

## Sproeien als middel tegen nachtvorstschade

Sproeien kan op het ogenblik wel als de zekerste maatregel ter voorkoming van nachtvorstschade aan planten worden beschouwd.

Nachtvorstschade wordt veroorzaakt door afkoeling van een plantedeel beneden een kritische grens. Deze afkoeling is een gevolg van: convectie, verdamping aan het plantoppervlak en uitstraling. In deze beschouwing wordt een poging gedaan om door een vereenvoudigde voorstelling te komen tot een berekening van hun invloed bij het sproeien. Voorts wordt getracht een antwoord te geven op de volgende vragen:

1. hoeveel water moet worden gegeven?
2. hoe lang mag de besproeiing worden onderbroken?
3. hoe lang moet met sproeien worden doorgegaan?

### 1. Afkoeling door convectie

Onder afkoeling door convectie wordt hier verstaan warmteafgifte door de plant aan de langstromende lucht. De snelheid van de luchtstroom, de vorm en de grootte van het omstroomde plantedeel en het temperatuurverschil bepalen de grootte van de warmteafgifte.

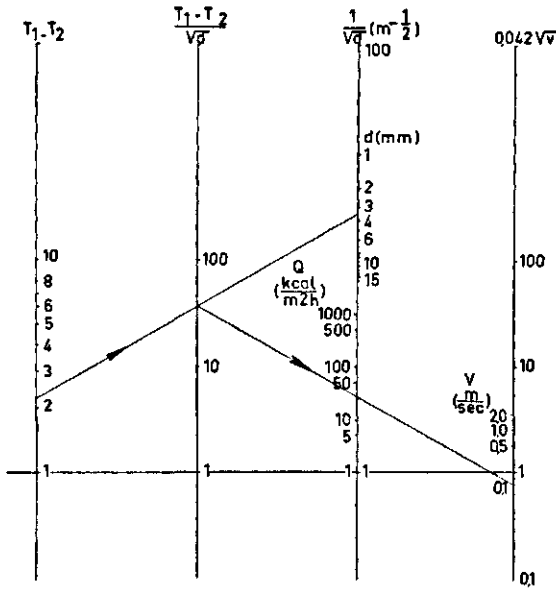
De beide eerste invloeden (luchtsnelheid en vorm) worden samengevat in het warmteovergangsgetal  $\alpha$ . Dit getal geeft het aantal kilocalorieën weer, dat per uur en per  $m^2$  van een voorwerp in de langstromende lucht overgaat als het temperatuurverschil tussen beide  $1^\circ C$  bedraagt. Wanneer we nu als eerste vereenvoudiging takken en andere ronde plantedelen door een cilinder voorstellen, kunnen we de gegevens van fig. 1 voor de berekening gebruiken.

Fig. 1 is namelijk een nomogram van de convectieve afkoeling van een cilinder, afhankelijk van de temperatuur, diameter en windsnelheid<sup>1</sup>.

Ter verduidelijking volgt hier een voorbeeld voor het gebruik van het nomogram. Gevraagd wordt het warmteverlies ten gevolge van convectie te bepalen van een cilindervormig lichaam met een diameter van  $3^3/7$  mm; de temperatuur van de omgeving is  $-2,3^\circ C$ , de temperatuur van het lichaam is  $0^\circ C$ , de windsnelheid is  $0,1$  m/sec.

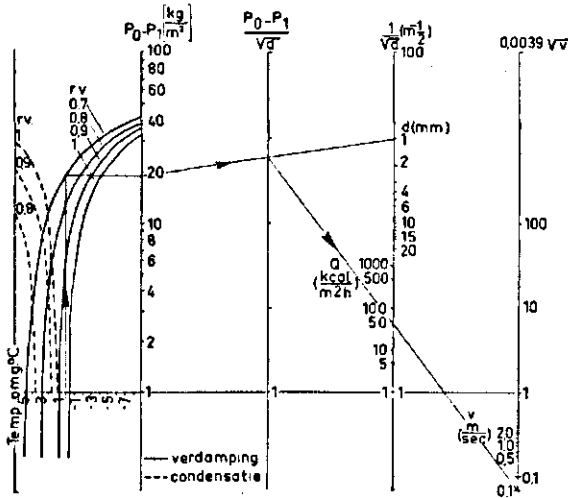
We beginnen op de linker as het temperatuurverschil tussen lichaam en omgeving  $T = 2,3^\circ$  uit te zetten. Dit punt verbinden we met het punt  $d = 3^3/7$  mm op

<sup>1</sup> Dit nomogram is, evenals dat van fig. 2, opgesteld door A. v. d. Graaf. De benodigde formules zijn afgeleid met behulp van gegevens uit [2].



