

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

Rapport no.: 1990

P. Bouwman, praktikant Hogere Tuin-  
bouwschool K.N.B.T.B.,  
's-Hertogenbosch  
periode half mei  
periode half juli 1977

BEPALING VAN DE WARMTEGELEIDINGS-  
COËFFICIËNT VAN ROZEN MET HET  
POENSGEN-APPARAAT.

Proj. no. 49

Het onderzoek werd begeleid door Ir. G. van Beek,  
afdeling fysische techniek.

Uitgebracht aan de Directeur van het Sprenger Instituut.

		blz.
1.	<u>INHOUDSOPGAVE.</u>	
1	Inhoudsopgave	1
2	Samenvatting	3
3	Voorwoord en dankwoord	4
4	Inleiding	5
5	Doel van de proef	5
6	Theorie van de proef	5
7	Uitvoering van de proef	7
7.1	Behandeling van de rozen	7
7.2	Metingen tijdens de proef verricht	7
7.2.1	Massametingen	7
7.2.2	Warmtestroommetingen	8
7.2.3	Temperatuurmetingen	8
7.2.4	Opbouw van de proef	9
7.3.1	Complicaties tijdens proef I	9
7.3.2	Complicaties tijdens proef II	10
8	Meetresultaten en resultatenberekeningen	10
8.1	Massametingen	10
8.2	Temperatuur- en warmtestroommetingen	12
8.3	Berekening van de warmtegeleidings- coëfficiënt over de laag rozen van 30 cm	14
8.4	Factoren die van invloed zijn op en berekening van de warmtegeleidings- coëfficiënt per laag rozen van 6 cm	15
9	Conclusies en aanbevelingen	17
10	Literatuur	19

BIJLAGEN

	blz.
1 Berekening van het koolstofmassaverlies, vocht- massaverlies, warmteproductie, latente warmte, vochttransport en warmtestroom per laag rozen van 6 cm.	20
2.1 Dichtheid van de rozen.	29
2.2 Bulkdichtheid en bulkporositeit van de rozen.	29
2.3 Verband tussen de bulkporositeit en de warmte- geleidingscoëfficiënt van de bulk.	30
3 Berekening van de relatieve luchtvochtigheid per laag rozen van 6 cm.	32
Lijst van figuren.	34
Lijst van tabellen.	36
Lijst van symbolen.	37

2. SAMENVATTING.

De warmtegeleidingscoëfficiënt van een laag rozen - cultivar Sonia - werd in een Poensgen-apparaat gemeten. De rozen lagen horizontaal, gelijk gebost met de bloemknoppen naar één zijde.

De warmtegeleidingscoëfficiënt bedroeg 0,24 en 0,11 W/(m.K) bij respectievelijk een opwaarts en neerwaarts gerichte warmtestroom.

Deze warmte is berekend over de gehele laag rozen van 30 cm. Er is een model opgesteld waarin de rozen in lagen van 6 cm zijn verdeeld en waarin factoren, die inherent zijn aan levende produkten, betrokken zijn. Het model is bij een neerwaarts gerichte warmtestroom op grond van de cijfers uitgewerkt.

Een correctie van de warmteproductiegegevens uit de literatuur van rozen was nodig om de berekende waarde overeen te doen stemmen met de gemeten waarde van de warmtestroom. De warmtegeleidingscoëfficiënt per laag rozen van 6 cm varieerde volgens het model bij deze correctie tussen 0,07 en 0,10 W/(m.K).

Deze waarde komt goed overeen met de theoretische waarde  $\lambda = 0,084$  W/(m.K) volgens Meffert.

Van Beek vond bij kunstcitroenen en eieren een positieve correlatie tussen het temperatuurverschil en de waarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt. In tegenstelling hiermee wordt bij rozen bij deze meting een negatieve correlatie gevonden. Een verklaring hiervoor is niet gegeven.

Het model is niet op grond van de cijfers uitgewerkt bij een opwaarts gerichte warmtestroom, daar het beeld hier, uit het model verkregen, ondoorzichtig was.

Het verdient aanbeveling - eventueel met een andere stapeling - (voorzover uit de literatuur bekend) de proef te herhalen daar nog niet eerder met rozen in het Poensgen-apparaat gewerkt is.

3. VOORWOORD EN DANKWOORD.

Als student aan de Hogere Tuinbouwschool van de K.N.B.T.B. te 's-Hertogenbosch, stelde het Sprenger Instituut te Wageningen mij in de gelegenheid, op de afdeling fysische techniek, een stage door te brengen in de periode van half mei tot half juli 1977. Een woord van dank is hier in het bijzonder op zijn plaats voor de bezielende leiding en katalyserende raadgevingen van de heer G. van Beek en voor de steeds welwillend verleende technische assistentie van de heer J. Lamers en verder voor al diegenen van het Instituut die direct of indirect hebben bijgedragen aan het totstandkomen van dit rapport.

Piet Bouwman.

4. INLEIDING.

Voor het voorspellen van het gedrag van stapeleenheden van tuinbouwprodukten is een nauwkeurige waarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt van belang, in verband met:

- de temperatuurvereffeningscoëfficiënt van een stapeleenheid;
- de afkoel- en opwarmsnelheid van een produktbolk en
- de veilige afmetingen van produktladingen.

5. DOEL VAN DE PROEF.

Het doel van de proef is de bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt van een laag rozen volgens de stationaire 2-platen methode, rekening houdend met de richting van de warmtestroom.

6. THEORIE VAN DE PROEF.

De laag rozen ligt tussen twee vlakke platen van verschillende temperatuur in een Poensgen-apparaat. Zie voor een schets van het apparaat fig. 1. Bij de proef wordt rekening gehouden met de richting van de warmtestroom. Bij een opwaarts gerichte warmtestroom wordt de plaat onder de rozen op een hoge temperatuur gehouden, de plaat boven de rozen op een lage temperatuur. Bij een neerwaarts gerichte warmtestroom is dit andersom.

Door de temperatuur van de platen constant te houden, wordt er een stationaire toestand geschapen en in het produkt een stationaire temperatuurgradiënt. De temperatuur blijft dan constant in de tijd en hangt slechts af van de plaats in de laag rozen.

De laag rozen wordt dan beschouwd als een lichaam, dat bestaat uit oppervlakken met dezelfde temperatuur. Loodrecht op deze oppervlakken zijn de grootste temperatuurverschillen te vinden, voornamelijk het gevolg van het opgelegde verschil in temperatuur tussen de platen.

Voor de bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt geldt de vergelijking van Fourier die luidt:

$$q = - \lambda \frac{dT}{dx}$$

waarin  $q$  = warmtestroomdichtheid in  $W/m^2$

$\lambda$  = warmtegeleidingscoëfficiënt in  $W/(m.K)$

$\frac{dT}{dx}$  = temperatuurgradiënt in  $K/m$

In woorden: de warmtestroomdichtheid is evenredig met de negatieve temperatuurgradiënt. De evenredigheidsfactor  $\lambda$  heet warmtegeleidingscoëfficiënt. Deze formule geldt voor homogene, isotrope<sup>1)</sup> materialen.

Voor de proef is de volgende formule gebruikt daar de snijbloemen laagsgewijs bekeken zijn:

$$\left[ \lambda_e = \frac{q_e \Delta x}{\Delta T} \right]$$

waarin  $\lambda_e$  = effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt  $W/(m.K)$

$q_e$  = effectieve warmtestroomdichtheid door de laag rozen met dikte  $\Delta x$   $W/m^2$

$\Delta T$  = temperatuurverschil over de laag rozen met dikte  $\Delta x$   $K$

$\Delta x$  = dikte van de laag rozen  $m$

1) isotroop: eigenschappen zijn richtingsonafhankelijk, tegenovergestelde: anisotroop.

7. UIVOERING VAN DE PROEF.

De proef wordt uitgevoerd in het Poensgen-apparaat (fig. 1). In dit apparaat bevindt zich een meetvak waarvan de afmetingen zijn: lengte x breedte x hoogte = 50 cm x 50 cm x 30 cm. Zowel boven als onder dit meetvak bevindt zich een metalen plaat die door middel van een thermostaatbad op een constante temperatuur wordt gehouden. Het meetvak is rondom geïsoleerd met tempexplaten.

7.1 Behandeling van de rozen.

De rozen zijn, na gehaald te zijn bij de kweker, op 50 cm afgeknipt, gewogen en daarna met de stengels evenwijdig en de knoppen bij elkaar, in het meetvak gelegd. In het meetvak bevinden zich vijf lagen rozen, één laag bevat vier bossen, één bos bevat twintig bloemen. Er is zodanig gestapeld, dat de rozen goed contact hebben met de wanden van het meetvak. Boven en onder worden de rozen met plastic folie afgedekt om te voorkomen dat de warmtestroommeters nat worden. Aangenomen is dat één laag rozen overeenkomt met 6 cm hoogte van het meetvak.

7.2 Metingen tijdens de proef verricht.

7.2.1 Massametingen.

Voor en na de proef wordt per laag rozen de massa gemeten.

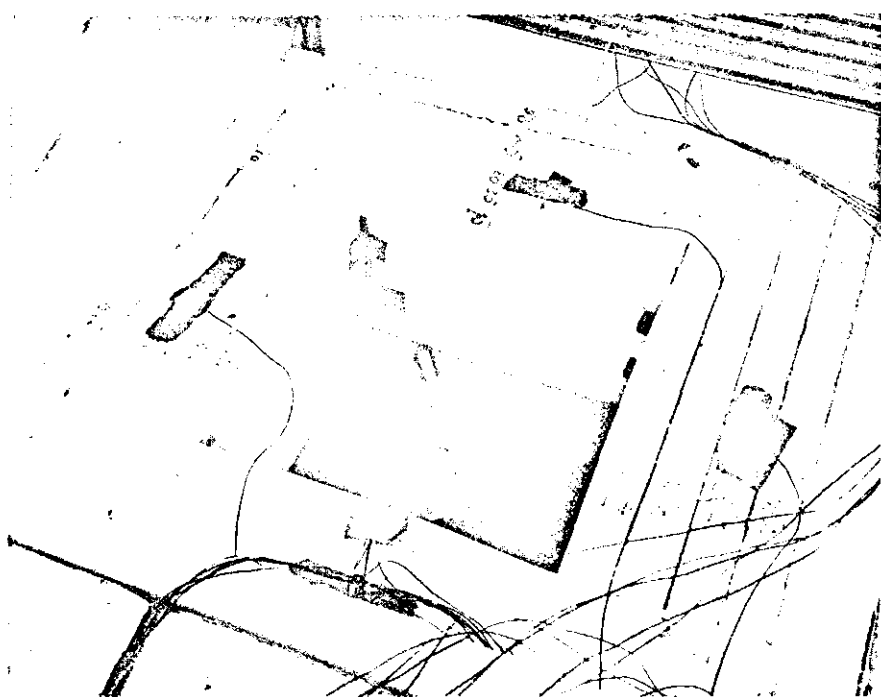
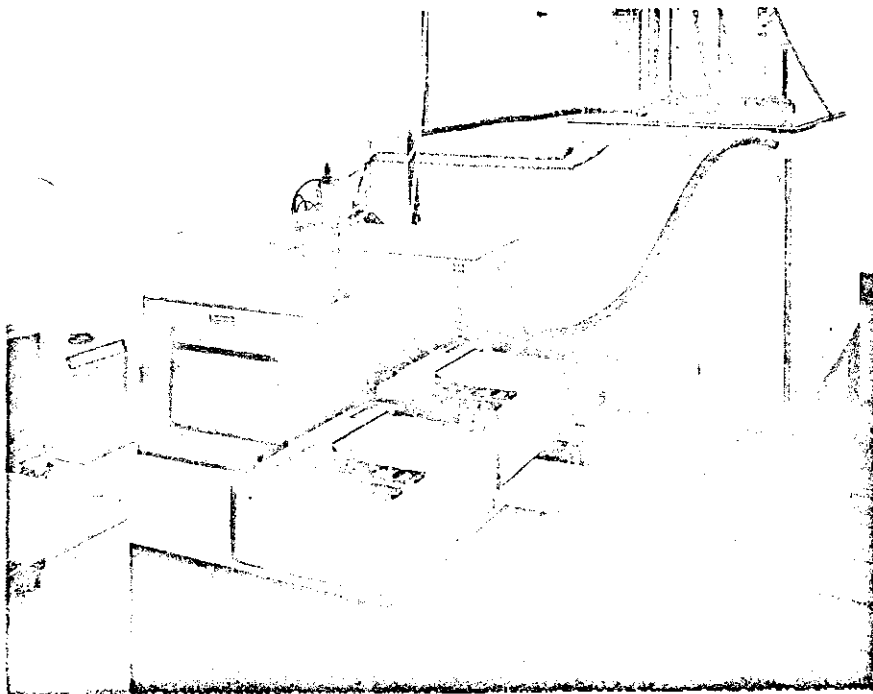


### 7.2.2 Warmtestroommetingen.

Deze wordt gemeten met warmtestroommeters. Op de onderzijde van de bovenplaat, direct boven het meetvak is warmtestroommeter "Z 89" gemonteerd. Op de bovenzijde van de onderplaat, direct onder het meetvak is "Z 85" gemonteerd. Het oppervlak van de warmtestroommeter komt overeen met het oppervlak van de boven- en onderzijde van het meetvak (fig. 1). De afgegeven spanning in mV van de warmtestroommeters wordt vastgelegd op mV-recorders.

### 7.2.3 Temperatuurmetingen.

Boven, onder en tussen het produkt wordt de temperatuur met thermokoppels gemeten. Voor een schets van de plaats van de koppels zie fig. 2. Bij de berekeningen worden alleen de gegevens van de thermokoppels in het meetvak gebruikt. Aan de boven- en onderzijde van de laag rozen zijn vijf koppels op zwarte gemaakte koperen plaatjes aangebracht. Uit deze temperatuurgegevens wordt de gemiddelde temperatuur zowel boven als onder het produkt, respectievelijk  $\bar{T}_b$  en  $\bar{T}_o$ , berekend. Tussen het produkt zijn vijf koppels op gelijke afstand van elkaar op een 30 cm lange plastic elektriciteitsbuis geplakt. Deze buis is verticaal in het centrum tussen de rozen aangebracht. De gegevens van deze koppels dienen om het verloop van de temperatuur te leren kennen in de laag rozen. De temperatuurwaarden worden op een Honeywell 24 punts recorder vastgelegd. De Honeywell recorder wordt door een relais-klok gestuurd, zodat om de drie uur een meting wordt verricht.



