

Zusammenfassung

Über das thermische Verhalten des Bodens in Tiefen unter 1 m ist relativ wenig Material veröffentlicht. Nach einer Überblicksdarstellung des Temperaturverhaltens im oberflächennahen Bodenabschnitt bis 50 cm Tiefe und der Wärmebewegungstheorie werden Möglichkeiten zur indirekten Bestimmung des thermischen Verhaltens in größeren Tiefen diskutiert. Bei der Interpretation der Ergebnisse von 4 Standortmeßreihen auf Tiefen bis 12 m wird auf deren Anwendbarkeit auf DDR-Standorte mit ähnlichen Lufttemperatur- und Bodenbedingungen eingegangen. Die Potsdamer und Wiener Reihe eignen sich dazu unter bestimmten Bedingungen. Neben einer kurzen Erörterung der Indikatorwirkung von langjährigen Temperaturmessungen in großen Tiefen für Klimapendelungen werden einige der in verschiedenen Böden Mitteleuropas bisher beobachteten maximalen Frosteindringtiefen mitgeteilt.

Summary

Some aspects concerning the successive temperature variations in soil down to 15 m depth under Central European conditions

Relatively little information has been published so far about temperature variations related to time in soil depths below 1 m. On the basis of a general survey of the temperature behaviour of surface-near soil sections (down to 50 cm depth) and on the basis of the theory of thermal motion, the paper discusses possibilities of indirect determination of temperature variations in greater depths.

The results of measurement series which have been conducted on 4 different measuring points down to 12 m depth are interpreted and the applicability of the results to locations in the GDR with similar air temperature and soil conditions are discussed. The measurement series conducted in Potsdam and that conducted in Vienna are suitable for this purpose under certain conditions. The paper shows that the results of long-term temperature measurements conducted in greater soil depths may serve as indicators of climatic fluctuations. For different soils of Central Europe the paper gives the maximum frost penetration depths measured to date.

Zum Temperaturgang des Bodens bis 15 m Tiefe unter mitteleuropäischen Verhältnissen

Mit 5 Abbildungen und 8 Tabellen im Text

Autor:

Meteor.-Ing. JÜRGEN TREMMEL
Akademie der Wissenschaften der DDR
Institut für Geographie und Geoökologie
7010 Leipzig
Georgi-Dimitroff-Platz 1

Hall. Jb. f. Geowiss. Bd. 9
Seite 117...130
VEB H. Haack Gotha 1984

Резюме

Ход температуры почвы до 15 м глубины в условиях Средней Европы

О термическом отношении почвы в глубинах больше одного метра опубликовано относительно мало фактов. Кроме облика термического отношения в близкой к поверхности почве до 60 см глубины и изображения теории термодинамики, обсуждаются возможности непрямого определения термического отношения в больших глубинах. При интерпретации результатов измерительных рядов на 4 экспериментальных площадках в глубинах до 12 м, рассматривается применение этих результатов на других местах в ГДР с подобными условиями температуры воздуха и почвенного состава. При определённых условиях Потсдамский и Венский ряды годятся для применения в других местах. Кроме краткого обсуждения индикационного действия многолетних измерений температуры на больших глубинах для осцилляций климата, сообщается о некоторых наблюдениях над максимальными глубинами промерзания в различных почвах Европы.

1. Vorbetrachtungen

In der Praxis der meteorologischen Dienste werden Temperaturmessungen allgemein nur bis 1 m Tiefe durchgeführt. Die Temperaturverhältnisse in größeren Tiefen sind nur für wenige Volkswirtschaftsbereiche sowie einige Bereiche der geowissenschaftlichen Grundlagenforschung von Interesse. Seit einiger Zeit rückt die Temperatur tiefer Bodenhorizonte und Gesteine, besonders der Temperaturgradient als Prinzipgrundlage des Wärmepumpeneinsatzes im Rahmen des Problemkreises „Alternativenergie“, wieder mehr ins Blickfeld.

Während man über die Wechselbeziehungen zwischen Boden und bodennaher Luftschicht, die Gesetze der Wärmebewegung im Boden sowie das Temperaturverhalten in dem durch menschliche Tätigkeit (Land-, Bau-, Energiewirtschaft u. a.) intensiv genutzten erdoberflächennahen Bereich eine Vielzahl von Literatur findet, sind Informationen über die thermischen Prozesse in größeren Tiefen recht spärlich. Einige Beispiele hierfür sind zwar in den Standardwerken der Mikroklimatologie, z. B. bei ALISSOW (1956), GEIGER (1961), BERENYI (1967) aufgeführt, jedoch erfährt man relativ wenig über die Tiefenwirksamkeit der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen und ihre Beträge. Zudem sind die letzten Veröffentlichungen über das Temperaturverhalten tiefer Bodenschichten in der deutschsprachigen Literatur schon mehr als 25 Jahre alt (TOLPERCZER 1947, HAUSMANN 1950, BATA 1955, MÜLLER 1958), so daß eine Zusammenschau der Ergebnisse einen hohen Informationswert besitzt.

Die vorliegende Studie hat folgende Ziele:

1. Überblicksdarstellung der oberflächennahen Bodentemperaturverhältnisse
2. Diskussion von Möglichkeiten zur Bestimmung des Bodentemperaturverhaltens in großen Tiefen ohne stationären Meßbetrieb
3. Erörterung des typischen Temperaturverhaltens in Tiefen bis 12 m anhand von 4 Meßreihen
4. Abschätzung von Anwendungsmöglichkeiten dieser Meßreihen zur Beschreibung der Bodentemperaturverhältnisse in großen Tiefen in der DDR

2. Das thermische Verhalten des Bodens

2.1. *Allgemeines Temperaturverhaltens*

Zwischen der Temperatur der unteren Luftschicht und der Temperatur der Erdoberfläche besteht ein enger Zusammenhang. Die einfallende kurzwellige Strahlung wird an der Erdoberfläche in Wärme umgewandelt und dringt in Form einer Temperaturwelle in den Boden ein. Bestimmend für die Erwärmung der Bodenoberfläche ist ihr Aufnahme- bzw. Rückstrahlungsvermögen für kurzwellige Strahlung (Albedo), das durch Farbe, Oberflächenstruktur und Bewuchs des Bodens bestimmt wird, sowie das Wärmeleitvermögen der oberen Bodenschicht.

Der größte Teil der zur Erdoberfläche gelangenden und in Wärme umgewandelten Energie wird wieder an die Atmosphäre zurückgegeben und führt hier zu einer Temperaturerhöhung. Hierbei spielen Prozesse wie Ausstrahlung, Verdunstung, Konvektion sowie in geringerem Maße Strahlungsscheinleitung und Wärmeleitung eine Rolle. Nur ein relativ geringer Teil wird durch Wärmeleitung in den Boden abgeführt und hat eine allmähliche Erwärmung tieferer Bodenschichten zur Folge.

Dunkler Boden erwärmt sich an der Oberfläche durch seine geringere Albedo wesentlich schneller und stärker als heller. So wurden nach GEIGER (1961) in geschwärztem Boden in 1 cm Tiefe bis zu 14 K höhere Temperaturen als in geweißtem und bis zu 5 K höhere als in natürlichem Boden gemessen. Mit steigender Bodenfeuchte verringern sich diese Beträge.

Eine sehr starke Oberflächenaufheizung durch die Sonnenstrahlung ist allgemein bei trockenen, lockeren, humosen oder mit organischen Substanzen (Laub, Streu u. ä.) bedeckten Böden, die die Wärme schlecht leiten, festzustellen. Als Extremwerte können in Mitteleuropa Oberflächentemperaturen bis 60° C, in Ausnahmefällen bis 70° C auftreten.