Figuur 1

Figuur 2



de derde as. Het snijpunt met de tweede as wordt verbonden met het punt  $V = 0,1$  m/sec. op de vierde as. Het snijpunt van deze verbindingslijn met de derde as geeft het warmteverlies:  $31 \text{ kcal/m}^2/\text{uur}$ .

Bij het bepalen van de juiste maatregelen tegen vorstschade moeten de berekeningen betrokken worden op die plantedelen, die het gevoeligst zijn voor vorstschade. Bij bloeiende vruchtbomen zijn dat in het algemeen de stamper en de pas gezette vruchtjes. We kunnen deze delen voorstellen als een cilinder. Een blad is belangrijk minder gevoelig voor nachtvorst dan een cilindrisch plantedeel. Een blad van 20 mm breedte heeft ongeveer dezelfde  $\alpha$  als een cilinder van 10 mm doorsnede. De stamper zal enigszins tegen windinvloeden worden beschermd door de bloembladen. Daardoor zal de convectieve afkoeling geringer zijn zijn dan wanneer de stamper vrij aan de wind zou zijn blootgesteld.

## 2. Afkoeling door verdamping

Ook de afkoeling door verdamping is belangrijk. Tijdens het sproeien wordt elk plantedeel langzamerhand bedekt met een laagje nat ijs. De lucht in de naaste omgeving van de plant heeft daardoor een temperatuur van  $0^\circ \text{C}$  en een relatieve vochtigheid (r.v.) van 100 %.

Verder van de plant heerst echter de omgevings-temperatuur, welke lager is dan die van de plant. Daar kan voorts de relatieve vochtigheid van de omgevingslucht kleiner dan 100 % zijn; de dampspanning van de omgeving is er dan ook geringer dan vlak bij de plant. Het gevolg is een damptransport van de plant naar de omgeving en een verdamping aan het plantoppervlak.

Wanneer we weer de plantedelen voorstellen als plaatjes en cilinders, is ook hier de warmteafgifte te berekenen.

Fig. 2 geeft een nomogram waaruit de grootte van de warmteafgifte van een cilinder kan worden af-

gelezen bij verschillende relatieve vochtigheden, diameters en windsnelheden.

Voorbeeld voor het gebruik: Bepaal het warmteverlies ten gevolge van verdamping van een cilindervormig lichaam met een diameter van 1 mm; de temperatuur van de omgeving is  $0^{\circ}\text{C}$ , temperatuur van het lichaam  $0^{\circ}\text{C}$ , de relatieve vochtigheid van de omgeving is 70 % en de windsnelheid is 0,1 m/sec. Op de horizontale as wordt de omgevingstemperatuur uitgezet. Vanuit dit punt gaan we verticaal omhoog tot de lijn r.v. = 0,7 en vandaar horizontaal naar rechts tot de eerste verticale as. Dit laatst gevonden punt wordt verbonden met het punt d = 1 mm op de derde as; het snijpunt van de verbindingslijn met de tweede as wordt verbonden met  $V = 0,1$  m/sec. op de vierde as, waarna op de derde as het warmteverlies kan worden afgelezen: 42 kcal/m<sup>2</sup>/uur.

### 3. Afkoeling door uitstraling

Gedurende nachtvorst is de afkoeling door uitstraling belangrijk. Het gemiddelde stralingsverlies van het aardoppervlak kan gesteld worden op 60 kcal/m<sup>2</sup>/uur.

Het plantoppervlak straalt energie uit naar alle richtingen. Ook ontvangt het straling (uit het heelal, van de aarde en van naburige plantedelen). Hoe groot de netto-uitstraling is, valt niet precies te zeggen. We zullen daarom de netto-uitstraling moeten schatten. We stellen deze op 40 kcal/m<sup>2</sup> uur, gemiddeld over het totale plantoppervlak. Wij nemen daarbij aan dat er een goed warmte-contact bestaat tussen de verschillende delen van de plant. Hierdoor zal warmte stromen van de het minst aan uitstraling blootgestelde delen naar plaatsen met een sterke uitstraling.

#### *Hoeveel water moet gegeven worden?*

Gedurende de nachtvorstperiode zullen de planten nog weinig blad hebben. Zij kunnen dus nog niet veel water opvangen; lang niet al het versproeide water zal daardoor op de plant terechtkomen.

De afkoeling is gebonden aan het oppervlak. Het maakt dus niet uit of een plant een groot of een klein totaal oppervlak heeft; de afkoeling per oppervlakte-eenheid blijft dezelfde en is alleen afhankelijk van de in het voorgaande besproken factoren. Bij een dichtere bladstand echter verspreidt het water zich beter over het plantoppervlak door spatten en druipen en zal een groter gedeelte van het totaal versproeide water op de plant blijven. Bij een ijle plant (zoals bijvoorbeeld een appelboom in de bloeitijd) zal meer water tussen de plantedelen door vallen, zonder de boom te raken. Hier wordt dus een zwaardere eis gesteld aan de regelmatigheid van het sproeipatroon.

