

Elektrophysikalische Aquametrie

C. Hübner, A. Brandelik, IMK

Einleitung

In der elektrophysikalischen Aquametrie werden Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts in Gemischen entwickelt. Im Gegensatz zu chemisch-analytischen Methoden ermittelt man die Materialfeuchte in-situ unter Verzicht auf Probenahmen. Als Messeffekt nutzt man meistens die starke Wechselwirkung zwischen elektromagnetischen Feldern und Wassermolekülen. Ein Schwerpunkt der Aquametrieforschung im FZK ist die großflächige und großvolumige Wassergehaltsbestimmung in inhomogenen Medien. Dabei werden Aufgaben bearbeitet, die von der Analyse der unterschiedlichen Bindungsarten von Wassermolekülen an Festkörperoberflächen über die Untersuchung der Ausbreitungseigenschaften freier und geführter elektromagnetischer Wellen in Materialien bis zur Entwicklung und Demonstration neuer Messverfahren in großtechnischen Pilotanlagen reichen. In der anwendungsorientierten Forschung im FZK werden Feuchtemessverfahren für Böden und Schneedecken, aber auch für Baustoffe und Filtermaterialien in der Abgasreinigung untersucht.

Einige Aufgaben der Aquametrie:

- Das Wasser im Boden spielt aufgrund seiner Wärmeleit- und speicherfähigkeit eine entscheidende Rolle für den Energieaustausch zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre und bildet einen wichtigen Eingabeparameter für meteorologische Modellrechnungen und Vorhersagen. Dazu bedarf es einer genauen und

großflächigen Erfassung der Bodenfeuchte, da Abweichungen von 1-2% im absoluten Wassergehalt je nach Bewuchs den Unterschied zwischen turbulenter und laminarer Verdunstung ausmachen können. Aus der Bodenfeuchte lässt sich der Sättigungsgrad und damit die verbleibende Pufferkapazität eines Bodens bestimmen. Eine genaue und großflächig angelegte Wassergehaltsbestimmung trägt dadurch auch zu einer frühzeitigeren Erkennung von Hochwassergefahren bei.

- Im Zuge der Diskussion um die globale Erwärmung richtet sich das Interesse der Klimaforscher auf die Gletscher in polaren Breiten. Die Bestimmung der Schneefeuchte ist ein Baustein für die Beantwortung der Frage, ob die Polkappen abschmelzen und der dadurch verursachte Anstieg des Meeresspiegels wertvolle Siedlungsflächen gefährden wird. In unseren Breiten ist die genaue Bestimmung des Wassergehalts im Schnee auch für die Zuflussprognose von Wasserkraftwerken maßgeblich und bildet die Grundlage für einen optimierten Kraftwerkseinsatz. Für das geplante und vom IMK koordinierte EU-Projekt SNOWPOWER wurden vom kanadischen Partner Hydro-Quebec, einem der weltgrößten Erzeuger von Strom aus Wasserkraft, Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zum Einsatz verbesserter Schneefeuchtemessverfahren angestellt. Für den Fall des La-Grande-River-Einzugsgebiets ergaben

sich Ertragssteigerungen von 2,2 TWh bzw. 45.000.000 Euro bei einer Verbesserung der Zuflussprognose um nur 10%. Darüber hinaus tragen Schneefeuchtemessungen zur Lawinen- und Hochwasservorhersage bei. Auch hier sind Messgenauigkeiten von 1-2% im absoluten Wassergehalt gefordert, um das Ausmaß und den Zeitpunkt der Wasserperkolations durch die Schneedecke zu bestimmen.

- In der Bautechnik ist die Wassergehaltsbestimmung unverzichtbar für die Produktion von Baustoffen, die Qualitätskontrolle beim Bau sowie die Überwachung von Bauwerken gegen Wassereintritt und Durchfeuchtung. Z.B. hat eine Unsicherheit von 1-2% im absoluten Wassergehalt von Frischbeton erheblichen Einfluss auf die Endfestigkeit und die Abbindezeit. In der Transportbetonindustrie besteht deshalb ein dringender Bedarf an Feuchtemesssystemen, mit denen insbesondere der Wassergehalt der Zuschlagsstoffe verlässlich bestimmt werden kann.

