

MEDEDELINGEN LANDBOUWHOGESCHOOL
WAGENINGEN • NEDERLAND • 75-5 (1975)

MULS EN MICROKLIMAAT
DE BETEKENIS VAN EEN MULS EN DE
VERANDERINGEN VAN HET TEMPERATUUR-
VERLOOP TENGEVOLGE DAARVAN

E. A. R. MELLAART

*Laboratorium voor Natuur- en Weerkunde,
Landbouwhogeschool, Wageningen, Nederland*

(Ontvangen 16-XII-1974)

INHOUD

1. INLEIDING	2
1.1 Algemene opmerkingen en definities	2
1.2 Soorten muls	3
1.3 De invloed op de bodemstructuur, op erosie en op de bodemvochtigheid	3
1.4 De invloed op de mestbehoefte	4
1.5 De invloed op de biologische activiteit, op de ziekten en op de plagen	5
2. MICROKLIMAAT	6
2.1 Algemene opmerkingen	6
2.2 Temperaturen en warmtestromen in homogene grond	6
2.2.1 De temperaturen van de homogene grond	7
2.2.2 De randcondities aan het oppervlak	8
2.3 Temperaturen en warmtestromen in een gelaagde grond	11
2.3.1 De temperaturen in een gelaagde grond	11
2.3.2 De randcondities aan het oppervlak	13
2.4 Vergelijking van een gemulste en een onbedekte grond	15
2.5 Een praktijksituatie	20
2.6 De invloed van straling en verdamping	22
2.7 Conclusies	25
3. SAMENVATTING	26
4. DANKBETUIGINGEN	26
5. REFERENTIES	28
<i>Meded. Landbouwhogeschool Wageningen 75-5 (1975)</i>	1

347 832.

I. INLEIDING

1.1 ALGEMENE OPMERKINGEN EN DEFINITIES

In de landbouwkundige praktijk bestaat er een telkens terugkerende belangstelling voor het gebruik van een mulst*, een gesloten of een plaatselijk aanwezige afdekking van de grond met een laag anders gearde materiaal. Mulsen kunnen als zodanig op het veld worden aangebracht, terwijl ook bewerkingen of andere invloeden kunnen leiden tot afdekkingen die gelijke kenmerken hebben als mulsen. De literatuur geeft nog een onvolledig, maar vooral tegenstrijdig, beeld van de invloed en betekenis van mulsen.

In dit artikel wil ik ingaan op de betekenis van een mulst in het algemeen en op de beïnvloeding van het microklimaat in het bijzonder. In volgende artikelen komen dan de betekenis van het microklimaat voor de plant en de gevolgen van een mulst voor het gewas aan de orde.

Een der belangrijkste gevolgen van een mulst is de wijziging van het microklimaat boven en beneden het grensooppervlak bodem/lucht, vooral ten aanzien van temperaturen en vochtgehalten. De invloed van een mulst bij een sinusoidale variatie van de oppervlaktetemperatuur wordt o.a. beschreven door PEERLKAMP (1944), VAN DUIN (1956) en VAN WIJK & DERKSEN (1963). In dit artikel wordt een nieuwe, samenvattende presentatie van deze theorieën aangeboden. Tevens wil ik ingaan op de invloed van een fluctuatie van de luchttemperatuur op de bodem en omgekeerd van de bodem op de luchttemperatuur.

FLINT (1928) definieert een mulst als; iedere kunstmatige verandering aan het grondoppervlak. JACKS et al. (1955) verwerpen deze definitie omdat hij teveel kan omvatten. Zij definiëren mulsen als; het gebruik van plantenresten, mest, bladeren, turf en ander afval, evenals papier, glaswol, metaalfolie, cellofaan en andere geschikte materialen als mulst, met of zonder ondiepe bewerking van de grond, met het doel een verhoogde bodemproductiviteit te krijgen. Ondanks de lengte is deze definitie toch onvoldoende algemeen gesteld.

Beter is de definitie van ROWE-DUTTON (1957): mulst is het aanbrengen van een bedekkende laag materiaal op het bodemoppervlak. Deze definitie wil ik dan uitbreiden tot: *mulst is het aanbrengen van een bedekkende laag materiaal op het bodemoppervlak of het bewerken van de bovenlaag waardoor een mulst ontstaat*. Onder mulst versta ik dan: *een laag materiaal aan de oppervlakte van de grond met afwijkende fysische eigenschappen*. Deze laag kan dus opzettelijk zijn aangebracht maar ook veroorzaakt zijn door bewerking of ontstaan zijn door natuurlijke invloeden van buitenaf. Onder deze definitie vallen dus ook stoppelmulst die zijn ontstaan door het achterlaten op het veld van de stoppels en

* In Nederland wordt evenals in andere landen dikwijls het Engelse woord 'mulch' overgenomen. In dit en volgende artikelen zal ik echter de spelling 'mulst' gebruiken overeenkomstig Veenman's Agrarische Winkler Prins (1957). Naast dit zelfstandig naamwoord, mulst, zal ik ook het werkwoord 'mulsten' gebruiken.

ook de bodem- en of stofmulen die ontstaan door uitdroging van de bovenste laag van de grond.

In dit artikel zal ik meerdere malen de term 'losse mul' gebruiken. Daaronder versta ik dan een mul die een losse pakking heeft en daardoor een lagere warmtecapaciteit en een lagere warmtegeleiding dan de ondergrond waarop zij is aangebracht.

1.2. SOORTEN MULS

Voor het aanbrengen van een bedekkende laag die als mul moet dienen kunnen allerlei materialen gebruikt worden. Vroeger gebruikte men vooral mest, stro, turf, bladeren en bladaarde; tegenwoordig ook wel papier, glaswol en zaagsel. Een aparte groep vormen de bedekkingen met vellen. De dikte daarvan is veelal zo gering dat er nauwelijks sprake is van een laag. Toch vormen ze een mul die dan echter voornamelijk bestaat uit de lucht die zich tussen het (gladde) vel en het (ruwe) bodemoppervlak bevindt. Ook door bewerking van de bovengrond waardoor deze een lossere (of vastere) structuur krijgt (zie VAN DUIN, 1956) en door het bespuiten van het oppervlak met bijvoorbeeld bitumen (COLLIS GEORGE et al., 1963) ontstaat een mul. Behalve door het ingrijpen van de mens kunnen er ook op natuurlijke wijze mulen ontstaan, bijvoorbeeld door het vallen van bladeren of naalden en door het reeds genoemde uitdrogen van de bovenste bodemlaag.

Al deze mulen hebben zeer uiteenlopende eigenschappen zowel in chemisch als in fysisch opzicht. Alleen al daardoor zullen ze uiteraard zeer verschillende invloeden op de planten hebben.

Naar de letter zouden zelfs plantendekken als een mul op te vatten zijn. Door hun erg open bouw zijn ze evenwel niet zonder meer als een warmtegeleidend materiaal te beschouwen. Een belangrijker verschil, met hetgeen wij hier als mul hebben gedefinieerd, is dat een plantendek waterdamp produceert. Ook valt hierbij nog te denken aan het warmte-effect van fotosynthese en respiratie. Dit neemt niet weg dat in de tropen toch dikwijls het begrip mulen gebruikt wordt voor plantendekken.

1.3. DE INVLOED OP DE BODEMSTRUCTUUR, OP EROSIË EN OP DE BODEMVOCHTIGHEID

In de volgende paragrafen zal ik een aantal invloeden van mulen kort bespreken. Voor uitvoerigere gegevens verwijs ik ten aanzien van landbouwgewassen naar JACKS, BRIND & SMITS (1955, 280 lit. opgaven), ten aanzien van tuinbouwgewassen naar ROWE-DUTTON (1957, 350 lit. opgaven) en ten aanzien van meteorologische aspecten en maïs naar BURROWS (1959), 150 lit. opgaven.

Alle soorten mul oefenen direct of indirect invloed uit op de bodemstructuur. Reeds DARWIN (1881) wees op deze invloed van mulen. Dit uit zich vooral in

de aeratie en de bewerkingsmogelijkheid van de grond (BAKERMANS en DE WIT, 1970; BLACK, 1963; BARKLEY & BLASER, 1965; BURROWS, 1959; JACKS et al., 1955; ROWE-DUTTON, 1957 en SCHALLER & EVANS, 1954).

De verbeterde bodemstructuur en de muld zelf bieden een bescherming tegen erosie, hetgeen dikwijls het hoofdmotief is voor de toepassing van een muld. De klimatologische invloeden van een muld zijn dikwijls zo gering of onzeker dat aanpassing op die grond alleen economisch vaak niet verantwoord is. Indien men echter een muld toepast voor erosiebescherming verschuift de vraag van al-of-niet-aanwenden naar de keuze van het soort muld. In die gevallen dient men dus over voldoende informatie te beschikken over de overige invloeden van de gekozen muld. Juist dit aspect heeft geleid tot nieuw onderzoek op dit gebied.

Ook de verdamping vanuit de grond wordt door de muld beïnvloed. Dat geldt met name bij de bedekking met ondoorlatende vellen. Alle bovengenoemde auteurs wijzen op deze gunstige invloed van een muld. Naast de directe invloed van vermindering van de verdamping kan er echter ook door een indirecte invloed via het gewijzigde temperatuurregime een verschil in de vochthuishouding optreden (CARY, 1965 en GIDDENS et al., 1969).

DAMAGNEZ (1959) geeft een voorbeeld van een situatie waarbij de muld aanvankelijk wel de dagelijkse verdamping verminderde maar uiteindelijk juist tot grotere waterverliezen aanleiding gaf. De verdamping van de gemulste grond was in die situatie zo laag dat er blijvend voldoende capillair water aangevoerd kon worden. In tegenstelling daartoe leidde bij de onbedekte grond de verdamping na enige tijd tot een verdroging van de bovenlaag. In feite betekent dit dat er een natuurlijke muld gevormd werd, die op den duur aanmerkelijk beter de verdamping tegenhield dan de kunstmatige muld.

In de tropen wordt dikwijls een plantendek toegepast om te ver gaande opwarming van de bodem (waardoor onder andere de erosiegevoeligheid sterk zou kunnen toenemen) tegen te gaan. Onder deze omstandigheden kan het plantendek dus eveneens als een muld worden opgevat.

1.4. DE INVLOED OP DE MESTBEHOEFTE

In de literatuur zijn vele vermeldingen te vinden wat betreft de invloed van mulden op de bemesting, zowel ten aanzien van de indirecte invloed van de muld op de aanwezige voedingsstoffen als ten aanzien van de levering van voedingsstoffen door de muld zelf (CLARKSON, 1960; ROWE-DUTTON, 1957; SCHALLER and EVANS, 1954). Wat betreft het eerste aspect spelen onder andere de temperaturen onder de muld een rol bij de omzettingen waarbij voedingsstoffen voor de plant vrijkomen (SABEY et al., 1956). De nitrificatie bijvoorbeeld is in zekere mate temperatuurafhankelijk. Onder dit eerste aspect kan men ook de pH-wijziging rangschikken zoals die kan optreden door een sterk verzurende muld (TUKEY and SCHOFF, 1963). Bij het tweede aspect, de directe invloed, speelt natuurlijk vooral de samenstelling van de toegepaste muld een rol.

