

# Bodenfeuchtesensoren, eine brauchbare Alternative zu Tensiometern auf Baustellen?

Luzius Matile<sup>1</sup> und Christine Meyer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen, ZHAW, Wädenswil

<sup>2</sup>FRIEDLIPARTNER AG, Zürich

## Zusammenfassung

Tensiometer spielen eine zentrale Rolle für den Bodenschutz auf Baustellen, sie sind aber in der Regel wartungsintensiv. Es stellt sich darum die Frage, ob nahezu wartungsfreie Matrixpotenzialsensoren Tensiometer teilweise oder ganz ersetzen könnten. Darum wurden an zwei Standorten Vergleichsmessungen von PlantCare-Sensoren und Tensiometern durchgeführt. Die Übereinstimmung der Werte von Tensiometern und PlantCare-Sensoren war in vielen Fällen gut, aber vor allem beim schwereren Boden von Fehraltorf reagierten in zwei Situationen nach kleineren Niederschlägen die Sensoren wegen hydraulischer Entkopplung teilweise nicht oder nicht vollständig auf die veränderten Bedingungen. In diesen Fällen wäre die Tragfähigkeit des Bodens massiv überschätzt worden. Nach den vorliegenden Vergleichsmessungen ist der Einsatz der Sensoren im aktuellen Entwicklungsstand für eine Anwendung im Bereich Bodenschutz limitiert auf leichte bis allenfalls mittelschwere Böden.

## Abstract: Matric potential sensors, a useful alternative to tensiometers on construction sites?

Tensiometers play a key role for soil protection on construction sites, but they are usually very maintenance-intensive. This raises the question of whether almost maintenance-free matrix potential sensors can partially or completely replace tensiometers. Therefore, comparative measurements of PlantCare sensors and tensiometers were carried out at two sites. The correspondence between the values of tensiometers and PC-sensors was good in many cases, but especially in the finer textured soil of Fehraltorf, the sensors did sometimes after minor precipitations not reflect the changed conditions due to hydraulic decoupling. In these cases, the susceptibility to compaction of the soil would have been massively underestimated. According to the present comparative measurements, the use of the sensors in the current state of development is limited to an application in the field of soil protection on light to at most medium textured soils.

**Keywords:** tensiometer, matric potential sensors, soil protection, construction site

---

## 1. Einleitung

Die Messung der Saugspannung mit Tensiometern spielt eine zentrale Rolle für die Beurteilung der Tragfähigkeit des Bodens auf Baustellen (BFE, 1997; BUWAL, 2001; BAFU, 2015). Gleichzeitig sind Tensiometer relativ wartungsintensiv (YOUNG and SISSON, 2002) und bei den meisten Tensiometern, die in der Praxis auf Baustellen zur Anwendung kommen, werden die Daten nicht automatisch übertragen. Eine alternative Möglichkeit die Saugspannung zu ermitteln, besteht in einer indirekten Messung durch Matrixpotenzialsensoren (SCANLON and ANDRASKI, 2002). Bei dieser Art von Sensor wird der Wassergehalt in einem porösen Material gemessen, das mit dem Boden in Kontakt steht und folglich im Gleichgewicht das gleiche Matrixpotenzial wie der Boden aufweisen sollte. Mögliche Fehlerquellen

bei der Messung mit diesen Sensoren sind je nach Messbereich Einschränkungen der Auflösung bedingt durch die Porenstruktur, Hystereseeffekte und insbesondere hydraulische Entkopplung bei stark unterschiedlich grossen Poren von Boden und Sensor (SCANLON and ANDRASKI, 2002). Beim letzten Effekt bildet sich zeitweise eine Kapillarsperre zwischen Boden und Sensor aus.

Ob nahezu wartungsfreie Matrixpotenzialsensoren, deren Signale automatisch aufgezeichnet und verschickt werden können, genügend genau und zuverlässig sind, um Tensiometer für den Bodenschutz auf Baustellen teilweise oder ganz ersetzen zu können, hängt in erster Linie von der Porenstruktur des Sensormaterials, aber auch von der Textur des Bodens ab.

