

# WIE SICHER SIND MESSERGEBNISSE FÜR DEN BODENWÄRMESTROM?

C. LIEBETHAL<sup>1</sup>, TH. FOKEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Deutschland

## 1 EINLEITUNG

Der Bodenwärmestrom an der Erdoberfläche ( $BWS_0$ ) wird häufig als vernachlässigbar angenommen oder mit sehr einfachen Ansätzen parametrisiert (z. B.  $BWS_0 = 10\%$  der Strahlungsbilanz). Es gibt jedoch Oberflächen, an denen der Bodenwärmestrom sehr groß werden und damit eine wichtige Rolle in der Energiebilanz spielen kann; dies ist z. B. über Brache der Fall. Unter diesen Bedingungen muss  $BWS_0$  genau und korrekt gemessen werden. Zur Bestimmung von  $BWS_0$  gibt es zahlreiche Verfahren, die unter anderem in den Beiträgen von Fuchs (1980), Kimball und Jackson (1979), Philip (1961), Van Loon *et al.* (1998) und Watts *et al.* (1990) beschrieben sind. Es stellt sich die Frage, welche dieser Methoden die Anforderungen „genau und korrekt“ am besten erfüllen. Wir widmen uns in dieser Studie der Frage, wie  $BWS_0$  mit einfachen Messmethoden erfasst werden kann, ohne dass Fehler in der Messung von Bodenparametern (z. B. Bodentemperatur) erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Grundlage für alle hier präsentierten Ergebnisse sind Messungen, die während des Experiments LITFASS-2003 auf der Versuchsfläche A6 durch die Universität Bayreuth durchgeführt wurden. Eine detaillierte Beschreibung des Experiments findet sich in Beyrich (2004a und 2004b).

## 2 METHODEN ZUR BERECHNUNG DES BODENWÄRMESTROMS

Die Methoden, die zur Berechnung von  $BWS_0$  zum Einsatz kommen, sind zum einen die Kombination von Messungen mit Bodenwärmestromplatten und Kalorimetrie (plate/c) und zum anderen die Kombination von Gradientmethode und Kalorimetrie (grad/c). Bei beiden hier verwendeten Ansätzen wird der Bodenwärmestrom zuerst in einer Referenztiefe  $z_{ref}$  bestimmt:  $BWS(z = z_{ref})$  wird entweder mittels Bodenwärmestromplatte (Methode plate/c) oder mittels Gradientansatz (Methode grad/c) berechnet. Die Messung der Bodenwärmestromplatte in der Referenztiefe muss nach Philip (1961) um den Philip-Faktor  $f_{Phil}$  korrigiert werden (Gleichung 1); für den Gradientansatz werden Wärmeleitfähigkeit und vertikaler Temperaturgradient in der Referenztiefe multipliziert. Der jeweils sich in der Referenztiefe ergebende Fluss wird mit Hilfe der Kalorimetrie (zeitliche Änderung der Wärmespeicherung in der Schicht zwischen  $z = z_{ref}$  und  $z = 0$ ) an die Oberfläche extrapoliert. Daraus ergeben sich die vollständigen Bestimmungsgleichungen für  $BWS_0$  (Gleichung 2 für plate/c und Gleichung 3 für grad/c),

$$f_{Phil} = \frac{\lambda_{Platte}}{\lambda_{Boden} \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_{Platte}}{\lambda_{Boden}} - 1 \right) \left( 1 - \frac{1.7 \cdot Dicke_{Platte}}{Laenge_{Platte}} \right) \right]} \quad (1)$$

$$BWS_0 = \frac{BWS(z_{ref})}{f_{Phil}} + z_{ref} \frac{\partial(\overline{c_v T})}{\partial t} \quad (2)$$

$$BWS_0 = -\lambda_{Boden}(z_{ref}) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z_{ref}} + z_{ref} \frac{\partial(\overline{c_v T})}{\partial t} \quad (3)$$

wobei  $\lambda$  für die Wärmeleitfähigkeit der Bodenwärmestromplatte (Index *Platte*) bzw. des Bodens (Index *Boden*) steht,  $Dicke_{Platte}$  für die Dicke und  $Laenge_{Platte}$  für die Länge der Bodenwärmestromplatte.  $c_v$  ist die volumetrische Wärmekapazität des Bodens,  $T$  ist die Bodentemperatur und  $t$  die Zeit.  $z$  bezeichnet die Tiefe unter der Oberfläche (positiv skaliert von der Oberfläche aus nach unten). Für weitere Informationen zu den Methoden wird der Leser auf die oben aufgelisteten Literaturstellen verwiesen.

