

DIE THERMISCHEN EIGENSCHAFTEN DER MOORBÖDEN UND DIE BEEINFLUSSUNG DER NACHTFROSTGEFAHR DIESER BÖDEN DURCH EINE SANDECKE.

Von

D. A. de Vries und C. T. de Wit, Wageningen.

(Laboratorium voor Natuur- en Weerkunde, Landbouwhogeschool, Wageningen, Holland.
Direktor: Prof. Dr. W. R. van Wijk.)

Mit 3 Textabbildungen.

Zusammenfassung: Die Wärmeleitfähigkeit von 4 holländischen Moorböden bei verschiedenen Feuchtegehalten wurde nach einem nicht stationären Verfahren bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeiten wurden außerdem mit Hilfe einer früher behandelten Theorie berechnet. Aus der theoretischen Auswertung folgt ein Wert von $0,6 \times 10^{-3}$ cal/cm sec $^{\circ}$ C für die Wärmeleitfähigkeit von Humus.

Die experimentellen und theoretischen Werte sind zusammengefaßt in der Tabelle 2.

Von 2 dieser Moorböden wurde die spezifische Wärme der trockenen Bodensubstanz gemessen. Das Meßverfahren wird unter 2 beschrieben. Es ergab sich ein Wert von 0,46 cal/g $^{\circ}$ C für die spezifische Wärme von Humus, was in guter Übereinstimmung mit früheren Angaben ist.

Die hier ermittelten thermischen Eigenschaften des Moores werden zu einer theoretischen Diskussion des Einflusses einer Sanddecke auf die Nachtfrostgefahr bei Moorböden verwendet. Es wird gezeigt, daß unter allen Umständen die Nachtfrostempfindlichkeit eines Moorbodens durch Belegung dieses Bodens mit einer Sanddecke von 10 bis 13 cm Dicke auf die Nachtfrostempfindlichkeit eines Sandbodens herabgesetzt wird. Diese Dicke wird in der Praxis angewandt. Durch eine Mischung der Sanddecke mit den oberen Moorlagen steigt die Nachtfrostempfindlichkeit in Vergleich zu dem ungemischten Zustand insbesondere in trockenen Perioden; sie bleibt aber noch weit hinter der Nachtfrostempfindlichkeit des unbedeckten Moores zurück.

1. Einleitung.

In Vergleich mit den Daten über die thermischen Eigenschaften von mineralen Böden sind relativ wenig Angaben dieser Eigenschaften von Böden mit beträchtlichem Gehalt an organischer Substanz vorhanden. Messungen der Wärmeleitfähigkeit wurden veröffentlicht durch Patten⁶, Smith⁸ und Kersten³ in der USA, während Bracht¹ neben eigenen Resultaten auch vereinzelte Werte von anderen europäischen Untersuchern nennt. Werte der spezifischen Wärme findet man bei Bracht¹, Lang⁵, Tacke⁹ und Ulrich¹⁰.

Dieser verhältnismäßige Mangel an experimentellen Daten war Anlaß dazu, Messungen der Wärmeleitfähigkeit von vier holländischen Moorböden durchzuführen. Von zwei dieser Böden wurde daneben die spezifische Wärme festgestellt.

Die experimentellen Werte der Wärmeleitfähigkeit zeigen eine gute Übereinstimmung mit den theoretisch bestimmten Werten.

Infolge der geringen Wärmeleitfähigkeit der Moorböden haben sie eine wesentlich größere Nachtfrostgefahr als die mineralen Böden. Man kann die Nachtfrostgefahr herabsetzen durch Belegung des Moores mit einer Sanddecke. Der Einfluß einer solchen Decke von variabler Dicke auf die Temperaturschwankung an der Erdoberfläche wird theoretisch diskutiert, wobei speziell eingegangen wird auf den Effekt einer Austrocknung und auf den Effekt einer Mischung der Sanddecke mit den oberen Moorlagen.

2. Die Bestimmung der spezifischen Wärme.

Das Prinzip nach dem die spezifische Wärme der Böden bestimmt wurde, verdanken wir Herrn Professor Dr. E. F. M. van der Held, Direktor der „Warmtestichting“, Utrecht.

Eine abgewogene Menge des Bodens wird zusammen mit einem Beckmanthermometer in eine Thermosflasche gebracht und das Ganze wird in ein Wasserbad konstanter Temperatur gesetzt. Weil der Wärmedurchgang durch die Wand der Thermosflasche äußerst gering ist, sind die Temperaturdifferenzen innerhalb der Flasche zu vernachlässigen. Besteht zwischen dem Inhalt der Flasche und dem Wasserbad eine Temperatur-

differenz ϑ , dann wird die Änderung von ϑ mit der Zeit, t , gegeben durch:

$$\ln \vartheta / \vartheta_0 = -(aF/K) t.$$

Hier ist a die Wärmeübergangszahl, F die Kühlfläche und K die Wärmekapazität der Thermosflasche mit Inhalt. Letztere setzt sich zusammen aus der Wärmekapazität der Thermosflasche mit dem Thermometer K_0 und der Wärmekapazität der Bodenprobe.