Deutliche oberflächennahe Temperaturunterschiede gibt es auch zwischen bewachsenem und unbewachsenem Boden. Infolge der

Schutzwirkung durch den Bewuchs erwärmt sich der Boden tags geringer, kühlt nachts aber auch weniger aus. Eine Ausnahme bildet mit dürrerem Gras bestandener Boden, der infolge verminderter Schutzwirkung, verringerter Verdunstung sowie der Verhinderung turbulenter Luftbewegung und der damit verbundenen Wärmeabfuhr stärker erwärmt wird (ALISSOW 1956). Auch frisch bearbeiteter Boden weist gegenüber unbearbeitetem ein niedrigeres Temperaturniveau auf, der tägliche Temperaturgang ist ausgeglichener. Außerdem bewirkt die Bodenbearbeitung eine verminderte nächtliche Abkühlung der bodennahen Luftschicht.

Beim Eindringen in den Erdboden wird die Temperaturwelle nicht nur abgeschwächt, sondern auch verzögert. Die Phasenverschiebung ist von Boden zu Boden unterschiedlich. Für die ungestörte Tageswelle der Temperatur läßt sie sich berechnen, der erhaltene Wert besitzt jedoch wegen der vorausgesetzten Idealisierung nur Informationscharakter. In feuchtem Sandboden kann ab 40 cm Tiefe mit einer Verspätung der Extreme um 10...12 h gerechnet werden. TREMMEL (1981) berechnete für feuchten Lehm eine Laufzeit von 8...15 h bis 50 cm Tiefe, in trockenem Lehm werden 26...52 h erreicht. Nach GEIGER dringt die maximale Tagesschwankung zwischen 120 cm (Fels) und 24 cm (trockener Sand) in den Boden ein, die Jahresschwankung ist noch in Tiefen zwischen 20,6 m (Fels) und 4,6 m (trockener Sand) zu verspüren.

Die Eindringtiefe der täglichen Temperaturwelle in den Boden ist infolge der einstrahlungsbedingt unterschiedlichen Temperaturamplitude an der Erdoberfläche nicht konstant. Im Winter liegt sie in feuchtem Sandboden kaum tiefer als 20 cm, im Sommer unterhalb 50 cm (entspr. der max. Eindringtiefe).

Als Fremdeinfluß ist nur der Niederschlag von Bedeutung für das Verhalten der Bodentemperatur. Durch warmen oder kalten Regen verursachte Temperaturveränderungen sind jedoch nur bis 20 cm Tiefe nachweisbar. Sowohl die geotherme Tiefenstufe (Temperaturzunahme ca. 1 K/33 m auf dem Territorium der DDR) als auch die Bodenatmung sind bis auf wenige Sonderfälle für den Temperaturgang im Boden bedeutungslos.

2.2.

Theorie der Wärmebewegung im Boden

Die Theorie der Wärmebewegung im Boden wurde ausführlich von GEIGER (1961) und BERENYI (1967) dargelegt. Nachfolgende Kurzbeschreibung des thermischen Verhaltens bezieht sich im wesentlichen auf die Zielstellungen dieses Aufsatzes.

Bestimmend für die Fortpflanzung der Temperaturwelle von der Erdoberfläche in den Boden ist im oberen Bodenhorizont (bis maximal 20 cm) die Wärmeleitfähigkeit. Je größer sie ist, um so besser wird die Temperaturwelle in den Boden geleitet und die Bodenoberfläche erwärmt sich weniger, die gesamte Schicht dagegen gleichmäßiger.

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit erfolgt mit Hilfe eines Wärmeleitfähigkeitsmessers nach BRACHT (1949) bzw. KOITZSCH (1961) oder mit einem Wärmeumsatzmesser nach ALBRECHT (1932). Allerdings handelt es sich bei diesen Geräten um keine handelsüblichen Erzeugnisse, ihre Handhabung ist zudem nicht problemlos, so daß ihrer Anwendbarkeit Grenzen gesetzt sind.

Da die Temperaturwelle bei ihrem Eindringen in den Boden stark abgeschwächt und verzögert wird und infolge des mit der Tiefe abnehmenden Temperaturgradienten der Wärmefluß sinkt, wird die Temperaturveränderung in der Tiefe mehr und mehr nur noch durch die Temperaturleitfähigkeit bestimmt, die von Dichte und Wasserkapazität (bzw. Durchfeuchtung) des Bodens stark abhängig ist. Zu ihrer Ermittlung gibt es mehrere mathematische Verfahren (BERENYI 1967), für deren Anwendbarkeit Bodentemperaturmessungen in verschiedenen Tiefen Vorbedingung sind.

Über die Temperaturleitfähigkeit lassen sich Ausbreitungsgeschwindigkeit, Phasenverzögerung, Amplitudenverringern und Eindringtiefe der Temperaturwellen theoretisch relativ leicht berechnen. Die Schwierigkeit liegt darin, daß sie ebenso wie die für die Beschreibung des Temperaturverhaltens der oberflächennahen Schicht notwendige Wärmeleitfähigkeit nur in physikalisch gleichartigen Stoffen eine Konstante ist. Im Boden variiert sie infolge der stetigen Änderung seiner Zusammensetzung,

Bodensedi- ment	Quelle	Wärme- leitfähigkeit [J cm ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹]	Temperatur- leitfähigkeit [cm ² s ⁻¹]
Granit	GEIGER (1961)	0,017 bis 0,042	0,006 bis 0,023
	BERENYI (1967)	0,046	0,021
	BAUR (1970)	0,0335	0,017
Sand (feucht)	GEIGER	0,008 bis 0,025	0,004 bis 0,010
	BERENYI	0,017	0,01
	BAUR	0,0167	0,007
	SCHUBERT (1900)		0,0068
Sand (trocken)	GEIGER	0,002 bis 0,003	0,002 bis 0,005
	BERENYI	0,002	0,0013
	BAUR	0,0042	0,003
Moor (feucht)	GEIGER	0,003 bis 0,004	0,001 bis 0,003
	BERENYI	0,008	0,003
	BAUR	0,0038	0,001
Moor (trocken)	GEIGER	0,0004 bis 0,001	0,0009 bis 0,0015
	BERENYI	0,0006	0,0015
	BAUR	0,0008	0,001
Humus	BERENYI	0,013	0,005
	BAUR	0,0126	0,006
	BRACHT (1949)	0,0075 feucht	
		0,0025 trocken	
Lehmiger Humus	BRACHT	0,0102 feucht	
		0,0062 trocken	
Lehm (feucht)	GEIGER	0,008 bis 0,021	0,006 bis 0,016
	BAUR	0,0092	0,004
	BRACHT	0,0117	
	SCHUBERT		0,0082
Lehm (trocken)	GEIGER	0,0008 bis 0,006	0,006 bis 0,016
	BRACHT	0,0079	

Tabelle 1
Temperatur- und Wärmeleitfähigkeiten nach
verschiedenen Quellen

seines Wassergehaltes und des Anteils an Porenluft sehr stark und kann z. B. in einem gründlich durchfeuchteten Boden das Mehrfache des Normalwertes erreichen.

Durch einen hohen Anteil an Porenluft wird die Wärmeleitfähigkeit stark vermindert, so daß sich lockere, trockene Böden sehr stark er-

wärmen und besonders bei Strahlungswetter gegenüber festen, feuchten Böden einen großen Temperaturgradienten besitzen. Als Folge der großen Temperaturamplitude in der Oberschicht sind Wärme-/Kältewellen in leichtem Boden auch noch bis in große Tiefen zu verfolgen. Feuchte Böden dagegen erwärmen sich langsamer, aber gleichmäßiger.

