



KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT

Nachtvorst

ING. M. SCHARRINGA

Prijs f 9,85

VERSPREIDE OPSTELLEN

5



Nachtvorst

Nachtvorst

Ing. M. Scharringa

Ontstaan van het verschijnsel
en middelen en methoden om schade te voorkomen of te beperken



Voorwoord

Nachtvorst is een verschijnsel dat dikwijls grote plaatselijke verschillen vertoont. Een onderzoek naar het voorkomen van het verschijnsel kan dus niet beperkt blijven tot één plaats. De schrijver die zich sinds de vijftiger jaren met de studie van nachtvorst heeft beziggehouden heeft dan ook veldwaarnemingen over het gehele land bij zijn onderzoek betrokken. Naast de atmosferische toestand heeft hij ook aandacht geschonken aan bodemgesteldheid en begroeiing, factoren waarvan het bekend is dat zij mede van invloed zijn op het voorkomen van nachtvorst.

De verklaring van het verschijnsel berust op natuurkundige en meteorologische wetten. De schrijver heeft getracht zo weinig mogelijk in theoretische beschouwingen te vervallen en een op de praktijk gerichte behandeling te geven.

Gehoopt mag worden dat het boekje nut zal hebben voor mensen uit de praktijk, in het bijzonder voor hen die belast zijn met het geven van voorlichting of vakonderwijs.

De Hoofddirecteur

Inleiding

De uitdrukking ‘nachtvorst’ wordt gebruikt voor een meteorologische situatie waarin de luchttemperatuur en die van uitstekende voorwerpen nabij het aardoppervlak, des nachts tot onder het vriespunt dalen, maar overdag tot boven deze waarde stijgen.

In land- tuin- en bosbouw spreekt men van nachtvorst als deze toestand in het groeiseizoen optreedt. Als groeiseizoen kan in dit verband die periode worden beschouwd die begint zodra er gewassen zijn die door bevroering schade kunnen lijden en die eindigt als de gewassen zijn geoogst en de produkten zijn geborgen. De laatste toevoeging is noodzakelijk omdat ook geoogste produkten, die nog op het veld liggen, schade van nachtvorst kunnen ondervinden.

De door nachtvorsten veroorzaakte schade kan zo groot zijn, dat daardoor gehele bedrijven in hun voortbestaan worden bedreigd.

De natuurkundige processen waardoor nachtvorst ontstaat zullen in deze verhandeling worden beschreven. Voorts zullen methoden en middelen om de schade te beperken of te voorkomen, worden behandeld. De beschrijving van de natuurkundige processen is een onmisbare inleiding op de beoordeling van dergelijke methoden.

Het boek is gebaseerd op een ervaring die zich uitstrekt over een tijdvak van ruim 20 jaren en het past, hier een woord van dank neer te schrijven, bestemd voor allen die hun medewerking bij het opdoen van deze ervaring hebben gegeven.

In de eerste plaats geldt deze dank de mensen ‘van de voorlichtingsdiensten’, de verzamelnaam voor het korps van uitermate praktisch ingestelde ambtenaren met een uitgebreide kennis van wat zich in hun gebied afspeelt. Voor hen was geen moeite te veel om bij veldwaarnemingen en metingen de onmisbare hulp te verlenen.

In de tweede plaats geldt de dank de vele fruittelers, landbouwers en tuinders die ons op hun bedrijven gastvrijheid verleenden.

Ten slotte past dank aan de vele collega’s, in allerlei functies en van verschillende specialismen, die de auteur met raad en daad hebben geholpen en voortgeholpen.

Inhoud

1 Hoe nachtvorst ontstaat 11

- 1.1 Arbeid, arbeidsvermogen en vormen van arbeidsvermogen (energie) 11
- 1.2 Geleiding van warmte 14
 - 1.2.1 Convectorie 14
 - 1.2.2 Warmtegeleidingsvermogen van een aantal stoffen en dat van grond 14
- 1.3 Straling 17
 - 1.3.1 Golfte 17
 - 1.3.2 Bij stralingsprocessen betrokken hoeveelheden energie 19
 - 1.3.3 Transmissie, reflectie, absorptie en verstrooiing van straling 24
- 1.4 Stralings- en warmtehuishouding van de bodem 28
 - 1.4.1 Onbegroeide grond 28
 - 1.4.2 Begroeide grond 30
 - 1.4.3 Nachtelijke situatie bij onbegroeide grond 31
 - 1.4.4 Nachtelijke situatie bij begroeide grond 33
- 1.5 De inversie 37
- 1.6 De invloed van de wind 38
- 1.7 De invloed van bewolking 39
- 1.8 De invloed van obstakels 40
- 1.9 De invloed van de helling van het terrein 41
- 1.10 Percelen met een holle of bolle ligging 42

2 Waardoor planten bij bevrozing afsterven 44

- 2.1 Verklaringen 44
- 2.2 Onderkoeling 46
- 2.3 Concentratie van het celvocht 47

3 Waar nachtvorst voorkomt 48

- 3.1 Alleen de tropen zijn vrij van nachtvorsten 48
- 3.2 Binnen onze grenzen 48
 - 3.2.1 Nachtvorst op de Waddeneilanden 51

4 Wanneer treedt nachtvorst op 52

- 4.1 Het groeiseizoen 52
- 4.2 Wanneer in het groeiseizoen 52

5 Nachtvorstwering 55

- 5.1 Passieve methoden 55
 - 5.1.1 Keuze van het perceel 55
 - 5.1.2 Welke situaties men dient te vermijden 56
 - 5.1.3 Keuze van het groeiseizoen 57
 - 5.1.4 Selectie en het kweken van nieuwe rassen 57
 - 5.1.5 Cultuurmaatregelen 58
- 5.2 Actieve methoden 61
 - 5.2.1 Bedekking 61
 - 5.2.2 Glasbedekking 62
 - 5.2.3 Glas bedekt met ander materiaal 63
 - 5.2.4 Kunststof als bedekking 63
 - 5.2.5 Bedekking met dun metaal 65
 - 5.2.6 Bedekking met schuim 65
 - 5.2.7 Kunstmatige sneeuw 66
- 5.3 Stralingsafscherming 66
- 5.4 Vergroting van de atmosferische tegenstraling 70
- 5.5 Ventilatie 72
- 5.6 Verwarming 74
 - 5.6.1 Modellen van kachels 76
 - 5.6.2 Enkele andere methoden 77
- 5.7 Beregening 78
 - 5.7.1 Principe en geschiedenis 78
 - 5.7.2 Onderbroken sproeien 79
 - 5.7.3 Aantal sproeiers 80
 - 5.7.4 Plaatsing van de sproeiers 80

- 5.7.5 Hoeveelheid water 80
- 5.7.6 Kwaliteit van het water 81
- 5.7.7 Ander gebruik van de installatie 81
- 5.7.8 Enkele andere belangrijke zaken 81
- 5.7.9 De bedrijfszekerheid 82
- 5.8 De beste methode 82

6 Referenties 84

- 6.1 Lijst van Nederlandse publikaties over onderzoek op het gebied van de nachtvorst 84
- 6.2 Overige geraadpleegde literatuur 88

7 Nachtvorst in kleur 89

- 7.1 Noten bij de illustraties van dit hoofdstuk 91

8 Register 101

1 Hoe nachtvorst ontstaat

Omdat het niet mogelijk is inzicht te verkrijgen in de processen die tot het ontstaan van nachtvorst leiden, zonder enige kennis van een aantal natuurkundige begrippen en verschijnselen, zullen deze eerst moeten worden behandeld. Zij hebben alle betrekking op het transport en de overdracht van warmte (energie).

1.1 Arbeid, arbeidsvermogen en vormen van arbeidsvermogen (energie)

Wat arbeid is, kan men aanvoelen maar het is nodig daarvoor een eenheid in te voeren, zodat arbeid kan worden gemeten. Het is lang gebruikelijk geweest dit te doen met behulp van de kilogrammeter, afgekort kgm. Dit is de hoeveelheid arbeid die wordt verricht als men een gewicht van 1 kg 1 meter hoog opheft; men verplaatst dan het gewicht over een afstand van 1 meter tegen de zwaartekracht van 1 kg in. Doet men hetzelfde met een gewicht van 100 kg dan is de arbeid 100 kgm en als de verplaatsing in plaats van 1 meter, 2 meter bedraagt, is de geleverde arbeid 200 kgm, enz.

Nu is de zwaartekracht een kracht die niet overal gelijk is. Hij hangt af van de plaats waar men zich bevindt en met name van de geografische breedte. Voorts is de zwaartekracht afhankelijk van de hoogte; op zeer grote hoogte is de zwaartekracht klein.

De zwaartekracht is voor nauwkeurig werk dan ook niet als eenheid te gebruiken en daarom werd hij vervangen door de Newton, die zodanig is gedefinieerd dat hij overal dezelfde waarde heeft. Deze Newton is dus de eenheid van kracht en is genoemd naar de Engelse natuurkundige, Sir Isaac Newton. Aan het aardoppervlak is, op onze geografische breedte, 1 Newton ongeveer 102 gram; aan de polen wat minder en aan de evenaar wat meer.

Op dezelfde wijze als men voorheen de kilogrammeter als eenheid van arbeid gebruikte, gebruikt men nu de Newtonmeter, afgekort tot Nm. De Newtonmeter wordt meestal Joule, afgekort tot J, genoemd naar James Prescott Joule, ook een Engelse natuurkundige. De Joule is dus de eenheid van arbeid. Op onze breedte is de Joule ongeveer gelijk aan 0,102 kgm.

Arbeidsvermogen is niet hetzelfde als arbeid. Het is het vermogen om een bepaalde hoeveelheid arbeid in een bepaalde tijd te verrichten. Een oude eenheid van arbeidsvermogen is de paardekracht, afgekort PK, die wordt gedefinieerd als het vermogen om 75 kgm (arbeid) in 1 seconde (tijd) te leveren. Dit kan als volgt worden voorgesteld. Als een gewicht van 75 kg op de vloer staat en men plaatst dit in 1 seconde op een plank die 1 meter boven de vloer is aangebracht, heeft men een arbeidsvermogen van 1 PK ontwikkeld. De arbeid die dan verricht is, volgens de oude eenheid 75 kgm, kan zelfs een kind leveren. Als men de 75 kg verdeelt in pakjes van 1 kg, dan krijgt het kind de 75 kg heus wel op de plank, maar de gehele last in 1 seconde op de plank zetten, kunnen zelfs de meeste volwassenen niet. Hun arbeidsvermogen is daarvoor niet toereikend.

Volgens de nieuwe eenheden wordt arbeidsvermogen uitgedrukt in Joules per seconde. Eerder is vermeld dat 1 Joule bij ons ongeveer gelijk is aan 0,102 kgm, zodat 1 PK ongeveer gelijk is aan 735 Joules per seconde. De Joule per seconde wordt in de regel Watt genoemd, naar James Watt, een andere Engelse natuurkundige. Deze eenheid, afgekort tot W, zal verder worden gebruikt.

Als voorbeeld van arbeidsvermogen werd het mechanische arbeidsvermogen gebruikt. Er zijn echter andere vormen van arbeidsvermogen, te weten: warmte, elektriciteit en chemisch arbeidsvermogen. Het is mogelijk de ene vorm in de andere te doen overgaan, hoewel daarvoor dikwijls ingewikkelde toestellen nodig zijn.

De algemene uitdrukking voor arbeidsvermogen is energie en men onderscheidt arbeidsvermogen in de vorm van warmte als thermische energie, verder zijn er elektrische en chemische energie.

De auto is een goed voorbeeld van een machine waarbij alle genoemde vormen van energie worden gebruikt.

Aangenomen wordt dat de auto stilstaat en dat er benzine in de tank is. De benzine vertegenwoordigt een hoeveelheid chemische energie. De accu is geladen en bevat eveneens chemische energie. Alvorens weg te rijden wordt de motor gestart door de startmotor op de accu aan te sluiten. In de accu wordt de chemische energie omgezet in elektrische die naar de startmotor wordt gevoerd. De startmotor zet de elektrische energie om in mechanische.

Door de draaiende benzinemotor wordt benzine met lucht gemengd en het mengsel door de vonk ontstoken. De benzine verbrandt en zijn chemische energie gaat over in warmte, dus in thermische energie. De daarbij optredende hoge temperaturen doen de verbrandingsgassen uitzetten waardoor de zuigers naar beneden worden geduwd. Dit is dus de omzetting van chemische energie in thermische, die weer overgaat in mechanische. De dynamo, die bewegingsenergie van de motor ontvangt zet deze om in elektrische die in de accu wordt opgeslagen als chemische energie. Ontsteekt men de lichten dan wordt de door de dynamo opgewekte elektriciteit gebruikt om de gloeidraden heet te stoken en wel zo heet dat zij licht gaan uitstra-

len. Dit is dus een omzetting van mechanische energie in elektrische en vervolgens in thermische energie.

Omdat energie van de ene vorm in een andere kan overgaan ligt het voor de hand dat er omrekeningsfactoren moeten zijn om de eenheden van de ene energievorm in die van een andere vorm uit te drukken. Belangrijker is, dat alle genoemde energievormen in één eenheid kunnen worden uitgedrukt. Het is gebruikelijk voor arbeidsvermogen de eenheid Watt (W) te kiezen. De eenheid van arbeid volgt daaruit als Watt-secunde, afgekort tot Ws. Het is de hoeveelheid arbeid die wordt geleverd als een arbeidsvermogen van 1 Watt gedurende 1 seconde wordt aangevend. De techniek gebruikt meestal de veel grotere eenheid kiloWattuur, afgekort tot kWh. Deze is 3600000 maal zo groot. Een kiloWatt is 1000 Watt en een uur telt 3600 seconden. Met deze eenheid is een ieder vertrouwd; de elektriciteitsmaatschappijen brengen de geleverde energie volgens deze eenheid in rekening.

De vaststelling van de omrekeningsfactoren tussen de verschillende energievormen is geen eenvoudige zaak en dit geldt vooral voor de omrekening van warmte in eenheden die oorspronkelijk voor mechanische energie werden gebruikt.

Voor warmte had men een afzonderlijke eenheid n.l. de calorie, afgekort tot cal, die de hoeveelheid warmte voorstelt die nodig is om 1 gram water 1 °C in temperatuur te doen stijgen. In de techniek gebruikt men de 1000 maal grotere eenheid, de kilocalorie, afgekort tot kCal of Cal (met een hoofdletter).

De meest nauwkeurige bepaling van de arbeidswaarde van een calorie is, dat 1 calorie gelijk staat met 4,1868 Watt-secunde (of Joule). Met behulp van deze omrekeningsfactor kunnen onderstaande vergelijkingen worden opgesteld.

Arbeid:

1 Joule (J) = 1 Watt-secunde (Ws) = $2,7778 \times 10^{-7}$ kiloWatt-uur (kWh)
= 0,23889 calorieën (cal).

1 calorie (cal) = 4,1868 Watt-secunde (Ws) en ongeveer gelijk aan 0,42694 kgm
Arbeidsvermogen:

1 Joule per seconde (J/s) = 1 Watt = 0,23889 calorieën per seconde en ongeveer
gelijk aan 0,00136 PK.

1 calorie per seconde (cal/s) = 4,1868 Watt en ongeveer gelijk aan 0,0057 PK.

1 paardekracht (PK) is ongeveer 735 Watt of 176 calorieën per seconde.

Er is reeds opgemerkt dat voor de omzetting van de ene energievorm in de andere dikwijls ingewikkelde toestellen of machines nodig zijn. Deze zijn niet volmaakt en er moet dan ook rekening mee worden gehouden dat niet alle energie die men aan de ene zijde in de machine brengt, aan de andere zijde in de gewenste vorm wordt geleverd. Bij het voorbeeld van de auto wordt slechts een deel van de chemische energie in de benzine voor de voortbeweging gebruikt. Een groot deel gaat

als warmte – thermische energie – verloren met de hete uitlaatgassen en via het koelsysteem.

1.2 Geleiding van warmte

Dit is de meest bekende vorm van warmteoverdracht, waarbij warmte van een voorwerp met hogere temperatuur wordt overgedragen naar een voorwerp met lagere temperatuur. Hoe inniger het contact tussen beide voorwerpen is, des te gemakkelijker vindt de overdracht plaats. Een ouderwetse strijkbout op een hete kachel is een goed voorbeeld van warmteoverdracht door geleiding.

1.2.1 *Convectie*

Er zijn gevallen van warmteoverdracht door geleiding waarbij nog een ander verschijnsel optreedt. Dit doet zich voor als een warm voorwerp zich in koudere lucht bevindt. Daarbij wordt door geleiding warmte van het voorwerp aan de lucht overgedragen, maar er vindt bovendien nog iets anders plaats.

Het is duidelijk dat de lucht die zich het dichtst bij het voorwerp bevindt, het warmst wordt. Omdat lucht bij verwarming uitzet zal een liter van de warme lucht wat lichter zijn dan een liter van de koudere op enige afstand van het voorwerp. De lichtere lucht zal naar boven ontwijken en de plaats zal worden ingenomen door koudere lucht die op zijn beurt wordt verwarmd. Op die wijze ontstaat er een opwaarts gerichte stroming rondom het warme voorwerp. Het verschijnsel heet convectie en deze convectie is in de meteorologie een belangrijke zaak. Dat de warmteoverdracht als gevolg van het telkens in aanraking komen van nieuwe koude lucht met het warme voorwerp, aanzienlijk wordt versneld spreekt vanzelf. Het verschijnsel treedt ook op als een koud voorwerp zich in warmere lucht bevindt, maar de stroming is dan naar beneden gericht omdat de lucht vlak bij het voorwerp het sterkst afkoelt en als gevolg van de inkrimping zwaarder wordt dan de lucht op grotere afstand. In vloeistoffen treedt het verschijnsel van de convectie eveneens op. In figuur 1 is de convectie aanschouwelijk voorgesteld.

1.2.2 *Warmtegeleidingsvermogen van een aantal stoffen en dat van grond*

Het warmtegeleidingsvermogen van een stof wordt met de gekozen eenheden beschreven als het aantal Watts per m^2 dat door een laag van 1 m dikte passeert als een temperatuursverschil van $1\text{ }^\circ\text{C}$ tussen de ene en de andere zijde van de laag in stand wordt gehouden. De dimensie (afmeting) is Watts per m^2 en per $^\circ\text{C}$ per meter. Deze laat zich vereenvoudigen tot $\text{W}/\text{m }^\circ\text{C}$.

In calorïën uitgedrukt gebruikt men meestal het aantal calorïën dat per cm^2 en per seconde door een laag van 1 cm dikte passeert als een temperatuursverschil

van 1 °C tussen de ene en de andere zijde van de laag in stand wordt gehouden. De dimensie is: cal/cm s °C. De eenheid W/m °C is 419 maal zo groot als de laatstgenoemde.

Warmtegeleidingsvermogen is een eigenschap van de stof en van een aantal stoffen wordt in tabel 1 het warmtegeleidingsvermogen vermeld.

Tabel 1 Warmtegeleidingsvermogen van een aantal stoffen

| stof | warmtegeleidingsvermogen in W/m °C | idem in cal/cm s °C |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| goud | 292,5 | 0,698 |
| zilver | 419 | 1,000 |
| koper | 388 | 0,926 |
| aluminium | 202,8 | 0,484 |
| ijzer | 83,8 | 0,200 |
| water (stilstaand)* | 0,58 | 0,0014 |
| lucht „ * | 0,024 | 0,0000578 |

* de toevoeging: stilstaand is nodig. Als water en lucht kunnen stromen wordt door de convectie het warmtetransport aanzienlijk vergroot.

Uit de gegevens blijkt dat het warmtegeleidingsvermogen van water ongeveer 0,14% van dat van zilver bedraagt en dat dit vermogen bij lucht slechts 4% van dat van water is.

Van grond kunnen moeilijk waarden worden opgegeven omdat de structuur en het vochtgehalte, die beide een grote invloed op het warmtegeleidingsvermogen hebben, zo sterk variëren. Van een tweetal monsters, één van zand en één van klei worden in tabel 2 de waarden vermeld bij verschillende poriënvolumina en vochtgehalten (ref. 27).

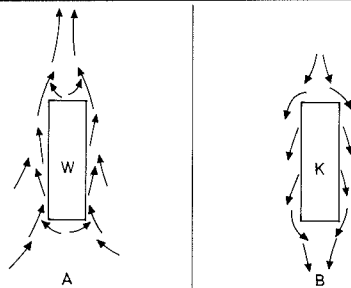


Fig. 1 A. Convectiestroming om een warm voorwerp in koude lucht of koude vloeistof. B. idem om een koud voorwerp in warme lucht of vloeistof.

Tabel 2 Warmtegeleidingsvermogen van grond bij verschillende poriënvolumina en vochtgehalten

| <i>I zand.</i> vochtgehalte in volumeprocenten | poriënvolume | | | | |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 30 % | 40 % | 50 % | 60 % | 70 % |
| 0 | 0,3771 (0,0009) | 0,2514 (0,0006) | 0,1676 (0,0004) | 0,1257 (0,0003) | 0,0838 (0,0002) |
| 10 | 1,676 (0,0040) | 1,1732 (0,0028) | 0,838 (0,0020) | 0,5866 (0,0014) | 0,4609 (0,0011) |
| 20 | 2,1788 (0,0052) | 1,6341 (0,0039) | 1,1732 (0,0028) | 0,8799 (0,0021) | 0,6285 (0,0015) |
| 30 | 2,4302 (0,0058) | 1,8436 (0,0044) | 1,3827 (0,0033) | 1,0056 (0,0024) | 0,7123 (0,0017) |
| 40 | | 2,0112 (0,0048) | 1,5503 (0,0037) | 1,1313 (0,0027) | 0,838 (0,0020) |
| 50 | | | 1,676 (0,0040) | 1,257 (0,0030) | 0,9637 (0,0023) |
| 60 | | | | 1,4246 (0,0034) | 1,0475 (0,0025) |
| 70 | | | | | 1,1732 (0,0028) |
| <i>II klei.</i> | | | | | |
| 0 | 0,3897 (0,00093) | 0,2849 (0,00068) | 0,2095 (0,00050) | 0,1466 (0,00035) | 0,1047 (0,00025) |
| 10 | 1,3408 (0,00320) | 1,0056 (0,00240) | 0,7542 (0,00180) | 0,5866 (0,00140) | 0,4399 (0,00105) |
| 20 | 1,6969 (0,00405) | 1,3617 (0,00325) | 1,0684 (0,00255) | 0,7961 (0,00190) | 0,5866 (0,00140) |
| 30 | 1,8855 (0,00450) | 1,5084 (0,00360) | 1,1732 (0,00280) | 0,9218 (0,00220) | 0,6704 (0,00160) |
| 40 | | 1,6341 (0,00390) | 1,2989 (0,00310) | 1,0056 (0,00240) | 0,7542 (0,00180) |
| 50 | | | 1,4246 (0,00340) | 1,1313 (0,00270) | 0,8799 (0,00210) |
| 60 | | | | 1,1732 (0,00280) | 0,9637 (0,00230) |
| 70 | | | | | 1,0265 (0,00245) |

De waarden zijn aangegeven in W/m °C; tussen haakjes de waarden in cal/cm s °C.

Uit deze tabel, die uiteraard slechts voorbeelden geeft, blijkt dat bij een zelfde poriënvolume het warmtegeleidingsvermogen sterk toeneemt als het vochtpercentage stijgt van 0 naar 10%. Bij gelijkblijvend vochtpercentage neemt het geleidingsvermogen af als het poriënvolume toeneemt. Deze verschijnselen zijn gemakkelijk

te verklaren omdat in het eerste geval lucht wordt vervangen door het veel beter geleidende water en in het laatste, gronddeeltjes worden vervangen door de veel slechter geleidende lucht.

Zowel bij zand als bij klei blijkt een groot poriënvolume, dus een losse grond als die tevens droog is, de warmte het slechtst te geleiden. Het valt verder op dat er tussen zand en klei weinig verschil bestaat. In droge toestand geleidt de klei de warmte wat beter, maar in natte toestand is het andersom.

1.3 Straling

Er zijn verschillende soorten van straling, maar deze verhandeling beperkt zich tot de eigenschappen van wat elektro-magnetische straling wordt genoemd.

1.3.1 Golflengte

De eerste eigenschap die aan straling wordt toegekend is, dat het een golfverschijnsel is en dat dientengevolge van golflengte kan worden gesproken.

Geluid is eveneens een golfverschijnsel, waarbij de toonhoogte door de golflengte wordt bepaald, maar het is van geheel andere aard omdat geluid gebonden is aan een stof waarin de golven worden opgewekt en zich voortplanten. In het dagelijks leven is deze stof de lucht en via de gehoororganen worden wij het bestaan van deze golven gewaar.

De tweede eigenschap van de elektromagnetische straling is, dat hij zich in het luchtledig voortplant met een snelheid van ongeveer 300000 km per seconde. In lucht is de snelheid slechts weinig lager. Daarbij vergeleken verplaatsen geluidsgolven zich maar langzaam, n.l. in lucht met een snelheid van ongeveer 300 m per seconde.

Dit grote snelheidsverschil is er de oorzaak van dat bij onweer vrijwel onmiddellijk de bliksem wordt gezien maar de donder eerst veel later wordt gehoord.

De verschillende soorten elektromagnetische straling worden onderscheiden naar de golflengten. Een overzicht wordt gegeven in tabel 3.

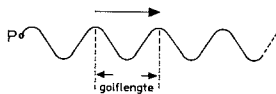


Fig. 2 Straling als golfverschijnsel. Het punt *P* – links – zendt straling uit in de richting van de pijl.

Tabel 3 De verschillende soorten elektromagnetische straling

| Benaming | golflengtegebied |
|---------------------------------|--|
| lange radiogolven | 1000 km – 600 m |
| korte en ultrakorte radiogolven | 600 m – 0,01 cm |
| infrarood | 0,01 cm – 0,78 μm |
| rood licht | 0,78 – 0,63 μm |
| oranje licht | 0,63 – 0,60 μm |
| geel licht | 0,60 – 0,57 μm |
| geelgroen licht | 0,57 – 0,55 μm |
| groen licht | 0,55 – 0,52 μm |
| blauwgroen licht | 0,52 – 0,50 μm |
| blauw licht | 0,50 – 0,45 μm |
| violet licht | 0,45 – 0,38 μm |
| ultraviolette straling | 0,38 – 0,01 μm |
| Röntgenstraling | 0,01 – 0,000.000.01 μm |
| kosmische straling | kleiner dan 0,000.000.01 μm |

Het teken μm staat voor een miljoenste deel van een meter of een duizendste deel van een millimeter. Dikwijls vindt men golflengten van de lichtstraling, de ultraviolette straling en het bij het licht aansluitende deel van het infrarood, aangegeven in Ångströmeenheden (afgekort Å). Een Ångströmeenheid is een tienn miljoenste deel van een millimeter.

Het is goed, een voorstelling te hebben hoe klein een dergelijke lengtemaat is. Een meter telt ongeveer evenveel Ångströmeenheden als er seconden zijn verlopen vanaf het einde van de tachtigjarige oorlog tot heden (1973). Een Ångströmeenheid is ongeveer de afmeting van een waterstofatoom. In moderne literatuur wordt ook de nanometer gebruikt, dat is een miljardste deel van een meter, dus gelijk aan 10 Ångströmeenheden. De nanometer wordt afgekort tot nm.

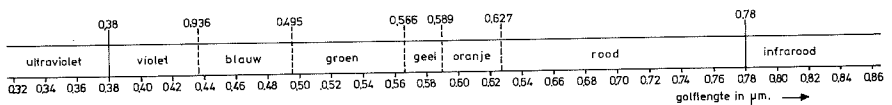


Fig. 3 Lichtstraling. De grenzen tussen de golflengtegebieden zijn niet scherp. Zo zal straling met een golflengte van 0,48 μm door de meeste waarnemers als groenachtig blauw worden waargenomen, waarbij ook nog grote individuele verschillen voorkomen. Ultraviolet en infrarood zijn in de tekening wel aangegeven, maar deze straling is niet zichtbaar.

