

NATIONALE RAAD VOOR LANDBOUWKUNDIG ONDERZOEK TNO
COMMISSIE VOOR FYTOTRONS TNO

TECHNISCHE ASPECTEN VAN DE LUCHTBEHANDELING
VAN KLIMAATKAMERS VOOR BIOLOGISCH ONDERZOEK

Drs. A.M.K. van Beek

en

Ir. R. Koppe

Woord vooraf

=====

Bij aanvragen van klimaatruimten voor onderzoek met planten of dieren vormen de technische aspecten vaak een moeilijk punt. Enerzijds missen de aanvragers in de regel het technisch inzicht dat nodig is om zich een gefundeerd oordeel te vormen over de mate waarin bepaalde technische eisen gerealiseerd kunnen worden en over de merites van verschillende oplossingen van eenzelfde technisch probleem. Anderzijds missen de installateurs gewoonlijk specifieke ervaring met klimaatruimten voor biologisch onderzoek.

Het leek de Commissie voor Fytotrons dan ook wenselijk dat op de technische problemen van de luchtbehandeling in klimaatruimten dieper werd ingegaan, dan in het rapport "Mogelijkheden en moeilijkheden bij de inrichting van Fytotrons" mogelijk was.

Inmiddels is de Commissie zich ervan bewust, dat deze tak van technische wetenschap zich heeft ontwikkeld tot een afzonderlijk vakgebied, waarvan de essenties zich uiteraard niet in een beperkt aantal pagina's laten samenvatten. De heren Drs. A.M.K. van Beek en Ir. R. Koppe, die dit rapport samenstelden, kunnen echter putten uit een ruime ervaring op het specifieke gebied. Zij zijn er dan ook naar het oordeel van de Commissie uitstekend in geslaagd uit de vele aspecten diegene te kiezen, die zowel voor de adspirant-gebruikers als voor de ontwerpers en installateurs primair van belang zijn, terwijl de lezer die dieper inzicht wenst, verwijzingen vindt naar de relevante literatuur.

De Commissie vertrouwt dan ook, dat dit rapport zijn weg zal vinden.

Namens de Commissie Fytotrons TNO,
J. Doorenbos,
voorzitter.

INHOUD

blz.

1. Inleiding	1
2. Principes van de conditionering	2
3. Luchtsnelheid	9
4. Belichting	11
5. Temperatuur	12
6. De vochttoestand van de lucht	14
7. Klimaatkassen	15
8. Systeemkeuze	16
9. Bouwwijze	17
10. Literatuur	18

Technische aspecten van de luchtbehandeling van klimaatkamers
voor biologisch onderzoek

door
Drs. A.M.K. van Beek
en
Ir. R. Koppe

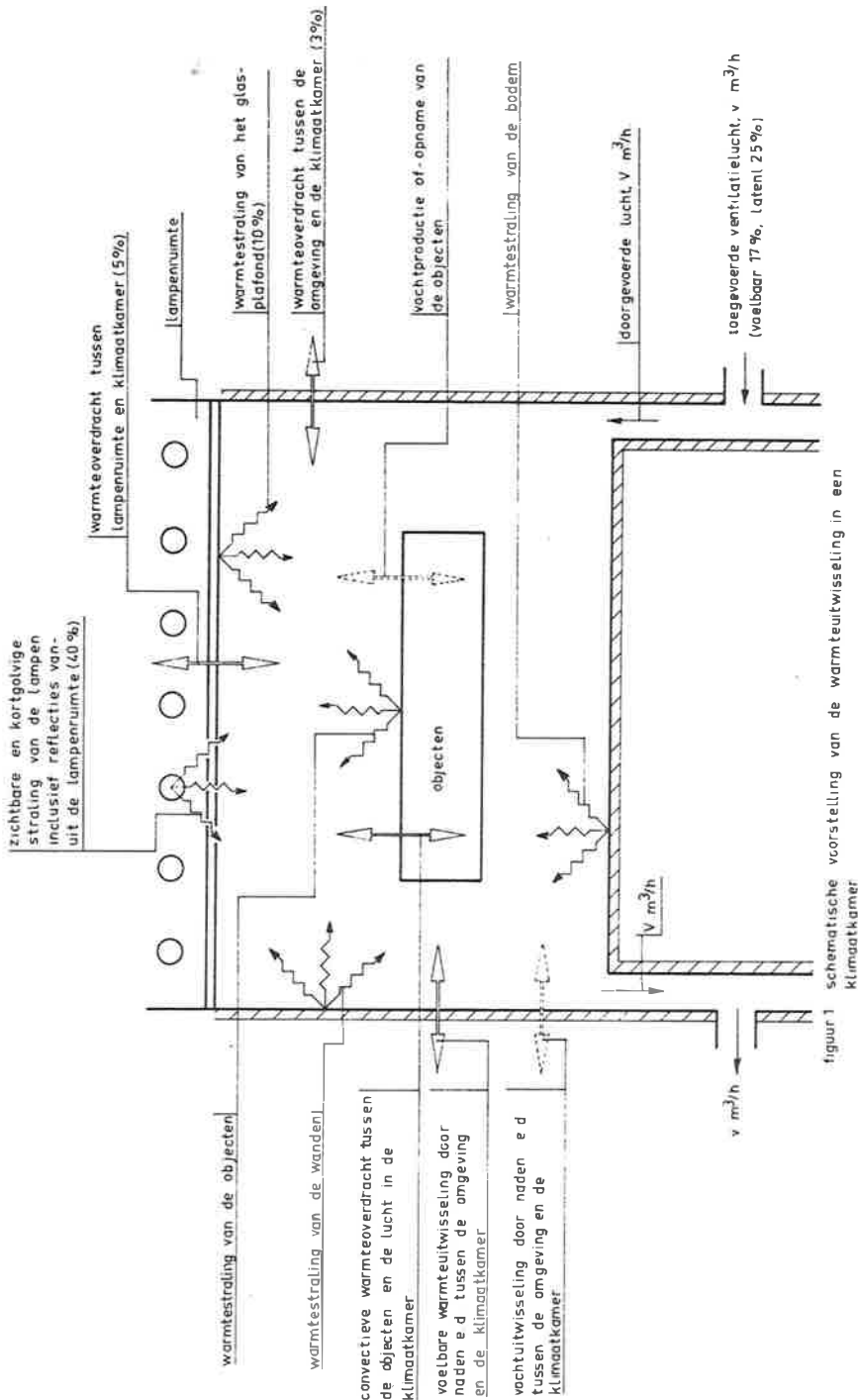
1. INLEIDING

Bij het ontwerpen van geconditioneerde ruimten voor het bestuderen van de invloed van milieufactoren op biologische processen blijken de gestelde eisen vaak tot, in zekere mate, tegenstrijdige uitvoeringsvormen te leiden. Dit wordt niet alleen veroorzaakt door de ingewikkeldheid van de problemen maar vooral door de onderlinge afhankelijkheid van de verschillende te beheersen milieufactoren. Zo is de relatieve vochtigheidsgraad afhankelijk van de temperatuur en zijn de temperatuurvariëaties afhankelijk van de hoeveelheid geconditioneerde lucht, d.w.z. van de luchtsnelheid, die door de kamer wordt gevoerd. Zijn dus bepaalde condities vastgelegd, dan zijn andere condities in principe hiermede automatisch bepaald. Daarnaast is het noodzakelijk de gewenste condities, vanuit het onderzoekprogramma gezien, zeer kritisch te beoordelen, omdat onnodig zwaar gestelde eisen leiden tot zeer dure en gecompliceerde installaties die ook wat betreft onderhoud en exploitatie een zware belasting voor de gebruiker vormen.