1.5. DE INVLOED OP DE BIOLOGISCHE ACTIVITEIT, OP DE ZIEKTEN EN OP DE PLAGEN

De meeste mulsen hebben invloed op de biologische activiteit in de bodem. Veelal is deze beïnvloeding indirect via wijzigingen van de temperaturen, het vochtgehalte en eventueel de pH, de bodemstructuur, enz. Op de betekenis van deze invloed wordt onder andere gewezen door ANONYMUS (1963).

Bij vergelijking tussen bewerkte en niet-bewerkte gemulste velden vonden BAKERMANS en DE WIT (1970) op de laatste eveneens een goede, zo niet betere, bodemstructuur die het gevolg was van de grotere biologische activiteit.

Een keerzijde van de biologische activiteit is het optreden van ziekten en plagen (o.a. RATTRAY, 1961). Daarnaast kan ook schade ontstaan door het uittreden van giftige stoffen uit de mul (o.a. MCCALLA, 1948; DULEY, 1954). Anderen (ANONYMUS, 1963; en ROWE-DUTTON, 1957) wijzen op het voordeel van de onderdrukking van onkruiden door het gebruik van een mul.

2. MICROKLIMAAT

2.1. ALGEMENE OPMERKINGEN

Het macroklimaat bepaalt de algemene omgevingscondities. Om deze vast te stellen zonder invloed van een bepaald gewas worden ze gemeten op 1,5 of 2 m hoogte boven kort gras, omdat op die hoogte de invloed van deze begroeiing verwaarloosbaar is.

Het microklimaat beschrijft de omgevingscondities van het gewas zoals die tot stand komen door de uitwendige invloeden van het macroklimaat in samen­spel met de eigenschappen van het beschouwde gewas en van de bodem. Sommige weersfactoren zoals instraling, bewolking en neerslag zijn identiek in micro- en macroklimaat. Andere weersfactoren zoals bijvoorbeeld temperatuur en vochtigheid vertonen in het microklimaat veel grotere variaties dan in het macroklimaat. Het onderkennen van deze variaties is van wezenlijk belang voor de bestudering van de invloed van het weer op gewassen.

In de praktijk wordt nog dikwijls gesproken van *de* temperatuur. Deze bestaat niet. Het is de samentrekking van het gehele temperatuurverloop in de tijd en van de plaatselijke verschillen tot één enkele waarde. Deze (op zich goed hanteerbare) waarde zal echter in veel gevallen niet representatief zijn en mag in principe dus slechts gebruikt worden als men er zeker van is dat noch plaatselijke verschillen noch een verandering in de tijd invloed hebben in de onderhavige situatie. Dat is bijvoorbeeld niet het geval als er nachtvorst optreedt, dan is immers zowel de temperatuur op grotere hoogte als de gemiddelde etmaaltemperatuur positief.

De samentrekking tot een enkele temperatuurwaarde is gebaseerd op de behoefte aan eenvoud en op de oudere meetmethoden met thermometers waarbij de temperaturen slechts één of enkele malen per dag worden afgelezen. Een muld heeft echter slechts geringe invloed op de gemiddelde temperaturen maar een grote invloed op temperatuurschommelingen. Voor een goed begrip van de invloed van een muld op de temperaturen is het dus nodig de temperaturen als functies van plaats en tijd te onderzoeken. Aan de hand van deze functies is dan een model te bouwen waarin de plantenfysiologische reacties bestudeerd kunnen worden.

2.2. TEMPERATUREN EN WARMTESTROMEN IN HOMOGENE GROND

Met de formules die in deze en de volgende paragrafen voorkomen willen we de functies aanduiden waarmee verschillende situaties kunnen worden vergeleken. Slechts in een enkel geval zullen ze gebruikt worden voor berekeningen. Daarom zijn er geen volledige afleidingen geven en zijn er dikwijls vereenvoudigde notaties gebruikt.

Voor de betekenis van de symbolen in de formules verwijs ik naar de symbolenlijst achterin deze publikatie.

Voor de afleidingen zij verwezen naar de handboeken van VAN WIJK (1963) en van CARSLAW & JAEGER (1959), Eerstgenoemde behandelt in de hoofdstukken 4 en 6 de warmtegeleiding in respectievelijk homogene en gelaagde gronden. De theorie in deze hoofdstukken is specifiek gericht op landbouwkundige toepassing. Laatstgenoemd handboek behandelt de wiskunde van de warmtegeleiding vanuit een meer algemeen gezichtspunt.

2.2.1. *De temperaturen van de homogene grond.*

In het onderstaande wordt de temperatuursgang behandeld voor een situatie met periodiek wisselende temperaturen, bijvoorbeeld de dagelijkse of jaarlijkse gang van de temperaturen.

De ééndimensionale warmtestroomdichtheid in een vast lichaam luidt volgens Fourier

$$\phi_w'' = -\lambda \cdot \partial T / \partial z.$$

Indien we ons beperken tot een model met zuivere geleiding, dus zonder effecten van lucht- of vochtverplaatsing, dan moet er worden voldaan aan de zogenaamde energiebalans-vergelijking

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho c} \cdot \frac{\partial \phi_w''}{\partial z} \quad \text{of} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}.$$

Deze differentiaalvergelijking (waarin $a = \lambda/\rho c = \lambda/C$ een constante is), wordt gewoonlijk de vergelijking van Fourier genoemd.

Om tot een oplossing van deze vergelijking te komen is het nodig de randvoorwaarden aan te geven. Daar we in het vervolg uitgaan van een continue golf kan de aanloopperiode buiten beschouwing gelaten worden en is er dus geen randconditie voor $t = 0$. De randcondities aan het oppervlak zullen we pas in een later stadium van de behandeling invoeren.

Als tweede randconditie in de plaatscoördinaat wordt aangenomen dat de temperatuur op oneindige diepte constant is en gelijk aan de gemiddelde temperatuur, dat wil zeggen $T(\infty) = \bar{T}$ oftewel $T(\infty) - \bar{T} = 0$. Hierbij wordt verondersteld dat de gemiddelde temperatuur op alle dieptes gelijk is. Deze veronderstelling wordt gemaakt om het rekenwerk niet nodeloos te compliceren. Essentieel voor de hierna volgende besprekingen en condities is zij niet. De hoekfrequentie (ω) van de golf beschouwen we als gegeven. In de regel zal dit de frequentie zijn van de dagelijkse of de jaarlijkse golf. Uiteraard stellen we dat er geen frequenties worden gegenereerd.

Ter bekorting van het schrijfwerk stellen we $T - \bar{T} = \theta$. Differentiaalvergelijking en randcondities worden dan

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2},$$

met $\theta = 0$ voor $z = \infty$ en $t > 0$ en nader aan te geven voor $z = 0$ en $t > 0$.

De algemene oplossing (zonder aanloopeffect) voor een periodiek verschijnsel luidt in complexe schrijfwijze

$$\theta(z,t) = \exp(i\omega t) \cdot \exp(\beta z).$$

Invoeren in de differentiaalvergelijking en daaruit oplossen van β leidt tot

$$\theta(z,t) = \{p \cdot \exp(+z\sqrt{i\omega/a}) + q \cdot \exp(-z\sqrt{i\omega/a})\} \exp(i\omega t). \quad (2-1)$$

Wegens de randconditie voor $z = \infty$ vervalt de eerste term (dus $p = 0$) en resteert na substitutie van $\sqrt{i} = (1+i)/\sqrt{2}$

$$\theta(z,t) = q \cdot \exp(-z\sqrt{\omega/2a}) \cdot \exp(i\omega t) \cdot \exp(-iz\sqrt{\omega/2a}), \quad (2-2)$$

waarin, zoals gezegd, z toeneemt met de diepte.

In het rechterlid van (2-2) geeft de vierde factor de faseverschuiving tengevolge van de diepte en de tweede factor de demping tengevolge van de diepte. Uit deze formule blijkt dus dat op grotere diepte de temperatuur later op zijn lokale maximumwaarde komt en dat de fluctuatie met de diepte afneemt. De grootste temperatuurfuctuaties treden dus aan het oppervlak op.

De factor q die later volgt uit de randcondities voor $z = 0$ kan nog complex zijn en is dan te schrijven als $q = \hat{\theta}(0)\exp(i\psi)$, waarin $\hat{\theta}(0)$ de amplitudo aan het oppervlak voorstelt. In niet-complexe notatie wordt formule (2-2) dan geschreven als

$$\theta(z,t) = \hat{\theta}(0) \cdot \exp(-z\sqrt{\omega/2a}) \cdot \cos(\omega t - z\sqrt{\omega/2a} + \psi).$$

Voeren we nog in de dempingsdiepte $D = \sqrt{2a/\omega}$ en $\xi = z/D$ dan krijgen we voor (2-2)

$$\theta(\xi,t) = q \cdot \exp(-\xi) \cdot \exp i(\omega t - \xi). \quad (2-3)$$

2.2.2. De randcondities aan het oppervlak

Voor de randcondities aan het oppervlak kunnen we een aantal verschillende gevallen onderscheiden. We bespreken er vier in toenemende graad van gecompliceerdheid. Met name de eerste twee gevallen (a en b) zijn weinig realistisch, maar ze zijn opgenomen als springplank voor de meer ingewikkelde uitwerkingen c en d.

Geval a. De temperatuur aan het oppervlak is gegeven, $\theta(0,t) = \hat{\theta} \cdot \exp(i\omega t)$. Dit is het eenvoudigst denkbare geval. Uitgaande van (2-3) vinden we nu $q = \hat{\theta}$, hetgeen leidt tot

$$\theta(\xi,t) = \hat{\theta} \exp(-\xi) \cdot \exp i(\omega t - \xi).$$

Geval b. De warmtestroomdichtheid door het oppervlak naar de bodem is gegeven, $\phi''_{bo} = \hat{\phi}''_{bo} \cdot \exp(i\omega t)$. Vanuit micrometeorologisch oogpunt is dit een iets meer realistisch geval; ten eerste omdat de warmtestroom aan het oppervlak beter bepaald kan worden dan de oppervlaktetemperatuur, ten tweede omdat we hiermee verschillende situaties kunnen vergelijken bij gelijke uitwendige omstandigheden. We gaan nu uit van (2-1) met $p = 0$. Daar $\phi''_{bo} = -\lambda \partial\theta/\partial z$ volgt hieruit voor $z = 0$,

$$\phi''_{bo} = -\lambda \cdot q(-\sqrt{i\omega/a}) \cdot \exp(i\omega t) = \hat{\phi}''_{bo} \cdot \exp(i\omega t).$$

De hieruit berekende waarde van q vullen we in (2-3) in. Bedenk hierbij, dat $\sqrt{i} = \exp(i\pi/4)$ is. We krijgen dan

$$\theta(\zeta, t) = [\hat{\phi}''_{bo}/\sqrt{\omega\lambda C}] \cdot \exp(-\zeta) \cdot \exp\{i(\omega t - \zeta - \pi/4)\}. \quad (2-4)$$

Hieruit blijkt dat de temperatuur 45° in fase achterloopt ten opzichte van de warmtestroom.