In einem Praxistest wurden an zwei Standorten mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften Vergleichsmessungen zwischen den Matrixpotentialsensoren von PlantCare (PC-Sensoren) und Tensiometern durchgeführt.

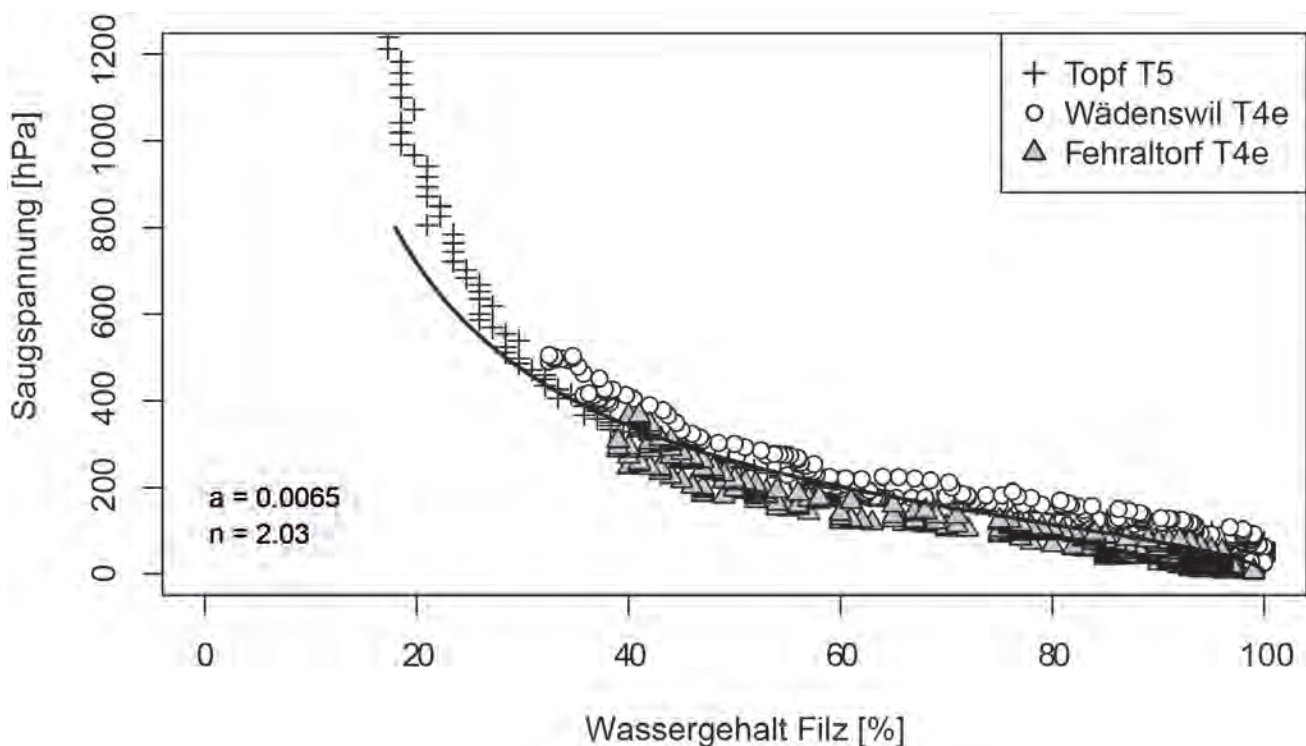
## 2. Material und Methoden

Die Vergleichsmessungen wurden von Juni bis Oktober 2016 auf einer Baustelle (Terrainveränderung) in Fehrltorf und bei der Bodenfeuchtemessstation in Wädenswil durchgeführt. Die beiden Standorte weisen unter anderem eine unterschiedliche Textur auf (Tabelle 1). Die Vergleichs- und Kalibrationsmessungen wurden mit UMS-Tensiometern ([www.ums-muc.de](http://www.ums-muc.de)) gemacht. In Fehrltorf waren dies fünf T4e-Tensiometer in 35 cm Tiefe (entsprechend der Tensiometerstation der Baustelle) und in Wädenswil drei T4e-Tensiometer der Bodenfeuchtemessstation in 20 cm Tiefe. In Wädenswil wurden die Oberbodenwerte verwendet, um für die Vergleichsmessungen möglichst viele starke Änderungen der Bodenfeuchte erfassen zu können. Mit zwei T5-Tensiometern, die durch Siedeverzug weit über 1000 hPa messen können, wurden in einem Austrocknungsversuch mit Boden vom Standort Wädenswil die Kalibrationsmessungen ergänzt.

