten temperatuurverloop aan het begin en eind van de buis in deze zelfde periode zien. In de periodes waar het scherm dicht en de aanzuigtemperatuur laag is, is de uitblaastemperatuur een graad of 4 á 5 hoger dan de aanzuigtemperatuur. Doordat de lucht door de warmere grond gegaan is, moet er energie uit deze grond zijn onttrokken. Hieruit blijkt dus dat de bodem als tijdelijke warmtebron kan functioneren. Overdag wordt de bodem opgewarmd door de warme lucht en 's nachts warmt de bodem de koudere lucht op.



Figuur 3: kasttemperatuur, aanzuigtemperatuur en uitblaastemperratuur van de grondbuis als functie van tijd.



Figuur 4: in deze grafiek is te zien of het scherm open of dicht is als functie van tijd. Hierin is 100 % een dicht scherm.

4. Simulatie

In dit hoofdstuk zal het simulatiemodel worden besproken. Het idee was een model te maken, waarmee de grondbuis kan worden nagebootst. Hierdoor kan een beeld worden gevormd van de warmtestromen die een rol spelen in de buis. Als bekend is wat er gebeurt in de grondbuis, kan worden gekeken naar het optimaliseren van het systeem.

De simulatie zal worden gemaakt in Matlab, omdat er met veel gegevens gewerkt zal worden en veel berekeningen gedaan worden. Matlab is een programma dat goed overweg kan met grote hoeveelheden gegevens en tevens de berekeningen snel uitvoert.

4.1. De grondbuis

Om het systeem te kunnen simuleren, dient het model te worden voorzien van bepaalde input. Uit de meetgegevens van hoofdstuk 3 worden de datum/tijd, de lichtsnelheid in de buis, de aanzuigtemperatuur en de luchtvochtigheid hiervoor gebruikt. Deze gegevens bestaan uit metingen van een willekeurige week (1 mei 2014 t/m 7 mei 2014). Ook heeft het systeem een aantal constanten, waaronder:

- Eigenschappen van de buis
- Eigenschappen van de lucht
- Eigenschappen van de grond

Met behulp van de input wordt uiteindelijk de grondtemperatuur en de uitblaasttemperatuur berekend. Deze berekende uitblaasttemperatuur kan worden vergeleken met de gemeten uitblaasttemperatuur, waaruit kan worden geconcludeerd of de berekeningen overeenkomen met de praktijk.

Het vochtgehalte wordt alleen gemeten in de kas. Op het moment dat het scherm dicht is, is de temperatuur boven het scherm een stuk lager en kan het dus ook minder vocht bevatten. Door eerst de temperatuur boven het scherm te bepalen, kan het maximale vochtgehalte boven het scherm worden berekend. Het vocht uit de kas stroomt door het schermdoek en verplaatst zich door kieren naar boven. Als de dampconcentratie in de kas hoger is dan de maximale dampconcentratie in de nok, dan zal het verschil condenseren.

De berekeningen worden uitgevoerd in een lus. De reden hiervoor is dat de uitblaasttemperatuur en de grondtemperatuur elke lus veranderen. Het model gebruikt de gegevens van de vorige lus om de nieuwe grondtemperatuur en uitblaasttemperatuur te bepalen. Dit houdt in dat er wordt gesommeerd over de periode tussen het huidige en het vorige meetpunt. Dit tijdsinterval is ± 1 min.

De lus zelf bestaat uit een aantal stappen. Eerst wordt met formule [12] het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil berekend. Doordat er wordt gesommeerd over een bepaalde tijdsduur, bestaat de kans dat de grondtemperatuur tussen de aanzuigtemperatuur en de uitblaasttemperatuur komt te liggen. Aangezien logaritmische functies niet met negatieve getallen werken, zullen er fouten optreden. Ook als de grondtemperatuur gelijk is aan de

luchttemperatuur treden deze fouten op. Mocht dit gebeuren, zal $\Delta T = 0$ worden gebruikt.

Hierna wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt bepaald, zodat alle grootheden bekend zijn om de voelbare warmtestroom te berekenen.

De volgende stap is het bepalen van de latente warmte.

Eerst worden formules [21] en [22] gebruikt om de buistemperaturen aan het begin en het eind van de buis te berekenen en formule [20] voor het berekenen van de dauwpunttemperatuur. De ingeblazen lucht kan alleen tegen de buiswand condenseren, waardoor moet worden bepaald op welk punt in de buis de dauwpunttemperatuur van de ingeblazen lucht lager is dan de buistemperatuur. Vervolgens worden bij deze temperaturen de dampconcentraties bepaald. Om de dampconcentratie aan het eind van de buis te bepalen, wordt een RV van 100% gebruikt. Dit gaat goed, omdat deze concentratie alleen wordt gebruikt als er condensatie op treedt en dan is het dampgehalte vanaf het dauwpunt tot aan het eind van de buis 100%.

De fractie van de buis waar condensatie optreedt, geldt als correctie factor op het oppervlak en heeft zodoende een waarde tussen 0 en 1. Als met formule [25] het gemiddelde concentratieverschil wordt berekend, zijn alle variabelen bekend voor het berekenen van de latente warmte.

Door de twee warmtestromen te sommeren, kan worden berekend hoeveel energie totaal per seconde tussen de lucht en de grond wordt uitgewisseld. Aan het einde van de lus worden de nieuwe startwaarden voor de grondtemperatuur en uitblaasttemperatuur berekend voor de volgende lus.

Met behulp van de totale warmtestroom, kan worden berekend hoeveel graden de werkzame grondlaag rondom de buis per seconde opwarmt. Door te bepalen hoeveel seconden er tussen het huidige meetpunt en het vorige meetpunt zit, kan de nieuwe grondtemperatuur worden berekend.

Om een idee te krijgen van de hoeveelheid energie die de lucht en de grond uitwisselen, wordt gesommeerd over alle positieve en negatieve warmtestromen. Een positieve warmtestroom betekent dat de lucht energie opneemt uit de grond, waardoor de temperatuur van de lucht toeneemt. Een negatieve warmtestroom houdt in dat de lucht energie afstaat aan de grond en zo dus in temperatuur afneemt.

Hiernaast wordt het geproduceerde condensatievocht berekend in g/s. Door deze te vermenigvuldigen met het tijdverschil in seconden en door 1000 te delen, kan worden bepaald hoeveel liter condensatievocht er ontstaat.

Uiteindelijk wordt alle relevante data in grafieken uitgezet.

4.2. Optimalisatie lus

Het script van de simulatie van de grondbuis is gekopieerd en aangepast, zodat er kan worden gekeken naar het effect van het variëren van constanten.

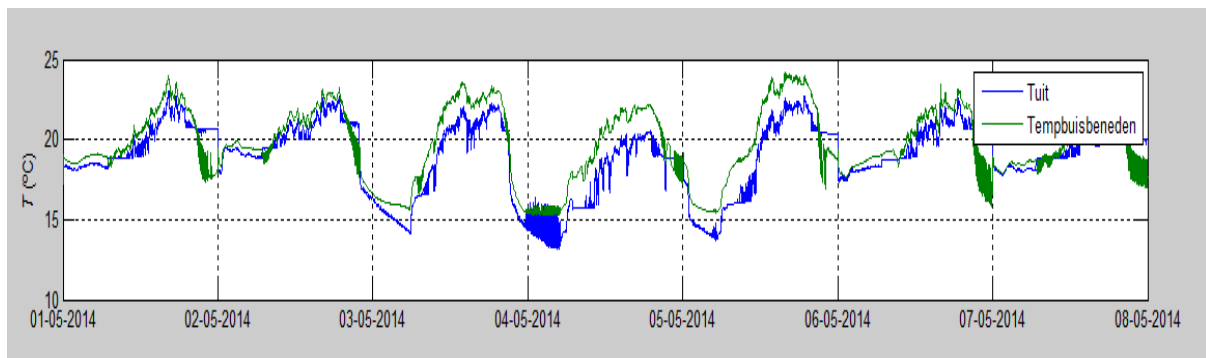
Alle berekeningen worden omvallen door een lus. Als bijvoorbeeld het effect van de buislengte onderzocht moet worden, moet deze constante buiten de lus worden geplaatst. Alle berekeningen worden vervolgens uitgevoerd met een buislengte van bijvoorbeeld 30 m en uitgezet in een aantal grafieken.

Aan het eind van de lus wordt de buis bijvoorbeeld met 10 m verlengd, waarna de lus opnieuw doorlopen wordt. Aan het begin van de lus dient ook te worden opgegeven hoe vaak de lus doorlopen moet worden. Hiermee wordt aangegeven voor hoeveel verschillende buislengtes de berekeningen moeten worden gedaan. De nieuwe grafieken worden aan de oude grafieken toegevoegd, zodat de veranderingen ten opzichte van de vorige berekeningen duidelijk te zien zijn.

5. Resultaten

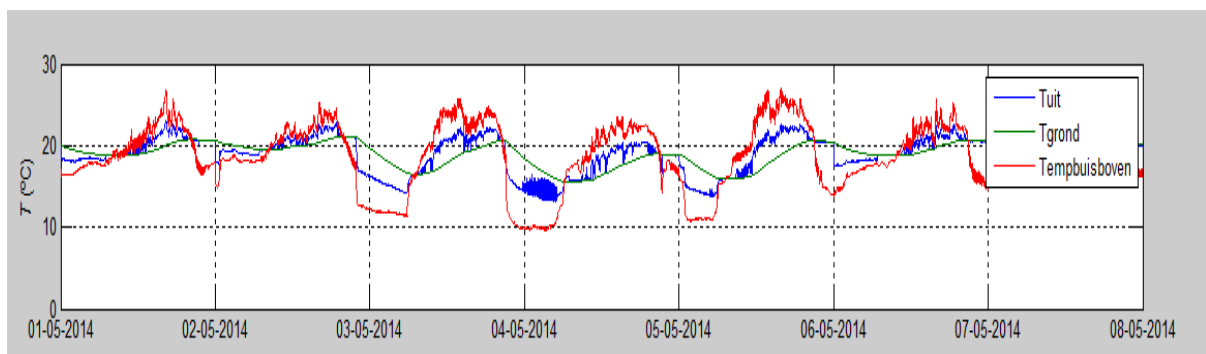
Nadat alle berekeningen zijn gedaan, worden de nuttige gegevens in grafieken uitgezet. Eén van deze grafieken laat het verschil zien tussen de gemeten en berekende uitblaastemperatuur. Als invoer in het model wordt de gemeten aanzuigtemperatuur gebruikt. Als de berekeningen kloppen, zouden de berekende en gemeten uitblaastemperatuur overeen moeten komen. Als voorbeeld wordt dezelfde week als in paragraaf 3.2. gebruikt. Als grondsoort is gekozen voor droge zandgrond. Dit omdat zandgrond de meest voorkomende grondsoort in Nederland is.

In de onderstaande figuur is te zien dat de gemeten en berekende uitblaastemperaturen redelijk goed overeen komen. Dit betekent dat de berekeningen moeten kloppen. Kleine verschillen kunnen worden verklaard door verschillen in eigenschappen van het systeem. Ook zal het temperatuurprofiel van de grond een belangrijke rol spelen. In de berekeningen is uitgegaan van een uniforme werkzame grondlaag. In werkelijkheid zal de grond dicht tegen de buis sneller van temperatuur veranderen dan de grond iets verder van de buis.



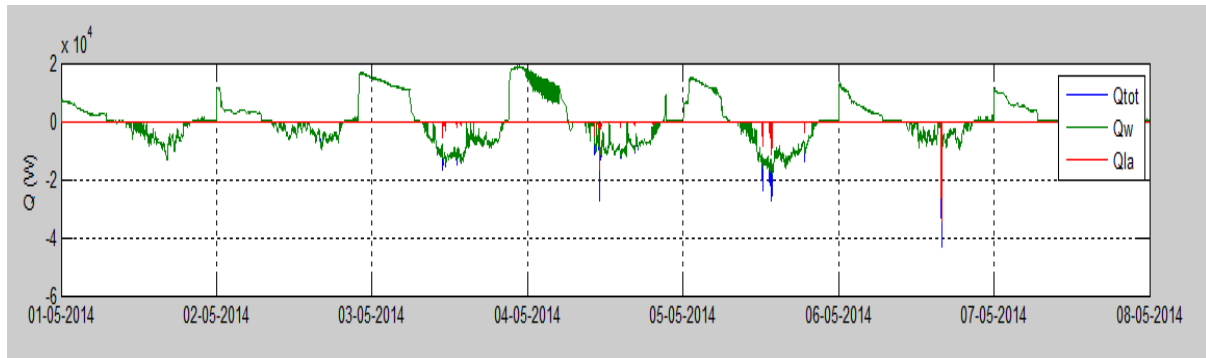
Figuur 5: uitblaastemperatuur berekend (blauw), uitblaastemperatuur gemeten (groen).

