

S P R E N G E R I N S T I T U U T
Haagsteeg 6, 6708 PM Wageningen
Tel.: 08370-19013

*(Publikatie uitsluitend met
toestemming van de directeur)*

RAPPORT NO. 2167

H.A.M. Boerrigter en Ir. G. van Beek

BEPALING VAN HET CIRCULATIEVOUD
VAN TULPEPLANTGOED

Uitgebracht aan de directeur van het Sprenger Instituut
Project no. 7

1. Inleiding

Bij de bewaring van bloembollen worden luchthoeveelheden voor circulatie en ventilatie voorgeschreven die de oorzaak zijn van een hoog energieverbruik. Circulatie en ventilatie zijn veel gebezigde termen die als volgt worden gedefinieerd:

circulatie is de hoeveelheid lucht die door systeemventilatoren door stapelkisten wordt geblazen uitgedrukt in m^3/m^3 produkt · uur.

Ventilatie is de hoeveelheid verse buitenlucht die per tijdseenheid in de cel geblazen wordt en heeft als doel: drogen van produkt en/of afvoer van schadelijke gassen.

Veelal worden beide luchtstromen door de systeemventilatoren tegelijkertijd onderhouden en kunnen deze m.b.v. kleppen in een bepaalde onderlinge verhouding geregeld worden, waarbij in de praktijk vaak de ventilatie de enige variabele is, omdat de totale doorgestroomde hoeveelheid lucht (circulatie) niet gewijzigd wordt.

De aangegeven normen voor circulatie en ventilatie (lit. 1) zijn niet opgesteld n.a.v. onderzoek maar worden vastgesteld door de gezamenlijke voorlichtingsdiensten aan de hand van praktijkervaringen.

Vooraf de sterk verhoogde energieprijzen hebben de vraag naar onderzoek versterkt om te komen tot gefundeerde circulatie- en ventilatievouden.

Eerder werd aangetoond door het Sprenger Instituut dat tijdens de heetstook van hyacinten grote besparingen mogelijk zijn t.a.v. het energieverbruik (lit. 5).

Om te komen tot een reken- of meetmethode voor het vaststellen van de circulatiebehoefte van bloembollen in een stapelkist is gekozen voor de bewaring van tulpeplantgoed, cultivar 'Apeldoorn' (maat 7-9), omdat deze verreweg het grootste aandeel heeft in genoemde energiekosten door de grootte van het areaal.

De firma Schulte en Lestraden heeft voor dit onderzoek een luchtverdeelpallet met ventilatoren beschikbaar gesteld.

2. Doel van het onderzoek

In een stapelkist gevuld met bloembollen kan temperatuurverhoging optreden door warmteproductie.

Daarnaast staat het produkt vocht af waardoor de relatieve vochtigheid (r.v.) van het microklimaat tussen de bollen toeneemt.

De kans op microbiële activiteit neemt toe naarmate de r.v. in het microklimaat hoger is.

Het gevaar voor uitbreiding van Fusariumaantasting (zuur) met de daarmee gepaard gaande kans op ethyleenschade is een bekend voorbeeld waarom bij het vaststellen van de circulatiebehoefte het zekere voor het onzekere wordt gekozen.

De r.v. in het microklimaat wordt door een zeer hoge circulatie en een lage r.v. in het macroklimaat zo laag mogelijk gehouden om kansarme groeiomstandigheden voor onder meer deze schimmel te creëren.

In de praktijk wordt om een energiebesparing te bereiken tegenwoordig gebruik gemaakt van schakelklokken die - weliswaar geheel gevoelsmatig - worden gebruikt om niet continu maar periodiek en met gebruikmaking van de volledige droogcapaciteit het bewaarproces in de hand te houden. De schakeling van de systeemventilatoren geschiedt dus op een tijdbasis.

Met de resultaten van deze proef wordt getracht een optimale schakelfrequentie te bepalen.

Ten eerste door tijdens de proef de ventilatoren te regelen met behulp van voelers (temp. en r.v.) tussen het produkt en ten tweede door berekeningen.

Uitgegaan wordt van de 20°C behandeling van tulpeplantgoed waarbij de volgende eisen zijn gesteld:

- a. maximum temperatuursspreiding: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ in de kist;
- b. r.v. tussen het produkt: lager dan 90% i.v.m. microbiële activiteit;
- c. produkt goed gedroogd en zuurvrij.

Behalve de schakelfrequentie is de minimale circulatiebehoefte bij permanent circuleren berekend op basis van gemeten produkteigenschappen als dichtheid, vochtafgifte en warmteproductie.

Deze gegevens zijn bovendien noodzakelijk om met behulp van het aanwezige rekenmodel "KOCA" adviezen voor de bouw en inrichting van bloembollencellen te kunnen verstrekken, met name voor de te installeren koel- of stookcapaciteit.

3. Proefopzet

De proef is uitgevoerd in 1979. Voor de bewaring van het plantgoed is gebruik gemaakt van twee klimaatkasten met een r.v. van respectievelijk 50 en 85%. In beide klimaatkasten werden twee objecten geplaatst, te weten:

- 5 kg plantgoed, laagdikte 10 cm, luchtsnelheid 0,05 m/s;
- 5 kg plantgoed, laagdikte 20 cm, luchtsnelheid 0,7 m/s.

Van deze vier partijtjes met bloembollen is vanaf 1 augustus tot 24 oktober de

vochtafgifte gemeten. Deze metingen staan in grafiekvorm in figuur 1 weergegeven.

Met behulp van de isotherme calorimeter zijn verder een aantal warmteproducties gedurende deze periode gemeten (zie figuur 2).

Met behulp van deze gegevens wordt de minimale circulatiebehoefte berekend.

Ook is in een CA-cel van het Sprenger Instituut een stapelkist opgesteld met daarin 800 l plantgoed.

De perforatie van de bodem is van het type Schulte en Lestraden (3% opening).

Genoemde cel is qua temperatuur en r.v. zeer nauwkeurig te regelen. Als de produkttemperatuur meer dan 1°C ten opzichte van de celtemperatuur stijgt dan worden de circulatieventilatoren ingeschakeld d.m.v. een thermostaatschakeling (zie figuur 3). Voor de vochtigheid geldt, dat als de r.v. van het microklimaat hoger dan 90% wordt ook d.m.v. een schakeling tussen hygrostaat en ventilator deze laatste bekrachtigd wordt.

Om pendelen te voorkomen is een tweede temperatuurvoeler (kwikcontactthermometer) geplaatst waarmee een onderste uitschakelwaarde (temperatuur) voor de ventilator is in te stellen. Als de produkttemperatuur deze waarde bereikt, worden de ventilatoren weer uitgeschakeld.

De hygrostaat bleek tijdens de proef dermate traag, dat pendelen rondom de instelwaarde niet voorkwam.

