

**Deutsches Reich**  
**Reichsamt für Wetterdienst (Luftwaffe)**

---

**Wissenschaftliche Abhandlungen**  
**Band IX**

**Nr. 2**

**Das Eindringen des Frostes in Böden**  
**unter gleichen und verschiedenen Witterungsbedingungen**  
**während des sehr kalten Winters 1939/40**

von

**Wilhelm Kreutz**

**Deutsches Reich**  
**Reichsamt für Wetterdienst (Luftwaffe)**

---

**Wissenschaftliche Abhandlungen**  
**Band IX**

**Nr. 2**

**Das Eindringen des Frostes in Böden**  
**unter gleichen und verschiedenen Witterungsbedingungen**  
**während des sehr kalten Winters 1939/40**

von

**Wilhelm Kreutz**

---

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-01942-9 ISBN 978-3-662-02237-5 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-02237-5

## Inhaltsübersicht.

	Seite
A. Problemstellung und Durchführung der Messungen . . . . .	3
B. Auswertung der Ergebnisse . . . . .	7
1. Verlauf der Temperatur in verschiedenen Böden und Tiefen . . . . .	7
2. Eindringen des Frostes . . . . .	11
a) Zeitlicher Eintritt . . . . .	11
b) Tiefe des Frostes . . . . .	11
c) Geschwindigkeit des Frostes . . . . .	14
d) Frostreste . . . . .	14
e) Frostempfindlichkeit . . . . .	16
3. Inversionen im Boden . . . . .	16
4. Theoretische Betrachtung . . . . .	17
5. Temperatur an der Oberfläche . . . . .	18
C. Vergleich mit Außenstationen . . . . .	19
D. Zusammenfassung . . . . .	22

## A. Problemstellung und Durchführung der Messungen.

Die Erkenntnis, daß zur Untersuchung des Boden- und bodennahen Klimas dem Studium des Temperaturverlaufes im Boden eine ebenso große Beachtung geschenkt werden muß wie dem in der Luft, und überdies die zwingende Notwendigkeit, solche Beobachtungen für die verschiedensten Zweige der Wirtschaft vorzunehmen, gaben Veranlassung, die Temperaturuntersuchungen im Boden während des kalten Winters 1939/40 als Sonderfall auszuwerten. Nach Beobachtungen in Gießen hat dieser Winter den strengen Vorgänger im Jahre 1928/29 noch übertroffen. Somit dürfte er der kälteste Winter seit 1830 gewesen sein. Zum Vergleich der beiden Winter seien nachstehend die Durchschnittstemperaturen angeführt:

Gießen		
	1928/29	1939/40
Dezember . . . . .	0,4	—0,9
Januar . . . . .	—3,9	—9,6
Februar . . . . .	—9,2	—2,8
Mittel:	—4,2	—4,4

Der verflossene Winter erscheint demnach für die Beantwortung unserer Fragestellung besonders günstig. Alle den Bodenfrost betreffenden Fragen interessieren nicht nur den Meteorologen, der sich mit Austauschvorgängen im Boden befaßt, und den Bodenkundler, der die Eigenschaften des Bodens erforscht, sondern auch den Landwirt und Gärtner, der solche Temperaturbeobachtungen zur Bodenbearbeitung und Aussaat, zum Abdecken von Mieten usw. benötigt, und das Baugewerbe, das bei Tiefbauten sowie beim Straßenbau darauf Rücksicht nehmen muß. Sie alle aber beanspruchen nicht nur die Temperaturen aus einem, sondern aus verschiedenen Böden.

Eine der wichtigsten Fragen ist deshalb zweifellos die Gewinnung von Beobachtungsmaterial aus mehreren Bodenarten unter gleichen Außenbedingungen. Die Schwierigkeit besteht nun darin, daß in der Natur verschiedene Böden nicht so benachbart anzutreffen sind, daß sie praktisch unter gleichem Witterungseinfluß stehen. Diese Tatsache zwang, eine geeignete Versuchsanlage zu schaffen, die hierfür die notwendigen Voraussetzungen lieferte. In freier Lage, 187 m über NN, wurde im Zusammenhang mit dem Neubau der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle Gießen Ende des Jahres 1938 eine Lysimeteranlage<sup>1)</sup> zum Studium des Bodenklimas geschaffen. Neben anderen Forschungsarbeiten wird an ihr auch die Klimakomponente Temperatur untersucht. Die Anlage ermöglicht durch ihre 2 × 2 m großen und 1,75 m tiefen Bottiche je 7 cbm Boden zu fassen. Im ganzen sind fünf solcher Behälter in die Erde eingebaut, die mit folgendem Bodenmaterial gefüllt sind: Sand, Lehm und Humus, außerdem einem normalen lehmigen Sandboden und endlich mit feinstem Basaltgrus (Korndurchmesser 1—3 mm), um Material zu besitzen, das den Übergang vom Gestein zum grobkörnigen Boden darstellen soll. Mit Hilfe dieser Anlage konnte also der Einfluß gleicher Witterungsfaktoren auf verschiedene Böden, die ähnlichen Voraussetzungen unterliegen, untersucht und der Temperaturverlauf in ihnen beobachtet werden. Da es gelang, die Böden fast im Naturprofil in die Lysimeter einzusetzen, ist eine Annäherung an die natürlichen Verhältnisse gewährleistet, wenn auch gewisse Ablagerungserscheinungen und Veränderungen beim organischen Boden sich erst im Laufe der Jahre auswirken.

Bei der Messung der Bodentemperatur wollten wir ursprünglich so verfahren, daß ein Teil des Bodens schneefrei und der andere bedeckt blieb. Ohne Zweifel wäre diese Untersuchung sehr wertvoll gewesen, und die Berechnung des Frosteintrittes im schneefrei gehaltenen Boden dürfte alsdann ein einfacheres physikalisches Problem darstellen als umgekehrt. Andererseits hätte die in diesem Winter besonders lang anhaltende, in ihrer Höhe wechselnde Schneedecke durch Vergleich mit schneefreiem Boden Schlüsse über das Maß des Wärmeleitungsvermögens gegeben. Man hätte aber dann die Oberflächen auf die Hälfte (2 × 1 m) verkleinern müssen, wodurch eine Verwischung der Unterschiede nicht ausgeblieben wäre. Da außerdem

<sup>1)</sup> W. Kreutz, Spezialinstrumente und Einrichtungen der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle des Reichsamts für Wetterdienst in Gießen und deren Verwendungszweck. Biokl. Beibl. 1939, S. 76.

in erster Linie praktische Fragen interessieren, mußten die natürlichen Verhältnisse möglichst gewahrt werden. Aus demselben Grunde wurden eingehendere Versuche über den Einfluß der Schneedecke auf den Temperaturgang nicht vorgenommen, weil das Ausstechen der Schneeproben die Beseitigung des Schnees über den Versuchsböden und somit eine Störung des Temperaturverlaufs zur Folge gehabt hätte. Schließlich ergaben sich Schwierigkeiten dadurch, daß die Lysimeteranlage auch der Erforschung des Wasserhaushalts dienen soll. Allerdings lassen sich bis jetzt an ihr nur Sickerwassermengen, aber nicht Feuchtigkeitsgrade in den einzelnen Tiefen ermitteln. Hierfür mangelt es zur Zeit noch an einem geeigneten Feuchtigkeitsmesser. Allein aus diesem Grunde mußte auch die äußerst wichtige Fragestellung nach dem Zusammenhang zwischen Feuchtigkeit und Temperatur vernachlässigt werden.

Die Oberfläche sämtlicher Böden war ohne Vegetation. Jegliche Bodenbearbeitungsmaßnahmen, wie Umgraben, Hacken, Tiefenlockerung usw. unterblieben, so daß die Oberflächenstruktur seit der Inangsetzung der Versuchsanlage immer die gleiche war. Hierdurch sind zunächst Studien im nackten und unbearbeiteten Boden möglich. Da Temperaturforschungen im bearbeiteten und bewachsenen Boden von ebenso großer Notwendigkeit sind, ist dieser Arbeitsgang in Aussicht genommen. Solche Messungen wurden früher schon einmal im Garten des Landwirtschaftlichen Instituts der Universität Gießen im vegetationsfreien und mit dichtem Gras bedeckten sandigen Lehmboden begonnen und ergaben in 20 cm Tiefe folgende Monatsmittel:

Tabelle 1. Bodentemperaturmittel in C°.

Bodenart u. -zustand	Bodentiefe	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
A. Sandiger Lehm, vegetationsfrei . . . . .	20 cm	10,3	13,0	14,4	14,9	7,9	4,9	2,4
B. Sandiger Lehm mit Vegetation (Gras) .	20 cm	7,5	10,1	12,0	12,7	5,2	6,1	5,9
A—B . . . . .		2,8	2,9	2,4	2,2	2,7	—1,2	—3,5

Offensichtlich werden schon an dieser Beobachtungsreihe die Unterschiede im Verlauf der Bodentemperatur nachgewiesen. Der vegetationsfreie Boden ist im Sommer wärmer und im Winter kälter als der mit Vegetation bedeckte. Außerdem deuten die Differenzen darauf hin, daß die Erwärmung wiederum geringer (nackter Boden August 2,4°, September 2,2° wärmer) und die Abkühlung größer ist (Dezember —3,5°).

Zur Betrachtung der näheren Einzelheiten, unter denen der Temperaturverlauf im Boden stattfindet, sind einige Hinweise über die physikalischen Beschaffenheiten der Versuchsböden unumgänglich.

Die hauptsächlichsten Bodenbestandteile nach der mechanisch-chemischen Bodenanalyse sind Sand, Lehm und Humus. Der Gehalt der Böden an diesen Bestandteilen ist von Ausschlag für die jeweils charakteristische physikalische Beschaffenheit und Eigenschaft der Böden.

Der Sand setzt sich aus den größten Bestandteilen (81,2% Feinsand, 16,2% Grobsand) zusammen, er vermag deshalb das Wasser kaum zurückzuhalten, so daß dieses schnell nach der Tiefe sickert, ein Vorgang, der für die Erwärmung des Bodens von wesentlichem Einfluß ist.

Der Lehm hingegen hat die feinsten Bodenbestandteile und somit auch die größte Bodenoberfläche. Infolge seiner dichten Lagerung dringt das Wasser kaum oder nur sehr langsam in ihn ein. Das aufgenommene Wasser hält er fest, so daß der Lehm im Gegensatz zum trockenen Sand über eine große Wärmekapazität verfügt, wodurch nur eine langsame Erwärmung möglich ist.

Schließlich hat der Humus noch eine größere Gesamtoberfläche als der Lehm, die jedoch nicht wie beim Lehm nach außen, sondern nach innen gerichtet ist. Durch diese große innere Oberflächenentwicklung ist der Humus imstande, sehr viel Wasser festzuhalten. Darüber hinaus kann aber in ihm auf Grund der relativ geringen äußeren Bodenoberfläche — was eine gröbere Struktur der einzelnen festen Teilchen zur Folge hat — auch das Wasser durch die sich bildenden weiteren Kapillaren gut weitergeleitet werden, so daß andererseits keine Stauungen möglich sind, wenn für geeigneten Abfluß gesorgt wird.

Für die Austauschvorgänge (Wärmeaufnahme und -abgabe) ist die physikalische Beschaffenheit des Bodens maßgebend. Art und Zustand der Bearbeitung der Bodenoberfläche, sowie ihre Neigung und Größe, ferner die Farbe des Bodens haben hierbei Einfluß. Überdies ist der Gang der Bodentemperatur im wesentlichen von den spezifischen Eigenschaften der Bodenarten, also von Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmeemission abhängig. Hinzu kommt noch die Bodenfeuchtigkeit als ausschlaggebender Faktor. Namentlich bei der Untersuchung der Wärmekapazität des Erdbodens ist zu beachten, daß diese Größe an den Wassergehalt gebunden ist. Bei Verdunstung des Wassers aus dem Boden geht bekanntlich Wärme verloren. Der Wärmeverbrauch ist um so größer, je höher der Wassergehalt des Bodens, besonders in den obersten Schichten, ist.

Zur Untersuchung der vorliegenden Fragestellung interessiert ausschließlich die Wärmeemission. Sie erfolgt, sobald die Bodentemperatur höher ist als die Lufttemperatur.

Die Temperaturmessungen in den Böden der Lysimeteranlage, deren Ergebnisse auf beifolgenden Seiten zusammengestellt sind, wurden mit den Fueßschen Fernthermographen ausgeführt, deren Meßkörper in 10, 20, 50 und 100 cm Tiefe lagen. Außerdem standen Ergebnisse von Terminbeobachtungen mit Quecksilber-Bodenthermometern aus 5, 10 und 20 cm Tiefe zur Verfügung, so daß gleichzeitig laufend mit den Beobachtungen auch eine Kontrolle der selbstschreibenden Instrumente in 10 und 20 cm Tiefe möglich war. Die Temperaturbeobachtungen an der Oberfläche konnten anfänglich aus versuchstechnischen Gründen nicht über sämtlichen Böden vorgenommen werden, man mußte sich auf Feststellungen des unmittelbar an die Lysimeteranlage angrenzenden Bodens beschränken. Erst im Februar ließen sich Messungen an der Oberfläche der einzelnen Böden ermöglichen, die auch im Rahmen dieser Arbeit mit ausgewertet wurden. Für letztere Beobachtungen wurden Normal- und Minimumthermometer verwendet, während wir für die laufenden neben der Lysimeteranlage nur Minimumthermometer einsetzten.

Die Werte der Lufttemperatur ergaben sich aus dem Thermographen an der Versuchsanlage. Mit Ausnahme des Kurvenverlaufs an der Oberfläche, der nur Extremwerte versinnbildlicht, zeigen alle übrigen Kurven den Temperaturgang nach den selbstschreibenden Instrumenten an.