De temperatuur rond het Poensgen-apparaat bedroeg ongeveer  $15^{\circ}\text{C}$ .

#### 7.2.4 Opbouw van de proef.

De proef bestaat uit twee delen:

"Proef I" : een neerwaarts gerichte warmtestroom:  $q\downarrow$

"Proef II" : een opwaarts gerichte warmtestroom:  $q\uparrow$

Bij proef II is de richting van de natuurlijke convectie overeenkomstig met die van de warmtestroom. Bij proef I wordt het convectieve aandeel van de natuurlijke convectie tegengegaan.

#### 7.3.1 Complicaties tijdens proef I.

Gedurende de eerste 54 uur na het begin van proef I heeft de relais-klok, die de Honeywell recorder om de drie uur door middel van thermokoppels de temperatuur laat vastleggen, onregelmatig gewerkt. De dertig keer, dat er meetwaarden verkregen zijn (normaal moest dit 17 keer zijn), zijn regelmatig over dit tijdsinterval verdeeld en als zodanig in grafiek uitgezet (fig. 5 en fig. 7). Door de berekeningen uit te voeren op het tijdstip  $t = 60$  uur na het begin van de proef is deze complicatie vermeden. Tevens is op dit tijdstip het proces stationair geworden.

Tussen ongeveer 100 en 162 uren na het begin van proef I zijn er geen meetwaarden van de warmtestroom door de bovenplaat bekend daar de meetwaarden te klein waren om binnen het bereik van de meetnauwkeurigheid van de mV-recorder te kunnen vallen. Dit is in figuur 5 gestippeld weergegeven.

7.3.2 Complicaties tijdens proef II.

Na verloop van ongeveer 55 uur viel het thermostaatbad, die de bovenplaat op een constante temperatuur houdt, uit. Oorzaak hiervan was een overbelast geworden relais. Hierdoor moest de proef gestaakt worden. Voor berekeningen is tijdstip  $t = 36$  uur genomen, een tijdstip, waarop het proces stationair genoemd mag worden.

8. MEETRESULTATEN EN RESULTATENBEREKENINGEN.

Proef I

Produkt: roos; cultivar Sonia.  
Inzet proef: 23 mei 1977 16.00 uur  
Eind proef : 1 juni 1977 14.00 uur  
Richting warmtestroom: neerwaarts:  $q\downarrow$

Proef II

Produkt: roos; cultivar Sonia.  
Inzet proef: 7 juni 1977 15.00 uur  
Eind proef : 10 juni 1977 15.00 uur  
Richting warmtestroom: opwaarts :  $q\uparrow$

8.1 Massametingen.

Tabel 1 toont de massa vóór de proef in kg ( $m_1$ ); de massa ná de proef in kg ( $m_2$ ); de gemiddelde massa in kg ( $\bar{m}$ ); de massaverandering in kg ( $\Delta m$ ) en het percentage massaverandering ( $\Delta m/m_1 \cdot 100\%$ ) per laag rozen voor proef I.

Tabel 2 toont dit voor proef I.

Tabel 1. Massametingen proef I.

laag	x	$m_1$	$m_2$	$\bar{m}$	$\Delta m$	$\frac{\Delta m}{m_1} \times 100$
	cm	kg	kg	kg	kg	%
1	0-6	1,651	1,662	1,657	+0,011	-0,67
2	6-12	1,609	1,598	1,604	-0,011	-0,68
3	12-18	1,627	1,625	1,626	-0,002	-0,12
4	18-24	1,611	1,580	1,596	-0,031	-1,92
5	24-30	1,741	1,593	1,667	-0,148	-8,50

Tabel 2. Massametingen proef II.

laag	x	$m_1$	$m_2$	$\bar{m}$	$\Delta m$	$\frac{\Delta m}{m_1} \times 100$
	cm	kg	kg	kg	kg	%
1	0-6	1,947	1,810	1,879	-0,137	-7,0
2	6-12	1,960	1,873	1,917	-0,087	-4,4
3	12-18	1,931	1,865	1,898	-0,066	-3,4
4	18-24	1,835	1,854	1,845	+0,019	+1,0
5	24-30	1,862	2,001	1,932	+0,139	+7,5

$m_1$  en  $m_2$  zijn gemeten waarden, de overige kolommen zijn hieruit berekend. Het percentage massaverandering is per laag rozen grafisch uitgezet voor proef I in fig. 3 en voor proef II in fig. 4.

Uit de gevonden waarden blijkt, dat de rozen in de lagen bij de warme plaat massa verloren hebben. De rozen in de lagen bij de koude plaat zijn in massa toegenomen, dit geldt zowel voor een opwaarts als een neerwaarts gerichte warmtestroom. Dit is conform de verwachtingen.

## 8.2 Temperatuur- en warmtestroommetingen.

Fig. 5 geeft het verloop in de tijd weer van de gemiddelde temperatuur van de boven- en de onderplaat, respectievelijk  $\bar{T}_b$  en  $\bar{T}_o$ , en het verloop van de warmtestromen door de boven- en onderplaat, respectievelijk  $q_b$  en  $q_o$ , voor proef I. De spreiding in de temperatuurwaarden van de platen is op verschillende tijdstippen weergegeven door een verticaal I-balkje.

Fig. 6 toont dit voor proef II.

De gemiddelde temperatuur van de bovenplaat ( $\bar{T}_b$ ) wordt verkregen door het gemiddelde van de gemeten temperaturen van de thermokoppels 5 t/m 9 te berekenen. Voor  $\bar{T}_o$  geldt dit analoog voor de koppels 14 t/m 18. (Zie ook fig. 2 voor de plaatsing van de koppels). De warmtestromen  $q_b$  en  $q_o$  worden verkregen door de gevonden meetwaarden in mV te vermenigvuldigen met een waarde uit de ijklijn geldend bij de gemeten gemiddelde plaattemperatuur. Fig. 15 geeft de ijklijnen voor de beide warmtestroommeters in afhankelijkheid van de temperatuur.

De grootte van de warmtestroomdichtheid  $q$  ( $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ ) wordt verkregen uit:

$$q = C_{\text{emk}} \times \text{EMK}_r$$

waarin  $q$  = warmtestroomdichtheid  $\text{kcal}/(\text{m}^2.\text{h})$   
 $C_{\text{emk}}$  = ijkwaarde (fig. 15)  $\text{kcal}/(\text{m}^2.\text{h.mV})$   
 $\text{EMK}_r$  = meetwaarde recorder  $\text{mV}$

Na omrekening met de factor 1,163 wordt  $q$  in  $\text{W}/\text{m}^2$  verkregen.

Uit fig. 5 en 6 blijkt, dat bij een neerwaarts gerichte warmtestroom na ongeveer een dag de toestand stationair genoemd mag worden. Bij een opwaarts gerichte warmtestroom vertoont het verloop van de temperatuur en de warmtestroom in de tijd een grilliger beeld. De spreiding in de temperatuurverschillen is groter (I-balkjes zijn langer). De fluctuaties van de warmtestromen zijn groter.

Fig. 7 toont het temperatuurverloop tussen de rozen (gemeten met thermokoppels 19 t/m 23) uitgedruk in de hoogte van het meetvak, bij een neerwaarts gerichte warmtestroom. Uit de figuur blijkt, dat gedurende de gehele tijdsduur van de proef, de temperaturen - gelet op de hoogte in het meetvak - elkaar opvolgen.

Fig. 8 toont het temperatuurverloop tussen de rozen bij een opwaarts gerichte warmtestroom. Hier blijkt, dat boven in het meetvak de temperatuur van de rozen hoger is dan iets lager in het meetvak.

In fig. 9 is het temperatuurverloop weergegeven in de laag rozen op het tijdstip 60 uur bij een neerwaarts gerichte warmtestroom. Fig. 10 geeft dit weer voor proef II, bij een opwaarts gerichte warmtestroom, 36 uur na het starten van de proef.

Uit deze figuren blijkt, dat de temperatuurgradiënt niet lineair over de laag rozen verloopt. De temperatuur verandert sterk per plaats. Dit geldt temeer voor een opwaarts gerichte warmtestroom. In deze figuur is het temperatuurverloop in de bovenste 5 cm van de laag onduidelijk. Met stippellijnen is dit in de figuur aangegeven. De temperatuurgradiënt wordt vanaf  $x = 20$  cm in de laag positief, wat betekent dat de warmtestroom hier in omgekeerde richting draait.

### 8.3 Berekening van de warmtegeleidingscoëfficiënt over de laag rozen van 30 cm.

Fig. 11 toont het verloop van de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda_e$  tijdens de proeven. Deze  $\lambda_e$  is berekend - volgens de formule die in de theorie onder 6 gegeven is - uit het gemiddelde van de warmtestroomwaarden, zoals deze gemeten zijn boven en onder de laag rozen, over de hele laag rozen ( $x = 30$  cm) en over het temperatuurverschil van de gemiddelde temperatuurwaarden van de boven- en onderplaat, respectievelijk  $\bar{T}_b$  en  $\bar{T}_o$ .

De aldus berekende waarden van  $\lambda_e$  geven een eerste benadering, omdat de gemiddelde warmtestroom is genomen en deze waarde sterk afwijkt van de gemeten warmtestromen.



Met gestippelde lijnen in deze figuur zijn de complicaties, zoals die zijn beschreven onder 7.3.1 en 7.3.2, uitgezet. Uit fig. 11 blijkt, dat het verloop van de warmtegeleidingscoëfficiënt bij een neerwaarts gerichte warmtestroom aan minder fluctuaties onderhevig is dan bij een opwaarts gerichte warmtestroom.

Tussen 24 uur en 50 uur na het starten van de proef schommelt de warmtegeleidingscoëfficiënt bij een neerwaarts, respectievelijk opwaarts gerichte warmtestroom, bij deze berekening tussen 0,10 - 0,12 W/(m.K), respectievelijk 0,23 - 0,25 W/(m.K).

#### 8.4 Factoren die van invloed zijn op een berekening van de warmtegeleidingscoëfficiënt per laag rozen van 6 cm.

Een berekening van de factoren die inherent zijn aan levende produkten en die van invloed zijn op de waarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt is uitgevoerd in bijlage 1.

Per laag rozen van 6 cm is hier berekend:

- de warmteproduktie
- het koolstofmassaverlies
- het vochtmassaverlies
- de latente warmte.

Uit deze berekende gegevens wordt de effectieve warmtestroomdichtheid berekend en hieruit per laag - samen met het temperatuurverschil per laag - de warmtegeleidingscoëfficiënt per laag rozen.

Deze berekening is alleen uitgevoerd voor een neerwaarts gerichte warmtestroom, op het tijdstip  $t = 60$  uur (proef I).

Uit deze berekening waarvan de gegevens vermeld staan in bijlage 1, tabel 4 en 5, varieert de warmtegeleidingscoëfficiënt tussen 0,10 en 0,16 W/(m.K) (tabel 5, kolom 6). Een correctie voor de warmteproductie van -30% was noodzakelijk in verband met de discrepantie tussen de gemeten warmtestroom bij de onderplaat ( $q_o = 8,15 \text{ W/m}^2$ ) en de op deze plaats berekende effectieve warmtestroom ( $q_e = 11,1 \text{ g W/m}^2$ ). Na deze correctie varieerde de warmtegeleidingscoëfficiënt tussen 0,07 en 0,10 W/(m.K) (zie bijlage 1, tabel 5, kolom 7).

Fig. 12 geeft het verloop in de laag rozen weer van de effectieve warmtestroomdichtheid en de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt zowel zónder (ononderbroken lijn) als mét de uitgevoerde correctie (onderbroken lijn). Gegevens zie bijlage 1, tabel 4 en 5.

Uit de figuur blijkt het lineaire verloop van de warmtegeleidingscoëfficiënt in de laag rozen.

Fig. 13 geeft de relatie weer tussen de warmtegeleidingscoëfficiënt en het temperatuurverschil per laag rozen van 6 cm. Ook hier komt het lineaire verloop van  $\lambda_e$  naar voren. Uit de figuur blijkt de negatieve correlatie tussen de warmtegeleidingscoëfficiënt en het temperatuurverschil. Dit is in tegenstelling tot wat Van Beek (lit. 3) voor eieren en kunstcitroenen heeft gevonden. Deze constateerde namelijk een positieve correlatie. Een verklaring hiervoor kon niet gevonden worden.

De berekeningen van de warmtegeleidingscoëfficiënt over de hele laag rozen (zie fig. 11) en per laag rozen van 6 cm (zie fig. 12) geven waarden die elkaar niet veel ontlopen.

Dit geldt alleen voor een neerwaarts gerichte warmtestroom.

Bij een opwaarts gerichte warmtestroom is het verkregen beeld te onduidelijk om hieruit juiste conclusies te trekken. De temperatuurgradiënt in het bovenste deel van de laag rozen verandert van teken (zie fig. 10). Hierdoor verandert de richting van de warmtestroom. De richting van de warmtestroom is in het onderste deel van de laag rozen dezelfde als die van de warmtestroom; in het bovenste deel echter tegengesteld. De berekeningen die bij proef II zijn uitgevoerd volgens het model in bijlage 1, geven uitkomsten van de effectieve warmtestroom die sterk verschillen met de gemeten warmtestromen. Uitgevoerde correcties vertroebelden het beeld nog meer.

9. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.

De bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt van rozen in het Poensgen-apparaat geeft goede resultaten indien de neerwaartse richting van de warmtestroom gekozen wordt. Berekeningen uitgevoerd over de gehele laag rozen van 30 cm en per laag rozen van 6 cm geven waarden voor de warmtegeleidingscoëfficiënt die elkaar niet veel ontlopen, namelijk:

- (a) Over de gehele laag rozen van 30 cm varieerde  $\lambda_e$  tussen 0,10 en 0,12 W/(m.K) (fig. 11).
- (b) Per laag rozen van 6 cm varieerde  $\lambda_e$  tussen 0,10 en 0,16 W/(m.K) (fig. 12).
- (c) Per laag rozen van 6 cm - met gecorrigeerde warmteproduktie van -30% - varieerde  $\lambda_e$  tussen 0,07 en 0,10 W/(m.K) (fig. 12).