Viele der bisher bekannten Verfahren und Methoden zur quantitativen Bestimmung des Wassergehalts sind für diese Aufgaben zu ungenau, arbeits- und kostenintensiv sowie nicht automatisierbar. Es fehlt teils an systematischen Untersuchungen zum physikalischen Messeffekt, teils an der praktischen Umsetzung in einsetzbare Messsysteme [1]. In der elektrophysikalischen Aquametrie werden deshalb auf der Basis grundlegender methodischer Untersuchungen neue Ver-

fahren für die wachsenden Anforderungen wissenschaftlicher und industrieller Anwender entwickelt. Eine Voraussetzung dafür ist die umfassende Kenntnis der Materialeigenschaften.

Dielektrische Materialeigenschaften und Mischungsregeln

In der Feuchtemesstechnik haben sich in vielen Bereichen die dielektrischen Verfahren aufgrund ihres ausgeprägten physikalischen Messeffekts durchgesetzt [2]. Diese Verfahren nutzen die besonderen dielektrischen Eigenschaften von Wasser. So liegt die Dielektrizitätszahl (DZ) von Wasser in den üblichen Temperatur- und Frequenzbereichen bei etwa 80, während Luft eine DZ von 1 und z.B. mineralische Bodenbestandteile selten höhere Werte als 6 bis 7 aufweisen. Deshalb ist die effektive DZ einer Mischung aus diesen Materialien vornehmlich durch ihren Wassergehalt bestimmt. Auf die Berücksichtigung des Verlustanteils, der durch den Imaginärteil der DZ repräsentiert wird kann meistens verzichtet werden. Die Berechnung der effektiven DZ erfolgt mit Hilfe von Mischungsregeln aus den bekannten dielektrischen Eigenschaften und Volumenanteilen der Einzelkomponenten. Das Aufstellen und die Auswahl einer geeigneten Mischungsregel hängt wesentlich von der Art und Form der Einzelkomponenten sowie ihrer Anordnung innerhalb des Gemisches ab. Für viele Materialien ist die angemessene Berücksichtigung der strukturellen Eigenheiten sowie der Wechselwirkungen zwischen den Einzelbestandteilen nur unzureichend

möglich. Deshalb greift man zu vereinfachten Mischungsmodellen, empirisch bestimmten Kalibrierfunktionen oder versucht mit Hilfe statistischer Ansätze die charakteristischen Eigenschaften von Mischungen zu erfassen. Ein Beispiel ist das in Abb. 1 gezeigte dreidimensionale Mischungsmodell.

Das Materialgemisch, eine aus den Einzelkomponenten Wasser, Luft und mineralische Körner bestehende fiktive Bodenprobe wird zwischen den Platten eines Kondensators angeordnet. Das Gemisch setzt man aus einer Vielzahl von Einzelwürfeln zusammen, denen man per Zufallsgenerator und gemäß vorgegebener Volumenanteile der Einzelkomponenten DZ-Werte zuordnet. Mit Hilfe elektromagnetischer Feldberechnung bestimmt man die Kapazität der Anordnung und berechnet daraus die DZ der Mischung. Die mit diesem Modell erzielten Ergebnisse sind im Ver-

gleich zu experimentell erfassten DZ-Werten für einen Sand von der Messwiese des IMK in Abb. 2 aufgetragen.

Diese Messungen wurden mit am IMK entwickelten DZ-Messplätzen durchgeführt (siehe z.B. Abb. 3). Für den Frequenzbereich zwischen 100 MHz und 2 GHz bestehen die Messplätze aus koaxialen Leitungsstrukturen oder Hohlleitern, in die das zu untersuchende Material eingefüllt wird. Die Hochfrequenzersatzschaltbilder der Sonden wurden mit elektromagnetischen Feldberechnungsverfahren bestimmt und geeignete Kalibriermethoden abgeleitet. Mit Netzwerkanalysatoren werden die Reflektions- bzw. Transmissionseigenschaften gemessen und daraus die dielektrischen Materialeigenschaften berechnet.