Vroegtijdig overleg tussen de gebruiker en de, technische, ontwerper zal in het algemeen leiden tot een verantwoord ontwerp dat zo goed mogelijk aansluit bij de eisen van het onderzoek.

In de navolgende beschouwingen zal nader ingegaan worden op de verschillende problemen die met het ontwerp en de technische uitvoering van de installaties voor klimaatbeheersing samenhangen. Voor uitvoerige beschrijvingen en gedetailleerde berekeningen moge worden verwezen naar de opgegeven literatuur (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,).

In dit rapport zullen wij ons beperken tot wat meer algemene beschouwingen en in het bijzonder de technische consequenties bespreken van de milieufactoren:



figuur 1 schematische voorstelling van de warmteuitwisseling in een klimaatkamer

de getallen tussen haakjes geven de orde van grootte aan van de belangrijkste componenten in % van de totale koellast voor een klimaatkamer van "normale" afmetingen 33 X 33 X 2,5 m³

kamercondities luchttemperatuur 20°C
 luchtvochtigheid 75%

lampenruimte luchttemperatuur 30°C
 dubbel glasplafond

omgeving luchttemperatuur 28°C
 luchtvochtigheid 70%

belichting Tl, 2kW/m²

ventilatie 15 X de kamerninhoud per uur

NB a de verdamping van de planten kan, afhankelijk van de plantenbezetting en de omstandigheden, oplopen tot ongeveer 0,2 kg/h m², de voor de verdamping benodigde energie wordt ontleend aan de instraling en eventueel aan de circulerende lucht

b bij slecht geconstrueerde kamers kan de warmte- en vochtuitwisseling door naden e d tussen de omgeving en de klimaatkamer grote waarden bereiken, soms oplopend tot het equivalent van 10 x de kamerninhoud per uur

- vochtinhoud van de lucht
 - luchttemperatuur
 - luchtsnelheid en luchtbeweging
- terwijl zijdelings problemen betreffende:
- de belichting
 - het CO₂-gehalte
 - en de algemene voorzieningen ter sprake komen.

2. PRINCIPES VAN DE CONDITIONERING

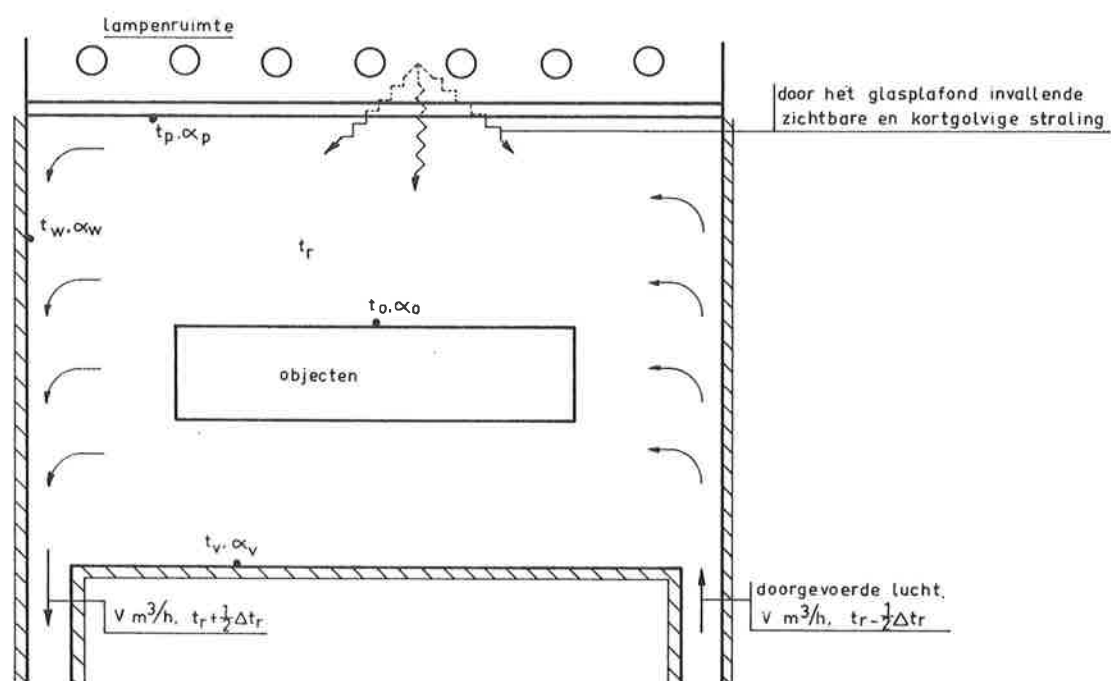
Indien wij ons in eerste instantie beperken tot de condities die in de ruimte worden geëist, dan is het voor het ontwerp van de installaties noodzakelijk een inzicht te verkrijgen in de warmte- en/of koelbelasting van de ruimte.

In figuur 1 is, zeer schematisch, aangegeven welke bijdragen worden geleverd aan de warmte- en vochtbalans van de lucht die door de kamer zal worden gevoerd:

1. de warmteoverdracht door convection tussen de te onderzoeken objecten en de lucht in de kamer en de vochtproduktie of -opname van deze objecten, zoals planten en van de grond (plantenbakken), ten gevolge van het geabsorbeerde gedeelte van de opvallende zichtbare en kortgolvlige straling van de belichtingslampen en van de langgolvlige straling van de omgeving. Deze bijdragen zijn sterk afhankelijk van de intensiteit van de straling.

Hierbij zij opgemerkt dat de oppervlakte temperatuur van de objecten mede bepaald wordt door de inwendige energieproduktie. Indien de te onderzoeken objecten dieren betreffen dient men de warmte- en vochtproduktie van deze dieren in de berekening op te nemen.

2. De door de wanden, de vloer, het plafond en andere voorwerpen in de ruimte aan de lucht afgestane warmte en vocht ten gevolge van temperatuur- en dampspanningsverschillen tussen de kamerlucht en de begrenzende oppervlakken. De temperaturen van deze oppervlakken worden bepaald door het geabsorbeerde gedeelte van de opvallende straling, de energieproduktie van de voorwerpen, warmte-transport van de naastliggende en omgevende ruimten en de warmteoverdracht tussen de lucht en de oppervlakken.



figuur 2 schematische voorstelling van een klimaatkamer in evenwichtstoestand, zonder vochtuitwisseling tussen de doorgevoerde lucht en de objecten en tussen de klimaatkamer en de omgeving

(t temperatuur, α warmteoverdrachtscoëfficiënt,

indices: p=plafond, w=wand, v=vloer, o=objecten, r=ruimte)

Opgemerkt dient hierbij nog te worden dat ook mensen in de ruimte bijdragen tot de warmte- of koellast van de klimaatkamer.

3. Het warmte- en vochttransport door niet goed afgedichte naden, kieren e.d. en door het openen van deuren.
4. Ten slotte dient men incidentele verstoringen van het klimaat in rekening te brengen indien de bijdragen hiervan niet verwaarloosbaar zijn. Te denken valt hierbij aan bijvoorbeeld het water geven van planten of het inbrengen van grote hoeveelheden grond.

Ter illustratie zal hier een zeer elementaire beschouwing worden gegeven over het opstellen van een warmtebalans voor een klimaatkamer in evenwichtstoestand zonder vochtuitwisseling tussen de doorgevoerde lucht en de objecten en tussen de klimaatkamer en de omgeving.

In figuur 2 is schematisch een ruimte aangegeven die geconditioneerd dient te worden. Stel dat in het stationaire geval de temperatuur van de lucht, t_r °C, in de ruimte constant dient te worden gehouden met een maximaal verschil van Δt_r °C, ten gevolge van de warmteopname of -afgifte van de door de kamer passerende lucht.