4. Resultaten

Figuur 2 laat zien, dat de in een calorimeter gemeten warmteproductie van tulpeplantgoed niet door het opslagklimaat, in dit geval r.v. en luchtsnelheid, wordt beïnvloed. Er is ook geen relatie (toe- of afname) met de opslagtijd. De effectieve warmteproductie in de opslagsituatie heeft uiteraard wel een relatie met de vochtafgifte.

Bij een lage r.v. is de vochtafgifte hoger dan bij een hoge r.v. In dit geval (goed gedroogd produkt) is de vochtafgifte in de tijd lineair (figuur 1).

In de objecten met een grote stapelhoogte is de vochtafgifte kleiner dan in de objecten met een geringe stapelhoogte.

Dit komt omdat de lucht bovenin de stapel minder vocht kan opnemen wanneer in de onderste laag de r.v. van de doorstromende lucht al verhoogd wordt.

4.1. Berekening van de circulatiebehoefte en de specifieke vochtafgifte

De specifieke vochtafgifte kan worden berekend op basis van gemeten grootheden m.b.v. de formule

$$\dot{m}_{\text{spec}} = \frac{\Delta m}{\bar{m} \cdot \Delta t \cdot \Delta P} \quad (1)$$

Symbolen: \dot{m}_{spec} = specifieke vochtafgifte (kg H₂O/kg prod. · Pa · s)
 Δm = vochtverlies (kg)
 \bar{m} = gemiddelde massa (kg)
 Δt = tijdsverschil (s)
 ΔP = dampdrukdeficit (Pa)

De specifieke vochtafgifte van tulpeplantgoed op basis van de in figuur 1 weergegeven metingen is dus:

situatie a: 20°C, 50% r.v.

$$\dot{m}_{\text{spec}} = \frac{5000 - 4400}{5000 \cdot 84 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 1170} = 0,141 \cdot 10^{-10} \text{ kg H}_2\text{O/kg prod} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$$

situatie b: 20°C, 85% r.v.

$$\dot{m}_{\text{spec}} = \frac{5000 - 4640}{5000 \cdot 84 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 350} = 0,283 \cdot 10^{-10} \text{ kg H}_2\text{O/kg prod} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Het verschil kan meerdere oorzaken hebben nl.:

1. De specifieke vochtafgifte is geen produktconstante maar is in geval van tulpeplantgoed afhankelijk van het dampdrukdeficit;
2. Door handbediening van de klimaatkasten worden afwijkingen van de ingestelde waarde onvoldoende snel gecorrigeerd;
3. De eigenschappen van de 2 gebruikte klimaatkasten (bijv. luchtsnelheid) zijn in deze proef niet gelijk geweest.

Voor de berekening van de minimale circulatiebehoefte hanteren we de gemiddelde waarde.

Deze waarde komt dicht in de buurt van de \dot{m}_{spec} gemiddeld zoals bijlage 2 aangeeft waarin de specifieke vochtafgifte per week is berekend en aangegeven.

Dus:

$$\dot{m}_{\text{spec}} \text{ van droog tulpeplantgoed (Apeldoorn 7-9)} = 0,212 \cdot 10^{-10} \text{ kg H}_2\text{O/kg prod} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$$

In figuur 2 zijn de warmteproducties van plantgoed weergegeven. Hiernit blijkt dat er geen verschillen zijn tussen de 4 volgende objecten nl.:

- 1^e hoge circulatie (vl = 0,7 m/s] en hoge r.v. (ca. 85%)
- 2^e hoge circulatie en lage r.v. (ca. 50%)
- 3^e lage circulatie (vl = 0,01 m/s) en hoge r.v.
- 4^e lage circulatie en lage r.v.

De warmteproductie (isotherm gemeten) is dus: 25 W/ton.

Met behulp van computersimulatie is het nu mogelijk de omstandigheden in de stapelkist rekenkundig vast te stellen.

Aan de hand van invoergegevens als:

- 1. circulatievoud;
- 2. r.v. in het macroklimaat (begintoestand microklimaat);
- 3. begintemperatuur (d.w.z. de celtemperatuur);
- 4. specifieke vochtafgifte;
- 5. warmteproductie.

wordt de verandering van het microklimaat uitgeprint op basis van de volgende formules:

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{Q_p}{W_p} + C_w \cdot T_p \quad (2)$$

$$\Delta x = \frac{W_p}{G} \quad (3)$$

Symboollijst:	Δh	= enthalpieverandering	(kJ/kg droge lucht)
	Δx	= absoluut vochtgehalteverandering	(kg H ₂ O/kg droge lucht)
	Q_p	= warmteproductie	(W/kg prod.)
	W_p	= vochtafgifte per massa eenheid	(kg H ₂ O/kg prod. s)
	C_w	= soortelijke warmte	(kJ/kg prod.)
	T_p	= temperatuur	(°C)
	G	= circulatiehoeveelheid	(kg droge lucht/kg prod. s)

Het uitrekenen van de toestand van de lucht die door een laag bloembollen stroomt is in principe als volgt. De laag wordt onderverdeeld in een groot aantal laagjes. De lucht stroomt het eerste laagje binnen en komt in contact

met de bollen in dat laagje en neemt warmte van de bloembollen op, neemt vocht van de bloembollen op en staat een warmtehoeveelheid aan de bloembollen af die evenredig is met de vochtafgifte van de bloembollen.

Na het eerste laagje is de vochtigheid van de lucht toegenomen. De temperatuur kan opgelopen, gedaald of constant gebleven zijn. De grootte-orde van de klimaatverandering hangt af van de eigenschappen van de bloembollen en de luchtsnelheid en is nu voor het eerste laagje berekend.

De eindtoestand van de lucht bij het eerste laagje is uiteraard de begintoestand van de lucht van het tweede laagje.

De berekeningen worden weer herhaald zodat de eindtoestand van de lucht voor het tweede laagje berekend is enz.

Vergelijking (2) geeft aan in welke richting de temperatuur en de relatieve vochtigheid verandert. Vergelijking (3) geeft de eindtoestand.

In bijlage 1 is een voorbeeld van deze rekenmethode weergegeven.

In bijlage 3 zijn de rekenresultaten voor tulpeplantgoed vermeld.

Als variabele voor deze berekening is de r.v. in het macroklimaat gekozen. Deze grootte nl. tracht men in de hand te houden door middel van ventilatie. De ventilatie die meestal de meeste energiekosten van een bewaring voor zijn rekening neemt, vooral als er een groot temperatuursverschil is tussen binnen- en buitenklimaat. De interactie van ventilatie en circulatie wordt door deze benadering duidelijk nl.: naarmate de r.v. in het macroklimaat verhoogd wordt (minder ventilatie) stijgt de minimale circulatiehoeveelheid die nodig is om de gestelde luchtcondities van het microklimaat te kunnen handhaven. Deze gestelde condities zijn bijv.: r.v. altijd lager dan 90% en temperatuurspreiding niet hoger dan 1°C (ook belangrijk i.v.m. verklisteringseffecten).