In deze formule komt de invloed van de hoekfrequentie op twee verschillende manieren tot uiting. In formule (2-2) zagen we reeds dat de demping sterker is voor snellere fluctuaties: factor $\exp(-z/\sqrt{\omega/2a})$.

Uit (2-4) zien we, dat daarnaast ook de amplitude gereduceerd wordt door de factor $\sqrt{\omega\lambda C}$. Door beide effecten wordt de amplitude kleiner bij toenemende frequentie ω .

Geval c. De luchttemperatuur is gegeven, $\theta_{lu} = \hat{\theta}_{lu} \cdot \exp(i\omega t)$. Meteorologisch is dit geval interessant omdat het een schakel vormt tussen geval b en geval d. In dat laatste komt de combinatie voor van de warmtestroom naar de lucht en die naar de grond.

Op zichzelf is dit geval (c) verwant aan de situatie waarbij de warmteuitwisseling wordt bepaald door de aanvoer van warmere of koudere lucht. Daarbij zijn de bodemtemperaturen dan het gevolg van de heersende luchttemperaturen. In de praktijk zal in de lucht niet zo gauw een periodieke temperatuurschommeling optreden. Men kan het echter ook als volgt interpreteren. Bij een fluctuatie van de bodemtemperatuur zal ook de temperatuur van de lucht daarboven fluctueren. Dan is dit geval te zien als een terug-rekening van de bodemtemperaturen op basis van meting van de door deze temperaturen veroorzaakte luchttemperaturen. (B.v. in de hut op 2 m hoogte)

De warmtestroom vanuit de lucht, of naar de lucht, is afhankelijk van het verschil tussen de luchttemperatuur (θ_{lu}) op zekere hoogte en de temperatuur aan het bodemoppervlak en een daarbij behorende (empirische) overdrachtscoëfficiënt (α). De formule luidt, zie ook (2-3):

$$\phi''_{lu} = \alpha(\hat{\theta}_{lu} - q) \cdot \exp(i\omega t).$$

Deze warmtestroom moet nu gelijk zijn aan de warmtestroom naar de grond, dus (vgl. geval b):

$$\phi''_{iu} = \alpha(\hat{\theta}_{iu} - q) \exp(i\omega t) = \phi''_{bo} = \sqrt{i\omega\lambda C} \cdot q \cdot \exp(i\omega t).$$

Hieruit volgt, na invullen van de gevonden q in (2-3):

$$\theta(\zeta, t) = \hat{\theta}_{iu} \cdot [\alpha / (\alpha + \sqrt{i\omega\lambda C})] \cdot \exp(-\zeta) \cdot \exp i(\omega t - \zeta). \quad (2-5)$$

We merken op dat we voor $\alpha = \infty$ (perfecte warmteoverdracht) het geval a terugkrijgen met $q = \hat{\theta}_{iu} = \theta(0)$. De faseverschuiving is dan nul.

Voor $\alpha \ll \sqrt{i\omega\lambda C}$ (hoge frekwentie òf slecht warmtecontact tussen bodem en lucht) wordt de invloed van de tweede term in de noemer relatief steeds groter zodat er dan wèl een faseverschil ontstaat met als limietwaarde $-\frac{1}{4}\pi$. De warmtestroom door het oppervlak is dan $\alpha\hat{\theta}_{iu}\exp(i\omega t)$. De faseverschuiving in dit limietgeval is dezelfde als die voor het geval b . In alle gevallen daartussen ligt de faseverschuiving tussen deze beide waarden $-\frac{1}{4}\pi$ en 0.

Geval d. De netto-instraling is gegeven: $\phi''_{str} = \hat{\phi}''_{str}\exp(i\omega t)$. Meteorologisch gezien is dit een situatie die de praktijk beter benadert. Het zou nog juister zijn om de volledige warmtebalans in beschouwing te nemen, doch dat zou hier te ver voeren. Daarom beperk ik me in dit geval door de stralingstermen samen te vatten tot een enkele term, de netto-instraling ϕ''_{str} . De overige termen beperken we tot de warmtestromen naar de grond en naar de lucht. De warmtebalans wordt dan $\phi''_{str} = \phi''_{bo} + \phi''_{iu}$.

Om deze formules uit te kunnen werken moet er nog een aanname gedaan omtrent de warmtestroom naar de lucht. In plaats van de empirische formule uit geval c wil ik hier ter afwisseling een meer theoretische formule gebruiken, die evenwel berust op een meer realistisch model. Warmte wordt in de lucht getransporteerd door vrije en/of gedwongen convectie. Indien de gedwongen convectie overheerst, dat wil zeggen dat de luchtbewegingen vooral plaats vinden door drukverschillen, dan kan de verticale warmtestroom theoretisch redelijk goed beschreven worden als geleiding met een schijnbaar warmtegeleidingsvermogen dat lineair toeneemt met de hoogte, dus $\lambda_a = b(z + z_o)$. Hierin hangt de factor b af van de windsnelheid z_o van de ruwheid van het oppervlak. Voor een oppervlakte-temperatuur die voldoet aan $\theta(0, t) = q \cdot \exp(i\omega t)$ geeft VAN WIJK (1963, pag. 117) een formule die in onze notatie luidt:

$$\phi''_{iu} = \alpha \cdot q \cdot \exp\{i(\omega t + \frac{1}{2}\pi + \phi_{iu})\} \quad (2-6)$$

waarin $\alpha = -b / (2 \ln \frac{1}{2} \gamma r_o)$, $\phi_{iu} = \arctg \{(4/\pi) \cdot \ln \frac{1}{2} \gamma r_o\}$. Hierin is γ de constante van Euler en $r_o = 2\sqrt{z_o C_{iu} \omega / b}$.

In deze formule (2-6) zijn α en ϕ_{iu} alleen afhankelijk van het logaritmische windprofiel. Evenals in geval c is α een overdrachtscoëfficiënt van oppervlak naar lucht. Naar hun aard zijn beide α 's echter niet gelijk. In geval c was α een empirische overdrachtscoëfficiënt tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur. De waarde daarvan wordt gekozen op grond van de aard van de convectie

en de windsnelheid. In geval d is α een theoretisch berekende coëfficiënt tussen bodemtemperatuur en gemiddelde luchttemperatuur. Bovendien is in geval d nog rekening gehouden met een faseverschuiving tussen de warmtestroom naar de lucht en de oppervlaktetemperatuur ten gevolge van de warmtecapaciteit van de lucht (als de warmtecapaciteit van de lucht C_{lu} nul is wordt $\phi_{lu} = -\frac{1}{2}\pi$).

In geval b vonden we reeds een formule voor de warmtestroom ϕ''_{bo} naar de grond. Uit $\phi''_{str} = \phi''_{lu} + \phi''_{bo}$ volgt dus nu met (2-6):

$$\hat{\phi}''_{str} \exp(i\omega t) = \alpha \cdot q \cdot \exp\{i(\omega t + \pi/2 + \phi_{lu})\} + \sqrt{\omega\lambda C} \cdot q \cdot \exp\{i(\omega t + \pi/4)\}.$$

Oplossen van q en invullen in (2-3) geeft:

$$\theta(\zeta, t) = [\hat{\phi}''_{str} / [\alpha \cdot \exp\{i(\phi_{lu} + \pi/4)\} + \sqrt{\omega\lambda C}]] \cdot \exp(-\zeta) \cdot \exp i(\omega t - \zeta - \pi/4). \quad (2-7)$$

We merken nog op, dat we ook hier voor $\alpha = 0$ weer de formule van geval b terugkrijgen. Wanneer α zeer groot wordt (goed warmtecontact tussen bodem en lucht) dan mag in de noemer $\sqrt{\omega\lambda C}$ worden verwaarloosd. Onder die veronderstelling wordt

$$\theta(\zeta, t) = \{\hat{\phi}''_{str} / \alpha\} \cdot \exp(-\zeta) \cdot \exp\{i(\omega t - \zeta - \phi_{lu} - \pi/2)\}.$$

De warmtestroom naar de bodem is dan relatief erg gering en dus ook de temperatuursfluctuatie. Is bovendien de warmtecapaciteit van de lucht verwaarloosbaar ($\phi_{lu} = -\frac{1}{2}\pi$), dan zien we dat de oppervlaktetemperatuur in fase is met de nettoinstraling. Dat laatste moet ook omdat nu (vrijwel) alle netto instraling direct weer aan de lucht moet worden afgegeven.

2.3. TEMPERATUREN EN WARMTESTROMEN IN EEN GELAAGDE GROND

2.3.1. De temperatuur in een gelaagde grond

Onder gelaagde grond verstaan we in deze paragraaf een grond die bestaat uit een homogene onderlaag en een eveneens homogene bovenlaag die echter andere warmte-eigenschappen bezit. Voorbeelden zijn onder andere (zie hoofdstuk 1) een bewerkte grond waarbij de bovenlaag is gevormd door de bewerking (zie VAN DUIN, 1956) en een grond waarop een mul is aangebracht. In het onderstaande wordt vooral op dit laatste geval ingegaan.

We beschouwen deze mul nu als een dek met een dikte d die op het oppervlak, nu grensvlak met $z=0$, ligt. Het nieuwe oppervlak (maaiveld) ligt dan dus op $z = -d$. De warmte-eigenschappen van deze eerste laag noemen we λ_1 en C_1 . De tweede laag die zich oneindig diep voortzet bestaat uit de ondergrond met λ_2 en C_2 . Deze tweelagensituatie kan vergeleken worden met een homogene grond met de warmte-eigenschappen λ_n en C_n . In het geval we vergelijking wen-

sen tussen wel of geen mul is zijn de eigenschappen van de onderlaag en van de homogene grond gelijk ($\lambda_2 = \lambda_h$ en $C_2 = C_h$).

Voor de gelaagde grond geldt eveneens de vergelijking van Fourier (zie 2.2.1). Het ligt voor de hand dat deze vergelijking nu voor beide lagen afzonderlijk opgelost moet worden. De twee oplossingen worden dan verbonden door de condities aan het grensvlak $z=0$. Voorts nemen we aan dat er hier evenmin aanloopverschijnselen zijn. De oplossingen van de differentiaalvergelijkingen leiden dan tot dezelfde formule als 2-1.

