De kas op temperatuur

Onderzoek naar warmtetransport in een kas

Vincent Mourik

dr. ir. C. Vuik, begeleider

Inhoud

Voorwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd tijdens de oriënterende stage die gevolgd moet worden in 5 VWO van het Wartburg College. Het onderzoek heeft niet als doel bepaalde resultaten te verkrijgen die ook echt van nut zijn. Het is veel meer bedoeld als een gedegen kennismaking met de academische werkwijze.
Om de werkelijkheid zo dicht mogelijk te benaderen, is er gekozen voor een probleem dat is aangereikt vanuit het bedrijfsleven. Daarnaast moest het onderzoek binnen een bepaalde tijdsduur uitgevoerd worden. Verslaglegging was ook een eis, omdat dit in de dagelijkse praktijk van een universitaire baan een vanzelfsprekendheid is.
Het verslag is het resultaat van een week lang experimenteren en onderzoek doen aan de TU Delft. Ondanks het feit dat het qua niveau niet vergelijkbaar is met een echt onderzoek, hoop ik dat ik erin geslaagd ben om een bevredigend resultaat neer te zetten.
Persoonlijk heb ik de stage en het onderzoek als erg leuk en boeiend ervaren. De kennismaking met het universitaire leven was eveneens erg interessant. Ik wil ook vanaf deze plaats mijn stagebegeleider, dhr Vuik, heel hartelijk bedanken voor zijn begeleiding gedurende de stage. Ik heb veel tijd van hem gevraagd, maar desondanks bleef hij mij geduldig helpen met het zoeken naar antwoorden op de problemen die ik tegen het lijf liep.
Tenslotte wens ik u veel leesplezier bij het doorlezen van dit verslag.

Vincent Mourik

1. Inleiding

1.1 Verantwoording onderzoek

In de glastuinbouw probeert men voor een bepaald gewas een zo aantrekkelijk mogelijk milieu te verkrijgen. Dit milieu wordt door een aantal factoren sterk beïnvloedt. Een aantal voorbeelden van belangrijke factoren zijn belichting, luchtvochtigheid en temperatuur. In dit onderzoek zal alleen de temperatuur ter sprake komen.
Om een bepaalde temperatuur te bereiken in de kas kunnen er twee dingen worden gedaan. Er kan verwarming of er kan juist afkoeling plaatsvinden. Vanuit de branche komt regelmatig de vraag naar voren wat de meest efficiënte manier van verwarmen van een kas is.
Een producent van verwarmingsketels voor kassen wil zijn klanten een degelijk advies kunnen geven over de beste wijze van verwarmen. In verband hiermee zal worden onderzocht hoe het warmtetransport in een kas plaatsvindt en waardoor er warmteverlies optreedt.
In dit onderzoek zal alleen de verwarming van een kas ter sprake komen. Dit probleem wordt behandeld aan de hand van een praktijk situatie. Als uitgangspunt wordt een tomatenkas genomen, omdat dit een veel voorkomend kastype is.

1.2 Situatieschets

Zoals al werd vermeld, wordt als uitgangspunt een tomatenkas genomen. Een dergelijk kas heeft een hoogte tot de dakgoot tussen de 3 en 4 m. De hoogte van de punt van een kap bedraagt ongeveer 0,8 tot 1 m. De breedte van een kap is ongeveer 3 m.
In dit onderzoek wordt uitgegaan van de situatie in het begin van het seizoen. In de kas moet dan een gemiddelde temperatuur van 17ºC heersen, de maximum temperatuur kan oplopen tot ongeveer 25ºC. Omdat het in het voorseizoen nog winter is, zal de gemiddelde buitentemperatuur rond de 5ºC liggen.
In een tomatenkas vindt de verwarming plaats door verwarmingsbuizen waardoor warm water stroomt. In feite is dit systeem vergelijkbaar met de cv-installatie in een woonhuis. Van deze vorm van verwarmen wordt in dit onderzoek uitgegaan.
Een bekend gegeven is dat in een kas de meeste warmte aan de omgeving wordt afgestaan door het glas aan de zijkanten en bovenkant van de kas. De grond heeft een isolerende werking, maar bij het glas treedt veel warmteverlies op.

1.3 Onderzoeksvraag

Bij dit onderzoek is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd:
- Op welke wijze wordt een tomatenkas het meest efficiënt verwarmd?

Met efficiënt verwarmen wordt hier niet alleen technisch gunstig, maar ook economisch verantwoord verwarmen bedoeld, het warmtetransport moet dus zo gunstig mogelijk verlopen en er moet dus zo min mogelijk verlies optreden.
De volgende deelvragen zijn geformuleerd:
- Welke invloed heeft het aantal verwarmingsbuizen op de verwarming van de kas?
- Welke invloed heeft de postitie van de verwarmingsbuizen op de verwarming van de kas?
- Welke invloed heeft de vorm van de verwarmingsbuizen op de verwarming van de kas?
- Welke invloed hebben de kasvorm en -afmetingen op de verwarming van de kas?

2. Model

2.1 Verantwoording model

De eerder beschreven tomatenkas is te ingewikkeld van samenstelling om te kunnen bestuderen. Er zijn veel factoren die de verwarming van de kas beïnvloeden. In eerste instantie zijn dit teveel factoren om te bestuderen. Door een model te maken van de kas kan het probleem sterk vereenvoudigd worden weergegeven. Bij het maken van een model van de kas worden er keuzes gemaakt tussen factoren. Sommigen worden wel meegenomen in het model, maar ander niet. Het is van belang om nu eerst duidelijk te maken welke factoren er nu wel en niet zijn meegenomen in het gebruikte model.

2.2 Belangrijke factoren binnen het model

2.1.2 Warmtetransport

Een eerste belangrijke factor is het warmtetransport in een kas. Warmte kan op drie verschillende manieren getransporteerd worden [1, 2].

Warmtegeleiding

Allereerst is er warmtegeleiding. Moleculen van een bepaalde stof bezitten verschillende vormen van energie. Eén daarvan is de energie van de trillingen die het molecuul maakt. Het is een bekend gegeven dat bij een toenemende temperatuur een molecuul steeds harder gaat trillen. Maar binnen een bepaald stuk materiaal kan het voorkomen dat het ene molecuul harder trilt dan het ander, de temperatuur is dan plaatselijk hoger. Hoe groter het verschil in hevigheid van trillen is, des te meer kans is er dat moleculen met elkaar botsen. Als zo'n botsing plaatsvindt tussen moleculen met een verschil in hevigheid van trillen, geeft het molecuul wat hard trilt een deel van zijn energie door aan het molecuul wat zacht trilt. Hierdoor verspreidt de plaatselijk hogere temperatuur zich over het materiaal. Een dergelijk vorm van verspreiding van temperatuur binnen een materiaal is een vorm van warmtegeleiding. Dit verschijnsel kan echter ook optreden aan de grenzen van twee verschillende materialen, het ene materiaal geeft dan warmte door aan het andere materiaal. Per stof verschilt de mate waarin moleculen energie aan elkaar over kunnen dragen sterk. Dit warmtegeleidingsvermogen (λ) vormt een aparte stofeigenschap.

Warmtestroming

De tweede vorm van warmtetransport is stroming of convectie. Hierbij wordt binnen een geleidende stof in vloeibare of gasvormig toestand met een bewegende deel van die stof warmte meegevoerd. Het bewegende deel van de stof vormt een bepaalde stroming. Het stromen kan door uitwendige oorzaken zijn ontstaan (gedwongen convectie). Voorbeeld hiervan zijn de luchtverplaatsing door wind en de waterverplaatsing in een rivier. Daarnaast kan het stromen spontaan op gang komen, bijvoorbeeld als gevolg van door temperatuurverschillen veroorzaakt dichtheidsverschillen (thermische vrije convectie) of door bellenvorming (koken).

Warmtestraling

De derde vorm van warmtetransport is straling. Dit is het transport van warmte door elektromagnetische straling tussen oppervlakken van verschillende temperatuur die gescheiden zijn door een min of meer voor de warmtestraling (infrarood licht) doorzichtig medium. Bij hoge temperatuur wordt de warmteoverdracht door straling snel belangrijk, maar ook bij kamertemperatuur speelt deze vorm van warmtetransport al een merkbare rol.
Binnen de kas zijn alle drie de vormen van warmtetransport aanwezig. Waarschijnlijk is warmtegeleiding van lucht de belangrijkste aanwezig vorm, maar ook de stroming van lucht zorgt voor een aanzienlijk warmtetransport binnen de kas. Straling is ook aanwezig, maar het is een bekend verschijnsel dat deze straling door het glas van de kas grotendeels wordt tegen

gehouden, we spreken immers niet voor niets over een ‘broeikaseffect’. Om deze reden wordt er in het model met warmtestraling geen rekening gehouden.
Ook met warmtetransport door convectie wordt geen rekening gehouden. Het is namelijk uiterst gecompliceerd om een bruikbare simulatie te maken van de luchtcirculatie binnen de kas. De enige vorm van warmtetranssport waarmee in het model van de kas gewerkt wordt is dus warmtegeleiding.

2.2.2 Isolatie

De warmtegeleiding veroorzaakt warmteverlies in de kas. In het model gaan we ervan uit dat de grond een isolerende werking heeft. In werkelijkheid is daar pas sprake van nadat de bovenlaag van de grond de kastemperatuur aangenomen heeft, maar dit warmteverlies verwaarlozen we. Tussen de lucht buiten de kas en in de kas bestaat na verwarming van de kas een aanzienlijk temperatuurverschil. Tussen deze twee lagen is een glaslaag aanwezig. Het glas heeft echter een geringe isolerende werking, aan de bovenkant treedt veel warmteverlies op.
Doordat in het model alleen met warmtegeleiding rekening wordt gehouden, zal er bovenin de kas altijd een temperatuur heersen die nadert tot of gelijk is aan de buitentemperatuur. De warmte die namelijk door geleiding boven in de kas terecht komt, wordt door geleiding ook weer afgegeven aan de buitenlucht.
De verwaarlozing van de convectie in de kas brengt twee problemen met zich mee.
Wanneer er rekening zou worden gehouden met convectie, zou de lage temperatuur boven in de kas worden tegengewerkt door de luchtcirculatie in de kas, hierdoor vindt er namelijk een voortdurende aanvoer van warme lucht boven in kas plaats. Doordat er voortdurend warme lucht boven in de kas aanwezig is bij convectie, treedt er een veel grotere warmtegeleiding naar de buitenlucht op en is het energieverlies met convectie veel groter dan zonder convectie. In het model is er dus een veel kleinere hoeveelheid energie nodig voor de verwarming van de kas dan in werkelijkheid.
Daarnaast is de verwaarlozing van de convectie verantwoordelijk voor extreme temperatuurverschillen tussen de verschillende delen van de kas. Bovenin heerst een temperatuur gelijk aan de buitentemperatuur, terwijl er onderin een veel hogere temperatuur heerst.

