

**MEDEDELINGEN LANDBOUWHOGESCHOOL
WAGENINGEN • NEDERLAND • 67-4 (1967)**

NACHTVORST EN MICROKLIMAAT

In het bijzonder in jonge bosaanplant

T. SCHNEIDER

*Afdeling Natuur- en Weerkunde,
Landbouwhogeschool, Wageningen, Nederland*

(Ontvangen 23-I-1967)

Mededelingen Landbouwhogeschool,
Wageningen 67-4 (1967)
is ook gepubliceerd als proefschrift

INHOUD

1. INLEIDING	1
1.1. Doel van het onderzoek	1
1.2. Definities	1
1.3. Proefterreinen	3
1.4. Metingen en instrumenten	4
2. NACHTELIJKE ENERGIEBALANS NABIJ HET AARDOPPERVLAK	6
2.1. Termen van de energiebalans	6
2.2. De langgolvlige straling	7
<i>Metingen</i>	10
2.3. De warmtestroom in de bodem	13
<i>Metingen</i>	17
2.4. De warmteuitwisseling in de onderste luchtlagen	20
<i>Metingen</i>	21
2.5. De latente warmteuitwisseling	24
<i>Verdamping, dauw en rijp</i>	25
2.6. De warmtestroom door de stofwisseling	26
3. TURBULENTIE EN STABILITEIT IN VERBAND MET DE WIND- EN TEMPERATUURPROFIELEN NABIJ HET AARDOPPERVLAK	27
3.1. Convectorie in de onderste luchtlagen	27
3.1.1. Transportverschijnselen	27
3.1.2. Turbulent transport	27
3.1.3. De neutrale toestand	28
3.1.4. Toestand van stabiel en onstabiel evenwicht	29
3.2. Wind- en temperatuurprofielen	30
3.2.1. Algemene theorie	30
3.2.2. Het windprofiel bij stabiel evenwicht	31
3.2.3. Gemeten en berekende wind- en temperatuurprofielen	33
3.2.4. Stabiliteitsparameter en profielvormfactor	40
3.3. Discussie van de resultaten	44
4. VORSTSCHADE EN VORSTRESISTENTIE	47
4.1. Vorstschade en schade door uitdroging	47
4.2. Vorstschade aan de planten	47
4.2.1. Het temperatuurverloop in de plant tijdens bevrozing	47
4.2.2. Verschijnselen in de levende planten tijdens bevrozing	48
4.3. Belangrijke factoren in verband met vorstresistentie	49
4.4. Verandering van vorstresistentie	50
<i>De temperatuur</i>	50
<i>Straling</i>	51
<i>Watervoorziening</i>	51
<i>Voeding</i>	51
4.5. De mate van vorstresistentie	52
5. BESCHERMING TEGEN NACHTVORST	54
5.1. Biologische methoden	54
5.1.1. Soortenkeuze	54
5.1.2. Plantenteelt	54
5.1.3. Bijzondere middelen	54
5.1.4. Groeivertragers	55

5.2. Cultuurmaatregelen (passieve methoden)	57
5.2.1. Keuze van het terrein bij een nieuwe beplanting	57
5.2.2. Bodembedekking	57
5.2.3. Doorstroming van koude lucht	57
5.2.4. Schoonhouden van de grond	57
5.3. Actieve methoden	58
5.3.1. Bedekking	59
5.3.2. Nevel- en rookschermen	59
5.3.3. Infrarood apparatuur	60
5.3.4. Verwarming	61
5.3.5. Beregening (besproeiing)	62
5.3.6. Ventilatie (windmachines)	63
5.4. Nachtvorstbestrijdingsmethoden in de bosbouw	64
<i>Metingen Smilde</i>	66
<i>Metingen Emmen</i>	67
SAMENVATTING	73
SUMMARY	76
LITERATUUR	79

1. INLEIDING

1.1. DOEL VAN HET ONDERZOEK

Schade door vorst is in de land- en bosbouw een veelvuldig optredend verschijnsel. De kosten verbonden met het herstellen van de aangerichte schade of de verliezen tengevolge van het verloren gaan van de oogst kunnen zeer hoog zijn. Veel van deze schade kan voorkomen worden. In sommige gevallen is de beste werkwijze de beschermingsmaatregelen te nemen lange tijd voordat de vorst kan optreden (passieve bestrijding). In andere gevallen worden maatregelen aangewend op het moment dat er vorst optreedt (actieve bestrijding).

Dat reeds lange tijd methoden zijn aanbevolen om de schade door vorst te voorkomen, blijkt uit het advies dat Plinius de oudere in zijn *Natuurlijke Historie* (A.D. 77) aan de wijngaardeniers gaf: 'maak vuren van snoeiafval of uitgetrokken onkruid; de rook zal fungeren als een goede beschermer'. Terwijl Plinius de rook als hulpmiddel beschouwde, weten we bijna 2000 jaar later dat de beschermende werking voor het grootste deel het gevolg is van de warmteafgifte door de vuren. VIA RAVENTOS (1915) die deze geschriften van Plinius noemt, vermeldt eveneens dat kunstmatige wolken ter bescherming tegen vorstschade voor het eerst gebruikt werden in Beieren in 1791 en in Avignon in 1860.

Het doel van het onderzoek is nu na te gaan of enkele methoden ter voorkoming van schade door nachtvorst in de bosbouwpraktijk toepassing kunnen vinden. Uit het overzicht dat gegeven wordt van de huidige stand van zaken ten aanzien van de vele methoden, zowel passieve als actieve, die in land- en tuinbouw gebruikt worden, blijkt welke methoden voor de bosbouw in aanmerking kunnen komen.

Een tweede belangrijk deel van het onderzoek omvat de beschrijving en onderlinge samenhang van de fysische verschijnselen die optreden in de onderste luchtlagen gedurende nachten, waarin aan de voorwaarden voor het mogelijke optreden van nachtvorst (helder, weinig wind) voldaan is. Dit gedeelte van het onderzoek is ingepast in het totaal van de bestudering van het microklimaat van begroeide en onbegroeide oppervlakken.

1.2. DEFINITIES

Conductie of geleiding is het transport van warmte binnen en door een stof, door middel van de moleculaire warmtebeweging (HUSCHKE, 1959).

Convectie is de verplaatsing van gedeelten van een fluide medium resulterend in het transport en de menging van de eigenschappen van het medium. In de meteorologie wordt het begrip convectie vaak beperkt tot de gevallen van verticale beweging en het begrip advection wordt dan gebruikt om het horizontale transport en menging van atmosferische eigenschappen te beschrijven.

Straling is het proces waarbij electromagnetische straling zich voortplant, ook

door de vrije ruimte, tengevolge van gelijktijdige golfvormige variaties in de elektrische en magnetische velden in de ruimte.

Het woord *vorst* wordt met betrekking tot verschillende begrippen gebruikt. Bij KEIL (1950) vindt men de volgende definitie: 'Frost nennt man zunächst das Sinken der Temperatur unter den Gefrierpunkt des Wassers (0°C , 32°F), dann aber auch die Wirkung solcher niedriger Temperatur auf die belebte und unbelebte Welt und endlich gewisse Erscheinungen die mit der Erstarrung des Wassers zu Eis zusammenhangen'. Dergelijke betekenissen vindt men ook in de Engelse taal. Bij HUSCHKE (1959) vindt men de volgende betekenissen:

1. 'Frost or hoarfrost, a deposit of interlocking ice crystals formed by direct sublimation on objects such as tree branches, plant stems and leaf edges, wires, poles etc. The deposition of hoarfrost is similar to the proces by which dew is formed, except that the temperature of the befrosted object must be below freezing.'
2. 'The condition which exists when the temperature of the earth's surface and earthbound objects falls below freezing, 0°C or 32°F .'

Verder onderscheid wordt nog gemaakt tussen 'white frost' die identiek is met 'hoar frost', en 'black frost' waarbij zowel de onderste luchtlagen als de met de aarde verbonden voorwerpen een temperatuur beneden 0°C hebben. In deze publicatie zal onder *vorst* worden verstaan het dalen van de temperatuur beneden 0°C .

Naast de bovenstaande betekenissen voor het begrip vorst vinden wij veelal een indeling naar de periode van het optreden van de vorst. Hierbij kan men onderscheiden:

Wintervorst = vorst gedurende de winter d.w.z. gedurende de periode van vegetatierust.

Voorjaarsvorst = late vorst = vorst in het voorjaar na het begin van het groeiseizoen tot begin juni.

Zomervorst = vorst gedurende de zomer (juni tot begin september).

Najaarsvorst = vroege vorst = vorst van begin september tot het einde van het groeiseizoen.

Tot deze indeling moet ook het begrip nachtvorst gerekend worden, vorst gedurende de nacht, als overdag de temperatuur boven het vriespunt is. Aangezien in de Engels sprekende landen het begrip 'night frost' niet bestaat, vergelijkt men nachtvorst wel met 'ground frost'. Dit is echter onjuist gezien de definitie van 'ground frost': een vorst die schadelijk is voor de vegetatie en die opgetreden is indien een, vlak boven een grasoppervlak vrij opgestelde, minimum-thermometer een temperatuur ('grass temperature') van $30,4^{\circ}\text{F}$ ($-0,9^{\circ}\text{C}$) of lager aanwijst. Het begrip nachtvorst wordt veelal ook beperkt tot het voorkomen tijdens het groeiseizoen. Dit is m.i. niet juist, ook tijdens de winter komen weersituaties voor waarbij de luchttemperatuur overdag boven 0°C en 's nachts beneden 0°C is. In deze publicatie zal onder nachtvorst worden verstaan de toestand dat overdag de luchttemperatuur nabij het aardoppervlak boven 0°C

is en gedurende de nacht, tengevolge van de sterke uitstraling, tot beneden 0°C daalt.

Een veelvuldig gebruikte onderverdeling is ook het tegenover elkaar stellen van advectie- of advectieve vorst en stralings- of inversievorst. Onder advectie-vorst verstaat men dan het dalen van de temperatuur beneden 0°C door de aanvoer van luchtmassa's met temperaturen beneden 0°C (gewoonlijk in verband met de passage van een diepe depressie of een sterk koudefront voor een hogedrukgebied). Onder stralingsvorst verstaat men de afkoeling van de ter plaatse aanwezige lucht tot beneden 0°C door de uitstraling van de bodem en de vegetatie. Dit laatste type hangt vaak samen met zich slechts langzaam verplaatsende hogedrukgebieden waarin de lucht koel en droog is. Slechts in de winter komen beide typen afzonderlijk voor. Tijdens het groeiseizoen zijn deze begrippen als tegenstelling onjuist. Tot vorst komt het meestal pas als tijdens of na de toevoer van koude luchtmassa's een sterke uitstraling plaats vindt. Het is niet logisch van advectieve vorst te spreken als beide componenten gelijktijdig werkzaam zijn en van stralingsvorst, als beide componenten ook samenwerken maar na elkander.

Een betere indeling biedt de gebruikmaking van de meteorologische grootheid de windsnelheid. Zoals welbekend is en in hoofdstuk 3 duidelijk zal blijken uit de resultaten van de metingen, speelt de wind een beslissende rol bij de verdeling van het voorkomen van nachtvorst in het terrein. Een mogelijke indeling is dan: vorst zonder wind d.i. vorst bij windstilte of bij een luchtverplaatsing met een snelheid $< 1,5 \text{ m.sec}^{-1}$, en vorst met wind d.i. vorst bij een windsnelheid van $1,5 \text{ m.sec}^{-1}$ of groter. De grens van $1,5 \text{ m.sec}^{-1}$ is bepaald door de volgende factoren:

- a. de door de locale niveaueverschillen afglijdende koude luchtmassa's verplaatsen zich in het algemeen met een snelheid beneden $1,5 \text{ m.sec}^{-1}$.
- b. een luchtbeweging van $1,5 \text{ m.sec}^{-1}$ is niet in staat de opbouw van de voor de vorst zonder wind karakteristieke temperatuurgelaagdheid en -verdeling te verhinderen (SCHNELLE, 1963).

1.3. PROEFTERREINEN

De terreinen waar ten behoeve van het onderzoek metingen werden verricht zijn:

- a. Boswachterij Smilde, vak 103c, $52^{\circ} 54' 40'' \text{ N.B.}$, $6^{\circ} 21' 50'' \text{ O.L.}$ Aan de oost- en zuidzijde is het terrein ($80 \times 160 \text{ m}$) omgeven door opgaand bos (hoogte ca. 10 m), aan de westzijde grenst het terrein aan een weiland en de noordelijke begrenzing wordt gevormd door een terrein met gras en een verspreide stronk-opslag van eiken (tot $1,5 \text{ m}$ hoog). Het proefterrein zelf is voor de helft, op de jonge aanplant na (fijnspaar, plantverband $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$), onbegroeid, voor de andere helft, naast de aanplant, bedekt met gras met een maximale hoogte van $0,5 \text{ meter}$.
- b. Landgoed 'Het Planken Wambuis', leegkapterrein ten zuiden van het aan de

weg Arnhem-Ede gelegen restaurant, 52°01'52" N.B., 5°47'12" O.L. Het proefterrein (300 × 220 m) is ingesloten door opstanden met een hoogte variërend tussen 8 en 15 meter. De lariksbeplanting (hoogte ca. 0,60 m, plantverband 1,5 m × 1,5 m) was nagenoeg vrij van onkruid.

c. Emmen, Boswachterij Sleenerzand, vak 45, 52°48'32" N.B., 6°46'46" O.L.

Het terrein van 120 × 130 m is omgeven door opgaand bos (hoogte 8–12 m). Voor ongeveer de helft is het proefterrein begroeid met opslag van eiken en berken (hoogte 1,5–3,5 m) met sterke grasverwildering. De andere helft is zwart gemaakt (stobben gerooid, geploegd en met de cultivator bewerkt). De beplanting is lariks en fijnspar (plantverband 1,8 m × 1,5 m).

d. Proefterreinen van I.N.R.A.T., afdeling Bioklimatologie te Ariana, Tunesië.

De metingen vonden hier plaats in een olijvenplantage en op een er naast gelegen onbegroeid terrein van ca. 100 × 50 m aan de zuidzijde van de olijvencultuur. Aan de oost- en zuidkant was het onbegroeide terrein nagenoeg geheel vrij van storende invloeden, aan de west- tot noordwestzijde bevindt zich op enige afstand een gebouw. Bij west- tot noordwestelijke wind kan dus een verstoring in de opbouw van de wind- en temperatuurprofielen verwacht worden.

1.4. METINGEN EN INSTRUMENTEN

Op de proefterreinen werden in het algemeen de volgende metingen verricht:

- Meting van het temperatuurprofiel in de lucht, 4–8 metingen tussen 0,05 en 6,40 meter boven het aardoppervlak.
- Meting van het windprofiel, 4–8 metingen tussen 0,05 en 6,40 meter.
- Meting van de nettostraling op enkele hoogten boven het aardoppervlak.
- Meting van het temperatuurprofiel in de bodem, in het algemeen uitsluitend in de bovenste 2–3 cm.
- Meting van de warmtestroom in de bodem.

Naast de onder a t/m e genoemde metingen, werden de volgende in de publicatie niet of slechts ten dele verwerkte grootheden gemeten:

- Luchtvochtigheid.
- Dauw.
- Windrichting.

Tevens werden de volgende waarnemingen verricht: Schatten van de bedekingsgraad indien bewolking aanwezig was, opnemen van het voorkomen van dauw of rijp.

Voor de temperatuurmetingen is gebruik gemaakt van thermokoppels vervaardigd uit constantaan-manganen ($\varnothing$ 0,02 cm). De windsnelheid is gemeten met thermokoppel anemometers, speciaal ontworpen voor het meten van lage windsnelheden (0,02–1,00 m.sec⁻¹), een modificatie van het type besproken door FRITSCHEN en SHAW (1961), gebaseerd op het in 1958 voor het eerst in Wageningen ontworpen model.¹ De nettostralingsmeters bestaan in principe uit 2 zwarte plaatjes, waarvan één gericht naar het aardoppervlak en één naar de atmosfeer, het temperatuurverschil tussen beide oppervlakken wordt gemeten met 2 onder de oppervlakken bevestigde thermokoppels. Het huis waarin de

meetvoelers zijn opgenomen is boven de zwarte plaatjes afgesloten met polyethyleenfolie. Diameter van de zwarte plaatjes 1 cm, diameter van het huis 2 cm. De meting van de warmtestroom in de bodem geschiedde met behulp van warmtestroommeters, een plaatje perspex (oppervlakte $2,5 \times 2,5$ cm, dikte 0,32 cm) met aan beide oppervlakken 3 gewalste thermokoppels. Deze metingen werden aangevuld met incidentele metingen van de warmtestroom met behulp van de nieuwe methode met de perspexblokken (hoofdstuk 2.3).

De signalen uit de diverse meetvoelers werden geregistreerd op een Sefram recorder met een gevoeligheid die varieerde van 0,25–1,00 mV per volle schaalbreedte van 25 cm, waarbij een schakelwals achtereenvolgens de verschillende meetvoelers op de Sefram aansloot. Maximaal werden 50 signalen per 2 of 5 minuten opgenomen al naar de cyclus van de schakelwals.

De bewerking van de registratiegegevens geschiedde voor een belangrijk deel met behulp van een I.B.M. 1620 computer.¹

¹ De auteur betuigt hierbij zijn dank aan Ir. A. J. W. BORGHORST voor de ontwikkeling van de meetapparatuur en aan Ir. H. GOEDKOOP Hzn. voor het vervaardigen van de vele programma's om de meetgegevens op de computer te kunnen verwerken. De medewerking van Ir. BORGHORST en Ir. GOEDKOOP valt binnen het onderzoekprogramma van de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (F.O.M.) en werd mogelijk gemaakt door financiële steun van de Nederlandse Organisatie voor Zuiver-Wetenschappelijk Onderzoek (Z.W.O.).

2. NACHTELIJKE ENERGIEBALANS NABIJ HET AARDOPPERVLAK

De temperatuurveranderingen van de bodem, de vegetatie en de onderste luchtlagen zijn het gevolg van warmteuitwisseling met de omgeving en de hogere luchtlagen. Deze energieoverdracht kan plaatsvinden door straling, moleculaire warmtegeleiding, turbulente menging van de lucht, toestandsveranderingen van water bij verdampen, condenserende, bevriezen en smelten, chemische omzettingen bij de stofwisseling van de planten, wateropname bij irrigatie en beregening enz.

Het resultaat van alle fysische en chemische warmtetransport is de warmtehuishouding. Een beeld van de warmtehuishouding geeft de energiebalans. Voor de bestudering van de verschijnselen die optreden bij nachtvorst is het belangrijk een analyse te maken van de warmtehuishouding van het milieu waarin de planten leven en een energiebalans op te stellen.

2.1. TERMEN VAN DE ENERGIEBALANS

Beschouwt men het oppervlak waarvoor de energiebalans wordt opgesteld, als een volkomen absorberend grensvlak waarin geen energie kan worden opgeslagen, dan moet dus de geabsorbeerde stralingsenergie naar het omringende medium worden afgegeven. Het verlies aan energie door uitstraling kan dan ook alleen gecompenseerd worden door warmtetransport van het medium naar het grensvlak.

Het warmtetransport wordt weergegeven met de warmtestroomdichtheid d.i. de hoeveelheid warmte die per oppervlakte- en per tijdseenheid naar het grensvlak toegevoerd of van het grensvlak afgevoerd wordt. Als symbool voor de warmtestroomdichtheid is gekozen H .

Aan het aardoppervlak komen de volgende warmtestroomdichtheden voor (het = teken duidt de oorsprong van de betreffende warmtestroomdichtheden aan):

H_{ra}^{ne} = de nettostraling.

H_{at} = de moleculaire en turbulente warmteuitwisseling tussen het aardoppervlak en de aangrenzende luchtlagen.

H_{so} = de moleculaire warmtegeleiding in de bodem.

H_{ev} = de latente warmte door de verdamping.

H_{dw} = de latente warmte door de condensatie (dauw).

H_{su} = de latente warmte door sublimatie (rijp).

H_{pre} = de warmtestroom door de neerslag.

Bij een begroeid oppervlak vinden we naast de bovengenoemde termen:

H_{ve} = de warmtestroom in de planten.

H_{ph} = de warmte door de stofwisseling (fotosynthese en ademhaling).

In de energiebalans worden de warmtestromen positief gerekend indien ze

naar het grensvlak toe gericht zijn. Zo zijn bijvoorbeeld 's nachts de warmtestroom in de bodem en de vrijkomende energie bij dauw- en rijpvorming positieve warmtestromen. Er is een duidelijk verschil in de richting van de warmtestromen overdag en 's nachts. Overdag wordt de opgenomen stralingsenergie verdeeld tussen de warmteopslag in de bodem en in de planten, de warmtestroom naar de omgevende luchtlagen en de warmte nodig voor de verdamping. Aan het oppervlak van bodem of planten vinden we dan de hoogste temperaturen. 's Nachts stralen de oppervlakken meer energie uit dan ze uit de lucht en de bodem ontvangen. De laagste temperaturen vinden we dan aan het oppervlak. Vanaf het grensvlak koelen bodem, vegetatie en de onderste luchtlagen af. Dit 'uitstralingstype' vinden we het duidelijkst in heldere nachten met weinig wind. Onder deze omstandigheden is het gevaar voor nachtvorst het grootst. Naast de sterke afkoeling door uitstraling kan ook afkoeling plaatsvinden door aanvoer van koude lucht van elders, in dit geval kunnen ook H_{at} en H_{ev} negatief worden en bijdragen tot de afkoeling van de bodem en de planten.

Voor de energiebalans voor een onbegroeid bodemoppervlak geldt:

$$H_{ra}^{ne} = H_{at} + H_{so} + H_{ev} + H_{pre}$$

De advectieve energie (H_{ad}) is hierbij opgenomen in H_{at} .

Voor een plantenoppervlak geldt:

$$H_{ra}^{ne} = H_{at} + H_{ve} + H_{ev} + H_{pre} + H_{ph}$$

Achtereenvolgens worden nu de voor de nachtelijke energiebalans van het aardoppervlak belangrijke termen besproken.

2.2. DE LANGGOLVIGE STRALING

De langgolvlige straling gaat uit van het oppervlak van de bodem en de planten en de bestanddelen van de lucht zoals wolken, waterdamp, kooldioxyde, ozon en vaste bestanddelen (verontreinigingen). De golflengte ligt praktisch in het bereik van 3–30 μ , met als maximum 9–12 μ (fig. 2.1).

De warmtestroomdichtheden voor de langgolvlige straling worden aangeduid met:

H_{ra}^{ea} = de uitstraling van het bodemoppervlak en de bovengrondse plantendelen

H_{ra}^{at} = de straling van de atmosfeer naar de aarde

$r_{lo} H_{ra}^{at}$ = de aan het aardoppervlak gereflecteerde langgolvlige atmosferische straling.

Volgens de wet van Stefan-Boltzmann is de door een lichaam in de halve ruimte uitgestraalde energie:

$$H_{ra}^{lo} = \epsilon_{lo} \sigma \theta^4 \quad (2.1)$$

waarin:

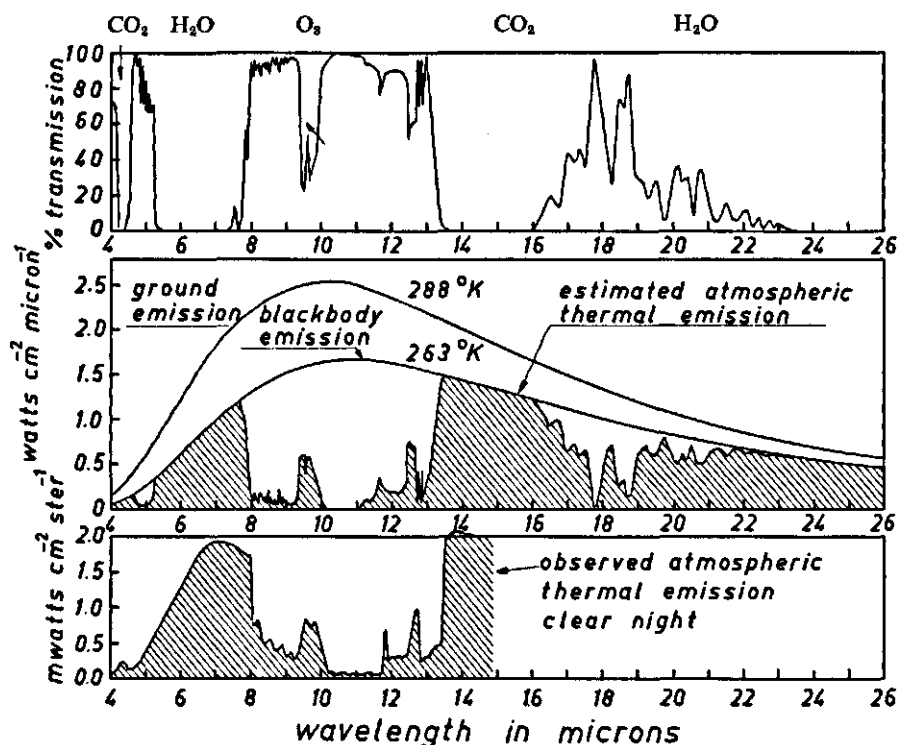


FIG. 2.1. De transmissie en emissie van langgolvrige straling door de atmosfeer, de uitstraling van het aardoppervlak en de langgolvrige straling van een zwart lichaam als functie van de golflengte (uit: GATES, 1965).

FIG. 2.1. The transmission and emission of the earth's atmosphere of longwave thermal radiation, the emission of longwave thermal radiation from the ground surface, and blackbody radiation each as a function of the wavelength (GATES, 1965).

ϵ_{lo} = het gemiddelde emissievermogen in het langgolvrige stralingsgebied,

$\sigma = 0,82 \cdot 10^{-10} \text{ cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-4} (5,7 \times 10^{-12} \text{ Watt. cm}^{-2} \cdot ^\circ\text{K}^{-4})$

en θ = de absolute temperatuur ($^\circ\text{K}$) van het stralende lichaam.

Terwijl H_{ra}^{ea} uitgaat van een door de planten en de bodem gegeven oppervlak, is H_{ra}^{at} de straling uit een laag van de atmosfeer. De effectieve dikte van deze laag is afhankelijk van het gehalte aan waterdamp, aantal waterdruppels, kooldioxyde, vaste bestanddelen enz. Indien we als gemiddeld absorptievermogen in het langgolvrige stralingsgebied $\epsilon_{lo} = 1 - r_{lo}$ nemen, kunnen we voor de netto langgolvrige straling schrijven:

$$H_{ra}^{ne} = \epsilon_{lo} (H_{ra}^{at} - \sigma \theta_{ea}^4) \quad (2.2)$$

De reflectiecoëfficiënt is voor de meeste oppervlakken klein en hangt af van de invalshoek (zie tabel 2.1).

TABEL 2.1: Reflectiecoëfficiënt van natuurlijke oppervlakken voor langgolvlige straling.

oppervlak	reflectiecoëfficiënt (%)
zand (droog-nat)	5-2
water	5
bos	4
gras	4-2
bladeren	6-2
water	5
sneeuw	2-0,5

TABLE 2.1: *Reflection factors of natural surfaces for longwave radiation.*

De langgolvlige stralingsstroomdichtheid van het aardoppervlak is dus gelijk aan

$$\epsilon_{lo} \sigma \theta_{ea}^4$$

Voor een vegetatie is ϵ_{lo} ongeveer 0,97 en voor een zandoppervlak 0,95-0,98. Het aardoppervlak gedraagt zich dus nagenoeg als een 'zwarte' straler. Een grote moeilijkheid bij het gebruik van deze formule is de bepaling van de oppervlaktetemperatuur. De langgolvlige straling van het aardoppervlak wordt daarom meestal gemeten met een stralingsmeter die zich boven het oppervlak bevindt. De uitstraling gedurende de nacht is van de orde van grootte van 300 Watt.m⁻².

Bij heldere lucht is de atmosfeer ten dele doorzichtig voor langgolvlige straling, alleen in bepaalde golflengtegebieden wordt de straling geabsorbeerd en uitgezonden (fig. 2.1). De bestanddelen waterdamp, kooldioxyde en ozon regelen voor een groot deel de uitwisseling van straling tussen het aardoppervlak en de atmosfeer. Uit figuur (2.1) blijkt dat waterdamp sterke absorptie vertoont rond 6 μ en bij golflengten groter dan 22 μ . De waterdamp in de atmosfeer zendt deze geabsorbeerde energie weer uit naar de ruimte en het aardoppervlak, maar bij een lagere temperatuur dan het aardoppervlak. Koolstofdioxyde speelt een vergelijkbare rol in het gebied tussen 14 en 16 μ . Er blijft echter een duidelijk venster open in de atmosfeer tussen 8 en 12 micron, waardoor de langgolvlige straling ontsnapt naar de kosmische ruimte. Een direct gevolg is de nachtelijke afkoeling van de planten en de grond door een nettoverlies aan straling.

Waterdamp is de belangrijkste bron van langgolvlige straling uit de atmosfeer. Naast waterdamp is de bijdrage van koolstofdioxyde belangrijk. In tegenstelling tot de verdeling van waterdamp, is het koolstofdioxyde uniform verdeeld door de atmosfeer en daardoor is de stralingsenergie uitgaande van het koolstofdioxyde, die op het aardoppervlak terecht komt, min of meer constant. Ozon draagt ook een kleine, uniform verdeelde hoeveelheid bij aan de totale langgolvlige stralingsenergie van de atmosfeer.

De naar het aardoppervlak toe gerichte langgolvlige straling van de atmosfeer wordt geschat met behulp van stralingsdiagrammen (ELSÄSSER, 1960; ROBINSON, 1947, 1950; YAMAMOTO, 1952). Deze diagrammen vereisen echter een kennis van

de verdeling van waterdamp en temperatuur met de hoogte in de atmosfeer. Diverse pogingen zijn daarom gedaan om empirisch de intensiteit van de langgolvlige straling van de onbewolkte atmosfeer die het aardoppervlak bereikt te vinden. ANGSTRÖM (1915) en BRUNT (1932) stelden formules voor die gebaseerd zijn op de luchttemperatuur en de waterdampspanning gemeten in een meteorologische hut. De constanten in hun formules hangen echter sterk af van de plaats op aarde. SWINBANK (1963) vond het volgende verband tussen de langgolvlige atmosferische straling en de luchttemperatuur in de hut:

$$H_{ra}^{at} = -17,09 + 1,195 \sigma \theta_{at}^4 \quad (2.3)$$

en

$$H_{ra}^{at} = 5,31 \times 10^{-14} \theta_{at}^4 \quad (2.4)$$

waarin H_{ra}^{at} in milliwatt per cm^2 , θ in $^\circ\text{K}$ en $\sigma = 5,77 \times 10^{-9} \text{ mWatt} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot ^\circ\text{K}^{-4}$. In het temperatuurtraject van 3°C tot 36°C is het maximale verschil in de warmtestroomdichtheden, berekend volgens beide formules, $0,5 \text{ mWatt} \cdot \text{cm}^{-2}$ d.i. 1–2% van de stralingsstroomdichtheid. Buiten het genoemde temperatuurtraject wordt het verschil tussen beide formules snel groter. Beide vergelijkingen geven een schatting van H_{ra}^{at} met een mogelijke fout van $0,5 \text{ mWatt} \cdot \text{cm}^{-2}$.