Factoren die inherent zijn aan levende produkten, zoals vochtmassaverlies, warmteproduktie etc., zijn in de onder (b) en (c) genoemde waarden verrekend. Hiervoor is een model opgesteld, zie bijlage 1.

Kiest men de opwaartse richting van de warmtestroom, dan is de berekening van de warmtegeleidingscoëfficiënt alleen uitvoerbaar over de gehele laag. Deze schommelt dan tussen 0,23 en 0,25 W/(m.K). Berekeningen per laag rozen van 6 cm, met het model dat in bijlage 1 weergegeven wordt, vertroebelen het beeld zozeer, dat hiervan geen uitwerking gegeven is.

Vergelijking met de theoretische waarde van 0,084 W/(m.K), berekend volgens de formule van Meffert (lit. 8):  $\lambda_{\text{bulk}} = (1-\epsilon)\lambda_{\text{water}}$  geeft een goede overeenkomst. Zie bijlage 2.3 voor een uitwerking hiervan.

Uit de proef is gebleken (fig. 13), dat rozen een negatieve correlatie vertonen tussen de warmtegeleidingscoëfficiënt en het temperatuurverschil. Van Beek vond met eieren en kunstcitroenen een positieve correlatie (lit. 3). Nader onderzoek hieromtrent is wenselijk.

Voor zover uit de literatuur bekend, is nog niet eerder een meting verricht aan rozen in het Poensgen-apparaat. Om meer zekerheid te verkrijgen over de in dit rapport gegeven meetresultaten is het aan te bevelen de proef, eventueel met een andere stapeling van het produkt, te herhalen.

10. LITERATUURLIJST.

- 1) Mohsenin N.N., Physical properties of plant and animal materials.  
Gordon and Beach, New York, vol. I, 1970.
- 2) Kostaropoulos, A.E., Wärmeleitzahlen von Lebensmitteln und Methoden zu deren Bestimmung, Heft V.D.M.A.
- 3) Beek, G. van, Heat transfer through layers of agriculture products of near spherical shape.  
Sprenger Instituut, Wageningen, 1974.
- 4) Beek, G. van, Verbeek W., Berekening van thermo-fysische eigenschappen van tuinbouwprodukten uit hun samenstelling.  
Rapport no. 1919, Sprenger Instituut, Wageningen.
- 5) Briel, A.J. van den, Ontwikkeling van een naaldmethode ter bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënten in stapels tuinbouwprodukten.  
Rapport no. 1925, Sprenger Instituut, Wageningen.
- 6) Beek, G. van, Nomogram voor warmteproductie, effectieve warmteproductie, massaverliessnelheid, koolstofverlies-snelheid en vochtverliessnelheid.  
Rapport no. 1918, Sprenger Instituut, Wageningen.
- 7) Verbeek, W., Rudolphij, J.W., Bepaling van de warmteproductie met behulp van de adiabatistische calorimeter.  
In druk 1977.
- 8) Meffert, H.F.Th., and G. van Beek, Safe radius is an important thermal physical property.  
Art. in: Ann. Bull. I.I.F., 1976-1, Comm. C2, D1, D2, D3, E1, Melbourne, blz. 341-348.

## Bijlage 1.

### 1.1 Inleiding.

Met het Poensgen-apparaat worden goede resultaten behaald als men werkt met isotrope, homogene materialen.

De rozen, waaraan de metingen zijn verricht, vormen echter een anisotroop, heterogeen materiaal. Het is tevens een levend produkt, waardoor verschijnselen optreden zoals:

- warmteproductie;
- massawijzigingen;
- vochttransportverschijnselen door verdamping en condensatie.

In deze bijlage zijn enkele berekeningen uitgevoerd met als doel de invloeden van deze verschijnselen te leren kennen en het effect hiervan te bestuderen op de waarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt.

De berekeningen zijn gebaseerd op de gemeten gegevens van temperatuur, warmtestroomdichtheid en massa. Uit deze gegevens kan een massabalans en een warmtebalans per laag rozen opgesteld worden.

### 1.2 Massabalans.

Voor een stationaire situatie geldt de volgende gelijkheid per laag rozen, de massabalans:

$$\text{Massastroom uit} = \text{massastroom in} + \frac{\text{massaverandering}}{\text{tijdseenheid}}$$

De massaverandering is de resultante van het vochtmassaverlies en het koolstofmassaverlies.

De massaverandering wordt door metingen uit het verschil in massa van de lagen rozen voor en na de proef verkregen (zie tabel 1 en 2).

Hierbij zijn inloopverschijnselen van water ver-  
waarloosd (later zal blijken dat dit niet reëel  
is, zie onder 1.6). De massaverandering wordt  
nu berekend als volgt:

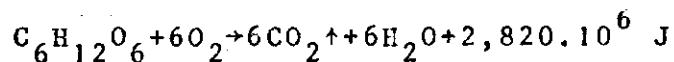
$$\Delta m = \Delta m_c + \Delta m_v$$

waarin  $\Delta m$  is massaverandering in kg (gemeten)  
 $\Delta m_c$  is koolstofmassaverlies in kg  
 $\Delta m_v$  is vochtmassaverlies in kg

### 1.2.1 Het koolstofmassaverlies.

Dit is het massaverlies ten gevolge van stofwis-  
selingsprocessen. Het koolstofmassaverlies hangt  
samen met de warmteproductie, zie fig. 14.

Uit de vergelijking van de ademhalingsreactie:



wordt de volgende relatie gedestilleerd:

$$2,820 \cdot 10^6 \text{ J} \stackrel{\Delta}{=} 0,072 \text{ kg C}$$

Het koolstofmassaverlies per laag rozen volgt nu uit:

$$\Delta m_c = 25,50 \cdot 10^{-9} q \cdot \Delta t \cdot \bar{m} \quad (\text{lit. 6})$$

waarin	$\Delta m_c$	koolstofmassaverlies per laag	kg
	$q_{\text{roos}}$	warmteproductie rozen	W/kg
	$\Delta t$	tijdsduur van de proef	s
	$\bar{m}$	gemiddelde massa van de laag rozen	kg

Opm.: Het water, dat vrijkomt bij de ademhalingsreactie, neemt als fysisch gebonden water de plaats in van het reservevoedsel. Het heeft in principe niets te maken met het vochtverlies van de rozen door verdamping.

### 1.2.2 Vochtmassaverlies.

Het vochtverlies is afhankelijk van:

- de aard van het oppervlak van het produkt;
- het dampdrukdeficit tussen het produkt en het microklimaat rondom het produkt;
- de luchtbeweging rondom het produkt.

De lagen rozen, die bij de plaat met hoge temperatuur liggen, zullen door verdamping water verliezen. Die bij de plaat met lage temperatuur zullen door condensatie van water in massa toenemen.

Het vochtmassaverlies per laag wordt berekend uit het verschil tussen de gemeten massaverandering per laag en het koolstofmassaverlies per laag, zoals dit onder 1.2.1 is geformuleerd.

### 1.3 Warmtebalans.

In een stationaire situatie geldt, dat er per laag rozen geen ophoping van warmte plaats heeft, zodat de volgende warmtebalans geldt:

$$\text{warmtestroom uit} = \text{warmtestroom in} + \frac{\text{resulterende warmteproductie}}{\text{tijdseenheid}}$$



De resulterende warmteproduktie per laag rozen wordt berekend uit:

$$q_{res} = q_{roos} + q_{lat}$$

waarin  $q_{res}$  = resulterende warmteproduktie  $W/m^2$   
 $q_{roos}$  = warmteproduktie per laag rozen  $W/m^2$   
 $q_{lat}$  = latente warmte van water per laag  $W/m^2$

### 1.3.1 Warmteproduktie

De warmteproduktie van een levend produkt is o.a. afhankelijk van:

- de temperatuur;
- soort produkt;
- ras produkt;
- voorbehandeling;
- rijpheidsstadium.

De laatste 4 punten vormen een vast gegeven. De eerste factor wisselt per laag. De warmteproduktie per laag in  $W/kg$  van de rozen wordt bepaald met behulp van de gemiddelde temperatuur per laag rozen en met behulp van fig. 16, dat het verband aangeeft tussen de temperatuur en de warmteproduktie van rozen, bepaald met de adiabatische calorimeter (lit. 7). De warmteproduktie  $q_{roos}$  in  $W/kg$  wordt per laag tot  $W/m^2$  omgerekend met de formule:

$$q_{roos} = \frac{\bar{m} q_{roos}}{A}$$

$q_{roos}$  = warmteproduktie per laag rozen  $W/m^2$   
 $A$  = oppervlak van het meetvak  $m^2$  (=  $0,25 m^2$ )  
 $q_{roos}$  = warmteproduktie van rozen  $W/kg$   
 $\bar{m}$  = gemiddelde massa per laag rozen  $kg$

### 1.3.2 Latente warmte.

Tengevolge van de verdamping van water in de lagen rozen bij de plaat met hoge temperatuur wordt er warmte aan de rozen onttrokken (verdampingswarmte). Waar water condenseert - namelijk bij de lagen rozen bij de plaat met lage temperatuur - komt warmte vrij, de condensatiewarmte.

Uit het onder 1.2.2 berekende vochtmassaverlies wordt per laag rozen de latente warmteproductie  $q_{lat}$  berekend volgens de formule:

$$q_{lat} = \frac{r \cdot \Delta m_v}{A \cdot \Delta t}$$

waarin:

$q_{lat}$	= latente warmte van water	$W/m^2$
A	= oppervlak van het meetvak	$m^2$ (=0,25 $m^2$ )
$\Delta t$	= tijdsduur van de proef	s
r	= verdampingswarmte van water	J/kg (= $2,4 \cdot 10^6$ J/kg)
$\Delta m_v$	= vochtmassaverlies	kg

### 1.4 Warmtetransport.

Tussen de lagen rozen treedt transport van warmte op als gevolg van:

#### 1.4.1 Vochttransport.

Een transport van vocht met een zekere warmte-inhoud (enthalpie) tengevolge van het verschil in dampdrukdeficit over de laag rozen. Een berekening van de relatieve luchtvochtigheid per laag rozen is uitgevoerd in bijlage 3.

1.4.2 Geleiding.

Een warmtestroom door middel van geleiding door de laag rozen tengevolge van het verschil in temperatuur over de laag rozen.

De laatste stroom nu is van belang voor de bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt per laag volgens de formule:

$$\lambda_e = \frac{q_e \cdot \Delta x}{\Delta T}$$

waarin  $\lambda_e$  = effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt in W/(m.K)  
 $q_e$  = effectieve warmtestroomdichtheid W/m<sup>2</sup>  
 $\Delta x$  = dikte van de laag rozen m  
 $\Delta T$  = temperatuurverschil over de laag rozen K

Opm.: De dikte per laag rozen bedraagt 6 cm.

Tabel 3. Gegevens volgend uit de berekeningen naar het laagsgewijs opgesteld model bij een neerwaarts gerichte warmtestroom op het tijdstip  $t = 60$  uur.  
 Verklaring van de tekens: zie tekst.

$\bar{x}$	$\bar{T}$	$\Delta m$	$\Delta m_c$	$\Delta m_v$	$q_{lat}$	$q_{roos}$	$q_{res}$
cm	°C	$\times 10^{-3}$ kg	$\times 10^{-3}$ kg	$\times 10^{-3}$ kg	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
3	9,8	+11	-6,0	17,0	+0,21	1,23	1,44
9	14,7	-11	-8,3	-2,7	-0,03	1,70	1,67
15	18,2	-2	-10,7	+8,7	+0,11	2,17	2,28
21	20,3	-31	-12,2	-19,7	-0,25	2,49	2,24
27	21,0	-148	-13,4	-134,6	-1,68	2,74	1,06

Tabel 4. Zie tabel 3. De warmteproductie gecorrigeerd met -30%.

$\bar{x}$	$\Delta m_c$	$\Delta m_v$	$q_{lat}$	$q_{roos}$	$q_{res}$
cm	$\times 10^{-3}$ kg	$\times 10^{-3}$ kg	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
3	-4,21	+15,2	+0,19	0,86	1,15
9	-5,81	-5,2	-0,06	1,19	1,13
15	-7,5	+5,5	+0,07	1,52	1,59
21	-8,6	-22,4	-0,28	1,74	1,46
27	-9,4	-138,6	-1,73	1,92	0,19

1.5 Illustratie van de berekeningen.

In fig. 14 is van het bovenstaande een illustratief model gegeven, geldend voor een stationaire situatie. De getallen, die hierin zijn aangegeven, zijn fictief en dienen ter verduidelijking van de figuur.

1.6 Resultaten van de berekeningen en discussie van de resultaten van de berekening.

In tabel 3 zijn de uitkomsten van de berekeningen weergegeven per laag rozen.

Zie de lijst van symbolen voor de verklaring van de tekens.

Uit de 5e kolom van tabel 3 blijkt, dat er ruim 131 gram vocht "verdwenen" is, dat wil zeggen een deel ervan (schatting 25%) werd aangetroffen op de onderplaat, het resterende deel is uit het apparaat gelopen.

De condensatiewarmte van 131 gram water bedraagt:  
 $q_{lat} = 1,71 \text{ W/m}^2$ .

De gemeten warmtestroom bij de bovenplaat bedraagt  $0,79 \text{ W/m}^2$ , die bij de onderplaat  $8,15 \text{ W/m}^2$  op het tijdstip 60 uur voor proef I (fig. 5).

Tabel 5. Gecorrigeerde en niet-gecorrigeerde effectieve warmtestroom en warmtegeleidingscoëfficiënt per laag rozen van 6 cm.

