

Ing. B.J. van der Sluis
Ing. K.R. Nawrocki
Ing. N.J.A. van der Velden

Publikatie 4.133

DEKKINGSGRADEN VAN RESTWARMTE IN DE GLASTUINBOUW



SIGN: L26-4.133
EX. NO: B
MLV:

Juli 1992

Landbouw-Economisch Instituut (LEI-DLO)
Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen (IMAG-DLO)

551519

REFERAAT

DEKKINGSGRADEN VAN RESTWARMTE IN DE GLASTUINBOUW

Sluis, B.J. van der, K.R. Nawrocki en N.J.A. van der Velden
Den Haag, Landbouw-Economisch Instituut (LEI-DLO), 1992
Publikatie 4.133
ISBN 90-5242-167-6

68 p, tab., fig., English summary

Onderzoek op praktijkbedrijven naar de dekkingsgraad van restwarmte in de glastuinbouw; dat is de mate waarin deze alternatieve warmtebron voorziet in de totale warmtevraag van een bedrijf.

In dit onderzoek is de dekkingsgraad bepaald op 45 glastuinbouwbedrijven in Noord-Brabant. Vervolgens is geanalyseerd waardoor deze wordt beïnvloed.

De dekking loopt uiteen van 25 tot 100% en bedraagt gemiddeld 57%. Ze is afhankelijk van de capaciteit van de restwarmtebron en een aantal bedrijfsomstandigheden. Een vergroting van de capaciteit van de restwarmtebron en een toename van de uitkoeling van het restwarmtewater verhogen de dekking. Meer CO₂-doserende met de ketel en een grotere warmtebehoefte op het bedrijf verlagen de dekkingsgraad.

De mate van uitkoeling van het restwarmtewater is afhankelijk van enerzijds de hoeveelheid en de aanbodtemperatuur van het restwarmtewater en de oppervlakte van de warmtewisselaar en anderzijds het verwarmingssysteem en de totale warmtebehoefte in de kas.

Restwarmte/Energie/Glastuinbouw/Alternatieve warmtebronnen/Warmtewisselaar/Energiebesparing/Dekkingsgraad/Nederland

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Sluis, B.J. van der

Dekkingsgraden van restwarmte in de glastuinbouw /
B.J. van der Sluis, K.R. Nawrocki, N.J.A. van der Velden. -
Den Haag : Landbouw-Economisch Instituut (LEI-DLO). -
Fig., tab. - (Publikatie / Landbouw-Economisch Instituut
; no. 4.133)

Met samenvatting in het Engels.

ISBN 90-5242-167-6

NUIG 835

Trefw.: energiebesparing ; glastuinbouw.

Overname van de inhoud toegestaan, mits met duidelijke bronvermelding.

INHOUD

	Blz.
WOORD VOORAF	5
SAMENVATTING	7
SUMMARY	11
1. INLEIDING	15
2. TECHNISCHE ACHTERGROND	17
2.1 Inleiding	17
2.2 Basislast	17
2.3 Restwarmtebron	19
2.4 Regeling kasverwarming en restwarmte	20
3. METHODE	24
3.1 Opzet van het onderzoek	24
3.2 Metingen	25
3.3 Analyse dekkingsgraad	27
3.4 Analyse delta t_p	32
4. RESULTATEN	34
4.1 Meetresultaten	34
4.1.1 Gerealiseerde dekkingsgraden	34
4.1.2 Gerealiseerde delta t_p	36
4.2 De verklarende variabelen	37
4.3 Onderlinge verschillen delta t_p	38
4.4 Onderlinge verschillen in CO ₂ -intensiteit	40
4.5 Onderlinge verschillen in dekkingsgraad	41
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	44
5.1 Conclusies	44
5.2 Aanbevelingen	45
LITERATUUR	47
BIJLAGEN	49

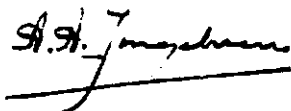
WOORD VOORAF

Vanuit milieu-overwegingen worden steeds meer eisen aan de omvang en wijze van energieverbruik gesteld. De overheid streeft naar een vermindering van de CO₂-uitstoot en een verbetering van de energie-efficiency. Blijkens het Nationaal Milieubeleidsplan (NMP) wordt gestreefd naar een verbetering van de energie-efficiency met 50% over de periode 1980-2000 en blijkens de Nota Energiebesparing met 30% over 1989-2000. De toepassing van restwarmte kan, als één van de alternatieve warmtebronnen, hieraan een belangrijke bijdrage leveren.

Voor de beoordeling van de technische en economische haalbaarheid van de toepassing van restwarmte in de glastuinbouw is het belangrijk inzicht te hebben in de mate waarin restwarmte wordt aangewend op de bedrijven en welke factoren dit bepalen.

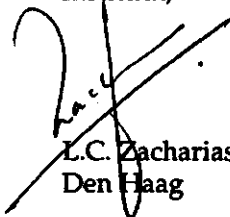
Het onderzoek is uitgevoerd door het Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen (IMAG-DLO) en het Landbouw-Economisch Instituut (LEI-DLO) in opdracht van de Nederlandse maatschappij voor energie en milieu (NOVEM). IMAG-DLO heeft de technische inventarisatie voor haar rekening genomen. LEI-DLO heeft de meetresultaten verzameld en verwerkt. De analyse van de meetresultaten en de rapportage zijn gezamenlijk uitgevoerd. De Provinciale Noordbrabantse Energie-Maatschappij Transport en Opwekking in Den Bosch (PNEM) en de tuinders hebben voor het onderzoek gegevens verstrekt. Voor hun bijdrage zijn wij erkentelijk.

De Directeur van het
Instituut voor Mechanisatie
Arbeid en Gebouwen,



A.A. Jongebreur
Wageningen

De Directeur van het
Landbouw-Economisch
Instituut,



L.C. Zachariasse
Den Haag

Juli 1992

SAMENVATTING

De warmtebehoefte in de Nederlandse glastuinbouw is groot. De verwarming van de gewassen vindt vooral plaats door de verbranding van aardgas in ketels. Op een *klein aantal* tuinbouwbedrijven worden alternatieve energiebronnen ingezet.

De overheid streeft naar een verbetering van de energie-efficiency en een verlaging van de CO₂-emissie. Dat kan worden gerealiseerd door de toepassing van alternatieve energiebronnen. De belangrijkste vorm van alternatieve energievoorziening is de gecombineerde productie van elektriciteit en warmte. Voor de glastuinbouw resulteert dit in de toepassing van restwarmte en warmte-kracht-installaties.

In de elektriciteitscentrale wordt brandstof omgezet in elektriciteit met een laag rendement; de rest gaat verloren als afvalwarmte. Deze afvalwarmte heeft een lage temperatuur (laagwaardige warmte) en is moeilijk aan te wenden in de glastuinbouw. Bij de gecombineerde productie van elektriciteit en warmte komt de warmte beschikbaar bij een hoger temperatuurniveau (hoogwaardige warmte). Dit is eenvoudiger toe te passen in de glastuinbouw. Hierdoor neemt het totaal rendement van het brandstofverbruik aanzienlijk toe.

Het verbruik van restwarmte brengt hoge investeringen met zich mee. Om de hoogte van de investering te beperken wordt restwarmte in de praktijk ingezet voor de basislast. De restwarmtebron heeft een beperkte capaciteit, maar wordt wel als eerste ingeschakeld, gaat als laatste uit en wordt zodoende zo lang mogelijk gebruikt. Aan de resterende warmtebehoefte (pieklast) wordt voldaan door de ketel. Hiermee wordt de hoogte van de investering beperkt en kan toch een groot deel van de warmte door de restwarmtebron worden geleverd. De ketel wordt ook gebruikt voor de CO₂-dosering. Tijdens de CO₂-productie met de ketel wordt warmte geproduceerd. Dit kan ten koste gaan van het restwarmteverbruik.

Het aandeel van restwarmte in het totale warmteverbruik op het glastuinbouwbedrijf wordt de dekkingsgraad genoemd. De hoogte van de dekkingsgraad bepaalt voor een belangrijk deel de brandstofbesparing

door restwarmte en daardoor de verbetering van de energie-efficiency en de CO₂-emissie.

In dit onderzoek staan twee vragen centraal. De eerste is welke dekingsgraad op de glastuinbouwbedrijven in de praktijk gerealiseerd wordt. De tweede vraag is waardoor de verschillen in dekingsgraad tussen de bedrijven worden veroorzaakt. Vooral dit laatste is van belang voor technisch-economische evaluaties voor zowel individuele bedrijven als restwarmteprojecten. De resultaten kunnen eveneens gebruikt worden als bouwstenen voor andere onderzoeksprojecten.

Voor dit onderzoek zijn over een periode van één jaar op 45 glastuinbouwbedrijven in Noord-Brabant de dekingsgraden bepaald. Daarnaast is een groot aantal technische- en teelttechnische bedrijfsgegevens verzameld die gebruikt worden om de verschillen in dekingsgraad te verklaren. Bij de bespreking van de resultaten zijn de bedrijven ingedeeld naar drie gebieden, namelijk West-Brabant (Breda e.o. en Tilburg e.o.), de Plukmadese polder en Oost-Brabant (Asten e.o.).

De gerealiseerde dekingsgraad van restwarmte is gemiddeld 57% per bedrijf. De spreiding tussen de bedrijven is groot en loopt uiteen van 25 tot 100%. In de Plukmadese polder wordt de hoogste dekking gehaald. Deze bedraagt gemiddeld 81%. In West- en Oost-Brabant is dit, met respectievelijk 56 en 40%, lager.

De verschillen in dekingsgraad tussen de bedrijven worden voor drie vierde deel verklaard door vier factoren, namelijk:

- de capaciteit van de restwarmtebron;
- de mate van uitkoeling van het restwarmtewater (Δt_p);
- de mate van CO₂ doseren met de ketel (CO₂-intensiteit) en
- de warmtebehoefte in de kas (warmte-intensiteit).

Daarnaast zijn er nog drie factoren waarvan verwacht wordt dat ze invloed hebben op de dekingsgraad, namelijk de regeling van de ketel en restwarmtebron, het al of niet opwarmen van de ketel met restwarmte en de boeteclausule van het gasbedrijf. De laatste twee factoren zijn, door het geringe aantal bedrijven waar dit het geval was, bij de analyse buiten beschouwing gelaten. Tussen de dekingsgraad en de regeling van de warmtebronnen is geen relatie gevonden.

Een grotere capaciteit van de restwarmtebron en een grotere uitkoeling resulteren in een hogere dekking; een hogere CO₂-intensiteit en een hogere warmte-intensiteit resulteren in een lagere dekking.

De capaciteit kan vergroot worden door een toename van de volumestroom en de aanbodtemperatuur van het restwarmtewater en een vergroting van het verwarmend oppervlak van de warmtewisselaar. De aanbodtemperatuur loopt uiteen van 108 tot 125°C, de volumestroom van 0,7 tot 2,8 dm³ per m² kas en het verwarmend oppervlak van 0,26 tot 1,04 dm² per m² kas. Dit resulteert in een capaciteitsfactor die uiteen loopt

van 3,0 tot 5,1 (onbenoemd). De capaciteitsfactor in de Plukmadese polder is met gemiddeld 4,3, respectievelijk vijf en tien procent hoger in vergelijking met West- en Oost-Brabant. Dit wordt met name veroorzaakt door een groter verwarmend oppervlak van de warmtewisselaar en een hogere gemiddelde aanbodtemperatuur.

De uitkoeling van het restwarmtewater (delta t_p) is gemiddeld 50°C per bedrijf en loopt uiteen van 22 tot 68°C. De delta t_p in de Plukmadese polder is 63°C, in de andere gebieden gemiddeld 40 en 49°C. De delta t_p kan vergroot worden door een vergroting van het verwarmend oppervlak van de warmtewisselaar, een hogere aanbodtemperatuur, een lagere volumestroom van het restwarmtewater, een groter verwarmend oppervlak (meer verwarmingspijpen) en een lagere warmte-intensiteit in de kas.

Zowel een hogere CO₂-intensiteit als een hogere warmte-intensiteit resulteren in een hoger gasverbruik van de ketel. Dit resulteert in een lagere dekkingsgraad. Gemiddeld wordt er 1,1 GJ restwarmte (dit is gelijk aan circa 35 m³ gaswarmte) en 28 m³ gas per m² kas verbruikt. Het restwarmteverbruik loopt uiteen van 0,5 tot 2,2 GJ per m² en het gasverbruik van 0,6 tot 53,7 m³ per m². De warmte-intensiteit bedraagt gemiddeld 1,9 GJ per m² en loopt uiteen van 1,0 tot 2,7 GJ per m² kas. Gemiddeld wordt 6,9 m³ gas per m² verbruikt voor de CO₂-dosering in combinatie met de warmteproductie. Dit loopt uiteen van 0 tot 14,3 m³ per m² kas. In de Plukmadese polder wordt veel "zuiver" CO₂ gedoseerd. In West- en Oost-Brabant is de CO₂-intensiteit respectievelijk 6,4 en 7,5 m³ per m².

Een toename van de capaciteitsfactor van de restwarmtebron van 0,5 resulteert in een verhoging van de dekkingsgraad van 5,5%. Een toename van de delta t_p van 10°C heeft tot gevolg dat de dekking met 11% toeneemt. Neemt de CO₂-intensiteit met 1 m³ per m² toe, dan daalt de dekking 1,1%. Een hogere warmte-intensiteit van 0,3 GJ/m² (ongeveer 10 m³ gas per m²) veroorzaakt dat de dekking met 3,4% afneemt.

De verklarende factoren hangen, met uitzondering van de capaciteit van de restwarmtebron, echter samen. Bij een hogere warmte-intensiteit is de CO₂-intensiteit hoger en de delta t_p lager. Immers, bij een hogere warmtebehoefte in de kas wordt de ketel intensiever gebruikt, waarbij meer CO₂ gedoseerd kan worden. Bovendien is bij een hogere warmte-intensiteit de gemiddelde pijptemperatuur hoger waardoor de delta t_p kleiner is. Dit betekent dat bij een schatting van de dekkingsgraad bij veranderende bedrijfsomstandigheden de samenhangende factoren niet onafhankelijk van elkaar in beschouwing mogen worden genomen. Bij een wijziging van één van de drie factoren zullen eerst de gevolgen voor de andere twee factoren moeten worden gekwantificeerd voordat de dekkingsgraad in de nieuwe situatie kan worden geschat. Door deze samenhang heeft een wijziging van één van de factoren een grotere wijziging van de dekkingsgraad tot gevolg.

SUMMARY

The heat demand of the Dutch greenhouse industry is high. Mainly natural gasboilers are used for heating. A small number of growers uses alternative heat sources.

The environmental policy plan of the Dutch government aims at an improvement of the energy efficiency and a reduction of the (total) CO₂-emission. This can be realized by using alternative energy sources. The most important alternative energy source is the simultaneous production of heat and power. This can be realized by using reject or abstract heat from power stations.

In a power station fuel is converted into electricity. A process with a low efficiency, the heat is let off as waste. Waste heat has a low temperature and is therefore difficult to use in the greenhouse industry. Simultaneous production of heat and electricity produces heat at a relative high temperature, called reject heat. Reject heat with a high temperature is easier to use in the greenhouse industry. As a result using reject heat considerable fuel savings can be realized.

The transport of reject heat to the greenhouses demands high investments and costs. These costs can be reduced by using reject heat in base-load. This means the reject heat has a limited capacity and is only able to cover the base-load demand. In case of a higher heat demand the rest of the heat (peak load) is produced by a gas boiler, the investments will then be lower and the main part of the heat is still provided for reject heat. The boiler is also used for CO₂-enrichment. During CO₂-enrichment with a boiler also heat is produced. This causes a decrease in the use of the amount of reject heat.

The share of reject heat in the total heat consumption of a greenhouse is called the coverage by reject heat. The coverage is important for the saving of fuel by using reject heat. The saving decides the improvement of the energy efficiency and the reduction of the CO₂-emission by using reject heat.

This research has two main subjects. Firstly the coverage which is realized in the greenhouse industry. Secondly the factors which cause the differences in coverage between the individual holdings. The answers to

these questions are important for technical-economical evaluations as well of reject heat projects as of individual holdings. The results can also be used for other research-projects.

In this research the coverage of reject heat on 45 holdings is determined over a period of one year. A great number of other technical data are also collected. These data are used to explain the differences in coverages between the individual holdings.

The holdings are located in the south of the Netherlands, namely West-Brabant (Breda, Tilburg and surroundings), the Plukmadese Polder and East-Brabant (Astén and surroundings).