Zudem kann in allen Böden eine sogenannte Doppelschichtung beobachtet werden, welche zusätzlich Gegensätze zwischen theoretisch zu erwartendem und praktisch beobachtetem Temperaturverhalten hervorruft (GEIGER 1961).

TOPERCZER (1947) spricht in diesem Zusammenhang davon, daß bis 50 cm Tiefe die Gesetze der Wärmeleitung praktisch nicht erfüllt werden. Somit ist die Berechnung erst für tiefere Schichten sinnvoll. Folgende Vorbedingungen müssen erfüllt sein:

1. Messung des Tagesganges der Temperatur in 50 cm Tiefe
 2. Wärme- und Temperaturleitfähigkeit sind bekannt
 3. Homogenität des Bodens
 4. tiefenkonstante Temperaturleitfähigkeitswerte
- } Idealisierung

2.3.

Möglichkeiten zur indirekten Bestimmung des thermischen Verhaltens von Böden

Zwischen der Temperaturschwankung in zwei verschiedenen Tiefen besteht unter idealisierten Bedingungen folgender Zusammenhang:

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 \exp\left(\Delta z \sqrt{\frac{\pi}{aT}}\right) \quad [K] \quad (1)$$

$\Delta t_1, \Delta t_2$ Temperaturamplitude in Tiefe 1 und 2 [K]

Δz Differenz der Tiefen [cm]

a Temperaturleitfähigkeit [cm^2s^{-1}]

T Periodendauer [s]

Die maximale Eindringtiefe von Temperaturschwankungen, unter der man die Tiefe versteht, in der die Temperaturamplitude nur noch 1/100 der Ausgangsschwankung beträgt,

läßt sich nach Umformung obiger Formel berechnen:

$$\Delta z = \frac{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}{\sqrt{\frac{\pi}{aT}}} \quad [\text{cm}] \quad (2)$$

Diese Formel kann natürlich auch zur Berechnung der Auftrittstiefe einer beliebigen Temperaturschwankung bei vorgegebener Ausgangsamplitude verwendet werden.

Die Laufzeit Δd von Temperaturwellen kann nach (3) bestimmt werden:

$$\Delta d = \Delta z \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{aT}} \quad [\text{s}] \quad (3)$$

Aufgrund der vorausgesetzten homogenen Boden- und Leitfähigkeitsverhältnisse besitzen alle so gewonnenen Angaben nur Schätzungs- bzw. Informationscharakter.

In den meisten Fällen wird man auf die Anwendung eines Wärmeumsatz- oder Wärmeleitfähigkeitsmessers, wie unter 2.2. angedeutet, verzichten müssen. Es bleibt also die Möglichkeit, die von verschiedenen Böden bekannten Wärme- und Temperaturleitfähigkeiten anzuwenden (Tabelle 1). Diese Zusammenstellung dokumentiert die große Unsicherheit von Wärmehaushaltskonstanten aus Substanzen, deren Struktur, Zusammensetzung und Wassergehalt nicht eindeutig bzw. universell definiert werden können und deren Homogenität vorausgesetzt werden muß. Das mit ihrer Hilfe berechenbare thermische Verhalten des Bodens kann also nur Anhaltswerte liefern.

3.

Der Jahresgang der Bodentemperatur, dargestellt mit Hilfe von Standardmeßreihen

3.1.

Bodenhorizont bis 50 cm Tiefe

Infolge des lokal sehr differenzierten thermischen Verhaltens der „Oberschicht“ von Böden ist es nicht möglich, die Ergebnisse von

Gebiet	Bodenkategorie	Station	Januar				Februar				März	
			Luft	Boden			Luft	Boden			Luft	Boden
				5 cm	20 cm	50 cm		5 cm	20 cm	50 cm		
B	leicht mittel	Neustrelitz	-0,7	-0,3	0,5	1,5	-0,2	-0,0	0,3	1,4	3,0	2,4
		Schwerin	-0,1	0,0	0,5	1,7	0,3	0,2	0,4	1,5	3,3	2,8
		Greifswald	-0,6	-0,0	0,5	2,0	-0,2	0,3	0,5	1,7	2,5	2,5
C	leicht	Potsdam	-0,7	-1,0	-0,6	0,8	0,1	-0,1	-0,0	0,7	3,6	3,5
		Wittenberg	-0,9	-0,2	0,5	1,3	-0,1	0,4	0,5	1,2	3,3	3,4
		Gardelegen	-0,1	0,3	0,8	1,7	0,7	0,8	1,0	1,7	4,0	4,0
	mittel schwer	Torgau	-0,2	-0,1	0,5	1,8	0,6	0,3	0,6	1,7	4,1	3,1
		Magdeburg	0,3	0,3	1,0	2,5	1,1	0,8	1,2	2,3	4,5	3,6
D	schwer	Görlitz	-0,8	-0,3	0,3	1,4	-0,1	0,2	0,5	1,1	3,4	2,6
		Erfurt	-0,7	-0,6	0,1	1,2	0,2	0,1	0,5	1,2	3,8	2,6
		Karl-Marx-Stadt	-0,7	-0,2	0,3	1,6	0,1	0,2	0,4	1,6	3,4	2,6
	mittel schwer mittel	Wien	-0,4	-0,5		1,6	0,2	-0,3		1,1	4,9	3,5
		Budapest	-1,1				1,0				5,8	
		Königsberg ¹	-2,7	-1,0		1,1	-2,0	-0,8		0,6	-0,3	0,6

Gebiet	Bodenkategorie	Station	Juli				August				September	
			Luft	5 cm	20 cm	50 cm	Luft	5 cm	20 cm	50 cm	Luft	Boden
B	leicht mittel	Neustrelitz	17,7	19,7	19,2	18,1	16,6	18,2	18,3	17,7	13,3	14,3
		Schwerin	17,5	19,6	19,0	18,1	16,7	18,1	18,1	17,6	13,6	14,6
		Greifswald	17,1	19,2	18,4	17,0	16,3	18,0	17,6	16,7	13,2	14,1
C	leicht	Potsdam	18,1	21,2	21,0	20,5	17,1	19,9	19,9	19,8	13,8	15,8
		Wittenberg	18,1	21,6	20,9	19,8	17,3	20,0	19,7	19,2	13,9	16,0
		Gardelegen	18,1	20,9	20,0	18,9	17,2	19,4	18,9	17,9	13,9	15,6
	mittel schwer	Torgau	19,0	20,1	19,4	18,3	17,9	18,9	18,6	18,0	14,5	15,0
		Magdeburg	18,8	20,1	19,2	17,8	17,9	18,7	18,6	17,6	14,6	15,2
D	schwer	Görlitz	18,3	19,5	18,9	18,2	17,4	18,2	18,1	17,9	14,1	14,6
		Erfurt	17,6	19,3	18,7	17,4	16,8	17,9	17,7	17,0	13,5	14,5
		Karl-Marx-Stadt	17,2	17,9	17,3	16,3	16,3	17,0	16,8	16,3	13,3	14,1
	mittel schwer mittel	Wien	19,3	23,6		21,3	18,3	21,5		20,4	14,7	15,9
		Budapest	22,2				21,4				17,4	
		Königsberg ¹	17,3	18,5		17,5	16,2	17,0		16,9	13,2	13,7

¹ [heute: Kaliningrad] – Bodentemperaturen 3 cm, 63 cm

Tabelle 2

Mittel der Luft- und Bodentemperatur bis 50 cm Tiefe [°C] in den Repräsentativgebieten mit einheitlicher Lufttemperatur der DDR (nach KLIMADATEN ... REIHE B 1980 und REIHE D 1981 sowie KLIMATOLOGISCHE NORMALWERTE 1956) und an den Vergleichsmeßstellen in Wien, Budapest und Königsberg [heute Kaliningrad] (nach Originalliteratur)

Es bedeuten:

Repräsentativgebiet B Nördlicher Teil des Binnentieflandes mit östlichem Küstengebiet

C mittlerer und südlicher Teil des Binnentieflandes

D Mittelgebirgsvorland

Momentanmessungen eines Standortes auf beliebige Standorte ohne Meßbetrieb zu übertragen. Für mehrterminige Mittel (z. B. Dekaden-, Monatswerte) wird dies unter Voraussetzung ähnlicher Bodenverhältnisse praktikabel, da die zeitliche Mittelung auch gewisse räumlich bedingte Unterschiede im Temperaturgang ausgleicht.