Het volgende heeft betrekking op de meest belangrijke straling, n.l. die in het gebied van het ultraviolet, het licht en het infrarood. In dit gebied wordt in de meteorologie onderscheid gemaakt tussen kortgolvlige en langgolvlige straling waarbij de grens wordt gelegd bij 3 à 4 μm .

1.3.2 Bij stralingsprocessen betrokken hoeveelheden energie

De belangrijkste eigenschap van de straling is, dat deze energie vertegenwoordigt. Een voorwerp dat straling uitzendt verliest energie en een ander dat straling opneemt (absorbeert) wint energie. De altijd om ons heen aanwezige straling betekent dan ook voortdurende verplaatsing van energie in allerlei richtingen. De bij de stralingsprocessen betrokken hoeveelheden energie kunnen in de gekozen eenheden worden uitgedrukt.

Oppervlakken zenden straling uit in een breed golflengtegebied. De totale hoeveelheid stralingsenergie is evenredig met de vierde macht van de absolute temperatuur van het, dikwijls uiterst dunne, oppervlaktelaagje.

Bij de Celsiusschaal ligt het nulpunt van de temperatuur bij het vriespunt van water en bij de temperatuur waarbij water onder normale luchtdruk kookt, ligt de waarde 100 en met deze schaal is een ieder vertrouwd.

Bij natuurkundige beschouwingen en berekeningen maakt men gebruik van de absolute temperatuur. Hierbij ligt het nulpunt: 273,15 °C onder het vriespunt van water. De schaal is verdeeld in graden die overeenkomen met de graden van Celsius, zodat het vriespunt van water bij 273,15 graden absoluut ligt. De graden worden graden Kelvin genoemd naar William Thompson, de latere Lord Kelvin. Zij worden geschreven als K. Water bevriest dus bij 273 K en kookt bij 373 K als wij gemakshalve de 15 achter de komma verwaarlozen.

De afhankelijkheid van de hoeveelheid uitgezonden stralingsenergie (S) van de vierde macht van de absolute temperatuur is gegeven in de wet van Stefan-Boltzmann, die luidt:

$$S = \sigma T^4$$

De Griekse letter σ (sigma) stelt een factor voor waarmee de vierde macht van de temperatuur moet worden vermenigvuldigd om de totale hoeveelheid energie te berekenen. De waarde van σ bedraagt:

$$5,669 \times 10^{-8} \text{ en de dimensie is } \text{W/m}^2\text{K}^4 \text{ *)}$$

De uitgezonden hoeveelheid stralingsenergie (S) bij een temperatuur van 0 °C (= 273K) bedraagt dus:

*) voor wie niet vertrouwd is met de schrijfwijze: 10^{-8} wordt er op gewezen dat dit de verkorte schrijfwijze is voor 1/100.000.000, dus voor een 1 gedeeld door een 1 met 8 nullen. Zo is 10^{-1} de schrijfwijze voor 1/10, 10^{-2} voor 1/100, 10^{-3} voor 1/1000 enz.

$$5,669 \times 10^{-8} \times 273 \times 273 \times 273 \times 273 = 315 \text{ W/m}^2$$

Dikwijls wordt voor σ een andere waarde opgegeven, maar dan verschijnt de uitkomst S in andere eenheden. Veel gebruikt wordt: $\sigma = 8,12 \times 10^{-11}$ waarvan de dimensie is: cal/cm² minuut K⁴. Voor een oppervlak met een temperatuur van 0 °C (273 K) wordt dan de waarde van S: 0,451 cal/cm² min.

Voor een aantal oppervlaktetemperaturen wordt in tabel 4 de uitgestraalde energie S volgens de wet van Stefan-Boltzmann gegeven.

Tabel 4

| temp. | S in W/m ² | S in cal/cm ² min.**) |
|----------------|-----------------------|----------------------------------|
| -20 °C (253 K) | 232,5 | 0,333 |
| 0 °C (273 K) | 315 | 0,451 |
| 10 °C (283 K) | 364 | 0,521 |
| 20 °C (293 K) | 418 | 0,599 |
| 100 °C (373 K) | 1097 | 1,572 |

**) cal per cm² wordt in de Angelsaksische literatuur dikwijls langley (afgekort ly) genoemd. S wordt dan opgegeven in ly per minuut.

De wet van Stefan-Boltzmann geldt voor de uitstraling van ideale, zogenaamde absoluut zwarte oppervlakken. De uitstraling van natuurlijke oppervlakken blijft onder de berekende waarde en daarom moet σT^4 nog worden vermenigvuldigd met een factor kleiner dan 1, de emissiecoëfficiënt ϵ (emissie betekent uitzending en ϵ is de griekse letter epsilon). De waarde van ϵ is voor elk oppervlak anders en hangt ook nog van het temperatuursgebied af. Bij temperaturen zoals die buiten voorkomen kan de emissiecoëfficiënt van de bodem, de plant en van de meeste organische materialen op 0,9 worden gesteld. De waarden die bij de toepassing van de wet van Stefan-Boltzmann worden gevonden, zijn voor deze oppervlakken dus rond 10% te hoog.

Bij oppervlakken wordt het eerst gedacht aan die van vaste voorwerpen of vloeistoffen, maar straling wordt ook uitgezonden door gassen. Bij vaste voorwerpen wordt de straling bepaald door de temperatuur en de emissiecoëfficiënt van het oppervlaktelaagje. Bij materiaal dat met een verflaag is bedekt, gelden dan ook slechts de genoemde eigenschappen van het verflaagje. Gassen zijn veel minder dicht dan vaste stoffen en vloeistoffen. De straling van gassen hangt dan ook af van de eigenschappen van een veel dikkere laag.

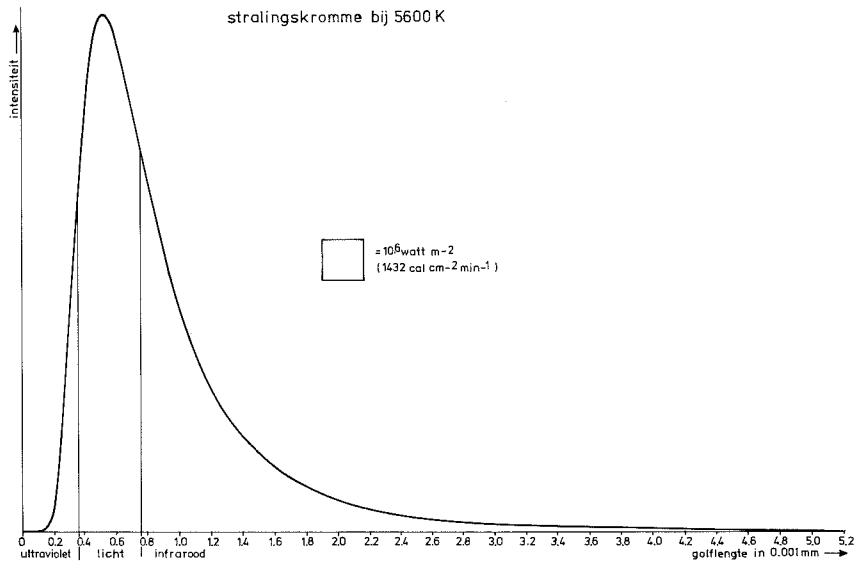
Bij de aanname van een waarde voor de emissiecoëfficiënt van 0,9 kan men zich afvragen hoe de vermindering van 10% tot stand komt. Men zou zich kunnen voorstellen dat de verkleining van ϵ wordt veroorzaakt doordat de uitstraling over

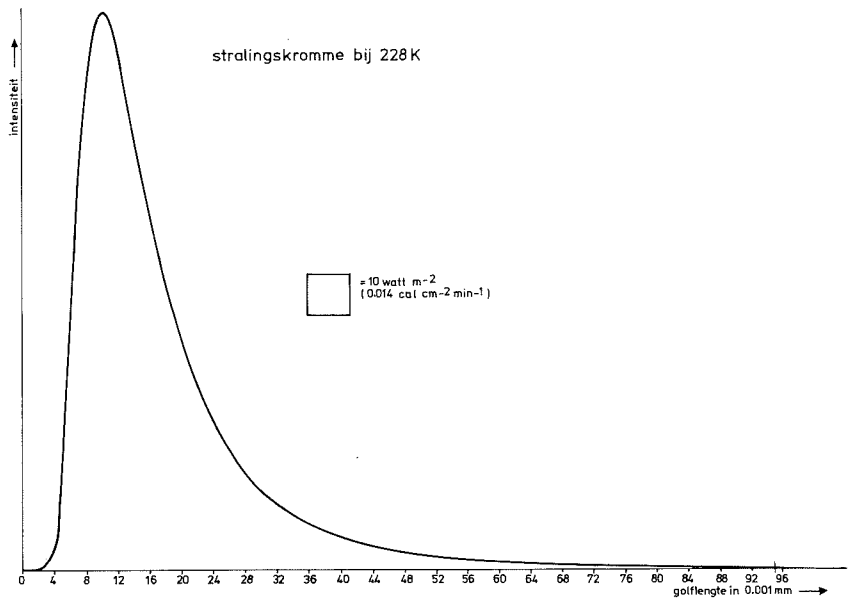
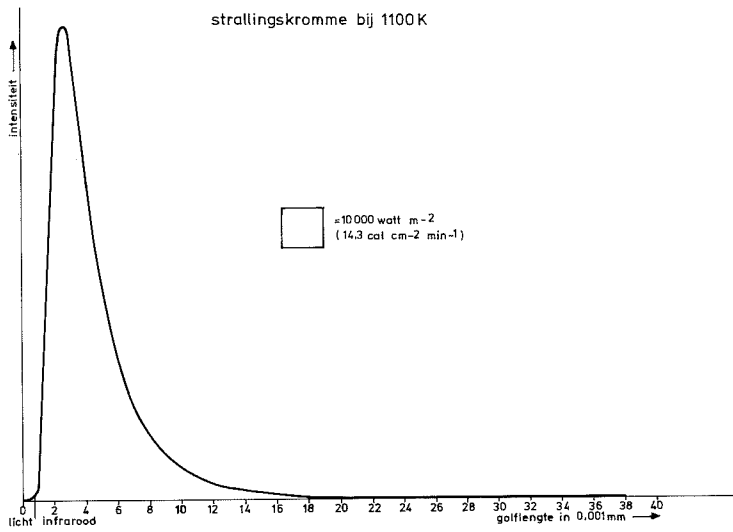
alle golflengten evenredig wordt verminderd. De werkelijkheid is echter dat de vermindering ontstaat doordat bepaalde golflengten of golflengtegebieden niet of in geringe mate worden uitgezonden.

De atmosfeer heeft een kleine emissiecoëfficiënt en van de gassen waaruit hij is samengesteld, te weten: stikstof, zuurstof, ozon, koolzuurgas en waterdamp hebben stikstof en zuurstof een emissiecoëfficiënt gelijk nul. De overige gassen stralen wel uit maar niet in alle golflengtegebieden. Zo straalt waterdamp praktisch niet uit in het golflengtegebied tussen 9 en 11 μm . Op dit feit wordt nog nader teruggekomen.

Zoals reeds werd meegedeeld bevat de door een oppervlak uitgezonden straling vele golflengten en als men voor een ideaal oppervlak, waarvoor de wet van Stefan-Boltzmann volledig geldt, de golflengte horizontaal uitzet tegen de intensiteit, dan ontstaan grafieken als die van de figuren 4, 5 en 6. De figuren laten zien dat de intensiteit aanvankelijk snel oploopt als de golflengte toeneemt. Dan komt er een top in de kromme waarbij de intensiteit het hoogst is. Bij verder toenemende golflengte daalt de intensiteit, maar deze daling verloopt veel minder steil dan de toename links van de top.

Hoewel de krommen voor alle temperaturen hetzelfde karakter vertonen is hun ligging ten opzichte van de golflengteschaal verschillend en hangt af van de tem-





peratuur van hetstralend oppervlak. De top van de kromme verschuift naar kortere golflengten als de temperatuur hoger is en omgekeerd. De ligging van de top is op eenvoudige wijze te berekenen met behulp van de verschuivingswet van Wien. Als de golflengte wordt uitgedrukt in de eenheid μm dan ligt de top van de kromme bij een golflengte die gelijk is aan $2880/T$, waarbij T de temperatuur in K is. Bij $15^\circ\text{C} = 288\text{ K}$ ligt de top bij $2880/288 = 10\ \mu\text{m}$. Bij een oppervlaktetemperatuur van 1100 K ligt de top bij $2,6\ \mu\text{m}$ en bij 5600 K , de oppervlaktetemperatuur van de zon, bij $0,5\ \mu\text{m}$.

Figuren 4, 5 en 6 In alle drie de figuren is horizontaal de golflengte uitgezet en verticaal de bij elke golflengte behorende sterkte van de uitgezonden straling.

Het oppervlak onder de krommen is een maat voor de totale hoeveelheid energie van de uitgezonden straling. Bij een oppervlaktetemperatuur van 5600 K ($= 5327^\circ\text{C}$) is die totale hoeveelheid $\pm 55,8$ miljoen W/m^2 .

Het in de figuur 4 getekende vierkantje stelt een hoeveelheid van 1 miljoen W/m^2 voor.

Bij de temperatuur van 5600 K valt $41,7\%$ van het totale oppervlak tussen de golflengten $0,36$ en $0,76\ \mu\text{m}$ en wordt dus als zichtbare straling (licht) uitgezonden.

De kromme van figuur 5 behoort bij een oppervlaktetemperatuur van 1100 K ($= 827^\circ\text{C}$). De totale hoeveelheid uitgezonden stralingsenergie bedraagt ongeveer $84000\ \text{W}/\text{m}^2$. Een zeer klein deel n.l. $0,003\%$ wordt uitgezonden bij golflengten kleiner dan $0,76\ \mu\text{m}$. Een voorwerp met een dergelijke oppervlaktetemperatuur (nachtvorstkachtjes) is in het donker juist zichtbaar door deze uiterst geringe hoeveelheid - rood - licht die het uitstraalt. Het in de figuur getekende vierkantje stelt een hoeveelheid van $10000\ \text{W}/\text{m}^2$ voor.

De stralingskromme van figuur 6 heeft betrekking op een oppervlaktetemperatuur van 288 K ($= 15^\circ\text{C}$). Straling met een golflengte van minder dan $0,76\ \mu\text{m}$ wordt niet uitgezonden. Voorwerpen met een temperatuur van 15°C geven dan ook geen licht. Dat men dergelijke voorwerpen toch kan zien komt doordat zij opvallend licht van de zon of van een lamp terugkaatsen. De totale hoeveelheid stralingsenergie die wordt uitgezonden bedraagt $380\ \text{W}/\text{m}^2$. Het vierkantje stelt een hoeveelheid van $10\ \text{W}/\text{m}^2$ voor.

De toppen van de drie krommen liggen bij verschillende golflengten.

Bij 5600 K ligt de top bij $0,514\ \mu\text{m}$, bij welke golflengte de uitstraling het sterkst is. De top bij 1100 K ligt bij $2,54\ \mu\text{m}$ en die bij 288 K bij $10\ \mu\text{m}$.

De horizontale en verticale schalen zijn bij de figuren verschillend.

Als alle figuren op dezelfde schaal zouden zijn getekend, zou òf die voor 5600 K ver buiten het papier vallen òf die voor 288 K zou nauwelijks bruikbaar zijn.

Volgens tabel 3 heeft de zichtbare straling, die licht wordt genoemd, golflengten die liggen tussen 0,36 en 0,76 μm zodat uit de kromme voor de temperatuur van 288 K volgt dat geen straling in dit golflengtegebied wordt uitgezonden. Anders gezegd, een oppervlak met een temperatuur van 15 °C straalt geen licht uit. Bij een oppervlaktetemperatuur van 5600 K ligt de top van de kromme bij 0,5 μm dus midden in het golflengtegebied dat licht heet. De zon straalt dan ook een intensief licht uit. De kromme behorende bij 1100 K (827 °C) vertoont de top bij 2,6 μm dus in het infrarood. Het begin van de kromme ligt zodanig dat tussen 0,5 en 1 μm reeds geringe uitstraling plaats vindt, dus ook bij golflengten kleiner dan 0,76 μm . Een oppervlak met een zodanige temperatuur zal dan ook enig licht uitstralen en zichtbaar zijn in het donker. Dergelijke temperaturen worden bereikt bij nachtvorstkachelletjes waarvan de mantel dan ook enig donkerrood licht geeft. De sterkte van de uitstraling van een vlakje is niet in alle richtingen dezelfde. Deze is het grootst in de richting loodrecht op het vlakje en wordt kleiner naarmate de richting een kleinere hoek met het vlakje maakt. Als die hoek 0° bedraagt, dus een richting evenwijdig met het oppervlak, is de sterkte gelijk nul geworden. Zie fig. 7. Denkt men over het vlakje een halve bol van doorlatend materiaal dan zijn de uitstralingsverliezen door de verschillende delen van de halve bol, zoals in fig. 7a is aangegeven.

1.3.3 Transmissie, reflectie, absorptie en verstrooiing van straling

Nu de uitstraling is behandeld, dient nog te worden nagegaan wat er gebeurt als straling een oppervlak treft en verder wat er 'onderweg' met straling kan plaatsvinden.

Straling die een oppervlak treft kan worden doorgelaten (getransmitteerd). Voorbeelden zijn glas en water die beide de lichtstraling vrijwel ongehinderd doorlaten. Gassen laten in het algemeen het licht door en meestal ook het infrarood. Dit laatste geldt niet meer als de gasmolekulen uit meer dan 2 atomen bestaan. De gassen waaruit de atmosfeer bestaat zijn in hoofdzaak stikstof (N_2) met 77,08 volume procenten, zuurstof (O_2) met 20,75 vol %, waterdamp (H_2O) 1,2 vol %, argon (Ar) 0,93 vol %, koolzuurgas (CO_2) 0,03 vol % en waterstof (H_2) 0,01 vol %. Dit is de gemiddelde samenstelling op zeeniveau; op grotere hoogte komt ook nog ozon (O_3) voor. Uit deze opsomming blijkt dat gassen met molekulen die uit meer dan 2 atomen bestaan, slechts een zeer klein deel van de dampkringslucht uitmaken. Ozon, koolzuurgas en waterdamp zijn voor de stralingseigenschappen van de atmosfeer van groot belang. Zij laten van het infrarood sommige golflengten wel en andere niet of in geringe mate door.

Bij het doorlaten van licht door de atmosfeer moet nog melding worden gemaakt van een verschijnsel dat verstrooiing wordt genoemd. Uit het van de zon afkomstige licht wordt door de stikstof- en zuurstofmolekulen een deel, en wel vooral het

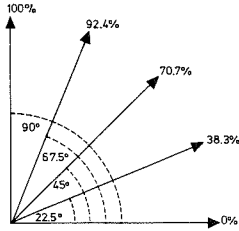


Fig. 7 De uitstraling van een horizontaal vlakje is het grootst in de verticale richting. Stelt men deze op 100 dan is de uitstraling onder hoeken van $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ en 90° als in de figuur aangegeven.

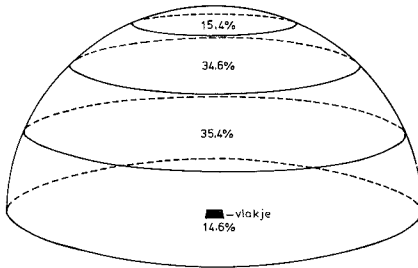


Fig. 7a In deze figuur is een halve bol over het horizontale vlakje uit fig. 7 getekend. Op de bol, die als volkomen doorlatend voor straling is gedacht, zijn op afstanden van $22,5^\circ$ ringen getekend. De eerste ring heeft de grootste oppervlakte, de bovenste – het kapje – de kleinste.

Hoewel de sterkte in de verticale richting het grootst is, is de oppervlakte van het kapje het kleinst en daarom passeert door het kapje slechts 15,4% van de van het vlakje uitgaande straling. Een zelfde redenering geldt voor de onderste ring. In de richtingen die door de ondersté ring worden 'gevangen' is de sterkte klein, maar de oppervlakte van de ring is zo groot dat toch nog 14,6% van alle straling door deze ring passeert.

blauw, in alle richtingen verstrooid. In alle richtingen betekent ook in neerwaartse richting en als deze straling het oog treft ziet men de hemel blauw. Waarom juist het blauw wordt verstrooid hangt samen met de afmetingen van de zuurstof- en stikstofmolekulen.

Straling die een oppervlak treft en niet wordt doorgelaten kan worden teruggekaatst (gereflecteerd) of geabsorbeerd. Zie fig. 8 b en c. Terugkaatsing of reflectie kan totaal zijn, hetgeen betekent dat alle opvallende straling, ongeacht de golflengte, wordt teruggekaatst. Voor licht kan deze toestand met een gepolijst zilveroppervlak worden benaderd. Zelden is de reflectie totaal en meestal worden bepaalde golflengten of golflengtegebieden wel en andere niet teruggekaatst. Bij lichtstraling is het verschijnsel algemeen bekend. Een rood oppervlak kaatst alleen het rood terug en een grasmat alleen het groen en deze oppervlakken worden dan ook respectievelijk rood en groen gezien. Zie fig. 9. In situaties waarin het opvallende

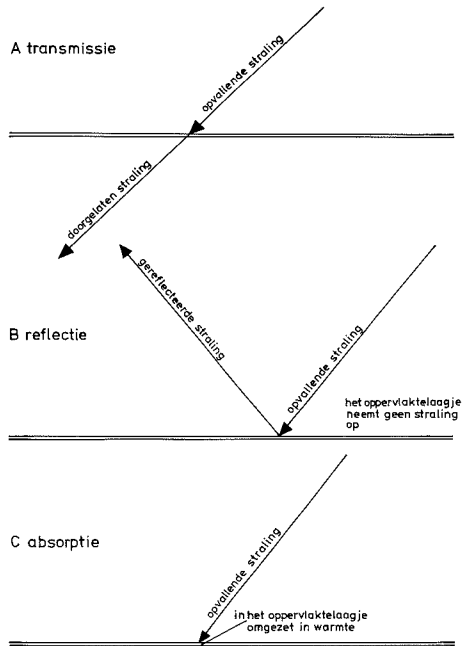


Fig. 8 In de meeste gevallen treden absorptie en reflectie op, waarbij sommige golflengten worden geabsorbeerd en andere worden gereflecteerd. Ook combinaties van absorptie, reflectie en transmissie komen voor.

licht bijvoorbeeld geen rood bevat kan ook geen rood worden teruggekaatst. Het oppervlak is dan ook niet rood. De zogenaamde natriumverlichting langs de verkeerswegen straalt uitsluitend geel licht uit en bij avond is een vuurrode auto dan ook niet rood maar vaalbruin. Zie fig. 10.

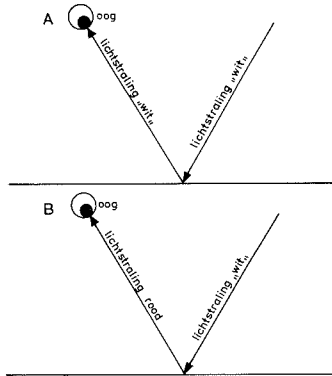


Fig. 9 Bij A worden alle golflengten gereflecteerd. Het oog ziet het oppervlak 'wit'. Bij B worden alleen de golflengten uit het gebied: rood gereflecteerd de overige worden geabsorbeerd. Het oog ziet het oppervlak: rood.

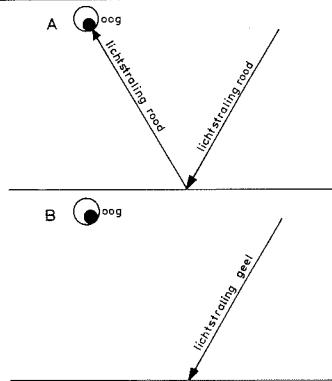


Fig. 10 A. Het witte oppervlak uit fig. 9 A met zuiver rood licht bestraald. Het rode licht wordt teruggekaatst en het oog ziet het oppervlak: rood. B. Het rode oppervlak uit fig. 9 B bestraald met zuiver geel licht. Geel wordt geabsorbeerd en het oog vangt geen straling op en ziet het oppervlak: zwart.

Absorptie van straling vindt plaats als zij een oppervlak treft en niet wordt teruggekaatst of doorgelaten. Die absorptie vindt bij de meeste vaste stoffen plaats in een uiterst dun oppervlaktelaagje en hierin wordt de geabsorbeerde straling, die immers energie vertegenwoordigt, omgezet in warmte. Bij gassen is de laag, waarin de absorptie en de omzetting in warmte plaats vindt, veel dikker.

Nu is er een belangrijke wet, de wet van Kirchhof, die zegt dat een oppervlak uitsluitend die golflengten kan uitzenden die het kan absorberen. Binnen hetzelfde temperatuurgebied mag men de waarde van de absorptiecoëfficiënt α , dat is het deel van de stralingsenergie dat geabsorbeerd wordt, gelijk stellen aan die van de emissiecoëfficiënt ϵ . Bij de oppervlakken van grond en plant mag de absorptie voor infrarode straling dan ook op 0,9 worden gesteld.

Het is duidelijk dat uitstraling en absorptie de mechanismen zijn die energieoverdracht van het ene naar het andere voorwerp bewerkstelligen. Een voorbeeld is de energieoverdracht van de zon naar de aarde met zijn atmosfeer die ruim 1 miljard mega-Watt belooft. Een mega-Watt (afgekort MW) = 1000000 Watt.

1.4 Stralings- en warmtehuishouding van de bodem

1.4.1 Onbegroeide grond

Begonnen wordt met de stralingshuishouding van een onbegroeide grond op een zonnige dag. Zie fig. 11.

Het bodemoppervlak ontvangt de kortgolvlige zonnestraling en absorbeert deze voor een groot deel. De kortgolvlige straling bestaat uit de direct van de zon afkomstige straling, verminderd met hetgeen door de atmosfeer wordt geabsorbeerd en verstrooid, maar vermeerderd met het naar de aarde gerichte deel van de verstrooide straling. Samen noemt men de kortgolvlige straling die direct en via verstrooiing het aardoppervlak bereikt, de globale straling. De globale straling bereikt de hoogste waarde als de zon hoog staat. Bij ons staat omstreeks 21 juni in het middaguur de zon in de hoogste stand en dan kan de waarde van de globale straling gemakkelijk 800 W/m^2 bedragen. In calorieën uitgedrukt is die waarde $1,2 \text{ cal/cm}^2$ min. Als wordt aangenomen dat 20% wordt teruggekaatst absorbeert onder die omstandigheden elke vierkante meter bodemoppervlak 640 W.

Het aardoppervlak ontvangt voorts de langgolvlige straling van de atmosfeer. Deze is afkomstig van het koolzuurgas, het ozon en de waterdamp. Omdat stikstof en zuurstof de langgolvlige straling niet absorberen zenden zij die ook niet uit. Men zou kunnen zeggen dat zij, voorzover het de stralingshuishouding betreft, in het infrarood niet meedoen. De hoeveelheden CO_2 en O_3 in de atmosfeer kunnen met enige vrijheid als constant worden beschouwd zodat aan de door deze gassen uitgezonden hoeveelheid stralingsenergie een constante waarde kan worden toege-

kend, die alleen afhangt van de temperatuur van die gassen. Anders is het met de waterdamp die in steeds wisselende hoeveelheden in de atmosfeer aanwezig is. De waterdamp neemt een belangrijk deel van de straling van de atmosfeer voor zijn rekening. De omvang van de atmosferische straling, die atmosferische tegenstraling wordt genoemd, kan worden geschat met behulp van een empirische formule waarbij gebruik wordt gemaakt van de temperatuur van de onderste luchtlag en het waterdampgehalte daarvan. Voor het waterdampgehalte wordt de relatieve vochtigheid, in combinatie met de temperatuur, als maatstaf gebruikt. Verder gelden de waarden bij een bepaalde aanname van de verticale verdeling van de waterdamp in de atmosfeer.