Ausgehend von einer Temperaturdifferenz ϑ_0 von ungefähr 6° C wird der Temperaturverlauf über eine Periode von etwa 10 Std gemessen. Wenn man $\log \vartheta$ gegen t aufträgt, bekommt man eine Gerade. Aus der Neigung dieser Geraden findet man aF/K . Macht man dies bei zwei Füllungen mit bekannter Wärmekapazität, dann kann man aF und K_0 berechnen. Bei unseren Experimenten war $aF = 3,56 \times 10^{-3}$ cal/sec $^{\circ}$ C und $K_0 = 15,0$ cal/ $^{\circ}$ C.

Zur Prüfung der Methode wurde zuerst eine Messung mit Quarzsand durchgeführt; diese gab als Resultat eine spezifische Wärme von 0,18 cal/g $^{\circ}$ C in guter Übereinstimmung mit anderen Autoren (z. B. Kersten³).

Für einen Hochmoorboden (einen sogenannten „Bolster“, s. u.) mit einem Gehalt von 96,1 Gewichtsprozent an organischer Substanz fanden wir für die Bodensubstanz 0,45 cal/g $^{\circ}$ C, für ein Niedermoor mit 60 Gewichtsprozent Humusgehalt 0,33 cal/g $^{\circ}$ C. Die mittlere Temperatur war bei allen Messungen ungefähr 28° C.

Aus der Messung des Bolsters folgt ein Wert von 0,46 cal/g $^{\circ}$ C für die spezifische Wärme von Humus. Für die meisten mineralen Bodenbestandteile findet Kersten³ einen Wert von 0,18 cal/g $^{\circ}$ C bei einer Temperatur von rund 28° C. Weil die Wärmekapazitäten additiv sind, bekommen wir daher z. B. für einen Boden mit 60% Humusgehalt: $0,60 \times 0,46 + 0,40 \times 0,18 = 0,35$ cal/g $^{\circ}$ C. Die Differenz von 0,02 cal/g $^{\circ}$ C mit dem experimentellen Wert kann sehr leicht verursacht werden durch eine Ungenauigkeit in der Bestimmung des Wassergehalts des Niedermoores. Die spezifische Wärme dieses Bodens wurde nämlich bestimmt bei einem Wassergehalt von 11,5 Gewichtsprozent wo der Wert 0,41 cal/g $^{\circ}$ C beträgt. Übrigens können die organischen Bestandteile der Böden auch von verschiedener Zusammensetzung sein.

Bracht¹ gibt für Verwitterungserde einen Wert von 0,416 cal/g $^{\circ}$ C, Lang⁵ und Ulrich¹⁰ fanden für Humus bzw. 0,477 und 0,443 cal/g $^{\circ}$ C. Tacke⁹ fand für trockenen Humus mit einer Porosität 0,754 einen Wert von 0,148 cal/cm³ $^{\circ}$ C. Mit einem spezifischen Gewichte von 1,3 g/cm³ folgt hieraus eine spezifische Wärme von 0,46 cal/g $^{\circ}$ C.

Für die Durchführung der Messungen nach dieser Methode sind folgende technische Einzelheiten von Bedeutung. Die Thermosflasche wird verschlossen mit einem Kautschukstopfen, durch welchen das Beckmanthermometer geführt wird. Der Stopfen wird abgedichtet mit Wachs; wir verwendeten sogenanntes „Parawet“, eine Lösung die nach Eintrocknen eine Polyvinylschicht hinterläßt. Eine gute Abdichtung ist wesentlich, insbesondere wenn das Muster flüchtige Bestandteile enthält. Eine geringe Verdampfung von Wasser würde z. B. die Resultate stark beeinflussen. Bei einer Messung mit Wasser

wurde daher auch noch eine dünne Ölschicht auf die Wasseroberfläche gelegt. Um Einflüsse der Umgebungstemperatur zu vermindern, wurde ein kegelförmiger rotkupferner Hut angebracht, der mit dem oberen Ende ungefähr 10 cm über dem Stopfen das Beckmanthermometer umschließt, während das untere Ende dicht neben dem Hals der Thermosflasche in das Wasserbad taucht.

3. Die Wärmeleitfähigkeit.

(Die experimentellen Daten.)

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit geschah nach einem nicht stationären Verfahren, daß anderswo ausführlich beschrieben wurde (De Vries^{11, 12}). Die Meßresultate findet man in Tabelle 2.

Die Bodenproben wurden uns zur Verfügung gestellt durch Herrn Ir. J. Bennema und Herrn Ir. B. van Heuveln der „Stichting voor Bodemkartering“. Die vier untersuchten Böden waren:

1. Ein sandiges Niedermoor aus der Umgebung von Boskoop.
2. Ein Niedermoor aus der Umgebung von Groot Mijdrecht.
3. Ein tonhaltiges Niedermoor aus der Umgebung von Ter Aa.
4. Ein Hochmoor aus dem Südosten der Provinz Drente. Dies ist eine Bunkerde, ein sogenannter „Bolster“, eine aus jungem, umgesetztem Torfmoos bestehende Bodenschicht.

Die Muster der Böden 1 bis 3 waren aus 0 bis 10 cm Tiefe.

