KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

Verslagen V-158
(R III-289-1964)

Temperatuurmetingen aan een jonge vrucht van de peer, te De Bilt in 1963.

door

M. Scharringa

De Bilt, oktober 1964.

Temperatuurmetingen aan een jonge vrucht van de peer te De Bilt 1963.

M. Scharringa.

1. Inleiding.

Het is reeds lang bekend dat plantedelen die aan de zonnestraling zijn blootgesteld hogere temperaturen aannemen dan de omringende lucht. Het verschil is o.a. groter naarmate de intensiteit van de zonnestraling hoger en de windsnelheid kleiner is.

Minder algemeen bekend is, dat plantedelen in heldere nachten een lagere temperatuur kunnen aannemen dan de omringende lucht. Ook hierbij is het verschil groter naarmate de windsnelheid kleiner is.

Reeds in 1906 werden door Smith op Ceylon metingen aan bladeren uitgevoerd en deze kwam tot de uitkomst dat bladeren van Rhoeo discolor, een tropische plant met stevige bladeren, in de zon bij windstil weer tenminste 10°C warmer waren dan de omringende lucht. In de laatste tijd was het o.a. Gates die door middel van metingen van de uitstraling van bladeren, o.a. van de eik, "overtemperaturen" heeft gemeten tot tenminste 17°C.

De nachtelijke "ondertemperatuur" heeft een veel kleinere waarde dan de overtemperatuur overdag, hetgeen logisch volgt uit de aanzienlijk kleinere omvang van de stralingshuishouding.

Aan kleine vruchten van appel en peer, die nog in het nachtvorstgevoelige stadium verkeren zijn, voorzover bekend, dergelijke metingen niet verricht. Dit was o.a. de reden waarom in 1963 in de boomgaard van het K.N.M.I. te De Bilt gedurende enkele etmalen het temperatuurverschil tussen een jonge vrucht van de peer en de omringende lucht werd geregistreerd met behulp van een koper-constantaan thermokoppel, aangesloten op een Brown-recorder. De draaddikte zowel bij het koper als bij het constantaan bedroeg 0,012 mm.

2. De opstelling.

In de boomgaard, aan de noordzijde van het middenpad, werd een afgesneden tak van een peer, met daaraan één vruchtje, in een statief geplaatst, zodanig dat zich het afgesneden einde van de tak in een bekerglas met water bevond. Deze methode werd gekozen omdat men dan het vruchtje alle gewenste standen kan geven. Aan de boom is dit veel moeilijker en ondervindt men bovendien hinder van allerlei ongewenste afschermingen door andere delen van de boom. In het vruchtje werd met een dunne naald ongeveer evenwijdig aan de lengte-as van het vruchtje een kanaal geprikt vanaf het aanhechtingspunt van de steel. In dit kanaal werd het thermokoppel gevoerd zodanig dat de las zo goed mogelijk

in het centrum van het vruchtje kwam.
De andere las werd vrij in de lucht opgesteld op een afstand van ongeveer 50 cm van het vruchtje.
De hoogte waarop het peertje en de vrije las zich bevonden bedroeg ongeveer 110 cm. De tak was zo opgesteld dat de lengte-as van het vruchtje zo goed mogelijk verticaal stond, een opstelling die overeenkomt met de situatie in de werkelijkheid.
De vorm van het vruchtje was te vergelijken met die van een afgeknotte kegel. De grootste doorsnede bedroeg ongeveer 12 mm, de lengte ongeveer 25 mm.
Er werd gemeten van 7 juni 12.00 M.E.T. tot 13 juni 12.00 M.E.T. onder omstandigheden die geen extremen deden verwachten.

3. De uitkomsten van de meting.

In de tabel zijn vermeld:

1. de datum.
2. het uurvak (M.E.T.).
3. het gemiddelde temperatuurverschil in °C tussen peer en omringende lucht, telkens over het uurvak (ΔT). Een positief verschil betekent dat het peertje warmer was dan de omringende lucht.
4. het maximale verschil in °C dat in elk van de uurvakken optrad (ΔT_{max}).
5. de luchttemperatuur in °C, aan het einde van het uurvak gemeten in de hut op de normale waarnemingshoogte. (T_{hut}).
6. het weer aan het einde van het uurvak, uitgedrukt in de ww code.
7. de bedekkingsgraad van de hemel in achtsten, uitgezonderd alle cirrusvormen, aan het einde van het uurvak (N_h).
8. de windsnelheid in m/sec., gemeten op 10 m hoogte, aan het einde van het uurvak (ff).
9. de windrichting aan het einde van het uurvak, afgerond op tientallen van graden (dd).
10. de som van de globale straling uit de solarimeterwaarnemingen, op de toren, over het uurvak in cal cm^{-2} uur^{-1} op het horizontale vlak.
11. de zonneschijnduur in uren over het uurvak uit de gegevens van de zonneschijnmeter (Campbell-Stokes) eveneens op de toren.

De betekenis van enkele codecijfers:

ww. 01: bewolking afgenomen.
02: uiterlijk van de hemel onveranderd.
03: bewolking toegenomen.
05: heiïg.

11: mist, niet hoger dan 2 meter; geen gesloten laag.
12: " " " " " " ; gesloten laag.
13: bliksem, lichten of weerlicht, donder niet hoorbaar, geen neerslag op het station.
17: onweer tijdens waarneming maar geen neerslag op het station.
29: onweer in het afgelopen uur.
95: onweer met regen tijdens waarneming.
dd. 000 windstil.
99 windrichting veranderlijk.