$\bar{x}$	$q_e$	$q_{e-30\%}$	$\Delta T$	$\Delta T/\Delta x$	$\lambda_e$	$\lambda_{e-30\%}$
cm	$\text{W/m}^2$	$\text{W/m}^2$	K	K/m	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
3	9,48	6,31	5,7	95,0	0,10	0,07
9	8,04	5,16	4,0	66,6	0,12	0,08
15	6,37	4,03	2,8	46,6	0,14	0,09
21	4,09	2,44	1,5	25,0	0,16	0,10
27	1,85	0,98	0,2	3,3	0,56	0,30

Wordt de resulterende warmtestroom  $q_{res}$ , zoals aangegeven in kolom 8 van tabel 3, gesommeerd, rekening houdend met

- de gemeten warmtestroom van  $0,79 \text{ W/m}^2$  bij de bovenplaat en
- de berekende latente warmte van  $1,71 \text{ W/m}^2$  vrijkomend bij de onderplaat,

dan wordt tabel 5 verkregen, kolom 2.

Zoals te zien is in fig. 14, geeft deze tabel de uiteindelijke warmtestroom ( $q_e$ ) weer met pijlen per laag, die van belang is voor de berekening van de warmtegeleidingscoëfficiënt.

Uit kolom 2 van tabel 5 blijkt, dat volgens het model de warmtestroom bij de onderplaat  $9,48 + 1,71 = 11,19 \text{ W/m}^2$  zou moeten bedragen.

De gemeten warmtestroom bij de onderplaat bedraagt echter  $8,15 \text{ W/m}^2$ . Dit is een afwijking van  $3,04 \text{ W/m}^2$ . In procenten: 27,2% van de berekende waarde.

1.7 Correctie van de berekening.

Wordt de waarde van de warmteproduktie (in tabel 4, kolom 5) met 30% verlaagd, dan blijkt uit tabel 5, kolom 3 dat uiteindelijk een waarde van  $6,31 + 1,71 = 8,02 \text{ W/m}^2$  wordt verkregen voor de berekende warmtestroom bij de onderplaat. Een warmteproduktie die 30% minder is dan die berekend uit fig. 16 is voor een levend, variabel produkt, zoals de roos, reëel te noemen. De correctie van -30% op de warmteproduktie geeft een afwijking van -1,6% op de gemeten warmtestroom bij de onderplaat.

1.8 Vergelijking van de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt.

Bij de oorspronkelijk aangehouden warmteproduktie, zoals aangegeven in fig. 15, varieert de warmtegeleidingscoëfficiënt tussen 0,10 en 0,16 W/(m.K) als de bovenste laag buiten beschouwing wordt gelaten (tabel 5, kolom 6). Bij de 30% lager gekozen warmteproduktie varieert  $\lambda$  tussen 0,07 en 0,10 (tabel 5, kolom 7), de bovenste laag wederom niet beschouwd.

Bijlage 2.

2.1 Dichtheid van de roos.

Uit metingen, volgens Mohsenin (lit. 1), is de dichtheid van de rozen bepaald.

Deze dichtheid bedroeg:  $798,8 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Uit tabel 6 blijkt, dat deze waarde ten opzichte van andere tuinbouwprodukten laag is.

2.2.1 Bulkdichtheid.

De bulkdichtheid wordt gevonden met de formule:

$$\rho_{\text{bulk}} = \frac{m}{V}$$

waarin  $\rho_{\text{bulk}}$  = dichtheid van de bulk  $\text{kg/m}^3$

m = massa van het produkt kg

V = inhoud van de bulk  $\text{m}^3$

Bij proef I bedroeg  $\rho_{\text{bulk}} = 109,8 \text{ kg/m}^{-3}$ .

Hierbij was de inhoud van de bulk  $7,5 \times 10^2 \text{ m}^3$  en de massa van het produkt 8,239 kg.

Uit deze waarde blijkt, dat al de genoemde bulkdichtheden uit tabel 6 die van de rozen overtreffen.

2.2.2 Bulkporositeit  $\epsilon$ .

De bulkporositeit  $\epsilon$ , de verhouding tussen het volume lucht en het volume van de bulk wordt gevonden met de formule:

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\rho_{\text{produkt}}}$$

waarin  $\epsilon$  = bulkporositeit  $m^3/m^3$   
 $\rho_{\text{bulk}}$  = bulkdichtheid  $kg/m^3$   
 $\rho_{\text{produkt}}$  = dichtheid produkt  $kg/m^3$

In de proef bedroeg  $\epsilon$  voor de rozen 0,86.  
Ten opzichte van andere tuinbouwprodukten bevat de bulk rozen relatief veel lucht.

Tabel 6. Produktdichtheid, bulkdichtheid, bulkporositeit en bulkwarmtegeleidingscoëfficiënt van enkele tuinbouwprodukten.

Gegevens ontleend uit lit. 4.

produkt	$\rho_{\text{produkt}}$ $kg/m^3$	$\rho_{\text{bulk}}$ $kg/m^3$	$\epsilon$ $m^3/m^3$	$\lambda_{\text{bulk}}$ $W/(m.K)$
aardbei	921	550	0,40	0,27
appel	830	500	0,40	0,23
andijvie	700	200	0,71	0,11
komkommer	950	600	0,37	0,31
kool	940	450	0,48	0,22
peen	1025	500	0,49	0,25
tomaat	1010	600	0,59	0,31

2.3

Het verband tussen de porositeit en de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bulk.

Deze wordt door Meffert (lit. 8) als volgt geformuleerd:

$$\lambda_{\text{bulk}} = (1-\epsilon)\lambda_{\text{produkt}} + \epsilon\lambda_{\text{lucht}}$$



waarin

$\lambda_{\text{bulk}}$	= geleidingscoëfficiënt van de bulk	W/(m.K)
$\epsilon$	= porositeit	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{produkt}}$	= geleidingscoëfficiënt van het produkt	W/(m.K)
$\lambda_{\text{lucht}}$	= geleidingscoëfficiënt van lucht	W/(m.K)

Daar het produkt voor het merendeel uit water bestaat, wordt de formule omgezet in:

$$\lambda_{\text{bulk}} = (1-\epsilon) \lambda_{\text{water}} + \epsilon \lambda_{\text{lucht}}$$

Na substitutie van

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{water}} &= 0,60 \text{ W/(m.K)} \text{ (bij } 20^{\circ}\text{C)} \\ \lambda_{\text{lucht}} &= 0,025 \text{ W/(m.K)} \text{ (bij } 20^{\circ}\text{C)} \\ \epsilon &= 0,86\end{aligned}$$

Volgt dat  $\lambda_{\text{bulk}} = 0,089 \text{ W/(m.K)}$

Opm. 1. Deze waarde geeft een goede afspiegeling van de waarde, die bij een neerwaarts gerichte warmtestroom is berekend in het Poensgen-apparaat.

Opm. 2. Uit tabel 6 blijkt de lage waarde voor  $\lambda$  van rozen ten opzichte van andere tuinbouwprodukten.

Tabel 7. Berekening van de relatieve luchtvochtigheid per laag rozen bij een neerwaarts gerichte warmtestroom.

laag	x	T	$\bar{m}$	vochtverlies	vochtstroom	$p_s$	$\Delta p$	$\phi$
	cm	°C	kg	$\times 10^{-3}$ kg	$\times 10^{-8}$ kg/s	Pa	Pa	%
1	0-6	9,8	-	+17,0	-	-	-	100
2	6-12	14,7	1,604	- 2,7	0,361	1672,3	0,74	99,9
3	12-18	18,2	-	+ 8,7	-	-	-	100
4	18-24	20,3	1,596	-19,7	2,57	2381,4	5,37	99,8
5	24-30	21,0	1,667	-134,6	17,48	2486,3	34,89	98,6

Tabel 8. Idem, bij een opwaarts gerichte warmtestroom (proef II).

laag	x	T	$\bar{m}$	vochtverlies	W	$p_s$	$\Delta p$	$\phi$
	cm	°C	kg	$\times 10^{-3}$ kg	$\times 10^{-8}$ kg/s	Pa	Pa	%
1	0-6	19,2	1,879	-133	51,35	2224,4	91,09	95,9
2	6-12	17,2	1,917	- 83	32,05	1961,9	55,73	97,2
3	12-18	15,9	1,898	- 63	24,32	1806,2	42,71	97,7
4	18-24	16,0	-	+ 22	-	-	-	100
5	24-30	16,8	-	+143	-	-	-	100

Bijlage 3.

Berekening van de relatieve luchtvochtigheid per laag rozen van 6 cm.

Met behulp van de formule van Darcy voor vochtafgifte kan de relatieve luchtvochtigheid van het microklimaat per laag rozen berekend worden:

$$\Delta p = \frac{W}{m \cdot m} \quad \text{en} \quad \phi = \frac{p}{p_s} \times 100\% \quad \text{als} \quad \Delta p = p_s - p$$

waarin

- $W$  = massaverlies vochtafgifte in kg/s
- $\overset{\circ}{m}$  = specifieke vochtafgifte in kg H<sub>2</sub>O/(kg<sub>produkt</sub>·Pa·s)
- $\Delta p$  = dampdrukdeficit Pa
- $\bar{m}$  = gemiddelde massa van het produkt kg
- $\phi$  = relatieve luchtvochtigheid %
- $p$  = heersende druk bij geg. temperatuur
- $p_s$  = evenwichtsdampdruk van de snijbloem  
(te benaderen uit het vriespunt).

Tabel 7 en 8 tonen de berekende waarden van de relatieve luchtvochtigheid per laag rozen.

Opm.:

Tijdsduur proef I :  $7,70 \times 10^5$  s.

Tijdsduur proef II :  $2,59 \times 10^5$  s.

Het vochtmassaverlies is gecorrigeerd voor het koolstofmassaverlies (zie bijlage 5).

Uit vochtafgifte experimenten is de specifieke vocht-afgifte voor rozen bekend:

$$\overset{\circ}{m} = 3,0 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$$

Bij de lagen waar condensatie is opgetreden is de relatieve luchtvochtigheid op 100% gesteld.

Wageningen, 3-8-1977.

PB/JZ.

LIJST VAN FIGUREN.

- Fig. 1. Schets van het Poensgen-apparaat.
- " 2. Plaats van de koppels in het Poensgen-apparaat.
- " 3. Massa-veranderingen in procenten in de laag rozen. Warmtestroom omlaag gericht.
- " 4. Idem als fig. 3.: Warmtestroom omhoog gericht.
- " 5. Verloop van de gemiddelde temperatuur van de bovenplaat  $\bar{T}_b$ , onderplaat  $\bar{T}_o$ , warmtestroom door de bovenplaat  $q_b$  en onderplaat  $q_o$ . Warmtestroom omlaag gericht.
- " 6. Idem als fig 5.: Warmtestroom omhoog gericht.
- " 7. Temperatuurverloop tussen de rozen. Warmtestroom omlaag gericht.
- " 8. Idem als fig. 7.: Warmtestroom omhoog gericht.
- " 9. Temperatuurverloop in de laag rozen op het tijdstip  $t = 60$  uur. Warmtestroom omlaag gericht.
- " 10. Idem als fig. 9.: Warmtestroom omhoog gericht.
- " 11. Verloop van de warmtegeleidingscoëfficiënt berekend over de laag rozen van 30 cm, bij een omlaag en omhoog gerichte warmtestroom.
- " 12. Verloop van de berekende warmtestroomdichtheid en de warmtegeleidingscoëfficiënt in de laag rozen volgens het model bij een omlaag gerichte warmtestroom.

Fig. 13. Verband tussen de warmtegeleidingscoëfficiënt en het temperatuurverschil, bij een omlaag gerichte warmtestroom.

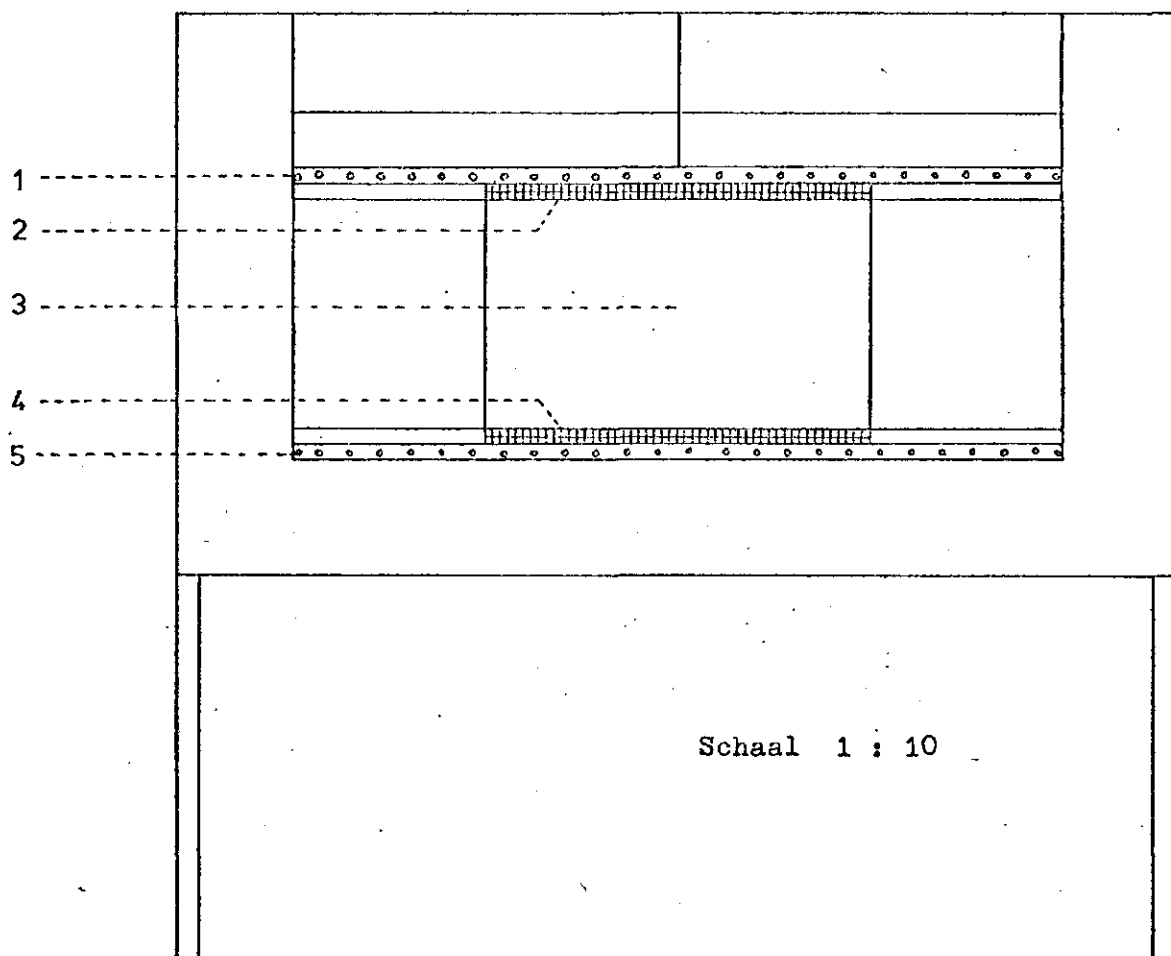
- " 14. Illustratief model voor de berekening van de warmtestroom per laag rozen.
- " 15. IJkgrafieken van de warmtestroommeters Z89 en Z85.
- " 16. Verband tussen de temperatuur en de warmteproductie van rozen.