De atmosferische straling kan groter worden door het voorkomen van wolken. De straling wordt groter als de wolken lager liggen en een hogere temperatuur aan de wolkenbasis gevonden wordt. De factor C_w waarmee de atmosferische straling bij heldere lucht vermenigvuldigd moet worden om de straling bij bewolkte lucht te verkrijgen is te vinden in figuur 2.2.

Eigen metingen. De netto langgolvlige straling kan met nettostralingsmeters direct gemeten worden. De figuren 2.3 en 2.4 geven de resultaten van dergelijke metingen tijdens de heldere nachten 1/2–4–1965 en 29/30–9–1965. Aan het begin van de nacht is het energieverlies door straling het grootst, meestal neemt de nettostraling gedurende de nacht af, waarbij de waarden in de morgenuren 20% lager liggen dan de waarden gemeten tijdens de avonduren.

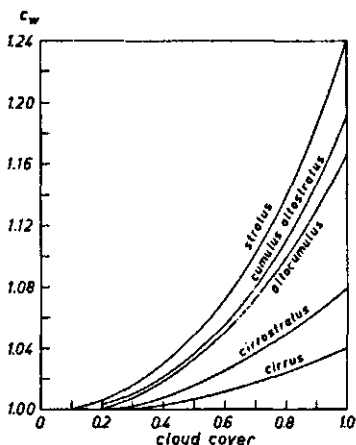


FIG. 2.2. Waarde voor C_w bij de bepaling van de langgolvlige uitstraling van de atmosfeer bij bewolking, afhankelijk van de bedekkingsgraad (uit: SCHNELLE, 1965).

FIG. 2.2. Value of C_w in the calculation of the long-wave thermal radiation of the earth's atmosphere dependent on the cloud cover (SCHNELLE, 1965).

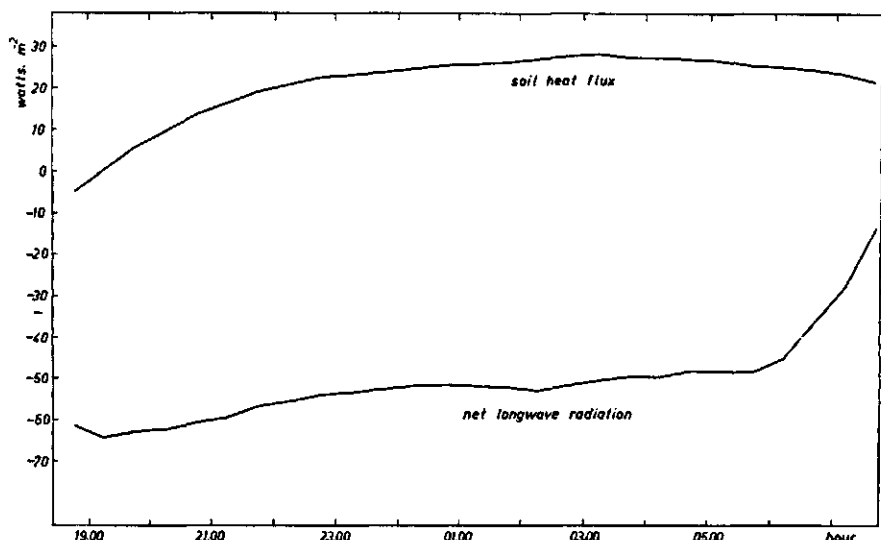


FIG. 2.3. Netto langgolvlige straling en warmtestroom in de bodem gedurende een heldere nacht (Planken Wambuis, 1/2-4-1965).

FIG. 2.3. *Net longwave radiation and soil heat flux during a clear night (Planken Wambuis, 1/2-4-1965).*

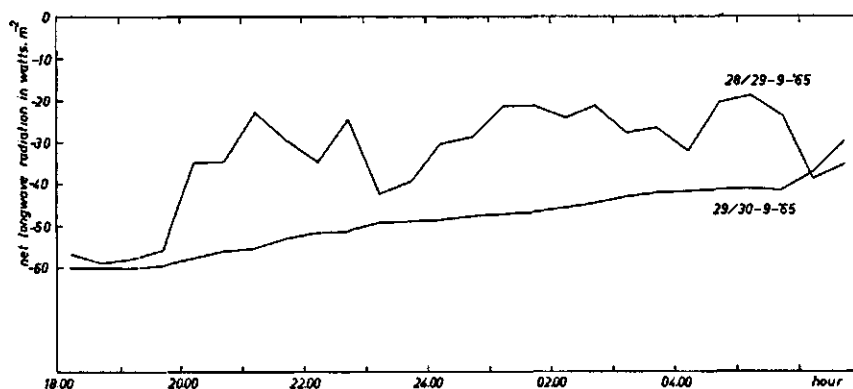


FIG. 2.4. Netto langgolvlige straling boven onbegroeide grond tijdens een heldere (29/30-9-1965) en een bewolkte (28/29-9-1965) nacht (Tunis).

FIG. 2.4. *Net longwave radiation above bare soil during a clear (29/30-9-1965) and a cloudy (28/29-9-1965) night (Tunis).*

De grote invloed van bewolking en mist is weergegeven in figuren 2.4 en 2.5. Tijdens de nacht van 28/29-9-1965 (figuur 2.4) was de bewolgingsgraad:

18.00-20.00 uur:	1/10-2/10
20.00-22.00 uur:	3/10-5/10
23.00 uur:	3/10
01.00-05.00 uur:	7/10-9/10
05.00 afnemend tot	5/10.

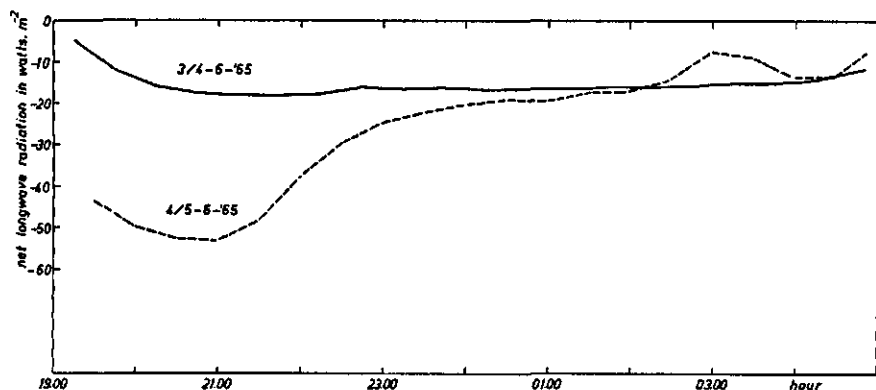


FIG. 2.5. Netto langgolvlige straling boven zwartgemaakte grond tijdens een bewolkte (3/4-6-1965) en een heldere (4/5-6-1965) nacht (Emmen).

FIG. 2.5. Net longwave radiation above cultivated soil during a cloudy (3/4-6-1965) and a clear (4/5-6-1965) night (Emmen).

Tijdens 3/4-6-1965 (figuur 2.5) was de gehele nacht de lucht volledig bewolkt. De invloed van de door de uitstraling veelvuldig optredende mist blijkt uit de metingen van 4/5-6-1965 (figuur 2.5). Bij een onbewolkte lucht te 21.00 uur ontstond na 22.00 uur stralingsmist die na 02.00 uur zeer dicht werd om vervolgens na 04.00 gedeeltelijk op te lossen. De invloed van mist is dus te vergelijken met die van uitgebreide bewolking. Op dit verschijnsel berust een methode van nachtvorstbestrijding (zie 5.3.2.). Bij aanwezigheid van een vegetatiedek kan de tegenstraling voor een deel ook van bepaalde plantendelen afkomstig zijn (figuur 2.6). De nettostraling tussen lang gras (25-50 cm) is dan ook kleiner dan de straling boven onbedekte grond (27/28-8-1964). Door de vorming van stralingsmist vertoont de nettostraling op 0,10 m eenzelfde daling, na 23.00 uur, zoals het geval was tijdens de nacht van 4/5-6-1965 (figuur 2.5).

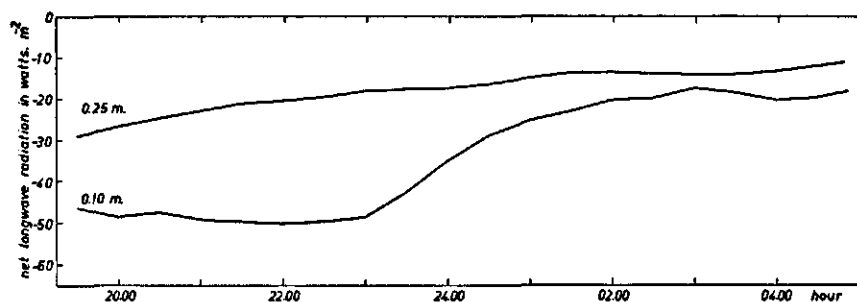


FIG. 2.6. Netto langgolvlige straling tijdens een heldere nacht (Smilde, 27/28-8-1964) gemeten boven onbegroeide grond (0,10 m) en tussen lang gras (0,25 m).

FIG. 2.6. Net longwave radiation during a clear night (Smilde, 27/28-8-1964) measured above bare soil (0.10 m) and between long grass (0.25 m).

2.3. DE WARMTESTROOM IN DE BODEM

De ervaring leert dat het warmtetransport in de bodem in hoofdzaak geschiedt door geleiding. Indien men aanneemt dat de warmtestroom alleen plaats vindt in de verticale z -richting geldt:

$$H_{so} = -\lambda \partial \vartheta / \partial z \quad (2.5)$$

hierin is $\vartheta = \vartheta(z, t)$ de temperatuur als functie van de diepte en de tijd en λ het warmtegeleidingsvermogen van de grond, waarbij λ van de diepte, het vochtgehalte en de tijd afhankelijk kan zijn.

Aangezien de grond geen homogeen medium is kan deze vergelijking alleen gebruikt worden indien de plaatselijke variaties door de structuur van de grond en de invloed van plantenwortels, kleine stenen en andere onregelmatigheden verwaarloosd worden. Het negatieve teken duidt er op dat de warmtestroom tegengesteld van richting is vergeleken met de toename van de temperatuur. Gedurende de nacht, als de temperatuur met de diepte toeneemt, is de warmtestroom dus positief, naar het oppervlak toe gericht. Voor de verandering van de temperatuur met de tijd geldt voor een medium, waarvan de eigenschappen noch van z noch van t afhangen, de differentiaalvergelijking:

$$\partial \vartheta / \partial t = a \partial^2 \vartheta / \partial z^2 \quad (2.6)$$

hierin is $a = \lambda / C = \lambda / \rho c$ de temperatuurvereffeningscoëfficiënt, ρ de dichtheid van de grond, c de soortelijke warmte en C de warmtecapaciteit per volume-eenheid.

De warmtestroom aan het aardoppervlak bepaalt de hoeveelheid warmte die de bodem binnendringt en verlaat. In de studie van de energiebalans aan het aardoppervlak en het gevaar voor nachtvorst op de verschillende gronden is deze een belangrijke grootte.

Uit de vergelijking voor H_{so} volgt dat het warmtegeleidingsvermogen λ bekend moet zijn aan het oppervlak evenals de temperatuurgradiënt. De warmteëigenschappen λ en C van de bovenste bodemlaag zijn vaak verschillend van λ en C op wat grotere diepte. De directe bepaling van H_{so} kan geschieden door meting met een warmtestroommeter. Deze meter bestaat veelal uit een vlakke plaat of schijf van een electrisch isolerend materiaal met bekende warmteconstanten zoals polyethyleen. Het temperatuurverschil tussen beide oppervlakken wordt gemeten met een aantal thermokoppels. De warmtestroom door de meter is dan gelijk aan:

$$H_M = -\lambda_M \frac{\vartheta_{bo} - \vartheta_{on}}{dikte} \quad (2.7)$$

waarin ϑ_{bo} resp. ϑ_{on} de gemiddelde temperatuur aan de bovenkant resp. onderkant van de meter is. De verstoring van het medium waarin de warmtestroom gemeten moet worden is echter een groot bezwaar van deze methode.

De resultaten van enkele metingen met een warmtestroommeter geven figuren

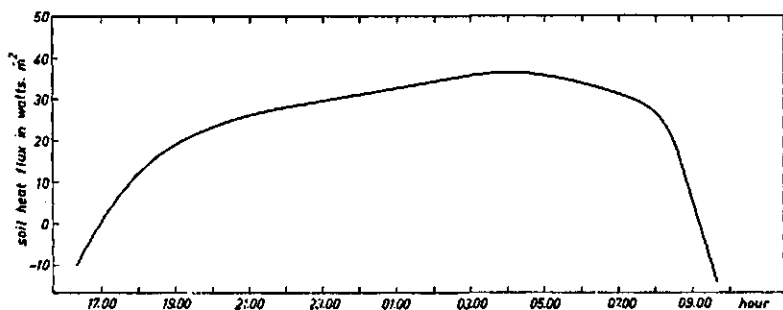


FIG. 2.7. Warmtestroomdichtheid in de bodem tijdens een heldere nacht (Planken Wambuis, 30/31-3-1965).

FIG. 2.7. Soil heat flux during a clear night (Planken Wambuis, 30/31-3-1965).

2.3, 2.7 en 2.8. De figuren 2.3 en 2.7 geven een beeld van het verloop van de warmtestroom op 0,09 m diepte gedurende een heldere nacht. Na zonsondergang een snelle toename tot ongeveer 21.00 uur waarna een langzame stijging volgt tot het bereiken van een maximumwaarde tussen 03.00 en 05.00 uur. Hierna volgt een snelle daling na zonsopkomst. Figuur 2.8 geeft een beeld van de warmtestroom tijdens een bewolkte en onbewolkte nacht. Het duidelijke verschil in warmtestroom is een gevolg van het verschil in temperatuurgradiënt in de bodem. Tijdens de heldere nacht is de temperatuur nabij het aardoppervlak lager dan tijdens de bewolkte nacht. In figuur 2.3 komt tevens het verschil tussen de nettostraling en de warmtestroom in de grond tot uiting. Dit verschil is in de avonduren het grootst. In deze periode zullen in de luchtlagen nabij het aardoppervlak dan ook de grootste temperatuurdalingen gevonden worden. Door de grote gradiënt van de luchttemperatuur nabij het aardoppervlak neemt in deze periode de warmtestroomdichtheid H_{at}^{ne} sterk toe, hetgeen noodzakelijk is om het grotere verschil tussen H_{ra}^{ne} en H_{so} te compenseren.

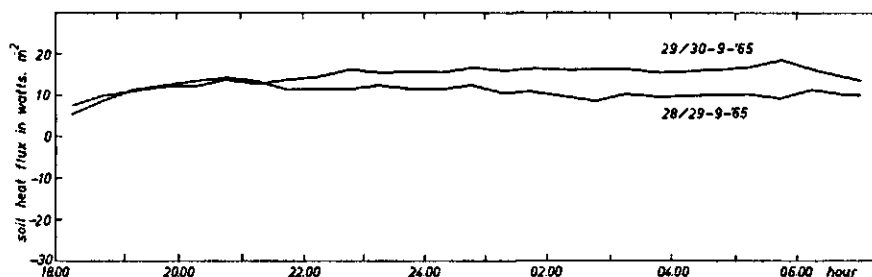


FIG. 2.8. Warmtestroomdichtheid in de bodem tijdens een heldere (29/30-9-1965) en een gedeeltelijk bewolkte (28/29-9-1965) nacht (Tunis).

FIG. 2.8. Soil heat flux during a clear (29/30-9-1965) and a partly cloudy (28/29-9-1965) night (Tunis).

Bij de nieuwe methode plaatst men een blok van een geschikt materiaal, met bij voorkeur een homogene temperatuur, op het bodemoppervlak en registreert

de temperatuur op het contactvlak van beide media (VAN WIJK e.a., 1965, 1967). Het product λC van de grond en de warmtestroomdichtheid in de grond, zoals deze vlak vóór het contact bestond, kunnen met deze methode bepaald worden. In de meeste experimenten zijn perspexblokken met een oppervlak van 10×10 cm en een hoogte van 4 cm gebruikt. De temperatuur nabij het centrum van het contactvlak werd geregistreerd gedurende 6–12 minuten.

Deze contacttemperatuur ($\vartheta(o, t)$) wordt berekend volgens de theorie van de warmtegeleiding in twee half-oneindige media, die plotseling met elkaar in contact gebracht worden langs het vlak $z = 0$ op het tijdstip $t = 0$. Dit is toegestaan gedurende een tijdsperiode waarin het contact met het andere lichaam alleen een laag beïnvloedt, die een diepte heeft die veel kleiner is dan de afmetingen van het lichaam. In de genoemde experimenten betekende dit een diepte van 1 tot 2 cm. Indien ϑ_1 constant is en $\vartheta(z, o) = \vartheta_2^{in} + Ez$ geldt voor de contacttemperatuur:

$$\vartheta^{(1)}(o, t) = \frac{\vartheta_1^{in} \sqrt{\lambda_1 C_1} + \vartheta_2^{in} \sqrt{\lambda_2 C_2}}{\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{E \lambda_2}{\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}} \sqrt{t} \quad (2.8)$$

De indices 1 en 2 hebben resp. betrekking op het blok en de bodem. Indien nu ϑ_1^{in} , ϑ_2^{in} en $\lambda_1 C_1$ bekend zijn, volgt uit een grafiek waarbij $\vartheta(o, t)$ tegen $\sqrt{t}$ is uitgezet, de temperatuur direct na het contact, $\vartheta(o, o)$. Met deze contacttemperatuur is, volgens formule (2.8), de contactcoëfficiënt van de bodem nabij het aardoppervlak, $\lambda_2 C_2$ te berekenen. Uit de helling van de lijn is vervolgens $E \lambda_2$ te berekenen d.i., afgezien van het teken, de warmtestroomdichtheid in de grond, aangezien $E = \partial \vartheta_2 / \partial z$, de temperatuurgradiënt in de grond nabij het oppervlak. Indien twee blokken gebruikt worden met een verschillende begintemperatuur is het niet nodig de begintemperatuur van de bodem te kennen. Men berekent deze dan eveneens uit de registrogrammen. De registraties van de beide contacttemperaturen dienen echter in dit geval zeer nauwkeurig te zijn, een kleine onnauwkeurigheid geeft een grote afwijking in de berekende $\lambda_2 C_2$ en daarmee in de warmtestroomdichtheid. De vergelijking (2.8) geldt alleen voor een ideaal thermisch contact d.w.z. $\vartheta(o, t) = \vartheta_1(o, t) = \vartheta_2(o, t)$ voor alle $t > 0$. Een betere benadering voor de metingen in het terrein is: $\vartheta_1(o, t) = \vartheta_2(o, t) + \mu H(o, t)$, waarin $H(o, t)$ de warmtestroomdichtheid van het blok naar de grond is en μ een positieve constante die de kwaliteit van het contact aangeeft. De vergelijking voor de contacttemperatuur wordt nu:

$$\begin{aligned} \vartheta_1(o, t) = & \frac{\vartheta_1^{in} \sqrt{\lambda_1 C_1} + \vartheta_2^{in} \sqrt{\lambda_2 C_2}}{\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}} - \frac{E \lambda_2 \mu \sqrt{\lambda_1 C_1 \lambda_2 C_2}}{(\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2})^2} + \\ & + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{E \lambda_2}{\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}} \sqrt{t} + \left[\frac{(\vartheta_1^{in} - \vartheta_2^{in}) \sqrt{\lambda_2 C_2}}{\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}} + \right. \end{aligned}$$

$$+ \frac{E\lambda_2 \mu \sqrt{\lambda_1 C_1 \lambda_2 C_2}}{(\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2})^2} \left] e^{\frac{(\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2})^2}{\mu^2 \lambda_1 C_1 \lambda_2 C_2} t} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}}{\mu \sqrt{\lambda_1 C_1 \lambda_2 C_2}} \sqrt{t} \right) \quad (2.9)$$

hierin is erfc het complement van de waarschijnlijkheidsintegraal (errorfunctie), $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$. Wederom kunnen $\lambda_2 C_2$, $E\lambda_2$ en μ berekend worden indien ϑ_1^n , ϑ_2^n en $\lambda_1 C_1$ bekend zijn. De term met de erfc bleek in de experimenten na

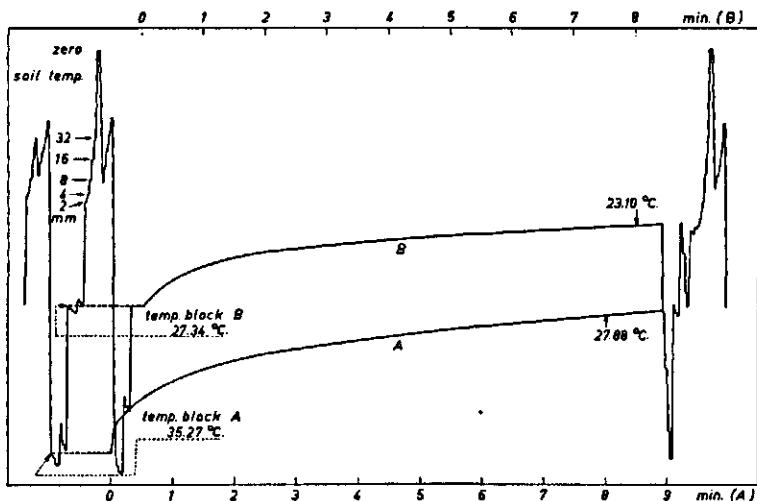


FIG. 2.9. Registrogram van een gelijktijdige meting met twee blokken (Tunis, 5-11-1965).¹

FIG. 2.9. Registration of a simultaneous measurement with two blocks (Tunis, 5-11-1965).

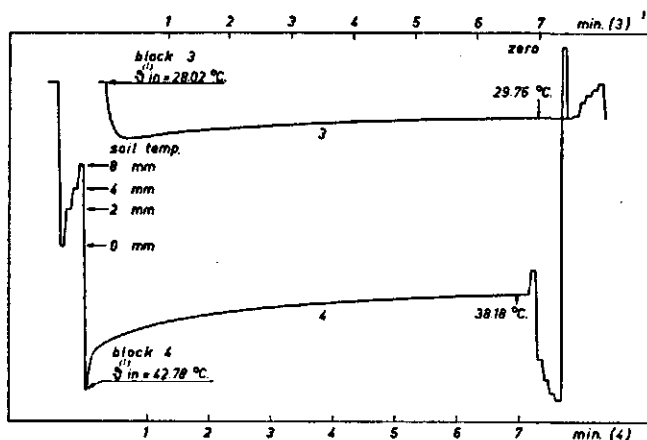


FIG. 2.10. Registrogram van een gelijktijdige meting met twee blokken (Tunis, 20-7-1966).¹

FIG. 2.10. Registration of a simultaneous measurement with two blocks (Tunis, 20-7-1966).

¹ Op de verticale as is geen onderverdeling aangebracht aangezien, door het verschil in uitwendige weerstand van de meetinstrumenten, op de aflezings in millivolts voor de diverse meetpunten verschillende correctiefactoren toegepast moeten worden. Hierdoor zou, na de omrekening van de aflezings van millivolts in graden celcius, voor elk instrument een aparte onderverdeling noodzakelijk zijn.

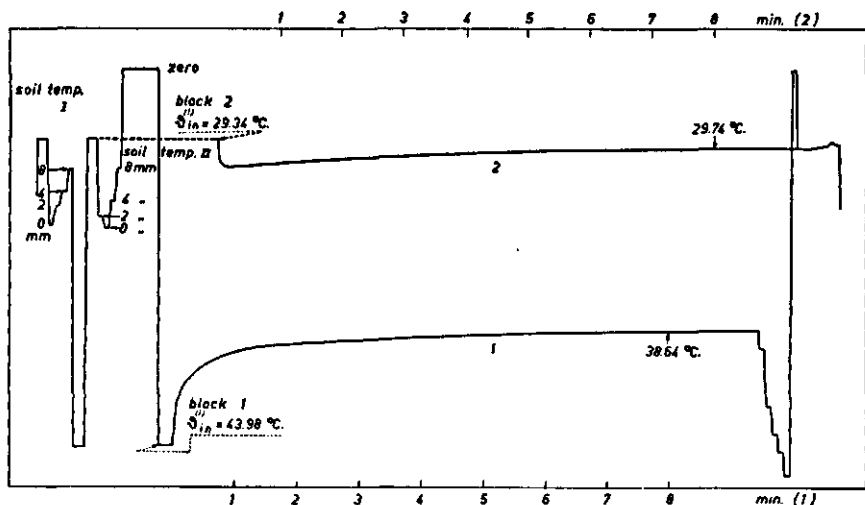


FIG. 2.11. Registrogram van een gelijktijdige meting met twee blokken (Tunis, 22-7-1966).¹
 FIG. 2.11. Registration of a simultaneous measurement with two blocks (Tunis, 22-7-1966).

een tijdsinterval, dat in de verschillende gevallen van 0,5 tot 2,5 minuut varieerde, verwaarloosbaar klein te worden.

Metingen. De figuren 2.9, 2.10 en 2.11 geven de registraties van metingen met 2 blokken op het proefterrein bij Tunis resp. op 5-11-1965, 20-7-1966 en 22-7-1966.

Meting op 5-11-1965 (09.30 uur). De beide blokken werden nagenoeg op hetzelfde tijdstip op het aardoppervlak geplaatst, waarbij blok A geplaatst werd boven een ingegraven frame met thermokoppels. Het verloop van de temperatuur in de grond met de diepte vóór de meting is eveneens in het registrogram weergegeven. Uit de registraties van de contacttemperaturen werd de grafiek $\vartheta^{(1)}(o, t)$ tegen $\sqrt{t}$ bepaald (figuur 2.12). Met behulp van formule 2.8 werden $\sqrt{\lambda_2 C_2}$ en ϑ_2^{in} bepaald.

$$\vartheta^{(1)}(o, o) = \frac{\vartheta_1^{in} \sqrt{\lambda_1 C_1} + \vartheta_2^{in} \sqrt{\lambda_2 C_2}}{\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}} \quad (2.10)$$

$$\text{stel:} \quad \sqrt{\lambda_2 C_2} = \alpha \sqrt{\lambda_1 C_1} \quad (2.11)$$

$$\vartheta^{(1)}(o, o) = \frac{\vartheta_1^{in} + \alpha \vartheta_2^{in}}{1 + \alpha} \quad (2.12)$$

$$\text{voor blok A} = 31,88 = \frac{35,27 + \alpha \vartheta_2^{in}}{1 + \alpha}$$

$$\text{voor blok B} = 26,04 = \frac{27,34 + \alpha \vartheta_2^{in}}{1 + \alpha}$$

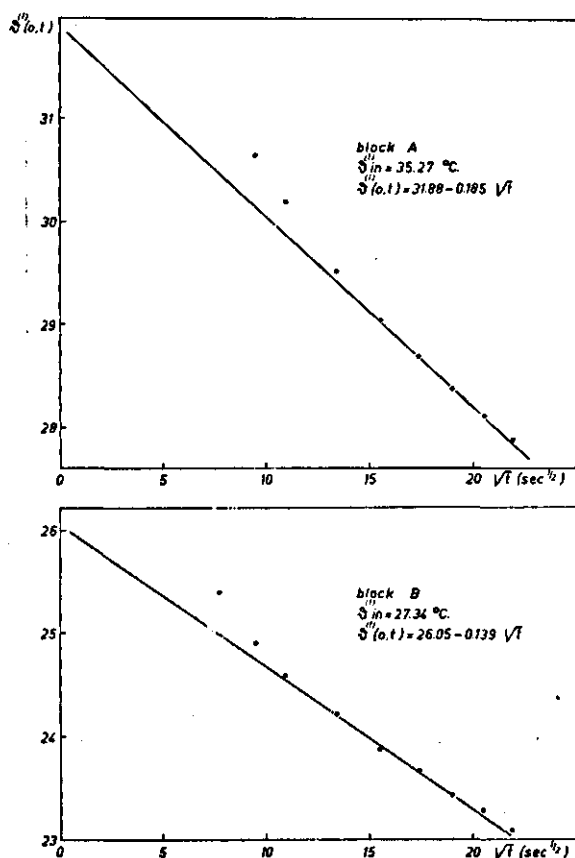


FIG. 2.12. Grafiek van de contacttemperatuur van de twee blokken $\vartheta^{(1)}(o,t)$, na plaatsing op het aardoppervlak, uitgezet tegen $\sqrt{t}$ (Tunis, 5-11-1965).

FIG. 2.12. Graph of the contact temperature of the two blocks $\vartheta^{(1)}(o,t)$, after placement on the soil surface, against $\sqrt{t}$ (Tunis, 5-11-1965).

Uit deze vergelijking volgt: $\alpha = 0,358$ en $\vartheta_2^n = 22,40^{\circ}\text{C}$. De temperaturen in de bodem waren voor de aanvang van de meting op 2, 4, 8 en 16 mm resp. 22,07; 21,75; 20,96 en 19,86 $^{\circ}\text{C}$. Dat de berekende oppervlaktetemperatuur overeenkomt met de geëxtrapoleerde waarde uit de gemeten temperaturen toont figuur 2.13.

$$\sqrt{\lambda_2 C_2} = \alpha \sqrt{\lambda_1 C_1} = 0,358 \times 1,3 \times 10^{-2} = 0,465 \times 10^{-2}$$

Uit de grafiek (figuur 2.8) volgt:

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{E\lambda_2}{\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}} = 0,185$$

$$H_{s0} = E\lambda_2 = 1,1518 \times 10^{-2} \times 1,358 \times 0,185 = 2,9 \times 10^{-3} \text{ cal. cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} (= 121 \text{ Watt} \cdot \text{m}^{-2})$$

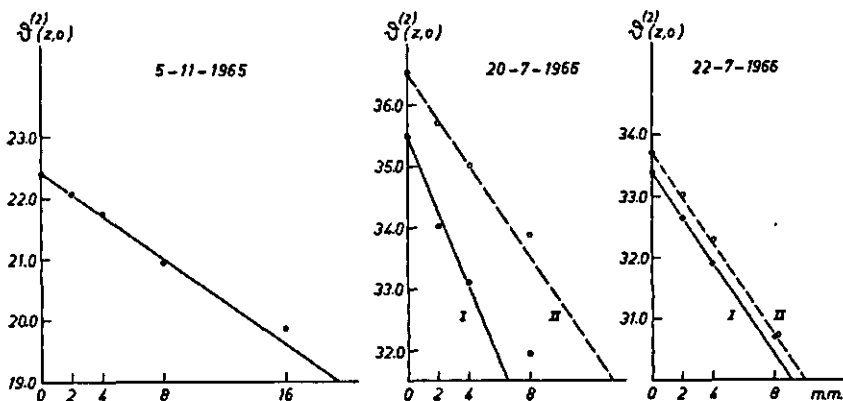


FIG. 2.13. Grafiek van de bodemtemperatuur $\Theta^{(2)}(z,0)$ uitgezet tegen de diepte (Tunis, 5-11-1965, 20-7-1966, 22-7-1966).