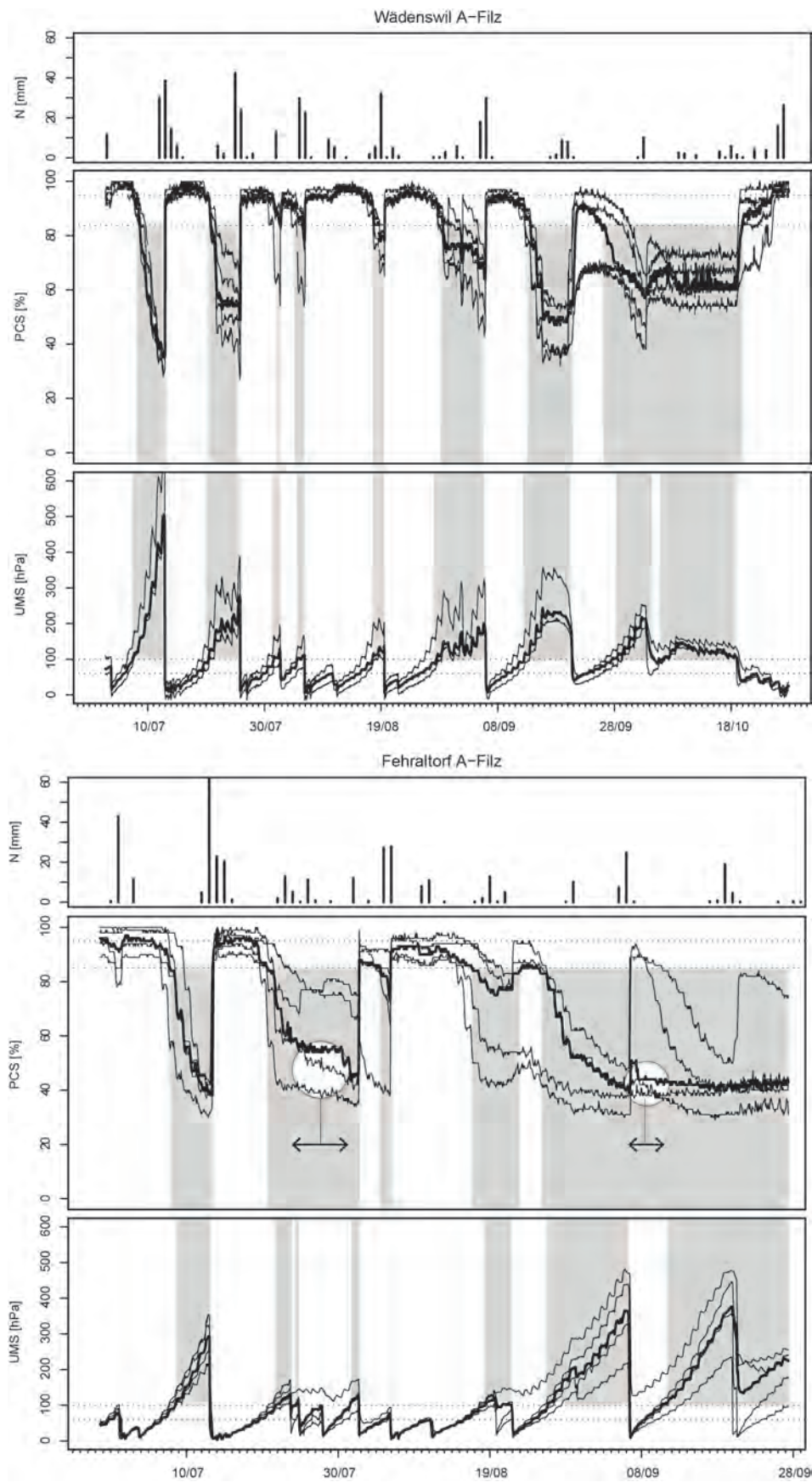
**Tabelle 1:** Standortparameter

	Wädenswil	Fehrltorf
Sensortiefe	20 cm	35 cm
Bodentyp	Saure Braunerde	Fahlgley anthropogen überprägt
Textur	21 T / 34 U / 45 S	29 T / 37 U / 34 S
Organische Substanz	3.7 %	3.1 %
Skelettanteil	12 %	2 %
pflanzennutzbare Gründigkeit	67 cm	24 cm
Nutzung	Wiese	Wiese

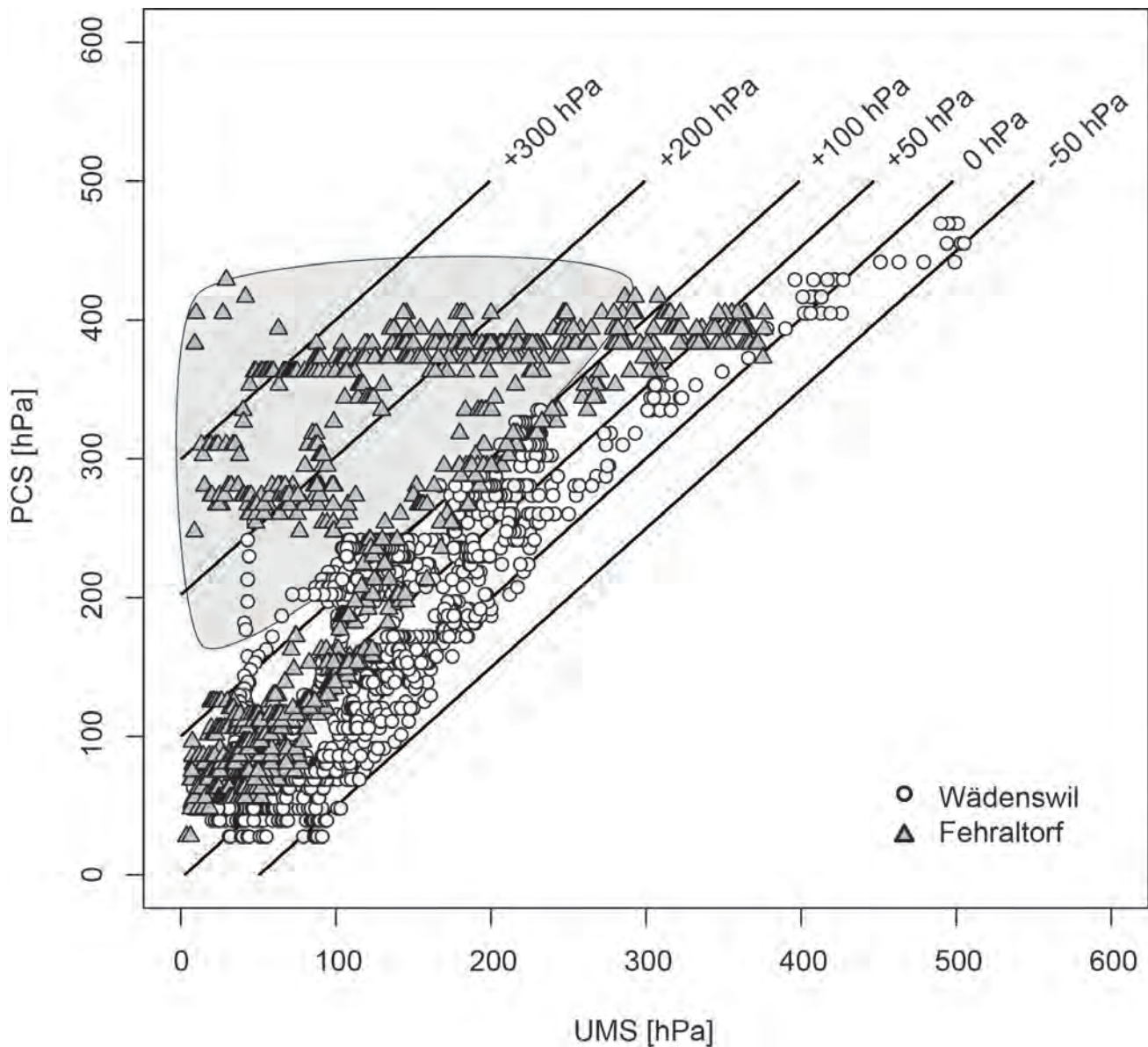
Die bei Bewässerungssteuerungen erfolgreich eingesetzten PlantCare-Sensoren ([www.plantcare.ch](http://www.plantcare.ch)) ermitteln das Matrixpotenzial indirekt, indem der Wassergehalt in einem Filz, der mit dem Boden in Kontakt steht, gemessen wird. Dabei setzt man voraus, dass das Matrixpotenzial im Filz dem im Boden entspricht. Der Wassergehalt im Filz wird indirekt über die Abkühlgeschwindigkeit eines Wärmepulses bestimmt, basierend auf den stark unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten von Luft und Wasser (MATILE et al., 2013). Die Bodenfeuchtwerte können entweder als Abkühlzeiten in Sekunden oder als