Einen Überblick über die Monatsmitteltemperaturen des Bodens bis 50 cm Tiefe im Gebiet der DDR gibt Tabelle 2. Sie ist auszugs-

weise und modifiziert aus den KLIMADATEN, REIHE D 1981 entnommen. Die Zuordnung der Stationen zu den Repräsentativgebieten mit einheitlicher Lufttemperatur (KLIMADATEN, REIHE B 1980) läßt das differenzierte Temperaturverhalten in Abhängigkeit von der Bodenkategorie deutlich erkennen. So sind die schweren Böden aller Gebiete in den Wintermonaten in 50 cm Tiefe im Mittel 0,5...1,7 K wärmer als die leichten, in 5 cm Tiefe sind kaum bodenartabhängige Unter-

			April				Mai				Juni			
			Luft		Boden		Luft		Boden		Luft		Boden	
	20 cm	50 cm		5 cm	20 cm	50 cm		5 cm	20 cm	50 cm		5 cm	20 cm	50 cm
	2,4	2,8	7,2	8,1	7,6	7,2	12,5	13,9	13,3	12,2	15,7	18,5	17,9	16,4
	2,5	2,7	7,4	8,2	7,7	7,2	12,6	14,2	13,5	12,3	15,6	18,8	17,9	16,5
	2,3	2,8	6,4	7,7	7,3	6,6	11,6	13,4	12,7	11,4	15,0	18,3	17,1	15,4
	3,3	3,4	8,0	9,8	9,4	8,9	13,4	15,8	15,4	14,7	16,3	20,6	20,3	19,2
	3,1	3,1	7,6	10,3	9,6	8,8	13,1	16,3	15,4	14,1	16,2	20,8	19,8	18,4
	3,6	3,6	8,2	10,1	9,4	8,6	13,5	15,8	14,9	13,7	16,3	19,9	18,8	17,5
	2,9	3,2	8,5	9,2	8,6	7,9	14,1	14,5	13,7	12,6	17,2	19,0	17,9	16,6
	3,4	3,7	8,8	9,1	8,5	7,8	14,1	15,0	13,7	12,3	17,0	19,1	17,7	16,1
	2,4	2,6	7,9	8,5	7,6	7,4	13,3	13,8	13,2	12,4	16,4	18,1	17,5	16,5
	2,8	2,5	8,0	7,9	7,4	6,6	13,0	13,6	12,9	11,4	15,8	17,8	16,9	15,3
	2,3	2,6	7,6	7,9	7,2	6,6	12,8	12,7	12,0	10,6	15,5	16,7	16,4	14,6
		3,6	9,3	10,9		9,1	14,3	17,4		15,6	17,3	21,8		19,4
		1,1	11,8				16,8				20,2			
			5,4	5,9		4,7	9,7	11,0		9,5	15,3	17,3		14,9
			Oktober				November				Dezember			
	14,8	15,0	8,2	9,3	9,3	10,7	3,4	3,8	4,8	6,1	0,5	0,8	1,7	3,3
	14,8	15,2	8,8	9,2	10,0	11,0	4,1	4,1	4,8	6,4	1,1	1,0	1,8	3,3
	14,3	14,4	8,4	9,2	9,5	10,6	3,8	3,9	4,7	6,5	0,8	0,9	1,8	3,6
	16,1	16,5	8,7	9,8	10,3	11,4	3,6	3,8	4,5	5,7	0,4	0,2	0,8	2,4
	16,1	16,2	8,7	10,2	10,5	11,4	3,5	4,0	4,8	6,2	0,2	0,8	1,5	2,8
	15,5	15,4	8,9	9,9	10,2	10,8	4,0	4,3	4,9	5,9	1,0	1,2	1,9	2,9
	15,1	15,4	9,3	9,6	10,1	11,1	4,2	4,0	5,0	6,5	0,9	0,9	1,8	3,3
	15,3	15,4	9,5	9,9	10,4	11,5	4,5	4,4	5,3	7,1	1,4	1,3	2,2	4,0
	14,9	15,3	8,9	9,4	10,0	10,9	3,7	3,8	4,7	6,1	0,4	0,7	1,4	2,8
	14,9	15,0	8,6	9,2	9,9	10,9	3,7	3,6	4,5	6,2	0,5	0,5	1,5	3,1
	14,2	14,5	8,5	9,3	9,7	10,8	3,6	3,8	4,6	6,3	0,4	0,8	1,5	3,2
		16,0	9,3	9,5		10,7	4,7	5,2		6,3	0,8	0,9		2,8
			11,3				5,8				1,5			
		14,5	6,9	7,6		9,8	1,9	2,9		5,3	-1,8	-0,3		2,2

schiede erkennbar. Von April bis September findet man umgekehrte Verhältnisse – die leichten Böden sind in 50 cm Tiefe 0,8...3,1 K wärmer als die mittleren und schweren. Während dieser Zeit kann auch in 5 cm Tiefe eine bodenartabhängige Temperaturdifferenzierung festgestellt werden – die Temperaturunterschiede zwischen leichten und schweren Böden erreichen bis zu 1,6 K. Im März und Oktober unterscheiden sich die Mitteltemperaturen der Repräsentativgebiete in allen Tiefen kaum voneinander.

Zum Vergleich sind in der Tabelle 2 die Lufttemperaturen und, soweit vorhanden, auch die Bodentemperaturen der im weiteren verwendeten Orte mit aus großen Tiefen gewonnenen Bodentemperaturreihen aufgeführt. Die Unterschiede im Temperaturverhalten der oberen

Bodenschicht können als durch klimatische Unterschiede (Lufttemperatur) maßgeblich geprägt angesehen werden.

3.2. Temperatur unterhalb 50 cm Tiefe

Über Temperaturmeßreihen aus Tiefen unter 1 Meter gibt es nur wenige Veröffentlichungen (siehe auch Bibliographie zum Thema Erdbo-
dentemperatur ANIOL 1965).