Bij deze eisen is een circulatiehoeveelheid voor 1 m^3 plantgoed van 30-50 m^3 lucht per uur voldoende.

De circulatiehoeveelheid in de praktijk is 500 m^3 lucht/ m^3 plantgoed \cdot uur (lit. 1). Het uitschakelen van de helft van de systeemventilatoren is niet altijd mogelijk zodat in dat geval de volledige droogcapaciteit van $1000 \text{ m}^3/\text{m}^3$ prod \cdot uur voor de bewaring wordt gebruikt.

Gezien de rekenresultaten kan gesteld worden dat de voor deze situatie berekende luchthoeveelheid 10-16 maal lager is dan de in de praktijk gehanteerde norm.

Het intermitterend gebruik van systeemventilatoren bij stapelkistbewaarsystemen vergt voor het uitrekenen van de schakelfrequentie een enigszins andere benadering.

Door het tijdelijk stilzetten van de ventilatoren neemt de r.v. en de temperatuur in het microklimaat toe.

Afhankelijk van de warmteproduktie en de vochtafgifte moet na zekere tijd lucht door de bollen stromen om de temperatuur met de celtemperatuur te egaliseren en om het vocht uit het microklimaat te verwijderen.

De tijd waarin de temperatuur naar een bepaald te stellen niveau oploopt kan eenvoudig uitgerekend worden bij adiabatische omstandigheden.

Dat wil zeggen dat er geen warmte-uitwisseling met de omgeving is door schoorsteeneffect of geleiding.

Uit een vergelijking van de tijd nodig om de relatieve vochtigheid tot een bepaald maximum in het microklimaat op te bouwen en de tijd nodig om de temperatuur tot een gegeven temperatuur boven de celtemperatuur te laten stijgen leiden we de inschakelfrequentie af die nodig is voor het handhaven van vooraf vastgestelde microklimaatcondities betreffende temperatuur en vochtigheid.

a. De temperatuurstijgtijd bij adiabatische omstandigheden (meest ongunstige situatie) van tulpeplantgoed.

Deze temperatuurstijgtijd geeft de periode aan, die nodig is om de produktstapel 1°C in temperatuur te laten stijgen t.o.v. de celtemperatuur.

$$\Delta t = \frac{C_p \cdot \Delta T}{Q_p} \quad (4)$$

Symboollijst: Δt = temperatuurstijgtijd (s)
 C_p = soortelijke warmte (kJ/kg · K)
 ΔT = temperatuurverschil (K)
 Q_p = warmteproduktie (W/ton)

Soortelijke warmte is 3,8 kJ/kg · K

Warmteproduktie is 25 W/ton

$$\Delta t = \frac{3,8 \cdot 1}{25 \cdot 10^{-6}} \cdot 3600 = 42 \text{ uur}$$

Dat wil dus zeggen dat na 42 uur ventilatorstilstand de temperatuur in een stapelkist plantgoed met 1°C gestegen zou zijn als er geen warmte-uitwisseling met de omgeving plaatsvindt. Deze tijd zal onder praktische omstandigheden dus nog langer zijn.

b. De tijdsduur, die de r.v. in het microklimaat nodig heeft om te stijgen tot boven een te stellen grenswaarde is uitgedrukt in halfwaardetijd gegeven door de volgende vergelijking

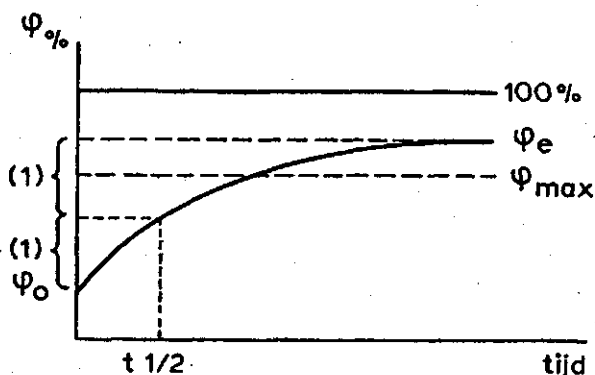
$$t_{1/2} = \frac{0,69 \ \epsilon}{\dot{m}_{\text{spec}} \cdot \rho_{\text{bulk}} \cdot 462 \ T_p} \quad (5)$$

- $t_{1/2}$ = halfwaardetijd voor de stijging van de r.v. (s)
 ϵ = porositeit $\epsilon = 1 - \rho_{\text{bulk}}/\rho_{\text{produkt}}$ (m^3/m^3)
 \dot{m}_{spec} = specifieke vochtafgifte ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg prod} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$)
 ρ_{bulk} = dichtheid van de bulk (kg/m^3)
 ρ_{produkt} = s.m. van het produkt (kg/m^3)
 T_p = temperatuur (K)
 $0,69 = \ln 2 = \ln \frac{P_s - P_0}{P_s - P} = \ln \frac{\psi_e - \psi_0}{\psi_e - \psi}$ ($\psi = \text{r.v.}$)
 $462 = \text{gasconstante voor waterdamp}$ ($\text{m}^2/\text{K} \cdot \text{s}^2$)

ψ_e is de relatieve vochtigheid behorende bij de evenwichts-dampspanning aan het oppervlak van het produkt en wordt berekend door per $^{\circ}\text{C}$ vriespunt beneden 0°C 1% van de 100% af te trekken. De vooraf gestelde grenswaarde van het microklimaat is ψ_{max} .

ψ_0 is de r.v. van het macroklimaat aanwezig bij het begin van de rustperiode zonder circulatie.

Grafisch:



In deze proeven is de soortelijke massa niet gemeten. Deze wordt gesteld op $800 \text{ kg}/\text{m}^3$.

De gemeten ρ_{bulk} is $400 \text{ kg}/\text{m}^3$; $\epsilon = 1 - \frac{400}{800} = 0,5$.

De halfwaardetijd waarmee de r.v. wordt opgebouwd d.w.z. de tijd nodig om de helft van het r.v. verschil tussen ψ_0 (r.v. macroklimaat) en ψ_e (evenwichts r.v.) te doorlopen is dan:

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{0,69 \cdot 0,5}{0,212 \cdot 10^{-10} \cdot 400 \cdot 462 \cdot 293} = 300 \text{ s}$$

Na 5 keer de halfwaardetijd wordt ψ bereikt.

Hieruit volgt dat minstens iedere $5 \times 300 \text{ s} = 25 \text{ min.}$ een korte draaitijd van de ventilatoren (enkele minuten) nodig is om het qua vochtigheidsgraad gewenste microklimaat te handhaven.