Die Materialproben können in den Messfassungen temperiert werden. Das Beispiel eines Opalinus-Tons zeigt einen für diese

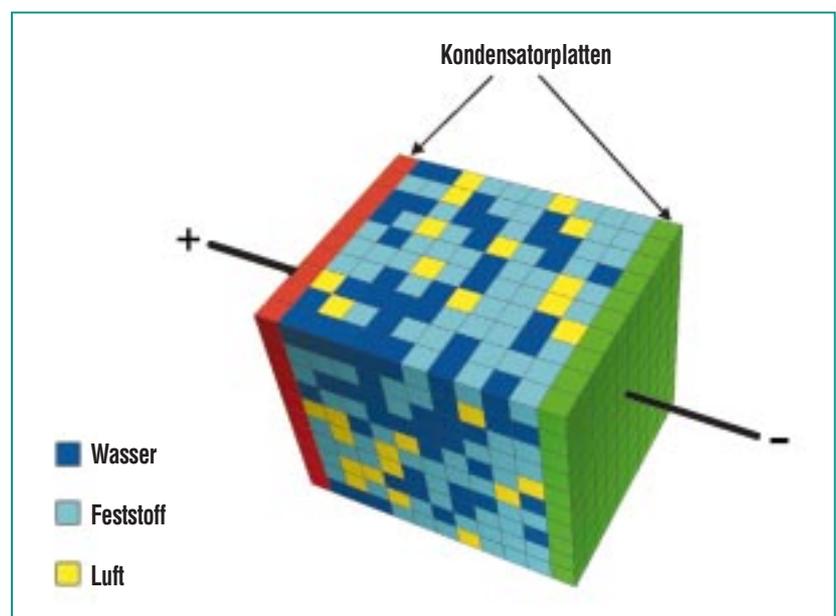


Abb. 1: Dreidimensionales Mischungsmodell.

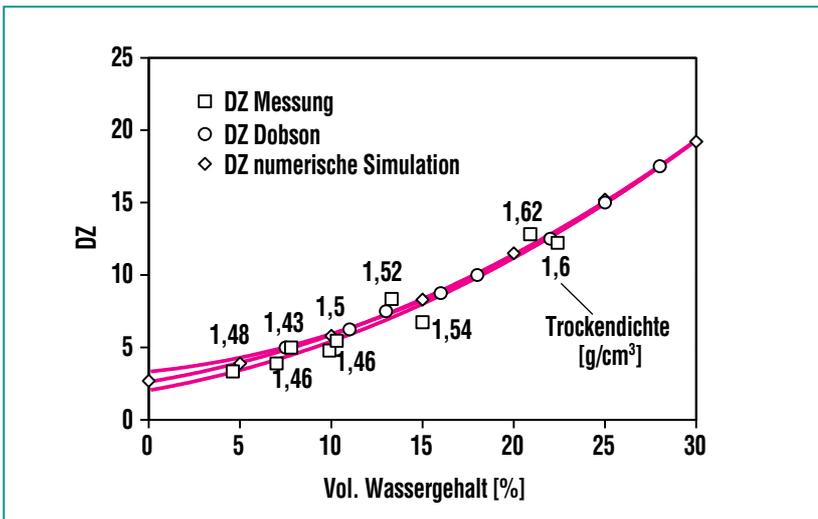


Abb. 2: Komplexe DZ von Sand (Messwiese des IMK). Vergleich des Realteils der DZ für die Messung, das Model nach Dobson [3] und die numerische Simulation. Die Schwankungen der Messung sind auf die Probenpräparation zurückzuführen. Die dadurch verursachte Messunsicherheit ist deutlich höher als die des Messplatzes von $\pm 0,1$ für die DZ.

Stoffklasse typischen Verlauf der temperatur- und frequenzabhängigen DZ (Abb. 4). Sowohl der Abfall der DZ mit steigender Frequenz als auch der Vorzeichenwechsel des Temperaturkoeffizienten bei etwa 700 MHz kann durch die Überlagerung von Leitfähigkeits- und Relaxationsverhalten des Porenwassers erklärt und modelliert werden.

Bei Materialien mit sehr großer innerer Oberfläche, wie z.B. bei den in der Baustoffindustrie vermehrt eingesetzten Bentoniten muss man noch weitere Effekte berücksichtigen. So sind die in der Materialmatrix eingebetteten Wassermoleküle an den Grenzflächen einer Reihe von bindenden Kräften ausgesetzt, die zu einer Veränderung ihrer dielektrischen Eigenschaften führen [4]. Deshalb wird das als gebunden bezeichnete Wasser in den Mi-

schungsregeln üblicherweise als separate Komponente neben freiem Wasser berücksichtigt.