Uit de figuur blijkt dat de hoeveelheid warmte die door deze lucht moet worden toe- of afgevoerd gelijk is aan:

$$F_w \cdot \alpha_w (t_w - t_r) + F_p \cdot \alpha_p (t_p - t_r) + F_v \cdot \alpha_v (t_v - t_r) + F_o \cdot \alpha_o (t_o - t_r) = Q_1 \quad (1)$$

Hierin is F de totale oppervlakte van de beschouwde oppervlakken. Hierbij is aangenomen dat de warmteoverdrachtscoëfficiënten (α) als constanten mogen worden opgevat.

Om, bij de voor deze kamers veelal toegepaste bouwwijze, de warmte binnen de gestelde temperatuurafwijking af te voeren moet een hoeveelheid geconditioneerde lucht door de cel worden gevoerd die bij het verlaten van de cel een, om de gedachten te bepalen, gemiddelde temperatuur zal hebben van $t_r + \frac{1}{2}\Delta t_r$ en bij de intrede in de ruimte $t_r - \frac{1}{2}\Delta t_r$. Deze hoeveelheid V , in m³/h, is nu te berekenen uit:

$$\begin{aligned} Q_1 &= V c_p [(t_r + \frac{1}{2}\Delta t_r) - (t_r - \frac{1}{2}\Delta t_r)] \\ &= V c_p \Delta t_r \end{aligned}$$

$$\text{of } \rho V = G = \frac{Q_1}{c_p \Delta t_r} \quad (2)$$

hierin is:

ρ = dichtheid van de lucht bij $t^\circ\text{C}$, $1,20 \text{ kg/m}^3$ bij 20°C en 760 mm Hg druk

c_p = soortgelijke warmte van de lucht bij constante druk, $0,24 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$, bij 20°C

G = gewicht van de doorgevoerde lucht in kg/h .

Uit formule (1) volgt dat indien Δt_r tweemaal zo klein zou moeten worden, V tweemaal zo groot moet worden. Men ziet hieruit direct de invloed die de gestelde eisen hebben op de technische installaties.

Stellen we vervolgens dat de vochtinhoud van de lucht in de kamer, $x_r \text{ kg/kg}$, mag variëren binnen de gestelde afwijking Δx_r en dat in de ruimte totaal aan waterdamp wordt geproduceerd, binnenlekt of wordt opgenomen:

$$X = X_o + X_1 \text{ kg/h,}$$

waarin X_o de vochtproduktie (of opname) van alle objecten voorstelt en X_1 de bijdrage door vochtuitwisseling door naden, deuren e.d. tussen de omgeving en de klimaatkamer, dan dient de doorgevoerde lucht, om de vochtinhoud

op de gewenste waarde $x_r \pm \frac{1}{2}\Delta x_r$ te houden aan de intredezijde een vochtinhoud te hebben van $x_r \pm \frac{1}{2}\Delta x_r - \frac{X}{V\rho}$ kg/kg . (3)

Immers, aangezien er $G \text{ kg/h}$ lucht door de kamer wordt gevoerd en indien de vochtinhoud van de lucht bij de intrede $x_r - \frac{1}{2}\Delta x_r \text{ kg/kg}$ bedraagt en bij de uittrede $x_r + \frac{1}{2}\Delta x_r \text{ kg/kg}$ betekent dit dat totaal $G\Delta x_r \text{ kg/h}$ vocht is geproduceerd.

Dit is gelijk aan X dus $\Delta x_r = \frac{X}{G}$

(3) kan dus nu ook worden geschreven als $x_r \pm \frac{1}{2} \frac{X}{G} \text{ kg/kg}$.

Opmerkingen

- a. Afhankelijk van het in de klimaatkamer aanwezige plantenbestand zal een groot gedeelte van de straling door en van het plafond ten goede komen aan transpiratie van de planten. Om de formules niet bijzonder ingewikkeld te maken, is afgezien van het kwantitatief in rekening brengen van deze interacties.

N.B. Het is echter bij het ontwerpen van kamers noodzakelijk deze interacties wel in rekening te brengen.

- b. Bij de berekening van de warmte- en vochtproduktie of opname van de in de ruimte aanwezige objecten is het noodzakelijk ook rekening te houden met eventueel toekomstige plannen voor het inbrengen van apparaten bijvoorbeeld voor het op temperatuur houden van voedingsoplossingen. Daarnaast dient de produktie van voelbare en latente warmte door de mens, zeker indien gedurende aanzienlijke perioden werkzaamheden in de cel moeten worden verricht, in de berekening te worden opgenomen.

Afhankelijk van de zwaarte van de te verrichten arbeid bedraagt de voelbare warmte ongeveer 100 tot 200 kcal/h terwijl de vochtafgifte dan ongeveer 40 tot 100 g/h zal bedragen. (8)

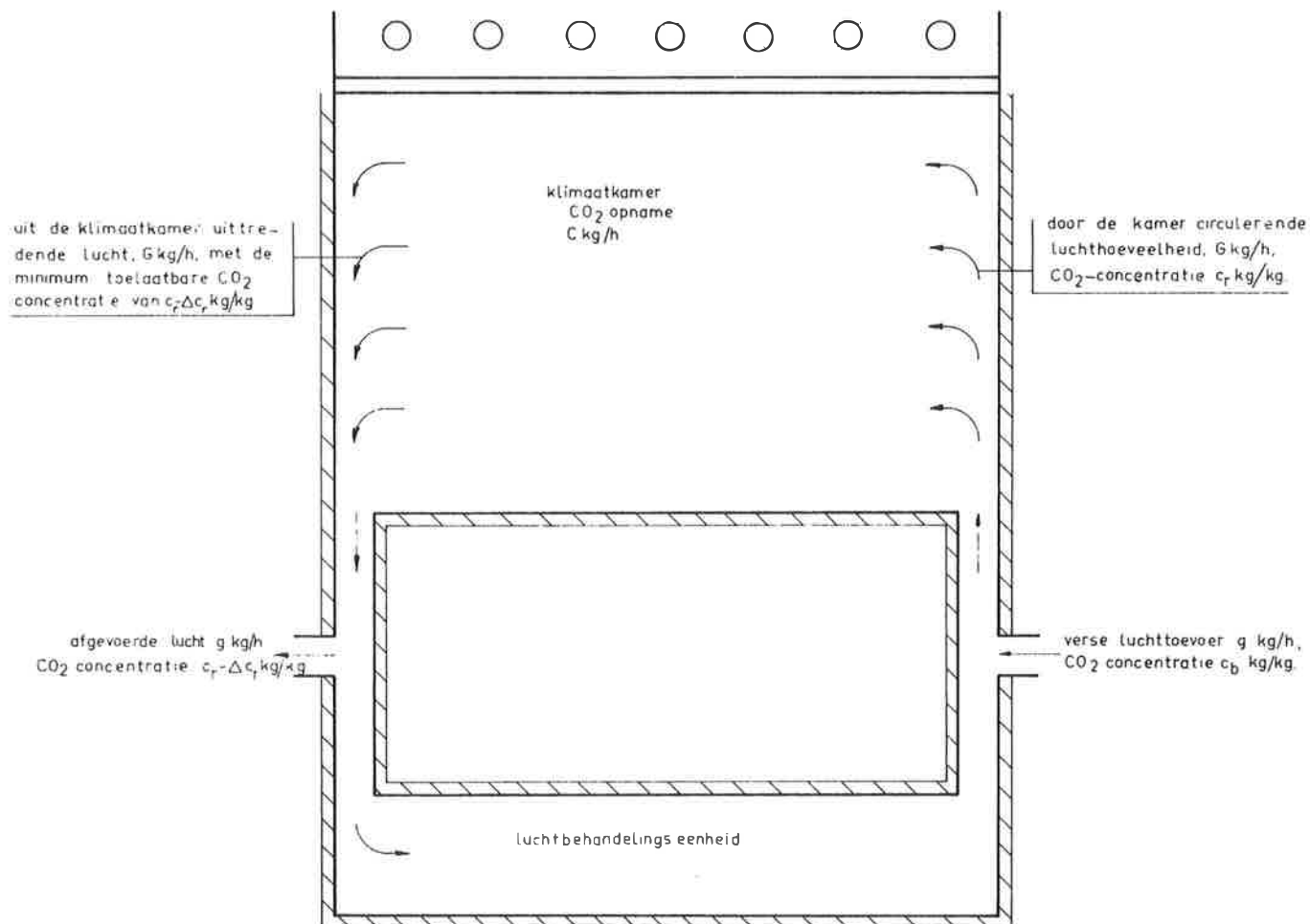
- c. Voor een nadere beschouwing over de instraling door de belichtingslampen moge hier worden verwezen naar het rapport van de Commissie voor Fytotrons, samengesteld door Dr. P. Gaastra "Enkele invloeden van twee lampsoorten op de warmtebalans voor klimaatkamers en lampenruimten". (9)