Voor de bepaling van de tijdsduur waarin ψ_0 stijgt naar ψ_{max} is het nomogram van fig. 4 zeer doelmatig. Op de horizontale as staat het aantal halfwaardetijden, berekend volgens vergelijking 5, en op de verticale as de relatieve vochtigheid. Op de linker verticale as staat ψ_0 (70%) en op de rechter ψ_e (99%).

Tussen beide punten wordt een rechte lijn getrokken. Een relatieve vochtigheid van 84% wordt bereikt na 1 halfwaardetijd. Als de maximum toelaatbare relatieve vochtigheid in het microklimaat 95% is, dan verstrijken 2,8 halfwaardetijden voor het voorbeeld dus ca. 15 minuten.

Een temperatuurstijging is gezien de berekende temperatuurstijgtijd niet te verwachten binnen zo'n korte periode.

Voor tulpeplantgoed kan dus gesteld worden, dat de vochthuishouding aan het microklimaat de schakelfrequentie van de circulatieventilatoren zal gaan bepalen en niet de warmteproductie.

4.2. Resultaten stapelkistproef

Circulatiehoeveelheid geregeld door het klimaat.

In de periode van 7-10 september heeft de ventilator 53 maal gewerkt gedurende 20 seconden.

De inschakelfrequentie loopt in die tijd op van 0,7 naar 1 maal per uur. De verandering wordt veroorzaakt door een daling van het temperatuursverschil tussen cel en produkt nl. van $0,8^{\circ}\text{C}$ naar $0,4^{\circ}\text{C}$ waardoor de r.v. in het microklimaat sneller de ingestelde 90% bereikt.

De toegepaste hygrostaat blijkt ongeschikt. De schaalverdeling is niet lineair te ijken met andere r.v.-meters. Bovendien is de aanspreekgevoeligheid bij ieder instelpunt anders.

In de periode van 11-13 september, waarbij de celtemperatuur verlaagd is om de oorspronkelijke ΔT van $0,8^{\circ}\text{C}$ te herstellen, wordt precies dezelfde waarneming gedaan nl. oplopende inschakelfrequentie bij afnemend verschil tussen cel- en produkttemperatuur.

Van 13-28 september zijn pogingen om r.v.-meting- en regeling van het micro-klimaat

te verbeteren op niets uitgelopen.

Van 28 september - 10 oktober is de vochtregeling uitgeschakeld. In deze periode, waarbij ook nog 1 ventilator is uitgeschakeld, wordt de resterende ventilator (opbrengst 400 m³/h) niet ingeschakeld door het temperatuurmeetsysteem.

Deze waarneming is in overeenstemming met de berekeningen (4.1.), nl. de berekende opwarmsnelheid onder adiabatische omstandigheden is 42 uur.

Door onmeetbare effecten als geleiding en natuurlijke circulatie (schoorsteen-effect) wordt in feite een stationaire situatie temperatuur-situatie bereikt die beneden de inschakelwaarde van de temperatuurvoeler blijft.

Na deze periode zijn de bollen in de hele stapel qua uiterlijk onveranderd (geen schimmel- of wortelvorming). Dit betekent, dat de vochtafvoer uit het microklimaat met als drijvende kracht het dampdrukdeficit en de natuurlijke circulatie tussen micro- en macroklimaat voldoende is in deze situatie.

In de berekening van de inschakelfrequentie gaan we er van uit dat er geen vocht-afvoer plaatsvindt in de periode van stilstand van de ventilatoren.

Van 10 oktober - 24 oktober is getracht de r.v.-regeling van het microklimaat te verbeteren.

In die tijd bleef de r.v. lager dan 90% terwijl de inschakelfrequentie 20-50 sec per uur bedroeg.

De berekende inschakelfrequentie is eenmaal per 25 minuten onder de voorwaarde dat er geen vochtafvoer plaatsvindt, als er niet gecirculeerd wordt.

Onder praktische omstandigheden loopt de frequentie als terug naar één maal per uur.

5. Discussie en programma van eisen voor toekomstige proeven

De gevolgde aanpak, namelijk het meten van basisgegevens van tulpeplantgoed t.b.v. voorspellingsberekeningen en daarnaast het uitvoeren van circulatieproeven met een stapelkist, geeft een toets voor de juistheid van het gekozen model.

Dat deze opzet in 1979 maar gedeeltelijk geslaagd is, is te wijten aan de niet optimale apparatuur voor r.v.-meting en regeling.

De gebruikte computerprogramma's kunnen op onderdelen beter op elkaar worden afgestemd, waardoor berekeningen sneller kunnen worden uitgevoerd.

Voor het verkrijgen van maximale energiebesparing zullen - zonder de kwaliteitsaspecten uit het oog te verliezen - simulatieproeven op schaal (1 stapelkist) in eerste instantie nodig blijven. Hiervoor is een meet- en regelsysteem nodig.

Een belangrijke voorwaarde daarbij is, dat betrouwbare en liefst nauwkeurige

vochtvoelers beschikbaar moeten zijn.

De energiebesparing, die mogelijk is bij het handhaven van het microklimaat ten opzichte van een macroklimaat bij continue circulatie door middel van het regelen van het circulatievoud op basis van een ethalpie-vergelijking tussen micro- en macroklimaat of bij intermitterend circuleren door het constateren van het overschrijden van een bovenste temperatuur- of vochtigheidsgrens (inschakelen) en een onderste grens (uitschakelen) kan empirisch worden aangetoond met zo'n systeem.

Ook is een energiebesparing mogelijk bij het handhaven van het macroklimaat door bijvoorbeeld de ventilatie voor de afvoer van vocht en ethyleen i.p.v. continu gefa te laten geschieden op energiegunstige momenten. Al naar gelang de gewenste temperatuur en vochtigheidstoestand van het macroklimaat en de toestand van de buitenlucht overdag en 's nachts. Om dit te kunnen doen moet voor het macroklimaat dan zoals voor het microklimaat een toe te laten temperatuur- en vooral vochtigheidsgebied worden vastgesteld. Bij de vastlegging van dat gebied maakt het verschil uit of continu dan wel intermitterend wordt gecirculeerd. In het eerste geval zijn micro- en macroklimaat sterker gekoppeld dan in het tweede geval. Voor het toetsen van een regelmodel om tenslotte afhankelijk van het buitenklimaat en met het inschakelen van hulpmiddelen als ventilatie, koeling, verwarming en circulatie een gewenst microklimaat op een zo voordelig mogelijke wijze te handhaven zal de bijdrage die een intelligent meet- en regelsysteem, "een bollencomputer", kan leveren onontbeerlijk zijn.