The average coverage by reject heat of all holdings is 57%. The differences between the holdings are considerable. The coverage differs from 25 to 100%. The highest average coverage is realized in the Plukmadese Polder where it amounts to 81%. In West- and East-Brabant this is respectively 56 and 40%.

The differences in coverage between the individual holdings are explained for 75% by four factors, namely:

- the capacity of the reject heat source;
- the cooling-down of the reject heat water (Δt);
- the CO₂-enrichment by the gasboiler and
- the heat-intensity in the glasshouse.

There are also three other factors of which influence on the coverage could be expected, namely:

- the control of the boiler and the reject heat source;
- the warming up of the boiler with reject heat and
- the penalty-clause of the gascompany.

The last two factors are left out of consideration as there are not enough holdings on which these factors are of any importance. No relation between the coverage and the control of the different heat sources has been found.

A bigger capacity of the reject heat and more cooling-down of the water will result in a higher coverage; more CO₂-enrichment by the gasboiler and a higher heat-intensity will result in a lower coverage.

The capacity can be enlarged by an increase of the water volume of the reject heat in the heat exchanger, an increase of the temperature of the reject heat and an increase of the heating surface of the heat exchanger. The temperature of the reject heat differs from 108 to 125°C, the water volume differs from 0,7 to 2,8 dm³ per m² glasshouse and the heating surface of the heat exchanger differs from 0,26 to 1,04 dm² per m². This results in capacity factors of 3,0 to 5,1. In the Plukmadese Polder the average capacity factor is 4,3. This is respectively five and ten per cent higher than in West- and East-Brabant. This is caused mainly by a larger heating surface of the heat exchanger and a higher temperature of the reject heat.

The cooling-down (Δt) of the reject heat water is 50°C in average and differs from 22 to 68°C . In the Plukmadese Polder the average Δt is 63°C and in the other areas respectively 40 and 49°C . The Δt can be enlarged by:

- an increase of the heating surface of the heat exchanger;
- a higher temperature of the reject heat;
- a lower water volume in the heat exchanger;
- a larger heating surface of the heating system in the glasshouse and
- a lower heat-intensity in the glasshouse.

More CO_2 -enrichment by the gasboiler as well as a higher heat-intensity demands a higher gas consumption by the boiler. This causes a lower coverage. The average use of reject heat is $1,1 \text{ GJ per m}^2$ (equal to 35 m^3 natural gas heat) and the average use of natural gas is $28 \text{ m}^3 \text{ per m}^2$. The use of reject heat differs from $0,5$ to $2,2 \text{ GJ per m}^2$ and the natural gas consumption from $0,6$ to $53,7 \text{ m}^3 \text{ per m}^2$. The total heat intensity is $1,9 \text{ GJ per m}^2$ in average and differs from $1,0$ to $2,7 \text{ GJ per m}^2$. The average gas consumption in combination with CO_2 -enrichment is $6,9 \text{ m}^3 \text{ per m}^2$ and differs from 0 to $14,3 \text{ m}^3 \text{ per m}^2$ glasshouse. In the Plukmadese Polder mostly pure CO_2 is used. The use of natural gas for CO_2 -enrichment in West- and East-Brabant is respectively $6,4$ and $7,5 \text{ m}^3 \text{ per m}^2$. The total average heat intensity is $1,9 \text{ GJ per m}^2$ and differs from $1,3$ to $2,5 \text{ GJ per m}^2$.

An increase of the capacity of the reject heat by $0,5$ results in a higher coverage by $5,5\%$. An increase of the Δt of 10°C causes a higher coverage by 11% . An increase of the CO_2 -enrichment by the gasboiler of $1 \text{ m}^3 \text{ per m}^2$ causes a decrease of the coverage by $1,1\%$. An increase of the heat-intensity of $0,1 \text{ GJ per m}^2$ (equal 3 m^3 natural gas per m^2) causes a decrease of the coverage by $1,1\%$.

The factors which explain the differences in coverage between the individual holdings are connected with each other, except the capacity of reject heat. A higher heat intensity causes more CO_2 -enrichment by the gasboiler and a lower Δt . An increase of the heat demand in the greenhouse causes the use of more gas use by the boiler and therefore more CO_2 -enrichment can be realized. A higher heat intensity means a higher average temperature of the heating pipes. This causes a fall of the Δt . Because of this no estimation of the coverage by changing circumstances may be made by independently changing the connected factors. A change of one of the three factors causes also a change of the other two. They have to be quantified before estimating the coverage in the new situation. A change of one of the factors causes a bigger change of the coverage than may be expected from an independent change.

1. INLEIDING

De Nederlandse glastuinbouw is een energie-intensieve bedrijfstak. De benodigde warmte wordt op het overgrote deel van de bedrijven geproduceerd met één of meer aardgasgestookte ketels. Door een klein deel van de bedrijven wordt in de warmtebehoefte voorzien met alternatieve warmtebronnen.

De overheid streeft naar een lagere milieubelasting door reductie van de CO₂-emissie en een verbetering van de energie-efficiency. Alternatieve energiebronnen kunnen hieraan een bijdrage leveren. De belangrijkste alternatieve energiebron is de gecombineerde produktie van elektriciteit en warmte (Van der Velden et al., 1990) aanwending van restwarmte van elektriciteitscentrales of steg-eenheden (stoom- en gasturbine) en door het gebruik van warmte-krachtinstallaties op tuinbouwbedrijven.

In een elektriciteitscentrale wordt de gebruikte brandstof voor ongeveer 40% omgezet in elektrische energie; de rest gaat verloren als afvalwarmte. Deze afvalwarmte kan aangewend worden in de glastuinbouw. Een nadeel is echter dat deze warmte beschikbaar komt bij een laag temperatuurniveau van 30-40°C (laagwaardige warmte). De aanwending van laagwaardige warmte vereist grote veranderingen in het verwarmingssysteem in de kas en de ontwikkeling van een nieuwe stooktechniek. Dit brengt aanzienlijke extra kosten en praktische problemen met zich mee (Van der Velden, 1989).

Bij de gecombineerde produktie van elektriciteit en (hoogwaardige) warmte wordt de brandstof aanzienlijk efficiënter gebruikt. Met dezelfde hoeveelheid brandstof wordt wel minder elektriciteit opgewekt, maar een groot deel van de warmte komt beschikbaar bij een hoger temperatuurniveau (hoogwaardige warmte) waardoor het eenvoudiger is aan te wenden op een glastuinbouwbedrijf. De verwarmingstechniek in de kassen is gebaseerd op gebruik van hoogwaardige warmte (maximaal 90°C). Door het gebruik van restwarmte of warmte van w/k-installaties neemt het totaalrendement van het brandstofverbruik aanmerkelijk toe.

Het gebruik van restwarmte vindt tot nu toe in de Nederlandse glastuinbouw op beperkte schaal plaats. Het betreft ongeveer honderd bedrijven in de provincie Noord-Brabant. Op de stadsverwarmingsleiding van

de Amercentrale naar Breda en Tilburg zijn bestaande glastuinbouwbedrijven aangesloten. In de Plukmadese polder zijn de bedrijven direct aangesloten op de Amercentrale. In Asten en omgeving maken de bedrijven gebruik van restwarmte van twee steg-eenheden in Helmond.

De restwarmtebron wordt in de praktijk ingezet voor de basislast van de warmtebehoefte. Dit wil zeggen dat deze een beperkte capaciteit heeft maar wel het eerst in werking treedt, het laatste uitgaat en dus zo lang mogelijk in gebruik is. De stookinstallatie wordt ingezet voor de pieklast van de warmtebehoefte en voor de CO₂-dosering. De hoogte van de investering in de restwarmte-bron wordt hierdoor beperkt en toch kan een groot deel van de jaarlijkse warmtebehoefte worden geleverd. Het aandeel in de jaarlijkse warmtebehoefte wordt de dekkinggraad genoemd.

De hoogte van de brandstofbesparing door het gebruik van een restwarmte-bron en daarmee de verbetering van de energie-efficiency en de CO₂-emissie, wordt voor een belangrijk deel bepaald door de hoogte van de dekkinggraad. Waarschijnlijk bestaan er grote verschillen in de gerealiseerde dekkinggraden op de afzonderlijke bedrijven.

De doelstelling van dit onderzoek bestaat uit twee onderdelen. Het eerste onderdeel is het vastleggen van de gerealiseerde dekkinggraden op de individuele glastuinbouwbedrijven met restwarmte. Het tweede is gericht op het verklaren van de onderlinge verschillen in dekkinggraad tussen de bedrijven. De oorzaken voor de onderlinge verschillen worden gekwantificeerd en kunnen vervolgens gebruikt worden om na te gaan in welke mate veranderende bedrijfsomstandigheden consequenties hebben voor de dekkinggraad.

De resultaten kunnen worden gebruikt voor technisch-economische evaluaties op zowel bedrijfsniveau als bij restwarmteprojecten en als bouwsteen voor andere onderzoeksprojecten binnen het totale energie-onderzoek in de glastuinbouw.

Na dit inleidende hoofdstuk wordt in hoofdstuk 2 de technische achtergrond van de toepassing van restwarmte beschreven. Daarna wordt in hoofdstuk 3 beschreven welke methode in het onderzoek is gebruikt. De resultaten komen in hoofdstuk 4 aan de orde. In het laatste hoofdstuk staan de conclusies en aanbevelingen.

2. TECHNISCHE ACHTERGROND

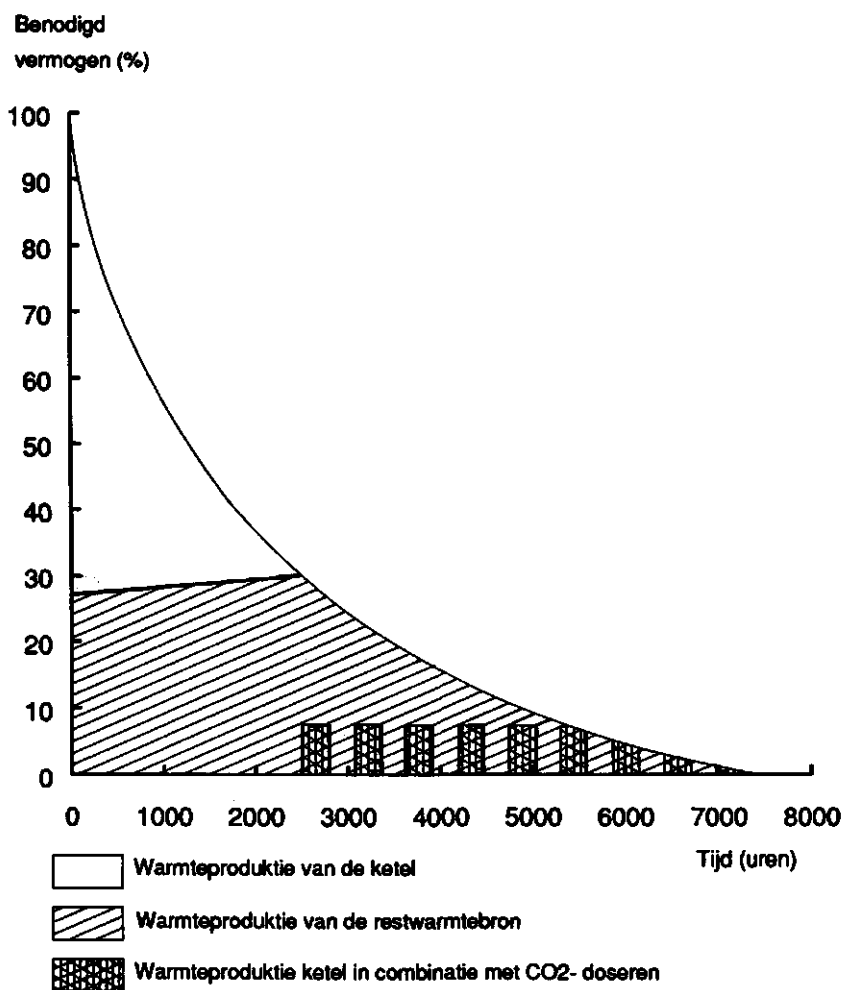
2.1 Inleiding

Het gebruik van restwarmte brengt een aantal technische veranderingen op het glastuinbouwbedrijf met zich mee. Voor een goed begrip wordt in dit hoofdstuk kort ingegaan op de technische achtergrond. Hierbij komen de inzet van de restwarmtebron, de ketel en de regeling van beide aan de orde.

2.2 Basislast

Op een glastuinbouwbedrijf moet het gehele jaar voldoende warmte geleverd worden om de temperatuur in de kassen op het gewenste niveau te houden. Het warmteleverend vermogen van de ketel is daarom afgestemd op de grootste warmtevraag. Het maximale vermogen is echter maar gedurende een korte tijd nodig. Dit blijkt uit de jaarbelastingduurkromme (Breuer) in figuur 2.1, waarin is weergegeven gedurende welke tijdsduur een bepaald vermogen nodig is.

Indien de jaarlijkse warmtebehoefte van een glastuinbouwbedrijf volledig door restwarmte zou worden geleverd, zal de capaciteit aan restwarmte gedurende bijna het gehele jaar niet volledig benut worden. Bovendien brengt het warmtetransportsysteem grote investeringen met zich mee. Om deze investeringen te beperken wordt restwarmte ingezet voor de basislast. De restwarmtebron levert dan een deel van het benodigd vermogen. De gasketel verzorgt de pieklast en de CO₂-productie. Hierbij wordt wel zolang mogelijk gebruik gemaakt van restwarmte; de restwarmtebron treedt als eerste in werking en gaat als laatste uit. De hoogte van de investeringen wordt hiermee beperkt en toch kan door de alternatieve warmtebron een groot deel van de jaarlijkse warmtebehoefte worden geleverd (zie arcering in figuur 2.1). In perioden waarin de restwarmtebron volledig in de warmtebehoefte kan voorzien, gaat het produceren van CO₂ met de ketel ten koste van de warmtelevering door de restwarmtebron (zie de blokken in het gearceerde deel van figuur 2.1).



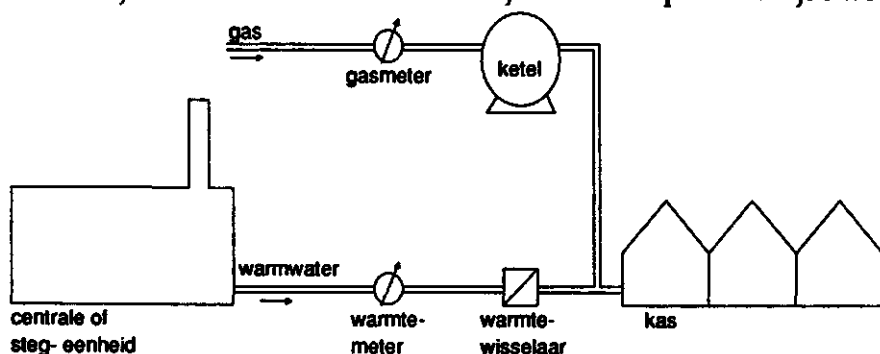
Figuur 2.1 Voorbeeld van een jaarbelastingduurkromme voor de glastuinbouw

Een nadeel van de aanwending van een alternatieve bron in basislast is dat de efficiency van de gasketel bij gebruik voor de pieklast lager is dan bij volledige gasstook. Er is dan meer gas nodig voor de produktie van een bepaalde hoeveelheid warmte. Dit heeft tot gevolg dat de gasbesparing door de alternatieve warmtebron lager uitvalt dan de dekking (Nawrocki et al., 1991).

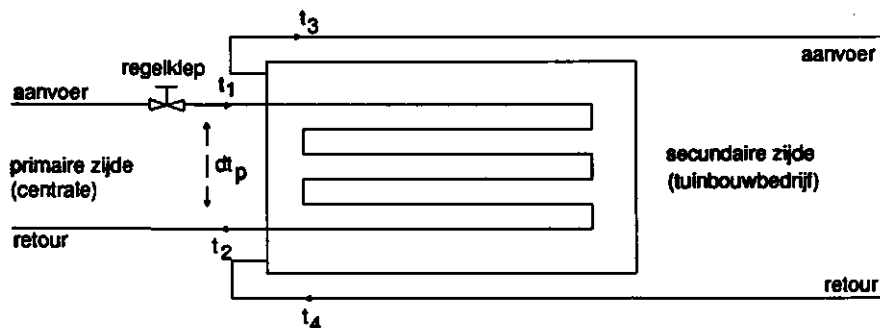
2.3 Restwarmtebron

De bij de centrale of steg-eenheid geproduceerde restwarmte wordt met water getransporteerd naar de glastuinbouwbedrijven. De warmte wordt via een warmtewisselaar afgegeven aan het verwarmingswater van het tuinbouwbedrijf. De aanwending van restwarmte en ketelwarmte wordt in figuur 2.2 schematisch weergegeven.

