

ZEITREIHENANALYSE DER TEMPERATUR- DYNAMIK EINES SANDBODENS

YAKOV KUZYAKOV^{1,*}, JÖRG RUHLMANN², BERND GEYER¹
und BODO GUTEZEIT²

¹*Humboldt Universität zu Berlin, Institut für Gärtnerischen Pflanzenbau, Germany*

²*Institut für Gemüse und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt e. V., Germany*

(Received 13 July 1996)

Die Stundenwerte der Temperatur eines Sandbodens wurden schichtweise bis zur Tiefe von 1 m mit Hilfe der Zeitreihenanalyse untersucht. Es wurden die Verzögerung des Tagesganges der Bodentemperatur gegenüber der der Lufttemperatur und die Dämpfung der täglichen Amplitude der Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Bodentiefe berechnet.

Die Verzögerung des Temperaturverlaufs in Abhängigkeit von der Bodentiefe wurde durch die Krosskorrelation zwischen einzelnen Temperaturmeßreihen bestimmt. Diese Abhängigkeit war linear: je 10 cm Bodenschicht wurde eine Verzögerung der Temperaturausbreitung um ca. 2 Stunden berechnet. Die Dämpfung der Amplitude des Tagesganges der Temperatur wurde als Zusammenhang zwischen den "saisonalen" Komponenten des Tagesganges der Temperatur bei "additiver Census-1-Decomposition" und der Bodentiefe bestimmt. Diese Abhängigkeit war exponentiell. Ein Pflanzenbestand wirkte als ein zusätzlicher Puffer sowohl auf die Dämpfung als auch auf die Verzögerung.

Die ermittelten Parameter ermöglichen es, die Bodentemperatur bis zur Tiefe von 30 cm in Abhängigkeit von der Lufttemperatur in 5 cm Höhe mit einer mittleren Abweichung von $< \pm 1,1$ K und einem Korrelationskoeffizienten $> 0,97$ zu berechnen. Die Simulation der Bodentemperatur in 50 und 100 cm Tiefe war mit dem gewählten Ansatz ungenauer.

STICHWORTER: Bodentemperaturdynamik, Abhängigkeit von der Bodentiefe, Zeitreihenanalyse, Modellierung

TIME SERIES ANALYSIS OF TEMPERATURE DYNAMICS OF A SANDY SOIL

A time series analysis was used to investigate changes in hourly-measured temperatures to a depth of one meter in a sandy soil. The delay in the course of daily soil temperatures compared with that of air temperatures, as well as the reduction of the amplitude of temperature changes with soil depth, was calculated.

The delay of temperature changes with the soil depth was determined with a cross correlation function between individual measured variants of soil temperature. The relation was linear; for each 10 cm of soil depth, a 2 hour delay was typical. The amplitude reduction of temperature was exponentially related to seasonal maxima of daily temperature changes as affected by both Census-1-Decomposition and soil depth. The presence of a plant canopy increased both the amplitude reduction and lag time of daily soil temperature changes.

The calculated parameters allowed simulation of soil temperature to a depth of 30 cm, based on air temperature 5 cm above the soil, with a mean difference of $< \pm 1,1$ K and a correlation coefficient of $r > 0,97$. The simulation of soil temperature changes at depth 50 and 100 cm was not accurate with this model.

KEY WORDS: Soil temperature dynamics, depth dependence, time series analysis, modelling