Tabel

dat.	uur-vak	$\bar{\Delta}T$	ΔT_{max}	T_{hut}	ww	N_h	ff	dd	glob. str.	zonne-schijn-duur
7/6	13	+3,0	+4,5	23,0	05	0	4,0	350	62,7	1,0
	14	+3,0	+4,2	23,9	05	2	4,1	340	59,4	1,0
	15	+2,4	+4,2	23,0	05	3	4,8	010	41,3	0,3
	16	+0,9	+1,8	21,8	05	0	4,3	360	21,6	.
	17	+0,3	+0,9	20,8	05	0	4,5	350	18,7	0,1
	18	+0,9	+1,2	20,7	05	0	4,7	360	20,6	0,8
	19	+0,3	+0,9	19,4	05	1	3,9	360	13,1	
	20	-0,2	+0,3	18,0	05	1	3,7	350	4,3	
	21	-0,6	-0,9	17,1	05	2	3,1	340	0,3	
	22	-0,6	-0,9	16,9	05	1	3,1	360		
	23	-0,6	-0,9	16,9	05	2	2,5	360		
	24	-0,6	-0,9	16,9	05	8	2,0	010		
8/6	1	-0,3	-0,9	16,9	05	8	0,7	350		
	2	-0,3	-0,6	16,8	95	5	2,0	330		
	3	-0,2	-0,6	17,0	29	6	2,7	360		
	4	-0,6	-0,9	16,8	01	4	2,0	020	0,3	
	5	-0,6	-1,2	16,4	01	1	1,8	020	3,9	
	6	-0,6	-0,9	17,1	02	3	2,2	010	10,4	
	7	-0,3	-0,6	18,0	03	4	2,1	020	17,2	0,3
	8	+0,9	+1,5	19,7	03	5	2,8	060	37,2	0,9
	9	+1,8	+2,7	22,3	01	3	2,1	030	48,0	1,0
	10	+2,7	+4,1	23,2	01	2	2,6	040	58,1	1,0
	11	+3,3	+4,5	24,2	01	1	3,1	040	63,6	1,0
	12	+3,3	+4,5	25,0	05	1	4,0	040	65,6	1,0
	13	+3,6	+5,1	26,1	05	2	4,0	040	62,3	0,8
	14	+2,5	+4,2	27,0	05	3	3,5	030	55,2	0,7
	15	+2,1	+3,6	26,5	05	3	3,9	090	48,7	0,9
	16	+1,8	+3,3	27,1	05	4	3,5	050	39,8	0,7
	17	+1,2	+2,7	24,1	17	5	3,6	040	15,0	0,1
	18	-0,3	-1,2	21,1	95	5	2,1	090	6,8	
	19	-1,2	-2,1	20,5	29	3	1,3	000	5,4	
	20	-0,6	-0,9	19,7	05	1	0,2	000	3,2	
	21	-0,3	-0,9	20,1	05	1	1,5	010	0,3	
	22	-0,9	-2,7	19,6	13	1	1,8	040		
	23	-0,6	-2,4	19,1	03	1	2,2	040		
	24	-0,9	-2,4	17,9	05	3	2,2	050		

dat.	uur-vak	$\bar{\Delta}T$	ΔT_{max}	T_{hut}	ww	N_h	ff	dd	glob. str.	zonne-schijn-duur
9/6	1	-0,6	-2,1	17,1	05	1	1,5	060		
	2	-0,6	-1,5	16,3	05	1	1,2	080		
	3	-0,6	-2,1	15,8	05	1	0,8	99		
	4	-0,3	-0,9	15,5	05	5	0,8	000		
	5	-0,3	-0,6	16,4	05	3	1,5	060	3,2	
	6	-0,6	-1,2	18,1	05	1	1,8	090	12,7	0,4
	7	-0,3	-0,9	20,0	05	1	1,8	090	25,7	1,0
	8	+0,6	+1,2	22,0	05	1	2,6	070	39,1	1,0
	9	+1,2	+2,7	22,7	02	0	2,8	100	51,0	1,0
	10	+1,8	+3,9	24,1	02	0	3,0	060	59,4	1,0
	11	+3,0	+4,8	24,6	03	0	3,4	070	59,4	1,0
	12	+3,0	+4,5	25,5	02	0	4,1	060	66,4	1,0
	13	+3,3	+4,8	25,8	01	1	4,1	060	67,2	1,0
	14	+3,3	+4,5	25,7	02	1	5,0	050	64,4	1,0
	15	+2,7	+3,9	26,2	02	1	5,1	040	58,1	1,0
	16	+2,1	+3,0	25,6	02	1	5,2	030	49,3	1,0
	17	+1,8	+2,4	24,5	01	1	4,8	020	35,9	0,9
	18	+0,9	+1,5	23,0	03	1	4,3	040	18,4	0,4
	19	-0,3	-1,2	22,5	02	1	3,5	040	15,0	0,9
	20	-0,9	-2,1	20,8	02	1	2,2	040	3,5	0,5
	21	-1,5	-3,3	18,8	01	1	2,2	040	0,3	
	22	-1,8	-4,5	17.6	01	1	3,4	040		
	23	-1,2	-2,1	16,5	02	1	2,9	040		
	24	-1,2	-2,4	15,7	02	0	2,9	030		
10/6	1	-0,9	-1,8	14,7	02	0	2,7	050		
	2	-0,9	-1,8	14,1	02	0	2,2	040		
	3	-0,9	-2,1	13,1	02	0	1,0	050		
	4	-0,9	-1,8	13,2	03	0	1,7	030	0,9	
	5	-0,9	-2,4	13,2	03	0	1,2	020	8,3	0,7
	6	-0,6	-2,1	16,3	05	0	1,2	100	19,5	1,0
	7	-1,2	-2,1	17,6	05	0	2,0	020	33.0	1,0
	8	-0,0	-1,8	19,6	01	0	2,7	360	45,4	1,0
	9	+1,5	+2,4	21,6	02	0	2,8	010	56,0	1,0
	10	+1,8	+3,6	22,2	01	0	3,3	030	64,8	1,0
	11	+3,0	+4,2	22,9	03	0	3,5	040	69,2	1,0
	12	+3,6	+4,8	24,2	01	0	2,7	030	71,3	1,0
	13	+3,6	+5,1	24,9	02	0	2,8	040	69,6	1,0
	14	+3,6	+5,7	25,0	03	1	3,4	040	64,8	1,0
	15	+3,6	+5,4	25,1	01	1	3,7	340	58,5	1,0
	16	+2,7	+4,5	25,5	02	1	3,8	360	49,7	1,0
	17	+2,1	+3,0	24,8	03	2	4,6	030	35,9	0,9
	18	+1,2	+2,4	23,7	02	2	4,9	010	25,3	0,9
	19	+0,6	+1,2	22,4	02	2	4,4	020	12,7	1,0
	20	-0,3	-0,9	20,7	02	2	4,0	020	3,2	0,3
	21	-0,9	-1,8	19,5	02	2	2,9	040		
	22	-0,9	-1,8	18,5	03	3	3,0	030		
	23	-0,9	-2,4	16,8	02	3	3,5	020		
	24	-0,9	-1,2	15,9	02	2	3,5	020		
11/6	1	-0,6	-1,2	15,1	01	2	3,6	010		
	2	-0,9	-1,2	14,4	01	1	3,1	010		
	3	-0,6	-0,9	13,8	01	0	2,2	010		
	4	-0,6	-1,2	14,3	03	7	3,0	030	0,3	
	5	-0,6	-1,2	14,4	03	8	3,3	030	1,4	
	6	0,0	-0,3	14,8	02	8	3,2	030	5,7	