In figuur 2.3 wordt de aansluitwijze van de warmtewisselaar weergegeven. Hierbij worden twee waterstromen onderscheiden; één aan de primaire zijde en één aan de secundaire zijde. Aan de primaire zijde wordt



Figuur 2.2 Schematische weergave van restwarmtelevering door een elektriciteitscentrale of steg-eenheid aan een glastuinbouwbedrijf



- t_1 = aanvoertemperatuur van de centrale (primaire zijde)
- t_2 = retourtemperatuur naar de centrale (primaire zijde)
- t_3 = aanvoertemperatuur naar de kas (secundaire zijde)
- t_4 = retourtemperatuur van de kas (secundaire zijde)
- d_{tp} = delta t primaire zijde

Figuur 2.3 Aan- en afvoer van de waterstromen bij de warmtewisselaar volgens het tegenstroomprincipe

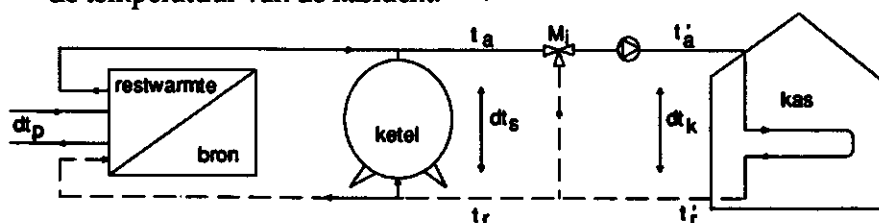
het restwarmtewater van de centrale aangevoerd. Vervolgens wordt de warmte via de warmtewisselaar overgedragen aan het verwarmingswater van het tuinbouwbedrijf (secundaire zijde). Het verschil in temperatuur van de aanvoer en retour aan de primaire zijde wordt de delta t_p (dt_p) genoemd.

2.4 Regeling kasverwarming en restwarmte

Kasverwarming

De mate van warmteoverdracht van het verwarmingssysteem in de kas is afhankelijk van:

- het verwarmend oppervlak (VO) van de verwarmingspijpen;
- de aanvoertemperatuur in het verwarmingssysteem en
- de temperatuur van de kaslucht.



- t_a = aanvoertemperatuur voor bijmengen
 t_r = retourtemperatuur na bijmengen
 t'_a = aanvoertemperatuur na bijmengen
 t'_r = retourtemperatuur voor bijmengen
 M_i = mengklep
 dt_k = delta t van de kas
 dt_s = delta t van het totale verwarmingssysteem
 dt_p = delta t van het primaire verwarmingswater (centrale)

Figuur 2.4 Schematische weergave van de verwarming van het tuinbouwbedrijf door de restwarmtebron en de ketel

In figuur 2.4 is schematisch weergegeven hoe de aan- en afvoer van het verwarmingswater in de kas plaatsvindt. Door de aanvoerleiding gaat het verwarmingswater naar de kas (t_a en t'_a), waar het verdeeld wordt over de verwarmingspijpen. Hier vindt warmte-afgifte plaats. Er wordt meer warmte afgegeven bij een groter pijpoppervlak en een hogere pijptemperatuur. De uitkoeling van het verwarmingswater in de kas (t'_a minus t'_r) is

de Δt van de kas (Δt_k). Het afgekoelde water uit de verwarmingspijpen verzamelt zich in een gemeenschappelijke retourleiding van waar het terug gaat naar de warmtewisselaar of de ketel.

In de aanvoerleiding is een mengklep (M_i) opgenomen. Deze maakt het mogelijk dat via een mengleiding een gedeelte van het retourwater weer mee circuleert door de pijpen, zonder dat het eerst door de warmtewisselaar of de ketel wordt opgewarmd. Dit bijmengen vindt sterker plaats bij een lagere warmtevraag in de kas; er is dan immers een lagere pijptemperatuur nodig. Dit heeft tot gevolg dat water met een lagere temperatuur teruggestuurd wordt (t_r) naar de restwarmtebron of de ketel. Het verschil in temperatuur tussen de aanvoer- en retourwater dat respectievelijk van en naar de warmtebronnen gaat (t_a en t_r) is de Δt van het totale verwarmingssysteem (Δt_s).

Bij een grotere warmtevraag in de kas is een hogere pijptemperatuur nodig om voldoende warmte te kunnen leveren. In deze situatie zal water met een hogere temperatuur teruggestuurd worden naar de restwarmtebron of de ketel. De uitkoeling van het verwarmingswater in de kas is maximaal 15°C. Er wordt dan geen retourwater via klep M_i opnieuw in het verwarmingssysteem van de kas gebracht en het retourwater heeft een hogere temperatuur. Dit heeft een kleinere uitkoeling van het water in het totale verwarmingssysteem (Δt_s) tot gevolg. Door de kleinere uitkoeling van dit water wordt minder warmte in de warmtewisselaar overgedragen. De uitkoeling in het totale verwarmingssysteem (Δt_s) is dus afhankelijk van de warmtevraag in de kas.

De Δt_s is in sterke mate gekoppeld aan de Δt_p aan de primaire zijde van de restwarmtebron. Een grote Δt_s heeft een grote Δt_p tot gevolg. Omdat de Δt_p gemeten kon worden zonder extra kosten voor meetapparatuur is in het onderzoek in de analyse verder uitgegaan van de Δt_p .

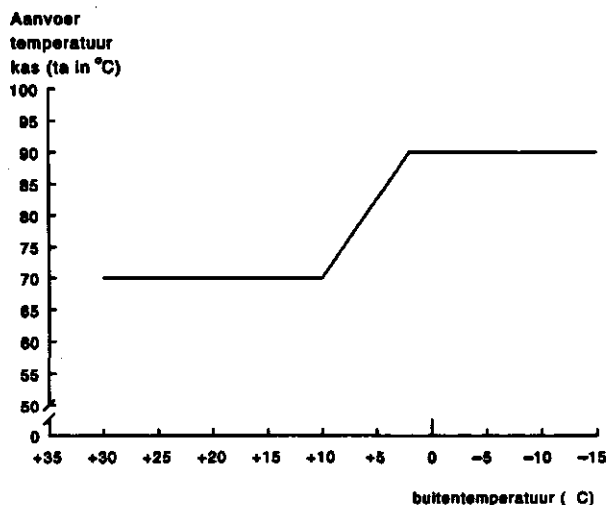
Restwarmte

De capaciteit van de restwarmtebron is afhankelijk van:

- het verwarmend oppervlak (VO) van de warmtewisselaar;
- het temperatuurverschil van het water tussen de primaire en de secundaire zijde van de warmtewisselaar en
- de volumestroom van het restwarmtewater in de warmtewisselaar aan de primaire zijde.

De capaciteit van de restwarmtebron wordt geregeld door de volumestroom aan de primaire zijde te variëren. Deze volumestroom (debiet) wordt geregeld met een regelklep (zie figuur 2.3). Als de klep volledig open staat wordt de maximale volumestroom geleverd. De temperatuur van het restwarmtewater zal dalen door de overdracht van warmte in de warmtewisselaar aan het water van het verwarmingssysteem van het

tuinbouwbedrijf. Getracht wordt, met behulp van de regelklep, de uitkoeling van het restwarmtewater zo groot mogelijk te maken ofwel de retourtemperatuur van het restwarmtewater naar de centrale zo laag mogelijk te maken.



Figuur 2.5 Voorbeeld van een stooklijninstelling

De temperatuur van het verwarmingswater aan de aanvoer van de secundaire zijde (t_3 in figuur 2.3) is zodanig geregeld dat deze afhankelijk is van de buitentemperatuur. Dit gebeurt met een stooklijninstelling, een voorbeeld hiervan is weergegeven in figuur 2.5. De temperatuur (t_3) is ingesteld tussen een minimum van circa 70°C en een maximum van circa 90°C. Bij een dalende buitentemperatuur blijft de aanvoertemperatuur naar het verwarmingssysteem op het bedrijf constant tot een ingestelde minimale buitentemperatuur (bijvoorbeeld 10°C). De aanvoertemperatuur stijgt als de buitentemperatuur verder daalt en neemt weer een constante waarde aan bij een lagere buitentemperatuur (bijvoorbeeld onder de 0°C). Als de buitentemperatuur afneemt tussen de minimale en maximale ingestelde waarde, mag de aanvoertemperatuur naar het verwarmingssysteem in de kas toenemen. De mate waarin is afhankelijk van de richtingscoëfficiënt van de stooklijn. Een grotere richtingscoëfficiënt zal een snellere reactie op een verlaging van de buitentemperatuur tot gevolg hebben. Dit alles heeft tot doel dat de temperatuur van het verwarmingswater in het verwarmingssysteem op het bedrijf niet onnodig hoog wordt

en hiermee samenhangend de dt_p van het restwarmtewater bij een grotere warmtevraag niet te klein wordt.

De stooklijninstelling is gekoppeld aan de regeling van de volumestroom aan de primaire zijde van de restwarmtebron. Bijvoorbeeld, bij een lagere warmtevraag in de kas (hogere buitentemperatuur) daalt de ingestelde aanvoertemperatuur (t_a') van het verwarmingswater naar de kas en daalt eveneens de aanvoertemperatuur (t_a) van het verwarmingswater vanuit de warmtebronnen. Dit wordt gerealiseerd met de regelklep aan de primaire zijde van de restwarmtebron, waarmee de volumestroom verlaagd wordt.

De beschreven stooklijninstelling geldt voor de meeste bedrijven in het onderzoek. Bij bedrijven in de Plukmadese polder is de stooklijninstelling lager ingesteld (maximum circa 70°C).

Een lagere stooklijninstelling kan de uitkoeling van het restwarmtewater vergroten. Dit is alleen realiseerbaar bij een verwarmend oppervlak van het verwarmingssysteem in de kas die groot genoeg is. Het verwarmend oppervlak wordt in de analyse in beschouwing genomen.

Tenslotte dient opgemerkt te worden dat de reactiesnelheid van beide warmtebronnen (restwarmtebron en ketel) verschillend is. In perioden met een hoge warmtevraag in de kas (pieklust) kan het voorkomen dat de capaciteit van de restwarmtebron niet volledig benut wordt. Dit wordt veroorzaakt door de weerstandsverschillen van het verwarmingswater in de ketel en de warmtewisselaar. De weerstand die het water ondervindt in de warmtewisselaar is namelijk groter dan in de ketel. Neemt de warmtevraag vrij snel toe dan reageert de restwarmtebron trager dan de ketel. Bovendien heeft bij een hogere warmtevraag het verwarmingswater uit de kas een hogere retourtemperatuur (t_r). Dit verlaagt de capaciteit van de warmtewisselaar, waarbij de ketel de extra benodigde warmte gaat leveren. De tragere reactie van de restwarmtebron ten opzichte van de ketel en de verlaging van de capaciteit van de warmtewisselaar in perioden met een grotere warmtevraag in de kas (pieklust) betekenen dat de restwarmtebron dan minder warmte levert. Dit wordt geïllustreerd met het dalend verloop van het geleverd vermogen van de restwarmtebron bij een hoger benodigd vermogen in figuur 2.1. Om de weerstandsverschillen te beperken zijn bij de bedrijven restricties op de volumestroom (regelklep) in de ketel ingebouwd.

3. METHODE

3.1 Opzet van het onderzoek

Op 45 glastuinbouwbedrijven met restwarmte is de dekkingsgraad bepaald. Hiervoor zijn per bedrijf gedurende een jaar gegevens verzameld over gasverbruik van de ketel(s) en het restwarmteverbruik van de elektriciteitscentrale of de steg-eenheden. De gasketel wordt gebruikt als de warmtevraag groter is dan het warmteleverend vermogen van de restwarmtebron en om CO₂ te doseren. Het CO₂-doseren heeft hierdoor invloed op de dekkingsgraad. Om inzicht te krijgen in de mate van CO₂-doseren zijn de bedrijfsuren van de CO₂-ventilator geregistreerd. Verder zijn aanvullende bedrijfsgegevens (technische en teelttechnische) verzameld. Al deze gegevens zijn nodig voor de analyse van de verschillen in dekkingsgraad tussen de bedrijven. De berekening van de dekkingsgraad wordt behandeld in paragraaf 3.2. De variabelen die gebruikt worden voor de analyse van de onderlinge verschillen in dekkingsgraad worden uiteengezet in paragraaf 3.3.

Naast de dekkingsgraad is tevens de mate van uitkoeling van het restwarmtewater (dtp) bepaald. Hiervoor is de geleverde restwarmte en de hoeveelheid water geregistreerd waarmee de warmte wordt getransporteerd. Naast de analyse van de onderlinge verschillen in de dekkingsgraad worden ook de onderlinge verschillen in Δt van het restwarmtewater (dtp) nader geanalyseerd. Hierdoor wordt het mogelijk een schatting van de.dtp te maken op grond van een aantal bedrijfsgegevens. De.dtp kan vervolgens gebruikt worden voor de schatting van de dekkingsgraad. De variabelen die gebruikt worden voor de schatting van de.dtp, worden in paragraaf 3.4 behandeld.

Alleen de bedrijven waar intensief wordt gestookt met buisverwarming zijn in het onderzoek betrokken. Bedrijven met een lagere warmte-intensiteit (heteluchtbedrijven) zijn buiten beschouwing gelaten. Dit bedrijfstype zal in de toekomst steeds minder van belang zijn en door de lage warmte-intensiteit is de toepassing van restwarmte minder aantrekkelijk.

Voor het vastleggen van de dekkingsgraad zijn op de bedrijven met restwarmte in de periode 1 juli 1990 - 1 juli 1991 vierwekelijks meterstan-

den verzameld. De groep van 45 bedrijven bestaat uit 29 groentebedrijven en 16 bloemen- of potplantenbedrijven. Veertien bedrijven krijgen warmte geleverd van een steg-eenheid en 31 bedrijven van een elektriciteitscentrale. De groep is verdeeld over drie gebieden in de provincie Noord-Brabant, namelijk West-Brabant (Breda e.o. en Tilburg e.o.), de Plukmadese polder en Oost-Brabant (Asten e.o.). Het aantal bedrijven in deze drie gebieden dat deelnam aan het onderzoek is respectievelijk 19, 12 en 14.

Het niveau van de buitentemperatuur gedurende de meetperiode is vergeleken met die van andere jaren. Het temperatuurniveau wordt uitgedrukt in graaddagen. Hierbij wordt uitgegaan van de gemiddelde buitentemperatuur per etmaal. Als de buitentemperatuur boven de 18°C ligt wordt ervan uitgegaan dat er geen warmte nodig is voor het verwarmen van de kas; dit wordt de stookgrens genoemd. Iedere graad Celsius die de gemiddelde buitentemperatuur (per etmaal) onder de stookgrens ligt is een graaddag. Een gemiddelde etmaaltemperatuur van 12°C is dus 6 graaddagen.

Het aantal graaddagen in de periode 1 juli 1990 - 1 juli 1991 bedraagt 3170. Het gemiddelde aantal graaddagen over de periode 1951-1990 bedraagt 3198. Het verschil bedraagt 28 en is minder dan 1%; derhalve kunnen we stellen dat de meetperiode niet veel afwijkt van een gemiddeld jaar.

3.2 Metingen

Het aandeel restwarmte in de totale warmtebehoefte van de kas(sen) is de dekkingsgraad. Deze wordt berekend door de warmteproductie van de restwarmtebron te delen door de som van de warmteproductie van de ketel(s) en de restwarmtebron. Voor de bepaling van de dekkingsgraad en de analyse van de verschillen tussen de bedrijven zijn de volgende gegevens vierwekelijks verzameld.

Gasverbruik

Het gasverbruik is gemeten met de op het bedrijf aanwezige gasmeter en omgerekend naar normatieve Groningse m³ aardgas. Er worden twee typen gasmeters gebruikt. Het eerste type is een volumeherleidingsmeter (EVHI) en de tweede een gewone gasmeter. Bij een volumeherleidingsmeter behoeven de gemeten waarden niet gecorrigeerd te worden voor temperatuur en druk, maar wel voor de calorische waarde. Bij een gewone gasmeter moeten de gasverbruiken naast de calorische waarde wel gecorrigeerd worden voor temperatuur en druk. De correctiefactoren zijn afkomstig van de nutsbedrijven. Indien er op het bedrijf gestoomd is, zijn de

gasverbruiken hiervoor gecorrigeerd. Gasverbruik voor stomen levert immers geen bijdrage aan de warmtevoorziening in de kas.