Er is nu aangetoond dat de berekeningen kloppen. De volgende grafiek laat de verschillen tussen de grondtemperatuur, aanzuigtemperatuur en uitblaastemperatuur zien. Dit geeft informatie over de momenten waarop de temperatuurverschillen het grootst zijn en dus de warmtestroom het grootst is.

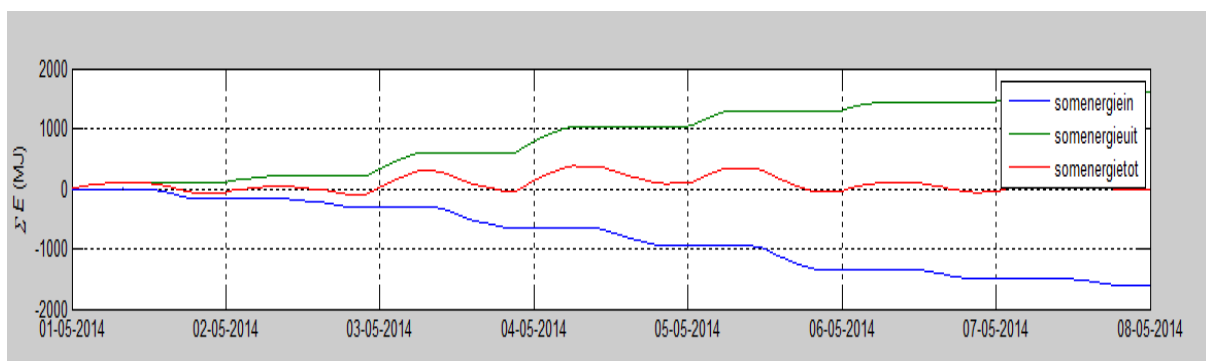


Figuur 6: de gemeten aanzuigtemperatuur (rood), de berekende grondtemperatuur (groen) en de berekende uitblaastemperatuur (blauw).

Door de berekende warmtestromen in een grafiek uit te zetten, kan de totale energieopslag van de bodem worden weergegeven. In de onderstaande figuur zijn de warmtestromen door het totaal aantal buizen te zien. Hierin is de negatieve warmtestroom, de warmtestroom van de lucht naar de grond. Door de warmtestromen over de totale week te sommeren, kan de energiebuffering van de grond worden bepaald. Door de 35 grondbuizen werd in deze week ongeveer 1600 MJ aan energie de grond overgedragen. Dit staat gelijk aan zo'n 50 m³ aardgas aan energie.

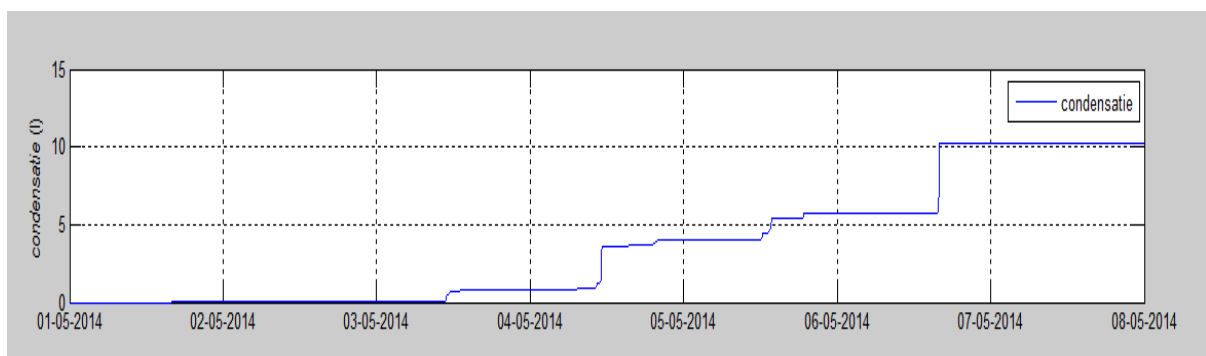


Figuur 7: de verschillende warmtestromen door het totaal aantal grondbuizen.



Figuur 8: de totale energiestroom gesommeerd over de week. Blauw is van lucht naar grond, groen is van grond naar lucht.

Door de latente warmtestroom te delen door de verdampingswarmte van water en te sommeren over de tijd, kan de condensatie in beeld worden gebracht. Zoals te zien in figuur 9 ontstaat er in deze week iets meer dan 10 l condensaat. Wat het effect van het condenseren is op de kas, zal worden behandeld in paragraaf 6.6.



Figuur 9: de productie van condensatievocht door het totaal aantal buizen, gesommeerd over de week.

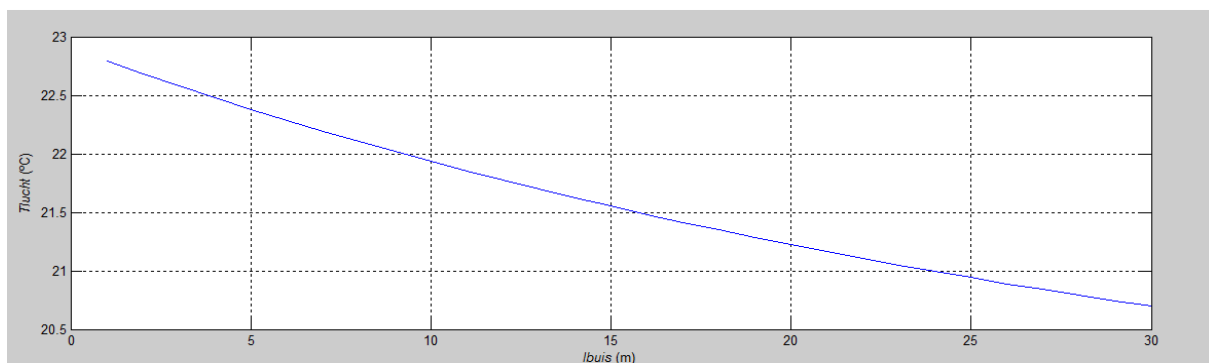
6. Optimalisatie

In paragraaf 4.2. is uitgelegd hoe het effect van het veranderen van systeemconstanten kan worden bepaald. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar verschillende aspecten in het systeem, waardoor een beeld kan worden gevormd over wat gedaan kan worden om het systeem te verbeteren. Er wordt weer gekeken naar de zelfde week als in paragraaf 3.2.

Bij alle berekeningen in dit hoofdstuk is gebruik gemaakt van de gemeten temperaturen. Het effect van de vorige meetpunten op de kas zal dus niet worden meegenomen in de berekeningen.

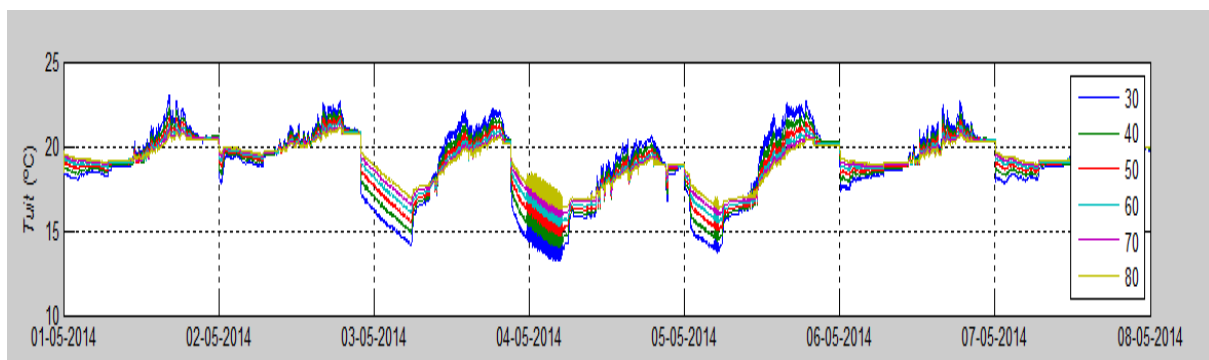
6.1. Buislengte

Op het moment dat warme lucht door de buis stroomt, zal deze energie afstaan aan de grond. De luchttemperatuur aan het eind van de buis zal hierdoor lager liggen dan de luchttemperatuur aan het begin van de buis. Dit is te zien in figuur 10. Hierin is de temperatuur van de lucht op een bepaald tijdstip berekend, als functie van verschillende posities in de buis.

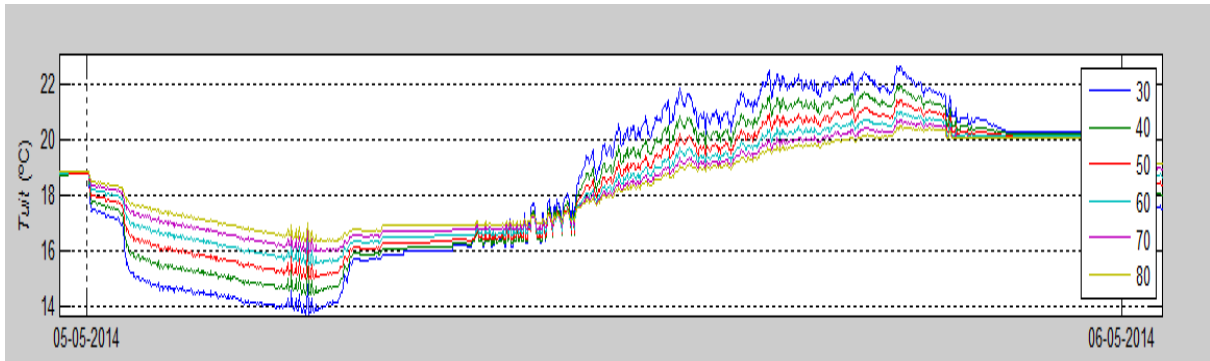


Figuur 10: over de gehele lengte van de buis, is op verschillende posities de luchttemperatuur berekend.

Figuur 11 laat de verschillen zien tussen de berekeningen bij verschillende buislengtes. Voor een duidelijker beeld is in figuur 12 ingezoomd op een bepaald stuk van de grafiek. Deze grafiek laat duidelijk zien hoe langer de buis, hoe groter het temperatuurverschil van de lucht tussen het begin en eind van de buis is. Het verschil tussen de verschillende lengtes wordt wel steeds kleiner, wat overeenkomt met de logaritmische temperatuurverdeling van de lucht in de buis.



Figuur 11: luchttemperatuur aan het eind van de buis berekend met verschillende buislengtes in (m) als input.



Figuur 12: luchttemperatuur aan het eind van de buis berekend met verschillende buislengtes in (m) als input, ingezoomd.

Bij een oneindig lange buis zal de uitblaastemperatuur uiteindelijk de grondtemperatuur aannemen. In de praktijk is dit niet haalbaar. Zoals uitgelegd in bijlage D, wordt uitgegaan van een thermisch rendement van de grondbuis van 80%.

Om achter de ideale buislengte te komen, wordt de lengte bepaald waarop het thermische rendement van 80% behaald is.

