

Optimierung temperaturwirksamer Anbau- und Bewirtschaftungsmaßnahmen

KAI VELTEN, WIESBADEN
JÜRGEN JAKI, WIESBADEN
PETER-JÜRGEN PASCHOLD, GEISENHEIM

Abstract

The soil heat model is used to evaluate and optimize common soil temperature affecting cultivation measures. The approach relies on an analysis of the two-dimensional stationary temperature fields induced by the cultivation measures. Finite elements are used to obtain the temperatures. Referring to open air white asparagus cultivation as an example, the optimization of the ridge direction is discussed. Also, optimization procedures regarding the application of films and heating pipes are indicated. While the optimization of temperature affecting cultivation measures is largely guided by experience and experiments today, it is argued that this approach can serve as another major source of information.

1 Einleitung

Bodentemperaturen und deren zeitlicher und räumlicher Verlauf sind wesentliche Standortfaktoren von Böden. Sie beeinflussen u.a. Keimungsprozesse, die Entwicklung des Wurzelsystems, die Ertragsbildung, Stickstofftransformationen (Ammonifikation, Nitrifikation, Denitrifikation, Immobilisierung), Kohlenstofftransformationen (Mineralisation, Humifizierung), den Abbau organischer Schadstoffe usw. Temperaturwirksame Anbau- und Bewirtschaftungsmaßnahmen wie Bodenbearbeitung, Beregnung, Folien usw. beeinflussen die Entwicklung der Bodentemperaturen. Sie werden in der Praxis auf der Grundlage von Erfahrungswerten und Experimenten optimiert. Ergänzend dazu können aber auch auf der Wärmetransportgleichung basierende Simulationsrechnungen den Optimierungsprozess anleiten. Dies wird anhand des Spargelanbaus als Beispiel erklärt.

2 Die Wärmeleitungsgleichung

Zur Beurteilung der in dieser Studie untersuchten Anbaumaßnahmen genügt die Berechnung zweidimensionaler Temperaturverteilungen mit der Wärmeleitungsgleichung (de Vries 1975)

$$(1) \quad \frac{\partial C(x, y, t)T(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, y, t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(x, y, t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) + Q(x, y, t)$$

x und y [m] bezeichnen die Raumkoordinaten, t [s] die Zeit, T [K] die Temperatur, C [J/m³/K] die spezifische Wärme, λ [W/K/m] die (isotrope) thermische Leitfähigkeit, Q [W/m³] eine Wärmequelle und $\frac{\partial}{\partial t}$, $\frac{\partial}{\partial x}$, $\frac{\partial}{\partial y}$ die Ableitungen bezüglich Raum und Zeit. Gleichung (1)

wird in vielen Simulationsumgebungen zur Berechnung der Bodentemperaturen verwendet (siehe z.B. JANSSON, 1991, ENGEL ET AL., 1993, BRADEN, 1995, ABRAHAMSEN ET AL., 2000). In dieser Studie wurde Gleichung (1) in einer Raumdimension mit der Finite-Differenzen-Methode (NECATI OZISIK, 1994) und in zwei Raumdimensionen mit der Finite-Elemente-Methode (REDDY ET AL., 2000) gelöst.

3 Ein Kriterium zur Beurteilung temperaturwirksamer Anbaumaßnahmen

Der beste Weg zur Beurteilung temperaturwirksamer Anbaumaßnahmen wäre die Simulation der von der jeweiligen Anbaumethode induzierten zeitabhängigen Temperaturverteilung mit Gleichung (1). Hierzu müsste man aber z.B. bei der Analyse zweidimensional temperaturwirksamer Anbaumaßnahmen (siehe die Abschnitte 3 und 4) die zweidimensionale Temperaturverteilung im Boden zu einem gegebenen Zeitpunkt kennen (weil man Gleichung (1) als sog. „Anfangs-Randwertproblem“ lösen muss, siehe REDDY ET AL., 2000). Diese Voraussetzung ist in der Praxis i.a. nicht gegeben. Damit bleibt als zweitbesten Weg übrig, die temperaturwirksamen Anbaumaßnahmen auf der Grundlage der induzierten stationären Temperaturverteilung zu beurteilen.