Voor de eerste laag $-d < z < 0$, vinden we

$$\theta_1(z,t) = \{p_1 \exp(z\sqrt{i\omega/a_1}) + q_1 \exp(-z\sqrt{i\omega/a_1})\} \exp(i\omega t),$$

en voor de tweede laag $0 < z < \infty$

$$\theta_2(z,t) = \{p_2 \exp(z\sqrt{i\omega/a_2}) + q_2 \exp(-z\sqrt{i\omega/a_2})\} \exp(i\omega t).$$

Daar ook hier op oneindige diepte de temperatuur constant en gelijk aan het gemiddelde verondersteld wordt, geldt $p_2=0$. Ook in dit verband is deze veronderstelling niet essentieel, maar wel wenselijk om een vereenvoudigde en overzichtelijke notatie van de formules te verkrijgen.

Aan het grensvlak ($z=0$) moet continuïteit van temperatuur en warmtestromen gelden. Dit leidt tot twee extra randvoorwaarden, namelijk

$$(1) \dots \theta_1(0,t) = \theta_2(0,t)$$

$$(2) \dots \phi''_{bo,1}(0,t) = \phi''_{bo,2}(0,t).$$

Invoeren van deze randvoorwaarden en oplossen leidt tot de formules:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1(z,t) &= q_1 \{r \exp(+z\sqrt{i\omega/a_1}) + \exp(-z\sqrt{i\omega/a_1})\} \exp(i\omega t), \\ \theta_2(z,t) &= q_1 \{(1+r) \cdot \exp(-z\sqrt{i\omega/a_2})\} \exp(i\omega t). \end{aligned} \right\} (2-8)$$

Hierin is $r = (\sqrt{\lambda_1 C_1} - \sqrt{\lambda_2 C_2}) / (\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2})$ ingevoerd.

Opgemerkt zij, dat we voor homogene grond, voor $z > 0$, de formule (2-2) weer terug vinden.

In analogie met paragraaf 2.2.1 voeren we de dempingsdiepten van de twee lagen in, $D_1 = \sqrt{2a_1/\omega}$ en $D_2 = \sqrt{2a_2/\omega}$, alsmede de dimensieloze plaatscoördinaten $\zeta_1 = z/D_1$ en $\zeta_2 = z/D_2$. Dit geeft:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1(\zeta_1,t) &= q_1 \{r \exp(+\zeta_1\sqrt{2i}) + \exp(-\zeta_1\sqrt{2i})\} \exp(i\omega t), \\ \theta_2(\zeta_2,t) &= q_1 \{(1+r) \exp(-\zeta_2\sqrt{2i})\} \exp(i\omega t). \end{aligned} \right\} (2-9)$$

Voor temperatuur en warmtestroom aan het buitenoppervlak vinden we nu gemakkelijk uit (2.7-2) met $\delta = d/D_1$

$$\theta_1(-\delta, t) = q_1 \{ r \exp(-\delta\sqrt{2i}) + \exp(+\delta\sqrt{2i}) \} \exp(i\omega t),$$

$$\phi''_{bo,1}(-\delta, t) = \sqrt{i\omega\lambda_1 C_1} q_1 \{ \exp(\delta\sqrt{2i}) - r \exp(-\delta\sqrt{2i}) \} \exp(i\omega t).$$

In beide betrekkingen is de factor tussen accolades alleen afhankelijk van de dikte van de bovenlaag en de warmte-eigenschappen van beide lagen. Korthedshalve vervangen we deze complexe factoren door hun argumenten, respectievelijk N en NM , en hun fasehoeken, respectievelijk ϕ en $(\phi-\psi)$. We krijgen dan:

$$\theta_1(-\delta, t) = q_1 \cdot N \exp\{i(\omega t + \phi)\}, \quad (2-10)$$

$$\phi''_{bo,1}(-\delta, t) = \sqrt{\omega\lambda_1 C_1} \cdot q_1 N \cdot M \exp\{i(\omega t + (\phi-\psi) + \pi/4)\}. \quad (2-11)$$

Afhankelijk van de te stellen randvoorwaarden aan het oppervlak kan q_1 worden opgelost. We gaan daarbij weer uit van de vier gevallen die we ook in de vorige paragraaf (2.2.2) hebben gezien.

2.3.2. De randcondities aan het oppervlak

In de vorige paragraaf hebben we de algemene formules afgeleid voor de temperatuur in de twee lagen en voor de warmteflux door het scheidingsvlak lucht-bovenlaag, zonder rekening te houden met de randconditie op dit vlak ($z=d$). In deze paragraaf zullen we analoog aan het besprokene in paragraaf 2.2.2, achtereenvolgens een aantal mogelijke randcondities op dat scheidingsvlak de revue laten passeren. We gaan daarbij uit van de formules (2-10) en (2-11).

Geval a. De temperatuur aan het oppervlak is gegeven, $\theta_1(-\delta, t) = \hat{\theta} \exp(i\omega t)$. Hieruit is q_1 via (2-10) direct op te lossen. Na invulling in (2-9) leidt dit tot:

$$\theta_1(\zeta_1, t) = [\hat{\theta}/N] \{ r \exp(\zeta_1\sqrt{2i}) + \exp(-\zeta_1\sqrt{2i}) \} \exp\{i(\omega t - \phi)\}.$$

Vergelijking met een homogene grond is in dit geval niet zo zinvol omdat het praktisch wezenlijke verschil juist zit in de temperatuursfunctie aan het oppervlak. En deze oppervlakte-temperatuurfunctie is hier zonder meer aangenomen.

Geval b. De warmtestroom aan het oppervlak is gegeven, $\phi''_{bo,1}(-\delta, t) = \hat{\phi}''_{bo,1} \exp(i\omega t)$. Hieruit is weer via (2-11) q_1 op te lossen. Daarna invullen in (2-10) geeft voor de temperatuur aan het oppervlak:

$$\theta_1(-\delta, t) = [\hat{\phi}''_{bo,1}/(M\sqrt{\omega\lambda_1 C_1})] \exp\{i(\omega t + \psi - \frac{1}{4}\pi)\}. \quad (2-12)$$

Vergelijken we deze formule met de overeenkomstige formule voor de homo-

gene grond (2-4) dan zien we dat er een faseverschil ψ optreedt en een afwijking in amplitudo. Beide kunnen worden afgeleid uit het quotient:

$$\frac{\theta_1(-\delta, t)}{\theta_h(0, t)} = \frac{\sqrt{\lambda_h C_h}}{M\sqrt{\lambda_1 C_1} \exp(-i\psi)} \quad (2-13)$$

waarin de indices 1 en h staan voor respectievelijk gelaagde (eerste laag) en homogene grond. Indien de ondergrond gelijk is aan de homogene grond geldt $\sqrt{\lambda_h C_h} = \sqrt{\lambda_2 C_2}$. Op de betekenis van M en ψ zullen we in paragraaf 2.4 dieper ingaan.

Geval c. De luchttemperatuur is gegeven, $\theta_{lu} = \hat{\theta}_{lu} \exp(i\omega t)$. Wegens (2-10) geldt thans:

$$\phi''_{lu} = \alpha [\hat{\theta}_{lu} - q_1 N \exp(i\phi)] \exp(i\omega t),$$

waarbij aangenomen wordt dat de warmteoverdrachtscoëfficiënt niet door de oppervlaktetoestand (muld of bodem) wordt beïnvloed. De warmtestroom naar de lucht moet gelijk zijn aan de warmtestroom vanuit de bodem volgens (2-11). Na oplossing van q_1 hieruit volgt dan voor de temperatuur aan het oppervlak:

$$\theta_1(-\delta, t) = \hat{\theta}_{lu} \{ \alpha / [\alpha + M\sqrt{i\omega\lambda_1 C_1} \exp(-i\psi)] \} \exp(i\omega t). \quad (2-14)$$

Vergelijking met de overeenkomstige formule voor de homogene grond (2-5) toont aan dat hier evenals in geval b het verschil bepaald wordt door de term $M\sqrt{i\omega\lambda_1 C_1} \exp(-i\psi)$ ten opzichte van de term $\sqrt{i\omega\lambda_h C_h}$.

Geval d. De nettostraling is gegeven, $\phi''_{str} = \hat{\phi}''_{str} \exp(i\omega t)$. Door vergelijking van de formules (2-3), (2-10) en (2-6) volgt nu dat de q uit de formule (2-6) vervangen moet worden door $q_1 N \exp(i\phi)$; dus

$$\phi''_{lu} = \alpha q_1 N \exp\{i(\omega t + \frac{1}{2}\pi + \phi_{lu} + \phi)\}.$$

Uit $\phi''_{str} = \phi''_{bo} + \phi''_{lu}$ volgt nu na oplossen van q_1 :

$$\theta_1(-\delta, t) = \frac{\hat{\phi}''_{str}}{\alpha \exp\{i(\phi_{lu} + \frac{1}{4}\pi)\} + M\sqrt{i\omega\lambda_1 C_1} \exp(-i\psi)} \exp\{i(\omega t - \pi/4)\}.$$

Ook hier wordt het verschil met de homogene grond (zie formule 2-7) bepaald door de factor $M\sqrt{i\omega\lambda_1 C_1} \exp(-i\psi)$. De verhouding tussen de oppervlaktetemperaturen van de homogene en de gemulste grond is nu:

$$\frac{\theta_1(-\delta, t)}{\theta_h(0, t)} = \frac{\alpha_h \exp\{i(\phi_{lu} + \frac{1}{4}\pi)\} + \sqrt{i\omega\lambda_h C_h}}{\alpha_1 \exp\{i(\phi_{lu} + \frac{1}{4}\pi)\} + M\sqrt{i\omega\lambda_1 C_1} \exp(-i\psi)} \quad (2-15)$$

We kunnen eveneens de verhouding berekenen tussen de temperatuur aan de grenslaag (het oppervlak van de ondergrond) en die aan het oppervlak van de homogene grond. We krijgen dan, met behulp van (2-9) en (2-10)

$$\frac{\theta_1(0,t)}{\theta_h(0,t)} = \frac{1+r}{N \exp(i\phi)} \cdot \frac{\theta_1(-\delta,t)}{\theta_h(0,t)} \quad (2-16)$$

In de voorgaande formule's wordt uitgegaan van een voor beide situaties gelijke netto-straling aan het oppervlak. Indien echter de reflectie van de kortgolvlige straling of de emissie van de langgolvlige straling in de twee situaties verschilt zal er een verschil zijn in nettostraling. Deze is weer te geven als:

$$\phi''_{str,1} = m \cdot \phi''_{str,h} \quad (2-17)$$

Daar de temperatuuramplitudines recht evenredig zijn met de nettostraling betekent dit dat de verhoudingen in de formules (2-15) en (2-16) dan ook een factor m groter zijn.