*Humboldt-Universität, Theodor-Echtermeyer-Weg, D-14979 Großbeeren, Germany

1. EINLEITUNG

Für die Simulation des Umsatzes von organischer Substanz im Boden ist die Kenntnis der Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen notwendig, da biochemische Prozesse im allgemeinen temperaturabhängig sind. Für die modellhafte Abbildung dieser in vielen Experimenten ermittelten Temperaturabhängigkeit wurde mehrfach die Q_{10} -Funktion genutzt, wobei für Q_{10} Werte zwischen 2 und 2,5 angegeben werden (Freytag, 1986; Freytag u.a., 1991; Kartschall und Franko, 1987). Dabei wurden alle Untersuchungen im Brutschrank bei konstanter Temperatur durchgeführt. Im Gegensatz dazu betragen unter mitteleuropäischen Klimabedingungen die Unterschiede zwischen Tagesmaximum und -minimum der Bodentemperatur bis zu 20 K. Sie sind besonders in den obersten 10–20 cm ausgeprägt. Die meisten C und N-Bodendynamikmodelle berechnen aber den Umsatz der organischen Substanz nur aufgrund der Tagesmitteltemperatur (Engel u.a., 1993). Da bei der Q_{10} -Funktion die Temperatur in der Potenz steht, ist die Auswirkung eines Tages mit konstanter Tagestemperatur auf den C-N-Umsatz nicht gleich einem Tag, mit einer zwar gleichen Tagesmitteltemperatur aber einer großen Tag-Nacht-Temperaturschwankung. So beträgt die berechnete zusätzliche Mineralisierung der organischen Substanz an einem Tag mit einer Tag-Nacht-Differenz von 15 K ca. 7% im Vergleich zu einem Tag mit konstanter Temperatur (Kalkulation für $Q_{10} = 2$). In vielen Experimenten, in denen die C-N-Transformation im Boden und die Änderung der Mikroorganismenpopulationen verfolgt wird, besonders bei der Verwendung von longitudinalen (zerstörungsfreien) Meßmethoden mit relativ kurzen Meßintervallen (z.B. Stunden, Minuten), können diese Unterschiede zu Interpretationsfehlern führen, bzw. die berechneten Geschwindigkeitskonstanten überschätzt sein. Daraus ergibt sich für viele Untersuchungen von Bodenprozessen die Notwendigkeit die Temperatur in kürzeren Zeitabständen als einem Tag in mehreren Tiefen zu kennen. Für ihre Bestimmung ist die Simulation inzwischen eine effektive und sichere Methode geworden.

In den meisten C- und N-Bodendynamikmodellen wird die Bodentemperatur mit Hilfe der Wärmeleitungsgleichung oder seltener mittels der Dämpfungsfunktion berechnet (Übersicht bei Engel *et al.*, 1993). Unsere Überprüfung des im Modell CANDY (Franko, 1989) verwendeten Temperaturmoduls (Wärmeleitungsgleichung) ergab eine unerklärliche 2-tägige Verzögerung der Simulationsergebnisse gegenüber den Meßwerten. Auch ein entwickelter Pflanzenbestand bewirkte keine Änderung der simulierten Bodentemperatur im Vergleich zur Brache. Deshalb war es das Ziel dieser Arbeit, die Wirkung der Lufttemperatur auf

- die Temperatursausbreitung im Boden in Abhängigkeit von der Tiefe zu untersuchen,
- die zusätzliche Wirkung des Pflanzenbestandes einzuschätzen und
- ein Bodentemperaturmodell vorzuschlagen, in dem kürzere Zeitintervalle als 1 Tag und nur die Lufttemperatur als Inputgröße verwendet werden.

2. MATERIAL UND METHODEN

Für die Bestimmung des Temperaturverlaufs in Abhängigkeit von Bodentiefe wurden die Stundenmittel der Bodentemperatur bis 1 m Tiefe in 5 Schichten

(5, 15, 25, 50, 100 cm) und die der Lufttemperatur in 2 Schichten (5 und 200 cm) verwendet.

Die Bodentemperatur wurde unter Brache und unter zwei unterschiedlich mit Stickstoff (N_0 -ungedüngt, N_{240} -gedüngt mit 240 kg/ha N als Kalkammonsalpeter) versorgten Porreebeständen [*Allium porrum*, L] stundenweise vom Anfang Mai bis Ende Oktober 1994 gemessen. Der Boden ist ein Sandtieflerhmstaugley (gleyic Cambisol (FAO-UNESCO, 1990)) mit (5,5% Ton+Feinschluff, 0,7% Gesamtkohlenstoff; 1,45 g/cm³ Trockenrohichte; 2,63 g/cm³ Trockensubstanzdichte; 20 Vol. % Feldkapazität und 4,5 Vol. % permanenten Welkepunkt. Ab ca. 100 cm Bodentiefe beginnt eine stauwasserdichte Lehmschicht.

Die Bodentemperatur wurde mit geeichten Platinwiderstandstemperaturfühlern PT-100 gemessen. Die Temperaturfühler wurden horizontal von einem seitlich an jeder Parzelle (4 × 5 m²) befindlichen Installationsschacht aus eingebaut. Die Lagerung des Bodens in Profil blieb damit weitgehend ungestört.