Die Kenntnis der Abhängigkeit der DZ eines Materials von Was-



Abb. 3: Messplatz zur Bestimmung von dielektrischen Materialeigenschaften.

sergehalt, Dichte, Leitfähigkeit, Frequenz, Temperatur usw. ist die Voraussetzung zur Lösung einer Feuchtemessaufgabe. Darüber hinaus müssen geeignete Methoden entwickelt werden, um die DZ des Materials nicht nur mit Messplätzen im Labor, sondern auch unter Feldbedingungen bestimmen zu können. Hierbei ergeben sich eine Reihe zusätzlicher anwendungsspezifischer Randbedingungen und Anforderungen, die sich in den folgenden Beispielen der am IMK entwickelten Sensoren widerspiegeln.

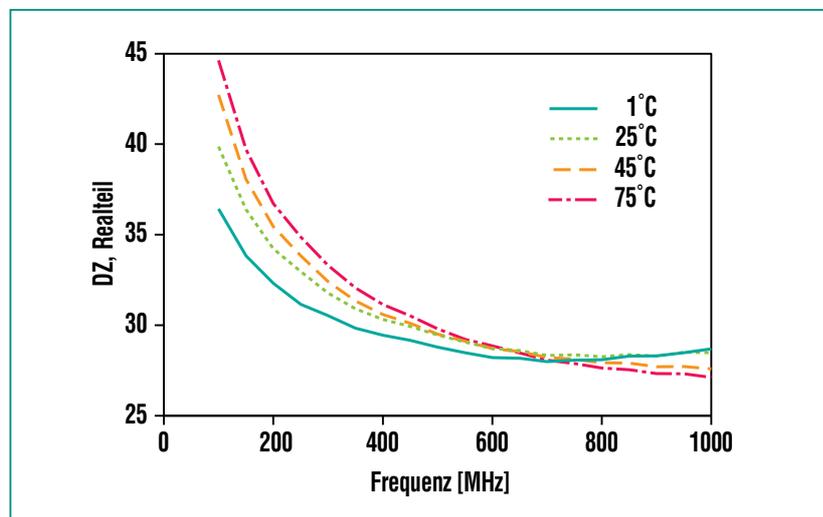


Abb. 4: Temperatur- und Frequenzabhängigkeit der DZ von Opalinus-Ton aus dem Felslabor Mont Terri (Schweiz) der NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle).

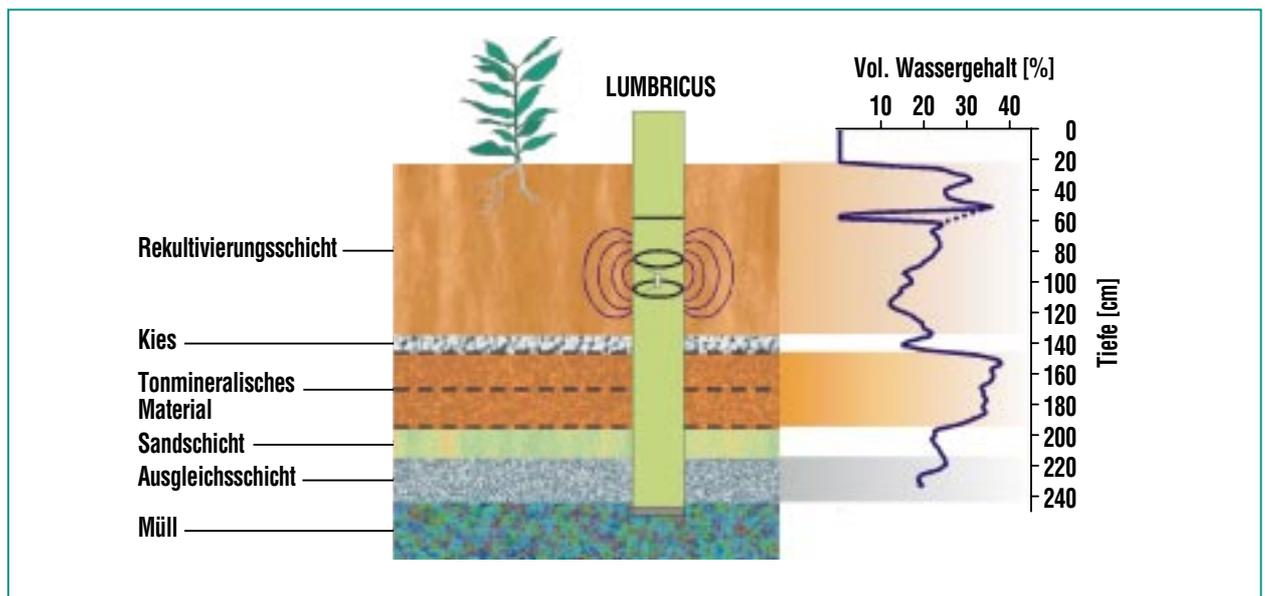


Abb. 5: Bodenfeuchtesensor LUMBRICUS, Messung des Wassergehaltsprofils in den verschiedenen Lagen einer Deponieabdichtung.