Die Referenztiefe  $z_{ref}$  kann grundsätzlich frei gewählt werden, hat aber ebenfalls einen Einfluss darauf, wie stark sich Messfehler in den Resultaten für  $BWS_0$  auswirken. Deshalb werden nicht nur die beiden Methoden plate/c und grad/c gegeneinander getestet; vielmehr werden für jede Methode verschiedene Realisationen berechnet, die verschiedenen Referenztiefen entsprechen.

Tabelle 1: Erlaubte Modifikation für verschiedene Bodenparameter.

Parameter	erlaubte Modifikation
Bodentemperatur	$\pm 1$ cm Einbautiefe (unter Berücksichtigung der Dämpfungstiefe)
Bodenfeuchte	$\pm 30$ % des Messwerts
Messung d. Bodenwärmestromplatte	$\pm 20$ % des Messwerts
Wärmeleitfähigkeit d. Bodens	$\pm 50$ % des Messwerts

### 3 SENSITIVITÄTSANALYSE

#### 3.1 METHODE

Zur Beurteilung, wie groß der Einfluss verschiedener Messfehler auf die Ergebnisse der jeweiligen Methode ist, wird die Generalised Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) nach Beven und Binley (1992) verwendet. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse verläuft nach folgendem Muster: Zuerst werden aus dem Originaldatensatz mit verschiedenen Realisationen die Ergebnisse für  $BWS_0$  berechnet (Originalergebnisse). Anschließend wird der Originaldatensatz innerhalb festgelegter Grenzen verändert, die den möglichen Messfehler widerspiegeln. Mit diesem modifizierten Datensatz wird die Berechnung von  $BWS_0$  wiederholt (modifizierte Ergebnisse). Aus dem Vergleich von Original- und modifizierten Ergebnissen wird ein Qualitätsflag  $L$  berechnet, der zwischen 0 und 1 liegt (Gleichung 4). Je näher  $L$  an 1 heranreicht, desto besser stimmen die modifizierten Ergebnisse mit den Originalergebnissen überein und desto weniger werden die Ergebnisse von den im modifizierten Datensatz eingebauten „Messfehlern“ verändert.

$$L = 1 - \frac{\sigma_{\text{delta}}^2}{\sigma_{\text{orig}}^2} \quad (4)$$

$\sigma^2$  ist die Varianz der Originalergebnisse (Index *orig*) bzw. die Varianz der Unterschiede zwischen Original- und modifizierten Ergebnissen (Index *delta*).

Die maximal erlaubten Abweichungen vom Messwert sind für die unterschiedlichen Bodenparameter verschieden groß (Tabelle 1). So darf die Modifikation der Bodenfeuchte bis zu 30 % des Originalwerts betragen, die des Signals der Bodenwärmestromplatte dagegen nur 20 %. Für die Bodentemperatur gilt eine besondere Regelung: Die Modifikation wird nicht proportional zum Messwert vorgenommen, sondern entspricht einem Fehler in der Einbautiefe von bis zu einem Zentimeter. Um dies zu simulieren wird sowohl die Amplitude als auch die Phase der Temperaturwelle in der entsprechenden Tiefe verändert. Für jeden zu modifizierenden Parameter wird die Stärke der Modifikation innerhalb des erlaubten Bereichs durch eine eigene Zufallszahl bestimmt. Dadurch wird gewährleistet, dass die Veränderung der einzelnen Bodenmessungen nicht voneinander abhängig ist. (Schließlich ist ein Fehler in der Messung der Bodenfeuchte in einer bestimmten Tiefe nicht davon abhängig, ob die Bodentemperatur in einer anderen Tiefe korrekt bestimmt wird.)

Das oben beschriebene Prozedere (Modifizierung der Daten - Berechnung der modifizierten Ergebnisse - Berechnung des Qualitätsflags) wird 10.000 Mal durchgeführt, sodass 10.000 Datensätze entstehen, die sowohl die Stärke der Modifikation der einzelnen Parameter (in Form der entsprechenden Zufallszahlen) als auch die daraus resultierende Qualität der modifizierten Ergebnisse enthalten. Diese Daten werden anschließend in Diagrammen organisiert, mit deren Hilfe dann die Sensitivität der Realisierungen auf Fehler in einzelnen Parametern beurteilt werden kann. Auf der Ordinate dieser Diagramme wird die Zufallszahl zur Variation des zu beurteilenden Bodenparameters aufgetragen. Sie ist von 0 bis 1 skaliert, wobei 0 der maximal erlaubten Verminderung des Originalwertes entspricht, 0.5 einer Beibehaltung des Originalwerts und 1 der maximal erlaubten Erhöhung. Die Abszisse (auf den folgenden Abbildungen stets von 0.95 bis 1.00 skaliert) gibt den Qualitätsflag  $L$  an. Die Form, die die Wolke der jeweils 10.000 Punkte im Diagramm annimmt, läßt eine Aussage über die Sensitivität der dargestellten Realisierung auf eine Variation des betreffenden Bodenparameters zu: Ergibt sich ein Band (parallel zur Ordinate), ist die Realisierung nicht sensitiv auf den Parameter; ergibt sich dagegen ein auf den Kopf gestelltes „V“, ist sie äußerst sensitiv. Darüber hinaus lassen die absoluten Werte des Qualitätsflags  $L$  Aussagen darüber zu, ob gute oder schlechte Qualitäten erreicht werden.