Die Auswertung der Ergebnisse der Temperaturmessung erfolgte mit Hilfe der Zeitreihen- und Regressionsanalyse.

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die den Untersuchungen zugrundeliegende Hypothese war, daß sich die vertikale Wärmeausbreitung mit zunehmender Bodentiefe und mit steigender Pflanzenmasse pro Flächeneinheit verzögert und mit gedämpfter Amplitude erfolgt. Da der Tagesgang der Temperatur eine ausgeprägte Periodizität anweist, bot sich die Zeitreihenanalyse zur Answertung dieser Untersuchungen an. Mittels dieser konnten Zusammenhänge zwischen den periodischen Prozessen festgestellt und charakterisiert werden.

3.1. Bestimmung der Verzögerung

Für die Bestimmung der Abhängigkeit der Verzögerung der Wärmeausbreitung von der Bodentiefe wurden die Krosskorrelationsfunktionen (CCF) zwischen allen einzelnen differenzierten Temperaturmeßreihen berechnet. Die Differenzierung ist für das Abfiltern der niederfrequenten Komponente – des Trends und der mehrtägigen Schwankungen der Temperatur notwendig. Die zeitliche Verschiebung, bei der der maximale Korrelationskoeffizient zwischen zwei Meßreihen festgestellt wird, entspricht der Verzögerung der Wärmeausbreitung zwischen den einzelnen Bodenschichten (Abb. 1). Die CCF wurden für alle Temperaturmeßreihen der jeweiligen Parzelle zueinander berechnet. Der Zusammenhang zwischen der so berechneten zeitlichen Verzögerung und der Bodentiefe (Abb. 2) war linear (Gl. 1):

$$\text{Verzögerung}_{(\text{Tiefe})} = 0,21 \cdot \text{Tiefe} - 0,89 \quad r^2 = 0,98 \quad [1]$$

mit: *Verzögerung* in Stunden; *Tiefe* in cm.

Für den untersuchten Boden konnte je 10 cm Schicht eine Verzögerung von ca. 2 Stunden berechnet werden.