Bodenfeuchtesensor LUMBRICUS

Für meteorologische und hydrologische Anwendungen wurde ein Verfahren und Sensor zur zerstörungsfreien Profilmessung der Bodenfeuchte entwickelt. Da-



Abb. 6: Befüllung des Glasfaserrohrs mit flüssigem Stickstoff zum Ausfrieren des umliegenden Bodens.

mit kann der vertikale Wassertransport im Boden und die zur Verdunstung verfügbare Wassermenge verfolgt werden. Der Sensor besteht aus einem Glasfaserrohr, das in den Boden eingesetzt wird und in dem sich eine Antenne (Resonator) auf- und abbewegt (Abb. 5). Eine besondere Einbringtechnik für das Glasfaserrohr minimiert die Störung des natürlichen Bodengefüges.

Das elektrische Feld der Antenne reicht durch die Rohrwandung in den umliegenden Boden und wird durch dessen dielektrische Eigenschaften beeinflusst. Dies äußert sich in einer Verschiebung der Resonanzfrequenz sowie Änderungen in der Resonanztiefe und -breite. Aus den Resonanzkurven kann auf die DZ des umgebenden Bodens und über die Mischungsregeln auf den Wassergehalt geschlossen werden. Zur Erfassung von

Bodendichteschwankungen und unterschiedlichen Mineralstoffeigenschaften wird die DZ sowohl im ungefrorenen als auch einmal im gefrorenen Zustand des Bodens bestimmt. Zum Gefrieren füllt man flüssigen Stickstoff in das Glasfaserrohr (Abb. 6). Im umliegenden Boden ändert sich dabei nur die DZ des Wassers (80) zu der von Eis (3,2). Wegen der Eisausdehnung steigt dabei die Porensättigung. Die DZ-Werte der mineralischen Bodenkörner und der Porenluft bleiben durch die Temperaturänderung weitgehend unbeeinflusst. Eine Differenzbildung ermöglicht deshalb eine dichte- und bodenparameterunabhängige Feuchtemessung im Feld ohne vorherige Laborkalibrierung.

Das Messverfahren wurde im Rahmen eines Technologietransfer-Projekts mit der Fa. Meteolabor AG (Wetzikon, Schweiz) zu einem Gerät weiterentwickelt,

mit dem man Wassergehaltsprofile im automatisierten Feldbetrieb aufzeichnen kann [5]. Die Messgenauigkeit beträgt etwa $\pm 1\%$ im absoluten volumetrischen Wassergehalt bei einer vertikalen Auflösung von 3 cm und einer Rohrlänge von bis zu 2,5 m.

Großflächiger Feuchtesensor TAUPE

Der Feuchtesensor TAUPE wurde für die großflächige Bestimmung von Wassergehaltsverteilungen in horizontalen Bodenschichten entwickelt [6]. Aufgrund der räumlichen Variabilität der Bodenfeuchte ist man sowohl an repräsentativen Feldmittelwerten als auch an der Lokalisierung trockener und feuchter Zonen interessiert. Ein Anwendungsbeispiel ist die Überwachung von Mülldeponien, für die gesetzliche Vorgaben ein regelmäßig kontrolliertes Abdichtungsbauwerk vorsehen (siehe Technische Anleitung zur Behandlung von Siedlungsabfällen TA-Si). Mülldeponien werden deshalb in vielen Fällen mit tonmineralischen Oberflächenabdichtungen versehen, um ein Auswaschen der im Müllkörper befindlichen Schadstoffe durch Regenwasser zu verhindern und dadurch das Grundwasser vor Verunreinigungen zu schützen. Die Dichtschichten sollen eine Wassersperre bilden und dabei erwarteten Setzungen der Deponie folgen. Um dies zu gewährleisten, darf sich der Wassergehalt in den zur Abdichtung eingesetzten tonmineralischen Materialien nur innerhalb einer engen Bandbreite von etwa 5% bezogen auf den absoluten volu-