2.4. VERGELIJKING VAN EEN GEMULSTE EN EEN ONBEDEKTE GROND

Indien we een mulst toepassen zullen we geïnteresseerd zijn in (of rekening moeten houden met) de wijzigingen van het microklimaat die daarvan het gevolg zijn. Dit geldt voor de temperatuurverschillen in de ondergrond wanneer al dan niet een mulslaag is aangebracht, maar ook voor de temperatuur van de lucht vlak boven de onbedekte grond in vergelijking tot die vlak boven de gemulste grond. Uiteraard moet ook de temperatuur in de bedekkingslaag zelf in het beeld worden opgenomen. Bij deze vergelijking zullen we uitgaan van de gevallen b, c en d uit de vorige paragraaf. Verschillen in netto-straling en verdamping laten we hier buiten beschouwing. In een der volgende paragrafen zullen we daarop nog terugkomen.

De verhouding van de temperatuuramplitudines wordt, zoals we zagen, mede bepaald door de convectieve warmtestroom naar de lucht. Deze is afhankelijk van de ruwheid van het oppervlak, de windsnelheid en de oppervlaktetemperatuur. De ruwheid wordt bepaald door de structuur van de mulst en kan dus afwijken van de ruwheid van de onbedekte grond. Zowel in geval c als in geval d zal er dan een andere α zijn ($\alpha_1 \neq \alpha_h$) en in geval d ook een andere faseverschuiving ($\phi_{lu,1} \neq \phi_{lu,h}$). De α_1 kan daardoor in geval d bij gelijkblijvende windsnelheid volgens VAN WIJK (1963, pag. 128-129) enige (3 à 4) malen groter of kleiner zijn dan de α_h , hetgeen dan leidt tot een verhouding van de temperatuuramplitudines variërend van ca. 0,3 tot 3. In geval c varieert in de praktijk de α van omstreeks 5-30 W/m²K. De ruwheid van het oppervlak kan in dit model een variatie in α opleveren van hooguit 10-20%.

In de vorige paragrafen zagen we reeds dat bij de gevallen b, c en d het verschil van de oppervlaktetemperaturen bepaald werd door de factor

$M\sqrt{\omega\lambda_1 C_1} \cdot \exp(-\psi)$. Uitwerking hiervan leidt onder andere tot figuur 1. In deze figuur zijn de verhoudingen van de amplitudines van de temperatuur aan het oppervlak uitgezet, voor geval b (zie formule (2-13)). Daarna heb ik dit uitgewerkt voor geval d voor een waarde van $\alpha/\sqrt{\lambda_h C_h} = 0,3$ (zie formule (2-15)). De resultaten hiervan zijn in dezelfde figuur weergegeven. In deze figuur is op de horizontale as de waarde δ uitgezet. Deze waarde is afhankelijk van de dikte en de dempingsdiepte van de mul.

In deze figuur is direct te zien dat voor $\delta = 0$ (geen mul of $\omega = 0$) de ver-

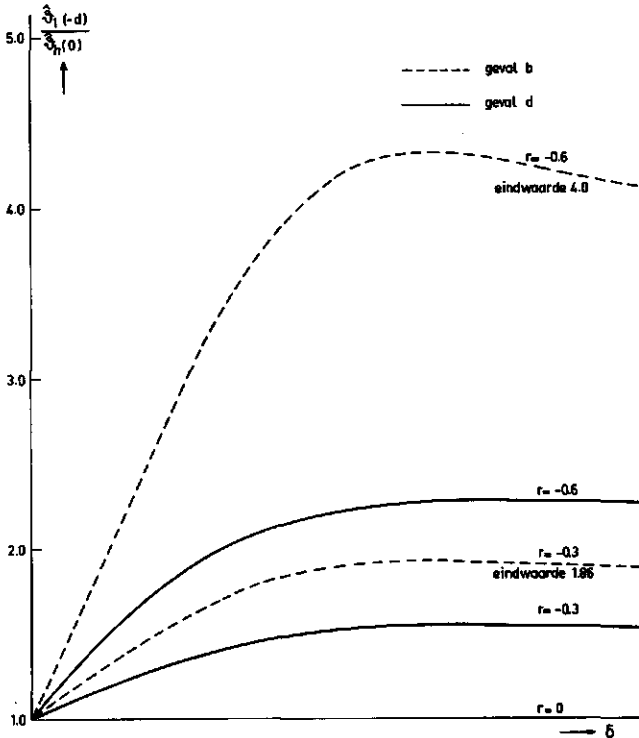


Fig. 1. De verhouding van de oppervlaktetemperaturen van een mul en een homogene grond als functie van de relatieve dikte ($\delta = d/D$) van de mulslaag. De gestippelde lijnen gelden voor geval b (zie tekst) met gelijke warmtestromen naar de grond. Voor grote waarden van δ gaan de verhoudingen in dit geval naar $\sqrt{\lambda_h C_h}/\sqrt{\lambda_1 C_1}$. De getrokken lijnen gelden voor het geval d waarbij in beide gevallen de som van de warmtestromen naar bodem en lucht dezelfde is. De limietwaarde is hier tevens afhankelijk van de waarde van α .

The ratio of the surface temperatures of a mulch and a homogeneous soil as function of the relative thickness ($\delta = d/D$) of the mulch. The broken curves refer to equal heat fluxes at the soil-air interface of mulched and bare soil, formulae (2-13). For large values of δ these curves tend to $\sqrt{\lambda_h C_h}/\sqrt{\lambda_1 C_1}$. The full curves refer to the case in which the sum of heat fluxes to soil and air is equal in both situations, formulae (2-15). In this situation the limit for large values of δ is also dependant of α .

($\alpha = 5$; $r = -0,3 \rightarrow \sqrt{\lambda_h C_h}/\sqrt{\lambda_1 C_1} = 1,86$; $r = -0,6 \rightarrow \sqrt{\lambda_h C_h}/\sqrt{\lambda_1 C_1} = 4,0$)

houding van de temperaturen 1 is. In geval b verloopt deze verhouding naar de eindwaarde $\sqrt{\lambda_h C_h} / \sqrt{\lambda_1 C_1}$ doch blijft steeds groter dan 1 (voor $r < 0$, dat wil zeggen een slecht geleidende mul). Hetzelfde geldt voor geval d. De eindwaarde is nu echter veel lager. Dat komt omdat nu ook de warmtestroom naar de lucht wordt meegerekend, waardoor de warmtestroom naar de grond (en dus ook de temperatuuramplitudines) geringer wordt dan in geval b. Dit effect treedt des te sterker op, naar mate het verschil tussen mul en onbedekte grond groter is (absolute waarde van r groter!).

In paragraaf 2.3.2 gingen we ook in op het verschil in temperatuur tussen het oppervlak van de homogene grond en het grensvlak van de gemulste grond. In de praktijk zal men namelijk niet altijd zo zeer geïnteresseerd zijn in de temperatuur aan het oppervlak als wel in de temperaturen in de ondergrond. Bij een vergelijking van een grond met of zonder mul zal dit temperatuurverloop zich in de ondergrond onder de mul in principe niet anders gedragen dan in de homogene grond. Er is gelijkheid van demping en faseverschuiving, maar er treden kwantitatief (verhoudingsgewijs) andere amplitudines en fasen op tengevolge van het verschil tussen het grensvlak en het oppervlak van de homogene grond.

Indien, zoals in geval b, voor de twee situaties (met en zonder mul) de warmtestromen door het oppervlak (maaveld) gelijk zijn zal een deel van de warmte in de mul opgenomen worden. De temperatuursfluctuatie op de grenslaag zal daarom altijd geringer zijn dan aan het oppervlak van de onbedekte grond. In geval d zal de hogere oppervlaktetemperatuur van de mul een grotere warmtestroom naar de lucht veroorzaken en zal er dus minder naar de grond gaan en dus zeker minder door de grenslaag. Dit geldt voor opwarmen. Bij afkoelen geldt het omgekeerde. In geval d zal er dan voor de mul een lagere oppervlaktetemperatuur zijn waarbij (vergeleken met de onbedekte grond) meer warmte aan de lucht onttrokken zal worden en minder uit de ondergrond.

In alle gevallen vinden we faseverschillen tussen de temperaturen en de warmtestromen en tussen de temperaturen op verschillende diepten. Dat komt omdat er altijd gedurende enige tijd warmte toegevoerd moet worden om een hogere temperatuur te verkrijgen. In de praktijk betekent dit dat op geringere diepte eerder de maximum- (of minimum-) temperatuur bereikt wordt en dat er daarbij verschil kan zijn tussen een gemulste en een onbedekte grond.

Het faseverschil dat optreedt tussen de temperatuursgangen aan het oppervlak van de mul en aan het oppervlak van de onbedekte grond is weergegeven in figuur 2. In geval d wordt de faseverschuiving beïnvloed door de warmtestroom naar de lucht. Daardoor zijn in figuur 2 de curven voor geval d, zie formule (2-13), van een enigszins andere gedaante dan die voor geval b, zie formule (2-15). De voor $r < 0$ positieve waarde van de faseverschuiving duidt erop dat de temperatuur aan het oppervlak van de mul eerder zijn extreme waarden bereikt dan die aan het oppervlak van de onbedekte grond.

Ook ten aanzien van de faseverschuiving heeft de frequentie een belangrijk effect. Bij de jaargolf is ω zeer kleine en daardoor ook de δ , ca. 0,01–0,1 (zie figuur 1 en 2). In dit geval is de faseverschuiving dus gering. VAN WIJK (1963,

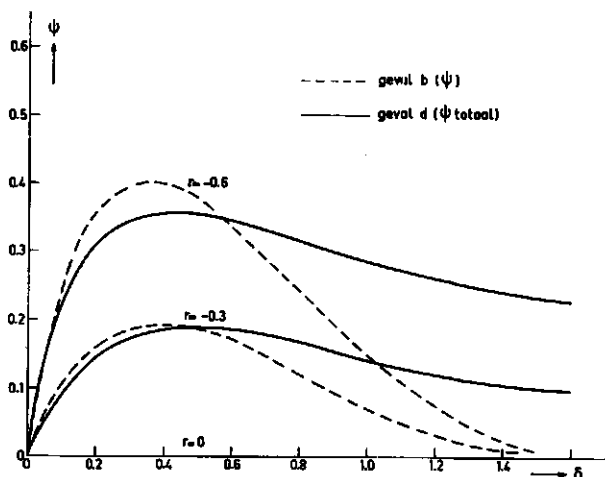


Fig. 2. Het faseverschil van de oppervlaktetemperaturen van een muls en een homogene grond als functie van de relatieve dikte ($\delta = d/D$) van de mulslaag. De gestippelde lijnen gelden voor geval b (zie tekst) met gelijke warmtestromen naar de grond. Voor grote waarden van δ wordt dit faseverschil gelijk aan nul. De getrokken lijnen gelden voor het geval d waarbij in beide situaties de som van de warmtestromen naar bodem en lucht dezelfde is. De limietwaarde is hier niet nul maar mede afhankelijk van α .