dat.	uurvak	$\overline{\Delta T}$	ΔT_{max}	T_{hut}	ww	N_h	ff	dd	glob. str.	zonne-schijn-duur
	7	0,0	0,0	15,1	01	7	4,5	010	11,6	
	8	+0,3	+0,6	15,9	02	7	4,3	020	24,1	0,1
	9	+0,9	+2,1	17,1	02	7	4,4	020	50,2	0,9
	10	+1,8	+3,0	18,6	01	1	4,5	020	58,5	1,0
	11	+3,3	+4,8	19,4	03	2	4,8	030	55,9	0,9
	12	+3,0	+4,5	20,2	01	1	4,4	030	68,8	1,0
	13	+3,9	+6,0	20,9	02	1	4,0	040	68,4	1,0
	14	+4,2	+5,4	20,3	02	1	4,5	030	65,2	1,0
	15	+4,2	+6,0	20,2	02	1	4,7	350	59,3	1,0
	16	+3,6	+4,8	19,2	02	1	4,9	350	51,4	1,0
	17	+3,6	+4,2	18,1	02	1	5,2	350	40,0	1,0
	18	+2,7	+3,9	17,0	02	1	4,9	360	28,1	1,0
	19	+1,8	+3,0	15,5	02	1	4,3	020	14,9	1,0
	20	+1,2	+2,1	14,0	02	1	3,7	010	3,9	0,4
	21	-0,3	-0,9	12,8	02	1	2,4	360	0,5	
	22	-0,9	-1,5	10,7	02	1	1,1	360		
	23	-0,6	-1,5	10,0	02	1	1,7	310		
	24	-0,6	-1,2	9,7	02	1	2,1	320		
12/6	1	-0,6	-1,2	9,0	03	3	1,8	330		
	2	-0,9	-1,2	8,6	01	2	1,9	340		
	3	-0,6	-1,5	7,8	01	0	1,1	320		
	4	-0,6	-1,2	8,6	11	7	1,8	290		
	5	-0,6	-1,2	9,9	12	7	1,9	310	1,7	
	6	-0,3	-0,6	10,6	05	7	1,6	310	5,0	
	7	-0,3	-0,6	11,9	05	8	1,2	310	12,7	
	8	+0,3	+0,9	12,9	05	6	0,8	000	32,2	0,6
	9	+1,5	+3,3	13,8	05	4	1,4	99	51,9	0,9
	10	+2,1	+3,6	14,6	05	3	2,5	190	61,5	1,0
	11	+3,0	+4,8	16,7	05	2	2,2	230	67,2	1,0
	12	+3,3	+5,7	18,7	05	2	2,1	200	70,4	1,0
	13	+3,9	+5,7	20,9	05	0	1,9	160	70,0	1,0
	14	+3,6	+5,7	22,3	05	0	1,8	210	65,2	1,0
	15	+4,2	+6,3	23,2	05	0	2,0	220	57,7	1,0
	16	+3,3	+4,8	23,1	05	0	2,1	210	48,0	1,0
	17	+3,0	+4,5	22,9	05	0	2,6	210	36,3	1,0
	18	+2,4	+3,3	22,5	05	0	2,2	220	26,1	1,0
	19	+1,8	+2,4	20,3	05	0	2,5	320	12,7	0,7
	20	+1,2	+2,4	17,7	05	0	2,0	300	3,6	
	21	-0,3	-1,2	14,8	05	0	1,1	320	0,3	
	22	-0,6	-1,2	12,8	05	0	0,5	000		
	23	-0,6	-0,9	11,7	05	0	0,3	000		
	24	-0,3	-0,6	10,6	05	2	0,0	000		
13/6	1	-0,3	-0,6	9,8	05	0	0,0	000		
	2	-0,3	+0,3	9,8	05	0	0,0	000		
	3	-0,3	-0,3	10,4	05	0	0,0	000		
	4	-0,3	-0,6	10,2	05	1	0,0	000		
	5	-0,3	-0,9	11,1	05	1	0,0	000	2,8	
	6	-0,3	-0,9	14,3	05	1	0,0	000	11,2	0,6
	7	-0,3	-0,3	16,2	05	0	0,8	120	20,6	0,6
	8	-0,3	-1,2	18,7	05	1	1,3	140	29,3	0,7
	9	0,0	-0,9(+0,9)	21,0	05	0	1,9	160	45,4	0,8
	10	+0,6	+2,1	22,2	05	0	2,7	170	47,1	0,6
	11	+0,9	+1,8	23,8	05	0	3,0	120	59,3	0,9
	12	+1,5	+3,0	24,3	05	1	3,0	130	57,7	0,6

4. Opmerkingen bij de uitkomsten.

Hoewel de maximale temperatuurverschillen in de kolom ΔT_{max} werkelijk zijn bereikt, is het goed te bedenken dat het belangrijke verschil in traagheid tussen de vrije las en de peer oorzaak kan zijn van een extreem groot temperatuurverschil in de registratie. Op zonnige dagen fluctueert de luchttemperatuur op geringe hoogte - enkele meters - soms enkele graden in de tijd van enkele minuten. De fijne las van de draadjes (0,012 mm diameter) zal deze fluctuaties snel volgen terwijl de peer dit veel minder doet. Bij het uurgemiddelde van het verschil, kolom $\overline{\Delta} T$, is dit verschijnsel waarschijnlijk niet meer van invloed omdat het in beide richtingen werkt en daardoor wel zal zijn uitgemiddeld.
De gemiddelde verschillen beliepen op 11 en 12 juni ruim 4°C. Bij volkomen windstil weer zullen zij groter kunnen zijn.
De gemiddelde verschillen in de nacht liepen op tot ten hoogste 1,5°C n.l. in de nacht van 9 op 10 juni. Dit grote verschil trad op in de late avond en in de voornacht; later werd het kleiner. Naar schrijvers mening kan men dit toeschrijven aan de voortdurende dauwafzetting op het vruchtje.

5. Berekening van temperatuurverschillen met de omringende lucht uit bekende gegevens.

5.1 In een nog te verschijnen verslag zal de theoretische wijze worden behandeld waarop aan een model-peer temperatuurverschillen met de omringende lucht uit de gegevens van straling en wind, kunnen worden berekend. Hier volgt slechts een korte uiteenzetting van de gevolgde werkwijze met getallenvoorbeelden. Men berekent eerst, uitgaande van de geometrie, de plaats en de oriëntatie van een voorwerp, de verschillende onderdelen van de stralingshuishouding. Is er een netto-overschot dan zal de temperatuur van het voorwerp oplopen, maar dan zal tevens warmte-overdracht aan de omringende lucht plaatsvinden. Ook de stralingshuishouding verandert omdat door de hogere temperatuur de uitstraling van het voorwerp toeneemt.
Het evenwicht is bereikt als de som van de geabsorbeerde straling gelijk is aan de som van de uitgaande straling en de convectieve warmteoverdracht, alles per tijdseenheid. De temperatuur van het voorwerp neemt dan niet meer toe.

Om deze methode te kunnen toepassen dient men uit te gaan van een voorwerp waarvan de geometrie volkomen is bepaald, terwijl men als begintoestand kan aannemen dat de temperaturen van het voorwerp, het aardoppervlak en die van de omringende lucht aan elkaar gelijk zijn.

Als complicaties bij levende objecten komen nog de verdamping (transpiratie) en de eigen warmteproductie, welke laatste bij plantedelen kan worden verwaarloosd.

Wij zullen trachten, volgens deze methode het temperatuurverschil tussen een peer, zoals die bij de meetopstelling werd gebruikt en de omringende lucht te berekenen.

De peer wordt geacht de vorm van een cylinder te bezitten met een straal (r) = 0,6 cm en een hoogte (h) = 2,5 cm. De as van de cylinder is verticaal geplaatst. Het voorwerp bevindt zich op geringe hoogte (tot enkele meters) boven het aardoppervlak dat geacht wordt horizontaal en oneindig uitgebreid en met kort gras begroeid te zijn.

De stralingshuishouding van een dergelijke cylinder kan als volgt worden beschreven.

$$c_1\alpha_1 \cos\varphi . I + c_2\alpha_1 \sin\varphi . I + c_3\alpha_1 . H + c_3\alpha_2 . G + c_3\alpha_2 . S - c_4 \varepsilon \sigma T^4 = \Delta Q \quad (1)$$

Hierin zijn c_1 t/m c_4 constanten (dimensie: cm^2) die betrekking hebben op de geometrie van de cylinder.

α_1 en α_2 zijn de absorptiecoëfficiënten voor kortgolvige, respectievelijk langgolvige straling.

ε is de emissiecoëfficiënt van het voorwerp voor langgolvige straling.

φ is de zonshoogte (hoek met de horizon) in graden.

I is de hoeveelheid energie aan directe zonnestraling per oppervlakte- en per tijdseenheid, loodrecht op de stralingsrichting gemeten (cal $cm^{-2}min^{-1}$).

H is de hoeveelheid energie aan diffuse hemelstraling per oppervlakte- en per tijdseenheid op het horizontale vlak gemeten (cal $cm^{-2}min^{-1}$).

G is de hoeveelheid energie aan atmosferische tegenstraling per oppervlakte- en per tijdseenheid gemeten op het horizontale vlak (cal $cm^{-2}min^{-1}$).

S is de hoeveelheid energie aan door het aardoppervlak uitgezonden straling per tijdseenheid en per oppervlakteeenheid over een halve bol (cal $cm^{-2}min^{-1}$)

ΔQ is de verandering van de warmteinhoud van het voorwerp per tijdseenheid (cal min^{-1}).

De constanten c_1 t/m c_4.

c_1 is de oppervlakte van het verticale snijvlak door de as van de cylinder, dus 2rh. Dit vlak denken we ons steeds loodrecht op het verticale vlak door de richting van de directe zonnestraling.

De directe zonnestraling treft het vlak 2rh onder een hoek $(90^\circ - \varphi)$ met de verticaal en de hoeveelheid per oppervlakteeenheid is evenredig met $\cos\varphi$.

c_2 is de oppervlakte van het bovenvlakje, dus πr^2. De directe zonnestraling

treft dit vlakje onder een hoek φ en de hoeveelheid is evenredig met sin φ.
c_3 is de oppervlakte van het bovenvlakje vermeerderd met de halve oppervlakte van de cylindermantel, dus $\pi r^2 + \pi rh = \pi r\ (r + h)$.
De mantel is op te vatten als een verticaal vlak waarop per eenheid van oppervlakte slechts de helft van de diffuse straling van het hemelgewelf of van het aardoppervlak, vergeleken met het horizontale vlak, wordt ontvangen.
C_4 is de totale oppervlakte van de cylinder, dus $2\ \pi r\ (r + h)$.

De constanten α_1, α_2 en ε.

α_1 is de absorptiecoëfficiënt van het oppervlak van het voorwerp voor kortgolvige straling. Aangezien we met een groen plantedeel te maken hebben, stellen we de waarde op 0,80.
α_2 is de absorptiecoëfficiënt voor langgolvige straling, te stellen op 0,94.
ε is de emissiecoëfficiënt voor langgolvige straling, zowel van het voorwerp als van het grasdek. We kunnen de waarde ervan eveneens stellen op 0,94.

De waarden van I, H, G, S, T en φ.

Wij gaan er van uit dat de hemel onbewolkt is.
De intensiteit van de directe zonnestraling, loodrecht op de stralingsrichting stellen we op 1 cal cm^{-2} min^{-1}.
De intensiteit van H, op het horizontale vlak, kan bij onbewolkte hemel worden gesteld op 0,2 cal $cm^{-2}min^{-1}$.
De tegenstraling G, kan worden geschat met behulp van de formule van Ångström. Deze formule luidt:

$$G = \sigma T_L^4\ (0{,}820 - 0{,}250\ .\ 10^{-0{,}126.e})\ \text{cal cm}^{-2}\text{min}^{-1}. \qquad (2)$$

Hierin is T_L de luchttemperatuur op waarnemingshoogte (^oK) en e de dampspanning in mm Hg. Gaan we uit van een luchttemperatuur van 295^oK en een relatieve luchtvochtigheid van 50% dan is e = 10,0 mm. De waarde van G bedraagt dan 0,50 cal $cm^{-2}min^{-1}$ (op het horizontale vlak).
De waarde van S bedraagt 0,94 σT^4. Bij T = 295^oK bedraagt S: 0,578 cal $cm^{-2}min^{-1}$. (σ is de constante uit de wet van Stephan-Boltzmann met de waarde: 8,1237. 10^{-11}cal $cm^{-2}min^{-1}$ $^oK^{-4}$).
Stellen we de zonshoogte op 50^o dan kunnen we Δ Q berekenen.

In de vergelijking (1) wordt dan de som van de termen waarin I voorkomt:

	2,235	cal min^{-1}
De waarde van de term waarin H voorkomt:	0,934	"
De waarde van de termen waarin G en S voorkomen:	5,917	"
De door het voorwerp geabsorbeerde stralingsenergie bedraagt dus:	9,086	"

De totale uitstraling van het voorwerp bedraagt 6,752 cal min^{-1}.
De netto-winst aan warmte-energie is dus 2,334 cal min^{-1}.

De temperatuur van het cylindertje zal dus oplopen tot een zodanige waarde dat de som van de toeneming van de uitstraling, ten opzichte van die bij de aanvangstoestand en de convectieve warmte-overdracht aan de omringende lucht gelijk is aan het bedrag van de netto-winst.
Zolang dit evenwicht nog niet is bereikt wordt een deel van de netto-winst gebruikt om de temperatuur van het cylindertje te verhogen. In de evenwichtstoestand is deze post nul geworden.
De convectieve warmteoverdracht, bij autoconvectie, kan worden geschat met behulp van de formule:

$$6{,}0 \cdot 10^{-3}\ (\Delta T/2r)^{1/4}\Delta T \cdot 2\pi rh \cdot\ (\mathrm{cal\ min^{-1}}) \qquad (3)$$

Deze semi-empirische formule wordt in de warmtetechniek gebruikt.

De toeneming van de uitstraling van het voorwerp kan worden berekend met:

$$\varepsilon\sigma\,(T+\Delta T)^4 - \varepsilon\sigma T^4\ (\mathrm{cal\ cm^{-2}min^{-1}}) \qquad (4)$$

Van het product $(T+\Delta T)^4 = T^4 + 4\,T^3\Delta T + 6\,T^2\,(\Delta T)^2 + 4\,T\,(\Delta T)^3 + (\Delta T)^4$ verwaarlozen we de termen waarin tweede en hogere machten van ΔT voorkomen.

De uitdrukking voor de toeneming van de uitstraling wordt dan:

$$4\,c_4\varepsilon\,.\sigma.T^3.\,\Delta T\ (\mathrm{cal\ min^{-1}}) \qquad (5)$$

Deze vereenvoudiging is slechts geoorloofd als $\Delta T \ll T$. In ons geval betekent de vereenvoudiging dat bij $\Delta T = 10^{\circ}C$ de uitgaande straling ongeveer 0,6 % te laag wordt berekend. Bij $\Delta T = 20^{\circ}C$, is de fout ongeveer 2%.

Als we de energiebalans van het cylindertje, in de evenwichtstoestand, opschrijven dan is deze als volgt:

$$S_a - S_e - 4c_4\,\varepsilon\sigma\ T^3\Delta T - 6{,}0.10^{-3}\ (\Delta T/2r)^{1/4}\Delta T\ .\ 2\pi rh = 0 \qquad (6)$$

Hierin is S_a de geabsorbeerde hoeveelheid stralingsenergie en deze bedraagt 9,086 cal min^{-1}. S_e is de hoeveelheid geëmitteerde stralingsenergie in de begintoestand en deze bedraagt 6,752 cal min^{-1}.
Vullen we ook de andere bekende waarden in dan ontstaat een vergelijking waarin slechts ΔT als onbekende voorkomt:

$$0{,}0913\,\Delta T + 0{,}054\,\Delta T\ (\Delta T)^{1/4} = 2{,}334 \qquad (7)$$

Voor de - numerieke - oplossing van deze vergelijking is het gemakkelijk om $(\Delta T)^{1/4}$ als onbekende te nemen zodat de vorm wordt:

$$x^4\ (0{,}054x + 0{,}0913) = 2{,}334 \qquad (8)$$

We vinden voor x als meest nauwkeurige waarde: 1,867, zodat ΔT ongeveer $12^{\circ}C$ bedraagt.