Wanneer we ervan uitgaan, dat het sproeipatroon regelmatig is, is het watervangend plantoppervlak gelijk aan de verticale projectie van de plant op de grond (beter: in de richting waarin het water valt; het verschil zal echter niet groot zijn). Het water dat op de plant valt, zal zich in alle richtingen over het oppervlak verspreiden. Het totaal oppervlak van een boom is ongeveer 3 à 4 maal het geprojecteerde oppervlak. Uitgangspunt is daarom dat bij een zeer regelmatige verdeling van X mm water per uur op het gehele plantoppervlak slechts  $\frac{1}{3}$  X tot  $\frac{1}{4}$  X mm terecht komt.

Voor lage gewassen met een min of meer gesloten bladerdek (aardbeien) is de situatie enigszins anders. Hier zullen de bovenste bladeren als een beschermende laag voor de meer naar binnen gelegen delen dienen. De buiten dit dek uitstekende delen zullen vanzelfsprekend het meest van de vorst te lijden hebben. Door de gesloten bladstand zal het opvangend vermogen van een laag gewas groot zijn. Bij een neerslag van X mm per uur zal zeker  $\frac{2}{3}$  X op de bovenste bladeren terecht komen. Bovendien zullen de uitstekende delen door spatten van alle kanten water ontvangen. Aangenomen wordt daarom dat hier de (gevoelige) uitstekende delen bij een neerslag van X mm per uur  $\frac{1}{2}$  X mm krijgen. Bij een neerslag van X mm wa-

*Warmteverlies onder verschillende omstandigheden*

Tijd	Temp. omg. °C r. v. omg. % diameter mm	Warmteverlies (in kcal/m <sup>2</sup> /uur) bij											
		a. windsnelheid < 0,1 m/sec.				b. windsnelheid 0,5 m/sec.				c. windsnelheid 2,0 m/sec.			
		con- vectie	ver- dam- ping	uit- stra- ling	totaal	con- vectie	ver- dam- ping	uit- stra- ling	totaal	con- vectie	ver- dam- ping	uit- stra- ling	totaal
22 uur	0 70 1	0	42	40	82	0	93	40	133	0	186	40	226
24 uur	-2,3 87 3 3/7	31	17	40	88	69	45	40	154	138	90	40	268
2 uur	-4 96 6 1/7	36	17	40	93	90	39	40	169	180	81	40	301
5 uur	-5 100 10	37	15	40	92	90	33	40	163	165	69	40	274

ter per uur van 8° komen ten gevolge van stolling 88 X kcal/m<sup>2</sup> per uur vrij. Daarom gaan we voor een berekening van de volgende warmtetoevoer uit.

a. bij boomgaarden:  $\frac{1}{2} \times 88 \text{ X kcal/uur}$ ;

b. bij gesloten gewas:  $\frac{1}{2} \times 88 \text{ X kcal/uur}$ .

*a. Boomgaard*

We gaan uit van het temperatuur- en vochtigheidsverloop van fig. 3.

Om 22 uur is de r.v. 70 % bij een temperatuur van 0° C. Door daling van de temperatuur zal de r.v. oplopen tot 100 % bij -5° om 5 uur.

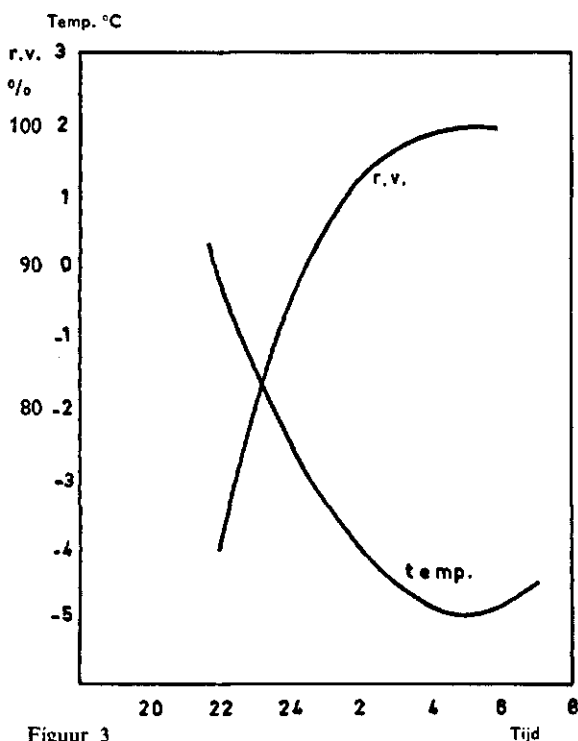
Wanneer we om 22 uur (bij 0° C) met het sproei-

en beginnen, heeft zich nog geen ijs op de plant gevormd.