The phase difference between the surface temperatures of a mulch and a homogeneous soil as function of the relative thickness ($\delta = d/D$) of the mulch. The broken curves refer to equal heat fluxes at the soil-air interface of mulched and bare soil, formulae (2-13). For large values of δ these curves tend to zero. The full curves refer to the case in which the sum of heat fluxes to soil and air is equal in both situations, formulae (2-15). In this situation the limit for large values of δ is also dependent of α .
 ($\alpha = 5$; $r = -0,3$ & $r = -0,6$)

blz. 188) vond in een rekenvoorbeeld voor de jaargolf een faseverschuiving van één, hooguit enige, dagen. In het algemeen is dit verschil van geringe betekenis, in bijzondere gevallen kan deze ene dag echter wel degelijk een rol spelen.

Snelle fluctuaties, bijvoorbeeld het regelmatig beschaduwen door wolken, hebben eveneens weinig effect. De grote waarde van ω leidt dan tot een grote δ en ook tot een sterke demping waardoor er nauwelijks invloed op de onderliggende lagen uitgeoefend wordt.

Relatief grote verschuivingen in fase treden op voor waarden van δ in de buurt van 0,5. Dat wil zeggen bij mulsen van meerdere cm's dikte zowel ten aanzien van de dagelijkse golf als ten aanzien van een golf van enige weken. Een periode van enige dagen waarin de gemiddelde temperaturen sterk stijgen of dalen kan men beschouwen als deel van een golf van enige weken. Bij verdere uitwerking van de formules van geval d vinden we dan dat bij een dergelijke golf in de ondergrond een faseverschuiving van enige dagen kan optreden. De faseverschuiving van de dagelijkse golf kan oplopen tot enige uren. Als volledige sinusvormige golf treden dergelijke verschijnselen evenwel niet op, zodat het

praktisch belang van dergelijke beschouwingen over de fase beperkt is. In feite treden deze faseverschuivingen natuurlijk wel op doch hun betekenis is veelal geringer dan theoretisch verwacht kan worden als gevolg van het optreden van hogere harmonischen. Bij de dagelijkse golf zijn de faseverschuivingen het beste in overeenstemming met de theorie. Voor een losse muld betekent dit dat aan het oppervlak grotere amplitudines optreden alsmede fasevervroeging vergeleken met de ongemulste oppervlakte. In de ondergrond onder de muld treden daarbij dan veel geringere amplitudines en vertragingen in fase op.

Aan de hand van dit faseverschil zou men gronden kunnen indelen als 'vroeg' of 'late' gronden, d.w.z. gronden die in het voorjaar op zekere (nader af te spreken) diepte eerder of later een bepaalde temperatuur overschrijden. Daarbij speelt echter ook de verdamping een belangrijke rol evenals het verschil in watervoorziening. In de bodemclassificatie (7th approximation) wordt geen rekening gehouden met deze factoren, doch alleen met de temperaturen op 50 cm diepte. Deze wordt slechts in geringe mate beïnvloed door de schommelingen aan het oppervlak (DERKSEN, 1974) en kan dus inderdaad beschouwd worden als een eigenschap van die bodem in die situatie. De temperaturen van de bovenlaag worden echter mede beïnvloed door bijkomende modificaties van de watervoorziening en van de bewerking van de bovenlaag. Deze temperaturen zijn dus geen strikte eigenschappen van de bodem doch ook nog het resultaat van andere factoren. Het is o.i. dan ook onjuist om een indeling op grond van het faseverschil aan het oppervlak in de classificatie op te nemen.

Dat ligt anders ten aanzien van een bodemgeschiktheidsbeoordeling waarbij men namelijk ook uitspraken kan doen ten aanzien van factoren als watervoorziening en bewerking. Bij deze beoordeling worden in Nederland wel de termen 'vroeg' en 'laat' gebruikt (DE HAAN & VAN DAM, persoonlijke mededeling, 1974). Deze vroegheidsbeoordeling geschiedt op basis van de watervoorziening en verdamping in het voorjaar waarbij een natte, langzaam drogende grond als 'laat' beschouwd wordt. In de praktijk gebruikt men ook wel de termen 'warm' en 'koud' waarmee dan in een aantal gevallen ook 'vroeg' of 'laat' bedoeld wordt (DERKSEN, 1974).

Het faseverschil tussen gemulste en onbedekte grond leidt bij de dagelijkse golf tot een andere relatie tussen bodemtemperaturen en stralingsintensiteiten. Literatuurgegevens over de betekenis daarvan voor gewassen zijn mij niet bekend. Wel vonden bijvoorbeeld TAYLORSON & HENDRICKS (1972) dat de kieming van bepaalde onkruidzaden afhankelijk was van bepaalde combinaties van temperaturen en lichtintensiteiten, zodat vooralsnog verwacht moet worden dat voornoemde faseverschillen wel degelijk effect hebben.

Concluderend kunnen we zeggen, dat onze beschouwingen een bijdrage vormen voor de kennis van de bodemtemperaturen. Om tot definitievere conclusies te kunnen komen is daarnaast evenwel ook studie nodig van het verloop van het vocht gehalte en van het gedrag van de plant.

De aanwezigheid van een faseverschil betekent dat men bij bodemtemperatuurmetingen niet kan volstaan met een meting op één tijdstip, doch dat men metingen op uiteenlopende tijdstippen van de dag (of de periode) moet verlan-

gen. ROSEMA (1974) trachtte dit probleem te ondervangen door een model te ontwikkelen waarmee hij de oppervlaktetemperaturen voor verschillende situaties kon simuleren. Met behulp van de resultaten daarvan kon hij dan voorspellen op welk tijdstip de metingen verricht zouden moeten worden om relevante gegevens te verkrijgen. Dit model, speciaal ontwikkeld met het oog op remote sensing onderzoek, verkeert thans nog in het laboratorium-stadium.

2.5. EEN PRAKTIJSITUATIE

In de vorige paragraaf stipten we reeds aan dat men in de praktijk, afhankelijk van de situatie, geïntereiseerd kan zijn in verschillende temperatuurverhoudingen. Daarom zullen we in deze paragraaf enkele resultaten geven van een rekenvoorbeeld voor een algemene situatie. Daarbij zullen we uitgaan van geval d.

We nemen aan dat er in de onbedekte grond gezaaid is op een diepte van 4,5 cm en in de grond die gemulst zal worden op een diepte van 1,5 cm. In de gemulste grond wordt minder diep gezaaid omdat de kiemplant dan ook nog door de 5 cm dikke mulslaag zal moeten groeien. Verder ben ik uitgegaan van een mul van droge turf op zand van veldcapaciteit. Dat leidde tot de waarde $r = -6,0$.

In figuur 3 zijn de resultaten van het temperatuurprofiel uitgebeeld. Horizontaal zijn de temperatuuramplitudines uitgezet, naar rechts voor de onbedekte grond en naar links voor de gemulste grond. De verticale assen zijn voor de bodem zo geplaatst dat de zaden in beide gevallen op dezelfde hoogte getekend konden worden. Voor de luchttemperaturen zijn echter de beide oppervlaktes (maaiveldniveau's) op dezelfde hoogte getekend.

In deze figuur (3) zien we duidelijk dat de temperatuursfluctuaties bovenin de mul aanzienlijk groter zijn dan bij de onbedekte grond. Onderin de mul en in de grond daaronder zijn de fluctuaties echter geringer (ongeveer $\frac{1}{2}$). Bij de fluctuaties van de luchttemperaturen valt op dat deze boven de mul overal veel groter zijn (ruim $2\times$). Dat laatste betekent ook dat, indien de gemiddelde temperaturen lager worden dan deze amplitudines, er nachtvorst op zal gaan treden (zij het dan ook slechts in een smalle zone). Het nachtvorstgevaar boven een losse mul is daardoor aanmerkelijk groter. Dat geldt dus ook voor een pas bewerkte grond (schoffelen) waardoor een bovenlaag met een geringe warmtegeleidbaarheid ontstaat die dan als een losse mul optreedt.

In figuur 4 zijn experimentele resultaten van temperatuurmetingen bij mul en onbedekte grond uitgezet. Weergegeven zijn maximum- en minimumtemperatuur voor elke plaats, alsmede de gemiddelde temperaturen. Duidelijk waarneembaar zijn de veel geringere amplitudines in de grond onder de mul en de veel grotere in de bovenlaag van de mul. De luchttemperaturen zijn vlak bij het oppervlak eveneens extremer maar op ca. 5 cm hoogte boven de mul alweer vrijwel gelijk. De lagere gemiddelde temperaturen onder de mul zijn het gevolg van de fasevertragingen van de jaargolf en eventuele andere meer-'daagse golven'.

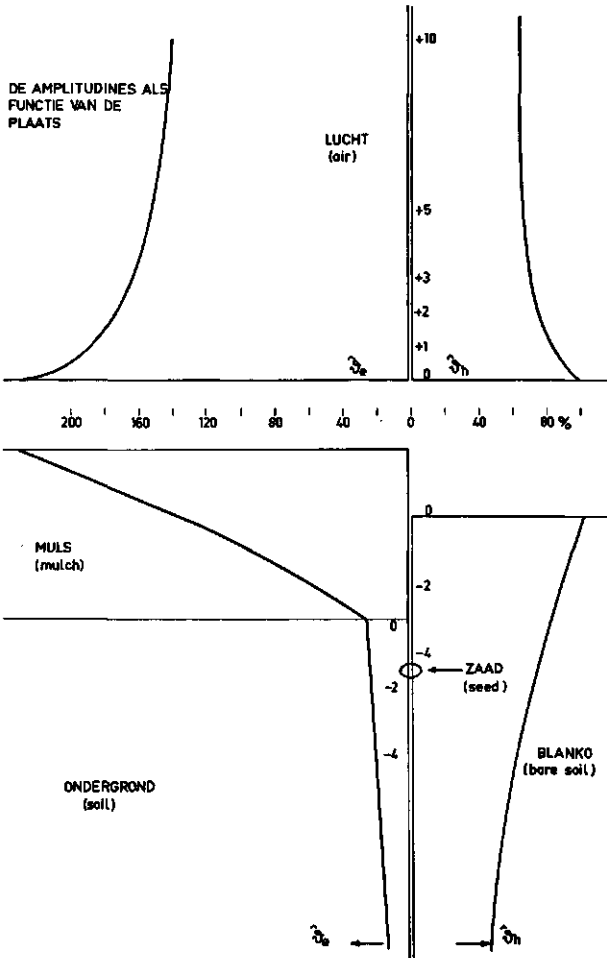


Fig. 3. De amplitudines van een gemulste en een onbedekte grond als functie van de hoogte. Voor de luchttemperaturen zijn respectievelijk het oppervlak van de mulst en van de onbedekte grond als referentie gekozen. Voor de bodemtemperaturen is de plaatscoördinaat t.o.v. de zaaidieptes onder de mulst (1,5 cm) en onder het onbedekte bodemoppervlak (4,5 cm) als referentie gekozen. In deze situatie is er van uitgegaan dat er geen advectieve warmtestromen optreden.