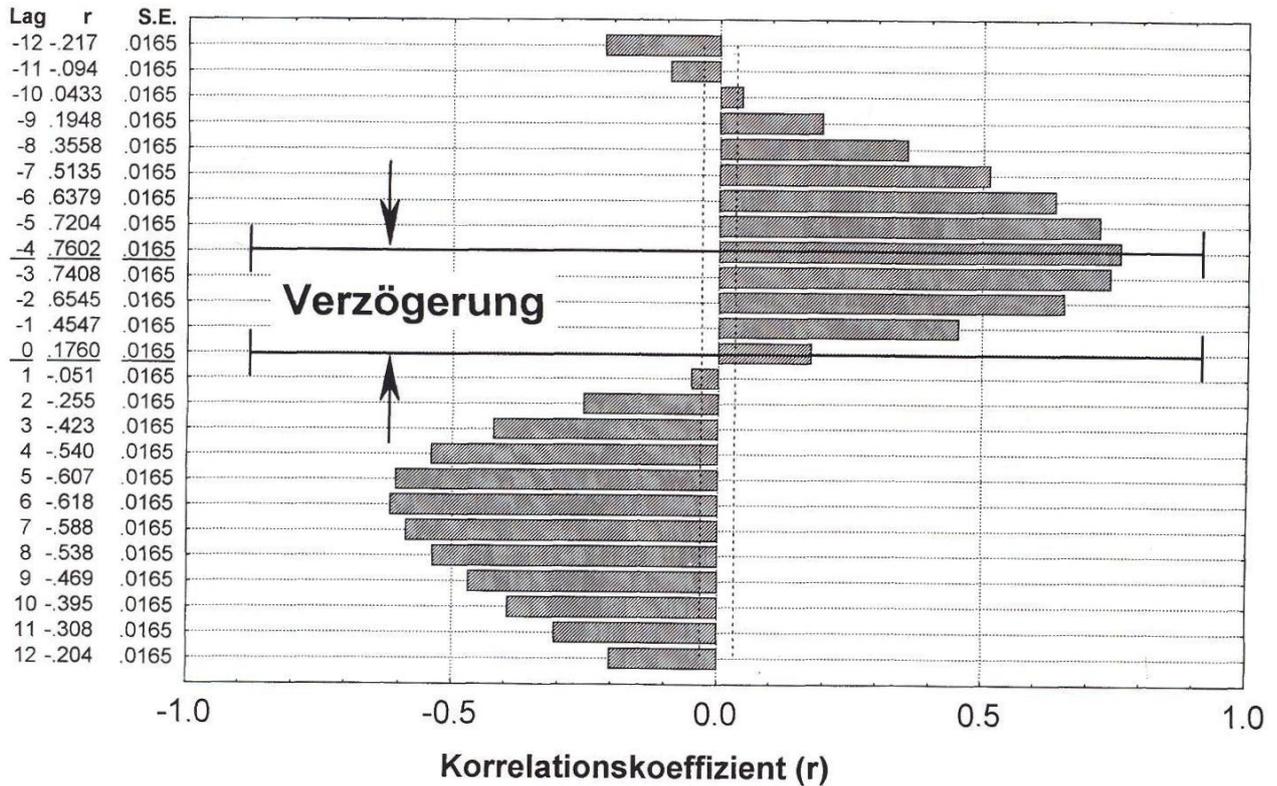


Abb. 1 Kalkulationsprinzip der Verzögerung der Bodentemperatur gegenüber der Lufttemperatur – Krosskorrelationsfunktion zwischen der Luft- und Bodentemperatur (nach der Differenzierung der Datenreihen). Lag – Verschiebung (Stunden); S.E. – Standardfehler des Korrelationskoeffizientes – r

Fig. 1 Calculation principle of the soil temperature delay to that of the air temperature – crosscorrelation function between temperatures of air and of soil (after the differentiation of dates). Lag – delay (hours); S.E. – standard error of the correlation coefficient – r