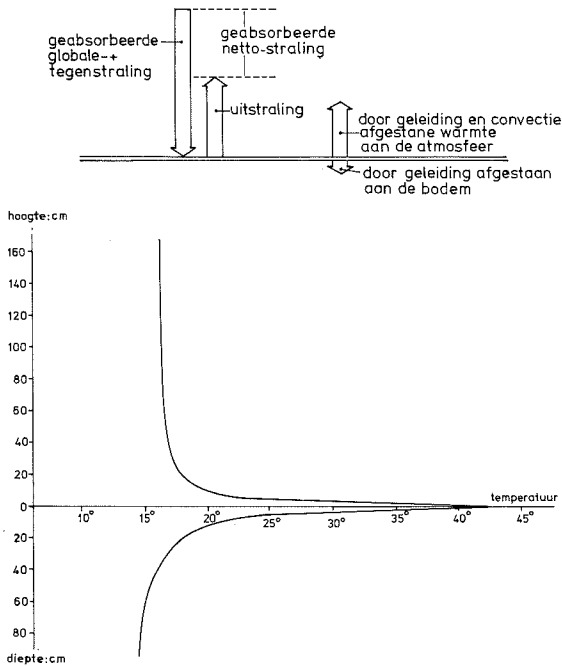


Fig. 11 Stralingshuishouding van een onbegroeide grond midden op een zomerdag bij heldere hemel. Onderste helft van de figuur: Het daarbij optredende temperatuursverloop in de onderste luchtlag en in de bodem.

Tabel 5 Atmosferische tegenstraling bij heldere hemel bij verschillende waarden van de luchttemperatuur en de relatieve vochtigheid op een hoogte van 2 meter, uitgedrukt in W/m^2 met tussen haakjes de waarde in $cal/cm^2 \text{ min}$

| lucht temperatuur | relatieve vochtigheid in % | | | | |
|----------------------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 0 °C | 218 (0,312) | 223 (0,319) | 227 (0,325) | 231 (0,331) | 251 (0,359) |
| 5 °C | 245 (0,351) | 251 (0,359) | 256 (0,366) | 259 (0,371) | 262 (0,376) |
| 10 °C | 274 (0,393) | 280 (0,401) | 284 (0,407) | 288 (0,412) | 290 (0,415) |
| 15 °C | 304 (0,436) | 309 (0,443) | 313 (0,448) | 314 (0,451) | 316 (0,453) |

Nu kunnen, bij wijze van voorbeeld, de waarden van de posten van de stralingshuis-houding worden ingevuld voor een heldere dag in juni waarbij de luchttemperatuur op 15 °C wordt geschat en de relatieve vochtigheid op 60 %.

De globale straling wordt gesteld op $800 W/m^2$ en daarvan wordt 80 % door het bodemoppervlak geabsorbeerd of $640 W/m^2$. De atmosferische tegenstraling bedraagt volgens tabel 5, $309 W/m^2$ en deze langgolvlige straling wordt voor 90 % geabsorbeerd, dat wordt dan een bedrag van $278 W/m^2$. De temperatuur van het oppervlaktelaagje wordt geschat op 42 °C (315 K) en het oppervlak zal dus een hoeveelheid van $0,9 \sigma 315^4 = 487 W/m^2$ uitstralen. Optelling van de geabsorbeerde bedragen levert als uitkomst: $918 W/m^2$. Het verlies door uitstraling moet daarvan worden afgetrokken en het aardoppervlak ontvangt dus netto: $918 - 497 = 421 W/m^2$ ($0,603 cal/cm^2 \text{ min}$.)

Zoals reeds gezegd, komt deze energie als warmte aan het oppervlaktelaagje ten goede en dit laagje staat deze warmte door geleiding af aan de aangrenzende lucht en aan de bodem.

Welk deel aan de atmosfeer en welk deel aan de bodem ten goede komt, is niet in het algemeen te zeggen. In het geval waarin de oppervlaktetemperatuur op 42 °C werd geschat, kan worden aangenomen dat 20 à 25 %, dus 85 à $105 W/m^2$ in de grond verdwijnt waardoor deze warmer wordt. De rest 315 à $335 W/m^2$, komt aan de atmosfeer ten goede.

Het warmtetransport naar beneden vindt praktisch uitsluitend door warmtegeleiding plaats en dat naar boven door convectie, waarbij allerlei andere luchtbewegingen het proces nog vergemakkelijken. Zie fig. 11.

1.4.2 Begroeide grond

Bij een begroeide grond, waarbij de aanwezigheid van een gesloten gewas wordt ondersteld, is de zaak wat meer gecompliceerd. Zie fig. 12. De absorptie van de

globale straling en die van de atmosferische tegenstraling vinden hierbij plaats door de bladeren van het gewas. Uit deze bladeren verdampt water en voor verdamping is veel energie nodig. Om 1 gram water in 1 gram waterdamp van dezelfde temperatuur over te voeren zijn ongeveer 2500 Watt-secunden nodig.

Als op dezelfde wijze als bij een onbegroeide grond, de balans wordt opgemaakt, is de post van de geabsorbeerde globale en atmosferische tegenstraling ook nu 918 W/m². De uitstraling is geringer omdat de oppervlaktetemperatuur van het gewas niet op 42 °C mag worden gesteld. Die temperatuur wordt geschat op 18 °C (291 K). Het bedrag van de uitstraling wordt daardoor 407 W/m² en netto ontvangt het gewas dan 511 W/m². Nu is het bekend dat van deze hoeveelheid energie onder de aangenomen omstandigheden wel tot 90 % wordt gebruikt voor de verdamping van water uit het gewas en dit betekent dat 435 W/m² voor die verdamping wordt gebruikt. Voor de afgifte aan de atmosfeer en aan de bodem blijft dan nog 52 W/m² beschikbaar, een gering bedrag vergeleken bij dat wat bij een onbegroeide grond daarvoor beschikbaar is.

1.4.3 Nachtelijke situatie bij onbegroeide grond

Voor de toestand gedurende de nacht kan nu ook een balans worden opgesteld. Opnieuw worden een onbegroeide grond, een heldere hemel en praktisch windstijlte ondersteld. De globale straling ontbreekt en van boven komt slechts de atmosferische tegenstraling. Wordt de luchttemperatuur op 2 m hoogte op 5 °C geschat en de relatieve vochtigheid op 80 %, dan levert tabel 5 voor de tegenstraling een bedrag van 259 W/m². Daar de tegenstraling langgolvig is, bedraagt de absorptiecoëfficiënt 0,9 zodat 90 % van de 259 of 233 W/m² wordt geabsorbeerd. Om de uitstraling van het bodemoppervlak te kunnen berekenen moet de temperatuur daarvan bekend zijn en in de aangenomen situatie wordt deze geschat op 0 °C (273 K), zodat de uitstraling $0,9 \times \sigma \times 273^4 = 283 \text{ W/m}^2$ zal bedragen. De netto-

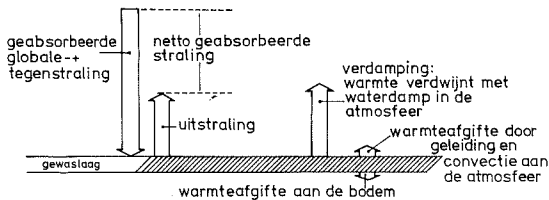


Fig. 12 Stralingshuishouding van een begroeide grond, midden op een zomerdag bij heldere hemel.

straling heeft dan een negatieve waarde, n.l. $233 - 283 = -50 \text{ W/m}^2$. Zie fig. 13. Het oppervlaktelaagje verliest dus voortdurend energie. Het zal daardoor afkoelen en kouder worden dan de aangrenzende lucht en grond, zodat warmte vanuit de lucht en vanuit de grond naar het oppervlaktelaagje zal worden geleid.

De warmtestroom in de atmosfeer is daardoor niet zoals overdag naar boven, maar naar beneden gericht en die in de bodem naar boven, dus ook andersom dan overdag. Het luchtlaagje dicht bij het oppervlak zal het eerst warmte afstaan en kouder worden dan de lucht op wat grotere hoogte. De onderste lucht wordt daardoor relatief zwaarder. Als wordt aangenomen dat de lucht volmaakt in rust is – een

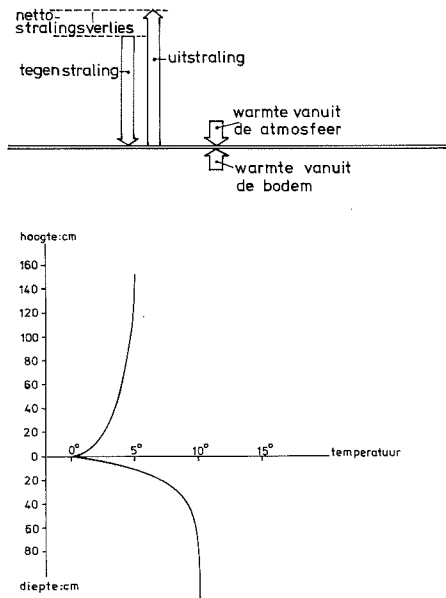


Fig. 13 Nachtelijke stralingshuishouding van het aardoppervlak bij helder en windstil weer. De bodem is onbegroeid gedacht. De uitstraling van het oppervlaktelaagje wordt gedeeltelijk gecompenseerd door de tegenstraling van de atmosfeer. Het verschil is de netto-straling (= warmteverlies). Het verlies wordt gedeeltelijk door warmte uit de atmosfeer en gedeeltelijk door warmte uit de bodem aangevuld. In de onderste helft een bij deze situatie passend temperatuursverloop.

toestand die slechts in theorie bestaat – dan moet het warmtetransport plaatsvinden door geleiding. Zoals reeds in tabel 2 is aangegeven heeft stilstaande lucht een uiterst geringe warmtegeleidingsvermogen en hieruit kan de gevolgtrekking worden gemaakt dat het netto-verlies door straling, praktisch geheel door de bodem moet worden aangevuld. Grond heeft, zelfs in ongunstige toestand, een aanzienlijk groter warmtegeleidingsvermogen dan stilstaande lucht. Bij deze beschouwing over het aandeel van de atmosfeer en dat van de bodem in de aanvulling van het tekort, dient het verschil in soortelijke warmte tussen grond en lucht te worden vermeld.

De soortelijke, of specifieke, warmte van een stof wordt uitgedrukt in een getal dat aangeeft hoeveel warmte aan een gram van die stof moet worden toegevoerd om de temperatuur ervan $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ te doen stijgen. Gemakkelijker is het in dit geval de warmtecapaciteit te gebruiken, dat is het getal dat aangeeft hoeveel warmte aan een volume-eenheid (bijv. cm^3) van de stof moet worden toegevoerd om de temperatuur $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ te doen stijgen. De warmtecapaciteit van grond is duizend tot tweeduizend maal zo groot als die van lucht in de onderste laag van de atmosfeer. Daaruit volgt dat als aan een cm^3 lucht en aan een cm^3 grond dezelfde hoeveelheid warmte wordt toegevoerd of onttrokken, de dan optredende temperatuursverandering bij lucht duizend à tweeduizend maal zo groot zal zijn als die bij grond. Er werd reeds opgemerkt dat de toestand waarbij de lucht volmaakt in rust is, slechts in theorie bestaat. In werkelijkheid is de lucht buiten, ook dicht bij het oppervlak, nooit geheel in rust. Er is, vooral op kleine schaal, altijd enige luchtbeveging zodat de warmteonttrekking toch aan een vrij dikke luchtlaag plaats vindt. De temperatuurdaling in de onderste luchtlaag is daardoor dan ook veel minder groot dan uit een berekening op basis van het warmtegeleidingsvermogen volgt. Het is echter duidelijk dat in de aangenomen situatie, het aandeel van de atmosfeer in de aanvulling van de stralingsverliezen relatief klein is, terwijl de temperatuurdaling relatief groot zal zijn; dit laatste als gevolg van de geringe warmtecapaciteit van lucht. Als de temperatuurdaling doorgaat tot onder het vriespunt, spreekt men van nachtvorst. Deze beschouwing diende om duidelijk te maken dat in eerste instantie de temperatuurdaling in de onderste luchtlaag afhangt van het aandeel dat de atmosfeer in de aanvulling van het netto-stralingsverlies van het oppervlaktelaagje levert. Dit aandeel is weer afhankelijk van de snelheid waarmee de bodem warmte kan leveren en deze hangt af van het poriëvolume en het watergehalte van de grond.

1.4.4 Nachtelijke situatie bij begroeide grond

De nachtelijke warmtehuishouding van een begroeide grond wijkt af van die van een onbegroeide. Zie fig. 14.

De stralingsuitwisseling met de atmosfeer vindt plaats vanuit een onregelmatig

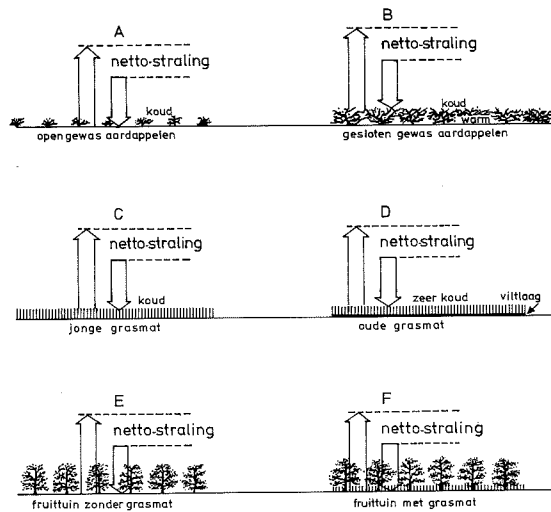


Fig. 14 Bij A een open gewas aardappelen. De stralingshuishouding wordt voor een groot deel bepaald door het bodemoppervlak dat nog slechts voor een klein deel met het gewas is bedekt. De temperatuur in de onderste luchtlaag wordt grotendeels bepaald door de eigenschappen van de bodem.

Bij B een gesloten aardappelgewas. De stralingshuishouding wordt nu bepaald door het gewas, dat aan de bovenzijde sterk afkoelt. Onder het gewas blijft het vrij warm. Bij C een jonge grasmat. De stralingshuishouding wordt bepaald door de grasplanten die sterk afkoelen, evenals de lucht in de nabijheid. De warmtevoorraad in de bodem kan slechts voor een klein deel worden gebruikt om deze afkoeling te temperen want de graslaag isoleert op de wijze van een wollen deken.

Bij D een doorsnede van een oude grasmat die op de bodem een sterk isolerende viltlaag bezit. Hier kan nog minder gebruik van de bodemwarmte worden gemaakt door de eigenschappen van de viltlaag.

Bij E een fruituin zonder grasmat. De stralingshuishouding wordt voor een groot deel door de bodem bepaald als wordt uitgegaan van een voorjaarssituatie waarin nog geen blad aan de bomen zit.

Bij F een fruituin met grasmat waarbij, op hetzelfde tijdstip als bij E, de stralingshuishouding voor een groot deel door de grasmat wordt bepaald en de netto-stralingsverliezen grotendeels vanuit de onderste luchtlagen moeten worden aangevuld, omdat de warmte in de bodem slechts een gering aandeel kan leveren.

gevormde laag bladeren. Het netto-stralingsverlies moet ook hier worden aangevuld uit de atmosfeer en uit de bodem. De aanvoer uit de bodem vindt minder gemakkelijk plaats dan bij onbegroeide grond want nu bevindt zich tussen de bodem en de bovenzijde van het gewas – waarheen de warmte moet worden getransporteerd – een laag, bestaande uit stengels en bladeren en voor het overgrote deel uit lucht die niet vrij kan bewegen. Het geheel doet denken aan een deken waarvan de isolerende werking op een soortgelijke opbouw berust.

Het gevolg is dat een groter deel van de netto-stralingsverliezen door de atmosfeer moet worden geleverd, dan bij onbegroeide grond. Dit leidt tot een sterkere temperatuurdaling van de lucht nabij het gewasoppervlak. Uit metingen is dan ook gebleken dat de luchttemperatuur vlak boven een grasmat, in een heldere windstille nacht wel tot 5 °C lager kan zijn dan boven dezelfde grond in onbegroeide toestand.

Het verschijnsel kan ook zonder meting worden waargenomen. Dikwijls komt het voor dat het gras 's morgens is berijpt, men noemt het ook wel 'witgevroren', terwijl jonge vorstgevoelige planten, als zij nog geen gesloten gewas vormen, geen spoor van vorstschade vertonen.

Het sterkst treedt het verschijnsel op bij oud grasland, omdat zich daar op de bodem een extra sterk isolerende laag van afgestorven plantedelen heeft gevormd. Over nachtvorstschade aan het gras zelf wordt meestal niet gesproken en toch kan deze niet onbelangrijk zijn. Op grasland dat beweid wordt ontstaat schade doordat het vee reeds vroeg in de morgen gaat weiden en elke voetstap op het bevroren gras geeft schade. Er wordt wel eens gezegd: 'Het vee vreet met vijf bekken'.

Rond het verschijnsel dat het in heldere windstille nachten boven gras kouder wordt dan boven onbegroeide grond, bestaan enkele misverstanden. Een verklaring die men nog wel eens aantreft, is dat een grasbestand of een gewas aanleiding geeft tot lagere temperaturen als gevolg van de vergroting van het oppervlak. Zelfs bij een kort gehouden grasmat is de oppervlakte van alle blaadjes e.d. vele tientallen malen groter dan die van de bodem en daardoor zou de uitstraling veel groter zijn. Hoewel het juist is, dat alle blaadjes e.d. uitstralen, telt slechts de som van alle naar boven gerichte straling en deze blijkt bij een ruw oppervlak precies even groot te zijn als bij een glad, vooropgesteld dat de temperaturen en de stralingseigenschappen van beide gelijk zijn. Zie fig. 15.

Een andere verklaring voor het verschijnsel wordt gezocht in de verdamping. Uit gras en uit gewassen verdampt immers veel water en hiervoor is warmte nodig. Ook deze verklaring is moeilijk houdbaar, want in echte windstille nachten condenseert juist water op het gewas en dit proces geeft warmtewinst.

Bij deze condensatie die als dauw bekend is, komt per gram water evenveel warmte vrij als nodig is voor de verdamping van een gram water, n.l. ± 2500 Ws (600 cal). Wordt de hoeveelheid dauw in een echte windstille en heldere nacht geschat op

0,3 mm (300 gram per m²) dan komen per m² ruim 750000 Ws vrij. Als deze hoeveelheid over 10 uren wordt gemiddeld is dat ongeveer 20 W/m². Stellen wij de netto-straling op -50 W/m^2 , dan zal de bij de dauwvorming vrijkomende warmte het netto-verlies terugbrengen tot -30 W/m^2 , waardoor de temperatuurdaling boven een gewas minder groot is dan kan worden verwacht als geen dauwvorming zou plaatsvinden.

Een gedeeltelijk begroeide grond, zoals die bij alle jonge gewassen wordt aange- troffen, neemt een tussenpositie in. Afhankelijk van de mate van bedekking ge- draagt hij zich soms meer als een onbegroeide, soms meer als een begroeide grond. Zie fig. 14 a en b.

Een fruittuin is daarvan een voorbeeld. Omstreeks de bloei vormt de fruitopstand een tamelijk open begroeiing en ten aanzien van nachtvorst zal de invloed van het bodemoppervlak overwegen. Is de bodem onbegroeid dan zal het nachtvorst risico meer naderen tot dat bij een onbegroeide grond. Is de bodem met gras begroeid dan zal dit risico groter en zelfs veel groter zijn als de grasbedekking volledig is. Dit is in het bijzonder het geval als de grasmat oud is en een sterk ontwikkelde viltlaag heeft.

Bij steenbakkerijen is eveneens een verhoogd risico van het bevroren van de nog natte ongebakken steen waargenomen als men tussen de droogschuren gras laat groeien.

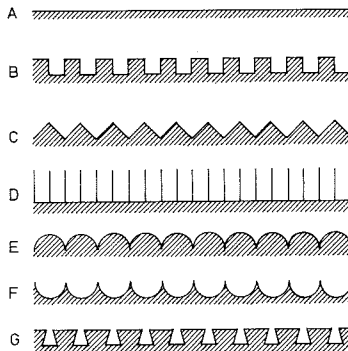


Fig. 15 Een aantal 'ruwe' oppervlakten in doorsnede. Berekening aan deze regel- matige vormen toon aan dat de uitstraling van al deze oppervlakten dezelfde waarde heeft en gelijk is aan die van een glad oppervlak met dezelfde horizontale uitgestrekt- heid. Het oppervlak C lijkt op dat van een geploegde grond en D op dat van een jong graangewas, terwijl G gelijk op het oppervlak van een nog niet gesloten aardappel- gewas.

1.5 De inversie

In het voorgaande is beschreven dat het oppervlak bij heldere windstille nachten kouder is dan de lucht er boven waardoor een warmtestroom uit de atmosfeer naar het oppervlak ontstaat. Zie fig. 16.

Dit betekent dat de luchttemperatuur nabij de grond het laagst is en aanvankelijk hoger wordt naarmate men zich verder van het oppervlak verwijderd. Dit is juist andersom dan men zou verwachten, want regel is dat de luchttemperatuur lager wordt naarmate men hoger komt. Gemiddeld daalt die temperatuur met $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ per 100 m toeneming van de hoogte. Op een hoogte van 4 à 5 km worden dan ook temperaturen van $20 - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ onder het vriespunt aangetroffen. De omkering van het temperatuurverloop wordt inversie genoemd. Inversie betekent omkering van de normale orde.

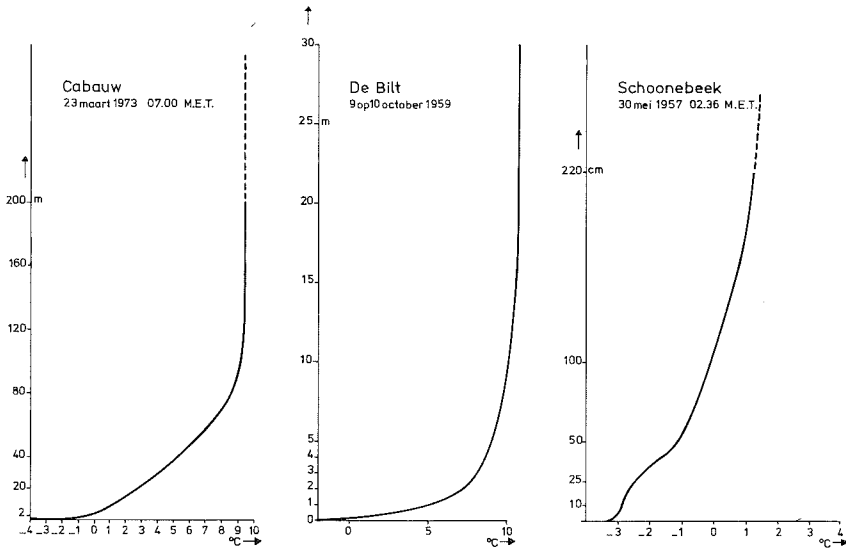


Fig. 16 Drie nachtelijke grondinversies. De eerste gemeten aan de mast te Cabauw (200 m). Op 2 m hoogte was de temperatuur $\pm 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ lager dan op 120–160 meter. De tweede gemeten te De Bilt waar het in die nacht op 2 m hoogte ongeveer $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ warmer was dan op 10 cm hoogte. Op 30 m hoogte was het nog eens $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ warmer. De derde werd gemeten te Schoonebeek. Het was toen op 2,2 m ruim $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ warmer dan nabij de grond.

De laag waarin het temperatuursverloop omgekeerd is, wordt inversielaag genoemd en de hoogte van de bovenzijde van de laag, de hoogte van de inversie. Deze hoogte kan onder gunstige omstandigheden oplopen tot enkele honderden meters, maar het sterkste verloop wordt in de onderste meters gevonden. Bij praktisch windstil weer en een hoge netto-straling blijkt het verschijnsel aanleiding te kunnen geven tot grote verschillen in temperatuur tussen bijvoorbeeld 10 cm en 2 meter. Een extreem geval deed zich voor te De Bilt in de nacht van 9 op 10 oktober 1959. De laagste temperatuur op 2 meter hoogte was die nacht $+7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en die op 10 cm hoogte $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; een verschil dus van $9,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Omdat ook op grotere hoogte inversies kunnen voorkomen wordt de inversie die aan het aardoppervlak grenst, meestal grondinversie genoemd. De inversie heeft grote praktische betekenis. Zo lopen lage planten meer gevaar te bevriezen dan hogere. De dikwijls gehoorde bewering dat men voorheen in de fruitteelt minder last van nachtvorst had dan tegenwoordig, kan uit de inversie worden verklaard. Voorheen teelde men fruit aan hoogstammen en de laagste bloesems bevonden zich zo hoog als een koe kan reiken, want men weidde vee onder de bomen. Tegenwoordig bevinden zich reeds bloesems enz. op enkele decimeters hoogte waar de temperatuur in gevaarlijke nachten veel lager kan zijn.

Verder doet een inversie de wind afnemen. Koude lucht is zwaarder dan warme. Zo weegt lucht van $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bij normale druk, 1247 gram per m^3 en bij dezelfde druk weegt lucht van $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1993 gram per m^3 .

De wrijving tussen stromende lucht en het aardoppervlak maakt het toch reeds moeilijk om de lucht vlak bij de grond te verplaatsen. In het geval van een inversie blijft de koudste en dus zwaarste lucht als het ware aan het aardoppervlak kleven en wordt bij zwakke wind niet meer meegesleept. Dit werkt het optreden van windstilte in de onderste lagen sterk in de hand. Bij mooi weer is het afkoelingsproces aan de grond dan ook een van de belangrijkste oorzaken waardoor de wind 's avonds gaat liggen.

1.6 De invloed van de wind

Uit ervaring is bekend, dat de kans op nachtvorst bij wind gering is. Als er wind is krijgt ook in een heldere nacht de lucht geen gelegenheid aan het aardoppervlak sterk af te koelen.

Stromende lucht vormt, evenals stromend water, allerlei wervels en het gevolg is dat telkens lucht van wat grotere hoogte met het aardoppervlak in aanraking komt waardoor de warmte-onttrekking plaats vindt aan een veel dikkere laag. Door zijn grotere warmte-inhoud kan die niet zo diep afkoelen als een dunne laag vlak bij de grond, in het geval van stilstaande lucht. Zie fig. 17, a en b.

1.7 De invloed van bewolking

Tot nu toe is aangenomen dat de nacht windstil en helder was. Er zal nu worden nagegaan wat er verandert als de hemel niet helder is. Er is reeds gezegd dat de tegenstraling van de atmosfeer afkomstig is van de waterdamp, het koolzuurgas en het ozon. Het aandeel van de waterdamp is daarbij het grootst, maar het is zeer veranderlijk, zie tabel 5. Als de hemel geheel of gedeeltelijk met wolken is bedekt, neemt de tegenstraling toe. De *waterdamp* laat de straling van de aarde gedeeltelijk

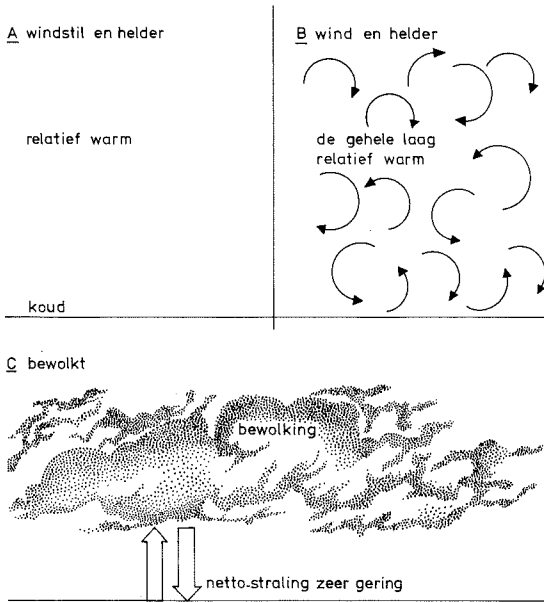


Fig. 17 In situatie A is het windstil en helder. De koudste lucht bevindt zich nabij het oppervlak; op enige hoogte is de lucht relatief warm. In situatie B is het weliswaar helder, maar er is wind die allerlei wervels veroorzaakt. Deze verhinderen het ontstaan van een koude laag bij de grond. De gehele getekende laag is relatief warm. In situatie C is er bewolking. De tegenstraling die nu afkomstig is van de waterdruppels in de wolken is groter dan die welke bij heldere hemel in hoofdzaak door de waterdamp wordt geleverd. De netto-straling is nu zeer gering en de lucht nabij het oppervlak koelt slechts langzaam af.

door, maar water in een wolk is daar niet in dampvorm aanwezig doch in de vorm van kleine druppels, dus vloeibaar. Bij hoge wolken kan het water ook als ijs aanwezig zijn.