LIJST VAN TABELLEN.

- 1) Massametingen proef I. Warmtestroom neerwaarts gericht.
- 2) Idem proef II. Warmtestroom opwaarts gericht.
- 3) Gegevens volgend uit de berekeningen naar het laagsgewijs opgesteld model bij een neerwaarts gerichte warmtestroom op het tijdstip  $t = 60$  uur.
- 4) Zie tabel 3. De warmteproductie gecorrigeerd met -30%.
- 5) Gecorrigeerde en niet-gecorrigeerde effectieve warmtestroom en warmtegeleidingscoëfficiënt per laag rozen van 6 cm.
- 6) Produktdichtheid, bulkdichtheid, bulkporositeit en bulkwarmtegeleidingscoëfficiënt van enkele tuinbouwprodukten.
- 7) Berekening van de relatieve luchtvochtigheid per laag rozen bij een neerwaarts gerichte warmtestroom (proef I).
- 8) Idem bij een opwaarts gerichte warmtestroom (proef II).

LIJST VAN SYMBOLEN.

A	oppervlak meetvak	$m^2$
$C_{enk}$	ijkwaarde volgens fig. 15	$kcal/(m^2 \cdot h \cdot mV)$
$EMK_r$	meetwaarde recorder	mV
p	druk	Pa
$p_s$	verzadigde druk	Pa
m	massa produkt	kg
T	temperatuur	$^{\circ}C$
$\bar{T}$	gemiddelde temperatuur per laag	$^{\circ}C$
$\bar{T}_b$	gemiddelde temperatuur bovenplaat	$^{\circ}C$
$\bar{T}_o$	gemiddelde temperatuur onderplaat	$^{\circ}C$
W	waterstroom	kg/s
V	volume bulk	$m^3$
dT	differentie van de temperatuur	K
dx	differentie van de afstand	m
$m_1$	massa voor de proef	kg
$m_2$	massa na de proef	kg
$\bar{m}$	gemiddelde massa	kg
$\bar{m}^o$	specifieke vochtafgifte	$kg/(kg \cdot Pa \cdot s)$
$\bar{x}$	midden van de laag rozen	m
q	warmtestroomdichtheid	$W/m^2$
$q_b$	warmtestroom bovenplaat	$W/m^2$
$q_e$	effectieve warmtestroom	$W/m^2$
$q_{e-30\%}$	gécorrigeerde eff. warmtestroom	$W/m^2$
$q_o$	warmtestroom onderplaat	$W/m^2$
$q_{lat}$	latente warmte van water	$W/m^2$
$q_{res}$	resulterende warmteproduktie	$W/m^2$



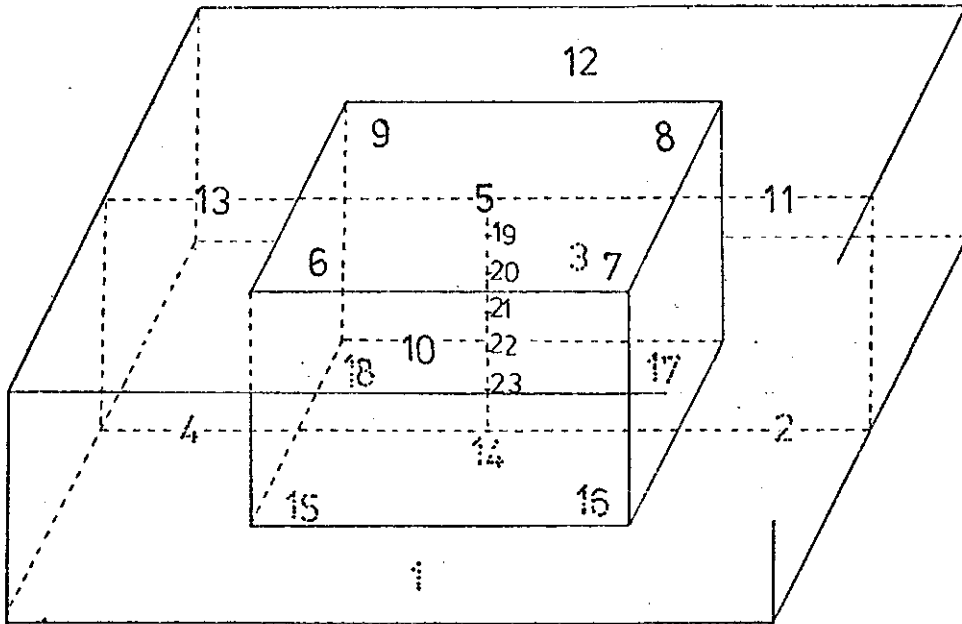
Schaal 1 : 10

Figuur 1 Schets van het Poensgen apparaat

- 1 bovenplaat
- 2 warmtestroommeter
- 3 meetvak
- 4 warmtestroommeter
- 5 onderplaat



$q_{\text{roos}}$	warmteproductie rozen	$W/m^2$ of $W/kg$
$q\uparrow$ of $q\downarrow$	richting warmtestroomdichtheid	
$r$	verdampingswarmte water	$J/kg$
$x$	afstand	$m$
$\Delta_m$	massaverandering	$kg$
$\Delta_{mc}$	koolstofmassaverlies	$kg$
$\Delta_{mv}$	vochtmassaverlies	$kg$
$\Delta p$	dampdrukdeficit	$Pa$
$\Delta T$	temperatuurverschil over $\Delta x$	$K$
$\Delta t$	tijdsinterval	$s$
$\Delta x$	dikte van de laag	$m$
$\epsilon$	porositeit	$m^3/m^3$
$\lambda$	warmtegeleidingscoëfficiënt	$W/(m.K)$
$\lambda_e$	effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt	$W/(m.K)$
$\lambda_{\text{bulk}}$	warmtegeleidingscoëfficiënt bulk	$W/(m.K)$
$\lambda_{\text{lucht}}$	warmtegeleidingscoëfficiënt lucht	$W/(m.K)$
$\lambda_{\text{produkt}}$	warmtegeleidingscoëfficiënt produkt	$W/(m.K)$
$\lambda_{\text{water}}$	warmtegeleidingscoëfficiënt water	$W/(m.K)$
$\lambda_{e-30\%}$	gecorrigeerde warmtegeleidingscoëfficiënt	$W/(m.K)$
$\rho_{\text{bulk}}$	dichtheid van de bulk	$kg/m^3$
$\rho_{\text{produkt}}$	dichtheid van het produkt	$kg/m^3$
$\phi$	relatieve luchtvochtigheid	$Pa/Pa$



Figuur 2 Plaats van de koppels in het Poensgen apparaat. Binnenste blok: meetvak.

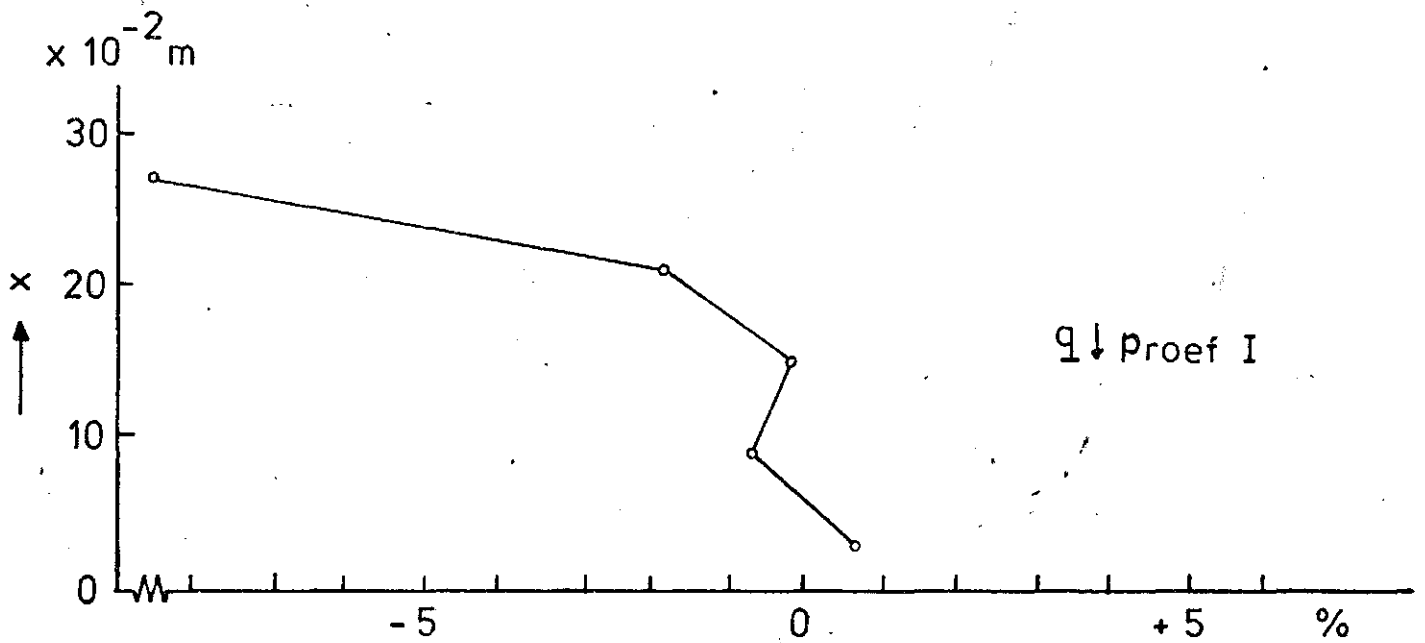


fig : 3

→ massaverandering =  $\frac{\Delta m}{m_1}$

Massa-veranderingen in procenten in de laag rozen.  
Warmtestroom omlaag gericht.

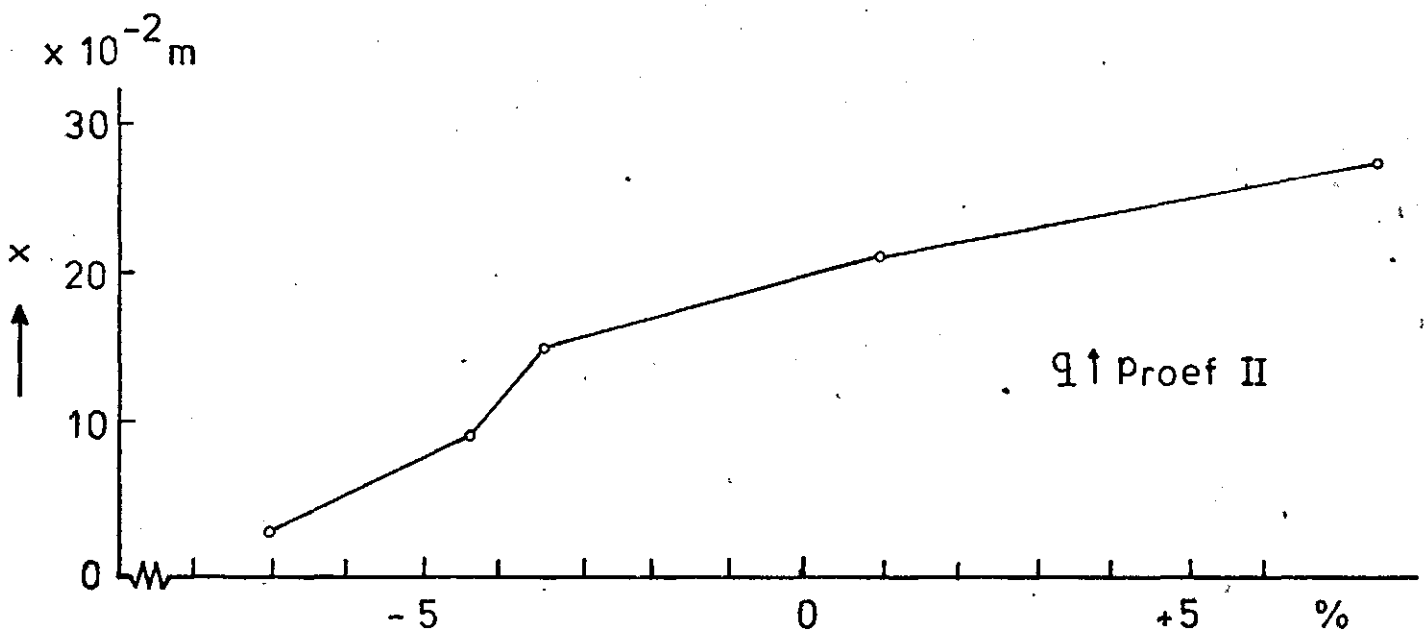


fig : 4

→ massaverandering =  $\frac{\Delta m}{m_1}$

Idem als fig. 3.: Warmtestroom omhoog gericht.