Hieronder is een voorbeeldberekening gedaan. De ingevulde waarden zijn afkomstig uit het simulatiemodel.

$$\eta = \frac{T_{l,eind} - T_{l,begin}}{T_g - T_{l,begin}} = 0,8 \quad [41]$$

$$\eta = 1 - e^{\left(\frac{U \cdot A}{\pi \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l}} \right)} = 0,8 \quad [42]$$

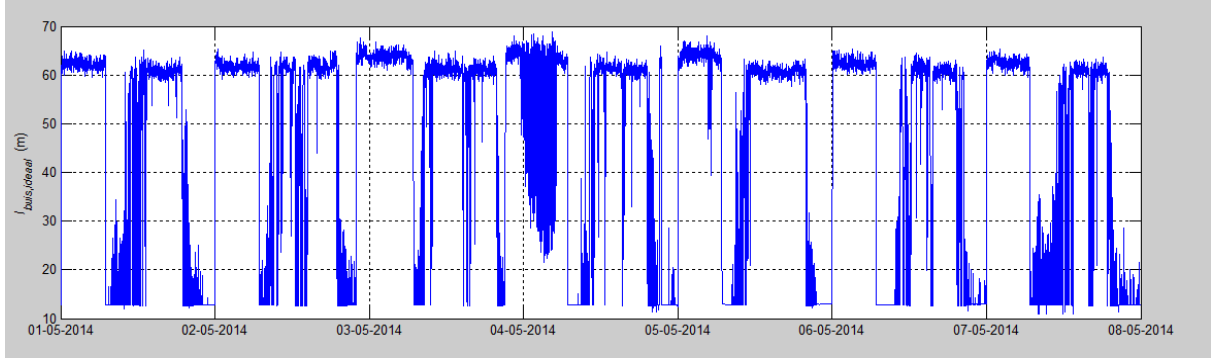
$$U \cdot A = -\ln(1 - \eta) \cdot \pi \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l} \quad [43]$$

$$l = \frac{-\ln(1 - \eta) \cdot \pi \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l} \cdot \left(\frac{1}{h_c \cdot D_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \lambda_b} + \frac{\sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e} \right)}{\pi} \quad [44]$$

$$l = \frac{-\ln(1 - 0,8) \cdot (0,5 \cdot 0,152)^2 \cdot 1,2073 \cdot 5 \cdot 1006 \cdot \left(\frac{1}{23,7653 \cdot 0,152} + \frac{\ln\left(\frac{0,160}{0,152}\right)}{2 \cdot 0,16} + \frac{0,6695 \cdot 0,1180}{0,7 \cdot 0,160} \right)}{\pi} = 64,50 \text{ m}$$

Echter kunnen de ingevulde waarden variëren, waardoor deze ideale lengte ook zou kunnen variëren. Als voor elk meetpunt deze berekening wordt gedaan, is het resultaat figuur 13. Het verloop van deze grafiek komt overeen met het verloop van de luchtsnelheid, wat inhoudt dat de ideale buislengte sterk afhankelijk is van de luchtsnelheid. De werking van de grondbuis verbetert bij afname van de luchtsnelheid.

De maximale gemeten luchtsnelheid die wordt bereikt, ligt rond de 5 m/s. Uit figuur 13 blijkt dat bij deze snelheid de meest ideale buislengte rond de 65 m ligt. Aangezien gebruik wordt gemaakt van gladde pvc-buizen, wordt de snelheid over de hele lengte van de buis gelijk verondersteld.



Figuur 13: ideale buislengte berekend.

Er kan ook worden gekeken wat de ideale luchtsnelheid is bij de huidige buislengte, zodat een thermisch rendement van 80% wordt verkregen.

$$l = -\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l} \cdot \left(\frac{1}{h_c \cdot D_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \lambda_b} + \frac{\sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e} \right) \quad [45]$$

$$l = -\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l} \cdot \left(\frac{1}{0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot \lambda_l} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \lambda_b} + \frac{\sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e} \right) \quad [46]$$

$$l = -\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l} \cdot \left(\frac{1}{0,027^{1,25} \cdot \frac{v_l \cdot D_i}{\nu} \cdot Pr^{0,4125} \cdot \lambda_l^{1,25}} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \lambda_b} + \frac{\sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e} \right) \quad [47]$$

$$l = -\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l} \cdot \left(\frac{\nu}{0,027^{1,25} \cdot v_l \cdot D_i \cdot Pr^{0,4125} \cdot \lambda_l^{1,25}} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \lambda_b} + \frac{\sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e} \right) \quad [48]$$

$$l + \frac{\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot c_{p,l} \cdot \nu}{0,027^{1,25} \cdot D_i \cdot Pr^{0,4125} \cdot \lambda_l^{1,25}} = - \frac{\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l} \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \lambda_b} - \frac{\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l} \cdot \sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e} \quad [49]$$

$$l + \frac{\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot c_{p,l} \cdot v}{0,027^{1,25} \cdot D_i \cdot Pr^{0,4125} \cdot \lambda_l^{1,25}} = v_l \cdot \left(- \frac{\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot c_{p,l} \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \lambda_b} - \frac{\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot c_{p,l} \cdot \sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e} \right) \quad [50]$$

$$v_l = \frac{teller}{noemer} \quad [51]$$

$$teller = l + \frac{\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot c_{p,l} \cdot v}{0,027^{1,25} \cdot D_i \cdot Pr^{0,4125} \cdot \lambda_l^{1,25}} \quad [52]$$

$$noemer = - \frac{\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot c_{p,l} \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \lambda_b} - \frac{\ln(1 - \eta) \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot c_{p,l} \cdot \sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e} \quad [53]$$

Het invullen van deze formule geeft:

$$teller = 30 + \frac{\ln(1 - 0,8) \cdot (0,5 \cdot 0,152)^2 \cdot 1,2 \cdot 1006 \cdot 0,0000151}{0,027^{1,25} \cdot 0,152 \cdot 0,71^{0,4125} \cdot 0,026^{1,25}}$$

$$noemer = - \frac{\ln(1 - 0,8) \cdot (0,5 \cdot 0,152)^2 \cdot 1,2 \cdot 1006 \cdot \ln\left(\frac{0,160}{0,152}\right)}{2 \cdot 0,16} - \frac{\ln(1 - 0,8) \cdot (0,5 \cdot 0,152)^2 \cdot 1,2 \cdot 1006 \cdot 0,6695 \cdot 0,1180}{0,7 \cdot 0,160}$$

$$v_l = 1,93 \text{ m/s}$$

Voor deze grondbuis met een lengte van 30 m, is het thermisch rendement van de buis 80% wanneer de lucht zich met een snelheid van 1,93 m/s door de buis verplaatst.

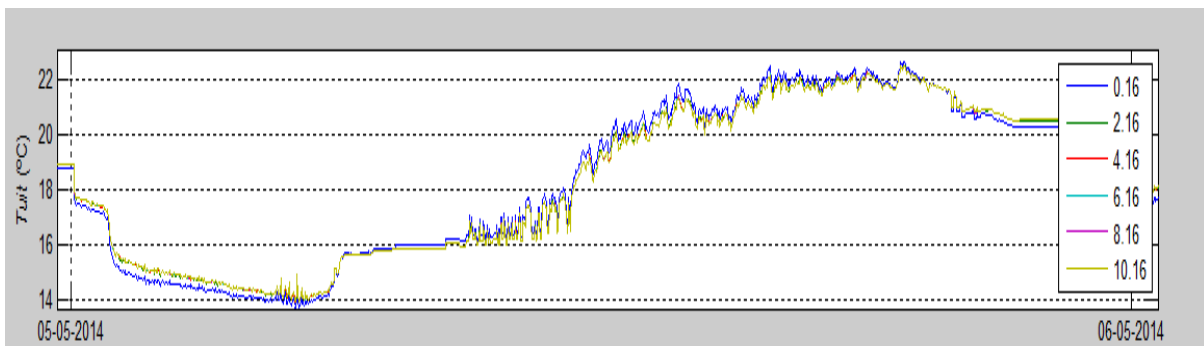
De luchtdichtheid en het getal van Prandtl zijn afhankelijk van de luchtvochtigheid, daarom wordt gesteld dat $\rho_{lucht} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ en $Pr = 0,71 \text{ kg/m}^3$. De stroming wordt in deze berekening turbulent verondersteld.

In bijlage G is een figuur weergegeven met de ideale luchtsnelheid als functie van de lengte van de grondbuis. Hieruit blijkt dat de lucht turbulent is bij een luchtsnelheid hoger dan 1 m/s.

6.2. Buiseigenschappen

De warmtestroom van de lucht naar de grond, is mede afhankelijk van de warmteweerstand en dus van de materiaaleigenschappen. De eigenschappen van de grondbuis zijn factoren die een rol spelen bij de warmteoverdracht. Er wordt hier onderscheid gemaakt tussen het materiaal, de dikte en de diameter van de grondbuis.

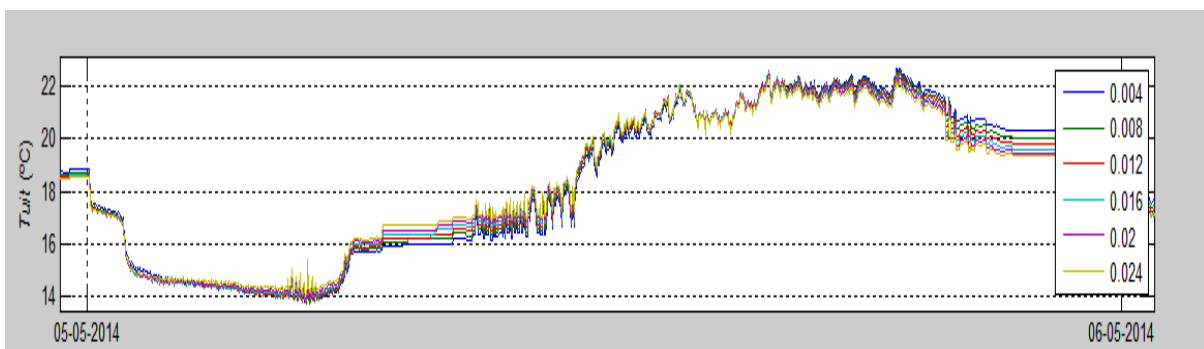
De buizen uit de meetopstelling zijn gemaakt van PVC en hebben een warmtegeleidingscoëfficiënt $\lambda_b = 0,16 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Het verhogen van deze constante laat het effect zien van beter warmtegeleidende buizen. In figuur 14 is te zien dat het verhogen van de warmtegeleidingscoëfficiënt nauwelijks effect heeft op het systeem. Hogere waarden zullen slechts iets beter geleiden. Een $\lambda_b = 10,16 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ gaat richting de metalen ($\lambda_{staal} = 50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$).



Figuur 14: luchttemperatuur aan het eind van de buis berekend met verschillende warmtegeleidingscoëfficiënten in ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) als input, ingezoomd.

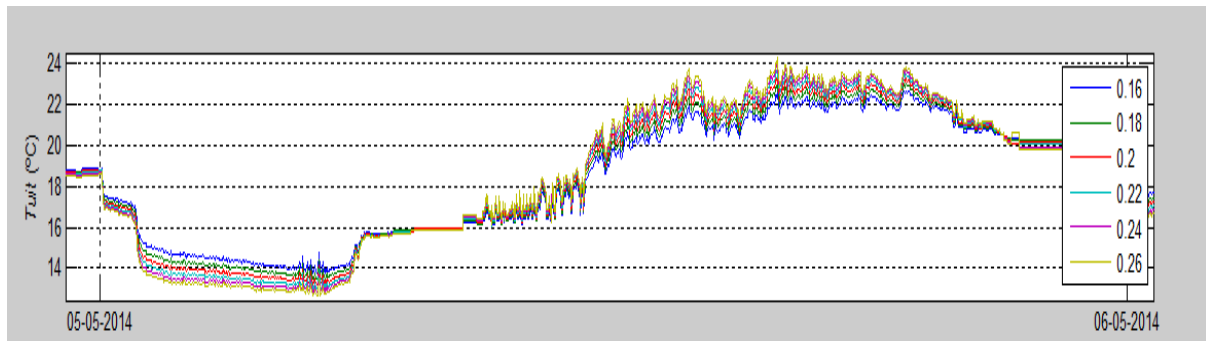
Door de dikte van de buis te verhogen, zal minder energie van de lucht overgedragen worden aan de grond. Een logisch verschijnsel, aangezien uit formule [3] blijkt dat de warmteweerstand groter wordt bij toenemende buisdikte.

Uit figuur 15 blijkt dat het verschil in temperatuur tussen de diktes echter relatief klein is. Er kan het best worden gekozen voor een dunne buiswand. Ook doordat de grondbuizen onder de teeltgoten liggen, waardoor de druk op de buizen minimaal is. Bijkomend effect is dat een dikkere buis zorgt voor een kleinere binnendiameter, waardoor de snelheid in de buis hoger wordt en het rendement afneemt.



Figuur 15: luchttemperatuur aan het eind van de buis berekend met verschillende buisdiktes in (m) als input, ingezoomd.

Figuur 16 laat zien dat het vergroten van de buisdiameter een groter verschil levert dan de vorige twee eigenschappen. Ook zal de totale warmtestroom toenemen, omdat het oppervlak groter is. Bij de berekeningen wordt voor alle buisdiameters de zelfde luchtsnelheid gebruikt. In de praktijk zal bij een grotere buisdiameter de luchtsnelheid lager worden, wat het rendement verhoogt.