- d. Voor een exacte berekening dient ook de warmte-uitwisseling tussen de lucht in de klimaatkamer en de omgeving bepaald te worden. Bij niet dampdichte wanden kan ook de vochtuitwisseling een niet verwaarloosbare bijdrage in de warmtebalansen leveren. In het vereenvoudigde geval waarbij de opvallende straling en de vochtuitwisseling verwaarloosd worden kan de formule worden gebruikt:

$$q = kF (t_2 - t_1) \text{ kcal/h}$$

hierin is:

F = het oppervlak van de beschouwde wand, m²



figuur 3 schematische voorstelling van een klimaatkamer voor de berekening van de luchtverversing in verband met de CO₂-opname ter bepaling van de minimum toelaatbare CO₂ concentratie, $c_r - \Delta c_r$ kg/kg

k = warmtetransmissiecoëfficiënt, $\text{kcal/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C h}$, die afhangt van de warmteoverdrachtscoëfficiënten van de buitenlucht en van de binnenlucht op de wanden, van de samenstelling en de dikte van de wanden en van de warmtegeleidingscoëfficiënten van de materialen waaruit de wanden zijn samengesteld. (10)

t_1 en t_2 zijn de temperaturen buiten en in de ruimte aan weerszijden van de betreffende wand.

Het is duidelijk dat indien in de wand de hoogste waarde van de dauwpunten behorend bij t_1 of/ en t_2 wordt bereikt, condensatie optreedt. Wanneer dit het geval is, verdient het aanbeveling of dampdichte isolatie aan te brengen of de wanden van de kamer dampdicht af te sluiten.

Bij het ontwerp dient er verder voor gewaakt te worden dat bij temperatuurwisseling in de kamer zo min mogelijk condensatie aan wanden, vloer en plafond optreedt.

- e. Niet goed afgedichte deuren, kieren en naden, doorvoeren van leidingen door de wanden, scheuren, sleutelgaten e.d. kunnen een aanzienlijke verstoring geven indien hoge eisen aan de te handhaven condities worden gesteld.

Het is uitermate moeilijk deze uitwisselingen in formules uit te drukken. Bij de bouw van de ruimte dient derhalve bijzondere aandacht besteed te worden aan de afdichting. Ook het openen van een deur zal in de ruimte een zekere verstoring van de condities tot gevolg hebben; hiervoor kan globaal een uitwisseling van ongeveer $0,1$ tot $0,2 \text{ m}^3$ lucht worden aangenomen. (11)

Bij de beschouwing over de warmte- en vochtbalans in de ruimte is hier nog niet in rekening gebracht, dat ook regelmatig verse (buiten) luchttoevoer, onder meer voor het binnen toelaatbare grenzen handhaven van het CO_2 -gehalte van de lucht in de ruimte, noodzakelijk is.

In figuur 3 is, schematisch, opnieuw de te conditioneren ruimte weergegeven waarbij is aangenomen dat $V \text{ m}^3/\text{h}$ of $G \text{ kg/h}$ lucht constant door de kamer en door de luchtbehandelingsinstallatie wordt gevoerd, terwijl een gedeelte $v \text{ m}^3/\text{h}$ of $g \text{ kg/h}$ moet worden toe- en afgevoerd voor de luchtverversing.

Uitgaande van een CO_2 -opname van C kg/h in de klimaatruimte, een concentratie c_r kg/kg van de intredende lucht en een minimaal toelaatbare concentratie van $c_r - \Delta c_r$ kg/kg in de ruimte kan nu de gewenste verversing worden berekend.

Voor de berekening van Δc_r geldt:

$$G \cdot c_r - C = G (c_r - \Delta c_r)$$

$$\Delta c_r = \frac{C}{G}$$

Om de concentratie van de intredende lucht te kunnen handhaven op c_r kg/kg zal de onbekende hoeveelheid g kg/h verse lucht met de CO_2 -concentratie van de buitenlucht c_b moeten worden toegevoerd, terwijl dezelfde hoeveelheid lucht met de minimaal toelaatbare concentratie $(c_r - \Delta c_r)$ kg/kg wordt afgevoerd.

De CO_2 - balans luidt dus:

$$g c_b - g (c_r - \Delta c_r) = C = G \Delta c_r$$

$$g = \frac{G \Delta c_r}{c_b - c_r + \Delta c_r}$$

De relatie tussen het CO_2 -gehalte van de buitenlucht en dat in de klimaatkamer wordt nu gegeven door de uitdrukking:

$$c_b - (c_r - \Delta c_r) = \frac{G \Delta c_r}{g} = \frac{C}{g}$$

Opgemerkt dient te worden dat één persoon per uur ongeveer 0,06 tot 0,14 kg CO_2 produceert, zodat, indien gedurende langere tijd werkzaamheden in de ruimte moeten worden verricht, deze bijdrage in rekening moet worden gebracht. (11)

De aangezogen buitenlucht moet door de luchtbehandelingsinstallatie op de temperatuur $t_r - \frac{1}{2} \Delta t_r$ gebracht worden en een vochtinhoud van $x_r + \frac{1}{2} \frac{K}{G}$ verkrijgen. Voor de verwarming van de lucht moet dus, indien de vochtinhoud gelijk zou blijven, $Q_2 = v \rho c_p (t_r - \frac{1}{2} \Delta t_r - t_b)$ kcal/h worden toegevoerd of indien $t_r - \frac{1}{2} \Delta t_r < t_b$ door een koeler worden afgevoerd, waarbij t_b de temperatuur van de aangezogen buiten-

lucht voorstelt. Aangezien bij koeling de vochtinhoud van de lucht kan afnemen zal in het algemeen, naast de voelbare warmte ook de bijdrage van de latente warmte in rekening moeten worden gebracht. Heeft de lucht een vochtinhoud van x kg/kg dan zal een hoeveelheid vocht van $x_r \pm \frac{1}{2}\Delta x_r - \frac{X}{G} - x$ kg/kg moeten worden toegevoerd of indien: $x > x_r \pm \frac{1}{2}\Delta x_r - \frac{X}{G}$ moeten worden afgevoerd door middel van droging.