**Abbildung 1:** Kalibration der PC-Sensoren durch UMS-Tensiometer (T4e, T5) in Fehrltorf (Dreieck), in Wädenswil (Kreis) und in einem Austrocknungsversuch mit Boden von Wädenswil (Kreuz). Die Parameter der Regressionskurve sind  $\alpha = 0.0065$  und  $n = 2.03$  (VAN GENUCHTEN, 1980).



**Abbildung 2:** Saugspannungsverlauf in Wädenswil (oben) und Fehraltorf (unten). UMS-Tensiometer (UMS, Median fett) und PC-Sensoren (PCS, Median fett) sowie Niederschlag (N). Graue Flächen markieren Perioden mit einer Saugspannung über 100 hPa. Weisse Kreisflächen markieren Messkurven hydraulisch entkoppelter Sensoren während der zwei markierten Messperioden (24. Juli bis 1. August und 4. bis 10. September)



**Abbildung 3:** Korrelation der Medianwerte von PC-Sensoren und UMS-Tensiometern in Wädenswil (Kreis) und in Fehraltorf (Dreieck); Kontouren der Abweichung der PC-Sensorwerte. Die graue Fläche markiert den Bereich hydraulischer Entkopplung.

Wassergehalt des Filzes in Prozent angegeben werden. Die Prozentwerte können durch Parametrisierung der Kalibrationskurve (VAN GENUCHTEN, 1980) in Saugspannungswerte umgerechnet werden (Abbildung 1). Damit die PC-Sensoren der Textur des Bodens oder dem Substrat angepasst werden können, stehen drei Filztypen mit unterschiedlicher Porengröße zur Verfügung. In allen hier präsentierten Versuchen wurden die feinporigsten A-Filze verwendet, weil sie der Porenstruktur der untersuchten Böden am ähnlichsten sind. Die anderen gröberen Filze sind eher geeignet zur Messung in grobkörnigen Substraten.

### 3. Resultate und Diskussion

Die Übereinstimmung der Werte von Tensiometern und PlantCare-Sensoren war in vielen Fällen gut, aber vor allem in Fehraltorf reagierten in zwei Messperioden (24. Juli bis 1. August und 4. bis 10. September) nach kleineren Niederschlägen die Sensoren teilweise nicht oder nicht vollständig auf die veränderten Bedingungen (Abbildung 2). In diesen Fällen wäre die Tragfähigkeit des Bodens massiv überschätzt worden.

