

Optimierung eines einfachen Verdunstungsverfahrens zur Bestimmung bodenhydraulischer Eigenschaften

A. Peters und W. Durner¹

Einleitung

Ein sehr einfaches Verfahren zur Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften aus Verdunstungsexperimenten ist das Verfahren nach Schindler (Schindler, 1980). In diesem Verfahren werden die Veränderungen des Gesamtgewichts und der Tensionen in zwei Tiefen und mit der Zeit erfasst.

Im Gegensatz zur inversen Simulation mit der Richardsgleichung werden die Flüsse sowie die Potenzial- und Wassergehaltsverteilung über Zeit und Raum linearisiert. Daraus ergeben sich diskrete Werte für die Retentions ($\theta(h)$)- und Leitfähigkeitsfunktion ($K(h)$), an die sich parametrische Funktionen anpassen lassen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die nicht vermeidbaren Linearisierungsfehler in Abhängigkeit von der zeitlichen Auflösung der Messungen sowie der Größe von Messfehlern zu analysieren und zu zeigen, wie sich bestimmte Fehler vermeiden bzw. minimieren lassen.

Theorie und Methoden

Linearisierungsannahmen

Das vereinfachte Verfahren nach Schindler beruht auf 4 Linearisierungsannahmen: Die Verläufe des Gewichtes (1) und der Potentiale (2) zwischen zwei Messzeitpunkten, sowie die Verteilung der Wassergehalte (3) und des Potentials (4) über die gesamte Säulenhöhe sind linear. Messungen und numerische Simulationen zeigen, dass diese Annahmen nicht immer erfüllt sind.

Unser Vorschlag zur Vermeidung, bzw. Abschwächung der zeitlichen Linearisierungsfehler bei größeren Messintervallen ist der Einsatz von Hermiteschen Splines zur Dateninterpolation (Abb. 1).

Die räumlichen Linearisierungsannahmen sind für die Potenzialverteilung in der ersten Phase der Verdunstungsmessung erfüllt (Abb. 2), bei der Wassergehaltsverteilung jedoch häufig nicht (Daten nicht gezeigt). Allerdings kann bei bekannter Potenzialverteilung auf die Annahme der linearen Wassergehaltsverteilung verzichtet werden wenn der integrale Ansatz von Peters und Durner (2006a) zur Parameterschätzung gewählt wird. Dieser Ansatz interpretiert die gemessenen Wassergehalte nicht als Punktmessungen, sondern

als Mittelwerte einer Wassergehaltverteilung über die Säulenhöhe. Dieser wird ermittelt durch Integration der Retentionsfunktion vom Potential am unteren Säulenrand, h_{ub} , bis zum Potential am oberen Säulenrand, h_{lb} :

$$\bar{\theta}(h) = \frac{1}{h_{ub} - h_{lb}} \int_{h_{lb}}^{h_{ub}} \theta(h) dh \quad (1)$$

Dadurch wird der räumliche Linearisierungsfehler minimiert (Abb. 3).

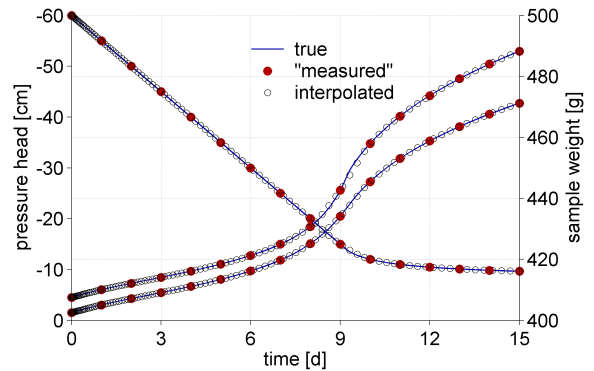


Abb.1 Zeitlicher Verlauf von Tensionen und Gewicht der Säule bei Verdunstung aus Sand. Aus den interpolierten Daten ergeben sich die diskreten Daten für die Auswertung.

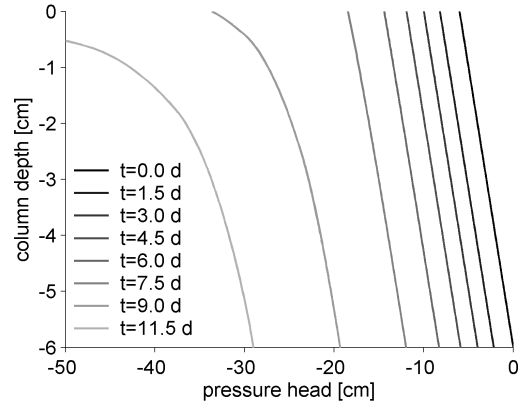


Abb.2 Potenzialverteilung über die Säulenhöhe zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei einem Sand.

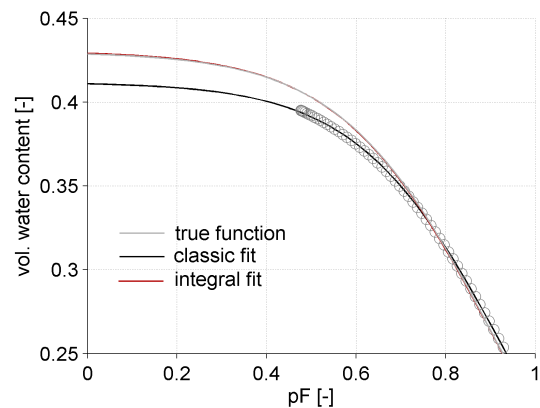


Abb.3: Vergleich von klassischer und integraler Anpassung mit wahrer Funktion bei einem Sand.