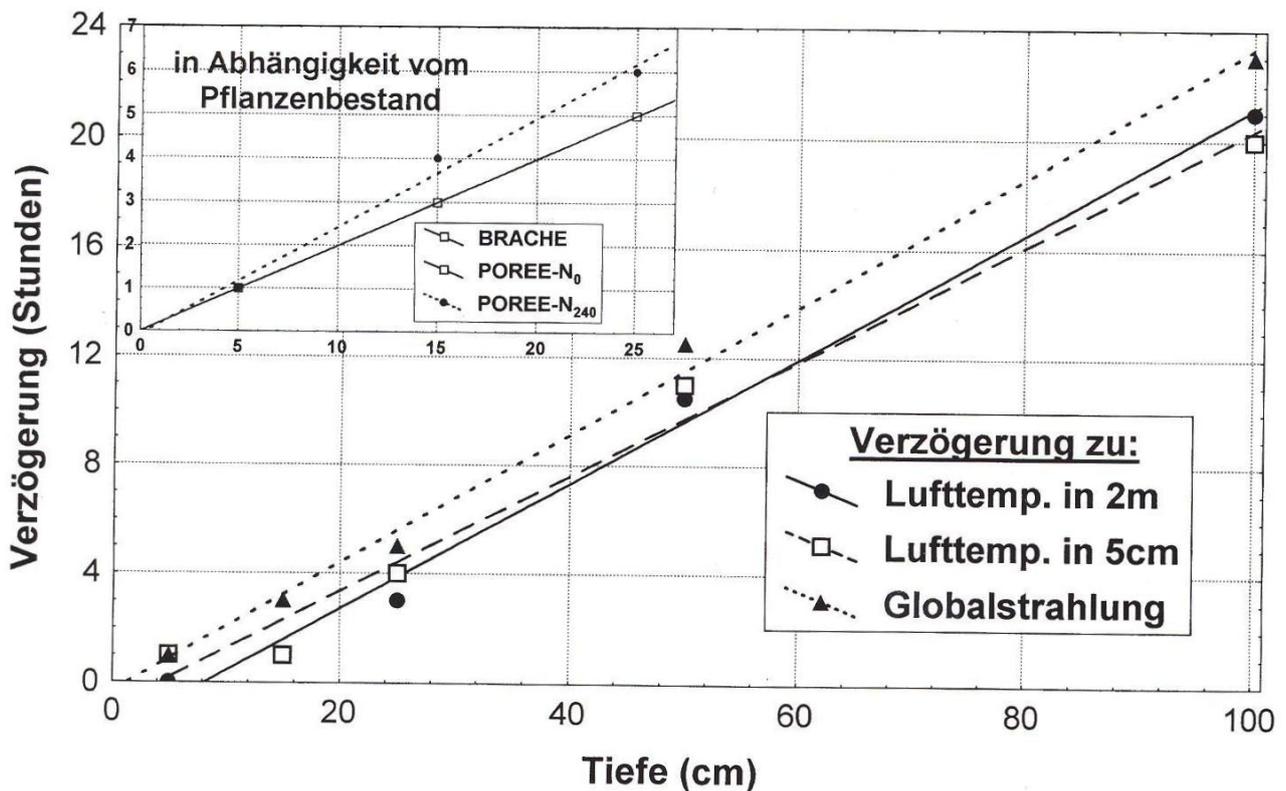


Abb. 2 Abhängigkeit der Verzögerung der Temperaturentbreitung von der Bodentiefe und dem Pflanzenbestand
 Fig. 2 Dependence of the temperature delay on the soil depth and on plant canopy

Der gut entwickelte Pflanzenbestand der N_{240} -Parzelle bewirkte gegenüber der Brache eine zusätzliche Verzögerung um ca. 1 Stunde / 20 cm Bodentiefe (Abb. 2). Der schwach entwickelte Pflanzenbestand der N_0 -Parzelle hatte dagegen keinen signifikanten Einfluß auf die Verzögerung gegenüber der Brache.

3.2. Bestimmung der Dämpfung

Für die Bestimmung der Abhängigkeit der Temperaturdämpfung von der Bodentiefe wurden alle Temperaturmeßreihen mit Hilfe der "additiven Census-1 Decomposition" in folgende 3 Komponenten zerlegt:

1. Trent und periodische Komponente
2. saisonale Komponente (1 Saison = 24 Stunden)
3. zufällige Komponente

Bei der angewendeten Methode der "additive Census-1 Decomposition" werden die langfristigen (in unserem Fall mehrtägigen) Änderungen "Trent und periodische Komponente" genannt (Statistica, 1994). Die saisonale Komponente ist diejenige, die eine kurzfristige, gut ausgeprägte Periode zeigt. Hier ist es die 24 Stunden Tagesperiode (Abb. 3). Bei der "Census-1 Decomposition" wird angenommen, daß sich die saisonale Komponente im Laufe der Untersuchungsperiode nicht ändert.

Für die saisonalen Komponenten jeder Meßreihe der Bodentemperatur (5 Tiefen) und für die der beiden Lufttemperaturmeßreihen wurden die Maxima berechnet. Danach wurde die Adhängigkeit dieser Maxima von der Bodentiefe mit Hilfe der