We nemen het voor nachtvorst meest gevoelige deel van de plant: de stamper. Deze heeft bij benadering de vorm van een cilinder. Stellen we de diameter bij het begin van het sproeien op ongeveer 1 mm en na 7 uur op 10 mm, dan is de diameter per uur toegenomen met 9/7 mm.

We nemen aan dat de windsnelheid zeer gering is (< 0,1 m/sec.) en kunnen dan met behulp van de twee nomogrammen de warmtebalans opzetten die is weergegeven in de tabel onder a.

Nadat zich eenmaal een ijslaagje heeft gevormd, verandert het totale warmteverlies niet veel meer. Ook de samenstellende componenten veranderen weinig. Onder deze omstandigheden zal aan neer-



Figuur 3

slag nodig zijn:  $X = \frac{93}{\frac{1}{3} \times 88} = 3,2 \text{ mm.}$

Wanneer er echter een geringe wind is, zullen de omstandigheden snel ongunstiger worden.

We zullen daarom de berekening herhalen voor een wind van 0,5 m/sec. Dit is een nauwelijks voelbare luchtstroom (zie tabel, onder *b*).

De benodigde hoeveelheid neerslag wordt dan:

$$X = \frac{169}{\frac{1}{3} \times 88} = 5,8 \text{ mm.}$$

Ook hier blijkt de totale warmteafgifte niet veel te veranderen.

Was bij vrijwel windstil weer de afkoeling door uitstraling en convectie ongeveer gelijk (40 % elk), bij een geringe wind daalt het aandeel van de uit-

straling tot 25 % en krijgt de convectieve afkoeling een grote waarde. Bij lage luchtvochtigheid (om 22 uur) is ook de verdamping belangrijk. Dit aandeel daalt echter snel tot ongeveer 25 % bij hogere luchtvochtigheden.

Wanneer vorst optreedt bij windsnelheden van 2 m/sec., spreekt men van een wind- of transportvorst. Ook voor dit geval zullen we de warmtebalans opzetten (zie tabel 1, onder *c*). In dit geval komen we tot een benodigde waterhoeveelheid

$$\text{van: } X = \frac{301}{\frac{1}{3} \times 88} = 10,2 \text{ mm.}$$

Bij deze windvorst overheerst het aandeel van convectieve afkoeling (ongeveer 60 %), terwijl de uitstraling van geringe betekenis is. Hierbij moet worden opgemerkt, dat  $-5^\circ \text{C}$  bij een windsnelheid van 2 m/sec. in de nachtvorstperiode als uitzonderlijk laag moet worden beschouwd.

Bij de berekening zijn de volgende punten buiten beschouwing gebleven.

1. door de grote warmtetoevoer zullen de temperatuur en de relatieve vochtigheid tussen het besproeiende gewas hoger zijn dan in de omgeving. Hierdoor zal de afkoeling door convectie en verdamping geringer zijn dan de berekende;
2. bij zware vorst en grote neerslag zal de ijsaan-groeiing groter zijn dan is aangenomen. Dit is van invloed op de afkoeling. Wanneer bij voorbeeld de doorsnee van het plantedeel om 5 uur 20 mm in plaats van 10 mm is, zal de benodigde neerslag 8,2 in plaats van 10,2 mm zijn.

#### *b. Laag gewas, bij voorbeeld aardbeien*

Laag gewas is aan lagere temperaturen blootgesteld dan hoger groeiende planten. Daartegenover is de windinvloed geringer. Hierdoor zal de af-

koeling door convectie en verdamping van minder betekenis zijn dan bij bomen en struiken. Dit geldt vooral indien op 2 m hoogte de wind een merkbare snelheid heeft.

We zullen de nadelige invloed van lagere temperatuur en het voordeel van minder wind aan elkaar gelijkstellen en nemen daarmee aan dat de afkoeling dezelfde is als in het rekenvoorbeeld van de boomgaard.

We komen dan tot de volgende neerslaghoeveelheden:

1. bij 0,1 m/sec. windsnelheid (op 2 m hoogte!):

$$X = \frac{93}{\frac{1}{4} \times 88} = 2,1 \text{ mm/uur,}$$

2. bij 0,5 m/sec. windsnelheid:  $X = \frac{169}{\frac{1}{4} \times 88} = 3,8$  mm/uur,

3. bij 2 m/sec. windsnelheid:  $X = \frac{301}{\frac{1}{4} \times 88} = 6,8$  mm/uur.

De hier gevonden waarden voor de neerslag zijn als richtlijnen te beschouwen. Zij geven een indruk van de orde van grootte van de neerslag. Het is echter belangrijker het aandeel van convectie, verdamping aan het plantoppervlak en uitstraling in de totale afkoeling te kennen.