FIG. 2.13. Graph of the soil temperature $\Theta^{(2)}(z,0)$ against the depth. (Tunis, 5-11-1965, 20-7-1966, 22-7-1966).

$$\sqrt{a_2} = \sqrt{\lambda_2/C_2} = 0,185 \times \sqrt{\pi/2} \times (1 + 1/\alpha) \times 1/E = 0,358 \text{ (cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1})^{1/2}$$

$$C_2 = \sqrt{\lambda_2 C_2} / \sqrt{a_2} = 0,013 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\lambda_2 C_2} \times \sqrt{a_2} = 1,7 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

Metingen 20 en 22-7-1966 (08.30 resp. 08.00 uur). De toestand van het oppervlak van het proefterrein was op deze dagen geheel verschillend van die op 5-11-1965. De bovenlaag was uitgedroogd en vertoonde scheuring. De metingen op deze dagen in juli geven dan ook geheel andere waarden voor λ_2 en C_2 . Uit de registraties van de contacttemperaturen (figuur 2.10 en 2.11) zijn weer de grafieken ($\Theta^{(1)}(0,t)$ tegen $\sqrt{t}$) geconstrueerd (figuur 2.14 en 2.15). Voor 20-7-1966 volgt uit de berekeningen $\alpha = 0,642$ en $\Theta_{\frac{1}{2}}^{(2)} = 35,5^\circ\text{C}$. De warmtestroom

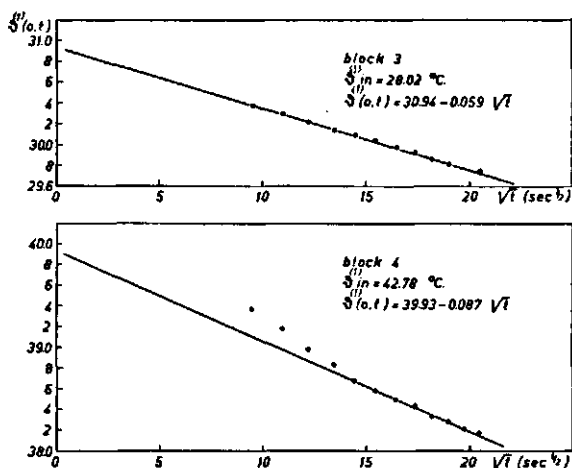


FIG. 2.14. Grafiek van de contacttemperatuur van de twee blokken $\Theta^{(1)}(0,t)$, na plaatsing op het aardoppervlak, uitgezet tegen $\sqrt{t}$ (Tunis, 20-7-1966).

FIG. 2.14. Graph of the contact temperature of the two blocks $\Theta^{(1)}(0,t)$, after placement on the soil surface, against $\sqrt{t}$ (Tunis, 20-7-1966).

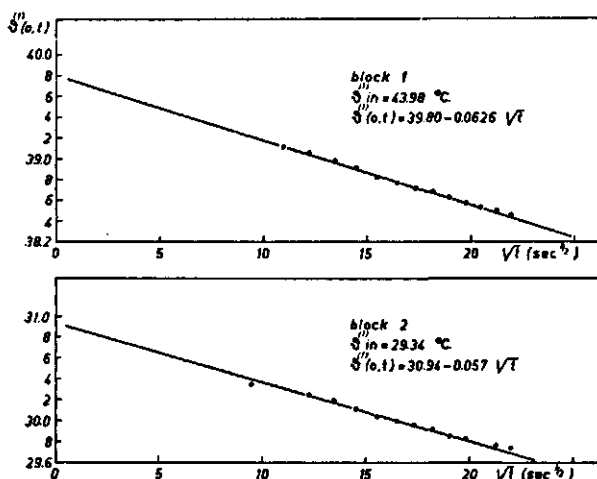


FIG. 2.15. Grafiek van de contacttemperatuur van de twee blokken $\theta^{(1)}(o,t)$, na plaatsing op het aardoppervlak, uitgezet tegen $\sqrt{t}$ (Tunis, 22-7-1966).

FIG. 2.15. Graph of the contact temperature of the two blocks $\theta^{(1)}(o,t)$, after placement on the soil surface, against $\sqrt{t}$ (Tunis, 22-7-1966).

in de bodem (H_{80}) was op het tijdstip $t = 0$: $1,65 \times 10^{-3} \text{ cal.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ ($= 69 \text{ Watt.m}^{-2}$). Voor de thermische constanten van de bovenlaag werd gevonden $C_2 = 0,25$ $\lambda_2 = 2,8 \times 10^{-4}$. De metingen van 22-7-1966 gaven als resultaat: $\alpha = 0,652$ $\theta_2^{in} = 33,4^{\circ}\text{C}$. $H_{80} = 1,19 \times 10^{-3} \text{ cal.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ ($= 50 \text{ Watt.m}^{-2}$), $C_2 = 0,23$ $\lambda_2 = 3,1 \times 10^{-4}$. De voor λ_2 en C_2 gevonden waarden op beide dagen stemmen goed overeen. Uit figuur 2.13 blijkt dat in een dergelijke uitgedroogde bovenlaag de temperaturen van plaats tot plaats zeer sterk kunnen verschillen, speciaal op 20-7-1966 wijken de bodemtemperaturen gemeten op enkele meters afstand van de plek waar de blokken geplaatst werden (lijn II) af van de aldaar gemeten temperaturen in de bovenste bodemlaag. Niettemin blijkt de, uit de gelijktijdige meting met 2 blokken, berekende oppervlaktetemperatuur, goed overeen te komen met de geëxtrapoleerde waarde uit het gemeten profiel.

Conclusie. Gezien de moeilijkheden bij het plaatsen van thermokoppels op een nauwkeurig bekende diepte nabij het aardoppervlak, verdient het aanbeveling de oppervlaktetemperatuur te berekenen uit de gelijktijdige meting met 2 blokken dicht bij elkaar geplaatst (Bij voorkeur blokken met een homogene temperatuur, waarbij één blok ca. 6°C lager en één blok ca. 6°C hoger in temperatuur dan het aardoppervlak). De voor de berekening van C_2 en λ_2 noodzakelijke gradiënt van de temperatuur in de bovenste bodemlaag is bij berekening van de oppervlaktetemperatuur en de meting van enkele temperaturen, dicht bij het oppervlak, ook nauwkeurig te bepalen.

2.4. DE WARMTEUITWISSELING IN DE ONDERSTE LUCHTLAGEN

De verticale warmtestroomdichtheid in de onderste luchtlagen hangt af van de temperatuurgradiënt, $\partial\theta/\partial z$ en de mate van turbulente uitwisseling. Deze turbulentie is in de eerste plaats afhankelijk van de windsnelheid, de temperatuurghaagdheid en de ruwheid van het bodemoppervlak. Een maat voor deze

turbulentie is de turbulente transportcoëfficiënt voor warmte K_H . Voor de warmtestroomdichtheid geldt:

$$H_{at} = K_H \rho c_p \partial \vartheta / \partial z \quad (2.10)$$

waarin ρ de dichtheid van de lucht en c_p de soortelijke warmte van de lucht bij constante druk is. De transportcoëfficiënt K_H wordt bepaald met behulp van de verticale profielen van de windsnelheid en de luchttemperatuur (zie hoofdstuk 3), K_H neemt toe met de windsnelheid en de ruwheid van het oppervlak.

Metingen. Uit de tabellen 2.2 en 2.3 blijkt het duidelijke verband tussen de berekende warmtestroomdichtheid (zie voor de berekening hoofdstuk 3) en de windsnelheid. Uit de metingen op 29/30-9-1965 te Tunis blijkt duidelijk het grote verschil in warmtestroomdichtheid overdag en 's nachts. Dit is het gevolg

TABEL 2.2: Warmtestroomdichtheid, H_{at} (Watt. m^{-2}) bij de diverse windsnelheidsgebieden

	gem. windsnelheid (m.sec ⁻¹)		H_{at}
hoogte (m)	6,40	0,10	
Smilde	1,6-1,9	0,3 -0,6	23,8
27/28-8-1964	0,8-1,1	0,2 -0,3	8,3
	0,4-0,8	< 0,2	0,5
Planken Wambuis	1,0-2,0	0,5 -1,0	3,4
30/31-3-1965	0,4-1,0	0,15-0,4	0,5
Emmen	0,8-1,4	0,3 -0,5	3,7
4/5-6-1965	0,6-0,8	0,2 -0,3	0,9
Smilde	0,4-0,6	0,2 -0,3	0,4
26/27-8-1964	0,2-0,4	0,1 -0,2	0,11
Planken Wambuis	0,3-0,5	0,1 -0,3	0,14
1/2-4-1965			

TABLE 2.2: Heat flux density, H_{at} (Watts. m^{-2}), at several ranges of the windspeed.

TABEL 2.3: Warmtestroomdichtheid, H_{at} (Watt. m^{-2}) gedurende een heldere dag en nacht, afhankelijk van de windsnelheid

	tijd	windsnelheid (m.sec ⁻¹)		H_{at}
Tunis	hoogte (m)	5,50	0,05	
29/30-9-1965				
	avond			
	18.00-20.00 h	2,0 -2,5	1,0 -2,0	8,1
	nacht			
	20.00-07.00 h	0,25-0,50	0,10-0,30	0,1
	dag			
	10.00-17.00 h	1,5 -3,5	1,0 -2,0	-18,7

TABLE 2.3: Heat flux density, H_{at} (Watts. m^{-2}), during a clear day and night, dependent on the windspeed

TABEL 2.4: Turbulente transportcoëfficiënt voor warmte, K_H ($\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$), afhankelijk van de windsnelheid

		gem. windsnelheid (m. sec ⁻¹)					K _H						
	hoogte (m)	5,50	0,05	1,0	-2,0	5,50	3,20	1,60	0,80	0,40	0,20	0,10	0,05
Tunis		2,0-2,5	0,10	1,0	-2,0	1712	1444	1243	838	761	584	437	342
29/30-9-1965		6,40	0,10	1,0	-2,0	6,40	1,63	1,63	0,42	0,42	0,14	0,14	0,05
Planken	hoogte (m)	1,0-2,0	0,5	-1,0	0,5	424	168	168	96	96	20	20	13
Wambuis		0,4-1,0	0,15-0,4	0,15	-0,4	68	48	48	30	30	13	13	0,05
30/31-3-1965		6,40	0,10	1,0	-2,0	6,40	3,20	1,60	0,80	0,40	0,20	0,10	0,05
Emmen	hoogte (m)	0,6-1,1	0,25-0,5	0,25	-0,5	1781	588	485	183	173	61	43	15
3/4-6-1965		6,40	0,10	1,0	-2,0	6,40	1,60	1,60	0,40	0,40	0,20	0,10	0,05
(bewolkt)		0,8-1,4	0,3	-0,5	0,3	519	231	231	138	138	63	55	26
Emmen	hoogte (m)	0,6-0,8	0,2	-0,3	0,2	106	38	38	21	21	7	6	3
4/5-6-1965		6,40	0,10	1,0	-2,0	6,40	2,40	1,60	0,40	0,40	0,20	0,10	0,05
Smilde	hoogte (m)	0,4-0,6	0,2	-0,3	0,2	17	8	4,4	2,7	2,7	1,4	1,2	0,05
26/27-8-1964													

TABLE 2.4: Transfer coefficient for heat, K_H ($\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$), dependent on the windspeed

TABEL 2.5: Temperatuurgradiënt ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$), afhankelijk van de windsnelheid en de hoogte

		gem. windsnelheid ($\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$)		$\partial\theta/\partial z$		
Tunis	hoogte (m)	5,50	0,10	5,50	0,10	0,05
29/30-9-1965						
avond		2,0 -2,5	1,0 -2,0	0,04	0,18	0,24
nacht		0,25 -0,5	0,1 -0,3	0,26	0,91	1,18
dag		1,5 -3,5	1,0 -2,0	-0,29	-1,96	-2,84
Smilde	hoogte (m)	6,40	0,10	6,40	0,10	
27/28-8-1964						
		1,6 -1,9	0,3 -0,6	0,06	0,36	
		0,8 -1,1	0,2 -0,3	0,01	0,22	
Planken	hoogte (m)	6,40	0,10	6,40	0,14	0,06
Wambuis						
30/31-3-1965		1,0 -2,0	0,5 -1,0	0,05	0,22	0,30
		0,4 -1,0	0,15 -0,4	0,05	0,38	0,60
Tunis	hoogte (m)	5,50	0,10	5,50	0,10	0,05
28/29-9-1965						
		0,5 -1,0	0,25 -0,5	0,014	0,24	0,40
		0,3 -0,5	0,15 -0,3	0,074	0,57	0,84
Emmen	hoogte (m)	6,40	0,10	6,40	0,10	0,05
4/5-6-1965						
		0,8 -1,4	0,3 -0,5	0,06	0,29	0,45
		0,6 -0,8	0,2 -0,3	0,09	0,43	0,66
Smilde	hoogte (m)	6,40	0,10	6,40	0,10	
26/27-8-1964						
		0,4 -0,6	0,2 -0,3	0,29	0,86	
		0,2 -0,4	0,1 -0,2	0,37	1,10	

TABLE 2.5: Temperature gradient ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$), dependent on the windspeed and the height above the surfaceTABEL 2.6: Warmtestroomdichtheid, H_{at} ($\text{Watt} \cdot \text{m}^{-2}$), tijdens overgangperiodes. Berekend uit de profielgegevens voor drie hoogten

tijd		H_{at}					
Tunis	hoogten (m)	5,50	5,50	3,20	3,20	1,60	0,80
29-9-1965		1,60	1,60	0,80	0,80	0,40	0,20
		0,40	0,10	0,20	0,05	0,10	0,05
	18.45 h	18,7	12,6	14,2	9,6	11,0	8,6
	19.15	17,4	13,2	16,0	12,1	15,2	14,4
	19.45	8,1	6,3	7,8	6,0	7,7	7,7
	20.15	4,8	3,6	4,4	3,2	4,0	3,7
30-9-1965	18.15 h	3,1	2,7	3,5	3,1	4,1	4,9
	18.45	3,1	2,6	3,4	2,9	3,8	4,4
	19.15	2,9	2,5	3,2	2,7	3,7	4,2
	19.45	12,6	9,8	12,0	9,2	11,7	11,4
	20.15	10,8	8,2	10,0	7,6	9,6	9,2
	20.45	3,6	2,8	3,5	2,7	3,5	3,5

TABLE 2.6: Heat flux density, H_{at} ($\text{Watts} \cdot \text{m}^{-2}$), during transition periods. Calculated from the profile data for three heights

van het feit dat overdag zowel de transportcoëfficiënt K_H , als de temperatuurgradiënt groter is.

Gemiddelde waarden voor K_H bij diverse windsnelheidsgebieden geeft tabel 2.4. Duidelijk blijkt hieruit ook de toename van de transportcoëfficiënt met de hoogte tengevolge van de toename van de windsnelheid met de hoogte. De temperatuurgradiënt (tabel 2.5) varieert ook met de windsnelheid, neemt echter af met de hoogte. Niettegenstaande deze afname met de hoogte van de temperatuurgradiënt neemt de warmtestroomdichtheid H_{at} toe met de hoogte aangezien de invloed van de sterke toename met de hoogte van K_H groter is. Tijdens de overgang van dag en nacht echter is H_{at} nagenoeg constant met de hoogte (tabel 2.6).

2.5. DE LATENTE WARMTEUITWISSELING

Van belang voor de energiebalans aan het aardoppervlak zijn ook de faseveranderingen van het water. Het betreft overgangen van:

- a. water naar waterdamp (verdampen)
- b. waterdamp naar water (condenseren)
- c. water naar ijs (bevriezen)
- d. ijs naar water (smelten)
- e. waterdamp naar ijs (sublimeren)

Ter illustratie van de warmtehoeveelheden die hierbij een rol spelen kunnen de volgende voorbeelden dienen.

Indien overdag, tijdens een onweer of door berekening, 10 mm ($1 \text{ gram} \cdot \text{cm}^{-2}$) regen valt, die 5°C koeler is dan de gemiddelde temperatuur van de vegetatie, dan is $5 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ of wel ca. 5 minuten zonnestraling noodzakelijk om de vegetatie weer tot de oorspronkelijke temperatuur te doen terugkeren. Indien echter van de 10 mm regen 1 mm verdampt, gaat ongeveer $60 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ of wel 60 minuten stralingsenergie verloren.

Bij een gemiddelde nettostraling van $5 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ gedurende een heldere nacht is de vorming van een ijslaagje van 1 mm dikte op het oppervlak van de planten voldoende om de uitstraling van $1\frac{1}{2}$ uur te compenseren.

Verdamping, dauw en rijp. Voor de warmtestroomdichtheid tengevolge van de verdamping geldt:

$$H_{ev} = L \rho K_E \partial \bar{q} / \partial z \quad (2.11)$$

waarin q = de absolute vochtigheid

L = de verdampingswarmte

Terwijl overdag tot $2/3$ van de toegevoerde stralingsenergie gebruikt wordt voor de verdamping, vindt gedurende heldere, windstille nachten nagenoeg geen verdamping plaats. Slechts tijdens nachten met een relatief langzame afkoeling tengevolge van grote windsnelheden (> 3 à $4 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ op 2 meter hoogte) of de aanwezigheid van bewolking, vindt verdamping plaats (MONTEITH, 1957).

De condensatiewarmte die vrij komt bij de vorming van dauw kan in belang-

rijke mate bijdragen tot de remming van de afkoeling tengevolge van de uitstraling. De maximale gemeten waarden variëren van 3–4 $\text{mg.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ (MONTEITH, 1957). Dit betekent een vrijkomende condensatiewarmte van 30–40 $\text{mcal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ (of ongeveer 20–30 Watt.m^{-2}).

Bij rijpvorming komt naast de condensatiewarmte ($600 \text{ cal.gram}^{-1}$) nog de bevroeringswarmte (ca. 80 cal.gram^{-1}) vrij. Van deze vrijkomende warmte wordt gebruik gemaakt bij de nachtvorstbestrijdingsmethode door middel van kunstmatige beregening. Hierbij blijft de temperatuur van de planten op 0°C .

Dat dauw en rijp invloed uitoefenen op de warmtebalans aan het aardoppervlak illustreert fig. 2.16. De op 30/31–3–1965 op het terrein 'Planken Wambuis' geregistreerde bodemtemperaturen vertonen, na een daling gedurende het eerste gedeelte van de nacht, een plotselinge geringe stijging door de vrijkomende condensatiewarmte bij de optredende dauwvorming. Vervolgens vindt weer een langzame daling plaats tot de sterke stijging na zonsopkomst.

2.6. DE WARMTESTROOM DOOR DE STOFWISSELING

Bij de assimilatie, die alleen gedurende de dag plaats vindt, wordt ongeveer $10 \text{ mcal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ($= 7,0 \text{ Watt.m}^{-2}$) verbruikt. Dit betekent dat max. 1% van de geabsorbeerde zonnestraling voor de assimilatie gebruikt wordt. Ten opzichte van de andere overdag werkzame warmtestromen is de warmtestroomdichtheid tengevolge van de assimilatie dus van geen betekenis.

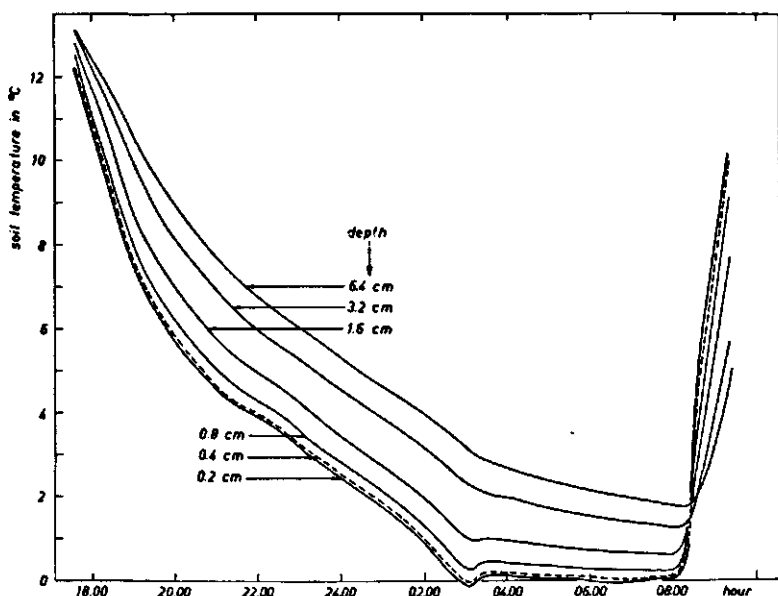


FIG. 2.16. Bodemtemperaturen in onbedekte grond (Planken Wambuis, 30/31–3–1965).
FIG. 2.16. Soil temperatures in bare soil (Planken Wambuis, 30/31–3–1965).

De bijdrage van de warmtestroomdichtheid tengevolge van de ademhaling, aan de nachtelijke warmtebalans wordt veelal verwaarloosd. De produktie van 1 gram CO_2 gaat vergezeld van een warmteafgifte van ca. 2,5 kcal. Uit de diverse onderzoeken (zie MONTEITH, 1957; SCHNELLE, 1965) is een redelijke schatting van de CO_2 produktie van een grasdek gedurende de nacht $0,2 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$, dit betekent een warmteafgifte van $0,5 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ (ca. 6 Watt.m⁻²). De ademhaling kan dus 's nachts in de warmtebalans voor een begroeid oppervlak van belang zijn.

3. TURBULENTIE EN STABILITEIT IN VERBAND MET DE WIND- EN TEMPERATUURPROFIELEN NABIJ HET AARDOPPERVLAK

3.1. CONVECTIE IN DE ONDERSTE LUCHTLAGEN

3.1.1. *Transportverschijnselen*

Bij de verplaatsing van de lucht wordt onderscheid gemaakt tussen drie soorten van transport.

De thermische uitwisseling of vrije convectie d.i. de verplaatsing van de lucht veroorzaakt door opwaartse krachten ('buoyancy forces'). Dit zijn de krachten uitgeoefend op een luchtdeeltje in het zwaartekrachtveld door de dichtheidsverschillen die er bestaan tussen het luchtdeeltje en de lucht er omheen.

De turbulente of dynamische uitwisseling of gedwongen convectie, de verplaatsing van de lucht veroorzaakt door mechanische krachten tengevolge van de wind.

De verplaatsing van de lucht door aanvoer van elders, de advection.

3.1.2. *Turbulent transport*

De atmosfeer is in het algemeen in turbulente beweging, uitgezonderd dicht bij het aardoppervlak, bij een stabiele opbouw van de luchtlagen en bij zeer geringe windsnelheden. Bij turbulente beweging verloopt de stroming van de lucht niet ongestoord in banen, maar op grillige, onsystematische wijze. Een belangrijk kenmerk van turbulentie is de menging die het veroorzaakt. De lucht die, op een schijnbaar willekeurige wijze, verplaatst wordt in luchtpakketjes of 'eddies' transporteert op deze wijze met eenzelfde pakketje grootheden als warmte, hoeveelheid van beweging, CO_2 enz., zodat de verschillende eigenschappen snel van de ene plaats van de atmosfeer naar een andere overgebracht worden.

Bij de discussie van turbulent transport stellen we het volgende geïdealiseerde geval: de atmosferische grenslaag bevindt zich boven een vlak, uniform oppervlak en de toestand is stationair, d.w.z. de gemiddelde eigenschappen van de lucht (afgezien dus van de turbulente fluctuaties) veranderen niet met de tijd (VAN WIJK, 1965).

De netto turbulente flux van een grootheid is afhankelijk van de hoogte boven het oppervlak. De gemiddelde waarden worden berekend over een periode die groot genoeg is om de turbulente fluctuaties uit te middelen (10–30 minuten). Het assenstelsel wordt zodanig gekozen dat de x -as valt in de gemiddelde windrichting, de y -as in het horizontale vlak loodrecht op de x -as en de z -as verticaal. De corresponderende componenten van de windsnelheid zijn dan resp. u , v , en w . Voor de windsnelheid in de x -richting geldt: $u = \bar{u} + u'$, waarin $\bar{u}$ de gemiddelde waarde en u' de fluctuerende turbulente afwijking van de gemiddelde windsnelheid is. Ook in de y en de z -richting komen dergelijke fluctuaties voor: $v = \bar{v} + v'$ en $w = \bar{w} + w'$.

De hoeveelheid van beweging in horizontale richting per volume eenheid lucht is ρu . De snelheid van verticaal transport van deze grootheid door een

horizontaal oppervlak is, per oppervlakte- en tijdseenheid, gelijk aan $\rho u w'$. De netto turbulente flux is nu over een gegeven periode gelijk aan $\overline{\rho u w'}$. Dit transport van hoeveelheid van beweging per oppervlakteëenheid is naar het aardoppervlak gericht en moet gelijk zijn aan de horizontale schuifspanning door de wind op het aardoppervlak uitgeoefend. Er geldt:

$$\tau = - \overline{\rho u w'} \quad (3.1)$$

Overeenkomstig geldt voor de verticale warmtestroom:

$$H_{at} = c_p \overline{\rho \vartheta w'} \quad (3.2)$$

Deze energiestromen worden ook wel weergegeven in een schaal waarin τ en ϑ worden vervangen door u_* en ϑ_* via de vergelijkingen:

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (3.3)$$

$$H_{at} = c_p \rho u_* \vartheta_* \quad (3.4)$$

In de stationaire en horizontaal uniforme toestand zijn u_* (de z.g. wrijvings-snelheid) en ϑ_* onafhankelijk van de hoogte.

De turbulente transportcoëfficiënten, voorgesteld door K_M en K_H , treden bij het turbulente transport in de plaats van de overeenkomstige moleculaire transportcoëfficiënten. Ze worden gedefinieerd door:

$$\tau = \rho K_M \partial \bar{u} / \partial z \quad (3.5)$$

en

$$H_{at} = c_p \rho K_H \partial \bar{\vartheta}_p / \partial z \quad (3.6)$$

in (3.6) is ϑ_p de potentiële temperatuur.

$$\partial \vartheta_p / \partial z = \partial \bar{\vartheta} / \partial z + \Gamma \quad (3.7)$$

$\Gamma = 0,01^\circ \text{C} \cdot \text{m}^{-1}$, de correctie om de afname van de atmosferische druk bij toenemende hoogte te compenseren. De potentiële temperatuur is voor de geringe verplaatsingen in hoogte, waar wij mee te maken hebben, praktisch gelijk aan de gemiddelde gemeten temperatuur.

3.1.3 De neutrale toestand

De thermisch neutrale toestand, die vooral vaak bij vrij sterke wind optreedt, is strikt genomen gekenmerkt door: $H_{at} = 0$ en $\partial \vartheta_p / \partial z = 0$. De opstijgende krachten die in verband staan met temperatuurfluctuaties zijn te klein om de luchtbeweging te beïnvloeden en er heerst een toestand van turbulentie veroorzaakt door de wind.

De klassieke 'mengweglengte-theorie' geeft aan dat in dit geval bij verticale

verplaatsing van een luchtpakketje over een afstand l , door een gradiënt $\partial u/\partial z$, waarbij het pakketje de waarde u van zijn beginhoogte behoudt, de horizontale snelheid na verplaatsing $l \partial u/\partial z$ verschilt met de snelheid van zijn nieuwe omgeving. Er geldt dan de vergelijking:

$$\tau = \rho l^2 (\partial u/\partial z)^2 \quad (3.8)$$

of bij gelijkstellen van l aan kz , waarin k de constante van VON KARMAN is ($k = 0,41$; HINZE, 1959):

$$\tau = \rho k^2 z^2 (\partial u/\partial z)^2 \quad (3.9)$$

De vorm van het gemiddelde windprofiel is dan:

$$\partial u/\partial z = u_* / kz \quad (3.10)$$

integratie geeft het bekende logaritmische windprofiel:

$$u = u_* / k \ln (z/z_0) \quad (3.11)$$

met z_0 , de ruwheid van het oppervlak, gelijk aan de hoogte boven het aardoppervlak waarop u gelijk aan nul wordt volgens bovenstaande vergelijking. In de praktijk wordt de profielvorm vlak boven de grond of vegetatie echter op zeer onregelmatige wijze verstoord, zodat een nauwkeurige bepaling van z_0 slechts in enkele gevallen mogelijk is.

Uit bovenstaande theorie volgt voor de neutrale toestand ook:

$$K_M = K_H = k z u_* \quad (3.12)$$

3.1.4. Toestand van stabiel en onstabiel evenwicht

De neutrale toestand wordt benaderd indien de warmtestroom H_{ai} en de potentiële temperatuurgradiënt $\partial \vartheta_p/\partial z$ zeer klein zijn en het windeffect overheerst. Deze situatie is karakteristiek voor een weerstoestand met dichte bewolking en sterke wind. In het algemeen echter is de atmosfeer thermisch gelaagd. Tijdens een heldere dag wordt het aardoppervlak sterk verwarmd door de zonnestraling. De temperatuurgradiënt $\partial \vartheta/\partial z$ is negatief, z.g. 'lapse' toestand, en de atmosferische turbulente warmtestroom is van het aardoppervlak af gericht. Tijdens een heldere nacht daarentegen, koelt het aardoppervlak sterk af door de uitstraling. De temperatuur stijgt met de hoogte (inversie toestand) en de warmtestroom is naar het aardoppervlak toe gericht.

Beschouwen we nu het dynamische effect van een thermisch gelaagde opbouw van de onderste luchtlagen aan een luchtpakketje dat verticaal verplaatst wordt met behoud van zijn oorspronkelijke potentiële temperatuur, dan blijkt dat het pakketje, door de opstijgende krachten tengevolge van dichtheidsverschillen in een 'lapse' toestand, de neiging vertoont zich over grotere afstand te verplaatsen dan in een neutrale atmosfeer het geval is, terwijl in een inversie

toestand de verplaatsing juist kleiner is. 'Lapse' – en inversietoestanden worden daarom vaak toestanden van onstabiel resp. stabiel evenwicht genoemd. Turbulente bewegingen zullen bij onstabiel evenwicht versterkt en bij stabiel evenwicht verzwakt worden.

Voor een stationaire toestand van turbulentie in de onderste luchtlagen kan de volgende energievergelijking worden geschreven:

$$\partial F / \partial z + \epsilon = \tau \partial u / \partial z + g H_{at} / c_p \theta \quad (3.13)$$

waarin:

g = de versnelling van de zwaartekracht

θ = de absolute temperatuur ($^{\circ}\text{K}$)

In deze vergelijking, voor een volume-eenheid lucht, hebben de twee termen aan de linkerkant betrekking op het verbruik van energie door turbulentie, de eerste is de divergentie van de verticale fluxdichtheid F en ϵ is de term die de dissipatie door visceuse krachten aangeeft. De twee termen aan de rechterkant geven resp. weer de productie van mechanische energie door de wind en de werking van de opstijgende krachten in het zwaartekrachtveld.