6. Conclusies

- Produktgegevens van het plantgoed dat voor deze proef werd gebruikt:

Produkt	: cv. Apeldoorn maat 7-9
ρ bulk	: 400 kg/m ³
ρ produkt	: 800 kg/m ³
Warmteproduktie	: 25 W/ton
Specifieke vochtafgifte:	0,212 10 ⁻¹⁰ kg H ₂ O/(kg prod. • Pa • s)
Soortelijke warmte	: 3,8 kJ/(kg • K)

- De berekende circulatiebehoefte voor tulpeplantgoed op basis van gemeten produktgegevens als specifieke vochtafgifte en warmteproduktie is 30-50 m³ lucht per m³ produkt.

De temperatuursspreiding in een stapelkist is dan maximaal 1°C en de r.v. van het microklimaat lager dan 90%.

Deze hoeveelheid is een factor 10 lager dan in de praktijk wordt voorgeschreven.

- Bij intermitterend gebruik van systeemventilatoren voor de bewaring van tulpeplantgoed is de berekende inschakelfrequentie 15 à 25 minuten.
Een korte draaitijd van de ventilatoren (enkele minuten) is voldoende om het gewenste klimaat te handhaven.
In de praktijk worden vaak klokken gebruikt waarmee een draaitijd van 10-50% per uur of per 10 min. wordt ingesteld. Een ander type klok zal nodig zijn om bewaring op genoemde wijze mogelijk te maken.

- De stapelkistproef heeft maar gedeeltelijk aangetoond, dat de berekende inschakeltijden juist zijn.
Onmeetbare grootheden als natuurlijke convectie en geleiding kunnen enerzijds als reden aangevoerd worden, anderzijds is het niet gelukt vochtregelaars zodanig in te stellen dat een microklimaatregeling met voldoende nauwkeurigheid kan plaatsvinden.
Door het uitschakelen van de vochtregeling is gebleken, dat circulatie niet noodzakelijk is voor de handhaving van de temperatuur.
De geproduceerde warmte (25 W/ton) wordt gemakkelijk door geleiding en natuurlijke convectie afgevoerd.

- De gemeten resultaten hebben betrekking op bollen van één herkomst en één bepaald jaar.
Enkele herhalingen of proeven op praktijkschaal kunnen aantonen of deze resultaten de basis kunnen zijn voor aanpassing van de huidige normen. Een belangrijke energiebesparing lijkt mogelijk bij de bewaring van tulpeplantgoed in de praktijk.

7. Literatuur

1. C.A.D. Bloembollenteelt.

Bouw en inrichting van bloembollenschuren; Lisse, 1980.

2. Van Beek, G. en J. Lamers.

De specifieke vochtafgifte van tuinbouwprodukten; Rapport no. 2072, Sprenger Instituut, Wageningen, 1979.

3. Kramer, C. e.a.

Verslag werkgroep Energie. Bloembollenteelt; Lisse, 1978.

4. Schenk, P.K.

Discussienota energiebesparing bij de behandeling van bloembollen; Lisse, 1978.

5. Looijesteijn, F.X.C., H.A.M. Boerrigter en B.J.L. Veltman.

Invloed van de ventilatie, circulatie en mechanische beschadiging van de bollen op het optreden van heetstookschade bij hyacinten; rapport no. 2021, Sprenger Instituut, Wageningen, 1978.

Wageningen, 29 juni 1981

WAMB/GvB/MJ

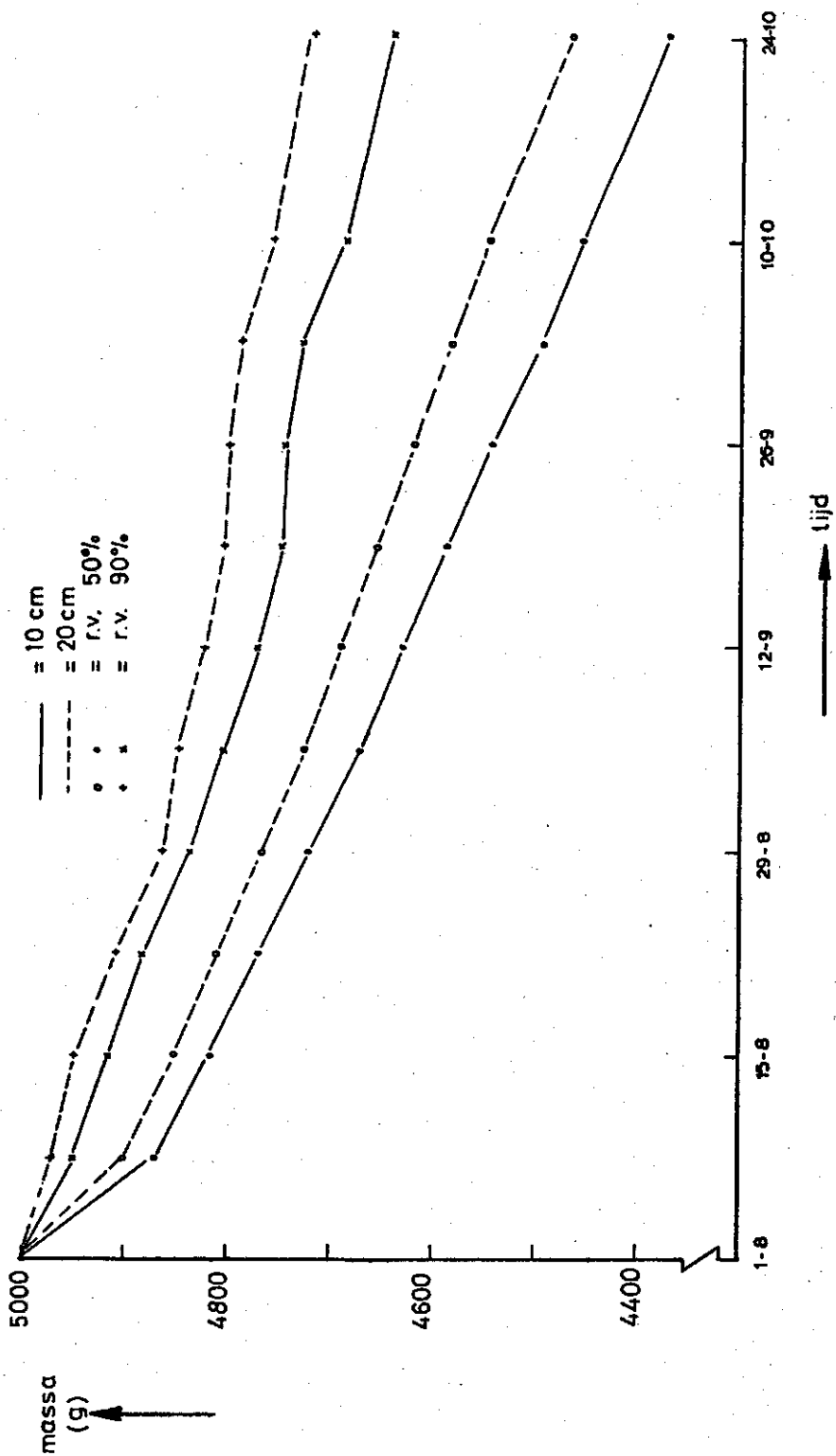


Fig. 1. Vochtafgifte van tulpeplantgoed bij verschillende bewaaromstandigheden.
Apeldoorn 7-9