Uit de berekeningen blijkt dat convectieve afkoeling een grote rol speelt, zelfs bij vrijwel windstil weer. Het verschil tussen 'stralings'- en 'wind'- of 'transport'-nachtvorsten is dan ook niet opvallend groot. Zelfs bij stralingsnachtvorsten is het aandeel van convectieve afkoeling nog wel 50 %.

We hebben in het voorgaande de benodigde hoeveelheid neerslag berekend. Geen enkele sproeier heeft echter een volkomen gelijkmatig sproeipatroon. Op ononderbroken oppervlakken zal na enige tijd sproeien wel een redelijk gelijkmatige neerslag gevonden worden, doordat maxima in de neerslag afvloeien naar minima. Een dergelijke nivellering zal echter op de plant slechts in veel

geringere mate kunnen plaatshebben, omdat een plaatselijk teveel aan water voor een deel door afdruipen op de grond terecht zal komen en dan voor de plant verloren is.

Het is dan ook onmogelijk te schatten hoeveel water per tijdseenheid (of aantal omwentelingen van de sproeier) op een stukje van het plantoppervlak terecht komt. In het voorgaande is en in het vervolg wordt ondanks deze moeilijkheid van een volkomen gelijkmatige neerslag uitgegaan.

### Hoe lang mag de besproeiing onderbroken worden?

Het antwoord op deze vraag wordt bepaald door de snelheid waarmee het op de plant aanwezige water stolt en waarmee daarna het ijslaagje afkoelt. Belangrijk is hierbij de vraag hoever de temperatuur mag dalen voordat door toevoer van nieuw water de temperatuur weer op nul graden moet worden gebracht.

Uit de literatuur is bekend, dat de meeste planten temperaturen tot  $-2,5^{\circ}\text{C}$  zonder schade kunnen doorstaan wanneer zij aan vorst worden blootgesteld en niet worden beroerd. Deze gunstige eigenschap wordt toegeschreven aan de mogelijkheid van onderkoeling van het celsap. Wanneer een onderkoelde vloeistof echter in beweging geraakt – bij voorbeeld door een schok –, zal de onderkoeling worden opgeheven en zullen ijskristallen worden gevormd.

Wanneer een plant besproeid wordt, ontvangen de plantedelen zonder ophouden schokjes door de erop vallende druppels. Van rust is geen sprake, evenmin dus van onderkoeling. Alleen de concentratie van het celsap kan nu nog voor enige vriespuntsverlaging zorgen. In het algemeen zal dit niet meer dan  $\frac{1}{2} - 1^{\circ}\text{C}$  zijn.

Voor verschillende lichaamsvormen kan worden berekend hoe het temperatuursverloop ten gevolge van convectieve afkoeling is onder verschillende omstandigheden [3]. We zullen voor het bepalen

van de onderbrekingstijd weer aanhalen bij het voorbeeld van de boomgaard.

Zolang nog water op de plant aanwezig is, is geen gevaar te duchten, zodra echter het water bevroren is, begint de temperatuur te dalen. Hieronder vermelden we voor verschillende tijdstippen het verloop van de oppervlakte-temperatuur van de cilinder uit het vorige voorbeeld, nadat het zich erop bevindende water bevroren is (temp.  $0^{\circ}\text{C}$ , windsnelheid  $0,1\text{ m/sec.}$ ).

22 uur. Omgevingstemperatuur  $0^{\circ}\text{C}$ , doorsnede van de cilinder =  $1\text{ mm}$ ,  $\alpha = 24\text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ . Temperatuur na 1, 2 en 3 minuten respectievelijk 0, 0 en  $0^{\circ}\text{C}$ .

24 uur. Omgevingstemperatuur  $-2,3^{\circ}\text{C}$ , doorsnede van de cilinder =  $3^{3/7}\text{ mm}$ ,  $\alpha = 13,5\text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ . Temperatuur na 1, 2 en 3 minuten respectievelijk  $-1,1$ ,  $-1,61$  en  $-2,18^{\circ}\text{C}$ .

2 uur. Omgevingstemperatuur  $-4^{\circ}\text{C}$ , doorsnede van de cilinder =  $6^{1/7}\text{ mm}$ ,  $\alpha = 9\text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ . Temperatuur na 1, 2 en 3 minuten respectievelijk  $-1$ ,  $-1,6$  en  $-1,8^{\circ}\text{C}$ .

5 uur. Omgevingstemperatuur  $-5^{\circ}\text{C}$ , doorsnede van de cilinder =  $10\text{ mm}$ ,  $\alpha = 7,5\text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ . Temperatuur na 1, 2 en 3 minuten respectievelijk  $-0,6$ ,  $-1,0$  en  $-1,5^{\circ}\text{C}$ .