Tabelle 1. Zusammensetzung (in Gewichtsprozenten) und spezifisches Gewicht der Bodensubstanz in g/cm^3 der untersuchten Moorböden.

Boden	% Humus	% Sand (16μ)	% Schlamm (16μ)	% Rest (Mineralien)	Spez. Gewicht
Boskoop . . .	26,2	44,2	24,6	5,0	2,00
Gr. Mijdrecht.	60,0	11,1	22,1	6,8	1,63
Ter Aa. . . .	47,2	15,0	30,7	7,1	1,74
Bolster . . .	96,1	0,0	2,3	1,6	1,36

Die Zusammensetzung der Böden und ihre pF -Kurven¹ wurden bestimmt durch die „Landbouwprouffstation en Bodemkundig Instituut T.N.O.“, Groningen. Die Resultate findet man

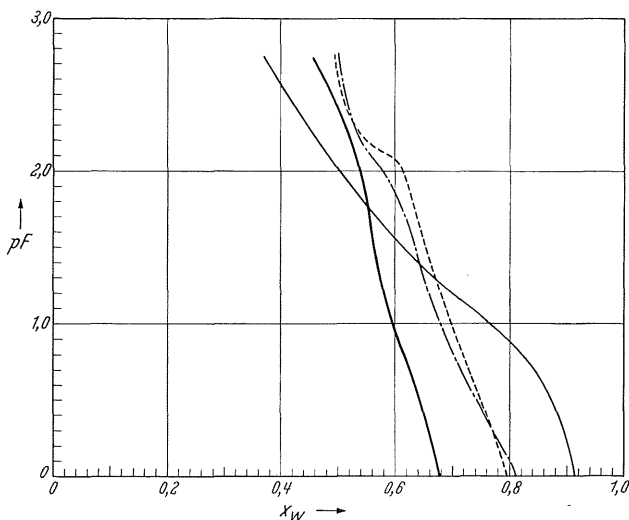


Abb. 1. pF -Werte der untersuchten Moorböden in Abhängigkeit vom Volumenanteil des Wassers, x_w . — Boskoop; - - - Groot Mijdrecht; - · - Ter Aa; — Bolster.

in Tabelle 1 und in Abb. 1. Die Tabelle 1 enthält ebenfalls die von uns gemessenen spezifischen Gewichte der trocknen Bodensubstanzen.

¹) Das pF ist in der Logarithmus aus den Betrag der Spannung (in cm Wasserdruck) mit dem das Wasser im Boden festgehalten wird.

(Die theoretische Auswertung.)

In einer früheren Arbeit (De Vries¹²), wurde beschrieben, wie man die Wärmeleitfähigkeit feuchten, körnigen Materials angenähert berechnen kann. Man muß dazu neben der Porosität und dem Wassergehalt die Wärmeleitfähigkeit und die Form der Körner kennen. Eine theoretische Beschreibung in geschlossener Form ist nur möglich, wenn die Körner ellipsoidal sind und deshalb werden die Bodenteilchen als kleine Ellipsoide betrachtet. Aus Messungen des Diffusionskoeffizienten¹³ und der Wärmeleitfähigkeit von vielen Böden folgt, daß man die Bodenteilchen meistens mit guter Annäherung als abgeplattete Rotationsellipsoide mit einem Verhältnis zwischen großer und kleiner Achse von 3 bis 5 betrachten kann.

Bei der Wärmeleitfähigkeit λ , wird unterschieden zwischen Sand (Quarz) mit $\lambda \approx 20 \times 10^{-3}$ cal/cm sec °C, sonstigen Bodenmineralien mit $\lambda \approx 7 \times 10^{-3}$ cal/cm sec °C und Humus mit $\lambda \approx 0,6 \times 10^{-3}$ cal/cm sec °C.

Für das obengenannte Achsenverhältnis wurde, in Übereinstimmung mit früheren Angaben, ein Wert von 4 angesetzt für die Sandteilchen und ein Wert von 5 für die Tonteilchen und die sonstigen Bodenmineralien. Für die Humusteilchen wurde an Hand einer Betrachtung unter dem Mikroskop ein Wert von 4 gewählt.

Weil die Volumenverhältnisse in die Berechnungen eingehen, war es notwendig, die Gewichtsprozentage aus der Tabelle 1 in Volumenprozentage umzurechnen, wozu man noch die spezifischen Gewichte der verschiedenen Bodenbestandteile kennen muß. Für die mineralen Bodenteile ist $2,65 g/cm^3$ ein guter mittlerer Wert. Für den Humus folgen dann aus den spezifischen Gewichten der trocknen Böden die Werte 1,18, 1,30, 1,26 und $1,33 g/cm^3$ für die Böden 1 bis 4.

Tabelle 2. Experimentelle* und theoretische Werte der Wärmeleitfähigkeit (in $cal/cm^3 sec °C$) der untersuchten Moorböden.

Boskoop			
x_f	x_w	$10^3 \lambda$ (exp.)	$10^3 \lambda$ (theor.)
0,362	0,532	1,69	1,92
0,360	0,385	1,42	1,60
0,350	0,259	0,88	1,18
0,361	0,135	0,59	0,82
0,470	0,000	0,31	0,31
Groot Mijdrecht			
x_f	x_w	$10^3 \lambda$ (exp.)	$10^3 \lambda$ (theor.)
0,250	0,681	1,35	1,33
0,237	0,337	0,65	0,77
0,274	0,205	0,45	0,43
0,328	0,066	0,29	0,34
0,403	0,000	0,21	0,20
Ter Aa			
x_f	x_w	$10^3 \lambda$ (exp.)	$10^3 \lambda$ (theor.)
0,275	0,644	1,50	1,43
0,251	0,493	1,01	1,15
0,260	0,299	0,60	0,81
0,393	0,000	0,29	0,24
Bolster			
x_f	x_w	$10^3 \lambda$ (exp.)	$10^3 \lambda$ (theor.)
0,098	0,817	1,15	1,20
0,109	0,693	0,91	1,03
0,109	0,493	0,67	0,76
0,159	0,000	0,093	0,094

x_f = Volumenanteil der Bodensubstanz.

x_w = Volumenanteil des Wassers.

* Die mittlere Temperatur bei den Messungen war 20°C.

Wasser und trockene Luft haben bei 20°C eine Wärmeleitfähigkeit von $1,42 \times 10^{-3}$ bzw. $0,0615 \times 10^{-3}$ cal/cm sec °C. Es wurde früher ebenfalls beschrieben¹², wie man den Beitrag der Dampfdiffusion in den luftgefüllten Poren nach der Theorie von Krischer u. Rohner⁴ in Rechnung stellen kann. Bei den vorliegenden Berechnungen wurde angenommen, daß dieser

Beitrag von dem maximalen Wert linear auf Null herabsinkt für Feuchtegehalte zwischen 50 und 0 Volumenprozenten.¹

Aus unseren Messungen folgt ein etwas kleinerer Wert für die Wärmeleitfähigkeit von Humus als früher¹² angegeben wurde, nämlich $0,6 \times 10^{-3}$ statt $0,7 \times 10^{-3}$ cal/cm sec °C. Letzterer Wert folgte aus nur zwei Messungen von *Smith*⁸, so daß wir den jetzt gefundenen Wert für besser halten.

Die Resultate der Messungen und der Berechnungen sind in der Tabelle 2 zusammengefaßt. Die Genauigkeit der experimentellen Daten ist ungefähr 4%. Für eine ausführliche Diskussion der Genauigkeit der theoretischen Werte müssen wir auf die öfter genannte Arbeit¹² verweisen. Wir betonen nur, daß keine Anpassung an die experimentellen Werte stattfand, abgesehen von der Wahl von $0,6 \times 10^{-3}$ cal/cm³ sec für den Wert der Wärmeleitfähigkeit der organischen Substanz. Die theoretischen Werte können bei Feuchtegehalten x_w , zwischen 0,5 und 0,1 noch weitgehend verbessert werden durch Annahme eines schnelleren Herabsinkens des Beitrages der Dampfdiffusion.

4. Der Einfluß einer Sanddecke auf die Nachtrostgefahr.

Zur Verbesserung der physikalischen Eigenschaften von Moorböden wird auf diese Böden öfters eine Sanddecke gelegt. Es wurde empirisch gefunden, daß bei einer größeren Dicke der Decke als 10—15 cm die landwirtschaftlichen Eigenschaften der Moorböden sich nicht weiter verbessern (vgl. z. B. *Tacke*⁹). Die experimentellen Daten erlauben nicht festzustellen, was die günstigste Dicke der Decke in Bezug auf die einzelnen Eigenschaften wie Wasserhaushalt, Nachtrostgefahr, Ertrag und Unkrautbekämpfung ist. Im folgenden wird theoretisch gezeigt, daß zur Verminderung der Nachtrostgefahr die übliche Dicke der Decke (10—15 cm) genügt. Wir erwähnen noch, daß zur Vermeidung einer starken Austrocknung der oberen Moortalagen eine weitaus geringere Dicke genügen würde.

Die täglichen Temperaturschwankungen sind bei Moorböden im allgemeinen wesentlich größer als bei mineralen Böden, was namentlich auf die geringere Wärmeleitfähigkeit jener zurückzuführen ist. Zur Charakterisierung der Nachtrostgefahr eines Bodens betrachten wir die Temperaturamplitude bei gegebener sinusförmiger Wärmez- und -abfuhr, was mathematisch in folgender Weise ausgedrückt wird:

$$\varphi = F \sin \omega t, \quad (1)$$

wobei F die Amplitude der Wärmestromdichte φ (in cal/cm² sec) ist, t die Zeit und $\omega = 2\pi/T$ die Kreisfrequenz bei der Periode T . Letztere ist für tägliche Variationen 86400 sec.

Die Theorie der Wärmebewegung in einem homogenen Boden von unendlicher Tiefe bei sinusförmigem Wärmestrom an der Oberfläche findet man in den Lehrbüchern der mathematischen Physik, z. B. *Frank u. von Mises*². Ist λ die Wärmeleitfähigkeit (in cal/cm sec °C) und C die volumetrische Wärmekapazität (in cal/cm³ °C) des Bodens, so folgt aus der Theorie für die Temperatur in der Tiefe z :

$$\vartheta(z, t) = Ae^{-z/D} \sin(\omega t - z/D - \pi/4), \quad (2)$$

mit A = Temperaturamplitude an der Oberfläche und $D = (2\lambda/C\omega)^{1/2}$. D ist die Tiefe in der die Amplitude A/e beträgt; sie wird die Dämpfungstiefe genannt. A hängt mit F zusammen nach der Beziehung:

$$A = F/(\omega \lambda C)^{1/2} \quad (3)$$

Bei gegebener sinusförmiger Wärmestromdichte ist für homogene Böden also die Phasendifferenz zwischen dieser und der Temperatur $\pi/4$ (3 Std für die täglichen Variationen). Die Temperaturamplituden sind den Werten von $(\lambda C)^{1/2}$ umgekehrt proportional. Für einen feuchten Sand und einen feuchten Bolster (beide auf Feldkapazität) sind diese Werte bzw. 0,0418 und 0,0195 cal/cm² sec^{1/2} °C (siehe Tabelle 3 für die numerischen Werte). Hieraus folgt daß die Amplitude beim feuchten Bolster rund das Doppelte von der Amplitude bei feuchtem Sande beträgt.

In Wirklichkeit ist der Wert von F aber noch von den thermischen Eigenschaften der Böden abhängig. In erster Linie

¹ Ein Feuchtegehalt von 50% korrespondiert bei diesen Böden ungefähr mit der Feldkapazität, d. h. mit dem Feuchtegehalt, bei dem das Wasser praktisch nicht mehr bewegt ist unter Einfluß von Kapillaren und Gravitationskräften.

wird F freilich bestimmt durch die Einstrahlung der Sonne tags und die Ausstrahlung nachts, aber bei erhöhtem Wert von A nehmen der Wärmeaustausch mit der Luft und die Verdampfung zu, während dagegenüber der Wärmeaustausch mit dem Boden und damit F abnimmt.

Für unseren Zweck ist aber die Annahme einer gegebenen φ bequem und brauchbar, falls man den hieraus folgenden Werten der Amplituden keinen absoluten, sondern nur vergleichweisen Wert zuerkennt. Zur Charakterisierung der Nachtrostempfindlichkeit eines Bodens betrachten wir schließlich das Verhältnis seiner Temperaturamplitude A , und der Temperaturamplitude A_s eines homogenen „Standardbodens“. Als letzteren wählen wir Sand bei Feldkapazität. Den Bruch A/A_s nennen wir den Nachtrostfaktor N ; den Werten von N kommt selbstverständlich ebenfalls nur vergleichsweise Bedeutung zu. Je größer für den untersuchten Boden N ist, um so größer ist die Nachtrostgefahr.

Um die Amplitude eines Moorbodens mit einer Sanddecke zu berechnen, muß man die Theorie auf einen Boden, der aus zwei Schichten mit verschiedenen thermischen Eigenschaften

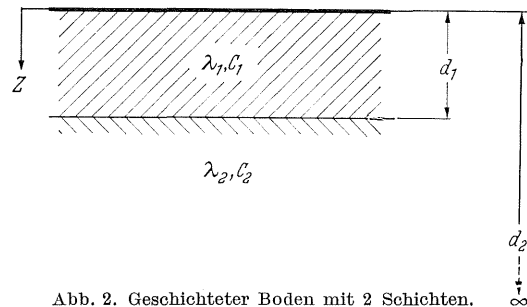


Abb. 2. Geschichteter Boden mit 2 Schichten.

aufgebaut ist (vgl. Abb. 2), erweitern. Für die Temperaturamplitude an der Erdoberfläche finden wir nach *Peerlkamp*⁷, wenn die Wärmestromdichte wieder durch (1) gegeben ist:

$$\vartheta(0, t) = A' \sin(\omega t - \pi/4 + \psi), \quad \text{mit} \quad (4)$$

$$A' = \left\{ F / (\omega \lambda_1 C_1)^{1/2} \right\} \left(\frac{1 + r^2 e^{-4\delta} + 2r e^{-2\delta} \cos 2\delta}{1 + r^2 e^{-\delta} - 2r e^{-2\delta} \cos 2\delta} \right)^{1/2} \quad (4a)$$

$$\psi = \arctg \frac{-2r e^{-2\delta} \sin 2\delta}{1 - r^2 e^{-4\delta}} \quad (4b)$$

$$r = \frac{(\lambda_1 C_1)^{1/2} - (\lambda_2 C_2)^{1/2}}{(\lambda_1 C_1)^{1/2} + (\lambda_2 C_2)^{1/2}}, \quad \delta = d_1/D_1 \quad (4c)$$

Die Werte von $\left(\frac{1 + r^2 e^{-4\delta} + 2r e^{-2\delta} \cos 2\delta}{1 + r^2 e^{-\delta} - 2r e^{-2\delta} \cos 2\delta} \right)^{1/2}$ und von ψ

bringen den Einfluß der unteren Schicht auf Amplitude und Phase der oberen Schicht zum Ausdruck. Sie sind in Abhängigkeit von δ gegeben in Abb. 3 für verschiedene Werte von r .