Um darüber hinaus von anderen Stellen außerhalb der Versuchsanlage, also unter normalen Bedingungen, das Eindringen des Frostes nach der Tiefe studieren zu können, bezog die Forschungsstelle die Bodentemperaturbeobachtungen von der Station höherer Ordnung Gießen, Liebigshöhe, und von ihren

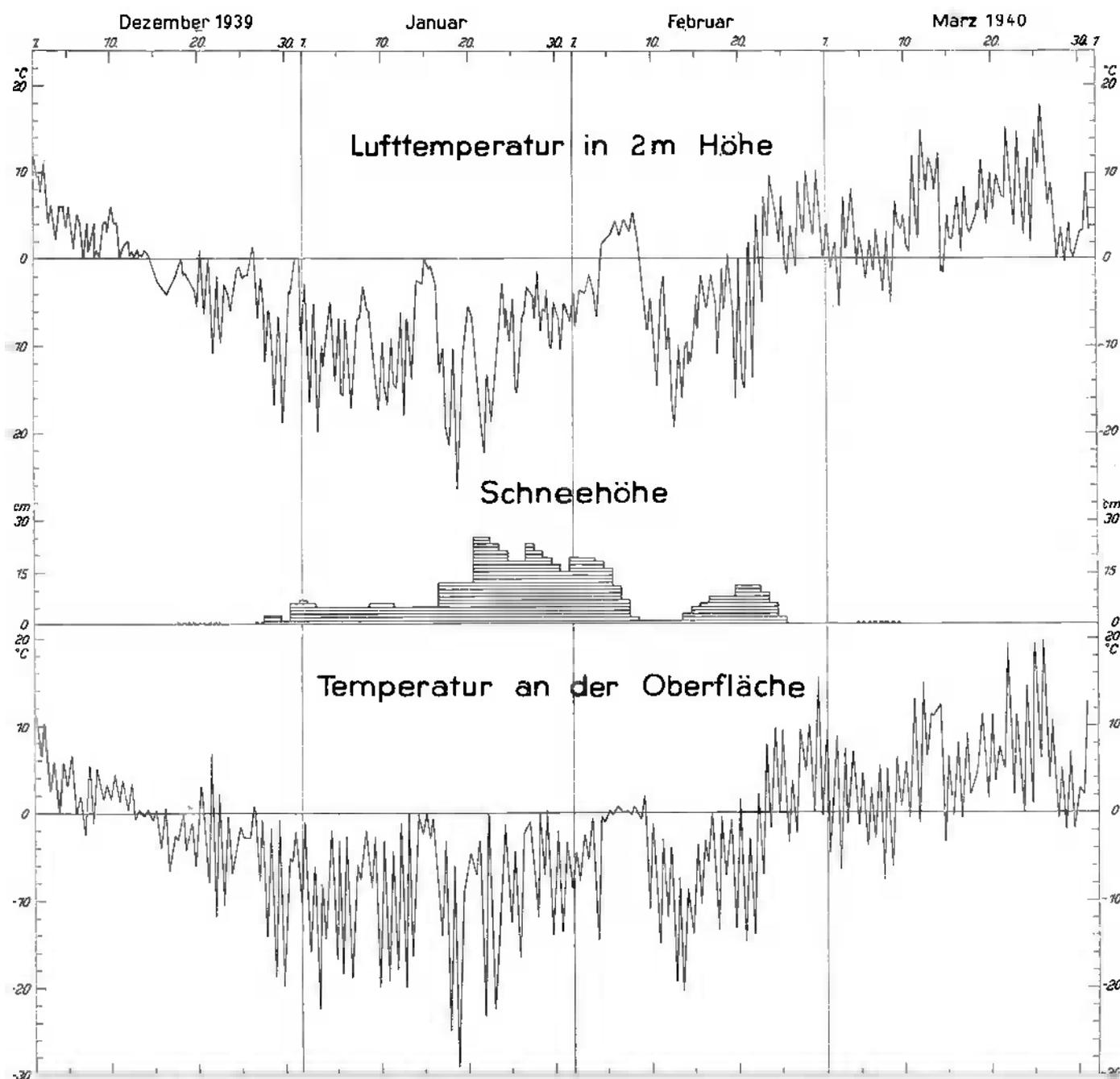


Abb. 1. Lufttemperatur und Temperatur an der Erdoberfläche.

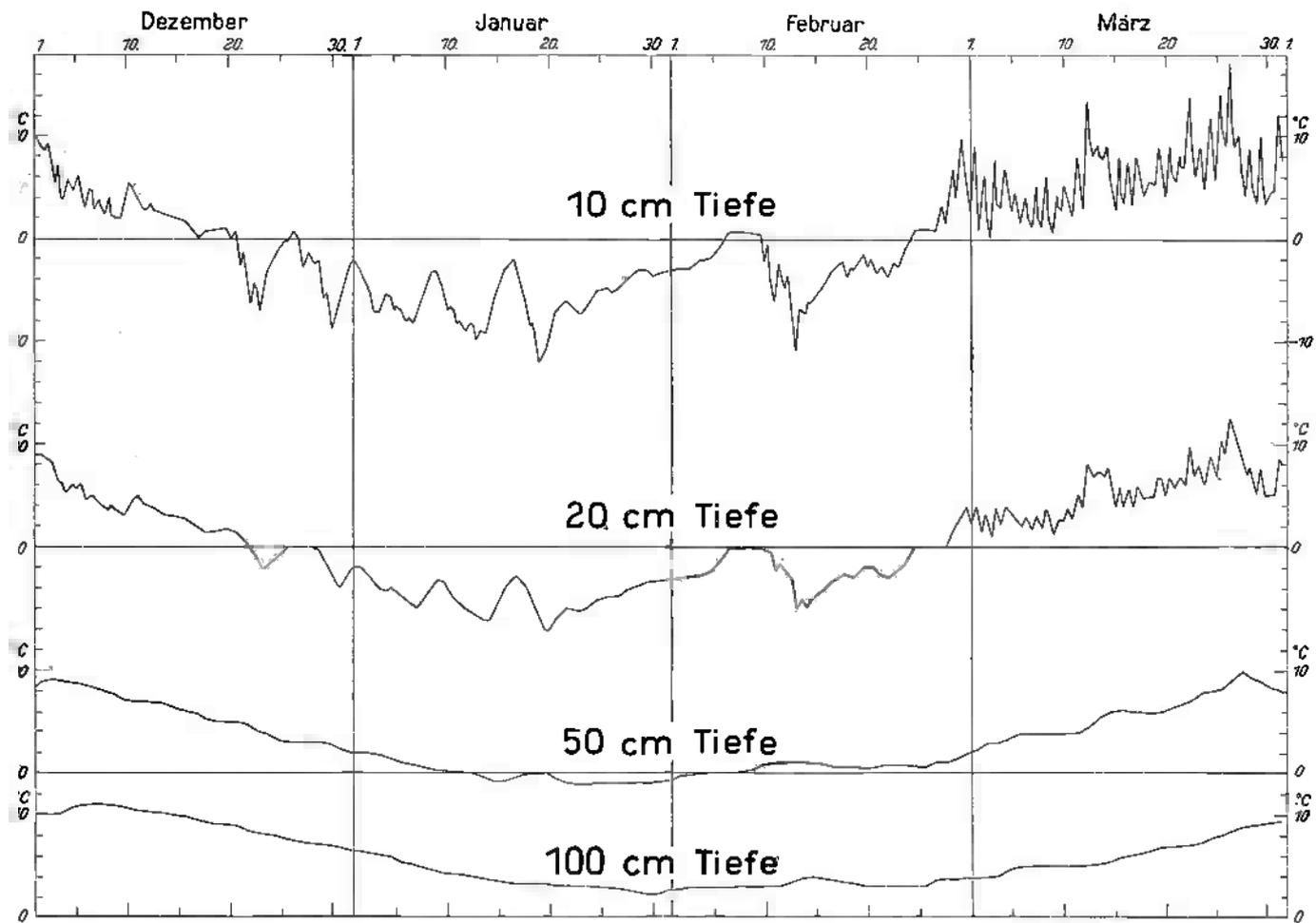


Abb. 1a. Temperaturverlauf in Basaltgrus.

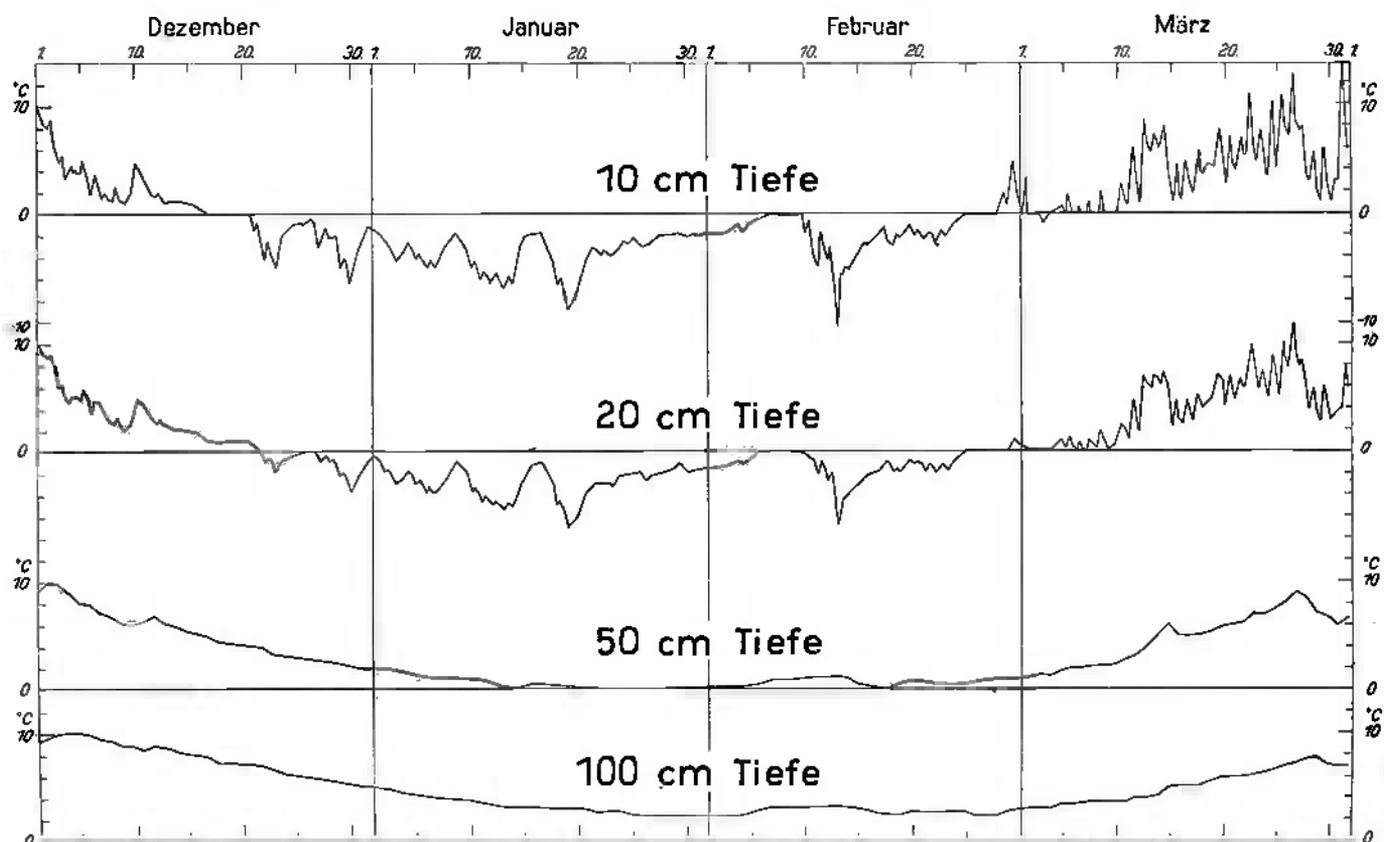


Abb. 1b. Temperaturverlauf in Sand.

fünf agrarmeteorologischen Beobachtungsstationen im Ried, die sich südlich von Darmstadt netzartig über das Meliorationsgelände verteilen, mit hinein. Von ihnen lagen Beobachtungen zu den drei Terminen aus 5, 10, 20, 50 und 100 cm Tiefe mit Quecksilberthermometern vor.