De verhouding van de beide laatste termen is een maat voor het relatieve effect van de thermische krachten. Hiervoor wordt gebruikt de stabiliteitsparameter R_t , het getal van Richardson:

$$R_t = \frac{(g/\bar{\theta}) \partial \theta / \partial z}{(\partial \bar{u} / \partial z)^2} \quad (3.14)$$

Bij een inversie is R_t positief en voor een gegeven warmtestroom zijn de turbulente transportcoëfficiënten kleiner en de gradiënten groter dan bij een onstabiele toestand.

Een andere index voor de atmosferische stabiliteit wordt gedefinieerd met een schaallengte L , door combinatie van de relevante fysische parameters (MONIN en OBUKHOV, 1954):

$$L = \frac{u_*^3 c_p \bar{\rho} \bar{\theta}}{kg H_{at}} \quad (3.15)$$

Bij stabiele toestanden is L positief, bij onstabiele negatief.

3.2. WIND- EN TEMPERATUURPROFIELEN

3.2.1. Algemene theorie

Uit diverse onderzoeken is gebleken dat in bijna neutrale omstandigheden het windprofiel in vele gevallen voldoet aan het logaritmische profiel, u uitgezet tegen $\ln z$. Er bestaat experimenteel bewijs dat ook het temperatuurprofiel een dergelijke vorm heeft in deze gevallen.

Bij onstabiliteit of stabiliteit van de atmosfeer echter, wijkt, speciaal op grotere hoogte, het windprofiel af van de logarithmische vorm.

Onder de vele empirische uitdrukkingen vindt men de volgende algemene vorm (DEACON, 1949):

$$\partial u / \partial z = z^{-\beta} \quad (3.16)$$

waarin β een parameter, afhankelijk van R_i is. Bij stabiele opbouw van de atmosfeer geldt $\beta < 1$. MONIN en OBUKHOV (1954) geven de afwijking van het neutrale windprofiel in de algemene vorm:

$$\partial u / \partial z = u_* / k z \Phi_u(z/L) \quad (3.17)$$

waarin Φ_u een functie is die nadert tot 1 indien z/L zeer klein wordt.

MONIN en OBUKHOV veronderstellen dat deze functie voorgesteld kan worden door een machtreeks:

$$\Phi_u = 1 + \alpha_1(z/L) + \alpha_2(z/L)^2 + \dots \quad (3.18)$$

en dat het in vele gevallen voldoende is alleen de lineaire term in rekening te brengen:

$$\partial u / \partial z = u_* / k z (1 + \alpha z/L) \quad (3.19)$$

bij integratie geeft deze benadering het zg. logarithmisch-lineaire windprofiel:

$$u = u_* / k \{ \ln(z/z_0) + \alpha(z-z_0)/L \} \quad (3.20)$$

In de laatste decade is aanzienlijke vooruitgang geboekt bij de bepaling van de niet-neutrale profielen. Het onderzoek heeft echter voornamelijk betrekking op de onstabiele toestand en algemene overeenstemming over de beste benadering en de keuze van de 'constante' α is nog niet bereikt; TAYLOR (1960), PRIESTLEY (1960), SWINBANK (1960), LUMELEY en PANOFKY (1964).

3.2.2. Het windprofiel bij stabiel evenwicht

In hun oorspronkelijk werk stelden MONIN en OBUKHOV voor:

$$\Phi(z/L) = 1 + \alpha z/L = (1 - \alpha Rf)^{-1} \quad (3.21)$$

waarin Rf het Richardson flux getal is:

$$Rf = - \frac{g H_{at}}{c_p \rho \bar{\theta} u_*^2 \partial \bar{u} / \partial z} \quad (3.22)$$

voor de transportcoëfficiënten geldt in dit geval:

$$K_H = K_M = k z u_* (1 + \alpha z/L)^{-1} = k z u_* (1 - \alpha R_i) \quad (3.23)$$

De passende waarden die, bij stabiel evenwicht, voor α gevonden zijn variëren van 5 tot 7 (ELLISON, 1957; TAYLOR, 1960; WEBB, 1965). De limietwaarde voor R_i , de waarde waarboven geen turbulentie meer gevonden wordt, varieert dan tussen 0,2 en 0,15.

Veelal wordt aangenomen dat K_H en K_M een gelijke waarde bezitten, daar echter de verhouding K_H/K_M bij stabiel evenwicht niet voldoende bekend is (veelal is de verhouding K_H/K_M niet gelijk aan 1), is het juister een lengte L' te introduceren. L' wordt gedefinieerd door:

$$L' = \alpha' L / \alpha \quad (3.24)$$

en

$$\alpha' = K_H / K_M \alpha \quad (3.25)$$

De vergelijking van MONIN-OBUKHOV wordt dan:

$$\Phi(z/L) = 1 + \alpha' z/L' = (1 - \alpha' R_i)^{-1} \quad (\text{MCVEHIL, 1964}) \quad (3.26)$$

Uit gemeten windsnelheden op 3 hoogten zijn nu u_* en α'/L' te bepalen:

$$u_2 - u_1 = u_*/k [\ln z_2/z_1 + (z_2 - z_1) \alpha'/L'] \quad (3.27)$$

$$\frac{u_3 - u_1}{u_2 - u_1} = \frac{\ln z_3/z_1 + (z_3 - z_1) \alpha'/L'}{\ln z_2/z_1 + (z_2 - z_1) \alpha'/L'} \quad (3.28)$$

de indices 1, 2 en 3 hebben betrekking op de diverse meetniveau's boven het aardoppervlak.

Aangezien blijkt dat deze log-lineaire benadering alleen overeenstemt met de waarnemingen bij stabiele opbouw en kleine R_i getallen ($z/L < 1$), is een tweede benadering van de wind- en temperatuurprofielen gebruikt: het exponentiële windprofiel (SWINBANK, 1964).

SWINBANK introduceert een nieuwe niet-lineaire hoogtevariabele X die de eigenschap heeft dat de grafiek u tegen $\log X$ altijd een rechte lijn geeft, ongeacht de stabiliteit. De definitie van X wordt dus gegeven door de vergelijking:

$$\partial u_x / \partial X = u_*/kX \quad (3.29)$$

De hypothese is nu dat het rechter lid van formule 3.13 weergegeven kan worden met één pseudo scheerkrachtterm:

$$\tau \partial u / \partial z + g H_{at} / c_p \theta = \tau \partial u / \partial X \quad (3.30)$$

uit de vergelijkingen (3.29) en (3.30) volgt dan:

$$dX/dz - X/L = 1 \quad (3.31)$$

of bij integratie met de randvoorwaarde $X \rightarrow 0$ met z :

$$X = L [\exp z/L - 1] \quad (3.32)$$

Voor het windprofiel volgt dan:

$$\partial u / \partial z = u_* / k L [1 - \exp(-z/L)]^{-1} \quad (3.33)$$

Uit de metingen van de windsnelheid op 3 hoogten kunnen nu u_* en L bepaald worden met behulp van de vergelijkingen:

$$u_2 - u_1 = u_* / k \ln \left[\frac{\exp(z_2/L) - 1}{\exp(z_1/L) - 1} \right] \quad (3.34)$$

$$\frac{u_3 - u_1}{u_2 - u_1} = \frac{\ln \left[\frac{\exp(z_3/L) - 1}{\exp(z_1/L) - 1} \right]}{\ln \left[\frac{\exp(z_2/L) - 1}{\exp(z_1/L) - 1} \right]} \quad (3.35)$$

Met behulp van wind- en temperatuurprofielen kunnen hierna H_{at} , K_H en K_M bepaald worden.

3.2.3 Gemeten en berekende wind- en temperatuurprofielen

Op de vier proefterreinen werden de windsnelheden en luchttemperaturen gemeten op 8 of 4 hoogten boven het aardoppervlak. Bij 8 meetniveau's was de verdeling meestal: 0,05; 0,10; 0,20; 0,40; 0,80; 1,60; 3,20 en 6,40 meter, bij gebruikmaking van 4 meetniveau's: 0,10; 0,40; 1,60 en 6,40 meter.

De meetcyclus bedroeg in de meeste gevallen 5 minuten, d.w.z. op iedere hoogte werd om de 5 minuten de windsnelheid en de luchttemperatuur gemeten. De resultaten van deze metingen werden gebruikt om gemiddelde wind- en temperatuurprofielen te berekenen over een periode van 30 minuten.

Als algemene vorm van de profielen werd gekozen:

$$\partial u / \partial z = A z^{-B} \text{ en } \partial \vartheta / \partial z = C z^{-D}$$

waarin A , B , C en D , voor een gegeven periode, constant zijn met de hoogte en de tijd (A en C in $\text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$).

Plaatselijke verstoring van het evenwicht of incidentele gebreken in de meetinstrumenten kunnen grote afwijkingen tot gevolg hebben tussen de gemeten en de uit het theoretische windprofiel berekende waarden voor de windsnelheid en de luchttemperatuur. Tijdens heldere nachten echter, werd over het algemeen een goede overeenstemming gevonden zoals blijkt uit de resultaten van de

TABEL 3.1: Afwijkingen (in $0,01^{\circ}\text{C}$) tussen gemeten en berekende luchttemperaturen; Emmen, 4/5-6-1965. Verschillen in absolute waarde.

tijd	meethoogte (m)				
	3,20	1,60	0,40	0,10	0,05
20.30 h	2	2	6	12	3
21.00	8	4	7	2	0
21.30	7	3	39	14	7
22.00	13	5	7	1	6
22.30	1	1	5	11	0
23.00	24	11	20	1	6
23.30	2	3	0	9	3
00.00	11	18	2	4	16
00.30	3	0	15	5	24
01.00	8	12	13	1	9
01.30	14	1	8	1	1
02.00	4	9	3	0	24
02.30	0	3	12	5	20
03.00	0	3	12	2	1
03.30	7	7	3	1	0
04.00	1	1	0	1	5
04.30	6	12	9	15	3
05.00	6	12	9	1	4

TABLE 3.1: *Differences (in 0.01°C) between measured and calculated air temperatures; Emmen, 4/5-6-1965. Differences in absolute value.*

TABEL 3.2: Afwijkingen (in $\text{cm}.\text{sec}^{-1}$) tussen gemeten en berekende windsnelheden; Emmen, 4/5-6-1965. Verschillen in absolute waarde.

tijd	meethoogte (m)				
	3,20	1,60	0,40	0,10	0,05
20.30 h	15	1	8	0	15
21.00	13	0	4	1	7
21.30	26	7	10	3	5
22.00	3	1	0	0	8
22.30	1	3	2	1	5
23.00	1	3	3	1	8
23.30	1	0	0	2	10
00.00	2	0	2	0	8
00.30	12	8	4	3	1
01.00	6	1	2	0	3
01.30	5	1	2	1	6
02.00	4	1	3	0	0
02.30	4	3	2	0	3
03.00	12	2	7	0	6
03.30	6	5	6	2	13
04.00	5	2	5	1	2
04.30	2	4	1	1	4
05.00	6	0	2	0	5

TABLE 3.2: *Differences (in $\text{cm}.\text{sec}^{-1}$) between measured and calculated windspeeds; Emmen, 4/5-6-1965. Differences in absolute value.*

TABEL 3.3: Afwijkingen (in 0,01 °C) tussen gemeten en berekende luchttemperaturen; Planken Wambuis, 30/31-3-1965. Verschillen in absolute waarde.

tijd	meethoogte (m)							
	6,40	3,20	1,63	0,82	0,42	0,23	0,14	0,06
18.15 h	3	6	8	12	1	8	11	1
18.45	4	1	6	3	0	1	7	3
19.15	9	5	2	5	26	0	4	2
19.45	28	13	39	0	9	8	9	2
20.15	2	3	13	23	12	11	7	6
20.45	19	3	20	17	3	0	7	5
21.15	3	7	12	6	7	12	8	1
21.45	4	9	18	9	1	8	6	1
22.15	6	8	17	3	11	3	4	6
22.45	29	20	13	6	8	6	5	2
23.15	2	15	11	4	2	1	0	0
23.45	32	14	4	22	3	9	4	1
00.15	4	4	13	6	0	0	3	7
00.45	29	11	14	4	13	3	7	1
01.15	12	17	10	13	3	0	7	2
01.45	22	22	22	0	13	2	8	7
03.45	32	14	41	4	15	6	1	11
04.15	14	7	32	1	12	15	2	3
04.45	25	7	26	4	11	8	1	5
05.15	41	14	39	14	9	6	2	5
05.45	25	17	47	12	10	15	17	2
06.15	17	12	36	8	7	18	13	1
06.45	22	25	19	9	5	1	6	1

TABLE 3.3: Differences (in 0.01 °C) between measured and calculated air temperatures; Planken Wambuis, 30/31-3-1965. Differences in absolute value.

nachten 4/5-6-1965 (tabel 3.1 en 3.2), 30/31-3-1965 (tabel 3.3 en 3.4) en 26/27-8-1964 (tabel 3.5 en 3.6) resp. gemeten op de terreinen bij Emmen, het 'Planken Wambuis' en Smilde. Voor de gemiddelde windsnelheden en luchttemperaturen op de verschillende hoogten wordt verwezen naar de in hoofdstuk 5 weergegeven en besproken grafieken. Bij Emmen werd gemeten boven de zwart gemaakte grond.

De constanten A, B, C en D. De tabellen 3.7 en 3.8 geven de waarden voor de constanten tijdens heldere nachten met weinig wind. Tijdens de nacht met zeer geringe windsnelheden (26/27-8-1964) varieert *A* tussen 0,03 en 0,07; factor *C* tussen 0,5 en 0,7 met een daling tot 0,3 aan het eind van de nacht. De factoren *B* en *D* vertonen een grotere spreiding, resp. 0,2-0,6 en 0,1-0,4. Door het iets hoger gelegen windsnelheidsniveau tijdens de nachten 30/31-3-1965 en 4/5-6-1965 zijn de waarden voor *A* ook hoger (0,1-0,2), de waarden voor *C* daarentegen zijn, vergeleken met de metingen in Smilde, veel lager (0,1-0,2). Ook tijdens deze nachten werd een grotere spreiding voor *B* en *D* gevonden, resp. 0,1-0,5 en 0,2-0,6.

TABEL 3.4: Afwijkingen (in $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$) tussen gemeten en berekende windsnelheden; Planken Wambuis, 30/31-3-1965. Verschillen in absolute waarde.

tijd	meethoogte (m)							
	6,40	3,20	1,63	0,82	0,42	0,23	0,14	0,06
18.15 h	2	39*	4	54	13	2	8	26
18.45	34*	66*	2	7	8	4	7	15
19.15	71*	4	15	6	9	9	2	1
19.45	0	11	7	8	9	5	2	1
20.15	34	31	8	3	7	3	8	9
20.45	22	26	8	6	2	2	9	4
21.15	27	30	2	5	4	2	4	5
21.45	3	52*	15	15	9	1	3	8
22.15	—	28	18	7	16	6	6	0
22.45	48*	7	17	11	6	7	0	1
23.15	12	31*	6	14	27	10	20	4
23.45	1	27	11	8	3	11	3	7
00.15	—	3	22	10	18	11	3	1
00.45	18	22	28	17	16	2	7	2
01.15	—	12	7	2	6	3	1	0
02.45	35*	3	1	2	1	6	1	1
03.15	17	1	0	3	1	2	1	2
03.45	8	13	1	3	2	4	0	3
04.15	40*	31	0	0	2	0	2	3
04.45	21	16	3	0	1	3	3	0
05.15	24	29	4	3	4	1	5	4
05.45	21	14	2	4	1	3	2	2
06.15	44	29	3	3	1	1	4	3

TABLE 3.4: Differences (in $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$) between measured and calculated windspeeds; Planken Wambuis, 30/31-3-1965. Differences in absolute value.

Bij de waarden gemerkt met * lagen de windsnelheden buiten het nauwkeurige meetbereik van de thermokoppelanemometers.

Voor een gedeeltelijk bewolkte nacht (tabel 3.9) zijn de volgende waarden gevonden; *A* en *C*: 0,01–0,2; *B* en *D*: 0,4–0,8. Het verloop van de constanten gedurende een nacht met relatief hoge windsnelheden geeft tabel 3.10. De gevonden waarden zijn: *A* = 0,05–0,25; *C* = 0,04–0,1 (avond) en 0,2–0,5 (nacht); *B* = 0,4–0,7 en *D* = 0,2–0,5.

Alhoewel er soms een aanzienlijke spreiding in de gevonden waarden voor de constanten bestaat, is er ook onder deze zeer stabiele toestanden een duidelijk verband tussen de berekende profielen. De factor *A* blijkt afhankelijk te zijn van de grootte van de windsnelheid, bij hogere windsnelheden wordt *A* groter. De factor *C*, uit het temperatuurprofiel, wordt daarentegen kleiner bij hogere windsnelheden. De factoren *B* en *D*, die de vorm en de kromming van de profielen aangeven, vertonen over het geheel gezien een iets grotere spreiding, gemiddeld echter passen ze in het gebied van 0,2–0,6; tijdens gedeeltelijk bewolkte nachten in het gebied: 0,4–0,8.

TABEL 3.5: Afwijkingen (in $0,01^{\circ}\text{C}$) tussen gemeten en berekende luchttemperaturen; Smilde 26/27-8-1964. Verschillen in absolute waarde.

tijd	meethoogte (m)					
	2,40	1,60	0,80	0,40	0,20	0,10
19.00 h	19	7	45	12	12	1
19.30	20	17	0	15	8	11
20.00	20	30	14	4	16	9
20.30	5	25	1	3	8	5
21.00	2	12	1	2	10	7
21.30	7	4	8	2	8	5
22.00	3	4	12	6	6	2
22.30	7	13	6	15	0	2
23.00	9	9	0	3	3	2
23.30	13	5	12	4	7	5
00.00	4	17	6	32	7	2
00.30	16	4	2	7	5	1
01.00	6	14	11	17	4	2
01.30	6	34	13	8	10	2
02.00	0	3	5	14	7	2
02.30	8	14	7	2	5	2
03.00	9	12	18	1	1	3
03.30	10	14	3	25	1	2
04.00	25	2	8	4	15	20
04.30	20	24	5	15	13	5
05.00	0	31	2	17	9	6
05.30	12	28	12	13	7	3

TABLE 3.5: Differences (in 0.01°C) between measured and calculated air temperatures; Smilde, 26/27-8-1964. Differences in absolute value.

TABEL 3.6: Afwijkingen (in $\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$) tussen gemeten en berekende windsnelheden; Smilde 26/27-8-1964. Verschillen in absolute waarde.

tijd	meethoogte (m)					
	2,40	1,60	0,80	0,40	0,20	0,10
19.00 h	3	0	3	3	2	1
19.30	2	5	0	2	2	1
20.00	0	7	3	1	1	0
20.30	0	6	0	0	1	0
21.00	1	1	5	1	2	1
21.30	1	3	2	0	1	2
22.00	2	1	2	1	0	0
22.30	3	0	2	0	0	2
23.00	3	1	3	2	0	2
23.30	1	1	5	1	0	3
00.00	0	0	1	1	1	0
00.30	3	7	1	1	2	0
01.00	7	2	4	1	1	2
01.30	1	2	7	0	2	2
02.00	2	6	3	0	1	0
02.30	3	3	5	1	1	3
03.00	1	2	0	2	3	0
03.30	0	1	2	2	1	0
04.00	1	6	5	3	2	1
04.30	0	7	2	2	3	1
05.00	3	4	4	2	0	2
05.30	4	2	5	3	2	4

TABLE 3.6: Differences (in $\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$) between measured and calculated windspeeds; Smilde, 26/27-8-1964. Differences in absolute value.

TABEL 3.7: Het verloop van de constanten A, B, C en D uit de formules voor de wind- en temperatuurprofielen

	tijd	A	B	C	D
Smilde 26/27-8-1964	19.00 h	0,04	0,11	0,90	0,22
	19.30	0,04	0,32	0,71	0,19
	20.00	0,03	0,64	0,75	0,32
	20.30	0,02	0,57	0,60	0,30
	21.00	0,05	0,38	0,61	0,27
	21.30	0,03	0,53	0,55	0,17
	22.00	0,04	0,39	0,66	0,23
	22.30	0,04	0,18	0,61	0,06
	23.00	0,04	0,29	0,60	0,32
	23.30	0,04	0,30	0,53	0,27
	24.00	0,04	0,39	0,50	0,28
	00.30	0,05	0,46	0,52	0,33
	01.00	0,06	0,25	0,51	0,32
	01.30	0,05	0,19	0,52	0,40
	02.00	0,07	0,38	0,52	0,22
	02.30	0,04	0,20	0,43	0,40
	03.00	0,01	0,44	0,44	0,29
	03.30	0,04	0,29	0,46	0,17
	04.00	0,07	0,37	0,34	0,34
	05.00	0,07	0,03	0,38	0,35
	05.30	0,07	0,18	0,35	0,08

TABLE 3.7: *Values for the constants A, B, C and D from the formules for the wind and temperature profiles*

TABEL 3.8: Het verloop van de constanten A, B, C en D uit de formules voor de wind- en temperatuurprofielen

	tijd	A	B	C	D
Planken Wambuis 30/31-3-1965	18.45 h	0,13	0,30	0,06	0,51
	19.45	0,12	0,09	0,22	0,46
	20.15	0,08	0,40	0,13	0,33
	20.45	0,11	0,25	0,17	0,46
	21.15	0,12	0,17	0,11	0,41
	21.45	0,18	0,22	0,11	0,48
	23.15	0,18	0,20	0,10	0,48
	23.45	0,15	0,07	0,13	0,14
	00.45	0,16	0,25	0,11	0,20
	02.15	0,11	0,08	0,22	0,56
	02.45	0,09	0,10	0,14	0,53
	04.15	0,11	0,11	0,12	0,47
	05.15	0,04	0,10	0,11	0,57
	06.45	0,04	0,32	0,12	0,54
Emmen 4/5-6-1965	20.30 h	0,15	0,52	0,09	0,57
	21.00	0,21	0,33	0,15	0,16
	21.30	0,19	0,29	0,13	0,52
	22.00	0,09	0,49	0,30	0,21
	22.30	0,12	0,28	0,21	0,30
	23.30	0,07	0,55	0,19	0,37
	24.00	0,12	0,44	0,13	0,53
	00.30	0,13	0,19	0,10	0,66
	01.00	0,11	0,27	0,20	0,43

TABLE 3.8: *Values for the constants A, B, C and D from the formules for the wind and temperature profiles*

TABEL 3.9: Het verloop van de constanten A, B, C en D uit de formules voor de wind- en temperatuurprofielen

	tijd	A	B	C	D
Tunis	17.45 h	0,04	0,86	-0,07	0,61
28/29-9-1965	18.15	0,21	0,62	-0,01	0,89
(Bewolking	18.45	0,20	0,52	-0,01	1,81
2/10-8/10)	19.15	0,20	0,51	0,01	0,81
	19.45	0,22	0,51	0,01	0,67
	22.45	0,10	0,55	0,05	0,72
	23.15	0,14	0,40	0,08	0,61
	23.45	0,10	0,36	0,03	0,84
	00.15	0,01	0,68	0,02	0,78
	00.45	0,02	0,73	0,07	0,68
	01.45	0,03	0,62	0,03	0,81
	02.15	0,05	0,54	0,11	0,70
	02.45	0,10	0,35	0,18	0,44
	03.15	0,06	0,50	0,24	0,44
	04.15	0,04	0,64	0,04	0,66
	05.15	0,01	0,79	0,28	0,40
	05.45	0,02	0,52	0,14	0,67

TABLE 3.9: Values for the constants A, B, C and D from the formules for the wind and temperature profiles

TABEL 3.10: Het verloop van de constanten A, B, C en D uit de formules voor de wind- en temperatuurprofielen

	tijd	A	B	C	D
Tunis	18.45 h	0,25	0,54	0,09	0,33
29/30-9-1965	19.15	0,24	0,64	0,08	0,32
	19.45	0,19	0,66	0,07	0,56
	20.15	0,16	0,63	0,10	0,48
	20.45	0,19	0,44	-	-
	21.15	0,07	0,55	-	-
	21.45	0,06	0,50	0,45	0,33
	22.15	0,05	0,19	0,58	-
	22.45	0,04	0,44	0,47	0,44
	00.45	0,01	0,86	0,80	0,14
	01.45	0,03	0,57	0,54	0,18
	03.45	0,12	0,74	0,30	0,46
	05.45	0,03	0,52	0,21	0,47
	06.15	0,05	0,60	0,25	0,47
	18.45	0,14	0,73	0,04	0,37
	19.15	0,14	0,73	0,05	0,20
	19.45	0,22	0,66	0,04	0,16
	20.15	0,20	0,65	0,05	0,45
	20.45	0,14	0,67	0,09	0,29
	21.15	0,09	0,72	0,13	0,40

TABLE 3.10: Values for the constants A, B, C and D from the formules for the wind and temperature profiles

3.2.4. Stabiliteitsparameter en profielvormfactor

Een maat voor de stabiliteit is de parameter L . De tabellen 3.11, 3.12, 3.13 en 3.14 geven de waarden voor L op de verschillende tijden onder stabiele omstandigheden. L is berekend, met behulp van het exponentiële windprofiel, uit de berekende windsnelheden op drie hoogten (Tunis: 5,50; 1,60 en 0,10 m; Planken Wambuis en Emmen: 6,40; 1,60 en 0,10 m; Smilde: 6,40; 2,40 en 0,10 m).

De bij stabiele gelaagdheid van de onderste luchtlagen berekende waarden voor L verschillen aanzienlijk met de waarden voor L geldend voor de onstabiele toestand zoals deze berekend werden door SWINBANK (1964). SWINBANK vond waarden variërend van vijf meter tot enkele tientallen meters, de waarden voor L bij grote stabiliteit variëren van enkele decimeters tot enkele meters (2,0 à 2,5 meter).

TABEL 3.11: Stabiliteitsparameter (L) en profielvormfactoren (P)
Tunis, 29/30-9-1965

tijd	L (m)	P	$L'/\alpha L$
18.15 h	1,28	1,0	1,3
18.45	1,14	1,2	1,2
19.15	1,56	1,3	1,4
19.45	1,69	1,1	1,4
20.15	1,50	1,2	1,3
20.45	0,84	0,7	1,1
21.15	1,17	0,8	1,2
21.45	1,01	1,2	1,2
22.15	0,37	1,4	0,7
22.45	0,83	1,0	1,1
00.45	4,40	1,9	1,8
01.45	1,25	1,5	1,3
03.45	1,06	1,9	1,2
04.45	2,30	1,3	1,6
06.45	1,07	1,1	1,2
07.15	1,36	1,1	1,3
18.45	2,18	1,4	1,5
19.15	2,23	1,7	1,5
19.45	1,64	1,6	1,4
20.15	1,59	1,2	1,4
20.45	1,74	1,4	1,4
21.15	2,15	1,3	1,5
21.45	5,41	2,4	1,8
22.15	1,81	1,5	1,5
22.45	2,36	1,7	1,5
23.15	1,13	3,1	1,3

TABLE 3.11: Thermal stability parameter (L) and profile similarity factor (P)

TABEL 3.12: Stabiliteitsparameter (L) en profielvormfactoren (P)
Planken Wambuis, 30/31-3-1965

tijd	L (m)	P	$L'/x'L$
17.45 h	1,52	0,8	1,3
18.15	0,90	0,6	1,0
18.45	0,63	0,8	0,9
19.45	0,26	0,7	0,4
20.15	0,86	1,1	1,0
20.45	0,53	0,8	0,8
21.15	0,40	0,8	0,6
21.45	0,49	0,8	0,7
23.15	0,44	0,8	0,7
23.45	0,23	0,9	0,4
00.45	0,54	1,1	0,8
02.15	0,24	0,6	0,4
02.45	0,28	0,7	0,5
04.15	0,30	0,7	0,5
04.45	0,07	0,6	0,1
05.15	0,28	0,6	0,5
06.15	1,93	1,8	1,4
06.45	0,68	0,8	0,9
07.15	0,34	0,6	0,6
07.45	0,81	0,7	1,0
08.15	0,69	0,8	0,9
08.45	0,74	0,7	0,9

TABLE 3.12: Thermal stability parameter (L) and profile similarity factor (P)

Een maat voor de gelijkvormigheid van de temperatuur- en windprofielen is de profielvormfactor P ,

$$P = \frac{\vartheta_3 - \vartheta_1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \bigg/ \frac{u_3 - u_1}{u_2 - u_1} \quad (3.36)$$

De indices hebben betrekking op de hoogten waarvoor de temperaturen en windsnelheden berekend werden (3 = hoog, 2 = midden, 1 = laag). De in de tabellen 3.11 t/m 3.14 gegeven waarden voor P zijn de gemiddelden van de uit de volgende hoogtecombinaties berekende waarden.

Voor de metingen uit Tunis: 5,50-1,60-0,40 m
5,50-1,60-0,10 m
3,20-0,80-0,20 m
3,20-0,80-0,05 m
1,60-0,40-0,10 m
0,80-0,20-0,05 m

TABEL 3.13: Stabiliteitsparameter (L) en profielvormfactoren (P)
Tunis, 28/29-9-1965

tijd	L (m)	P	$L'/\alpha'L$
17.45 h	4,31	1,2	1,7
18.15	1,46	0,8	1,3
19.15	1,06	0,5	1,2
19.45	1,02	0,8	1,2
20.45	0,96	0,9	1,2
23.45	1,16	0,9	1,2
00.15	0,73	0,8	1,0
00.45	0,66	0,7	1,0
01.15	1,78	0,9	1,5
01.45	2,16	1,0	1,5
02.45	1,44	0,9	1,4
03.15	1,11	0,9	1,3
03.45	0,63	0,9	1,0
04.15	1,00	1,1	1,2
04.45	0,66	0,5	1,0
05.15	1,54	1,0	1,4
06.15	2,91	1,4	1,6
07.15	1,05	0,9	1,2
Emmen, 4/5-6-1965			
20.30 h	1,13	1,0	1,2
21.00	0,63	1,2	0,9
21.30	0,55	0,8	0,8
22.00	1,02	1,3	1,2
22.30	0,55	1,0	0,8
23.00	0,98	1,7	1,2
23.30	1,26	1,2	1,2
24.00	0,89	0,9	1,1
00.30	0,39	0,6	0,7
01.00	0,52	0,8	0,8
01.30	0,79	1,7	1,0
02.30	0,53	0,7	0,8
03.00	0,75	0,7	1,0
03.30	1,33	1,2	1,3
04.00	0,24	0,6	0,5
04.30	0,80	1,0	1,0
05.00	1,21	1,2	1,2

TABLE 3.13: Thermal stability parameter (L) and profile similarity factor (P)

Voor de metingen uit Smilde: 6,40–2,40–0,80 m
6,40–2,40–0,10 m
3,20–1,60–0,40 m
3,20–1,60–0,20 m
2,40–0,80–0,10 m
1,60–0,40–0,20 m

TABEL 3.14: Stabiliteitsparameter (L) en profielvormfactoren (P)
Smilde, 26/27-8-1964

tijd	L (m)	P	$L'/\alpha'L$
19.00 h	0,31	0,9	0,5
19.30	0,73	1,1	0,9
20.00	1,95	1,2	1,4
20.30	1,33	1,2	1,3
21.00	0,87	1,1	1,0
21.30	1,37	1,3	1,2
22.00	0,90	1,1	1,0
22.30	0,44	1,1	0,6
23.00	0,65	1,0	0,8
23.30	0,68	1,0	0,9
24.00	0,90	1,1	1,0
00.30	1,11	1,1	1,1
01.00	0,57	0,9	0,8
01.30	0,46	0,9	0,7
02.00	0,87	1,1	1,0
02.30	0,48	0,9	0,7
03.00	1,04	1,1	1,1
03.30	0,67	1,1	0,8
04.00	0,84	1,0	1,0
05.00	0,15	0,8	0,3
05.30	0,44	1,1	0,6
06.00	0,61	0,7	0,8
06.30	0,72	0,7	0,9
07.00	0,45	0,5	0,6

TABLE 3.14: Thermal stability parameter (L) and profile similarity factor (P)

Voor de metingen uit Emmen

en Het Planken Wambuis: 6,40–1,60–0,40 m
6,40–1,60–0,10 m
3,20–0,80–0,20 m
3,20–0,80–0,05 m
1,60–0,40–0,10 m
0,80–0,20–0,05 m

Uit de resultaten blijkt duidelijk dat de waarden voor P in vele gevallen dicht bij 1 liggen.