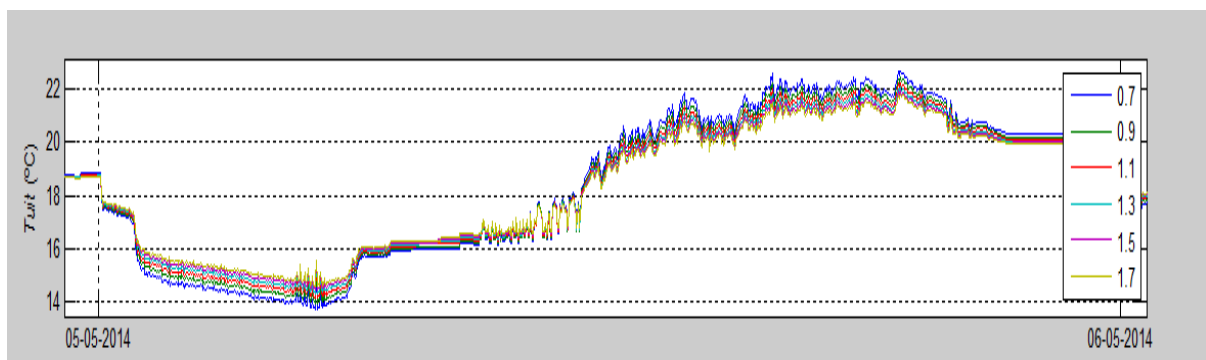


Figuur 16: luchttemperatuur aan het eind van de buis berekend met verschillende buisdiameters in (m) als input, ingezoomd.

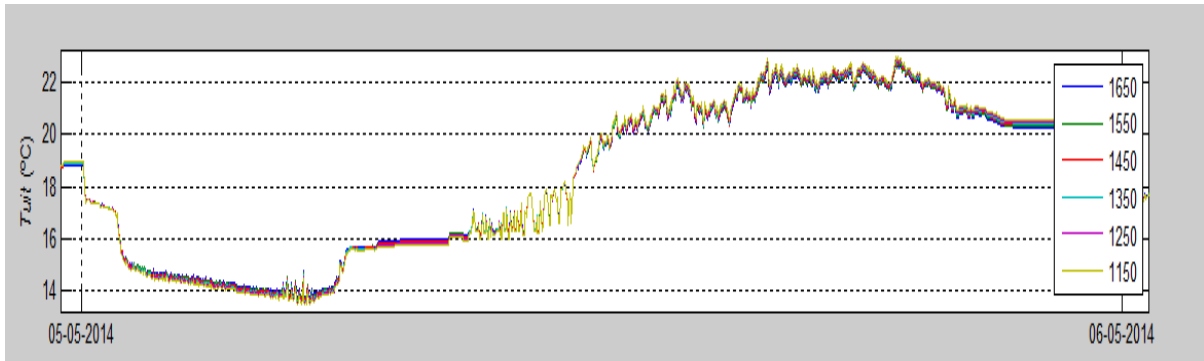
6.3. Grondeigenschappen

De warmteopname van de grond wordt bepaald door de grondeigenschappen. Deze eigenschappen bestaan uit de dichtheid, de soortelijke warmte en de warmtegeleidingscoëfficiënt. Uit de drie onderstaande figuren blijkt, dat de dichtheid van de grond weinig effect heeft. De warmtegeleidingscoëfficiënt heeft echter wel effect op het systeem. Een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt zorgt voor een betere warmtegeleiding door de grond. Doordat de indringdiepte groter wordt, zal de grond minder snel opwarmen en stijgt de warmtebuffering. De soortelijke warmte heeft effect op de snelheid waarmee de grond opwarmt. Een kleine soortelijke warmte zorgt dat de grond snel opwarmt, wat voor een lagere warmteopname zal lijden.

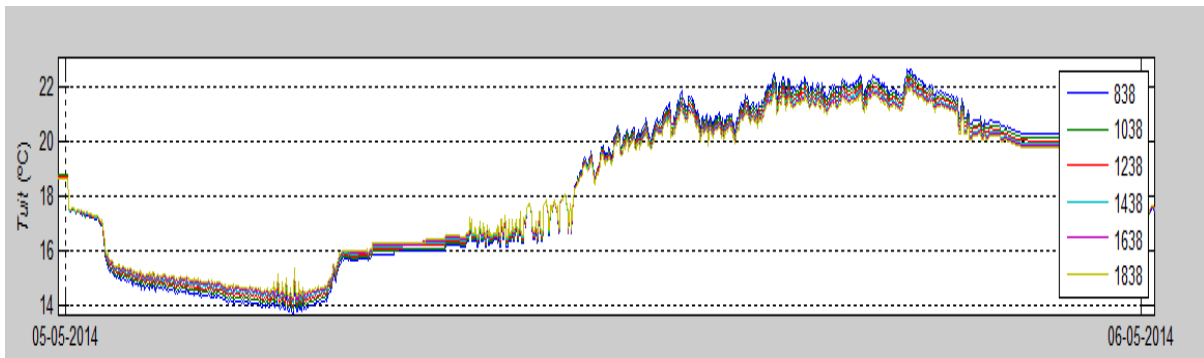
In het model wordt de grond als een homogeen materiaal beschouwd, waarbij de eigenschappen van de grond onafhankelijk van het vochtgehalte en de temperatuur zijn.



Figuur 17: luchttemperatuur aan het eind van de buis berekend met verschillende warmtegeleidingscoëfficiënten in (W/(m·K)) als input, ingezoomd.



Figuur 18: luchttemperatuur aan het eind van de buis berekend met verschillende dichtheden in (kg/m³) als input, ingezoomd.



Figuur 19: luchttemperatuur aan het eind van de buis berekend met variërende soortelijke warmte in (J/(kg·K)) als input, ingezoomd.

6.4. Afstand tussen de buizen

Om de minimale afstand tussen de buizen te bepalen, zodat de effecten van de buizen elkaar niet overlappen, dient eerst de indringdiepte te worden bepaald. De maximale indringdiepte bij een grondbuis kan worden berekend door de indringdiepte door een plat vlak te vermenigvuldigen met de correctiefactor.

$$\sigma \cdot d_g = \frac{-D_e + \sqrt{D_e^2 + 4 \cdot d_g \cdot D_e}}{2 \cdot d_g} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{\lambda_g}{\rho_g \cdot c_g}}{\frac{2 \cdot \pi}{t_p}}} \quad [54]$$

$$\sigma \cdot d_g = \frac{-D_e + \sqrt{D_e^2 + 4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_g \cdot t_p}{2 \cdot \pi \cdot \rho_g \cdot c_g}} \cdot D_e}}{2} \quad [55]$$

Uit deze formule blijkt dat de dikte van de werkzame grondlaag afhankelijk is van de eigenschappen van de grond. In de tabel in bijlage E staan de grondeigenschappen voor verschillende grondsoorten. Voor de berekeningen wordt gebruik gemaakt van de eigenschappen van een droge zandbodem^{14}.

$$d_g \cdot \sigma = \frac{-0,160 + \sqrt{0,160^2 + 4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1650 \cdot 838}} \cdot 0,160}{2} = 0,079 \text{ m}$$

De maximale indringdiepte rond de buis na een dag heeft bij de gegeven grondeigenschappen een dikte van 7,9 cm. Omdat kan worden gesteld dat na een afstand $d_g \cdot \sigma$ vanaf de buis de bodemtemperatuur constant is, is de minimale afstand tussen twee buizen $2 \cdot d_g \cdot \sigma$. Het overlappen van de werkzame grondlagen zou voor een verslechterd effect zorgen.

Doordat de maximale indringdiepte relatief klein is, hoeft de grondbuis niet diep worden ingegraven, wat scheelt in de aanlegkosten van het systeem. Hierbij wordt het effect van de kas zelf op de grond verwaarloosd. Dit is gedaan, omdat er noppenfolie is aangebracht tussen de grond en kaslucht.

6.5. Effect temperatuur op kas

De warmte uitwisseling tussen de grond en de lucht zorgt ervoor dat de uitgaande lucht een andere temperatuur heeft dan de ingaande lucht. Deze temperatuurverandering zorgt ook voor een verandering van de kastemperatuur. De mate waarin de ventilatie effect heeft op de kastemperatuur is afhankelijk van de temperatuurverandering in de buis en het luchtdebiet. Het luchtdebiet kan worden bepaald door:

$$q = \pi \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot D_i\right)^2 \cdot v_l \quad [56]$$

met:

$$q = \text{luchtdebiet} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

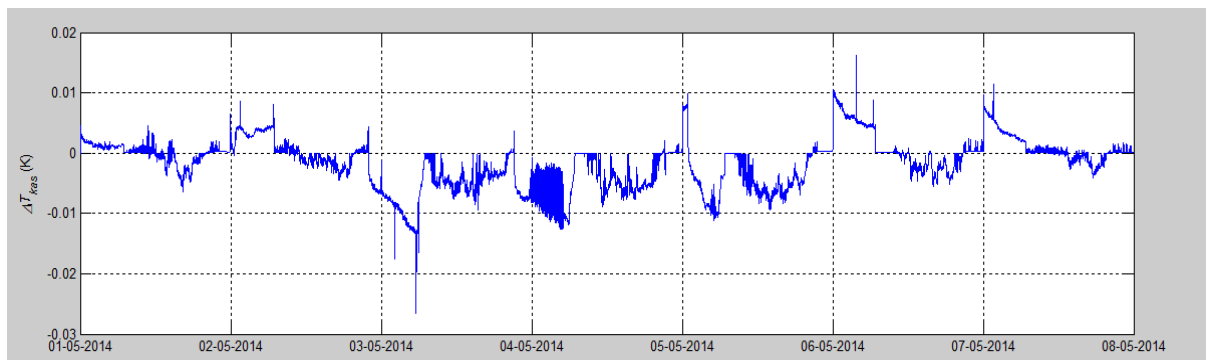
De opwarming van de kas wordt berekend door:

$$\Delta T_{kas} = \frac{(I_{kas} \cdot T_{kas} + q \cdot (T_{l,eind} - T_{kas}))}{I_{kas}} - T_{kas} \quad [57]$$

waarin:

$$\begin{aligned} \Delta T_{kas} &= \text{temperatuurverandering kas per sec.} & (\text{K/s}) \\ I_{kas} &= \text{volume van de kas} & (\text{m}^3) \end{aligned}$$

Door uit te gaan van kasafmetingen van 135 x 100 x 6, kan per data punt worden berekend hoeveel de kastemperatuur zou stijgen door grondbuisventilatie. In onderstaande figuur is te zien dat de maximale temperatuurverandering per tijdsinterval van ± 1 min, ongeveer 0,01 K is. Ook blijkt dat in deze periode de grondbuis over het algemeen een koelend effect heeft op de kas.



Figuur 20: de berekende temperatuurverandering door grondbuisventilatie.

6.6. Effect vocht op kas

Voor de luchtvochtigheid kan hetzelfde worden gedaan als in de vorige paragraaf. Het idee achter het ventileren met grondbuizen was het drogen van de kaslucht. In paragraaf 2.4. is uitgelegd hoe de absolute vochtigheid van de lucht aan het begin van de buis wordt berekend. Door de dampstroom hierbij op te tellen, kan de dampconcentratie aan het eind van de buis worden berekend.

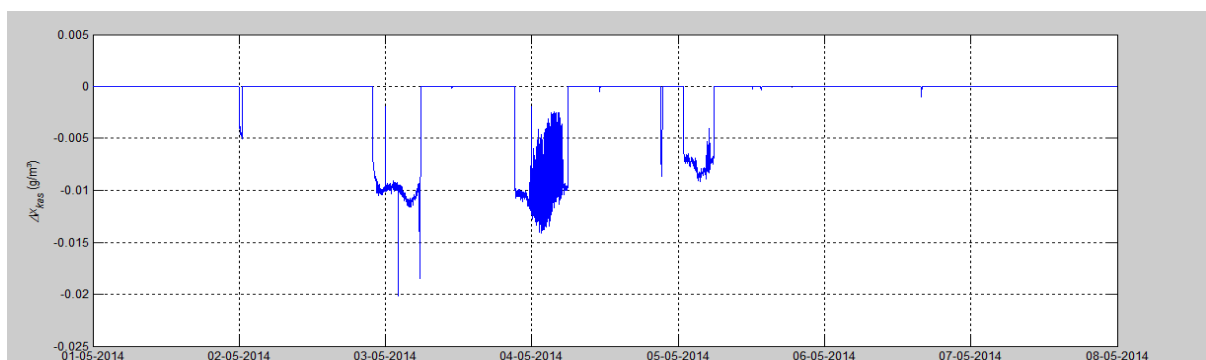
Om de verandering van dampconcentratie in de kas te bepalen, wordt formule [57] gebruikt met dampconcentraties in plaats van temperaturen. Dit levert:

$$\Delta x_{kas} = \frac{(I_{kas} \cdot x_{kas} + q \cdot (x_{l,eind} - x_{kas}))}{I_{kas}} - x_{kas} \quad [58]$$

waarin:

Δx_{kas}	= verandering dampconcentratie per sec.	((g/m ³))/s)
x_{kas}	= dampconcentratie kas	(g/m ³)
$x_{l,eind}$	= dampconcentratie lucht eind buis	(g/m ³)

Onderstaande figuur laat het resultaat van deze berekening zien. Duidelijk is dat het grootste effect wordt bereikt in de periodes waarin de schermen dicht zijn. Hierin wordt de kaslucht per tijdsinterval van ± 1 min zo'n $8 \cdot 10^{-3}$ g/m³ droger. Condensatie levert een kleine bijdrage, maar dit valt in het niet bij het effect van deze schermperiodes.