## B. Auswertung der Ergebnisse.

### 1. Verlauf der Temperatur in verschiedenen Böden und Tiefen.

Zur Ableitung des täglichen Ganges der Temperatur und zur Betrachtung des Verlaufs des Temperaturwechsels im Boden und in mehreren Tiefen von der Oberfläche werden zunächst die jeweiligen Kurvenbilder gebracht, weil sie die Unterschiede zwischen den einzelnen Böden in Abhängigkeit von der gleichen Wetterlage am deutlichsten veranschaulichen. Die Beobachtungen erstreckten sich über die Zeit vom

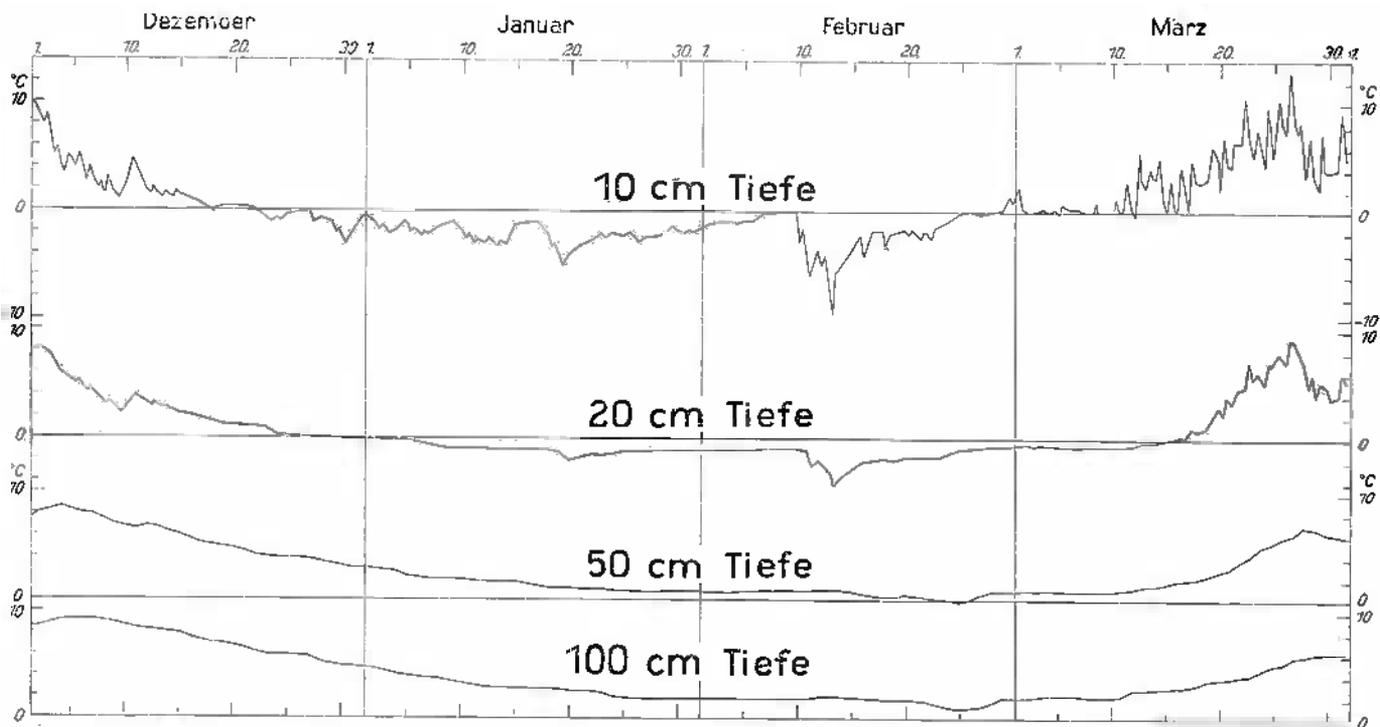


Abb. 1c. Temperaturverlauf in Lehm.

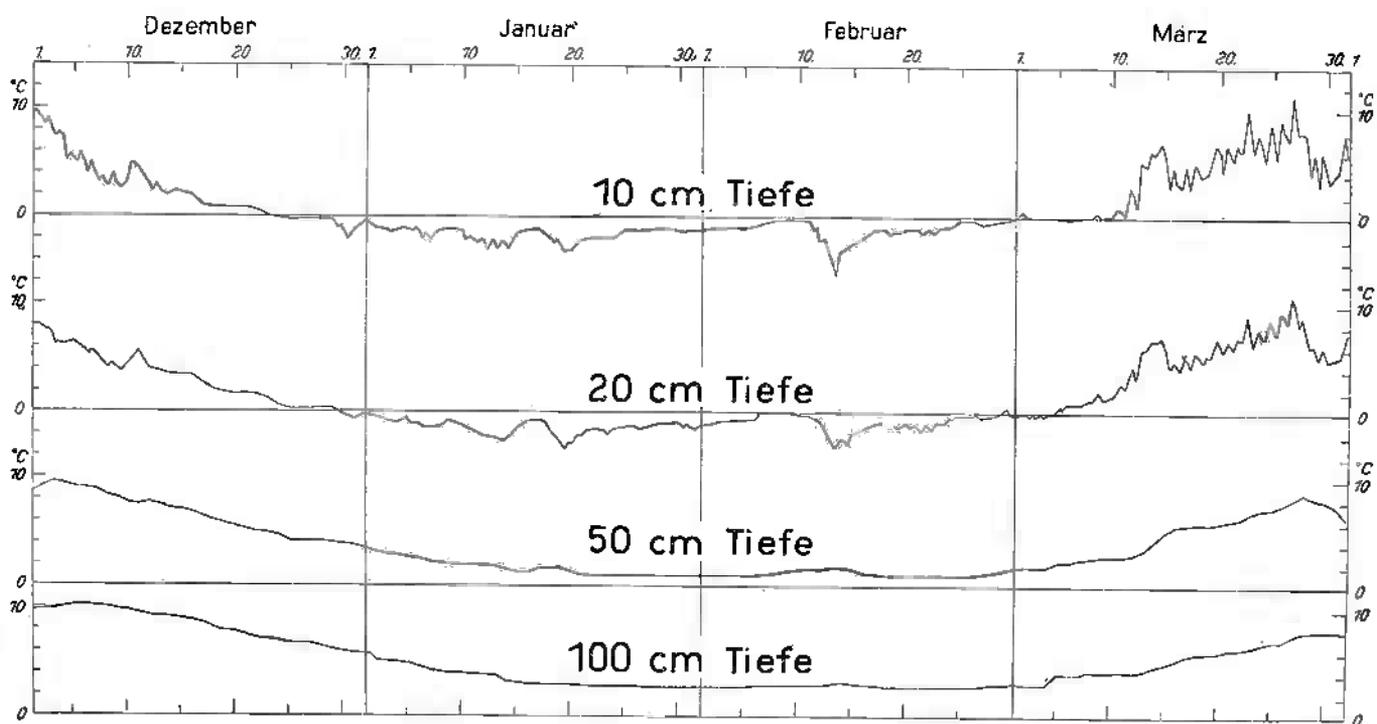


Abb. 1d. Temperaturverlauf im lehmigen Sand.



**Luft- und Bodentemperaturen.**  
Tages- und Monatsmittel.

Monat	Luft	B ö d e n																				
		Humus				Lehm				Lehmiger Sand				Sand				Basaltgrus				
		10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	
Jan. 1940																						
1.	- 8,0	0,6	1,2	3,0	6,7	-0,7	-0,2	3,0	4,8	-0,7	-0,3	3,2	5,4	-1,5	-0,7	1,9	4,8	- 2,4	-2,0	2,0	6,4	
2.	-14,8	0,4	1,1	3,0	6,6	-1,5	-0,2	2,8	4,6	-1,0	-0,5	3,0	5,1	-2,6	-1,7	1,8	4,7	- 4,1	-2,5	2,0	6,2	
3.	-14,4	0,2	1,0	3,0	6,5	-1,9	-0,2	2,8	4,3	-1,2	-0,7	2,9	5,0	-3,9	-2,6	1,7	4,5	- 6,5	-3,6	1,8	6,0	
4.	- 9,0	0,2	1,0	2,9	6,3	-1,3	-0,2	2,5	4,2	-1,0	-0,6	2,8	5,0	-3,2	-2,2	1,4	4,2	- 5,8	-4,2	1,5	5,8	
5.	-12,8	0,1	1,0	2,8	6,2	-1,8	-0,3	2,2	4,0	-1,1	-0,8	2,7	4,8	-3,9	-2,7	1,2	4,0	- 6,5	-4,4	1,2	5,5	
6.	-13,9	0,0	0,9	2,6	6,0	-2,1	-0,5	2,1	4,0	-1,7	-1,2	2,4	4,4	-4,6	-3,4	1,0	3,9	- 7,7	-5,2	0,9	5,2	
7.	- 7,6	0,0	0,8	2,6	6,0	-1,8	-0,7	2,0	3,9	-1,6	-1,2	2,2	4,2	-4,1	-3,3	1,0	3,8	- 7,3	-5,7	0,6	4,9	
8.	- 3,5	0,0	0,8	2,4	5,8	-1,3	-0,9	2,0	3,7	-1,0	-0,9	2,1	4,0	-2,5	-1,8	1,0	3,8	- 4,6	-4,6	0,4	4,7	
9.	- 9,5	0,0	0,8	2,2	5,7	-1,4	-0,9	2,0	3,5	-1,1	-0,7	2,0	4,0	-2,5	-1,5	1,0	3,7	- 3,7	-3,5	0,2	4,4	
10.	-12,2	0,0	0,7	2,0	5,5	-2,3	-0,9	1,9	3,3	-1,8	-1,3	2,0	4,0	-4,4	-3,2	0,9	3,6	- 6,3	-4,2	0,1	4,2	
11.	-12,2	-0,1	0,4	2,0	5,3	-2,7	-0,9	1,8	3,2	-2,1	-1,8	2,0	3,8	-5,6	-4,4	0,7	3,4	- 7,8	-5,5	0,0	4,0	
12.	- 9,6	-0,2	0,1	2,0	5,2	-2,8	-1,0	1,8	3,0	-2,3	-2,2	2,0	3,8	-6,0	-4,7	0,4	3,2	- 8,5	-6,4	0,0	3,9	
13.	-11,3	-0,3	0,1	2,0	5,1	-3,0	-1,0	1,7	3,0	-2,5	-2,5	1,9	3,7	-6,3	-5,1	0,2	3,0	- 9,2	-7,0	-0,3	3,7	
14.	- 3,0	-0,2	0,1	2,0	5,0	-2,2	-1,0	1,7	3,0	-2,3	-1,9	1,6	3,2	-5,1	-4,2	0,1	3,0	- 7,9	-7,0	-0,7	3,5	
15.	- 0,5	-0,2	0,1	2,0	5,0	-2,1	-1,0	1,6	3,0	-1,2	-1,0	1,4	3,2	-2,4	-2,2	0,3	3,0	- 4,4	-5,2	-0,8	3,4	
16.	- 3,0	-0,4	0,1	1,6	4,9	-1,0	-1,0	1,5	2,9	-1,0	-0,7	1,6	3,1	-1,8	-1,2	0,4	3,0	- 2,5	-3,5	-0,6	3,2	
17.	-14,0	-0,4	0,1	1,6	4,8	-1,6	-1,0	1,3	2,8	-1,4	-0,8	1,6	3,1	-3,1	-2,2	0,4	2,9	- 4,0	-3,3	-0,3	3,2	
18.	-18,6	-0,6	0,0	1,6	4,8	-2,9	-1,1	1,2	2,8	-2,1	-2,0	1,7	3,1	-6,0	-4,4	0,2	2,8	- 7,6	-5,0	-0,2	3,2	
19.	-16,1	-0,8	0,0	1,5	4,6	-4,5	-1,7	1,2	2,8	-2,9	-2,9	1,5	3,0	-8,2	-6,5	0,0	2,8	-10,9	-7,0	-0,2	3,1	
20.	- 7,0	-0,8	0,0	1,3	4,4	-3,6	-1,8	1,2	2,7	-2,5	-2,4	1,3	3,0	-6,3	-5,2	-0,1	2,8	- 9,0	-7,8	-0,4	3,0	
21.	-13,2	-0,8	0,0	1,2	4,2	-3,0	-1,6	1,1	2,7	-1,9	-1,7	1,2	3,0	-3,8	-3,5	0,0	2,6	- 6,6	-6,5	-0,8	3,0	
22.	-17,8	-0,8	0,0	1,2	4,2	-2,4	-1,5	1,1	2,5	-1,8	-1,5	1,1	2,9	-3,6	-3,0	0,0	2,5	- 6,5	-6,1	-1,1	3,0	
23.	-12,0	-0,8	-0,1	1,2	4,2	-2,2	-1,4	1,0	2,3	-1,8	-1,7	1,1	2,9	-3,7	-2,8	-0,1	2,5	- 7,1	-6,2	-1,2	3,0	
24.	- 6,8	-0,8	-0,1	1,1	4,1	-2,1	-1,3	1,0	2,2	-1,4	-1,4	1,1	2,9	-2,9	-2,2	-0,1	2,4	- 5,9	-5,6	-1,0	2,9	
25.	- 9,2	-0,8	-0,1	1,1	4,0	-2,1	-1,2	1,0	2,2	-1,0	-1,2	1,1	2,9	-2,6	-2,0	0,0	2,3	- 4,9	-5,0	-1,0	2,8	
26.	- 8,4	-0,8	-0,1	1,1	4,0	-2,6	-1,2	0,9	2,0	-1,0	-1,2	1,1	2,8	-3,0	-2,4	0,0	2,2	- 5,0	-5,0	-1,0	2,7	
27.	- 4,2	-0,6	-0,1	1,1	4,0	-2,4	-1,2	0,8	2,0	-1,0	-1,1	1,1	2,8	-2,4	-2,2	0,0	2,2	- 4,4	-4,5	-1,0	2,6	
28.	- 5,3	-0,3	0,0	1,1	4,0	-2,2	-1,1	0,8	2,0	-1,0	-0,9	1,1	2,8	-2,0	-1,9	0,0	2,2	- 3,6	-4,0	-1,0	2,4	
29.	- 7,0	-0,4	0,0	1,0	4,0	-1,7	-1,1	0,9	2,0	-1,0	-0,8	1,1	2,8	-2,0	-1,7	0,1	2,2	- 3,1	-3,6	-1,0	2,2	
30.	- 7,0	-0,6	0,0	1,0	3,9	-1,9	-1,1	0,9	2,0	-1,2	-1,1	1,1	2,8	-2,1	-1,9	0,1	2,2	- 3,4	-3,4	-1,0	2,2	
31.	- 7,0	-0,6	0,0	1,0	3,8	-1,8	-1,1	0,9	2,0	-1,1	-1,2	1,1	2,8	-2,1	-1,8	0,1	2,2	- 3,3	-3,4	-0,8	2,5	
Monatsmittel	- 9,6	-0,3	0,4	1,8	5,0	-2,2	-1,0	1,6	3,0	-1,5	-1,3	1,7	3,6	-3,7	-2,9	0,5	3,1	- 5,8	-4,9	-0,1	3,8	
Febr. 1940																						
1.	- 5,7	-0,4	-0,1	1,0	3,8	-1,4	-1,1	0,8	2,0	-1,0	-1,0	1,1	2,8	-2,0	-1,7	0,1	2,2	-3,1	-3,2	-0,5	2,6	
2.	- 5,2	-0,4	-0,1	1,0	3,8	-1,1	-1,0	0,8	2,0	-0,9	-0,8	1,1	2,8	-1,9	-1,4	0,1	2,2	-3,0	-3,1	-0,2	2,7	
3.	- 3,2	-0,3	-0,1	1,0	3,7	-1,0	-1,0	0,8	2,0	-0,8	-0,8	1,1	2,8	-1,5	-1,2	0,1	2,2	-2,5	-2,9	-0,1	2,8	
4.	- 3,2	-0,2	-0,1	1,0	3,7	-1,0	-1,0	0,8	2,0	-0,8	-0,7	1,1	2,8	-1,5	-1,0	0,2	2,3	-2,1	-2,6	-0,0	2,8	
5.	1,2	-0,2	-0,1	1,0	3,6	-0,8	-1,0	0,9	2,0	-0,8	-0,6	1,1	2,9	-1,0	-0,6	0,3	2,6	-1,5	-1,9	0,0	2,8	
6.	1,6	-0,3	-0,1	0,9	3,6	-0,5	-1,0	0,9	2,0	-0,6	-0,2	1,2	3,0	-0,4	0,0	0,6	2,8	-0,1	-0,7	0,0	2,8	
7.	2,3	-0,3	-0,1	0,9	3,5	-0,2	-0,9	0,9	2,0	-0,3	0,0	1,2	3,0	-0,2	0,0	0,8	2,9	0,7	-0,1	0,0	2,8	
8.	2,9	-0,2	-0,1	0,9	3,5	0,0	-0,9	0,9	2,0	-0,2	0,0	1,3	3,0	-0,2	0,0	0,8	2,9	0,6	-0,1	0,2	2,9	
9.	- 3,4	-0,2	-0,1	0,9	3,5	-0,1	-0,9	0,9	2,0	-0,1	0,0	1,5	3,0	-0,2	0,0	0,8	2,9	0,5	0,1	0,5	2,9	
10.	- 9,9	-0,2	-0,1	1,0	3,6	-1,8	-1,0	0,9	2,0	-0,1	-0,2	1,6	3,0	-1,6	-0,6	1,0	3,0	-1,4	-0,3	0,8	3,0	
11.	- 6,8	-0,2	-0,1	1,0	3,8	-4,9	-2,1	1,0	2,0	-1,0	-0,4	1,7	3,0	-3,3	-1,6	1,0	3,0	-4,5	-1,4	1,0	3,0	
12.	-13,0	-0,6	-0,3	1,0	3,6	-4,7	-2,5	1,0	2,2	-2,3	-1,3	1,8	3,0	-4,2	-2,6	1,0	3,0	-4,4	-2,6	1,0	3,2	
13.	-14,5	-1,8	-0,5	0,8	3,6	-7,1	-4,0	1,0	2,2	-4,0	-2,8	1,8	3,1	-6,6	-5,3	1,0	3,0	-8,3	-5,0	1,0	3,6	
14.	-12,5	-1,8	-0,4	0,8	3,6	-4,5	-3,3	1,0	2,0	-2,6	-2,4	1,8	3,1	-4,8	-3,6	0,4	3,0	-6,9	-5,4	1,0	3,8	
15.	- 8,0	-1,5	-0,4	0,8	3,6	-3,1	-2,6	0,8	2,0	-2,0	-1,6	1,5	3,0	-3,4	-2,8	0,3	2,8	-5,5	-4,7	0,8	3,8	
16.	- 4,0	-1,2	-0,4	0,8	3,5	-3,0	-2,1	0,5	2,0	-1,4	-1,2	1,2	3,0	-2,5	-2,0	0,2	2,6	-4,0	-3,8	0,6	3,6	
17.	- 3,6	-1,0	-0,3	0,8	3,4	-1,8	-1,9	0,4	1,8	-1,0	-0,9	1,2	2,9	-1,8	-1,4	0,1	2,4	-2,6	-3,0	0,5	3,4	
18.	- 6,2	-1,0	-0,2	0,8	3,4	-2,4	-1,9	0,4	1,8	-1,2	-1,1	1,1	2,8	-2,5	-1,8	0,2	2,3	-2,9	-2,9	0,5	3,2	
19.	- 1,6	-1,0	-0,3	0,8	3,2	-1,8	-1,8	0,5	1,8	-1,1	-1,0	1,1	2,8	-1,6	-1,4	0,6	2,4	-2,4	-2,5	0,5	3,1	
20.	- 9,4	-1,0	-0,4	0,7	3,2	-1,9	-1,7	0,5	1,8	-1,0	-1,0	1,1	2,8	-1,7	-1,1	0,6	2,5	-2,2	-2,0	0,4	3,0	
21.	- 6,4	-1,0	-0,4	0,7	3,1	-2,2	-1,7	0,4	1,7	-1,2	-1,3	1,1	2,8	-2,1	-1,5	0,5	2,5	-2,9	-2,5	0,6	3,0	
22.	- 1,7	-1,0	-0,4	0,7	3,1	-2,0	-1,7	0,2	1,6	-1,1	-1,2	1,1	2,8	-2,2	-1,6	0,4	2,5	-3,2	-2,8	0,7	3,0	
23.	1,2	-0,9	-0,4	0,7	3,1	-1,2	-1,5	0,2	1,2	-0,8	-0,7	1,1	2,8	-1,7	-1,4	0,4	2,5	-2,2	-2,2	0,7	3,0	
24.	5,4	-0,6	-0,3	0,7	3,0	-0,5	-1,2	0,0	1,0	-0,6	-0,3	1,1	2,8	-0,6	-0,5	0,4	2,4	-0,1	-0,9	0,6	3,0	
25.	3,4	-0,2	-0,2	0,7	3,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	-0,2	-0,2	1,1	2,8	-0,2	0,0	0,6	2,2					