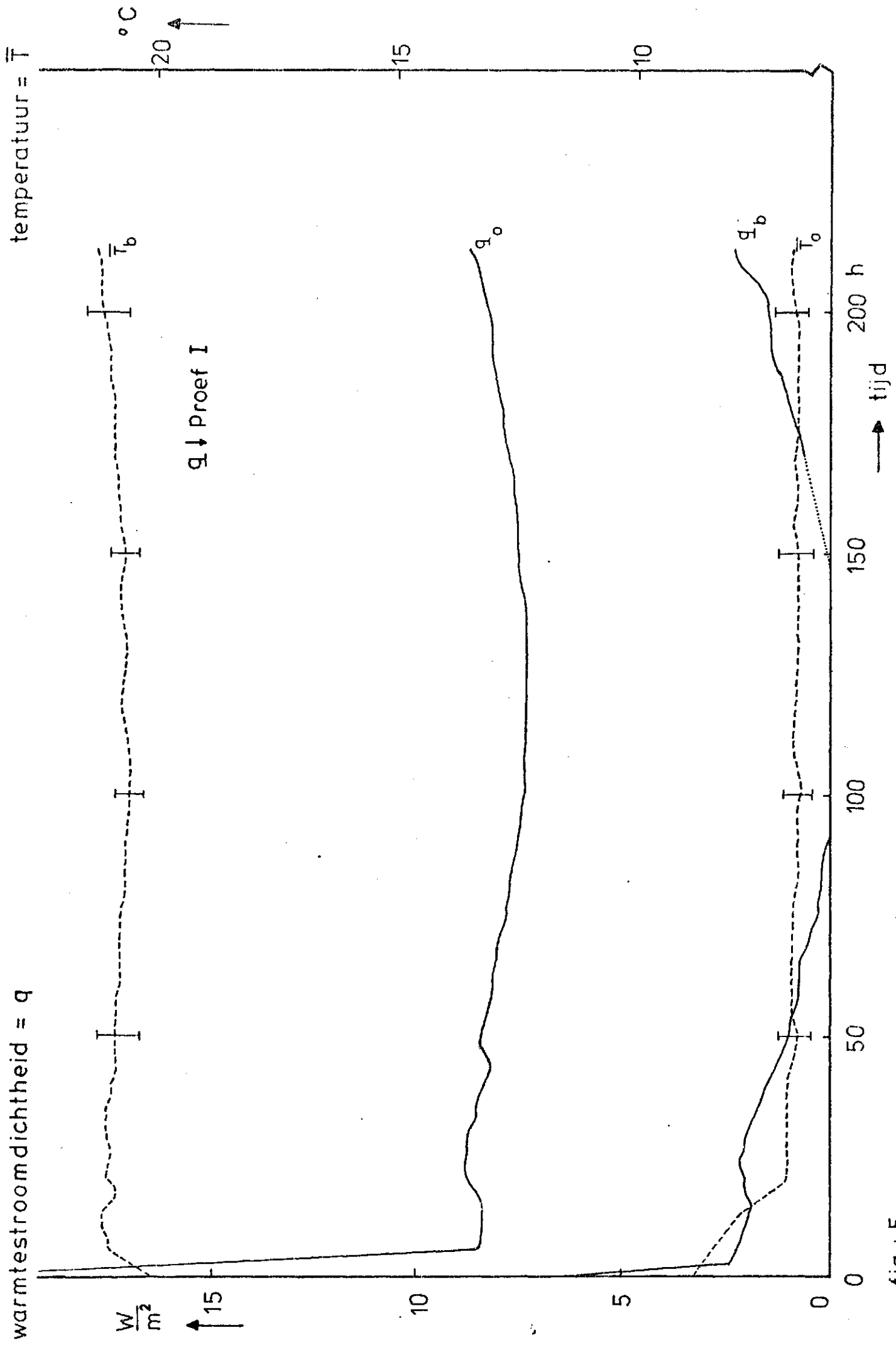


fig : 5 Verloop van de gemiddelde temperatuur van de bovenplaat  $\bar{T}_b$ , onderplaat  $\bar{T}_o$ , warmtestroom door de bovenplaat  $q_b$  en onderplaat  $q_o$ . Warmtestroom omlaag gericht.

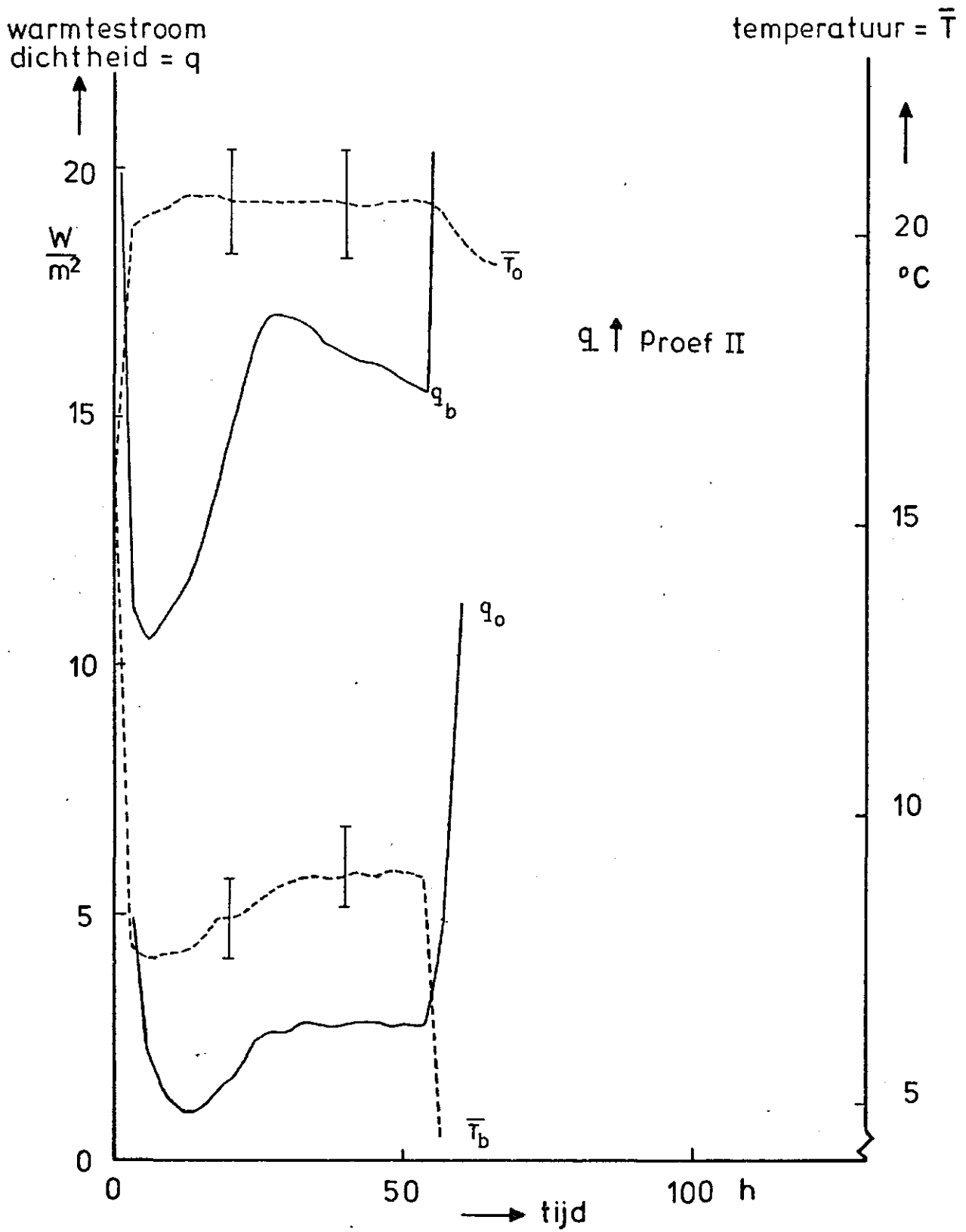


fig: 6

. Idem als fig 5.: Warmtestroom omhoog gericht.

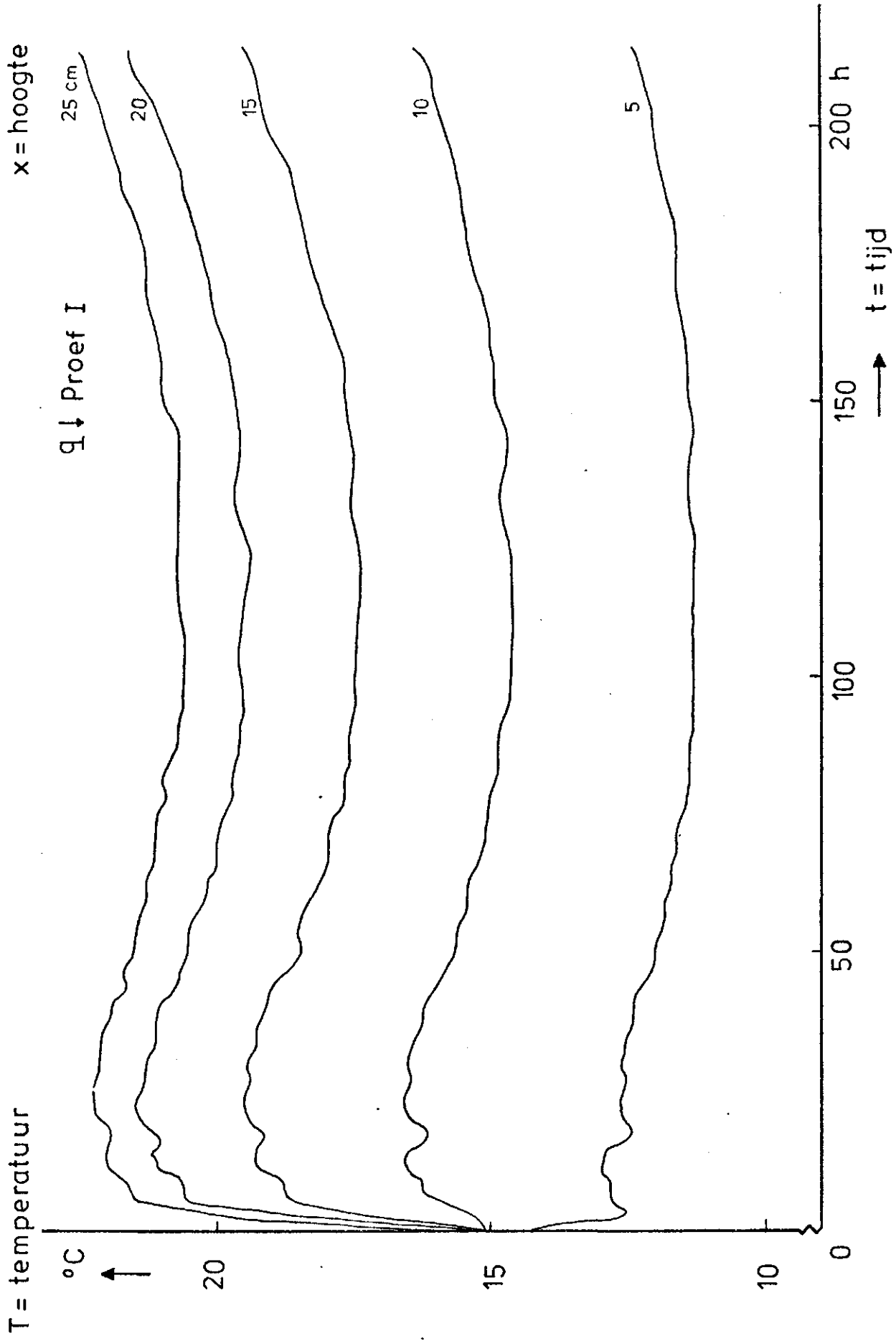


fig: 7  
 Temperatuurverloop tussen de rozen. Warmtestroom  
 omlaag gericht.

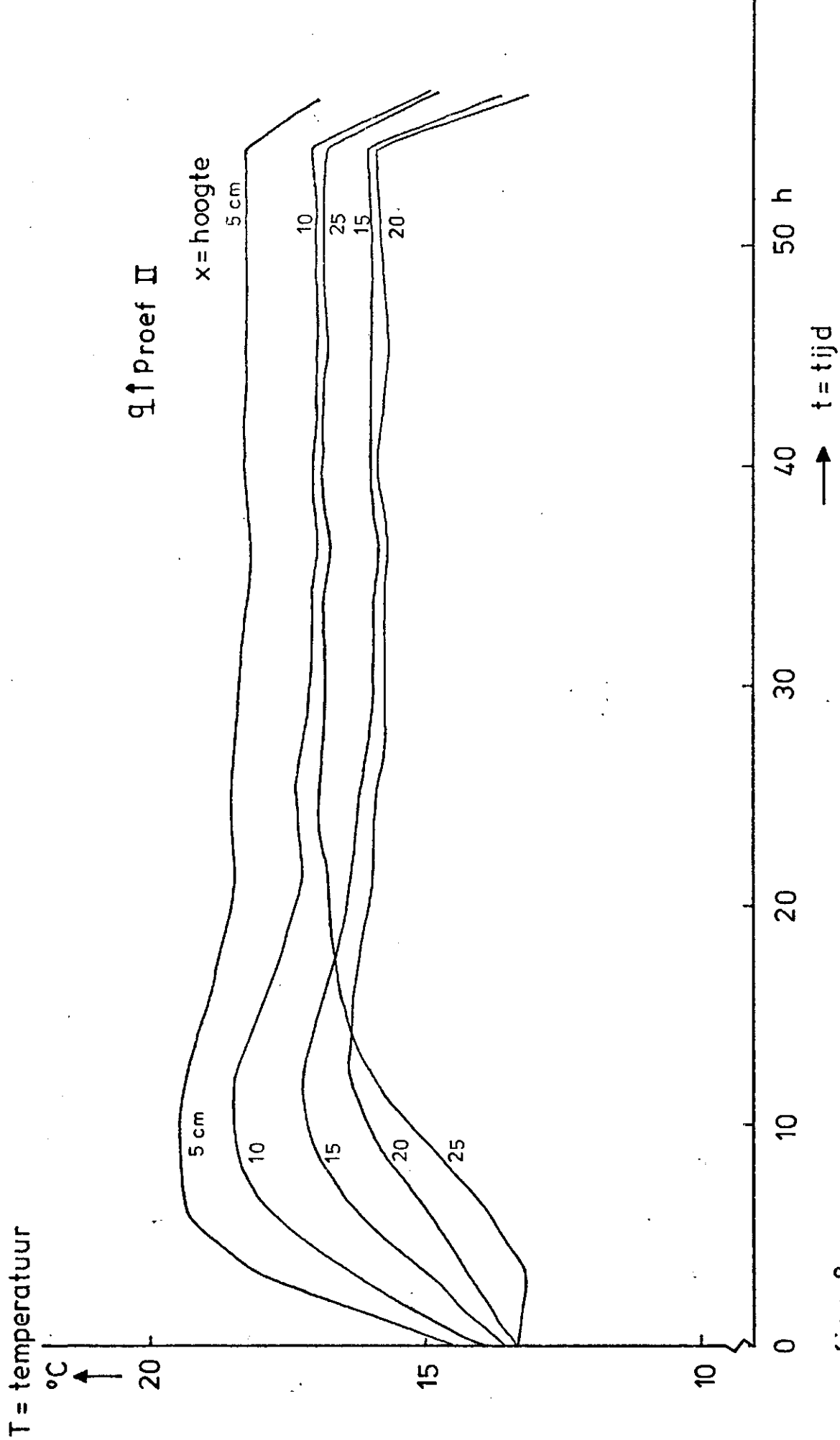


fig: 8

Idem als fig. 7.: Warmtestroom omhoog gericht.