Met behulp van de formules 3.27, 3.28, 3.34 en 3.35 is voor alle profielen de verhouding $L'/\alpha'L$ berekend (tabel 3.11 t/m 3.14). Deze verhouding is gelijk aan $1/\alpha$, zodat een vergelijking kan worden gemaakt tussen de α 's gevonden bij metingen tijdens stabiele omstandigheden. Uit de resultaten blijkt dat bij grote stabiliteit (relatief lage waarden voor L) $1 < \alpha < 2$ (tabel 3.12 en 3.14). Bij hogere windsnelheden en grotere waarden voor L is α in het algemeen kleiner dan 1; $0,5 < \alpha < 1,0$ (tabel 3.11 en 3.13). Deze resultaten komen overeen met de waarden gevonden door MONIN en OBUKHOV (1954) en SWINBANK (1964).

3.3. DISCUSSIE VAN DE RESULTATEN

Zoals bij de bespreking van het turbulente transport, aan het begin van dit hoofdstuk, gebleken is, heeft men voor niet-neutrale omstandigheden nog geen algemene overeenstemming bereikt over de weergave van de temperatuur- en windprofielen. Al zijn voor de onstabiele toestand enkele formules bekend, die in de meeste gevallen de gemeten temperatuur- en windprofielen goed weergeven (LUMELEY en PANOFSKY, 1964), is ten aanzien van de stabiele toestand nog weinig bekend.

Uit de resultaten van de in deze publicatie beschreven metingen, blijkt dat de vorm, zoals die door SWINBANK (1964) werd voorgesteld, in veel gevallen een duidelijke weergave kan zijn van de metingen. De verschillen tussen gemeten en berekende luchttemperaturen en windsnelheden zijn niet groot. Ook worden, onder vergelijkbare omstandigheden, op de vier proefterreinen voor de factoren A , B , C en D , de stabiliteitsparameter en de transportcoëfficiënten K_H en K_M waarden van dezelfde orde van grootte gevonden. De waarden hangen echter sterk af van het windsnelheidsniveau zoals dit ten tijde van de meting op de verschillende terreinen bestaat.

Zoals uit de literatuur (LUMELEY en PANOFSKY, 1964; WEBB, 1964) blijkt, neemt men als grens waarboven geen turbulentie meer plaats vindt een waarde van het getal van Richardson van 0,2. Bij waarden groter dan 0,2 is te verwachten dat K_M en K_H zich verschillend van elkaar zullen gaan gedragen. Onder deze omstandigheden zullen fluctuerende verticale bewegingen plaatsvinden die voornamelijk het gevolg zijn van dichtheidsverschillen ('zwaartekrachtgolven'). Deze bewegingen kunnen een netto verticale verplaatsing van een grootheid als warmte veroorzaken indien er, ten aanzien van deze grootheid, een verband bestaat tussen de zich verplaatsende lucht en de omgeving. Een dergelijk verband kan voortkomen uit de schuifspanning in het geval van hoeveelheid van horizontale beweging en door straling in het geval van warmte.

Om een idee te verkrijgen van de verhouding K_H/K_M , zijn uit alle metingen de profielen geselecteerd die een goede overeenstemming met het model te zien gaven en waarvoor de profielvormfactor (P) dicht bij 1 lag (tabellen 3.15 en 3.16). In de tabellen zijn naast de verhouding K_H/K_M op 3 hoogten ook L en het getal van Richardson (gemiddeld over alle hoogten) opgenomen. K_H en K_M werden berekend met behulp van de volgende formules:

$$K_H = \frac{H_{at}}{c_p \rho \partial \theta / \partial z} \quad (3.37)$$

$$K_M = \frac{u_*^2}{\partial u / \partial z} \quad (3.38)$$

De waarden voor L blijken voor deze geselecteerde profielen binnen een beperkt gebied te liggen (0,5–1,2 meter). Het getal van Richardson varieert zeer sterk, de hoogste waarden werden gevonden voor de nacht 26/27–8–1964 (tabel 3.15)

TABEL 3.15: Geselecteerde profielen, verhouding K_H/K_M

	tijd	$P(L'/\alpha'L)$	L (m)	R_t	K_H/K_M		
					5,50	1,60	0,05 m
Tunis	21.45 h	1,2(1,2)	1,01	4,8	0,09	0,13	0,39
29/30-9-1965	22.45	1,0(1,1)	0,83	8,6	0,06	0,08	0,10
(onbewolkt)	06.45	1,1(1,2)	1,07	8,6	0,05	0,07	0,10
Tunis	20.45 h	0,9(1,2)	0,96	0,02	4,34	4,44	3,71
28/29-9-1965	23.45	0,9(1,2)	1,16	0,61	0,97	1,04	0,93
(bewolking:	00.15	0,8(1,0)	0,73	0,12	6,76	6,27	4,20
2/10-8/10)	03.15	0,9(1,2)	1,11	1,46	0,41	0,44	0,41
	03.45	0,9(0,9)	0,63	0,61	1,15	1,21	1,20
	04.15	1,1(1,2)	1,00	2,49	0,19	0,26	0,50
	07.15	0,9(1,2)	1,05	16,40	0,04	0,04	0,03
					6,40	1,60	0,10 m
Smilde	19.30 h	1,1(0,9)	0,73	15,5	0,04	0,06	0,07
26/27-8-1964	21.00	1,1(1,0)	0,87	11,4	0,05	0,08	0,09
(onbewolkt	22.00	1,1(1,0)	0,90	22,3	0,02	0,04	0,05
kleine windsnelheid)	23.00	1,0(0,8)	0,65	15,1	0,05	0,06	0,05
	23.30	1,0(0,9)	0,68	14,2	0,05	0,06	0,06
	24.00	1,1(1,0)	0,90	14,8	0,04	0,06	0,07
	00.30	1,1(1,1)	1,11	8,0	0,06	0,11	0,14
	02.00	1,1(1,0)	0,87	3,8	0,13	0,23	0,32
	03.30	1,1(0,9)	0,67	13,4	0,04	0,06	0,08
	04.00	1,0(1,0)	0,84	2,9	0,20	0,29	0,29

TABLE 3.15: Selected profiles, ratio K_H/K_M

bij zeer kleine windsnelheden. Waarden die liggen beneden de grens van 0,2 werden gevonden bij relatief hogere windsnelheden (4/5-6-1965) en bij bewolking (3/4-6-1965).

De verhouding K_H/K_M is bij grote stabiliteit zeker kleiner dan 1. De waarde voor K_H kan zelfs dalen tot minder dan het tiende deel van K_M (tabel 3.15: 29/30-9-1965 en 26/27-8-1964). Bij bewolking, hogere windsnelheden en kleine Richardson getallen, wordt K_H/K_M groter dan 1 (tabel 3.16: 3/4-6-1965 en 4/5-6-1965). Een andere conclusie die uit de resultaten volgt is dat, bij grote stabiliteit, K_M sneller toeneemt met de hoogte dan K_H . Deze afname van K_H/K_M met de hoogte is ook gevonden bij het onderzoek van McVEHIL (1964) en SWINBANK (1964). Beide onderzoekers baseren deze conclusie echter op berekende waarden van P die groter dan 1 zijn en de aanname dat τ en H_{at} constant zijn met de hoogte. Uit de resultaten blijkt echter dat een verandering van τ en H_{at} met de hoogte mogelijk ook een rol kan spelen in de transportprocessen ($K_H/K_M \ll 1$, $P \approx 1$).

Bij een sterke inversie met wind is de afkoeling tengevolge van de stralingsstroomdivergentie vaak groter dan de werkelijke afkoeling (FUNK, 1960, 1962; ROBINSON, 1950). De variatie van H_{at} met de hoogte moet daardoor in nauw verband staan met de straling, de variatie zal echter klein zijn bij hoge windsnelheden (ELLIOT, 1964; GAEVSKAYA e.a., 1962). Bij lage windsnelheden daar-

TABEL 3.16: Geselecteerde profielen, verhouding K_H/K_M

	tijd	$P(L'/\alpha'L)$	L (m)	R_i	K_H/K_M		
					6,40	1,60	0,05 m
Emmen 3/4-6-1965 (bewolking 10/10)	19.15 h	0,9(1,1)	0,95	0,10	5,9	6,8	8,1
	19.45	1,1(1,2)	1,15	0,82	0,5	0,8	2,0
	20.15	0,8(1,1)	0,92	0,09	8,4	7,6	4,9
	20.45	0,8(1,1)	0,86	0,08	9,7	8,6	5,5
	21.15	0,8(0,9)	0,60	0,09	11,1	9,6	6,0
	22.45	1,1(1,1)	0,87	0,26	1,9	2,6	5,0
	23.15	0,8(1,1)	0,92	0,11	6,5	6,2	4,6
	23.45	0,8(0,9)	0,67	0,11	7,5	7,1	5,4
	02.45	0,9(1,1)	0,93	0,18	3,4	3,8	4,0
	04.45	1,0(1,2)	1,18	0,67	0,7	0,9	1,6
	05.45	0,9(1,2)	1,07	0,84	0,7	0,8	0,7
Emmen 4/5-6-1965 (onbewolkt)	20.30 h	1,0(1,2)	1,13	0,14	3,8	4,7	6,4
	21.00	1,2(0,9)	0,63	0,12	3,9	5,8	14,2
	21.30	0,8(0,8)	0,55	0,11	9,0	7,5	4,4
	22.30	1,0(0,8)	0,55	0,44	1,5	1,7	2,1
	24.00	0,9(1,1)	0,89	0,32	1,9	2,1	2,4
	01.00	0,8(0,8)	0,52	0,59	1,6	1,4	1,0
	04.30	1,0(1,0)	0,80	5,43	0,10	0,13	0,19
	05.00	1,2(1,2)	1,21	2,48	0,16	0,27	0,79
Planken Wambuis 30/31-3-1965 (onbewolkt)	18.45 h	0,8(0,9)	0,63	0,12	7,8	6,8	4,5
	20.15	1,1(1,0)	0,86	0,77	0,7	0,9	1,6
	20.45	0,8(0,8)	0,53	0,47	2,2	1,9	1,1
	00.45	1,1(0,8)	0,54	0,15	4,3	5,2	7,7
	06.45	0,8(0,9)	0,68	2,24	0,41	0,36	0,23
	08.15	0,8(0,9)	0,69	1,38	0,69	0,57	0,41

TABLE 3.16: *Selected profiles, ratio K_H/K_M*

entegen zal het temperatuurprofiel sterk beïnvloed worden door de straling. Een gevolg is het reeds verschillende malen geconstateerde verschijnsel van de kromming in het temperatuurprofiel, waarbij de minimumtemperatuur enkele centimeters tot enkele decimeters boven het aardoppervlak gevonden wordt (FLEAGLE, 1956; LAKE, 1956; RASCHKE, 1957).

4. VORSTSCHADE EN VORSTRESISTENTIE

4.1. VORSTSCHADE EN SCHADE DOOR UITDROGING

Uit de schadebeelden aan de planten is dikwijls moeilijk te zien of de schade een gevolg is van op elkaar volgende bevrozing en ontdooiing of van uitdroging (TRANQUILLINI, 1964).

Indien aan het eind van de winter de bovenste lagen van de grond nog bevroren zijn, kunnen tijdens heldere dagen de planten door een grote transpiratie uitdrogen, daar de toevoer van water uit de bodem te klein is. De dan ontstane schade is uiterlijk niet te onderscheiden van de nachtvorstschade in het voorjaar, die het gevolg is van de sterke nachtelijke uitstraling tijdens heldere nachten. Een treffend voorbeeld van 'vorstschade' boven 0°C , treedt op als gevolg van een z.g. 'Sukhovei'. Sukhovei is een droge, meestal hete, wind die voorkomt in Rusland (DZERDZEEVSKII, 1963). De algemene kenmerken voor de sukhovei zijn: een verzadigingsdeficit van minimaal 17 torr en een windsnelheid groter dan 5 m. sec^{-1} . Zo had een relatief koude sukhovei op 19-10-1949 een zeer grote schade aan de cultuurgewassen in de Krim tot gevolg. De relatieve vochtigheid van de koude luchtmassa, aangevoerd vanuit de Poolstreken en opgewarmd bij het transport over land, daalde in de Krim gedurende de nacht van 4% tot 1%. De luchttemperatuur varieerde tussen 7°C en 9°C bij een N.O.-wind van $12-20 \text{ m. sec}^{-1}$. Alhoewel de luchttemperatuur dus duidelijk boven 0°C was, werd, o.a. bij de citrus en eucalyptus, een verdroging en bruin worden van de bladeren gevonden, beelden zoals die bij nachtvorstschade optreden. Normale vorstschade treedt bij de citrus pas op bij een temperatuur beneden -6°C .

In het navolgende zullen alleen de oorzaken van de echte vorstschade besproken worden, schade tengevolge van temperaturen onder 0°C . Een uitvoerige bespreking vindt men in LEVITT (1956), ULRICH (1962), LIEGEL (1965).

4.2. VORSTSCHADE AAN DE PLANTEN

4.2.1. *Het temperatuurverloop in de plant tijdens bevrozing*

Indien een plant blootgesteld wordt aan een temperatuur beneden 0°C , daalt de temperatuur eerst gelijkmatig en zonder onderbreking tot beneden 0°C . Op het moment dat een zekere temperatuur, die enkele graden onder nul kan liggen, bereikt is, volgt een plotselinge stijging van de temperatuur van het plantenweefsel. Na een temperatuur, die tussen het reeds bereikte minimum en 0°C in ligt, bereikt te hebben blijft de temperatuur een tijd constant en daalt daarna langzaam tot een temperatuur die, door de uitstraling van de plant, beneden de temperatuur van de omgevende lucht ligt.

Het minimum dat bij de eerste temperatuurdaling bereikt wordt is het onderkoelingspunt. De warmte die bij de bevrozing van het weefselsap vrijkomt, veroorzaakt de lichte stijging van de temperatuur tot het eigenlijke vriespunt, de

temperatuur waarbij uitgeperst celsap bevriest. Indien de vrijkomende warmte niet meer toereikend is om de warmteverliezen te compenseren, begint de tweede daling van de temperatuur.

4.2.2. *Verschijselen in de levende planten tijdens bevrozing*

Vroeger was men van mening dat bij een daling van de temperatuur tot beneden 0°C het protoplasma direct zou bevroren en dat de cellen door de bevrozing van het celsap zouden springen (MÜLLER-THURGAU, 1880, 1886). Volgens de tegenwoordige opvatting wordt de beschadiging door vorst in de cel veroorzaakt door inter- en intracellulaire ijsvorming. Allereerst bevriest niet het water in de cellen, maar het water tussen de cellen in de intercellularen of aan het oppervlak van de weefsels. Voorwaarde hiervoor is de aanwezigheid van ijskernen aan het inwendige oppervlak van de intercellularen. Zodra zich op deze plaatsen ijs gevormd heeft, daalt daar de dampspanning aangezien de verzadigingsspanning boven ijs kleiner is dan boven water. Door het hierdoor ontstane damptransport groeien de ijskristallen aan zolang er in de omgeving nog water beschikbaar is. Allereerst vormen zich nog relatief weinig ijskristallen met het in de intercellularen beschikbare water. Met de toevoer van water uit de omliggende cellen echter groeien de ijskristallen steeds sneller. Indien de ruimte in de intercellularen niet meer voldoende is, wordt de druk op de cellen zo groot dat de celwanden scheuren. Zodra ook het protoplasma beschadigd wordt, sterft de cel af. Uit verschillende onderzoeken meenden diverse onderzoekers de conclusie te kunnen trekken dat de schade tengevolge van de ijsvorming voornamelijk een mechanische beschadiging van het protoplasma betreft (LEVITT, 1956).

Volgens ULRICH (1962) is de schade niet alleen een gevolg van mechanische beschadiging maar in de eerste plaats een verstoring van de chemische omzettingen in het protoplasma en een verstoring van de stofwisseling. Naast de ijsvorming in de intercellularen is ook intracellulaire ijsvorming mogelijk. De ijsvorming binnen de celwanden is mogelijk buiten het protoplasma (periplasmatisch) en er binnen (endoplasmatisch). Periplasmatisch ijs vormt zich indien een ijskristal door een plasmodesmakanal heen groeit en binnen de celwand een ijsmantel om het protoplasma vormt. De endoplasmatische ijsvorming is in alle delen van de fijnstructuur van de cel mogelijk. De intracellulaire ijsvorming heeft nagenoeg altijd een blijvende schade tot gevolg.

Hoe langer de bevrozingstijd is, hoe groter de schade kan zijn. Ook het aantal achtereenvolgende vorstperioden en de snelheid van ontdooien zijn van belang voor de grootte van de schade. Bij een snelle ontdooiing geeft het intra- en intercellulaire ijs het water te snel af voor de wederopname in de cel. Bovendien is het vrijkomende water zeer ionenarm wat ongunstig werkt op de stofwisseling. Ook de periode na de ontdooiing is van belang, onder ongunstige uitwendige omstandigheden kan de schade in deze tijd nog groter worden.

Indien zich binnenin de hele cel ijs vormt, wat bij snelle bevrozing het geval kan zijn, sterft de cel direct. Vindt de ijsvorming echter alleen in de intercellu-

lairen plaats, dan heeft deze niet altijd blijvende schade tot gevolg. Treedt wel schade op dan kan het tijdstip van beschadiging óf tijdens de bevroering óf tijdens de daaropvolgende ontdooiing vallen.

4.3. BELANGRIJKE FACTOREN IN VERBAND MET VORSTRESISTENTIE

Steeds wordt waargenomen dat de verschillende plantensoorten zich ten opzichte van de inwerking van de vorst verschillend gedragen en een afwijkende vorstresistentie bezitten. Zelfs bij één enkele plant kunnen op verschillende tijden verschillen in vorstresistentie worden waargenomen.

De grootte van de vorstresistentie hangt er uiteindelijk vanaf in hoeverre het transport van water uit de cel naar de intercellulairen geremd of verhinderd kan worden. De eigenschappen van het protoplasma welke de onttrekking van water remmen en coagulatie versterken zijn in dit verband belangrijk.

Een belangrijke invloed op de vorstresistentie hebben de in het celsap opgeloste stoffen. De belangrijkste is wel de in het celsap opgeloste suiker. Vele onderzoekers hebben reeds gewezen op een verhoging van het suikergehalte tijdens het harden van planten. Zo vond SAKAI (1960, 1962) dat in de parenchymweefsels van de moerbeiboom een vergroting van de vorstresistentie steeds samen gaat met een verhoging van de suikerconcentratie in de cellen. Terwijl een zuivere temperatuurbehandeling, zonder de mogelijkheid van toename van het suikergehalte, geen invloed op de vorstresistentie had, gelukt het daarentegen door een kunstmatige suikertoevoer de vorstresistentie aanzienlijk te doen stijgen. Deze vergroting is speciaal bij monosacchariden duidelijk (LEVITT, 1959). Hoe hoger het suikergehalte is, des te hoger is de osmotische druk van het celsap. Hierdoor wordt het watertransport van de cellen naar de intercellulairen sterk geremd. Ook verschillende andere in de cel gevonden stoffen werden onderzocht. Zo toonde HEBER aan (ULRICH, 1962) dat het suikergehalte van de bladeren van wintertarwe in het begin van het harden weliswaar sterk toeneemt, maar daarna geen duidelijk verband met de vorstresistentie meer heeft. Op grond van de resultaten van zijn onderzoek neemt hij aan dat niet alleen de suiker maar ook het protoplasma-eiwit een rol speelt en dat beide factoren al naar de omstandigheden hun invloed uitoefenen op de vorstresistentie.

Naast de in de cel opgeloste stoffen heeft ook het watergehalte van de cellen zelf een sterke invloed op de vorstresistentie. Hoe minder water in de cellen aanwezig is, hoe minder ze kunnen afgeven naar de intercellulairen. Ook neemt dan de concentratie van het celsap en daarmee de osmotische druk toe. Dit is goed te zien bij de knoppen van vruchtbomen. Tijdens de winter is slechts weinig water in de cellen aanwezig en zijn ze zeer resistent tegen de inwerking van de vorst. Bij het uitlopen echter verliezen de knoppen door wateropname en de daarmee verbonden omzetting van koolhydraten hun vorstresistentie.

Van groot belang voor de vorstresistentie is de permeabiliteit van de celmembranen. Een grote semi-permeabiliteit is gunstig omdat daardoor het gevaar

van ijsvorming in de cel voorkomen wordt. Ook kan in dit geval bij het ontdooien het water sneller de cel binnendringen zodat de protoplast zich nagenoeg net zo snel kan uitzetten als de celwand.

Een zeer belangrijke rol speelt ook de inwendige fijnstructuur van de protoplast (ULRICH, 1962). De protoplast van een cel is een fysisch-chemisch systeem met verschillende fasen. Ieder deel van de cel (celkern, vacuole, mitochondriën, plastiden etc.) heeft een eigen grenslaag, niet alleen morfologisch, maar ook als een fysisch-chemische scheidingslaag. De vorstresistentie is een stofwisselings-fysiologisch probleem, waarbij de concentratie van laag moleculaire stoffen een rol speelt. De chloroplasten blijken zeer gevoelig voor temperaturen beneden 0°C te zijn wat ook tot gevolg heeft, dat de fotosynthese sterker geschaad wordt dan de ademhaling.

De bovenstaande fysiologische factoren die van belang zijn voor de vorstresistentie zijn steeds tegelijkertijd werkzaam, alhoewel wisselend in relatieve grootte. Het is daardoor in de afzonderlijke gevallen vaak moeilijk vast te stellen welke factor in het bijzonder verantwoordelijk voor de schade is.

Tussen de morfologische eigenschappen van een plant en zijn vorstresistentie is betrekkelijk weinig verband. In het algemeen schijnt een kleine celgrootte met grotere vorstresistentie verbonden te zijn. Zo bezitten kleine cellen ook kleine vacuolen en daardoor minder water. In verband met grotere permeabiliteit zijn kleine cellen ook in het voordeel, daar dan het water de cel sneller binnendringt of verlaat. Door de kleinere ruimte, kan de samentrekking en uitzetting van het protoplasma niet zo'n grote vorm aannemen, zoals in de grotere cellen met een groter aantal en grotere vacuolen. Ook bij het ontdooien zal minder snel schade voorkomen.

4.4. VERANDERING VAN VORSTRESISTENTIE

De vorstresistentie is bij één en dezelfde plant niet steeds gelijk. De werking van de verschillende factoren die van belang zijn voor de vorstresistentie en daarmee het vermogen lage temperaturen zonder schade te doorstaan, is in de loop van de ontwikkeling aan grote schommelingen onderhevig. Terwijl in de zomer de vorstresistentie meestal zeer klein is, neemt deze tot de winter steeds toe. De milieufactoren zijn dus van belang voor de vorstresistentie.

De temperatuur. Om het harden van de cel te bevorderen is het allereerst noodzakelijk dat meer suiker in de cellen kan worden opgeslagen. Hiervoor is een toereikende fotosynthese in de herfst tegen het eind van het groeiseizoen nodig. De plant moet met een grote voorraad aan koolhydraten, bij voorkeur in oplosbare vorm, de winter in gaan. Het harden van de planten wordt dus bevorderd door enerzijds gunstige voorwaarden voor de fotosynthese in de herfst en anderzijds een afname van de groei door de daling van de temperatuur. Na de eerste periode van het hardingsproces waarbij de temperatuur nog boven 0°C blijft,

volgt een tweede met temperaturen onder het vriespunt. De fotosynthese en de opslag van suikers houden dan in de meeste gevallen op, maar het harden gaat door, in dit geval door onttrekking van water aan de cellen door bevrozing van water in de intercellulair.

Afwijkingen van het normale verloop van het harden hebben verstoring tot gevolg. Dit is zeker het geval indien de temperatuurdaling tot beneden 0°C zeer snel geschiedt. De plant is dan, door de afnemende fotosynthese, niet in staat voldoende suiker in de cel op te slaan. Hierdoor is ook de ernstige schade te verklaren, die het gevolg kan zijn van een plotseling inzettende najaarsvorst. De hardheid van een plant kan tijdens de winter ook teniet gedaan worden door een hervatte groei tijdens lange dooiperiodes. Een dergelijke toestand kan zich ook voordoen indien de planten lange tijd met sneeuw bedekt zijn.

Straling is eveneens een belangrijke factor. Voor een toereikende fotosynthese is een zekere hoeveelheid stralingsenergie noodzakelijk. Zo kan bij aanwezigheid van bewolking de stralingsenergie ontoereikend zijn om bij een temperatuur van enkele graden boven 0°C een voor het harden van de plant noodzakelijke fotosynthese te leveren. Een voldoende hoge stralingsenergie bij te hoge temperatuur geeft echter ook geen goede resultaten door de te sterke groei. Niet alleen de stralingsintensiteit is van belang, ook de daglengte speelt een rol. Zo wordt het harden van jonge bomen en struiken door een korte daglengte sterk geremd.

Watervoorziening. Naast de temperatuur en de straling is de watervoorziening van de planten belangrijk. Alle factoren die een gunstige of ongunstige invloed uitoefenen op de watervoorziening van de planten oefenen een invloed uit op het harden van de plant. Indien een plant in een vochtige bodem opgroeit is een belangrijke voorwaarde voor vermindering van de vorstresistentie aanwezig. Bij een hoge luchtvochtigheid is de verdamping van de planten kleiner en drogen de intercellulair in de bladeren niet uit. Bij daling van de temperatuur onder 0°C vormen zich dan allereerst aan het oppervlak van de bladeren ijskristallen (rijp). Tegelijkertijd begint ook in de bladeren, door het binnendringen van ijskernen, de ijsvorming in de intercellulair. Door een hoge luchtvochtigheid wordt de schadelijke werking van temperaturen beneden het vriespunt dan ook groter.

Ook directe neerslag kan schadelijk werken. Iedere neerslag, korte tijd voor de inval van de vorst, vergroot het gevaar voor beschadiging door vorst. Bij vorst ontstaat in dit geval een ijslaag op het blad. De vrijkomende bevrozingswarmte beschermt nog enige tijd de er onder liggende plantendelen. Wanneer dit niet meer plaats vindt omdat een verdere toevoer van water uitblijft, is, net als bij langdurig onderbroken kunstmatige beregening het geval is, het bevrozen van de betreffende plantendelen het gevolg.

Daar de intercellulair reeds water bevatten begint de ijsvorming hier zeer snel. Op gelijke wijze kan ook dauwvorming nadelig werken.

Voeding. Veelvuldig is reeds gebleken dat al naar het meer of minder op de

voorground staan van een bepaald element bij de plantenvoeding, een meer of minder grote resistentie bereikt kan worden. Zo is bekend dat eenzijdige stikstofvoeding de vorstresistentie doet afnemen. Door de stikstof vindt een versnelde groei plaats, de aanwezige koolhydraten worden sneller verbruikt, waardoor het suikergehalte en hiermede de vorstresistentie afneemt. Door de voeding met kalium en fosfor daarentegen wordt de groei geremd en vindt men een grotere vorstresistentie (SATO e.a., 1952; SHARPE e.a., 1954). Door een doelmatige keuze is het dus mogelijk door bemesting het weerstandsvermogen van de plant tegen de schadelijke werking van lage temperaturen in gunstige zin te beïnvloeden.

4.5. DE MATE VAN VORSTRESISTENTIE

Van groot praktisch belang is het antwoord op de vraag, welke graad van vorst de planten of plantendelen met een goede vorstresistentie nog zonder schade kunnen verdragen.

Van belang is hierbij de tijd gedurende welke de plantendelen aan de lage temperatuur blootgesteld zijn. Zo vond SAKAI (1956) bij enkele houtsoorten de volgende waarden (zie tabel 4.1.).

TABEL 4.1: De tijd (in dagen) die twijgen de verschillende temperaturen kunnen doorstaan

houtsoort	bevroren bij een temperatuur van:			
	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
moerbeï	180	30	10	0,5
populier	360	90	50	20

TABLE 4.1: The time (in days) which the twigs are able to sustain the different temperatures

De vorstresistentie varieert met het seizoen. Zo toonde PARKER (1955) aan dat de naalden van *Pinus ponderosa* Laws. en *Abies grandis* Lindl. een langzame toename in vorstresistentie vertoonden gedurende de nazomer en het begin van de herfst en een sterke toename in begin november, wat samenviel met enkele nachten met temperaturen rond het vriespunt. JUNGHANS (1959) onderzocht het verloop van de vorstresistentie van naalden van verschillende ouderdom van *Picea Abies* Karst. Hij vond dat de vorstresistentie van jonge naalden vanaf het uitlopen tot ongeveer eind januari steeds toeneemt. Daarbij is vanaf midden november de resistentie al groter dan die van oudere naalden. Bij het begin van de lente neemt de vorstresistentie dan langzaam af, bij jonge naalden vaak sneller dan bij oudere.

Er is een duidelijk verband tussen het stadium van ontwikkeling van de plant en zijn vorsthardheid. Zo toonde VENTSKEVICH (1961) aan dat de vorstgevoeligheid met de voortschrijdende ontwikkeling toeneemt. Ook DURAND (1964) vond een duidelijk verband tussen de fenologische fase van bomen en de laagste temperatuur die ze kunnen verdragen. De vorstgevoeligheid nam met de ontwikkeling van nog gesloten en zich openende knoppen via de bloem tot de jonge

vrucht steeds toe. Zo konden volgens zijn waarnemingen de bloemen in een vroeg stadium nog temperaturen tot -5°C verdragen terwijl jonge vruchten reeds bij -2°C bevroren waren.