migen Sand werden sie nur angedeutet, und beim Humus sind sie verschwunden. In 50 und 100 cm Tiefe fehlen die täglichen Amplituden ganz.

Des weiteren ist der Einfluß der Schneedecke zu erkennen, und zwar ist die Schneehöhe von Ausschlag. Vor allem im Januar, als die Schneedecke an einzelnen Tagen eine Höhe von 20 cm erreichte, ist dies zu bemerken, aber auch im Februar ist bei der geringeren Höhe noch ihre Wirkung zu verspüren. Im Kurvenverlauf tritt durch die Schneedecke eine gewisse Beruhigung und Stetigkeit ein. Diese Feststellung gilt besonders für 10 und 20 cm Tiefe. Sie prägt sich sehr deutlich beim Basaltgrus und Sand, aber auch beim Lehm und lehmigen Sand aus. Der Humusboden wird hiervon nicht berührt. Ferner wird durch die geringe Leitfähigkeit des Schnees das Eindringen der Kälte im Boden abgebremst, die Bodentemperatur also erhöht, und andererseits verlangsamt sie den Vorgang des Auftauens. Zahlenmäßige Angaben über den Einfluß der Schneebedeckung ließen sich aus dem eingangs angegebenen Grund nicht ermöglichen.

## 2. Eindringen des Frostes.

a) Zeitlicher Eintritt. Im Anschluß hieran interessiert insonderheit das Frostphänomen im Erdboden. Zum Studium dieser Aufgabe wurden die täglichen Mittelwerte herangezogen, welche die ersten Aussagen über den Frost im Boden ermöglichen. Während bei allen Böden der Oberflächenfrost gleichzeitig mehr oder weniger stark auftrat, setzte im Boden der Frost zu verschiedenen Zeiten ein.

Tabelle 4. Frosteintritt im Boden.

Bodenart	Tiefe/cm		
	10	20	50
Basaltgrus . . . . .	21. Dez. 1939	22. Dez. 1939	11. Jan. 1940
Sand . . . . .	18. „ 1939	22. „ 1939	19. „ 1940
Lehm . . . . .	22. „ 1939	29. „ 1939	—
Lehmiger Sand . . . . .	23. „ 1939	30. „ 1939	—
Humus . . . . .	6. Jan. 1940	18. Jan. 1940	—

Die zeitlichen Unterschiede sind hiernach beträchtlich. Im Humus begann in 10 cm Tiefe der Frost erst 19 Tage und in 20 cm Tiefe sogar 27 Tage später als im Sandboden. Diese Feststellung ist für den Praktiker von außerordentlichem Wert. Bei den übrigen Böden sind die Unterschiede geringer. In 10 cm Tiefe wurde im Lehm der Frost 4 Tage und im lehmigen Sand 5 Tage, in 20 cm Tiefe 7 bzw. 8 Tage später als im Sand beobachtet.

Der gleichzeitige Frosteintritt beim Basaltgrus und Sand in 20 cm Tiefe ist in 50 cm Tiefe nicht mehr wahrzunehmen. Von allen Böden haben nur diese beiden in 50 cm Tiefe noch Frost, allerdings jetzt mit einer zeitlichen Verschiebung. Im Sand wurde der Nullpunkt erst 8 Tage später unterschritten als im Basaltgrus. Nach der Tiefe war Sand feuchter als Basaltgrus, infolgedessen drang hier der Frost langsamer ein.

b) Tiefe des Frostes. Zur Untersuchung der Tiefe des Frostes in den Böden wurden als Ausgangsmaterial wiederum die Tagesmittel herangezogen. Aus ihnen ließen sich ohne weiteres durch graphische Interpolation die Nullwerte für die einzelnen Tiefen ermitteln. Die hieraus sich ergebenden Null-Isothermen sind in den Abb. 2a und b durch eine starke Linie dargestellt. In derselben Weise wurden von  $-10^{\circ}$  bis  $+2^{\circ}$  die anderen Isothermen in Abständen von  $2^{\circ}$  berechnet und in die Abbildung eingetragen.

Aus Abb. 2 kann die Tiefe des Frostes für die unter gleichem Witterungseinfluß stehenden Böden direkt entnommen werden.

Tabelle 5. Frosttiefe im Boden.

Bodenart	Tiefe m
Basaltgrus . . . . .	0,67
Sand . . . . .	0,52
Lehm . . . . .	0,52
Lehmiger Sand . . . . .	0,40
Humus . . . . .	0,32

Auch dieses Ergebnis ist von großem Interesse, zumal wohl erstmalig durch die Lysimeteranlage solche Studien vergleichender Art möglich waren. Im Basaltgrus drang demnach der Frost doppelt so tief wie im Humus ein.

Interessant ist auch ein Vergleich der übrigen Isothermen in den verschiedenen Böden. Im Basaltgrus dringen sie auch bei kürzeren Schwankungen tief in den Boden, bis zu 50 cm, ein, so daß die Fläche inner-

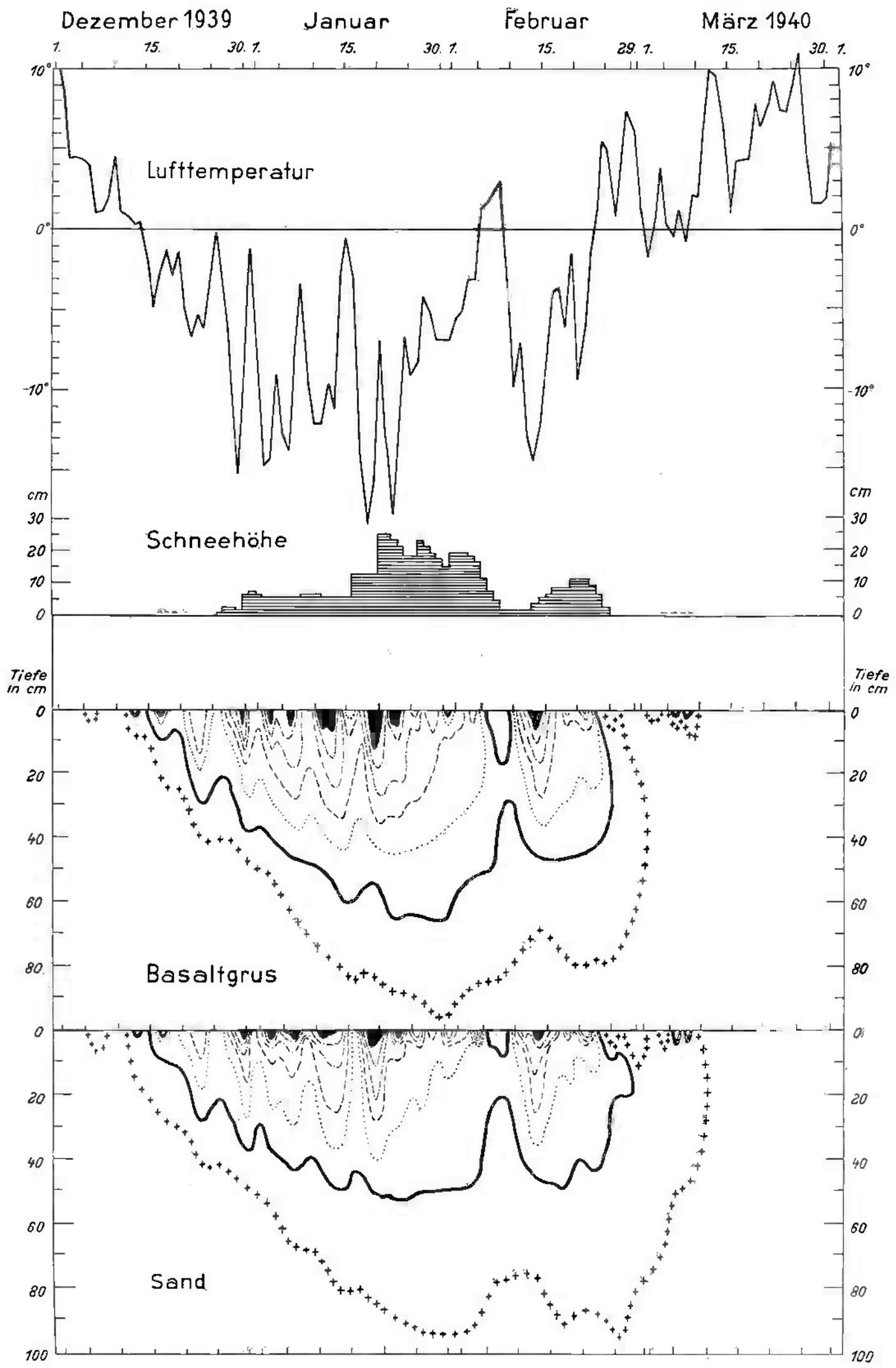


Abb. 2a. Verlauf der Isothermen in verschiedenen Böden.