2.2.3 Warmtebron

Binnen een kas vindt de verwarming plaats door verwarmingsbuizen. In het model wordt deze vorm van warmtebron opgenomen. Dit is namelijk de meest realistische benadering van de werkelijkheid. Een aantal factoren die betrekking hebben op de warmtebron worden onderzocht. Allereerst zal de ideale positie van een verwarmingbuis worden onderzocht. Daarnaast wordt onderzocht wat het beste aantal buizen binnen een kas is. Ten slotte wordt de invloed van de buisdiameter onderzocht.

2.2.4 Gebruikte deel van de kas

Wanneer een kas opgedeel wordt in evengrote blokken, ontstaan er eigenlijk drie typen blokken (zie figuur). Allereerst zijn er de hoekblokken (type I). Een dergelijk blok maakt op drie plaatsen contact met de buitenlucht, aan de bovenkant en aan twee zijkanten.
Daarnaast zijn er de randblokken (type II). Deze blokken maken op twee plaatsen contact met de buitenlucht, namelijk aan één zijkant en aan de bovenkant.
Tot slot zijn er nog de blokken die alleen aan de bovenkant met de buitenlucht contact maken (type III). Omdat dit type het grootste deel van de kas vormt en omdat het zich gemakkelijker laat onderzoeken, berust het model alleen op dit type kasdeel.

figuur 1 Schematische voorstelling kas

2.2.4 Vorm en dimensie

Een tomatenkas heeft een bepaalde vorm en afmetingen. Vooral de vorm van de kas is tamelijk gecompliceerd. Daarom wordt de vorm van de kas eerst sterk vereenvoudigd. De vorm waar we allereerst van uitgaan, is een balk. Van deze vorm worden 2 modellen gemaakt. In eerste instantie zal er een model gemaakt worden binnen één dimensie. Dit is in feite de snijlijn van twee verticale vlakken binnen de balk. Op deze lijn ligt een laag grond, een laag kas, een laag glas en een laag buitenlucht. De enig afmeting waar sprake van is, is dus de hoogte. Binnen deze vorm en dimensie kunnen bepaalde patronen worden onderzocht die relevant zijn voor de volgende stap.

lucht

kas

grond

figuur 3 tweedimensionaal balkvormig model van de kas

Een volgende stap is de overgang naar het tweede model, een tweedimensionaal model. Dit model wordt gevormd door een verticale vlak van de balk, dat loodrecht op de grensvlakken van balk staat en de voor- en achterkant niet snijdt. De afmetingen worden nu dus bepaald door de breedte en de hoogte van de balk.
Wanneer deze kasvorm onderzocht is, zal de balkvorm worden uitgebreidt met de gebruikelijk punt van een kap in de kas. Vervolgens zal hier weer een tweedimensionaal model van worden gemaakt.

lucht

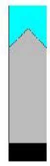
kas

grond

figuur 2 eendimensionaal model van de kas

Doordat er sprake is van een kasdeel dat alleen aan de bovenkant contact maakt met de buitenlucht (zie 2.2.4), is het overbodig om nog een stap naar een ruimtelijk model te maken, want elke doorsnee die aan de hierboven beschreven voorwaarden voldoet, heeft dezelfde eigenschappen.

figuur 4 tweedimensionaal kas-vormig model van de kas



3. Werkwijze

3.1 Algemene opzet onderzoek

Zoals al werd vermeld in hoofdstuk 2, zal het model van de kas in een aantal stappen worden onderzocht. Allereerst zal het ééndimensionale model worden onderzocht. Vervolgens zal in twee stappen het tweedimensionale model worden onderzocht.

3.2.1 Werkwijze bij het ééndimensionale model

Het ééndimensionale model kan worden onderzocht met behulp van daarvoor geschikte software. Een geschikt programma voor een dergelijk model is het programma 'Matlab'.
Het ééndimensionale model is opgebouwd uit drie lagen: een laag grond, een laag kas en een laag buitenlucht. Aan de hand van een voorbeel kan worden toegelicht wat voor type berekening er moet worden uitgevoerd om de temperatuur in de verschillende delen van de kas te berekenen.
We gaan ervan uit dat er alleen warmteoverdracht plaatsvindt tussen de kas en de buitenlucht. Binnen de kas nemen we, zoals al werd gezegd, alleen warmtegeleiding mee. Daarnaast gaan we ervan uit dat er gelijkmatig over de gehele kas een verwarmingsbron aanwezig is die we 'bronterm' noemen. De sterkte van deze bronterm krijgt de fictieve hoeveelheid 2. De temperatuur van de buitenlucht bedraagt 5°C. Aan de grond bedraagt de temperatuur 20°C. We nemen aan dat de overdracht tussen kas en buitenlucht heel groot is, de temperatuur boven in de kas bedraagt dan dus evenals de buitenlucht 5°C. De hoogte van de kas is 4 m.
Bij bovenstaande situatie geldt een bepaalde differentiaalvergelijking. Deze differentiaalvergelijking luidt als volgt:

$- d^2T/dx^2 =$ bronterm met T = temperatuur (°C)
x = hoogte (m)

T(x) geldt voor het interval [0, h] met h = maximale kashoogte (in dit geval 4).
Er zijn twee voorwaarden gegeven, namelijk T(0) = 20°C en T(4) = 5°C. Daarnaast is er de vergelijk $- d^2T/dx^2 = 2$. Omdat er hier sprake is van een situatie waarin de 2^e afgeleide van T(x) een constante is, is de functie T(x) een 2^e graads-functie van het type ax^2+bx+c.

Van T(x) is de 2e afgeleide -2. De eerste afgeleide is dus -2x+bx. Hieruit volgt:
$T(x) = - x^2 + bx + c$
Nu zijn ook de twee onbekenden b en c uit te rekenen.
T(0) = 20 geeft:

$20 = - 0^2 + b \cdot 0 + c$

c = 20

T(4) = 5 geeft:

$5 = -4^2 + b \cdot 4 + 20$

b = 0,25

b = 0,25 en c = 20 geeft:

$T(x) = -x^2 + 0{,}25x + 20$

Hiermee is de functie bekend die de temperatuur op een bepaalde plaats in de kas weergeeft.

3.2.2 Matlab

Matlab[3] (**Mat**rix **lab**oratory) is een interactief software systeem voor numerieke berekeningen en grafieken. Matlab is speciaal ontworpen voor matrix berekeningen: oplosmethoden van liniaire vergelijkingen, factoring matrices enz. Daarnaast heeft Matlab verschillende grafische mogelijkheden en kan het worden uitgebreid met andere programma's.
Matlab is ontworpen om numerieke problemen op te lossen, om precies te zijn rekenkundige. Om deze reden produceert het programma meer benaderingen dan exacte oplossingen.
Binnen het programma kunnen bepaalde berekeningen worden geprogrammeerd, die door het programma worden opgelost.

3.2.3 Toepassing van Matlab binnen het ééndimensionale model

Het bovenstaande voorbeeld (3.2.1) is uiterst eenvoudig. Zodra er sprake is van een bronterm op een bepaalde hoogt met een bepaalde vorm wordt het moeilijk om de temperatuur met de hand uit te rekenen. Binnen Matlab kan er echter heel eenvoudig een model worden gecreëerd wat overeenkomt met het ééndimensionale model. Er kunnen er variabelen worden ingevoerd waarna het programma in staat is om de temperatuur in de kas te berekenen en deze te plotten in een grafiek. De berekeningen die het programma uitvoert, berusten op het principe wat in het bovenstaande voorbeeld aan de orde kwam.
Het programma gaat als volgt te werk. Binnen de opgegeven afmetingen van de kas wordt een onderverdeling gemaakt in een aantal gelijke intervallen. Vervolgens wordt het temperatuurverloop in elk interval afzonderlijk berekend en plakt het programma alles als het ware achter elkaar. Een aantal variabelen kunnen worden aangepast.

3.2.4 Variabelen binnen Matlab

Verschillende variabelen hebben een bepaalde invloed op de temperatuur in de verschillende delen van de kas. Dit zijn:
- alpha
- kashoogte
- buitentemperatuur
- sterkte bronterm
- vorm verwarmingsbuis
- positie verwarmingsbuis
- aantal verwarmingsbuizen

Deze variabelen zullen allen worden toegelicht.

Uitwisseling van warmte tussen kas en buitenlucht

Tussen de kas en de buitenlucht vindt uitwisseling van warmteplaats in de vorm van warmte overdracht vanuit de kas naar de buitenlucht. Alpha (α) is een bepaalde factor die invloed heeft op de warmteoverdracht. Het volgende verband geldt binnen het model:
$- dT/dx = \alpha(T-T_{buiten})$
Alpha komt voort uit een aantal natuurkundige wetten, waaronder de wet van Fourier[1 4]. Deze wetten luiden:

1. $\phi''_{w,x} = -\lambda\ dT/dx$ (wet van Fourier)
2. $\phi''_{w} = U(T-T_{buiten})$
3. $U^{-1} = (h')^{-1} + (\lambda/d)^{-1} + (h'')^{-1}$

De verklaring van de symbolen gaat als volgt:
$\phi''_{w,x}$ = warmtestroomdichtheid in een punt (W m^{-2})
ϕ''_{w} = warmtestroomdichtheid voor een bepaald interval (W m^{-2})
U = totale warmtedoorgangscoëficient (W m^{-2} K^{-1})
h = warmtedoorganscoëficient (W m^{-2} K^{-1})
λ = warmtegeleidingsvermogen (W m^{-1} K^{-1})
T = temperatuur (K)
d = dikte materiaal (m)
Samenvoegen van de drie wetten geeft:
$-\lambda\ dT/dx = U(T-T_{buiten})$
$-dT/dx = U/\lambda\ (T-T_{buiten})$
hieruit volgt:
$\alpha = U/\lambda$ met $U^{-1} = (h')^{-1} + (\lambda/d)^{-1} + (h'')^{-1}$
Het is nu mogelijk om alpha te berekenen. In ons geval geldt namelijk voor alpha:
$\alpha = U/\lambda_{lucht}$ met $U^{-1} = (h_{buitenlucht})^{-1} + (\lambda_{glas}/d_{glas})^{-1}$
λ_{lucht}[5] = $24 \cdot 10^{-3}$ W m^{-1} K^{-1}
h_{lucht}[1] is 5 – 10, $h_{buitenlucht} = 5$
λ_{glas}[5] = 0,93 W m^{-1} K^{-1}
d_{glas} varieert tussen 0,005 en 0,01 m
Als we kiezen voor een glasdikte van 0,005 m is de waarde van alpha ongeveer 203. Voor het gemak kiezen we in het model voor alpha = 200.
Ondanks de berekende waarde is het wel van belang de invloed van alpha te onderzoeken, omdat aan de resultaten van een dergelijk onderzoek bruikbare tips voor isolatie op kunnen leveren.

kashoogte
In het model kan de invloed van de kashoogte worden onderzocht. Voor de kashoogte worden alleen de voor een tomatenkas relevante afmetingen onderzocht. De minumum hoogte van een tomatenkas is ongeveer 3 m, de maximum hoogte is ongeveer 4,5 m. Om deze reden wordt alleen tussen 2,5 en 5 m de invloed van verschillende kashoogtes op de temperatuur in de kas onderzocht.