Zoals uit het voorafgaande blijkt is de schade door vorst niet het gevolg van de inwerking van de lage temperaturen alleen, maar afhankelijk zowel van de uitwendige omstandigheden en de voorgeschiedenis van de plant voor de intrede van de vorst als ook van genetische factoren en het fysiologische ontwikkelingsstadium waarin de plant verkeert.

5. BESCHERMING TEGEN NACHTVORST

5.1. BIOLOGISCHE METHODEN

De biologische methoden berusten op het vergroten van de weerstand tegen lage temperaturen of de vertraging van de ontwikkeling van de plant zodat het begin van de groei na de gevaarlijke periode valt. Het aantal methoden is zeer groot maar zij bevinden zich voor een groot deel nog in het onderzoekstadium in de laboratoria.

5.1.1. Soortenkeuze

Er bestaat veelal een duidelijk verschil in vorstresistentie en in het tijdstip van uitlopen tussen de verschillende soorten. Zo vond SCHENNIKOW (1953) dat de siberische fijnspar aan de westkant van zijn verspreidingsgebied even laat uitloopt als in het optimum ervan, terwijl de in dit gebied ook voorkomende fijnspar vroeger uitloopt. Daardoor bestaat er voor de jonge twijgen van de siberische fijnspar minder gevaar door voorjaarsvorst beschadigd te worden, dan bij de fijnspar het geval is. Ook bij de verschillende herkomsten van de fijnspar vindt men verschil in uitlopen.

5.1.2. Plantenteelt

De kruising van vorstresistente soorten met minder resistente soorten, die echter een grotere opbrengst vertonen, heeft in enkele gevallen succes opgeleverd. Onderzoek in deze richting vindt voornamelijk in de fruitteelt plaats. Zo is b.v. de aanplant van fruitbomen in grote delen van Siberië mogelijk geworden met door kruising verkregen vorstresistente soorten (I. W. Mitschurin).

5.1.3. Bijzondere middelen

Men tracht door behandeling van de planten met bepaalde chemische stoffen invloed uit te oefenen op het celsap en hierdoor de vorstresistentie te vergroten. De diverse stoffen waarvan men een gunstige invloed verwacht, worden door middel van begieten of bespuiten op de planten gebracht. Deze methoden zijn voor een deel nog in het beginstadium van het onderzoek.

Niettegenstaande vele negatieve resultaten, is het uit economische overweging zeer aan te bevelen deze methode van nachtvorstbescherming verder te ontwikkelen. Indien deze methode bruikbaar zou zijn is het mogelijk de op de diverse bedrijven veelal reeds aanwezige besproeiings- of bespuitingsuitrusting nog voor een ander doel te gebruiken, zodat deze apparatuur dan rendabeler wordt.

Een van de onderzochte middelen is de behandeling van de planten met bori-um. Deze methode werd door BELTRAM in 1952 in Joegoslavië gevonden. BELTRAM (1958, 1959) behandelde o.a. essen-, populieren-, sparren- en dennen-zaailingen met duidelijk succes. De planten worden bespoten met een 0,5% oplossing van borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$). De bladeren moeten droog zijn, zodat de oplossing in de bladeren of naalden kan dringen. De luchttemperatuur overdag moet ten minste 8°C bedragen, zodat nog een zekere groeiactiviteit aanwezig is.

De gunstigste tijd voor de bespuiting is het begin van het groeiseizoen. De werking van het borium berust waarschijnlijk op een omzetting van de koolhydraten in suiker. Indien de luchttemperatuur boven 8°C is, vindt een relatief snelle omzetting plaats en daarmee een sterke vergroting van de vorstresistentie in korte tijd.

Naast borium zijn ook andere stoffen gebruikt. Zo gebruikte RZAJEV (1957) naast borium met succes mangaan, koper en zink. Vergroting van vorstresistentie werd ook gevonden bij bespuitingen met decenylbarnsteen zuur (KUIPER, 1964) en met ureum (BOON, 1964).

5.1.4. Groeivertragers

De kunstmatige remming van het begin van de groei kan een bescherming geven tegen de vroege voorjaarsvorst. Daar echter de kritieke nachtvorstperioden van jaar tot jaar verschillen, heeft deze methode in de meeste gevallen maar gedeeltelijk succes. Een tweede bezwaar is de verkorting van het groeiseizoen wat in veel gevallen een vermindering van de opbrengst tot gevolg kan hebben. De middelen die met succes zijn toegepast zijn o.a. gibbereline (WEAVER, 1959; MODLIBOWSKA, 1962, 1965); 2-chloorethyl trimethylammonia (MODLIBOWSKA, 1965) en alpha naftylazijnzuur (NIGOND, 1960).

Bij al deze proeven bij de wijnstok en diverse fruitbomen werd, afhankelijk van de concentratie van de toegevoegde stof en de datum van behandeling, een vertraging in het uitlopen van de planten gevonden van 9-27 dagen. Uit het

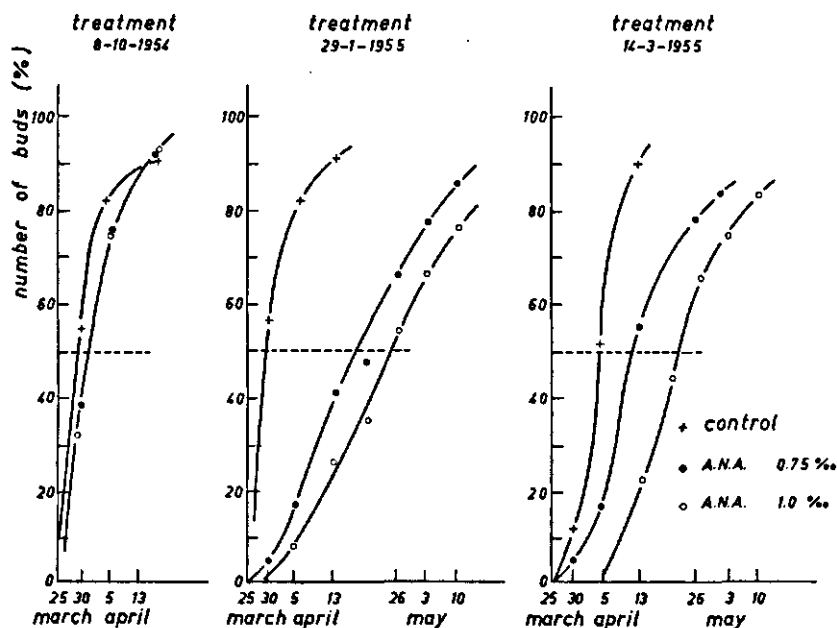


FIG. 5.1. Invloed van α -naftylazijnzuur op het uitkomen van de knoppen bij de wijnstok.
FIG. 5.1. Influence of α -naphthaleneacetic acid on bud development of the vine.

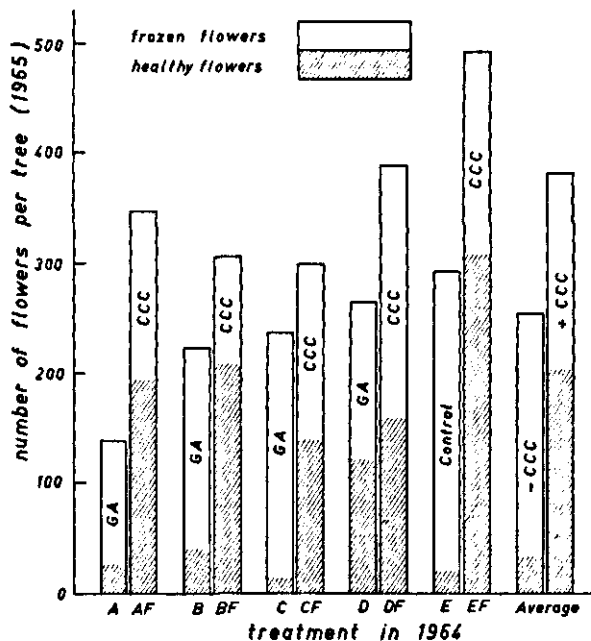


FIG. 5.2. Invloed van gibbereline (GA) en 2-chloor-ethyltrimethylammonia (CCC) op de vorming van bloemen bij jonge perebomen en de resistentie van de bloemen tegen vorst.

FIG. 5.2. Influence of gibberellin (GA) and chloride of trimethylammonia (CCC) on the flower formation of young pear-trees and the resistance of the flowers against frost.

onderzoek blijkt tevens dat de keuze van de datum van de behandeling veel belangrijker is dan de concentratie van het toegepaste middel (figuur 5.1. en 5.2.).

Figuur 5.1. toont aan dat, in tegenstelling tot de behandeling op 8 oktober 1954, de behandelingen op 29-1 en 14-3-1955 een duidelijke vertraging in het uitkomen van de knoppen tot gevolg hebben. Het verschil met de contrôle metingen is 9-27 dagen. Ook blijkt uit de resultaten dat de individuele knoppen verschillend reageren op de behandeling. De periode waarover het uitkomen van de knoppen zich uitstrekt is 40 dagen bij de behandeling op 29-1 met een concentratie van 0,750/00, deze periode is op het contrôle perceel 20 dagen.

Figuur 5.2. toont de werking van enkele stoffen op de ontwikkeling van bloemen en hun gevoeligheid voor vorst. De behandeling met 0,5% GA geschiedde op de volgende data:

A: 18 en 13-4, 4-5-1964

B: 29-4 en 4-5-1964

C: 29-4-1964

D: 18-4-1964

E: contrôle

Op 25-5-1964 werd de helft van de bomen in elke groep behandeld met 1% CCC, behandeling F. In 1965 werden diverse boompjes, gedurende 15 minuten, blootgesteld aan een temperatuur van $-3,5^{\circ}\text{C}$. De boompjes behandeld met CCC vertoonden veel minder schade, in de vorm van bevroren bloemen, dan de boompjes die alleen behandeld werden met GA terwijl het aantal geopende bloemen op het moment van behandeling juist groter was.

Gezien het feit dat naast de invloed van deze middelen op de vorstresistentie ook invloed wordt uitgeoefend op de lengtegroei, het aantal bloemknoppen en de ontwikkeling daarvan, zal een voortgezet onderzoek naar de werking van deze middelen moeten worden verricht alvorens zij voor de praktijk kunnen worden aanbevolen.

5.2. CULTUURMAATREGELEN (PASSIEVE METHODEN)

Bij deze methoden wordt op permanente wijze het risico van schade door nachtvorst verminderd. De methoden bestaan in hoofdzaak uit de keuze van terreinen voor beplantingen en een blijvende verbetering van het microklimaat.

5.2.1. *Keuze van het terrein bij een nieuwe beplanting*

Het is duidelijk dat voor de nieuwe aanplant zoveel mogelijk terreinen gezocht moeten worden die niet of weinig vorstgevaarlijk zijn. Is dit niet mogelijk of heeft men te doen met reeds bestaande beplantingen dan is men aangewezen op cultuurmaatregelen.

5.2.2. *Bodembedekking*

Door bedekking van de bodem met stro, turfmolm, matten e.d. kan men een gunstige invloed op de bodemtemperatuur uitoefenen. Door de isolerende laag wordt de afgifte van warmte uit de bodem geremd, de nabij het oppervlak liggende wortels worden op deze wijze voor een te sterke afkoeling beschermd. Voor de plantendelen vlak boven de bedekking is deze maatregel echter zeer gevaarlijk, aangezien in heldere nachten de luchttemperatuur boven de bedekte grond enkele graden lager wordt dan boven de onbedekte grond. Men moet 'mulchen' dus vermijden in de kritieke periode.

5.2.3. *Doorstroming van koude lucht*

Het is van belang openingen te maken in stroomafwaarts gelegen obstakels om een goede afvoer van de koude lucht te verkrijgen en zodoende te verhinderen dat zich boven de aanplant een koude luchtmassa ophoopt. Indien mogelijk moeten stroomopwaarts gelegen secundaire bronnen van koude lucht als braakliggend land, struikgewas e.d. vermeden worden. Is er gevaar voor het binnendringen van koude lucht op het te beschermen terrein dan moet deze gevaarlijke luchtstroming door dichte randbeplantingen of schuttingen om het terrein heen geleid worden. Voorbeelden van de juiste wijze van bescherming zijn te vinden in HILKENBÄUMER, SCHNELLE en BREUER (1951).

5.2.4. *Schoonhouden van de grond*

Het is van groot belang onkruid, struikgewas en lage schermbeplantingen te verwijderen op door vorstgevaar bedreigde terreinen. Het gevaar voor nachtvorst boven een onkruiddek en tussen struikgewas is veel groter dan boven schoongehouden grond. Een duidelijk voorbeeld geeft het onderzoek beschreven in 5.4.

5.3. ACTIEVE METHODEN

De actieve methoden bestaan uit een tijdelijke verandering van het microklimaat gedurende de kritieke periode van sterke nachtelijke afkoeling. De tijdelijke modificatie geschiedt door toevoer van warmte op diverse manieren. Bij de bestrijding van nachtvorst tracht men de temperatuur niet verder te doen dalen, wanneer de 'drempelwaarde' voor blijvende schade bereikt is. BOUCHET (1954, 1960) berekent de hiervoor theoretisch benodigde energie. Indien men een oppervlaktetemperatuur van 0°C aanneemt, is de uitgestraalde energie ongeveer $0,5 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$. De tegenstraling van de atmosfeer gedurende een heldere nacht is ongeveer $0,35 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$. De afkoeling wordt dus veroorzaakt door een deficit van $0,15 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$, wat ongeveer gelijk is aan $10^6 \text{ kcal.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$. In feite wordt echter zoveel warmte uit de bodem en de lucht aangevoerd dat men slechts ca. 3.10^4 – $6.10^4 \text{ kcal.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ zou moeten toevoeren om de temperatuur aan het oppervlak constant te houden. Indien men nu warmte zou kunnen toevoeren zonder de begintemperatuur te veranderen zou de benodigde hoeveelheid dus gering zijn. Bij constante oppervlaktetemperatuur zou het te compenseren deficit met de tijd toenemen en de berekening (BOUCHET, 1954) toont aan dat deze energie na 1 uur 20–30% en na 4 uur 50–60% van het maximale deficit van $0,15 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ bedraagt.

Om twee redenen is de voorgaande schatting echter te laag:

a. De warmtebronnen hebben niet de temperatuur die men vlak boven het aardoppervlak wenst te bereiken. De warmteverliezen zijn daardoor aanzienlijk, vooral met warmtebronnen van hoge temperatuur. De verliezen zijn relatief kleiner bij de bestrijdingsmethode met behulp van beregening aangezien de warmtebronnen daar zeer talrijk zijn en een temperatuur hebben die dicht bij de temperatuur van het aardoppervlak ligt.

b. Het handhaven van een constante temperatuur in een gebied dat afkoelt heeft een temperatuursprong tot gevolg. Zelfs bij totale windstilte zal er convectorie ontstaan waarbij luchtpakketjes uit de omringende koude laag worden uitgewisseld tegen de warme luchtpakketjes in dit beschermde gebied. De berekening toont aan dat voor de verwarming van deze koude luchtlagen een hoeveelheid energie nodig is, die vele malen groter is dan het tekort door de nettostraling ter plaatse. De energieverliezen door de uitstraling per oppervlakte-eenheid zijn niet afhankelijk van de grootte van het te beschermen gebied, de verliezen tengevolge van de noodzakelijke opwarming van de koude lucht die het te beschermen gebied binnen dringt daarentegen wel. Hoe kleiner het beschermde oppervlak is en hoe hoger de temperatuur van de warmtebronnen, hoe groter het warmteverlies dus zal zijn. Indien alleen de verliezen door nettostraling gecompenseerd moesten worden, zou gedurende een nacht slechts 200.000–300.000 kcal.ha^{-1} nodig zijn. De verliezen tengevolge van (a) en (b) kunnen echter enkele miljoenen kcal.ha^{-1} bedragen.

De actieve methoden ter bescherming tegen nachtvorst zullen, indien ze werkelijk efficiënt willen zijn, dan ook krachtige middelen moeten zijn, die daardoor ook in de meeste gevallen tot hoge kosten zullen leiden.

5.3.1. Bedekking

Door bedekking wordt tijdens heldere nachten de uitstraling van plantendelen verminderd. Het bedekkingsmiddel treedt tussen de planten en de atmosfeer op als een nieuw warmteuitstralend oppervlak. De tussen de bodem en bedekking ingesloten lucht, de planten en het bodemoppervlak, koelen minder sterk af. Men kan lage cultures in hun geheel bedekken door lagen stro, karton, glaswol, plasticfolie etc. of men kan de afzonderlijke planten of een rij planten bedekken. Voor het laatste worden veelal kokers of matten van stro en riet gebruikt, plastic werkt in dit verband minder gunstig. In de meest gunstige gevallen kan men een bescherming van 6°C verkrijgen. Het merendeel van de bedekkingen geeft echter slechts een bescherming tegen lichte vorst (tot enkele graden beneden 0°C). Het grote nadeel van deze methode is echter de vele arbeidsuren die nodig zijn voor het aanbrengen en verwijderen van de bedekking.

5.3.2. Nevel- en rookschermen

Gedurende de kritieke perioden neemt men waar dat indien er bewolking aanwezig is, het gevaar voor schade door nachtvorst sterk afneemt. Door de terugstraling van het wolkendek wordt de effectieve uitstraling aan het aardoppervlak veel kleiner. Voor het langgolelige infrarood met een golflengte van 10 μ gelden de volgende getallen (zie tabel 5.1).

TABEL 5.1: Effectieve uitstraling in het infrarood bij verschillend wolkendek

soort wolken	gem. effect. uitstr. in cal. cm ⁻² . min ⁻¹	gemiddelde hoogte van de basis der wolken
nimbostratus	0.005–0.02	1.5 km
altocumulus	0.01–0.04	3 km
cirrus	0.10–0.13	6 km
onbewolkt	0.12–0.18	—

TABLE 5.1: Net radiation loss of the earth's surface under different cloud covers

Alhoewel de wolken eveneens langgolelige straling uitzenden naar de wereldruimte, is de hoeveelheid straling die naar de wereldruimte ontwijkt bij dichte bewolking kleiner dan bij heldere lucht, daar zij afkomstig is van de bovenste lagen van het wolkendek die per eenheid van oppervlak minder uitstralen dan het aardoppervlak omdat daar de temperatuur lager is dan die van de bodem. Dichte mist heeft hetzelfde resultaat als bewolking vandaar dat men al sinds lange tijd getracht heeft cultures te beschermen tegen nachtvorst door het creëren van nevel- en rookschermen. Pas in de laatste decennia echter, heeft men deze methode aan een kritisch onderzoek onderworpen, mede door het gebruik voor militaire camouflage doeleinden.

Om een rookscherm te verkrijgen worden door verbranding van bepaalde stoffen kleine deeltjes in de vochtige lucht gebracht. Al naar de aard van de deeltjes vormt zich een meer of minder dichte rook. Naast het verbranden van afvalproducten uit land-, tuin- en bosbouw zijn veel gebruikte middelen:

'Tauno-Laine' een mengsel van zwaveltrioxyde en waterdamp en de chemische middelen 'Fumex' (een mengsel van zink en een organische chloorverbinding) en de 'Vulkaannevel' (een rookmiddel met hexachlooraethaan als basis).

Een tweede groep van middelen heeft door de vorming van nevelschermen een vergelijkbare werking. Men gebruikt nevelzuren als titaan-tetrachloride en silicium-tetrachloride. Voor een uitvoerige beschrijving van deze en andere middelen zie SCHNELLE (1965). Uit diverse onderzoeken (CLENENIN, 1955; COLLINS, 1946; GODARD en NIGOND, 1954; OZAWA, 1960) is gebleken dat het nuttig effect van de rook- en nevelschermen gering is. Zelfs bij een goede uitvoering wordt slechts een temperatuureffect van 1–2°C verkregen. Tevens kan het gebruik van chemische middelen schade aan de planten tot gevolg hebben.

Uit de theoretische studies die gemaakt zijn over de rook- en nevelschermen (BOUCHET, 1954; DE BOER, 1965) zijn de oorzaken van de vele mislukkingen met deze methode te verklaren. De werkzaamheid van de nevel of rook hangt zeer sterk af van de straal van de deeltjes (cq. waterdruppels) en de hoeveelheid van het middel dat gebruikt wordt om de nevel of rook te veroorzaken. DE BOER berekende dat de waterdruppels een straal van 7,5–8,5 μ moesten hebben en een precipitabele waterdikte van 0,002 cm nodig was om het atmosferische venster (8–12 μ) voor 99% te sluiten. Dit wil zeggen dat slechts 1% van de langgolvlige straling van het aardoppervlak direct doorgelaten wordt door de atmosfeer indien er ongeveer $8,2 \times 10^5$ druppels met een straal tussen 7,5 en 8,5 μ in een verticale kolom met een doorsnede van 1 cm² zitten.

Uit het onderzoek van RITTBERGER (1960) blijkt dat in natuurlijke wolken de druppels met een straal van 5–10 μ ver in de meerderheid zijn, hieruit is dus de goede afscherming van een wolkendeek te verklaren.

Tot nu toe heeft men in de praktijk geen nevel of rook kunnen verwekken met de vereiste dichtheid en afmeting van de deeltjes. Zo heeft men bij nevelschermen geen druppels groter dan 4 μ kunnen verkrijgen. Naast deze technische moeilijkheden kan deze methode ook alleen gebruikt worden over grotere oppervlakten door de verplaatsing van de nevel (of rook) door wind of plaatselijke luchtstromingen. Tevens moet men bedacht zijn op de gevaren voor het verkeer in de omgeving van de behandelde terreinen. Het grote voordeel van de methode zijn de relatief geringe kosten. Voor een oppervlak van minimaal 10 ha zijn de materiaalkosten per hectare bij nevelschermen ca. f 10,— en bij rookschermen f 5,— tot f 10,—. De methode zou dus geschikt zijn voor het voorkomen van lichte nachtvorst over grotere oppervlakten mits men grotere druppels zou kunnen maken.

5.3.3. Infrarood apparatuur

De aanvoer van energie door straling vermijdt in principe de verwarming van de omgevende lucht. Bij gebruik van infrarood apparatuur echter is de energiebron altijd min of meer puntvormig en heeft een hoge temperatuur. Een deel van de energie gaat zo verloren door convectie. Het effect van de straling vermindert zeer snel met de afstand van de bron, bovendien schermen naar de bron toegerichte delen van het plantendeek andere gedeelten af, deze worden dan al-

leen beschermd door de warme lucht die boven de oppervlakte van bestraalde delen ontstaat. Bijna alle ontvangen energie dient dus ter vervanging van het energieverlies door uitstraling, het temperatuureffect is $1-2^{\circ}\text{C}$. Indien men echter een verhoging van de temperatuur wil verkrijgen die groter is dan het temperatuurverschil tussen plant en omgevende lucht, dan is een verwarming van deze lucht onvermijdelijk. Men gebruikt daarom vaak een combinatie van straling en verwarming. Het meest bekende apparaat is de Amerikaanse 'frost guard', bestaande uit een oliebrander in een stalen vat die aan de bovenkant voorzien is van een aluminium reflector. Het grote bezwaar van deze uit het oogpunt van nuttig rendement gunstige methode zijn de hoge aanschaffingskosten (ca. f 1250,— per brander). Om een bescherming van $3-4^{\circ}\text{C}$ te verkrijgen zijn 4 branders per hectare noodzakelijk.

5.3.4. Verwarming

Indien men aan bescherming tegen afkoeling denkt is de directe verwarming van de bedreigde delen de eerste in aanmerking komende methode. Deze methode wordt dan ook veelvuldig toegepast (CLEDENIN, 1955; GESLIN, 1962; KESSLER en KAEMPFFERT, 1940; PERRAUDIN, 1961).

Bij gebruik van branders wordt de afkoeling van de plantendelen geremd, zowel door de toename van de luchttemperatuur en daardoor de voelbare warmtestroom naar de planten, als door toename van de stralingstroom naar de planten.

De energieafgifte van een brander is een functie van de warmtecapaciteit van de brandstof en de snelheid van verbranding. Het verschil in rendement bij de omzetting van brandstof in warmte verschilt bij de diverse branders weinig. Er is echter een verschil in de verdeling van deze warmte in stralings- en convectieve energie. Zo zullen branders met hoge 'schoorstenen' ongeveer 25 procent van de warmte als straling afgeven, terwijl een open vlam slechts 10 procent in de vorm van straling afgeeft (KEPNER, 1951). De rest van de energieafgifte, de voelbare warmte, ontwijkt in een opstijgende kolom warme lucht. De hoogte van deze kolom, of de dikte van de verwarmde luchtlaag, hangt af van de temperatuurinversie, het brandstofverbruik en de windsnelheid. Bij gebruik van grote branders of verbrandingspotten heeft men een groot verlies aan warmte door de verwarming en opstijging van de lucht boven de branders. Een groot aantal kleine branders zal dan ook gunstiger werken dan enkele grote. Een verbetering is ook het gebruik van de beter regelbare branders met schoorsteen zoals die in Californië ontwikkeld zijn.

Belangrijk is de bepaling van de hoeveelheid energie die aangevoerd dient te worden om een toereikende bescherming te bieden. RENTSCHLER (1960) berekende dat voor de bescherming tegen een daling van de temperatuur tot -5°C een warmtehoeveelheid van 15.000 tot 20.000 kcal per 100 m^2 per uur noodzakelijk is. Dit betekent dat bij nachtvorst zonder wind $3-4\text{ kg}$ olie per 100 m^2 per uur gebruikt moet worden (1 kg olie levert ongeveer 10^4 kcal). CRAWFORD (1964, 1965) heeft een methode ontwikkeld voor de berekening van de benodigde energie voor bescherming tegen vorst als functie van zeven variabelen (dikte van

de verwarmde laag, temperatuur inversie, windsnelheid, hoogte van het gewas, convectieve warmte geleverd per brander, temperatuurverschil met de omgevende lucht, oppervlakte en hoogte van bovenwindse vegetatie). De energiebalans die hij voor een boomgaard opstelt bevat de volgende termen: warmteafgifte door de afkoelende laag (boomgaard) is gelijk aan de som van het verlies tengevolge van advectie van koude lucht door de wind, binnenstromen van koude lucht door daling van de luchtdruk tengevolge van de opstijging van warme lucht, uitstraling en warmteafgifte van de branders. Vergelijking van de ontwikkelde theorie met gegevens uit metingen gaf een nauwkeurigheid van 5 procent te zien. Gegeven de volgende omstandigheden:

- a. Brandstofverbruik en temperatuurinversie beperken de verwarming tot een laag van 15 meter dikte.
- b. Windsnelheid ca. 70 cm. sec^{-1} .
- c. Oppervlakte proefveld 8 hectare.
- d. Temperatuurverschil met omringende koudere lucht: $4,5^{\circ}\text{C}$,
dan volgt uit de theorie dat $25.000 \text{ kcal per } 100 \text{ m}^2 \text{ per uur}$ noodzakelijk zijn om de temperatuur in de boomgaard constant te houden.

Het grote bezwaar van de methode door directe verwarming zijn de vele arbeidsuren die het vullen en het onderhoud van de branders eisen. Bij langdurig branden gaan ook de kosten van de brandstof een rol spelen. Tegenover deze nadelen staat echter een nagenoeg afdoende bescherming tegen alle soorten nachtvorst. Deze methode is zowel toe te passen op terreinen met kleine als grote oppervlakte.

Een verbetering is recent toegepast in Duitsland en Zwitserland. Vanuit een reservoir wordt de olie onder druk via plastic leidingen naar de diverse branders gebracht. De bediening wordt zodoende veel eenvoudiger en vraagt minder arbeidsuren.

In afgelegen gebieden is het mogelijk, door het aanleggen van een barrière van vuur voor de kwetsbare cultures, de toestroming van koude lucht langs hellingen e.d. te verhinderen. Door de grote rookontwikkeling die ontstaat door het gebruik van afval als brandstof is deze methode echter in bevolkte gebieden niet te gebruiken.

De laatste ontwikkeling op het gebied van de directe verwarming is de gebruikmaking van propaangas in Frankrijk (TABARD en BERBEN, 1965). Via een buizen-net met een groot aantal branders wordt de aanplant beschermd tegen afkoeling. Met 1190 branders per hectare en een overdruk van het propaangas van 800–1200 mb bereikte men een temperatuureffect van $2-2,5^{\circ}\text{C}$.

Directe verwarming van de bedreigde cultures biedt dus een goede bescherming, de investerings- en onderhoudskosten zijn echter veelal hoog. Waarschijnlijk zal het gebruik van aardgas een belangrijke kostenverlaging mogelijk maken.

5.3.5. Berekening (besproeiing)

De bescherming van beplantingen tegen nachtvorst door besproeiing met water wordt verkregen door de vrijkomende warmte bij de bevrozing van het

water (80 cal per gram gevormd ijs). Een deel van deze warmte gaat verloren door uitstraling naar de atmosfeer, de rest dient ter handhaving van de temperatuur van de planten op 0°C. Het principe van de methode is dus het handhaven op de vegetatie van een hoeveelheid water in de toestand van bevrozing (BUSINGER, 1965; DAVIS, 1955; JENNY, 1958a, 1958b, 1958c, 1964; PERRAUDIN, 1961; POGRELL, 1958; WRIGHT, 1956). Vergeleken met de nachtvorstbestrijding door directe verwarming zijn de verliezen door convectie tengevolge van de lage temperatuur van de bron van energie zeer laag, rekening moet echter worden gehouden met de verdamping die rechtstreeks afhangt van de vochtigheid van de lucht.

Berekening toont aan dat al naar de weersgesteldheid (windsnelheid, verzadigingsdeficit, nettostraling etc.) de toe te voeren energie van de orde van grootte is van $2-4 \cdot 10^6$ kcal.ha⁻¹.h⁻¹ of 2,5-5 mm.h⁻¹. Dit benadert de energie die nodig is bij directe verwarming. Naast de technische problemen als aantal sproeiers per hectare, diameter van de sproeiers, rotatie snelheid, regendichtheid en tijdsduur komen problemen naar voren die verband houden met de zuiverheid van het water en de secundaire invloeden van de besproeiing op de beplanting (randschade, bodemschade, breukschade). Voor een uitvoerige uiteenzetting wordt verwezen naar SCHNELLE (1965).

De bescherming die bereikt kan worden is 4-6°C, zodat de methode een middel is tegen alle nachtvorsten. Een voordeel van de methode is dat ze bedrijfszeker is en eenvoudig te bedienen (weinig arbeidsuren). De investeringskosten daarentegen zijn hoog (f 10.000-f 18.000 per hectare).

5.3.6. Ventilatie (windmachines)

De turbulentie voortgebracht door de luchtstroom van een windmachine geeft op twee manieren een bescherming tegen afkoeling. In de eerste plaats veroorzaakt deze turbulentie, bij aanwezigheid van een temperatuurinversie, de menging van de warme lucht boven de beplantingen met de koude lucht in de beplanting. Hierdoor stijgt de luchttemperatuur in de beplanting, deze stijging is evenwel afhankelijk van de grootte van de inversie. In de tweede plaats verhoogt deze extra turbulentie de turbulente transportcoëfficiënt voor de voelbare warmtestroom gericht naar de plant die normalerwijze door de uitstraling afkoelt tot beneden de luchttemperatuur. De energie die nodig is om de nachtelijke afkoeling te remmen wordt dus verkregen uit de luchtlagen boven de aanplant. (ANGUS, 1958, 1962; BROOKS e.a., 1961; CRAWFORD, 1965; FRITH, 1951; SMALL, 1949; VAN EIMERN, 1956).