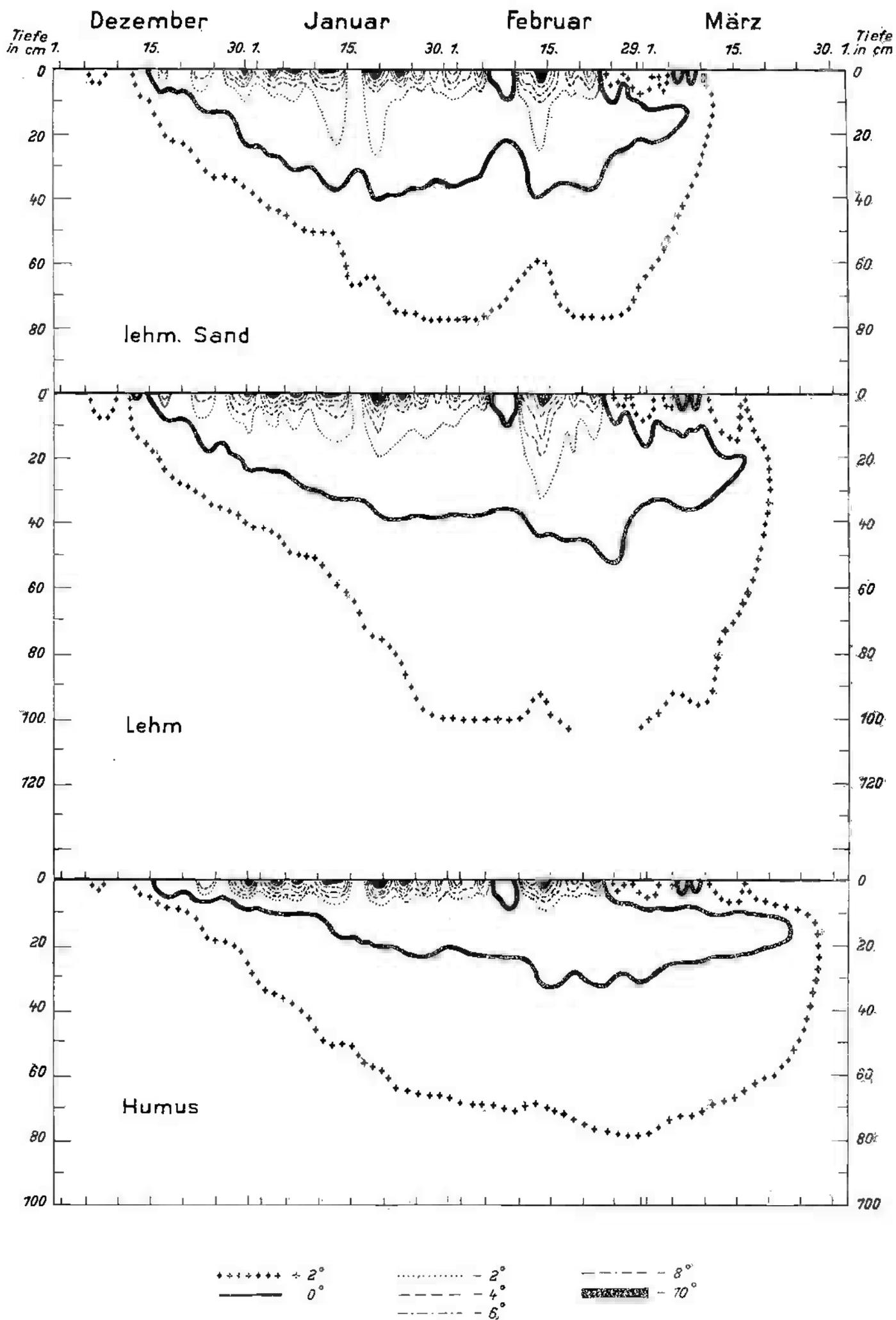


Abb. 2b. Verlauf der Isothermen in verschiedenen Böden.

halb der Nulllinie von ihnen gleichmäßig erfüllt wird. Beim Humus hingegen spielen sich solche Vorgänge nur in der obersten Schicht von 5 cm ab. Die übrige Fläche bleibt unberührt. Zwischen diesen beiden liegen die anderen Böden und bilden Übergänge. So reicht im Sand die Isotherme  $-2^{\circ}$  etwa 40 cm, im lehmigen Sand und Lehm etwa 30 cm hinab.

Auffallend ist endlich, daß die Isotherme  $+2^{\circ}$  sich etwas anders verhält. Sie hat die größte Tiefe diesmal im Lehm.

c) Geschwindigkeit des Frostes. Von Wichtigkeit sind endlich noch Kenntnisse über die Eindringungsgeschwindigkeit des Frostes. Nachdem an Hand der Tabelle mit den Tagesmitteln und auch durch Darstellung der Null-Isotherme Tiefe und Zeit des Frostes gegeben sind, konnte die durchschnittliche Geschwindigkeit, mit der der Frost sich im Boden fortpflanzte, errechnet werden. Die nachstehenden Werte sind aus dem durchschnittlichen Neigungswinkel der Null-Isotherme bestimmt.

Tabelle 6. Eindringungsgeschwindigkeit des Frostes.

Bodenart	cm/Tag
Basaltgrus . . . . .	2,0
Sand . . . . .	1,7
Lehm . . . . .	1,1
Lehmiger Sand . . . . .	1,1
Humus . . . . .	0,6

Das langsame Eindringen des Frostes im Humus mit nur 0,6 cm je Tag ist besonders auffallend. Im Sand erreichte der Frost im Tag nahezu die dreifache Tiefe des Humus. Im wesentlichen ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Frostes von der im Boden vorhandenen Feuchtigkeit abhängig. Je mehr nun der Boden mit Feuchtigkeit angereichert wird, desto größer ist auch die im Boden frei werdende latente Wärme und um so langsamer dringt der Frost ein. Im gleichen Maße wie bei der Abkühlung latente Wärme frei wird, wird sie umgekehrt bei der Erwärmung gebunden, beide Male tritt eine Verzögerung ein, d. h. ein längeres Verharren bei  $0^{\circ}$ . Stellt man nun die Aufzeichnung der Lysigraphen, die Fragen des Wasserhaushaltes der Böden klären sollen, der vorstehenden Tabelle über die Eindringungsgeschwindigkeit des Frostes gegenüber, so ergibt sich ohne weiteres eine entsprechende Parallele mit ähnlicher Größenordnung. Hiernach haftet am wenigsten Niederschlag im Basaltgrus und Sand, am feuchtesten ist der Humus.

d) Frostreste. Von großem praktischen Nutzen sind überdies Nachforschungen nach Frostresten, die mit Beendigung der Kälteperiode noch mehr oder weniger lang im Boden verweilen. Zur Betrachtung der näheren Umstände und zum Vergleich der einzelnen Böden untereinander möge nochmals der Verlauf der Null-Isotherme dienen. Vorweg besagt er schon, daß die vorübergehende Erwärmung Anfang Februar auch im Boden Einfluß gewinnt, indem um diese Zeit eine Einschnürung der Null-Isotherme von oben und unten zu beachten ist. Vor allem aber fällt die Beendigung der Frostperiode auf, die zu verschiedenen Zeiten in den einzelnen Böden stattfindet.

Tabelle 7. Beendigung des Frostes.

Bodenart	Zeit
Basaltgrus . . . . .	25. Febr. 1940
Sand . . . . .	28. „ 1940
Lehmiger Sand . . . . .	7. März 1940
Lehm . . . . .	16. „ 1940
Humus . . . . .	22. „ 1940

Unter dem Einfluß der allgemeinen Erwärmung schreitet auch der Temperaturanstieg von oben nach unten voran, wobei gleichzeitig mit dem Auftauen und der Einschränkung der Frostfläche auch von unten nach oben eine Temperaturumkehr verbunden ist, so daß etwa in einer Tiefe von 10 bis 20 cm, je nach Bodenart, der Frost am längsten verharret. Da sich im Basaltgrus die Erwärmungsvorgänge am raschesten vollziehen, hat dieser Boden keinen Frostrest aufzuweisen. Fast in ähnlich schneller Weise übernimmt der Sandboden die Lufttemperatur, so daß auch bei ihm praktisch nicht von einem Frostrest gesprochen werden kann. Dagegen ist im lehmigen Sand ein solcher zu erkennen, der in 10 cm Tiefe ausklingt. Noch deutlicher und mächtiger stagniert er im Lehm in einer Tiefe von 20 cm, und schließlich ist der Frostrest am augenscheinlichsten und längsten im Humus in einer Tiefe von 10 cm ausgeprägt. Der dem Humus durch seinen verspäteten Frosteintritt zuzusprechende Vorteil wird andererseits durch das lange Anhalten des Frostes wieder zu Nachteil. Die Frage, wann am Ausgang des Winters die Böden frostfrei sind, interessieren

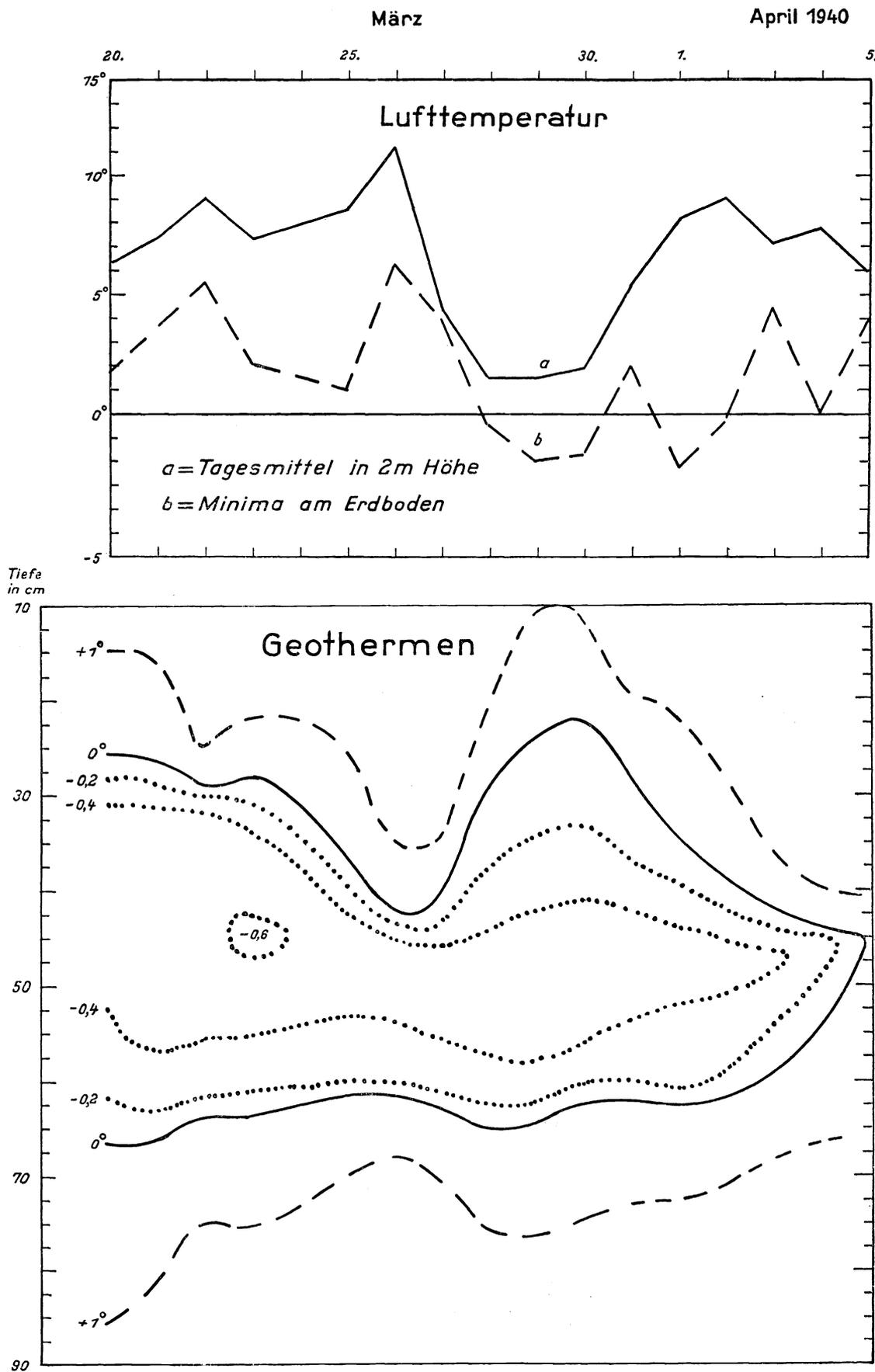


Abb. 3. Temperaturverlauf im Erdhaufen.

zweifelsohne Baugewerbe und vor allem Landwirtschaft und Gartenbau am meisten. Entscheidungen über Beginn der Bodenbearbeitung und Aussaat hängen davon ab.