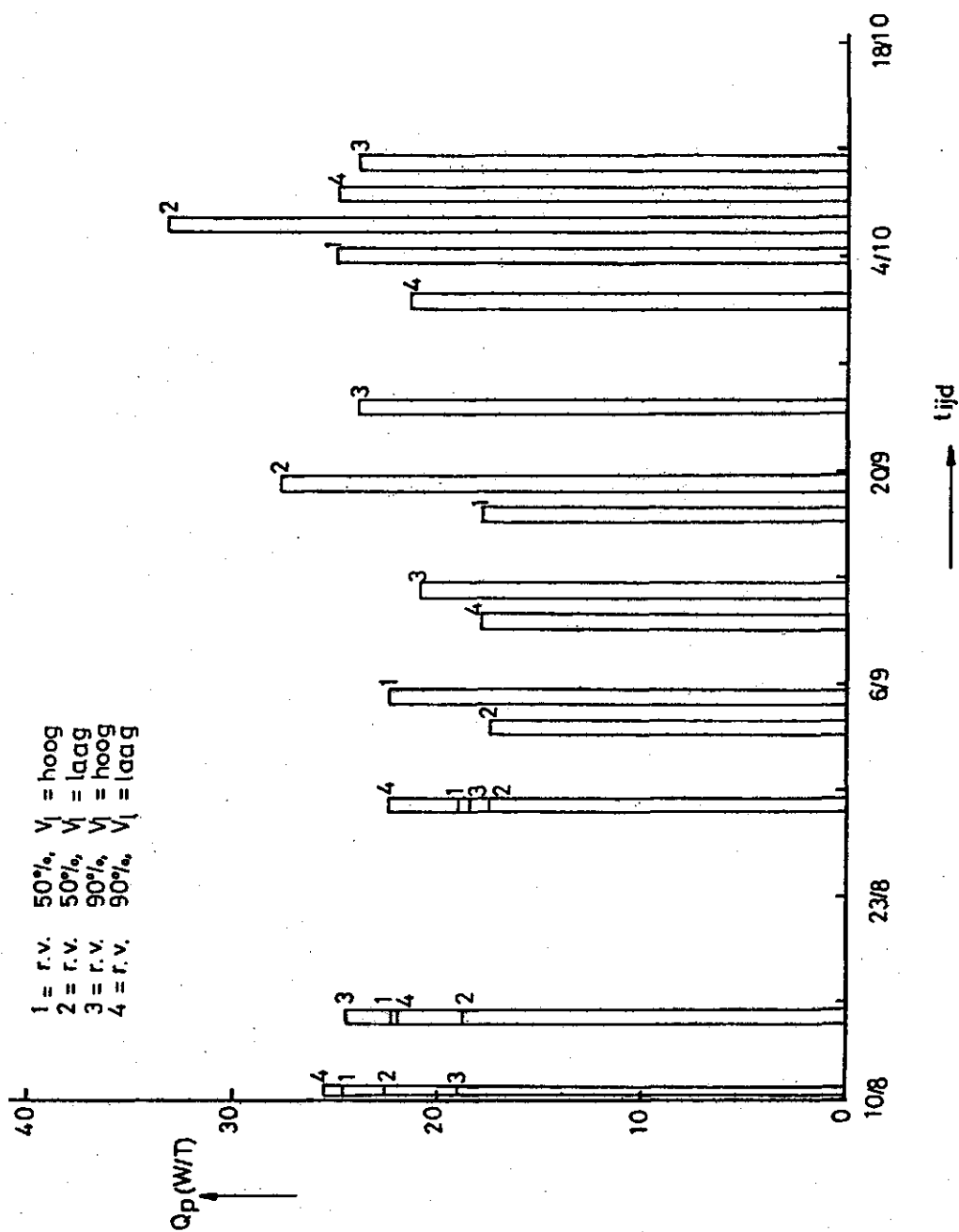


Fig. 2. Warmteproductie van tulpeplantgoed bewaard onder verschillende omstandigheden.