Buitentemperatuur
Zoals al ter sprake is gekomen heeft de buitentemperatuur een grote invloed op de temperatuur in de kas. Doordat er warmteverlies optreedt vanuit de kas naar de buitenlucht, neemt de temperatuur in de kas met de hoogte af, dicht op het glas zal de temperatuur zelfs gelijk worden aan de buitentemperatuur. Om deze reden is de buitentemperatuur een belangrijke factor. Alleen de invloed van de gemiddelde buitentemperatuur wordt onderzocht, dus extreme weersomstandigheden worden buiten beschouwing gelaten. De invloed van de buitentemperatuur zal worden onderzocht voor temperaturen tussen de 0 en 20°C.

Sterkte bronterm
De bronterm uit het model is eigenlijk het verwarmingselement van de kas. In dit geval zijn de verwarmingsbuizen dus de bronterm. De sterkte van de bronterm kan worden gevarieerd. Hierdoor is mogelijk te onderzoeken hoe groot de bronterm moet zijn om een bepaalde gemiddelde kastemperatuur te onderzoeken. Het is echter moeilijk om een reëele energiehoeveelheid aan een waarde van de bronterm te koppelen. Doordat er een aantal aannames in het model zijn gedaan, zal de bronterm namelijk heel laag uitvallen. Het is daarom niet mogelijk om een uitspraak te doen over hoeveelheden in energieverlies, maar verschilfactoren kunnen wel worden aangetoond.

Vorm verwarmingsbuis
Doordat er sprake is van één dimensie, heeft een verwarmingsbuis geen cirkelvorm in het model. Alleen de diameter van de verwarmingsbuis wordt in het model opgenomen. Onderzocht wordt of de grootte van de diameter invloed heeft op de verschillende temperaturen in de kas.

Positie verwarmingsbuis
De positie van een verwamingsbuis kan gewijzigd worden. Ook hier speelt het ééndimensionale aspect een rol. Hierdoor is het namelijk alleen mogelijk om de hoogte van een buis te variëren. Er kan worden gekozen voor een buis op de grond of voor een buis op een meter hoogte. De verschillende buishoogtes zullen waarschijnlijk allen een eigen temperatuursverdeling in de kas hebben. Door deze hoogte te variëren kan de invloed van een buispositie worden onderzocht.

Aantal verwarmingsbuizen
Ook het aantal verwarmingsbuizen kan worden gewijzigd, er kunnen meerdere verwarmingsbuizen boven elkaar worden aangebracht. Alleen de mogelijkheid om twee buizen boven elkaar aan te brengen, zal worden onderzocht.

3.2.5 Programmeren in Matlab
Een aantal van de bovengenoemde variabelen is heel eenvoudig aan te passen, er hoeft alleen een bepaalde waarde te worden veranderd. Dergelijke variabelen zijn alpha, kashoogte, buitentemperatuur en bronsterkte. De vorm en positie van de buizen vraagt iets meer inzicht. De doorsnee van een buis vormt een cirkel. De formule voor een cirkel is: $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$.
Een dergelijk cirkel heeft het middelpunt (a,b). Omdat er in dit model alleen sprake is van een bepaalde hoogte, geldt er: $(x-a)^2 = r^2$. Hierin is a de hoogte vanaf de grond.
Een tweede buis kan worden toegevoegd door een zelfde formule in te voeren, maar dan met een andere waarde voor a.
In bijlage 1 is een voorbeeld van het hoofddeel van het Matlab programma opgenomen. Hierin zijn een aantal van de bovenstaande variabelen zichtbaar. In bijlage 2 is het deel van het programma opgenomen wat de vorm, positie en aantal van de buizen beschrijft.

3.2.6 Experimenten in Matlab
In Matlab zijn op twee manieren experimenten uitgevoerd.
Allereerst zijn er experimenten uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in de invloed van de verschillende variabelen op het temperatuursverloop in de kas. Om één variabele afzonderlijk te kunnen onderzoeken, is het nodig om de anderen op een vaste waarde te houden. Bij deze serie experimenten is er van tevoren voor elke variabele een vaste waarde gekozen. Vervolgens werd telkens één variabele onderzocht door deze steeds een andere waarde te geven. Gelet werd op de bijbehorende gemiddelde kastemperatuur en de maximum kastemperatuur. De gemiddelde kastemperatuur vormt namelijk een goed indicatie voor het warmteverlies dat optreedt. Een relatief lage gemiddelde kastemperatuur duidt op veel warmtverlies, bij een relatief hoge gemiddelde kastemperatuur is het juist andersom. De maximum kastemperatuur vormt een indicatie voor de verdeling van de warmte over de kas. Als er sprake is van een relatief groot verschil tussen de gemiddelde en maximum kastempratuur is er een ongelijkmatige verdeling van de warmte over de kas, bij een relatief klein verschil is het omgekeerde het geval.
Nadat er inzicht verkregen was in de invloed van de verschillende variabelen, zijn er nog andere experimenten uitgevoerd. Hierbij werd de gemiddelde kastemperatuur constant gehouden, vervolgens werd de bronsterkte aangepast totdat de gewenste gemiddelde temperatuur was bereikt. Dit is voor een aantal relevante variabelen onderzocht, maar variabelen waaraan een op de praktijk gebaseerd vaste waarde kon worden toegenkend, zijn hier niet meer onderzocht.

3.3 Werkwijze binnen het tweedimensionale model
Ook het tweedimensionale model kan worden onderzocht met een daarvoor geschikt programma. Een geschikt programma hiervoor is het programma ‘Sepran’.

3.3.1 Sepran
Sepran[6] is een softwarepaket waarin complexe, praktische berekeningen kunnen worden uitgevoerd. Er wordt veel gebruik gemaakt van numerieke oplosmethoden. Sepran is vanuit de TU Delft ontwikkeld. De ontwikkeling van het pakket heeft geleid tot de totstandkoming van het ingenieursbedrijf Sepra. Het pakket vindt wereldwijd toepassingen bij de meest uiteenlopende praktische problemen.
Een probleem oplossen binnen Sepran vindt altijd volgens drie stappen plaats. Allereerst is er het voorbewerken (pre-processing). Hierbij wordt het gebied of rooster waarin gewerkt wordt, aangemaakt. De volgende stap is de reken stap (computational part). In deze stap worden allerlei berekeningen uitgevoerd die nodig zijn om het probleem op te lossen. De derde stap is het

nabewerken (post-processing). In deze stap worden de uitkomsten van de berekeningen verwerkt tot leesbare resultaten, het plotten van diagrammen vindt dan bijvoorbeeld plaats.

3.3.2 Toepassing van Sepran binnen het tweedimensionale model

Bij het programma Sepran wordt anders te werk gegaan dan bij het programma Matlab. Een bepaald gebied wordt door een soort rooster opgedeeld in een aantal kleiner oppervlakken. Vervolgens wordt een probleem voor een klein oppervlak opgelost en daarna worden de oplossingen samengevoegd tot één geheel. Er wordt gebruik gemaakt van allerlei nummerieke oplosmethoden op het gebied van integratie.
Voor het tweedimensionale model is dit een geschikt oplosmethode. In Sepran is een model van de kas gemaakt. Dit werd vervolgens opgedeeld in een variabel aantal kleinere oppervlakken, driehoeksvormig.
In bijlage 3 is zichtbaar dat de afmetingen van het gebied kunnen worden aangepast. Ook het aantal opdelingen kan worden aangepast. Hoe fijner de opdeling is, hoe nauwkeuriger de oplossing, maar ook hoe meer tijd het oplossen kost. Na enig proberen is gekozen voor 100 roosterpunten langs elke zijde van het oppervlak, aan elke zijde van het kasmodel grenzen dus 100 kleinere oppervlakken. Dit levert een enorm totaal aantal oppervlakken op, groot genoeg om goede benaderingen van de oplossing te geven.
Binnen het tweedimensonale model is in twee stappen gewerkt. Allereerst is een balkvormige kas onderzocht zonder punt. Vervolgens is aan de balk een punt toegevoegd, zodat de werkelijkheid dicht benaderd wordt.

3.3.3 Variabelen binnen Sepran

Uit de resultaten van het onderzoek in Matlab bleek dat een aantal variabelen geen invloed hebben op de kastemperatuur (zie 4.2). De volgende variabelen zijn onderzocht:
- kashoogte (alleen voor het balkvormige model)
- positie van de verwarmingsbuizen
- aantal verwarmingsbuizen
- sterke bronterm

Voor alpha is de waarde 200 gekozen en buitentemperatuur 5°C. Ook voor de vorm van de verwarmingsbuizen is een vaste afmeting gekozen, namelijk een staal van 0,025 m. De breedte van de kas is in het model 3 m.
Bij het model met punt is gekozen voor een breedt van 3 m, een hoogte tot de dakgoot van 3,5 m en een totale hoogte van 4,3 m.
Alleen de drie variabelen met betrekking tot de buizen en de bron zullen nader worden toegelicht.

Positie en aantal van de verwarmingsbuizen

In het tweedimensonale model is er geen sprake meer van alleen een variabele buishoogte. Ook in de breedte kan voor een andere positie worden gekozen. Bij één buis in de kas of twee buizen boven elkaar is echter het midden van de kas aangehouden, omdat dan de temperatuur het meest gelijkmatig verspreidt wordt. De invloed van de buishoogte is dan wel onderzocht.
Wanneer er twee verwarmingsbuizen op dezelfde hoogte aanwezig waren, is de positie in de breedte onderzocht. De onderlinge afstand tussen de buizen werd dan gevarieerd. Omdat de kas 3 m breed is, is het niet zinvol om vanuit het midden meer dan 1,5 m onderlinge afstand te hebben. De buizen uit de kap ernaast zorgen er dan namelijk voor dat er toch nog een kleinere onderlinge afstand is, 1,5 m is het maximum.
Er zijn verschillende aantallen verwarmingsbuizen onderzocht. Allereerst is er onderzocht hoe de temperatuur beïnvloedt wordt door één buis. Daarnaast is onderzocht wat er bij twee buizen boven elkaar en twee buizen naast elkaar gebeurt. Ten slotte is er onderzocht wat er gebeurd met de temperatuur in de kas als er twee buizen naast elkaar liggen en één buis zich op een variabele hoogte midden tussen de twee buizen bevindt.

Sterkte van de bronterm
Eigenlijk is deze variabele om dezelfde redenen en op dezelfde wijze als binnen de Matlab experimenten behandeld, zie daarom 3.2.3

3.3.4 Programmeren in Sepran
Programmeren in Sepran is wat complexer dan in Matlab. Het is betrekkelijk eenvoudig om het rooster waarin gewerkt wordt, aan te passen, zie hiervoor bijlage 3. De kashoogte aanpassen vormt geen proleem.
Om de positie van een buis aan te geven moet nu de hele cirkelvergelijking worden opgenomen. Voor een cirkel met middelpunt (M_a,M_b) geldt $(x-M_a)^2 + (y-M_b)^2 = r^2$. De gewenste positie kan in deze formule worden ingevuld. Daarnaast moet er een waarde voor r worden opgegeven.
Het variëren van de bron iets lastiger. Hiervoor moet het programma eerst een berekening uitvoeren met een bronsterkte en som (zie bijlage 4) van 1. Vervolgens kan één van de verkregen uitkomsten bij som worden ingevoerd, nu is het mogelijk om de bron te variëren in sterkte.
In bijlage 5 is het programma zichtbaar wat de eigenlijke berekening binnen Sepran uitvoert.

3.3.5 Experimenten in Sepran
De experimenten die zijn uitgevoerd binnen Sepran zijn qua opzet volledig identiek aan de Matlab-experimenten. Eerst zijn de variabelen onderzocht, vervolgens is de gemiddelde temperatuur constant gehouden en de bronterm gevarieerd. Deze twee stappen zijn echter niet voor beide kasvormen uitgevoerd. Bij de balkvormige kas is alleen de eerste stap aan bod gekomen, bij de kas met punt zijn beide stappen doorlopen.

4. Resultaten en bespreking resultaten

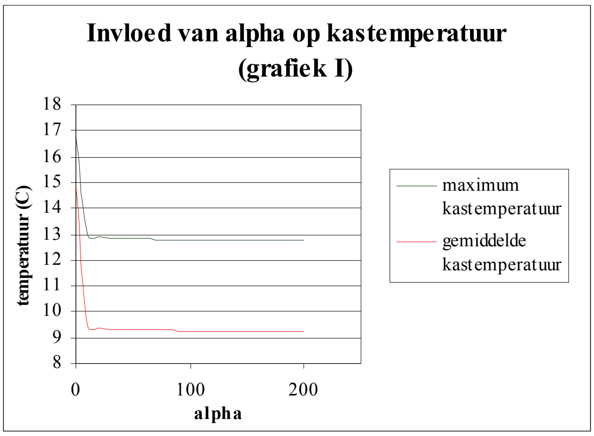
4.1 Indeling van de resultaten

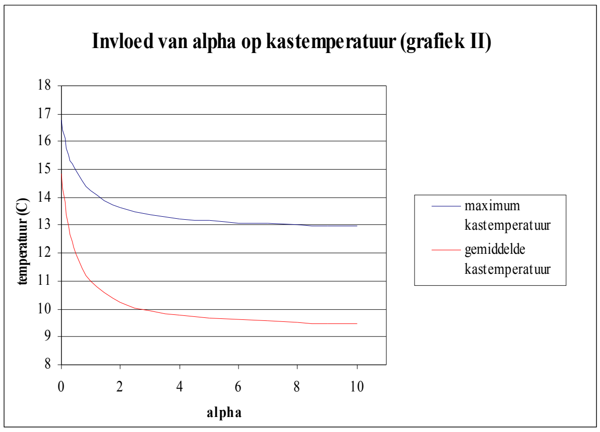
De resulaten zijn in 3 hoofdgroepen onderverdeeld. Allereerst zijn er de resultaten van de Matlab-experimenten. Daarnaast zijn er de resultaten van de Sepran-experimenten. Deze zijn onderverdeel in twee groepen, de resultaten afkomstig van de experimenten met de balkvormige kas en de resultaten afkomstig van de experimenten met de kas met punt.
Behalve deze hoofdindeling is er een identieke indeling per groep in twee delen. De resultaten van het onderzoek naar de variabelen worden allereerst besproken. Vervolgens komen de resultaten van de variabele bronsterkte aan bod. Alleen bij de balkvormige kas wordt hiervan afgeweken, hier worden alleen de variabelen onderzocht.

4.2.1 Matlab: restultaten onderzoek naar variabelen

Bij het onderzoek naar de variabelen hebben alle variabelen van tevoren een vaste waarde gekregen. Deze waardes zijn:
alpha = 10
buitentemperatuur = 5°C
hoogte kas = 3,5 m
hoogte buis = 0,2 m
diameter buis = 0,1 m
aantal buizen = 1
sterkte bronterm = 1
Elke variabele werd apart onderzocht. Terwijl de overige variabele de bovenstaande waarde hadden, werd de te onderzoeken variabele steeds gevarieerd. De resultaten van dit onderzoek geven dus alleen inzicht in de invloed van de variabelen op de temperatuur. Elke variabele zal apart worden behandeld, de invloed van de variabele op de temperatuur is uitgezet in een grafiek die zal worden besproken.

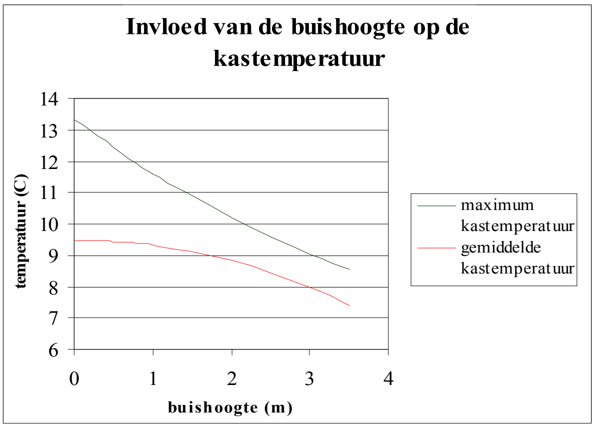
Alpha



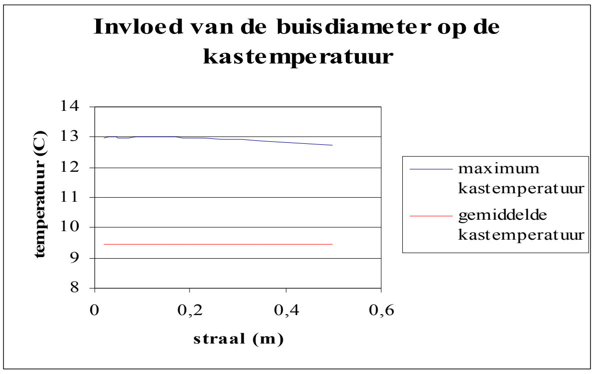


Uit de grafieken blijkt dat alpha maar voor een beperkt deel invloed heeft op de temperatuur. Als alpha kleiner is 8, gaat de gemiddelde en maximum kastemperatuur snel stijgen. Dit houdt in dat er pas vanaf een alpha kleiner dan 8 een isolerend effect op gaat treden bij het glas. Isoleren van een kas bij het glas heeft dus alleen zin als alpha wordt teruggebracht tot een waarde kleiner dan 8. Dit is bijna onmogelijk te realiseren omdat er hiervoor zeer sterke isolatie nodig is.
Uit de grafieken blijkt verder dat voor het vervolg van dit onderzoek de exactie waarde van alpha niet zo belangrijk is, omdat de invloed van alpha vanaf 10 ongeveer gelijk blijft.

Buishoogte



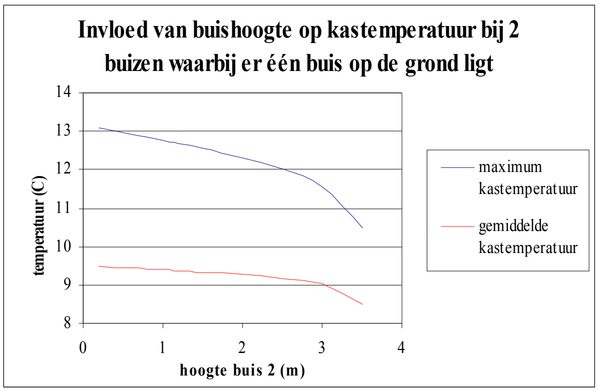
Twee dingen vallen op in het verloop van de grafieken.
Allereerst is er duidelijk een afname in temperatuur zichtbaar bij een toenemende buishoogte. In dit opzicht is de ideale buispositie dus een buis op de grond.
Een tweede punt wat opvalt, is dat het verschil tussen de gemiddelde en maximum temperatuur bij een grotere buishoogte steeds kleiner wordt. De temperatuur wordt blijkbaar gelijkmatiger in de kas bij een grote buishoogte.



Buisdiameter

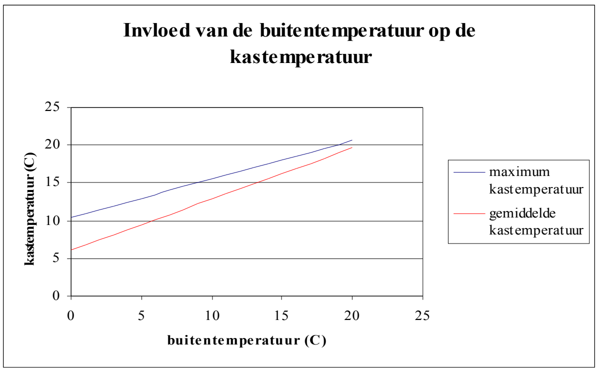
Uit de grafiek blijkt dat de invloed van de buisdiamter op de kastemperatuur nihil is. Pas bij een diameter van 0,3 m wordt er een lichte afname in de maximum temperatuur zichtbaar. Echter, dit is een buisgrootte die geen enkel practisch nut heeft. Een buisdiameter binnen reëele afmetingen heeft dus geen invloed op de kastemperatuur. De doorsnee van de buis kan dus worden aangepast aan de hoeveelheid en de wijze waarop het water door de buizen moet stromen.

Twee buizen, waarvan één op de grond



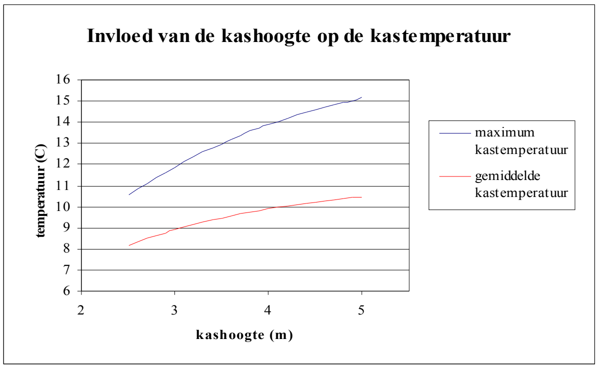
Waarneer we het deze grafiek vergelijken met de grafiek waarbij de buishoogte varieert met één buis, valt er iets op.
Wanneer er een buis op de grond blijft liggen, neemt de temperatuur tot een hoogte van 3 m veel geleidelijker af dan bij één buis. De buis op de grond zorgt er blijkbaar voor dat er minder warmteverlies optreedt. De warmte komt dus voornamelijk tussen de twee buizen terecht, want anders zou er meer warmteverlies op treden aan de bovenkant. Dit is gunstig, want hierdoor is het mogelijk om een redelijk stabiel temperatuursgebied te creeëren tussen de twee buizen.
Echter, wanneer de tweede buis boven de drie meter komt te hangen, vermindert het effect sterk, doordat er nu een heel directe warmteoverdracht tussen de kas en de buitenlucht kan plaatsvinden.

Buitentemperatuur



Zoals te verwachten valt, treedt er bij een hogere buitentemperatuur minder energie verlies op. Er is dan immers een minder groot verschil tussen de temperatuur in de kas en buiten, waardoor er minder warmteoverdracht plaatsvindt vanuit de kas naar de buitenlucht. Bij een hogere buitentemperatuur hoeft er dus minder gestookt te worden in de kas.

Kashoogte



Uit de grafieken blijkt dat een hoge kas gunstig is voor het energieverlies dat optreedt. Bij een hoge kas treedt er minder energieverlies op dan bij een lage.
Een tweede punt wat opvalt in de grafieken is dat het verschil tussen de gemiddelde en maximum temperatuur evenredig toeneemt met de kashoogte. Bij een hoge kas is er dus een groot warmteverschil tussen de onderste en de bovenste delen van de kas, een verschil wat significant groter is dan bij een lage kas.

4.2.2 Matlab: resultaten onderzoek naar variabele bronsterkte

Er zijn twee situaties onderzocht, namelijk een variabele buishoogte bij één buis en een variabele buishoogte bij twee buizen waarvan er één op de grond ligt. Bij dit onderzoek zijn er vaste waardes gekozen voor een aantal variabelen. Deze waardes zijn gebaseerd op de praktijk of op berekeningen (zie ook H2, 3). Vervolgens werd de kracht van de bron aangepast totdat er een gewenste gemiddelde temperatuur werd bereikt. De gekozen waardes voor een aantal variabelen zijn:

alpha = 200

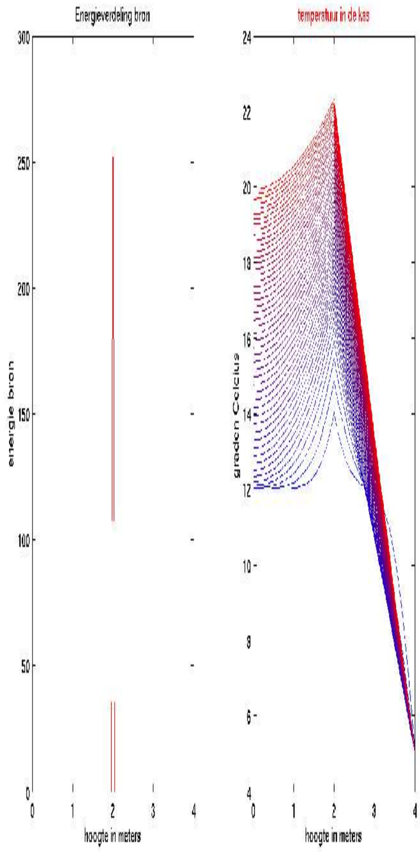
buitentemperatuur = 5°C

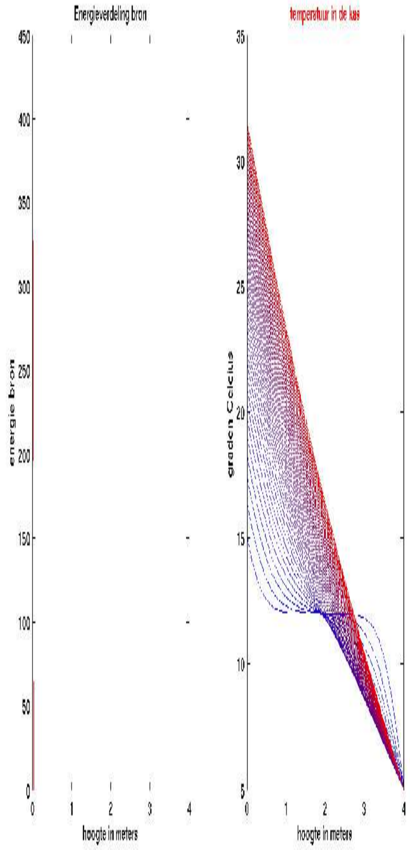
gemiddelde kastemperatuur = 17°C

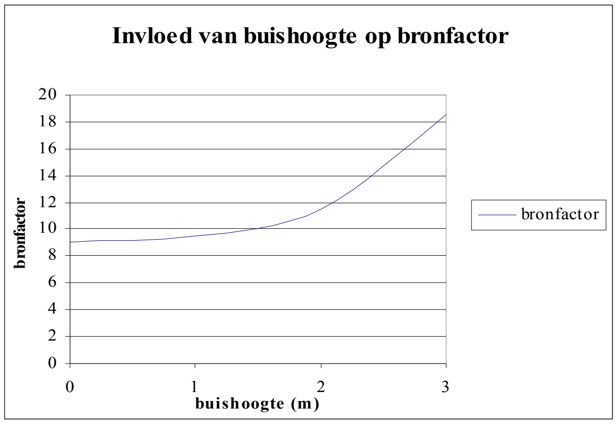
doorsnee buis = 0,1 m

hoogte kas = 4 m

Behalve een grafiek met de invloed van de buishoogte op de bronfactor, zijn er voor een aantal situaties grafieken met het temperatuurverloop in de kas opgenomen. In deze grafieken geeft de rode curve de eindsituatie aan. De groene lijn is de lijn van 17°C.

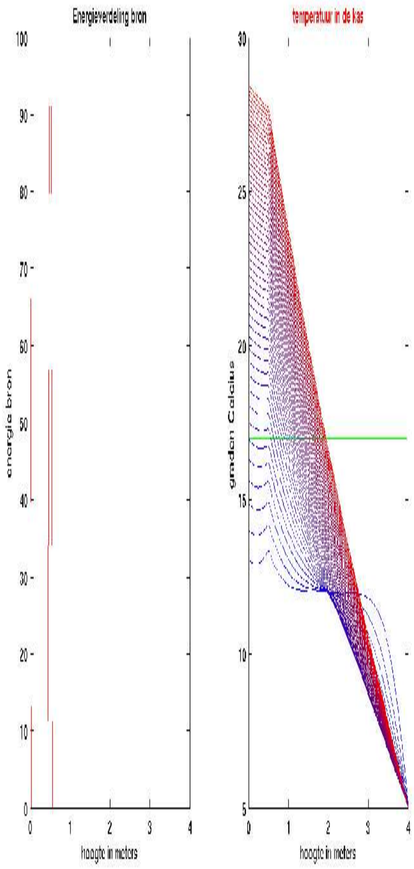


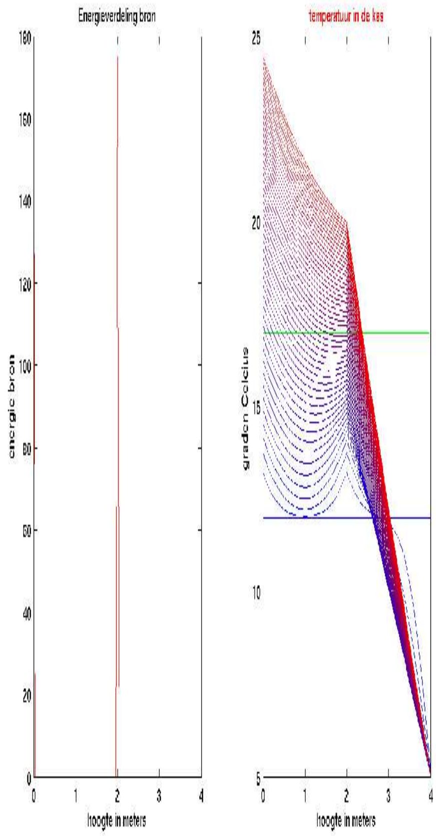


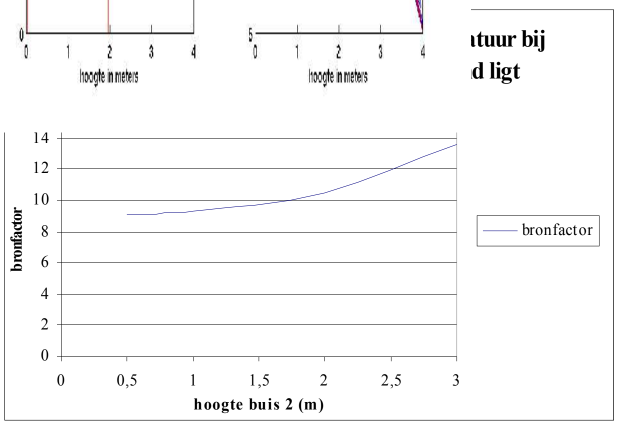


Eén buis met variabele hoogte

Uit de grafiek hieraast blijkt dat bij een grotere buishoogte meer energie nodig is om een zelfde temperatuur te bereiken. Daarnaast valt op dat de toename van de energie tussen 0 en 1 m veel kleiner is dan tusen 1 en 2 m maar vooral tussen 2 en 3 m is er veel meer energie nodig.
Dit is te verklaren door de evenredige toename van het warmteverlies met de buishoogte. Dit bleek ook al bij het onderzoek naar de buishoogte als afzonderlijke variabele.
De twee bovenstaande grafieken met het temperatuurverloop binnen de kas vertonen een opmerkelijk beeld. De linker grafiek geeft de situatie weer bij een buis die op de grond ligt. In de rechter grafiek bevindt de buis zich op twee meter hoogte. In beide gevallen is de gemiddelde temperatuur 17°C. In de eerste grafiek vindt er al direct een sterke afname plaats bij een toenemende hoogte. Het temperatuursverschil tussen het laagste en hoogste gedeelte van de kas is erg groot, zo'n 27°C. Bij de tweede grafiek zien we echter een geheel ander beeld. De temperatuur is tot aan de buis redelijk constant, het verschil tussen de hoogste en laagste temperatuur bedraagt maar 2°C. Vanaf de buis treedt er echter een nog grotere afname in temperatuur op bij een toenemende hoogte.
Uit bovenstaande kunnen we concluderen dat een buis op een hogere positie in de kas verschillende effecten heeft. Het energieverbruik is behoorlijk groter dan bij een buis op de grond. Een groot voordeel is echter dat de temperatuur tot aan de buis vrijwel constant is. Als een gewas een constante temperatuur nodig heeft door de gehele kas, is dit dus een betere positie voor de buis dan op de grond.







Twee buizen, waarvan er één variabel is in hoogte en één op de grond ligt

Ook uit de grafiek rechts blijkt dat bij een toenemende buishoogte meer energie nodig is. Dit maakt weinig uit voor één of twee buizen in de kas. Het beeld van de grafiek lijkt sterk op dat van de grafiek bij één buis.

De twee bovenstaande grafieken met het temperatuurverloop door de kas vertonen echter wel verschillen. De linker grafiek geeft de situatie weer bij één buis op de grond en één buis op 0,5 m hoogte. De rechter grafiek geeft de situatie weer bij één buis op de grond en één buis op 2 m hoogte. In beide gevallen is de gemiddelde temperatuur weer 17°C.

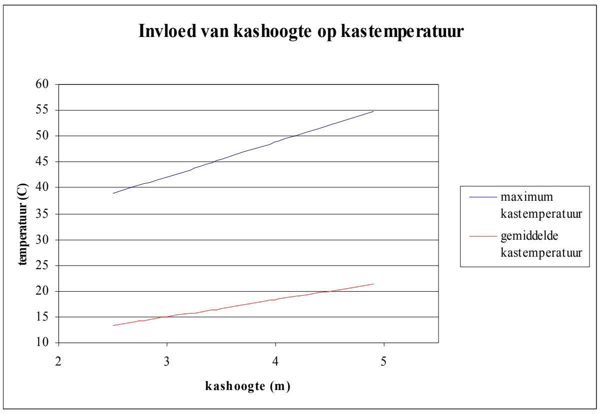
De linker grafiek vertoont een beeld wat sterk lijkt op de grafiek van de ene buis op de grond. Blijkbaar is een hoogte van 0,5 m van de tweede buis te klein om een groot verschil te geven. Het verschil wat er desondanks toch is, ligt tussen de 0 en de 0,5 m. Hiertussen neemt de temperatuur wat minder steil af, daarnaast is de maximum temperatuur wat lager.

De rechter grafiek vertoont eigenlijk hetzelfde beeld, maar dan over een grotere hoogte. Bij een buishoogte van 2 m neemt de temperatuur tussen de twee buizen geleidelijk af. De temperatuur tussen de twee buizen is iets minder constant dan bij één buis op 2 m hoogte, hier is het verschil tussen het minimum en het maximum namelijk 4°C tegen 2°C in de andere situatie. Aangezien het energieverbruik in beide gevallen gelijk is, kun je op grond van dit model concluderen dat het niet zo zinvol is om twee buizen in een kas te plaatsen. Bij vergelijkbare buishoogtes is het temperatuurverloop bij twee buizen gelijk aan dat van één buis of het is minder gunstig.

4.3 Sepran balkvormige kas: resultaten onderzoek naar variabelen

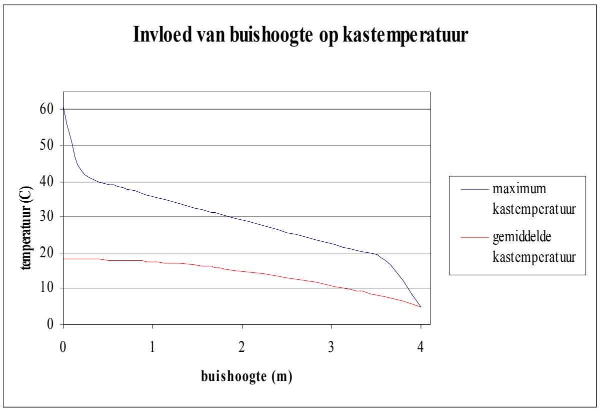
In het onderzoek naar de variabelen is er eigenlijk op een vergelijkbare wijze te werk gegaan als bij Matlap. Er zijn echter minder variabelen onderzocht (zie ook H3). De vaste waardes van de variabelen zijn:
kashoogte = 4 m
aantal buizen = 1
postitie buizen = (1,5 ; 0)
sterkte bronterm = 20

Kashoogte



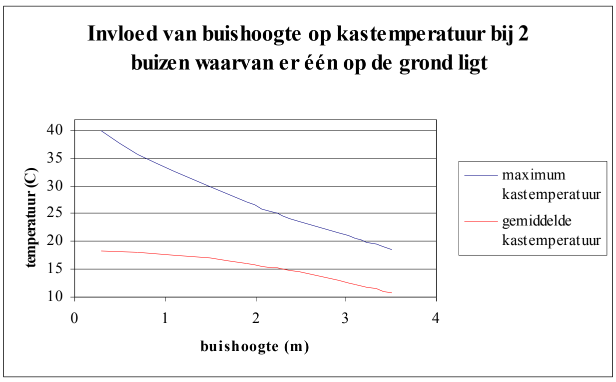
We zien hier een vergelijkbaar beeld met de resultaten uit Matlab. Ook hier is het gunstiger om een hoge kas te hebben.
Maar net als in Matlab blijkt in dit model de temperatuur bij een toenemende kashoogte steeds minder gelijkmatig te zijn. De maximum temperatuur neemt namelijk meer toe dan de gemiddelde temperatuur.
Concluderend kunnen we zeggen dat het voor een laag energieverlies gunstig is om een hoge kas te hebben, maar dat de kas temperatuur dan minder gelijkmatig is.

Buishoogte



Het beel van deze grafiek is opvallend. Bij een toenemende buishoogte neemt de gemiddelde temperatuur best wel constant af. De maximum temperatuur daarentegen vertoont een heel ander beeld. De eerste halve meter neemt de temperatuur heel snel af, vervolgens is de afname een periode heel constant en vanaf drie meter zien we opnieuw een snelle afname.
Hieruit volgt dat de verdeling van de temperatuur over de kas bij één buis het gunstigst is tussen een buishoogte van 0,5 en 3 m, want dan is het verschil tussen de maximum en de gemiddelde temperatuur minimaal. Echter, het energieverlies gaat vanaf 1 m hoogte ook een steeds belangrijkere rol spelen, dus de meest gunstige postitie van één buis ligt tussen de 0,5 en 1 m.

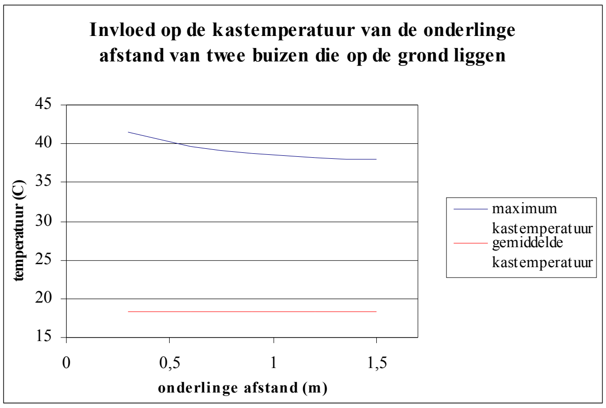
Twee buizen, waarvan één met variabele hoogte



In de grafiek is zichtbaar dat het energieverlies evenredig toeneemt met de hoogte van de tweede buis. Maar de temperatuur is wel wat gelijkmatiger verdeeld over de kas. De maximum temperaturen zijn lager dan bij één buis. Het verschil tussen maximum en gemiddelde temperatuur is ook lager dan bij één buis, dus de temperatuur is gelijkmatiger verdeeld over de kas. In deze situatie ligt de optimale hoogte van de tweede buis tussen de 1 en 2

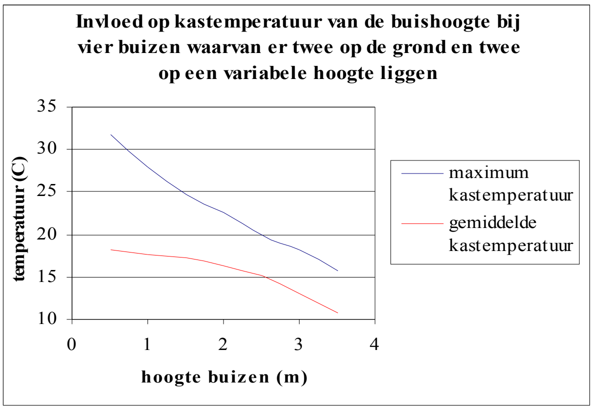
m. De toename van het energieverlies blijft dan beperkt, terwijl er al heel wat geprofiteerd kan worden van de meer gelijkmatige verdeling van de temperatuur in de kas.