Der hiernach in Strahlungsnächten noch auftretende Frost berührt nur die Oberfläche oder reicht wenige Zentimeter nach dem Innern des Bodens und beschränkt sich vorwiegend auf Nacht- und Morgenstunden. Es bedarf an dieser Stelle noch einmal des Hinweises, daß die Forschungen im unbearbeiteten Boden vorgenommen wurden. Beim Vorhandensein eines Vegetationsbestandes und ebenso bei der Auflockerung

des Bodens durch Bearbeitung hätten sich die Verhältnisse geändert, denn eine Auflockerung bedeutet Anreicherung des Bodens mit Luft. Bekanntlich hat trockene Luft die geringste Leitfähigkeit (physikalische Leitung), sodaß im Gegensatz zum festen Boden die Wärmeleitfähigkeit herabgesetzt wird. Gesteigert wird dieser Vorgang außerdem noch durch die mit der Lockerung verbundene austrocknende Wirkung der bearbeiteten Bodenschicht.

Frosterscheinungen im Boden konnten noch bis in den Monat April hinein beobachtet werden, so in tieferen feuchten Lagen, in Gruben, am Ausfluß von Drainagen und in Wäldern. Aber auch im Freiland, an Stellen mit aufgeschüttetem Boden, waren noch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt anzutreffen. Hierfür fand die Forschungsstelle in ihrem Versuchsgarten ein treffendes Beispiel. Dort lag ein 90 cm hoher Haufen von Komposterde, etwa 1,5 cbm. In ihn wurde von der Seite her ein keilförmiger Einschnitt gemacht und in senkrechten Abständen von 15 cm Normalthermometer in den Boden eingetrieben. Der Temperaturverlauf wurde mehrmals täglich festgestellt. Es war ohnehin schon eine beachtenswerte Beobachtung, daß im freiliegenden Komposthaufen Frost noch zu einer Zeit auftrat, als die benachbarten Böden der Lysimeteranlage — darunter auch der Humus — und die der Außenbeobachtungsstellen frostfrei waren.

Nach dem Geothermenverlauf war erst am 5. April der Erdhaufen frostfrei, obwohl sich bereits vorher eine allgemeine kräftige Erwärmung vollzog. Nur vom 28. bis 30. März und vom 1. bis 2. April ging das Minimum der Lufttemperatur und dasjenige der Erdoberfläche noch einmal unter den Gefrierpunkt zurück. Der starke Temperaturanstieg (Tagesmittel der Luft bis 11,2°) am 26. März schnürte zwar den Frostrest erheblich ein, aber dafür brachten die folgenden Tage mit leichterem Nachtfrost (Minimum an der Oberfläche —2,2°) sofort wieder eine Ausweitung der Frostschrift. Ferner ist noch zu beachten, daß der Frost in der Mitte der Erdschicht mit unverminderter Stärke (—0,4°) fast bis zum Schluß anhielt. Während im Komposthaufen die Temperatur noch unter 0° lag, hatten sich die Böden der Lysimeteranlage schon so stark erwärmt, daß in 10 cm Tiefe im Basaltgrus die Temperatur bis auf 18°, im Sand auf 12,1°, Lehm 11,4°, lehmigen Sand 8,8° und im Humus auf 6,1° anstieg. Da der Erdhaufen infolge der Aufschüttung im lockeren Zustand war, er also relativ viel Luft enthielt, wurde seine Wärmeleitfähigkeit ganz erheblich verringert. Nur hierauf ist auch das überaus lange Verweilen des Frostes in diesem Boden zurückzuführen.

e) Frostempfindlichkeit. Der Praktiker wird nun häufig danach fragen, welcher Boden am „frostempfindlichsten“ ist. Der Begriff „Frostempfindlichkeit“ ist wohl noch nicht genau definiert. Immerhin dürfte sich aus den Abb. 2a und b ein Urteil darüber bilden und ein vergleichendes Maß ableiten lassen. Im Begriff „Frostempfindlichkeit“ ist sowohl die Tiefe des Frostes als auch seine Zeitdauer enthalten. Rechnerisch würde das bedeuten, daß man das Integral über die von der Null-Isotherme umschlossene Fläche zu bilden hat. Dies geschah durch Ausplanimetrierung der fünf Flächen. Da es nur auf Verhältniszahlen ankommt, wurde die kleinste, also die des Humus, gleich 1 gesetzt. Es ergaben sich alsdann folgende Zahlen:

Humus . . . . .	1
Lehmiger Sand . . . . .	1,24
Lehm . . . . .	1,58
Sand . . . . .	1,68
Basaltgrus . . . . .	1,85

Dieses Maß für die Frostempfindlichkeit würde praktisch bedeuten, daß beispielsweise Basaltgrus fast doppelt so frostempfindlich ist als Humus.

### 3. Inversionen im Boden.

An der bekannten Feststellung, daß im Winter der Boden in der Tiefe wärmer ist als oben, ändert sich nichts, auch wenn der Frost zunimmt. Steigt jedoch umgekehrt außen die Temperatur an, dann finden auch im Boden Inversionen statt, die je nach Bodenart verschieden und an die spezifischen Eigenschaften gebunden sind. In welcher Art nun Inversionen möglich sind, veranschaulicht der Kurvenverlauf in nachstehender Abbildung.

Von Interesse sind nur vorübergehende Temperaturanstiege während des Winters von außen her und nicht die endgültigen im Frühjahr, wo ohnedies Umkehrungen erfolgen müssen. Den Kurven liegen diesmal Pentadenmittel zugrunde. Hiernach kommt es zu verschiedenen Überschneidungen der Temperaturlinien, die sich je nach Zeit und Tiefe unterscheiden. Im Humusboden sind Inversionserscheinungen praktisch ausgeschlossen, im Lehm, Sand und lehmigen Sand sind sie vorhanden und im Basaltgrus hingegen ist die Temperaturumkehr am eindeutigsten zu beobachten, d. h. also, daß der letztere am meisten und der Humus am wenigsten den Schwankungen der Außentemperatur unterworfen ist. Auch diese Feststellung hat abermals gewisse praktische Bedeutung, sowohl für Baugewerbe als auch für Landwirtschaft und Gartenbau, beispielsweise beim Einmieten von Produkten und für die ersten Bestellungsarbeiten.

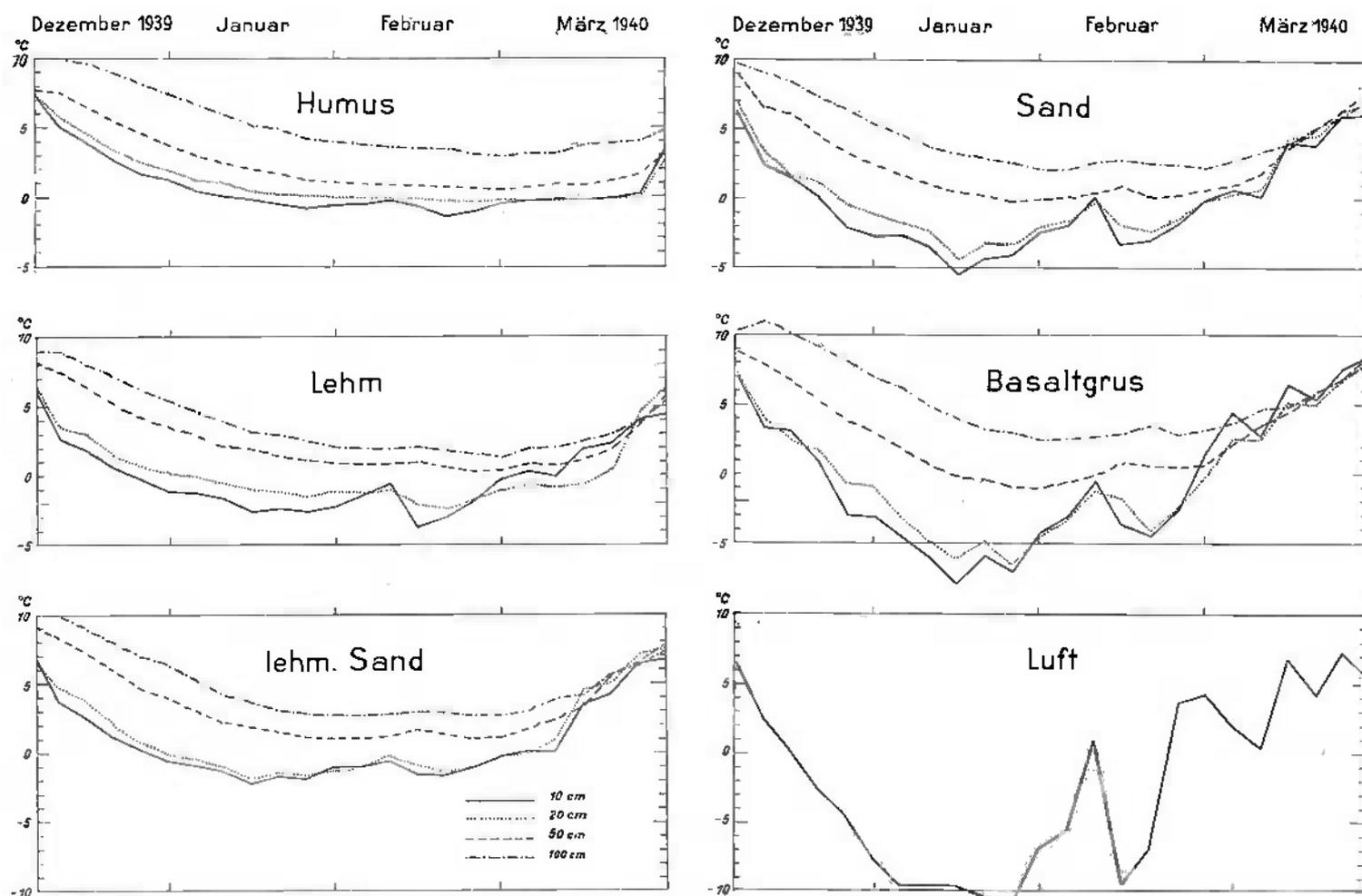


Abb. 4. Inversionen im Boden.

4. Theoretische Betrachtung.

Um eine zahlenmäßige Beziehung zwischen der Außentemperatur und der Bodentemperatur zu bekommen, wurden nach der Methode der kleinsten Quadrate folgende Gleichungen berechnet:

Tabelle 8.

Bodenart	Gleichung	r	m	Z
Basaltgrus . . . . .	$\vartheta_{10} = 0,712 \cdot \Theta + 1,56$	0,95	0,009	106
Sand . . . . .	$\vartheta_{10} = 0,466 \cdot \Theta + 0,82$	0,91	0,016	57
Lehm . . . . .	$\vartheta_{10} = 0,344 \cdot \Theta + 0,94$	0,79	0,034	23
Humus . . . . .	$\vartheta_{10} = 0,180 \cdot \Theta + 1,33$	0,60	0,059	10
Lehmiger Sand . . . . .	$\vartheta_{10} = 0,340 \cdot \Theta + 1,70$	0,80	0,033	24

Dabei bedeutet  $\vartheta_{10}$  das Tagesmittel der Temperatur in 10 cm Tiefe und  $\Theta$  die Lufttemperatur am vorherigen Tage. Letzteres erschien notwendig, um der Phasenverschiebung und der Trägheit der Instrumente Rechnung zu tragen. Außerdem sind der Korrelationskoeffizient r, der Fehler  $m = \frac{1-r^2}{\sqrt{N-2}}$  und der Sicherheitskoeffizient  $Z = \frac{r}{m}$  angegeben. Die graphische Darstellung ist in Abb. 5 wiedergegeben.

In dem Ergebnis sind die konstanten Faktoren bedeutsam, und zwar für:

Basaltgrus . . . . .	0,712
Sand . . . . .	0,466
Lehm . . . . .	0,344
Lehmiger Sand . . . . .	0,340
Humus . . . . .	0,180

Sie geben an, in welchem Verhältnis eine Zunahme  $\Delta\vartheta$  zu einem Zuwachs  $\Delta\Theta$  steht und stellen geometrisch das Steigungsmaß der geraden Linien dar. Es ist für die Böden charakteristisch, daß die Zahlen

wieder von dem kleinsten Wert beim Humus zum größten Wert beim Basaltgrus ansteigen. Wiederum ein Beweis dafür, daß Humus sich wenig, Basaltgrus dagegen sehr gut den äußeren Temperaturverhältnissen anpaßt. In Abb. 5 wird außerdem gezeigt, daß bei tiefen Temperaturen Humus am wärmsten, Basaltgrus am kältesten ist, bei hohen Temperaturen ist aber Humus am kältesten und Basaltgrus am wärmsten. Jedoch ist die Reihenfolge der Böden nicht dieselbe. Da die Geraden für Lehm und lehmigen Sand fast parallel laufen, liegt die Temperatur des lehmigen Sandbodens immer etwas höher als die des Lehmes. Ebenso ist zu beachten, daß die Korrelation in jedem Falle günstig ist, vom Humus zum Basaltgrus aber an Sicherheit noch zunimmt.