Restwarmteverbruik

De hoeveelheid restwarmte is geregistreerd met de aanwezige warmtemeter voor de warmtewisselaar. Bij de warmtewisselaar treedt er enig warmteverlies op. Voor de berekening van het restwarmteverbruik in de kassen is hiervoor een correctie toegepast. Uitgegaan is van 0,5% van de restwarmte-afname.

Warmteproductie van de ketel(s)

De warmteproductie van de ketel(s) wordt berekend aan de hand van het gasverbruik. Hiervoor dient ingeschat te worden het gebruiksrendement van de ketel. Uit het onderzoek "Gebruiksrendementen van aardgas-gestookte ketels in de glastuinbouw" (Nawrocki et al., 1991) is gebleken dat het gebruiksrendement van een gasketel wordt bepaald door de variabele en vaste verliezen. De berekening van de vaste verliezen en vervolgens van de warmteproductie van de ketel(s) is weergegeven in bijlage 1.

CO₂-doseren

Het assimilatieproces van het gewas wordt gestimuleerd door het doseren van CO₂ in de kas. Dit kan door gebruik te maken van de rookgassen van de ketel of door zuiver CO₂ te doseren. Als de ketel wordt gebruikt voor de produktie van CO₂ wordt ook warmte geproduceerd. Dit kan zowel plaatsvinden in perioden waarin de restwarmtebron volledig in de warmtebehoefte voorziet als in perioden waarin naast de restwarmtebron ook de ketel nodig is. In perioden waarin de ketel niet nodig is voor de warmteproductie beïnvloedt het CO₂-doseren de dekkinggraad. Om inzicht te krijgen in de mate van CO₂-doseren zijn de bedrijfsuren van de CO₂-ventilator geregistreerd. Dit is gedaan met een urenteller. Daarnaast is de brandercapaciteit (m³/uur) momentaan gemeten tijdens het CO₂-doseren.

Een aantal bedrijven dienen CO₂ toe in de vorm van zuiver CO₂, afkomstig van derden. De hoeveelheid zuiver CO₂ (kg) is gemeten en uitgedrukt per m² kasoppervlak (bijlage 5). Hierbij wordt geen warmte door de ketel geproduceerd. Het doseren van zuiver CO₂ is warmtetechnisch gelijk aan geen CO₂-doseren.

Op een aantal bedrijven wordt er naast de grote ketel een CO₂-ketel gebruikt. Dit is een ketel met een kleinere capaciteit en bestemd voor de productie van CO₂ voor het gewas. De technische uitvoering van de CO₂-ketels is nogal afwijkend vergeleken met die van de hoofdketels. De warmteproductie wordt daarom niet berekend zoals bij de hoofdketel(s) (bijlage 1) maar op basis van een gesteld gebruiksrendement voor deze ketel. Voor de CO₂-ketel zonder condensor is het gebruiksrendement gesteld op 90% op onderste verbrandingswaarde (o.w.) en met condensor op 97% (o.w.). Het gasverbruik van de CO₂-ketel is bepaald aan de hand van het aantal uren CO₂-doseran en de brandercapaciteit van deze ketel tijdens het doseren.

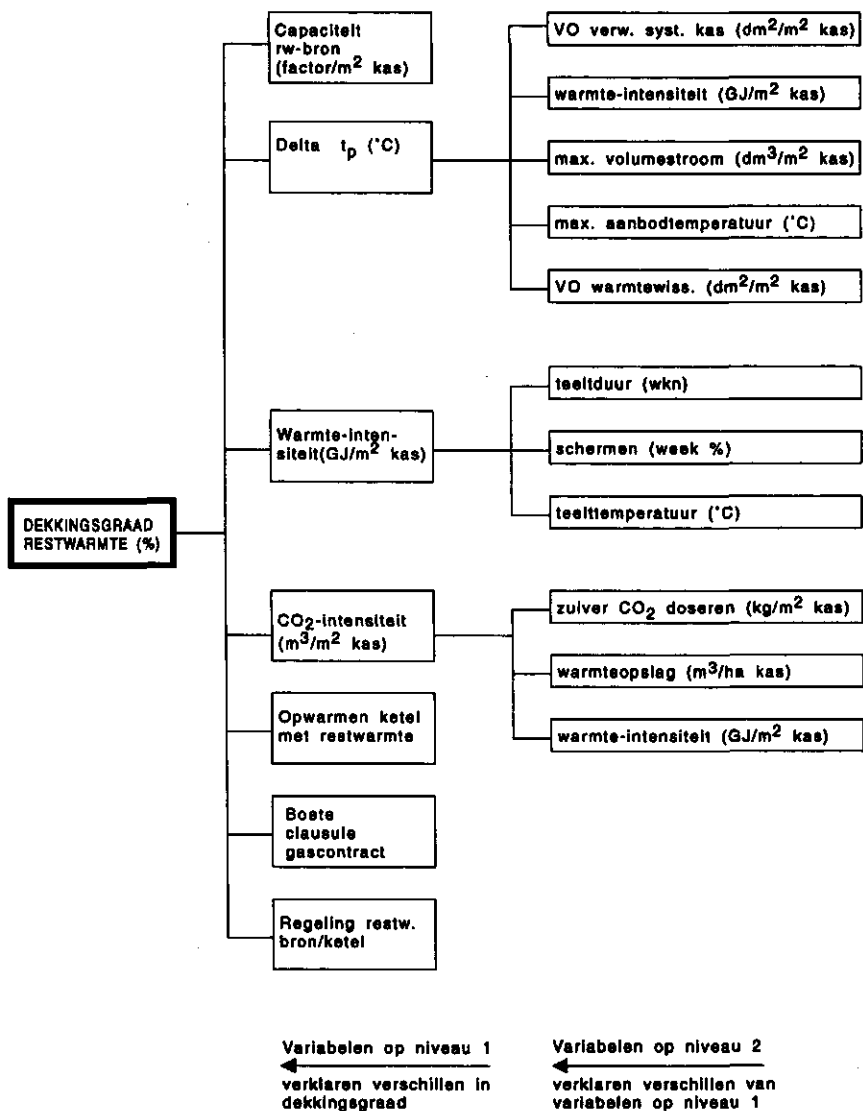
3.3 Analyse dekkingsgraad

Om inzicht te krijgen in de verschillen in dekkingsgraad tussen de bedrijven is naast de vierwekelijks verzamelde gegevens een groot aantal technische en teelttechnische bedrijfsgegevens verzameld. In figuur 3.1 staan in een relatieschema de variabelen waarvan verwacht wordt dat deze de verschillen in dekkingsgraad veroorzaken. De verklarende variabelen zijn op twee niveaus weergegeven, afhankelijk van hoe ze in relatie tot elkaar staan.

Alle genoemde variabelen in het relatieschema zijn per bedrijf waargenomen.

In het relatieschema staan zeven variabelen op het eerste niveau. Deze verklaren naar verwachting de verschillen in dekkingsgraad tussen de bedrijven. Dit zijn de capaciteit van de restwarmtebron, de delta t_p , de warmte-intensiteit, de CO₂-intensiteit, het opwarmen van de ketel met restwarmte, de boeteclausule en de regeling van de ketel-restwarmtebron. De eerste vier zijn zogenaamde vangvariabelen. Dit betekent dat deze bepaald worden door meerdere achterliggende variabelen. Bijvoorbeeld de warmte-intensiteit wordt bepaald door de teeltduur, de teelttemperatuur en de mate van schermen (figuur 3.1). De relaties worden geanalyseerd en gekwantificeerd met multiple lineaire regressie-analyse. De regressievergelijking wordt gebruikt om de gevolgen van veranderingen van bedrijfsomstandigheden voor de hoogte van de dekkingsgraad in te schatten.

Op het tweede niveau staan variabelen die naar verwachting de verschillen tussen de variabelen op het eerste niveau verklaren. Voor de delta t_p en de CO₂-intensiteit en hun verklarende variabelen zijn eveneens de regressievergelijkingen bepaald. Bijvoorbeeld voor de delta t_p betekent dit dat eerst de consequentie van veranderde bedrijfsomstandigheden (twee-



Figuur 3.1 Relatieschema dekkingsgraden restwarmte

de niveau) voor de delta t_p geschat wordt, vervolgens wordt met de gewijzigde delta t_p de dekkingsgraad geschat.

Uit figuur 3.1 blijkt dat de warmte-intensiteit naar verwachting met meerdere factoren samenhangt; dit zijn naast de dekkingsgraad ook de delta t_p en de CO_2 -intensiteit. Op voorhand mag derhalve verwacht worden dat de warmte-intensiteit een intercorrelatie vertoont met de delta t_p en de CO_2 -intensiteit.

Capaciteit van de restwarmtebron

De capaciteit van de restwarmtebron heeft invloed op de dekkingsgraad. Bij een grotere capaciteit kan er immers meer warmte worden geleverd. De capaciteit is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de primaire en secundaire zijde, het verwarmend oppervlak van de warmtewisselaar, de volumestroom en het materiaal waaruit de warmtewisselaar bestaat. Het temperatuurverschil tussen de primaire en secundaire zijde is echter niet bekend op het moment waarop de restwarmtebron het maximale vermogen (de maximale volumestroom) levert. De capaciteit kan dus op deze manier niet berekend worden.

Een andere mogelijkheid is het bepalen van een verhoudingsgetal als maatstaf voor de capaciteit van de restwarmtebron. Dit verhoudingsgetal is bepaald uit het produkt van het verwarmend oppervlak van de warmtewisselaar per m^2 kas, de maximale hoeveelheid restwarmtewater per m^2 kas en de gemiddelde maximale aanbodtemperatuur gedurende het jaar ($^{\circ}C$). Het verband tussen de capaciteit van de warmtewisselaar en het warmteleverend vermogen is niet lineair, maar vertoont een natuurlijk logaritmisch verloop. Met regressie-analyse kunnen echter alleen lineaire relaties geanalyseerd worden. Daarom wordt van het produkt de natuurlijke logaritme genomen. Het verhoudingsgetal wordt als volgt berekend:

$$CR = \ln \left(\frac{VO}{O} \times \frac{D}{O} \times T_{\max} \right),$$

waarin CR = factor voor capaciteit van de restwarmtebron;
 VO = verwarmend oppervlak warmtewisselaar (dm^2);
 D = maximale hoeveelheid restwarmtewater (dm^3/h);
 $T_{\max}$ = gemiddelde maximale aanbodtemperatuur verwarmingswater primaire zijde ($^{\circ}C$) en
 O = oppervlak van de kas (m^2).

De capaciteit van de restwarmtebron kan naast de genoemde drie variabelen ook beïnvloed worden door een vervuiling van de warmtewisse-

laar. Een vervuiling beperkt de volumestroom en de warmte-overdracht van de warmtewisselaar en daarmee de dekkingsgraad van de restwarmte. Bij de warmteleveranciers is nagegaan of er in de meetperiode van het onderzoek vervuilde warmtewisselaars geconstateerd zijn. Indien dit het geval was zijn de bedrijven in het onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Delta t_p

Van het restwarmtewater is de mate van uitkoeling (dt_p) bepaald. De dt_p is het gemiddelde verschil in temperatuur tussen het aangevoerde water van en het afgevoerde water naar de centrale in een bepaalde periode. Om dit te bepalen is naast de geleverde warmte ook de hoeveelheid water geregistreerd waarmee de restwarmte wordt getransporteerd. In bijlage 2 is weergegeven hoe de dt_p is berekend. Verwacht wordt dat de dt_p van het restwarmte-water invloed heeft op de dekkingsgraad. Naarmate de dt_p groter is wordt er per geleverde hoeveelheid warm water meer warmte afgegeven aan de secundaire zijde van de warmtewisselaar (kaszijde).

Warmte-intensiteit

De som van de warmteproductie van de ketel(s) en het gebruik van restwarmte is de totale warmtevrage in de kas. Uitgedrukt per m^2 kas resulteert dit in de warmte-intensiteit (GJ/m^2). Eén gigajoule komt ongeveer overeen met $30 m^3$ aardgas. Bij een toenemende warmte-intensiteit zal relatief meer ketelwarmte gebruikt worden. Dit heeft een verlaging van de dekkingsgraad tot gevolg. De warmte-intensiteit hangt naar verwachting samen met de teelttemperatuur, de teeltduur en het schermgebruik. Een hogere teelttemperatuur en teeltduur hangen samen met een hogere warmte-intensiteit. Een energiescherm wordt op een deel van de bedrijven toegepast om het warmteverlies vanuit de kas te verminderen. Het gebruik vindt vooral plaats in perioden met een grote warmtebehoefte in de kas ('s nachts). Door het scherm wordt minder warmte afgestaan aan de buitenlucht en neemt de warmtebehoefte af. Dit houdt in dat vooral de ketel minder warmte hoeft te leveren. Hierdoor zal de dekkingsgraad toenemen.

Voor de warmte-intensiteit en de verklarende variabelen is geen regressievergelijking opgesteld. Inzicht in de oorzaken van de verschillen in warmte-intensiteit valt buiten het onderzoek. Bovendien kan de warmte-intensiteit per bedrijf gemeten worden zoals beschreven in paragraaf 3.2.

CO₂-intensiteit

Het CO₂-doseran met de ketel beïnvloedt de dekkingsgraad omdat er tegelijkertijd warmte wordt geproduceerd. In dit onderzoek is de mate van CO₂-doseran met de ketel uitgedrukt in de CO₂-intensiteit. De CO₂-intensiteit is de hoeveelheid gas per m² kas die gedurende het jaar voor de CO₂-produktie wordt verbruikt. Meestal wordt CO₂ gedoseerd met de ketel op minimum branderstand. De CO₂-intensiteit kan dus berekend worden door het aantal doseeruren te vermenigvuldigen met het gasverbruik bij de minimum branderstand. Dit produkt wordt uitgedrukt per m² kasoppervlak. In bijlage 3 staat een voorbeeldberekening.

Het doseren van CO₂ kan plaatsvinden in perioden met en zonder warmtevraag. In perioden met warmtevraag, waarbij naast de restwarmtebron ook de ketel ingeschakeld wordt voor de warmteproduktie heeft het doseren geen invloed op de dekkingsgraad. In de perioden met een lagere warmtevraag, waarbij de restwarmtebron volledig in de warmtebehoefte kan voorzien beïnvloedt het CO₂-doseran wel de dekkingsgraad.

De geproduceerde warmte kan opgeslagen worden in de ketel en indien deze vol (op temperatuur) is, eventueel in een opslagtank. De warmte kan dan later in perioden met warmtevraag worden aangewend (bijvoorbeeld 's nachts). Het gebruik van een warmteopslagtank zal een hogere CO₂-intensiteit veroorzaken. Bovendien zal er in perioden waarin de opgeslagen warmte uit de ketel of de opslagtank in de kas benut wordt geen of minder restwarmte worden gebruikt.

Wanneer zuiver CO₂ gedoseerd wordt (geheel of aanvullend) wordt de ketel niet of in beperkte mate gebruikt voor de CO₂-dosering. Zuiver CO₂-doseran heeft dus een lagere CO₂-intensiteit tot gevolg. De CO₂-intensiteit is nul als geheel met zuiver CO₂ gewerkt wordt.

Warm houden ketel door restwarmte

Restwarmte wordt voor de basislast van de warmtebehoefte aangewend. Voor de pieklast wordt de ketel ingezet. De perioden waarin de ketel geen warmte hoeft te leveren wordt deze toch op temperatuur (stand by) gehouden. Dit kan gedaan worden door de verbranding van aardgas of door gebruik te maken van restwarmte. In de gevallen waar de ketel met restwarmte op temperatuur wordt gehouden heeft dit een verhoging van het restwarmteverbruik en de dekkingsgraad tot gevolg.

Boeteclausule gascontract

De tuinder is contractueel verplicht een minimum hoeveelheid gas per jaar af te nemen. Indien deze hoeveelheid niet wordt gehaald, leidt dit tot

een verplichte extra betaling aan het gasbedrijf. Om dit te voorkomen wordt er op een aantal bedrijven aan het eind van het jaar in plaats van restwarmte, gas verstookt om in de warmtebehoefte van de kas te voorzien. Dit is nadelig voor de hoogte van de dekkingsgraad.

Regeling restwarmtebron en ketel

Afhankelijk van de hoogte van de warmtevraag in de kas worden de restwarmtebron en/of de ketel ingeschakeld. De regeling waarmee dit plaatsvindt kan per bedrijf verschillen. Zoals in paragraaf 2.3 is beschreven is de reactiesnelheid van de ketel groter dan die van de restwarmtebron. Op de meeste bedrijven worden de ketel en de restwarmtebron onafhankelijk van elkaar geregeld. De ketelregeling wordt aangestuurd door de klimaatcomputer. De restwarmtebron wordt geregeld met een analoge regelaar. Op een beperkt aantal bedrijven is de regeling van beide warmtebronnen echter geïntegreerd in het klimaatcomputerprogramma. Het wel of niet geïntegreerd zijn van de regeling is in de analyse in beschouwing genomen.

3.4 Analyse delta t_p

Om inzicht te krijgen in de oorzaken van de verschillen in de mate van uitkoeling (delta t_p) van het restwarmtewater tussen de bedrijven is een aantal technische en teelttechnische bedrijfsgegevens verzameld. In het relatieschema in figuur 3.1 staan de variabelen (tweede niveau) weergegeven waarvan verwacht wordt dat ze verschillen in delta t_p veroorzaken.

Verwarmend oppervlak verwarmingssysteem in de kas

Bij de warmte-overdracht in de kas speelt het verwarmend oppervlak (VO) van het verwarmingsnet een belangrijke rol. De warmte-afgifte van het verwarmingsnet neemt onder andere toe door een groter VO. Hierdoor is de retourtemperatuur lager waardoor in de warmtewisselaar een grotere delta t_p gerealiseerd kan worden. Het verwarmend oppervlak is tevens een vangvariabele voor de stooklijnstelling (zie pagina 22).

Het verwarmingswater waarmee de warmte in de kas wordt gebracht heeft een hoge aanvoertemperatuur van maximaal 90-95°C (hoogwaardige warmte) en het verschil in temperatuur tussen het warme water dat de kas in en uit gaat bedraagt maximaal 15°C (zie figuur 2.5; dt_k). De ketel is vaak uitgerust met een rookgascondensor. De warmte uit de condensor wordt afhankelijk van het type condensor (zie paragraaf 3.2) wel of niet in een extra verwarmingsnet aangewend. Dit condensornet heeft een lage

temperatuur (30-40°C; laagwaardige warmte). Voor de bepaling van het VO (dm^2/m^2 kasoppervlak) van het verwarmingssysteem is alleen dat deel waarmee hoogwaardige warmte in de kas gebracht wordt in beschouwing genomen. Het eventuele condensornet wordt dus buiten beschouwing gelaten.

Bij een aantal bedrijven wordt in het condensornet tijdelijk water met een hogere temperatuur bijgemengd. Omdat dit maar gedurende een beperkte periode van het jaar (aantal weken en/of enkele uren per dag) plaats vindt is dit geen reden om het VO van het condensornet in de analyse van de delta t_p in beschouwing te nemen.

Warmte-intensiteit

In paragraaf 3.3 is de warmte-intensiteit reeds genoemd als variabele die de dekkingsgraad beïnvloedt. Daarnaast beïnvloedt de warmte-intensiteit ook de delta t_p . Bij een hoge warmte-intensiteit zal de gemiddelde buistemperatuur in de kas hoog zijn (zie paragraaf 2.3). Het gevolg is dat de gemiddelde retourtemperatuur uit de kas hoger is. Dit resulteert in een geringere uitkoeling van het restwarmtewater in de warmtewisselaar.

Capaciteit van de restwarmtebron

De capaciteit van de restwarmtebron heeft invloed op de uitkoeling van het restwarmtewater. De capaciteit wordt bepaald door het VO van de warmtewisselaar (dm^2/m^2 kas), de maximale aanbodtemperatuur ($^{\circ}\text{C}$) en de maximale volumestroom van het restwarmtewater (dm^3/m^2 kas) dat door de wisselaar stroomt. Verwacht wordt dat een groter VO en een hogere aanbodtemperatuur de uitkoeling van het verwarmingswater verhogen. Een toename van de volumestroom zal de delta t_p doen afnemen. Deze drie variabelen worden daarom afzonderlijk in de analyse van de delta t_p in beschouwing genomen.

4. RESULTATEN

4.1 Meetresultaten

4.1.1 Gerealiseerde dekkingsgraden

De dekkingsgraad op alle bedrijven in het onderzoek bedraagt gemiddeld 57%. De verschillen tussen de bedrijven zijn groot. De dekkingsgraad loopt uiteen van 25 tot 100%. De dekkingsgraad wordt bepaald door het verbruik van restwarmte en gas. In bijlage 4 zijn de resultaten per bedrijf vermeld. Hieruit blijkt ook dat het gas- en restwarmteverbruik sterk uiteen loopt. Het gasverbruik is gemiddeld $27,8 \text{ m}^3$ per m^2 kas en loopt uiteen van $0,6$ - $53,7 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Dit resulteert in een gemiddeld gaswarmteverbruik van $0,8 \text{ GJ}/\text{m}^2$, variërend tussen de 0 - $1,7 \text{ GJ}/\text{m}^2$. Het restwarmteverbruik is gemiddeld $1,1 \text{ GJ}$ per m^2 kas en loopt uiteen tussen de $0,5$ - $2,0 \text{ GJ}/\text{m}^2$. De warmte-intensiteit, dit is rest- en gaswarmte bij elkaar opgeteld, is gemiddeld $1,9 \text{ GJ}$ per m^2 kas en loopt uiteen van $1,0$ tot $2,7 \text{ GJ}/\text{m}^2$.

In tabel 4.1 zijn de gemiddelde resultaten van de bedrijven per regio weergegeven. Het blijkt dat er verschillen bestaan tussen de drie gebie-

Tabel 4.1 Gemiddelde meetresultaten per m^2 kasoppervlak op jaarbasis per regio

Gebied	Aantal bedrij- ven	Rest- warmte (GJ/m^2)	Gasver- bruik (m^3/m^2)	Gas- warmte (GJ/m^2)	Warmte- inten- siteit (GJ/m^2)	Dek- kings- graad (%)
West-Brabant	19	1,1	30,2	0,9	1,9	56
Plukmadese polder	12	1,5	12,0	0,3	1,8	81
Oost-Brabant	14	0,8	40,1	1,2	2,1	40
Alle bedrijven	45	1,1	27,8	0,8	1,9	57

den. Het restwarmteverbruik is in de Plukmadese polder het hoogst, hier wordt gemiddeld een dekkingsgraad van 81% gerealiseerd. In Oost-Brabant is de dekkingsgraad gemiddeld met 40% het laagst. De bedrijven in West-Brabant nemen met 56% een tussenpositie in.

De verschillen in dekkingsgraad tussen de bedrijven hangen samen met de bedrijfsomstandigheden. In paragraaf 4.2 wordt hierop nader ingegaan. In tabel 4.2 zijn de gemiddelde meetresultaten weergegeven van een drietal variabelen, waarvan samen met de warmte-intensiteit verwacht wordt dat ze de verschillen in dekkingsgraad veroorzaken; dit zijn de CO₂-intensiteit, de delta t_p en de factor voor de capaciteit van de restwarmtebron. In bijlage 5 zijn deze gegevens per bedrijf vermeld. De CO₂-intensiteit laat een grote spreiding zien, lopend van 0 tot 14,3 m³/m² en is gemiddeld 6,9 m³/m². De gemiddelde delta t van het restwarmtewater (dt_p) is 50°C. Deze loopt uiteen van 22°C tot 68°C. De factor voor de capaciteit van de restwarmtebron loopt uiteen van 3,1-4,9 per m² kas. Hoe deze berekend wordt staat in bijlage 8. De gemiddelde factor van alle bedrijven is 4,0. De spreiding is bij deze variabele gering.

Tabel 4.2 Gemiddelde meetresultaten van de verklarende variabelen voor de dekkingsgraad op jaarbasis per regio

Gebied	Aantal bedrijven	CO ₂ -intensiteit (m ³ /m ²)	Delta t _p (°C)	Capaciteit rw-bron (factor/m ²)
West-Brabant	19	6,4	49	3,9
Plukmadese polder	12	-	63	4,3
Oost-Brabant	14	7,5	40	4,1
Alle bedrijven	45	6,9	50	4,0

De verschillen in CO₂-intensiteit worden onder andere veroorzaakt door de wijze van toediening. In de Plukmadese polder wordt voornamelijk zuiver CO₂ gedoseerd. Zuiver CO₂-doseren is warmtetechnisch gelijk aan geen CO₂ doseren. In West- en Oost Brabant wordt op de meeste bedrijven alleen rookgas-CO₂ uit de ketel toegepast. Op deze bedrijven wordt gemiddeld 6,9 m³ gas per m² kas verstoekt in combinatie met het doseren van CO₂.

Uit tabel 4.2 blijkt dat de delta t_p op de bedrijven in de Plukmadese polder gemiddeld 63°C is. Dit is hoger dan in de andere regio's. In West- en

Oost-Brabant is de delta t_p respectievelijk 49°C en 40°C. In paragraaf 4.3 wordt nader ingegaan op de oorzaken van de verschillen in delta t_p .

In vergelijking met West-Brabant is de factor voor de capaciteit van de restwarmtebron in de Plukmadese polder 0,4 hoger (10%). In vergelijking met Oost-Brabant is dit 0,2 ofwel 5%.

4.1.2 Gerealiseerde delta t_p

De delta t_p wordt berekend door het restwarmteverbruik en de hoeveelheid water waarmee de restwarmte wordt getransporteerd. In bijlage 6 zijn deze gegevens per bedrijf vermeld. Het werkelijk watergebruik van de centrale is gemiddeld 5,4 m³/m² kas en loopt uiteen van 2,7 tot 10,3 m³/m².

Tabel 4.3 Meetresultaten voor de berekening van de delta t_p voor alle bedrijven en per regio

Gebied	Aantal bedrijven	Water gebruik (m ³ /m ²)	Restwarmte verbruik (GJ/m ²)	Delta t_p (°C)
West-Brabant	19	5,3	1,1	49
Plukmadese polder	12	5,7	1,5	63
Oost-Brabant	14	5,1	0,8	40
Alle bedrijven	45	5,4	1,1	50

In tabel 4.3 zijn de gemiddelde meetresultaten weergegeven per regio die nodig zijn voor de berekening van de delta t_p . Het restwarmtewatergebruik tussen de drie gebieden loopt uiteen van 5,1-5,7 m³ per m². De meetgegevens resulteren in een gemiddelde delta t_p van 50°C.

De variabelen per bedrijf die waarschijnlijk de verschillen in delta t_p veroorzaken, worden in bijlage 7 weergegeven. Het gemiddelde VO van het verwarmingssysteem van alle bedrijven is 25,5 dm²/m² en loopt uiteen van 11,8 tot 49,6 dm² per m² kas. Het VO van de warmtewisselaar loopt uiteen van 0,3-1,0 dm² per m² kas, het debiet varieert van 0,9-2,8 liter per m² kas en de gemiddelde maximale aanbodtemperatuur varieert van 108 tot 125°C.

De gemiddelden per regio staan vermeld in tabel 4.4.

Tabel 4.4 Gemiddelde meetresultaten van de verklarende variabelen voor de delta t_p op jaarbasis per regio

Gebied	Aantal bedrijven	VO-verwarmings-systeem (dm ² /m ²)	Warmte-intensiteit (GJ/m ²)	Aanbod-temperatuur (°C)	Debiet warmte-wisselaar (dm ³ /m ²)	VO warmte wissel. (dm ² /m ²)
W.-Brabant	19	24,3	1,9	119	1,1	0,4
Plukmadese polder	12	29,9	1,8	118	1,2	0,6
O.-Brabant	14	23,7	2,1	109	1,3	0,5
Alle bedr.	45	25,5	1,9	116	1,2	0,5

Het gemiddeld VO van het verwarmingsnet in de Plukmadese polder is met 29,9 dm² per m² kas ruim 5 dm²/m² kas groter dan in de andere regio's. Het gemiddeld VO van de warmtewisselaar in de Plukmadese polder is 0,1-0,2 dm²/m² hoger dan in de andere gebieden. De gemiddelde maximale aanbodtemperatuur is in Oost-Brabant met gemiddeld 109°C lager dan in de andere twee gebieden waar de temperatuur circa 120°C is.

4.2 De verklarende variabelen

De invloed van de variabelen op de dekkingsgraad is geanalyseerd. Dit betreft zeven variabelen namelijk de capaciteit van de restwarmtebron, de delta t_p , de CO₂-intensiteit, de warmte-intensiteit, het op temperatuur houden van de ketel met restwarmte, de boeteclausule en de regeling van de warmtebronnen (zie figuur 3.1).

Op slechts twee bedrijven wordt de ketel niet met restwarmte op temperatuur gehouden en op twee andere bedrijven wordt aan het eind van het jaar minder restwarmte verbruikt in verband met de boeteclausule in het gascontract. Deze aantallen zijn te gering om in de analyse te gebruiken. Derhalve zijn deze variabelen niet in beschouwing genomen. Tussen de dekkingsgraad en de zevende variabele (de regeling van de warmtebronnen), is geen relatie gevonden. In de regressievergelijking is deze variabele daarom niet opgenomen. Verder is tijdens de gegevensverzameling op één bedrijf geconstateerd dat de regeling van de ketel en de restwarmtebron niet optimaal functioneerde. Dit bedrijf is in de analyse buiten beschouwing gelaten. Verder zijn er nog een zestal bedrijven tijdens

de analyse afgevallen. Voor vier bedrijven bleek dat de factoren voor de restwarmtebron te sterk afwijken van de overige bedrijven en daardoor een te grote invloed zouden hebben op de ligging van de regressielijn (hefboomeffect). Bovendien bleek op één bedrijf van deze vier bedrijven een apart verwarmingsnet aangesloten te zijn op de restwarmtebron. Tenslotte zijn nog twee bedrijven tijdens de analyse van de verschillen in Δt_p uit het onderzoek genomen; dit komt in paragraaf 4.3 aan de orde.

Uit de analyse blijkt dat de overige vier variabelen allen een statistisch betrouwbare samenhang vertonen met de dekkingsgraad. Dit zijn de capaciteitsfactor van de restwarmtebron, de Δt_p , de warmte-intensiteit en de CO_2 -intensiteit. Uit figuur 3.1 komt al naar voren dat de warmte-intensiteit vrij sterk samenhangt met de Δt_p en de CO_2 -intensiteit. Een hogere warmte-intensiteit wil in feite zeggen dat de kas met een gemiddeld hogere pijptemperatuur gestookt wordt. Dit houdt in dat de retourtemperatuur van het verwarmingswater uit de kas hoger wordt, met als gevolg dat de Δt_p afneemt (paragraaf 2.3). Wanneer de warmte-intensiteit toeneemt zal de ketel meer gebruikt worden, waardoor meer CO_2 gedoseerd kan worden; dit resulteert in een hogere CO_2 -intensiteit.

De intercorrelatie (r) tussen de Δt_p en warmte-intensiteit is -0,61; dit betekent dat 37% (r^2) van de verschillen in de Δt_p samenhangen met de verschillen in warmte-intensiteit. Tussen de Δt_p en CO_2 -intensiteit is dit -0,52 (27%) en tussen de CO_2 -intensiteit en warmte-intensiteit 0,56 (31%) (zie bijlage 9).

Voor een juiste interpretatie van de relatie van de vier variabelen met de dekkingsgraad is het dus vereist dat de onderlinge samenhangen tussen deze variabelen gekwantificeerd worden. In paragraaf 4.3 wordt de verklaring van de verschillen in Δt_p behandeld, hierbij komt eveneens de samenhang tussen de Δt_p en de warmte-intensiteit aan de orde. De samenhang tussen de CO_2 -intensiteit en de warmte-intensiteit wordt in paragraaf 4.4 besproken. Verder komen in paragraaf 4.5 de verklaring van de verschillen in de warmte-intensiteit aan de orde. Daarna wordt de relatie van de vier variabelen met de dekkingsgraad besproken in paragraaf 4.6.

4.3 Onderlinge verschillen Δt_p

De variabelen waarvan verwacht wordt dat ze invloed hebben op de verschillen in Δt_p zijn geanalyseerd. Dit zijn het VO van het verwarmingssysteem in de kas, de warmte-intensiteit, de maximale aanbodtemperatuur van het restwarmtewater, de maximale volumestroom in de warmtewisselaar en het VO van de warmtewisselaar. Tijdens de analyse zijn twee bedrijven afgevallen. Eén bedrijf vanwege een sterk vervuilde

warmtewisselaar tijdens de meetperiode, het andere bedrijf vanwege een sterk afwijkend VO van het verwarmingssysteem (betonvloer). Uit de analyse blijkt dat alle genoemde variabelen een statistisch betrouwbare samenhang (90%) met de delta t_p hebben. De relatie luidt als volgt:

$$dt_p = 4,5 + 0,4 VO_k + 0,7 AT - 26 DB + 26,4 VO_c - 12,1 WI, \quad (\text{formule 1})$$

waarin:

dt_p = delta t_p ($^{\circ}\text{C}$);

VO_k = verwarmend oppervlak van het verwarmingssysteem in de kas (dm^2/m^2);

AT = aanbodtemperatuur verwarmingswater van de centrale ($^{\circ}\text{C}$);

DB = debiet verwarmingswater door de warmtewisselaar (dm^3/m^2);

VO_c = verwarmend oppervlak van de warmtewisselaar (dm^2/m^2) en

WI = warmte-intensiteit (GJ/m^2).

De bijbehorende statistische informatie is hierna vermeld:

$t(VO_k) = 2,20$;

$t(AT) = 2,33$;

$t(DB) = -2,51$;

$t(VO_c) = 1,60$ *);

$t(WI) = -3,30$;

$r^2 = 59\%$ en

$n = 34$.

**) De statistische betrouwbaarheid is in dit geval 80%.*

Met deze regressievergelijking wordt 59% van de verschillen in delta t_p verklaard. Bij het gebruik van de vergelijking dient rekening gehouden te worden met de minimale en maximale waarden van de variabelen. De spreiding voor de variabelen is hieronder weergegeven. Buiten de gegeven trajecten mag de vergelijking niet toegepast worden.

VO-verwarmingssysteem kas (VO_k) : 11,78 - 42,56 dm^2/m^2 ;

Aanbodtemperatuur warmtewisselaar (AT) : 108 - 120 $^{\circ}\text{C}$;

Warmwaterdebiet warmtewisselaar (DB) : 0,90 - 1,37 dm^3/m^2 ;

VO-warmtewisselaar (VO_c) : 0,31 - 0,67 dm^2/m^2 en

Warmte-intensiteit (WI) : 1,17 - 2,53 GJ/m^2 .

De betekenis van de regressievergelijking is dat een groter VO_k van het verwarmingssysteem in de kas (meer verwarmingspijpen) de uitkoeling van het centralewater doet toenemen. Neemt het VO_k toe van 20 naar 30 dm^2/m^2 (van vier naar zes 51-mm verwarmingspijpen) dan wordt de

delta t_p 4°C groter. Hetzelfde kan gezegd worden van de aanbodtemperatuur: een toename van 10°C betekent een toename van de delta t_p van 7°C. Een toenemend waterdebiet in de warmtewisselaar verlaagt de delta t_p . Een groter waterdebiet van bijvoorbeeld 0,1 dm³/m² kas doet de delta t_p met 2,6°C afnemen. Verder blijkt uit de formule dat het VO_c van de warmtewisselaar positief samenhangt met de delta t_p . Neemt het VO van de warmtewisselaar met 0,1 dm² toe, dan wordt de delta t_p 2,6°C hoger. Tenslotte blijkt er een negatief verband te bestaan tussen de warmte-intensiteit en de delta t . Neemt de warmte-intensiteit in de kas toe, dan neemt de delta t_p af. Een hogere warmte-intensiteit van 0,1 GJ/m² betekent een lagere delta t_p van 1,2°C.

4.4 Onderlinge verschillen in CO₂-intensiteit

De variabelen waarvan verwacht wordt dat ze invloed hebben op de verschillen in CO₂-intensiteit zijn geanalyseerd. Dit zijn de warmte-intensiteit, de warmte-opslagcapaciteit en het zuiver CO₂-dosereren. Doordat op één bedrijf de warmteopslagcapaciteit sterk afweek is dit bedrijf voor de regressie-analyse buiten beschouwing gelaten. De relatie luidt als volgt:

$$CI = -2,2 + 3,9 WI + 0,06 WO - 0,6 ZC, \quad (\text{formule 2})$$

waarin:

CI = CO₂-intensiteit (m³/m² kas);

WI = warmte-intensiteit (GJ/m² kas);

WO = warmte-opslagcapaciteit (m³/ha kas) en

ZC = zuivere CO₂-dosereren (kg/m²).

De bijbehorende statistische informatie is:

t(WI) = 2,69;

t(WO) = 3,05;

t(ZC) = -2,11;

r² = 50% en

n = 33.

Uit de regressievergelijking blijkt dat bij een toenemende warmte-intensiteit de ketel intensiever wordt gebruikt en ook meer CO₂ uit de ketel kan worden gedoseerd. Een toenemende warmte-intensiteit met 0,1 GJ per m² kas gaat samen met een toename van de CO₂-intensiteit van 0,4 m³ per m² kas. Een toenemende warmte-opslagcapaciteit vergroot de mogelijkheden om CO₂ te doseren op het bedrijf. Bij een 25 m³/ha grotere opslagtank wordt een toename van de CO₂-intensiteit van 1,5 m³ per m² kas geschat.

Het doseren van zuiver CO₂ verlaagd de CO₂-intensiteit. Wordt op een bedrijf naast het ketel-CO₂ aanvullend 1 kg/m² zuiver CO₂ per jaar gedoseerd dan neemt de CO₂-intensiteit af met 0,6 m³/m².

Met deze regressievergelijking worden 50% van de verschillen in CO₂-intensiteit verklaard.

De minimale en maximale waarden waar binnen de variabelen gebruikt mogen worden zijn:

Warmte-intensiteit (WI)	:	1,17 - 2,53 GJ/m ² kas;
Warmteopslag (WO)	:	0 - 88 m ³ /ha kas en
Zuivere CO ₂ (ZC)	:	0 - 7,8 kg/m ² .

4.5 Onderlinge verschillen in dekkingsgraad

Uit paragraaf 4.3 en 4.4 blijkt dat drie variabelen (delta t_p, de warmte-intensiteit en de CO₂-intensiteit) samenhangen. Als één van de drie gewijzigd wordt, heeft dit uitwerking naar verschillende richtingen. Een verhoging van de warmte-intensiteit veroorzaakt een verlaging van delta t_p en een verhoging van de CO₂-intensiteit. De vierde verklarende variabele is de capaciteitsfactor voor de restwarmtebron. Deze vertoont geen intercorrelatie met de overige drie variabelen. De vier variabelen vertonen allen een statistisch betrouwbare samenhang (90%) met de dekkingsgraad. De relatie luidt als volgt:

$$DK = -11 + 10,9 CR + 1,1 dt_p - 1,1 CI - 11,4 WI, \quad (\text{formule 3})$$

waarin:

- DK = dekkingsgraad restwarmte (%);
- CR = capaciteitsfactor van de restwarmtebron (factor);
- DT_p = delta t_p (°C);
- CI = CO₂-intensiteit (m³/m²) en
- WI = warmte-intensiteit (GJ/m²).

De bijbehorende statistische informatie is hierna vermeld:

- t(CR) = 1,34 *);
- t(DT_p) = 4,91;
- t(CI) = -1,87;
- t(WI) = -1,79;
- r² = 75% en
- n = 34.

*) De statistische betrouwbaarheid is in dit geval 80%.

De verschillen in dekkingsgraad worden voor 75% verklaard door bovenstaande regressievergelijking. Een toename van de capaciteitsfactor van de restwarmtebron van 0,5 resulteert in een verhoging van de dekkingsgraad van 5,5%. Een toename van de delta t_p van 10°C heeft tot gevolg dat de dekking met 11% toeneemt. Neemt de CO_2 -intensiteit met 1 m^3 per m^2 toe, dan daalt de dekking met 1,1%. Een hogere warmte-intensiteit van $0,1 \text{ GJ}$ per m^2 veroorzaakt dat de dekking met 1,1% afneemt.

Bij het gebruik van de vergelijking dient rekening gehouden te worden met de minimale en maximale waarden van de gegevens waarbinnen regressie-analyse is toegepast. Buiten de gegeven trajecten mag de vergelijking niet worden toegepast. De spreiding per variabele is hieronder weergegeven:

Capaciteitsfactor restwarmtebron (CR)	: 3,488 - 4,517;
Delta t_p (dt_p)	: 28 - 68°C ;
CO_2 -intensiteit (CI)	: 0 - $14,3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ gas en
Warmte-intensiteit (WI)	: 1,17 - $2,53 \text{ GJ}/\text{m}^2$.

Met de regressievergelijking kan voor een bepaalde bedrijfssituatie de dekkingsgraad worden geschat. Als bijvoorbeeld voor een individueel bedrijf geldt: de capaciteitsfactor van de restwarmtebron is 3,5, de delta t_p is 40°C , de CO_2 -intensiteit is $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ en de warmte-intensiteit is $1,5 \text{ GJ}/\text{m}^2$, dan volgt uit de regressievergelijking (formule 3) dat naar schatting een dekkingsgraad van 49% wordt behaald. Een hogere warmte-intensiteit en een hogere CO_2 -intensiteit in de kas verlagen de dekkingsgraad. Een grotere delta t_p (meer uitkoeling) en een grotere capaciteit van de restwarmtebron resulteren in een hogere dekkingsgraad.

Wanneer echter een schatting van de dekkingsgraad bij gewijzigde bedrijfsomstandigheden gemaakt wordt, dient men rekening te houden met de onderlinge samenhang van de delta t_p , de CO_2 -intensiteit en de warmte-intensiteit. Dit betekent dat een verandering van de waarde van één van deze drie variabelen gevolgen heeft voor de waarden van de andere twee variabelen. Bijvoorbeeld, door een overschakeling van de teelt van tomaten naar komkommers wordt met hetzelfde verwarmingsnet een hogere teelttemperatuur aangehouden. Hierdoor neemt de warmte-intensiteit (WI) toe. Dit laatste heeft gevolgen voor de CO_2 -intensiteit (hoger) en de dt_p (lager). In bijlage 10 is een voorbeeldberekening gegeven. Hieruit blijkt dat als de dekkingsgraad wordt berekend zonder rekening te houden met de onderlinge samenhang het effect van bijvoorbeeld een hogere warmte-intensiteit van $0,3 \text{ GJ}/\text{m}^2$ een verlaging van de dekkingsgraad van 4% tot gevolg heeft. Indien wel rekening gehouden wordt met de onderlinge samenhang dan daalt de dekkingsgraad met 9%.

Veranderingen van variabelen die geen samenhang met andere variabelen vertonen kunnen wel direct in de regressievergelijking gebruikt

worden. Dit geldt bijvoorbeeld voor een verandering van de delta t_p als gevolg van een uitbreiding van het verwarmingssysteem in de kas. Door een vergroting van het verwarmingssysteem kan het water in het verwarmingsnet verder uitkoelen (grotere dt_p). In dit geval is er geen samenhang tussen de gewijzigde dt_p en de WI en CI. Hiervan is een voorbeeldberekening in bijlage 11 gegeven.

5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 Conclusies

De gerealiseerde dekkingsgraad van restwarmte is gemiddeld 57% per bedrijf. De spreiding tussen de bedrijven is groot en loopt uiteen van 25 tot 100%. In de Plukmadese polder wordt de hoogste dekking gehaald, deze bedraagt gemiddeld 81%. In West- en Oost-Brabant is dit met respectievelijk 56 en 40% lager.

De verschillen in dekkingsgraad tussen de bedrijven worden voor drie vierde deel verklaard door vier factoren, namelijk:

- de capaciteit van de restwarmtebron;
- de mate van uitkoeling van het restwarmtewater (Δt_p);
- de mate van CO₂ doseren met de ketel (CO₂-intensiteit) en
- de warmtebehoefte in de kas (warmte-intensiteit).

Een grotere capaciteit van de restwarmtebron en een grotere uitkoeling resulteren in een hogere dekking; een hogere CO₂-intensiteit en een hogere warmte-intensiteit resulteren in een lagere dekking.

Een toename van de capaciteitsfactor van de restwarmtebron van 0,5 resulteert in een verhoging van de dekkingsgraad van 5,5%. Een toename van de Δt_p van 10°C heeft tot gevolg dat de dekking met 11% toeneemt. Neemt de CO₂-intensiteit met 1 m³ per m² toe, dan daalt de dekking met 1,1%. Een hogere warmte-intensiteit van 0,1 GJ per m² veroorzaakt dat de dekking met 1,1% afneemt.

De verklarende factoren hangen, met uitzondering van de capaciteit van de restwarmtebron, echter onderling samen. Dit betekent dat bij een schatting van de verandering van de dekkingsgraad door veranderende bedrijfsomstandigheden de factoren niet onafhankelijk van elkaar in beschouwing mogen worden genomen. Bij een wijziging van één van de drie factoren zullen eerst de gevolgen voor de andere twee factoren moeten worden gekwantificeerd voordat de dekkingsgraad in de nieuwe situatie kan worden geschat. Door deze samenhang heeft een wijziging van één van de factoren grotere gevolgen voor de dekkingsgraad.

De uitkoeling van het restwarmtewater (Δt_p) is gemiddeld 50°C en loopt uiteen van 22 tot 68°C. De Δt_p in de Plukmadese polder is 63°C,

in de West- en Oost-Brabant is dit gemiddeld 40 en 49°C. Deze kan vergroot worden door een vergroting van het verwarmend oppervlak van de warmtewisselaar, een hogere aanbodtemperatuur en een lagere volumestroom van het restwarmtewater aan de primaire zijde van de restwarmtebron en aan de kaszijde een groter verwarmend oppervlak van het verwarmingssysteem (meer verwarmingspijpen) en een lagere warmte-intensiteit.

5.2 Aanbevelingen

Een aantal bedrijven maakt aan het eind van het jaar niet of in beperkte mate gebruik van restwarmte door de minimum-afnameverplichting van het aardgas. Dit gaat ten koste van de gasbesparing en de reductie van de CO₂-emissie. Hiervoor dient een oplossing gezocht te worden op bestuurlijk niveau.

Vervuiling van de warmtewisselaar vermindert het restwarmteverbruik op het glastuinbouwbedrijf. Vooral tijdens aanleg van en onderhoud aan het verwarmingssysteem moet voorkomen worden dat hierin vervuiling optreedt.

De regeling van de restwarmtebron en de ketel vindt op de meeste bedrijven gescheiden plaats. Een aantal bedrijven maakt wel gebruik van een geïntegreerde regeling. Een relatie met de dekkingsgraad is echter niet gevonden. Wellicht kan, door de twee regelingen te integreren in één klimaatcomputer, een betere afstemming van het warmteverbruik van de restwarmtebron en de ketel plaatsvinden. Nader onderzoek kan hierover uitsluitsel geven.

Een apart verwarmingsnet voor restwarmte op het glastuinbouwbedrijf kan een positieve bijdrage leveren aan een verhoging van de dekkingsgraad. Het aanvullend gebruik van de ketel resulteert dan niet meer in een hogere retourtemperatuur van het verwarmingswater uit de kas. De effecten van een apart net, zowel technisch als economisch, dienen nader onderzocht te worden.

Ter bevordering van het assimilatieproces wordt op veel bedrijven CO₂ gedoseerd met de ketel. Dit gaat ten koste van restwarmte. Het verdient aandacht dat de minimum (doseer) stand van de brander niet hoger wordt afgesteld dan nodig voor de CO₂-behoefte van het gewas. Tevens kan hierdoor langer CO₂ gedoseerd worden.

Op de meeste bedrijven wordt de ketel op temperatuur gehouden door restwarmte. Hierdoor kan deze niet of in mindere mate gebruikt worden voor warmte-opslag in perioden met CO₂-behoefte, maar zonder warmtevraag. Dit gaat ten koste van de CO₂-intensiteit en de groei van het gewas.

Aanbevolen wordt daarom de ketel niet of in beperkte mate door restwarmte op temperatuur te houden.

Tot slot wordt aanbevolen bedrijfseconomisch onderzoek te doen naar de optimale capaciteit van de restwarmtebron voor het individuele glastuinbouwbedrijf. Dit kan een verbetering van de economische mogelijkheden van het restwarmteverbruik voor zowel de leverancier als de tuinder met zich mee brengen.

LITERATUUR

Benninga, J.

Leveringsvoorwaarden bij de toepassing van afval- en restwarmte; Den Haag, LEI, 1987; Mededeling 367

Breuer, J.J.G.

Rekenmodel energiebehoefte in kassen; Wageningen, IMAG, 1983; Rapport 49

Nawrocki, K.R.

De relatie tussen CO₂-doserende en het brandstofverbruik bij het stoken met aardgas in de glastuinbouw; Wageningen, IMAG, 1984; Rapport 62

Nawrocki, K.R.