Als we nu aannemen dat het niet windstil is, maar dat er loodrecht op de as van de cylinder een windsnelheid van 1 m sec^{-1} wordt gemeten dan hebben we niet meer met autoconvectie doch met geforceerde convectie te maken. Dan geldt voor deze vorm van warmteverlies van een cylinder volgens een eveneens aan de warmtetechniek ontleende semi-empirische formule:

$$6{,}17 \cdot 10^{-3} \cdot (v/4r^2)^{1/3} \cdot \Delta T \ (cal\ cm^{-2} min^{-1}). \qquad (9)$$

Met $v = 100$ cm sec^{-1} en $r = 0{,}6$ cm, vinden we dan voor het convectieve warmteverlies van de gehele cylindermantel:

$$0{,}2388\ \Delta T\ cal\ min^{-1}.$$

De vergelijking waaruit ΔT kan worden opgelost luidt nu:

$$(0{,}0913 + 0{,}2388)\Delta T = 2{,}334 \qquad (10)$$

Hieruit volgt: $\Delta T = 7^oC$.

5.2. <u>De gebruikte formules voor de convectieve warmteoverdracht.</u>

De formules (3) en (9) zijn ontleend aan:

Mc.Adams W,H, "Heat Transmission" Mc. Graw Hill 1942.

Eckert. E,R,G, "Introduction to the Transfer of Heat and Mass" Mc.Graw Hill 1950.

Gates. David,M, "Energy Exchange in the Biosphere" Harper and Row 1962.

Deze semi-empirische formules zijn ontworpen voor technische doeleinden. Wat ons voorbeeld aangaat schuilt er een moeilijkheid in de verhouding tussen lengte en diameter van de cylinder. In de techniek wordt de warmteoverdracht vanaf de eindvlakken verwaarloosd. Deze fout is klein omdat de verhouding tussen de oppervlakte van de mantel en die van de beide eindvlakjes (h/r) als regel groter zal zijn dan in ons voorbeeld waar deze ongeveer 4 bedraagt.

Het schijnt daarom niet juist de convectieve warmteoverdracht vanaf de eindvlakjes te verwaarlozen. Het is echter moeilijk in te zien hoe deze vlakjes in rekening moeten worden gebracht. We hebben daarom de oppervlakte van de cylindermantel met een bedrag $2\pi r^2$ vergroot. De uitdrukking (7) wordt dan:

$$0{,}0913\ \Delta T + 0{,}0669\ \Delta T.\ (\Delta T)^{1/4} = 2{,}334 \qquad (11)$$

Als meest nauwkeurige waarde voor ΔT vinden we ongeveer 11^oC. Vergeleken met de eerder gevonden waarde van 12^oC is de invloed van de op deze wijze in rekening gebrachte eindvlakjes niet groot; de orde van grootte van ΔT verandert niet.

Bij een aangenomen windsnelheid van 1 m sec^{-1} loodrecht op de as van de cylinder geldt een dergelijke moeilijkheid, maar hier kunnen we de convectieve warmteoverdracht vanaf de eindvlakjes in rekening brengen door gebruik te maken van een aan eerder genoemde bronnen ontleende formule, geldende voor een vlakke plaat evenwijdig aan de windrichting, van de volgende gedaante:

$$5{,}73 \cdot 10^{-3}\sqrt{\frac{v}{L}} \quad \text{cal cm}^{-2}\ \text{min}^{-1}\ {}^{o}\text{C}^{-1} \tag{12}$$

($v = 100$ cm sec^{-1}; $L = 2r = 1{,}2$ cm)

Deze uitdrukking, gecombineerd met (5) en (9) geeft:

$$0{,}448\ \Delta T = 2{,}334 \tag{13}$$

Bij het in rekening brengen van de eindvlakjes wordt de waarde van ΔT: $5{,}2^{o}C$.

Om de berekende en de gemeten waarden van ΔT te kunnen vergelijken moet men bedenken dat wij rekenen met een evenwichtstoestand die theoretisch eerst na oneindig lange tijd wordt bereikt als de omstandigheden niet veranderen. In werkelijkheid komt dit buiten niet voor. De zonshoogte verandert continu en ook de luchttemperatuur is niet constant, zelfs niet gedurende het uur midden op de dag. In het geval van de onderstelde autoconvectie kan deze niet dan gedurende zeer korte tijd bestaan omdat toch af en toe luchtverplaatsing optreedt en de convectie forceert. Het ligt voor de hand dat een uurgemiddelde van ΔT een waarde zal hebben die tussen de evenwichtswaarde bij autoconvectie en die bij geforceerde convectie ligt en wel het dichtst bij de laatste. Dat men rekening houdende met deze omstandigheid een goede overeenstemming met de gemeten waarde vindt kan nog toevallig zijn. Een experiment met lichaampjes met bekende physische eigenschappen zal dit moeten uitwijzen.

5.3. De verdamping.

Zoals reeds werd opgemerkt is er bij levende objecten een complicatie te verwachten omdat zij water verdampen. Wat deze verdamping betreft kan men voor de peer uit ons voorbeeld een bedrag schatten, maar de uit de literatuur bekende gegevens hebben bijna alle betrekking op een blad of op een gehele plant.

Deze waarden blijken zelfs onder vergelijkbare omstandigheden nog vrij sterk uiteen te lopen. Ten dele regelt de plant zijn verdamping zelf door het openen en sluiten van de huidmondjes.

Nu is een vrucht anders gebouwd als een blad en het wil ons voorkomen dat men met een geringere verdamping moet rekenen.

Uit een aantal gegevens over de verdamping van een blad van Helianthus annuüs (eenjarige zonnebloem) blijkt dat bij een windsnelheid van 16 m sec^{-1} de verdamping van bladeren - onder- en bovenzijde samen - ongeveer

0,5 mg $cm^{-2}min^{-1}$ bedroeg. Aangezien de verdampingssnelheid zeer sterk afhankelijk is van de windsnelheid is een schatting van de verdamping van 0,1 mg $cm^{-2}min^{-1}$ bij zeer geringe windsnelheid wellicht nog aan de hoge kant. Rekenen wij dat de verdamping van het peertje deze orde van grootte heeft, dan vinden we voor het vruchtje ongeveer 1 mg min^{-1}.
Stellen we de verdampingswarmte op 580 cal g^{-1} ($T = 30^oC$), dan zou het vruchtje als gevolg van deze verdamping 0,6 cal min^{-1} verliezen.
De temperatuurverschillen onder de beschouwde omstandigheden worden, als we dit extra warmteverlies in rekening brengen:
Bij vrije convectie: $8,4^oC$ en bij geforceerde convectie (1 m sec^{-1}): $3,8^oC$.