LAUSCHER (1962) erwähnt als größte im Routinebetrieb benutzte Meßtiefe eine belgische Reihe, die bis 19 m reicht. Über diese auch für Mitteleuropa sicher sehr interessante Reihe waren leider keine Veröffentlichungen zugänglich. Sehr große Meßtiefen sind auch aus Por-

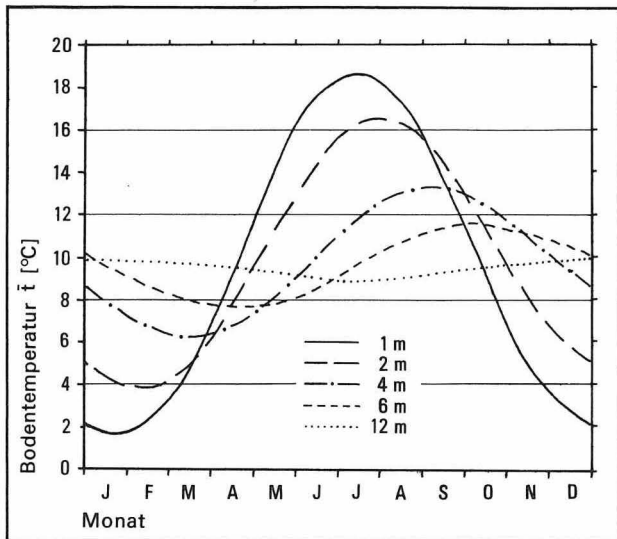


Abbildung 1
 Jahresgang der Bodentemperatur in unbewachsenem kiesigen Sandboden, Oberfläche schneefrei gehalten, Potsdam 1896...1945 (nach HAUSMANN 1950)

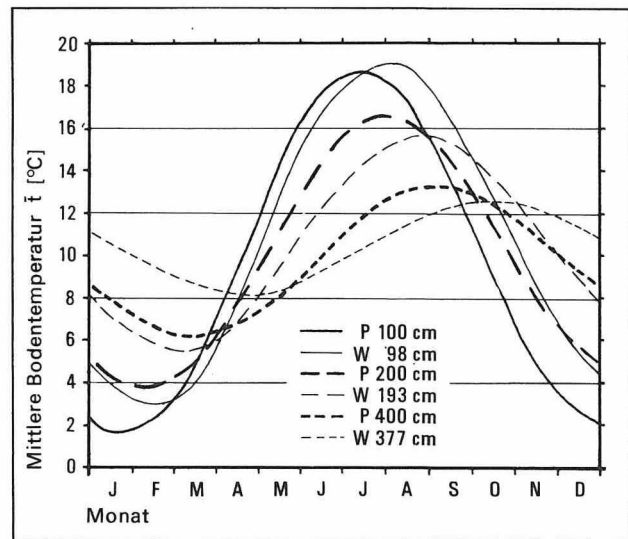
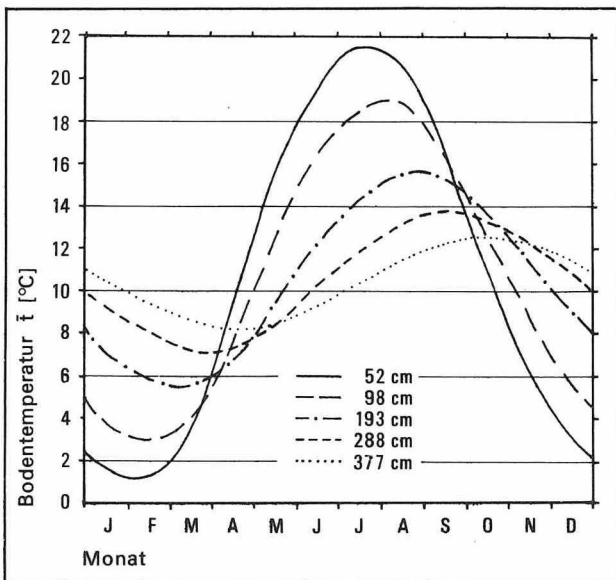


Abbildung 3
 Vergleich der mittleren Bodentemperaturen bis 4 m Tiefe von Potsdam (kiesiger Sand, unbewachsen) und Wien (kalkreicher Löß, grasbewachsen)

tugal und Argentinien mit 10 m bekannt. Folgende Reihen wurden zur Auswertung herangezogen:

1. Potsdam (HAUSMANN 1950)
2. Wien (TOPERCZER 1946)
3. Königsberg [heute Kaliningrad] (SCHMIDT, LEYST 1891/92)
4. Budapest (BATA 1955)

Abbildung 2
 Jahresgang der Bodentemperatur in kalkreichem Löß, Oberfläche grasbewachsen, Schneedecke nicht beseitigt, Wien 1911...1940 (Werte nach TOPERCZER 1947)



Lediglich die Potsdamer und die Budapester Reihe wurden bis in die Gegenwart unverändert fortgeführt. Neuere Veröffentlichungen von Meßergebnissen sind jedoch nicht bekannt.

Nachfolgend werden nur die auf Standortverhältnisse in der DDR abstrahierbaren Angaben aus den Standardmeßreihen, die sich auf eine Interpretation des allgemeinen Temperaturganges und einige wenige Spezifika beschränken, mitgeteilt.

3.2.1.

Die Potsdamer und die Wiener Reihe

Beide Reihen erwiesen sich für die Charakterisierung der Temperaturverhältnisse tiefer Bodenschichten in Mitteleuropa als besonders wertvoll. Während die Potsdamer Reihe ab 1894 in einem bis 6 m Tiefe geschütteten kiesigen Sand gewonnen wird, fanden die Wiener Messungen 1905...1945 in einem kalkreichen Löß mit ca. 30 cm Humusaufgabe statt. Da das Potsdamer Meßfeld ständig vegetations- und schneefrei gehalten wird (Grund: Homogenität der unter diesen Bedingungen begonnenen Reihe), repräsentieren die Messungen zwar nicht exakt das Temperaturverhalten von Sandböden in natürlicher Lagerung, liefern

Tiefe	Jahres- mittel	mittleres Maximum	Dekade, Monat	mittleres Minimum	Dekade, Monat	Einzelwerte				Jahres- mittel absolute Amplitude
						mittlere Am- plitude	absolute Am- plitude	abso- lutes Maximum	abso- lutes Minimum	
1 m	10,9	20,6	III 7	1,0	II 2	19,6	25,4	22,8	-2,7	2,6
2 m	10,4	17,2	II 8	3,6	I 3	13,6	17,2	18,7	1,6	1,9
4 m	10,0	13,7	III 9	6,3	I 4	7,3	9,7	14,6	4,9	1,5
6 m	9,9	11,9	III 10	7,8	I 5	4,2	5,9	12,8	6,9	1,3
12 m	9,7	10,0	II 2	9,3	I 8	0,7	2,0	10,7	8,9	1,3

Tabelle 3
Mittelwerte und Extrema [°C], deren mittlere Auftrittszeit [Dekade, Monat] sowie Amplitude [K],
Potsdam 1894 ... 1948

aber dennoch brauchbare Aussagen über die in Mitteleuropa überhaupt möglichen tiefenabhängigen Temperaturschwankungen. Das Wiener Meßfeld war grasbestanden und wurde nicht vom Schnee geräumt. Da sich Wien temperaturmäßig nur wenig von den Verhältnissen im Lufttemperaturrepräsentativgebiet C der DDR (mittlerer und südlicher Teil des Binnentiefenlands – vergleiche Tabelle 2) unterscheidet, lassen die Bodentemperaturmessungen eine gewisse Extrapolation auf die mittelschweren bis schweren landwirtschaftlich genutzten Böden dieses Gebietes zu.