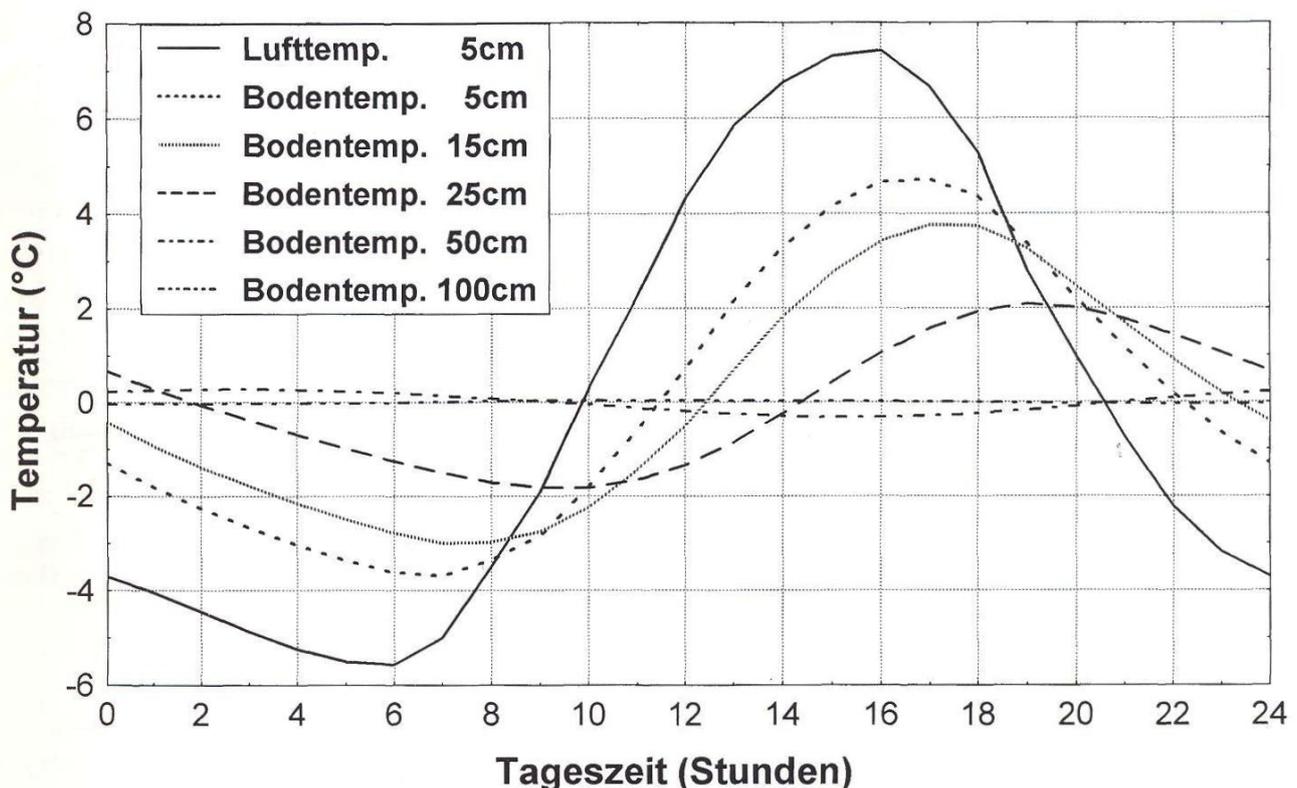


Abb. 3 Saisonkomponenten der Dynamik der Luft- und Bodentemperatur in verschiedener Tiefe nach "additiver Census-1-Decomposition"

Fig. 3 Seasonal components of temperature dynamic of air and of soil in different depths after additive Census I Decomposition

nichtlinearen Regression bestimmt (Abb. 4). Die Amplitude des Tagesganges der Temperatur wurde mit der Tiefe exponentiell gedämpft:

$$\text{Dämpfung (Tiefe)} = 0,83 \cdot e^{-0,042 \cdot \text{Tiefe}} \quad r^2 = 0,97 \quad [2]$$

Der Pflanzenbestand sowohl der N_{240} -Parzelle als auch der N_0 -Parzelle verursachte eine zusätzliche Dämpfung der Bodentemperaturamplitude (Abb. 4).

3.3. Modellansatz

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Zeitreihenanalyse wurde folgender Ansatz für die Simulation der Bodentemperatur in Adhängigkeit von der Lufttemperatur entwickelt:

$$BT_{t,\text{Tiefe}} = GM_{t-V} + (LT_{t-V} - GM_{t-V}) \cdot D \quad [3]$$

mit: $BT_{t,\text{Tiefe}}$: Bodentemperatur in einer Tiefe zum Zeitpunkt t ; GM gleitendes Mittel der Lufttemperatur in 5 cm, LT : Lufttemperatur; D : Dämpfung (s. Gl. 2); V : Verzögerung (s. Gl. 1); t : Zeitpunkt.

Dieser Ansatz besteht aus zwei additiv verknüpften Komponenten:

1. GM_{t-V}
2. $(LT_{t-V} - GM_{t-V}) \cdot D$

Die erste Komponente beschreibt die langfristige (mehrtägige) Änderung der Bodentemperatur, den Trend. Dies geschieht durch die Bildung des gleitenden Mittelwertes.