Vloeibaar water en ijs absorberen alle infrarode straling van de aarde. Water in deze vormen gedraagt zich wat zijn eigen uitstraling betreft ongeveer als het aardoppervlak. De toeneming van de tegenstraling bij aanwezigheid van bewolking blijkt uit enige voorbeelden. Bij een gesloten hoge bewolking die uit cirrus bestaat, is de toeneming ongeveer 4%, maar bij een gesloten laag wolkendek is die 20% of meer. Beide gevallen vergeleken met de tegenstraling bij onbewolkte hemel en onder overigens gelijke omstandigheden. Deze invloed van bewolking is er de oorzaak van dat bij een gesloten wolkendek nauwelijks vrees voor nachtvorst behoeft te bestaan. Zie fig. 17 c.

1.8 De invloed van obstakels

Obstakels op het terrein, zoals bomenrijen, hagen, windsingels of muren beïnvloeden de stralingshuishouding in belangrijke mate.

Als voorbeeld wordt de stralingshuishouding van een horizontaal vlakje in de nabijheid van een muur of schutting nagegaan. De uitstraling van het vlakje vindt plaats overeenkomstig de wet van Stefan-Boltzmann. In de helft van de halve bol, die men zich over het vlakje kan denken, is deze uitstraling naar het hemelgewelf gericht en het ontvangt van daar de tegenstraling. In de andere helft van de halve bol is de straling naar de muur gericht en het vlakje ontvangt van daar de straling. Daar het obstakel als het uit steen, hout, bebladerde bomen of struiken bestaat, nagenoeg dezelfde stralingseigenschappen heeft als het bodemoppervlak en als er van wordt uitgegaan dat dit laatste en het obstakel weinig in temperatuur verschillen, dan zal het beschouwde vlakje evenveel stralingsenergie van het obstakel ontvangen als het zelf naar het obstakel uitzendt. De netto-straling naar het obstakel is dus gelijk nul en in de andere helft van de halve bol heeft hij de helft van de waarde die het vlakje zou hebben als er geen obstakel zou zijn. In totaal is de netto-straling ten opzichte van die van een vlakje in het open veld dus gehalveerd. De netto-straling op enige afstand van een muur of ander obstakel zal toenemen omdat het 'uitzicht' van het vlakje op de hemelkoepel steeds groter wordt. Zie ook fig. 27.

Dit alles is in overeenstemming met de ervaring dat planten vlak bij een muur, schutting, of windsingel bij nachtvorst meestal weinig of geen schade ondervinden.

1.9 De invloed van de helling van het terrein

Hoewel men in ons land meestal te maken heeft met vlakke en praktisch horizontale terreinen liggen er in het zuid-oostelijke deel, met name in Zuid Limburg, sterk hellende terreinen. De nachtelijke warmtehuishouding daarvan vraagt een afzonderlijke beschouwing.

De uitstraling van een niet horizontaal vlakje dat deel uitmaakt van een helling bedraagt evenveel als die van een horizontaal vlakje met dezelfde temperatuur en stralingseigenschappen. De tegenstraling komt echter niet uitsluitend van de atmosfeer, maar gedeeltelijk van wat onder de horizon ligt, dus van het aardoppervlak. Zie fig. 18.

De verandering van de netto-straling kan voor een helling worden berekend en dan blijkt bij een helling van 1 op 3,75 de netto-straling nog 97% van die van een horizontaal vlakje te zijn. Bij een helling van 1 op 2,75 is het percentage 95 en bij steilere hellingen neemt de netto-straling af tot 40% bij een verticale wand.

Er is bij hellingen een ander verschijnsel dat belangrijk is, n.l. het afvloeien van koude lucht. Als op een helling op de wijze zoals eerder beschreven, een laag koude en dus relatief zware lucht ontstaat, zal deze zware lucht langs de helling naar beneden vloeien en zich onderaan of op onderaan gelegen vlak terrein verzamelen waardoor de temperatuur daling daar aanzienlijk groter kan zijn dan op horizontale terreinen die niet door een helling worden begrensd. Een rivier- of beekdal, ingesloten tussen heuvels of bergen vertoont het verschijnsel in versterkte

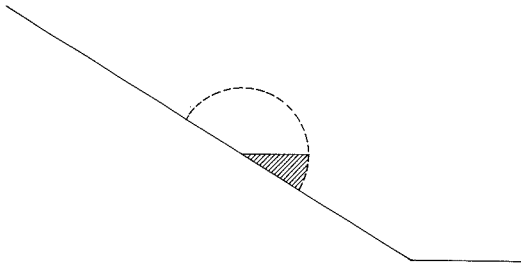


Fig. 18 *Stralingshuishouding van een helling. Een vlakje dat deel uitmaakt van een helling ontvangt via het blanco deel van de halve bol de tegenstraling van de atmosfeer en via het gearceerde gedeelte de straling van het aardoppervlak. Deze laatste heeft een grotere waarde dan de atmosferische tegenstraling.*

mate omdat dan van weerszijden de koude lucht toestroomt. Zie fig. 19. Bij de wijnbouw, die in West Europa praktisch alleen op hellingen wordt bedreven, vermijdt men dan ook de dalen. Ook op de helling zelf geeft het verschijnsel nog de nodige problemen. Het onderste deel van een lange helling wordt dan ook niet voor de wijnbouw gebruikt. Dikwijls treft men voorzieningen om de stroom koude lucht te onderbreken o.a. door dwars op de helling dichte heggen of muurtjes aan te brengen. De koude lucht kan dan niet passeren en door opzettelijk uitgespaarde openingen krijgt de lucht de gelegenheid af te vloeien naar plaatsen waar hij geen kwaad kan doen.

De vraag is, bij welke helling de koude lucht gaat afstromen, maar hierop is geen algemeen antwoord te geven. Als het hellende terrein weinig ruw is zal de koude lucht reeds in merkbare mate gaan afstromen bij hellingen van de orde van 1 op 100. Bij ruwere oppervlakken en gewassen alsmede op ruig begroeid terrein zal de helling groter moeten zijn. Dan zullen hellingen van 2 à 3 op 100 tot het verschijnsel aanleiding kunnen geven.

1.10 Percelen met een holle of bolle ligging

Als gevolg van het afstromen van koude lucht naar de laagste gedeelten kan men bij holle percelen de meeste nachtvorstschade op het laagste gedeelte verwachten. Dat dit niet altijd het geval is, moet worden toegeschreven aan verschil in bodemeigenschappen tussen de lagere en hogere gedeelten. Dergelijke verschillen kunnen het effect van de holle ligging versterken, maar ook tegenwerken.

Dit is een goede gelegenheid om er met nadruk op te wijzen dat men bij het verklaren van gevallen van nachtvorstschade, die op de ene plaats wel en op de andere niet optrad, meestal niet kan volstaan met aan één oorzaak te denken.

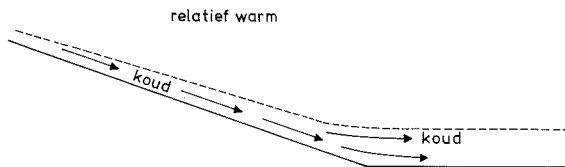


Fig. 19 De op een helling gevormde koude luchtlaag stroomt af en verzamelt zich aan de voet van de helling. Als de terreinomstandigheden daar geschikt zijn, ontstaat een 'zee' van koude lucht die een 'diepte' van tientallen meters kan bereiken.

Het effect van een helling kan soms zeer duidelijk worden waargenomen na een nachtvorst in de Betuwe. Bij fruittuinen aan de voet van de Rijn- of Waalbandijk is er dikwijls ernstige schade aan de eerste rijen van het perceel. Dit als gevolg van het afvloeien van koude lucht van de met gras begroeide dijkelling.

Lage terreinen die aan alle zijden door hogere zijn omringd, zijn dikwijls beruchte 'vorstzakken', een vertaling van het engelse 'frostpocket'. Van bol liggende percelen vloeit de koude lucht af en er is dan ook een oude regel die zegt dat convexe (= bolle) landschapsonderdelen 's nachts warm en concave (= holle) 's nachts koud zijn.

2 Waardoor planten bij bevroering afsterven

2.1 Verklaringen

De oude verklaring voor het afsterven van bevroren plantedelen berust op het volgende.

Als water in ijs overgaat, neemt het volume met $\pm 10\%$ toe. Een liter water weegt 1 kg en als dit in ijs overgaat heeft het een inhoud van 1,1 liter, maar het gewicht blijft 1 kg. Ijs drijft dan ook op water. Als water in de plant in ijs overgaat, zal door de uitzetting van 10% de celwand kunnen scheuren en ook de cellen kunnen uiteen worden gedrukt. Hoewel niet ontkend kan worden dat dit proces dodelijk kan zijn voor waterrijke weefsels, bevredigt deze verklaring niet.

Ten eerste zijn er planten die reeds bij temperaturen boven het vriespunt afsterven, dus als er nog geen sprake is van ijsvorming. Ten tweede kunnen dezelfde planten in het ene geval geen en in het andere wel bevroering verdragen.

Hoewel allermint alle vragen omtrent de bevroeringsdood van planten zijn beantwoord, is het wel duidelijk geworden dat het verschil in vorstgevoeligheid tussen de verschillende plantesoorten en binnen dezelfde soort moet worden toegeschreven aan verschil in eigenschappen van het protoplasma. Fig. 20.

Het protoplasma is een uit water, organische stoffen – waaronder eiwitten – en zouten bestaande substantie waarin de levensprocessen zich afspelen. Protoplasma is evenals lijm een colloïdale oplossing. Colloïdale stoffen hebben o.a. de eigenschap dat kleine veranderingen in de samenstelling soms grote veranderingen in hun gedrag teweegbrengen.

Uit de veelheid van resultaten van onderzoek in dit moeilijke gebied blijkt wel dat bij lagere temperaturen, boven het vriespunt, stoffen worden gevormd die aan het protoplasma eigenschappen geven die maken dat het beter tegen lage temperaturen en zelfs tegen bevroering bestand is. De vorming van dergelijke stoffen vraagt tijd en hiermee kan een verklaring van het verschijnsel van de afharding worden gegeven. Elke tuinder weet dat planten die onder glas, dus onder zeer gunstige temperatuuromstandigheden, zijn verbouwd, niet zonder voorbereiding in de open grond

kunnen worden uitgezet. Die voorbereiding bestaat uit het gewennen aan lagere temperaturen en dit noemt men afharderen.

Het natuurlijke afhardingsproces vindt in ons klimaat plaats tijdens het groeiseizoen. Jonge loten van Coniferen, maar ook die van eik en beuk zijn zeer vorstgevoelig. Een half jaar later kunnen diezelfde loten temperaturen van meer dan 20 °C onder het vriespunt verdragen. Voor fruitbomen geldt iets dergelijks en interessant zijn de proeven genomen te Bavendorf (D). In potten gekweekte appelboompjes werden in de loop van de herfst, in koelcellen blootgesteld aan zeer lage temperaturen. In september overleefden zij dit niet, maar naarmate de proef later in het seizoen werd genomen, werd het percentage overlevenden groter. Aan het einde van het jaar verdroegen de bomen de lage temperaturen zonder schade.

Aan de kennis van deze verschijnselen kan de conclusie worden verbonden dat het weinig zin heeft, proeven te nemen waarbij men tracht uit te maken welke temperaturen nog juist kunnen worden verdragen door knoppen, open bloemen of jonge vruchten van appel en peer. Uit de resultaten van dergelijke proeven blijkt dat elke onderzoeker weer andere waarden vindt. Dit is begrijpelijk want het gebruikte materiaal zal nooit geheel gelijk kunnen zijn omdat de voorgeschiedenis, met name de afhardingstoestand, telkens anders kan zijn.

Bij dergelijke proeven is wel iets anders gebleken, n.l. dat de snelheid van bevroering en die van ontthooing invloed heeft op de overlevingskansen. Een mondelinge mededeling van Durand te Versailles luidde dat perknoppen bij zeer langzame afkoeling en ontthooing tot -13 °C konden worden afgekoeld zonder schade, terwijl bij snelle afkoeling de dood reeds bij -5 °C intrad. Dit verschijnsel heeft in zoverre praktische betekenis, dat men daarmee onverwacht grote schade, die

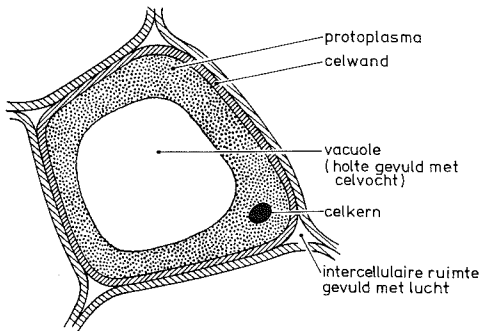


Fig. 20 Schematische tekening van een jonge plantecel

men op grond van de bereikte laagste temperatuur niet zou verwachten, aan de snelle afkoeling dient toe te schrijven. Dit was o.a. het geval bij de nachtvorst van 27 op 28 mei 1961.

2.2 Onderkoeling

Een plant kan, afhankelijk van de soort en de omstandigheden, tot enkele graden onder nul afkoelen, maar dan neemt men waar dat de temperatuur plotseling tot 0°C stijgt. Bij voortgezette warmte-onttrekking blijft de temperatuur aanvankelijk op deze waarde en eerst na enige tijd daalt hij verder. In fig. 21 is dit temperatuursverloop getekend.

Dit onverwachte gedrag wordt veroorzaakt door het verschijnsel van de onderkoeling.

Als men water, dat geheel in rust verkeert, langzaam afkoelt kan deze afkoeling doorgaan tot verscheidene graden onder het vriespunt zonder dat er ijs ontstaat. Gaat de warmte-onttrekking door dan gaat plotseling een deel van het water in ijs over, waarbij de temperatuur even plotseling tot het vriespunt stijgt.

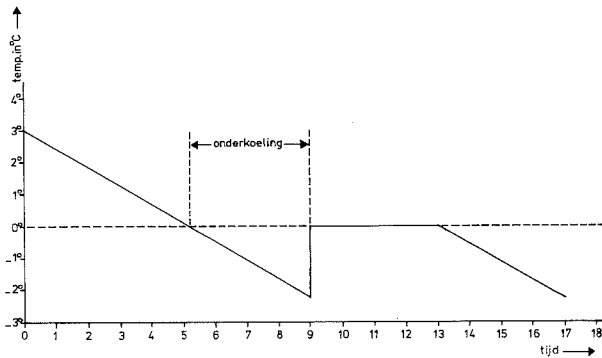


Fig. 21 Verloop van de temperatuur van een afkoelend plantendeel als onderkoeling optreedt. Op het tijdstip 0 is de temperatuur 3°C , op het tijdstip 5 wordt de 0° gepasseerd en tussen de tijdstippen 5 en 9 daalt de temperatuur naar ruim 2° onder het vriespunt. Dit is de tijd waarin het water onderkoeld is. Op het tijdstip 9 stijgt de temperatuur plotseling naar 0°C en blijft op die hoogte tot het tijdstip 13. Dan is alle water in de plant in ijs overgegaan en kan de temperatuur opnieuw dalen.

Hetzelfde doet zich voor bij het sap in de planten en het verschijnsel kan in grensgevallen nachtvorstschade nog juist voorkomen. Er ontstaat dan geen ijs terwijl de planten toch tot onder het vriespunt afkoelden. De verklaring van het temperatuursverloop bij onderkoeling berust op het vrijkomen van warmte, de zogenaamde stollingswarmte, bij de overgang van water in ijs. Dat de temperatuur bij het plotseling ontstaan van ijs niet tot boven het vriespunt kan stijgen vindt zijn oorzaak in de warmte die nodig is om ijs te doen smelten. Bij beregening tegen nachtvorst wordt van de stollingswarmte gebruik gemaakt. In het hoofdstuk: Nachtvorstwering, wordt nader op het verschijnsel ingegaan.

2.3 Concentratie van het celvocht

Water waarin stoffen zijn opgelost, bevriest niet bij 0 °C maar bij een lagere temperatuur. Hoe laag die temperatuur zal zijn hangt af van de aard van de opgeloste stof(fen) en van de concentratie. Het verschijnsel heet vriespuntsverlaging.

In het water in de plant zijn verschillende stoffen opgelost en daarom is de temperatuur waarbij ijs in de plant ontstaat altijd lager dan 0 °C. Men make zich van deze vriespuntsverlaging geen overdreven voorstelling. Stoffen die het meest werkzaam zijn, zijn de zouten en daarvan is de concentratie in het plantesap zeer gering. Suikers e.d. zijn in dit opzicht veel minder werkzaam. Zo bevriest een 10% oplossing van glucose reeds bij -1,0 °C en een even sterke oplossing van rietsuiker bij -0,6 °C. Dat zouten een veel grotere verlaging veroorzaken is ook de reden dat deze bij de gladheidsbestrijding worden gebruikt om sneeuw en ijs op het wegdek vloeibaar te maken.

Verskil in vorstgevoeligheid bij dezelfde planten wordt door sommigen nog wel aan verschil in concentratie van het celsap toegeschreven. Deze concentratie varieert n.l. in afhankelijkheid van de voedingstoestand en het groeistadium. De daardoor ontstaande verschillen in vriespuntsverlaging zijn echter gering en hebben nauwelijks praktische betekenis.

3 Waar nachtvorst voorkomt

3.1 Alleen de tropen zijn vrij van nachtvorsten

Uit temperatuurgegevens blijkt dat eigenlijk alleen de tropische gordel van 20 à 25° Noorderbreedte tot 20 à 25° Zuiderbreedte vrij is van het verschijnsel nachtvorst. Op wat grotere hoogte komt echter ook in de tropen wel nachtvorst voor; zo is er soms ernstige schade aan koffie- en theeplantages omdat deze vrij hoog tegen de berghellingen worden aangelegd.

Van het optreden van nachtvorsten in wat warme landen worden genoemd, kunnen enkele voorbeelden worden gegeven.

In de Sahara komen nachtelijke temperaturen voor die tussen 5 en 10 °C onder het vriespunt zijn gelegen. De Kilimandscharo, de hoogste berggroep van Afrika ligt enkele honderden kilometers van de evenaar verwijderd en heeft toppen met eeuwige sneeuw. In de omgeving van Windhoek in Zuid-Afrika komen temperaturen tot onder het vriespunt voor op vlakten die tussen de 1000 en 1500 m boven zeeniveau liggen. Beperkt men zich tot Europa en Noord-Afrika dan kan worden gezegd dat nachtvorsten die economische betekenis hebben, vrijwel overal in de landbouwgebieden voorkomen.

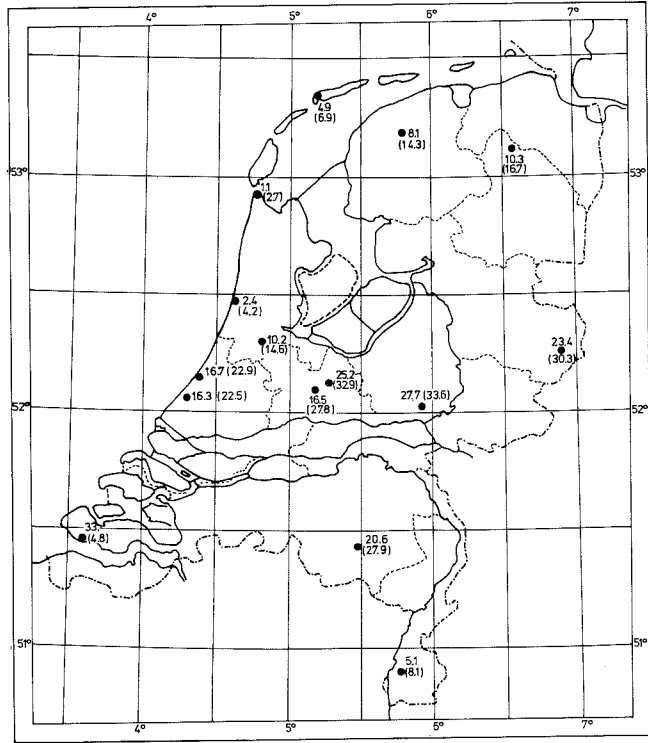
De frequentie van optreden is echter zeer verschillend, maar het is goed daarbij te bedenken dat in gebieden waar het verschijnsel zeldzaam is, men het sortiment van gewassen aan die gunstige toestand heeft aangepast, zodat als het dan vriest de schade zeer groot kan zijn.

3.2 Binnen onze grenzen

Binnen onze landsgrenzen treedt nachtvorst niet overal even dikwijls op. In grote trekken levert een strook langs de zee kust in dit opzicht minder risico op dan de meer landinwaarts gelegen gebieden. Hiervoor zijn twee oorzaken aan te wijzen. De eerste is gelegen in het feit dat de zee een enorm warmtereservoir is en de tweede oorzaak is dat de wind in de buurt van een groot wateroppervlak minder gemakkelijk afneemt tot praktisch windstilte. Meer landinwaarts wordt het eerder windstil. Zie kaarten 1. en 2.



Kaart 1 Bij de 15 stations op de kaart is de gemiddelde windsnelheid in kilometers per uur aangegeven over de periode 1 april t/m 30 juni en berekend over de jaren 1958 tot en met 1967. Op de stations: Terschelling, Den Helder, IJmuiden en Vlissingen wordt de windsnelheid vlak bij zee gemeten. De gemiddelde snelheden liggen daar alle boven 20 km/uur. De gemiddelde windsnelheid op de stations: Leeuwarden, Schiphol, Valkenburg (Z-H) en Ypenburg liggen tussen 15 en 20 km/uur. Op de overige stations zijn de gemiddelde snelheden lager dan 15 km/uur. De verklaring voor de aanzienlijk hogere windsnelheden aan zee is, dat de stromende lucht boven water weinig wordt afgeremd. De invloed is duidelijk te zien bij het station Valkenburg (Z-H) dat vlak achter de duinen is gelegen. De gemiddelde snelheid bedroeg daar 17,2 km/uur terwijl men zo dicht bij zee een bedrag boven de 20 km/uur zou verwachten.



Kaart 2 Bij dezelfde stations als die op kaart no. 1. zijn hier de percentages praktisch windstille nachturen aangegeven, over de periode april, mei en juni, gemiddeld over de jaren 1958 tot en met 1967. Onder nachturen worden verstaan de uren tussen 22 uur en 6 uur en onder praktisch windstil, een windsnelheid tot ten hoogste 0,5 meter per seconde. Tussen haakjes zijn vermeld de percentages nachturen met een windsnelheid tot ten hoogste 1 meter per seconde. Het vliegveld Zuid Limburg geeft een niet goed in het beeld passend percentage te zien, maar hiervoor zijn plaatselijke omstandigheden verantwoordelijk. Het vliegveld ligt op een plateau en deze ligging heeft invloed op de windsnelheid. In het overige deel van Zuid-Limburg moet men aannemen dat de percentages veel hoger zijn.

Hierbij dient te worden bedacht dat de aangeduide verschillen gemiddeld wel juist zijn, maar als er weinig of geen wind is blijft de relatief warme lucht boven zee op zijn plaats en zelfs gebieden vlak bij de kust kunnen daarvan dan niet profiteren. In dergelijke gevallen gedragen plaatsen dicht bij de zee zich niet anders dan die welke meer landinwaarts zijn gelegen.

3.2.1 Nachtvorst op de Waddeneilanden

Nachtvorsten treden dan ook wel op in de duinen en vlak daar achter. Als voorbeeld kan de bijna jaarlijks geconstateerde nachtvorstschade aan de Cranberries (*Vaccinium macrocarpon* Ait.) op Vlieland en Terschelling worden genoemd. Het gewas is gedurende een groot deel van het groeiseizoen gevoelig voor nachtvorst. Ook in de IJsselmeerpolders, hoewel deze aan grote wateroppervlakken grenzen, kan ernstige nachtvorstschade aan fruitgewassen en aardappelen optreden.

4 Wanneer treedt nachtvorst op

4.1 Het groeiseizoen

De uitdrukking: groeiseizoen is reeds gebruikt. Dit groeiseizoen is niet voor alle gewassen gelijk en voor hetzelfde gewas geldt, dat het niet elk jaar op dezelfde data begint en eindigt.

Een groot aantal nachtvorstgevoelige gewassen zijn niet gedurende het gehele groeiseizoen gevoelig; dit is vooral duidelijk bij houtige gewassen.

Het jonge blad van beuk, eik en andere loofbomen verdraagt geen bevroering en hetzelfde geldt voor jonge loten van vele naaldhoutsoorten. De volgroeide loten en naalden daarentegen kunnen zelfs zeer strenge winters overleven. Haver verdraagt in een zeer jong stadium bevroering, maar planten van een decimeter hoog kunnen ernstig van nachtvorst lijden en zelfs geheel afsterven. In 1953 is hierdoor ernstige schade ontstaan.

Bij fruitbomen zijn de bloemknoppen, de bloemen en de jonge vruchten gevoelig.

4.2 Wanneer in het groeiseizoen

Gemiddeld over vele jaren geldt dat nachtvorsten meer optreden in het begin van de groeiperiode dan later, terwijl de kans aan het einde weer toeneemt.

De vraag doet zich voor of er maanden zijn waarin het verschijnsel niet voorkomt. Eigenlijk moet het antwoord ontkennend luiden, want hoewel de maand augustus praktisch vrij is van nachtvorsten zijn er in de loop der jaren enkele geweest. Zo sneuvelden in de nacht van 21 op 22 augustus 1973 vele bloeiende dahlia's door nachtvorst.

In september is nachtvorst niet zeldzaam. In 1971 en 1972 was er ernstige schade, o.a. aan de bloeiende chrysanthemums, in de eerste helft van september.

Zeer veel nachtvorsten komen in april voor maar meestal is dan de schade nog niet groot omdat bij de economisch meest belangrijke gewassen de gevoelige periode nog niet is begonnen.

In mei, waarin het grootste aantal gewassen gevoelig is voor nachtvorst, komt het verschijnsel minder dikwijls voor dan in april, maar de gevolgen zijn veel ernstiger en daardoor is de meimaand berucht geworden. Men heeft zelfs gemeend in deze maand een periode van drie, in België vier en in Duitsland zelfs vijf dagen te kunnen aangeven waarop het risico extra groot zou zijn. De 11e, 12e en de 13e mei zouden van die dagen zijn en uit de oude tijdrekening met heiligendagen volgen daaruit drie IJsheiligen te weten: St. Mamertius, St. Pancratius en St. Servatius. In België komt daar nog St. Bonifacius – 14 mei – bij en in Duitsland kent men nog de heilige Sophia – 15 mei –, die kalte Sophie. Dit kan als volgt worden verklaard. Uit ervaring wist men dat korte perioden met noordenwind en heldere hemel in het voorjaar dikwijls voorkomen. Men weet nu dat dit invallen zijn van lucht uit ver naar het noorden gelegen gebieden, welke invallen in april en mei koude nachten kunnen veroorzaken. Het verschijnsel heeft in de eerste helft van mei nogal eens aanleiding gegeven tot zware nachtvorstschade. Later in de maand komt het niet meer zo gemakkelijk tot nachtvorst omdat het gemiddelde temperatuurniveau is gestegen. Om deze reden is de eerste helft van mei berucht geworden.