metrischen Wassergehalt bewegen. Besonders gefährlich ist eine Austrocknung, die zu Schrumpfrissen, einem starken Anstieg der hydraulischen Leitfähigkeit und dadurch zu einem Versagen der Abdichtung führen kann. Die bisher übliche Kontrolle mittels Sickerwasserbrunnen signalisiert Schäden zu spät und erlaubt keine Ortung der Versagensstelle. Aus diesem Grund wurde der Feuchtesensor TAUPE entwickelt, mit dem man die Wassergehaltsänderungen und dadurch den Zustand der tonmineralischen Abdichtungsschicht kontrollieren kann. Der Wassergehalt bzw. die Austrocknung in der Abdichtungsschicht wird mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5\%$ bei einer Ortsauflösung von ca. 5 m bestimmt. Bei einem kontinuierlichen Monitoring kann man die Entwicklung einer Gefährdung frühzeitig beurteilen. Reparaturen von Schadstellen sind dadurch kleinräumig und kostensparend möglich.

Das Feuchtemesssystem TAUPE besteht aus feuchteempfindlichen Kabelnetzwerken als Sensoren, die während des Baus der Abdichtung in die zu untersuchenden Schichten eingelegt werden (Abb. 7).

Bei den Sensorkabeln handelt es sich um Flachbandleitungen. Das elektromagnetische Feld der Kabel und die dazugehörigen Wellenausbreitungseigenschaften werden durch die DZ des umgebenden Bodens beeinflusst. Diese DZ kann mit Hilfe von Laufzeit- und Phasenmessungen bestimmt und über eine Kalibrierfunktion der Wassergehalt für jeden Teilbereich der Abdichtung angegeben werden [7]. Die vom Land Baden-Württemberg geförderte Demonstrationsanlage auf der Mülldeponie Karlsruhe-West ist seit 3 Jahren in Betrieb und kann von Interessenten besichtigt werden. Im Rahmen eines Folgeprojektes wird derzeit an der Erweiterung des Messverfahrens



Abb. 7: Verlegung des Kabelnetzwerks auf der Mülldeponie Karlsruhe-West. Die weißen Flachbandleitungen werden kreuzförmig über die zu überwachende Fläche gelegt. Danach erfolgt eine Abdeckung mit einem Geotextil.

gearbeitet, um auch Wassersperren aus Kunststoffdichtungsbahnen überwachen zu können. Eine weitere Anwendung ist die Untersuchung der Langzeitfunktionsfähigkeit von Dränagematten, die im Tiefbau eingesetzt werden. Mit dem Feuchtesensor Taupe wird dazu auf zwei Mülldeponien in Bochum und Magdeburg der Wassertransport im Boden über der Dränage erfasst. Ein Trend in der Bautechnik ist die Verwendung von Verbundwerkstoffen, wie z.B. geosynthetischen Bentonitmatten als Abdichtungsmaterial. Bisher gibt es jedoch nur wenige Erkenntnisse über deren Langzeitverhalten unter realen Bedingungen. Im Rahmen einer Kooperation mit der Fa. Naue Fasertechnik wurden 6 Großlysimeter mit modifizierten TAUPE-Sensoren bestückt. Seit 2 Jahren wird damit der Wasserhaushalt und die saisonale Austrocknung bzw. Durchfeuchtung der Bentonitmatten überwacht. Die Schwierigkeit bestand darin, das Messvolumen der Sensoren durch eine geeignete elektromagnetische Abschirmung auf die nur 8 mm dicken Bentonitmatten, unabhängig von den darüber- und darunterliegenden Materialien zu begrenzen.

Schneefeuchtebestimmung

Ein weiteres Beispiel für die Notwendigkeit einer großflächigen Wassergehaltsbestimmung ist die Schneefeuchtemessung. Schneedecken weisen je nach Durchfeuchtungsgrad eine starke räumliche Variabilität des Wassergehalts auf. Aufgrund der klei-

nen Messvolumina ermöglichen die bisher bekannten In-situ-Messgeräte keine ausreichende Mittelung über die natürlichen Inhomogenitäten. Deshalb wurde ein neues Messverfahren entwickelt, mit dem man über die räumlichen Feuchteschwankungen integrieren und ihre zeitlichen Veränderungen beobachten kann [8]. Dazu werden in den zu untersuchenden Gebieten Sensoren mit Längen von 40 m und mehr ausgespannt und eingeschneit (siehe Abb. 8).