Het is duidelijk dat de invloed van de diameter groter is dan die van de omgevingstemperatuur. We moeten er overigens op bedacht zijn dat hier alleen de temperatuurdaling ten gevolge van convectie is gegeven. De convectieve afkoeling is slechts een deel van de totale afkoeling. Verwaarlozen we het aandeel van de verdamping (die bij een ijsoppervlak minder is dan bij een waterlaagje), dan is de verhouding van convectieve tot stralingswarmteafgifte  $39 : 40$ . De temperatuurdaling ten gevolge van uitstraling is dan even groot als die tengevolge van convectieve afkoeling. In werkelijkheid voltrekt zich de temperatuurdaling dan ook minstens tweemaal zo snel als hiervoor is vermeld. Dit houdt in, dat bij deze

vorst met geringe wind in het gunstigste geval binnen 1 minuut na stolling van het water een temperatuur van  $-1^{\circ}\text{C}$  bereikt is en de plant dus bevriest. We moeten echter rekening houden met het ongunstigste geval. Hierbij zal  $-1^{\circ}\text{C}$  reeds bereikt zijn binnen een halve minuut.

Wanneer de plant daarna weer met water wordt bedekt, zal de temperatuur snel stijgen doordat de warmte-overdracht op het ijs en de geleiding in het ijs groot zijn.

Daar het niet mogelijk is gebleken vast te stellen met welke frequentie een klein oppervlak van een plant bevochtigd wordt, is het ook niet mogelijk de dikte van het waterlaagje te schatten. Ook de tijd, nodig om dit laagje te doen stollen, is daardoor niet te schatten. De toelaatbare tijd tussen twee bevochtigingen mag dus gelijk zijn aan:

de stoltijd van het waterlaagje plus  $\frac{1}{4}$  minuut bij vrijwel windstil weer.

### Hoe lang moet met sproeien doorgegaan worden?

Indien aan het eind van een vorstnacht de temperatuur van de lucht weer gaat oplopen en de nul graden passeert, behoeft dit nog niet te betekenen dat het vorstgevaar voor de plant voorbij is. Al zal dan geen afkoeling door convectie meer plaatsvinden, er kan nog steeds warmte door verdamping aan de plant worden onttrokken.

Een voorbeeld kan dit verduidelijken.

Indien we aannemen, dat bij een temperatuur van nul graden de omgevingslucht een r.v. heeft van  $80\%$  en de luchtlaag vlak om de plant een r.v. van  $100\%$ , dan zal damptransport plaatshebben. Dit gaat door tot de dampspanning van beide gebieden gelijk is. Nemen we aan dat de r.v. van de omgeving constant blijft, dan moet de dampspanning van de luchtlaag om de plant dalen. Een r.v. van  $80\%$  van lucht komt overeen met een dampspanning van  $0,8 \times$  maximale dampspanning bij nul graden ( $= 0,006228\text{ atm.}$ ). Indien

geen damptransport meer plaats heeft, moet de dampspanning om het blad gelijk zijn aan die van de omgeving. Er moet dus om (en in) het blad een temperatuur heersen, waarbij de maximale dampspanning gelijk is aan  $0,8 \times 0,006228 = 0,0049824$  atm. Deze temperatuur is  $-1,46^\circ \text{C}$ .

Hieruit blijkt, dat de mogelijkheid bestaat dat de bladtemperatuur daalt tot beneden het vriespunt, wanneer onder ongunstige omstandigheden met sproeien gestopt wordt bij een temperatuur van nul graden. Het is daarom het veiligst door te gaan met sproeien totdat het gevormde ijs begint te smelten.

### Vergelijking met proefgegevens

Door Businger zijn in 1955 een aantal proeven genomen met lage planten om een indruk te krijgen van de benodigde hoeveelheid neerslag [7]. In de tabel zijn de resultaten gegeven.

Nemen we aan dat de doorsnee van de te beschermen plantedelen gemiddeld 10 mm is (zoals in de rekenvoorbeelden steeds is aangehouden) en de r.v. 100 %, dan kunnen we uit de nomogrammen de gewenste neerslag berekenen. Deze is ingevuld in de laatste kolom van de tabel.

Minimum temperatuur $^\circ\text{C}$	Wind-snelheid m/sec.	Neerslag mm/uur	Berekende neerslag mm/uur
-5,5	0,3	4	3,3
-5	0,35	4	3,3
-4	0,2	2,5	2,3
-3,5	0,5	3	2,8
-3	0,3	2	2,2
-3	0,6	2,5	2,8
-3	0,7	3	3,0

Er blijkt een goede overeenstemming te bestaan. De kleine verschillen zijn verklaarbaar uit mogelijke verschillen in diameter en r.v. bij berekening en proef.

### Warmte-uitwisseling ten gevolge van convectie

De warmte-afgifte van een lichaam aan voorbijstromende lucht wordt bepaald door de warmte-overgangscoefficient  $\alpha$ .