Figuur 21: de berekende verandering in absolute vochtigheid door grondbuisventilatie.

Op koudere dagen is het scherm vaak gesloten om warmteverliezen te beperken. Dichte schermen zorgen ervoor dat de luchtvochtigheid hoog kan oplopen, wat voor vochtproblemen kan zorgen.

Uit figuur 21 blijkt dat de grondbuizen op deze momenten voor een drogend effect zorgen. Bijkomend effect is dat de luchtramen minder vaak en minder ver open hoeven. Hierdoor zal er ook een stuk minder warmte verloren gaan en hoeft er minder gestookt te worden, wat scheelt in het gasverbruik. Hoeveel precies bezuinigd kan worden, zal moeten blijken uit een vervolgonderzoek.

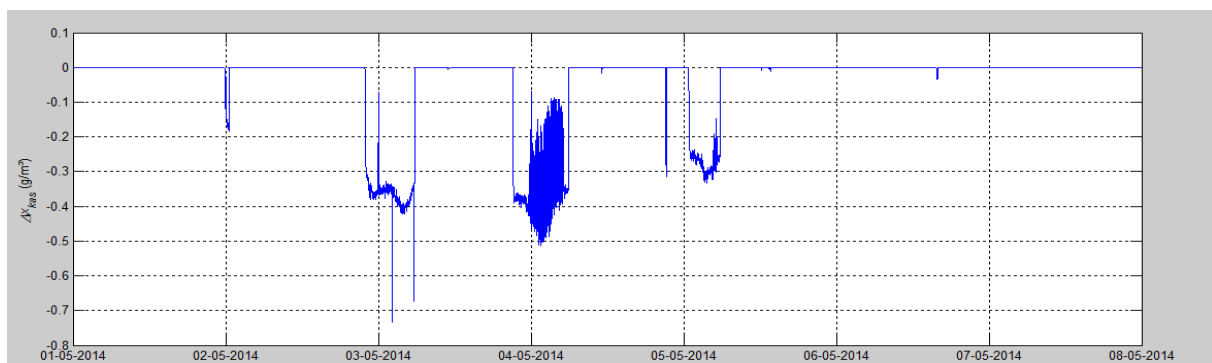
6.7. Bodem vol met grondbuizen

Uit vorige twee paragrafen is gebleken dat de 35 grondbuizen uit het voorbeeld een beperkt effect hebben op de kas. In deze paragraaf zal worden onderzocht wat het effect is als de bodem vol wordt gelegd met grondbuizen.

De ruimte die één buis nodig heeft, is de buis zelf plus aan beide kanten de maximale indringdiepte na een dag. Eén buis heeft dus $0,16 + 2 \cdot 0,079 = 0,318$ m ruimte nodig. Bij een kas van 135 m lang, is er ruimte voor 424 buizen naast elkaar. Bij een kas van 100 m breed passen drie buizen achter elkaar, wat een totaal van 1272 grondbuizen oplevert.

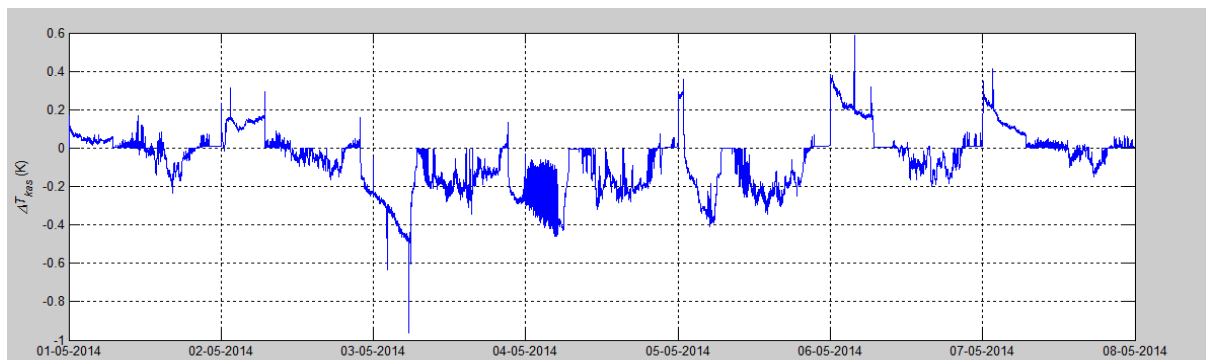
Het verhogen van het aantal buizen zal geen effect hebben op de grondtemperatuur of uitblaastemperatuur, aangezien de buizen zover uit elkaar liggen dat de werkzame grondlagen elkaar niet overlappen. Echter zal het de luchtvochtigheid en temperatuur van de kas wel beïnvloeden.

Uit figuur 22 blijkt dat het verhogen van het aantal buizen zorgt voor een groter verschil in luchtvochtigheid. Op momenten dat het scherm dicht is, kan de dampconcentratie van de kaslucht afnemen met zo'n $0,35 \text{ g/m}^3$ per minuut.



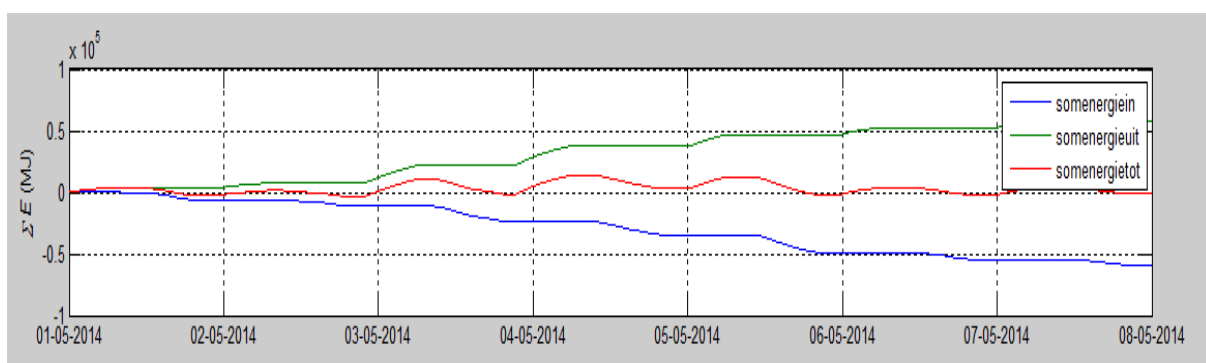
Figuur 22: de berekende verandering in absolute vochtigheid door grondbuisventilatie.

De kastemperatuur zal door het grote aantal grondbuizen ook veel sneller van temperatuur veranderen. Uit figuur 23 blijkt dat de kastemperatuur op veel momenten zo'n $0,3 \text{ K}$ per minuut kan veranderen.



Figuur 23: de berekende temperatuurverandering door grondbuisventilatie.

Het energie die wordt uitgewisseld tussen de lucht en grond is opgelopen tot een kleine 60000 MJ. Dit staat gelijk aan zo'n 1700 m³ aardgas aan energie.



Figuur 24: de berekende verandering in absolute vochtigheid door grondbuisventilatie.

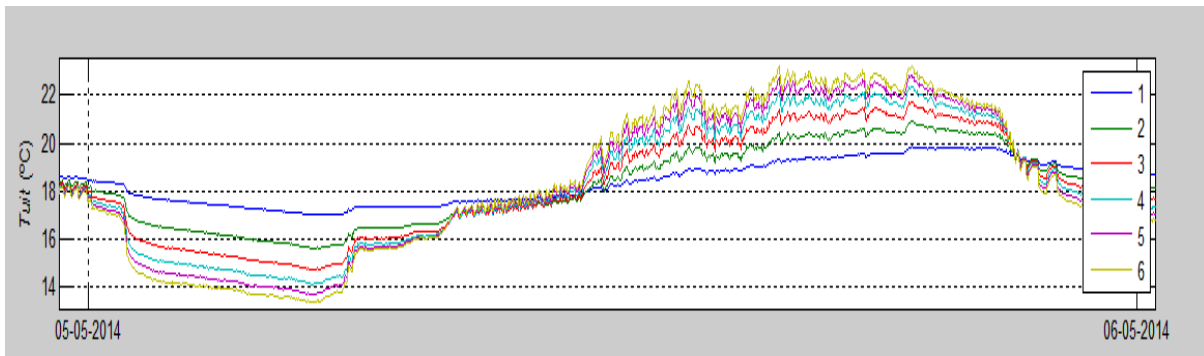
Het verhogen van het aantal buizen heeft als resultaat dat de totale energiestroom tussen de lucht en grond toeneemt en de luchtvochtigheid en temperatuur van de kas sneller verandert.

In de meetopstelling zijn de buizen langs de palenrijen onder de teeltgoten geplaatst, waarbij de verticale buizen langs deze palen ophoog lopen. Dit om ervoor te zorgen dat de buizen zo min mogelijk in de weg liggen en zo min mogelijk licht tegenhouden. Door het beperkt aantal palenrijen is dit aantal echter niet realistisch, dus zal een oplossing moeten worden bedacht om meer grondbuizen te plaatsen.

Wel laat dit zien dat het kasklimaat makkelijker te beïnvloeden is als het aantal grondbuizen wordt vergroot, waardoor het dus aan te raden is om veel buizen te plaatsen.

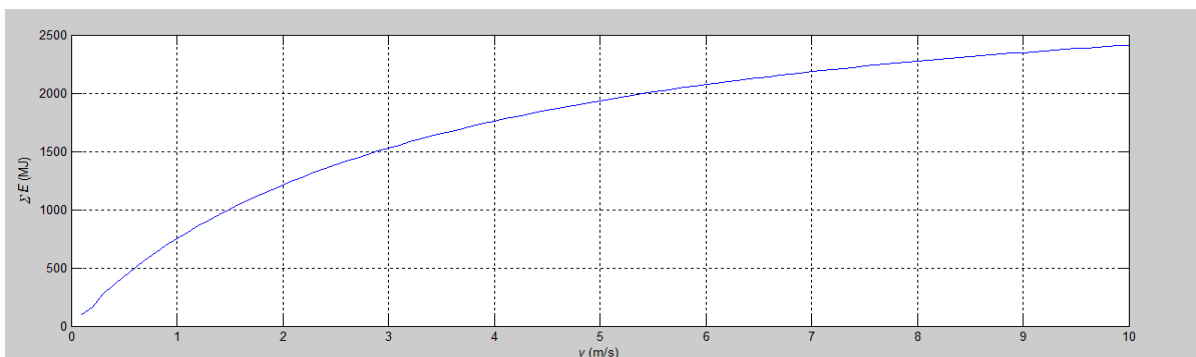
6.8. Effect snelheid op warmtebuffering

Eerder is gebleken dat de luchtsnelheid een groot effect heeft op het systeem. Zo zal een lagere luchtsnelheid een hoger thermisch rendement leveren en dus zorgen voor een groter temperatuurverschil. Echter zal het luchtdebiet hierdoor afnemen, waardoor het maar de vraag is of dit meer energie bespaard. Door de berekeningen uit te voeren met constante snelheid, kan het effect van de luchtsnelheid op de totale warmtestroom worden bekeken.



Figuur 25: luchttemperatuur aan het eind van de buis berekend met variërende lichtsnelheden in (m/s) als input, ingezoomd.

Zoals verwacht, blijkt uit bovenstaande grafiek dat de eindtemperatuur bij hogere snelheden grotere schommelingen laat zien. Dit betekent dat 1 m^3 passerende lucht minder energie wisselt met de grond dan bij lagere snelheden. Aangezien er meer lucht door de buis stroomt, is het de vraag wat voor effect het heeft op de totale warmtestroom. Het uitzetten van de totale warmtestroom over de week tegenover de lichtsnelheid levert de onderstaande figuur. Berekeningen laten zien dat bij hogere lichtsnelheden, in totaal meer warmte wordt uitgewisseld. Het realiseren van hogere snelheden zal echter zorgen voor een flinke toename in elektriciteitsverbruik van de ventilator. Onderzoek moet uitwijzen wat het effect is op de elektriciteitskosten en de besparing op de warmtevraag, zodat de werkelijke kosten in beeld kunnen worden gebracht. Hiernaast moet bij hogere snelheden ook rekening worden gehouden dat de eindtemperatuur niet te laag wordt, waardoor koelschade kan ontstaan.