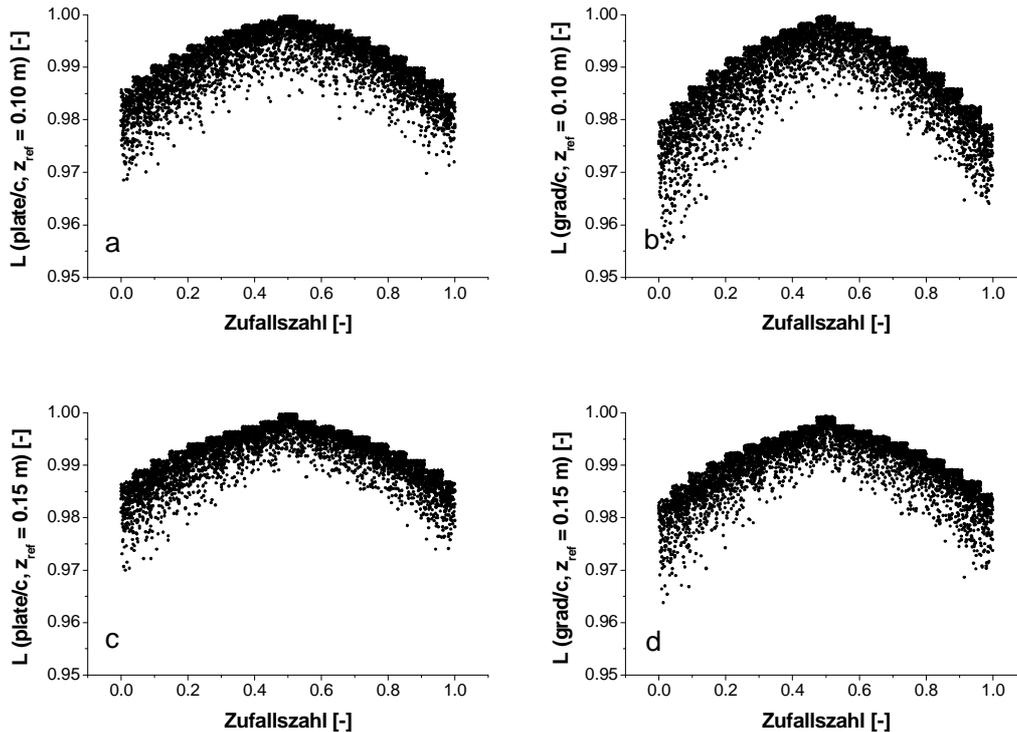


Abbildung 1: Sensitivität auf Modifikationen in den Temperatur-Messwerten. Gezeigt sind die Methode plate/c mit  $z_{ref} = 0.10\text{ m}$  (a) bzw.  $z_{ref} = 0.15\text{ m}$  (c) sowie die Methode grad/c mit  $z_{ref} = 0.10\text{ m}$  (b) bzw.  $z_{ref} = 0.15\text{ m}$  (d).

### 3.2 ERGEBNISSE

An dieser Stelle werden nur zwei Beispiele für die vielfältigen Abhängigkeiten herausgegriffen, die während der Sensitivitätsanalyse aufgezeigt werden konnten: Zum einen die Sensitivität auf Variationen der Temperatur-Messwerte (Abbildung 1), zum anderen diejenige auf Variationen der Wärmeleitfähigkeit des Bodens (Abbildung 2). In beiden Abbildungen sind die Sensitivitätsdiagramme von vier Realisierungen dargestellt: Links oben die Methode plate/c mit  $z_{ref} = 0.10\text{ m}$ , links unten die Methode plate/c mit  $z_{ref} = 0.15\text{ m}$ , rechts oben die Methode grad/c mit  $z_{ref} = 0.10\text{ m}$  und rechts unten die Methode grad/c mit  $z_{ref} = 0.15\text{ m}$ .