Demonstratieproject Energiearme Kas; Wageningen, IMAG, 1985; Rapport 77

Nawrocki, K. R. en N.J.A. van der Velden

Gebruiksefficiënties aardgasgestookte ketels in de glastuinbouw; Wageningen, IMAG, 1991; Nota 91-55

Post, C.J. van der, P. Knies, A.N.M. de Koning, J.V.M. Vogelesang en P.W.T. Verwaaijen

Technisch en teeltkundig onderzoek bij toepassing van rest- en afvalwarmte; Wageningen, IMAG, 1987; Rapport 96

Velden, N.J.A. van der en A.P. Verhaegh

Brandstofverbruik in de glastuinbouw van Denemarken, België en de Bondsrepubliek; Den Haag, LEI, 1986; Mededeling 350

Velden, N.J.A. van der, K.R. Nawrocki en H.J. de Sterke

Afstandsverwarming in de glastuinbouw van Denemarken en de Bondsrepubliek, Verslag van een studiereis; Den Haag, LEI, 1986; Mededeling 353

Velden, N.J.A. van der

Laagwaardige warmte in de glastuinbouw; Een bedrijfseconomische evaluatie;
Den Haag, LEI 1989; Onderzoekverslag 37

Velden, N.J.A. van der, V.P. Fonville en A.P. Verhaegh

Energie-efficiency en CO₂-emissie in de glastuinbouw; Den Haag, LEI, 1990;
Publikatie 4.126

BIJLAGEN

Bijlage 1 Berekening van de vaste verliezen en de warmteproductie van de ketel

De warmteproductie van de ketel(s) wordt berekend aan de hand van het gasverbruik. Hiervoor dient ingeschat te worden het gebruiksrendement van de ketel inclusief eventueel een rookgascondensor. Onder het gebruiksrendement wordt verstaan het aandeel (%) van de toegevoerde energie van het aardgas dat wordt omgezet in warmte die nuttig wordt aangewend voor het verwarmen van de kassen. Uit onderzoek is gebleken dat het gebruiksrendement van een gasketel wordt bepaald door de variabele en vaste verliezen. De variabele verliezen zijn afhankelijk van het gebruik van een rookgascondensor, het type condensor en het al of niet bijmengen van het ketelwater in het condensornet. Met een rookgascondensor worden de rookgassen uit de ketel verder afgekoeld waardoor meer warmte aan de rookgassen wordt onttrokken. Dit kan nuttig aangewend worden voor de verwarming van de kassen. Er zijn drie typen condensoren in gebruik, namelijk:

- de enkelvoudige condensor op de retour;
- de enkelvoudige condensor op een apart net en
- de combicondensor.

Bij de condensor op de retour wordt de warmte uit de rookgassen afgegeven aan het retourwater van het hoofdnets. Bij de condensor op een apart net is de condensor aangesloten op een apart verwarmingsnet in de kas met een lage temperatuur. De combicondensor bestaat uit twee secties waarvan de eerste is aangesloten op de retour en de tweede op een apart net.

De vaste verliezen ontstaan vooral doordat de ketel continu op temperatuur wordt gehouden. De omvang van de vaste verliezen zijn afhankelijk van de mate van isolatie van de ketel, de omvang van de ketel en het wel of niet warm zijn van het expansievat. Ondanks de isolatie aan de buitenkant van de ketel wordt warmte afgegeven aan de lucht in het ketelhuis. De mate waarin is afhankelijk van de isolatie van de ketel. Een grotere ketel geeft meer warmte af dan een kleine ketel. Verder is de ketel uitgerust met een expansievat. Als deze warm is, wordt hiermee eveneens warmte aan de lucht afgegeven. De vaste verliezen worden dus bepaald door de gemiddelde dikte van de ketelisolatie (cm), de ketelomvang (MW) en het wel of niet warm zijn van het expansievat.

De vaste verliezen van de ketel zijn afhankelijk van:

- de ketelisolatie;
- de omvang van de ketel;
- het wel of niet warm zijn van het expansievat en
- gebruiksduur van de ketel.

Het berekenen van de vaste verliezen geschiedt met de formule:

$$VV = (-182 + 1272 \times \frac{CK}{KI} + 169 \times EV) N, \quad \text{(formule 1)}$$

waarin:

VV = vaste verliezen van de stookinstallatie (m^3);

CK = ketelcapaciteit (MW);

KI = gemiddelde dikte van de ketelisolatie (cm);

EV = het wel (ev=1) of niet (ev=0) warm zijn van het expansievat en

N = gebruiksduur van de ketel (weken).

De warmteproductie van de stookinstallatie wordt berekend met het gebruiksrendement van de ketel(s) voor de pieklast. Het gebruiksrendement van de ketel hangt samen met de volgende factoren:

- vaste verliezen van de ketel (bijvoorbeeld stralingsverliezen);
- type condensor en
- gasverbruik.

Deze zijn neergelegd in de volgende formule:

$$X_w = \frac{Y_w - VV}{FC}, \quad (\text{formule 2})$$

waarin X_w = warmteproductie van de ketel (Gigajoules);

Y_w = gasverbruik ketel (m^3);

VV = vaste verliezen (m^3);

FC = factor voor condensortype

- geen condensor : $33,1 \text{ m}^3/\text{GJ}$;
- enkelvoudige condensor op retour : $30,8 \text{ m}^3/\text{GJ}$;
- enkelvoudige condensor op apart net : $30,6 \text{ m}^3/\text{GJ}$ en
- combicondensor : $29,7 \text{ m}^3/\text{GJ}$.

Uit de factoren voor de condensor-typen blijkt dat bij het gebruik van een condensor minder gas nodig is voor de productie van 1 GJ warmte. Bij gebruik van een enkelvoudige condensor op een apart net of een combicondensor komt het voor dat in het aparte verwarmingsnet voor de condensor warm verwarmingswater uit de ketel wordt bijgemengd (meestal automatisch). Dit wordt gedaan omdat de warmtevraag op bepaalde plaatsen in de kas tijdelijk hoger is (groeipijpen, matverwarming). Het bijmengen gaat ten koste van het rendement. Dit heeft tot gevolg dat van de condensor en daarmee van de gehele stookinstallatie de factor voor het condensortype naar boven moet worden aangepast. Hoe hoog de nieuwe factorwaarde wordt, is afhankelijk van de duur van bijmengen en het type condensor. Doordat meestal automatisch wordt bijgemengd is de duur niet exact bekend. Het bijmengen is echter teeltafhankelijk. Daarom is op grond van de teelt een schatting gemaakt van de verandering van de factor van het condensortype. De correcties zijn:

- condensor op apart net:
 - tomaat/paprika : + 0,5% (nieuwe factor: $30,8 \text{ m}^3/\text{GJ}$);
 - komkommer/potplanten/chrysant : + 1%;
- combicondensor
 - tomaat/paprika : + 1% en
 - komkommer/potplanten/chrysant : + 2%.

Voorbeeldberekening:

Uitgangspunten:

- ketelcapaciteit (CK) : 2,3 MW
- ketelisolatie (KI) : 5,8 cm
- expansievat (EV) : warm (=1)
- aantal weken ketel op temperatuur (N) : 52 weken
- gasketel met combicondensor met bijmengen en komkommerteelt;
condensorfactor (FC) (29,7+2%) : 30,3 m³/GJ
- onderste verbrandingswaarde aardgas : 31,65 MJ/m³
- gasverbruik (Y_w) : 326.000 m³

De vaste verliezen van de ketel worden met formule 1 geschat:

$$\begin{aligned}
 VV &= (-182 + 1272 \times \frac{ck}{ki} + 169 \times ev) \times n && \text{(formule 1)} \\
 &= (-182 + 1272 \times \frac{2,3}{5,8} + 169 \times 1) \times 52 \\
 &= 25.554 \text{ m}^3 \text{ gas.}
 \end{aligned}$$

De vaste verliezen zijn 25.554 m³ gas per jaar, dit is 7,8% van het totale gasverbruik.

De warmteproductie van de ketel wordt geschat met formule 2.

Er wordt bijgemengd.

$$\begin{aligned}
 X_w &= \frac{Y_w - VV}{FC} && \text{(formule 2)} \\
 &= \frac{326.000 - 25.554}{30,3} \\
 &= 9.916 \text{ GJ}
 \end{aligned}$$

Bijlage 2 Berekening van de uitkoeling van het restwarmtewater (delta t_p)

Op jaarbasis is geregistreerd	Restwarmteverbruik	= 7.000 GJ
	Watergebruik	= 42.500 m ³

Om 1 m³ water 1°C in temperatuur te verhogen is 0,0041868 GJ nodig.

$$\text{Delta } t_p = \frac{\text{restwarmteverbruik}}{\text{watergebr.} \times 0,0041868} = \frac{7.000}{42.500 \times 0,0041868} = 39^\circ\text{C}$$

Bijlage 3 Berekening van de CO₂-intensiteit

Uitgangspunten voorbeeldberekening:

Gemiddeld aantal uren

doseren : 4,5 uren/dag ofwel 1.642 uur/jaar

Doseerstand CO₂-ketel : 30,86 m³/uur

Kasoppervlak : 10.000 m²

$$\text{CO}_2\text{-intensiteit} = \frac{1.642 \text{ uur} \times 30,86 \text{ m}^3/\text{uur}}{10.000 \text{ m}^2} = 5,07 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

Bijlage 4 Meetresultaten op jaarbasis per bedrijf per gebied

Tabel 4.a West-Brabant

Bedrijfs-nummer	Rest-warmte (GJ/m ²)	Gas-verbruik (m ³ /m ²)	Gas-warmte (GJ/m ²)	Warmte-intensiteit (GJ/m ²)	Dek-king (%)
2	0,77	41,48	1,26	2,03	38
3	0,99	48,72	1,42	2,40	41
7	1,18	30,65	0,93	2,10	56
8	1,15	23,89	0,70	1,85	62
9	1,15	16,87	0,36	1,51	76
10	0,82	38,43	1,04	1,85	44
11	0,72	36,69	1,08	1,80	40
12	1,11	12,00	0,27	1,38	81
13	0,89	36,96	1,06	1,96	46
14	0,92	29,03	0,84	1,76	52
15	1,09	17,67	0,54	1,63	67
16	1,17	32,63	1,03	2,20	53
18	1,34	25,27	0,69	2,03	66
19	0,85	43,63	1,34	2,19	39
20	1,08	35,43	1,10	2,18	50
21	1,62	19,14	0,56	2,18	74
22	0,96	10,44	0,22	1,18	81
23	1,03	19,13	0,52	1,55	66
46	1,16	24,86	0,66	1,82	64
Gemiddeld	1,11	30,16	0,87	1,98	56

Tabel 4.b Plukmadese polder

Bedrijfs-nummer	Rest-warmte (GJ/m ²)	Gasver-bruik (m ³ /m ²)	Gas-warmte (GJ/m ²)	Warmte-in-tensiteit (GJ/m ²)	Dek-king (%)
36	1,26	33,85	0,95	2,21	57
37	0,95	3,31	0,09	1,03	92
38	1,96	12,63	0,35	2,31	85
39	1,30	21,41	0,61	1,91	68
40	1,10	3,26	0,07	1,17	94
41	1,75	9,22	0,24	2,00	88
42	2,19	17,83	0,51	2,70	81
43	1,76	10,37	0,26	2,02	87
44	1,42	0,57	0,00	1,42	100
45	1,92	4,09	0,12	2,05	94
47	0,96	14,63	0,42	1,38	69
48	0,96	12,75	0,37	1,33	72
Gemiddeld	1,46	11,99	0,33	1,79	81

Tabel 4.c Oost-Brabant

Bedrijfs-nummer	Rest-warmte (GJ/m ²)	Gasver-bruik (m ³ /m ²)	Gas-warmte (GJ/m ²)	Warmte-in-tensiteit (GJ/m ²)	Dek-king (%)
1	0,52	49,00	1,57	2,09	25
4	0,46	51,84	1,45	1,91	24
5	1,22	30,99	0,99	2,20	55
6	0,62	37,87	1,17	1,79	35
24	1,17	29,08	0,82	1,99	59
25	0,73	51,88	1,55	2,28	32
26	0,73	38,08	1,23	1,96	37
29	1,27	38,52	1,17	2,44	52
30	1,11	44,39	1,42	2,53	44
31	0,67	53,71	1,69	2,36	28
32	0,74	40,56	1,28	2,02	37
33	0,91	24,95	0,67	1,58	58
34	0,76	34,86	1,07	1,83	42
35	0,78	36,07	1,16	1,94	40
Gemiddeld	0,84	40,13	1,23	2,07	40

Bijlage 5 Meetresultaten van de verklarende variabelen voor de dekkingsgraad op jaarbasis per bedrijf per gebied

Tabel 5.a West-Brabant

Bedrijf	CO ₂ -intensiteit (m ³ /m ²)	Delta t _p (°C)	Capaciteit restwarmte- bron (factor)
2	9,87	39	4,057
3	11,81	46	4,143
7	10,39	58	3,660
8	3,30	56	3,982
9	9,55	58	3,773
10	4,36	39	4,038
11	4,06	38	4,444
12	5,39	42	4,102
13	6,38	22	4,051
14	7,69	55	3,872
15	0,65	51	3,855
16	5,51	51	3,099
18	5,73	53	3,798
19	6,26	37	3,997
20	8,26	57	3,878
21	8,33	53	3,664
22	1,27	55	3,695
23	6,11	60	3,665
46	0	57	3,488
Gemiddeld	6,38 *)	49	3,856

*) Gemiddelde exclusief bedrijf 46.

Tabel 5.b *Plukmadese polder (inclusief hoeveelheid zuiver CO₂-doser)*

Bedrijfs-nummer	CO ₂ -intensiteit (m ³ /m ²)	Delta t _p (°C)	Capaciteit restwarmte-bron (factor)	Zuiver CO ₂ (kg/m ²)
36	7,76	64	4,706	2,11
37	2,37	68	3,972	2,37
38	0	63	4,265	0,57
39	0	55	4,153	7,93
40	0	67	4,517	3,14
41	0	66	4,383	6,32
42	0	51	4,075	3,72
43	0	61	3,982	1,61
44	0	63	4,317	7,81
45	0	65	4,929	0
47	0	63	4,106	0
48	0	67	4,072	0
Gemiddeld	4,83 a)	63	4,290	3,95 b)

a) Bedrijf 36 en 37; b) Exclusief de bedrijven 45, 47 en 48.