De capaciteit van de verwarmers of de koelers om $G + g$ kg droge lucht op de vereiste condities te brengen zal derhalve, met inachtneming van alle hiervoor gestelde beperkingen ten minste moeten bedragen $Q = Q_1 + Q_2 = Gc_p \Delta t_r + gc_p (t_r - \frac{1}{2}\Delta t_r - t_b)$.

Voor de berekening wordt vaak gebruik gemaakt van het begrip enthalpie, H , dat de totale warmteinhoud van de lucht aangeeft.

Beschouwen we een mengsel van 1 kg droge lucht van t °C en x kg waterdamp van t °C dan zal de warmteinhoud of enthalpie van deze $(1 + x)$ kg vochtige lucht zijn: $H = h_1 + xh_d$

hierin is:

h_1 = de warmteinhoud van de droge lucht d.i. $c_{pl}t$ bij t °C

xh_d = de warmteinhoud van x kg waterdamp d.i. $c_{pd}t.x + 596.x$ bij t °C

c_{pl} = soortgelijke warmte van droge lucht = 0,24 kcal/kg °C

c_{pd} = soortgelijke warmte van waterdamp = 0,46 kcal/kg °C

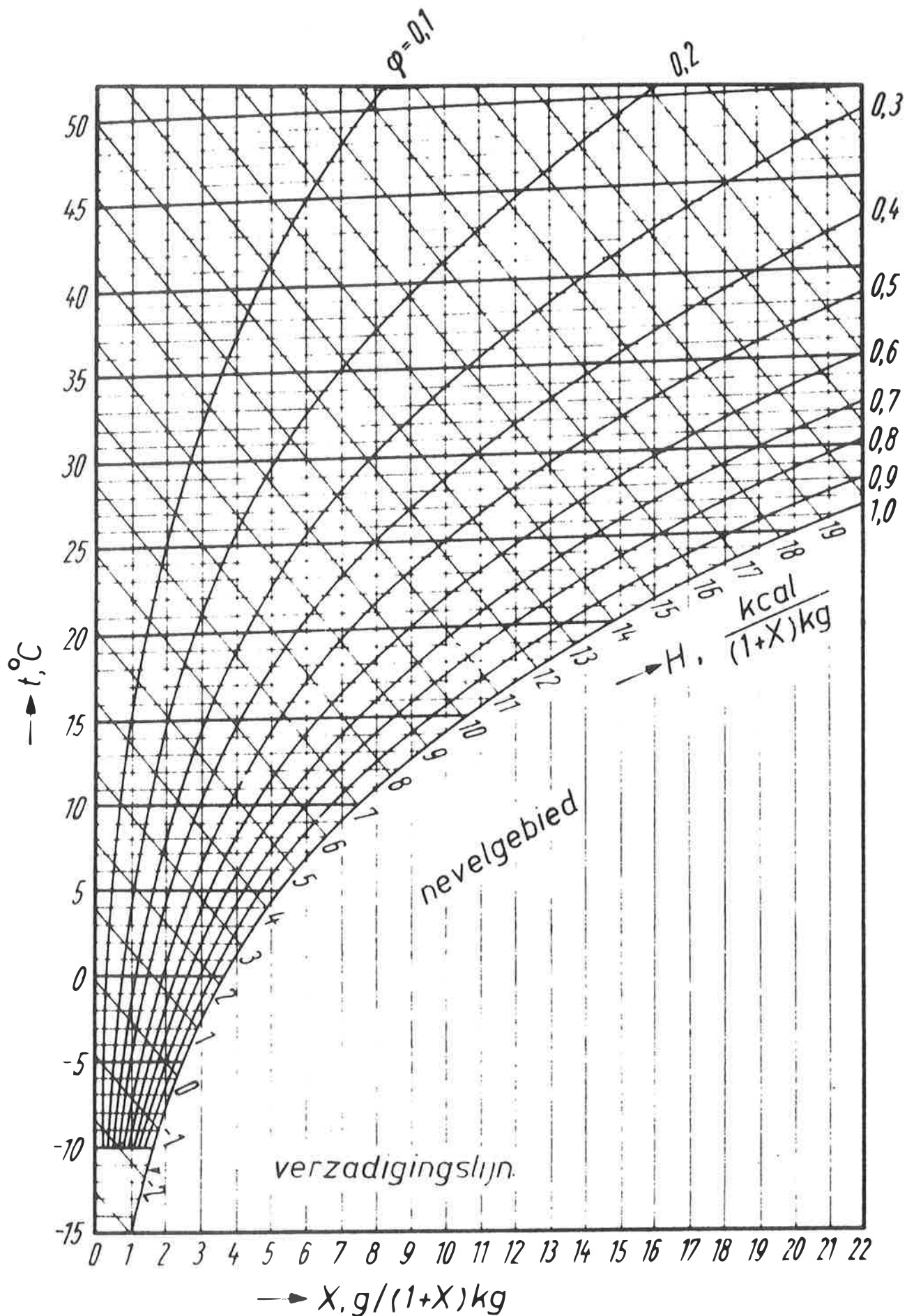
Ten slotte is voor de verdamping van x g water van 0 °C tot x g waterdamp van 0 °C 596.x kcal nodig geweest zodat de verdampingswarmte latent in de waterdamp is opgeslagen.

Samenvattend luidt de formule (2) dus:

$H = 0,24 t + 0,46 t x + 596.x$ in kcal/ $(1 + x)$ kg vochtige lucht.

Het verband tussen H, X, t en de relatieve vochtigheidsgraad, gedefinieerd als de verhouding van de partiële waterdampspanning bij de heersende temperaturen en de verzadigingswaterdampspanning bij deze temperaturen, wordt weergegeven in een zgn. Mollierdiagram. Hieruit is de toestand van de lucht direkt af te lezen.

Opgemerkt zij dat het Mollierdiagram bestaat uit twee diagrammen, één met een rechthoekig assenstelsel, het t, x diagram en één met een scheefhoekig assenstelsel, het t, H diagram.



figuur 4 H,x-diagram volgens Mollier

H = enthalpie in kcal droge lucht vermengd met x g waterdamp

x = gram waterdamp per kg droge lucht

ϕ = relatieve vochtigheid bij een barometerstand van 760 mm Hg druk

t = temperatuur van de lucht in $^{\circ}\text{C}$

Door de twee diagrammen over elkaar heen te leggen met gemeenschappelijk t- as krijgt men het in figuur 4 afgebeelde H,x,t en diagram.

Uit het diagram ziet men dat verwarming of koeling van de lucht met constant blijvende vochtinhoud verloopt langs de rechte $x = \text{constant}$.

Ook de eindtoestand van twee luchtmengsels G_1 met de warmteinhoud H_1 en G_2 met de warmteinhoud H_2 is, indien geen warmte of vocht wordt toegevoerd of onttrokken op eenvoudige wijze uit het diagram af te leiden.

Indien in de eindtoestand de enthalpie van het mengsel wordt voorgesteld door H_m dan geldt:

$$G_1 H_1 + G_2 H_2 = (G_1 + G_2) H_m$$

$$H_m = \frac{G_1 H_1 + G_2 H_2}{G_1 + G_2}$$

H_m ligt dus op de verbindingslijn van H_1 en H_2 in het diagram en deelt deze lijn in twee delen in de verhouding: $G_1 : G_2 = (H_2 - H_m) : (H_m - H_1)$.