Wenn die oberen Bodenschichten durch Austrocknen ihr Wasser verlieren, entsteht im Falle eines Moorbodens mit einer Sanddecke ein Boden, der aus 3 Schichten besteht, nämlich trockenem Sand, feuchtem Sand und feuchtem Moor. Die theoretische Behandlung dieses Problems verläuft ganz analog wie bei 2 Schichten, d. h. daß man die Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeleitung löst unter der Voraussetzung einer sinusförmigen Zeitabhängigkeit der Temperatur und mit den folgenden Randbedingungen:

- die Wärmestromdichte an der Erdoberfläche ist wieder durch Gleichung (1) gegeben,
- an den Grenzflächen verlaufen die Wärmestromdichte und die Temperatur kontinuierlich,
- in unendlicher Tiefe ist die Temperatur konstant.

Die Lösung läßt sich in diesem Falle aber nicht in übersichtlicher Form schreiben. Nach unserer Erfahrung tut man daher am besten bei der Behandlung von numerischen Beispielen zuerst die bekannten Werte der thermischen Größen der verschiedenen Schichten in die Randbedingungen einzutragen und

dann die so erhaltenen Gleichungen nach den unbekanntenen Amplituden zu lösen.

Mit Hilfe der obengenannten Theorie kann man nun leicht den Einfluß der Schichtdicke einer Sanddecke auf den Nachtfrostfaktor übersehen. Man muß dazu die thermischen Eigenschaften des Sandes und des Moorbodens einsetzen. Wir haben die Theorie angewendet auf einen mit Quarzsand bedeckten

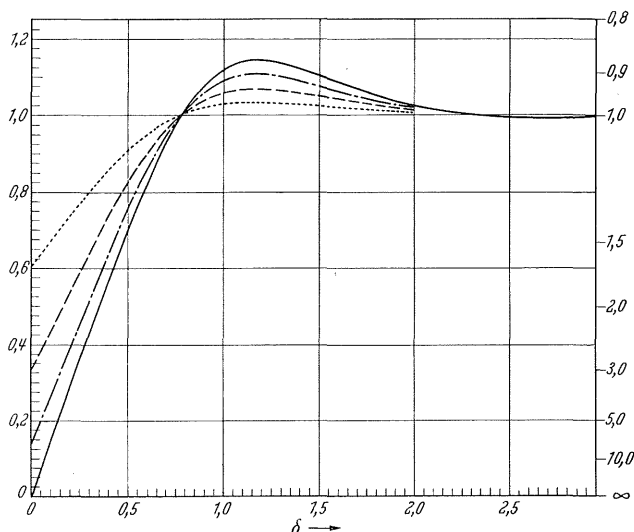


Abb. 3a. Werte von $\left(\frac{1 + r^2 e^{-4\delta} + 2 r e^{-2\delta} \cos 2\delta}{1 + r^2 e^{-4\delta} - 2 r e^{-2\delta} \cos 2\delta}\right)^{\frac{1}{2}}$ in Abhängigkeit von δ für $|r| = 0$ (—); 0,25 (.....); 0,50 (— — —); 0,75 (— · —) und 1,00 (— — —). Für negative r -Werte benutze man die linke Ordinatenkala; für positive r -Werte die reziproke rechte Skala.

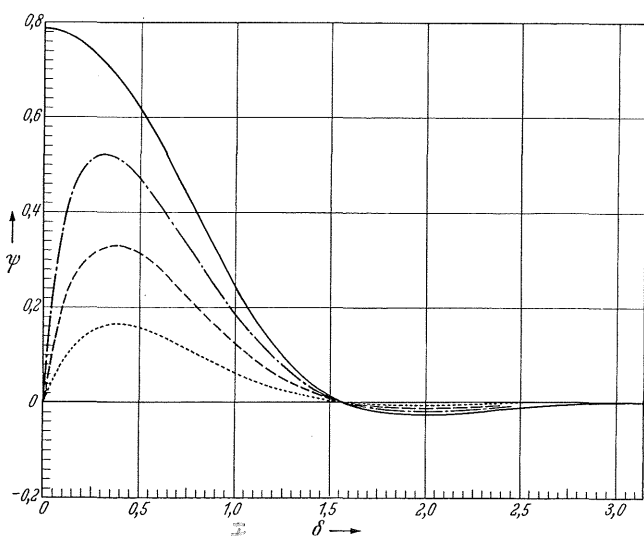


Abb. 3b. Werte von $\frac{1}{2} \psi$ aus Gleichung (4b) für $r = 0$ (—); $\pm 0,25$ (.....); $\pm 0,50$ (— — —); $\pm 0,75$ (— · —) und $\pm 1,00$ (— — —).

„Bolster“. Für andere Moorböden sind die Resultate analog. Die Wärmeleitfähigkeit eines Quarzsandes wurde früher ausführlich gemessen (de Vries¹²), die spezifische Wärme des

Sandes und die thermischen Eigenschaften des Bolsters sind oben gegeben. Die hier verwendeten physikalischen Eigenschaften dieser Böden sind in der Tabelle 3 zusammengefaßt. Die Angaben unter f beziehen sich dabei auf Feldkapazität, unter t auf trocknen Boden.

Weil wir den feuchten Sand als Standardboden wählten, ist aus der Gleichung (4a) und der Abb. 3 ersichtlich, daß, falls die Sanddecke auf Feldkapazität ist, der Wert von N sehr nahe 1 liegt, für $\delta = 0,7$ und für $\delta = \pi/4 = 0,785$ exakt 1 wird, unabhängig von den thermischen Eigenschaften des unterliegenden Moorbodens. Für den hier betrachteten Sand folgt hieraus, daß schon bei einer Dicke der Decke von etwa 13 cm der geschichtete Boden fast denselben Nachtfrostfaktor hat wie ein Sandboden. Weil die Werte von D_1 für verschiedene Sandböden keine große Streuung aufweisen, ist die empirisch gefundene Dicke von 10—15 cm hiermit theoretisch erklärt.

Ist der Bolster z. B. ebenfalls auf Feldkapazität, dann ist $r = 0,364$ und $N = 2,14$ für $\delta = 0$, d. h. für einen Bolster ohne Sanddecke.

Wenn die obere Bodenschicht austrocknet, ist die günstige Wirkung einer Sanddecke noch deutlicher. In der Zeit der gefährlichen Nachtfroste, also im Frühling dringt die Austrocknung unter westeuropäischen meteorologischen Verhältnissen nur einige Zentimeter vor¹. Woodruff¹⁴ hat angegeben, wie man das Fortschreiten einer Trockenfront im Boden angenähert berechnen kann. Nach dieser Berechnungsweise fanden wir für Sand und für Bolster eine Tiefe des Austrocknens von 3,1 bzw. 2,4 cm.

Man kann jetzt den Wert von N für einen ausgetrockneten Boden mit Hilfe der Gleichungen (3) und (4a) berechnen, wobei angenommen wird, daß der Boden unterhalb der Trockenfront bis großer Tiefe auf Feldkapazität ist. Für den Sand berechneten wir $N = 2,8$, für den Bolster $N = 12$. Ist der Bolster aber bedeckt mit einer Sanddecke von beispielsweise 7,3 bzw. 14,6 cm Dicke, so berechnet man nach der Theorie von 3 Schichten, falls die Tiefe des Austrocknens im Sande wieder 3,1 cm ist, $N = 2,9$ bzw. $N = 2,7$; also fast denselben Wert wie beim reinen Sandboden.

In Holland wird manchmal die Sanddecke mit den oberen Moorlagen durch Graben oder Pflügen vermischt. Weil hierdurch die Wärmeleitfähigkeit der oberen Schicht herabgesetzt wird, steigt die Nachtfrostgefahr wieder, insbesondere, wenn die oberen Zentimeter trocken sind. Dies sei durch die nachfolgenden Beispiele illustriert.

Zuerst betrachten wir eine Sanddecke von 7,3 cm Dicke, welche nachher mit den oberen 7,3 cm des Bolsters gemischt wird, so daß eine gemischte Schicht von 14,6 cm Tiefe entsteht. Ist diese Schicht ebenfalls auf Feldkapazität, dann berechnen wir die folgenden Werte der thermischen und sonstigen Eigenschaften dieser Schicht: Volumenanteil der Bodenbestandteile, $x_f = 0,337 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; Volumenanteil des Wassers $x_w = 0,303$; $\lambda_1 = 2,12 \times 10^{-3} \text{ cal/cm sec } ^\circ\text{C}$ (nach der oben genannten Theorie); $C_1 = 0,469 \text{ cal/cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$; $D_1 = 11,1 \text{ cm}$; Nachtfrostfaktor der oberen Schicht, $N_1 = 1,32$; Nachtfrostfaktor des geschichteten Bodens, $N = 1,28$, in Vergleich zu $N = 1,26$ vor der Mischung.

Hier ist also der Einfluß der Mischung auf die Nachtfrostgefahr zu vernachlässigen. Bildet sich aber auf dem gemischten Boden eine trockene Schicht (deren Tiefe nach Woodruff auf 2,6 cm berechnet wurde), so ist für den trockenen Boden: $\lambda_1 = 0,25 \times 10^{-3} \text{ cal/cm sec } ^\circ\text{C}$; $C_1 = 0,166 \text{ cal/cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$; $D_1 = 6,4 \text{ cm}$ und $N_1 = 6,5$.

Für den geschichteten Boden wird N jetzt zu 4,3 berechnet in Vergleich zu $N = 2,8$ falls nicht gemischt wurde.

¹ Hierbei wird gedacht an eine Austrocknung bis zur Lufttrockenheit durch Dampfdiffusion. Es wird angenommen, daß die tieferen Bodenschichten auf Feldkapazität bleiben, da die Pflanzen in dieser Zeit meistens noch klein sind.

Tabelle 3. Physikalische Eigenschaften des Sandes und des Bolsters*.

Boden	x_f	x_w	C		$10^3 \lambda$		$10^2 (\lambda C)^{\frac{1}{2}}$		D		N	
			t	f	t	f	t	f	t	f	t	f
Sand . . .	0,573	0,105	0,27	0,38	0,60	4,6	1,04	4,18	7,8	18,2	4,0	1,0
Bolster . . .	0,100	0,500	0,061	0,56	0,081	0,68	0,22	1,95	6,0	5,8	19,0	2,1

x_f = Volumenanteil der Bodensubstanz, x_w = Volumenanteil des Wassers bei Feldkapazität. λ in $\text{cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$, C in $\text{cal/cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$, D in cm.

* Aus den Temperaturmessungen von W. Kreuz, Journal für Landwirtschaft 89, 92 (1943), berechneten wir einen Wert von ungefähr 7 cm für die Dämpfungstiefe von unbearbeitetem Moor in 5 bis 10 cm Tiefe, was in guter Übereinstimmung ist mit dem hier berechneten Wert von ungefähr 6 cm.

Zuletzt behandeln wir den Fall, daß eine Sanddecke von 14,6 cm mit 5,4 cm Bolster gemischt wird zu einer Schicht von 20 cm Dicke. Ist diese Schicht auf Feldkapazität so ist: $x_f = 0,445$; $x_w = 0,212$; $\lambda_1 = 2,96 \times 10^{-3}$ cal/cm sec °C; $C_1 = 0,427$ cal/cm³ °C; $D_1 = 13,8$ cm; $N_1 = 1,17$ und $N = 1,13$ im Vergleich zu $N = 1,00$ ohne Mischung.

Entsteht eine trockene Oberschicht von 2,6 cm Tiefe, so ist: $\lambda_1 = 0,33 \times 10^{-3}$ cal/cm sec °C; $C_1 = 0,215$ cal/cm³ °C; $D_1 = 6,5$ cm; $N_1 = 5,0$; $N = 3,4$ in Vergleich zu $N = 2,8$ ohne Mischung.

Zusammenfassend kann man daher sagen, daß eine Sanddecke von 10—13 cm unter allen Umständen die Nachtfrostempfindlichkeit eines Moorbodens auf die Nachtfrostempfindlichkeit eines Sandbodens herabsetzt. Durch eine Mischung des Sandes mit den oberen Moorlagen nimmt die Nachtfrostgefahr wieder zu und zwar erheblich in einer Trockenperiode. Sie bleibt aber noch weit hinter der Nachtfrostgefahr des unbedeckten Moorbodens zurück.

Wir sind Herrn Prof. Dr. *E. F. M. van der Held* zu Dank verpflichtet für seine Anweisungen bei der Bestimmung der spezifischen Wärme; den Herren Ir. *J. Bennema* und Ir. *B. van Heweln* für Übermittlung der Bodenmuster und weiland Herrn Dr. *S. B. Hooghoudt* für seine Vermittlung bei der Bestimmung der Analysen und *pF*-Kurven.

Literatur.

- ¹ *Bracht, J.*: Über die Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens und des Schnees und den Wärmeumsatz im Erdboden. Veröff. Geophys. Inst. Univ. Leipzig, 2. Ser. 14, Heft 3 (1949). —
- ² *Frank, P., u. R. von Mises*: Die Differential- und Integralgleichungen der Mechanik und Physik, 2. Aufl. New York, II, 572 (1943). —
- ³ *Kersten, M. S.*: Thermal properties of soils, Bull. Univ. Minnesota Inst. of Techn. Eng. Exp. Stat. Bull. 28 (1949). —
- ⁴ *Krischer, O., u. H. Rohmalter*: Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern, V.D.I. Forschungsheft 402 (1940). —
- ⁵ *Lang, C.*: Über die Wärmekapazität der Bodenkonstituenten, Forsch. Geb. Agr.-Phys. 1, 109 (1878). —
- ⁶ *Patten, H. E.*: Heat transfer in soils, Bur. of soils Bull. 59 (1909). —
- ⁷ *Peerlkamp, P. K.*: Bodemeteorologische onderzoekingen te Wageningen, Mededelingen Landbouwhogeschool 47, Verh. 3, 1 (1944). —
- ⁸ *Smith, W. O., and H. G. Byers*: The thermal conductivity of dry soils of certain of the great soils groups, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 3, 13 (1938). —
- ⁹ *Tacke, B.*: Die naturwissenschaftlichen Grundlagen der Moorkultur (1929). —
- ¹⁰ *Ulrich, R.*: Untersuchungen über die Wärmekapazität der Bodenkonstituenten, Forsch. Geb. Agr.-Phys. 17, 1 (1894). —
- ¹¹ *Vries, D. A. de*: A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ, Soil Sci. 73, 83 (1952). —
- ¹² *Het warmtegeleidingsvermogen van grond*, Mededelingen Landbouwhogeschool 52, Verh. 1, 1 (1952). —
- ¹³ *Some remarks on gaseous diffusion in soils*, Trans. 4th Int. Congr. of Soil Science II, 41 (1950). —
- ¹⁴ *Woodruff, C. M.*: The movement and evaporation of soil water in relation to *pF*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 6, 120 (1941).