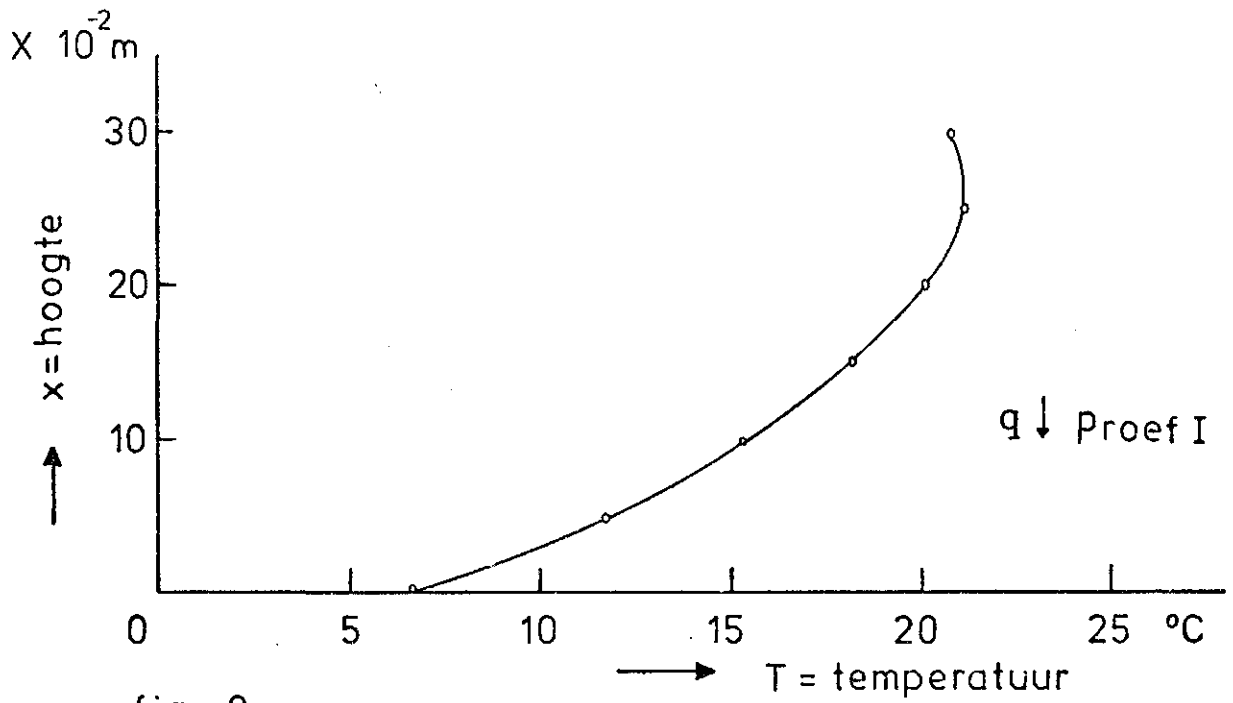


fig : 9

Temperatuurverloop in de laag rozen op het tijdstip  $t = 60$  uur. Warmtestroom omlaag gericht.

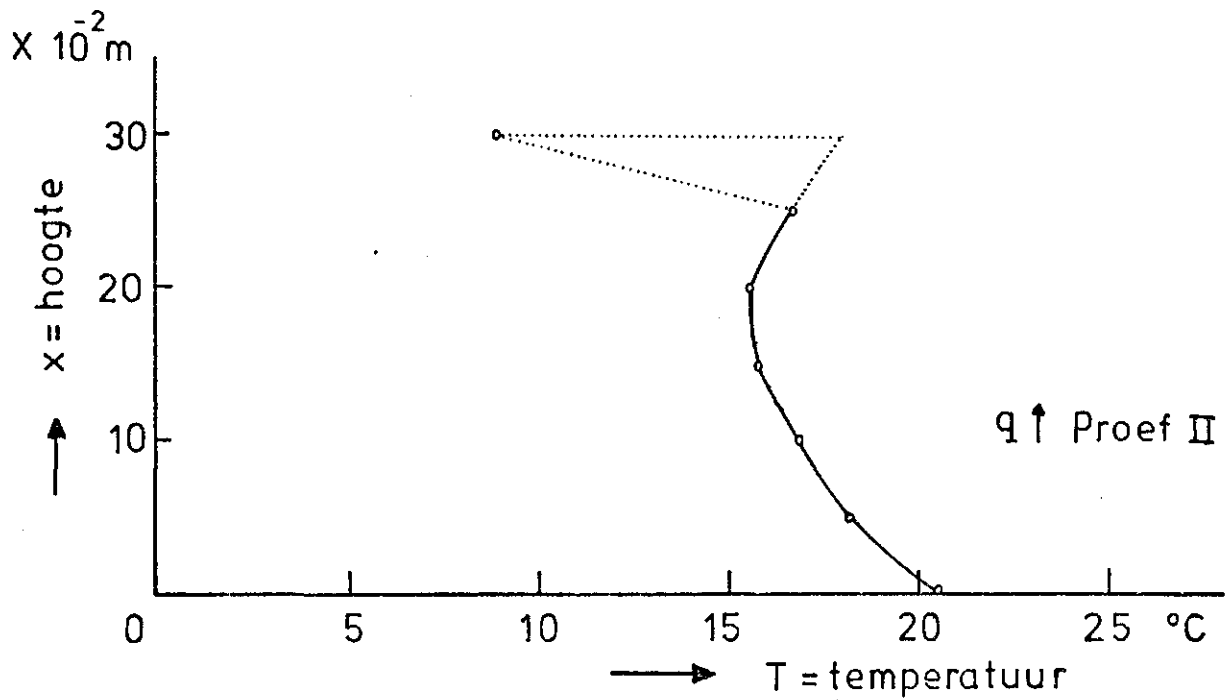


fig : 10

Idem als fig. 9.: Warmtestroom omhoog gericht.



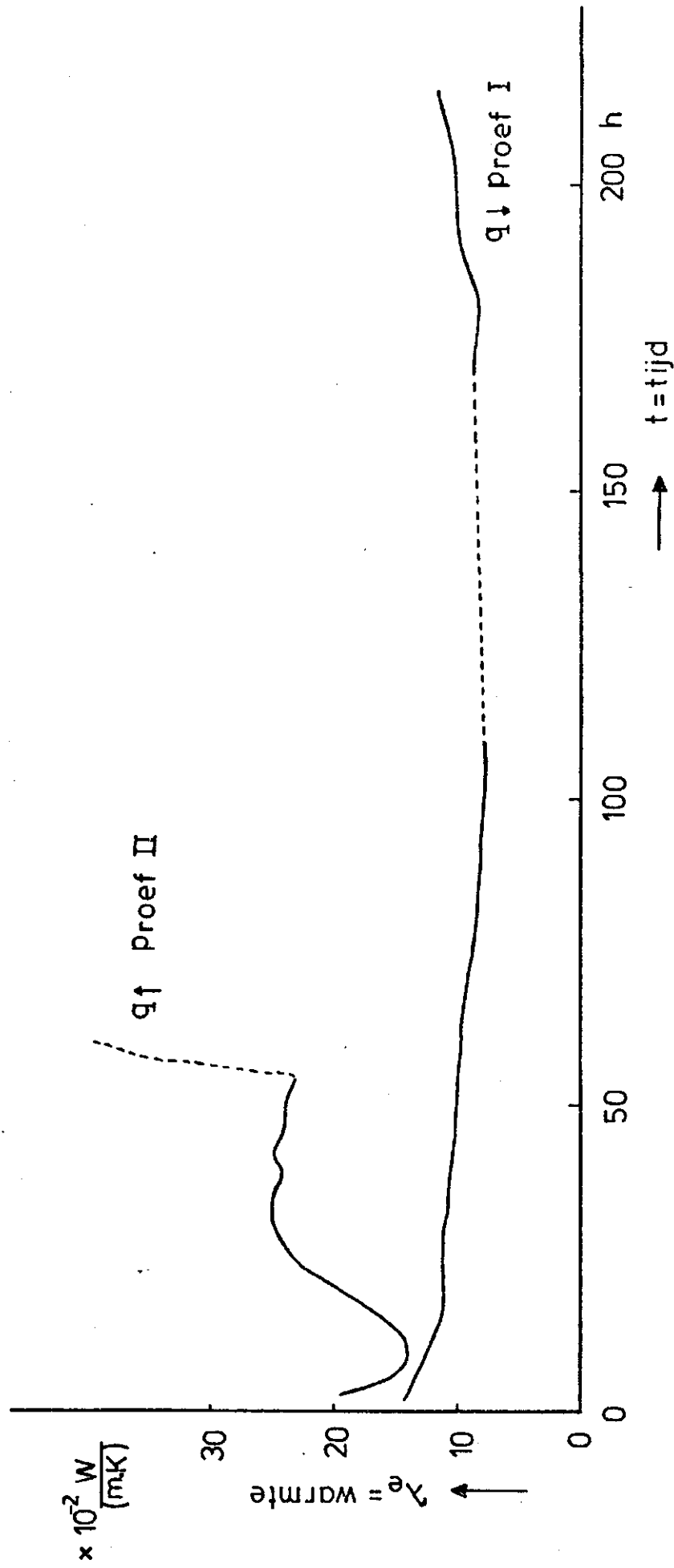


fig : 11

Verloop van de warmtegeleidingscoëfficiënt berekend over de laag rozen van 30 cm, bij een omhoog en omhoog gerichte warmtestroom.

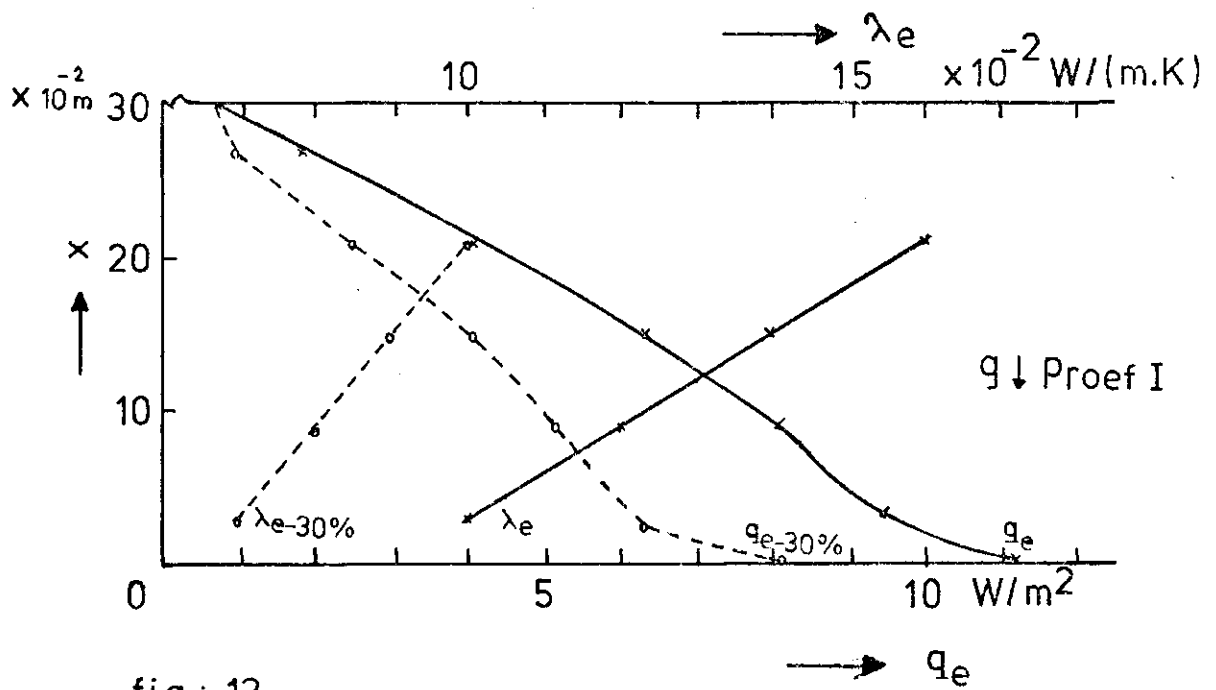


fig : 12

Verloop van de berekende warmtestroomdichtheid en de warmtegeleidingscoëfficiënt in de laag rozen volgens het model bij een omlaag gerichte warmtestroom.