Was die physikalische Bedeutung der 5 Faktoren betrifft, so könnte man sie unter anderen Umständen dem Temperaturleitungsvermögen der Böden proportional setzen. In unserem Falle ist aber zu bedenken, daß durch das Frieren abnorme Verhältnisse geschaffen werden. Die Böden waren natürlich mehr oder weniger feucht, bei jedem Absinken der Temperatur friert ein Teil des Wassers, bei jedem Ansteigen taut Eis auf. Die dabei auftretenden bzw. verbrauchten Wärmemengen sind aber so beträchtlich, daß die normale Wärmeleitung dadurch stark gestört wird. Das dürfte außer der wechselnden Schneedecke auch der innere Grund dafür sein, daß alle Versuche, die absoluten Werte der Wärmeleitungszahlen zu berechnen, zu keinem Ergebnis führten. Es standen dafür drei Wege offen: Die Berechnung aus dem Verhältnis der täglichen Amplituden, aus der Phasenverschiebung und nach der Gleichung  $\frac{\delta\vartheta}{\delta t} = k \cdot \frac{\delta^2\vartheta}{\delta x^2}$  (dabei ist  $x$  die Tiefe,  $t$  die Zeit,  $k$  das Temperaturleitvermögen). In allen Fällen zeigt es sich überdies, daß das Beobachtungsmaterial noch nicht ausreichte. Diese Gründe bewirkten eine solche Streuung der Resultate, daß eine Mittelbildung zwecklos erschien. Auf die Ableitung allgemein gültiger physikalischer Gesetze mußte also in diesem Sonderfall mit seinen einmaligen und eigenartigen Verhältnissen verzichtet werden.

Um einen Begriff zu geben, wie weit die obigen Gleichungen dem tatsächlichen Verlauf entsprechen, ist noch Abb. 6 beigefügt, und zwar als Beispiel für berechnete Temperaturen im Sandboden. Die gestrichelte Kurve gibt Lufttemperaturen im Tagesmittel an, die ausgezogene beobachtete Temperaturen in 10 cm Tiefe. Die punktierte Kurve ist nach der zweiten Gleichung errechnet und zeigt noch gute Übereinstimmung trotz des Einflusses der Schneedecke, die die normalen Vorgänge störte.

### 5. Temperatur an der Oberfläche.

Es wurde schon eingangs darauf hingewiesen, daß die Bodenoberfläche nicht schneefrei gehalten wurde, um die tatsächlichen Temperaturverhältnisse im Boden studieren zu können. Erschwerend auf die

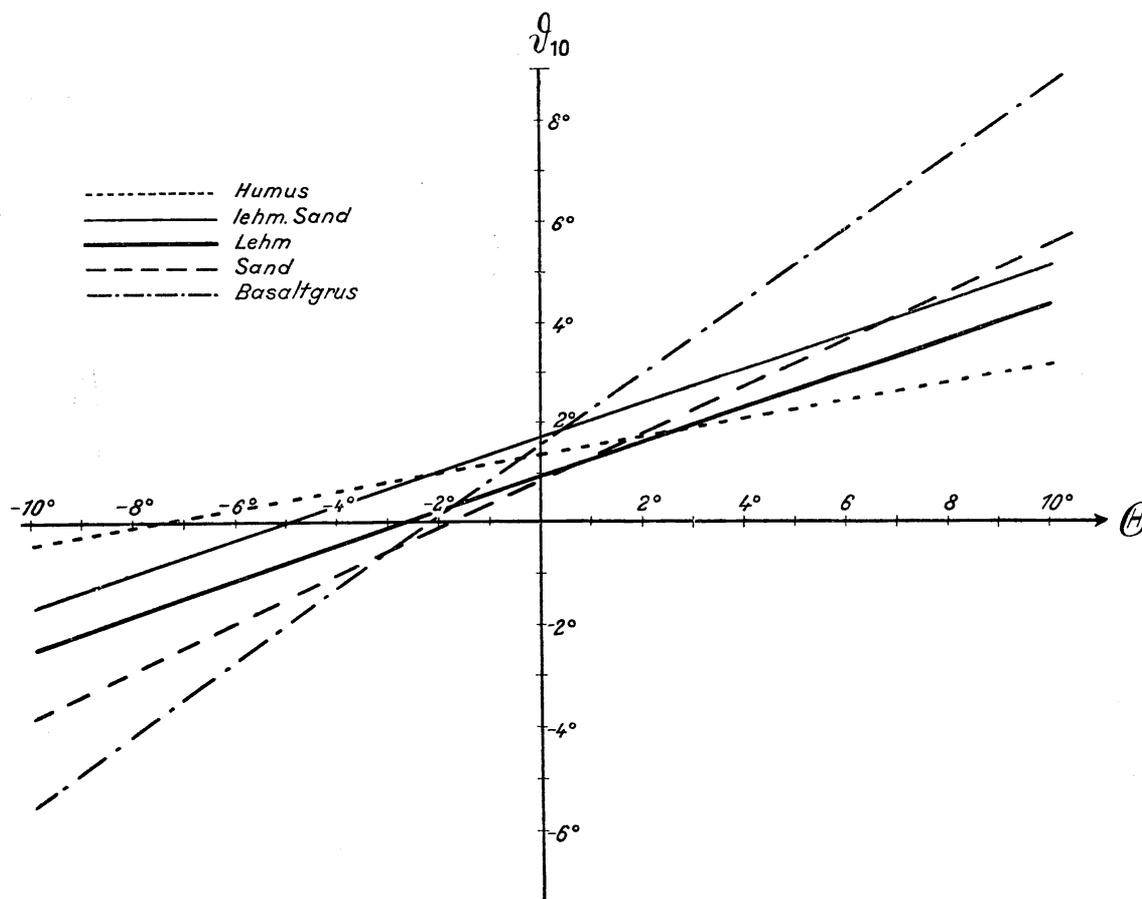


Abb. 5. Bodentemperatur in 10 cm Tiefe als Funktion der Lufttemperatur.

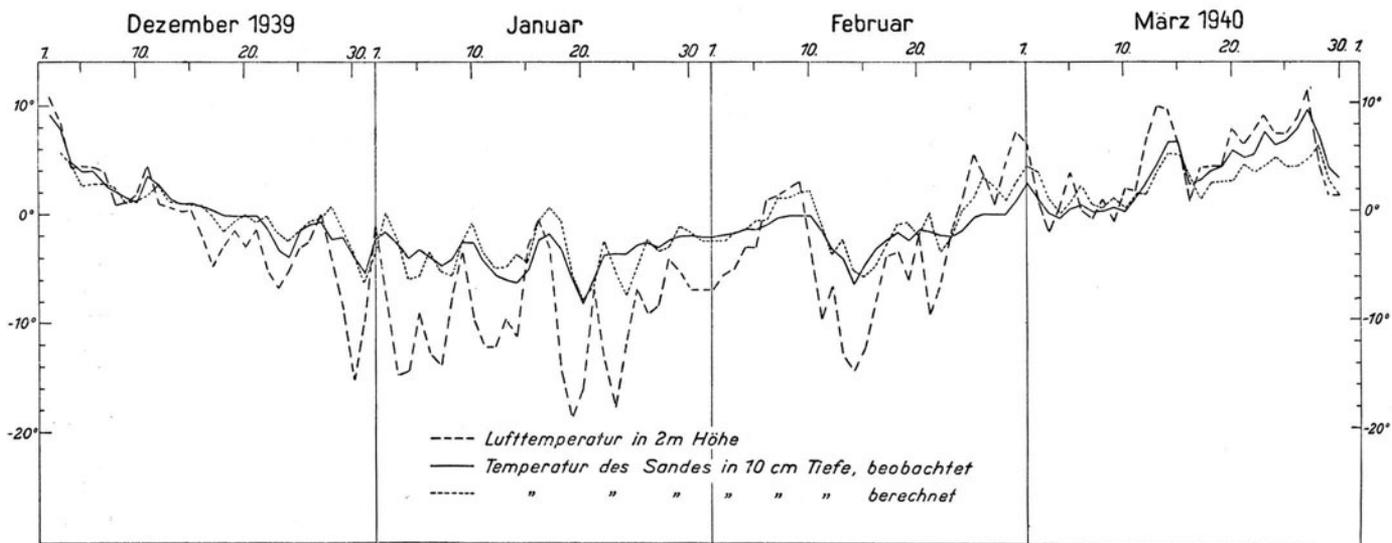


Abb. 6. Beobachtete und berechnete Temperaturen.

Untersuchung wirkten auch die wechselnden Schneehöhen und der damit verbundene wechselnde Abstand der Thermometer von der Bodenoberfläche. Ebenso beeinflussten sie das Wärmeleitungsvermögen des alten und neuen Schnees, wobei bekanntlich alter Schnee ein besseres Wärmeleitvermögen besitzt als frischer. Dennoch wurde der Versuch unternommen, im Februar an der Schneeoberfläche über den einzelnen Böden Temperaturstudien anzustellen. Sie wurden fortgesetzt als die Böden bereits schneefrei waren, aber noch Frost auftrat. Die Zusammenstellung von 37 Einzelbeobachtungen erbrachte nachstehende Mittelwerte.

Tabelle 9. Temperatur an der Oberfläche über verschiedenen Böden.

Durchschnittliche Schneehöhe	Humus	Lehm. Sand	Lehm	Sand	Basaltgrus
A. 7 cm . . . . .	-10,2	-10,3	-10,8	-11,1	-10,4
B. 10 cm . . . . .	- 0,8	- 1,5	- 1,1	- 1,7	- 0,9

Das Ergebnis ist beachtenswert, zumal aus ihm hervorgeht, daß die Böden je nach ihrer Beschaffenheit entsprechenden Einfluß auf die bodennahe Luft haben, der auch bei einer durchschnittlichen Schneehöhe von 7 cm an der Schneeoberfläche noch nicht verwischt wird. Der Unterschied zwischen dem größten und kleinsten Wert, sowohl bei A als auch bei B, ist der gleiche, d. h. in beiden Fällen 0,9. Über Sand ergab sich die tiefste Oberflächentemperatur, was nach anderen Beobachtungen vorauszusehen war. Das Verhalten der Temperatur über Basaltgrus entspricht nicht den Erwartungen. Wahrscheinlich haben Eisbildungen über einzelnen Stellen der Oberfläche, zu denen es einmal durch überfließendes Wasser vom äußeren Rand der Anlage kam, den Temperaturverlauf stärker beeinflusst. Über Humusboden spiegelt sich ebenfalls die ihm eigene Temperatur wider, indem es dort am wärmsten ist. Die wichtige Frage, bei welcher Schneehöhe und -dicke die spezifischen Eigenschaften der Böden praktisch ausgeschaltet werden und an der Schneeoberfläche Temperaturgleichheit herrscht, steht noch offen.

### C. Vergleich mit Außenstationen.

Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen stehen noch vergleichende Beobachtungen über das Eindringen des Frostes im Boden außerhalb der Lysimeteranlage zur Verfügung. Sie gewähren, da sie aus verschiedenen Gegenden mit verschiedenen Bodenarten stammen, Einblick in natürliche Verhältnisse. Die Voraussetzungen sind hier anderer Art als in der Versuchsanlage. Zunächst sind die Auswirkungen der Witterung örtlich je nach Lage verschieden, wenn auch der Gesamtwitterungscharakter gewahrt bleibt. Ferner handelt es sich nicht um extreme organische und mineralische Böden, sondern um Mischböden. Zudem bestehen erhebliche Unterschiede in der Wasserführung. Während an der Station Gießen, Liebigshöhe, das Grundwasser so tief stand, daß es keinerlei Einfluß auf den Gang der Temperatur hatte, bewegte sich das Grundwasser in der Rheinebene (Riedmeliorationsgebiet) in Griesheim 0,80 m, Goddelau 0,72 m, Allmendfeld 1,68 m, Groß-Rohrheim 0,72 m und endlich in Riedrode 1,94 m unter der Erdoberfläche. Gleich war jedoch an allen Stationen die Beschaffenheit der Erdoberfläche, sie befand sich in vegetationsfreiem und

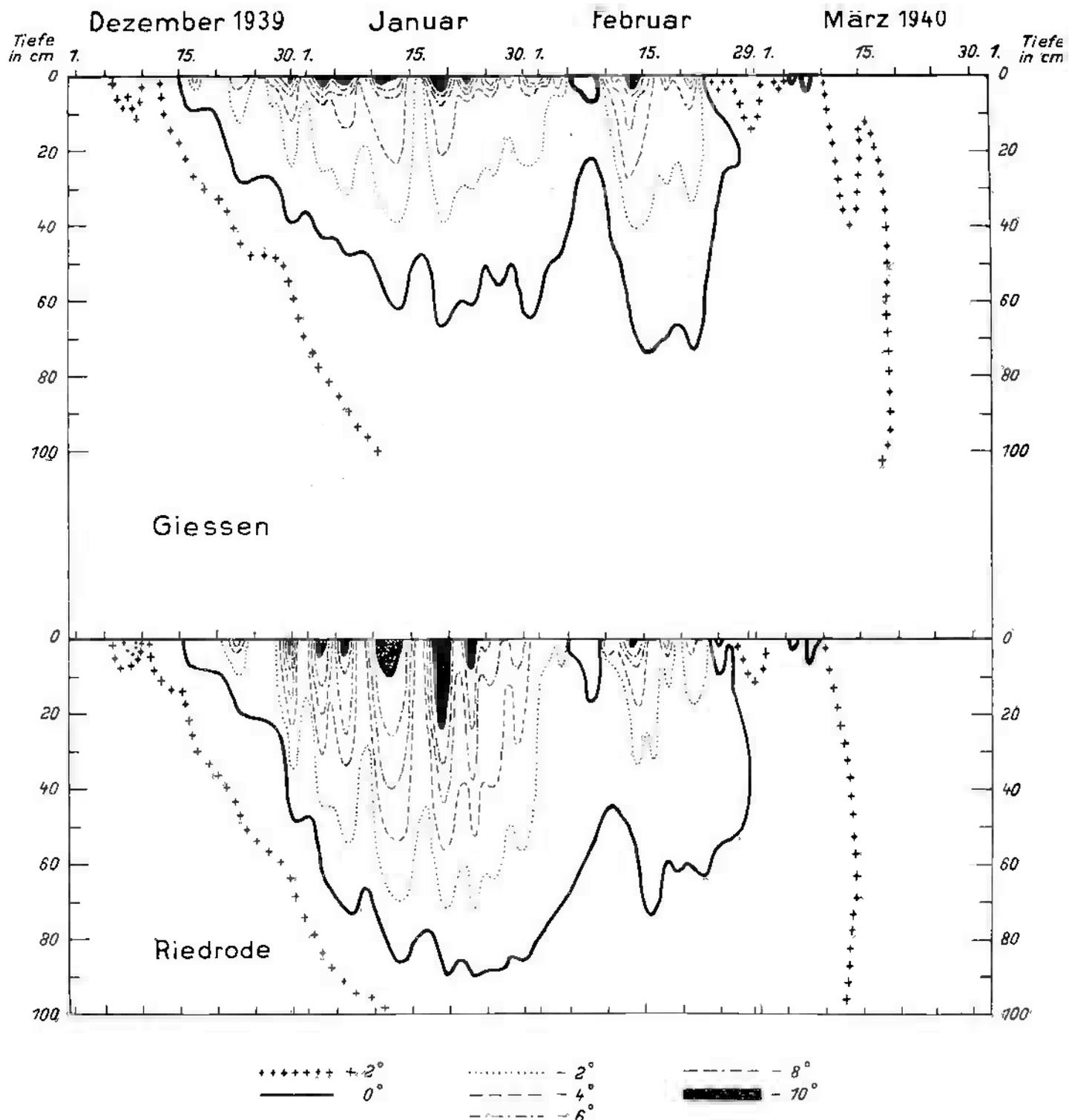


Abb. 7a. Isothermen von Außenstationen.

unbearbeitetem Zustand. Die Temperaturen wurden mit Quecksilberthermometern an der Oberfläche und in 5, 10, 20, 50 und 100 cm Tiefe täglich zu den drei Terminen beobachtet. Zur Veranschaulichung werden nicht von allen Stationen die Null-Isothermen gebracht, eine Darstellung derselben von Giessen, Griesheim, Groß-Rohrheim und Riedrode genügt vollauf.