Zur Einführung stationärer Temperaturverteilungen betrachten wir zunächst Beispiel 1: $C(x, y) = 1.58 \text{ [MJ/m}^3\text{/K]}$, $\lambda(x, y) = 1.78 \text{ [W/K/m]}$, $T(x, 0, t) = 20$, $T(x, -6, t) = 10$. Dies entspricht einem homogenen Boden, dessen Wärmeleitungseigenschaften einem typischen Szenario am Standort Geisenheim entsprechen (Sand- und lehmige Sandböden bei 8-12 Volumenprozent Feuchtigkeit), und dessen Temperatur an der Oberfläche und in 6 m Tiefe konstant gehalten wird (20 °C bzw. 10 °C). Eine auf Gleichung (1) basierende Simulationsrechnung zeigt dann (Abbildung 1(a)), dass sich ein für die Zeit $t=0$ angenommenes Temperaturprofil (unterste, gestrichelte Kurve in der Abbildung) im Laufe der Zeit einem stationären (d.h. zeitlich unveränderlichen) Temperaturprofil annähert (oberste, durchgezogene Kurve in der Abbildung).

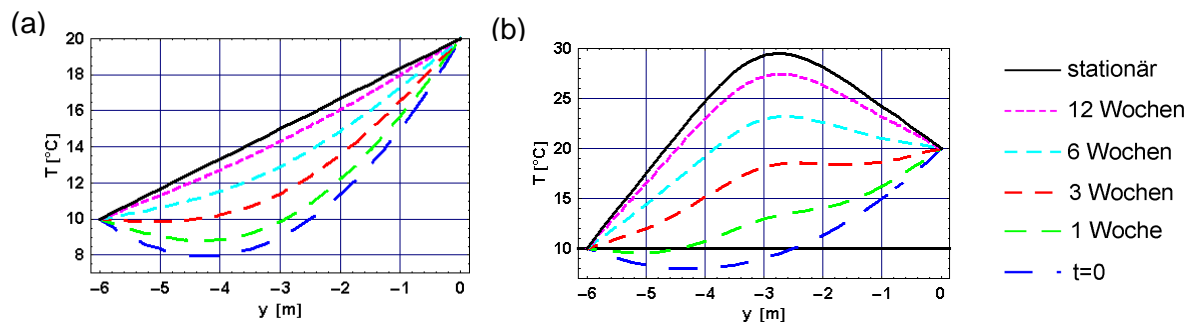


Abbildung 1: Temperaturprofile (a) zu Beispiel 1 und (b) zu Beispiel 2.

Stationäre Temperaturprofile lassen sich auch für höherdimensionale Probleme berechnen, indem man jeweils die Zeitableitung in Gleichung (1) auf Null setzt. Sie haben stets die Eigenschaft, dass sich ein gegebenes Temperaturprofil im Laufe der Zeit dem stationären Temperaturprofil annähert. Damit ergibt sich zur Beurteilung temperaturwirksamer Anbaumaßnahmen ein Kriterium, das ohne die Kenntnis der realen Temperaturverteilung im Boden auskommt: Temperaturwirksame Anbaumaßnahmen sollten so angewendet werden, dass sich eine im Sinne der jeweiligen pflanzenbaulichen Erfordernisse wünschenswerte stationäre Temperaturverteilung einstellt. Damit ist dann gewährleistet, dass sich eine jeweils gegebene Temperaturverteilung in die richtige Richtung entwickelt.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich die stationäre Temperaturverteilung nur bei festen Randbedingungen und über sehr lange Zeiträume einstellt (z.B. 12 Wochen in Abbildung 1(a)). Nehmen wir z.B. an, dass in Beispiel 1 aus pflanzenbaulicher Sicht eine Erhöhung der Temperatur in 3 m Tiefe von zunächst ca. 9° C auf 15° C erwünscht ist. In Beispiel 1 ist 15° C gerade der stationäre Temperaturwert in 3 m Tiefe, der erst nach über 12 Wochen erreicht wird. In einem solchen Fall müsste die temperaturwirksame Anbaumethode möglichst so modifiziert werden, dass sich z.B. eine stationäre Temperaturverteilung wie in Beispiel 2 (Abbildung 1(b)) ergibt (Daten in Beispiel 2 wie in Beispiel 1, zusätzlich eine Wärmequelle