The amplitudes of a mulched and a bare soil in relation to their vertical position. For the air temperatures the soil-air interface is used as the origin of our vertical reference. For the soil and mulch temperatures the position of the seed (1,5 cm below the mulch and 4,5 cm in the bare soil) is used as the origin of our vertical reference. (Formulae 2-6, 2-7, 2-15 and 2-16). We supposed that advective heat flux did not occur.

$$(\alpha = 5; \sqrt{\lambda_1 C_1 / \lambda_h C_h} = 0,25 \rightarrow r = -0,6)$$

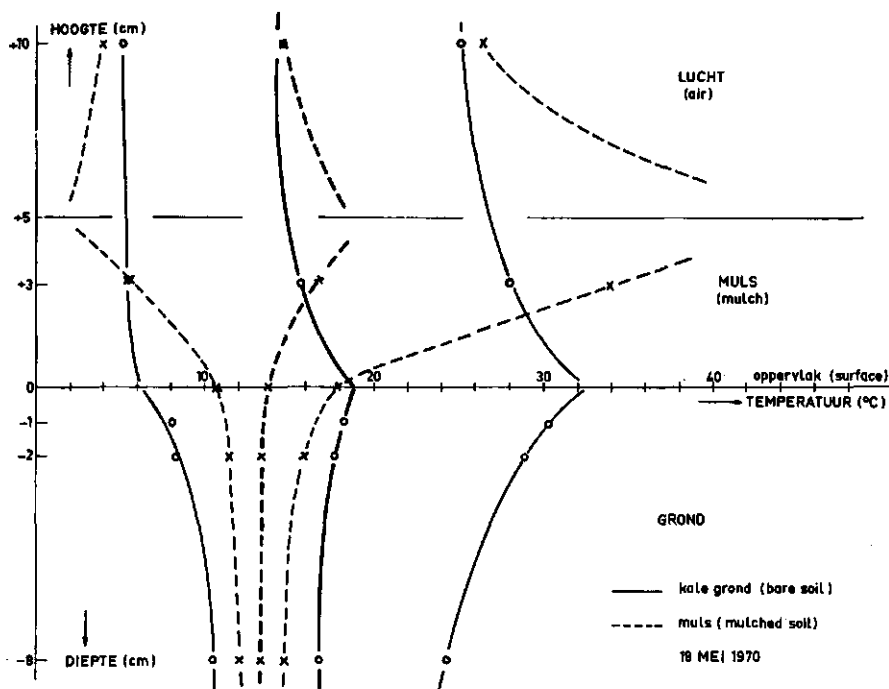


Fig. 4. De gemiddelde, maximum- en minimumtemperaturen van een zandgrond met en zonder muls op 18 mei 1970 in Wageningen. Hier is het grondoppervlak als referentie voor de plaatscoördinaat gekozen. Merk op dat de temperaturen op 10 cm boven de grond en op 5 cm boven de muls al vrijwel gelijk zijn. Dit is mede het gevolg van advectieve warmtestromen op de kleine meetveldjes. In de ondergrond lopen de temperaturen ver uiteen. De hogere gemiddelde temperaturen in de homogene grond zijn het gevolg van de jaargolf en het weertype van de afgelopen weken.

The mean, maximum- and minimum temperatures on sand with and without mulch on the 18th May 1970 at Wageningen (The Netherlands). In this figure the soil surface is used as the origin of our vertical reference system. Notice that the temperatures at 10 cm above the bare soil and at 5 cm above the mulch are nearly equal, which is due to advective heat fluxes at the small experimental parcels. The large amplitudes on the top of the mulch and the small ones at the bottom of the mulch and in the soil beneath are also shown in this figure. The higher mean temperatures on the bare soil are due to the seasonal and weather-type fluctuations.

2.6 DE INVLOED VAN STRALING EN VERDAMPING

In de vorige paragrafen zijn we ervan uitgegaan dat de nettostraling in alle gevallen gelijk was. Een betere benadering wordt verkregen door deze veronderstelling te laten vervallen en meerdere termen van de energiebalans in beschouwing te nemen, we krijgen dan:

$$(1-\rho) \phi''_{str,sh} - net\phi''_{str,lo} = \phi''_{lu} + \phi''_{bo} + \phi''_{le}$$

met

$$net\phi''_{str,lo} = 4\varepsilon\sigma(\theta_{ea})^3 \cdot \hat{\theta}_o. \quad (\text{VAN WIJK, 1963; formules 4.18 en 4.31})$$

Daar zowel het albedo als de emissiecoëfficiënt afhankelijk zijn van het bodemoppervlak kunnen we voor de mul's ten opzichte van de onbedekte grond bij benadering stellen: $\phi''_{str,1} = m \cdot \phi''_{str,h}$. In paragraaf 2.3 zagen we reeds, dat een verschil in netto-straling evenredig is met de temperatuuramplitudines zodat doorberekening van deze verschillen geen problemen oplevert.

Een speciale moeilijkheid zit nog in de wijze waarop we de langgolvlige straling in rekening zouden moeten brengen. De amplitudo hiervan hangt natuurlijk lineair af van de oppervlakte-amplitudo. Zodra we echter de invloed op de netto-straling willen berekenen speelt ook de faseverschuiving een rol. Bij vergelijking van een gemulste en een niet-gemulste grond maakt dit de berekeningen aanzienlijk ingewikkelder. In de praktijk blijken de faseverschillen tussen 'mul's' en 'ongemulst' echter klein te zijn. VAN WIJK (1963, pag. 185-187) geeft een rekenvoorbeeld waarin met deze faseverschuiving rekening is gehouden. Zijn berekening leidde tot een temperatuuramplitudo die slechts 1% kleiner was dan voor het geval waarbij de faseverschuiving verwaarloosd werd. Vanwege de omvang van de berekeningen en het geringe verschil in resultaten ben ik daarom hier niet verder op ingegaan.

Aan het oppervlak van de mul's of de onbedekte grond zal de totale netto-straling bepaald worden door absorptie van kortgolvlige straling en emissie van langgolvlige straling. Indien door een mul's het albedo of de emissiecoëfficiënt gewijzigd worden zal daardoor ook de totale netto-straling gewijzigd worden. In tabel 1 zijn albedo's en emissiecoëfficiënten van enige oppervlakken gegeven. Daaruit kan worden afgeleid dat de factor m kan variëren van 0,6-1,6.

Voor twee verschillende gronden met bovendien elk ook nog verschillende grondwaterdieptes vond FEDDES (1971) verschillen van 10-20% in de netto-

Tabel 1

Oppervlak	Gemiddelde absorptie coëfficiënt zichtbare straling	Emissiecoëfficiënt langgolvlige straling
sneeuw	0,12-0,20	0,97-0,99
oude sneeuw	0,30-0,60	0,97-0,99
onbedekte grond	0,70-0,85	0,95-0,97
zand	0,75-0,90	0,82-0,89
bos	0,82-0,95	0,94-0,98
gras	0,73-0,84	0,96-0,98
zee (water)	0,90-0,92	0,91-0,92
droge turf	0,80-0,85	0,97-0,98

straling. ROSEMA (1974) heeft een theoretisch simulatiemodel opgesteld voor de berekening van oppervlaktetemperaturen als functie van een groot aantal variabelen, onder andere albedo, emissiecoëfficiënt, bodemvochtigheid, windsnelheid en ruwheid van het oppervlak. Hij vond bij vergelijking van grof zand en klei ten opzichte van zavel verschillen in amplitudines van 5-30%. Voor een voorjaarsdag in Nederland kwam dit neer op tijdelijke temperatuurverschillen tot 8°C tussen deze grondsoorten.

Dergelijke modellen bieden het voordeel dat de invloed van alle factoren en hun wisselwerking in beschouwing genomen kunnen worden. De resultaten komen dan des te beter met de werkelijkheid overeen naarmate men erin slaagt de juiste veronderstellingen in het model in te voeren.

Onze hiervoor geschetste theorie heeft het nadeel dat er slechts enige factoren in beschouwing genomen zijn. Maar deze theorie verschaft wel een sneller inzicht in de *mogelijke invloeden* van deze speciale factoren. De verificatie van een simulatiemodel kan slechts in de praktijk geschieden omdat het regelen van alle daarin voorkomende condities voor proefopstellingen te grote technische moeilijkheden zou opleveren. Onze theorie kan daarentegen veel eenvoudigere condities aangeven die wel technisch gerealiseerd kunnen worden in een proefopstelling. Men moet dan voor lief nemen dat resultaten bij een dergelijke opzet wel sterker van de praktijk kunnen afwijken. Omdat het hier in de eerste plaats om inzicht gaat hoeft dit geen groot bezwaar te zijn.

Ook de verdampingsterm, die in de warmtebalans toch van aanzienlijke betekenis is, wordt in onze berekeningen buiten beschouwing gelaten. De verdamping en de warmtestroom naar de lucht zijn echter beide afhankelijk van dezelfde transporteigenschappen van de lucht. Daardoor is het gerechtvaardigd om aan te nemen dat beide in fase zijn. (Zie hierover ook VAN WIJK, 1963, par. 4.6.) Dat betekent dat de verdamping geen kwalitatieve veranderingen in de hierop volgende beschouwing zal geven. Kwantitatief kan hij desgewenst ingevoerd worden door de warmtestroom naar de lucht in getalwaarde te vergroten of te verkleinen.

De verhouding tussen voelbare en latente warmte wordt weergegeven door het Bowen-getal: $\beta = \phi''_{lw} / \phi''_{le}$. Dit getal is afhankelijk van de temperatuur- en vochtgradiënt en kan zowel positief als negatief zijn. In de door ons beschouwde semi-stationaire gevallen is het Bowen-getal steeds positief. Ondanks een grotere waarde van de som van beide warmtestromen kan een sterkere verdamping dan toch leiden tot een geringere opwarming van de lucht in die situatie. Bij een losse muld zal de verdamping veelal geringer zijn dan op de blanco grond zodat de voelbare warmtestroom naar de lucht dan nog groter wordt. In de praktijk kunnen zich ook situaties voordoen waarbij het Bowen-getal negatief is. FEDDES (1971) geeft daarvan een voorbeeld. In zijn geval trad er een afkoeling van de lucht op, tegelijk met een opwarming van de bodem.