Die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen entlang der Sensorkabel werden durch die DZ des umgebenden Schnees beeinflusst. Mit Hilfe hochfrequenter Laufzeitmessungen und einer zusätzlichen niederfrequenten Impedanzanalyse kann der Wassergehalt und die Dichte der Schneedecke in diskreten Höhenstufen bestimmt werden. Aus der Messung des Durchgangswiderstands der verwendeten Kupferleiter wird gleichzeitig die Schneetemperatur bestimmt. Trotz einer rein-

weißen und deckenden Einfärbung der Sensorkabel kann es nach längerer Sonneneinstrahlung zu einer Erwärmung und einer selektiven Schneeschmelze in der Kabelumgebung kommen. Durch Verwendung von Mehrleiterkabeln mit abgestufter Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes bzw. unterschiedlich großen Messvolumina können diese Luftspalteffekte erfasst und korrigiert werden [9].

Ein typischer zeitlicher Verlauf der hochfrequenten DZ wie er auf dem Plaine-Morte-Gletscher in der Schweiz gemessen wurde ist in Abb. 9 gezeigt.

Man kann deutlich zwischen der Trockenschnee- und der Feuchtschneephase unterscheiden. Erstere zeichnet sich durch einen stetigen Anstieg der DZ aufgrund von Setzungsprozessen und der damit verbundenen Dichteerhöhung aus. Im Gegensatz zur Trockenschneephase weisen die Feuchtschneezeiten starke Schwankungen auf höherem DZ-Niveau auf. Eine genauere und



Abb. 8: Ansicht der Schneefeuchtemesskabel kurz nach dem Aufbau (Plaine-Morte-Gletscher, Schweiz). Durch die winterlichen Schneefälle werden die Kabel vollständig eingeschneit.

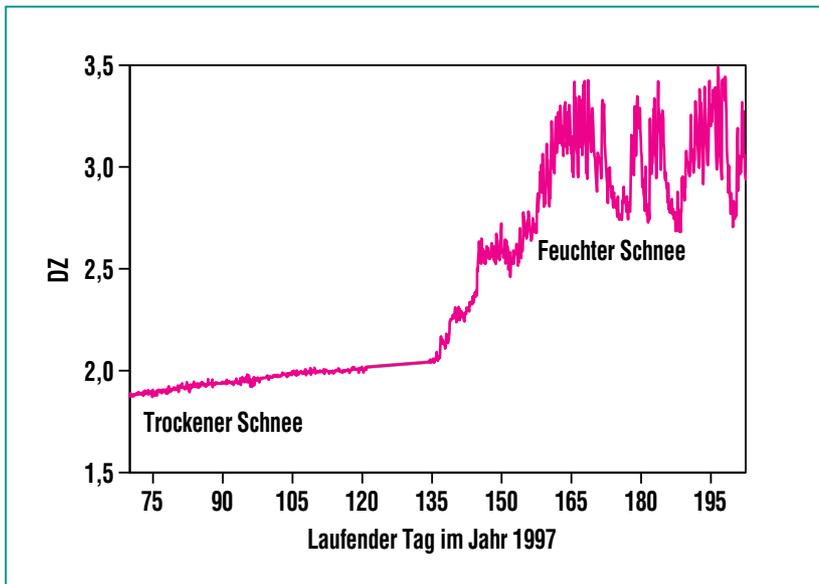


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der hochfrequenten DZ an einem Schneefeuchtemesskabel auf dem Gletscher Plaine Morte, Schweiz.

zeitlich hoch aufgelöste Analyse zeigte den Zusammenhang mit dem Wettergeschehen. Positive Strahlungsbilanz und Lufttemperaturen über dem Gefrierpunkt sind eng mit den Schneefeuchtevariationen korreliert. In einer Zusammenarbeit mit dem Institut für Physische Geographie der Universität Freiburg wurde das Messsystem auch für die Klimaforschung auf der antarktischen Halbinsel eingesetzt. Im Vordergrund stand dabei die Kalibrierung von Satellitendaten anhand von In-situ-Messungen der Schneefeuchte.