der Stärke $Q(y) = 11.7 \cdot \exp(-(y-3)^2)$ W/m²). Aufgrund des höheren stationären Temperaturwerts in 3 m Tiefe (ca. 28° C) erreicht man die gewünschten 15° C bereits in 1-2 Wochen. Bei der Berechnung der stationären Temperaturverteilungen müssen die Randbedingungen zeitunabhängig vorgegeben werden. Der Tag-Nacht-Rhythmus der Oberflächentemperatur wird berücksichtigt, indem an der Oberfläche der 24-Stunden-Mittelwert der Temperatur vorgegeben wird. Wenn man etwa in Beispiel 1 die obere Randbedingung $T(x,0,t)=20$ durch eine Randbedingung mit Tag-Nacht-Rhythmus ersetzt (z.B. $T(x,0,t) = 20 + A \cdot \sin(\frac{2\pi t}{24 \cdot 60 \cdot 60})$), so lässt sich zeigen, dass die mit der realistischeren Randbedingung berechneten Temperaturen sinusförmig um die in Abbildung 1(a) gezeigten Temperaturprofile schwanken, wobei die Amplitude dieser Schwankung mit der Bodentiefe abnimmt und für die in Beispiel 1 betrachteten Böden bereits in 60-80 cm verschwindet (DE VRIES, 1975). Die Verwendung des 24-Stunden-Mittelwerts der Temperatur als obere Randbedingung bedeutet daher, dass die berechneten stationären Temperaturprofile ebenfalls näherungsweise als 24-Stunden-Mittelwert der realen Temperaturprofile aufgefasst werden können.

3 Beispiel: Optimale Ausrichtung von Spargeldämmen

In den folgenden Simulationen wird der Wärmeübergang an der Bodenoberfläche wie in BELJAARS ET AL (1993) beschrieben mit der Wärmeübergangsgleichung berechnet. In 6 m Tiefe geben wir CAMPBELL (1977) folgend jeweils die Jahresmitteltemperatur am Standort Geisenheim vor (10° C). Wir vergleichen in Nord-Süd-Richtung (Szenario S1) bzw. in Ost-West-Richtung (S2) ausgerichtete Spargeldämme. Experimentell wurde zuvor festgestellt, dass die Ausrichtung der Spargeldämme keinen messbaren Effekt auf die Bodentemperaturen oder den Spargelertrag hat (Löpmeier, Agrarmeteorologische Forschungsstelle Braunschweig, persönliche Mitteilung). Abbildung 2(a) zeigt die stationäre Temperaturverteilung unter dem Spargeldamm in S2. Für $x=-90$ cm und $x=90$ cm wurden periodische Randbedingungen angenommen, d.h. die stationäre Temperaturverteilung im gesamten Spargelfeld entsteht aus Abbildung 2(a), indem man Kopien der Abbildung links und rechts anfügt. In S1 nehmen wir für die Temperatur in der bodennahen Luftschicht einen konstanten 24-Stunden-Mittelwert von 18° C an. In S2 wird diese Temperatur im Dammbereich $-30 \text{ cm} \leq x \leq 30 \text{ cm}$ modifiziert, weil die südliche Dammseite wärmer ist. Konkret wurde für die linke (rechte) Dammseite in Abbildung 2(a) im 24-Stunden-Mittel ein Temperaturmaximum von 21° C (ein Temperaturminimum von 15° C) angenommen.

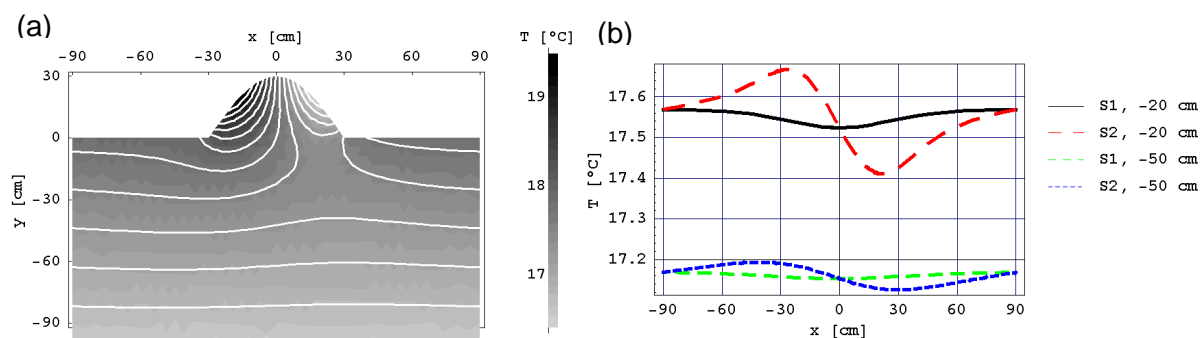


Abbildung 2: (a) Temperaturverteilung in S2 (Isolinien im Viertelgradabstand), (b) Vergleich der -20 cm- und -50cm-Temperaturprofile in S1 und S2

Abbildung 2(a) zeigt, dass sich zwischen der linken und rechten Dammseite ein starker Temperaturgradient einstellt (enge Isolinien!). Nach dem Fourierschen Wärmeleitungsgesetz bedeutet dies eine starke Wärmeströmung von der warmen zur kalten Dammseite. Die

Wärmeströmung in den Boden erweist sich dagegen als vernachlässigbar. In den für den Spargelanbau bedeutsamen Bodentiefen ergibt sich keine signifikante Temperaturänderung (Abbildung 2(a)). Dies bestätigt die o.e. experimentellen Ergebnisse.