Variabele onderlinge afstand tussen twee buizen



De grafiek laat zien dat de invloed van de onderlinge afstand op de gemiddelde temperatuur niets is. De maximum temperatuur vertoont een licht daling bij een grotere onderling afstand. Het grote voordeel van een grote onderlinge afstand tussen twee buizen is de gelijkmatige verdeling van de temperatuur die bereikt wordt. Wanneer twee buizen namelijk dicht bij elkaar liggen, vormen de verschillend warmtelagen eigenlijk een bol rondom de buizen. Bij een grote onderlinge afstand echter gaat er een horizontale gelaagdheid in temperatuurlagen optreden, waardoor de temperatuur in de breedte heel constant is.

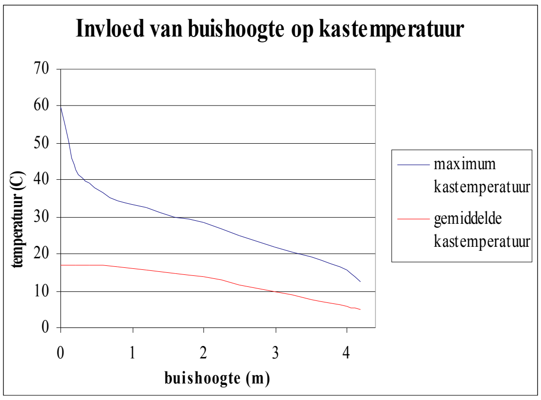
Vier buizen, waarvan twee op de grond en twee op een gelijke, variabele hoogte



Het beeld van deze grafiek lijkt veel op dat van de grafiek met 2 buizen waarvan er één een variabele hoogte had. Het verschil is echter weer de constante temperatuur in de breedte. De buizen liggen alle 1,5 m uit elkaar. Hierdoor treedt er een horizontale gelaagdheid op in temperatuurlagen.
Uit de grafiek wordt duidelijk dat de temperatuur ook in de hoogte gelijkmatig wordt, het verschil tussen de maximum en gemiddelde temperatuur neemt namelijk bij een toenemende hoogte van 2 buizen af. Het gebied tussen de twee buizen heeft een erg constante temperatuur. Het energieverlies is echter wel groter, bij 2 buizen treedt er minder energieverlies op dan bij 4 buizen.

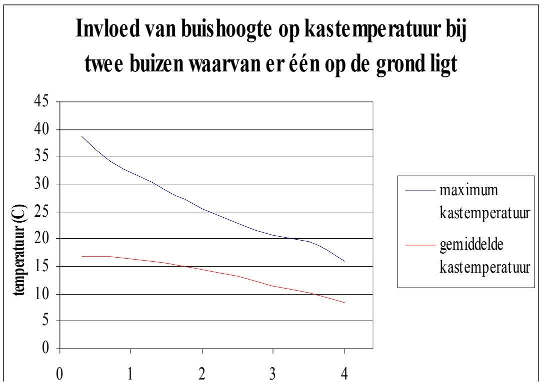
4.4.1 Sepran kas met punt: resultaten onderzoek naar variabelen

Het onderzoek is op een wijze uitgevoerd die vergelijkbaar is met het onderzoek van de balkvormige kas. Echter, twee opties zullen niet meer worden onderzocht, omdat de relevantie hiervan niet groot is. Dit zijn de mogelijkheid om 4 buizen in een kas aan te brengen en de mogelijkheid om de buizen in onderlinge afstand te variëren. In het vervolg is de onderling afstand tussen twee buizen op dezelfde hoogte altijd 1,5 m. De variabele waardes zijn dezelfde als bij de balkvormige kas behalve de hoogte, zie hiervoor H3.



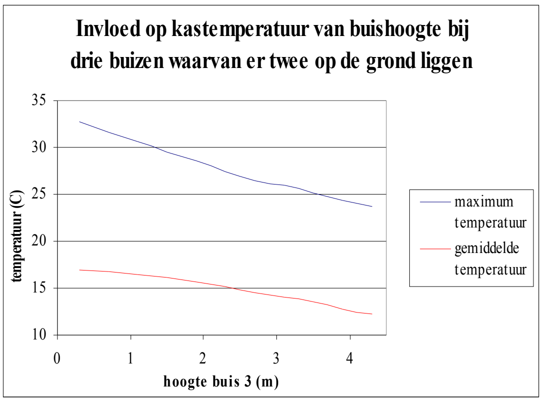
Eén buis met variabele hoogte

Het beeld van deze grafiek lijkt sterk op dezelfde grafiek bij de balkvormige kas. Er treedt niet echt meer energieverlies op, de punten die bij de balkvormige kas ter sprake kwamen, zijn ook hier van toepassing.



Twee buizen, één op de grond en één variabel

Ook deze grafiek vertoont een beeld dat vergelijkbaar is met dat van de balkvormige kas, zie daarom de bespreking van dezelfde grafiek in 4.3

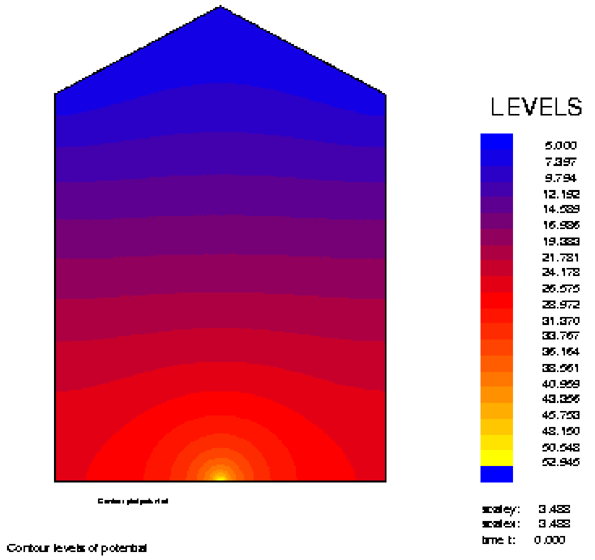


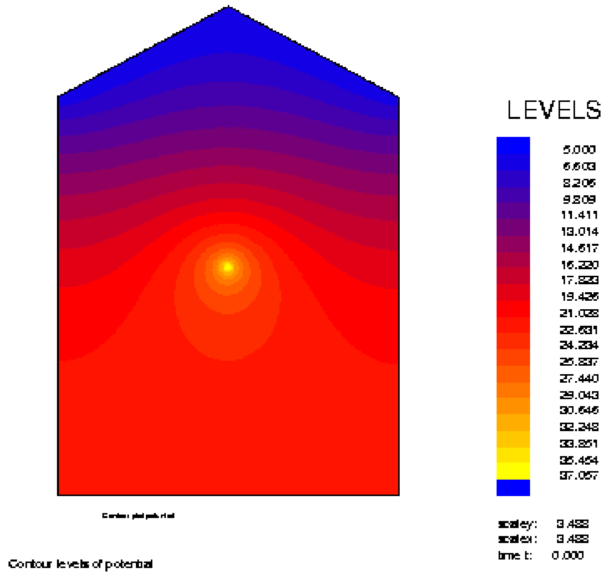
Twee buizen op de grond, één buis op een variabel hoogte

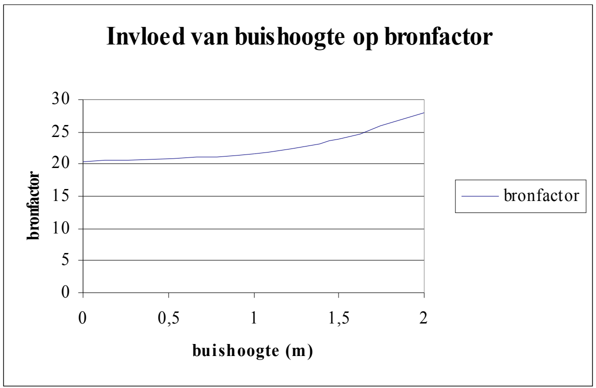
Bij deze variant liggen er twee buizen op de grond met een onderling afstand van 1,5 m. Hiertussen bevindt zich een derde buis met een variabele hoogte. Het beeld wat we nu zien valt op. Bij een toenemende hoogte van de derde buis is er namelijk nauwelijks sprake van een afname in verschil tussen de gemiddelde en maximum temperatuur. De verdeling van de temperatuur lijkt nauwelijks te veranderen. Echter, de derde buis heeft als effect dat de warmte van de twee onderste buis naar boven wordt getrokken. Hierdoor ontstaat er een gebied tussen de buizen waarin de temperatuur redelijk constant is. In energieverlies is deze variant ook redelijk, er is geen sprake van extreem weinig of veel energieverlies in vergelijkin met de andere varianten.

4.4.2 Sepran kas met punt: resultaten onderzoek naar variabele bronsterkte

Er zijn drie situaties onderzocht. Allereerst met één buis, daarnaast met twee buizen en ten slotte ook nog met drie buizen. In de afbeeldingen is zichtbaar hoe de temperatuur zich verspreidt over de kas.



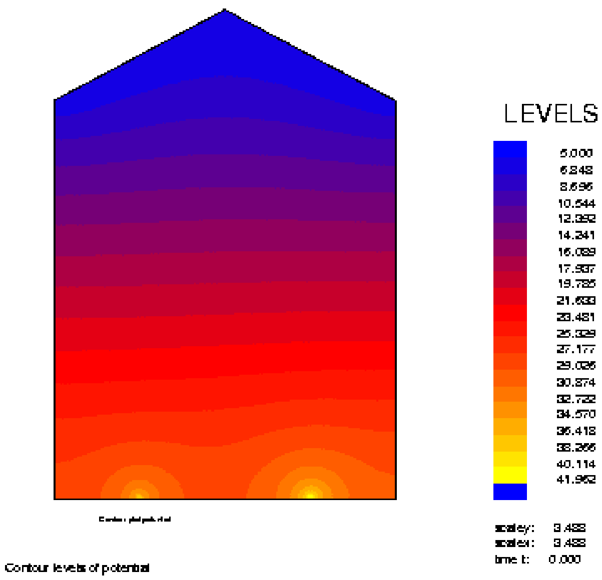


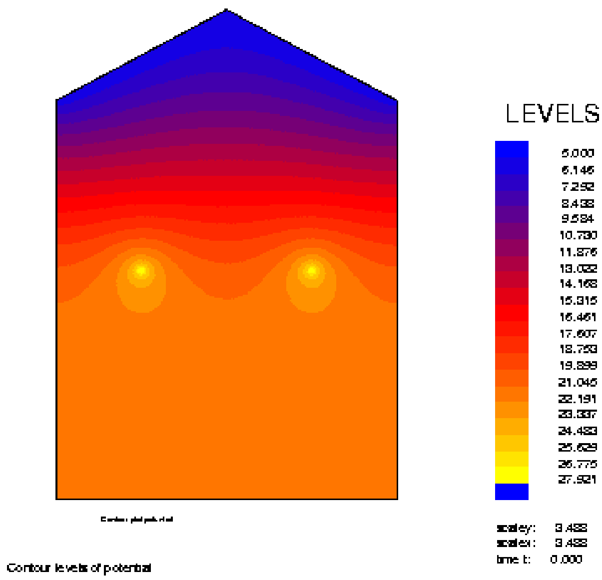


Eén buis met variabele hoogte

Uit de grafiek links blijkt dat met een toenemende buishoogte steeds meer energie nodig is om de gewenste temperatuur te bereiken. Vooral vanaf 1 m hoogte wordt de energie toename sterker.