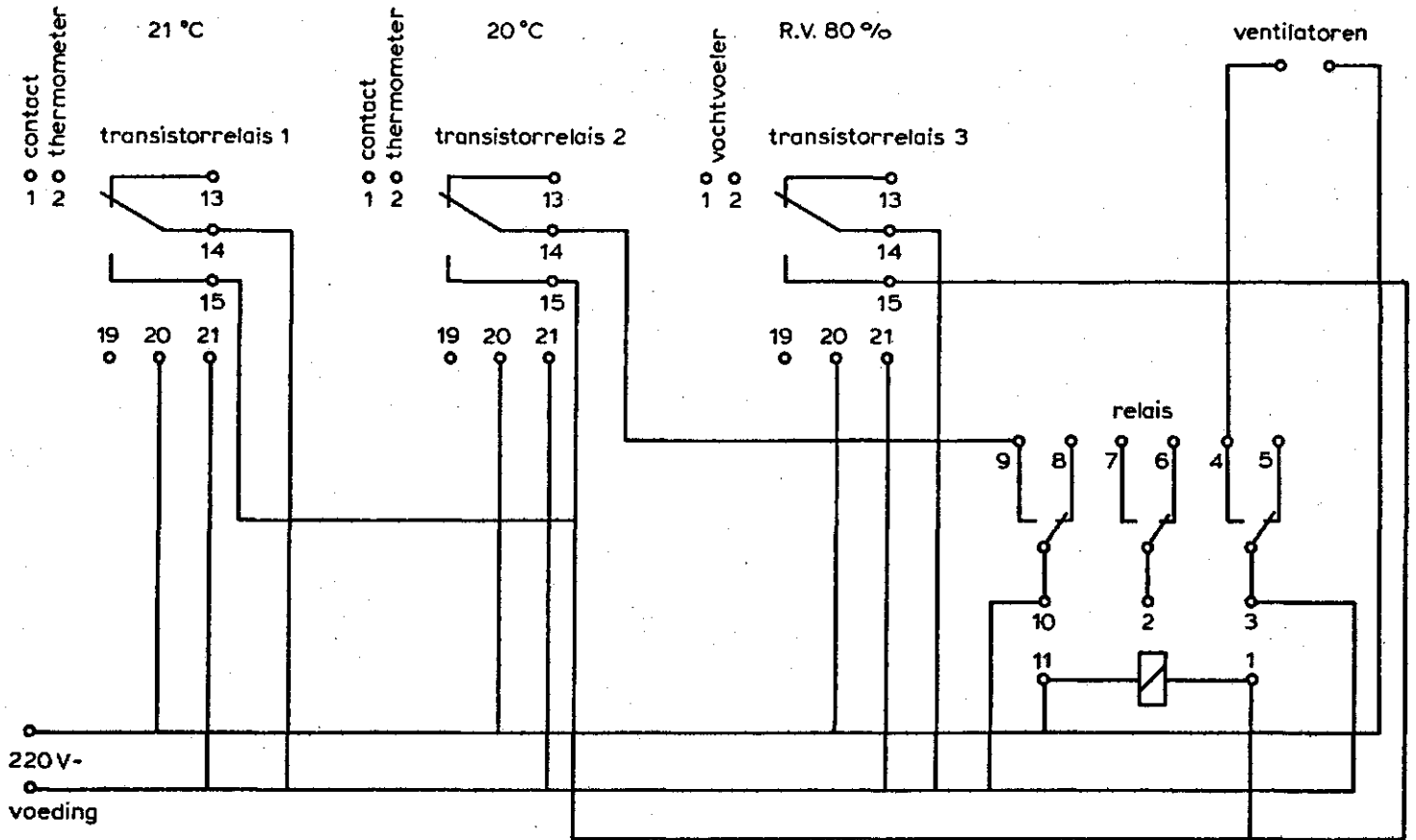


Fig. 3. Elektrisch schema voor regeling van systeemventilatoren op basis van temperatuur- en vochtmeting in het microklimaat.

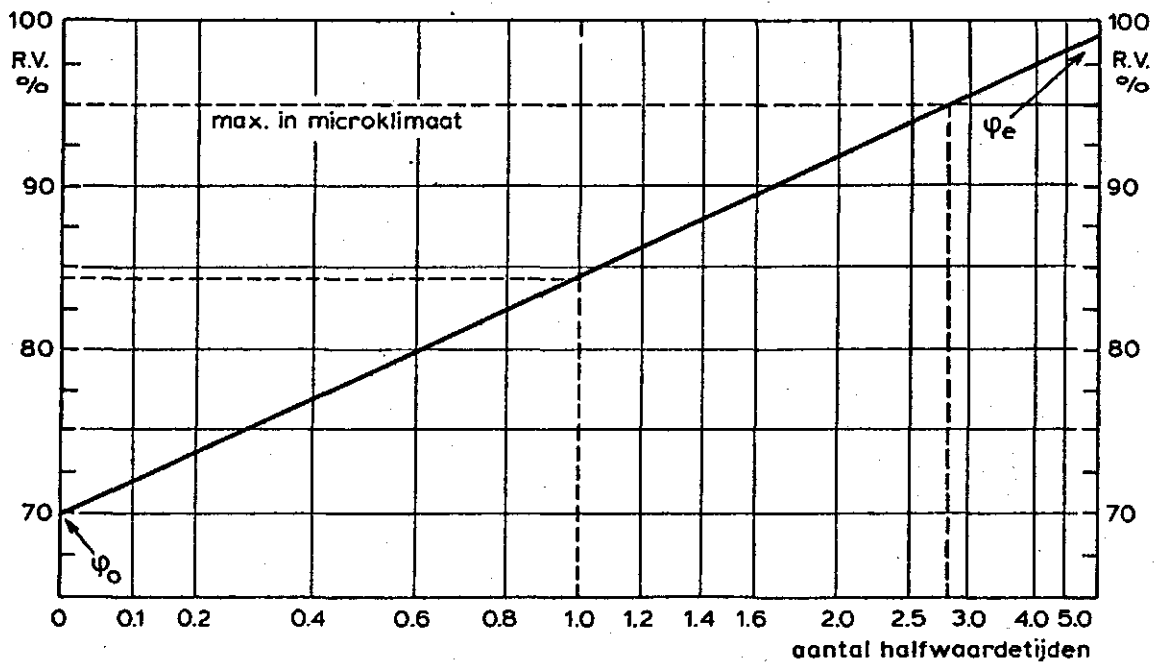


Fig. 4. Nomogram voor de bepaling van de tijdsduur, waarin ϕ_0 stijgt naar ϕ_{max} .

Voorbeeld: Het optimale klimaat voor het bewaren van winterpeen is $2^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \text{ K}$ en $90\% \pm 5\%$. De benodigde fysische en fysiologische gegevens van winterpeen zijn:

$$q (T = 2^{\circ}\text{C}) = 0,034 \text{ W/kg}$$

$$\dot{m}_{\text{spec}} = 7,1 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$$

$$\rho_{\text{bulk}} = 600 \text{ kg/m}^3$$

Bereken de benodigde hoeveelheid circulatielucht in $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{uur})$ en de gemiddelde vochtafgifte in $\%/ \text{mnd.}$

Oplossing $P_s = 705 \text{ Pa}$; $p = 0,9 \cdot p_s = 635 \text{ Pa}$;

$$w_p = 7,1 \times 10^{-10} \cdot 70 = 4,97 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{s}) = 12,8 \%/ \text{mnd.}$$

Uit deze grote waarde voor het vochtverlies volgt dat uitdrogingsverschijnselen spoedig zichtbaar worden, waardoor de bewaarduur niet langer dan 1 maand mag zijn.

$$dh/dx = 0,034/4,97 \times 10^{-8} + 4217 \cdot 2 = 693 \text{ kJ/kg}; \text{ de temperatuur daalt van } 2,3 \text{ tot } 1,7^{\circ}\text{C. Voor de berekening van } g \text{ is de relatie } \Delta x = \frac{W_p}{g} \text{ geschikt}$$

$$g = 4,97 \times 10^{-8} / (4,07 - 3,75) 10^{-3} = 1,55 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{s});$$