Tabel 5.c *Oost-Brabant*

Bedr.	CO ₂ -intensiteit (m ³ /m ²)	Delta t _p (°C)	Capaciteit restwarmte-bron (factor)
1	14,30	42	3,869
4	6,32	40	3,967
5	5,21	41	4,120
6	8,47	38	4,035
24	3,31	40	3,850
25	3,67	39	3,980
26	5,42	39	3,707
29	13,69	41	4,169
30	5,76	42	4,032
31	7,73	29	3,762
32	8,49	38	3,811
33	8,29	28	5,052
34	5,60	45	3,970
35	9,08	51	4,754
Gemiddeld	7,52	40	4,077

Bijlage 6 Meetresultaten voor de bepaling van de delta t_p op jaarbasis per bedrijf per gebied

Tabel 6.a West-Brabant

Bedrijfs-nummer	Water-gebruik (m^3/m^2)	Rest-warmte (GJ/m^2)	Delta t_p ($^{\circ}C$)
2	4,72	0,77	39
3	5,17	0,99	46
7	4,84	1,18	58
8	4,92	1,15	56
9	4,72	1,15	58
10	5,03	0,82	39
11	4,53	0,72	38
12	6,25	1,11	42
13	9,77	0,89	22
14	3,97	0,92	55
15	5,10	1,09	51
16	5,49	1,17	51
18	6,10	1,34	53
19	5,43	0,85	37
20	4,51	1,08	57
21	7,24	1,62	53
22	4,16	0,96	55
23	4,11	1,03	60
46	4,81	1,16	57
Gemiddeld	5,31	1,05	49

Tabel 6.b Plukmadese polder

Bedrijfs- nummer	Water- gebruik (m ³ /m ²)	Rest- warmte (GJ/m ²)	Delta t _p (°C)
36	4,71	1,26	64
37	3,32	0,95	68
38	7,44	1,96	63
39	5,58	1,30	55
40	3,90	1,10	67
41	6,34	1,75	66
42	10,27	2,19	51
43	6,84	1,76	61
44	5,41	1,42	63
45	7,12	1,92	65
47	3,65	0,96	63
48	3,44	0,96	67
Gemiddeld	5,67	1,46	63

Tabel 6.c Oost-Brabant

Bedrijfs- nummer	Water- gebruik (m ³ /m ²)	Rest- warmte (GJ/m ²)	Delta t _p (°C)
1	2,99	0,52	42
4	2,73	0,46	40
5	7,04	1,22	41
6	3,87	0,62	38
24	6,97	1,17	40
25	4,47	0,73	39
26	4,41	0,73	39
29	7,30	1,27	41
30	6,28	1,11	42
31	5,63	0,67	29
32	4,67	0,74	38
33	7,86	0,91	28
34	4,04	0,76	45
35	3,67	0,78	51
Gemiddeld	5,14	0,84	40

Bijlage 7 Meetresultaten die de delta t_p beïnvloeden op jaarbasis per bedrijf per gebied

Tabel 7.a West-Brabant

Bedrijfs-nummer	VO-verwarmingssysteem (dm^2/m^2)	Warmte-intensiteit (GJ/m^2)	Aanbodtemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)	Debiet water (dm^3/m^2)	VO-warmte-wisselaar (dm^2/m^2)
2	20,031	2,03	120	1,295	0,372
3	24,906	2,40	120	1,366	0,384
7	24,912	2,10	118	0,904	0,364
8	30,546	1,85	118	0,996	0,456
9	31,094	1,51	118	0,994	0,371
10	29,938	1,85	120	1,302	0,363
11	25,031	1,80	120	1,336	0,531
12	14,471	1,38	120	1,282	0,393
13	20,031	1,96	120	1,250	0,383
14	20,031	1,76	118	1,038	0,392
15	30,031	1,63	118	0,901	0,444
16	20,031	2,20	118	0,715	0,263
18	21,948	2,03	118	1,000	0,378
19	15,031	2,19	118	1,025	0,450
20	26,157	2,18	118	1,005	0,407
21	25,031	2,28	118	0,971	0,341
22	20,031	1,18	118	0,956	0,357
23	42,562	1,55	118	1,007	0,329
46	20,031	1,82	118	0,905	0,306
Gemiddeld	24,308	1,87	119	1,066	0,383

Tabel 7.b Plukmadese polder

Bedrijfs-nummer	VO-verwarmingssysteem (dm ² /m ²)	Warmte-intensiteit (GJ/m ²)	Aanbodtemperatuur (°C)	Debiet water (dm ³ /m ²)	VO-warmte-wisselaar (dm ² /m ²)
36	30,031	2,21	118	1,160	0,808
37	21,000	1,03	118	1,163	0,387
38	25,500	2,31	118	1,173	0,514
39	24,125	1,91	118	1,166	0,462
40	15,031	1,17	118	1,158	0,670
41	37,531	2,00	118	1,136	0,597
42	49,562	2,70	118	1,170	0,426
43	35,937	2,02	118	1,176	0,386
44	37,500	1,42	118	1,164	0,546
45	a)	2,05	118	1,125	1,042
47	26,094	1,38	118	1,205	0,427
48	26,094	1,33	118	1,185	0,420
Gemiddeld	29,855 b)	1,79	118	1,165	0,557

a) Betonvloer; b) Exclusief bedrijf 45.

Tabel 7.c Oost-Brabant

Bedrijfs-nummer	VO-verwarmingssysteem (dm ² /m ²)	Warmte-intensiteit (GJ/m ²)	Aanbodtemperatuur (°C)	Debiet water (dm ³ /m ²)	VO-warmte-wisselaar (dm ² /m ²)
1	20,031	2,09	108	1,150	0,386
4	28,281	1,91	108	1,171	0,417
5	25,031	2,20	108	1,163	0,490
6	30,031	1,79	108	1,176	0,445
24	25,031	1,99	108	1,099	0,396
25	29,938	2,28	108	1,216	0,407
26	11,783	1,96	108	1,203	0,314
29	28,241	2,44	108	1,191	0,503
30	25,531	2,53	108	1,174	0,445
31	20,031	2,36	108	1,125	0,354
32	25,531	2,02	108	1,175	0,356
33	17,034	1,58	125	2,757	0,453
34	25,531	1,83	108	1,181	0,415
35	20,031	1,94	108	1,166	0,922
Gemiddeld	23,718	2,07	109	1,282	0,450

Bijlage 8 Berekening van de factor van de capaciteit van de restwarmtebron

Uitgangspunten:	Debiet (D)	= 10.000 liter
	VO-warmtewisselaar (VO)	= 5.000 dm ²
	Aanbodtemperatuur (T _{max})	= 108 °C
	Oppervlak kas (O)	= 10.000 m ²

De factor wordt als volgt berekend:

$$\begin{aligned} CR &= \ln \left(\frac{VO}{O} \times \frac{D}{O} \times T_{max} \right) \\ &= \ln \left(\frac{10.000}{10.000} \times \frac{5.000}{10.000} \times 108 \right) \\ &= 3,989 \end{aligned}$$

Nieuwe situatie:

Het debiet wordt vergroot van 10.000 naar 15.000 liter en de aanbodtemperatuur neemt toe van 108 naar 118°C. Dan wordt de factor:

$$\begin{aligned} CR &= \ln \left(\frac{15.000}{10.000} \times \frac{5.000}{10.000} \times 118 \right) \\ &= 4,483 \end{aligned}$$

De factor CR is met 4,483-3,989 ofwel 0,494 toegenomen.

Bijlage 9 Correlatiematrix van de variabelen

DK	= Dekkingsgraad (%)
CR	= Capaciteitsfactor restwarmtebron per m ² kas
DT	= Delta t _p (°C)
CI	= CO ₂ -intensiteit (m ³ /m ²)
WI	= Warmte-intensiteit (GJ/m ²)
VOK	= VO-kasverwarmingssysteem (dm ² /m ²)
AT	= Aanbodtemperatuur primaire zijde (°C)
DB	= Debiet primaire zijde (dm ³ /m ²)
VOC	= VO-warmtewisselaar (dm ² /m ²)
WO	= Warmte-opslagcapaciteit (m ³ /ha)
TEELT	= Teelt (tomaat=1, komkommer=2, komkommer/tomaat=3, paprika=4, chrysant=5, potplant=6, overig=7)
TEDU	= Teeltduur (weken)
TETEMP	= Teelttemperatuur globaal (°C)
RESTWM	= Restwarmteverbruik (GJ/m ²)
GASWM	= Gaswarmteverbruik (GJ/m ²)
WTRVM	= Watergebruik (m ³ /m ²)
CO ₂ UR	= CO ₂ -doseran (uren/dag)
TKETW1	= Tijdsduur dat ketel op temperatuur wordt gehouden (weken)
TIJDSCH	= Tijdsduur schermen (weken)
DEELSCH	= Deel van het kasoppervlak dat wordt geschermd (%)
WEEK%	= TIJDSCH x DEELSCH
RWREG	= regeling ketel en restwarmtebron (Breda=1, overig=2)
WOPSLAG	= warmte-opslagcapaciteit (m ³ /ha)
ZC	= zuiver CO ₂ -doseran (kg/m ²)

1	1,000																
2	0,235	1,000															
3	0,819	0,092	1,000														
4	-0,648	-0,200	-0,522	1,000													
5	-0,689	-0,096	-0,614	0,556	1,000												
6	0,254	0,119	0,317	-0,163	0,025	1,000											
7	0,534	0,155	0,567	-0,325	-0,475	0,087	1,000										
8	-0,234	0,625	-0,360	0,122	0,123	-0,073	-0,125	1,000									
9	0,351	0,866	0,235	-0,285	-0,112	0,157	0,066	0,199	1,000								
10	-0,484	-0,174	-0,316	0,470	0,273	-0,315	-0,293	0,288	-0,320	1,000							
11	0,421	-0,247	0,427	-0,372	-0,641	-0,088	0,105	-0,350	-0,119	-0,183	1,000						
12	0,494	-0,150	0,527	-0,255	-0,444	0,071	0,136	0,193	-0,085	-0,203	0,630	1,000					
13	-0,513	0,125	-0,498	0,277	0,528	0,007	-0,318	0,170	0,094	0,144	-0,415	-0,720	1,000				
14	0,721	0,185	0,569	-0,397	-0,026	0,446	0,333	-0,254	0,332	-0,425	0,041	0,249	-0,163	1,000			
15	-0,970	-0,185	-0,821	0,676	0,811	-0,242	-0,572	0,247	-0,285	0,466	-0,535	-0,499	0,517	-0,607	1,000		
16	0,106	0,138	-0,264	0,012	0,507	0,170	-0,152	0,044	0,174	-0,270	-0,290	-0,134	0,228	0,623	0,038	1,000	
17	-0,760	-0,252	-0,642	0,772	0,578	-0,176	-0,321	0,172	-0,378	0,489	-0,462	-0,495	0,477	-0,519	0,766	-0,012	
18	0,153	-0,363	0,187	0,051	0,025	0,009	-0,175	-0,296	-0,252	0,082	0,146	0,372	-0,252	0,188	-0,089	0,068	
19	0,557	0,102	0,482	-0,533	-0,741	-0,177	0,367	-0,073	0,115	-0,293	0,692	0,622	-0,487	0,099	-0,648	-0,256	
20	0,331	-0,117	0,293	-0,247	-0,519	0,080	-0,020	-0,117	-0,075	0,013	0,643	0,382	-0,018	0,059	-0,447	-0,192	
21	0,528	0,120	0,476	-0,496	-0,678	-0,148	0,332	-0,042	0,125	-0,271	0,679	0,672	-0,461	0,118	-0,610	-0,227	
22	0,187	-0,337	0,339	-0,190	-0,039	0,152	-0,416	-0,640	0,055	-0,147	0,306	0,214	-0,083	0,208	-0,155	-0,064	
23	-0,484	-0,123	-0,279	0,485	0,290	-0,252	-0,227	-0,285	-0,281	0,924	-0,163	-0,214	0,132	-0,406	0,468	-0,279	
24	0,620	0,516	0,493	-0,439	-0,277	0,357	0,212	0,080	0,600	-0,167	-0,060	0,106	-0,179	0,533	-0,534	0,117	
CO2UR	1,000																
TKETW1	0,089	1,000															
TIJDSCH	-0,617	0,047	1,000														
DEELSCH	-0,237	0,161	0,506	1,000													
WEEK%	-0,566	0,113	0,978	0,551	1,000												
RWREG	-0,244	0,419	0,021	0,229	0,036	1,000											
WOPSLAG	0,504	0,089	-0,333	-0,044	-0,310	-0,199	1,000										
ZC	-0,451	0,062	0,024	0,005	0,042	0,147	-0,180	1,000									
	17	18	19	20	21	22	23	24									

Zie voor de betekenis van de afkortingen pagina 64.

Bijlage 10 Voorbeeldberekening voor de schatting van de dekkingsgraad bij een wijziging van de oorzakelijke samenhangende variabelen

Uitgangspunten:

Restwarmtebron: aanbodtemperatuur (AT)	:	108 °C
volumestroom (DB)	:	1,0 dm ³ /m ² kas
VO-warmtewisselaar (VO _c)	:	0,5 dm ² /m ² kas

Hieruit volgt dat de factor voor de

restwarmtebron is (CR)	:	4,0 (zie bijlage 8)
Warmte-intensiteit (WI)	:	1,3 GJ/m ²
VO-verwarmingssysteem kas VO _k)	:	20 dm ² /m ² kas
Warmteopslag (WO)	:	geen
CO ₂ -intensiteit (CI)	:	3,0 m ³ /m ² kas

1. Schatting van de delta t_p:

Substitutie van het VO van het verwarmingssysteem, de maximale aanbodtemperatuur, de volumestroom, het VO-warmtewisselaar en de warmte-intensiteit in formule 2 resulteert in een schatting van de delta t_p:

$$dt_p = 4,5 + 0,4 VO_k + 0,7 AT - 26 DB + 26,4 VO_c - 12,1 WI$$

$$4,5 + 0,4 \times 20 + 0,7 \times 108 - 26 \times 1,0 + 26,4 \times 0,5 - 12,1 \times 1,3$$

$$4,5 + 8 + 75,6 - 26 + 13,2 - 15,7$$

$$= 60^{\circ}\text{C}.$$

2. Schatting van de dekkingsgraad:

Substitutie van de capaciteitsfactor voor de restwarmtebron, de delta t, de CO₂-intensiteit en de warmte-intensiteit in formule 1 levert een schatting van de dekkingsgraad op:

$$DK = -11 + 10,9 CR + 1,1 dt_p - 1,1 CI - 11,4 WI$$

$$= -11 + 10,9 \times 4,0 + 1,1 \times 60 - 1,1 \times 3,0 - 11,4 \times 1,3$$

$$= -11 + 43,6 + 66 - 3,3 - 14,8$$

$$= 81\%$$

Doen zich nu veranderingen voor in de uitgangspunten, dan worden eerst de consequenties voor de variabelen onderling bepaald voordat de dekkingsgraad bepaald kan worden. Een vergroting van de warmte-intensiteit van 1,3 naar 1,6 GJ/m² is te vergelijken met een stijging van de brandstofintensiteit van circa 40 m³/m² naar circa 50 m³/m².

Indien de dekkingsgraad wordt berekend zonder rekening te houden met de onderlinge samenhang, dan volgt uit de schatting:

$$\begin{aligned}
 DK &= -11 + 10,9 CR + 1,1 dt_p - 1,1 CI - 11,4 WI \\
 &= -11 + 10,9 \times 4,0 + 1,1 \times 60 - 1,1 \times 3,0 - 11,4 \times 1,6 \\
 &= -11 + 43,6 + 66 - 3,3 - 18 \\
 &= 77\% \text{ (ofwel een lagere dekking van 4\%)}
 \end{aligned}$$

Een wijziging van de warmte-intensiteit heeft tegelijkertijd gevolgen voor de delta t_p en de CO_2 -intensiteit. De consequenties voor de delta t_p en de CO_2 -intensiteit en tenslotte de dekkingsgraad worden hieronder beschreven:

1. De geschatte delta t_p wordt nu:

$$\begin{aligned}
 dt_p &= 4,5 + 0,4 VO_k + 0,7 AT - 26 DB + 26,4 VO_c - 12,1 WI \\
 &= 4,5 + 0,4 \times 20 + 0,7 \times 108 - 26 \times 1,0 + 26,4 \times 0,5 - 12,1 \times 1,6 \\
 &= 4,5 + 8 + 75,6 - 26 + 13,2 - 19,4 \\
 &= 56^\circ C
 \end{aligned}$$

2. De geschatte CO_2 -intensiteit wordt nu:

$$\begin{aligned}
 CI &= -2,2 + 3,9 WI + 0,06 WO - 0,6 ZC \\
 &= -2,2 + 3,9 \times 1,6 + 0,06 \times 0 - 0,6 \times 0 \\
 &= -2,2 + 6,2 + 0 - 0 \\
 &= 4,0 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ kas}
 \end{aligned}$$

3. De geschatte dekkingsgraad wordt nu:

$$\begin{aligned}
 DK &= -11 + 10,9 CR + 1,1 dt_p - 1,1 CI - 11,4 WI \\
 DK &= -11 + 10,9 \times 4,0 + 1,1 \times 56 - 1,1 \times 4,0 - 11,4 \times 1,6 \\
 &= -11 + 43,6 + 61,6 - 4,4 - 18,2 \\
 DK &= 72\%
 \end{aligned}$$

Door een toename van de warmte-intensiteit van 1,3 naar 1,6 GJ/m^2 , wordt geschat dat de dekkingsgraad afneemt met 81-72, ofwel 9%.

Bijlage 11 Voorbeeldberekening voor de schatting van de dekkingsgraad bij een wijziging van niet samenhangende variabelen

Uitgangspunten: zie voorbeeld 1; in dit voorbeeld verandert alleen het VO van het verwarmingssysteem in de kas. Deze wordt uitgebreid van 20 naar 30 dm² per m² kas. Dit heeft een geschatte vergroting van de delta t_p tot gevolg:

$$\begin{aligned}1. \quad dt_p &= 4,5 + 0,4 VO_k + 0,7 AT - 26 DB + 26,4 VO_c - 12,1 WI \\&= 4,5 + 0,4 \times 30 + 0,7 \times 108 - 26 \times 1,0 + 26,4 \times 0,5 - 12,1 \times 1,3 \\&= 4,5 + 12 + 75,6 - 26 + 13,2 - 15,7 \\&= 64^\circ\text{C}\end{aligned}$$

2. De geschatte dekkingsgraad wordt nu:

$$\begin{aligned}DK &= -11 + 10,9 CR + 1,1 dt_p - 1,1 CI - 11,4 WI \\&= -11 + 10,9 \times 4,0 + 1,1 \times 64 - 1,1 \times 3,0 - 11,4 \times 1,3 \\&= -11 + 43,6 + 70,4 - 3,3 - 14,8 \\&= 85\%\end{aligned}$$