Vele andere berekeningsvoorbeelden zijn in de literatuur beschreven zodat korthedshalve daarnaar moge worden verwezen. (12,16)

3. LUCHTBEWEGING

Zoals reeds eerder is opgemerkt neemt in de stationaire toestand de per tijdseenheid door de ruimte te voeren lucht de af te voeren warmte op. Hoe groter de luchthoeveelheid des te dichter kunnen de gestelde eisen in de ruimte worden benaderd. Toch zal men de luchtsnelheid binnen bepaalde grenzen willen en moeten beperken, zodat ook hier een compromis tussen nauwkeurigheid en luchtsnelheid moet worden gevonden. (1)

De lucht kan op velerlei wijzen door de ruimte worden gevoerd, waarvan wij hier noemen:

- verticaal omhoog of naar beneden door middel van in het plafond en in de vloer aangebrachte sleuven, roosters e.d.
- horizontaal door geperforeerde wanden, voorzien van jalouzieën of roosters.

In het eerste geval mag men een verticale temperatuursgradiënt verwachten in het tweede geval een horizontale bij een lege "ideale" kamer waarbij de lucht met uniforme snelheid door de kamer beweegt en de instraling uniform is.

In de praktijk blijkt van een uniforme stroming geen sprake; integendeel de luchtbeweging is zeer onregelmatig. Dit betekent dat ook de temperatuurgradiënt op verschillende plaatsen in de kamer niet dezelfde zal zijn. Een meer uniforme luchtbeweging is alleen dan bereikbaar indien de vorm van de toevoerkanalen hiervoor apart wordt berekend. De consequenties van een dergelijke eis zullen echter zowel wat betreft de installaties als de benodigde ruimte niet aanvaardbaar zijn.

Bij jalouzie- of roosterwanden kunnen vaak de openingen zodanig worden ingesteld dat een bepaald patroon van luchtbeweging zeer grof is in te stellen. Bij het bovenstaande is er van uitgegaan dat de lucht buiten de kamer wordt geconditioneerd en vanuit de luchtbehandelingsapparatuur door middel van kanalen in de kamer wordt geblazen waarbij de inblaasopeningen een gehele wand of vloer moeten beslaan. Indien dit niet het geval is maar slechts een aantal kleinere openingen aanwezig zijn of de luchtbehandelingsapparatuur in de vorm van een gesloten eenheid in de ruimte zelf is opgesteld, is de luchtbeweging geheel onduidelijk.

Uiteraard behoeft dit voor bepaalde onderzoeken in het geheel geen bezwaar te zijn mits op de plaats van de te onderzoeken objecten de gewenste temperatuur- en vochtigheidsgradiënten worden bereikt.

Om het effect van de luchtbeweging op de planten bij horizontale doorstroming te verkleinen kan men, bijvoorbeeld om de 15 minuten, de doorstroomrichting omkeren. Met geschikt gekozen ventilatoren is dit zonder veel moeilijkheden te realiseren.

Om technische redenen geeft men vaak de voorkeur aan een horizontale luchtdoorstroming door de kamer, hoewel in de praktijk ook verschillende andere configuraties optreden, zoals moge blijken uit de voorbeelden opgenomen in het door de Commissie voor Fytotrons uitgebrachte rapport: "Enquête Fytotrons I". (13)

4. BELICHTING

De instraling door de belichting, de warmtestraling van het plafond en de convectieve warmteoverdracht van de warme lampenruimte naar een relatief koude kamer vormen de belangrijkste bijdragen tot de warmtebelasting van een plantenkamer. Om deze te beperken worden, vooral indien aanzienlijke lampvermogens noodzakelijk zijn, dubbelbeglaasde plafonds toegepast.

Hierbij doen zich verschillende problemen voor:

- welk glas wordt gekozen
- moet de spouw gekoeld worden
- welke constructie dient te worden gekozen om schaduwwerking, lijsten en sponningen tot een minimum te beperken.

Nog afgezien van de problemen die onder meer betrekking hebben op:

- de keuze van de lampen
- de spectrale verdeling in de kamer
- de verdeling van de lampen
- de totaal te bereiken intensiteit
- dag- nachtlengte instellingen
- uniformiteit van de belichting over de kamer
- eventuele gedeeltelijke belichting.

Voor nadere beschouwingen over deze problemen moge worden verwezen naar het door de Commissie voor Fytotrons uit te brengen en door Dr. P. Gaastra samengestelde rapport "Lichtbronnen voor klimaatkassen en klimaatkamers". (14)

Afgezien van de altijd optredende absorptie is nog geen constructie voor het plafond bekend die geheel aan alle eisen voldoet. Zowel perspex als thermopane worden vaak toegepast waarbij, op grond van ervaring en berekening, een lichte voorkeur uitgaat naar het tweede systeem. Uiteraard is het geïnstalleerde lampvermogen per m² bepalend of een dubbel beglaasd plafond noodzakelijk is. De spectrale doorlaatbaarheid voldoet meestal voor beide typen aan de door het onderzoek gestelde eisen, hoewel zeker voor speciale onderzoeken aan dit aspect aandacht moet worden besteed.

Toepassing van plafonds waarvan de spouw door middel van lucht of door water wordt gekoeld, moet ontraden worden omdat dit vaak intensief onderhoud vergt.

De uniformiteit van de belichting in de kamer is mede van belang bij de beoordeling van de onderzoekresultaten. De lichtverdeling in verticale en horizontale richting in de kamer wordt in sterke mate bepaald door de oppervlaktebehandeling van de wanden zoals blijkt uit (15). Het is gewenst het probleem van de lichtverdeling in de kamers nader te onderzoeken: in afhankelijkheid van het object van onderzoek. In elk geval lijkt het gewenst een indruk te hebben van het verloop van de lichtverdeling in de kamer.

Tot dusver is er vanuit gegaan dat de lampenruimte geheel van de kamer is gescheiden. In sommige kamers is de belichting in de kamer geplaatst, wat betekent dat het totale lampvermogen als warmte-last in de berekeningen van de grootte van de installatie moet worden afgenomen.

Om een reproduceerbare intensiteit en spectrale verdeling van het uitgezonden licht te handhaven is het noodzakelijk voor sommige lampsoorten de temperatuur van de lampen ongeveer constant te houden. Dit betekent dat de lampenruimte gekoeld moet worden. Dit kan geschieden door buitenlucht via filters en eventueel via een koel-spiraal langs de lampen te leiden. De afwijking van de temperatuur mag hierbij variëren tussen + en -5°C van de ingestelde waarde.

Ten slotte zal men rekening moeten houden met de vermindering van de intensiteit van de lampen door veroudering, terwijl de lampen zodanig dienen te zijn bevestigd dat een eenvoudige en snelle verwisseling kan geschieden. De boven gegeven beschouwingen zullen niet allemaal bij de bouw van een klimaatkamer betrokken behoeven te worden: het onderzoek dat in de kamer zal worden uitgevoerd bepaalt de mate van belangrijkheid van de afzonderlijke problemen.