Het effect van de windmachines hangt dus in de eerste plaats af van de hoogte en de grootte van de temperatuurinversie. Een goede karakteristiek voor het effect van de machine is de druk op de lucht uitgeoefend, deze druk staat in rechtstreeks verband met de oppervlakte die beschermd wordt (CRAWFORD, 1963).

De windmachines kunnen alleen economisch gebruikt worden op grote, horizontale oppervlakken met aaneensluitende beplantingen of ook wel kleinere oppervlakten (min. 1 ha) met eensoortige beplanting. Voor de beoordeling van

het nuttig effect van de windmachines heeft men veelal alleen de bereikte stijging van temperatuur in de onderste luchtlagen onderzocht. Een tweede belangrijk punt is echter het opdrogen van de plantenoppervlakken (LEHMANN, 1957). Waar deze opdroging niet voldoende is, vindt men aan de rand van het bestreken gebied door de verdamping zelfs lagere temperaturen dan in het ernaast liggende onbehandelde gebied.

Van belang voor de goede werking van de machine is ook de motor. Bij gebruik van motoren met een horizontale as en snellopende propellers heeft men 20 pk per hectare nodig, bij gebruik van motoren met verticale as en grote, langzaam draaiende propellers 40–50 pk per hectare. Het volgens ANGUS (1962) te verkiezen type heeft kleine, sneldraaiende propellers die met een hoek van 10–20° (met de horizontaal) naar het aardoppervlak toegericht zijn. De omwentelingssnelheid om de verticale as van de machine bedraagt 2–3 min. De aanschaffingskosten liggen vrij hoog f 3500,— tot f 6000,— per hectare. De bedrijfskosten daarentegen zijn laag ca. f 4,— tot f 5,— per uur per hectare (BROOKS, 1961).

Het effect dat met de windmachines bereikt kan worden is, afhankelijk van de omstandigheden, een temperatuurverhoging van 1–4°C. Deze methode kan gebruikt worden voor terreinen waar regelmatig lichte nachtvorst voorkomt. Voor een goede werking is een temperatuurinversie van ten minste 3°C tussen 1 en 12 meter hoogte noodzakelijk (ZANON, 1960).

5.4. NACHTVORSTBESTRIJDINGSMETHODEN IN DE BOSBOUW

Van de genoemde methoden zijn enkele van belang voor de bosbouwpraktijk. De onder 5.1. genoemde biologische methoden zijn nog te veel in het experimentele stadium om voor de praktijk reeds bruikbaar te zijn. Het verdient evenwel aanbeveling de ontwikkeling van de methode waarbij gebruik gemaakt wordt van bespuiting met bepaalde stoffen zoals borium, nauwgezet te volgen.

De actieve methoden zoals verwarming, besproeiing, bedekking, brengen te hoge investeringskosten met zich mee en zijn veelal ook duur in arbeidsuren. Indien de technische moeilijkheden ten aanzien van het verkrijgen van een voldoende nevel- of rookdichtheid opgelost zijn, is de methode die gebruik maakt van nevel- of rookschermen ook voor de bosbouw van belang. Het is mogelijk dat een verplaatsbare windmachine, die enkele hectares kan bestrijken, en die achtereenvolgens voor diverse dure beplantingen gedurende enkele jaren gebruikt kan worden, een voor de praktijk weliswaar dure maar toch rendabele methode van nachtvorstbestrijding is in gebieden waar veelvuldig lichte nachtvorst voorkomt.

De voor de bosbouwpraktijk zeer goed bruikbare en economisch mogelijke methoden zijn de in 5.2. genoemde cultuurmaatregelen. Belangrijk is dat de koude lucht die ter plaatse ontstaat of toestroomt uit bronnen van koude lucht (akkers, onbegroeid terrein etc.) van de aanplant kan wegstromen. Stroomafwaarts van een jonge beplanting moet dus voor een goede afvoer van de koude lucht gezorgd worden. Dichte, hoge opstandsranden moeten aan deze zijde ver-

meden worden. Door een doelmatige keuze van randbeplantingen is het ook mogelijk de stroming van de koude lucht in banen om de bedreigde aanplant heen te leiden, of indien mogelijk, deze reeds van te voren in andere banen te leiden. De boven een, door een hogere beplanting omgeven, aanplant ontstane koude lucht moet door openingen in de randen afgevoerd kunnen worden.

De niveauverschillen die deze stroming van koude lucht kunnen bewerkstelligen kunnen zeer klein zijn; in het terrein praktisch niet zichtbare hoogteverschillen kunnen al van doorslaggevende betekenis zijn voor het al of niet aanwezig zijn van nachtvorstgevaar.

Voorbeelden van een dergelijke afstroming zijn te vinden op de Veluwe in het gebied ten N.O. van Ede. De afstroming vindt plaats langs de hellingen van de twee heuvelruggen waarvan de eerste ten N.O. van Lunteren begint en via Ede over het landgoed de Sijsselt richting Bennekom loopt en de tweede ten Noorden van de Driesprong op het landgoed de Vâle Ouwe begint en via Planken Wambuis naar Reemst loopt. Op het landgoed de Vâle Ouwe is het gevaar voor afstroming en ophoping van koude lucht tegen dichte bosranden e.d. nog goed te zien (helling 1:50 tot 1:80), de geringe hoogteverschillen op de Ginkelse heide daarentegen geven op het oog geen aanleiding om te veronderstellen dat het bosgebied zich daar in een verzamelbekken van koude lucht bevindt. De koude lucht stroomt hier van beide heuvelruggen naar toe en dit heeft het gevolg dat hier tot op een hoogte van 5-10 meter nog vorstschade aan de bomen gevonden wordt.

Een tweede belangrijke maatregel is het verwijderen van onkruid en struikgewas. Het onkruid vergroot het nachtvorstgevaar door de lage temperaturen die aan het oppervlak ervan voorkomen.

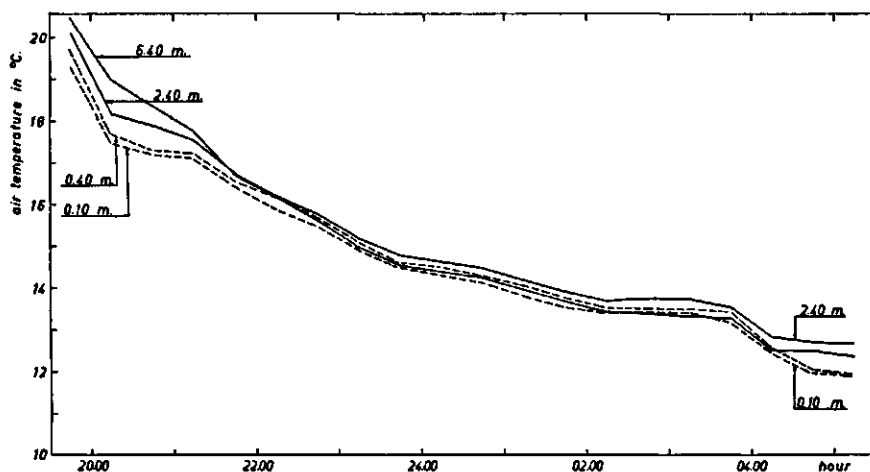


FIG. 5.3. Luchttemperaturen tussen en boven een jonge aanplant op onbegroeide grond (Smilde, 27/28-8-1964).

FIG. 5.3. Air temperatures in and above a young forest plantation on bare soil (Smilde, 27/28-8-1964).

Metingen Smilde. Een voorbeeld geven de metingen van luchttemperaturen op het proefveld in Smilde tijdens de nacht van 27/28-8-1964, figuren (5.3) en (5.4). In figuur (5.3) zijn weergegeven de temperaturen boven een jonge aanplant op overigens onbegroeid terrein, in figuur (5.4) de temperaturen boven het er naast gelegen gedeelte van de aanplant in lang gras. De remming van de afkoeling rond 21.00 uur is het gevolg van de grotere windsnelheid, figuur (5.5).

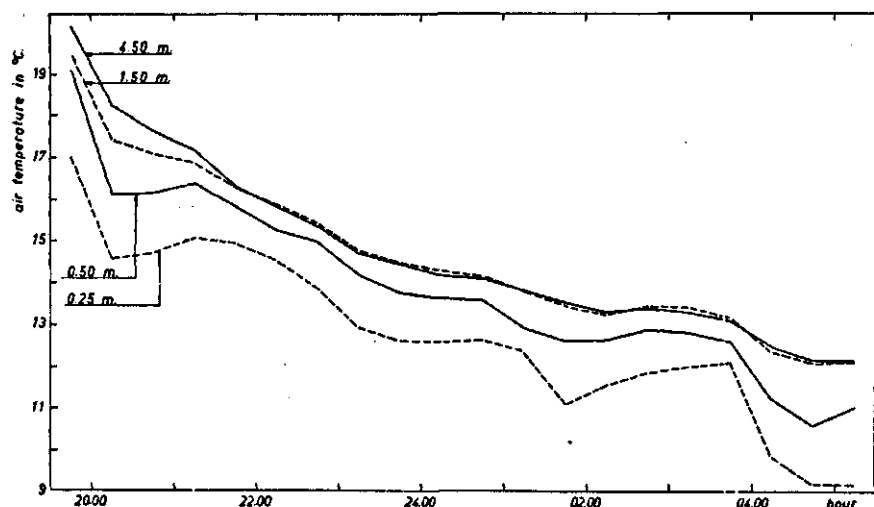


FIG. 5.4. Luchttemperaturen tussen en boven een jonge aanplant in lang gras (Smilde, 27/28-8-1964).

FIG. 5.4. Air temperatures in and above a young forest plantation in long grass (Smilde, 27/28-8-1964).

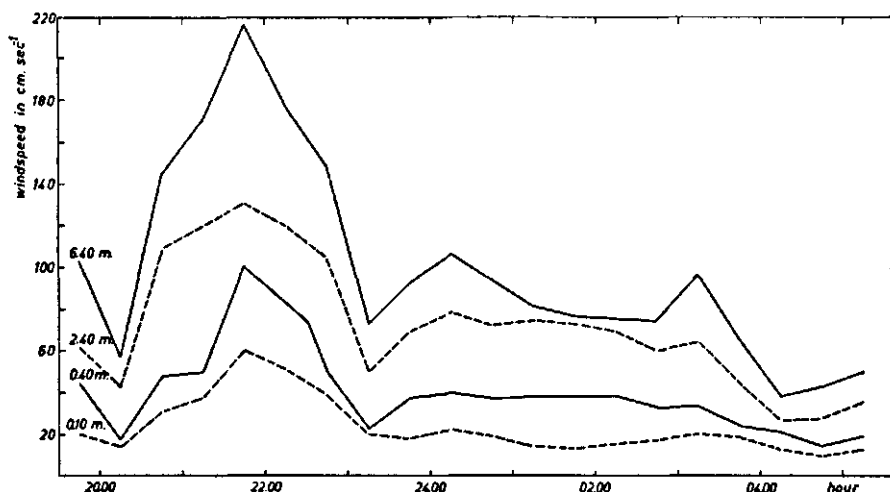


FIG. 5.5. Windsnelheid tussen en boven een jonge aanplant op onbegroeide grond (Smilde, 27/28-8-1964).

FIG. 5.5. Windspeed in and above a young forest plantation on bare soil (Smilde, 27/28-8-1964).

Duidelijk blijkt uit de grafieken dat de temperatuurgradiënt boven het gras veel groter is dan boven de zwarte grond. De temperaturen op 4,50 m en 1,50 m liggen slechts iets lager dan de vergelijkbare temperaturen boven het onbegroeide terrein. Het grote verschil in temperatuur wordt vlak boven de grond gevonden. Het verschil in temperatuur op 0,50 m (het niveau van de langste grashalmen) varieert gedurende de nacht van 0,6–1,2°C. De verschillen in temperatuur tussen begroeid en onbegroeid terrein op 0,25 m, wat in het eerste geval betekent tussen het gras, zijn veel groter, namelijk van 1,5–3,0°C. Dat de verschillen niet nog groter geworden zijn is ten dele een gevolg van de nog heersende wind en ten dele een gevolg van de na 22.00 uur ontstane stralingsmist. Deze mist, die een hoogte van 4–5 meter bereikte, is er ook de oorzaak van dat de temperaturen op 6,40 m resp. 4,50 m beneden de temperaturen op 2,40 resp. 1,50 m komen te liggen. De oppervlakte van de mist vormt een nieuw uitstralend oppervlak waarboven lagere temperaturen voorkomen dan in de stralingsmist zelf. In de mist wordt slechts een geringe temperatuurgradiënt gemeten, tenzij de opbouw, zoals boven het gras het geval is, verstoord wordt. De sterke daling van temperatuur om 05.00 uur is het gevolg van het afnemen van de windsnelheid en het verdwijnen van de mist.

Metingen Emmen. Naast een grasbedekking kan ook door struikengroei en lage schermbeplantingen het nachtvorstgevaar vergroot worden. De remming van de wind heeft een geringere menging van de lucht tussen en boven de aanplant tot gevolg. De hierdoor ontstane sterkere afkoeling van de lucht rond de jonge boompjes wordt niet gecompenseerd door de grotere terugstraling van de omringende struiken en lage bomen. Een beeld van de grote verschillen in luchttemperatuur die boven 'zwartgemaakte' grond en tussen struiken kunnen optreden geven de resultaten van de metingen op het proefterrein in Emmen op 3/4 en 4/5–6–1965.

Tijdens een heldere nacht met weinig wind (4/5–6) worden tussen het struikgewas (figuur 5.6) veel lagere temperaturen gemeten dan boven de zwartgemaakte grond (figuur 5.7). Omstreeks 22.00 uur bedraagt het temperatuurverschil op 5 cm hoogte 4,5°C. Door een geringe toename van de wind (figuur 5.8) daalt dit verschil tot 3,0°C. Dit verschil blijft lange tijd gehandhaafd totdat het, door de sterke stijging van de windsnelheid, om 02.30 uur gereduceerd wordt tot 0,5°C. Door de grotere windsnelheid, op 6,40 meter groter dan 1 m.sec⁻¹, wordt de temperatuurgradiënt boven beide terreinen klein. De om 3.30 uur volgende afname van de wind heeft direct een sterke daling van temperatuur tussen het struikgewas tot gevolg, waardoor het temperatuurverschil op 5 cm weer oploopt tot ca. 3°C.

Een overzicht van het duidelijke verschil in temperatuur dat er bestaat boven de twee terreinen geeft figuur 5.9. Hieruit blijkt ook dat er op 6,40 meter praktisch geen verschil meer in temperatuur te vinden is.

Uit het hierboven geschetste beeld van het temperatuurverloop blijkt duidelijk de grote invloed van de wind op het temperatuurprofiel boven de schoon-gemaakte aanplant. Boven het onbehandelde oppervlak wordt het temperatuur-

profiel pas beïnvloed bij een windsnelheid op 6,40 m van ca. $1 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$.

De resultaten van de metingen op 3/4-6, figuur 5.10 en 5.11, tonen aan dat de temperaturen boven het onbehandelde gedeelte ook onder een wolkendek

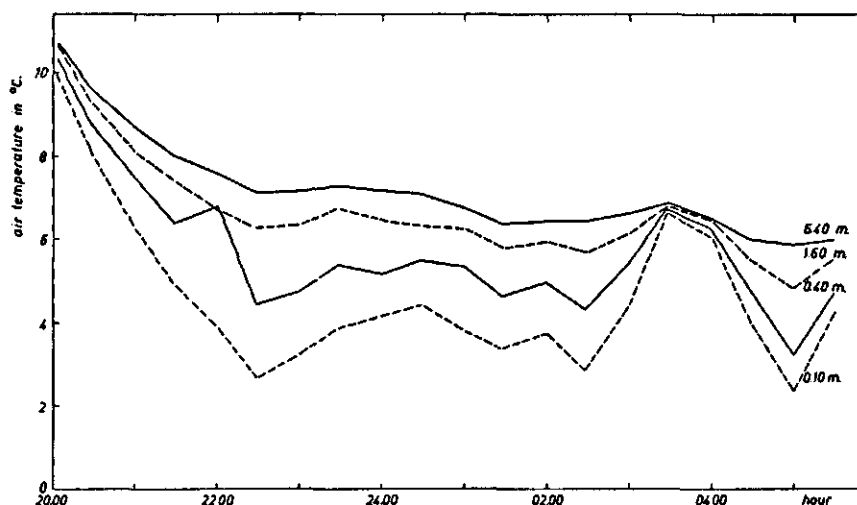


FIG. 5.6. Luchttemperaturen tussen en boven een jonge aanplant geplant in struikgewas en lage schermbeplanting (Emmen, 4/5-6-1965).

FIG. 5.6. Air temperatures in and above a young forest plantation planted between scrub and small trees (Emmen, 4/5-6-1965).

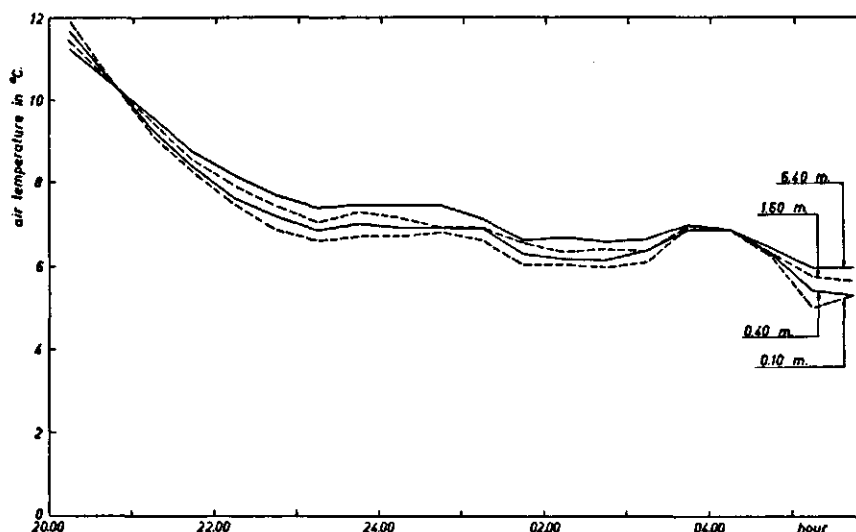


FIG. 5.7. Luchttemperaturen tussen en boven een jonge aanplant op zwartgemaakte grond (Emmen, 4/5-6-1965).

FIG. 5.7. Air temperatures in and above a young forest plantation on cultivated soil (Emmen, 4/5-6-1965).

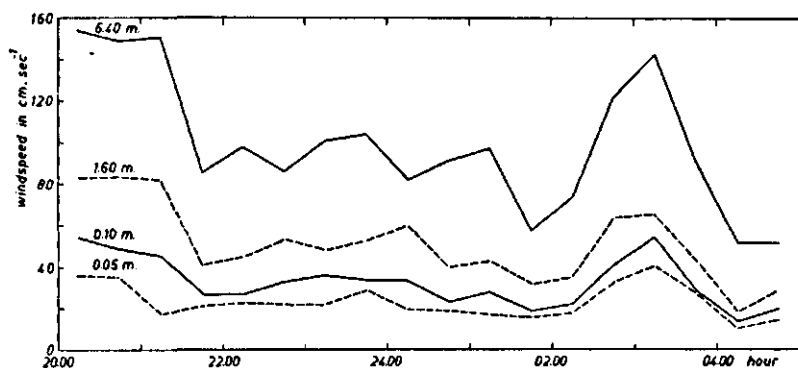


FIG. 5.8. Windsnelheid tussen en boven een jonge aanplant op zwartgemaakte grond (Emmen, 4/5-6-1965).

FIG. 5.8. Windspeed in and above a young forest plantation on cultivated soil (Emmen, 4/5-6-1965).

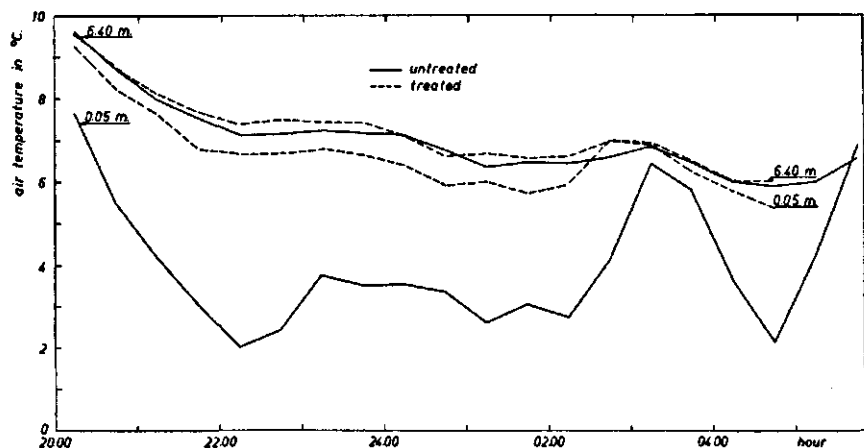


FIG. 5.9. Vergelijking van de luchttemperaturen tussen en boven de aanplant op de zwartgemaakte grond en de aanplant in het struikgewas (Emmen, 4/5-6-1965).

FIG. 5.9. Comparison of air temperatures in and above a young forest plantation on cultivated soil and between scrub and low trees (Emmen, 4/5-6-1965).

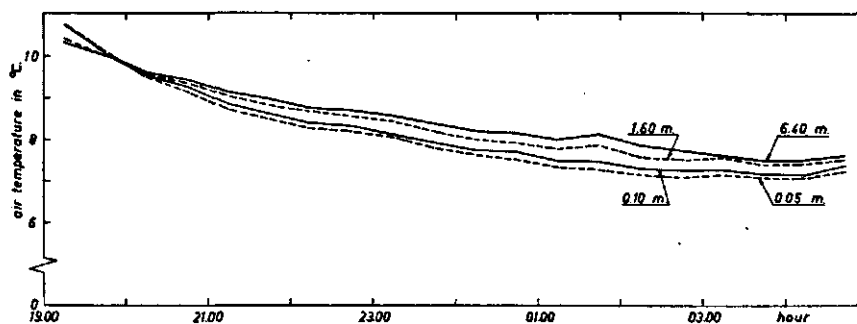


FIG. 5.10. Luchttemperaturen tussen en boven een jonge aanplant geplant in struikgewas en lage schermbeplanting (Emmen, 3/4-6-1965).

FIG. 5.10. Air temperatures in and above a young forest plantation planted between scrub and small trees (Emmen, 3/4-6-1965).

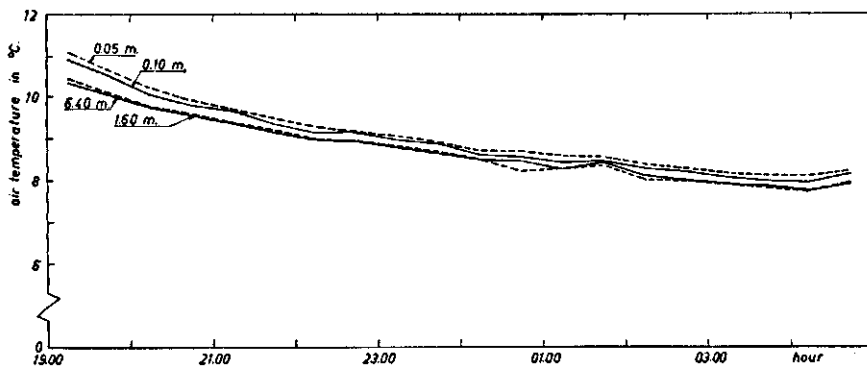


FIG. 5.11. Luchttemperaturen tussen en boven een jonge aanplant op zwartgemaakte grond (Emmen, 3/4-6-1965).

FIG. 5.11. Air temperatures in and above a young forest plantation on cultivated soil (Emmen 3/4-6-1965).

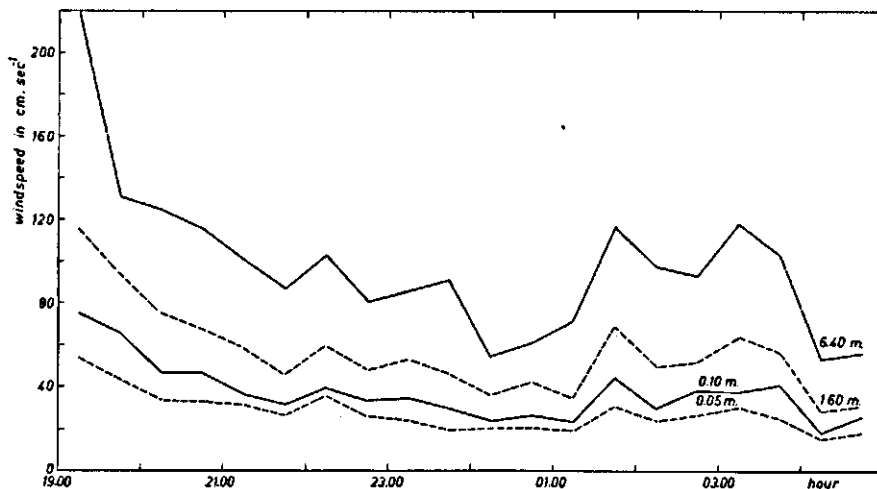


FIG. 5.12. Windsnelheid tussen en boven een jonge aanplant op zwartgemaakte grond (Emmen, 3/4-6-1965).

FIG. 5.12. Windspeed in and above a young forest plantation on cultivated soil (Emmen, 3/4-6-1965).

(geheel bewolkt) lager liggen dan boven de zwartgemaakte grond. De windsnelheid is van dezelfde orde van grootte als tijdens de heldere nacht, figuur 5.12. Door de grotere tegenstraling van de atmosfeer is de nettostraling nabij het oppervlak veel kleiner (figuur 2.5) en dalen de temperaturen zowel boven het behandelde als onbehandelde terrein langzamer dan tijdens de heldere nacht. Niettemin zijn er duidelijk verschillen in temperatuur te constateren boven de beide terreinen. Het verschil in temperatuur op 6,40 meter boven beide terreinen bedraagt 0,2-0,5°C, het verschil op 5 cm bedraagt 1,0-1,5°C (figuur 5.13). De invloed van de wind op de (geringere) temperatuurgradiënt is hier minder duidelijke.

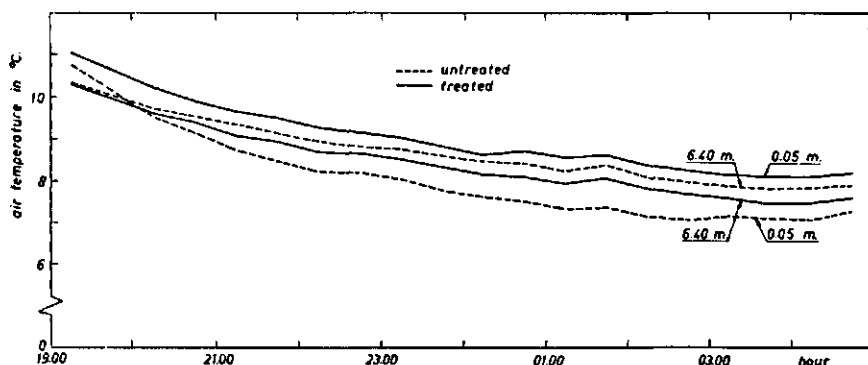


FIG. 5.13. Vergelijking van de luchttemperaturen tussen en boven de aanplant op de zwartgemaakte grond en de aanplant in het struikgewas (Emmen, 3/4-6-1965).

FIG. 5.13. Comparison of air temperatures in and above a young forest plantation on cultivated soil and between scrub and low trees (Emmen, 3/4-6-1965).

lijk te zien, de plotselinge toename van de wind na 01.00 uur heeft echter een duidelijke remming van de afkoeling en, gedurende korte tijd, een stijging van temperatuur tot gevolg.

Een markant verschil tussen beide terreinen is gedurende deze nacht de opbouw van het temperatuurprofiel. Boven het onbehandelde terrein blijft ook onder deze omstandigheden een stabiele opbouw gehandhaafd, de temperatuur stijgt met de hoogte. Boven de zwartgemaakte grond daarentegen neemt de temperatuur met de hoogte af, er vindt dus geen omkering van het temperatuurprofiel bij de overgang van dag naar nacht plaats, de onderste luchtlagen bevinden zich in dit geval in een onstabiele toestand.

Conclusies. Uit de resultaten van de metingen blijkt dus duidelijk dat in het onbehandelde terrein een veel groter gevaar voor nachtvorst aanwezig is, zowel tijdens heldere als bewolkte nachten met weinig wind. Het gehele temperatuurniveau ligt echter tijdens de bewolkte nachten hoger en door de langzamere daling van de temperatuur is de kans dat gevaarlijke temperaturen onder 0°C bereikt worden kleiner.

Het zwartmaken van de grond, d.w.z. het verwijderen van onkruid, struiken en lage schermbeplantingen is dus een goede maatregel ter voorkoming van nachtvorst. In de praktijk was dit t.a.v. het onkruid reeds bekend, duidelijke cijfers van het verschil in temperatuur boven een behandeld en een onbehandeld terrein waren echter nog niet beschikbaar. Dat deze maatregelen niet noodzakelijkerwijs kostbaar behoeven te zijn bewijst het overzicht in tabel 5.2 van de aan beide terreinen bestede kosten, uitgedrukt in manuren per hectare. Opgemerkt dient te worden, dat deze kostenvergelijking alleen betrekking heeft op het betreffende perceel en dat de verhouding voor andere terreinen geheel verschillend kan zijn.

TABEL 5.2: Kosten (in manuren per ha) bij volledige en gedeeltelijke bewerking

vak 45 gedeeltelijk bewerkt		vak 45 volledig bewerkt	
takken op rillen gooien	80 manuren	met slagmaaier bewerken	14 manuren
bewerken met Gepas ploeg	50 „	ploegen	55 „
planten	55 „	hulp bij ploegen	110 „
vrijstelling van de		planten	50 „
aanplant (2×25)	50 „	met cultivator bewerken	15 „
		($2 \times 7\frac{1}{2}$)	
	235 manuren		245 manuren

TABLE 5.2: Cost (man-hours per ha) by complete and partial cultivation

Alhoewel de volledige bewerking vele voordelen geeft, minder gevaar voor nachtvorst en als gevolg daarvan minder inboeten en betere groeieresultaten, zijn de extra kosten die hieraan verbonden zijn gering. Om te kunnen beoordelen of deze methode van nachtvorstbestrijding door volledige bewerking, op grote schaal aanbeveling verdient, is het wenselijk dat de methode op enkele grotere proefterreinen getest wordt.

SAMENVATTING

1. INLEIDING

Nadat het doel van het onderzoek aangegeven is, worden enkele definities gegeven o.a. voor de begrippen *vorst* en *nachtvorst*. De vier proefsterreinen, waarvan drie in Nederland en één in Tunesië, worden beschreven naar ligging en beplanting. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de verrichte metingen en de gebruikte instrumenten.