Voor een cilinder die in een luchtstroom is opgehangen, wordt  $\alpha$  voor het *stuwpunt* van de cilinder gegeven door

$$\alpha = 2 A \lambda \sqrt{\frac{U_0}{d}} \quad \begin{array}{l} U_0 = \text{luchtsnelheid (aanstroom-} \\ \text{snelheid van de lucht)} \\ d = \text{diameter cilinder} \end{array}$$

Na enig omwerken krijgt men:

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = 2 A \sqrt{\text{Re}_d} \quad \begin{array}{l} \lambda = \text{warmte-geleidingscoëfficiënt} \\ \nu = \text{kinematische viscositeit van} \\ \text{de lucht} \end{array}$$

$$\text{Re} = \text{Reynoldsgetal} = \frac{U_0 d}{\nu}$$

Uit Eckert pag. 69, fig. 49, volgt met enig lineair extrapoleren voor de grotere waarden van  $\varphi$  voor de coëfficiënt A op verschillende plaatsen langs de omtrek van de cilinder

$$\varphi = 0 \quad 10 \quad 20 \quad 30 \quad 40 \quad 50 \quad 60 \quad 70 \quad 80 \quad 90$$

$$2A = 1,02 \quad 1,02 \quad 1,0 \quad 0,97 \quad 0,94 \quad 0,87 \quad 0,76 \quad 0,60 \quad 0,40 \quad 0,18$$

$$\varphi = 100 \quad 110 \quad 120 \quad 130 \quad 140 \quad 150 \quad 160 \quad 170 \quad 180$$

$$2A = 0,16 \quad 0,14 \quad 0,12 \quad 0,10 \quad 0,08 \quad 0,06 \quad 0,04 \quad 0,02 \quad 0,00$$

$$\Sigma 2A = 8,48 \text{ of } \overline{2A} = 0,446$$

De gemiddelde warmte-overgangscoefficient over de gehele omtrek van de cilinder wordt nu

$$\overline{\alpha} = \frac{\lambda}{d} \cdot 0,446 \sqrt{\text{Re}_d}$$



Voor de warmte-afgifte geldt

$$Q = \bar{\alpha} (T_1 - T_2) \text{ kcal/m}^2 \text{ uur}$$

$$\text{of } Q = \frac{\lambda}{d} (T_1 - T_2) 0,446 \sqrt{Re_d}$$

Vullen we de volgende waarden in

$$\lambda = 0,0206 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$$

$$\nu = 0,04752 \text{ m}^2/\text{h}, \text{ dan vinden we}$$

$$Q = \frac{0,0206}{\alpha} \cdot 0,446 \cdot \sqrt{\frac{U_o d}{0,04752}} \cdot (T_1 - T_2) \text{ of}$$

$$Q = (T_1 - T_2) \cdot \frac{1}{\sqrt{d}} \cdot 0,042 \cdot \sqrt{U_o}$$

Het nomogram is op deze formule gebaseerd.

De afkoelsnelheid van een lichaam kan men bepalen met behulp van grafieken, opgesteld door H. Bachmann: 'Tafeln über Abkühlungsvorgänge einfacher Körper.'

#### Warmte-uitwisseling van een cilinder ten gevolge van verdamping en waterdamptransport

Verdamping van water van een oppervlak is analoog met het warmteovergangsproces. Dit houdt in dat voor de verdamping soortgelijke formules gelden als voor de warmteovergang. Wij kunnen daarom dezelfde formules gebruiken als bij de warmteovergang, maar moeten dan  $\alpha$  vervangen door de stofovergangs-coëfficiënt  $\beta$ ,  $\lambda$  door de diffusiecoëfficiënt  $D$ .

Wij gaan dus uit van de formule voor warmte-overdracht voor het stuwpunt van een cilinder:

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = 2A \sqrt{Re_d}$$

Wij moeten beginnen om  $A$  uit te drukken in de grootheden welke bij verdamping een rol spelen.

In Eckert pag. 69 vinden wij een tabel waarin  $A$  als functie van het Prandtl getal is uitgedrukt.

Zetten wij de waarden van  $A$  en  $Pr$  dubbellogaritmisch uit dan krijgen wij een rechte lijn, waaruit volgt dat

$$A = 0,562 \cdot (Pr)^{0,38} = 0,562 \cdot \left(\frac{\nu}{\lambda}\right)^{0,38}$$

Vervangen wij nu de verschillende constanten door die welke bij verdamping een rol spelen, dan komt

$$\frac{\beta d}{D} = 0,562 \cdot \left(\frac{\nu}{D}\right)^{0,38} \cdot \sqrt{Re_d} \text{ voor het stuwpunt.}$$

Voor de gehele cilinderomtrek geldt weer (zie convectieve warmte-overdracht)

$$\bar{A} = 0,221 \text{ en}$$

$$\beta = \frac{D}{d} 0,442 \cdot 0,562 \left(\frac{\nu}{D}\right)^{0,38} \cdot \sqrt{Re_d}$$

De diffusiecoëfficiënt  $D$  wordt bepaald door extra poleren van een kromme die kan worden getekend met behulp van enkele waarden van  $D$  bij verschillende temperaturen (zie Eckert pag. 197, tabel 5).