Die Temperaturstudien in Giessen, Liebigshöhe, sowie in Riedrode und Allmendfeld wurden im Sandboden, in Griesheim und Groß-Rohrheim in anmoorigem Boden und in Goddelau in sandigem Lehm-boden ausgeführt. Auch die Kurven der Abb. 7a und b sprechen für sich und zeigen eindeutig charakteristische Merkmale, die sich auf jeweilige physikalische Eigenschaften der Böden stützen. Der Beginn des Frostes erfolgte überall gleichzeitig. Die Anfang Februar einsetzende Erwärmung kommt ebenfalls in der Einschnürung der Null-Isotherme zum Ausdruck. Dagegen ist die Beendigung des Frostes sehr verschieden. Hier wiederum muß festgestellt werden, daß in den mineralischen Böden (Giessen, Riedrode) kein Frostrest zu beobachten ist, Ende Februar sind sie frostfrei. Hingegen wird das langsame Auftauen in den organischen

Böden (Griesheim, Groß-Rohrheim) augenscheinlich durch den sich bis Mitte März hinziehenden Frostrest bewiesen. Ein Vergleich mit den in Beziehung stehenden Böden der Lysimeteranlage veranschaulicht eine gewisse Widerspiegelung, und zwar nicht nur in Bezug auf Dauer des Frostes, sondern auch hinsichtlich Tiefe und Eindringungsgeschwindigkeit desselben. Allerdings ist zu bedenken, daß nicht überall genau die gleichen Temperaturverhältnisse vorherrschten. In Gießen waren die absoluten Minima der Lufttemperatur:

- in 2 m Höhe  $-26,6^{\circ}$  und an der Oberfläche  $-29,2^{\circ}$  (18./19. Januar 1940),
- in Griesheim in 2 m Höhe  $-29,5^{\circ}$ , an der Oberfläche  $-29,8^{\circ}$  (18./19. Januar 1940)
- in Groß-Rohrheim in 2 m Höhe  $-29,1^{\circ}$ , an der Oberfläche  $-30,0^{\circ}$  (18./19. Januar 1940)
- in Riedrode in 2 m Höhe  $-29,9^{\circ}$ , an der Oberfläche  $-32,0^{\circ}$  (18./19. Januar 1940).

Tabelle 10. Eindringungsgeschwindigkeit und größte Tiefe.

Station	cm/Tag	Tiefe m
Gießen . . . . .	2,0	0,74
Riedrode . . . . .	2,5	0,89
Allmendfeld . . . . .	2,0	0,79
Goddelau . . . . .	1,3	0,54
Griesheim . . . . .	1,1	0,40
Groß-Rohrheim . . . . .	1,0	0,43

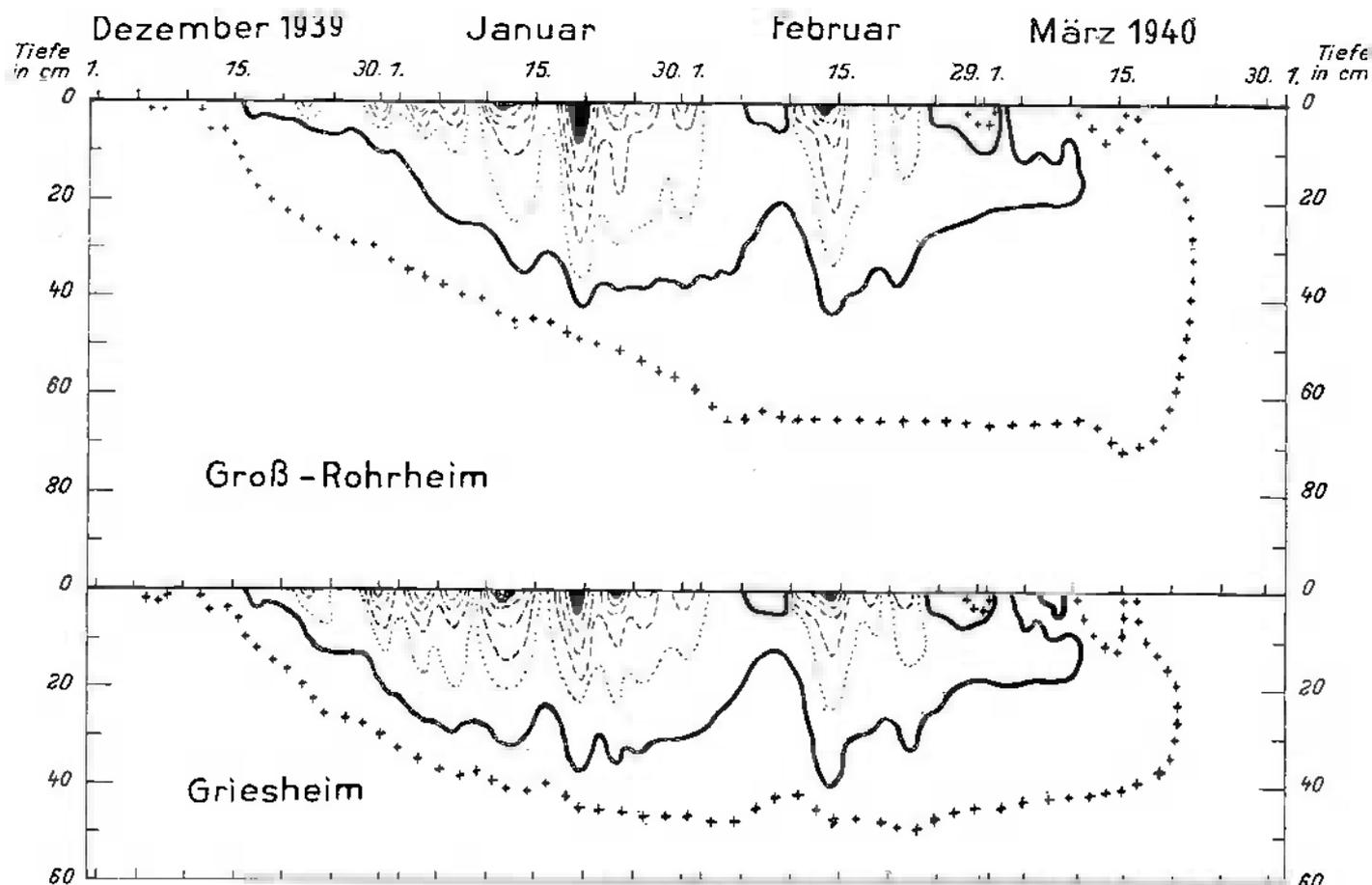
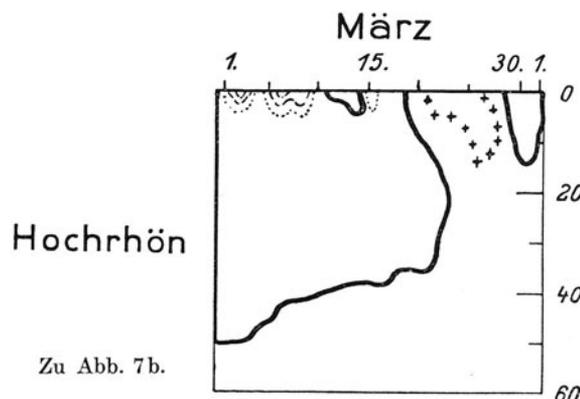


Abb. 7b. Isothermen von Außenstationen.

In der Tabelle sind noch die Ergebnisse der beiden anderen Versuchsstellen Allmendfeld und Goddelau mit angeführt. Danach erreicht der Frost seine größte Tiefe wiederum in Sandböden (Gießen, Riedrode, Allmendfeld) und in humosen und anmoorigen Böden (Griesheim, Groß-Rohrheim) ist die Tiefe am geringsten. Eine Zwischenstellung nimmt der mineralische Mischboden in Goddelau ein. Entsprechend dieser Abstufung ergibt sich auch eine ähnliche Größenordnung für die Eindringungsgeschwindigkeit des Frostes.



Zu Abb. 7b.

Beachtenswert ist auch das tiefe Eindringen der Kälteschwankungen in den Böden, vor allen Dingen in Riedrode. Die Isotherme  $-2^{\circ}$  führt bis 72 cm Tiefe, und sogar die Isotherme  $-10^{\circ}$  reicht 24 cm hinab. Für Gießen sind diese Zahlen 39 und 4 cm, Groß-Rohrheim 35 und 8 cm und Griesheim 24 und 4 cm. Daß in den beiden letzteren, trotz des anmoorigen Bodens, die Isothermen verhältnismäßig tief eindringen, mag daran liegen, daß der Grundwasserstand recht hoch war. Dies bewirkte eine stärkere Durchfeuchtung des Bodens und somit eine Vergrößerung der Leitfähigkeit.

Es bedarf noch des Hinweises, daß die Isotherme  $+2^{\circ}$  in Gießen und Riedrode während des größten Teiles der Frostperiode unterhalb der Beobachtungsgrenze von einem Meter verlief.

Die Frage, wie lange in Höhenlagen der Frost im Boden anhielt, soll an einem anderen Beispiel gezeigt werden, und zwar durch Beobachtungen an unserer agrarmeteorologischen Station am Bayrischen Staatshof auf der Hochrhön in 800 m Höhe. Infolge besonderer Umstände konnten die Messungen in den Monaten Januar und Februar nicht durchgeführt werden, so daß sich die größte Frosttiefe nicht ermitteln ließ. Die Märzbeobachtungen geben aber noch genügend Einblick über den Verlauf der Temperatur in verschiedenen Tiefen, vor allen Dingen, um nachzuforschen, wann der Boden frostfrei war. In Abb. 7 unten ist nun zu erkennen, daß am 1. März der Boden noch bis 50 cm Tiefe gefroren war, während in der Ebene in Sandböden der Frost bereits verschwand. Beachtenswert ist weiterhin, wie unter dem Einfluß der Schneedecke (mittlere Schneehöhe 19 cm) und niedriger Außentemperaturen das Auftauen verlangsamt wurde, so daß ein Kälterest mit einer Mächtigkeit, wie er in der Ebene nicht anzutreffen war, bis zum 23. März im Boden verharrte. Fast bis zu diesem Zeitpunkt zeigte aber auch der Humusboden der Lysimeteranlage noch Frostspuren an, in allen übrigen Böden hatte sich bereits Temperaturumkehr vollzogen. Immerhin beweisen die Beobachtungen, daß auch in Höhenlagen der Boden nicht so lange gefroren bleibt, wie man bislang vermutete oder von den Ansässigen zu hören bekommt.

#### D. Zusammenfassung.

Die vorliegende Untersuchung soll einen Beitrag zur Erforschung des Bodenklimas liefern, und zwar unter besonderer Berücksichtigung der Frostverhältnisse in Böden, deren Abhängigkeit von denselben Witterungsverhältnissen geprüft wurde. Die eigens für Temperaturstudien erbaute Lysimeteranlage mit ihrer Meßeinrichtung ermöglichte ohne Schwierigkeiten die Bearbeitung dieser Teilfrage. Darüber hinaus wurde noch an Außenstationen unter natürlichen Voraussetzungen das Eindringen des Frostes studiert. Sehr eindeutig veranschaulichen die Beobachtungsergebnisse, wie die Tiefe des Frostes von bodenphysikalischen Eigenschaften abhängt, und wie überdies auch Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Dauer des Frostes durch sie bestimmt werden.

Die absolute Tiefe des Frostes unterliegt bei den einzelnen Böden erheblichen Schwankungen. In organischen Böden drang der Frost während des strengen Winters 1939/40 höchstens bis 43 cm und in mineralischen bis 89 cm tief ein.

Die Eindringungsgeschwindigkeit des Frostes schwankte zwischen 0,6 cm/Tag und 2,5 cm/Tag.

Auch die für den Praktiker wichtige Frage über Beginn und Beendigung des Frostes im Boden wurde untersucht. Sie ergab, daß sich in organischen Böden der Frost erst 19 Tage später nach der Tiefe fortpflanzte, dafür aber auch bis zu 3 Wochen länger anhielt als in mineralischen Böden.