Im ersten Fall (Abbildung 1) wurden alle Temperaturen um jeweils denselben „Tiefenoffset“ modifiziert, da die Sensoren in einer Führungsschiene in festem Abstand zueinander fixiert waren. Es zeigt sich, dass alle vier Realisierungen sensitiv auf eine Veränderung der Temperatur-Messwerte reagieren. Die Stärke der Sensitivität differiert jedoch: Für beide Methoden ergeben sich bei der Wahl einer größeren Referenztiefe geringfügig bessere Werte bei gleicher Temperatur-Variation. Dies gilt sowohl für die minimal als auch die maximal erreichte Qualität. Vergleicht man die beiden Methoden bei gleicher Referenztiefe miteinander, fällt auf, dass die Methode plate/c jeweils bessere Werte liefert als die Methode grad/c. Auch streuen die erreichten Qualitätsflags bei plate/c weniger stark.

Die Variation der Wärmeleitfähigkeit des Bodens in der Referenztiefe hat nur schwache Auswirkungen auf die Qualität der Ergebnisse (Abbildung 2). Bei der Methode grad/c (rechts oben/unten) bewirkt eine Abweichung vom Originalwert einen leichten Abfall der maximalen Qualität, bei der Methode plate/c (links oben/unten) hat sie keine erkennbare Modifikation der Qualität zur Folge. Die beiden gezeigten Abbildungen lassen somit die Schlussfolgerung zu, dass sich eine Fehlpositionierung der Temperatursensoren um maximal 1 cm wesentlich stärker auf die Qualität der Ergebnisse auswirkt als eine um maximal 50 % falsche Angabe der Wärmeleitfähigkeit des Bodens in der Referenztiefe. Darüber hinaus zeigt sich, dass bei Verwendung derselben Referenztiefe die Methode plate/c geringfügig bessere Ergebnisse produziert als die Methode grad/c. Die Ergebnisse für  $z_{ref} = 0.10\text{ m}$  und  $z_{ref} = 0.15\text{ m}$  unterscheiden sich nur wenig.

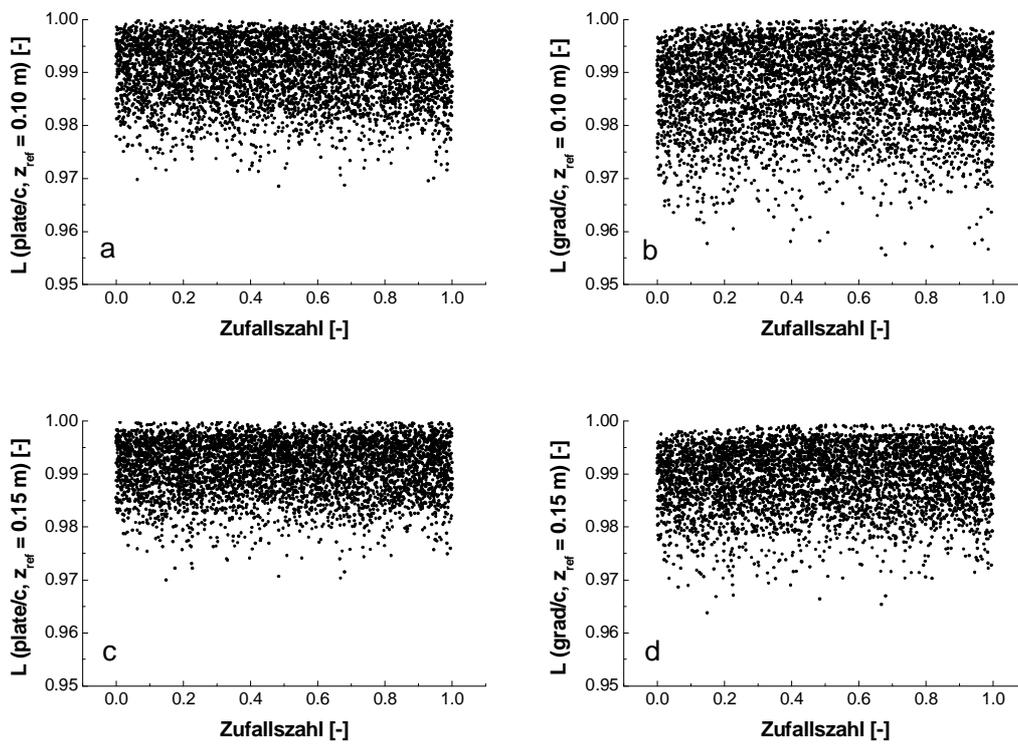


Abbildung 2: Sensitivität auf Modifikationen in der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda(z_{ref})$ . Gezeigt sind die Methode plate/c mit  $z_{ref} = 0.10$  m (a) bzw.  $z_{ref} = 0.15$  m (c) sowie die Methode grad/c mit  $z_{ref} = 0.10$  m (b) bzw.  $z_{ref} = 0.15$  m (d).