Figuur 26: totale warmtestroom van grond naar lucht, gesommeerd over een week als functie van een constante lichtsnelheid gedurende de hele week.

7. Conclusies en aanbevelingen

Met grondbuisventilatie kan de thermische opslagcapaciteit van de bodem worden benut om overdag warmte op te slaan en 's nachts warmte uit te halen. Ook kan de grondbuis worden ingezet om de lucht te ontvochtigen. Het doel van dit onderzoek was het in beeld brengen van de fysische aspecten van de grondbuis en onderzoeken hoe het systeem kan worden geoptimaliseerd. Om een benadering te geven, is een simulatiemodel gemaakt en gevalideerd met metingen uit de praktijk. Warmtestromen in de buis worden berekend en de effecten daarvan op de kas bestudeerd.

Er is gekeken naar de eigenschappen van de verschillende onderdelen van de meetopstelling die een rol spelen bij de warmteoverdracht van de lucht naar de grond.

Het blijkt niet uit te maken van wat voor materiaal de grondbuis wordt gemaakt. PVC is een isolator, maar zelfs als de buis van een geleidend materiaal zoals staal gemaakt zou zijn, zouden er geen grote veranderingen optreden. Door de relatief dunne buiswand, is het effect op de eindtemperatuur minimaal. Bij dikkere buizen zal de binnendiameter kleiner worden, wat de luchtsnelheid verhoogt. Het vergroten van de buisdikte heeft een verlaging van de warmtebuffering als gevolg. Het vergroten van de buisdiameter heeft als gevolg dat de eindtemperatuur iets minder verandert. De warmtestromen zullen daarentegen stijgen, mede doordat het warmtewisselend oppervlak toeneemt en het temperatuurverschil tussen de lucht en grond groter wordt.

Ook is gekeken naar de invloed van de grondeigenschappen op de werking van het systeem. De dichtheid heeft nauwelijks effect op de warmtestroom. De warmtegeleidingscoëfficiënt heeft echter wel invloed. Een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt zorgt voor een grotere indringdiepte, waardoor de bodem minder snel opwarmt. Het temperatuurverschil zal hierdoor groter zijn, waardoor ook de warmtestromen groter worden. De soortelijke warmte heeft effect op de snelheid, waarmee de grond van temperatuur verandert. Een kleine soortelijke warmte zorgt voor een snellere temperatuurverandering van de grond, waardoor de warmtestroom afneemt.

De parameters die voor de grootste veranderingen zorgen, zijn de buislengte en de luchtsnelheid.

De buislengte beïnvloedt het volume van de werkzame grondlaag. Een langere buis heeft meer grond om op te warmen, waardoor de totale warmtestroom toeneemt. Er is een relatie tussen de buislengte, de luchtsnelheid en het thermisch rendement. Een thermisch rendement van 80 % zou ideaal zijn. Om dit te bewerkstelligen moeten de buislengte en luchtsnelheid op elkaar worden afgestemd.

Bij de huidige buislengte van 30 m is de ideale luchtsnelheid 1,93 m/s. Dit is een stuk lager dan de gemeten luchtsnelheid van zo'n 5 m/s, waarbij een lengte van 64,5 m ideaal zou zijn. Bij een langere buis is dus een hogere luchtsnelheid gewenst. Het kost echter veel ventilatorenergie om een hogere luchtsnelheid te krijgen. Het is dus aan te raden om niet te kiezen voor te lange buizen, zodat de luchtsnelheid laag kan blijven.

Ook moet rekening worden gehouden dat de luchtstroom turbulent is, omdat de warmteoverdracht bij turbulente stroming groter is dan bij laminaire stroming. Bij de gebruikte systeemeigenschappen is de luchtstroom turbulent vanaf een lichtsnelheid van zo'n 1 m/s.

Naast de systeemeigenschappen is ook het effect van de grondbuizen op de kas bekeken. De kaslucht wordt beïnvloed door de uitgeblazen temperatuur en luchtvochtigheid. Op koudere dagen of in koudere nachten wordt gebruik gemaakt van schermen om de gestookte warmte in de kas te houden. De lucht boven het scherm zal een stuk kouder en droger zijn dan de lucht in de kas. Door droge lucht van boven het scherm de kas in te blazen, neemt de luchtvochtigheid af. Door deze lucht eerst door de warmere grond te blazen, wordt de lucht opgewarmd en ontstaat er geen koelschade aan de plant.

Naarmate het voorjaar vordert, zal de buitentemperatuur stijgen. Voor de energiebalans is dit gunstig, omdat er minder gestookt hoeft te worden om de kas op temperatuur te houden. Voor de vochtbalans zal dit problemen geven. Door de hogere temperaturen van de lucht boven het scherm en het kasdek, zal er minder condensatie tegen het kasdek op treden en wordt het moeilijker om vocht af te voeren. De verdamping van het gewas kan in deze periodes zorgen voor een hoge luchtvochtigheid, waardoor optimale omstandigheden ontstaan voor schimmelproductie.

Afhankelijk van de temperaturen zal in de nacht worden geschermd. Als er wordt geschermd heeft de inzet van grondbuizen een positief effect op de luchtvochtigheid. Bij warmere nachten zal het scherm open zijn en heeft de inzet van grondbuizen geen effect op de luchtvochtigheid van de kas. Op warmere dagen kunnen de grondbuizen worden gebruikt om de warme kaslucht te koelen. Hierdoor hoeft minder gelucht te worden, waardoor het kasklimaat makkelijker op niveau te houden is.

Om een beeld te krijgen van de besparingen en terugverdientijd, zou een model van de hele kas moeten worden gemaakt. Door alle energiebalansen in beeld te brengen, kan het effect van de grondbuizen op de ventilatie via luchtramen en de stookkosten van de kas worden bestudeerd.

Het verhogen van de lichtsnelheid resulteert in een verlaging van het thermisch rendement. Echter zal meer lucht de buis passeren, waardoor de totale warmtestroom toeneemt. Er is veel energie nodig om een ventilator snel te laten draaien. Onderzoek moet uitwijzen hoe groot het effect is op het elektriciteitsverbruik en de besparing op de warmtevraag.

Verder kan ook worden gekeken naar het temperatuurprofiel van de grond. In deze simulatie wordt uitgegaan van een uniforme grondlaag met één temperatuur. In werkelijkheid zal de grond dicht bij de buis sneller van temperatuur veranderen dan de grond iets verder van de buis. Ook zal de grond over de lengte van de buis verschillende temperaturen hebben. Door de buis op te delen in stukken en voor elk stuk de warmtestromen en temperaturen te berekenen, zullen de uitkomsten nauwkeuriger zijn en kan de benadering worden verbeterd.

Er zijn veel eigenschappen die effect hebben op het functioneren van het systeem. Uit dit onderzoek blijkt dat:

- De dichtheid van de grond weinig effect heeft.
- Een grote soortelijke warmte van de grond gewenst is.
- Een grote warmtegeleidingscoëfficiënt van de grond gewenst is.
- Een buis met een grote diameter gewenst is.
- Een buis met een dunne wand gewenst is.
- De warmtegeleidingscoëfficiënt van de buis weinig effect heeft.
- Het beter is om korte buizen te nemen.
- Bij huidige afmetingen een luchtsnelheid van zo'n 2 m/s gewenst is.
- Het aan te raden is om het aantal grondbuizen te vergroten.

Onderzoek moet uitwijzen welke systeemeigenschappen qua investering, gebruikskosten en terugverdientijd zorgen voor de kortste terugverdientijd. Hierbij moet niet alleen de warmtebuffering van de grondbuis worden meegenomen, maar ook het effect op het kasklimaat. Zowel het effect op de temperatuur als luchtvochtigheid heeft als resultaat dat de ramen minder vaak open hoeven, waardoor het kasklimaat beter op niveau te houden is. Er zal minder hoeven te worden gestookt en de kans op ziektes wordt verkleind, waardoor de productie stijgt.

8. Lijst met gebruikte symbolen

Symbool	Omschrijving	Eenheid
A	warmtewisselend oppervlak	(m ²)
c_g	soortelijke warmte grond	(J/kg·K)
$c_{p,l}$	soortelijke warmte lucht	(J/kg·K)
d_b	dikte van de wand	(m)
d_g	indringdiepte	(m)
D_e	buitendiameter buis	(m)
D_i	binnendiameter buis	(m)
h_c	warmteoverdrachtscoëfficiënt lucht	(W/(m ² ·K))
h_{dek1}	warmteoverdrachtscoëfficiënt dek buiten	(W/(m ² ·K))
h_{dek2}	warmteoverdrachtscoëfficiënt dek binnen	(W/(m ² ·K))
$h_{scherm1}$	warmteoverdrachtscoëfficiënt scherm bovenkant	(W/(m ² ·K))
$h_{scherm2}$	warmteoverdrachtscoëfficiënt scherm onderkant	(W/(m ² ·K))
I_g	volume grondlaag rondom buis	(m ³)
I_{kas}	volume van de kas	(m ³)
I_v	volume vlakke grondlaag	(m ³)
K	stofoverdrachtscoëfficiënt	(m/s)
l	lengte buis	(m)
$l_{fractie}$	correctiefactor warmtewisselend oppervlak	(-)
m_g	massa werkzame grond	(kg)
f_m	dampstroom	(g/s)
$\dot{m}_l$	massastroom lucht	(kg/s)
Nu	getal van Nusselt	(-)
P	omtrek buis	(m)
P_a	de atmosferische luchtdruk	(Pa)
P_d	partiële druk droge lucht	(Pa)
Pr	getal van Prandtl	(-)
P_{sat}	verzadigde dampdruk	(hPa)
P_v	dampdruk water	(Pa)
q	luchtdebiet	(m ³ /s)
r_{verd}	verdampingswarmte water	(J/g)
R	totale warmteweerstand	(m ² ·K/W)
R_d	specifieke gas constante droge lucht	(J/kg·K)
Re	Reynolds getal	(-)
R_v	specifieke gas constante waterdamp	(J/kg·K)
RV	relatieve luchtvochtigheid	(%)
Sc	getal van Schmidt	(-)
t_p	duur van de periode	(s)
T	luchttemperatuur	(°C)
$T_{b,begin}$	temperatuur buiswand begin	(K)
$T_{b,eind}$	temperatuur buiswand eind	(K)
T_{buiten}	buitentemperatuur	(K)
T_d	dauwpunttemperatuur	(°C)
T_{dek}	temperatuur dek van de kas	(K)
T_g	grondtemperatuur	(K)
$T_{g,begin}$	grondtemperatuur begin buis	(K)
$T_{g,eind}$	grondtemperatuur eind buis	(K)
T_{kas}	temperatuur van de kas	(K)
$T_{l,begin}$	luchttemperatuur begin buis	(K)

$T_{l,eind}$	luchttemperatuur eind buis	(K)
T_{nok}	temperatuur tussen scherm en dek	(K)
U	warmtedoorgangscoefficiënt	(W/(m ² ·K))
v_l	luchtsnelheid	(m/s)
x	absolute dampconcentratie	(g/m ³)
$x_{b,eind}$	verzadigde concentratie buiswand eind	(g/m ³)
x_{bg}	gemiddeld dampconcentratie buis opp.	(g/m ³)
x_d	concentratie dauwpunt	(g/m ³)
x_{kas}	dampconcentratie kas	(g/m ³)
$x_{l,eind}$	dampconcentratie lucht eind buis	(g/m ³)
x_{lg}	gemiddeld dampconcentratie lucht	(g/m ³)
x_{gem}	gemiddeld concentratieverschil	(g/m ³)
α_g	warmtediffusiviteit grond	(m ² /s)
α_l	warmtediffusiviteit lucht	(m ² /s)
ΔT	temperatuurverschil lucht en grond	(K)
ΔT_g	temperatuurverandering grond per seconde	(K/s)
ΔT_{log}	logaritmisch gemiddeld temperatuurverschil	(K)
ΔT_{kas}	temperatuurverandering kas per seconde	(K/s)
Δx_{kas}	verandering dampconcentratie per seconde	((g/m ³)/s)
η	thermisch rendement	(-)
λ_b	warmtegeleidingscoëfficiënt buis	(W/(m·K))
λ_g	warmtegeleidingscoëfficiënt grond	(W/(m·K))
λ_l	warmtegeleidingscoëfficiënt lucht	(W/(m·K))
ν	kinematische viscositeit lucht	(m ² /s)
ρ_{lucht}	luchtdichtheid	(kg/m ³)
ρ_g	dichtheid grond	(kg/m ³)
σ	correctiefactor indringdiepte	(-)
Φ	voelbare warmtestroom	(W)
Φ_{la}	latente warmtestroom	(W)
Φ_{tot}	totale warmtestroom	(W)
ω	cirkelfrequentie dagelijkse gang	(Hz)