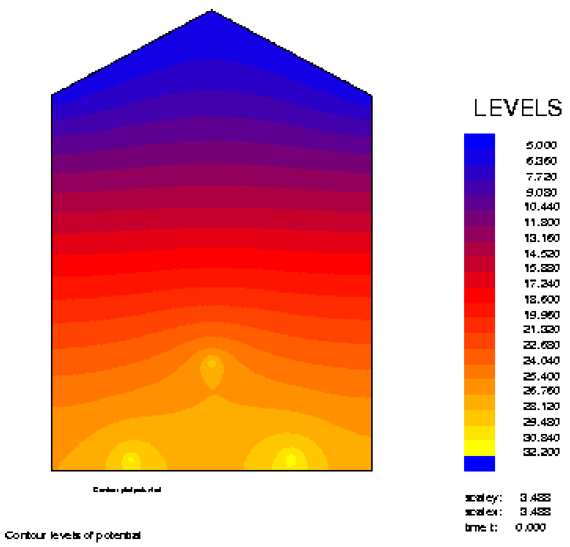
Uit de twee bovenstaande grafieken blijkt dat de ideale situatie echter bereikt wordt bij een buis op 2 m hoogte, omdat er dan een heel gelijkmatige temperatuur heerst in het gebied daaronder. Hieraan is echter onvermijdelijk een hoog energieverlies gekoppeld.

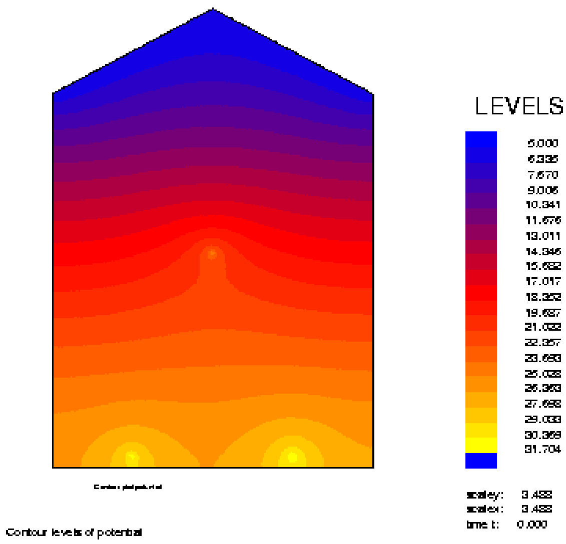


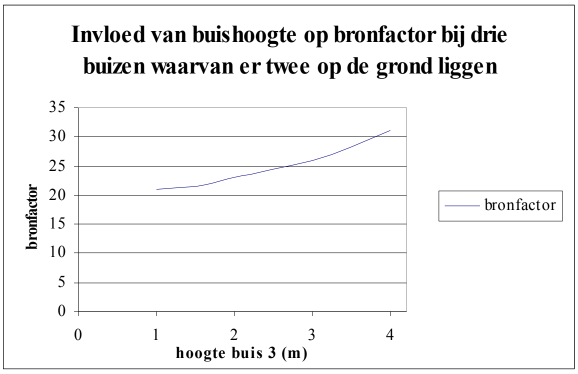


Twee buizen op variabele hoogte

De energie grafiek van twee buizen is exact vergelijkbaar met de situatie bij 1 buis. Het grote voordeel is echter, zoals uit bovenstaande afbeeldingen blijkt, dat de temperatuur uiterst gelijkmatig verdeeld is over de kas als de buizen hoog in de kas hangen. Een nadeel is echter dat het energieverlies vrij groot is.







Twee buizen op grond, één op variabele hoogte

Wanneer we de grafiek van de buishoogte en energie hoeveelheid links vergelijken met de grafiek bij één buis, valt op dat het energieverlies bij deze buis iets minder is. Hiermeer heeft deze buizen-variant een licht voordeel boven de twee andere varianten. Als we naar de twee bovenstaande diagrammen kijken, valt op dat bij een derde buis op de 2 m hoogte de temperatuur best wel gelijkmatig verdeelt is over de kas. Hiermee is deze variant iets beter dan de andere twee, want de warmte wordt redelijk gelijkmatig verdeelt over de kas en het energieverbruik is lager dan bij de andere twee.

5. Conclusie

In dit hoofdstuk wil ik twee dingen bespreken. Allereerst wil ik proberen een antwoord te formuleren op de onderzoeksvraag. Daarnaast wil ik het onderzoek evalueren en eventuele aandachtspunten voor verder onderzoek bespreken.

5.1. Conclusie

Uit de resultaten is gebleken dat het erg moeilijk is om een kort, duidelijk antwoord te formuleren op de onderzoeksvraag. Per situatie zijn er namelijk een aantal opties waaruit gekozen kan worden. Voordat deze ter sprake zullen komen, zal eerst de onderzoeksvraag herhaald worden, deze luidt als volgt:
Op welke wijze wordt een tomatenkas het meest efficiënt verwarmd?
Uit de Sepran resultaten blijkt dat er een aantal relevante opties zijn om een kas te verwarmen. Als men een minimaal energieverlies wil hebben, is het goed om te kiezen voor verwarmingsbuizen die op de grond liggen. Voor het energieverlies maakt het weinig uit of dit één of twee buizen zijn, hier is eigenlijk geen verschil tussen.
Het voordeel van twee buizen op de grond is zichtbaar in de bijbehorende diagrammen. Bij twee buizen op de grond worden er gelijkmatige warmtelagen gevormd, die horziontaal lopen. Bij één buis ontstaat er een bolvormige gelaagdheid in temperatuur. Voor een gelijkmatige tempartuur in de breedte van de kas is het dus verstandig om voor twee verwarmingsbuizen te kiezen.
Echter, een groot nadeel van deze optie blijft de erg ongelijkmatige verdeling van de warmte ten opzichte van de hoogte. Laag bij de grond is het heel warm, terwijl op 2,5 m de temperatuur al meer dan gehalveerd is t.o.v. de grond. Voor de meeste gewassen, ook voor tomaten, zal dit niet bevorderlijk zijn voor de groei. De koppen van de planten missen dan immers een goede temperatuur.
Om dit probleem op te vangen is het beter om de verwarmingsbuizen op een bepaalde hoogte te hangen. Hierbij zijn drie mogelijkheden. Er kan één buis op een bepaalde hoogte gehangen worden, er kunnen twee buizen op een bepaalde hoogte worden gehangen en er kunnen twee buizen op de grond liggen en één op een bepaalde hoogte hangen.
Van deze drie zijn qua energieverlies de eerste twee volstrekt identiek. Er treedt bij buizen op een bepaalde hoogte vrij veel energieverlies op. Dit is dus erg ongunstig. De variant met 1 buis is het minst geschikt, want nu is er nog steeds sprake van een redelijk ongelijkmatige verdeling van de temperatuur in de breedte van de kas. In dit opzicht is de variant met 2 buizen aan te raden. In het gebied onder de twee buizen onstaat een heel constante temperatuur, terwijl ook boven de buizen nog geprofiteerd wordt van de aanwezige verwarmingsbron. Bij buizen op 2 m hoogte onstaat een redelijk constante temperatuur tot een hoogte van ongeveer 3 m.
De derde variant heeft als groot voordeel dat het energieverlies lager is dan bij de andere twee varianten. De derde buis trekt de warmte van de twee buizen op de grond eigenlijk de hoogte in. Hierdoor onstaat een vrij constante temperatuur in de kas. Bij een hoogte van de 3e buis van 2 m is de temperatuur tot ongeveer 3 m redelijk constant. Wel moet opgemerkt worden dat de variant met twee buizen dan een constanter beeld vertoont. Desondanks is de variant met 3 buizen ook een goede optie.
Samenvattend kunnen we dus concluderen dat de twee meest geschikte varianten de variant met twee buizen en de variant met 3 buizen zijn. Het is echter per gewas verschillend welke variant de voorkeur verdient.

5.2. Bespreking onderzoek en aanbevelingen

Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van modellen. Om deze modellen te construeren zijn een aantal aannames gedaan. Hierdoor werd de benodigde energiehoeveelheid om een kas op temperatuur te krijgen niet realistisch, de hoeveelheid energie bleef laag. De belangrijkste aanname die hiervoor verantwoordelijk is, is de verwaarlozing van de warmteconvectie in de kas. In een eventueel vervolgonderzoek is het aan te bevelen om de convectie ook mee te nemen in het model. Daarnaast is het in een vervolgonderzoek misschien ook goed om andere aantallen en posities van verwarmingsbuizen te onderzoeken. Een variant die nog niet is onderzocht, is namelijk de variant met één buis op de grond en twee buizen op een variabele hoogte.
Wat wel moet worden opgemerkt is dat de relevantie van andere varianten van tevoren goed moet worden overdacht. Het is bijvoorbeeld erg onpraktisch om heel veel buizen in een kas te hebben. Daarnaast is een teveel aan verwarmingbuizen economisch gezien onverantwoord.
Samenvattend kan ik zeggen dat het in mijn mening zinvol is om nog verder onderzoek te doen naar dit probleem, zodat aan een tuinder uiteindelijk een optimaal advies kan worden gegeven.

Bronvermelding

1. Fysische transportverschijnselen I
   Smith, J. M. M. en Stammers, E.
   Delft, Delftsche Uitgevers Maatschappij b.v. 1973-1

2. Heat transfer, volume I
   Jacob, Max
   New York, John Wiley & sons inc. 1955-4

3. Fysisische transportverschijnselen II
   Hoogendoorn, C.J.
   Delft, Delftsche Uitgevers Maatschappij b.v. 1978-1

4. http://www.math.mtu.edu/~msgocken/intro/node2.html#SECTIO

5. Binas
   Groningen, Wolters-Noordhoff 1998-4

6. http://ta.twi.tudelft.nl/sepran/sepran.html