## 4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

In ähnlicher Weise wie oben dargestellt wurden beide Methoden auch für andere Referenziefen ( $z_{ref} = 0.035\text{ m}/0.05\text{ m}/0.075\text{ m}/0.20\text{ m}$ ) betrachtet. Es wurde auch die Sensitivität auf Fehler in den Feuchtemessungen verschiedener Tiefen, auf die Fehlpositionierung einzelner Temperatursensoren und auf Fehler in den Messungen der Bodenwärmestromplatten untersucht. Aus diesen Analysen können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Fehler in den Bodenfeuchtemessungen wirken sich auf alle Realisierungen aus. Je tiefer die Referenztiefe gewählt wird, umso weniger Einfluss haben Fehler in einer einzelnen Bodenfeuchtemessung.
- Werden alle Temperaturen synchron modifiziert, wirkt sich dies erheblich auf die Qualität aller Realisierungen aus. Betrachtet man einzelne Temperaturmessungen, verursachen Modifikationen in tiefen Sensoren wesentlich geringere Qualitätsverluste als Modifikationen in flach eingebauten Sensoren.
- Liefern die Bodenwärmestromplatten fehlerhafte Signale, so sinkt die minimal erreichte Qualität in der entsprechenden Realisierung ab. Auch bei einer Veränderung um 20 % des Ausgangswertes können noch Qualitätsflags von  $L = 1.00$  erreicht werden.

Aufgrund dieser Ergebnisse geben wir für die Messung des Bodenwärmestroms folgende Empfehlungen:

- Die Referenztiefe  $z_{ref}$  sollte nicht zu flach gewählt werden. Gute Erfahrungen ergaben sich aus den Daten von LITFASS-2003 für die Referenziefen 0.15 m und 0.20 m.
- Flach eingebaute Sensoren beeinflussen die Qualität der Ergebnisse wesentlich stärker als Sensoren in größerer Tiefe. Deshalb sollte darauf geachtet werden, dass vor allem Sensoren in geringen Tiefen sorgfältig eingebaut und gewartet werden.
- Wenn diese Empfehlungen berücksichtigt werden, fallen die Qualitätsflags der verschiedenen Realisierungen nur selten unter 0.99.

## DANKSAGUNGEN

Wir danken den Mitarbeitern der Abteilung Mikrometeorologie der Universität Bayreuth, die an Vorbereitung und Durchführung des Experiments LITFASS-2003 beteiligt waren. Das Experiment wurde gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (DEKLIM, Projekt EVA-GRIPS 01LD0103(UBT)).

## LITERATUR

- Beven, K. J. und Binley, A. M. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Processes*, 6, 279-298.
- Beyrich, F. (Editor) (2004a). *Verdunstung über einer heterogenen Landoberfläche. Das LITFASS-2003 Experiment*. DWD Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung, Offenbach, Arbeitsergebnisse Nr. 79, 100 pp.
- Beyrich, F. (2004b). Turbulente Flüsse über einer heterogenen Landoberfläche: Das LITFASS-2003 Experiment - Ein Überblick. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologentagung 2004*, Karlsruhe, Germany, 7. - 10. September 2004.
- Fuchs, M. (1986). Heat flux. In: Klute, A. (Editor), *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Agr. Monogr. ASA and SSSA, Madison, 957-968.
- Kimball, B. A. und Jackson, R. D. (1979). Soil heat flux. In: Barfield, B. J. und Gerber J. F. (Editors), *Modification of the aerial environment of plants*. Am. Soc. Agric. Eng., Michigan, 211-229.
- Philip, J. R. (1961). The theory of heat flux meters, *J. Geophys. Res.*, 66, 571-579.
- Van Loon, W. K. P., Bastings, H. M. H. und Moors, E. J. (1998). Calibration of soil heat flux sensors. *Agric. For. Meteorol.*, 92, 1-8.
- Watts, D. B., Kanemasu, E. T. und Tanner, C. B. (1990). Modified heat-meter method for determining soil heat flux. *Agric. For. Meteorol.*, 49, 311-330.