5. DE TEMPERATUUR

In het algemeen zal men de temperatuur in de kamer over een zeker traject willen regelen. Hiertoe is in de kamer een voeler aangebracht die, ingesteld op een gekozen waarde, signalen geeft aan de verwarmings- respectievelijk koelapparatuur indien de temperatuur in de kamer een bepaalde negatieve of positieve afwijking van de ingestelde waarde heeft bereikt. De grootte van deze afwijking hangt af van de keuze van het regelorgaan. De snelheid waarmee het signaal van de

voeler gerealiseerd wordt, hangt af van de traagheid van de voeler zelf, de tijd die verloopt tussen het moment waarop het signaal wordt gegeven en het moment dat de eerste invloed in de toegevoerde lucht merkbaar wordt. Behalve door de overregeling, d.w.z. het nog gedurende een korte tijd doorgaan van de verwarming of koeling als de gewenste instelling weer bereikt is, wordt de afwijking mede bepaald door de dode zone en de schakeldifferentie d.w.z. het traject tussen de aan- en uitschakelfuncties van de regelaars. (16)

Een veel toegepaste betrouwbare temperatuurregelaar is de kwik-contactthermometer, waarvan de bol tegen stralingsinvloeden afgeschermd dient te worden. Meestal is deze opgesteld tegen de wand zodanig dat de instelling en aflezing buiten de kamer kan geschieden. Opgemerkt moet worden dat deze plaats niet erg representatief behoort te zijn voor de condities in de kamer; immers op deze plaats zullen zelden planten staan, terwijl de invloed van de omgeving op de voeler weleens anders zou kunnen zijn dan wanneer deze midden in de kamer zou zijn opgesteld. Conclusies over de waarde van de temperatuur of over de gelijkmatigheid hiervan in de kamer op grond van de aanwijzing van een aan de wand bevestigde temperatuurvoeler, zijn derhalve aanvechtbaar. De gewenste waarde zal het dichtst worden benaderd indien de temperatuurvoeler in het midden van de kamer wordt opgesteld.

Het vaststellen van de temperaturen in de ruimte op verschillende plaatsen vergt een zeer uitvoerig meetprogramma dat met de grootste zorg dient te worden uitgevoerd.

Door het periodiek omkeren van de doorstroomrichting van de conditioneringslucht wordt de over de ruimte heersende temperatuurgradiënt ook omgekeerd hetgeen onder bepaalde omstandigheden van voordeel kan zijn.

Andere in de praktijk toegepaste systemen maken onder meer gebruik van met gas of vloeistof gevulde voelerelementen, waarbij de uitzetting hiervan langs elektrische of mechanische weg de regelorganen stuurt, van thermokoppels, halfgeleider elementen en weerstandvoelers. (17, 18, 19)

De ontwikkeling van een elektronische temperatuurregelaar die geheel contactloos schakelt belooft voor de toekomst een zeer betrouwbaar en nauwkeurig regelement te worden dat, gecombineerd met statische relaisschakelingen, een grote verbetering in de regeling van de installaties en een veel kleinere kans op storingen zal geven.

6. DE VOCHTTOESTAND VAN DE LUCHT

Een toch wel wat moeilijker dan de temperatuur te regelen grootheid vormt de relatieve vochtigheid, of wellicht beter de vochtinhoud van de lucht, vooral omdat de hiervoor te verkrijgen regelaars alle in meerdere of mindere mate bezwaren vertonen.

Verschillende regelaars waarvan het vochtgevoelige element bestaat uit een bundel natuurlijk haar, zijn vrij onnauwkeurig en traag en moeten regelmatig herijkt en geregenereerd worden.

Verbetering in deze situatie heeft de toepassing van een synthetisch haarelement gebracht dat, gekoppeld aan een potentiometer waarvan het uitgangssignaal de bevochtiger en droger stuurt, thans op verschillende plaatsen met succes wordt toegepast.

Eveneens veel toegepast wordt de methode van de natte- en drogebolregelaar, met bijvoorbeeld contactthermometers. Het nadeel van deze methode is de grote zorgvuldigheid die betracht moet worden om het systeem goed te laten functioneren: wekelijks de kousjes vernieuwen of schoonmaken, bij voorkeur gedistilleerd water gebruiken en aspireren met een luchtsnelheid van ongeveer 2,5 m/s. Naast deze meer conventionele methoden worden ook elementen toegepast die berusten op de verandering van de elektrische weerstand met de luchtvochtigheid van een op een drager aangebracht geleidend materiaal. Hoewel enkele van deze elementen veelbelovend lijken is nog te weinig bekend over veranderingen van het geleidingsvermogen in de tijd, over de aantasting onder invloed van verontreinigingen en over de reproduceerbaarheid van de temperatuurvariaties. Zeker is dat meer ervaring moet worden verkregen alvorens deze elementen geheel de plaats van de meer conventionele regelaars zullen kunnen innemen.

Verschillende van de door de handel geleverde industriële installaties en klimaatkasten zijn voorzien van zgn. LiCl-voelers. De LiCl-cellen worden in twee soorten uitgevoerd; bij de ene soort

wordt de cel verwarmd totdat een evenwicht wordt bereikt tussen de maximale dampspanning van de verzadigde LiCl-oplossing en de heersende dampspanning van de lucht, bij de tweede uitvoering, waarvoor in principe ook andere zouten dan LiCl kunnen worden toegepast, wordt de verandering van het geleidingsvermogen onder invloed van de vochttoestand van de lucht als maat voor de relatieve vochtigheid bepaald. Afgezien van het feit dat geen water op de LiCl-cel mag komen en dat deze nu en dan moet worden vernieuwd zijn hiermede aanvaardbare resultaten bereikt.

Een andere groep van meetelementen maakt gebruik van de verandering van het geleidingsvermogen van op bepaalde wijze behandelde oppervlakken, bijvoorbeeld van polystyreen. Ook met deze elementen is nog onvoldoende ervaring verkregen om een beoordeling van de bruikbaarheid te geven. (20) Zoals ook bij de temperatuurregeling het geval was geeft de vochtigheidsvoeler door middel van de regelaar, signalen af naar de bevochtiger en de droger. (18, 19) Als bevochtigers worden stoominjecteurs, waternevelaars, sproeiers of waterbaden waarover de lucht wordt geleid, toegepast. Het meest effectief, zeker daar waar grote hoeveelheden vocht moeten worden toegevoerd, is stoominjectie. Als ontvochtigers worden vaak koudespiralen toegepast, terwijl ook wel gebruik wordt gemaakt van drogers bijvoorbeeld gevuld met silicagel. Aangezien in plantengroeiruimten soms water direct aan de planten wordt toegediend door sproeien of anderszins, hetgeen overigens sterk ontraden wordt, terwijl door de verdamping de plant water zal geven aan de lucht, zal vooral aandacht aan een goede ontvochtiging dienen te worden besteed. Bij het ontwerp van ontvochtigers dient men rekening te houden met de mogelijkheid van invriezen van de koude spiralen.

7. KLIMAATKASSEN

Tot dusver hebben wij ons beperkt tot beschouwingen over klimaatkamers met kunstmatige belichting. De gegeven beschouwingen gelden echter in principe ook voor klimaatkassen waarbij echter de energie-instraling veel groter en veranderlijker is. Wil men vergelijkbare condities in een kas realiseren als in een klimaatkamer dan zijn hiervoor installaties met zo grote capaciteit noodzakelijk dat

een praktische realisering bezwaarlijk is. Wanneer het echter mogelijk is, en bij vele onderzoeken zal dit binnen bepaalde grenzen gelden, dat niet te allen tijde de koudste of warmste binnencondities onder extreem warme of koude buitenomstandigheden gehandhaafd behoeven te blijven dan zal met aanmerkelijk kleinere en dus goedkopere installaties kunnen worden volstaan. Zo is het mogelijk de conditioneringsinstallaties bijvoorbeeld te baseren op een koelcapaciteit van 500 kcal/h.m² gerekend naar het grondoppervlak. Met een installatie van deze grootte zullen de gevraagde maximum temperaturen in de kas bij grote instraling niet gehandhaafd kunnen worden maar de overschrijding kan meestal wel binnen aanvaardbare grenzen worden gehouden.

Deze overschrijding kan tevens worden beperkt door gedeeltelijke of algehele scherming. Aan de andere kant kan de capaciteit van de kasverwarming enigszins beperkt worden indien gedurende de vrij zelden voorkomende perioden van extreme koude en kastemperaturen slechts gehandhaafd hoeven te worden tot juist boven het niveau waarbij de plantengroei gevaar loopt doch waarbij de groei niet zal verlopen zoals gewenst.