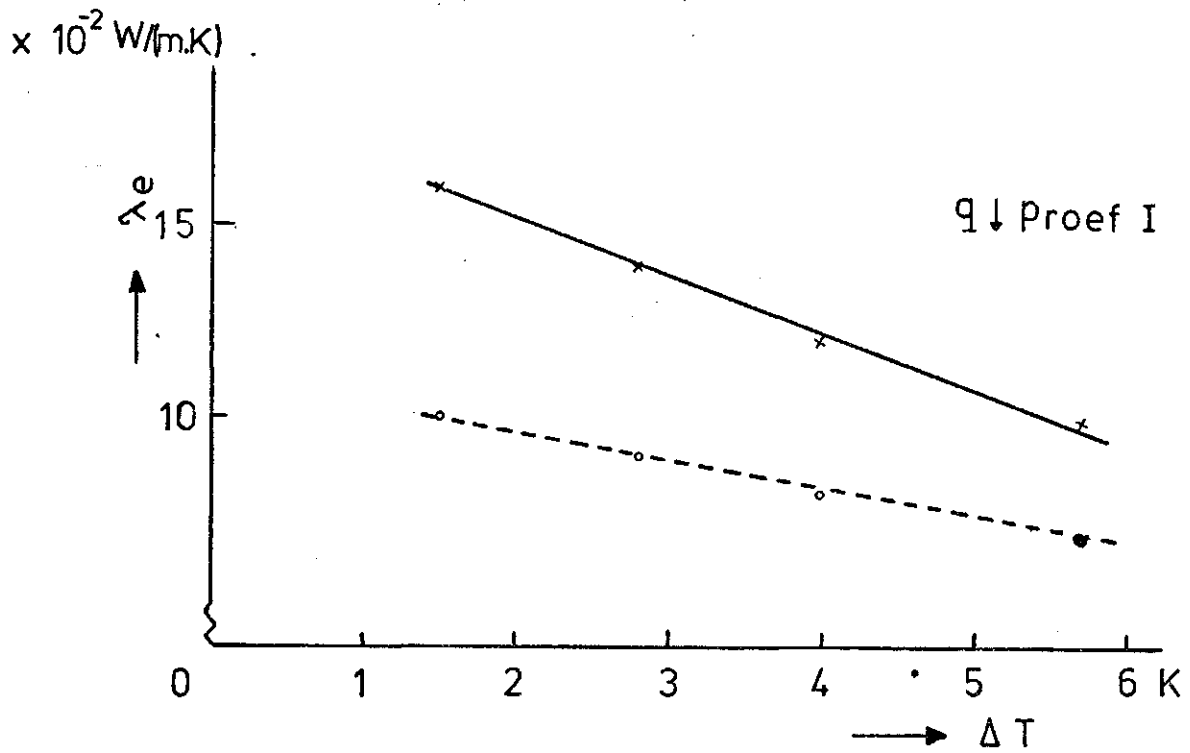


fig : 13

Verband tussen de warmtegeleidingscoëfficiënt en het temperatuurverschil, bij een omlaag gerichte warmtestroom.

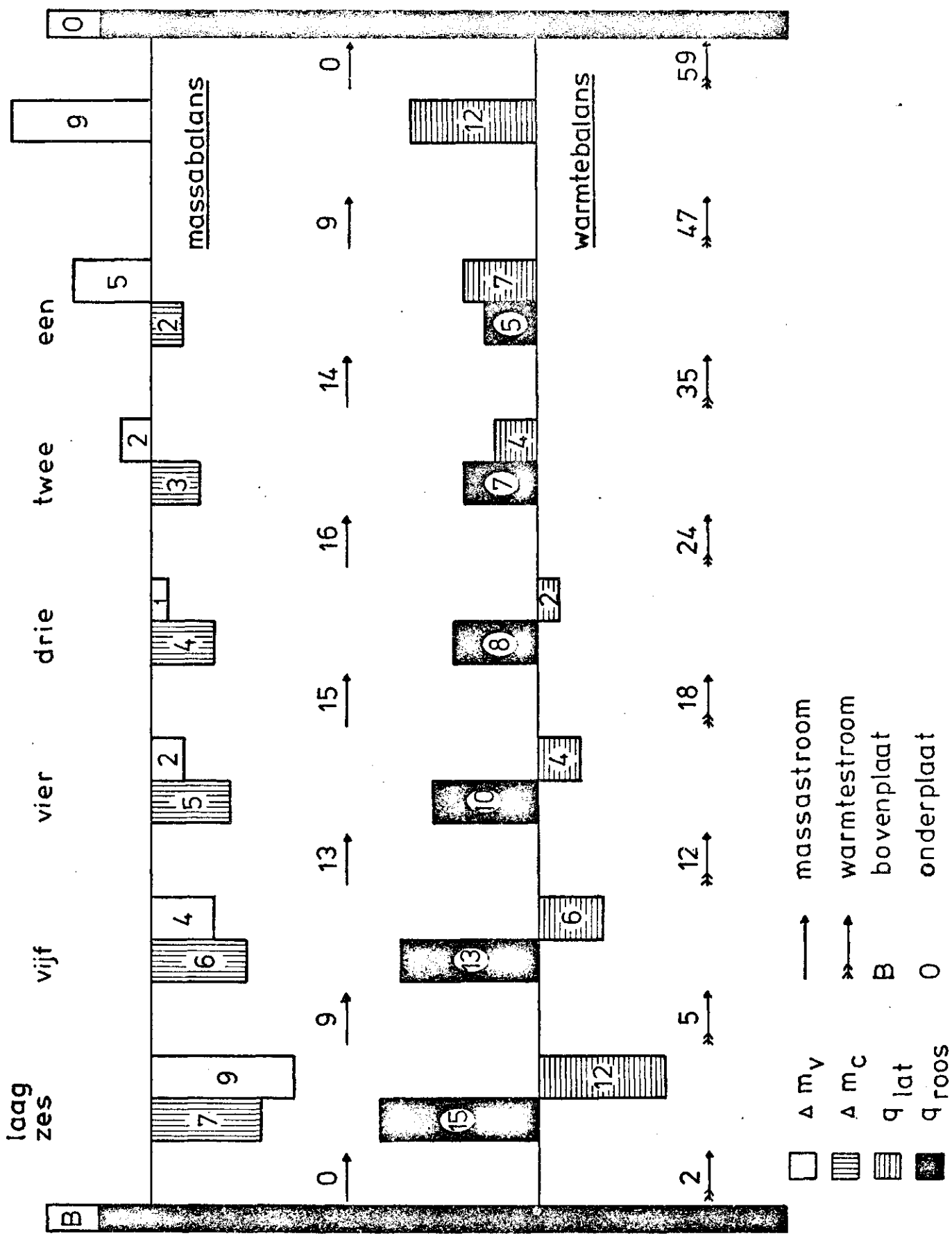


fig: 14 Illustratief model voor de berekening van de warmtestroom per laag rozen.

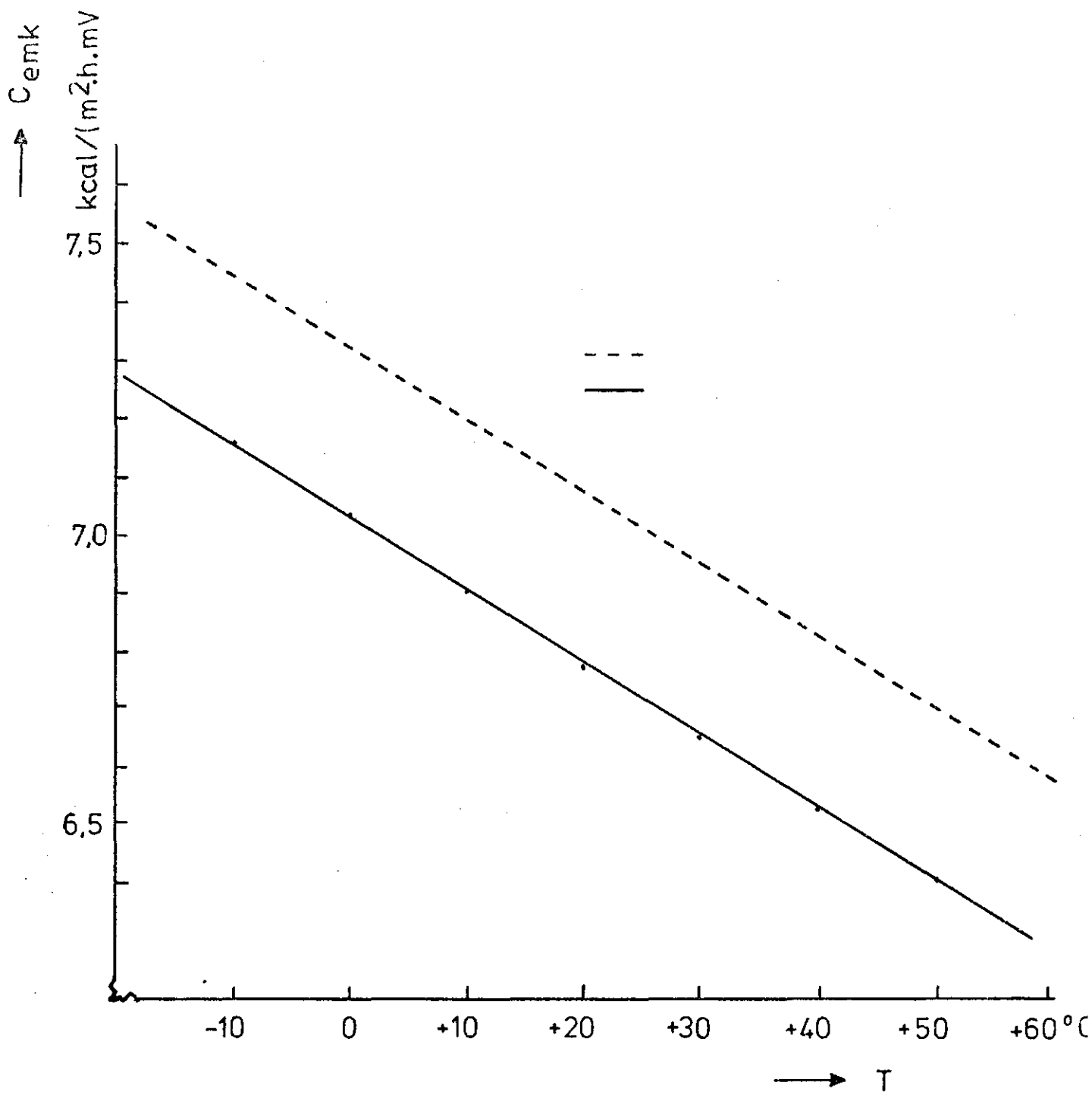


fig : 15

IJkgrafieken van de warmtestroommeters Z89 en Z85.

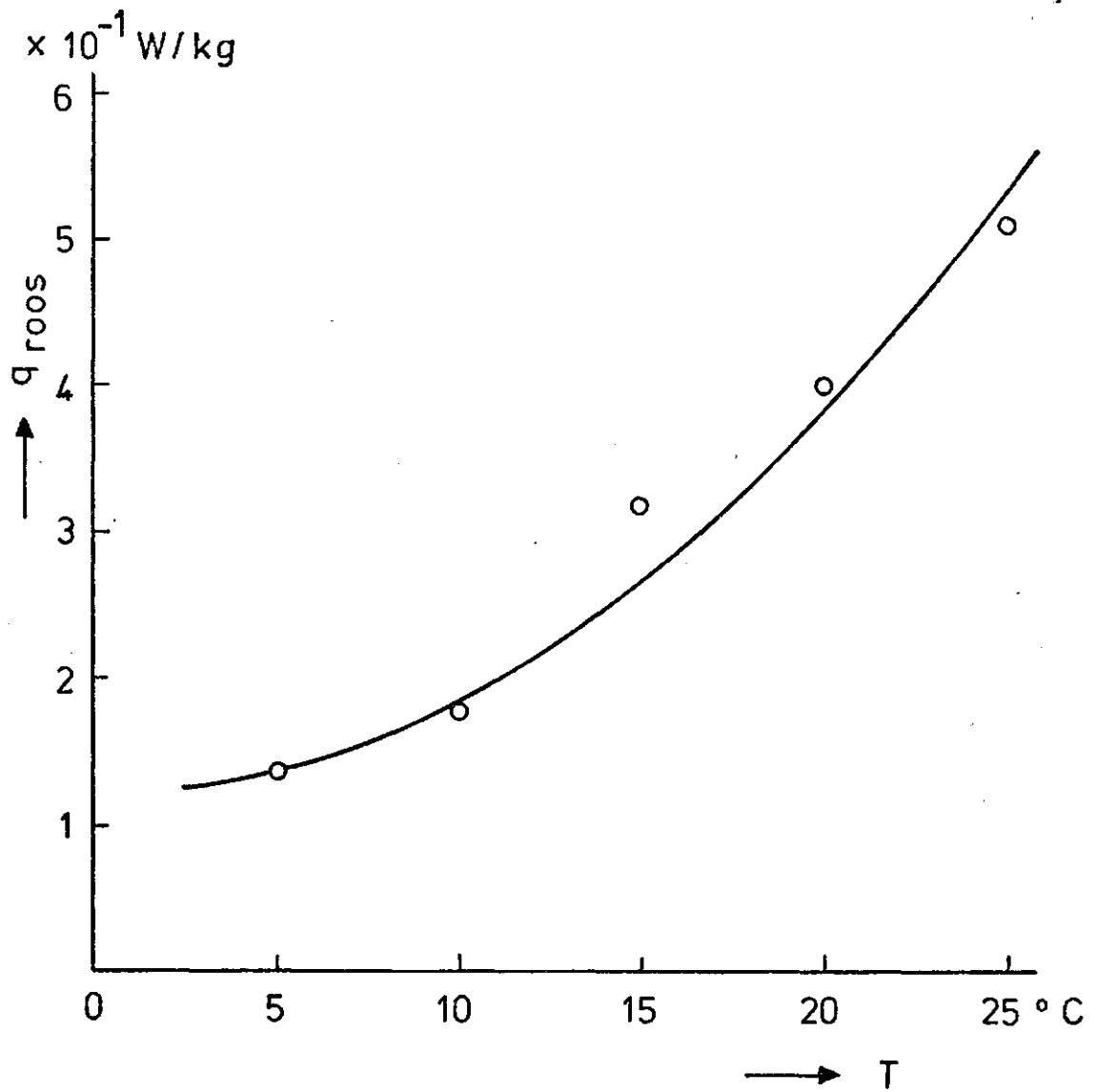


fig: 16

Verband tussen de temperatuur en de warmteproductie van rozen.