9. Literatuur

- {1} Knoll, ir. W.H., Wagenaar, ir. E.J., Weele, ir. A.M. van; Handboek Installatietechniek deel 1; 2^e druk; Stichting ISSO; Rotterdam; januari 2002;
- {2} Mazee, A.N.; Verbetering bodemtemperatuur-metingen; KNMI; De Bilt; 2005;
- {3} Bree van de, A.G.; Aardtunnel-ventilatie; Bouwfysica; 1995;
- {4} http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html;
- {5} Schalkoort, T.A.J.; Modelleren van warmte-, vocht-, lucht- en lichtstromen; TU-Delft; Faculteit Bouwkunde; voorlopige uitgave oktober 2001;
- {6} <http://www.paroscientific.com/dewpoint.htm>;
- {7} <http://carnotcycle.wordpress.com/2012/08/04/how-to-convert-relative-humidity-to-absolute-humidity/>;
- {8} Lee, K.H., Strand, R.K.; The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings; University of Illinois; United States; april 2007;
- {9} Lienhard, J.H. IV, Lienhard, J.H. V; A Heat Transfer Textbook; 3^e editie; Phlogiston Press; Cambridge; Massachusetts; U.S.A.; 2008;
- {10} Marivoet, B.; De bodem-lucht warmtewisselaar; Xios Hogeschool; Limburg; Hasselt; 2008;
- {11} Stijger, H.; Van Antwerpen over ingegraven luchtcirculatiesysteem : "Geen schimmelziektes meer en grotere tomaten"; Onder Glas; November 2013;
- {12} Dieleman, A.; Effecten van luchtvochtigheid op groei en ontwikkeling van tomaat; Wageningen UR Glastuinbouw; Wageningen; februari 2008;
- {13} Zwart de, H.F., Stanghellini, C., Knaap van der, L.P.M.; Hoog isolerende en lichtdoorlatende schermconfiguraties; Wageningen UR Glastuinbouw; Wageningen; februari 2010;
- {14} Rehau; Awadukt thermo; 2006; Duitsland;
- {15} Harmanny, D.; Lucht bodem warmtewisselaar; Hanzehogeschool Groningen; Groningen; 2012;
- {16} BINAS Tabellenboek; Noordhoff Uitgevers; 5^e druk; 2008; Groningen/Houten;
- {17} Weel van, P.A., Voogt, J.O.; Natuurkundige analyse van de vocht- en energie balans van een tuinbouwkas; Wageningen UR Glastuinbouw; Wageningen; 2012;

Bijlagen

A. Opdrachtoomschrijving

In het kader van energiezuinige huisvesting en bedrijfsruimten, neemt de interesse toe in het gebruik van de ondiepe ondergrond voor het balanceren van de temperatuurverschillen tussen dag en nacht. Energie wordt met behulp van buizen tijdelijk opgeslagen in de bodem. Zowel in woningen als in bedrijfsruimten (bijv. kassen) is het aantrekkelijk om warme lucht in de zomer door ondiepe ondergrond de sturen, waarmee de lucht gekoeld en ontvochtigd wordt. Er is behoefte om energie te besparen door temperatuurverschillen tussen dag en nacht te egaliseren via tijdelijke opslag van energie in de bodem

Dit principe is op zich duidelijk, maar het onbekend hoe dit op een goede wijze kan plaatsvinden. Er is een vermoeden dat er veel factoren zijn die invloed hebben op het op een efficiënte manier werkend krijgen van dit systeem.

Er moet onderzoek worden gedaan naar het effect van de inzet van grondbuizen in kassen of glas overkapte ruimten en het effect daarvan op de temperatuur, vochtgehalte en energie.

De fysische aspecten moeten in beeld worden gebracht en optimalisatievoorstellen moeten worden ontwikkeld. Metingen en simulaties kunnen beide worden uitgevoerd, zodat de simulatiemodellen kunnen worden gevalideerd.

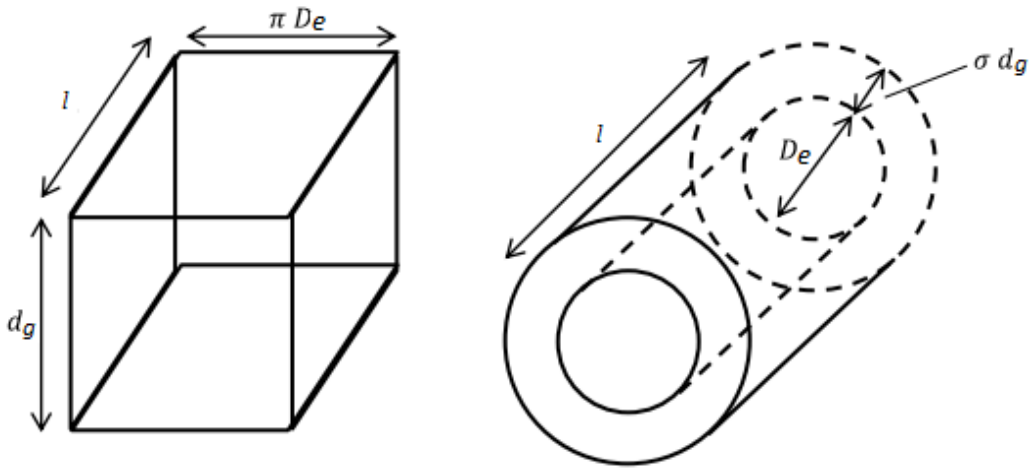
B. Uitleg werkzame grondlaag

Eerder is vermeld dat formules [1] en [3] alleen gelden voor warmtestromen door een vlakke laag. De grondbuis is rond, waardoor het volume van de grond niet lineair toeneemt naarmate de afstand tot de buis groter wordt. Het volume van een vlakke laag wordt gegeven door:

$$I_v = \pi \cdot D_e \cdot l \cdot d_g \quad [59]$$

Het volume van de laag rondom de buis kan berekend worden door de dikte van de laag, vermenigvuldigt met de correctiefactor, gelijk te stellen aan de dikte van de laag wanneer deze vlak is.

Als de vlakke laag rond de buis wordt gewikkeld, is de omtrek van de buitenzijde groter dan die aan de binnenzijde. De laag zal dus dunner worden, om hetzelfde volume te behouden. De correctiefactor geeft de verhouding tussen de diktes van de twee grondlagen weer.



Figuur 27: werkzame grondlaag vlakke grond (links), werkzame grondlaag met correctiefactor rond een buis (rechts) ^{15}.

Het volume van de grondlaag rondom de grondbuis kan worden berekend door het volume van de buis van het totaal af te trekken.

$$I_g = \pi \cdot l \cdot (0,5 \cdot D_e + \sigma \cdot d_g)^2 - \pi \cdot l \cdot (0,5 \cdot D_e)^2 \quad [60]$$

$$I_g = \pi \cdot l \cdot ((0,5 \cdot D_e + \sigma \cdot d_g)^2 - (0,5 \cdot D_e)^2) \quad [61]$$

$$I_g = \pi \cdot l \cdot (0,25 \cdot D_e^2 + \sigma^2 \cdot d_g^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot D_e \cdot \sigma \cdot d_g - 0,25 \cdot D_e^2) \quad [62]$$

$$I_g = \pi \cdot l \cdot (\sigma^2 \cdot d_g^2 + \sigma \cdot d_g \cdot D_e) \quad [63]$$

Gelijk stellen van [59] en [63] levert:

$$\pi \cdot D_e \cdot l \cdot d_g = \pi \cdot l \cdot (\sigma^2 \cdot d_g^2 + \sigma \cdot d_g \cdot D_e) \quad [64]$$

$$\sigma^2 \cdot d_g^2 + \sigma \cdot d_g \cdot D_e - d_g \cdot D_e = 0 \quad [65]$$

Met de Abc-formule kan de correctiefactor voor het berekenen van de werkzame grondlaag rond de buis worden bepaald. Om te zorgen dat de correctiefactor positief is wordt de plus variant gekozen.

$$\sigma = \frac{-d_g \cdot D_e \pm \sqrt{d_g^2 \cdot D_e^2 + 4 \cdot d_g^2 \cdot d_g \cdot D_e}}{2 \cdot d_g^2} \quad [66]$$

$$\sigma = \frac{-d_g \cdot D_e \pm \sqrt{d_g^2 \cdot (D_e^2 + 4 \cdot d_g \cdot D_e)}}{2 \cdot d_g^2} \quad [67]$$

$$\sigma = \frac{-D_e \pm \sqrt{D_e^2 + 4 \cdot d_g \cdot D_e}}{2 \cdot d_g} \quad [68]$$

C. Uitleg berekening uitblaastemperatuur

Zoals eerder vertelt, kan de voelbare warmte op twee manieren worden berekend.

$$\Phi = \dot{m}_l \cdot c_{p,l} \cdot (T_{l,eind} - T_{l,begin}) \quad [69]$$

$$\Phi = -U \cdot A \cdot \Delta T_{log} \quad [70]$$

met:

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{l,begin} - T_{g,begin}) - (T_{l,eind} - T_{g,eind})}{\ln \frac{(T_{l,begin} - T_{g,begin})}{(T_{l,eind} - T_{g,eind})}} = \frac{(T_{l,begin} - T_{l,eind})}{\ln \frac{(T_{l,begin} - T_g)}{(T_{l,eind} - T_g)}} \quad [71]$$

en:

$$U \cdot A = \frac{\pi \cdot l}{\frac{1}{h_c \cdot D_i} + \frac{\ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right)}{2 \cdot \lambda_b} + \frac{\sigma \cdot d_g}{\lambda_g \cdot D_e}} \quad [72]$$

Het aan elkaar gelijk stellen van de warmtestroomvergelijkingen en het stapsgewijs omrekenen hiervan, levert een formule voor het berekenen van de eindtemperatuur.

$$\dot{m}_l \cdot c_{p,l} \cdot (T_{l,begin} - T_{l,eind}) = U \cdot A \cdot \frac{(T_{l,begin} - T_{l,eind})}{\ln \frac{(T_{l,begin} - T_g)}{(T_{l,eind} - T_g)}} \quad [73]$$

$$\ln \frac{(T_{l,begin} - T_g)}{(T_{l,eind} - T_g)} = \frac{U \cdot A \cdot (T_{l,begin} - T_{l,eind})}{\dot{m}_l \cdot c_{p,l} \cdot (T_{l,begin} - T_{l,eind})} \quad [74]$$

$$\ln \frac{(T_{l,begin} - T_g)}{(T_{l,eind} - T_g)} = \frac{U \cdot A}{\dot{m}_l \cdot c_{p,l}} \quad [75]$$

$$\frac{-1}{-1} \cdot \frac{(T_{l,begin} - T_g)}{(T_{l,eind} - T_g)} = e^{\left(\frac{U \cdot A}{\dot{m}_l \cdot c_{p,l}} \right)} \quad [76]$$

$$T_g - T_{l,eind} = (T_g - T_{l,begin}) \cdot e^{\left(\frac{U \cdot A}{\dot{m}_l \cdot c_{p,l}} \right)^{-1}} \quad [77]$$

$$T_{l,eind} = T_g - (T_g - T_{l,begin}) \cdot e^{\left(-\frac{U \cdot A}{\dot{m}_l \cdot c_{p,l}} \right)} \quad [78]$$

Deze formule kan ook worden omgeschreven naar de vorm die wordt gebruikt voor de berekeningen met het rendement van de grondbuis.

$$(T_{l,eind} - T_{l,begin}) = (T_g - T_{l,begin}) - (T_g - T_{l,begin}) \cdot e^{\left(-\frac{U \cdot A}{\dot{m}_l \cdot c_{p,l}} \right)} \quad [79]$$

$$\frac{(T_{l,eind} - T_{l,begin})}{(T_g - T_{l,begin})} = 1 - e^{\left(-\frac{U \cdot A}{\dot{m}_l \cdot c_{p,l}} \right)} \quad [80]$$