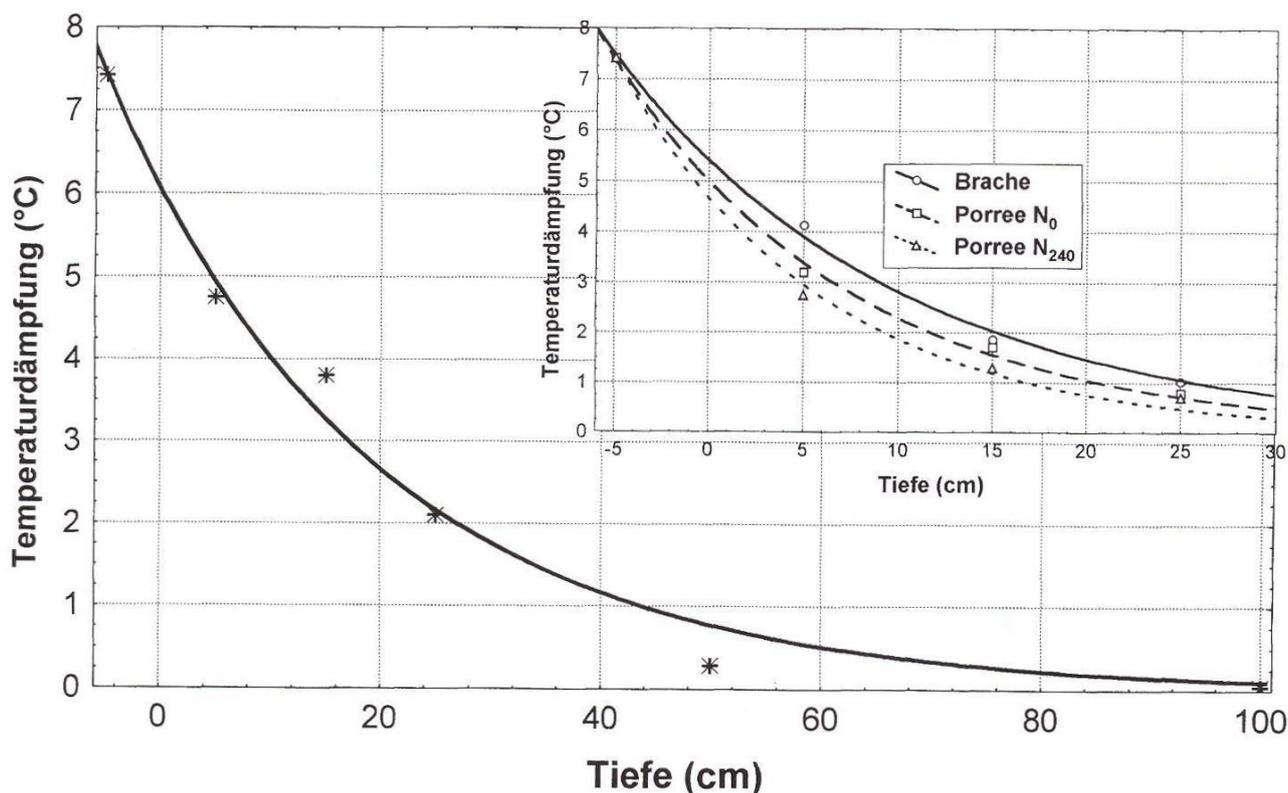


Abb. 4 Abhängigkeit der Temperaturdämpfung von der Bodentiefe und dem Pflanzenbestand
 Fig. 4 Dependence of the reduction of the temperature amplitude on soil depth and on plant canopy

Die zweite Komponente beschreibt die täglichen Temperaturschwankungen um den Temperaturmittelwert. Die Parameter für diese Komponente wurden mit Hilfe der Zeitreihenanalyse berechnet (siehe Gl. 1 u. 2).

Für die Kalkulation der ersten Komponente ist außer der Verzögerung (s. Gl. 1) die Stundenanzahl für die Berechnung des gleitenden Mittelwertes der Lufttemperatur notwendig. Die Stundenanzahl muß ein ganzzahliges Vielfaches der Stundenanzahl der saisonalen Komponente ($n \cdot 24$ Stunden) sein, damit der berechnete Mittelwert nicht assymmetrisch verschoben wird. Die Berechnung der Stundenanzahl erfolgte durch Anpassung der simulierten an die gemessenen Werte. Dafür wurde die Methode der Minimierung der Summe der Abweichungsquadrate mit dem Ziel der Maximierung der Korrelationskoeffizienten (r) genutzt. Als zusätzlich zu optimierende Größen wurden

- der Anstieg (n) der Übereinstimmungsgerade zwischen simulierten und gemessenen Werten, der gegen eins und
- der Schnittpunkt (a) der Übereinstimmungsgerade mit der Y-Achse, der gegen null gehen sollte

bei der Anpassung berücksichtigt (Gl. 4).