De hoeveelheid water die verdampt wordt nu uitgedrukt door de vergelijking:

$$G = \frac{\beta}{R_d T} (P_1 - P_2) \text{ kg/m}^2 \text{ uur}$$

Hierin is  $R_d$  = gasconstante

$T$  = absolute temperatuur van het verdampend oppervlak

$P_1, P_2$  = dampdruk ter plaatse van verdampend oppervlak en van omgeving.

De voor de verdamping benodigde warmte wordt gegeven door

$$Q = r \cdot G = r \cdot \frac{\beta}{R_d T} \cdot (P_1 - P_2) \text{ kcal/m}^2 \text{ uur}$$

waarin  $r$  = verdampingswarmte in kcal/kg

Het nomogram is nu gebaseerd op de formule

$$Q = \frac{D}{d} \cdot \frac{0,26077}{R_d T} \cdot \left( \frac{\nu}{D} \right)^{0,38} \cdot r \cdot (P_1 - P_2) \sqrt{\frac{U_0 d}{\nu}}$$

### Samenvatting en conclusie

In deze verhandeling is gepoogd met een vereenvoudigde voorstelling van zaken te berekenen hoe planten door sproeien tegen nachtvorst kunnen worden beschermd. Daarbij is gebleken, dat de windsnelheid, de relatieve vochtigheid en de uitstraling een grote rol spelen.

Als het 5° vriest, is bij vrijwel windstil weer een neerslag van 3,2 mm per uur wel het minimum; bij wind kan de vereiste hoeveelheid neerslag veel groter zijn.

De afkoelingssnelheid van een beijsd blad is groot. Tussen twee besproeiingen kan een tijdsverloop van maximaal ½ minuut na stolling van het aanwezige water getoleerd worden (bij windstil weer). Het sproeien kan pas beëindigd worden als het gevormde ijs begint te smelten.

Bij de berekening is duidelijk naar voren gekomen, dat op het gebied van sproeien tegen nachtvorst nog enkele leemten bestaan in de kennis van dit proces. Het is daarom gewenst een onderzoek in te stellen naar:

*de neerslagfrequentie van sproeiers.* Men kan geen berekening opzetten, indien men geen gegevens heeft over de frequentie waarmee een klein oppervlakje van de plant bevochtigd wordt. Hiermee hangt samen de mogelijkheid van uitvloeiing van het water over de plant;

*het rendement van het sproeien.* Het is onbekend hoeveel van het versproeide water nuttig aan de plant ten goede komt. Een dergelijk onderzoek zal de schattingen op blz. 46 betrouwbaarder kunnen maken;

*het temperatuur- en vochtigheidsverloop van de lucht tussen de planten.*

### Summary

#### Spraying against night frost damage

In this article the author has tried, with a simple presentation of the subject-matter, to determine in what way plants can be protected against night frosts by means of spraying.

It has been found that wind velocity, relative moisture content and radiation play important parts in the cooling process.

When the temperature has fallen to 5° C below zero, and there is practically no wind, a precipitation of 3.2 mm per hour is the minimum quantity at which damage can be prevented; when there is a wind blowing the required quantity of precipitation may be appreciably larger.

The cooling rate of an ice-covered leaf is high. Between two successive spraying operations a period of time not exceeding ½ minute after freezing of the water can be tolerated (in calm weather). Spraying should not be terminated until the ice which has formed starts to melt.

The calculations involved have clearly shown that in the field of spraying against night frosts there are still a few gaps in our knowledge of the process. Therefore, it would seem to be desirable to have the following points investigated:

*The precipitation frequency of spraying nozzles.* No calculations can be made if no data are available about the frequency of moistening a small area of the plant. Closely connected with this is the possibility for the water to flow out over the plant.

*The effect of spraying.* It is not known how much of the water sprayed actually plays a part in preventing night frost damage to the plant. Further research into this matter will tend to make the estimates at the top of page 46 more reliable.

*Temperature and moisture content of the air between the plants.*

## Literatuur

1. Gröber-Erk-Grigull: *Die Grundgesetze der Wärmeübertragung*. 1955.
2. Eckert, E.: *Einführung in den Wärme- und Stoffaustausch*. 1949.
3. Bachmann, H.: *Tafeln über Abkühlungsvorgänge einfacher Körper*. 1938.
4. Perrot bibliotheek: Heft 4.
5. Niemann, A.: *Akten der Internationalen Tagung für Frostberechnung*. 1957.
6. Geiger, R.: *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. 1950.
7. Businger, J.: *Nachtvorstbestrijding door middel van besproeiing*. Meded. 29 I.T.T., 1955.