Zusammenfassung

In der elektrophysikalischen Aquametrie werden Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts in Gemischen mit dielektrischen Methoden entwickelt. Dazu untersucht man die Abhängigkeit der Material-DZ von verschiedenen Parametern wie

Wassergehalt, Dichte, Leitfähigkeit, Frequenz und Temperatur. Für diese Aufgabe werden Messplätze entwickelt und Modelle zur Beschreibung der dielektrischen Eigenschaften aufgestellt. Die Ergebnisse sind Grundlage für neue Feuchtemessverfahren, die anhand anwendungsorientierter Beispiele dargestellt wurden. Mit dem Bodenfeuchtesensor LUMBRICUS lassen sich Wassergehaltsprofile mit 3 cm Auflösung bis zu einer Tiefe von 2,5 m ermitteln. Der großflächige Feuchtesensor TAUPE wurde für Bestimmung der Wasserverteilung in horizontalen Bodenschichten entwickelt und ist als Kontrollsystem auf mehreren Mülldeponien im Einsatz. Die Arbeiten über Schneefeuchtemessverfahren zeigen, wie man die Änderungen der Schneedeckeneigenschaften kontinuierlich über lange Zeiträume erfassen kann.

Ausblick

Die Forschungsaktivitäten in der elektrophysikalischen Aquametrie werden durch eine Reihe von anwendungsorientierten Projekten geprägt. So wird im Rahmen eines BW-Plus-Projektes der Feuchtesensor Taupe als Kontrollsystem für Deponieabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahn ertüchtigt. Ein weiteres BW-Plus-Projekt befasst sich mit der Feuchtemessung in Biofiltern zur Abgasreinigung. Zur Einstellung einer optimalen Schadstoffreduktion soll dort die Filterfeuchte geregelt werden. In einem anderen Projekt zu Verschlussbauwerken im Bergbau wird eine Sensorik entwickelt, mit der man den Wassertransport durch Bentonitsperren messen kann. Das Messsystem muss dabei für extreme Drücke und hohe elektrische Leitfähigkeit ausgelegt werden. In Vorbereitung befindet sich das EU-Projekt SNOWPOWER. Durch die Entwicklung und den Einsatz neuer Schneefeuchtemesssysteme zusammen mit Fernerkundungsdaten und hydrologischen Modellen soll die Zuflussprognose für Wasserkraftwerke verbessert und der wirtschaftliche Vorteil demonstriert werden. Parallel zur dieser anwendungsorientierten Forschung sind Grundlagenuntersuchungen zu dielektrischen Materialeigenschaften und Messverfahren notwendig. Innerhalb des als „Subsurface Sensing“ bezeichneten Forschungsgebietes wurde dabei die elektrophysikalische Aquametrie als neue Disziplin eingeführt [10].

Literatur

- [1] G. Scholz,
Metrologische Aspekte der Feuchtemessung in festen Stoffen,
Proc. 9. Feuchtetag, Weimar, 17.-18.9.1997
- [2] K. Kupfer,
Materialfeuchtemessung: Grundlagen, Messverfahren, Applikationen, Normen,
Expert Verlag, 1997
- [3] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, M. A. El-Rayes,
Microwave Dielectric Behaviour of Wet Soil – Part II: Dielectric Mixing Models,
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 23 (1985) 35-46
- [4] A. Brandelik, G. Krafft,
in "Electromagnetic Wave Interaction with Water-containing Materials",
A. Kraszewski (ed.), IEEE Press, Piscataway (1996), 101-110
- [5] C. Hübner,
Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6329,
Forschungszentrum Karlsruhe (1999)
- [6] A. Brandelik, C. Hübner, R. Schuhmann,
(1996), Feuchtesensor für ausgedehnte Schichten,
Deutsches Patent Nr. 19501196.
- [7] C. Hübner, A. Brandelik,
in "Sensors Update Vol. 7",
H. Balthes, W. Göpel, J. Hesse (ed.s),
Wiley-VCH, Weinheim (2000), 317-340
- [8] A. Brandelik, C. Hübner,
(1997), Verfahren zur Bestimmung des volumetrischen Flüssigwassergehalts und der Dichte von Schnee und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens,
Deutsches Patent Nr. 19755052.
- [9] C. Hübner, A. Brandelik, G. Döpke, S. Wunderle, F. Rau, F. Weber,
A New Method for Snow Moisture Sensing,
Proc. EARSeL Workshop Remote Sensing of land Ice and Snow,
Freiburg, 17.-18.4.1997
- [10] A. Brandelik, C. Hübner,
Subsurface Sensing, Subsurface Aquametry, Subsurface Sensing Technologies and Applications,
Kluwer Academic/Plenum Publishers, Vol.1, No. 4, (2001) 365-376,