Die Jahresgänge der Bodentemperatur an beiden Orten sind in Abbildung 1 und 2 dargestellt. Aus Gründen der Anschaulichkeit (Monatswerte sind zwar für Wien, aber nicht für Potsdam veröffentlicht) wurde in Abbildung 3 ein graphischer Vergleich der Temperaturverläufe der entsprechenden Tiefen beider Reihen vorgenommen. Es zeigt sich, daß der Wiener Boden ein deutlich ausgeglicheneres thermisches Verhalten als der Potsdamer hat. Die Ursache ist in der stärker puffernden Wirkung des Lösses im Zusammenhang mit dem Bodenbewuchs zu se-

hen, wodurch der Temperaturgang ausgeglichener wird. In folgenden Zeitabschnitten sind die Bodentemperaturen im Mittel um 1...3 K wärmer als in Potsdam:

- 1 m Mitte Juli...Anfang März
- 2 m Anfang September...Ende März
- 4 m Mitte Oktober...Ende Mai

In den Tabellen 3, 4 und 5 sind einige Kennzahlen der Bodentemperatur an beiden Orten mitgeteilt:

Bis 4 m Tiefe unterscheiden sich die Jahresmittel beider Reihen nur geringfügig voneinander. Der Wiener Löß wirkt im Zusammenhang mit dem Bewuchs auf die Temperaturwellen stärker amplitudenvermindernd und phasenverzögernd als der Potsdamer Sand. Während im leichten unbewachsenen Boden die Temperatur erst in 12 m Tiefe etwa spiegelbildlich der an der Erdoberfläche verläuft, ist dies im bewachsenen mittelschweren schon in 7,3 m (berechnet) der Fall. Dies entspricht Temperaturwellenlaufzeiten von ca. 15 bzw. 25 Tagen je Meter.

Die Mitteltemperatur geht mit wachsender Tiefe zurück. In 12 m beträgt sie in Potsdam

Tabelle 4
Laufzeiten [d] der Wärme- und Kältewellen in die Tiefe, Potsdam 1894 ... 1948

Horizont	Laufzeit [d]					
	Wärmewellen			Kältewellen		
	Mittel	Maximum	Minimum	Mittel	Maximum	Minimum
1... 2 m	17	69	3	21	73	1
2... 4 m	38	71	13	30	64	10
4... 6 m	38	63	23	31	51	8
6...12 m	102	132	74	98	115	76

Tiefe (cm)	Jahresmittel	mittleres Maximum	mittleres Minimum	mittlere Amplitude	absolutes Maximum	absolutes Minimum	absolute Amplitude
52	10,7	21,3	1,1	20,2	22,9	-1,1	24,0
98	10,5	18,6	2,9	15,7	21,4	1,2	20,2
193	10,4	15,3	5,5	9,8	16,4	4,1	12,3
288	10,3	13,5	7,2	6,2	14,3	6,2	8,1
377	10,3	12,3	8,2	4,1	13,0	7,4	5,6

Tabelle 5
Jahresmittel und Monatsextrema der Temperatur [°C] sowie ihre Amplitude in verschiedenen Tiefen [K],
Wien 1905 ... 1944

noch 9,7°C. Da die geothermische Isothermie nur wenige Meter tiefer liegt, kann es als sicher gelten, daß das Niveau des Jahresmittels der Lufttemperatur (Potsdam: 8,5°C), wie man es allgemein für langjährige Bodentemperaturisothermien als normal ansieht (MÜLLER 1958), nicht erreicht wird. Auch die Wiener und Königsberger Messungen lassen schließen, daß die geothermische Isothermie etwa 1 K wärmer als das langjährige Lufttemperaturmittel ist.

Die Temperaturextrema des mittelschweren Bodens erreichen die des leichten bei weitem nicht. In leichten Böden tritt in 2 m Tiefe kein Frost mehr auf, in 4 m werden 5°C, in 12 m 9°C kaum unterschritten. Mehr als 15°C werden schon in 4 m Tiefe nicht mehr festgestellt. In mittleren und schweren Böden schwankt die Temperatur in dieser Tiefe nur noch zwischen 7 und 13°C, schon in 2 m werden 4°C nicht mehr unterschritten. Die größte Frosteindringtiefe wurde in Potsdam mit 150 cm, in Wien mit 81 cm festgestellt.

Die Extrema können in großen Tiefen als Summe kurzperiodischer gleichgerichteter Einflüsse aufgefaßt werden. Die Eintrittszeiten der Maxima und Minima sowie die Phasendifferenzen schwanken sehr stark in allen Bodenhorizonten (Tabelle 3). In leichten Böden dringen Wärmewellen bis 1 m rascher vor als Kältewellen, darunter sind die Verhältnisse umgekehrt (Tabelle 4). In schweren Böden liegt diese Umkehrzone in geringerer Tiefe (siehe Budapest, Tabelle 7).

Langanhaltende Witterungsanomalien bewirken ein langsames tiefes Eindringen der Störungswellen. Die Eindringtiefe wird bestimmt durch den Betrag der Temperaturveränderung an der Bodenoberfläche und den Bo-

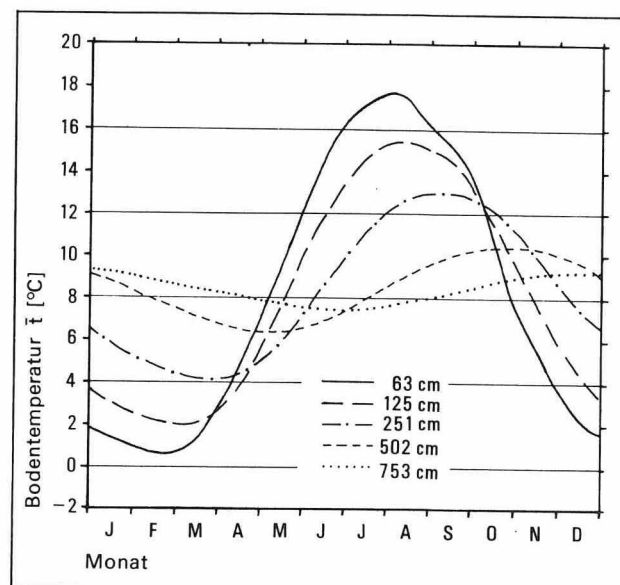
denwassergehalt (Temperaturleitfähigkeit). In leichten, unbewachsenen Böden dringen höchstens 98 % der Temperaturwellen aus 1 m bis in 2 m Tiefe, 23 % aus 2 m bis in 4 m und 7 % aus 4 m bis in 6 m Tiefe vor. Erst mehrere trendartig aufeinanderfolgende gleichgerichtete Abweichungen der Jahresmitteltemperatur bzw. der Sommer- und Wintertemperaturen bewirken deutliche Änderungen der Mitteltemperatur in 12 m Tiefe.

3.2.2.

Die Reihen von Königsberg [heute Kaliningrad] und Budapest

Wegen der klimatisch anderen Bedingungen (s. Lufttemperatur Tabelle 2) sei hier nur informationshalber auf beide Reihen eingegangen:

Abbildung 4
Jahresgang der Bodentemperatur
in schneefrei gehaltenem Geschiebemergel,
Königsberg [heute Kaliningrad] 1873...1886
(nach SCHMIDT und LEYST 1892)



Tiefe (cm)	mittlere Amplitude des Monatsmittels	mittleres Tagesmaximum	mittleres Tagesminimum	mittlere Amplitude der Tagesmittelwerte	größtes Tagesmittel	kleinstes Tagesmittel
31	18,3	21,5	-2,9	24,5	22,7	-6,8
63	16,8	19,2	-0,5	19,7	20,3	-3,2
123	13,3	16,1	1,7	14,5	17,1	0,5
251	8,8	13,2	3,9	9,3	13,9	3,2
502	3,9	10,5	6,4	4,0	10,9	6,0
753	1,8	9,3	7,5	1,8	9,4	7,3

Tabelle 6
Extremwerte [°C] und Amplituden [K] der Bodentemperatur, Königsberg [heute Kaliningrad], 1873 ... 1886

Die Königsberger Temperaturmessungen in schneefrei gehaltenem Geschiebemergel bis 7,50 m Tiefe aus den Jahren 1873...1886 brachten als erste die Übereinstimmung des nach der Wärmebewegungstheorie vermuteten Temperaturganges im Boden mit seinem tatsächlichen Verlauf zutage. Abbildung 4 zeigt den mittleren Temperaturgang, Tabelle 6 die Extrema sowie die Schwankungsbreite der Bodentemperatur.