Het is begrijpelijk dat de toekomstige gebruiker zal vragen hoe vaak en hoe lang afwijkingen van de gewenste condities verwacht mogen worden voor te komen. Voor Nederland zijn enkele meteorologische gegevens beschikbaar in de literatuur (21, 22, 23, 24, 25, 26,) zij het nog niet geheel en al in de meest wenselijke vorm en uitvoerigheid, aan de hand waarvan kan worden nagegaan hoe vaak en hoe lang de gewenste binnencondities niet bereikt zullen worden. Sedert kort echter heeft het Instituut voor Tuinbouwtechniek te Wageningen meteorologische gegevens laten bewerken waarmee een beter inzicht in de klimatologische ontwerpfactoren mogelijk is. (27)

8. SYSTEEMKEUZE

Bij het ontwerpen van de luchtbehandelingsinstallaties kan voor het uitvoeren van elk van de deelprocessen koelen, verwarmen, drogen en bevochtigen, een keuze gemaakt worden uit veel verschillende mogelijkheden. Dit geldt ook voor de volgorde waarin de te behandelen lucht deze deelprocessen in de luchtbehandelingseenheid doorloopt. In de bestaande fytotrons komen dan ook verbijsterend veel verschillende systemen voor.

De efficiency van de luchtbehandeling met de genoemde deelprocessen en de volgorde hiervan kan voor de uitersten van de ontwerpcondities en voor de meest voorkomende ontwerpcondities worden bepaald door het totale proces te bestuderen in het Mollierdiagram.

Bij een technische gelijkwaardigheid in het behalen van de gewenste condities moet uit het vergelijken van aanschaffingsprijs en bedrijfskosten een keuze worden gemaakt bijvoorbeeld tussen een systeem met centrale koudevoorziening voor een tiental klimaatkamers of een systeem met één koelaggregaat per kamer. Over de in deze paragraaf aangehaalde punten zijn voor het ontwerpen van klimaatkamers voor plantenteelt en voor klimaatkassen weinig of geen gegevens bekend of bekend gemaakt. Door de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek TNO is, op advies van de Commissie van Fytotrons, derhalve opdracht gegeven met behulp van een elektrisch analogon verschillende systemen te vergelijken en optimale systemen te berekenen.

Voorts dient er de nadruk op gelegd te worden dat alle installaties, ook de regel- en elektrische installaties, zo eenvoudig mogelijk en met een minimum aan onderdelen dienen te worden uitgevoerd.

9. BOUWWIJZE

De fytotrons in Nederland zijn tot nu toe uitgevoerd als series van vaste kamers met installaties die ter plaatse door de installateurs worden opgebouwd.

Voor de toekomst wordt verwacht dat geprefabriceerde klimaatkamers met aangebouwde, als eenheid uitgevoerde, koel- en elektrische installaties beschikbaar zullen komen tegen concurrerende prijzen. Dan zal het mogelijk zijn een fytotron te bouwen door een aantal van deze kamers op te stellen in een vrij goedkope hal. De voordelen van deze werkwijze zijn: snelle bouw, flexibiliteit van opstelling, het gebruik van in de fabriek beproefde systemen, het vrijwel wegvallen van installatieproblemen en eenvoudige uitbreidingsmogelijkheid.

LITERATUUR

1. Mogelijkheden en moeilijkheden bij de inrichting van Fytotrons.
Rapport samengesteld door de Commissie voor Fytotrons van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek TNO (1968) (april)
2. Ashrae Guide and Data book, Volume I: Fundamentals (1967)
Volume II: Applications (1966)
Volume III: Systems and Equipment (1967),
uitgave van de American Society of heating, refrigeration and air-conditioning Engineers.
3. Proceedings of a symposium on engineering aspects of environment control for plant growth, (1962). Uitgave van de Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia.
4. Carrier, W.H., Cherne, R.E., Grant, W.A. and Roberts, W.H., Modern air conditioning, heating and ventilating, Pitman Publishing Corporation New York (1959).
5. Rietschels, H., Lehrbuch der Heiz- und Lüftungstechnik, Springer-Verlag Berlin (1963).
6. Shaw, A., An environmental plant growth chamber, ASHRAE journal (1967) (2) 41-50.
7. Brown, A., Snowdon, C., The design, manufacture and initial testing of a climatic cabinet, Hand V.E. (1967) (5) 569-576.
8. Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung, Lüftung und Klimatechnik, Oldenburg, München (1966).
9. Gaastra, P., Enkele invloeden van twee lampsoorten op de warmtebalans van klimaatkamers en lampenruimte. Rapport van de Commissie voor Fytotrons van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek TNO (in voorbereiding).

10. VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-Verlag Düsseldorf (1963).
11. Threlkeld, J.L., Thermal Environmental Engineering, Prentice-Hall, Inc., New York (1962).
12. Morris, L.G., Some aspects of control of plant environment, II, J. Agric. Engng. Res. (1957) (2) 30-43.
13. Enquête Fytotrons I. Rapport samengesteld door de Commissie voor Fytotrons van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek TNO (1968) (juni).
14. Gaastra, P., Lichtbronnen voor klimaatkassen en klimaatkamers, Rapport van de Commissie voor Fytotrons van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek TNO (in voorbereiding).
15. Carpenter, G.A., A packaged plant growth cabinet with high and uniform intensity of illumination, Nature (1966) (209) 448-450.
16. Automatische regeling van luchtbehandelingsinstallaties, Leergang georganiseerd door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs (1967) 5-38.
17. Wolsey, W.H., Die elektrische Heizungs- und Klimaregelung, I. Theoretische Grundlagen, VDI-Verlag, Düsseldorf (1967).
18. Weber, F., Messen, Regeln und Steuern in der Lüftungs- und Klimatechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf (1965).
19. Herzfeld, C.H., Editor, Temperature measurement in science and Industry, Volume I: Basic concepts, Standards and methods. Volume II: Applied methods and Instruments. Reinhold Publishing Corporation, New York (1962).

20. Wexler, A., Editor, Humidity and Moisture,
Volume I: Principles and Methods of Measuring humidity
in gases.
Volume II: Applications.
Volume III: Fundamentals and Standards.
Reinhold Publishing Corporation, New York (1965).
21. Kassen en kasklimaat, Publikatie no. 13 van het Instituut voor
Tuinbouwtechniek, Wageningen (1967).
22. Koppe, R. en D. Bokhorst, Energie, vocht- en CO₂-huishouding in
kassen. Publikatie no. 21 van het Instituut voor Tuinbouwtechniek,
Wageningen (1967).
23. Kassen en Bedrijfsgebouwen, Mededeling no. 61 van het Instituut
voor Tuinbouwtechniek, Wageningen (1968).
24. Braak, C., Het klimaat van Nederland, Publikatie no. 102, Lucht-
temperatuur,
Mededelingen en Verhandelingen 43;
Wind, Mededelingen en Verhandelingen 46;
Zonneschijn en bewolking, Mededelingen en Verhandelingen 40;
Vochtigheid, Mededelingen en Verhandelingen 41.
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
25. Meteorologische gegevens, I: Buitentemperatuur en Zonneschijnduur,
TVV L- Publikatie 6-WG, (1966) (april).
26. Meteorologische gegevens, II: Droge- en natte boltemperaturen en
relatieve vochtigheid. TVVL- Publikatie 7-WG, (1967) (mei).
27. Meteorologische tabellen ten behoeve van het onderzoek van het kli-
maat en de installaties in kassen. Deel 1, 2 en 3, Uitgave van het
Instituut voor Tuinbouwtechniek, maart 1969.