Omdat het voorheen gebruikelijk was, belangrijke data met heiligendagen aan te duiden, lag het voor de hand de, wat de nachtvorst betreft, meest gevaarlijke dagen ook op die wijze te benoemen. Dat men zich niet op deze vaste dagen kan verlaten, blijkt wel uit uitspraken als: De IJsheiligen zijn dit jaar vroeg (of laat).

De maand juni is evenmin veilig wat nachtvorsten betreft. Er zijn verscheidene gevallen van ernstige schade in die maand bekend. Vermeldenswaard is het nog steeds bestaande geloof dat nachtvorsten na de langste dag – gemiddeld 21 juni – niet meer voorkomen. Dit is in strijd met de ervaring, er zijn gevallen van ernstige nachtvorstschade waargenomen in de laatste 10 dagen van juni, zoals in 1956 en 1957.

In de maand juli is nachtvorst zeldzaam, maar komt wel voor. Zo zijn zware nachtvorsten voorgekomen in het noordoosten van het land op bijvoorbeeld 15 en 16 juli 1921 en op 19 juli 1971.

Tijdens de eerste wereldoorlog is er in de Veenkoloniën een zware nachtvorst geweest. De roggeogst was toen begonnen zodat het zeker niet vroeger was dan eind juli. De schade was aanzienlijk; enkele dagen later verspreidden de bevroren stengels en bladeren van het aardappelgewas een sterke geur van verrotting. Het is niet gelukt, de juiste datum te achterhalen.

Een voorbeeld van aanzienlijke schade uit de middeleeuwen kan worden gevonden aan de kerk te Wendelsheim, ongeveer 30 km ten zuidwesten van Wiesbaden, waar een gedenksteen is aangebracht met de inscriptie:

AO 1576 DEN ERSTEN TAG MAY
WAR ES NIT FEIN DA ERFRORN KORN UND WEIN.

Van de daarbij opgetreden temperaturen is niets te zeggen, want de thermometer en de temperatuurschalen moesten nog worden uitgevonden en dat heeft tot omstreeks 1700 geduurd.

Aan het prachtige boek van Hendrik Willem Heuvel (1864–1926): ‘Oud Achterhoeks Boerenleven’ kan het volgende over nachtvorsten in juni worden ontleend (ref. 26):

‘Hoe menigmaal bevrozen nog in juni de aardappels. Nooit zal ik vergeten die zondagmorgen 21 juni van het jaar 1874, toen in onze zandstreken alle aardappels, boekweit, bonen en vlas waren bevroren. Toen de zon er over scheen was bijna alles zwart.’

Voorts wordt van juli, de hooimaand, gezegd:

‘Maar het kan ook koud zijn in de morgenvroegte en het gebeurt, dat het ijs van overafgekoelde dauw rammelt voor de zeis’.

Samenvattend kan worden gezegd dat men tot en met de maand juni bedacht moet zijn op de mogelijkheid van het optreden van nachtvorst en dat men, te beginnen met de maand september opnieuw moet rekenen met een kans op nachtvorst. Zo was het voorheen en er is geen reden aan te nemen dat het in de toekomst anders zal zijn.

5 Nachtvorstwering

De veel gebruikte uitdrukking: 'nachtvorstbestrijding' is niet fraai, want het gaat om het voorkómen van nachtvorst of bescherming tegen de gevolgen daarvan. Beide bedoelingen kunnen worden uitgedrukt door het woord 'nachtvorstwering' te gebruiken.

De methoden van nachtvorstwering kunnen worden ingedeeld in twee groepen die men passieve en actieve methoden pleegt te noemen.

Onder passieve methoden worden verstaan, maatregelen die van te voren en soms ver van te voren worden genomen. Een goed voorbeeld is de verbouw van vorstgevoelige gewassen, bijv. fruit op percelen waarop nachtvorst niet dikwijls voorkomt. In de wijnbouw wordt dit reeds lang toegepast o.a. door de bodem van een dal of de onderzijde van hellingen niet voor de wijnbouw te bestemmen.

Onder actieve methoden worden maatregelen verstaan die vlak voor of tijdens nachtvorst worden genomen. Beregening en verwarming zijn daarvan voorbeelden. In het volgende zullen de thans bekende passieve en actieve methoden worden beschreven en zal hun effect zo goed mogelijk worden aangegeven. Economische beschouwingen zullen worden vermeden, ook al omdat deze zo afhankelijk zijn van steeds veranderende factoren als de kosten van materiaal en arbeid.

5.1 Passieve methoden

5.1.1 *Keuze van het perceel*

Als eerste passieve methode wordt de keuze van het perceel behandeld. Waar men vrij is in de keuze van het perceel of bedrijf, is het vanzelfsprekend het beste een plaats te kiezen waar men het kleinste nachtvorst risico loopt. Reeds in 1914 stelde W. J. Humphreys: 'De beste tijd om het fruit tegen vorst te beschermen is de tijd waarin de boomgaard wordt aangelegd.'

In de wijnbouw heeft men reeds van oudsher deze methoden toegepast. In Duitsland vervaardigt de Duitse weerdienst kaarten van gebieden waarin men nieuwe bedrijven denkt te vestigen; kaarten met een indeling in klassen van oplopend

vorstrisico. In heuvel- of bergland is een dergelijke indeling mogelijk en zinvol; binnen onze grenzen niet. Toch zijn er in ons land verschillen wat de nachtvorst-kansen betreft en voor een eerste benadering kan gebruik worden gemaakt van de Klimaatatlas van Nederland (ref. 25). Beziet men in deze atlas de kaarten van de gemiddelde minimumtemperaturen over het tijdvak 1931-1960 dan blijkt dat in april gemiddeld de laagste temperaturen worden gevonden op de zuidoostelijke Veluwe, de Lijmers, de Achterhoek, Salland, Twente en het midden en het zuidoostelijk deel van Drenthe. De minst lage temperaturen komen voor in Zeeland, de kuststreek van Holland en het uiterste noorden van Friesland en Groningen. De maanden mei en juni geven een overeenkomstig beeld te zien, maar de temperatuurwaarden liggen uiteraard hoger.

Uit deze gegevens kan de gevolgtrekking worden gemaakt dat het oosten van het land voor de verbouw van vorstgevoelige gewassen, inclusief fruit, minder geschikt is.

In de keuze van vestiging is men in ons land niet vrij, maar het blijft natuurlijk waar dat de hiervoor genoemde 'koude' gebieden een groter nachtvorstrisico opleveren dan de 'warme' gebieden langs de kust. Maar ook al zou men vrij kunnen kiezen, dan zou de zaak toch niet zo eenvoudig zijn als de kaarten suggereren. De kaarten zijn getekend op basis van temperatuurwaarnemingen op 1,5 m hoogte, verkregen op 12 stations die regelmatig over het land verspreid liggen. Als in plaats van de temperaturen op die hoogte die van 10 cm hoogte zouden zijn gebruikt, zou blijken dat lage temperaturen dicht bij de grond zeer grillig over het land zijn verdeeld.

Bij lage temperaturen, die in de genoemde maanden optreden, is de toestand van de grond van grote invloed. Onder deze toestand moeten niet alleen de structuur en het vochtgehalte worden verstaan, maar ook de aard van de begroeiing. Volgens de eerder genoemde kaarten moet nachtvorst op Terschelling in mei en juni een zeldzaam verschijnsel zijn, maar de werkelijkheid is dat het daar vrij veel voorkomt. Temperatuurmetingen op 10 cm hoogte op Terschelling toonden aan dat daar in mei en juni zeer koude nachten kunnen voorkomen. Aangenomen mag worden dat de andere waddeneilanden een soortgelijk gedrag zullen vertonen.

Uit temperatuurmetingen en waarnemingen van nachtvorstschade blijkt dat onmiddellijk achter de duinen van de Noordzeekust nogal eens nachtvorst voorkomt. Ten zuiden van Bergen op Zoom komt veel nachtvorst voor, hoewel dit gebied onmiddellijk aan het 'warme' Zeeland grenst. Zo zijn er overal wel grotere of kleinere gebieden aan te wijzen met een groot nachtvorstrisico.

5.1.2 *Welke situaties men dient te vermijden*

Er is een aantal situaties dat aanleiding kan geven tot een verhoogd nachtvorstrisico.

In de eerste plaats kan worden gezegd dat veengronden of gronden die rijk zijn aan

humus een groter risico geven. Bij dergelijke gronden heeft de bovenlaag meestal een losse structuur en daardoor een hoog poriënvolume. Na enkele droge en zonnige dagen is het bovenlaagje sterk uitgedroogd en de poriën zijn dan gevuld met lucht. Het gevolg is een gering warmtegeleidingsvermogen, waardoor in daarvoor geschikte nachten lage temperaturen nabij de grond kunnen optreden. Er zijn echter juist op veen of veenachtige gronden vollegrondstuinbouwbedrijven waar men weinig risico loopt, maar dan zijn er andere oorzaken, zoals een ligging dicht bij de kust die het risico verkleinen.

In de tweede plaats zijn terreinen grenzende aan grote met gras begroeide oppervlakken blootgesteld aan de invloed hiervan. De koude lucht boven gras zal de neiging hebben ook de ingesloten of aangrenzende percelen te overstromen.

Situaties met grote grasvlakten komen in ons land veel voor, maar het is niet alleen een grasmat die gevaar oplevert. Ook andere vormen van begroeiing zijn berucht en met name de wilde vegetatie die niet wordt geoogst en waarbij een sterk warmte-isulerende laag van verdorpe afval het bodemoppervlak bedekt. Heidevelden zijn daarvan goede voorbeelden. Ook hellingen zijn gevaarlijk, hoewel deze bij ons niet veel voorkomen. De afgekoelde en dus relatief zware lucht stroomt langs de helling naar beneden en waar deze lucht zich verzamelt kunnen zeer lage temperaturen optreden. Uit de bosbouw zijn voorbeelden bekend van het effect van hellingen. Men heeft ervaren dat het onderaan de helling of in een dal moeilijk is, een jonge beplanting te doen slagen omdat de jonge loten zo dikwijls bevriezen.

5.1.3 Keuze van het groeiseizoen

Volledigheidshalve wordt de keuze van het groeiseizoen als passieve methode genoemd. In ons klimaat is men beperkt in de keuze van plant en zaaitijden en er zijn geen voorbeelden bekend van een verschuiving van de groeiperiode met de bedoeling daardoor minder nachtvorst risico te lopen.

5.1.4 Selectie en het kweken van nieuwe rassen

Met selectie wordt hier bedoeld, het zoeken naar typen of variëteiten die minder nachtvorstgevoelig zijn of die na bevroering een beter of sneller herstel vertonen. Met deze methode is nog weinig bereikt. Binnen dezelfde soort is de variatie in nachtvorstgevoeligheid gering. Zo zijn aardappelen, welke rassen men ook neemt, alle in dezelfde mate gevoelig voor temperaturen onder het vriespunt. Misschien is dit niet geheel juist, maar als er verschillen zijn, zijn deze zo klein dat zij zich aan onze waarneming onttrekken.

Op de Kevelinghoeve te Valthermond waren eens enkele duizenden nieuw gekweekte rassen, die daar op kleine veldjes waren uitgezet, in gelijke mate bevroren. Later waren er wel verschillen in de mate waarin en de snelheid waarmee de planten nieuwe stengels en bladeren vormden. Dit is uitermate belangrijk voor de cultuur,

maar heeft met de eigenlijke gevoeligheid voor bevrozing niets te maken.

De bewering dat er tussen de aardappelrassen geen merkbaar verschil in gevoeligheid bestaat, schijnt in tegenspraak met de ervaring. Zo is geconstateerd dat van twee identieke percelen waarop verschillende rassen groeiden, het ene perceel wel en het andere geen vorstschade opliep. Deze verschillen moeten worden toegeschreven aan verschillen in de vorm van de planten en het ontwikkelingsstadium. Het ene ras bedekt reeds vroeg de bodem en het andere sluit veel later. Bij een gesloten gewas wordt de temperatuur nabij de grond in hoofdzaak door het gewas bepaald, bij een open gewas meer door de eigenschappen van de bovenste grondlaag. Dit laatste kan zowel voordelig als nadelig zijn, afhankelijk van de toestand van de grond.

Bij fruit ligt de zaak niet veel anders. Er zijn verschillen tussen de appelrassen en tussen de pererassen. De vele metingen wijzen uit, dat er tussen de rassen geringe verschillen bestaan wat betreft de laagste temperaturen die zij nog kunnen verdragen, afhankelijk van het stadium van ontwikkeling. Duidelijk, hoewel nog niet in alle bijzonderheden, is ook dat de voorgeschiedenis deze drempel mede bepaalt. Het kweken van nieuwe rassen die minder vorstgevoelig zijn, heeft reeds lang de volle aandacht.

Bij aardappelen kent men wilde verwanten, die onder meer in het Andesgebergte groeien. Deze verdragen temperaturen tot -5°C en aangezien zij met onze aardappelen kunnen worden gekruist, heeft men in die richting naar een vermindering van de nachtvorstgevoeligheid gezocht. Voor de kruising wordt dikwijls *Solanum demissum* gebruikt. De resultaten zijn nog niet bevredigend. Het is mogelijk, een aardappelras te kweken met een behoorlijke vorstresistentie, maar om de cultuureigenschappen, de smaak en het opbrengstvermogen van onze rassen daarbij te behouden, is in elk geval een zaak van veel geduld.

Bij fruit zijn resultaten bereikt in Rusland. De nieuwe rassen kunnen in Siberië worden verbouwd, waar voorheen geen fruitteelt mogelijk was. Er wordt niet bericht of deze rassen zich met de elders bestaande kunnen meten wat opbrengst en smaak betreft.

Ook bij druiven heeft men resultaten bereikt o.a. door het kweken van rassen waarbij de slapende ogen na een nachtvorst snel nieuwe groei geven, maar dit is geen eigenlijke vorstresistentie.

5.1.5 Cultuurmaatregelen

Het toepassen van groeiregulatoren is een van de maatregelen. De methode is vrij nieuw en is er meestal op gericht, de ontwikkeling bij verschillende fruitsoorten in het voorjaar te vertragen. Hierdoor komen de gevoelige stadia wat later in het seizoen te liggen en het gewas loopt daardoor minder kans te bevriezen. Een vertraging in de ontwikkeling van 2 à 3 weken werd reeds bereikt, maar de neven-

werkingen zijn in meerdere of mindere mate schadelijk voor de bomen. De methode is dan ook nog niet rijp voor praktische toepassing.

Een ander groeiregelend middel wordt bij peren toegepast. Peren hebben de neiging tot het vormen van parthenocarpe vruchten, d.w.z. vruchten die zonder voorafgaande bevruchting tot stand komen. Als nu door nachtvorst de bloeiorganen worden beschadigd, kan een behandeling met gibberella-zuur het uitgroeien van de vruchtbeginsels, die dan intact moeten zijn, tot parthenocarpe vruchten bevorderen. Er zijn hoopgevende resultaten bij enkele pererassen bereikt.

De vormgeving, in het bijzonder bij fruitbomen, kan het nachtvorstisico beïnvloeden. Daar de laagste temperaturen dicht bij de bodem optreden wordt de kans op schade kleiner als men de kwetsbare delen verder van het oppervlak verwijderd houdt. In dit opzicht is de vroegere hoogstamvorm veel gunstiger dan de latere struikvorm waarbij vele bloesems zich in de onderste meter bevinden.

In de wijnbouw wordt geadviseerd op percelen waarop zich gemakkelijk koude lucht kan verzamelen, de onderste ranken op wat grotere hoogte te laten groeien. Deze maatregelen worden volledigheidshalve vermeld. Wijnbouw kennen wij niet en de voordelen van laagstammen in de fruitteelt zijn te groot, dan dat men terug zou willen naar het vroegere systeem.

Als laatste passieve methode wordt de invloed van de bodembehandeling en die van de begroeiing besproken.

Reeds eerder werd duidelijk dat het warmtegeleidingsvermogen van de grond sterk afhangt van het poriënvolume en de mate waarin de poriën met water zijn gevuld. Anders gezegd: Hoe droger en lossere de grond is, des te groter is de kans op nachtvorst. Eerder werd ook duidelijk dat het daarbij vooral gaat om het bovenste grondlaagje omdat alle warmte uit de bodem dit laagje moet passeren.

Hieruit kan de regel worden afgeleid, dat men in de periode waarin nachtvorst kan optreden alles moet nalaten wat de bovenlaag los maakt. De verschillen tussen een losse en een meer vaste bovenlaag bleken bij de nachtvorsten van 27 op 28 en 28 op 29 mei 1961 in de Noordoostpolder. De zwart gehouden fruitpercelen die korte tijd voor de nachtvorsten nog waren bewerkt, bleken aanzienlijk zwaarder getroffen te zijn dan die waarop deze bewerking achterwege was gebleven. De met gras begroeide fruittuinen waren in het algemeen het zwaarst getroffen.

In een ander geval in 1957 te Schoonebeek werden dergelijke verschillen gemeten. Het ging hier om een perceel 'bovenveen', dus om een zuivere veengrond die voor de teelt van aardappelen niet extra was bewerkt. De oppervlaktelaag was los en droog. Een gedeelte van het perceel was voor de teelt van bieten voorbereid waarbij de grond was fijingemaakt en met een rol aangedrukt. De verwachting was dat de temperatuur in stralingsnachten boven dit gedeelte hoger zou moeten blijven dan boven de rest van het perceel. Metingen met thermometers wezen uit dat het verschil soms meer dan 1,5 °C was. Dit was dan het effect op een grond die van

nature zeer veerkrachtig is en waarop het rollen veel minder invloed heeft op de structuur dan op bijvoorbeeld een zandgrond. Bij deze laatste moet een grotere invloed op de temperatuur worden verwacht. Nu is op de meeste grondsoorten in de gevaarlijke tijd een oppervlakkige bewerking nodig voor de bestrijding van onkruid.

De onkruidbestrijding kan o.a. bij aardappelen en fruit ook met chemische middelen worden verkregen. Bij aardappelen wordt deze bestrijding vlak voor het opkomen toegepast, waarna de grond niet meer wordt bewerkt. Dit is de oorzaak van de juistheid van de op het eerste gezicht wat vreemde uitspraak dat chemische onkruidbestrijding een bruikbaar middel tegen nachtvorst kan zijn.

In juni 1963 deed zich op een veenkoloniaal bedrijf een fraai verschil voor. De ene helft van het bedrijf was op de gebruikelijke wijze door middel van oppervlakkige grondbewerking onkruidvrij gehouden en op de andere helft was, bij wijze van proef, dit met een chemisch middel bereikt. Op de helft waarop de grondbewerking was toegepast waren de aardappelen zwaar door nachtvorst beschadigd; op de andere was geen schade te zien.

Hoewel werd beweerd dat de toestand van het bovenste grondlaagje zo belangrijk is, betekent dit niet dat de rest van de bouwvoor geen invloed zal hebben. Bij een laat in het voorjaar geploegde grond heeft de gehele bouwvoor een losse structuur en aangezien de meeste van onze voorjaren betrekkelijk droog zijn, krijgt de grond in die tijd weinig gelegenheid te bezakken. In de gevaarlijke tijd is de gehele bouwvoor dan een slechte warmtegeleider en men dient dan ook lage temperaturen nabij het oppervlak te verwachten. Van ernstige nachtvorstschade op een laat geploegd perceel zijn vele voorbeelden te vinden.

Ook de voorvrucht kan via dit mechanisme van invloed zijn. Gewassen als aardappelen en bieten kunnen de grond in zeer losse toestand achterlaten. Als vervolgens de winter droog is, bezakt de bouwvoor onvoldoende, zodat het volgende gewas begint met een losse grond. Als dit gewas nachtvorstgevoelig is, is vergroting van het gevaar als gevolg van de voorvrucht, niet denkbeeldig. In de loop der jaren werden duidelijke verschillen in de omvang van de schade, die uitsluitend aan deze oorzaak moesten worden toegeschreven, geconstateerd.

De aanwezigheid van een begroeiing kan het risico sterk vergroten. Bij vorstgevoelige akkerbouw- en tuinbouwgewassen is de bodem niet begroeid, behalve dan met het gewas zelf dat in een jong stadium de grond nog slechts voor een klein deel bedekt. In de bosbouw is de grond bij jonge aanplantingen dikwijls met gras bedekt en zoals reeds werd gezegd, geeft gras aanleiding tot lagere temperaturen. Dergelijke aanplantingen ondervinden dikwijls ernstige schade. In de Duitse bosbouw spreekt men dan ook van 'Grasfrost'.

In de fruitteelt is het gebruikelijk, de bodem met gras te laten begroeien. Een grasmat is, vooral op zware grond, zeer geriefelijk omdat de grond anders in een natte

periode onbegaanbaar zou zijn. Omdat een grasmat het risico sterk verhoogt, is echter zwart houden van de grond in het gevaarlijke seizoen sterk aan te bevelen. Er is een systeem dat de voordelen van een grasmat en die van een zwarte grond in zich verenigt. Daarbij wordt op de stroken tussen de bomenrijen, Westerwolds of Italiaans raaigras gezaaid en de grasmat laat men tot het einde van de winter intact. Men heeft dan het voordeel van de goede begaanbaarheid. Aan het einde van de winter wordt de dunne grasmat ondergeploegd. In het gevaarlijke seizoen heeft men dan de voordelen van een zwarte grond.

Er zijn gronden waar het inzaaien of het onderploegen moeilijkheden geeft, men kiest dan toch voor een permanente grasmat. Heeft men, om welke reden dan ook, de boomgaard 'in gras liggen' dan is het beste wat men kan doen: het gras zo kort mogelijk houden en ten minste de stroken waar de bomen staan, zwart houden. Door een verstandige bodembehandeling, het niet hebben van een grasmat inbegrepen, kan men het nachtvorst risico belangrijk verkleinen.

Gedurende meer dan twintig jaren werden vele gevallen van uitgebreide schade door nachtvorst onderzocht en daarbij bleek dat zelfs na een nacht waarin 'alles' was afgevroren, er altijd wel enkele percelen waren waar de schade of gering of zelfs geheel afwezig was. Als oorzaak kon in dergelijke gevallen uitsluitend de zeer gunstige bodemtoestand worden aangewezen. Het gaat hier om gevallen waarbij geen andere oorzaken, zoals beschutting of de onmiddellijke nabijheid van grote wateroppervlakken, in het spel waren.

5.2 Actieve methoden

5.2.1 Bedekking

Bedekking is wellicht de oudste methode om nachtvorstschade te voorkomen. De toepassingsmogelijkheden zijn beperkt tot lage gewassen omdat voor hogere, bijvoorbeeld fruit, de kosten van arbeid en materiaal spoedig te hoog worden. Van de lage gewassen komen om dezelfde reden alleen kleine percelen met kostbare gewassen in aanmerking.

Over de waarde van de verschillende bedekkingsmaterialen bestaat nogal wat misverstand, maar uitgaande van de processen zoals die eerder werden beschreven is gemakkelijk uit te maken aan welke eisen bedekkingsmaterialen moeten voldoen. De praktische eisen zijn: lage prijs, duurzaamheid en goede hanteerbaarheid, maar er worden andere eisen bedoeld. Er wordt uitgegaan van een nachtelijke situatie met een heldere hemel en praktisch windstilte. Het aardoppervlak straalt uit en ontvangt de tegenstraling van de atmosfeer. Het verschil, de netto-straling, kan worden vertaald als warmteverlies van het oppervlaktelaagje. Dit verlies wordt door de aanvoer van warmte uit de aangrenzende luchtlaag en uit de bodem aangevuld.

Wordt nu op enige afstand van het oppervlak een horizontaal scherm gedacht, dan kan de invloed van een dergelijk scherm worden nagegaan. Een scherm kan geheel doorlatend zijn voor infrarode straling. Het aanbrengen heeft dan geen effect, behalve dat de geringe verticale uitwisseling van lucht, die bij praktisch windstil weer nog aanwezig is, wordt onderdrukt.

Een ander geval is een scherm, van glas bijvoorbeeld, dat geheel ondoorlatend is voor infrarode straling, maar deze wel absorbeert en, zoals uit de stralingswetten volgt, zelf uitstraalt volgens de wet van Stefan-Boltzmann. In dit geval wordt de door het bodemoppervlak uitgezonden straling door het scherm geabsorbeerd en het scherm straalt zelf uit en wel naar beneden en naar boven.

Als wordt aangenomen dat de temperatuur van het scherm en die van het aardoppervlak weinig verschillen, ontvangt het aardoppervlak ongeveer evenveel van het scherm als het zelf naar het scherm uitstraalt. Deze toestand blijft niet bestaan want het scherm straalt naar boven uit en ontvangt van daar de tegenstraling die een geringere waarde heeft dan zijn uitstraling. Het verschil is de netto-straling, maar nu die van het scherm.

Als gevolg van het op deze wijze tot stand komende stralingsverlies zal het scherm aan de bovenzijde afkoelen en als gevolg van de warmtegeleiding zal de temperatuur van de onderzijde eveneens dalen. Nu ontstaat een toestand waarbij een relatief warm aardoppervlak straalt naar een relatief koud scherm. Het verschil tussen de van het aardoppervlak uitgaande straling en de van het scherm terug ontvangen straling krijgt dan betekenis en wel des te meer naarmate het temperatuurverschil tussen bodemoppervlak en de onderzijde van het scherm groter wordt.

Het scherm zal zijn effect verloren hebben als het aan de onderzijde is afgekoeld tot een temperatuur waarbij zijn uitstraling gelijk is aan de atmosferische tegenstraling. Dan maakt het immers voor de stralingshuishouding van het aardoppervlak geen verschil meer of men het scherm wegneemt of op zijn plaats laat.

Als de atmosferische tegenstraling wordt geschat op 230 W/m^2 dan zal de onderzijde van het scherm een temperatuur moeten hebben van 259 K ($-14 \text{ }^\circ\text{C}$). Het tijdstip waarop onder de geschetste omstandigheden een dergelijke temperatuur wordt bereikt is niet eenvoudig aan te geven. Het hangt niet alleen van de stralingshuishouding van het scherm af, maar ook van zijn warmtecapaciteit, dus van de dikte en van de aard van het materiaal waarvan het scherm is gemaakt. Voorts ook nog van hoeveelheid warmte die door de minder koude lucht aan het scherm wordt afgestaan.

5.2.2 Glasbedekking

Een scherm met al de genoemde eigenschappen wordt zeer algemeen gebruikt. Glas is n.l. praktisch ondoorlatend voor langgolelige straling en bovendien geeft het een redelijk goed warmtegeleidingsvermogen, ongeveer als een matig vochtige

cultuurgrond. De dikte van het glas bedraagt meestal niet meer dan enkele millimeters en de warmtecapaciteit is van dezelfde orde van grootte als die van cultuurgrond. De dunne glaslaag zal door de stralingsverliezen snel afkoelen en de onder- en bovenzijde zullen als gevolg van de redelijk goede warmtegeleiding, weinig temperatuursverschil vertonen.