De verhouding van de oppervlaktetemperaturen was in geval d kleiner dan in geval b (zie figuur 1). Indien er echter ook verdamping optreedt zijn er een tweetal gevallen te onderscheiden, waarbij we ervan uitgaan dat de netto-straling in beide gevallen gelijk is. Ten eerste, als de verdamping voor beide oppervlak-

ken gelijk is betekent dit alleen een vermindering van de beschikbare energiestroom en dus een geringere amplitudo doch een gelijke verhouding. Ten tweede als er een verschil in verdamping is zal evenals in het vorige geval de verdamping leiden tot geringere amplitudines terwijl de verdamping tevens de verhouding van de amplitudines zal wijzigen. We zagen reeds dat bij een losse mul een geringere verdamping tot een vergroting van de verhouding der amplitudines leidt. In extreme gevallen kan dus bij aanwezigheid van verdamping de verhouding in geval d toch weer groter worden dan in geval b.

Een theoretische uitwerking van de invloed van de verdamping heeft weinig nut omdat er dan zoveel veronderstellingen gemaakt moeten worden dat de gevonden resultaten nauwelijks meer van algemeen belang geacht kunnen worden. Daarom hebben wij hier volstaan met deze kwalitatieve beschouwingen.

2.7 CONCLUSIES

Met behulp van een fysische theorie kan het inzicht in de verschijnselen, die optreden bij toepassing van een mul verdiept worden. Naarmate er in het systeem echter meer factoren een rol spelen kunnen de effecten zowel verzwakt als versterkt worden. Dit geeft een gedeeltelijke verklaring voor de tegenstrijdige literatuurgegevens over mulsen.

Het aanbrengen van een mul biedt de mogelijkheid om op bescheiden doch merkbare wijze in het microklimaat in te grijpen. Indien men om andere redenen een mul toepast dient bij de keuze daarvan rekening gehouden te worden met de invloeden op het microklimaat.

Bij afwezigheid van verdamping zal een losse mul in de onderste luchtlagen en in de bovenste laag van de mul sterkere fluctuaties van de temperaturen vertonen dan een homogene onbedekte grond. Bovendien zullen de fluctuaties, b.v. de dagelijkse en de jaarlijkse, in de ondergrond geringer zijn. Dat betekent voor de gematigde klimaten dat er een grotere kans op nachtvorst optreedt en dat de grond onder de mul in het voorjaar trager opwarmt en afkoelt tijdens 'weertype' schommelingen. Voor de warme klimaten betekent de mul in vergelijking met onbedekte grond extreem hoge temperaturen erboven doch lagere temperaturen in de ondergrond. De verschillen zijn des te sterker naarmate a) de mul lossier is; b) als gevolg van de mul geringere verdamping optreedt en c) de mul een geringere albedo bezit.

Een mul leidt tot faseverschillen tussen temperatuur en lichtintensiteit. Over de mogelijke gevolgen daarvan zijn onvoldoende gegevens bekend.

3. SAMENVATTING

In de landbouwpraktijk kan vanwege uiteenlopende redenen een mulc aan het oppervlak worden aangebracht, terwijl deze ook door natuurlijke oorzaak kan ontstaan. Een mulc heeft op allerlei factoren verschillende invloeden die in dit artikel worden aangegeven. Daarnaast wordt dieper ingegaan op de betekenis van een mulc op de temperatuurvariaties boven en onder het oppervlak. Een oplossing wordt gegeven voor de vergelijking tussen een homogene en een gemulste grond die beide dezelfde straling ontvangen. Tevens wordt ingegaan op de mogelijke invloed van verdamping.

Trefwoorden: microklimatologie, mulc, mulch, temperatuuramplitudo, warmte stromen in bodem en lucht.

4. DANKBETUIGINGEN

Mijn dank gaat met name uit naar professor J. Schenk voor de hulp bij de presentatie van de tweelagentheorie en zijn kritische opmerkingen bij de tekst en naar professor G. J. Vervelde voor zijn opmerkingen vanuit het landbouwkundige gezichtspunt. Voorts dank ik allen die in de lange reeks van bewerkingen van eerste manuscript tot drukwerk hun onmisbare medewerking hebben verleend.

<i>Symbolen</i>	<i>Betekenis</i>	<i>Eenheid</i>
<i>a</i>	warmtediffusiecoëfficiënt	$m^2 \cdot s^{-1}$
<i>C</i>	volumieke warmtecapaciteit	$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
<i>c</i>	warmtecapaciteit	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
<i>D</i>	dempingsdiepte, $D = \sqrt{2a/\omega}$	m
<i>d</i>	dikte van de mul- of bovenlaag	m
<i>M</i>	hulpvariabele, zie blz. 13	
<i>m</i>	verhoudingsgetal, zie blz. 15	
<i>N</i>	hulpvariabele, zie blz. 13	
<i>T</i>	absolute temperatuur	K
<i>t</i>	tijd	s
<i>z</i>	diepte	m
α	warmteoverdrachtscoëfficiënt	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
β	Bowen's ratio, $\beta = \phi''_{in}/\phi''_{ie}$	-
δ	relatieve dempingsdiepte, $\delta = d/D$	-
ϵ	emissiecoëfficiënt	-
ζ	relatieve diepte, $\zeta = z/D$	-
θ	temperatuur (-verschil)	K
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	dichtheid; albedo	$kg \cdot m^{-3}$; -
ϕ''	energiestroomdichtheid	$W \cdot m^{-2}$
ϕ	faseverschuiving, zie blz. 13	rad
ψ	faseverschuiving, zie blz. 13	rad
ω	hoeksnelheid	s^{-1}

Aanhangers

<i>l</i>	bovenlaag = <i>Ie</i> laag
<i>bo</i>	bodem
<i>h</i>	homogene grond
<i>l</i>	gelaagde grond
<i>le</i>	latente energie
<i>lo</i>	langgolvig (long)
<i>lu</i>	lucht
<i>sh</i>	kortgolvig (short)
<i>str</i>	straling

5. REFERENTIES

- ANONYMUS, 1963. Over de strooisellaag als cultuurmaatregel. *Bodem* **52**: 11–16.
- BAKERMANS, W. A. P. en C. T. DE WIT, 1970. Crop husbandry on naturally compacted soils. *Neth. J. Agr. Sc.* **18**: 225–246.
- BARKLEY, D. G., R. E. BLASER and R. E. SCHMIDT, 1965. Effect of mulches on microclimate and turf establishment. *Agr. J.* **57**: 189–192.
- BLACK, J. D. F., 1963. The development of an impermeable layer under straw mulch in a soil management trial. *Austr. J. Exp. Agr. and An. Husb.* **3**: 101–104.
- BURROWS, W. C., 1959. Mulch influence on soil temperature and corn growth. Diss. Iowa State Univ. of Sc. and Techn., Ames, Iowa, 121 pp.
- CARSLAW, H. S. en J. C. JAEGER, 1959. Conduction of heat in solids. 2nd ed. New York, N.Y., Oxford Univ. Press.
- CARY, J. W., 1965. Water flux in moist soil: thermal versus suction gradients. *Soil Sc.* **100**: 168–175.
- CLARKSON, V. A., 1960. Effect of black polyethylene mulch on soil and microclimate temperature and nitrate level. *Agr. J. (Mad.)*, **52**: 307–309.
- COLLIS-GEORGE, N., B. G. DAVEY, D. R. SCOTTER and D. R. WILLIAMSON, 1963. Some consequences of bituminous mulches. *Austr. J. Agr. Res.* **14**: 1–11.
- DAMAGNEZ, 1959. Rôle du mulch naturel ou artificiel sur la dynamique et l'économie de l'eau dans le Languedoc méditerranéen. *C. R. Acad. Fr.* **45**: 237–241.
- DARWIN, 1881. Vegetable Mould and Earthworms.
- DERKSEN, W. J., 1974. Thermal-infrared pictures and the mapping of microclimate. *Neth. J. Agr. Sc.* **22**: (2): 119–132.
- DUIN, R. H. A. VAN, 1956. Over de invloed van grondbewerking op het transport van warmte, lucht en water in de grond. *Versl. Landb. Onderz.* no. 62.7, 's-Gravenhage, 82 pp.
- DULEY, F. L., 1954. *Neb. Coll. Agric. and U.S.D.A., E.C.* 54–100.
- FEDDES, R. A., 1971. Water, heat and crop growth. *Meded. Landb. Hogesch.*, 71–12, Wageningen, 184 pp.
- FLINT, L. H., 1928. Crop-plant stimulation with paper mulch. *U.S.D.A. Techn. Bull.* **75**, 20 pp.
- GEIGER, R., 1961. *Das Klima der Bodennahen Luftschicht.* 4e neubearbeitete und erweiterte Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 647 pp.
- GIDDENS, J., H. D. MORRIS en A. W. WHITE jr., 1969. Some effects of mulches on crops and soils. *Res. Bull. Coll. Agr. Exp. Stat. Univ. Georgia*, no. 66, 22 pp.
- JACKS, G. O., W. D. BRIND en R. SMITH, 1955. Mulching. *Comm. Bur. of Soil Sc., Techn. Comm.* no. 49, 87 pp.
- MCCALLA, T. M. en F. L. DULEY, 1946. Effect of crop residues on soil temperature. *J. Amer. Soc. Agron.* **38**: 75–89.
- PARKER, D. T., 1957. Influence of soil temperature on nitrification. *Bact. Proc.* **57**: 9.
- PARKER, D. T. and W. E. LARSON; 1962. Nitrification as affected by temperature and moisture content of mulched soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **26**: 238–242.
- PEERLKAMP, P. K., 1944. *Bodemmeteorologische onderzoekingen te Wageningen.* *Meded. Landb. Hogesch.* **47**: 1–96.
- RATTRAY, A. G. H., 1961. The value of maize stover. *Rhod. Agr. J.* **58** (6): 350–353.
- ROSEMA, A., 1974. Simulation of the thermal behaviour of bare soils for remote sensing purposes. In: D. A. de Vries (editor), *Heat and Mass Transfer in the biosphere*, Scripta Publ. Comp., New York, 1974.
- ROWE-DUTTON, P., 1957. The mulching of vegetables. *Comm. Bur. of Hort. and Plantation Crops. Techn. Comm. Bull.* no. 24, 196 pp.
- SCHALLER, F. W. en D. D. EVANS, 1954. Some effects of mulch tillage. *Agr. Eng.* **35**: 731–734, 736.
- TAYLORSON, R. B. and S. B. HENDRICKS, 1972. Interactions of Light and a Temperature Shift on Seed Germination. *Plant Physiol.* **49**: 127–130.

- TUKEY, R. B. en E. L. SCHOFF, 1963. Influence of different mulching materials upon the soil environment. Proc. Am. Hort. Sc. **82**: 68-76.
- WIJK, W. R. VAN (ed.), 1966. Physics of plant environment. North Holland Publ. Comp., Amsterdam. 2nd ed., 382 pp.
- WIJK, W. R. VAN en W. J. DERKSEN, 1966. In: WIJK, W. R. VAN, Physics of plant environment: 171-209.