2. NACHTELIJKE ENERGIEBALANS NABIJ HET AARDOPPERVLAK

De termen van de energiebalans aan het aardoppervlak worden besproken en voor de termen die gedurende de nacht het belangrijkste zijn worden de methoden van meting en berekening aangegeven. Het betreft hier de volgende warmtestromen:

- a. de langgolvige straling. De figuren 2.3 en 2.4 geven de resultaten van metingen tijdens heldere nachten. De invloed van bewolking en mist is weergegeven in de figuren 2.4 en 2.5. Ook werd het verschil in nettostraling tussen lang gras en boven de onbedekte grond gemeten (fig. 2.5).
- b. de warmtestroom in de bodem. De metingen uitgevoerd met een warmtestroommeter worden weergegeven in de figuren 2.3, 2.7 en 2.8. De verschillen in warmtestroom tussen heldere en bewolkte nachten komen hierin duidelijk naar voren. Bijzondere aandacht is besteed aan een nieuwe methode voor de bepaling van de warmtestroom in de bodem en de thermische constanten van de grond nabij het aardoppervlak (VAN WIJK e.a., 1965, 1967). Na een korte weergave van de theorie en de uitvoering van de metingen worden drie voorbeelden van buitenmetingen te Ariana (Tunesië) en de berekeningen besproken (fig. 2.9 t/m 2.15).
- c. de warmteuitwisseling in de onderste luchtlagen. De resultaten van de berekening van de warmtestroomdichtheid H_{at} en de turbulente transportcoëfficiënt voor warmte zijn weergegeven in de tabellen 2.2. t/m 2.6. Een duidelijk verband met de windsnelheid en de hoogte wordt aangetoond.
- d. de latente warmtestroom en de warmtestroom door de stofwisseling. Deze beide laatste warmtestromen worden kort besproken en gemiddelde waarden voor een heldere nacht met weinig wind zijn aangegeven.

3. TURBULENTIE EN STABILITEIT IN VERBAND MET DE WIND- EN TEMPERATUURPROFIELEN NABIJ HET AARDOPPERVLAK

Een korte inleiding wordt gegeven over de transportverschijnselen en het turbulente transport. De thermisch neutrale en gelaagde opbouw van de onderste luchtlagen wordt besproken met de stabiliteitsparameters R_t en L . Het belangrijkste onderdeel van dit hoofdstuk omvat een behandeling van de theorieën ontworpen om de wind- en temperatuurprofielen weer te geven. In het

bijzonder wordt hierbij aandacht geschonken aan de profielen bij stabiel evenwicht. Voor de verwerking van de meetresultaten worden de formules van MCVEHIL (1964) en SWINBANK (1964) gebruikt.

Na de berekening van de wind- en temperatuurprofielen wordt een overzicht gegeven van de verschillen tussen gemeten en uit de profielen berekende windsnelheden en temperaturen (tabellen 3.1 t/m 3.6). In de tabellen 3.7 t/m 3.10 worden de waarden voor de constanten uit de, voor de profielen gekozen, algemene vorm weergegeven. Er blijkt een duidelijk verband te bestaan tussen de profielen berekend met de gemiddelde windsnelheden en temperaturen (gemiddelden over een half uur) en het windsnelheidsniveau en de bewolkingsgraad. De tabellen 3.11 t/m 3.14 geven waarden voor de stabiliteitsparameter L , de profielvormfactor P en de verhouding $L'/\alpha'L$. De waarden voor L blijken bij stabiele gelaagdheid van de onderste luchtlagen aanzienlijk kleiner te zijn (ongeveer een factor 10) dan de waarden voor L geldend voor de onstabiele toestand. De profielvormfactor is een maat voor de gelijkvormigheid van de temperatuur- en windprofielen, in veel gevallen liggen de waarden voor P dicht bij 1. De verhouding $L'/\alpha'L$, die gelijk is aan $1/\alpha$, geeft afhankelijk van de graad van stabiliteit waarden van α in de trajecten 0,5–1,0 en 1,0–2,0. Deze waarden komen overeen met de door MONIN en OBUKHOV (1954) en SWINBANK (1964) gevonden resultaten.

Uit de literatuur blijkt dat ten aanzien van de stabiele toestand nog weinig bekend is. Veelal neemt men aan dat er bij het verdwijnen van de turbulentie (waarden voor het getal van Richardson $> 0,2$) geen bepaalde vorm meer bestaat voor het windprofiel. Uit de metingen beschreven in deze publicatie blijkt echter dat de vorm aangegeven voor SWINBANK in de meeste gevallen goed voldoet. Zo blijkt bij een selectie uit alle berekende profielen, dat de stabiliteitsparameter L binnen nauwe grenzen varieert. Voor deze geselecteerde profielen is ook de, voor de transportprocessen, belangrijke factor K_H/K_M berekend, (tabellen 3.15 en 3.16). Deze verhouding wordt zeer klein bij sterke stabiliteit en neemt af met de hoogte. De invloed van de stralingsstroomdivergentie op de nachtelijke afkoeling moet groot zijn en nauw samenhangen met de variatie van H_{at} met de hoogte. Een nadere bestudering van de processen waarbij warmteoverdracht plaatsvindt onder stabiele omstandigheden is gewenst. Men dient hierbij niet als uitgangspunt te nemen, zoals bij de bestaande theorieën veelal wordt gedaan, dat de warmtestromen constant zijn met de hoogte.

4. VORSTSCHADE EN VORSTRESISTENTIE

Dit hoofdstuk bevat een overzicht, uit de recente literatuur, van de verschijnselen die optreden in de levende planten tijdens bevriezing. Naast de bespreking van de wijze waarop de schade veroorzaakt wordt, is aandacht besteed aan de factoren die van invloed zijn op de vorstresistentie. Tevens wordt een indruk gegeven van de verandering van vorstresistentie door de milieufactoren: temperatuur, straling, watervoorziening en voeding. Tot slot wordt aan de hand van enkele voorbeelden de mate van vorstresistentie bij enkele houtsoorten besproken.

5. BESCHERMING TEGEN NACHTVORST

Aan de hand van een beschrijving van de vele methoden die in de land- en tuinbouw aanbevolen of gebruikt worden is bekeken welke methoden, onder omstandigheden, in de bosbouw gebruikt kunnen worden. De diverse actieve methoden zullen voor de bosbouw veelal te kostbaar zijn, een mogelijke toepassing van een windmachine voor dure beplantingen kan aanbevolen worden. De biologische methoden verkeren veelal nog in het onderzoekstadium in de laboratoria. De bijzondere middelen zoals een bespuiting met borax kunnen echter in de nabije toekomst aanbeveling verdienen.

De voor de bosbouw zeer goed bruikbare methoden zijn de cultuurmaatregelen. In het bijzonder wordt gewezen op het verwijderen van onkruid en struikgewas. Het gevaar van onkruid wordt aangetoond met behulp van de resultaten van de metingen te Smilde (figuren 5.3, 5.4 en 5.5). Op het proefveld te Emmen worden vergelijkende metingen verricht naar de verschillen in luchttemperatuur boven schoongemaakte grond en tussen struikgewas en lage bomen. Hierbij worden grote verschillen in temperatuur gemeten (figuren 5.6, 5.7 en 5.9). Zelfs gedurende een geheel bewolkte nacht bleek dat het gevaar voor een sterke daling van de temperatuur boven zwartgemaakte grond kleiner was (figuren 5.10, 5.11 en 5.13). De windsnelheden tijdens beide nachten zijn van dezelfde orde van grootte (figuren 5.8 en 5.12). Uit de resultaten van de metingen kan de conclusie getrokken worden dat het verwijderen van onkruid, struiken en lage schermbeplantingen een goede maatregel ter voorkoming van nachtvorst is.

SUMMARY

FROST AND MICROCLIMATE

In particular in young forest plantation

(Received 23-I-1967)

1. INTRODUCTION

Already early in history mankind has used methods to prevent frost damage. These first methods consisted in the building of fires out of weeds and scrubs. In the last century a series of methods have been proposed and utilized in horticulture and agriculture.

In forestry the damage caused by frost can also be considerable. The purpose of this publication is to consider whether, out of the whole scale of frost prevention methods, there are methods which can be used in forestry.

An important part of the research has been devoted to the study of the description of the microclimate and the relations between the physical phenomena which occur in the lowest air layers during inversion conditions.

After a review of the various definitions the following have been chosen: *frost* = the falling of the air temperature below 0°C and '*night frost*', a conception unknown in the English language = the condition close to the earth's surface when the air temperatures are above 0°C during the day and are falling below 0°C during the night because of the strong radiation of the earth's surface below a clear sky in connection with very light wind.

The measurements have been carried out at four sites: Smilde, Het Planken Wambuis and Emmen in The Netherlands and at Ariana in Tunisia. The first three were clearings inside a forest area. The experimental field at Ariana was an open area bordering an olive-plantation.

The following measurements were carried out at different heights above the ground surface: air temperature, humidity of the air, windspeed, net longwave radiation. At different depths were measured: soil temperature (0–6 cm) and soil heat flux. Incidentally dew, wind direction and cloudiness were measured or estimated.

2. ENERGY BALANCE AT THE EARTH'S SURFACE DURING THE NIGHT

The different terms of the energy balance are considered with special attention paid to the following fluxes:

Net longwave radiation flux. Measurement during clear and cloudy nights (fig. 2.3, 2.4 and 2.5). A comparison is made between the net radiation above bare soil and a long grass vegetation (fig. 2.6).

The soil heat flux measurements, made with heat flux plates ($2,5 \times 2,5 \times 0,3$ cm), are presented in fig. 2.3, 2.7 and 2.8. Special attention is given to the new

method for the measurement of the soil heat flux and the thermal constants of the soil near the surface (VAN WIJK et al, 1965, 1967). After a brief explanation of the theory (formules 2.8 and 2.9) and the experiments, three examples of measurements in the field are given (fig. 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 and 2.15).

The sensible heat flux in the lowest air layers is calculated using the model of SWINBANK (1964). Tables 2.2 and 2.3 give the results. The calculated turbulent exchange coefficient for heat K_H is given in table 2.4. Clearly is demonstrated the dependance of K_H (and H_{at}) on windspeed and height. The corresponding temperature gradients are given in table 2.5.

The latent heat flux and the heat flux resulting from the photosynthesis and the respiration of the plants are briefly viewed, and average values for these fluxes are given.

3. TURBULENCE AND STABILITY IN CONNECTION WITH THE WIND AND TEMPERATURE PROFILES NEAR THE EARTH'S SURFACE

After a short introduction on turbulence and convection, the turbulent transfer in neutral and thermally stratified conditions is discussed. The parameters for thermal stability (R_t and L) are followed by the representations for the mean profiles of windspeed and air temperature in formules 3.13–3.35 (DEACON, 1949; MONIN and OBUKHOV, 1954; MCVEHIL, 1964; SWINBANK, 1964).

The mean profiles are calculated from the measurements and the differences between calculated and measured air temperatures and windspeeds are presented in tables 3.1–3.6. Values for the factors A, B, C and D from the formules for the profiles are given in tables 3.7–3.10. The index of thermal stability (L , formula 3.15) and the shape factor (P , formula 3.16) by different windspeeds and cloudiness, are used to compare the profiles (tables 3.11–3.14). Values for the ratio $L'/\alpha'L$, which is equal to $1/\alpha$ (formula 3.24), are also given in the tables 3.11–3.14. The values for this ratio in stable conditions correspond with $0.5 < \alpha < 2.0$. To be able to discuss the results a selection from all the calculated profiles has been made and the ratio K_H/K_M for different heights has been calculated (tables 3.15 and 3.16).

Until recently very little was known about the mean profiles in thermally stratified conditions (LUMELEY and PANOFKY, 1964; WEBB, 1965). Especially for inversion conditions there is only a limited number of experimental investigations. The results of the measurements described in this publication demonstrate the profile forms in 'no-turbulence' conditions with $R_t > 0.2$.

Although we are far from a definite solution of the description of the transfer processes in stable conditions, it is possible to use the exponential profile, as proposed by SWINBANK, to calculate L , H_{at} , K_H and K_M . An important problem yet to be solved is the influence of the radiation flux divergence on the temperature profile and the sensible heat flux near the ground. An important step towards the solution of this last problem will be a theory which describes the profiles without the assumption of constancy of the fluxes with height.

4. FROST DAMAGE AND FROST RESISTANCE

After a description of the frost damage and the phenomena inside the living plants when the temperature falls below 0°C, the important factors concerning frost resistance are discussed on the basis of recent literature (LEVITT, 1956; 1959; ULRICH, 1962; LIEGEL, 1965). The change of frost resistance is discussed as it depends on temperature, radiation, water supply and nutrition. Finally some examples are given of the degree of frost resistance of different treespecies.

5. FROST PROTECTION

The different frost protection methods used in horticulture and agriculture are presented and explained and their possible application in forestry is discussed.

5.1. *Biological methods*: Choice of species, plantbreeding, special means like sprinkling with boron, growth retardation methods (e.g. gibberellin).

5.2. *Passive methods*: Choice of location for planting, soil cover, drainage of cold air, cleaning and cultivation of the soil.

5.3. *Active methods*: Covering, smoke screens and fog, infrared apparatus, heaters, sprinkling, wind machines.

Of all the methods presented only the passive methods are recommended at present, with a possible application in the near future of the biological methods and in special cases fog screens or wind machines.

With the results of the measurements in Smilde, the danger of a grass vegetation is demonstrated (fig. 5.3., 5.4 and 5.5). The possibility of frost protection by cleaning the soil surface is shown by the measurements at Emmen. The differences in air temperature above the cultivated and overgrown soil are shown in the figures 5.6, 5.7 and 5.9, for a clear night, and in the figures 5.10, 5.11 and 5.13 for a cloudy night. The windspeed above the two surfaces is of the same order of magnitude (fig. 5.8 and 5.12).

At the end of chapter 5 a comparison is given of the expenditures on the two parts of the experimental field (table 5.2). It is proposed to test this promising method at a larger scale in forestry practice.

LITERATUUR

- ANGSTROM, A., 1915. The study of radiation of the atmosphere. *Smithsonian Misc. Coll.*, **65** (3), 1-159.
- ANGUS, D. E., 1958. Frost prevention by wind machines. In: *Climatology and Microclimatology. Proc. Canberra Symp.*, UNESCO, Arid Zone Res., **11**, 265-277.
- ANGUS, D. E., 1962. Frost protection experiments using wind machines. *Commonwealth Scient. Ind. Res. Org., Div. Meteorol. Melbourne, Physics Techn. Paper*, **12**, 44 pp.
- BAUMGARTNER, A., 1956. Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes. *Ber. Deut. Wetterdienstes*, **5** (28), 53 pp.
- BELTRAM, V., 1958. Bor als Frostschutz. *Allg. Forstz.*, **13**, 147-148.
- BELTRAM, V., 1959. Borax, moyen prouvé contre les gelées: découverte de 1952 et recherches de 1953-1958. *Confederazione Internazionale dei Tecnici Agricoli*, Rome 7-9 maggio 1959, 1431-1434.
- BOER, H. J. DE, 1965. Comparison of water vapor, water and waterdrips of various sizes, as means of preventing night frost. *Agr. Meteorol.*, **2** (4), 247-258.
- BOON, J. VAN DER, 1964. Bespuiting met ureum tegen nachtvorstschade. *Meded. Directeur Tuinbouw*, **27**, 201-209.
- BROOKS, F. A. (Editor), 1965. Investigation of energy, momentum and mass transfer near the ground. *Univ. Calif., Davis, Dept. Agr. Eng. and Dept. Irrigation, Final Rep.*, 285 pp.
- BROOKS, F. A., LEONARD, A. S., CRAWFORD, T. V. and SCHULTZ, H. B., 1961. Frost protection by wind machines and heaters. *Trans. Am. Soc. Agr. Engrs*, **4** (2).
- BOUCHET, R., 1954. Contribution à l'étude de la lutte contre les gelées de printemps au moyen d'écrans nuageux. *Météorol.*, **36**, 403-439.
- BOUCHET, R., 1965. Problèmes des gelées de printemps. *Agr. Meteorol.*, **2**, 167-195.
- BRUNT, D., 1932. Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **58**, 389-418.
- BUSINGER, J. A., 1965. Frost protection with irrigation. In: P. E. Waggoner (Editor), *Agricultural Meteorology. Meteorol. Monogr., Am. Meteorol. Soc., Boston*, **6** (28), 74-80.
- CLENDENIN, J. D., 1955. Frost control practices and the prospective use of anthracite. *U.S. Bur. Mines, Inform. Circ.*, **7714**, 45 pp.
- COLLINS, J. O., 1946. Report on evaluation of artificial oil fog as a means of frost protection. *Stand. Oil Developm. Co., Esso lab., Washington, D.C., Div. Rept.*, 47 pp.
- CRAWFORD, T. V., 1964. An analysis of the area influenced by wind machines used in frost protection. *Trans. Am. Soc. Agr. Engr.*, **7**, 250-251, 255.
- CRAWFORD, T. V., 1965. Frost protection with wind machines and heaters. In: P. E. Waggoner, *Agricultural Meteorology. Meteorol. Monogr., Am. Meteorol. Soc.*, **6** (28), 81-87.
- DAVIS, J. R., 1955. Frost protection with sprinkler irrigation. *Michigan Extension Bull.*, **327**, 12 pp.
- DEACON, E. L., 1949. Vertical diffusion in the lowest layers of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **75**, 89-103.
- DURAND, R., 1964. Les seuils de résistance des arbres fruitières à pepins aux gelées printannières. *16e Int. Hortic. Congr., Brussel 1962*, **5**, 449 pp.
- DZERDZEEVSKII, B. L. (Editor), 1963. Sukhoveis and drought control. *Israel Progr. Scient. Transl., Jerusalem*, 366 pp.
- EIMERN, J. VAN, 1956. Frostschutz mittels Ventilation. *Mitt. Deut. Wetterdienst*, **16** (3), 77-85.
- ELLIOT, W. P., 1964. The height variation of vertical heat flux near the ground. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **90**, 260-265.
- ELLISON, T. H., 1957. Turbulent transport of heat and momentum from an infinite rough plane. *J. Fluid Mech.*, **2**, 456-466.
- ELSÄSSER, W. M., 1960. Atmospheric radiation tables. *Meteorol. Monogr., Am. Meteorol. Soc., Boston*, **23**, 44 pp.

- FLEAGLE, R. G., 1956. The temperature distribution near a cold surface. *J. Meteorol.*, **13**, 160-165.
- FRITH, H. J., 1951. Frost protection in orchards using air from the temperature inversion layer. *Australian J. Agr. Res.*, **2** (1), 24-42.
- FRITSCHEN, L. J., SHAW, R. H., 1961. A thermocouple-type anemometer and its use. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **42**, 42-46.
- FUNK, J. P., 1960. Measured radiation flux divergence near the ground at night. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **86**, 382-389.
- FUNK, J. P., 1961. A numerical method for the computation of the radiative flux divergence near the ground. *J. Meteorol.*, **18**, 388-392.
- FUNK, J. P., 1962. Radiative flux divergence in radiation fog. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **88**, 233-249.
- GAEVSKAYA, G. N., KONDRATI'EV, K. Y. and YAKUSHEVSKAYA, K. E., 1962. Radiative heat flux divergence and heat regime in the lowest layer of the atmosphere. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, Ser. B., **12**, 321-336.
- GATES, D. M., 1965. Radiant energy, its receipt and disposal. In: P. E. Waggoner, *Agricultural Meteorology*. Meteorol. Monogr., Am. Meteorol. Soc., Boston, **6** (28), 1-26.
- GESLIN, H., 1956. Les variations microclimatiques de température et le problème des gelées de printemps. *Ann. Soc. Hortic. France*, **6**, 11 pp.
- GESLIN, H., 1962. Importance du gel en agriculture et lutte contre les gelées. Univ. de Paris, Palais de la Découverte, Paris, 282 pp.
- GODARD, M., NIGOND, J., 1954. Les gelées de printemps à l'Ecole Nationale d'Agriculture de Montpellier. *Météorol.*, **36**.
- GOSSARD, E. E., 1953. The effect of wind on nighttime radiational cooling. *Trans. Am. Geophys. Union*, **34**, 841-848.
- HILKENBAUMER, F., SCHNELLE, F., BREUER, W., 1951. Bestands- und Ertragssicherung im Obstbau durch Forstschadenverhütung. Zweckmäßige Arbeitsweise im Obstbau. Neumann Verlag, Radebeul, Arbeitsmerkheft 7, 88 pp.
- HINZE, J. O., 1959. Turbulence. Mc Graw-Hill, New York, 586 pp.
- HOFMANN, G., 1955. Die Thermodynamik der Taubildung. *Ber. Deut. Wetterdienstes*, **3** (18), 45 pp.
- HUSCHKE, R. E., 1959. Glossary of meteorology. Am. Meteorol. Soc., Boston, Massachusetts, 638 pp.
- JENNY, J., 1958a. Quelques données techniques sur les méthodes de lutte contre le gel. Stations Fédérales d'Essais Agricoles, Lausanne, 573 (= *Ann. Agr. Suisse*, **59**, 557-574).
- JENNY, J., 1958b. Quelques notions fondamentales sur les mesures de protection prises contre les gelées. Stations Fédérales d'Essais Agricoles, Lausanne, 577, 12 pp.
- JENNY, J., 1958c. Méthode pratique de recherche pour la lutte contre le gel. Stations Fédérales d'Essais Agricoles, Lausanne, 641 (= *Ann. Agr. Suisse*, **62**, 311-318).
- JUNGHANS, B., 1959. Über den jahreszeitlichen Gang der Frosthärte verschiedenaltiger Nadeln von *Picea abies* (L.) Karsten im Hügelland. *Arch. Forstwesen*, **8**, 286-336.
- KEIL, K., 1950. Handwörterbuch der Meteorologie. F. Knapp, Frankfurt (Main), 604 pp.
- KEPNER, R. A., 1951. Effectiveness of orchard heaters. *Calif. Agr. Exp. Stat., Coll. Agr. Univ. Calif., Bull.*, **723**, 30 pp.
- KESSLER, O. W. und KAEMPFFERT, W., 1940. Die Frostschadenverhütung. Reichsamt für Wetterdienst, Wiss. Abhandl., **6** (2), 243 pp.
- KRAUS, H., 1958. Untersuchungen über den nächtlichen Energietransport und Energiehaushalt in der bodennahen Luftschicht bei der Bildung von Strahlungsnubeln. *Ber. Deut. Wetterdienstes*, **7** (48), 25 pp.
- KRAUS, H., 1963. Der Tagesgang des Energiehaushaltes der bodennahen Luftschicht. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, **12** (3/4), 491-515.
- KUIPER, P. J. C., 1964. Inducing resistance to freezing and desiccation in plants by decenylsuccinic acid. *Sci.*, **146**, 544-546.
- LAKE, J. V., 1956. The temperature profile above bare soil on clear nights. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **82**, 187-197.

- LEHMANN, P., 1956. Frostschutz durch biologische und Kulturmassnahmen, ferner durch Bedecken, Beheizen und kombinierte Methoden. Mitt. Deut. Wetterdienst, 3 (16), 54–61.
- LEHMANN, P., 1957. Schutzwirkung, aber auch Frostverschärfung durch Nebel. Agrarmeteorol. Beratungsstelle, Trier, Agrarmeteorol. Ber., 10 (11), 2.
- LEVITT, J., 1956. The hardiness of plants. Academic Press Inc., New York, N.Y., Agronomy, 6 and 8, 278 pp.
- LEVITT, J., 1958. Frost, drought and heat resistance. Protoplasmatologia, Handbuch der Protoplasmaforschung, 8 (6), 87 pp.
- LEVITT, J., 1959. Effects of artificial increases in sugar content on frost hardiness. Plant Physiol., 34, 401–402.
- LIEGEL, W., 1965. Physiologie de la résistance au gel de plantes supérieures. Phytoma, 17 (11), 20–25.
- LUMELEY, J. L., PANOFKY, H. A., 1964. The structure of atmospheric turbulence. Interscience, New York, 239 pp.
- MCVEHIL, G. E., 1964. Wind and temperature profiles near the ground in stable stratification. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 90, 136–146.
- MODLIBOWSKA, I., 1962. Some factors affecting supercooling of fruit blossoms. J. Hort. Sci., 37, 249–261.
- MODLIBOWSKA, I., 1965. Action des substances chimiques sur la résistance des plantes au gel. Phytoma, 17 (11), 10–12.
- MÖLLER, F., 1964. Einige Überlegungen zur Frage des abgehobenen Temperaturminimum bei Nacht. Meteorol. Rundschau, 17, 86–89.
- MONIN, A. S., OBUKHOV, A. M., 1954. Basic relationships of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. Akad. Nauk. SSSR Trud. Geofiz. Inst., 24 (151), 163–187.
- MONTEITH, J. L., 1957. Dew. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 83, 322–341.
- MÜLLER-THURGAU, H., 1880. Über das Gefrieren und Erfrieren der Pflanzen I. Landwirtsch. Jahrb., 9, 133–189.
- MÜLLER-THURGAU, H., 1886. Über das Gefrieren und Erfrieren der Pflanzen II. Landwirtsch. Jahrb., 15, 453–610.
- NIGOND, J., 1960. Le retard au débourrement de la vigne par un traitement à l'acide α -naphthalène acétique et la lutte contre les gelées. Compt. Rend. Acad. Agr. France, 45, 452–457.
- OZAWA, Y. and MURAOKA, R., 1960. Studies on the transmission of infrared radiation through smoke layers. J. Agr. Meteorol., 16 (2), 45–50 (In Japans).
- PARKER, J., 1955. Annual trends in cold hardiness in ponderosa pine and grand fir. Ecology, 36, 377–380.
- PERRAUDIN, G., 1961. Lutte contre le gel. Rhodanique, St-Maurice, Suisse, 225 pp.
- POGRELL, H. von, 1958. Grundlegende Fragen der direkten Frostschtzsberechnung. Diss. Landwirtsch. Fak. Univ. Bonn, 48 pp.
- PRIESTLEY, C. H. B., 1960. A determinant hypothesis for the superadiabatic wind and temperature profiles. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 86, 232–236.
- RASCHKE, K., 1957. Über das nächtliche Temperaturminimum über nacktem Boden in Poona (Indien). Meteorol. Rundschau, 10, 1–11.
- RENTSCHLER, W., 1960. Zur Frostschtadensverhütung im Obstbau. Mitt. Klosterneuburg, Ser. Rebe u. Wein, 13, 159–163.
- RITTBERGER, W., 1960. Zur Struktur der Wolken. Arch. Meteorol. Geophys., Bioklimatol., Ser. A, 11, 333–367.
- ROBINSON, G. D., 1947. Notes on the measurement and estimation of atmospheric radiation. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 73, 127–150.
- ROBINSON, G. D., 1950. Notes on the measurement and estimation of atmospheric radiation. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 76, 37–51.
- RZAJEV, N. D., 1957. Invloed van enkele spore-elementen op de wintervastheid van tarwe onder de omstandigheden in Aserbajdschan (russ.) – Dokl. Akad. Nauk Aserbajdschan USSR, 7, 775–779.
- SAKAI, A., 1956. The effect of temperature on the hardening of plants. Low Temp. Sci., Ser. B, 14, 7–15.

- SAKAI, A., 1960. Relation of sugar content to frost hardiness in plants. *Nature (London)*, **185**, 698-699.
- SAKAI, A., 1962. Mechanism of the protective action of sugars against frost injury in plant cells. *Nature (London)*, **193**, 89-90.
- SATO, Y., 1952. Factors affecting cold resistance in tree seedlings. *Res. Bull. Coll. Exp. Forests*, **15**, 63-96.
- SCHENNIKOW, A. P., 1953. *Pflanzenökologie*. Deutscher Bauernverlag, Berlin.
- SCHNELLE, F. (Editor), 1963. *Frostschutz im Pflanzenbau*, dl I, BLV, München, 488 pp.
- SCHNELLE, F., (Editor), 1965. *Frostschutz im Pflanzenbau*, dl II, BLV, München, 604 pp.
- SHARPE, R. H., BLACKMANN, G. H., GAMMON, N., 1954. Relation of potash and phosphate to cold injury of Moore pecans. *Better Crops with Plant Food*, **38**, 17-18.
- SMALL, R. T., 1949. The use of wind machines and helicopter flights for frost protection. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **30** (3), 79-85.
- SWINBANK, W. C., 1960. Wind profile in thermally stratified flow. *Nature*, **186**, 463-464.
- SWINBANK, W. C., 1963. Longwave radiation from clear skies. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **89**, 339-348.
- SWINBANK, W. C., 1964. The exponential wind profile. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **90**, 119-135.
- TABARD, P., BERBEN, R., 1965. Le chauffage à l'aide de rampes à gaz. *Phytoma*, **17** (11), 63-71.
- TAYLOR, R. J., 1960. Similarity theory in the relation between fluxes and gradients in the lower atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **86**, 67-78.
- TRANQUILLINI, W., 1964. The physiology of plants at high altitudes. *An. Rev. Plant Physiol.*, **15**.
- ULRICH, H., 1962. Zur Physiologie von Frostresistenz und Frosthärtung. *Angew. Bot.*, **36**, 258-272.
- VENTSKEVICH, G. Z., 1961. *Agrometeorology*. Israel Progr. Scient. Transl., Jerusalem, 300 pp.
- VIA RAVENTOS, J., 1915. Late frost and artificial clouds. *Camara Agrícola Oficial de la Provincia de Tarragona*. Tarragona, Spain, 35 pp.
- WEAVER, R. J., 1959. Prolonging dormancy in *Vitis vinifera* with gibberellin. *Nature (London)*, **183**, 1198-1199.
- WEBB, E. K., 1965. Aerial microclimate. In: P. E. Waggoner, *Agricultural Meteorology*. Meteorol. Monogr., Am. Meteorol. Soc., Boston, **6** (28), 27-58.
- WIJK, W. R. VAN (Editor), 1963. *Physics of Plant Environment*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 382 pp.
- WIJK, W. R. VAN, 1967. New method for measuring heat flux density at the surface of soils or of other bodies. *Nature*, **213**, 214.
- WIJK, W. R. VAN, SCHNEIDER, T. et BELGHITH, A. Détermination des propriétés thermiques et du flux de la chaleur à la surface du sol. Colloque International sur les phénomènes de transport avec changement de phase dans les milieux poreux ou colloïdaux, 1966. C.N.R.S., Paris, sous presse.
- WIJK, W. R. VAN et BELGHITH, A. Determination of thermal conductivity and heat capacity of soils by non-stationary methods. *Proc. Int. Symp. on Forest Hydrology*, 1965. Pennsylvania, in press.
- WRIGHT, C. S., 1956. *Sprinkler irrigation manual*. Wright Rain Ltd., Ringwood, 156 pp.
- ZANON, K., 1960. Erfahrungen und Ergebnisse mit der Frostschutzbewindung in Südtirol. *Erwerbsobstbau*, **2**, 150-159.