Ein solches Verhalten kann die Folge stark unterschiedlicher Porenstruktur von Filz und Boden sein. Wenn die Poren des Filzes deutlich gröber sind als jene des Bodens, kann sich bei sinkender Saugspan-

nung an der Grenze zwischen Boden und Filz eine Kapillarsperre bilden. Die Konsequenz davon ist, dass der Sensor nach einem Niederschlagsereignis eine zu hohe Saugspannung anzeigt. Je ähnlicher die Porenstruktur von Filz und Boden sind, umso kleiner ist die Gefahr einer solchen hydraulischen Entkoppelung. Dieser Effekt war in Fehraltorf mit einem schwereren Boden demnach auch wesentlich ausgeprägter als in Wädenswil, wo in der untersuchten Periode keine entscheidungsrelevanten Unterschiede festgestellt wurden. Für schwere Böden existiert zurzeit kein genügend feinporiger Filz, um hydraulische Entkopplung zu vermeiden. Die Tendenz war aber auch in Wädenswil als abweichendes Verhalten zweier Sensoren nach dem 19. September vorhanden, was aber auf den Medianwert keinen Einfluss hatte. Es gab aber auch bei Tensiometern Abweichungen wie nach dem 24. Juli in Fehraltorf. Es handelte sich aber stets um Einzelfälle ohne oder mit einem lediglich geringen Einfluss auf den Median, die als eine Folge von Bodenheterogenitäten wie präferentiellen Fließwegen interpretiert werden. Effekte durch Alterungsprozesse, wie Verstopfen der Poren des Filzes, sind denkbar, wurden aber bei Versuchen bis jetzt nicht beobachtet. Die kostengünstigen Filze können zudem einfach ersetzt werden.

Die Genauigkeit der Saugspannungsmessung mit den Matrixpotentialsensoren war in vielen Fällen genügend, um die Bodenbelastbarkeit richtig einschätzen zu können. Es ergaben sich aber wie in Fehraltorf auch einige massive Abweichungen durch hydraulische Entkopplung (Abbildung 3). Wie man den Kalibrationskurven von Abbildung 1 entnehmen kann, wird die Messung auch durch die Textur beeinflusst (MATILE et al., 2013).

Der PC-Sensor hat sich bewährt bei der Bewässerungssteuerung, bei der vor allem die Messung während des Austrocknungsvorgangs wichtig ist. Dabei behindern etwas gröbere Poren im Filz verglichen mit dem Boden den Wasserfluss zwischen den beiden Medien nicht. Im umgekehrten Fall, bei der Benetzung, wenn das Wasser vom Boden in den Filz fließen muss, kann sich jedoch eine Kapillarsperre ausbilden. Dies kann bei stark abweichenden Porengrößen und kleineren Niederschlagsereignissen verhindern, dass sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Um diesen Effekt zu vermeiden, sollte der Filz eine möglichst ähnliche Porenstruktur wie der Boden aufweisen. Nach den vorliegenden Vergleichsmessungen ist der Einsatz der Sensoren im aktuellen Entwicklungsstand für eine Anwendung im Bereich Bodenschutz limitiert auf leichte bis allenfalls mittelschwere Böden. Bei unbekanntem Bodenverhält-

nissen sind Kontrollmessungen mit Tensiometern notwendig.

#### 4. Literatur

BAFU (Hrsg.) BELLINI, E. 2015: Boden und Bauen. Stand der Technik und Praktiken. Umwelt-Wissen Nr. 1508: Bundesamt für Umwelt, Bern.

BFE, 1997: Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien). Bundesamt für Energie, Bern.

BUWAL, 2001: Bodenschutz beim Bauen, Leitfaden Umwelt (Nr. 10). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.

MATILE, L., R. BERGER, D. WÄCHTER and R. KREBS, 2013: Characterization of a new heat dissipation matrix potential sensor. *Sensors* 13, 1137–1145.

SCANLON, B.R. and B.J. ANDRASKI, 2002: Miscellaneous methods for measuring matrix or water potential, in: DANE, J.H. and G.C. TOPP (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Physical Methods*. Soil Science Society of America, pp. 643–670.

VAN GENUCHTEN, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892–898.

YOUNG, M.H. and J.B. SISSON, 2002: Tensiometry, in: DANE, J.H. and G.C. TOPP (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Physical Methods*. Soil Science Society of America, pp. 575–608.