Omdat het afkoelende glas ook warmte aan de luchtlaag onder het glas onttrekt, ontstaat een toestand waarin de koudste lucht zich nabij het glas en de warmste zich nabij het bodemoppervlak bevindt. Zie fig. 22. Deze toestand is niet stabiel, want de koude lucht is het zwaarst en zal naar het aardoppervlak stromen en worden vervangen door de warmere lucht. Door dit uitwisselingsproces zal de invloed van het koude glasdek zich snel tot de gehele luchtlaag onder het glas uitbreiden. Men mag op grond van de eigenschappen van glas en het genoemde uitwisselingsproces dan ook geen hoge verwachtingen van de beschermende werking van een glasdek hebben. Er zijn zelfs ervaringen, waarvan de juistheid door metingen werd bevestigd, dat soms onder plat glas de temperatuur wat lager komt dan op hetzelfde niveau in het open veld. Dit verschijnsel kan waarschijnlijk slechts optreden als de wind niet geheel wegvalt. In het open veld wordt dan de koude lucht gemengd met wat warmere van wat grotere hoogte, terwijl deze gunstige invloed onder glas uiteraard ontbreekt. Overigens zij men voorzichtig met vergelijkingen van schadebeelden, want een gewas in het open veld is als regel afgehard en dat onder glas niet of in veel mindere mate. Dat het glas sterk afkoelt kan men waarnemen aan plantedelen die in aanraking of bijna in aanraking waren met het glas. Zij vertonen na een heldere nacht dikwijls vorstschade.

5.2.3 *Glas bedekt met ander materiaal*

Aanzienlijke verbetering wordt bereikt door het glas 's nachts te bedekken met een slecht warmtegeleidend dek; meestal gebruikt men daarvoor rietmatten. De verbetering ontstaat doordat de stralingsuitwisseling met de atmosfeer nu plaats vindt via het oppervlaktelaagje van de rietmat. Als dit laagje afkoelt ontstaat in de slecht warmtegeleidende laag een groot temperatuursverschil tussen de onder- en bovenzijde (Fig. 22). Het bodemoppervlak staat dan in stralingsuitwisseling met de relatief warme onderzijde, de glasplaat, waardoor de afkoeling van het oppervlak, van de lucht onder het glas en van eventuele gewassen slechts langzaam verloopt.

De rietmat werd als voorbeeld gebruikt omdat die op grote schaal wordt toegepast. Vanzelfsprekend gaat de redenering ook op voor ander materiaal als het maar een gering warmtegeleidingsvermogen heeft.

5.2.4 *Kunststof als bedekking*

In veel gevallen vervangt men glas door een kunststof die in het algemeen als plastic wordt aangeduid.

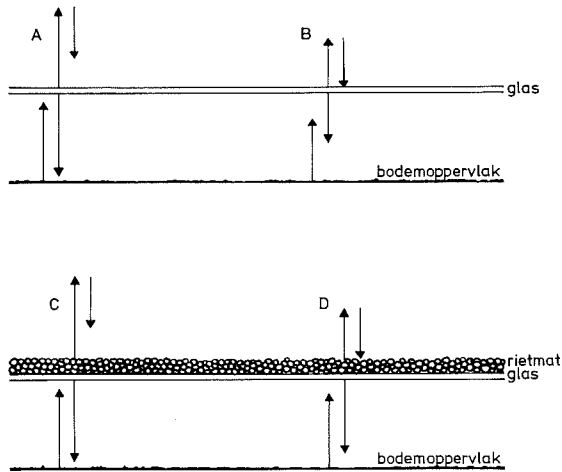


Fig. 22 Situatie A. Bodemoppervlak en glas hebben dezelfde temperatuur en dezelfde stralingseigenschappen. De van de bodem uitgaande straling en de van het glas naar de bodem gerichte straling hebben dezelfde sterkte. Het glas straalt echter ook naar de atmosfeer en ontvangt vandaar de tegenstraling die een geringere sterkte heeft. Er is dus een nettostralingsverlies van het glas aan de atmosfeer en het glas zal afkoelen. Na verloop van tijd zal de toestand B worden bereikt.

Situatie B. Het glas is zover afgekoeld dat de naar de bodem gerichte straling dezelfde sterkte heeft als de tegenstraling van de atmosfeer. Denkt men nu de glasplaat weg dan maakt dit voor de stralingshuishouding van de bodem geen verschil meer.

Situatie C. Glas, rietmat en bodemoppervlak hebben dezelfde temperatuur en dezelfde stralingseigenschappen. De bovenzijde van de rietmat straalt uit naar de atmosfeer en ontvangt vandaar de tegenstraling. Er is dus een netto-stralingsverlies van de bovenzijde van de rietmat die daardoor afkoelt en na verloop van tijd ontstaat de situatie D.

Situatie D. De uitstraling van de bovenzijde van de rietmat is nu gelijk aan de tegenstraling van de atmosfeer. De onderzijde van de rietmat en de glasplaat zijn minder afgekoeld dan de bovenzijde van de mate, daar de rietmat, vergeleken met glas, een zeer slechte warmtegeleider is. De naar de bodem gerichte straling is dan ook nog aanzienlijk sterker dan in de situatie B.

Er zijn vele soorten plastic en zij hebben ook wat de straling betreft, verschillende eigenschappen. Zo is polyvinylchloride (P.V.C.) voor langgolvlige straling bijna even ondoorlatend als glas, terwijl polyaethyleen de langgolvlige straling juist goed doorlaat. Door deze eigenschap zou bedekking met polyaethyleen geen effect kunnen hebben, maar dit is niet in overeenstemming met de ervaring.

In de eerste plaats werd de doorlatendheid bepaald aan films van de zuivere stof in nieuwe en schone staat. Geringe bijmengsels van andere stoffen en vervuiling van het oppervlak kunnen de doorlatendheid sterk beïnvloeden.

In de tweede plaats is bij gebruik als bedekkingsmateriaal bij planten, reeds vroeg in de avond de onderzijde van het plastic met een laagje condenswater bedekt en dit blijft soms tot laat in de voormiddag van de volgende dag aanwezig.

Onder die omstandigheden gelden de eigenschappen van een plasticfilm + waterfilm. Ook al is het plastic volkomen doorlatend voor langgolvlige straling, een waterfilmpje is geheel ondoorlatend voor die straling. De toestand is dan dezelfde als bij een glasdek. De dunne waterlaag is er de oorzaak van dat, onafhankelijk van de eigenschappen van het gebruikte plastic, toch een redelijke bescherming tegen nachtvorst wordt verkregen. Zwart plastic bestaat uit een kunststof waaraan men bij de bereiding koolstof heeft toegevoegd en deze zwarte vellen zijn praktisch ondoorlatend voor langgolvlige straling. Het nadeel is, dat zwart plastic onvoldoende licht doorlaat zodat het 's morgens moet worden verwijderd. Heldere plastics kan men onder sommige omstandigheden overdag over de planten laten liggen.

5.2.5 *Bedekking met dun metaal*

Vele andere materialen kunnen voor bedekking worden gebruikt, van oude kranten tot wollen dekens, al of niet gecombineerd met glas. Bij één soort bedekkingsmateriaal past een waarschuwing, n.l. bij metalen die als folie, maar ook in de vorm van blikken bussen over de planten worden geplaatst. Door het hoge warmtegeleidingsvermogen van metalen zal de binnenzijde even sterk en praktisch even snel afkoelen als de buitenzijde. Plantedelen die met het materiaal in aanraking zijn of er zich dicht bij bevinden, kunnen ernstige bevroeringsverschijnselen vertonen. Er zijn voorbeelden van dergelijke bedekkingen, voornamelijk met blikken bussen, waarbij de beschermde planten wel en de niet beschermde niet bevroren. Brengt men metaalfolie op enige afstand aan, op een raamwerk bijvoorbeeld, dan wordt de toestand veel gunstiger.

5.2.6 *Bedekking met schuim*

Afzonderlijke vermelding verdient een geheel ander bedekkingsmateriaal, n.l. schuim. Schuim is zeer effectief, maar het moet aan een aantal eisen voldoen. Als eerste eis geldt vanzelfsprekend dat het niet schadelijk mag zijn voor de planten, als tweede dat het stabiel moet zijn, dus niet in de loop van de nacht mag ver-

vloeien en als derde dat het gemakkelijk moet zijn te verwijderen, bijvoorbeeld met behulp van een waterstraal. Beter nog is het als het schuim onder invloed van het daglicht snel vervloeit. Proeven in Duitsland zouden hebben aangetoond dat het effect van een schuimlaag 3 à 7 °C bedraagt, afhankelijk van de dikte van de laag.

5.2.7 Kunstmatige sneeuw

Kunstmatige sneeuw is proefsgewijze als bedekkingsmateriaal gebruikt. Het ontstaat als fijn verdeeld water en perslucht in een daartoe geconstrueerde mengkamer worden verspoten. Bij uittreding uit de sproeiopening koelt het uitzettende mengsel af en de afkoeling doet de fijne waterdruppels tot ijsnaalden bevriezen. Deze ijsnaalden bedekken de planten en vormen evenals natuurlijke sneeuw een goede bescherming tegen lage temperaturen. Het systeem kan alleen onder bepaalde atmosferische omstandigheden, niet te lage temperatuur en een hoge luchtvochtigheid, worden gebruikt en is zeker nog niet rijp voor praktische toepassing. De kosten worden als laag beoordeeld.

5.3 Stralingsafscherming

Enigermate een tussenpositie tussen actieve en passieve methoden nemen die maatregelen in, die bedoeld zijn om de straling af te schermen. Een voorbeeld is te vinden bij de bosbouw. Als een bos gekapt wordt, plant men het meestal opnieuw in en de jonge boompjes, ter hoogte van enkele decimeters, lopen grote kans te bevriezen. Men spaart dan wel bij het kappen enkele grote bomen, verspreid over het terrein, die met hun kruinen een deel van de hemel afschermen. Het gunstige effect van deze maatregel berust in hoofdzaak op de beïnvloeding van de stralingshuishouding van de bodem. Een willekeurig stukje bodemoppervlak kan niet meer de gehele hemelkoepel 'zien' en straalt gedeeltelijk naar de atmosfeer en gedeeltelijk naar de bomen uit. De atmosfeer geeft het vlakje de tegenstraling terug en de boom zijn, naar de aarde gerichte, straling die een grotere waarde heeft dan de atmosferische tegenstraling. Het netto-warmteverlies van de bodem wordt hierdoor kleiner en daarmee de kans op nachtvorstschade aan de jonge aanplant. Het grootste effect treedt op onder en nabij de gespaarde bomen. Zie fig. 23.

Op hetzelfde beginsel berust het effect van een verticaal opgesteld scherm. Een vlakje aan de voet van het scherm, of dit nu een schutting, een muur of een windsingel is, 'ziet' slechts de halve hemelkoepel en ontvangt uit de nadere helft de straling van het scherm. Omdat deze groter is dan de atmosferische straling wordt het netto-stralingsverlies gereduceerd. Het effect wordt vanzelfsprekend kleiner naarmate het bodemoppervlakje verder van het scherm is verwijderd. Zie fig. 24.

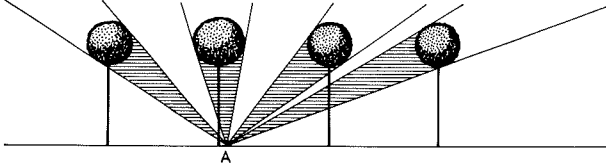


Fig. 23 Enkele verspreid staande grote bomen die als stralingsscherm voor jonge aanplant dienst doen. De uitstraling van een vlakje bij A is voor het niet gearceerde deel naar de atmosfeer en voor het gearceerde, naar de bomen gericht. De tegenstraling van de atmosfeer is geringer dan die van de bomen zodat de netto-stralingsverliezen van het aangegeven vlakje kleiner zijn dan die van een zelfde vlakje in het open veld.

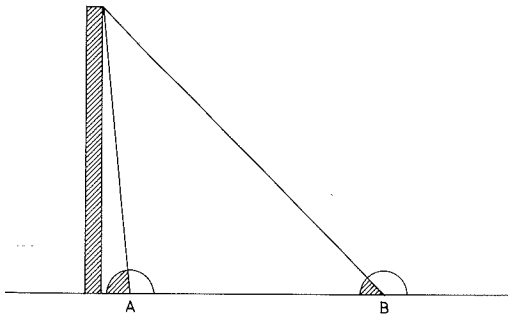


Fig. 24 De invloed van een wand. Een vlakje bij A staat voor bijna de helft in stralingsuitwisseling met de wand, zodat de netto-straling weinig meer dan de helft bedraagt van die van een vlakje in het open veld. Een dito vlakje bij B staat voor een aanzienlijk kleiner deel in stralingsuitwisseling met de wand zodat de netto-straling groter is dan die van het vlakje bij A.

De figuur 25 (zie ook fig. 7 en 7a) geeft de verklaring van het effect van verticale afscherming. Uit de tekening blijkt dat de omvang van de nachtelijke netto-straling in richtingen die een kleine hoek met het horizontale vlak maken, nog van betekenis is.

Als de netto-straling in het open veld op 100 wordt gesteld, is op afstanden, die overeenkomen met de hoeken waaronder het beschouwde vlakje de bovenzijde van het scherm 'ziet', de netto-straling als in de volgende tabel is aangegeven. Aangenomen is, dat de temperaturen van het bodemoppervlak en van het scherm gelijk zijn en dat beide dezelfde stralingseigenschappen bezitten.

Tabel 6

| Afstand tot het scherm als dit een hoogte heeft van: | | | Hoek waaronder het vlakje de bovenzijde van het scherm ziet | Netto-straling in procenten van die in het open veld |
|--|--------|--------|---|--|
| 5 m | 10 m | 15 m | | |
| 0 | 0 | 0 | 90° | 50 |
| 1,3 m | 2,6 m | 3,9 m | 75° | 57 |
| 2,9 m | 5,8 m | 8,5 m | 60° | 65 |
| 5,0 m | 10,0 m | 15,0 m | 45° | 73 |
| 8,5 m | 17,0 m | 26,0 m | 30° | 81 |

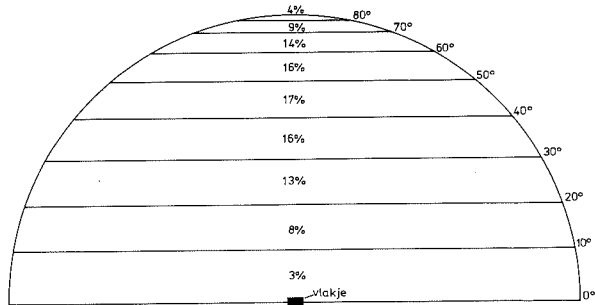


Fig. 25 In de figuren 7 en 7a werd de uitstraling in verschillende richtingen getekend. Belangrijker is de netto-straling in de verschillende richtingen in en fig. 25 zijn de percentages van de totale netto-straling van het horizontale vlakje in het centrum getekend. Ook hier is weer een halve bol van volkomen doorlatend materiaal over het vlakje gedacht waarop nu cirkels om de 10° zijn getekend. De waarde van de tegenstraling kan sterk verschillen, maar voor de berekening werd een gemiddelde waarde bij heldere hemel gebruikt.

Als nu bijvoorbeeld een fruittuin van 100 m breedte aan beide zijden van een windscherm van 15 m hoogte is voorzien, zal een klein bodemoppervlakje, dat juist in het midden tussen beide windschermen is gelegen, in gelijke mate de invloed van beide schermen ondervinden. In dit geval zal de netto-straling van het vlakje nog 77% van die in het open veld bedragen. Voor een vlakje dat niet in het midden ligt zal de invloed van het dichtstbij zijnde scherm groter en dat van het verst verwijderde kleiner worden. Voor een vlakje dat op 20 m van het ene en dus op 80 m van het andere scherm is gelegen, geldt dat de netto-straling nog ruim 70% van die in het open veld is.

Er zijn veel voorbeelden bekend van de stralingsafscherming door windsingels, bomenrijen, heggen enz., waarbij een perceel vorstschade vertoonde behalve op een strook langs de windsingels, enz.

Het meest sprekende voorbeeld werd waargenomen in 1961 in het fruitgebied van de Noordoostpolder waar, in de nacht van 28 op 29 mei, van het reeds uitgebloeide fruit de jonge vruchtjes waren bevroren. Later in het seizoen werden tellingen uitgevoerd aan rijen dwars over het perceel, dus van de ene windsingel naar de andere. Daarbij toonden de aantallen overgebleven vruchten per boom duidelijk de invloed van de stralingsafscherming door de windsingels. De figuur 26 laat de uitkomsten van de tellingen zien. Hieruit zou kunnen worden geconcludeerd dat het met het oog op het nachtvorstisico aanbeveling verdient zoveel mogelijk windschermen te plaatsen, maar er zijn voor de hand liggende redenen om het aantal beperkt te houden.

Er zijn gevallen die met het voorgaande in strijd schijnen te zijn. Soms is er juist in de buurt van een windscherm wel en op grotere afstand geen vorstschade.

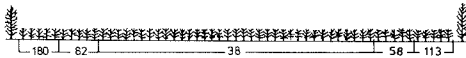


Fig. 26 De invloed van windschermen op de nachtvorstschade aan de hand van een voorbeeld uit de Noordoostpolder waar in de nachten van 27 op 28 en van 28 op 29 mei 1961 ernstige schade aan het fruit werd waargenomen. Later in het seizoen werden de aantallen overgebleven appels per boom geteld en de uitkomsten zijn in de figuur te zien. Bij een bepaalde rij van 55 bomen telde men 180 appels aan de eerste 5 bomen. Aan de volgende 5 werden 82 appels geteld en aan de vijf en dertig bomen die min of meer in het midden van het perceel stonden werden in totaal 38 appels geteld, dus gemiddeld weinig meer dan 1 per boom. De 5 bomen naast het andere windscherm leverden 113 appels en de 5 bomen wat verder van het scherm verwijderd, gaven 58 appels te zien.

De verklaring moet worden gezocht in de wind. Als wordt aangenomen dat de wind, die loodrecht op het scherm staat, zwak is zal aan de lijszijde van het scherm een zône zijn waar de windsnelheid praktisch nul wordt.

In deze zône van windstilte zal zich in alle rust een temperatuurprofiel kunnen opbouwen waarbij de koudste lucht zich aan de grond bevindt, zodat daar nachtvorst kan optreden. In het open veld zorgt dan de wind voor verticale menging van de koude met de minder koude lucht en daar zal de temperatuur minder laag worden. Weliswaar werkt achter het scherm ook de stralingsafscherming, maar het effect van de menging in het open veld wint het dan blijkbaar. In situaties zonder wind zal alleen de stralingsafscherming van belang zijn, met het reeds besproken gevolg.

5.4 Vergroting van de atmosferische tegenstraling

Als het bedrag van de uitstraling gelijk blijft, betekent vergroting van de atmosferische straling dat de netto-straling geringer wordt. De tegenstraling wordt voornamelijk bepaald door de temperatuur en het waterdampgehalte van de atmosfeer tot op grote hoogte. Het aandeel van de onderste luchtlagen is daarbij het grootst en de tegenstraling daarvan kan worden vergroot door het aanbrengen van een rook- of mistlaag. Een mistlaag van voldoende dikte is zelfs ondoorlatend voor langgolvlige straling en nachtvorstwering met behulp van mist is dan ook reeds beproefd.

Men stuit daarbij op grote moeilijkheden. Ten eerste is het niet eenvoudig, mist te produceren. Ten tweede is het zeer moeilijk om een dergelijke mistlaag in stand te houden omdat mist in een drogere omgeving snel verdampt. Ten slotte zijn er in ons land uiterst zelden situaties waarbij in het geheel geen horizontale luchtverplaatsing optreedt en zelfs een geringe verplaatsing doet de aangebrachte mistlaag wegdrijven. Bovendien zijn de kosten niet gering en de proeven hebben dan ook nog niet tot een praktisch bruikbare toepassing geleid.

Een zeer oud middel dat op hetzelfde principe berust, is het roken tegen nachtvorst. Uit oude Romeinse geschriften is bekend dat reeds meer dan 2000 jaren geleden het beroken van wijnbergen in zwang was. In Midden Europa kwam het beroken eerst tussen 1700 en 1800 in gebruik. Dat ging niet vanzelf, want de conservatieve instelling van de wijnbouwers leidde tot grote weerstanden.

‘Ein solches Unternehmen ist ein Eingriff in Gottes Weltregierung und will den Allmächtigen gleichsam Trotz bieten, als ob der schwache Mensch ihm verwehren wollte, seinen Weinberg erfrieren zu lassen. Unsere Vorfahren haben das Erfrieren der Weinberge nicht gehindert, so wollen wir es auch nicht; die Alten waren auch keine Narren’. (ref. 2).

Om dergelijke weerstanden te overwinnen namen de regeerders van sommige Duitse vorstendommen hun toevlucht tot maatregelen waarbij het beroken van wijnbergen bij de wet werd voorgeschreven.

Als middel werd en wordt alles gebruikt wat bij verbranding rook geeft. Nu is het niet onverschillig welk materiaal wordt verbrand. Rook bestaat in het algemeen uit kleine roetdeeltjes en waterdruppeltjes en deze laatste zijn het meest werkzaam. De ervaring heeft dan ook geleerd dat het gebruik van natte materialen het best helpt. Om het vuurtje gaande te houden gebruikt men wat droge brandstof, soms een paar briketten. Het geheel wordt afgedekt met natte turfmoalm, vers gras of nat stro. De rookontwikkeling kan dan enorm zijn terwijl de rook voor een groot deel uit waterdruppeltjes bestaat en dus de eigenschappen van mist benadert.

Aan de methode kleven nogal wat bezwaren. In de eerste plaats is men in ons vlakke land zelden zeker van de richting waarin de rook trekt. Het komt herhaaldelijk voor dat de zwakke luchtbeweging gedurende de nacht, 180° van richting verandert. Dan 'profiteert' de buurman van de rook. Een bezwaar van geheel andere aard is, dat in ons dicht bevolkte land zelden een perceel zodanig is gelegen dat niet een openbare weg met een dichte nevel wordt bedekt met alle hinder en gevaar voor het verkeer.

In de wijnbouw ligt de zaak veel gunstiger. Wat het eerste bezwaar betreft, zal men op grond van de helling en de richting daarvan, plaatsen kunnen vinden vanwaar de rook met een grote mate van zekerheid daar terecht komt waar men deze wil hebben. Ook het andere bezwaar, dat van de overlast, telt minder omdat de wijngaarden meestal in grote complexen bijeen liggen. Verder doet iedereen mee en kan men gemakkelijk maatregelen treffen, die de verkeersveiligheid waarborgen. Van het resultaat van een rookgordijn moet men zich geen overdreven voorstelling maken. In het algemeen beoordeelt men een rooklaag staande en men kijkt dan min of meer tegen de zijkant (fig. 27). Aldus gezien lijkt het meestal heel wat, maar



Fig. 27 Een rookscherm. De man kijkt in horizontale richting tegen de laag rook aan, maar de werkzame dikte van de laag is slechts als in de figuur is aangegeven. Hij zou deze beter kunnen beoordelen door zich in het gewas neer te leggen en recht naar boven te kijken. In de beginperiode van de luchtvaart zijn er gevallen geweest waarin piloten de mogelijkheid tot landen beoordeelden aan wat door een mistlaag recht naar beneden konden zien. Kwamen zij dan op geringe hoogte dan zagen zij tot hun schrik dat het schuine en horizontale zicht aanzienlijk slechter was.

eigenlijk zou men onder de laag moeten gaan liggen en recht naar boven kijken. Men ziet dan dikwijls nog de helderste sterren door de rooklaag heen.

Er is reeds opgemerkt, dat nevels die uit waterdruppels bestaat, het grootste effect hebben. Experimenten met nevels die uit oliedruppels bestaan hebben weinig opgeleverd. Dergelijke nevels laten de langolvige straling grotendeels door.

Andere stoffen die voor het produceren van nevels zijn gebruikt, zijn afkomstig van de techniek van het maken van rookgordijnen in de oorlog. Bekend zijn: zwaveltrioxyde, rode phosphor en zink- en chloorverbindingen. Ook ammoniumchloride, hexachlooraethaan, titaantetrachloride en siliciumtetrachloride werden gebruikt. De gebruikte stoffen mogen uiteraard niet schadelijk voor het gewas zijn. Aan deze eis is slechts ten dele voldaan, maar op plaatsen waar de concentratie hoog was traden bij vele stoffen verbrandingsverschijnselen bij het gewas op. Het zogenaamde nevelzuur, vertaling van Nebelsäure, is een mengsel van chloorsulfonzuur en zwaveltrioxyde. Er zijn slechte ervaringen mee opgedaan; tot 60 m van het apparaat trad ernstige schade aan het gewas op.

Teer en oude autobanden produceren een donkere rook die grotendeels uit roet bestaat. Het effect is redelijk, maar de overlast is niet gering zodat het gebruik spoedig moeilijkheden geeft. De rook is overigens niet schadelijk voor de planten gebelen.

De vraag rest nog, hoeveel de temperatuurwinst in het gunstigste geval bij het gebruik van rook en nevel bedraagt. Deze kan worden gesteld op 1–3 °C. In ons vlakke land zal het zelden gelukken 3 °C te bereiken. De eindconclusie is dat voor het met succes gebruiken van rook of nevel, de terrein- en weersomstandigheden in Nederland zelden geschikt zijn. Verder zijn de bevolkingsdichtheid en de dichtheid van het wegnnet zodanig dat de kansen op niet te accepteren overlast te groot zijn.

5.5 Ventilatie

De gunstige invloed van de wind, die de aan het aardoppervlak afkoelende lucht voortdurend mengt met de minder koude op enige hoogte, is reeds behandeld.

Kunstmatige wind kan in heldere nachten het optreden van lage temperaturen nabij de grond bemoeilijken. Dit is het beginsel van de ventilatie. De toepassing is reeds oud. Vroeger liet men in Duitsland wel schapen heen en weer rennen in een bedreigd gewas. Hierbij is niet alleen de menging van de lucht werkzaam, maar ook de warmte van de dieren zelf. In Noorwegen sleepte men voorheen in gevaarlijke nachten een, door twee personen vastgehouden, touw over de graanvelden waardoor ook enige menging optrad.

Er vindt in deze gevallen behalve de menging nog iets anders plaats. Stilstaande

plantedelen vormen in een stralingsnacht een laagje koude lucht om zich heen, die bij beweging wordt vervangen door minder koude. Het resultaat van ventilatie hangt in de eerste plaats af van het verticale temperatuursverloop. Wanneer de temperatuur nabij het oppervlak tot onder het vriespunt daalt, terwijl deze op enkele meters hoogte boven het vriespunt blijft, zal een voortdurende menging van de onderste luchtlag met een dikte van bijvoorbeeld 5 of 10 meter, de temperatuur in de gehele laag boven het vriespunt kunnen houden.

Dergelijke toestanden komen bij ons niet veel voor. Meestal verloopt de temperatuur naar boven minder sterk en levert menging weliswaar enige verbetering op, maar niet voldoende.

In Californië wordt ventilatie vrij veel toegepast, maar juist in dit gebied komen sterke inversies veelvuldig voor. Onder een sterke inversie verstaat men een inversie met een groot temperatuursverschil tussen onder- en bovenzijde. Dit verschil in optreden van sterke inversies geeft ook het antwoord op het in 1960 in Duitsland uitgesproken verwijt, dat er in dat land slechts enkele installaties zijn voor luchtmenging terwijl men in Amerika toen ongeveer 12000 installaties in gebruik had. Zie fig. 28.

Bij de bestaande ventilatieapparatuur maakt men gebruik van propellers, aangedreven door een motor. De propellers zijn opgesteld op stalen masten en er zijn er met verticale, horizontale en schuin staande as. De drie systemen hebben elk hun eigen voor- en nadelen.

Voor onze omstandigheden geldt voor al deze installaties het nadeel dat men bij de (zeer) hoge kosten allermindst zeker is van een goed resultaat, voornamelijk omdat de warmere lucht óf te hoog zit óf niet voldoende warm is.

Proeven om lucht te mengen door over het perceel een helikopter laag te laten vliegen hebben niet het resultaat opgeleverd dat men bij de hoge kosten mag eisen.

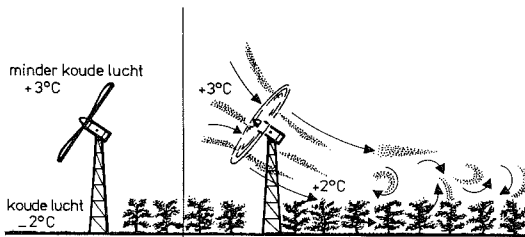


Fig. 28 Menging met warmere lucht door middel van een door een motor aangedreven propeller. In de linkershelft van de figuur de toestand bij stilstaande en rechts die bij draaiende propeller.