Leider lassen sich diese Werte infolge der unterschiedlichen Bezugszeiträume kaum mit den anderen in dieser Arbeit verwendeten Reihen vergleichen. Dennoch wird die stark puffernde Wirkung des Geschiebemergels deutlich. So erreicht die mittlere Temperaturamplitude in 123 cm mit 13,3 K bei weitem nicht den Potsdamer Wert von 19,6 K aus der vergleichbaren Tiefe 100 cm. Auch die Amplituden in 63 cm und 31 cm Tiefe liegen mit 16,8 K bzw. 18,3 K noch deutlich darunter. Dieses Verhalten wird teilweise aber auch durch die insgesamt niedrigere Lufttemperatur bedingt. Als Folge der relativ milden Winter des Bezugszeit-

raumes wurde eine maximale Frosteindringtiefe von lediglich 1,20 m festgestellt.

Die Budapester Reihe ab 1912 wurde in schwerem Boden gewonnen und reicht bis 4 m Tiefe. Die Mitteltemperatur der Luft liegt in allen Monaten mit Ausnahme des Januar um 1...4 K über der von Potsdam, die mittleren und absoluten Maxima der Bodentemperatur (Tabelle 7) erreichen jedoch nicht die Potsdamer Werte vergleichbarer Tiefen. Der Bodentemperaturgang insgesamt ist noch etwas ausgeglichener als der von Wien, obwohl die absolute Amplitude der Lufttemperatur mit 23,3 K die höchste aller verwendeten Orte ist (Potsdam 18,8 K, Wien 19,7 K, Königsberg 20,0 K). Hier wird die sehr starke Temperaturpufferung des schweren Budapester Bodens deutlich. Die maximale Frosteindringtiefe beträgt 82 cm und ist damit ähnlich wie in Wien.

In Tabelle 8 wird ein schon bei der Abhandlung der Potsdamer Reihe erwähnter Effekt deutlich – Wärmewellen dringen mindestens bis 50 cm rascher in die Tiefe als Kältewellen.

Tabelle 7
Mittlere und absolute Extrema [°C] und Temperaturamplituden [K], Budapest 1912 ... 1941

cm	mittleres Maximum	mittleres Minimum	mittlere Amplitude	absolutes Maximum	absolutes Minimum	absolute Amplitude
50	21,3	1,1	20,2	26,0	-2,4	28,4
100	18,8	3,6	15,2	20,9	1,4	19,5
150	17,1	5,0	12,1	18,4	2,8	15,6
200	16,0	6,4	9,6	17,0	4,2	12,8
300	14,3	7,8	6,5	15,2	6,4	8,8
400	13,1	9,1	4,0	13,6	8,2	5,4

cm	Laufzeit [d]	
	Wärmewellen	Kältewellen
2	0	0
5	0	1
10	0	1
20	1	2
50	21	23
100	32	26
150	42	34
200	58	49
300	77	67
400	105	90

Tabelle 8
Laufzeit der Wärme- und Kältewellen in die Tiefe,
Budapest 1912 ... 1941

3.3. Rückschlüsse auf die Bodenbeschaffenheit aus den Temperaturamplituden

Abbildung 5 zeigt die mittleren Temperaturamplituden an den 4 Stationen in Abhängigkeit von der Tiefe (halblogarithmische Darstellung). Mit Hilfe dieser normierten Darstellung lassen sich Unterschiede im thermischen Verhalten der Böden sowie Bodeninhomogenitäten relativ gut erkennen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Angabe der mittleren Maxima und Minima verzichtet. Sie sind den Tabellen zu entnehmen.

Auffallend ist für alle Meßreihen der fast lineare Verlauf der Amplitudenkurve unterhalb 50 cm Tiefe, der einer logarithmischen Änderung der Temperaturamplitude entspricht. Er läßt auf relativ homogene Bodeneigenschaften bis 6 m Tiefe an hellen Standorten schließen.

Markant ist der Knick in der Potsdamer Amplitudenkurve bei 6 m Tiefe. Er signalisiert ein verändertes thermisches Verhalten des bis hier geschütteten kiesigen Sandes gegenüber den natürlich gelagerten Sedimenten in größerer Tiefe. Besonders deutlich wird die geringe Wärmekapazität des Potsdamer sehr leichten Bodens und die dadurch verursachte rasche und nachhaltige Reaktion auf Erwärmungs- und Abkühlungsabschnitte: Obwohl hier die geringsten Jahresamplituden der Lufttemperatur auftreten, liegen die Amplituden der Bodentemperatur um 6...2 K über denen der anderen Stationen aus vergleichbaren Tiefen.

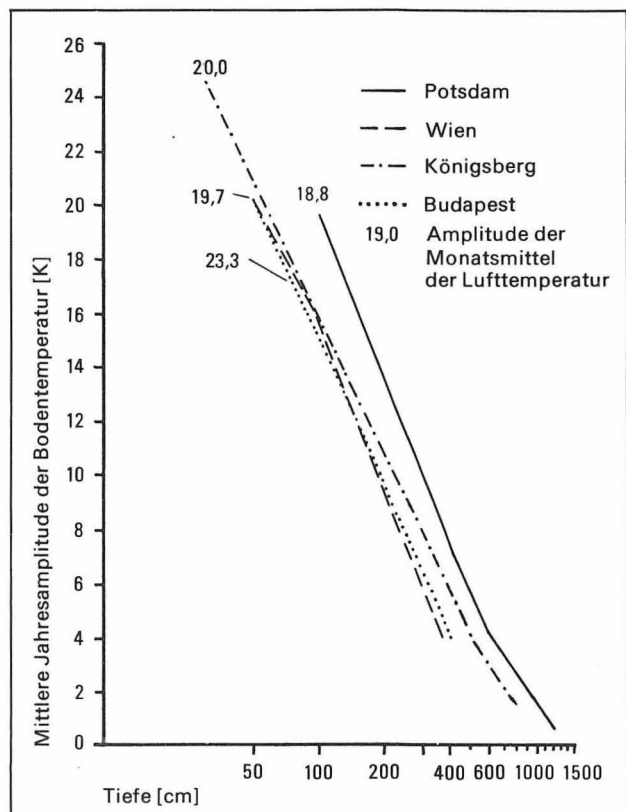
Der Budapester Boden besitzt offensichtlich die größte Wärmekapazität, denn die Amplituden der Bodentemperatur unterscheiden sich in allen Tiefen kaum von den Wiener Amplituden, obwohl die Lufttemperatur den weitaus größten Schwankungsbereich besitzt.

Dem Königsberger Boden muß eine Zwischenstellung zugewiesen werden. Zu beachten ist in jedem Falle, daß diese Reihe nur beschränkt mit den übrigen zu vergleichen ist.

4. Langfristige Schwankungen im Bodentemperaturgang als Indikator für Klimapendelungen

Anhand der Jahresmittel der Bodentemperatur lassen sich recht gut Klimapendelungen bzw. mehrjährige Temperaturanomalien erkennen,

Abbildung 5
Mittlere Jahresamplituden der Bodentemperatur in Abhängigkeit von der Tiefe und die Amplituden der Lufttemperaturmonatsmittel in Potsdam, Wien, Königsberg [heute Kaliningrad] und Budapest



denn die Temperatur tiefer Schichten (als Begrenzungstiefe sei das tiefste Niveau aller Meßreihen angenommen) reagiert erst auf andauernde oder trendartig in mehreren Folgejahren auftretende Anomalien durch eine deutliche Temperaturänderung. Eindrucksvoll wird dies bei der Interpretation der Potsdamer Reihe von HAUSMANN (1950) dargestellt. MÜLLER (1958) beschäftigt sich in seiner Arbeit mit dem langfristigen Bodentemperaturverhalten an mehreren europäischen Beispielsstationen.