5.4. Het temperatuurverschil in de nacht.

Het temperatuurverschil in de nacht, als het helder en windstil is, kunnen we op overeenkomstige wijze schatten als dat overdag.
De energiebalans van het vruchtje kunnen we nu als volgt opschrijven:

$$c_3\alpha_2 G + c_3\alpha_2 S - c_4\varepsilon\sigma(T - \Delta T)^4 - 6{,}0 \,.\, 10^{-3}\left(\frac{\Delta T}{2r}\right)^{1/4} .\, \Delta T .\, c_4 = \Delta Q \quad (14)$$

$G = 0,35$ cal $cm^{-2}min^{-1}$; berekend met (2) waarbij $T = 275^oK$ en $f = 85\%$.
In de evenwichtstoestand is $\Delta Q = 0$.
De vergelijking waaruit ΔT kan worden opgelost luidt:

$$4{,}3208 - 5{,}105 + 0{,}0742\ \Delta T + 0{,}0639\ (\Delta T)^{1/4} .\ \Delta T = 0.$$

Stel $(\Delta T)^{1/4} = x$, dan is:

$$x^4\ (0{,}0742 + 0{,}0669\ x) = 0{,}7845. \quad (15)$$

De meest nauwkeurige waarde van x bedraagt 1,46 en hieruit volgt:

$$\Delta T = -4{,}5^oC.$$

Verdamping is hierbij niet in rekening gebracht omdat deze als regel onder de gegeven omstandigheden ontbreekt. Wel zal condensatie van waterdamp vanuit de atmosfeer kunnen optreden. Zou deze op het gehele vruchtje 0,5 mg min^{-1} bedragen dan wordt de berekende waarde van ΔT ongeveer -3^oC.

6.1. Berekening van het temperatuurverschil als het vruchtje voor een haag is opgesteld.

Wij zijn uitgegaan van een cylinder die volkomen vrij stond opgesteld, doch in ons geval is dit niet in overeenstemming met de werkelijkheid. Wij nemen daarom aan dat de cylinder deel uitmaakt van een oneindig lange, rechte en hoge haag en we nemen verder aan dat die haag dezelfde temperatuur aanneemt als de cylinder.
De energiebalans kunnen we dan als volgt opschrijven.

$$c_1\alpha_1 \cos\varphi I + c_2\alpha_1 \sin\varphi I + 0{,}5\ c_3\alpha_1 H + 0{,}5\ c_3\alpha_2 G + 0{,}5\ c_3\alpha_2 S + c_3\alpha_2\varepsilon\sigma (T + \Delta T)^4 - c_4\alpha_2\varepsilon\sigma(T + \Delta T)^4 - c_4 .6{,}0 .10^{-3}\left(\frac{\Delta T}{2r}\right)^{1/4} .\Delta T - \Delta Q = 0. \quad (16)$$

Uitgaande van $T = 295^{o}K$, $G = 0{,}50$ cal $cm^{-2}min^{-1}$ en de evenwichtstoestand waarin $\Delta Q = 0$, kunnen we schrijven:

$$\Delta T \left\{0{,}0458 + 0{,}0669\ (\Delta T)^{1/4}\right\} = 2{,}3858. \qquad (17)$$

Hieruit volgt: $\Delta T = 14^{o}C$.

Brengen we een verdamping van 1 mg min^{-1} in rekening dan wordt de vergelijking:

$$\Delta T \left\{0{,}0458 + 0{,}0669\ (\Delta T)^{1/4}\right\} = 1{,}7858. \qquad (18)$$

Hieruit volgt: $\Delta T = 10{,}5^{o}C$.

Houden we rekening met een ventilatie van 1 m sec^{-1}, loodrecht op de as van de cylinder, dan wordt de energiebalans:

(16) tot en met de 7e term $- 2\pi rh \cdot 6{,}17.10^{-3} \left(\frac{v}{4r}2\right)^{1/3} \cdot \Delta T - 2\pi r^{2} \cdot 5{,}73 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{v}{2r}} \cdot \Delta T = 0.$ (19)

of: $0{,}4028\ \Delta T = 2{,}3858$ waaruit voor ΔT de waarde $5{,}9^{o}C$ volgt.

Brengen we ook hier een verdamping van 1 mg min^{-1} in rekening dan wordt de waarde van $\Delta T = 4{,}4^{o}C$.

Het ligt meer voor de hand, hier een groter bedrag, bijvoorbeeld het dubbele, voor de verdamping in rekening te brengen. We vinden in dit geval voor ΔT de waarde: $2{,}9^{o}C$.

Bij dezelfde opstelling van de cylinder kunnen we, in het geval van autoconvectie, de energiebalans voor de nacht als volgt opschrijven:

$$0{,}5\ c_3\alpha_2 G + 0{,}5\ c_3\alpha_2 S + c_3\alpha_2\ \varepsilon\ \sigma(T - \Delta T)^4 - c_4\alpha_2\ \varepsilon\ \sigma(T - \Delta T)^4$$
$$- c_4 \cdot 6{,}0.10^{-3} \left(\frac{\Delta T}{2r}\right)^{1/4} \cdot \Delta T - \Delta Q = 0. \qquad (20)$$

Met $T = 275^{o}K$, $G = 0{,}35$ cal $cm^{-2}min^{-1}$ levert deze uitdrukking de vergelijking:

$$\Delta T \left\{0{,}03709 + 0{,}0669\ (\Delta T)^{1/4}\right\} = -0{,}39251. \qquad (21)$$

Hieruit volgt: $\Delta T = -3^{o}C$.

Zouden we hier een condensatie van 0,5 mg min^{-1} in rekening brengen, dan wordt $\Delta T = -1^{o}C$.