Voorts is laag vliegen in het donker, ook met een helikopter een niet ongevaarlijk bedrijf. Zie fig. 29.

5.6 Verwarming

Verwarming is wel het meest voor de hand liggende middel tegen te lage temperaturen.

Warmte is gemakkelijk te produceren door verbranding van wat dan ook. Elke kilogram olie levert bij verbranding ongeveer 44×10^6 Ws (= 12,2 kWh). Als wordt aangenomen dat het netto-stralingsverlies van het bodemoppervlak in een heldere nacht 84 W/m^2 bedraagt en dat deze toestand 10 uren aanhoudt wordt het totale verlies over 1 hectare en een nacht: 30168000000 Ws (= 8380 kWh). Als verder wordt aangenomen dat dit bedrag voor een derde deel door de warmtestroom uit de bodem wordt aangevuld dan zou per nacht en per ha de verbrandingswarmte van 450 kg olie voldoende zijn om de afkoeling geheel te compenseren.

Zo simpel als deze berekening is, zo moeilijk is het om de warmte te brengen daar waar hij nodig is. Dit wordt duidelijk als wordt nagegaan waar de verbrandingswarmte blijft die in een kachel vrij komt. Er wordt uitgegaan van een kachel waarvan gemakshalve de vorm van een cylinder wordt gegeven. De warmteproductie vindt dan in de cylinder plaats. Een groot deel van de warmte bevindt zich in de hete verbrandingsgassen. Deze zijn door hun hoge temperatuur aanzienlijk lichter dan de omringende lucht en zullen met grote snelheid door de schoorsteen ont-
wijken.

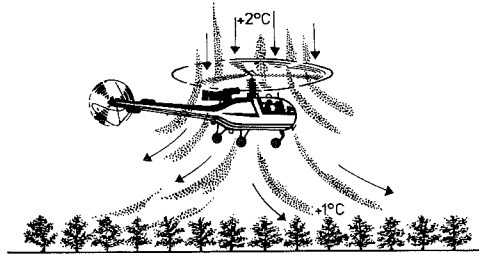


Fig. 29 De helikopter zuigt relatief warme lucht van boven aan en veroorzaakt een sterke naar beneden gerichte luchtstroom die de koude lucht nabij de grond vervangt door minder koude.

De cylindermantel wordt heet en dit warme oppervlak zal in de eerste plaats een grote hoeveelheid stralingsenergie uitzenden. Aannemende dat de mantel een temperatuur van 1000 K heeft, bedraagt de straling ongeveer $49\,000\text{ W/m}^2$. Ook zal de hete mantel warmte afstaan aan de omringende lucht en dit proces wordt vele malen versneld door convectie.

De overdracht van de door de kachel geproduceerde warmte aan de planten verloopt via de straling vrij efficiënt, maar de straling maakt slechts een deel uit van de totale hoeveelheid vrijkomende energie. Bij een oliekachel van een veel gebruikt model bedraagt de door de schoorsteen uitgestraalde warmte 20 tot ten hoogste 30% van de verbrandingswarmte van de gebruikte olie. De rest wordt door geleiding en menging met de hete schoorsteengassen aan de lucht afgestaan. De lucht wordt daardoor verwarmd en kan aan de bedreigde plantedelen warmte afstaan. Langs deze weg is de overdracht echter weinig doelmatig.

De opwaartse beweging langs de kachelwand en de opwaartse stroming van de verbrandingsgassen leiden de warme lucht naar boven en brengen deze ver van de planten. De stromingen veroorzaken een circulatie die zelfs schadelijke gevolgen kan hebben. Zie fig. 30.

Daarbij worden twee gevallen onderscheiden.

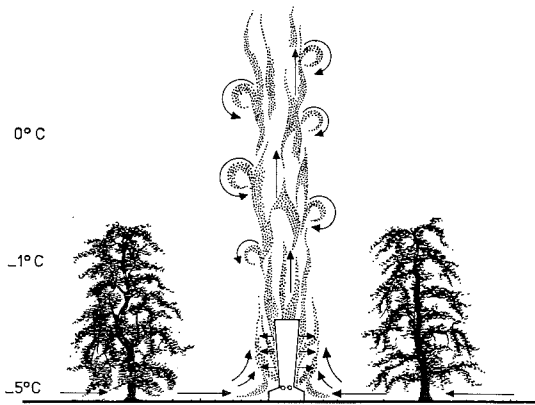


Fig. 30 De hete schoorsteengassen van de kachel verdwijnen naar boven evenals de door de schoorsteen verwarmde lucht. De hete schoorsteen straalt o.a. naar de bomen en daardoor zal de temperatuur daarvan worden verhoogd. Over de bodem ontstaat een van alle zijden naar de kachel gerichte stroom koude lucht.

In het ene geval is er geen inversie of slechts een zwakke; een toestand die bij ons het meest voorkomt. In het andere geval is er een sterke inversie, die als een sperlaag voor de stijgende warme lucht fungeert.

Uit de figuren wordt duidelijk dat de stijgende luchtstroom in het eerste geval oorzaak is dat lucht uit de – koude – omgeving wordt aangezogen. Omdat er normaal vele kachels per perceel worden gebruikt vindt het aanzuigen van de koude lucht vooral aan de randen van het perceel plaats. Er is daartegen een doeltreffend, maar kostbaar, middel en dat is het aanbrengen van rietmatten of van een plastic scherm rond het perceel. Een andere remedie is een zodanige verdeling van de kachels over het perceel, dat de randrijen het dichtst met kachels zijn bezet.

In het tweede geval stuit de stijgende luchtstroom tegen een sterke inversie en buigt horizontaal af. Er ontstaat dan een circulatie zoals in figuur 31 is getekend. Deze, in dit opzicht gunstige, toestand komt voornamelijk voor onder aan hellingen, dus in heuvel- en bergland.

5.6.1 Modellen van kachels

Er zijn zeer eenvoudige kachels die bestaan uit een soort pan of emmer waarin zich olie bevindt. Ze zijn goedkoop, niet regelbaar en produceren dikwijls vrij veel roet.

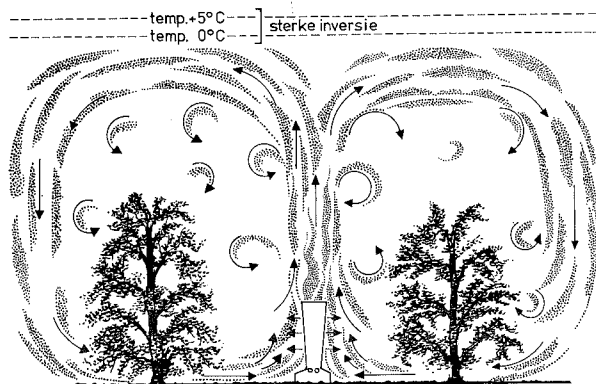


Fig. 31 Hetzelfde geval als in figuur 30, maar nu is er op enige hoogte een sterke inversie die als sperlaag voor de stijgende warme lucht werkt. De luchtstroom buigt naar alle richtingen horizontaal af en gecombineerd met de aanzuiging van lucht aan de grond, ontstaat een circulatie als in de figuur is getekend. Een dergelijke gunstige toestand komt in dalen en onderaan hellingen wel voor, maar ontbreekt praktisch in ons vlakke land.

De betere kachels hebben een schoorsteen met een voorziening die voldoende lucht-toevoer garandeert. Meestal zijn ook de lucht- en olietoevoer regelbaar. De verbranding is bij juiste afstelling nagenoeg volkomen en er wordt weinig of geen rook geproduceerd. In beide gevallen heeft elke kachel zijn eigen olievoorraad en bij het meestal noodzakelijke bijvullen betekent dit dat men alle kachels langs moet. Er zijn systemen waarbij centrale voeding wordt toegepast. Deze vindt plaats vanuit een olievat met behulp van een elektrisch of door een dieselmotor aangedreven pomp. De druk bedraagt ongeveer 5 ato. De kachels zijn dan voorzien van branders en de regeling kan binnen bepaalde grenzen via de oliedruk plaats vinden. De kosten zijn hoger dan bij niet centrale voeding. In de eerste plaats zijn branders nodig en voorts een systeem van leidingen.

De kwaliteit van de branders is zeer belangrijk. Zij hebben een kleine opening en bij de eerste typen trad nogal eens verstopping op. Bij de latere typen zou dit zijn verholpen. Bij goed functioneren vindt de verbranding van de olie zonder rook- of roetvorming plaats. Een dergelijk systeem, waarbij het principe van de branders werd gewijzigd, is door Ruijpers en Dahlmans in Limburg ontworpen. De proeven waren veelbelovend.

In het algemeen kan worden gezegd, dat men met kachels elke nachtvorst aan kan, als men maar genoeg kachels plaatst. Hier stelt de economie grenzen, die overigens van gewas tot gewas verschillen.

Ook open vuurtjes kunnen worden gebruikt en in ons land is het o.a. Crombach geweest die met in olie gedrenkte turf resultaten bereikte. De 'installatie' is goedkoop, maar het systeem is bewerkelijk. Een methode die ook met open vuur werkt, is die waarbij paraffinekaarsen worden gebruikt. Een cilindervormige kartonnen bus met een diameter van 20 cm en een hoogte van 25 cm is gevuld met paraffine. De brandduur bedraagt 6-8 uren, maar de roetontwikkeling is vrij sterk. Per hectare wordt een aantal van 300 aanbevolen.

5.6.2 Enkele andere methoden

Elektrische verwarming van de bodem is wel beproefd, maar bleek veel te kostbaar.

Verwarming met gasstralers, dezelfde die wel voor caféterrassen worden gebruikt, werd in Frankrijk gepropageerd. Berekening van het te verwachten effect wettigt de conclusie dat de resultaten niet in een redelijke verhouding tot de hoge kosten staan.

Voor kleine percelen is ook de zogenaamde watermatras aanbevolen. Hierbij worden platte, met water gevulde plastic zakken tussen de rijen gelegd. Overdag warmt het water op en 's nachts wordt die warmte afgegeven.

5.7 Berekening

5.7.1 Principe en geschiedenis

Deze jongste methode is, in de huidige vorm, voor het eerst toegepast in de twintiger jaren van deze eeuw.

Reeds in 1755 werd in Württemberg een prijsvraag uitgeschreven waarbij werd gevraagd naar de gemakkelijkste, beste en goedkoopste methode om een lage wijngaard tegen voorjaarsvorst te beschermen. De prijs werd gewonnen door pastoor J. Höslén, die vond dat begieten met water het beste middel was.

De verklaring van de werking van berekening was aanvankelijk, dat het relatief warme water de planten warm houdt en dat bovendien de gevormde ijslaag de bedreigde plantedelen isoleert en tegen verdere afkoeling beschermt. Men zag overeenkomst met de Eskimohutten van sneeuwblokken, de igloos.

Eerst in 1957 kwam Niemann (ref. 24) met een bevredigende verklaring van het effect van berekening. Hij gaf een volledige fysische verklaring en bracht als eerste naar voren dat het compacte ijs, zoals bij de berekening wordt gevormd, een hoog warmtegeleidingsvermogen heeft. Het warmtegeleidingsvermogen is ongeveer viermaal zo hoog als dat van stilstaand water. De opvatting dat het ijspantser de planten isoleert bleek dus niet juist te zijn.

Het beginsel waarop de berekening berust werd reeds kort behandeld bij de bevroering van plantedelen, maar het wordt hier nog eens uiteen gezet.

Van vrijwel alle stoffen zijn drie aggregatietoestanden bekend, te weten: de vaste, de vloeibare en de gasvormige.

Bij de overgang van vast naar vloeibaar wordt warmte gebruikt, dit is eveneens het geval bij de overgang van vloeibaar naar gasvormig. Deze warmte komt weer vrij bij de overgang in omgekeerde richting. De warmte die vrijkomt bij de overgang van vloeibaar naar vast, heet stollingswarmte en is gelijk aan de smeltingswarmte die nodig is bij de overgang van vast naar vloeibaar.

Het bedrag van de stollingswarmte is voor elke stof anders. Voor water is het, uitgedrukt in de hier gekozen eenheden, 335 Ws per gram (80 cal per gram). Als een gram water van 0 °C overgaat in ijs van die temperatuur komen daarbij dus 335 Ws vrij. Als een gram ijs van 0 °C overgaat in water van die temperatuur zijn daarvoor 335 Ws nodig.

Wanneer aan een mengsel van ijs en water met een temperatuur van 0 °C warmte wordt onttrokken, zal het mengsel willen afkoelen. Doch als water van 0 °C afkoelt, gaat het in ijs over en daarbij komt stollingswarmte vrij. Het resultaat van de warmteonttrekking is dan ook dat het mengsel niet afkoelt, maar meer ijs gaat bevatten. Eerst als al het water in ijs is overgegaan zal de warmteonttrekking de temperatuur doen dalen. Bij warmtetoevoeging verloopt het proces in omgekeerde richting. De toegevoerde warmte zal de temperatuur niet doen stijgen, maar meer

ijs doen smelten en ook in dit geval kan de temperatuur eerst stijgen als al het ijs in water is overgegaan.

Een mengsel van ijs en water zal daardoor steeds een temperatuur van 0°C hebben. Warmteonttrekking zal meer ijs doen ontstaan en warmtetoevoeging meer water.

Deze redenering gaat slechts op als ijs en water innig zijn gemengd. Een blok ijs in een emmer water is geen mengsel.

Het voorgaande geeft ook de mogelijkheid aan, thermometers nauwkeurig op 0°C te ijken. Fijn verdeeld ijs wordt met water gemengd tot een brijachtige massa en een daarin geplaatste thermometer moet 0°C aanwijzen. Vindt men een andere waarde dan wijst dit op een fout van de thermometer. Dergelijke afwijkingen maken het instrument niet onbruikbaar want men weet met welk bedrag men de aanwijzing moet corrigeren om de juiste temperatuur te vinden.

Tijdens beregening bij luchttemperaturen beneden het vriespunt worden de planten met een ijslaag bekleed en dit ijspantser is met een waterlaagje bedekt. Op de grens tussen ijs en water zal een temperatuur van 0°C heersen.

Als gevolg van warmteonttrekking door straling en eventuele verdamping zal de ijslaag aangroeien, maar de temperatuur ervan blijft 0°C . De warmteonttrekking vindt aan de buitenzijde, dus aan het waterlaagje plaats. In figuur 32 is een en ander aanschouwelijk voorgesteld.

5.7.2 Onderbroken sproeien

Op grond van wat hiervoor werd behandeld zou bij de ideale werkwijze een ononderbroken regen van zeer fijne druppels op het gewas en de bodem moeten vallen.

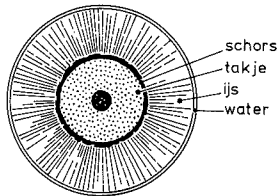


Fig. 32 Dwarsdoorsnede van een takje bedekt met een ijslaag en een dunne waterfilm. De warmteonttrekking vindt plaats aan de waterfilm en daarin zal, als de temperatuur van het water tot het vriespunt is gedaald, ijs ontstaan en wel op de bestaande ijsmantel, die daardoor voortdurend aangroeit. De beregening heeft ten doel te zorgen dat het waterfilmje steeds aanwezig blijft.

Om praktische redenen is dit moeilijk te verwezenlijken. In de eerste plaats vraagt de produktie van een dergelijke regen een installatie met zeer veel sproeiers, want fijne druppels kunnen niet over grote afstanden worden verspoten. In de tweede plaats kunnen fijne druppels slechts met behulp van hoge druk worden gemaakt. Deze beide voorwaarden – veel sproeiers en hoge druk – maken de installatie kostbaar. Ten slotte kunnen, bij lage luchttemperaturen, zeer fijne druppels onderweg reeds bevroren, waardoor het effect verloren gaat. Het algemeen in gebruik zijnde systeem is uitgerust met draaiende sproeiers waarbij de waterdruk de sproeiers met korte tussenpozen over een kleine hoek verplaatst en meestal zo, dat de sproeier in ten hoogste 1 minuut rond is geweest. Het gevolg is dat elke beregende plek tenminste eenmaal per minuut van een waterlaagje wordt voorzien. Dit is bijzonder belangrijk want bij lage temperaturen kunnen bij een langere omlooptijd de planten toch nog bevroren.

De genoemde omlooptijd is op grond van vele proeven aangenomen als veilig. Er is in de tijd nog wel enige speling geoorloofd. Automatische sproeiers zijn geen precisieinstrumenten en de waterdruk zal ook niet altijd en overal gelijk zijn, waardoor de omlooptijd niet exact vastligt.

5.7.3 Aantal sproeiers

Het aantal sproeiers dat nodig is, hangt af van de capaciteit en deze is mede afhankelijk van de waterdruk en van de diameter en de lengte van de leidingen.

Het valt buiten het bestek van deze verhandeling om daaraan uitvoerige beschouwingen te wijden. Om de gedachte te bepalen moet men rekenen met tenminste 20 sproeiers per hectare bij een sproeiopening van 4,2 mm en een bedrijfswaterdruk van 4 ato.

Voor het maken van een plan en een begroting kan men zich het best tot de voorlichtingsdiensten wenden.

5.7.4 Plaatsing van de sproeiers

Een sproeier bestrijkt een cirkel en wil men alle plaatsen bereiken dan zullen de cirkels elkaar moeten overlappen. Men kan de sproeiers in rechthoeks- of in driehoeksverband plaatsen, maar altijd zo dat er geen plaatsen zijn die niet beregend worden.

5.7.5 Hoeveelheid water

Experimenten hebben aangetoond dat met de meeste in gebruik zijnde installaties ongeveer 3 mm per uur moet worden gegeven, dus 30000 liter per ha en per uur. In een gevaarlijke nacht moet men wel eens 10 uren beregenen en dikwijls komen er enkele van die nachten na elkaar. Berekend naar 3 nachten à 10 uren, komt dan 90 mm water op een beregend perceel terecht.

Voor de grond zijn dergelijke hoeveelheden in zo korte tijd meestal ongewenst en daarom wordt wel geadviseerd om percelen die tegen nachtvorst zullen worden beregend, te draineren. De noodzaak daartoe hangt vanzelfsprekend af van de samenstelling van de grond.

5.7.6 *Kwaliteit van het water*

Het ligt voor de hand dat aan het gebruikte water de eis moet worden gesteld dat het geen stoffen mag bevatten die schadelijk zijn voor de planten. Bij de openbare wateren kan men daarvan niet meer zeker zijn. Bronwater kan te veel ijzer of zout bevatten en daarom dient men zich vooraf te verzekeren van de veiligheid van het te gebruiken water. Het best kan men daartoe de voorlichtingsdiensten inschakelen.

5.7.7 *Ander gebruik van de installatie*

Onze voorjaren zijn gemiddeld droog en dikwijls is er watergebrek juist in de tijd van de snelste groei. Het voordeel van een regeninstallatie tegen nachtvorst is, dat deze ook in een droge tijd kan worden gebruikt voor het geven van water. Men doet er goed aan, dit voordeel, dat bij het ene bedrijf veel meer betekent dan bij het andere, bij de kostenbegroting in rekening te brengen.

Men kan ook bestrijdingsmiddelen via de regeninstallatie verspuiten.

5.7.8 *Enkele andere belangrijke zaken*

Een belangrijke vraag is, bij welke luchttemperatuur moet men met beregenen beginnen.

In een aantal gevallen waarin de berekening tot ernstige teleurstelling leidde, was men te laat begonnen. Omdat er geen gevallen bekend zijn waarbij een te vroeg beginnen schadelijk was, zou men als regel kunnen stellen dat moet worden begonnen als men de toestand ook maar enigszins verdacht vindt, maar omdat onnodige bedrijfsuren verspilling betekenen, kan men niet zo eenvoudig te werk gaan.

Een goede regel is, dat men moet beginnen als de temperatuur van de planten tot het vriespunt is gedaald. De grote moeilijkheid is echter dat die temperatuur niet eenvoudig met in de praktijk bruikbare middelen is te bepalen.

In Frankrijk gebruikt men veel de 'indice actinothermique', dat is de aanwijzing van een onbeschermd in het open veld op 40 cm hoogte horizontaal opgestelde thermometer. Als deze -2°C aanwijst, moet men beginnen. Dit kan een veilige methode worden geacht.

Meestal zal men over een normale thermometeropstelling beschikken, d.w.z. een thermometer op 1,5 m hoogte in een kleine hut. Als deze thermometer $+1,0^{\circ}\text{C}$ aanwijst, wordt het tijd een beslissing te nemen.

Met opzet wordt hier niet geschreven, dat het dan tijd wordt te beginnen. Bij de

beslissing om al of niet te beginnen dient men niet alleen op de temperatuur af te gaan, maar ook op het gezonde verstand. Voorbeelden kunnen duidelijk maken wat wordt bedoeld.

Als men een uur voor zonsopgang constateert dat de thermometer in de hut $+1,0^{\circ}\text{C}$ aanwijst, dan heeft het geen zin meer, te beginnen. Als dit reeds in de avond het geval is, bij helder en windstil weer, is het raadzaam actief te worden.

Nu wordt gemakkelijk gesproken over het in de gaten houden van de temperatuur, maar als regel zal men slapen. Het advies om op te blijven als er kans op nachtvorst bestaat, is niet praktisch.

De oplossing werd gevonden in het gebruik van een nachtvorstthermometer of nachtvorstmelder. Dit is een thermometer die, als de temperatuur beneden een van te voren ingestelde waarde daalt, een bel in werking stelt.

Een andere vraag is, wanneer men in de ochtend met beregenen kan stoppen. Wordt de installatie te vroeg stopgezet dan kan nog grote schade optreden. Een goede regel is, op te houden als men ziet dat het ijs van de planten begint los te laten. Dit is soms enkele uren na zonsopgang het geval.

5.7.9 *De bedrijfszekerheid*

Er kan nauwelijks genoeg de nadruk op worden gelegd dat een regeninstallatie bedrijfszeker moet zijn. Als de installatie uitvalt is de schade aan een beregend perceel meestal veel groter dan aan een perceel dat niet werd beregend.

De bedrijfszekerheid eist dat men liefst enkele weken voor het seizoen begint, de installatie enkele uren moet laten werken. Eventuele gebreken zullen dan tevoorschijn komen en nog kunnen worden verholpen. Dit verhelpen moet men zoveel mogelijk zelf kunnen doen, want bij een storing in de nacht heeft men ook niet onmiddellijk een vakman bij de hand. Voor dit zelf doen is uiteraard goed gereedschap nodig. De tijd waarin men slechts beschikte over een vastgeroeste verstelbare sleutel en een waterpomptang is waarschijnlijk wel achter de rug.

Een of meer waterdichte pakken – oliejasen – en zuidwesters zijn onmisbaar want als er bij een in bedrijf zijnde installatie ergens een sproeier hapert, moet er iemand heen.

Een paar goede zaklampen zijn eveneens noodzakelijk.

5.8 **De beste methode**

De vraag, welke methoden of middelen voor Nederlandse omstandigheden het meest in aanmerking komen, kan moeilijk worden vermeden en in het volgende zal worden getracht een globaal antwoord te geven.

Onderscheid dient te worden gemaakt tussen kostbare en minder kostbare gewassen

al naar de waarde die deze per eenheid van oppervlakte vertegenwoordigen.

Als voorbeeld van een minder kostbaar en zeer nachtvorstgevoelig gewas kan men de aardappel kiezen. Als dat van een kostbaar gewas, een of ander tuinbouw- of bloemisterijgewas. De fruitgewassen nemen een tussenpositie in.

Voor de minder kostbare gewassen komt in de eerste plaats een verstandige bodembehandeling in aanmerking. Beregening en verwarming zijn in het algemeen te duur.

Bij kostbare gewassen en ook bij die in particuliere tuinen waar een gewas, hetzij een siergewas hetzij een eetbaar gewas, geheel anders gewaardeerd wordt dan op bedrijven, kan men beregening, verwarming of bedekking toepassen.

Bij fruitgewassen zullen beregening en verwarming nog economisch verantwoord zijn, maar een verstandige bodembehandeling, die weinig of niets kost mag niet achterwege blijven. In niet te ernstige gevallen kan deze juist voldoende zijn om een gewas niet te doen bevriezen of de schade beperkt te houden.

In de meeste gevallen zal men voor de keuze worden gesteld, of een beregeningsinstallatie of kachels aan te schaffen. Bij een beregeningsinstallatie heeft men een pomp nodig en een motor die deze aandrijft. Voor dit laatste is meestal een trekker beschikbaar.

Een andere zaak is het water. Als van open water gebruik kan en mag worden gemaakt, moet een filterinrichting worden gebouwd om te voorkomen dat de sproeiers door vuildeeltjes verstopt raken. Is er geen open water van geschikte kwaliteit dan zal een bron moeten worden geslagen die, afhankelijk van de plaatselijke gesteldheid, meer of minder kost. Tegenover deze uitgaven staat het voordeel dat ook tegen droogte kan worden berekend. Hoe zwaar dit voordeel weegt zal van bedrijf tot bedrijf verschillen.

Het installeren van kachels is goedkoper, maar deze kunnen uiteraard alleen tegen nachtvorst worden gebruikt.

Voor inlichtingen over kosten, zowel die van aanschaffing als die per bedrijfsuur kan men zich het best tot de voorlichtingsdiensten wenden.

6 Referenties

6.1 Lijst van Nederlandse publikaties over onderzoek op het gebied van de nachtvorst

1 *Woudenberg, Dr. P, J, M,*

Mededelingen van de Directeur Tuinbouw 14, 1951. 7 pp.

Nachtvorst en nachtvorstbestrijding in Kennemerland.

Tuinbouwveilingen, de tuinbouwvoorlichtingsdienst en het K.N.M.I. werkten in 1950 en 1951 samen in een systeem van nachtvorstwaarschuwingen ten behoeve van de aardbeientelers in Kennemerland. Tevens werden bedekkingsmaterialen vergeleken en wel plastic, rechtstreeks aangebracht, plastic op ijzerdraad, sisalkraftpapier en crêpe-jute. Er was geen verschil in effect tussen de diverse materialen.

2 *Woudenberg, Dr. J, P, M,*

Verslagen K.N.M.I. RIII - 169 - 1956. 12 pp.

Bescherming van gewassen tegen nachtvorst.

In de voorjaren van 1951, 1952, 1954 en 1955 werden aanvankelijk te Heemskerk en later te De Bilt, plasticdoek, sisalkraftpapier en crêpe-jute vergeleken bij het gewas aardbeien. Er was geen duidelijk verschil tussen de materialen, maar plasticdoek bleek het gemakkelijkst in het gebruik. Het materiaal dient zonder ondersteuning over het gewas te worden aangebracht.

Wat het temperatuureffect aangaat; het bleek dat in gevaarlijke nachten door bedekking een temperatuurverschil van 4 °C met het onbedekte gewas kon worden bereikt.

3 *Scharringa, M,*

Verslagen K.N.M.I. V-1. 21 pp. 1956.

Een onderzoek naar het gedrag van de minimumtemperatuur op 10 cm hoogte boven een kort gehouden grasmat, in stralingsnachten, op het proefsterrein te De Bilt.

Uit schadebeelden na het optreden van een nachtvorst was twijfel gerezen ten aanzien van de representativiteit van temperatuurmetingen op 10 cm hoogte. Om van die representativiteit een indruk te verkrijgen werden op een, op het oog homogeen, stuk grasland van 10 × 10 m dat een onderdeel vormde van een veel groter grasoppervlak, 36 minimumthermometers uitgezet in vierkantsverband op afstanden van 2 m.

Verscheidene malen werd gevonden dat de aldus gemeten minimumtemperaturen in dezelfde nacht meer dan 2 °C verschilden.