Aus beiden Arbeiten lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Die auch großräumig nachweisbaren Temperaturänderungen im Erdboden laufen nahezu parallel denen der Luft. Frosteinfluß und Bodenfeuchtegang sind im Langzeitraum sichtlich von untergeordneter Bedeutung.

2. Die Schwankungen der Zehnjahresmittel sind bis 4 m Tiefe etwa von gleicher Größenordnung wie die der Luft, in 12 m Tiefe sind sie etwas geringer. Demnach ist *langfristig* kaum ein Dämpfungseinfluß des Bodens nachweisbar.

3. Die Sommer- und Winterwitterung hat den maßgeblichen Anteil am Temperaturverhalten in der Tiefe. Aufeinanderfolgende kühle (kalte) Sommer (Winter) bewirken eine tiefgreifende Abkühlung, zu warme Jahreszeiten eine Erwärmung.

5. Eindringtiefe von Bodenfrost

Da Kenntnisse über die Frosteindringtiefe für viele Bereiche der Volkswirtschaft von großem Interesse sind, sei abschließend darauf noch einmal näher eingegangen. Es steht die Frage, ob die bei der Abhandlung der 4 Bodentemperaturmeßreihen mitgeteilten Frosteindringtiefen wirklich als allgemeingültig angesehen werden können oder ob sie nur charakteristisch für den jeweiligen Standort sind.

Hierfür stellt eine Arbeit von ANIOL (1952) eine gute Hilfe dar. Sie enthält für den Zeitraum 1905...1951 maximale Frosteindringtiefen, die zwar ausnahmslos von Orten auf dem Gebiet der BRD stammen, sich aber ohne

einen größeren Fehler zu begehen auch auf die DDR anwenden lassen. Alle Angaben wurden in nicht vom Schnee befreiten, aber vegetationslosen Böden gewonnen. So betragen die maximalen Eindringtiefen in leichten Böden 90...130 cm, teilweise aber auch weniger als 70 cm.

Während in unbewachsenen leichten Böden der Frost in 15 % aller Jahre bis 1 m Tiefe vordringt, bleiben mittlere bis schwere Böden in dieser Tiefe praktisch frostfrei. Lediglich in 30 % aller Jahre unterschreitet er in solchen Böden 50 cm. Aus der Potsdamer und der Wiener Reihe läßt sich unterhalb 50 cm für leichten Boden eine Frosteindringgeschwindigkeit von $2,6 \text{ cm d}^{-1}$ errechnen, in mindestens mittelschwerem Boden beträgt sie nur $0,5 \text{ cm d}^{-1}$. Hoher Bodenwassergehalt setzt Frosteindringtiefe und -geschwindigkeit herab.

In Bremen, wo die Messungen in schneefreiem Sandboden durchgeführt wurden, konnte 1929 eine maximale Eindringtiefe von 150 cm festgestellt werden. Die Minimumtemperatur betrug zu dem Zeitpunkt in 1 m Tiefe $-2,2^\circ\text{C}$. Diese Werte stimmen gut mit den Potsdamer Messungen überein. Zur Erinnerung: Im Februar 1929 wurde in Potsdam die bisher größte Frosteindringtiefe mit ebenfalls 150 cm beobachtet, die Minimumtemperatur in 1 m Tiefe betrug $-2,7^\circ\text{C}$. Das Mittel der Lufttemperatur erreichte mit $-4,8^\circ\text{C}$ im Januar und $-10,0^\circ\text{C}$ im Februar ungewöhnlich niedrige Werte. Somit kann davon ausgegangen werden, daß größere Frosteindringtiefen in Mitteleuropa auch in Strengwintern nicht auftreten.

Literatur

ALBRECHT, F.:

Ein Meßgerät für die Messung des Wärmeumsatzes im Erdboden. — In: Meteor. Zeitschr. — Braunschweig 49 (1932), S. 294...295.

ALISSOW, B. P.:

Lehrbuch der Klimatologie. — Berlin, 1956.

- ANIOL, R.:
Die größten Bodenfrosttiefen. — In: Naturwiss. Rundschau. — Stuttgart 5 (1952), 11, S. 493...495.
—: Beobachtungsergebnisse der Erdbodentemperatur. — In: Bibliographie d. Dt. Wetterdienstes. — Offenbach 18 (1965).
- BATTA, E.:
Tägliche Normalwerte der Bodentemperatur und die Bestimmung einer Aussaattemperatur. — In: Időjaras. — Budapest. 59 (1955), 6, S. 351...358.
- BAUR, F.:
Linkes Meteorologisches Taschenbuch (Neue Ausgabe). Bd. 2. — Leipzig, 1970.
- BERENYI, D.:
Mikroklimatologie. — Stuttgart, 1967.
- BRACHT, J.:
Über die Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens und des Schnees und den Wärmeumsatz im Erdboden. — Berlin, 1949. — (Veröff. d. geophys. Inst. d. Univ. Leipzig: 2. Ser.: Spezialarbeiten; 14, 3).
- GEIGER, R.:
Klima der bodennahen Luftschicht. — Braunschweig, 1961.
- HAUSMANN, G.:
Unperiodische Schwankungen der Erdbodentemperaturen in 1 m bis 12 m Tiefe. — In: Zeitschr. f. Meteorol. — Berlin 4 (1950), 12, S. 363...372.
- KLIMADATEN DER DDR:
Ein Handbuch für die Praxis. Reihe B; Bd. 1: Lufttemperatur. — Potsdam, 1980.
—: Reihe D; Bd. 1: Agrarmeteorologie. — Potsdam, 1981
- KLIMATOLOGISCHE NORMALWERTE für das Gebiet der DDR (1901...1950). Lfg. 1. — Berlin, 1955.
- KOITZSCH, R.:
Versuche zur Bestimmung des Wassergehaltes des Erdbodens auf thermischer Grundlage. — Abh. d. Meteor. Dienstes d. DDR. — Berlin — 54 (1960).
- LAUSCHER, F.:
Das Weltnetz der Bodentemperaturmeßstellen. — In: Wetter und Leben. — Wien 14 (1962), 9/10, S. ...223.
- MÜLLER, W.:
Großräumige Temperaturänderungen im Erdboden seit 1911. — In: Meteorol. Rundschau — Berlin [West], Heidelberg 11 (1958), 5, S. 145...150.
- SCHMIDT, A., und E. LEYST:
Theoretische Verwertung der Königsberger Bodentemperaturbeobachtungen. — In: Schriften d. physikal. ökonom. Gesellschaft zu Königsberg in Pr. — Königsberg 32 (1981), S. 97...168; 33 (1892), S. 1...67.
- SCHUBERT, J.:
Der jährliche Gang der Luft- und Bodentemperatur und der Wärmeaustausch im Erdboden. — Berlin, 1900.
- TOPERCZER, M.:
Bodentemperaturen in Wien 1911 — 1944. — In: Jb. d. Zentralamtes f. Meteorol. u. Geodynamik 1946, Anh. 6. — Wien, 1947.
- TREMMELE, J.:
Zeitverhalten der Bodentemperatur in einem Auelehm. — Inst. f. Geogr. u. Geoökol. — Leipzig: Ingenieurabschlußarbeit, 1981 (unveröff.).