Bij geforceerde convectie met een aangenomen windsnelheid van 1 m/sec^{-1}, loodrecht op de as van de cylinder, wordt de energiebalans:

$$0{,}5\ c_3\alpha_2 G + 0{,}5\ c_3\alpha_2 S + c_3\alpha_2\ \varepsilon\ \sigma(T - \Delta T)^4 - c_4\alpha_2\ \varepsilon\ \sigma(T - \Delta T)^4$$
$$+ 2\pi rh.\ 6{,}17.10^{-3} \left(\frac{v}{4r}2\right)^{1/3}.\ \Delta T + 2\pi r^2.\ 5{,}73.10^{-3} \left(\frac{v}{2r}\right)^{1/2} + \Delta Q = 0. \qquad (22)$$

In de evenwichtstoestand met $\Delta Q = 0$ wordt deze vorm:

$$- 0{,}32018\ \Delta T = 0{,}39251. \qquad (23)$$

De waarde van $\Delta T = - 1{,}2^{o}C$.

6. **Recapitulatie van de berekende waarden van ΔT in de evenwichtstoestand (Q = 0).**

I dag.

A. Opstelling vertikaal en vrij.

1. autoconvectie, zonder verdamping. $\Delta T = 11^\circ$
2. autoconvectie; verdamping geschat op 1 mg min^{-1}. $\Delta T = 8,4^\circ$
3. geforceerde convectie, zonder verdamping: ventilatiesnelheid 1 m sec^{-1}. $\Delta T = 5,2^\circ$
4. als 3 doch met een verdamping van 1 mg min^{-1}. $\Delta T = 3,8^\circ$
5. als 3 doch met een verdamping van 2 mg min^{-1} $\Delta T = 2,5^\circ$

B. Opstelling voor een haag.

1. autoconvectie; zonder verdamping. $\Delta T = 14^\circ$
2. autoconvectie; verdamping geschat op 1 mg min^{-1}. $\Delta T = 10,5^\circ$
3. geforceerde convectie, zonder verdamping; ventilatiesnelheid 1 m sec^{-1}. $\Delta T = 5,9^\circ$
4. als 3, doch met een verdamping van 1 mg min^{-1}. $\Delta T = 4,4^\circ$
5. als 3, doch met een verdamping van 2 mg min^{-1}. $\Delta T = 2,9^\circ$

II nacht.

A. Opstelling vertikaal en vrij.

1. autoconvectie, zonder verdamping/condensatie. $\Delta T = -4,5^\circ$
2. autoconvectie; condensatie geschat op 0,5 mg min^{-1}. $\Delta T = -3^\circ$
3. geforceerde convectie, zonder verdamping/condensatie; ventilatiesnelheid 1 m sec^{-1}. $\Delta T = -1,2^\circ$
4. als 3 doch met een condensatie van 0,5 mg min^{-1}. $\Delta T = -0,9^\circ$

B. Opstelling voor een haag.

1. autoconvectie, zonder verdamping/condensatie. $\Delta T = -2^\circ$
2. autoconvectie; condensatie geschat op 0,5 mg min^{-1}. $\Delta T \quad 0^\circ$
3. geforceerde convectie, zonder verdamping/condensatie; ventilatiesnelheid 1 m sec^{-1}. $\Delta T = -0,7^\circ$
4. als 3 doch met een condensatie van 0,5 mg min^{-1} $\Delta T \quad 0^\circ$

7. **Samenvatting en conclusie.**

In een boomgaard te De Bilt werd in 1963 van 7 juni 12 uur M.E.T. tot 13 juni 12 uur M.E.T. het temperatuurverschil tussen een vertikaal opgestelde jonge vrucht van de peer en de omringende lucht geregistreerd. Het was gedurende die tijd overwegend zonnig weer met vrij veel wind, terwijl de nachten helder en af en toe windstil waren.

Het temperatuurverschil werd bepaald met behulp van een fijn thermokoppel aangesloten op een Brown-recorder. De luchttemperatuur werd gemeten met een onafgeschermde las en die van het vruchtje door een las in het centrum van de vrucht.
Daar metingen, indien zij goed worden uitgevoerd, zeer tijdrovend zijn en bij een beperkt meetprogramma slechts de waarde hebben van puntmetingen in een inhomogeen milieu, werd getracht de orde van grootte van dergelijke temperatuurverschillen te berekenen. Daarbij werd uitgegaan van de omstandigheden waaronder werd gemeten en van de daarbij behorende, waarschijnlijke, omstandigheden van straling en wind.
De uitkomsten zijn niet in strijd met de gemeten waarden, als men de uitkomsten bij veronderstelde autoconvectie buiten beschouwing laat. Deze vallen namelijk te hoog uit, doch daarbij moet worden bedacht dat de toestand waarbij slechts autoconvectie optreedt, overdag buiten in het geheel niet voorkomt en 's nacht hoogstens wordt benaderd.
Deze bewering steunt op de waargenomen temperatuuronrust die moeilijk anders dan aan voortdurende uitwisseling van lucht kan worden toegeschreven.
Voorbeelden daarvan zijn opgenomen in het verslag V - 33 (R III-221-1958) o.a. op blz. 29 waar is te vinden dat tussen 02.21 M.E.T. en 02.33 M.E.T. de temperatuur van de lucht op 100 cm hoogte varieerde van $-0{,}6^{o}$ tot $+0{,}4^{o}$C. Dit was bij onbewolkte hemel en zonder merkbare wind. Overdag - blz. 37 - was de variatie op bijvoorbeeld 50 cm tussen 12.46 M.E.T. en 13.40 M.E.T. van $14{,}4^{o}$ tot $17{,}8^{o}$C.

Het is blijkbaar mogelijk de orde van grootte van de temperatuurverschillen tussen plantedelen en de omringende lucht te schatten met behulp van de gegevens van straling en wind en door gebruik te maken van formules uit de warmtetechniek voor de berekening van de convectieve warmte-overdracht.
Een moeilijkheid blijft de verdamping (transpiratie) die overdag een aanzienlijk deel van de energiehuishouding uitmaakt.