$$\text{Opt. Krit.} = (1 - r)^2 + (1 - n)^2 + a^2 \quad [4]$$

Dieses Optimierungskriterium (*Opt. Krit.*) ermöglicht die Verringerung von zwei Arten systematischer Fehler bei gleichzeitiger Vergrößerung von Korrelationskoeffizienten. Während durch die Optimierung des Anstiegs die Fehler minimiert werden, die von der Höhe des Meßwertes abhängig sind, erfolgt durch die Optimierung des Schnittpunktes die Verringerung von meßwertunabhängigen Fehlern.

Im Ergebnis der Optimierung wurde ein linearer Zusammenhang zwischen der Stundenanzahl für die Kalkulation des gleitenden Mittelwertes und der Bodentiefe mit ca. 24 h/10 cm erhalten. Dieser gleitende Mittelwert kann als ein Puffer des Bodens in Bezug auf die lokale Temperaturänderung betrachtet werden. Die Ergebnisse der Anpassung und der Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Stundenwerte ($N=1992$ Wertepaare) der Bodentemperatur in verschiedener Tiefe sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Der vorgestellte Ansatz für die Simulation der Bodentemperatur in Abhängigkeit von der Lufttemperatur in 5 cm Höhe ergab für den Meßwert-Simulationswert-

Tabelle 1 Übereinstimmungsparameter der gemessenen ($N=1992$ Wertepaare) und simulierten Stundenwerte der Bodentemperatur in den verschiedenen Bodentiefen

Bodentiefe (cm)	Korrelationskoeffizient	mittlere Abweichung (K)	Anstieg (K/K)	Achsenabschnitt	Optimierungskriterium
5	0,985	-1,03	1,09	ns	0,008
15	0,971	0,37	1,04	-0,89	0,791
25	0,976	0,26	1,12	-1,82	3,357
50	0,977	0,52	1,35	-5,19	27,06
100	0,981	1,24	1,73	-11,7	138,2

ns – nicht signifikant (Achsenabschnitt = 0)

Vergleich bis zu 30 cm Tiefe einen Korrelationskoeffizienten $> 0,97$ und eine mittlere Abweichung $< \pm 1,1$ K.

In den Bodentiefen 50 und 100 cm wurde die Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Bodentemperatur schlechter (Tab. 1). Ursachen dafür werden sowohl in der Texturabhängigkeit der Temperatureausbreitung im Boden (Schichtwechsel von Sand zu Lehm in 100 cm) als auch in der Änderung des Wassergehaltes des Bodens gesehen.

Danksagung

Die Arbeit wird seit 1992 als Projekt der Forschergruppe: "Grundlagen umweltschonender Bodennutzungsstrategien im nordostdeutschen Tiefland" durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literatur

- Engel, T.; Klöcking, B.; Priesack, E. und Schaaf, T.: Simulationsmodelle zur Stickstoffdynamik. *Schriftenreihe Agrarinformatik*, Bd. 25, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 484 S. (1993)
- FAO-UNESCO: Soil Map of the World. UNESCO, Rom (1990)
- Franko, U.: C- und N-Dynamik beim Umsatz organischer Substanzen im Boden. *Dissertation B., AdL* Berlin 140 S. (1989)
- Freytag, H.E.: Ableitung einer allgemeinen Mineralisierungsfunktion für die organische Bodensubstanz. *Archiv Acker- u. Pflanzenbau Bodenkunde* Bd. 30, Heft 4. S. 201–209 (1986)
- Freytag, H.E.; Grabert, D. und Lüttich, M.: Zur Temperaturabhängigkeit der Bodenatmung unter natürlichen Bedingungen. *Archiv Acker- u. Pflanzenbau Bodenkunde*, Bd. 35, Heft 4. S. 265–275 (1991)
- Kartschall T. und Franko U.: Reaktionskinetisches Modellkonzept zur Beschreibung von Mineralisierungsprozessen. *Archiv Acker- u. Pflanzenbau Bodenkunde*. Bd. 31, Heft 1. S. 33–40 (1987)
- STATISTICA for Windows III, Users Guide. USA. Tulsa. 3911 pp. (1994)