4 Weitere Beispiele

Auch die Temperatureffekte von Folien, Heizrohren oder Beregnungsmaßnahmen können mit der beschriebenen Methodik analysiert werden. Abbildung 3(a) zeigt beispielsweise eine detaillierte Darstellung der von einer Dammfolie initiierten Wärmeströmung, Abbildung 3(b) die Temperaturverteilung um Heizrohre, die in einem Spargelfeld in der Nähe eines Kraftwerks in 25 cm Tiefe (bei 30 cm lateralem Abstand) verlegt wurden. Auch diese Simulationsergebnisse können zur Optimierung verwendet werden, indem man etwa die in Abbildung 3(a) gezeigte Simulation für verschiedene Folientypen wiederholt und jeweils den Temperatureffekt in einer interessierenden Bodenzone analysiert, oder indem man die in Abbildung 3(b) gezeigte Simulation für Heizrohre in unterschiedlichen Bodentiefen wiederholt und jeweils den resultierenden Energieverbrauch berechnet usw.

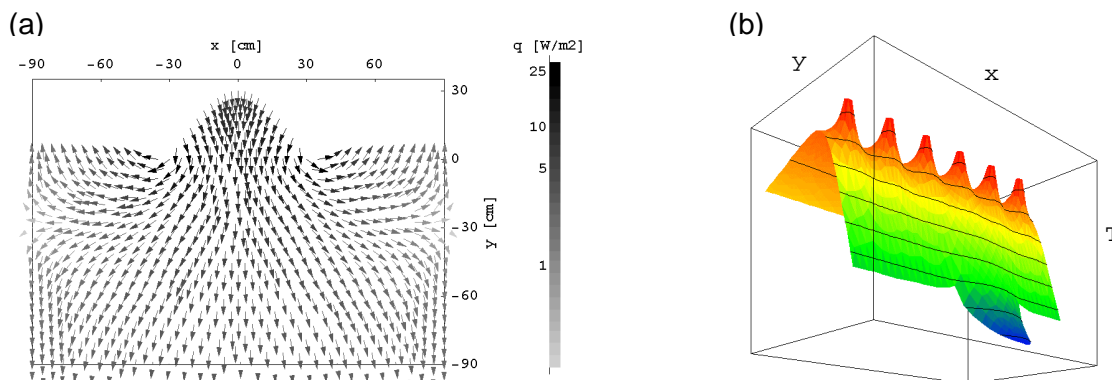


Abbildung 3: (a) Wärmeströmung unter Folie, (b) Temperaturverteilung um Heizrohre

5 Literatur

- ABRAHAMSEN, P.; HANSEN, S. (2000): Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model. *Environmental Modelling & Software* 15, 313-330
- BELJAARS, A.C.M.; BETTS, A.K. (1993): Validation of the boundary layer representation in the ECMWF model. *Seminar Proceedings on validation of models over europe. Volume 2.* ECMWF, Reading, England
- BRADEN, H. (1995): The Model AMBETI: A Detailed Description of a Soil-Plant-Atmosphere Model. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 195*
- CAMPBELL, G.S. (1977): *An introduction to environmental biophysics.* Springer, Berlin.
- DE VRIES, D.A. (1975): Heat transfer in soils. In: "Heat and mass transfer in the biosphere. Part I: Transfer processes in the plant environment", Eds. D.A. De Vries, N.H. Afgan, Wiley, S. 4-28
- ENGEL, T.; PRIESACK, E. (1993): Expert-N, a building-block system of nitrogen models as resource for advice, research, water management and policy. In: *Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection* (Eds.: Eijsackers, H.J.P. and Hamers, T.). Dodrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, S. 503-507
- JANSSON, P.E. (1991): SOIL: a simulation model for soil water movement and heat conditions, Report 165, Swedish University of Agricultural Science, Department of Soil Science
- NECATI OZISIK, M. (1994): *Finite difference methods in heat transfer.* CRC Press
- REDDY, J.N.; GARTLING, D.K. (2000): *The finite element method in heat transfer and fluid dynamics.* Lewis Publishers