Uit vergelijkingen tussen de minimumtemperaturen gemeten in de officiële waarnemingshut op 2,20 m hoogte en de laagste minimumtemperatuur op 10 cm hoogte bleek, dat in echte stralingsnachten het minimum op 10 cm in veel gevallen meer dan 6 °C lager was dan dat op 2,20 m. Een extreem geval, 20 april 1956, vertoonde een verschil van 8,6 °C.

4 *Scharringa, M.*

Hemel en Dampkring. 1957. pp 186-190.

Oorzaak van de schade door nachtvorst in de nacht van 15 op 16 juni 1956.

In de nacht van 15 op 16 juni 1956 was in het noordoosten van het land op uitgebreide schaal nachtvorstschade aan aardappelen waargenomen. In het artikel worden enkele gevallen van het niet optreden van schade op bepaalde percelen genoemd, die duidelijk aan de toestand van de grond moesten worden toegeschreven.

5 *Scharringa, M.*

Verslagen K.N.M.I. V-33. 1958. 52 pp.

Een vergelijkend onderzoek naar het optreden van lucht- en grondtemperaturen in zuidoost Drenthe in 1957.

Op een perceel dalgrond te Klazienaveen en een perceel hoogveen te Schoonebeek werden de metingen uitgevoerd, met behulp van thermokoppels aangesloten op recorders.

De belangrijkste conclusies waartoe de uitkomsten aanleiding gaven, waren:

Slecht warmtegeleidende gronden geven des nachts aanleiding tot lage luchttemperaturen nabij het aardoppervlak, doch ook tot lage minima op de normale waarnemingshoogte.

In slecht warmtegeleidende gronden kunnen zeer grote verticale temperatuurgradienten in de bovenste centimeters optreden. Zo was te Schoonebeek het verschil tussen de temperatuur van het oppervlaktelaagje ter dikte van enkele millimeters en die op een diepte van 3 cm, in de nacht meermalen 11 °C.

6 *Scharringa, M.*

Mededelingen Directeur Tuinbouw, juni 1958. 6 pp.

Nachtvorst, bodem en begroeiing.

Beschrijvingen van de warmtebalans van het aardoppervlak met enkele berekeningen van de nachtelijke afkoeling.

7 *Scharringa, M.*

Verslagen K.N.M.I. V-41. 1958. 9 pp.

Een onderzoek naar de minimumtemperaturen op 10 cm hoogte in enkele, als nachtvorstgevoelig bekend staande, gebieden in Nederland.

In het tijdvak van 22 april tot en met 28 juni 1958 werden tijdelijke stations ingericht waar met behulp van 3 minimumthermometers de minimumtemperaturen op 10 cm hoogte werden gemeten.

Het koudst bleek het station Wijtre te zijn, hetgeen wordt toegeschreven aan de ligging op de bodem van het Geuldal. Ook het station Terschelling bleek zeer koud als gevolg van de structuur van de lage begroeiing die de warmtelevering uit de bodem belemmerde.

8 *de Zeeuw, Ir. J.*

Meded. 38 - sep. 1958 - van het Instituut voor Tuinbouwtechniek. 5 pp.

Mogelijkheden van nachtvorstwering.

Op de ontwikkelingsdag voor Tuinbouwtechniek op 16 januari 1958 te Wageningen werden de belangrijkste nachtvorstbestrijdingsmethoden kort behandeld.

9 *Scharringa, M.*

Verslagen K.N.M.I. V-59.

Een onderzoek naar de nachtelijke minimumtemperaturen op 10 cm hoogte boven verschillende bodemoppervlakten te De Bilt (1958).

Van december 1957 tot en met november 1958 werden minimumtemperaturen gemeten boven

verschillende bodemoppervlakten, n.l. een grasmat, een grindlaag, een onbegroeide zandgrond die met een rol was aangedrukt en een dito grond met losgemaakte bovenlaag. De belangrijkste conclusie is, dat het in een stralingsnacht boven gras kouder was dan boven dezelfde grond in onbegroeide toestand. Op deze regel kwamen geen uitzonderingen voor. In enkele nachten bedroeg het verschil ongeveer 5 °C.

10 *Scharringa. M.*

Nederlands Bosbouwkundig Tijdschrift. sep. 1961. 3 pp.

De nachtvorsten van 28 en 29 mei 1961.

In de nachten van 27 op 28 en van 28 op 29 mei 1961 kwam ten noorden van de grote rivieren op veel plaatsen nachtvorst voor. Ernstige schade deed zich voor op de Veluwe aan het jonge lot van verscheidene boomsoorten waaronder ook sommige waaraan niet eerder nachtvorstschade was waargenomen.

11 *Felius. Ir. P. M., en Scharringa. M.*

Mededelingen Directeur Tuinbouw feb. 1962. 5 pp.

De nachtvorst in mei 1961 en de schade aan de fruitteelt in de Noordoostpolder.

Een nachtvorst met zeer ernstige schade aan de jonge vruchten op de fruitteeltbedrijven in de Noordoostpolder.

Er waren frappante verschillen tussen percelen met zwarte grond en die met gras. Voorts was er een zeer duidelijke invloed van de afscherming door de windsingels; de schade nam toe met de afstand tot een windscherm.

12 *Los. Dra. G. J., en Scharringa. M.*

Nota aan de studiec commissie nachtvorst.

Enkele beschouwingen naar aanleiding van een demonstratie met nachtvorstkachels op 17 november 1961 op het bedrijf van L. Ruijpers te Walem (L).

Gedemonstreerd werd met kachels, die met olie werden gestookt en die centraal werden gevoerd. Het systeem werd ontwikkeld door de heren L. Ruijpers en H. W. Dahlmans. De resultaten waren hoopgevend.

13 *Scharringa. M.*

Mededelingen Directeur Tuinbouw. april 1961. 4 pp.

Berekening over nachtvorstwering in de fruitteelt.

Berekeningen van het warmteverlies per uur en per hectare van een boomgaard in een stralingsnacht, werden gebruikt als basis voor de geschatte uitwerking van beregening tegen nachtvorst. Het blijkt dat de gebruikelijke 3 mm per uur aanzienlijk uitgaat boven de hoeveelheid die, bij een rendement van 80 %, zelfs in de ernstige gevallen nodig is. Het probleem ligt echter vooral op het terrein der techniek.

Nachtvorstwering door verwarming is veel minder gunstig omdat de directe verwarming van de lucht weinig zin heeft daar de verwarmde lucht snel naar boven ontwijkt. Bij verwarming zal men het hoofdzakelijk van de stralingswarmte moeten hebben.

14 *Scharringa. M.*

Verslagen K.N.M.I. V-121.

Voortgezet onderzoek naar de nachtelijke minimumtemperaturen op 10 cm hoogte boven verschillende bodemoppervlakken te De Bilt (1959).

Het in 1958 begonnen onderzoek – zie 8 – werd in 1959 voortgezet. De zomer van 1959 was extreem droog en als gevolg daarvan had de grasmat sterk isolerende eigenschappen waardoor de verschillen tussen de minimumtemperaturen boven zwarte grond en die boven gras groter wa-

ren dan in 1958. Gemiddeld over 23 stralingsnachten bleek het boven gras 3 °C kouder te zijn dan boven zwarte grond.

15 *Scharringa. M.*

Verslag van een op het K.N.M.I. gehouden colloquium op 9 dec. 1958.

Nachtvorstschade in Cranberrycultuur op Terschelling en beschouwingen over de invloed van beschutting op de afkoeling.

Gebleden is, dat zelfs bij zeewatertemperaturen van 14 °C, nachtvorstschade aan de cranberries kan worden waargenomen.

Over de invloed van beschutting op de omvang van de netto-straling werden berekeningen gemaakt.

16 *de Boer. Dr. H. J.*

Verslagen K.N.M.I. W.R. 64-1. 23 pp.

Over de nachtvorstwerende eigenschap van water, waterdamp en waterdruppels van verschillende grootte.

Berekeningen van de doorlaatbaarheid van een atmosferische laag waarin waterdruppels zweven, voor de door de aarde uitgezonden langgolvlige straling, leidde tot de conclusie dat deze doorlaatbaarheid praktisch verdwijnt als voldoende waterdruppels van geringe afmetingen aanwezig zijn. Een laag van 20 m dikte is dan voldoende om de langgolvlige straling geheel te absorberen.

17 *Scharringa. M.*

Verslagen K.N.M.I. V-158.

Temperatuurmetingen aan een jonge vrucht van de peer in 1963.

Met gebruikmaking van wind-, temperatuur- en stralingsgegevens werd de temperatuur van een peertje met een lengte van 2,5 cm en een doorsnede van 1,2 cm, berekend. De uitkomsten bij zonnig weer en zwakke wind gaven waarden die ongeveer 5 °C boven de luchttemperatuur op hetzelfde niveau liggen. Bij heldere hemel en windstilte in de nacht werden temperaturen berekend die ongeveer 2 °C beneden de luchttemperatuur liggen.

Metingen onder de genoemde omstandigheden bevestigden de orde van grootte van deze verschillen.

18 *Scharringa. M.*

Verslagen K.N.M.I. (zonder nummer)

Calculations on the effect of heaters of the 'Brillois Schwank' type for protection against frost.

Het stralingseffect van een in Frankrijk gepropageerde methode van nachtvorstwering met behulp van propaan gasstralers, werd berekend. Het effect moet in verhouding tot de hoge kosten onvoldoende worden geacht. Voor zeer kostbare gewassen ligt de verhouding kosten/baten gunstiger.

19 *Scharringa. M.*

Verslag van een voordracht ter gelegenheid van de 'Réunion des Trois Pays' te Versailles op 8 en 9 sep. 1965. Phytoma, Défense des Cultures Decembre 1965.

Sur l'importance du sol dans le bilan énergétique et le microclimat en nuits claires et calmes.

De invloed van de bodemtoestand op het nachtvorstgevaar wordt hierin uiteengezet.

20 *De Vries. Ir. H. C. P., Bosch. A., en Dahlmans. H. W.*

Publikatie no. 18 van het Instituut voor Tuinbouwtechniek te Wageningen.

Nachtvorstwering met behulp van Texaco Paraffinekaarsen te Sittard gedurende het voorjaar 1976.

Verslag van een proef te Sittard. Bij gebruik van 200 kaarsen per ha bleek bij de proef de tem-

peratuurwinst 0,75–1,5 °C, gemeten op een hoogte van 40 cm, te bedragen. Schrijvers kwamen tot de conclusie dat 300 kaarsen per ha gewenst zijn.

21 *Woudenberg. Dr. J, P, M, en de Jong – van Meeterén. E, M,*
Verslagen K.N.M.I. V–192.

Metingen van de minimumtemperatuur op 10 cm hoogte in de voorjaarsmaanden van 1957 en 1959 tot en met 1964 in het Westland en De Kring.

Er kon o.a. worden aangetoond dat gemiddeld over de in de titel genoemde jaren de minimumtemperaturen in het Westland met zijn vele glasopstanden hoger waren dan die in De Kring waar de glasbedrijven wat meer verspreid liggen en bovendien in de nabijheid van grote graslandpercelen zijn gelegen.

22 *Scharringa. M,*

Proceedings of the Regional Training Seminar on Agrometeorology 13–25 May 1968 at Wageningen.

Calculations of temperatures in an orchard.

Verslag van een voordracht waarin voornamelijk wordt behandeld hetgeen voorkomt in ref. 17.

23 *Woudenberg. Dr. J, P, M,*

Verslagen K.N.M.I. W.R. 68–1. 210 pp.

Nachtvorst in Nederland.

Van de vele conclusies is er één, gebaseerd op waarnemingen vanaf 1916 te De Bilt, n.l. dat geen aanwijzing kon worden gevonden voor een IJsheiligen periode (11 t/m 13 mei) en voorts dat de De Bilt de kans op een minimumtemperatuur beneden het vriespunt voor een april dag 29 % en voor een meidag 12 % bedraagt.

6.2 Overige geraadpleegde literatuur

24 *Schnelle. Dr. Fritz, e.a.*

Frostschutz im Pflanzenbau

Quellenwerk über den Nachtfrost, seine Entstehung, Vorhersage und Abwehr. 2 Bände 1090 pp. (BLV Verlagsgesellschaft München, Basel, Wien 1963.)

Het standaardwerk over nachtvorst. Het meest volledige werk waarin het ontstaan, de verwachtingstechniek en de nachtvorstwering worden behandeld. Een deel is gewijd aan de historisch berucht geworden gevallen in West-Europa.

25 *Klimaatatlas van Nederland*

K.N.M.I. Staatsuitgeverij 's Gravenhage 1972.

34 dubbele pagina's met kaarten. Losse toelichting in Nederlands en Engels.

26 *Heuvel. Willem, Hendrik,*

Kluwer Deventer 1927 en 1946.

Oud-Achterhoeks Boerenleven, het gehele jaar rond. 315 pp.

Beschrijving van een jeugd, doorgebracht op de boerderij 'De Blaauwhand' te Oolde bij Laren (G).

27 *De Vries. D, A,*

Dissertatie Wageningen 1952

Het warmtegeleidingsvermogen van grond.

Een theoretische behandeling van het warmtegeleidingsvermogen van grond en een beschrijving van de apparatuur om het geleidingsvermogen te meten.

7 Nachtvorst in kleur

Opnamen van de schrijver

7.1 Noten bij de illustraties van dit hoofdstuk

Plaat no. 1. Links van de greppel, aardappelen op een perceel dat in de herfst was geploegd. Op het perceel rechts een strook die laat in het voorjaar werd geploegd, met daardoor ernstige vorstschade.

Plaat no. 2. Een nachtvorst in de tweede helft van juni kan een aardappelgewas praktisch vernietigen.

Plaat no. 3. Een zandontginning die enigszins onregelmatig van samenstelling was. De bodemverschillen gaven aanleiding tot grote verschillen in temperatuur die oorzaak waren dat binnen hetzelfde perceel de vorstschade varieerde van zware schade tot geen schade.

Plaat no. 4. Het verschil in samenstelling tussen de beide percelen – voorgrond en achtergrond gaf op deze veenkoloniale grond aanleiding tot een belangrijk verschil in temperatuur.

Plaat no. 5. Rechts aardappelen op onvergraven hoogveen. De planten zijn tot het oppervlak afgevroren. Links vergraven hoogveen, met zand gemengd. Hier is nauwelijks schade met uitzondering van enkele rijen langs het onvergraven gedeelte, die als gevolg van het afvloeien van koude lucht bevroren.

Plaat no. 6. Aardappelperceel waarop in het voorjaar van 1957 meetapparatuur stond opgesteld. Het patroon van de niet bevroren – groene – gedeelten laat zien waar de meetopstelling was geplaatst. Achteraan stond de recorder opgesteld en naar deze recorder was een kabel gelegd voor aanvoer van netspanning. Om de kabel niet te beschadigen werd bij de oppervlakkige groundbewerking telkens vóór de kabel gekeerd zodat er gedeelten overbleven die niet waren losgemaakt. De nachtvorst van 24 op 25 juni bracht deze voorgeschiedenis aan het licht.

Plaat no. 7. In het midden een aardappelperceel dat aan de voorzijde en links en rechts door gras wordt begrensd. Aan de achterzijde grenst het aan onbegroeide grond. De lucht boven het gras koelde in de nacht van 14 op 15 juli 1959 af tot $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en deze koude lucht overstroomde het aardappelveld. De gevolgen zijn duidelijk zichtbaar.

Plaat no. 8. Een aardappelperceel grenzende aan een havergewas. Het dichte gewas haver heeft een soortgelijk effect als een grasmat. De koude lucht die boven de haver ontstond is over de aardappelen gevloeid.

Plaat no. 9. Vorstschade aan een Douglas (Pseudotsuga Douglasii). De jonge loten van de onderste etage zijn alle gedood, die aan de volgende gedeeltelijk en de top vertoont geen vorstschade. Het schadebeeld is in overeenstemming met het temperatuursverloop in een grondinversie.

Plaat no. 10. Abië's koreënsis. Een zeer langzaam groeiende conifeer. Aan deze boom die tenminste 40 jaren oud was, was niet eerder vorstschade waargenomen. De jonge loten waren in 1961 door nachtvorst gedood. Van de rechtopstaande kegels waren de toppen bevroren. Het zijn juist de naar het hemelgewelf gerichte delen van de kegels die de grootste stralingsverliezen leden.

Plaat no. 11. Beeld van een bloeiende peer tijdens beregening tegen nachtvorst. Elk deel – zie meeldraden – is met een ijslaagje bedekt.

Plaat no. 12. Doorsneden van jonge vruchten van appel en peer, met schade ontstaan tijdens de nachtvorst van 27 op 28 mei 1961. Zij zijn gerangschikt van links naar rechts en van boven naar beneden volgens toenemende ernst van de beschadiging. Het schijfje links boven is dat van een gave vrucht.

Plaat no. 13. Wat er gebeurt als de regeninstallatie defect raakt. Op de voorgrond bomen die *niet* werden beregend. Op de achtergrond bomen die werden beregend, waarbij in de loop van de nacht de installatie defect raakte. Het middel was hier duidelijk erger dan de kwaal. Men lette ook op de Ridderzuring die een soortgelijk verschil te zien geeft.

Plaat no. 14. Op enkele honderden meters van het strand bevroren in de nacht van 14 op 15 juni 1958 de struikheide en de kraaiheide. Van beide plantesoorten werd een niet bevroren takje neergezet om het verschil met de bevroren planten te tonen.

Plaat no. 15. Perceel op een bedrijf waar op de gewone wijze, door middel van oppervlakkige grondbewerking, het onkruid werd bestreden. Er was ernstige vorstschade.

Plaat no. 16. Perceel op hetzelfde bedrijf als 15. Hier werd chemische onkruidbestrijding toegepast en de grond nadien niet bewerkt. Er is geen vorstschade te zien.



1. *Barger Compascuüm. 15 juni 1957*



2. *Oranjedorp. (Dr.) 26 juni 1957*



3. *Nieuw Amsterdam. 25 juni 1957*



4. *Zwartemeer. (Dr.) 25 juni 1957*



5. *Nieuw Schoonebeek, 13 juni 1957*



6. *Klazienaveen, 26 juni 1957*



7. *De Bilt*. 15 juli 1959



8. *Zwartemeer*. 25 juni 1957



9. *Putten (G). De Schovenhorst 28 mei 1961*



10. *Putten (G). De Schovenhorst 28 mei 1961*



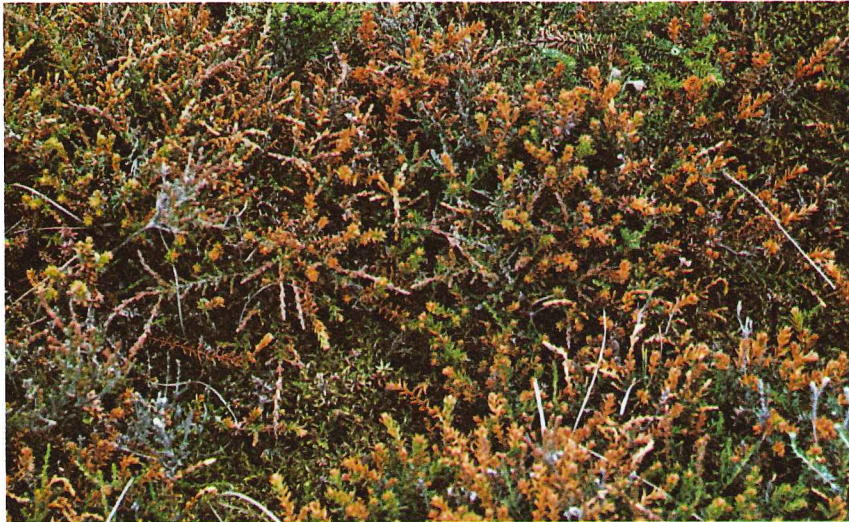
11. *De Bilt*, mei 1957



12. *Omgeving De Bilt*, mei 1961



13. *Limburg.*



14. *Terschelling. 15 juni 1958*



15. *Valthermond. 3 juni*



16. *Valthermond. 3 juni*

8 Register

A

absolute temperatuur 19
absorptie 26
– *coëfficiënt* 28
afharding 44
Ångströmeenheden 18
arbeid 11
– , *eenheid van* 11, 13
arbeidsvermogen 12
– , *eenheid van* 12, 13
– , *mechanisch* 12
– , *elektrisch* 12
– , *chemisch* 12
– , *thermisch* 12
arbeidswaarde van calorie 13
atmosferische tegenstraling 29
auto 12

B

bedrijfszekerheid 82
berekening, tijdstip van beginnen 81
bevriezingsdood van planten 44
bewolking, invloed van 39
bodembehandeling 59
bovenveen 59

C

calorie 13
– , *kilo* 13
– , *arbeidswaarde van* 13
cel 44
celvocht 44
– , *concentratie van het* 47
celsiuschaal 19
condenswater 65
convectie 14
– *stroming* 14
cranberries, vorstschade bij 51

D

dauw 35

E

elektriciteit 77
emissie 20
– *coëfficiënt* 20
energie 12
– , *eenheid van* 12, 13
– , *elektrische* 12
– , *mechanische* 12
– , *thermische* 12

F

filterinrichting 83

G

gassen in de atmosfeer 24
– , *stralingseigenschappen van* 24
gasstralers 77
geleiding van warmte 14
geluid 17
globale straling 28
glasdek, beschermende werking van een
62
golflengte 17
– *eenheden* 18
grasmat 35
Grasfrost 60
groei-regulatoren 58
groei-eizoenen 52

H

helikopter 73
helling, afstromen van koude lucht
langs een 41
– , *invloed van een* 41
– , *netto-straling van een* 41

I

inversie 37
– *laag* 38
– , *grond-* 38

J

Joule 11

K

kachel 74
Kelvin 19
– *graden* 19
kilocalorie 13
kilogrammeter 11
kiloWattuur 13
klei, warmtegeleiding van 16
koncaaf 43
konvex 43
koolzuurgas 24
kosmische straling 18
kunststof 63

L

lichtstraling 18

M

menging van lucht 72
metaal, bedekking met 65
mist 72

N

nachtvorstmelder 82
– *thermometer* 82
nanometer 18
netto-straling 33
Newton 11
Newtonmeter 11

O

obstakels, de invloed van 40
olienevel 72
onderkoeling 46
onkruidbestrijding, chemische 60
oppervlaktelaagje 20
ozon 24

P

paardekracht 12
paraffinekaarsen 77
parthenocarpie 59
plastic 63
polyvinylchloride 65
polyaethyleen 65
porienvolume van de grond 16
protoplasma 44

R

radiogolven 18
reflektie 26
Röntgenstralen 18
rook 70

S

schuim 65
smeltingswarmte 78
sneeuw, kunstmatige 66
soortelijke warmte 33
specifieke warmte 33
Stephan-Boltzmann, wet van 19
stikstof 24

stollingswarmte 47
straling 17
 – , *elektromagnetische* 17
 – , *licht* 18
straling, kort- en langgolvlige 19
 – , *globale* 28
 – , *netto-* 33
 – , *ultraviolette* 19
 – *van gassen* 20
stralingshuishouding van de bodem 28

T

tegenstraling, atmosferische 29, 70
thermometers, ijking van 79
transmissie 24
tropen 48

U

ultraviolette straling 19
uitstraling 20

V

ventilatie 72
verstrooiing 25
voorvrucht, invloed van de 60
vorstgevoeligheid 44
vorstzakken 43

W

warmte 13
warmtegeleidingsvermogen 14
 – *van diverse stoffen* 15

– van grond 16
Warmtehuishouding van de bodem 28
warmte, soortelijke 33
– , specifieke 33
– capaciteit 33
– stroom 32
waterdamp 24
watermatras 77
Watt 12
Watt-secunde 13
Wien, verschuivingswet van 23
wind, de invloed van de 38
windsingel 69
wrijving 38

IJ

IJsheiligen 53
ijken van thermometers 79

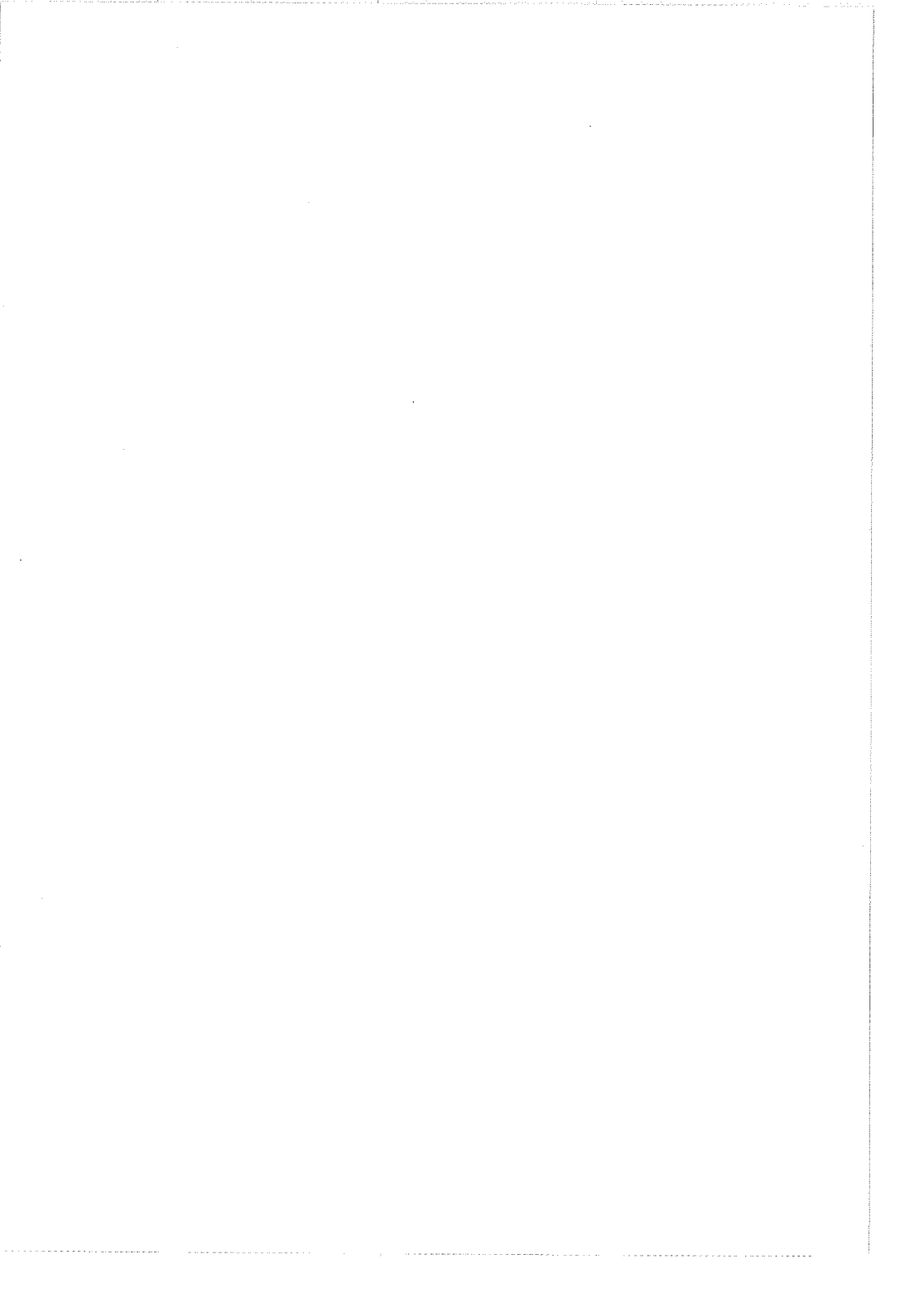
Z

zand, warmtegeleidingsvermogen van
16
zuurstof 24
zwaartekracht 11

Colophon

Vormgeving: Staatsdrukkerij (Gérard Bouwman)

Zetwerk, druk en bindwerk: Wolters-Noordhoff Grafische Bedrijven bv – Groningen



525060*—167