De totale hoeveelheid produkt in de opstelling is

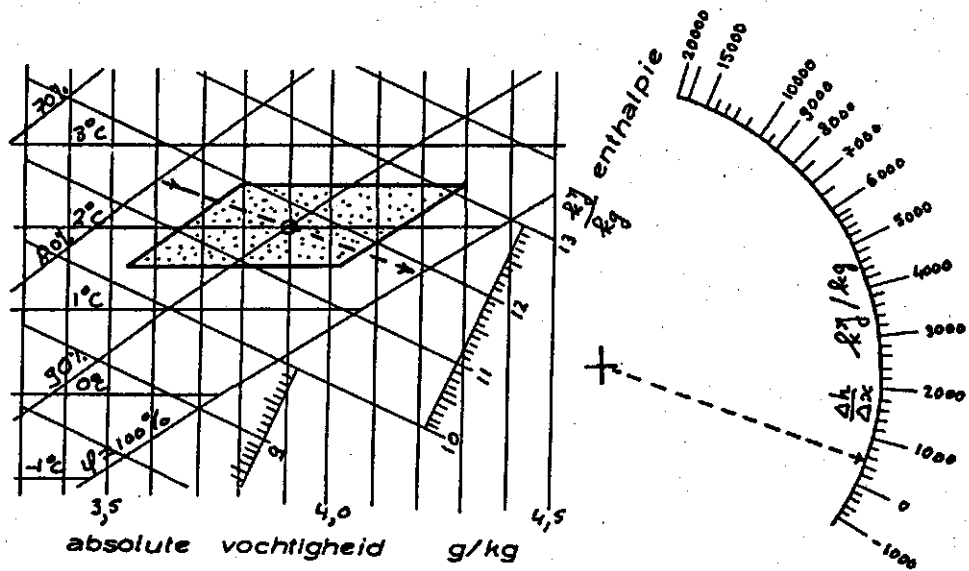
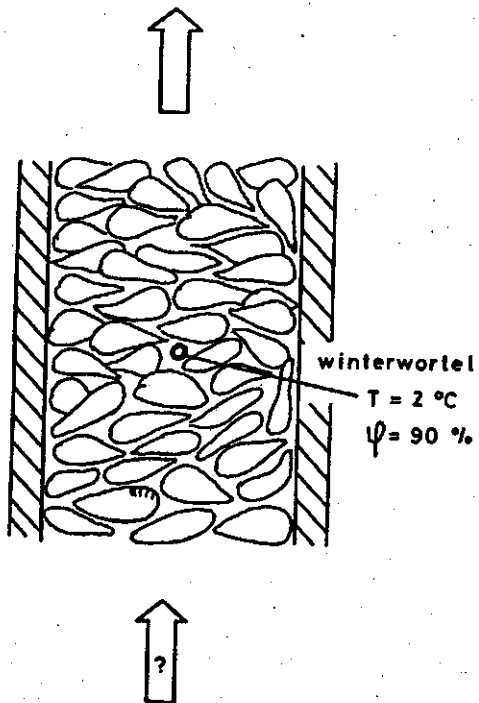
$$m = \rho_{\text{bulk}} \cdot V = 1200 \text{ kg}$$

dus

$$G_{\text{circ}} = 1200 \times 1,55 \times 10^{-4} = 0,186 \text{ kg}/(\text{s} \cdot 2 \text{ m}^3)$$

of uitgedrukt in termen die de praktijk gebruikt;

$$G_{\text{circ}} = \frac{0,186 \times 3600}{1,28 \times 2} = 261 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{uur})$$



Specifieke vochtafgifte van tulpeplantgoed afgeleid van figuur 1.

$$\dot{m}_{\text{spec}} = \frac{\Delta m}{\bar{m} \cdot \Delta t \cdot \Delta P} = \text{kg H}_2\text{O/kg prod. Pa s}$$

$$\bar{m} = 5000 \text{ g} \quad \Delta t = 1,0584 \cdot 10^6 \text{ s.}$$

r.v. %	P _o (Pa)	ΔP	Δm	\dot{m}_{spec}	r.v.	P _o (Pa)	ΔP (Pa)	Δm (g)	\dot{m}_{spec}
85	1987	351	50	0,471 · 10 ⁻¹⁰	52	1216	1122	130	0,383 · 10 ⁻¹⁰
88	2057	281	35	0,412 · 10 ⁻¹⁰	54	1263	1075	53	0,163 · 10 ⁻¹⁰
90	2104	234	33	0,466 · 10 ⁻¹⁰	52	1216	1122	47	0,139 · 10 ⁻¹⁰
74	1730	608	47	0,255 · 10 ⁻¹⁰	50	1170	1170	50	0,141 · 10 ⁻¹⁰
80	1870	468	30	0,212 · 10 ⁻¹⁰	52	1216	1122	50	0,147 · 10 ⁻¹⁰
78	1824	514	32	0,206 · 10 ⁻¹⁰	52	1216	1122	40	0,118 · 10 ⁻¹⁰
80	1870	468	23	0,163 · 10 ⁻¹⁰	50	1170	1170	45	0,127 · 10 ⁻¹⁰
95	2221	117	2	0,057 · 10 ⁻¹⁰	52	1216	1122	50	0,147 · 10 ⁻¹⁰
88	2057	281	20	0,235 · 10 ⁻¹⁰	52	1216	1122	40	0,118 · 10 ⁻¹⁰
80	1870	468	43	0,304 · 10 ⁻¹⁰	52	1216	1122	35	0,103 · 10 ⁻¹⁰
80*	1870	468	31	0,110 · 10 ⁻¹⁰	52*	1216	1122	85	0,125 · 10 ⁻¹⁰

\dot{m}_{spec} bij hoge r.v. (± 85%) is gemiddeld 0,263 · 10⁻¹⁰ kg H₂O/kg·Pa; st.dev. = 0,138

\dot{m}_{spec} bij lage r.v. (± 50%) is gemiddeld 0,156 · 10⁻¹⁰ kg H₂O/kg·Pa·s; st.dev. = 0,077

\dot{m}_{spec} gemiddeld is 0,209 · 10⁻¹⁰ kg H₂O/kg·Pa·s; st.dev. = 0,122

* tijdsduur van deze meting is 14 dagen.

Tabel 1. Berekening van de minimale circulatiebehoefte van tulpeplantgoed c.v. Apeldoorn 7-9 afhankelijk van het macroklimaat

begin temperatuur	20°C			20°C			20°C					
	r.v. in macro	50%	75%	90%	r.v. uit micro (%)	vochtverlies (%/week)	eindtemp. (°C)	r.v. uit micro (%)	vochtverlies (%/week)	eindtemp. (°C)	r.v. uit micro (%)	vochtverlies (%/week)
circulatie (m ³ /m ³ prod. uur)												
1000		19,96	20	20,02	50,3	1,4	20	75,1	0,70	20,02	89,9	0,28
500		19,92	20	20,03	50,6	1,4	20	75,2	0,70	20,03	89,9	0,28
100		19,64	19,96	20,15	53,0	1,36	19,96	76,1	0,69	20,15	89,5	0,29
50		19,33	19,94	20,30	55,8	1,31	19,94	77,1	0,68	20,30	89,1	0,30
10		18,07	20,11	21,31	71,9	1,02	20,11	82,4	0,95	21,31	87,2	0,34
5		18,1	20,79	22,30	80,7	0,8	20,79	85,0	0,53	22,30	86,8	0,38
1		25,0	27,19	28,50	88,2	0,51	27,19	89,2	0,46	28,50	89,8	0,44

Berekening op basis van: Warmteproductie : 25 W/ton
 Specifieke vochtafgifte: $0,212 \cdot 10^{-10}$ kg H₂O/kg prod. Pa · s