D. Rendement grondbuis

Bij een oneindig lange buis of een oneindig langzame luchtsnelheid, zal de uitblaastemperatuur uiteindelijk de grondtemperatuur aannemen. Dit zou een thermisch rendement leveren van 100%. In de praktijk is dit niet haalbaar. Het thermisch rendement is gedefinieerd als de verhouding van de temperatuurverandering tussen de aangevoerde lucht en de afgevoerde lucht en het maximaal haalbare temperatuurverschil tussen de lucht en de grond. Het rendement dat wordt behaald in de buis wordt gegeven door:

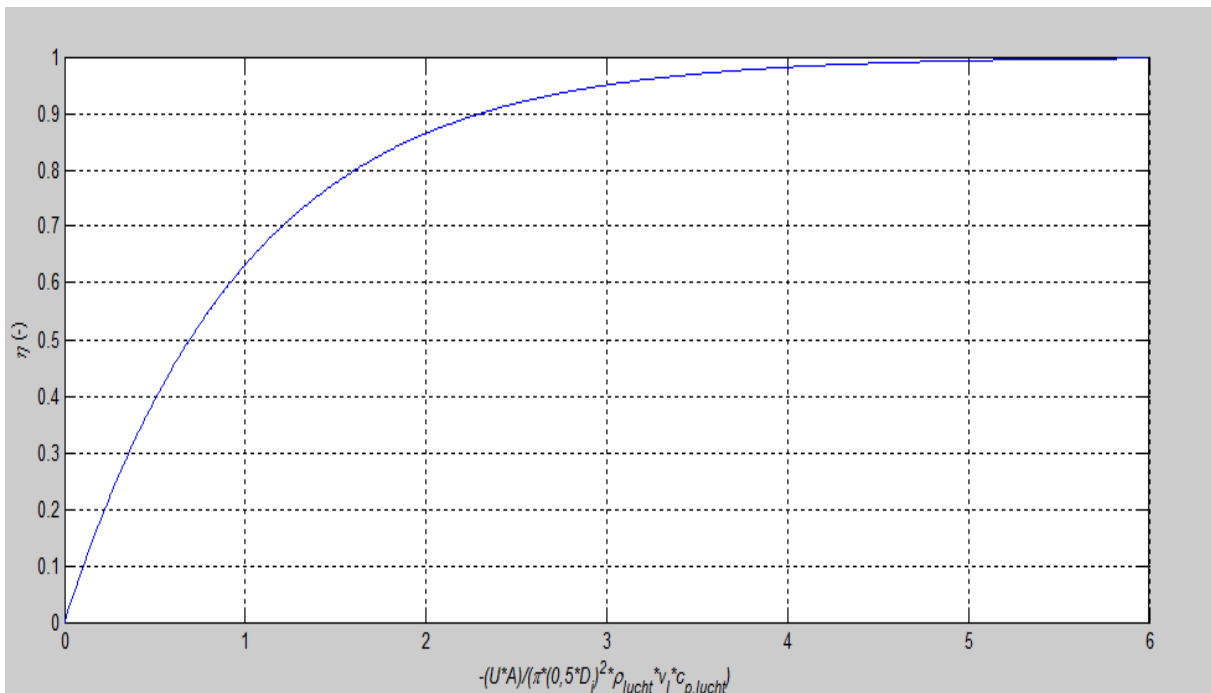
$$\eta = \frac{T_{l,eind} - T_{l,begin}}{T_g - T_{l,begin}} \quad [81]$$

Uit bijlage C formule [80] blijkt dat dit gelijk staat aan:

$$\eta = 1 - e^{\left(-\frac{U \cdot A}{\dot{m}_l c_{p,l}}\right)} = 1 - e^{\left(-\frac{U \cdot A}{\pi \cdot (0,5 \cdot D_i)^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot v_l \cdot c_{p,l}}\right)} \quad [82]$$

Het thermisch rendement van de grondbuis wordt dus bepaald door een e-macht. Hoe dichter de uitblaastemperatuur bij de grondtemperatuur ligt, hoe hoger het rendement zal zijn. Een hoger rendement resulteert in een betere warmteoverdracht, maar zal wel vragen om een relatief hogere investering in het systeem.

Aangezien het rendement wordt bepaald door een e-macht, zal het effect steeds kleiner worden naarmate het rendement hoger wordt. Dit is te zien in figuur 28. Uit de grafiek blijkt dat het steeds moeilijker wordt om een hoger rendement te halen. Tot ongeveer 80% stijgt de lijn nog vrij snel, waarna die vrij snel afvlakt. Hierdoor wordt uitgegaan van een ideaal rendement van 80%.



Figuur 28: rendement van de grondbuis als functie van de macht uit de e-macht functie.

E. Grondeigenschappen

In de onderstaande tabel staan de eigenschappen van verschillende bodemsoorten.

In de laatste kolom is de maximale indringdiepte bij een buis weergegeven. Deze waarden gelden voor een buis van 160 mm doorsnede en de indringdiepte van één dag.

Tabel 1: eigenschappen verschillende soorten grond ^{14}.

soort grond	λ (W/m*K)	ρ (kg/m ³)	α ($\cdot 10^{-7}$) (m ² /s)	c (J/kg*K)	$\sigma \cdot d_g$ (m)
Standaard	1,450	1800	6,02	1339	0,084
Droog zand	0,700	1650	5,06	838	0,079
Droog kwarts zand	0,265	1650	2,01	799	0,055
Kwarts zand 8% vocht	0,588	1750	3,33	1009	0,067
Zand 9% vocht	0,980	1440	4,52	1506	0,076
Zand 13% vocht	1,500	1600	5,21	1799	0,080
Zand 15% vocht	0,924	1780	3,75	1384	0,070
Vochtig zand	1,880	1500	10,45	1199	0,103
Zand/gravel	2,000	1950	9,77	1050	0,101
Vochtig zand	2,100	2166	3,22	3011	0,066
Ruige gravel grond	0,520	2000	1,41	1844	0,048
Krijtachtige grond	0,714	1670	1,92	2227	0,054
Vochtige leemgrond	1,450	1800	6,02	1338	0,084
Leembodem 36% vocht	2,300	1650	4,90	2845	0,078
Verzadigde leembodem	2,900	1800	10,13	1590	0,102
Klei	1,200	1820	2,09	3155	0,056
Slib	1,500	1920	2,66	2937	0,062
Klei/slib/modder	1,500	1500	4,76	2101	0,077
Klei bodem	1,280	1500	9,70	880	0,100
Zandsteen	1,900	2250	11,89	710	0,108
Graniet	2,800	2600	10,77	1000	0,104
Gesteente	3,500	2500	5,60	2500	0,082
Turf 100% vocht	0,350	1500	0,60	3889	0,034

F. Overige eigenschappen

Tabel 2: Fysische eigenschappen van lucht ^{5}.

θ °C	λ 10 ⁻² W/mK	c 10 ³ J/kgK	ρ kg/m ³	ν 10 ⁻⁵ m ² /s	η 10 ⁻⁵ kg/ms	γ 10 ⁻³ /K	Pr	Gr/L ³ .ΔT 10 ¹⁰ /m ³ K	Gr.Pr/L ³ .ΔT 10 ³ /m ³ K
-20	2,25	1,005	1,40	1,16	1,61		0,72	2,90	2,09
-10	2,33	1,006	1,34	1,24	1,67		0,72	2,44	1,74
0	2,41	1,006	1,30	1,33	1,72		0,72	2,05	1,46
10	2,49	1,006	1,25	1,42	1,76		0,71	1,75	1,24
20	2,57	1,007	1,20	1,51	1,81		0,71	1,47	1,04
30	2,65	1,007	1,16	1,60	1,86		0,71	1,28	0,90
40	2,72	1,008	1,13	1,69	1,90		0,71	1,10	0,78
50	2,80	1,008	1,09	1,78	1,95		0,70	0,94	0,67
60	2,88	1,009	1,06	1,88	2,00		0,70	0,82	0,58
70	2,95	1,010	1,03	1,98	2,04		0,70	0,73	0,51
80	3,02	1,010	1,00	2,08	2,08		0,70	0,63	0,45
90	3,10	1,011	0,97	2,19	2,13		0,70	0,56	0,39
100	3,18	1,012	0,94	2,30	2,17		0,69	0,50	0,34

Tabel 3: stofeigenschappen vaak gebruikte materialen bij 20 °C ^{1}.

materiaal	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg · K)]	λ [W/(m · K)]	$\eta = \nu \cdot \rho$ [kg/(m · s)]
water	1000	4180	0,60	$1,0 \cdot 10^{-3}$
lucht	1,20	1010	0,026	$18,2 \cdot 10^{-6}$
beton -verdicht	2450	840	1,7-2,3*	-
baksteen -rood	1600	840	0,6-0,9*	-
minerale wol	35 - 200	840	0,04	-
glas	2500	800	0,81	-
hout	800	1880	0,17-0,23	-
pvc -hard	1390	1000	0,16	-
staal 0,6 % C	7840	460	46	-
aluminium	2700	900	240	-
koper	8920	380	400	-

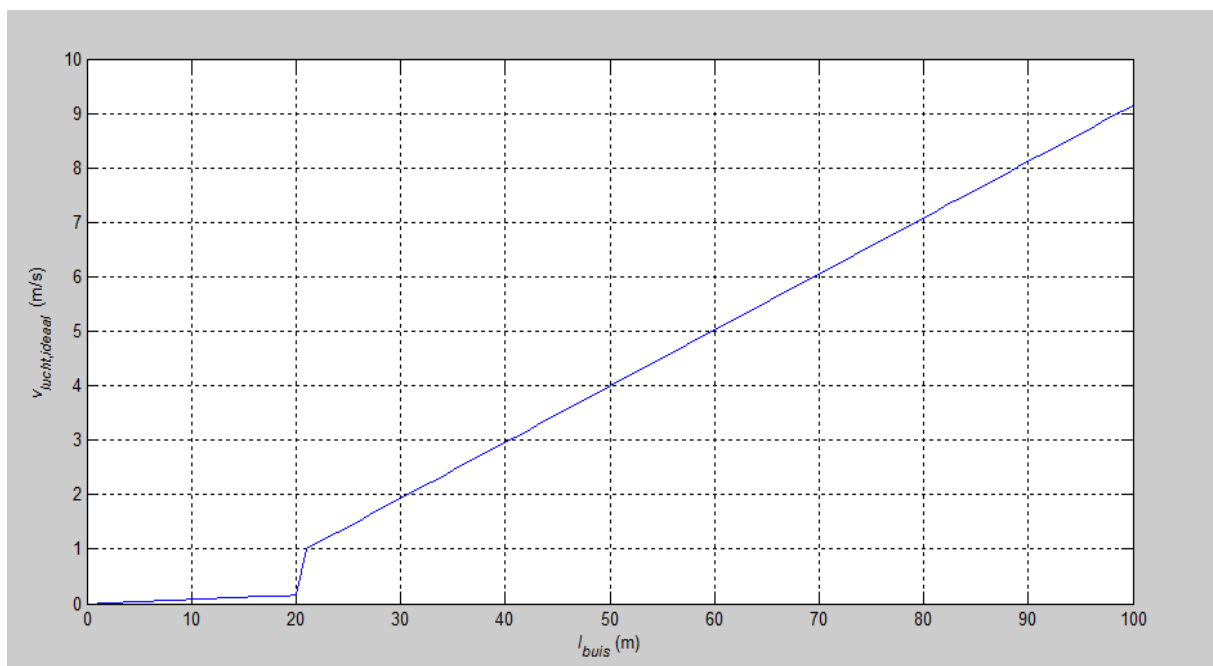
* afhankelijk van het vochtgehalte

G. Ideale luchtsnelheid

In de onderstaande figuur is de luchtsnelheid berekend als functie van de lengte van de grondbuis, waarbij een rendement van 80% het uitgangspunt is.

De berekeningen zijn uitgevoerd met formule [51]. Echter geldt deze formule alleen voor turbulente stroming ($Re > 10^4$). Met de berekende luchtsnelheid wordt het getal van Reynolds berekend. Als deze kleiner is dan 10^4 wordt de berekening opnieuw uitgevoerd met een iets andere formule. Door v_l uit formule [45] te delen en $Nu = 3,66$ in te vullen, kan de ideale luchtsnelheid bij laminaire stroming worden berekend.

Voor het tussengelegen gebied wordt ook $Nu = 3,66$ gebruikt. Dit omdat turbulente stroming gewenst is en zo duidelijk in beeld wordt gebracht vanaf welke snelheid de lucht turbulent is. Vanaf $v_{lucht,ideaal} = 1$ m/s is de luchtsnelheid turbulent.



Figuur 29: ideale luchtsnelheid als functie van de lengte van de grondbuis