¹Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie, Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig. e-mail: a.peters@tu-bs.de

K(h)-Funktion nahe Sättigung

Eine bekannte Limitierung der Verdunstungsmethode liegt darin, dass sie aufgrund großer Unsicherheiten bei der Berechnung des hydraulischen Gradienten (∇H) in diesem Feuchtebereich nur wenig Informationen für die $K(h)$ -Funktion nahe Sättigung liefert. Die Unsicherheit von ∇H ist gegeben durch: $\sigma_{\text{gradH}} = \sigma_h / \Delta z$. Dabei sind σ_h und Δz der Fehler in der Tensionsmessung und der Tensiometerabstand. Wir schlagen vor alle $K(h)$ -Datenpaare die aus einem Gradienten kleiner als $6 \cdot \sigma_{\text{gradH}}$ resultieren aufgrund der hohen Unsicherheit zu verwerfen (Abb. 4).

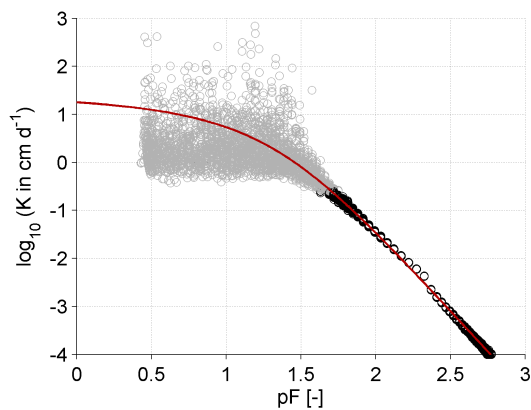


Abb.4: Wahre $K(h)$ -Funktion (rot) und Datenpunkte aus einer Monte-Carlo-Simulation des vereinfachten Verfahrens. Bodenart: Lehm. Schwarz: akzeptierte Werte; grau abgelehnte Werte. $\sigma_h=0.2 \text{ cm}$ $\Delta z=3 \text{ cm}$ ($\sigma_{\text{gradH}}=0.067$).

Sensitivitätsanalyse

Mit dem Software-Paket HYDRUS-1D wurden Verdunstungsexperimente für unterschiedliche bodenhydraulische Eigenschaften und Offsets in Tensiometerkalibration und -einbau entsprechend dem vereinfachten Verfahren simuliert. Aus den Simulationsergebnissen wurden Daten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung für die Verdunstungsmethode extrahiert, interpoliert (Abb. 1) und ausgewertet.

An den auf diese Weise erhaltenen diskreten Datenpunkten für $\theta(h)$ und $K(h)$ wurden die gekoppelten hydraulischen Funktionen angepasst und mit den wahren Funktionen verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Die Potenzialverteilung in der Säule ist in der ersten Phase des Experimentes quasi linear (Abb. 2), so dass die integrale Anpassung der Retentionsfunktion anwendbar ist und den Linearisierungsfehler $\theta(z)$ eliminiert (Abb.3). In der zweiten Phase ist dieser Fehler vernachlässigbar (Daten nicht gezeigt).

Durch die Interpolation mit Hermiteschen Splines genügt für Sande und Lehme eine zeitliche Messauflösung von einem Tag (Daten nicht gezeigt). Für Tone und strukturierte Böden sollten die Tensionen in höherer Auflösung gemessen werden.

Offsets in der Tensiometerkalibration die zur Überschätzung des hydraulischen Gradienten führen, ergeben einen starken systematischen Fehler bei der Berechnung von $K(h)$. Eine Unterschätzung von ∇H führt dagegen aufgrund des Ablehnungskriteriums in erster Linie zum Verwerfen von Daten, und damit zu weniger Information für $K(h)$. Einbaufehler der Tensiometer haben in erster Linie Auswirkungen auf die Schätzung der Funktionen im trockenem Bereich (Daten nicht gezeigt). Die Verdunstungsmethode liefert keine Informationen für die $K(h)$ -Funktion nahe Sättigung (Abb. 4).

Fazit

Die Verdunstungsmethode im Design nach Schindler zeigt sich mit unseren Verbesserungen des Auswerteverfahrens (Interpolation der diskreten zeitlichen Messdaten mit Hermiteschen Splines; Berücksichtigung des integralen Charakters der mittleren Wassergehalte; Wahl eines intelligenten Kriteriums zum Herausfiltern von unzuverlässigen $K(h)$ -Daten nahe Sättigung) sehr robust in Hinblick auf die Auswirkungen der dem Verfahren zu Grunde liegenden Linearisierungsannahmen. Die Fehler für Retentions- und Leitfähigkeitsdaten sind erstaunlich gering.

In Kopplung mit einem robusten Anpassungsverfahren für die gekoppelten hydraulischen Funktionen (SHYPFIT 2.0, Peters und Durner, 2006b) ergibt sich somit ein praxistaugliches Verfahren, welches bei geringem Messaufwand zu sehr präzise bestimmten hydraulischen Funktionen führt. Das Verfahren wird ab Herbst 2007 von der Firma UMS München unter der Produktbezeichnung HYPROP als Hardware+Software-Paket vertrieben.

Literatur

- Schindler, U. (1980), Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben, Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenk., 24, 1-7.
- Peters, A. und W. Durner (2006a), Improved estimation of soil water retention characteristics from hydrostatic column experiments, Water Resour. Res., doi:10.1029/2006WR004952 .
- Peters, A. und W. Durner (2006b), SHYPFIT 2.0 User's Manual, Internal Report. Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig.