

**Kontrolle von Barrieren:
Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit an Hand des
Bodenwassergehaltes**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

der Fakultät für

Bauingenieur- und Vermessungswesen

der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Rainer Schuhmann

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen
Prüfung:

04. Juli 2002

Hauptreferent:

Prof. Dr. Franz Nestmann

Korreferenten:

Prof. Dr. Erich Plate
Prof. Dr. Rolf Nüesch
Prof. Dr. Josef Brauns

Karlsruhe 2002

Vorwort

Die Beseitigung unserer Abfälle erfolgte lange Zeit auf Deponien, die nicht in der Lage waren, Emissionen aus den abgelagerten Abfällen in die Umwelt zu verhindern. Seit Ende der 60er Jahre ist der Gesetzgeber bemüht, durch Gesetze, Verordnungen und Richtlinien Normungen für Barrieren zu schaffen, die die Emissionen in den Deponien zurückhalten sollen. Entstanden ist daraus das „Multibarrieren“-Konzept. Barrieren sind beispielsweise geeignete geologische Verhältnisse am Standort der Deponie, der Müll selbst durch seine entsprechende Vorbehandlung, wie auch die künstlich geschaffenen Barrieren am Standort, die Abdichtungen der Deponie. Eine neu angelegte Deponie wird mit einer Basisabdichtung ausgestattet, die durch ihre Ausstattung die Auslaugung von Schadstoffen aus den gelagerten Abfällen in den Untergrund und in das Grundwasser verhindert. Die Oberflächenabdichtung sorgt dafür, dass Emissionen die Deponie nicht über den Gaspfad verlassen und keine Niederschläge in den Deponiekörper eindringen. Eine so ausgestattete moderne Ablagerung ist zudem kontrollierbar und die Barrieren sind reparierbar auszustatten. Leider finden wir so nur wenige Deponien. Die meisten Deponien haben einen ungünstigen geologischen Untergrund und keine Basisabdichtung. Somit kommt der Oberflächenabdichtung die entscheidende Bedeutung zu.

In der vorliegenden Arbeit werden die Oberflächenabdichtungen der Deponien analysiert und es wird festgestellt, dass die Kontrolle dieser Barriere für die Umwelt von entscheidender Bedeutung ist. Der Aufbau der Oberflächenabdichtung besteht aus mehreren von einander unabhängigen Schichten, die alle eine spezielle Aufgabe haben. Es konnte gezeigt werden, dass nicht das lokale Versagen einer Schicht die gesamte Barriere unwirksam macht, sondern dass die Barriere als gesamtes System zu kontrollieren ist. Ein Grund dafür ist, dass die Reparatur einer Oberflächenabdichtung mit sehr hohen Kosten verbunden ist, die die Bürgerschaft durch ihre Abfallgebühren aufbringen muss. Überwachungseinrichtungen müssen also dem Deponiebetreiber ein verlässliches Zeichen geben, wann Sanierungsbedarf vorliegt.

Als Lösung wird, basierend auf der Analyse der Bewegung von Wasser im Boden, eine Kontrollschicht empfohlen, in die ein Überwachungssystem eingelegt wird. Mit diesem System, das auf elektrophysikalischem Wege die Dielektrizitätszahl der Kontrollschicht bestimmt, kann deren Wassergehalt eindeutig bestimmt werden. Die Kenntnis der bodenmechanischen Parameter lässt es zu, die hydraulische Leitfähigkeit der Kontrollschicht orts aufgelöst zu bestimmen und mit der Langzeitbetrachtung des Wassergehaltes sogar den Fluss durch die Schicht abzuschätzen. Da, wie durch eine umfangreiche Literaturrecherche belegt, Effekte der Hysterese vernachlässigt werden können, sind die Aussagen auch quantitativ belastbar. An einem Lysimeter werden die theoretischen Annahmen verifiziert.

Die theoretischen und rechtlichen Grundlagen werden in der vorliegenden Arbeit herausgearbeitet. Es ist Herrn Dr. Rainer Schuhmann gelungen, die oftmals recht komplexen Zusammenhänge klar darzustellen und den Leser „an der Hand“ in die Materie einzuführen. Es liegt nun ein Kontrollsystem für Barrieren vor, das in Baden-Württemberg erstmals großflächig eingesetzt werden soll. Die Arbeit ist ein hervorragendes Beispiel für die Verbindung von Theorie und Praxis.

Kurzfassung

Mülldeponien und sonstige Anlagen zur Langzeitlagerung von umweltrelevanten Stoffen sind mit Abdichtungen gegen die Umgebung abzukapseln. Diese Barrieren sollen verhindern, dass Niederschlagswasser in den Müllkörper einsickert und Sickerwasser und Deponiegas den Müllkörper unkontrolliert verlassen. Die Funktion der Barriere muss über eine lange Zeit aufrecht erhalten bleiben. Die Wirksamkeit der Barriere wird über den gesetzlich festgelegten Überwachungswert, die hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert), kontrolliert.

Verfahren, die den aktuellen k_f -Wert direkt bestimmen, sind sehr aufwändig und destruktiv, d.h. sie zerstören die Barriere an der Stelle der Probenahme. Ein geeignetes Verfahren soll in der Lage sein, zu jedem gewünschten Zeitpunkt und flächendeckend, dazu in hoher vertikaler Auflösung, den k_f -Wert darzustellen. Indirekte Verfahren haben bisher über die Messung der Wasserspannung im Boden, die dem Potenzial gleichgesetzt wird, den aktuellen Bodenwassergehalt und den k_f -Wert berechnet. Diese bodenspezifische Beziehung ist mit einer starken Hysterese behaftet, d.h. je nach dem bodenhydraulischen Zustand (Be- oder Entwässerung) weichen die daraus berechneten k_f -Werte um den Faktor 200 voneinander ab. Berechnet man den k_f -Wert aus dem gemessenen Bodenwassergehalt, so wird dieser Faktor um das 500-fache auf 0,4 reduziert. Somit ist der Weg vorgegeben, **den k_f -Wert aus dem gemessenen Bodenwassergehalt zu berechnen.**

Dazu ist der Bodenwassergehalt mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Aus einem Vergleich der möglichen Verfahren wurde ein elektromagnetisches Verfahren gewählt. Es bestimmt die Dielektrizitätszahl (DZ) des Bodengemisches (Boden, Wasser, Luft). Diese DZ wird von der DZ des Wassers dominiert, ist also über eine Kalibrierung direkt mit dem Wassergehalt des Bodengemisches verknüpfbar. Das Verfahren benötigt Sensoren, die in einer Bodenschicht mit definiertem Material unter dem Abdichtungssystem eingebaut werden.

Das Verfahren wurde an einem Lysimeter verifiziert. Dieser wurde in Analogie zu einem entwickelten bodenhydraulischen Modell dimensioniert, das die Durchsickerung von Bodenschichten in ihre Grundmechanismen zerlegt. Dabei ist durch den Ausschluss der Verdunstung aus der Bodenschicht der Hauptstrom des vertikalen Aufstiegs des Wassers ausgeschlossen. Der Fortgang der Feuchtefront, d.i. die vertikale Darstellung der Bodenwassergehalte, konnte qualitativ und quantitativ belegt werden. **Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist somit zu jedem Messzeitpunkt eindeutig berechenbar.** Das wird auch über die Bilanzierung der Modellregenereignisse bestätigt.

Mit diesem Verfahren ist es möglich, Verfahren zur numerischen Simulation des Wasserhaushaltes von Deponien zu kalibrieren. Unsicherheiten der Größe der Evapotranspiration und der „Alterung“ des Bodenmaterials können mit gemessenen Bodenwassergehalten und berechneten aktuellen hydraulischen Leitfähigkeiten zumindest gemindert werden. Mit den berechneten hydraulischen Leitfähigkeiten kann der gesetzliche Überwachungsparameter verifiziert werden.

Abstract

Waste disposal sites and other landfills for long-term storage of hazardous materials must be encapsulated to protect the environment. Technical barriers are to prevent precipitation from migrating into the landfill as well as to avoid an uncontrolled escape of seepage water and landfill gas into the surroundings. The efficiency of the barrier must be sustained over a long time period. It is controlled by the hydraulic conductivity (k_f -value), a measurement parameter defined and established in law.

Methods that directly determine the hydraulic conductivity are very time-consuming and destructive, i.e. they destroy the barrier at the sampling spot. A suitable technique should be capable to display the k_f -value comprehensively and with a high temporal and spatial resolution. Indirect methods used to determine the hydraulic conductivity and the volumetric soil water content by measuring the pressure head of the soil water, which is set equal to the potential. This soil specific relationship shows a high hysteresis, i.e. the water content at a particular pressure head depends upon the previous wetting and drying history of the sample and deviations of k_f -values by a factor of 200 can occur. If the hydraulic conductivity is determined by the measured soil water content, the deviations are reduced by factor 500 to 0,4. Therefore, it is obvious **to determine the k_f -value from the measured soil water content**.

It is necessary to determine the soil water content with a very high accuracy. From several possible methods, an electromagnetic measurement technique was selected. This technique determines the dielectric constant of the soil mixture (soil matrix, water, and air), which is mainly a function of the water content of the soil and thus it is possible to quantify the water content with a suitable calibration. The method requires sensors that are installed in a soil layer with a defined material below the barrier system.

The technique was verified with a lysimeter. The lay out of the lysimeter was designed according to a soil hydraulic model that describes the principal mechanisms of water migration in the unsaturated zone. In the model, the evaporation from the soil layer is ignored, thus eliminating the main flow of the vertical rise of the water. The movement of the water front, i.e. the vertical projection of the soil water contents, could be demonstrated both qualitatively and quantitatively, that way allowing a precise determination of the unsaturated hydraulic conductivity at any time. This is also confirmed by the balancing of several model precipitation events.

With this technique it is possible to calibrate methods for the numerical simulation of the water economy. With the measured soil water contents and the calculated current hydraulic conductivities, uncertainties such as the size of the evapotranspiration and the 'aging' of the soil material can at least be minimized. With the calculated hydraulic conductivities the legal control parameter can be verified.

Inhalt

| | |
|---|-----|
| Vorwort | 002 |
| Kurzfassung, Abstract | 003 |
| Inhaltsverzeichnis | 005 |
| Abbildungsverzeichnis | 007 |
| Tabellenverzeichnis | 009 |
| Symbole, Abkürzungen, Parameter und Formeln | 010 |

1. Einführung

| | |
|-----------------------|-----|
| 1.0. Einleitung | 013 |
| 1.1. Veranlassung | 014 |
| 1.2. Notwendigkeit | 015 |
| 1.3. Aufgabenstellung | 017 |

2. Grundlagen

| | |
|------------------------------------|-----|
| 2.1. Hydrologie | 020 |
| 2.2. Analytische Grundlagen | 023 |
| 2.3. Bodenmechanik, Bodenhydraulik | 026 |
| 2.4. Bodenfeuchte | 031 |
| 2.5. Hysterese | 033 |
| 2.6. Untersuchungsschwerpunkte | 036 |

3. Feuchtemessung

| | |
|--|-----|
| 3.1. Messverfahren | 038 |
| 3.1.1. Direkte Verfahren | 038 |
| 3.1.2. Indirekte Verfahren | 039 |
| 3.1.3. Verfahrenswahl | 042 |
| 3.2. Beschreibung des gewählten Verfahrens | 043 |
| 3.2.1. Grundsätzliche Funktion | 043 |
| 3.2.2. TAUPE-Verfahren | 045 |
| 3.2.3. Auswertung der Messsignale | 046 |

4. Bodenmodell

| | |
|---|-----|
| 4.1. Modell mit Einflussgrößen | 049 |
| 4.2. Abgleich der Modellbedingungen mit Abdichtungssystemen | 054 |
| 4.2.1. Vorstellung der Abdichtungssysteme | 055 |
| 4.2.2. Mess- und Kontrollsystem | 059 |
| 4.2.3. Abgleich der Modellbedingungen | 062 |

5. Experimentelle Untersuchungen

| | |
|---|-----|
| 5.1. Vorversuche | 063 |
| 5.2. Naturversuch | 066 |
| 5.2.1. Randbedingungen, Vereinfachungen | 066 |
| 5.2.2. Planung, Entwurf und Bemessung | 068 |
| 5.2.3. Wahl und Bemessung der Materialien | 071 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.4. Bau (Bilddokumentation) | 077 |
| 5.3. Messtechnik | 079 |
| 5.3.1. Konventionelle Messtechnik | 080 |
| 5.3.2. Bodenfeuchte-Messsystem | 081 |
| 6. Verifizierung des Modells | |
| 6.1. Datenerfassung, Datenabgleich, Kalibrierung | 083 |
| 6.1.1. Grundlagen der Datenaufbereitung | 083 |
| 6.1.2. Sensitivitätsbetrachtungen | 089 |
| 6.1.3. Referenzmessungen | 096 |
| 6.1.4. Wassergehalts-Messungen | 100 |
| 6.2. Versuchsdurchführung, Bilanzierung | 103 |
| 6.2.1. Inbetriebnahme des Lysimeters | 103 |
| 6.2.2. Abgleich der gemessenen Wassergehalte | 106 |
| 6.2.3. Abgleich der Sensor-Wassergehalte | 108 |
| 6.2.4. Bilanzierung von Beregnungsereignissen | 110 |
| 6.2.5. Plausibilitätsbetrachtungen | 115 |
| 6.3. Ergebnisse der Versuche | 117 |
| 7. Numerische Verfahren | |
| 7.1. Numerische Verfahren | 121 |
| 7.2. Das numerische Modell „HELP“ | 123 |
| 7.3. Kalibrierung der Verfahren | 125 |
| 8. Anwendungen | |
| 8.1. Leckageortung | 126 |
| 8.2. Monitoring (Deponie-Jahrbuch) | 129 |
| 8.3. Wasserhaushalt - Hanglänge | 130 |
| 9. Schlussbetrachtung | 132 |
| Anhang | |
| 10.1. Recht, Vollzugsstand | 136 |
| 10.2. Einsatzmöglichkeiten der Wassergehaltsmessung | 145 |
| 10.3. Untersuchungen zur Hysterese | 147 |
| 10.4. Literaturverzeichnis | 169 |
| 10.5. Schlusswort und Dank | 179 |
| 10.6. Lebenslauf | 180 |

Abbildungsverzeichnis

Grundlagen

| | | |
|--------|---|-----|
| 2.1.1. | Wasserbilanz an einer Deponieoberfläche | 022 |
| 2.3.1. | Wassergehalts-Wasserspannungskurve (pF-WG-Kurve) | 026 |
| 2.3.2. | Wirkung der Kapillarsperre | 027 |
| 2.3.3. | Beispielhafter Aufbau einer Kapillarsperre in einer Oberflächenabdichtung | 028 |
| 2.3.4. | Ink-bottle-Modell zur Beschreibung der Hysterese | 028 |
| 2.3.5. | Be- und Entwässerungskurve | 028 |
| 2.4.1. | Bodengefüge | 031 |
| 2.4.2. | Volumetrische Anteile der Phasen | 031 |
| 2.5.1. | Hysterese nach Topp (1969, 210) | 035 |
| 2.5.2. | Hysterese nach Elrick (1964, 56) | 035 |

Feuchtemessung

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.2.1. | elektromagnetische Messung | 044 |
| 3.2.2. | graphische Oberfläche des Steuerprogramms | 045 |
| 3.2.3. | Flachbandsensor | 046 |
| 3.2.4. | Mess- und Steuereinheit | 046 |
| 3.2.5. | Messanordnung | 047 |
| 3.2.6. | Charakteristischer Impulsverlauf | 047 |
| 3.2.7. | Ermittlung der Impulslaufzeit | 047 |
| 3.2.8. | Wassergehaltsganglinie | 048 |

Bodenmodell

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.1.1. | Definition der Variablen | 050 |
| 4.1.2. | Vereinfachungen aus den Randbedingungen | 051 |
| 4.1.3. | Definition der Bezeichnungen am Bodenelement | 053 |
| 4.2.1. | Abdichtung mit Bentokies | 055 |
| 4.2.2. | Abdichtung mit Bentonitmatten | 055 |
| 4.2.3. | Abdichtung mit wasserglasvergüteten Mineralgemischen | 056 |
| 4.2.4. | Abdichtung mit Asphalt | 056 |
| 4.2.5. | Unten liegende Kapillarsperre | 057 |
| 4.2.6. | Oben liegende Kapillarsperre | 057 |
| 4.2.7. | Abdichtung mit Kunststoffdichtung | 057 |
| 4.2.8. | Abdichtung mit Geodrän | 058 |
| 4.2.9. | Aufbau der Rekultivierungsschicht | 058 |
| 4.2.10. | Kontrolle unter der Dichtung | 060 |
| 4.2.11. | Kontrolle in der Dichtung | 060 |

Versuchsaufbau

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.1.1. | Testfeld in Karlsruhe mit Sensorkabeln | 064 |
| 5.1.2. | Feuchteverteilung (Februar 1999) | 064 |
| 5.1.3. | Reaktion des Sensors auf gezielte Wasserzugabe | 065 |
| 5.2.1. | pF-WG-Kurve und Porengrößenverteilung eines bimodalen Bodens (<i>Durner, 52</i>) | 067 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.2.2. | elektromagnetisches Feld um ein Sensorkabel | 068 |
| 5.2.3. | Sensorkabel, eingebaut auf der Schichtgrenze | 069 |
| 5.2.4. | Lageplan Lysimeter | 070 |
| 5.2.5. | Querschnitt des Lysimeters | 070 |
| 5.2.6. | pF-WG-Kurve für den Kiessand | 071 |
| 5.2.7. | pF-WG-Kurve für Su (Material 1) | 074 |
| 5.2.8. | pF-WG-Kurve für Su (Material 2) | 075 |
| 5.2.9. | Beziehung k_u zu θ für die verwendeten Materialien | 076 |
| 5.2.10. | Realteil der DZ der Materialien | 077 |
| 5.2.11. | Bauphase des Lysimeters | 078 |
| 5.2.12. | Bau des Leitungsgrabens | 078 |
| 5.2.13. | Lage der TAUPE-Sensoren | 078 |
| 5.2.14. | Einbringen des Bodenmaterials | 078 |
| 5.2.15. | Einbau des Messschachtes | 079 |
| 5.2.16. | Fertiggestellter Lysimeter | 079 |
| 5.3.1. | Messtechnik im Lysimeter | 079 |
| 5.3.2. | Konventionelle Messtechnik im Lysimeter | 080 |
| 5.3.3. | Messbox mit Anschluss der Sensoren | 081 |
| 5.3.4. | Messgeräte in der Messbox | 081 |

Verifizierung des Modells

| | | |
|----------|---|-----|
| 6.1.1. | Ersatzschaltbild eines Leiterelementes der Länge dx | 084 |
| 6.1.2. | Spannungsverlauf eines Impulses auf einem Sensorkabel | 085 |
| 6.1.3. | Ersatzschaltbild eines Sensorkabels | 085 |
| 6.1.3.a. | Idealisierte Anordnung der Bodenkomponenten | 087 |
| 6.1.4. | Zusammenhang zwischen DZ und θ in Sand ($f=500\text{MHz}$) | 088 |
| 6.1.5. | Kennlinie des Sensorkabels | 088 |
| 6.1.6. | Abhängigkeit der DZ von geringen Wassergehalten | 089 |
| 6.1.7. | Einfluss der Eichkurvenform | 090 |
| 6.1.8. | Einfluss der Kalibrierparameter | 091 |
| 6.1.9. | Verlauf der Impulskurve im Sensor 3 | 092 |
| 6.1.10. | Variation der Koaxialkabel-Laufzeit | 094 |
| 6.1.11. | Ganglinie der Lufttemperatur im Luftraum des Lysimeters | 096 |
| 6.1.12. | Verlauf der Luftfeuchte im Luftraum des Lysimeters | 097 |
| 6.1.13. | Bodentemperatur in zwei Horizonten | 098 |
| 6.1.14. | Verlauf der Saugspannung im Lysimeter | 099 |
| 6.1.15. | Verlauf der Bodenwassergehalte (5m-Sensor) | 100 |
| 6.1.16. | Verlauf der Bodenwassergehalte (7m-Sensor) | 102 |
| 6.1.17. | Verlauf der Bodenwassergehalte (Schnitt e) | 102 |
| 6.1.18. | Abgleich der Bodenwassergehalte mit der Saugspannung | 103 |
| 6.2.1. | Wassergehalt im Lysimeter in der ersten Beobachtungsphase | 104 |
| 6.2.2. | Wassergehaltsverlauf während des Einstaus des Lysimeters | 106 |
| 6.2.3. | Lage der Proben im Lysimeter | 108 |
| 6.2.4. | Feuchteverteilung im Lysimeter am 05.07.2001 | 110 |
| 6.2.5. | Wassergehalte der Beregnung vom 27.08. bis 07.09.2001 | 111 |
| 6.2.6. | Feuchteverteilung im Lysimeter bei der Beregnung | 113 |
| 6.2.7. | Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit im Lysimeter | 114 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 6.2.8. | Messvolumen in der Kontrollschicht und Verteilung der Bodenfeuchte bei Zufluss von oben | 116 |
| 6.2.9. | Definitionen an der pF-WG-Kurve | 116 |
| 6.3.1. | Wassergehalt im Freilandlysimeter (86a) | 119 |

Anwendungen

| | | |
|--------|---|-----|
| 8.1.1. | Physikalisches Leckage-Modell nach Wehry (225) | 127 |
| 8.1.2. | Aufbau der Testeinrichtung zur Detektion von Leckagen | 128 |
| 8.1.3. | Bewässerung um ca. 09:28 Uhr | 128 |
| 8.1.4. | Bewässerung um ca. 10:29 Uhr | 128 |
| 8.1.5. | Verlauf der Spannungskurven in den Feuchtesensoren | 129 |
| 8.3.1. | Grenzlinie der Einsickerung in die Rekultivierungsschicht In der Vegetationsruhe (schematisch) | 131 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.2.1. | Bodenparameter der Dränageschicht | 071 |
| 5.2.2. | Bodenparameter der Bodenschicht (Material 1) | 074 |
| 5.2.3. | Bodenparameter der Bodenschicht (Material 2) | 075 |
| 6.1.1. | WG-Differenz bei um 10% reduzierten Kalibrierparametern | 091 |
| 6.1.2. | Veränderung des berechneten WG in Abhängigkeit von Sensorlänge und Laufzeit-Differenz | 094 |
| 6.1.3. | Charakteristische Konstante in Abhängigkeit der Sensorlänge | 095 |
| 6.1.4. | Ereignisse der Tensionmetermessungen | 099 |
| 6.2.1. | Abgleich der Wassergehalte (Bewässerung) | 107 |
| 6.2.2. | Abgleich der Wassergehalte (Entwässerung) | 107 |
| 6.2.3. | Wassergehalte der Bodenproben vom 05.07.2001 | 108 |
| 6.2.4. | Wassergehalte der Bodenfeuchte-Sensoren am 05.07.2001 | 108 |
| 6.2.5. | Abgleich der Wassergehalte | 109 |
| 6.2.6. | Wassergehalte der Bodenfeuchte-Sensoren am 05.07.2001 | 109 |
| 6.2.7. | Abgleich der Wassergehalte | 109 |
| 6.2.8. | Bilanzierung des Ereignisses vom 26.04.2001 | 110 |
| 6.2.9. | Zuordnung des θ -Verlaufs zum Bodenmodell | 112 |
| 6.2.10. | Bilanzierung des Regenereignisses (Sensor 18) | 112 |
| 6.2.11. | Bilanzierung des Regenereignisses (Abfluss und Speicherung) | 112 |
| 6.2.12. | Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit | 115 |
| 7.2.1. | Simulation des Wassergehaltes im Lysimeter | 124 |
| 9.1.1. | Stand der Realisierung der Deponieoberflächenabdichtungen | 142 |
| 9.1.2. | Deponieparameter in Deutschland | 143 |

Abkürzungen, Symbole

Wo immer möglich, werden die in der Literatur gebräuchlichen Symbole verwendet. Symbole in unterschiedlichen Disziplinen können daher mehrfach belegt sein. Die Gefahr einer Verwechslung wird durch den Textzusammenhang minimal sein.

Abkürzungen

| | |
|-------|--|
| AusS | Ausgleichsschicht (unter dem Abdichtungssystem = Planum) |
| BAM | Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung |
| BZ | Beobachtungszeitraum |
| DK | Deponieklasse nach TA-Si bzw. nach Deponie-Verordnung (DepVO) |
| DOA | Deponie-Oberflächen-Abdichtungssystem |
| EntS | Entwässerungsschicht, oft der obere Kiesflächenfilter (OKF) |
| FDR | Frequenz-Domain-Reflektometrie |
| FZK | Forschungszentrum Karlsruhe |
| IfH | Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe |
| IWK | Institut für Meteorologie und Klimaforschung am FZK |
| KB | Kapillar-Block, aus Grobsand (auch kapillarbrechende Schicht, KBS) |
| KDB | Kunststoff-Dichtungs-Bahn |
| KS | Kapillar-Schicht, i.d.R. aus Feinsand |
| LAGA | Länder-Arbeits-Gemeinschaft-Abfall |
| LfU | Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg |
| MA | Mineralische Abdichtung |
| MKS | Mess- und Kontroll-System |
| OA | Oberflächen-Abdeckung |
| OKF | Oberer Kies-Flächenfilter |
| pF | negativer \log_{10} der Saugspannung [hPa] |
| RekS | Rekultivierungsschicht, auch Oberboden oder Vegetationsschicht |
| SchuS | Schutzschicht, z.B. über der KDB |
| TA-Si | technisch Anleitung zur Behandlung von Siedlungsabfällen |
| TDR | Time-Domain-Reflektometrie |
| THL | Temperaturprofil im Lysimeter |
| VGM | Parameter nach van Genuchten/Mualem |

Symbole

| | |
|-------------|---|
| a | Luftanteil im Bodengefüge (air) [-] |
| a | Durchmesser einer Fehlstelle in einer KDB [mm] |
| b | i.a. Breite einer Schicht oder eines Elementes [cm] |
| c | Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle [m/sec] |
| c_0 | Lichtgeschwindigkeit [$2,9979 \times 10^8$ m/sec] |
| $c_{phys.}$ | Tatsächliche Geschwindigkeit eines Impulses [m/sec] |
| d_x | Durchmesser der Körnung bei x-% [mm] |
| d | i.a. Dicke einer Schicht [cm] |
| h | Saugspannung in [cm WS] oder in [hPa] |
| h | i.a. Höhe einer Schicht oder eines Elementes [cm] |
| h | hydrostatischer Druck [m] |
| h_b | Saugspannung am Lufteintrittspunkt [cm WS] oder [hPa] |
| k_f | gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, oft auch k_s [m/sec] |
| k_s | gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, oft auch k_f [m/sec] |

| | |
|-----------|--|
| k_u | ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/sec] |
| l_{geo} | geometrische Länge eines Sensorkabels [m] |
| m, n | Formparameter, abhängig von der Kornverteilung [-] |
| n | Porenanteil [-] |
| p | Porosität [m ²] bei der Bemessung eines Geotextils |
| q | auf die Tiefe bezogener Fluss im Bodenelement [m ²] |
| s | Feststoffanteil im Bodengefüge (solid) [-] |
| t_{LZ} | Laufzeit eines TDR-Impulses (auch t_s) [sec] |
| t_s | Laufzeit eines TDR-Impulses (auch t_{LZ}) [sec] |
| v | Filtergeschwindigkeit (Index gibt die Richtung an) [m/sec] |
| A_i | Zufluss zur Schicht i [Liter] |
| C_0 | Kapazität im Vakuum [F] |
| C | Kapazität [F], oder Kapazitätsbelag [F/m] |
| C | spez. Feuchtekapazität des Bodens (Richards-Gleichung) |
| DZ | Dielektrizitätszahl [-], oft auch Dielektrizitätskonstante (DK) |
| ET_a | Gesamtverdunstung, aktuelle Evapotranspiration [mm] |
| EVA | Evaporation des Bodens [mm] |
| F | Fläche [m ²] |
| G | Ableitungsstrom, Ableitungsbelag [S/m] |
| G_f | Feuchtgewicht einer Bodenprobe [kp/m ³] |
| G_t | Trockengewicht einer Bodenprobe [kp/m ³] |
| I | Gefälle in [%] oder [-] |
| I | Stromstärke in Ampere [A] |
| $IntV$ | Interzeptionsverlust, auch Muldenverlust [mm] |
| K | Dielektrische Permittivität des Bodens |
| L | Längeneinheit [m] |
| L | Induktivitätsbelag [H/m] |
| N | Niederschlag, meist in [mm] |
| P_i | Stelle der Probenahme im Lysimeter |
| PT | Pflanzen-Transpiration [mm] |
| Q | Abfluss [Liter] |
| Q_{Ab} | Ausfluss aus einem Bodenelement [Liter] |
| Q_D | Abfluss in der Dränageschicht [Liter] |
| Q_L | Lateraler Abfluss [Liter] |
| Q_O | Oberflächen-Abfluss [Liter] |
| Q_V | Versickerung durch die Dichtung [Liter] |
| R | Widerstandsbelag [Widerstand in Ohm Ω , Belag in Ω/m] |
| R_h | benetzter Radius [cm] |
| S | Senken- oder Quellenterm (Richardsgleichung) |
| S | Sättigung [-] mit Flüssigkeit |
| S_e | Sättigungsindex [-] |
| S_i | Speicherung in der Schicht i [Liter] |
| S_i | Sensor im Lysimeter mit Nummer |
| Su | schluffiger Sand |
| sU | sandiger Schluff |
| T | Tara (Gewicht des Behältnisses oder der Verpackung) [kp] |
| T_i | Tensiometer (mit Nummer i) |
| U | Ungleichförmigkeitsgrad einer Sieblinie |
| U | Spannung in [V] |
| V | Volumen [m ³] |
| W_A | Wassergehalt am Anfang der Beobachtung [-] |

| | |
|-----------------|---|
| W_E | Wassergehalt am Ende der Beobachtung [-] |
| W_i | Wassergehalt in der Schicht i [-] |
| WG | Wassergehalt [Vol.-%] |
| WS | Wassersäule, hydrostatische Druckhöhe [cm] |
| Z | Wellenwiderstand [Ω] |
| Z_i | Zufluss zur Schicht i [Liter] |
| α | Dämpfungsfaktor einer Welle [-] |
| α | reziproker Wert der Saugspannung am Lufteintrittspunkt [-] |
| β | Winkelmaß [-] |
| ε | Dielektrizitätszahl [-] |
| ε' | Realteil der Dielektrizitätszahl [-] |
| ε'' | Imaginärteil der Dielektrizitätszahl [-] |
| γ | Faktor für den Einfluss der Tortuosität [-] |
| γ | Fortpflanzungsfaktor einer Welle [-] |
| η_v | Abminderungsfaktor [-], Bemessung von Geotextilien |
| λ | Index für die Porengrößenverteilung [-] |
| θ | Wassergehalt [Vol.-%] |
| θ_r | Residual- Wassergehalt [Vol.-%] |
| θ_s | Sättigungs- Wassergehalt [Vol.-%] |
| θ_{Gr} | gravimetrischer Wassergehalt [Gew.-%] |
| θ_{Vol} | volumetrischer Wassergehalt [Vol.-%] |
| $\Delta\theta$ | Wassergehaltsdifferenz [Vol.-%] |
| ρ | spez. elektrischer Widerstand des Bodens [Ω] |
| ρ_b | Dichte des Bodens [g/cm^3] |
| ρ_w | Dichte des Wassers [g/cm^3] |
| σ | elektrische Leitfähigkeit des Bodens [mS] |
| ω | Kreisfrequenz [Hz] |
| ψ_x | Potenzial [cm WS] oder [hPa], auch Saugspannung, Index gibt das Bezugsniveau an |
| ψ_b | Potenzial am Lufteintrittspunkt [cm WS] oder [hPa] |

Einheiten

| | |
|-----|--|
| hPa | Hektopascal, Druckeinheit |
| j | bezeichnet den imaginären Anteil, oft auch i |
| H | Henry, Einheit für die Induktivität |
| MHz | Mega-Hertz, Einheit für die Frequenz |

1.0. Einleitung

Die nachhaltige Bewahrung unserer Umwelt ist auch am Anfang des dritten Jahrtausends, neben der Befriedigung der Grundbedürfnisse, innerer und äußerer Sicherheit und sozialem Frieden, gesellschaftspolitische Pflicht. Unsere soziale Verpflichtung und unsere Verantwortung, Vorsorge für die kommenden Generationen zu treffen, manifestiert sich im schonenden Umgang mit dem Ökosystem Erde. Um die Stabilität der Umwelt zu erhalten, ist es notwendig, die Komplexität der Ökosysteme zu erkennen und ihre Mechanismen zu begreifen. Boden, Wasser und Luft als den Grundelementen allen Lebens kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu.

Um die Ressourcen zu schonen und zu schützen, ist die Kenntnis ihrer Wechselwirkung untereinander und ihre Reaktion mit Immissionen, das sind die Einwirkungen von außen, notwendig. Diese Einwirkungen auf die Ökosysteme sind in ihrer Komplexität auch heute noch nicht ausreichend erforscht. So sind beispielsweise die Wirkungen von Emissionen in Zentraleuropa auf die nordeuropäischen Seen und Wälder vom Grundsatz her erkannt. Die Schadgase wirken auf die die UV-Strahlung adsorbierende Ozonschicht und bewirken eine Veränderung des Kleinklimas und der globalen Klimaverhältnisse. Die Auswirkungen sind zur Zeit aber nur teilweise prognostizierbar. Es gilt daher das Vorsorgeprinzip:

Emissionen sind schon an ihrer Quelle zurückzuhalten.

Gebräuchlich dazu sind Barrieren, seien es Filtersysteme, biologische Reaktoren oder auch mineralische Abgrenzungen. Diese Barrieren müssen kontrollierbar, regenerierbar und reparierbar sein, sollen sie doch über einen langen Zeitraum ihre Wirksamkeit behalten. Mit der Überwachung der Barrieren geht die qualitative und quantitative Beurteilung von potenziellen Störfallszenarien einher. Dazu sind die wichtigen Überwachungsparameter zu definieren.

Bei mineralischen Barrieren, und diese sollen hier im weiteren ausschließlich betrachtet werden, sind die Vorgänge im Boden zu beschreiben, beispielsweise das Lösen oder Anlagern von Stoffen sowie die chemisch-physikalischen und organischen Reaktionen mit allen ihren Auswirkungen. Diese Beschreibung soll flächendeckend, nicht punktuell, und andauernd (online), nicht stichprobenweise erfolgen. Das Erkennen von Versagensfällen und eine möglichst genaue Abschätzung der Konsequenzen aus dem Versagen sind notwendiges Rüstzeug von Ingenieuren. Diese Aufgaben insgesamt zu lösen, sprengt bei weitem den Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit. Es ist ein Schritt zur Beschreibung der Mechanismen, wenn wir das Verhalten von Wasser im ungesättigten Boden besser verstehen können.

Die Bewegung von Wasser im Boden ist vorherzusagen, und die Messungen sind quantitativ auszuwerten. Wasser ist ein sogenannter qualitativer Minimumfaktor, wie z.B. Phosphor für das Wachstum von Biomasse. Damit kommt Wasser als bestimmendem Faktor für den Transport von Wärme und die Löslichkeit von Stoffen (*Ballestro et al., 7*) eine entscheidende Bedeutung zu. Um auf den Ausgangspunkt zurückzukommen, ist die Dichtigkeit mineralischer Barrieren und die Unversehrtheit synthetischer Barrieren das maßgebliche Qualitätskriterium für ihre Funktion. In der vorliegenden Arbeit soll ein Beitrag geleistet werden, nämlich die Entwicklung eines Verfahrens zur Verbesserung der Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit (oder

Durchlässigkeitsbeiwert: k_f -Wert) im Boden allein aus der permanenten Messung des Bodenwassergehaltes. Mit einem zulässig vereinfachten Modell kann daraus direkt der Wasserfluss durch Kontrollquerschnitte berechnet werden. Damit lassen sich die Wirkungen und Auswirkungen der durch Barrieren versiegelten (Abfall)-Stoffe auf die Schutzgüter leichter abschätzen. Auf Kosten-Nutzen-Analysen basierende wirtschaftliche Berechnungen helfen dann, den eventuell nötigen Handlungsbedarf zu definieren. Außerdem liefert die aus gemessenen Werten berechnete hydraulische Leitfähigkeit wertvolle Input-Parameter für derzeit marktgängige numerische Modelle (HELP (Berger, 15), CATFLOW (Zehe, Maurer, 238)). Die Berechnung des Wasserhaushalts von z.B. Mülldeponien kann weiter verbessert werden.

1.1. Veranlassung

Hydraulische Leitfähigkeiten bzw. Transmissivitäten sind die bestimmenden Eingangsparameter numerischer Modelle, beispielsweise zur Berechnung von Grundwasserströmungen. Der Energieaufwand bzw. die Effektivität der Gewinnung von Grundwasser in der Nähe von Gewässern (Uferfiltrat) ist ebenso von der richtigen Prognose der langfristigen Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit bestimmt (Berücksichtigung einer progressiven Kollmation, der Gefügeveränderung, an der Flusssohle), wie auch die Erhaltung der Funktion von Abdichtungen, seien es Hochwasserdämme parallel zum Gewässer oder für Rückhaltebecken senkrecht zum Gewässer oder Barrieren um Ablagerungen aller Art.

Anlagen zur Ablagerung von Reststoffen sind die finalen Einrichtungen jeder Produktion und jeder Abfallwirtschaft. Mit administrativen Maßnahmen wird versucht, in volkswirtschaftlich vertretbarem Rahmen die Menge der Rest- oder Abfallstoffe zu minimieren. Trotzdem verbleibt immer ein nicht unerheblicher Teil zur geordneten oberirdischen Ablagerung. Die meisten „alten“ Ablagerungen sind sowohl vom Inhalt (Qualität der Abfälle, wie z.B. Anteil der organischen Fraktion und Schadstoffgehalt) als auch von der Qualität ihrer Barriere (Abdeckung anstatt Abdichtung, teilweise sind die Stoffe auch gar nicht von der Umwelt abgeschlossen) her umweltproblematisch. Zur Beschreibung ihrer Umweltrelevanz ist die Kenntnis des Wasserhaushalts der Ablagerungen notwendig. Einsickerndes Niederschlagswasser hält den Bioreaktor Deponie am Leben und sorgt für die Mobilität von organischen und anorganischen Schadstoffen.

Insgesamt bündeln sich die Fragestellungen zur Kernfrage, nämlich der möglichst korrekten Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit der Barrieren.

Bisher war es nur möglich, entweder ex-situ im Labor oder in-situ über den Umweg der Messung der Saugspannung im Boden den volumetrischen Wassergehalt zu bestimmen. Die gravimetrische Bestimmung des Wassergehaltes hat ihre Unsicherheit in den Störungen des Bodengefüges bei der Probenahme und der Ermittlung der Dichte des Bodens. Die Berechnung des volumetrischen Wassergehaltes aus den im Labor gewonnenen Saugspannungs-Wassergehalts-Diagrammen (pF-WG-Kurve) hat ihre Unsicherheit in der Übertragbarkeit wegen der verschiedenen Skalen und dem großem Einfluss der Hysterese auf diese Beziehung. Mit beiden Verfahren gewinnt man Ergebnisse, die gerade in den kritischen Bereichen eine Prognose nicht genügend genau zulassen. Mit dem Vorliegen eines zuverlässigen Meßsystems, mit dem in-situ kontinuierlich der Bodenwassergehalt gemessen werden kann, ist es jetzt möglich, ohne diesen Umweg direkt die hydraulischen Leitfähigkeit zu berechnen.

Dazu wird die hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt dargestellt. Diese Beziehung ist eindeutig, wie die nachfolgende Arbeit zeigen wird.

Nachdem sich das Meßsystem in Vorversuchen bewährte, war es möglich, innerhalb eines vom Land Baden-Württemberg geförderten Forschungsprojektes diese neuen Möglichkeiten zu erarbeiten. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die langfristige Überwachung von Oberflächenabdichtungen von Mülldeponien gelegt. Hier ist der Einsatz solcher Überwachungssysteme dringend geboten. Eine Anwendung der kontinuierlichen Bodenwassergehaltsmessung scheiterte bisher daran, dass noch kein zertifiziertes System auf dem Markt ist. Übertragungen auf weitere Einsatzgebiete (siehe Anhang 9.2.) sind nicht nur technisch möglich, sondern sogar gefordert.

1.2. Notwendigkeit

In Deutschland werden heute noch ca. 370 Mülldeponien zur Ablagerung von Abfällen betrieben. Alleine in Baden-Württemberg sind neben den betriebenen 50 Mülldeponien über 400 Deponien schon abgeschlossen und weitere über 4500 Altablagerungen und Altlasten kartiert. Rechnet man diese Zahlen auf das gesamte Bundesgebiet hoch, so sind mindestens 50.000 mehr oder weniger kontaminierte Standorte anzunehmen. Von allen diesen Altstandorten gehen Beeinträchtigungen der Umwelt aus. Mit hohem finanziellen Aufwand werden diese Altstandorte seit über 15 Jahren erfasst und historisch und technisch erkundet. Aus dem Abgleich der so gewonnenen standortspezifischen Daten, dem Steckbrief, werden die Altstandorte mit gesetzlich festgelegten Kriterien bewertet und in Prioritätenlisten aufgenommen. Dieses „Erbe“ aus der Vergangenheit ist allerdings so groß, dass selbst ein wirtschaftlich potenter Staat wie Deutschland es sich nicht leisten kann, eine zügige und damit umweltoptimale Sanierung durchzuführen.

Dazu trägt auch bei, dass die Bewertungskriterien für die Altlasten selbst politischen Bewertungen unterliegen. Dabei wird über das volkswirtschaftlich Machbare die Prioritätenliste wesentlich beeinflusst. Summiert man die Kosten auf, die auf die Träger der Maßnahmen (Bund, Länder, Gemeinden und private Grundstücksbesitzer) zukommen, so wird sehr schnell deutlich, dass eine optimale Sanierung (nach dem Prinzip „grüne Wiese“) nicht bezahlbar sein wird. Beurteilt man das Szenario pragmatisch, so wird das Abkapseln der Altstandorte sehr häufig das Mittel der Wahl sein. Dabei ist nun die Technik gefordert: die Mehrzahl der Altstandorte liegt in hydrogeologisch problematischen Gebieten (der Altstandort liegt im Grundwasserleiter, oder es sind im anstehenden Gebirge Klüfte und Verwerfungen bis zur Sohle der Altablagerung vorhanden) und diese sind an der Basis nicht abgedichtet. So kann das Schadstoffinventar nach einer Mobilisierung über den Wasserpfad ausgetragen und in der Umwelt verteilt werden.

Eine Abkapselung, die über einen langen Zeitraum wirksam sein muss, kann zumindest verhindern, dass über den Niederschlag weiteres Wasser in die Ablagerung einsickert und zur Mobilisierung beiträgt. Schneidet man diesen Pfad ab, so wird die Emission, damit der Schadstoffaustrag, abnehmen. Die Aktivität (Bildung von Deponiegas in anaeroben Prozessen) des Reaktors „Deponie“ wird abnehmen und die Schadstoffe nur noch in geringer Dosis abgegeben (nach Paracelsus: Die Dosis macht das Gift). Diese „Immissionstheorie“ benannte Philosophie der Altablagerungsbehandlung lebt mit der Qualität und der Beständigkeit der Abkap-

selung, der Barriere. Sollte die Barriere in ihrer Funktion nachlassen, was oftmals schleichend geschieht, oder ihre Funktion ganz verlieren, steigen die Immissionen über die paracelsus'sche Dosis an – ein neuer Sanierungsfall ist geboren.

Die Vertreter der „Emissionstheorie“ betrachten die Schadstoffabgabe nicht über die Konzentration, sondern über die Fracht. Da ohnehin alle Schadstoffe über einen nur lange genug gewählten Beobachtungszeitraum von der Ablagerung an die Umgebung abgegeben werden, befürworten sie eine möglichst vollständige Umsetzung der organischen Inhaltsstoffe während der Betriebsphase der Ablagerung. Dazu ist es erforderlich, Wasser möglichst genau nach dem Bedarf des Bioreaktors zuzudosieren, genügend für die Aufrechterhaltung der organischen Prozesse, wenig genug, um Ausschwemmungen von Schadstoffen zu vermeiden. Die Ablagerung soll dann möglichst als „erloschener“ Bioreaktor in die Nachsorgephase, das ist die Überwachungszeit nach Abschluss der Ablagerung, entlassen werden. In dieser Zeit sollen die Barrieren weiter ihre Funktion behalten, damit keine anorganischen Schadstoffe eluiert werden.

Beiden Philosophien ist gemein, dass zu ihrem Funktionieren den Barrieren der Deponien oder Altstandorten die entscheidende Bedeutung zukommt. Geht man davon aus, dass der Wasserhaushalt der Ablagerung langfristig über mineralische Barrieren bestimmt wird, so ist die Überwachung der Barrieren geboten. Es wird weiter unten gezeigt werden, dass die Wassergehaltsänderung in den mineralischen Barrieren als Indikator für ihre Funktionsfähigkeit herangezogen werden kann. Diese zu messen wurde, basierend auf dem elektrophysikalischen Time-Domain-Reflectometry-Verfahren (TDR-Verfahren), ein geeignetes Verfahren entwickelt. Damit ist es möglich, die Abdichtungen online und flächig zu überwachen.

Nach dem Stand des Wissens ist es mittlerweile erwiesen, dass z.B. tonmineralische Abdichtungen nicht wie gesetzlich vorgeschrieben auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve eingebaut werden sollen. Beobachtungen und Aufgrabungen haben gezeigt, dass so gebaute Abdichtungen schon nach kurzer Zeit austrocknen und durch Schrumpfen in ihrer Funktion irreversibel zerstört werden (siehe die Fachdiskussion im Internet unter www.deponie-stief.de). Diesen Vorgang kann man mittlerweile nicht nur analytisch prognostizieren, sondern auch mit dem neu entwickelten Verfahren messtechnisch belegen. Dazu war es allerdings notwendig, elektrophysikalische Verfahren auf den bodenmechanischen Bedarf abzustimmen. Diese Abstimmung ist bis heute noch nicht abgeschlossen: die verschiedenen Fachsprachen haben es bisher verhindert, durch gegenseitiges Verstehen die Technologie weiter voran zu bringen.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Überwachung der Barrieren abfallrechtlich (siehe Anhang 9.1.) und gesellschaftspolitisch (siehe Anhang 9.1.) notwendig und technisch (siehe Kapitel 2. und 3.) möglich ist. Es wird technisch möglich sein, die Wassergehaltsänderung der Barrieren online zu überwachen, daraus direkt den rechtlich verbindlichen Überwachungsparameter „hydraulische Leitfähigkeit“ zu bestimmen und mit diesem genau genug den Wasserzutritt zum Deponiekörper abzuschätzen. Es wird nicht nur möglich, großflächig den Wasserhaushalt zu bilanzieren und den gebotenen Handlungsbedarf daraus abzuleiten, sondern auch kleinflächig Fehlstellen oder Verletzungen zu detektieren, um diese dann mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand zu beheben.

Das Potenzial für die Investitionen in die Barrieren für die noch betriebenen ca. 400 Deponien liegt bei über 8 Mrd. €. Hierzu soll den verantwortlichen Körperschaften ein Überwachungssystem als Instrument in die Hand gegeben werden (u.a. *Arndt et al.*, 2), das hilft, die Furcht vor Fehlplanungen zu nehmen. Gleichzeitig könnte dieses Instrument den Vollzug des Baus der Barrieren beschleunigen und Mittel für diese ökologisch sinnvollen Investitionen freisetzen.

1.3. Aufgabenstellung

Die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen belegen, dass eine Abkapselung von Ablagerungen, speziell von Abfalldeponien, umweltpolitisch, formalrechtlich und gesellschaftspolitisch gefordert ist (*Bothmann*, 22).

Die umweltpolitische Forderung ergibt sich aus dem Schadstoffinventar der Deponien, das weder über die Flüssigkeitsphase, noch über die Gasphase in die Umwelt gelangen darf. Dazu ist es notwendig, die Deponien mit Barrieren zu versehen, die langfristig wirksam sind (*Jax*, 103). Die langfristige Wirksamkeit, eine Grundvoraussetzung der Immissions- und der Emissionstheorie, ist über Kontroll-einrichtungen sicher zu stellen.

Die gesellschaftspolitische Forderung stellt sich aus der formalrechtlichen Verpflichtung, Abfalldeponien mit Barrieren abzuschotten und die Emissionen und Immissionen zu kontrollieren (siehe Anhang 9.1.). Der hohe Anspruch an die Maßnahmen zur Sicherung der Ablagerungen (*Watter*, 224, *Zuhse*, 243) ergibt sich schon alleine daraus, dass der „Stand der Technik“ als Auswahlkriterium für die zu erstellenden Bauwerke gilt. Dabei wird auch die rasante Entwicklung in der Abfallwirtschaft berücksichtigt, wo innerhalb nur zweier Jahrzehnte der heutige Kenntnisstand entwickelt wurde. Im Bemühen, eine „sichere“ Technik zu entwickeln, wurden zeitweise die Kosten für die Realisierung der Maßnahmen in den Hintergrund gedrängt. Nach dem Motto „nur eine teure Abfallwirtschaft mit hohen Gebühren schafft Anreize zum Recycling“ konnte nichts kostenintensiv genug sein. Beispielsweise wurde über die Forderung nach der Behandlung der wässrigen Emissionen (Deponiesickerwasser) nach den Vorgaben des Anhangs 51 zur Rahmen-Abwasser-Verwaltungsvorschrift eine ganze Schlüsseltechnologie (Mikrofiltration, Druckbiologie, thermische Verfahren, jeweils für stark kontaminierte und salzhaltige Abwässer) aus den Gebühren der Abfallwirtschaft gefördert.

Das ist heute politisch nicht mehr vertretbar. Die Abfallgebühren haben auf Grund unterschiedlichster Entwicklungen eine solche Höhe erreicht, dass die entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften mit der Umsetzung selbst gesetzlich geforderter Maßnahmen zögerlich werden mussten. Wegen wegbrechenden Abfallmengen aus dem Gewerbebereich sind die Behandlungsanlagen, wie Verbrennungsanlagen, Sortieranlagen und Deponien, nur noch zum Teil ausgelastet. Das betriebliche Defizit aus den hohen Abschreibungs- und Fixkosten (*Roder, Arndt*, 170) muss über die Gebühren, die hauptsächlich der Privathaushalt bezahlt, gedeckt werden. Diese Stimmung konnte mit der Umfrage zum Stand der Umsetzung der Oberflächenabdichtung der Deponien belegt werden. Nur vereinzelt sind die abgeschlossenen Abschnitte der Deponien nach dem Stand der Technik der dritten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallbeseitigungsgesetz (TA-Si) abgedichtet. Die Fach- und Genehmigungsbehörden geraten so immer mehr unter Druck,

mittels technischer Auflagen und rechtsverbindlichen zeitlichen Vorgaben die gesetzlich geforderten Umsetzungen auch einzufordern.

Als Beitrag, diese Situation zu entkrampfen, wird der Einsatz von Kontrollsystemen für die Abdichtungen gesehen (*Burkhardt et al.*, 34). Es wird damit möglich sein, den teuren, in der TA-Si (1993) verbindlich vorgeschriebenen Standard auf die jeweilige Situation der Deponie anzupassen. Angepasste Abdichtungssysteme, die regional verfügbare Materialien und die „Müllgeschichte“ der Deponie berücksichtigen, sind zudem preiswerter zu erstellen als das geforderte Regelabdichtungssystem. Um dieses Kontrollsystem einsetzen zu können, muss zuerst seine technische Machbarkeit geprüft werden.

Die folgende Ausarbeitung wird die zentrale These

„Es ist möglich, die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit einer Bodenschicht eindeutig aus der Messung des Bodenwassergehaltes zu bestimmen“

belegen. Damit wird es möglich werden, den gesetzlichen Überwachungsparameter online abzubilden, damit auch eine nachlassende Wirkung des Abdichtungssystems schon im Vorfeld seines Versagens zu erkennen und Fehlstellen zu lokalisieren. Eine Reparatur des teuren Systems wird gezielt und wirtschaftlich vertretbar möglich.

Nach der Einführung im ersten Kapitel werden im zweiten Kapitel dazu die Grundlagen untersucht. Die Abschätzung der Bewegung von Wasser im Boden, damit verbunden der Transport von Schadstoffen, erfordert die Kenntnis und die quantitative Berechnung der Fließvorgänge in der ungesättigten Bodenzone. Es wird gezeigt, dass die bisher immer störend auftretenden Effekte der Hysterese in der Beziehung hydraulische Leitfähigkeit zu Bodenwassergehalt unter bestimmten Voraussetzungen vernachlässigt werden können.

Die gebräuchlichen Messverfahren für den Wassergehalt werden im dritten Kapitel vorgestellt und verglichen. Das ausgewählte Messverfahren wird mit seinen mathematisch-analytischen Grundlagen beschrieben, und seine Gültigkeitsgrenzen werden definiert.

Anschließend wird im vierten Kapitel gezeigt, dass aus dem Zusammenspiel der grundlegenden Kenntnisse aus Hydrologie, Hydromechanik und Bodenphysik ein analytisches Modell entwickelt werden kann, das es erlaubt, die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit allein aus der Messung der Änderung des Wassergehaltes zu bestimmen. Die Randbedingungen für dieses Modell und die notwendigen Vereinfachungen werden diskutiert. Das Modell wird geprüft, ob es auf die verbindlich vorgegebenen Abdichtungen der Deponieoberfläche (Regelfälle) übertragen werden kann. Die Systematisierung der Lage der Messeinrichtung ist ein weiteres Ziel dieser Untersuchung.

Das im vierten Kapitel aufgestellte Modell wird im fünften und sechsten Kapitel anhand von Lysimeterversuchen (*Maile*, 119) verifiziert und auf die

„Bestimmung des flächigen Durchflusses durch eine Bodenschicht“

erweitert. Das Gewinnen der Daten, die Kalibrierung und Auswertung werden dargestellt und die Ergebnisse interpretiert. Die Grenzen der Einsetzbarkeit des Messverfahrens werden für die definierten Regelfälle diskutiert.

Im siebten Kapitel wird versucht, die Aufgabenstellung mit einem gängigen Verfahren numerisch nachzuvollziehen. Dabei wird die Perspektive eröffnet, das numerische Modell mittels der Messungen in einem Lysimeter oder anderen Testflächen auf der untersuchten Deponie zu kalibrieren. So können die Modellrandbedingungen, wie die Funktion des Wurzelbodens für die Abdichtung oder die Höhe und der jährliche Verlauf der Evapotranspiration, quantifiziert werden.

Abschließend werden im achten Kapitel Beispiele aus der Palette weiterer Anwendungen aufgezeigt. Der weitere Untersuchungsbedarf kann anhand der Einsatzgrenzen dargestellt werden. Ein umfangreiches Literaturverzeichnis (siehe Anhang 9.4.) rundet die Ausarbeitung ab.

Abschließend werden in der Zusammenfassung nochmals Ziel und Nutzen der vorliegenden Arbeit genannt.

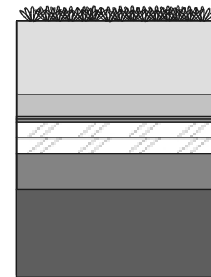
2. Grundlagen

Die Grundlagen der Beschreibung der Bewegung des Wassers im Boden werden im folgenden in die Hauptbereiche Hydrologie (Abschnitt 2.1.), Hydraulik (Abschnitt 2.2.), Bodenmechanik und Bodenhydraulik (Abschnitt 2.3.), Bodenfeuchte (Abschnitt 2.4.) und eine spezielle Betrachtung zum Einfluss der Hysterese (Abschnitt 2.5.) gegliedert. Abschließend werden in Abschnitt 2.6. die Untersuchungsschwerpunkte dargestellt.

2.1. Hydrologie

Gemäß den gesetzlichen Vorgaben werden Deponie-Oberflächenabdichtungen aus mehreren Schichten aufgebaut (*Egloffstein et al., 54, 55, Rosenberg, 176, Rowe et al., 180*). Das Regelsystem zur Oberflächen-Abkapselung einer Hausmülldeponie (Deponie-Klasse II) hat folgenden verbindlichen Aufbau (von oben nach unten):

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| Rekultivierungsschicht (RekS) | D > 1,00 Meter |
| Entwässerungsschicht (EntS) | D > 0,30 Meter |
| Schutzschicht (SchuS) | ohne Mindestangabe |
| Kunststoffdichtungsbahn (KDB) | D > 2,50 Millimeter |
| Mineralische Abdichtung (MA) | D > 0,50 Meter |
| Ausgleichsschicht (AusS) | D > 0,50 Meter |
| Müllablagerung | |



Die wasserwirtschaftliche Wirksamkeit des Systems wird von der RekS bestimmt. Treten in Schichten Defekte auf, so bestimmen auch die EntS, die KDB und die MA die Wirksamkeit. Jede Schicht für sich hat eine ganz spezielle Aufgabe, die auch nach Jahren für ein Funktionieren der gesamten Dichtung erhalten sein sollte.

Die **Rekultivierungsschicht**, auch Wurzelboden oder Wasserhaushaltsschicht genannt, geschüttet aus schwach bindigem Bodenmaterial, soll die Möglichkeit bieten, möglichst viel Wasser zu speichern und an die Pflanzen, die in ihr wurzeln, wieder abzugeben (*Si et al., 197, Sisson et al., 198*). Je nach Exposition der Oberfläche können über die Evapotranspiration bis zu 75% des Jahresniederschlages wieder abgegeben werden. Nicht speicherbares Wasser wird nach unten in tiefere Schichten weitergegeben.

Die **Entwässerungsschicht**, auch Kiesflächenfilter oder oberer Kiesfilter (*Roth, 179*) genannt, hat die Aufgabe, aus der RekS abgegebenes Wasser lateral abzuführen. Aufgebaut aus einem kiesigen Material (hydraulische Leitfähigkeit: $k_f > 10^{-3}$ m/sec) oder aus synthetischen Dränmatten, wird hier nur die Funktion des Ableitens des anfallenden Wassers gefordert. Dazu muss - je nach Neigung und Länge der Oberfläche - ein ausreichender Querschnitt angeboten werden. Wasser, das in der EntS angelangt ist, kann in der Regel nicht mehr in den Wurzelboden aufsteigen, es steht somit potentiell dem Wasserhaushalt der Deponie zur Verfügung.

Die **Schutzschicht**, i.d.R. aus Feinsand aufgebaut, hat die Aufgabe, die darunter liegende KDB vor mechanischen Beschädigungen aus der EntS zu schützen. Alternativ kann dafür auch ein synthetisches Geotextil verwendet werden.

Die **Kunststoffdichtungsbahn**, auch Konvektionssperre genannt, versiegelt als quasi undurchlässige Schicht die Deponieoberfläche. Sie soll verhindern, dass bei Aufbau eines hydraulischen Gradienten in der EntS Wasser in die unter ihr liegende MA eindringen kann. Eine unverletzte und intakte KDB sorgt dafür, dass alles Wasser, das durch die RekS in die EntS sickert, auch in der EntS abgeführt wird. An die KDB werden seitens der Qualitätskontrolle bei der Herstellung, der Verlegung und Verschweißung hohe Anforderungen gestellt. Neben der Wasserdichtheit ist die KDB dicht gegenüber aufsteigendem Deponiegas.

Die **mineralische Abdichtung** wird aus bindigem Material hergestellt. Bei einem hydraulischen Gradienten von $i = 30$ ist eine hydraulische Leitfähigkeit von $k_f < 5 \times 10^{-9}$ m/sec einzuhalten. Die MA hat die Aufgabe, bei evtl. Verletzungen der aufliegenden KDB die Dichtigkeit des Systems weiter zu gewährleisten. Die MA ist in Lagen von maximal 25 cm Dicke einzubauen. Die MA (Czurda, 39, 41, Melchior et al., 128, 129) als bindige Schicht mit hoher Verdichtung bei optimalem Einbauwassergehalt nach Proctor wird für die Regulierung des Wasserhaushalts und den Transport von Schadstoffen (Bärlund, 6, Roehl, 174) relevant. Teilweise wird versucht, das Material der MA z.B. mit Zeolithen und Aktivkohle zu vergüten (Upmeier, 215), um es langzeitstabil zu machen.

Die **Ausgleichsschicht** aus homogenem, nicht bindigem Material hat auf den Wasserhaushalt der Deponie keinen nennenswerten Einfluss. Sie dient als Auflager für das gesamte Oberflächenabdichtungssystem und kann durch ihre grobporige Struktur aufsteigendes Deponiegas erfassen und zu Absaugeinrichtungen leiten.

Die TA-Si lässt zu dem oben beschriebenen Dichtungssystem „gleichwertige“ Varianten zu, die aber grundsätzlich nichts an der Bedeutung des einzelnen Bauteils für den Wasserhaushalt (Breh et al., 28, Roth, 178) ändern. Genannt werden sollen hier nur die Bentonitmatte als Ersatz für die MA und die Kapillarsperre als Ersatz für die KDB und/oder die MA.

Zur Überwachung der Funktion der einzelnen Bauteile gibt es folgende Möglichkeiten:

- Mineralische Elemente (MA, Kapillarsperre, RekS, EntS) können mit Hilfe der Kenntnis der jeweiligen Wassergehalte überwacht werden. Steigende Wassergehalte deuten auf einen sich vergrößernden Durchfluss in der Schicht hin (die hydraulische Leitfähigkeit (k_f) ist mit dem Wassergehalt (θ) gekoppelt). Sinken die Wassergehalte bei bindigem Material unter einen jeweils spezifischen Wert, so deutet das auf ein Schrumpfen der Schicht und damit auf die Bildung von Rissen und Klüften hin, was die Gebirgsdurchlässigkeit wesentlich erhöht. Wassergehalte unter der Schrumpfgrenze sind somit auch ein Hinweis darauf, dass eine MA zumindest in Teilen oder zeitweilig zerstört ist (Ramke, 162).
- Synthetische Elemente (KDB, Geotextil, Dränmatten) werden i.d.R. auf Unversehrtheit überprüft. Neben der Beschädigung durch Eindrücken von Gegenständen (z.B. aus der EntS) oder der Durchwurzelung ist ein Reißen bei zu hoher Zugbeanspruchung bei z.B. ungleichmäßigen Setzungen im Untergrund zu detektieren.

Mit dem vorgestellten Verfahren sollen beide Arten von Dichtelementen überwacht werden können. Alle Elemente der Oberflächenabdichtung haben ihre ganz spezielle

Aufgabe, die mit einem Überwachungssystem kontrolliert werden sollen, um Fehlstellen zu detektieren.

Nach der physikalischen Grundlage, dass keine Masse verloren geht (Massenerhaltungsgesetz), gilt für Deponieoberflächenabdichtungssysteme die Wasserhaushaltsgleichung (Maidment, 118). Die Inputgröße Niederschlag (N) ist gleich der Summe aus der aktuellen Gesamtverdunstung (Fiedler et al., 65, Haude, 81) ET_a (Evaporation des Bodens - EVA, Pflanzentranspiration – PT und Interzeptionsverdunstung - IntV), der Summe der Abflüsse (Oberflächenabfluss Q_o , lateralem Abfluss in der Rekultivierungsschicht Q_L , Abfluss aus der Entwässerungsschicht Q_D und der Versickerung durch die Dichtung Q_v) und der Änderung des Wassergehaltes in den Bodenschichten innerhalb des Beobachtungszeitraumes ($\Delta\theta = W_A - W_E$).

$$N = ET_a + (Q_o + Q_L + Q_D + Q_v) + (W_A - W_E) \quad (2.1.1.)$$

W_A (WG am Anfang des Beobachtungszeitraumes (BZ)) und W_E (WG am Ende des BZ) beziehen sich in Bild 2.1.1. auf das gesamte Abdichtungssystem.

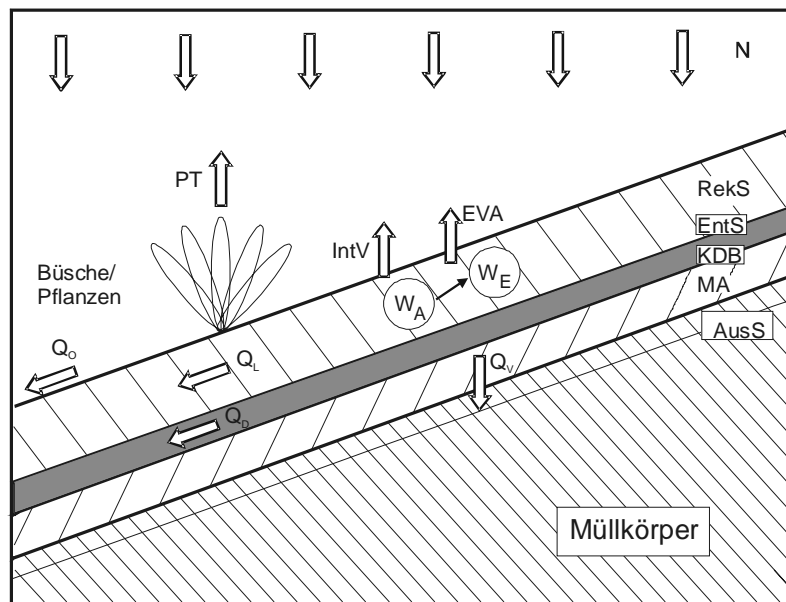


Bild 2.1.1.: Wasserbilanz an einer Deponieoberfläche

Entscheidend für die Gesamtfunktion des Dichtungspakets ist jedoch nur die Menge Q_v , die Versickerung durch die Dichtung. Löst man die Gleichung 2.1.1. nach Q_v auf, so wird

$$Q_v = N - ET_a - (Q_o + Q_L + Q_D) - (W_A - W_E) \quad (2.1.2.)$$

ET_a ist von meteorologischen Parametern, wie Windgeschwindigkeit, Niederschlagsintensität und -verteilung, Besonnung, Exposition der Fläche etc., abhängig. Die ET_a ist der kritische Parameter in den numerischen Modellen, da mit ihrer Größe die im Boden verbleibende Wassermenge definiert wird. Schon geringe Fehler in der Größe können in der Folge eine Kalibrierung des Modells unmöglich machen. Der Oberflächenabfluss Q_o wird meist mengenmäßig überschätzt. Nach Aufzeichnungen aus Lysimetern liegt Q_o im Jahreschnitt meist kleiner als 5% des Niederschlages. Nur bei wenigen Starkregen und bei steilen Böschungen wird bei Wassersättigung der Bodenoberfläche oder bei Querkollmation ein Q_o auftreten. Der laterale Abfluss

Q_L hat ebenfalls quantitativ nur untergeordnete Bedeutung (außer bei Kapillarsperren, wo der laterale Abfluss gewünscht ist). Er wird meist mit dem Abfluss in der EntS Q_D zusammen erfasst. Q_D kommt für die Funktion der Dichtung entscheidende Bedeutung zu. Im Idealfall ist Q_D so groß wie die Differenz aus $N - ET_a$. Ein Aufstau in der EntS ist zu vermeiden, damit sich kein nennenswerter hydraulischer Gradient (Druck) auf der MA aufbauen kann. Die Differenz des Bodenwassergehalts ($W_A - W_E$) in den oberen Schichten (RekS, EntS) ist bei langfristiger Betrachtung in ET_a und/oder in Q_D enthalten. Maßgeblich für die Funktion der MA ist deren Wassergehalt. Sinkt der Wassergehalt dort tendenziell, so besteht die Gefahr, dass die MA austrocknet und Schrumpfrisse ein Makroporensystem bilden. Sonst ist der Durchfluss Q_V - wie oben gezeigt - eine Funktion der hydraulischen Leitfähigkeit und damit des aktuellen Wassergehaltes (*Ernig et al., 59, Horn, 94*). Neben den meteorologischen Parametern kommt somit dem Bodenwassergehalt für den gesamten Wasserhaushalt die entscheidende Bedeutung zu.

Die Beschreibung des Wasserhaushaltes in vertikalen Bodenprofilen ist die grundlegende Voraussetzung für die Beschreibung des Wasserhaushaltes in Flächen. Zahlreiche Untersuchungen zur Regionalisierung von Punktaufnahmen (*Ackermann, 1, Lehmann, 116, Maurer, 127, Merz, 131, Plate, 155-157, Schiffler, 186*) bieten dazu schon heute fundierte Übertragungsmöglichkeiten. Die Verteilungen im Profil sind heute messtechnisch bestimmbar (*Schlaeger, 187a*). Lediglich sind die Referenzflächen auf Grund fehlender wirtschaftlicher Messmöglichkeiten noch sehr klein. Im folgenden soll der Wasserhaushalt in einem vertikalen Profil betrachtet werden.

2.2. Analytische Grundlagen

Der Schwerpunkt der Untersuchung wird im folgenden auf die Bewegung von Flüssigkeit, hier von Wasser, in der Bodenmatrix gelegt (*Hartge, 78, 79*). Die Wasserbewegung unterliegt nicht nur der Schwerkraft, sondern auch Einflüssen aus dem Boden selbst (*Hillel, 87, 88*). In der Literatur wird der Boden als ein 3-Phasen-System (ungesättigter Fall) definiert, das aus zeitlich und räumlich variablen Anteilen einer festen Phase (Boden mit organischen Bestandteilen), einer flüssigen Phase (Bodenwasser mit gelösten Inhaltsstoffen) und einer gasförmigen Phase (Bodenluft) besteht. Sind die Poren mit Wasser gesättigt, so verbleibt in erster Näherung ein 2-Phasen-System als Sonderfall (gesättigter Fall, der Anteil der Bodenluft wird zu Null gesetzt) (*Campbell, 35, David, 44, Kraemer et al., 111, Nielsen, 147, Vogelsang, 221*). U.a. spielen folgende Faktoren für die Wasserbewegung eine Rolle:

- Oberflächenspannungen an der Grenzfläche Wasser/Luft
- Grenzflächenspannungen zwischen Wasser und Bodenmatrix
- Benetzbarkeit der Bodenmatrixoberfläche
- Bindung des Wassers an der Mineraloberfläche durch Adhäsionskräfte
- kapillarer Aufstieg, dem die Schwerkraft entgegen wirkt
- Geometrie des Porenraumes (siehe auch *Scheffer et al., 184 und 185*)
- Vorhandensein von Makroporen (Wurzeln, Tiergänge, Schrumpfrisse in tonmineralischen Abdichtungen, etc.)

Antreibende Kräfte, wie Gravitation (hydrostatische Kräfte), Adsorption, Kohäsion, osmotische Kräfte aufgrund gelöster Salze etc., verursachen durch ihre Resultierende die Wasserbewegung (*Czurda, 39, LfU, 117*). Bei der Wasserbewegung wird unterschieden in den advektiven Fluss und die Diffusion. Für die in der

Oberflächenabdichtung vorgesehenen Materialien mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit wird die Diffusion als nicht relevant betrachtet. Der Durchfluss ist abhängig von der Homogenität bzw. Heterogenität des Bodens und seiner Isotropie. Es können sich präferentielle Fließwege ausbilden, wie zum Beispiel

- Makroporenfluss (durch Schrumpfrisse in tonmineralischen Abdichtungen, oder durch Wurzel- und Tiergänge, (siehe auch *Ritsema et al., 169*)
- Fingering (Wasserzutritt, der Wasserfront voreilend. Phänomen, das durch den Benetzungswiderstand der Bodenmatrix verursacht wird)
- Funnel flow (lateraler Abfluss über einer geneigten Grenzfläche zwischen Bodenschichten, z.B. einer Kapillarsperre. Es sind dazu zumindest im Mikrobereich nahezu gesättigte Verhältnisse notwendig)

Im weiteren wird von einem homogenen Boden (*Hötzl et al., 89*) ausgegangen, in dem diese Fließwege vernachlässigbar sind.

Zur Beschreibung der Bewegung des Wassers im Boden wird der mathematische Ausdruck des Potentials eingeführt. Das Lagepotential beschreibt die Lageenergie des Bodenwassers bezogen auf ein definiertes Bezugssystem. Das Gesamtpotential wird definiert als die Arbeit, die notwendig ist, eine beliebige Menge Wasser reversibel und isotherm in einem Bezugssystem zu einem betrachteten Punkt zu überführen. Das Gesamtpotential kann in mindestens sechs Teilpotenziale zerlegt werden:

$$\Psi_{\text{Gesamt}} = \Psi_{\text{Gravitation}} + \Psi_{\text{osmotisch}} + \Psi_{\text{Feuchte}} + \Psi_{\text{hydrostatisch}} + \Psi_{\text{Auflast}} + \Psi_{\text{Gasdruck}} \quad (2.2.1.)$$

Dabei sind:

| | |
|-------------------------------|--|
| Ψ_{Gesamt} | Gesamtpotential |
| $\Psi_{\text{Gravitation}}$ | Gravitationspotential |
| $\Psi_{\text{osmotisch}}$ | osmotisches Potential, führt zur Diffusion von Wasser und spielt im Bereich von Pflanzenwurzeln eine Rolle, hier vernachlässigbar |
| Ψ_{Feuchte} | Bodenwasserpotential (im ungesättigten Zustand, bei Wassersättigung wird $\Psi_{\text{Feuchte}} = 0$) |
| $\Psi_{\text{hydrostatisch}}$ | hydrostatisches Potential, verursacht von der gesättigten Wassersäule über dem betrachteten Punkt ($\Psi_{\text{hydrostatisch}}$ wird im ungesättigten Zustand zu Null) |
| Ψ_{Auflast} | Auflastpotential, auch bei quellenden Böden als Umgebungsdruckpotential, hier vernachlässigbar |
| Ψ_{Gasdruck} | pneumatisches Potential, verursacht vom Luftdruckunterschied zwischen Bezugssystem und betrachtetem Ort, hier vernachlässigbar |

Somit bleiben in der weiteren Betrachtung für die Wasserbewegung in der ungesättigten Zone nur das Gravitationspotential ($\Psi_{\text{Gravitation}}$) und das Bodenwasserpotential (Ψ_{Feuchte}) relevant. Anzumerken ist, dass die Potentialtheorie weder die Geometrie des Porenraumes, noch die Mechanismen der Wasserbindung explizit berücksichtigt. Diese sind im Matrixpotential enthalten. Ebenfalls wird nur die mechanische Energie berücksichtigt, nicht aber die thermische Energie. Nach Kutílek/Nielsen (113) sind jedoch die mechanischen Konzepte für die meisten Fragestellungen ausreichend. Bei Oberflächenabdichtungen von Deponien kann der Einfluss der Temperatur entscheidend werden. Durch die Wärmeentwicklung der

biologischen Aktivität im Deponiekörper kann sich in der MA ein Temperaturgradient ausbilden. Dieser erzeugt Kräfte, die in der MA eine thermisch bedingte Wasserbewegung hervorrufen. Die MA kann Wasser verlieren und dabei „austrocknen“ (Gottheil, Brauns, 75, Holzlöhner et al., 93, Stoffregen et al., 206).

Der stationäre Fluss im ungesättigten Bereich wird durch die Gleichung von Darcy/Buckingham (Bewegungsgleichung) beschrieben. Dieses Gesetz stellt den Fluss durch ein Einheitsvolumen in Abhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens und des Gradienten des Potentials dar. Die Fließgeschwindigkeit ist abhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert) des Bodens und vom Gesamtpotential (Ψ). Der k_f -Wert ist dabei vom Wassergehalt (θ) abhängig.

$$v_x = -k_{fx}(\theta) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial x}, \quad v_y = -k_{fy}(\theta) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad v_z = -k_{fz}(\theta) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (2.2.2.)$$

Der k_f -Wert ändert sich mit θ nicht linear, sondern er folgt einer für jeden Boden charakteristischen Beziehung. Bei der Entwässerung wird mit der Zeit der durchflossene Querschnitt verringert, d.h. die größten Poren entwässern zuerst. Beim weiteren Entwässern wird dann auf Wasser, das in feineren Poren gehalten wird, zurückgegriffen. Der k_f -Wert sinkt hier, bezogen auf die durchströmte Fläche, mit dem Quadrat des Kapillarradius'. Die Bodenluft wird dabei als ortsfest angenommen. Für instationäre Verhältnisse wird die Darcy/Buckingham-Gleichung (Bewegungsgleichung) mit der Kontinuitätsgleichung (Gültigkeit des Massenerhaltungsgesetzes)

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial \theta}{\partial t} - S \quad (2.2.3.)$$

kombiniert. S stellt dabei einen Senken- oder Quellenterm dar. Mit der Kombination von Gl. 2.2.2. und Gl. 2.2.3. wird berücksichtigt, dass sich der Wassergehalt ändert, wenn ein Bodenelement durchflossen wird. Diese Formel wird die partielle Differentialgleichung für den ungesättigten Fluss (Einheit: 1/sec) in der Bodenmatrix (Richards-Gleichung, 168) genannt.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} \cdot C + S = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{fx}(\theta) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_{fy}(\theta) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_{fz}(\theta) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right] \quad (2.2.4.)$$

$C (=d\theta/d\psi)$ wird definiert als die spezifische Feuchtekapazität des Bodens. Enthalten sind in der Richards-Gleichung die Beziehungen zwischen dem Wassergehalt (θ) und der Saugspannung (Ψ , die näherungsweise dem Potential gleichgesetzt wird), sowie die der hydraulischen Leitfähigkeit (k_f) und dem Wassergehalt (θ). Diese Beziehungen haben eine hochgradige Nichtlinearität, sodass zur Lösung von Gleichung 2.2.4., d.h. zur Berechnung des Wasser- und Stofftransportes, numerische Verfahren herangezogen werden (Jentsch, 104, Philip et al., 154). Die analytischen Ansätze zur Lösung der Problemstellung werden in Kapitel 7 dargestellt.

Es wird ersichtlich, dass zur Beschreibung der Wasserbewegung im Boden die Kenntnis zweier Parameter, des Gesamtpotentials (Ψ , wird unter den o.a. Randbedingungen durch die Saugspannung repräsentiert) und des Wassergehaltes

(θ) erforderlich ist. Diese Parameter sind daher von einem Überwachungssystem zu erfassen.

2.3. Bodenmechanik, Bodenhydraulik

Wird auf Grund der Unzulänglichkeit eines Abdichtungsbauteils (Barriere) Wasser an einen mineralischen Kontrollquerschnitt weitergegeben, so wird die Wasserbewegung (Matthess *et al.*, 125, 126) selbst durch die bodenphysikalischen Transporteigenschaften (Bergfeld, 17, Dagan, 42, Husmann, 99, Mitchell *et al.*, 133, Verruijt, 217, 218) bestimmt. Diese Eigenschaft von Böden, Wasser in ihrem Porensystem zu speichern oder durch das Porensystem weiterzuleiten, sind von der hydraulischen Leitfähigkeit und von der Porenstruktur (Tamari, 208) bestimmt. Die hydraulische Leitfähigkeit ist vom Wassergehalt des Bodens abhängig (siehe Gl. 2.2.2.). In der folgenden ersten Überlegung wird von einem „idealen“ Boden ausgegangen, d.h. einem Boden mit einheitlicher Mikrostruktur ohne Makroporen.

Im Regelfall ist der betrachtete Boden nicht wassergesättigt. Bei der ungesättigten Wasserbewegung sind folgende Beziehungen maßgeblich:

- Wassergehalt (θ) in [Vol.-%] zu Saugspannung (Ψ) in [cm Wassersäule], der sogenannten Wasserspannungskurve oder pF-WG-Kurve (pF ist der \log_{10} der Saugspannung)
- Saugspannung (Ψ) zu hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert)
- Wassergehalt (θ) zu hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert)

Die Saugspannung, auch Wasserspannung genannt, entspricht der Summe aller durch die Bodenmatrix auf das Wasser ausgeübten Bindungskräfte. Die pF-WG-Kurve (Scheffer *et al.*, 184, 185) hat für unterschiedliche Böden jeweils einen charakteristischen Verlauf (Bild 2.3.1.).

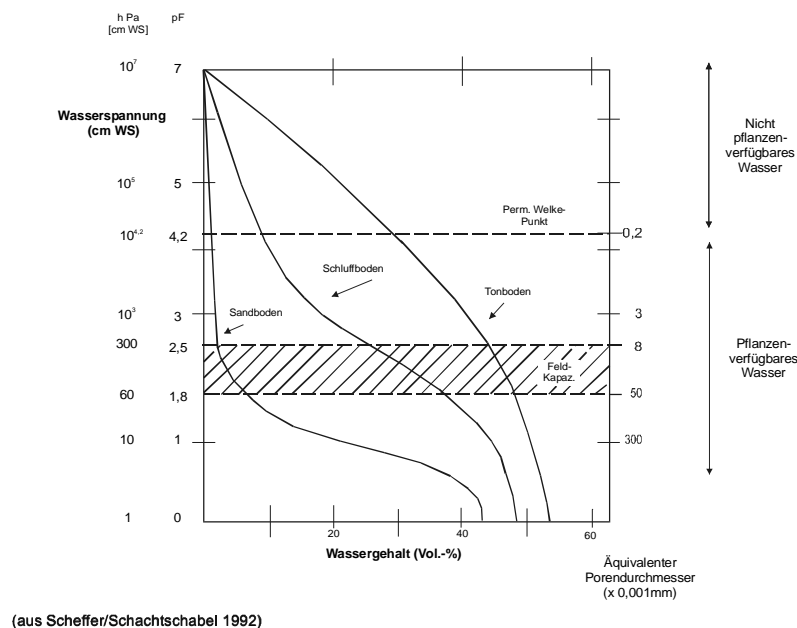


Bild 2.3.1.: Wassergehalts-Wasserspannungskurve (pF-WG-Kurve) (184, 185)

Der Verlauf der pF-WG-Kurve ist abhängig von der Größenverteilung, der Anordnung und der Vernetzung der Poren und von deren Volumen. Der Anteil der organischen Substanz und die chemische Zusammensetzung der benetzenden Phase hat ebenfalls Einfluss. Sand hat ein geringes Wasserhaltevermögen (die Residualsättigung θ_r bei $pF > 4,2$ liegt bei einem WG von kleiner 3 Vol.-%) und gibt bei geringen Saugspannungsdifferenzen das im Porengerüst gehaltene Wasser ab (geringe spezifische Wasserkapazität C , d.h. geringe Steigung der Tangente an die pF-WG-Kurve bei $0 < pF < 2,5$). Dagegen besitzt Ton eine hohe Residualsättigung (der WG bei $pF = 4,2$ liegt bei ca. 30 Vol.-%) und es bedarf großer Saugspannungsänderungen, damit das Wasser abgegeben wird (hohe spezifische Wasserkapazität C , d.h. große Steigung).

Die pF-WG-Kurve wird auch gedeutet als Zusammenhang zwischen der Saugspannung Ψ und dem entwässerbaren Porendurchmesser (mit $d [\mu\text{m}] = 3.000/\Psi [\text{cm WS}]$). Dieser Porendurchmesser d wird auch als äquivalenter Porendurchmesser bezeichnet. Mit der zugehörigen Saugspannung werden die Poren wie folgt klassifiziert:

| | | |
|------------------------|---|-------------------------|
| $d < 0,002 \text{ mm}$ | $\Psi = 15.000\text{cm}$ (entspricht $pF = 4,2$) | Feinporen, Ton |
| $d < 0,01 \text{ mm}$ | $\Psi = 300\text{cm}$ (entspricht $pF = 2,5$) | Mittelporen |
| $d < 0,05 \text{ mm}$ | $\Psi = 60\text{cm}$ (entspricht $pF = 1,8$) | enge Grobporen, Schluff |
| $d < 2,00 \text{ mm}$ | $\Psi = 1\text{cm}$ (entspricht $pF = 0,0$) | weite Grobporen, Sand |

Die Ermittlung der Bodenparameter in der ungesättigten Zone nimmt auch in der Literatur einen breiten Raum ein. Es werden Verfahren zur qualifizierten Schätzung der Parameter vorgestellt (*Hollenbeck et al., 92, Xu, 232*), teilweise werden die Parameter aus der Infiltration (*Kirda et al., 108, Zhang, 241*), der Benetzung von unten (*Hudson et al., 96*), meist aber in Abhängigkeit eines jeweils speziellen Materials (*Bauters et al., 10*) ermittelt. Das gemeinsame Ziel ist, eine Vorhersage der Wasserbewegung allein aus der Kenntnis der Bodenparameter zu gewinnen (*Bruggeman, 33, Ross, 177*).

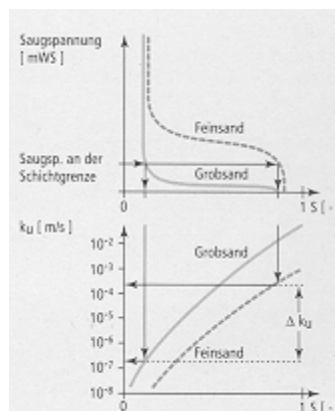


Bild 2.3.2.: Wirkung der Kapillarsperre (*Broschüre der Stadt Karlsruhe, Mülldeponie-West, 32a*)

Wie dargestellt, bestehen Oberflächenabdichtungen von Deponien aus einer Folge verschiedener Schichten. Bei der Festlegung der Kombination der Schichten ist die pF-WG-Kurve hilfreich. Die verschiedenen Verläufe der pF-WG-Kurven (Bodencharakteristiken) führen dazu, dass bei einer bestimmten Schichtfolge (z.B. Feinsand über Grobsand) bei ungesättigten Verhältnissen (Sättigung $S \ll 1$) an der Schichtgrenze die hydraulische Leitfähigkeit im Grobsand um mehrere Zehnerpotenzen

geringer ist als die im Feinsand (siehe Bild 2.3.2.). Offensichtlich haben hier die im Grobsand eingeschlossenen Luftporen eine hohe „dichtende“ Wirkung. Diesen Effekt nennt man Kapillarsperre. Man macht sich diesen Effekt bei der Abdichtung von Mülldeponien zu Nutze, insbesondere in Bereichen, die steil sind (Böschungen) und/oder in denen noch mit Setzungen zu rechnen ist. Ein Beispiel dazu ist in Bild 2.3.3. dargestellt.

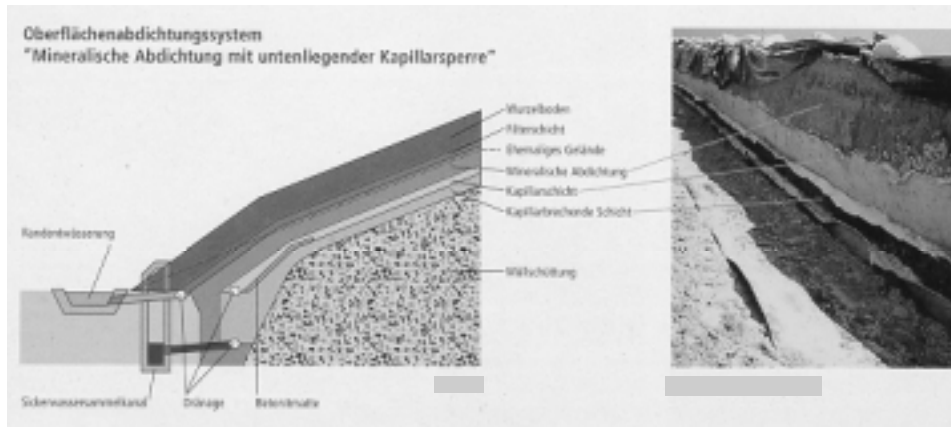


Bild 2.3.3.: Beispielhafter Aufbau einer Kapillarsperre in einer Oberflächenabdichtung (32a)

Der Verlauf der pF-WG-Kurve weist eine Hysterese auf, d.h. je nach der Vorgeschichte des Bodens hinsichtlich der Be- und Entwässerung weicht ihr Verlauf voneinander ab. Erklärt wird dieses Verhalten über das Modell der ink-bottle (Tintenfass).

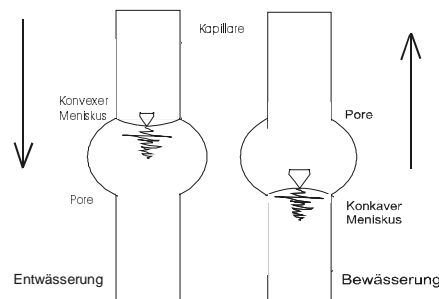


Bild 2.3.4.: Ink-bottle-Modell zur Beschreibung der Hysterese

Es wird angenommen, dass die Kapillaren, die die Poren verbinden, geringeren Durchmesser haben als die Poren selbst.

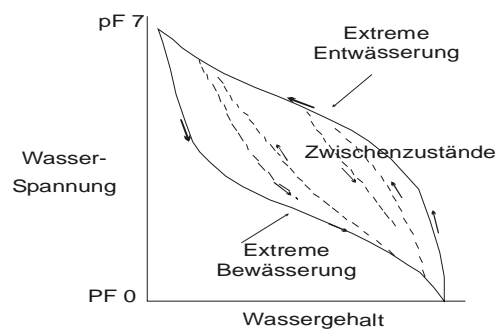


Bild 2.3.5.: Be- und Entwässerungskurve (Verlauf qualitativ)

Bei der Entwässerung hält sich der konvexe Meniskus (durch Haltekräfte gebildet) noch bei höherer Saugspannung am oberen Rand der Pore fest, als bei der Bewässerung notwendig ist, um den konkaven Meniskus (durch Benetzungswiderstand gebildet) in die Kapillare zu verlegen. Für schluffigen Sand hat die pF-WG-Kurve für die Be- und Entwässerung den in Bild 2.3.5. dargestellten qualitativen Verlauf.

Die Haupteinflussfaktoren auf die pF-WG-Kurve sind:

- Körnung:** Die Bindungsstärke des Wassers in Abhängigkeit von der Körnung beruht auf einer Zunahme der adsorbierenden Oberfläche und der Abnahme des Porendurchmessers. Eine geringe Steigung der pF-WG-Kurve wie bei Sand bedeutet, dass die Poren in dem Bereich einen relativ einheitlichen äquivalenten Porendurchmesser haben.
- Gefüge:** Es zeigt den Einfluss des Spannungszustandes in der festen Matrix. Quellen und Schrumpfen führt zur Änderung des Porenvolumens, damit zur Änderung der Porengrößenverteilung. Da bei Sand dieser Einfluss vernachlässigbar ist, ist die pF-WG-Kurve hier nahezu ein „unveränderliches Charakteristikum“.
- Hysterese:** Einfluss hat die „Richtung“ der Wassergehaltsänderung, d.h. ob das Bodenmaterial bewässert oder entwässert wird. Gründe dafür sind die gegensätzliche Wirkung von Porenengpässen („Ink-bottle“-Effekt), Veränderung der Benetzbarkeit der Matrixoberflächen, Wirkung von Luft einschließen und die durch Schrumpfen bewirkte und nur teilweise reversible Gefügeänderung. Die Hysterese ist bei Sand stark ausgeprägt.

Zur analytischen Beschreibung der pF-WG-Kurve gibt es vielfältige Ansätze. *Brooks & Corey* (1964) kombinieren in ihrem Ansatz die mathematische θ zu ψ - Beziehung mit dem Leitfähigkeitsmodell von *Burdine*. Das ist ein Kapillarbündelmodell mit einer von der effektiven Sättigung abhängigen Tortuosität, das speziell für die Erdölförderung entwickelt wurde.

Der effektive Wassergehalt, auch relativer Sättigungsindex oder Boden-Wasser-Rückhalt genannt, wird definiert zu:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.3.1.)$$

- mit θ aktueller Wassergehalt
 θ_r Residualwassergehalt (vereinfacht = 0, besser gemessen bei pF = 4,2)
 θ_s Sättigungswassergehalt (gemessen bei pF = 0), entspricht der Porosität

Die Beziehung (*Brooks & Corey*) wird zu:

$$S_e(\psi) = (\Psi_b / \Psi)^2 \quad \text{für } \Psi_b \leq \Psi \quad (2.3.2.)$$

und

$$S_e(\psi) = 1 \quad \text{für } 0 \leq \Psi \leq \Psi_b \quad (2.3.2.)$$

mit ψ_b = Saugspannung am Lufttrittspunkt. An dieser Stelle ist die Beziehung nicht differenzierbar. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit ergibt sich zu

$$k_f(S_e) = S_e^{\left(3 + \frac{2}{\lambda}\right)} \quad \text{mit } \lambda > 0 \quad (2.3.3.)$$

λ ist der Index für die Porengrößenverteilung, der mit einer enger werdenden Verteilung größer wird. Neben dem Ansatz von *Campbell* (1974, 36, siehe auch Kap. 7.2.) ist der gebräuchlichste Ansatz der von *van Genuchten* (1980, 71) und *Mualem* (1976 (137), 1986 (140)), im folgenden VGM genannt (*Nielsen et al.*, 149). Dieser hat sich in der Vergangenheit in der Literatur durchgesetzt und soll im weiteren betrachtet werden. Hier wird die $\theta(\psi)$ -Beziehung mit dem Leitfähigkeitsmodell von *Mualem* kombiniert. Im Gegensatz zum *Brooks & Corey-Burdine-Modell* (*Berger*, 15) hat es keinen scharfen Lufteintrittspunkt. Somit ist das Modell unter Nebenbedingungen auch analytisch lösbar. Der relative Sättigungsindex wird hier definiert zu

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (2.3.4.)$$

mit α, m, n von der Kornverteilung des Bodens abhängige Formparameter:
 $\alpha = 1/h_b$, mit $h_b =$ Saugspannung (ψ) am Lufteintrittspunkt,
 $m = \lambda/(\lambda + 1)$, mit $\lambda =$ Porengrößenindex,
 $n = \lambda + 1$, damit wird $m = 1 - 1/n$
 h Saugspannung (ψ) beim Wassergehalt θ

Damit wird die Beschreibung der Abhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit von der Bodenfeuchte analytisch auf Basis des Vorhersagemodells von *Mualem* wie folgt möglich:

$$\frac{k_f(\theta)}{k_s} = S_e^\gamma \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2.3.5.)$$

mit $k_f(\theta)$ hydraulische Leitfähigkeit beim aktuellen Wassergehalt
 k_s hydraulische Leitfähigkeit bei Wassersättigung. Er wird oft konstant gesetzt, ist aber von der Struktur des Bodens abhängig
 γ Berücksichtigt den Einfluss der Tortuosität, meist $\gamma = 0,5$

Durch inverse Parameteridentifizierung (siehe auch *Schultze et al.*, 191, zur Hysterese) können die Werte numerischer Simulationen denen der Feldversuche angenähert werden. Somit werden die gesuchten Parameter direkt geliefert. Zu beachten ist, dass die Ergebnisse jeweils kritisch überprüft werden müssen. Das VGM ist nicht universell einsetzbar und teilweise differieren die Ergebnisse aus der Rechnersimulation stark von den gemessenen Parametern. Manchmal wird in der Berechnung auch kein stabiles Ergebnis erreicht. Ursache dafür dürfte sein, dass das VGM nur für unimodale Böden, das sind Böden mit nur einem Maximum in der Kornverteilung, entwickelt wurde. Für gemischte Böden (multimodal) wurden mittlerweile Entwicklungen (*Durner et al.*, 52 u. 53) durchgeführt und das Modell entsprechend angepasst. Später wird gezeigt, dass für die vorliegende Aufgabenstellung idealerweise unimodale Böden zum Einsatz kommen und damit die erweiterten Modelle hier nicht weiter betrachtet werden müssen.

Obiges Verfahren stellt für den vorliegenden Anwendungsfall (Lage der Überwachungseinrichtung in einer mineralischen Schicht) die Grundlage zur Beschreibung der bodenphysikalischen Zusammenhänge zwischen hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert) und Wassergehalt (θ) dar (Gehrke *et al.*, 69). Bisher war es Stand der Technik, die Wasserspannung mittels Tensiometer zu messen. Über die pF-WG-Kurve wurde aus der Wasserspannung der Wassergehalt des Bodens bestimmt und daraus dann der k_f -Wert. Der Einfluss der Hysterese ließ bisher keine eindeutigen Ergebnisse zu.

2.4. Bodenfeuchte

Zur Lösung der Richardsgleichung (Gl. 2.2.4.) wird die Kenntnis der Eigenschaften des Bodenmaterials benötigt. Diese wurden bisher der grundlegenden pF-WG-Kurve entnommen. Dabei ist der pF-Wert der dekadische Logarithmus aus Buckingham's „Kapillarpotenzial“ in cm WS (p bezeichnet den Logarithmus, F bezeichnet die Differenz der freien Energie). Die Form und die Eindeutigkeit der pF-WG-Kurve hängen vom Gefüge ab, welches die Korngrößenverteilung (Textur) und die Lagerung und Anordnung der Partikel (Struktur) umfasst. Für die analytische Modellierung werden weitere Parameter, die alle Wassergehalte des Bodens bei Grenzzuständen beschreiben, erforderlich (siehe Gl. 2.3.1.). Neben dem natürlichen Sättigungswassergehalt (θ_s), dem definitionsgemäß ein pF-Wert von Null entspricht, ist die absolute Sättigung (θ_s^*) ein wichtiger Parameter. θ_s^* entspricht der Porosität (e) des Bodens. Die absolute Sättigung wird bei der Wiederbewässerung eines Bodens nicht mehr erreicht, da - je nach Textur und Struktur des Bodens - Teile der Poren noch luftgefüllt bleiben. Nach umfangreichen Untersuchungen gilt (Mualem, 136):

$$\theta_s = 0,8 \div 0,95 \theta_s^* \quad (2.4.1.)$$

Auch bei der natürlichen Sättigung verbleibt immer noch Luft in den Poren, und zwar in der Größenordnung von 5 \div 20 % der absoluten Sättigung. Der Boden ist daher immer als ein 3-Phasen-System (siehe Abschnitt 2.2.) anzunehmen. Als weiterer Parameter wird die Restwasser- oder Residualsättigung, bei der die Wasserphase nicht mehr kohärent ist, mit θ_r definiert. Der zugehörige pF-Wert wird mit 4,2 festgelegt.

Die Verteilung der drei Bestandteile, Wasser, Luft und Boden, wird mit verschiedenen „Mixing models“ beschrieben. In Bild 2.4.1. wird schematisch ein Ausschnitt aus dem Boden dargestellt. Die Anteile an den verschiedenen Phasen zeigt Bild 2.4.2.. Dabei wird die Wasserphase in das „freie Wasser“ und in das an oder in den Partikeln „gebundene Wasser“ unterschieden.

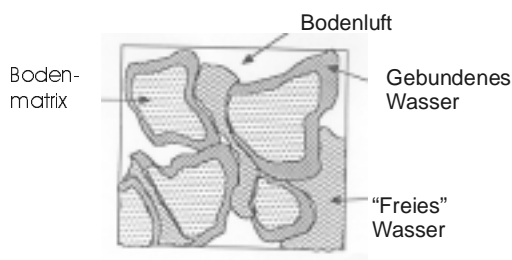


Bild 2.4.1.: Bodengefüge

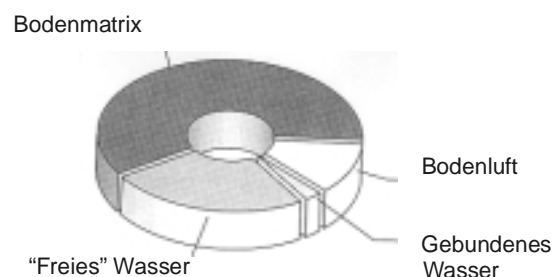


Bild 2.4.2.: Vol. Anteile der Phasen

Die elektrostatischen Kräfte um einen Festkörper (hier ein Bodenpartikel) wirken nach außen. Diese Kräfte entstehen durch die nicht allseitig nach außen elektrisch kompensierten Moleküle der Festkörperoberfläche. Die Benetzungsfähigkeit eines Körpers mit Wasser ist von der Stärke dieser Kräfte abhängig. Sind die Kohäsionskräfte der Wassermoleküle untereinander kleiner als die Oberflächenkräfte, werden die Wassermoleküle an der Festkörperoberfläche adsorbiert. Gebundenes Wasser kann weitere Wassermoleküle über Assoziationskräfte binden. Diese Bindung ist allerdings labil. (Hübner, 97)

Gebundenes Wasser wird bevorzugt an polare Bindungen angelagert. Die Oberflächen der Feinbestandteile im Boden (Tone) sind durch Ionen abgesättigt. Die Sorptionskräfte zwischen den Ionen und der Oberfläche der Tone sind größer als die apolaren Sorptionskräfte zwischen Oberfläche und Wassermolekül. Dadurch bildet sich die Benetzungsfähigkeit der Tone, es entsteht eine Hydrathülle um die Metallkationen. Außerdem liegt noch das Wasser vor, das im Gitter der Bodenpartikel gebunden ist, das Kristallwasser.

Wasser kann auch kondensiert in den Kapillaren vorliegen. Berühren sich zwei Wasserfilme, so fließen die Wassermoleküle zusammen und bilden in den Hohlräumen zwischen den Bodenteilchen tragende Menisken. Durch die Oberflächenspannung werden weitere Wassermoleküle nachgezogen. Ist die Bodenluft dampfgesättigt, kondensiert das Wasser über dem konkaven Meniskus. Dort ist der Dampfdruck kleiner als über einem konvexen oder ebenen Meniskus. Die Molekularkräfte werden durch den Wasserdampf oder durch flüssiges Wasser abgesättigt.

Der Hauptanteil des im Boden existierenden Wassers liegt nach der Absättigung der Molekularkräfte spannungsfrei und „tropfbar“ vor, unterliegt also der Schwerkraft. Dieser Anteil des Bodenwassers ist der für die Aufgabenstellung interessante Anteil.

Die Wassergehalte θ , θ_s und θ_r wurden bisher im Labor in Abhängigkeit der Saugspannung ermittelt. Dabei wurde in den Bewässerungs- und den Entwässerungszustand der Probe unterschieden, die unterschiedliche zugehörige Wassergehalte liefern. Dieses Phänomen wird Hysterese genannt und ist aus anderen naturwissenschaftlichen Anwendungen wohlbekannt, beispielsweise

- Erhitzen und Abkühlen von Ammoniumchlorid
- Magnetisierung von Eisenmagneten
- Ad- und Desorption von Gasen an porösem Gestein.

Nimmt man eine starre Bodenmatrix und konstante Temperatur während eines Be- und Entwässerungsvorganges an, so sind als Ursachen der Hysterese in der pF-WG-Beziehung folgende Faktoren identifiziert:

- Der Randwinkel zwischen Bodenmatrix und Bodenwasser (Meniskuskrümmung) ist beim Vorrücken von Wasser größer als bei seinem Rückzug.
- Es existieren porengeometrische Effekte, die mit dem „Ink-bottle“-Effekt (siehe Bild 2.3.2.) beschrieben werden.
- Adsorbiertes Wasser an Tonmineraloberflächen führt zur Adsorptionshysterese („Capillary condensation“, siehe oben).
- Eingeschlossene Luft ($\theta_s^* > \theta_s$) verstärkt die porengeometrischen Effekte.

Diese Faktoren führen dazu, dass die Beziehung des bisherigen Messwertes Saugspannung (ψ) zur hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert) ebenfalls stark der Hysterese unterliegt. *Mualem (138)* stellt die Bandbreite der Hysterese (Abstand der Punkte der Hauptbewässerungs- und der Hauptentwässerungskurve) dar:

| | | |
|---|--------|-----|
| Beziehung: $\theta(\psi)$, pF-WG-Kurve | Faktor | 3 |
| Beziehung: k_f -Wert (ψ) | Faktor | 200 |

Aussagen, die eine zuverlässige Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit zulassen, sind damit unmöglich. Die Vergrößerung der Unsicherheit um den Faktor 100 resultiert auch aus den Beobachtungsmaßstäben (ψ wird logarithmisch aufgetragen, der k_f -Wert exponentiell).

Diese Unsicherheit liefert die Grundlage für die Wahl des Bodenwassergehaltes (θ) als relevantem Messparameter. Betrachtet man die maximale Bandbreite der Hysterese bei der k_f - θ -Beziehung, so nennt ihn *Mualem* mit

| | | |
|-------------------------------------|--------|-----|
| Beziehung: k_f -Wert (θ) | Faktor | 0,4 |
|-------------------------------------|--------|-----|

Diese Beziehung liefert also Ergebnisse, die um den Faktor 500 schärfer, d.h. eindeutiger, sind als die aus der k_f - ψ -Beziehung. Die These, dass die k_f - θ -Hysterese nur gering ausgebildet ist, wird im nächsten Abschnitt intensiv untersucht. Weiterhin wird untersucht, ob unterschiedliche Bodenarten unterschiedliche Ausprägungen (*Mallants, 122*) der Hysterese besitzen.

2.5. Hysterese

Es ist bemerkenswert, dass die Hauptaktivitäten zur Untersuchung der Auswirkungen der Hysterese auf die eindeutige Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit in Böden (*Stolte et al., 207*) in dem Zeitraum zwischen 1955 und 1975 liegen. Mit den Veröffentlichungen von *van Genuchten* und *Mualem* (Abschluss 1986, 71, *Schaap, 183*) war das Thema offensichtlich wissenschaftlich abgeschlossen, ohne jedoch eine endgültige, allgemein gültige Lösung für die Anwender anzubieten. Die Gründe für diese Vorgehensweise und Entwicklung liegen darin, dass

- der Bodenwassergehalt (θ) damals in-situ flächig nicht direkt ermittelt werden konnte, sondern aus der Bodencharakteristik Wasserspannung (ψ) zu Wassergehalt (θ) (pF-WG-Kurve, im Labor ermittelt) bestimmt wurde. Diese Charakteristik unterliegt je nach Bodenmaterial mehr oder weniger stark der Hysterese (*Sheta, 196*).
- Die Wasserspannung (ψ) wurde mit Tensiometern in-situ gemessen. Die Bestimmung des Wassergehaltes (θ) erfolgte mit der gravimetrischen Methode ex-situ. Bei der Umrechnung von gravimetrischem Wassergehalt in volumetrischen Wassergehalt ist die Kenntnis der Dichte des Bodenmaterials erforderlich. Deren Bestimmung ist jedoch stark von der Sorgfalt der Probenbehandlung abhängig und damit fehleranfällig.
- Vereinfachend kam man überein, für die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert) den „oberen“ Ast (Entwässerung, dränierender Ast) des pF-WG-Diagramms zu wählen. Teilweise differieren dabei die k_f -Werte (dränierender Ast zu bewässerndem Ast) um mehr als zwei Zehnerpotenzen.

Da die k_f -Werte nach TA-Si Kontrollparameter für die Funktionsfähigkeit von Deponie-Abdichtungssystemen sind, ist eine wesentlich höhere Genauigkeit zur Bestimmung der aktuellen k_f -Werte erforderlich.

Die gewählten Literaturstellen wurden in drei Gruppen unterteilt:

- Gruppe I: Allgemeines und Grundsätzliches zur Entstehung und zum Einfluss der Hysterese.
- Gruppe II: Der Einfluss der Hysterese (auf die Beziehung Wassergehalt (θ) zu k_f -Wert) ist vernachlässigbar.
- Gruppe III: Der Einfluss der Hysterese (auf die Beziehung Wassergehalt (θ) zu k_f -Wert) ist nicht vernachlässigbar.

In Anhang 9.3. wird das Phänomen der Hysterese beschrieben und seine Auswirkungen auf die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit aus der Kenntnis der Bodenfeuchte bewertet. Daraus wird folgendes, für die vorliegende Aufgabenstellung abschließendes Urteil gebildet:

Das Phänomen der Hysterese tritt in einigen naturwissenschaftlichen Zusammenhängen auf (z.B. Magnetisierung einer elektrischen Spule). Zwischen diesen Phänomenen werden in der Literatur Parallelen beschrieben, mit deren Hilfe das Verstehen der einzelnen Phänomene erleichtert wird. So wird die Hysterese in der Beziehung Wassergehalt (θ) zu Wasserspannung (Ψ) und damit auch in der Beziehung Wassergehalt (θ) zu hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert) mit mechanischen Modellen (Everett et al., 60, 61) erklärt. Darauf aufbauend wird die „independent domain theory“ formuliert (Everett et al., 61, 62, Enderby, 57, Nielsen et al., 148, Narr et al., 145, Topp et al. 213 und Talsma, 246). Das Phänomen wird damit erklärt, dass Änderungen der Größen möglich sind, die vom Zustand zentraler Parameter wie Porengeometrie oder Porenvolumen unabhängig sind. Dabei ist zu bedenken, dass die Bodenzustandsparameter nur indirekt über die Ψ - θ -Kurve (pF-WG-Kurve) mit allen dabei in Kauf zu nehmenden Unzulänglichkeiten (Mess- und Zuverlässigkeitsbereich der Tensiometer, Fehler bei der ex-situ Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes, Fehler bei der Probenahme und -konservierung etc.) ermittelt werden konnten.

Schon früh wurde eine mathematische Beschreibung des Phänomens versucht (Klute et al., 109) mit dem Ziel, Bodenzustände bei verschiedenen Bedingungen prognostizieren zu können. Schließlich erfolgten mit den beginnenden 70er Jahren Beschreibungen, bei denen die bodenmechanischen Prinzipien mit berücksichtigt wurden (Arya et al., 3, 4, Mualem, 138, Topp, 212). Damit konnten Modelle konstruiert werden, die nicht nur auf einzelne Bodenarten, sondern auf eine ganze Palette von Böden übertragbar sind. Dabei ist anzumerken, dass bis zum heutigen Tage nur eine überschaubare Anzahl im Labor bestimmter Ψ - θ -Kurven vorliegt, die z.B. zur Modellvalidierung herangezogen werden können.

Der nächste Schritt war dann nicht nur das Verstehen von Resultaten aus Labormessungen, sondern deren detaillierte Erklärung (Watson et al., 223) mit der Weiterentwicklung zu allgemeingültigen Modellen (Mualem, 136). Damit war die Entwicklung weitgehend abgeschlossen. Es erfolgten bis heute lediglich geringfügige Verbesserungen (Hogarth et al., 91, Mualem, 139, Parlange, 151) des Modells mit

der Zielsetzung, den Messaufwand zu optimieren und den Verlauf der Prognosen an zwischenzeitlich erfolgte in-situ-Messungen anzupassen.

Für die Konstruktion des für das vorliegende Projekt erforderlichen Messfeldes und die Auswahl der zugehörigen Bodenmaterialien konnten schon aus dieser geschichtlichen Entwicklung wertvolle Schlüsse gezogen werden. Die Auswahl der Bodenmaterialien ist so zu treffen, dass Hystereseeffekte minimiert werden (*Parlange, 151*), um eine möglichst eindeutige Zuordnung gemessener Bodenwassergehalte zu den zugehörigen k_f -Werten zu ermöglichen.

Besonders deutlich wird diese Aufgabenstellung aus den Erkenntnissen der weiteren Literaturstellen (*Bloemen, 19, Bohne et al., 21, Milly, 132*). Dazu ist grundsätzlich folgendes anzumerken:

- o Für das Gelingen des vorliegenden Projekts ist eine eindeutige Beziehung θ zu k_f -Wert nötig (Übersicht in *Feddes et al., 63, 64*).
- o Mit dem vorgeschlagenen Verfahren soll es möglich sein, zerstörungsfrei den Wassergehalt des Bodens (θ) kontinuierlich zu messen. Der „Umweg“ über die Bestimmung der Saugspannung (Ψ) und der Konstruktion der pF-WG-Kurve ist nicht mehr notwendig. Denn gerade die pF-WG-Kurve weist eine ausgeprägte Hysterese auf.
- o Abzuleiten sind auch die Bodenparameter, die auf den Grad der Ausprägung der Hysterese Einfluss haben (*Hartmann et al., 80*).

In Bild 2.5.1. und 2.5.2. wird gezeigt, dass die Auswirkung der Hysterese tatsächlich vernachlässigbar ist.

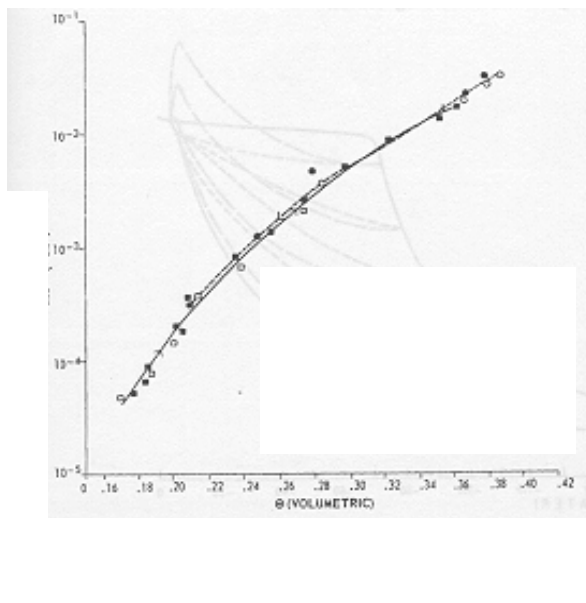


Bild 2.5.1.: k_f - θ -Beziehung nach Topp (210)

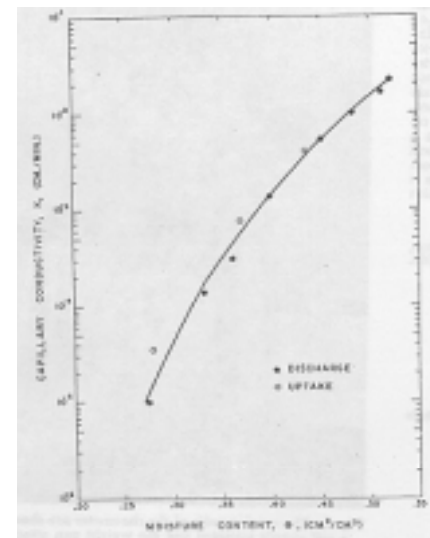


Bild 2.5.2.: k_f - θ -Beziehung nach Elrick (56)

Die überwiegende Anzahl der relevanten Veröffentlichungen (siehe Anhang 9.3., Kapitel II) zeigt auf, dass für leicht schluffige Sande die Beziehung θ zu k_f -Wert nur einer geringen oder keiner Hysterese unterliegt. Schlüsselparameter dafür sind die Porengrößenverteilung und der Verdichtungsgrad (*Narr et al., 145*). Diese beiden Parameter sind aber auch für die Qualität der Messungen des Bodenwassergehaltes entscheidend (möglichst ausreichende Verdichtung zur „Homogenisierung“ des

Materials und Minimierung von Bodenluft (quasi 2-Phasen-System), was durch eine breitere Porengrößenverteilung begünstigt wird.

Besonders anschaulich werden die Abhängigkeiten der Bodenparameter voneinander in *Klute et al. (109)* aufgezeigt. Sogar die Eindeutigkeit der θ - k_f -Wert Beziehung wird dargestellt. Weiterhin konnten die Phänomene der Erstabwässerung und Erstentwässerung beschrieben werden (*Mualem, 136*). Unabhängig von der Bodenart wird bei der Wiederbewässerung einer Bodenprobe nur noch 90% des Sättigungswassergehaltes der Ausgangsprobe erreicht (*Mualem, 136*), was am Einschluss von Luftporen in das Gefüge liegt.

Aus den Darstellungen (Anhang 9.3., Kapitel III), bei denen doch ein Einfluss der Hysterese in der θ - k_f -Wert Beziehung auftritt, wird deutlich, dass bindiges Bodenmaterial (Ton, Schluff) für die hier angestrebte Sensormessung nicht günstig ist (*Youngs, 234* und *Staple, 203*). Außerdem hilft für die Festlegung der geometrischen Lage des Kontrollsystems die Erkenntnis, dass mit fortschreitender Tiefe („unter der Pflugtiefe“) die Hysterese nicht mehr so stark ausgeprägt ist (*Staple, 202*). In den weiteren Literaturstellen ist der Einfluss der Hysterese zwar dokumentiert, die absolute Größe der Abweichung der Werte auf dem bewässernden und entwässernden Ast („Einhüllende“) der θ - k_f -Wert-Beziehung ist aber für die vorliegenden Versuche hinnehmbar. Das wird weiter dadurch verbessert, dass bei mehreren Be- und Entwässerungszyklen die k_f -Werte, die der gleichen Bodenfeuchte zugehören, enger zusammenrücken.

Es ist somit für die Durchführung des Versuchs belegt, dass die Hysterese bei der Bestimmung des k_f -Wertes aus dem Bodenwassergehalt nur eine untergeordnete Unschärfe in die Messergebnisse einbringt. Da bei der Versuchsdurchführung auch das Langzeitverhalten der Entwicklung der Wassergehalte bewertet wird, sind diese Unschärfen erkennbar, aber durch die nur relative Verwertung der Änderungen (Differenzen) des Wassergehaltes auch eliminierbar.

2.6. Untersuchungsschwerpunkte

In den vorangehenden Abschnitten wurden die Grundlagen für die Überwachung von Deponieoberflächenabdichtungen diskutiert. Die Erfassung des gesetzlich geforderten Überwachungsparameters, der hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert), ist mit den heutigen Messmethoden nur eingeschränkt möglich. Die zu Grunde liegende partielle Differenzialgleichung (Richardsgleichung, siehe Gl. 2.2.4.) ist wegen ihrer Nichtlinearität nicht geschlossen lösbar. Dazu existieren numerische Ansätze, die modellhaft Bodenparameter definieren (z.B. den Lufteintrittspunkt) und den Boden selbst in Modelle überführen (z.B. Kapillarbündelmodell). Die Lösung dieser Ansätze führt dann an ihre Grenzen, wenn der Boden in seinem aktuellen Zustand auch nur leicht vom Modell abweicht.

Damit wird deutlich, dass neben der Lösung der Differenzialgleichung der Modellierung des Bodens (Zwei- oder Dreiphasensystem) eine entscheidende Rolle zukommt. Die Betrachtung der antreibenden Kräfte über Potenziale führt konsequenterweise zum Parameter „Saugspannung“. Bekannt ist auch, dass jeder Saugspannung im Boden nicht eindeutig ein Bodenwassergehalt zugeordnet ist. Je nach Vorgeschichte des Bodens und seines Bewässerungs- oder Entwässerungs-

standes ist dem gemessenen Wert der Saugspannung ein anderer Wassergehaltswert zugeordnet (*Iwata et al., 102*).

Die aus der Saugspannung und dem Wassergehalt gewonnene Bodencharakteristik, die pF-WG-Kurve, ist nicht eindeutig. Daher kann ihre weitere Transformation in eine pF- k_f -Kurve ebenfalls nicht eindeutig sein. Die Differenz der beiden Zuständen zugeordneten k_f -Werte beträgt Zehnerpotenzen, bietet also keinen zuverlässigen Wert für einen Überwachungsparameter. Anstelle der Saugspannung wird im weiteren die

Bodenfeuchte

als maßgeblicher Parameter herangezogen. Diese Vorgehensweise ist neu. Die beiden folgenden Kapitel dienen der Absicherung des Verfahrens und der Untersuchung der Beziehung WG- k_f -Wert.

3. Feuchtemessung

Die Messung des Feuchtegehalts von Materialien wird eine immer größere Bedeutung erhalten. Auf der einen Seite bestimmt der Feuchtegehalt den Energieverbrauch beim Trocknen und Verbrennen von Stoffen (beispielsweise von Holz und Stroh). Auf der anderen Seite ist der Feuchtegehalt ein Beurteilungsparameter für die Lagerungsdauer und -möglichkeit von Stoffen (z.B. landwirtschaftliche Produkte). Der Feuchtegehalt ist entscheidend für die Konfektionierbarkeit (Produkte aus der Pharmaindustrie), die Transportfähigkeit (hochgetrocknete Waren zur Ersparnis von Frachtkosten) wie auch der Verbesserung der Haltbarkeit z.B. von Lebensmitteln. Die Online-Überwachung von Lagergut kann Bränden durch Selbstentzündung vorbeugen. Eine nicht abschließende Beschreibung von Einsatzmöglichkeiten der Feuchtemessung ist im Anhang 9.2. aufgeführt. Im Folgenden soll gemäß der Aufgabenstellung die Bestimmung der Feuchte im Boden, d.h. des Wassergehalts im Boden, betrachtet werden.

3.1. Messverfahren

Hier wird ein Überblick auf die derzeit möglichen und gebräuchlichen Verfahren gegeben (*Smith et al., 199*). Die Bestimmung des Wassergehaltes der Böden hat in vielen Bereichen grundlegende Bedeutung, z.B.

- in der Landwirtschaft zur Optimierung der Bewässerung,
- in der Meteorologie zur Kalibrierung von Modellen zur Nebel- und Wolkenbildung (Verbesserung der Wetterprognosen),
- in der Bodenmechanik zur Erklärung von erddynamischen Verhaltensweisen.

Dazu wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Verfahren entwickelt. Um die Verfahren zu systematisieren, wird in „direkte“ und in „indirekte“ Verfahren unterschieden.

3.1.1. Direkte Verfahren

Verfahren zur direkten Bestimmung des Wassergehaltes sind

- Gravimetrische Methode (Dörr-Wäge-Trocknung)
- Kalziumkarbidverfahren, Schwefelsäureverfahren (quasi-direkt)
- Verdampfungsverfahren
- Luftpyknometerverfahren

Schon sehr früh hat man den Gewichtsverlust einer Bodenprobe beim Trocknen gewogen (**gravimetrische Methode**). Das Verfahren gilt heute als Referenzmethode (DIN 18121 Teil 1), d.h. mit ihm werden andere Methoden verglichen oder indirekte Methoden kalibriert. Die Probe wird feucht gewogen (G_f), im Ofen bei 105°C getrocknet, im Exsikkator abgekühlt und anschließend wiederum gewogen (G_t). T ist das Gewicht des Behältnisses. Der gravimetrische Wassergehalt (θ_{Gr}) ergibt sich dann zu:

$$\theta_{Gr} = \frac{G_f - G_t}{G_t - T} \quad (3.1.1.)$$

Multipliziert mit 100 ergibt sich der prozentuale Anteil des Wassers zur Trockenmasse in Gew.-%. Der volumetrische Wassergehalt ergibt sich durch Verknüpfung von θ_{Gr} mit der trockenen Dichte des Bodens (ρ_d) und der Dichte des Wassers (ρ_w) zu

$$\theta_{Vol} = \theta_{Gr} \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w}. \quad (3.1.2.)$$

Die Ermittlung der trockenen Dichte des Bodens (ρ_d) ist sehr aufwändig und schon bei der geringsten Störung der Probe (z.B. bei der Probenahme) fehlerbehaftet. Da ρ_d linear in die Bestimmungsgleichung eingeht, pflanzt sich der Fehler linear fort.

Das Verfahren ist allerdings einfach in der Durchführung, und die Gerätekosten sind gering. Auch dient die Probennahme mittels Stechzylinder gleichzeitig zur Dichtebestimmung. Nachteilig ist, dass das Verfahren recht zeit- und arbeitsintensiv ist. Nach dem Teil 2 der DIN 18121 ist es möglich, die langen Trocknungszeiten mittels Mikrowelle zu verkürzen.

Das Verfahren ist generell destruktiv, d.h. durch die Probennahme werden die natürlichen hydrologischen Verhältnisse beeinflusst und damit verfälscht. Es ist daher nicht möglich, in ein und demselben Messvolumen die Änderung der Bodenfeuchte kontinuierlich zu verfolgen (z.B. Infiltrationsversuche *Kretzer et al., 114*). Außerdem ist es wahrscheinlich, dass bei Tonen, organischen Materialien oder Kolloiden auch andere flüchtige Bestandteile als Wasser ausgetrieben werden und Umsetzungen mit Luftsauerstoff auftreten, die das Messergebnis verfälschen.

Das **Kalziumkarbidverfahren** ist in der Bautechnik (z.B. Überprüfung des Wasser-Zement-Wertes von Frischbeton) verbreitet. Die feuchte Bodenprobe wird in einer Druckflasche mit Kalziumkarbid zusammen gebracht. Als Reaktionsprodukt entsteht Acetylgas, wobei der Wassergehalt der Probe direkt proportional zum Gasdruck ist. Beim **Schwefelsäureverfahren** ist die bei der Reaktion entstehende Temperaturerhöhung das Maß für den Wassergehalt der Probe.

Beim **Verdampfungsverfahren** wird der Probe durch Destillation oder durch Adsorption an ein Trockenmittel (z.B. Phosphor-Pentoxid) Wasser entzogen. Die entfernte Menge kann bestimmt werden.

Komprimierte Luft wird beim **Luftpyknometerverfahren** in einen Probebehälter geleitet. Der entstehende Druck ist vom Volumen des Bodens und der Masse des Wassers abhängig.

3.1.2. Indirekte Verfahren

Indirekte Verfahren sind weitaus differenzierter. Es sind:

- Tensiometrie
- Radiometrische Verfahren (Neutronensonde, Gammasonde)
- Elektrische Verfahren (Leitfähigkeitsmessung)
- Messung mit faseroptischen Sensoren (Heat-Pulse-Verfahren)
- elektromagnetische Verfahren
- sonstige Verfahren (z.B. Tauchwägung, Kernspinresonanzmethode).

Die **Tensiometrie** (*Stannard, 201, Yeh et al., 233*) erfasst die Saugspannungen im Boden. Dazu wird eine mit Wasser gefüllte Tonzelle (Tensiometer, DIN 19683, Blatt 4) in den zu untersuchenden Boden eingebaut. Der Tonzelle wird vom umgebenden Boden so lange Wasser entzogen, bis sich ein Druckausgleich einstellt. Mit Tensiometern kann die Hydratations- und die Kapillarspannung in Böden gemessen werden. Diese beiden Größen sind Funktion der Bodenfeuchte. Angegeben wird die Saugspannung im Boden, die der Kapillarspannung entspricht. Als prinzipieller Messfehler muss das abfallende Potenzial der Saugkraft des die Tonzelle umgebenden Bodens angesehen werden. Das Gleichgewicht im Tensiometer entspricht nicht der wirklichen Saugspannung, sondern zeigt einen geringeren Wert an. Diese Differenz hängt ab vom Feuchtigkeitsgefälle des Bodens um die Tonzelle und dem daraus resultierenden Saugspannungsgefälle. Durch sorgfältigen Einbau der Tensiometer und Einschlämmen der Tonzelle mittels feinkörnigem Material (Steinmehl o.ä.) sollen durch einen optimalen Verbund mit dem umgebenden Boden vertrauenswürdige Messergebnisse sichergestellt werden.

Mittels für jeden Boden charakteristischer Kurven (pF-WG-Kurve, s.o.) lässt sich aus der gemessenen Saugspannung der Wassergehalt bestimmen. Die Messgrenze der Tensiometer liegt bei ca. 850 hPa. Das entspricht $pF \approx 2,9$, was noch unter dem Definitionswert der Residualsättigung ($pF = 4,2$) liegt. Die Kalibrierung ist aufwändig, ebenso die Wartung. Bei Feldversuchen besteht die Gefahr des Einfrierens. Da die pF-WG-Kurve der Hysterese (siehe 2.5.) unterliegt, ist sie oftmals nicht eindeutig auswertbar. Die Vorgeschichte des Bodens und der aktuelle Bewässerungs- oder Entwässerungszustand müssen bekannt sein. Tensiometer werden dennoch als Referenz-Messgeräte beigezogen.

Radiometrische Verfahren (*Bohleber, 20, Kramer et al., 112, Williams, 229*) erfordern die Sicherheitsvorkehrungen nach dem Strahlenschutzgesetz. Das Messprinzip der Neutronensonde beruht darauf, dass aus der Anzahl Neutronen, die durch die im Boden befindlichen H-Kerne rückgestreut werden, auf den Wassergehalt des Bodens geschlossen werden kann. Dazu ist eine sorgfältige Kalibrierung ex-situ erforderlich, um Störgrößen, wie H-Kerne von Kristallwasser oder das Vorhandensein von Elementen mit hohem Neutroneneinfangquerschnitt (Li, Mn, Cl und Fe) richtig werten zu können. Das Messvolumen hat Kugelform ohne scharfe äußere Grenze, d.h. bei horizontal geschichteten Böden oder Schichten geringer Mächtigkeit wird das Messergebnis an den Schichtgrenzen verfälscht. Die Gammasonde besteht aus einem γ -Strahler und einem Detektor (Szintillator oder Zählrohr), der durch eine Bleischicht vom Strahler abgeschirmt ist. Nur die ausgesandten Strahlen werden registriert, die im Boden gestreut und abgebremst werden. Mittels einer Kalibrierfunktion erhält man aus der Zählrate einen Wert für die aktuelle Dichte des Bodens. Mit der bekannten Trockendichte des Bodenmaterials lässt sich daraus auch der volumetrische Wassergehalt bestimmen.

Die **elektrischen Verfahren** (*Biberstein, 18, Hayes et al., 82, Mualem, 141*) nutzen den Einfluss des Wassergehaltes auf die elektrische Leitfähigkeit (σ) des Bodens. Über den gemessenen Potenzialabfall an einem stromdurchflossenen Boden und die Messgeometrie lässt sich der scheinbare spezifische Widerstand (ρ_s) des Bodens bestimmen. Die elektrische Leitfähigkeit (σ) als Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes (ρ) lässt sich aus ρ_s bestimmen. Um damit auf die Bodenfeuchte schließen zu können, sind zusätzlich bodenspezifische Kalibrierfunktionen erforder-

lich. Das Verfahren ist nur für eine grobe Abschätzung des Wassergehaltes des Bodens geeignet.

Als weiteres Verfahren wird die Detektion von Feuchtefronten durch **faseroptische Ortung** mittels Heat-Pulse-Methode (Patent DE 198.25.500, *Dornstädter, 48a*) beschrieben. Ein industriell gefertigtes Glasfaserhybridkabel wird in dem Medium verlegt. Das Kabel verfügt neben den Lichtwellenleitern auch über elektrische Leiter. Der elektrische Leiter dient als Heizung. Der Wärmetransport vom Kabel in das umgebende Material hängt von dessen konduktiver Wärmeleitfähigkeit ab. Wird das Glasfaserhybridkabel von einem Fluid umströmt, so wird an dieser Stelle deutlich mehr Wärme abtransportiert. Aus dem sich zeitlich ändernden Temperaturverlauf entlang des Kabels kann dieser Bereich geortet werden, und die Fließgeschwindigkeit kann abgeschätzt werden (bei ausreichender Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Medium vorausgesetzt). Ist keine ausreichende Temperaturdifferenz vorhanden, wie bei der Aufsättigung des umgebenden Mediums, so kann dieser Vorgang über die Änderung der konduktiven Wärmeleitfähigkeit (Mediumeigenschaft) beschrieben werden. Das Verfahren ist geeignet, wenn relevante Wassermengen fließen, etwa zur Ortung von Fehlstellen und Leckagen.

Die Möglichkeit der Messung des Wassergehaltes über die Dielektrizitätszahl (**elektromagnetisches Verfahren**) beruht auf dem funktionalen Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätszahl (DZ, auch Dielektrizitätskonstante $DK = \epsilon$ genannt) des Bodens und seinem volumetrischen Wassergehalt (θ_{Vol}). Dabei wird ausgenutzt, dass die DZ von Wasser (bei 20° C) bei etwa 80 liegt, während Bodenmaterial eine DZ von ca. 3 bis 6 und Luft eine DZ von ca. 1 aufweist. Der Dipolcharakter des Wassers und seine Affinität zur Clusterbildung (gerichtete Anordnung der Moleküle in Gruppen) sind für die hohe DZ von Wasser verantwortlich. Die DZ von Gemischen wird also von der DZ von Wasser dominiert. Die Laufzeit eines Impulses durch einen Leiter ist von der DZ des umgebenden Mediums abhängig. Mittels Kalibrierung lässt sich diese gemessene Impulslaufzeit eindeutig in den Wassergehalt des Gemisches umrechnen. Die Ergebnisse sind reproduzierbar. Eine Online-Messung ist möglich. Das Verfahren ist preisgünstig und durch marktgängige Auswerterroutinen ohne spezielles Fachwissen anwendbar. Da die Sensoren im Medium eingebettet sind, ist der Einbau während der Bauphase notwendig. Ein nachträglicher Einbau z.B. in Oberflächenabdichtungen von Deponien ist wirtschaftlich nicht darstellbar.

Die **sonstigen indirekten Verfahren** (*Rasmussen, 163*), wie z.B.

- hygroskopische Methode (Wägung von Gipsblöcken und Ermittlung der Wasseraufnahme),
- Tauchwägung (Wägung unter Wasser bei Kenntnis der Korndichte, DIN 18121, Teil 2),
- Wärmeleitfähigkeits- und Kapazitätsmethode (Messung der Dauer der Erwärmung und Abkühlung einer mit dem Boden in Kontakt stehenden Sonde),
- Kernspinresonanzmethode (Ermittlung der Protonendichte aus Wechselwirkungseffekten mit hochfrequenten Magnetfeldern),
- optische Verfahren (Ausbreitungseigenschaften von hydrogelbeschichteten fiber-optischen Sensoren)

werden hier nicht vertieft behandelt, da sie für die Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung keine Bedeutung haben.

3.1.3. Verfahrenswahl

Bei der Diskussion der Verfahren werden nur die Verfahren berücksichtigt, die Stand der Technik sind und deren Einsatz zur Lösung der vorliegenden Fragestellung relevant ist.

Das **gravimetrische Verfahren** (direktes Verfahren) ist wie oben beschrieben als Referenzmethode einzusetzen. Für eine kontinuierliche und flächendeckende Überwachung z.B. einer Deponieoberfläche ist der Aufwand wirtschaftlich nicht vertretbar. Zudem wird durch jede Probennahme das zu überwachende Medium gestört. Eine Automatisierung ist nicht möglich. Die Messgenauigkeit ist mit $\pm 0,1$ Gew.-% zwar sehr gut, zur Umrechnung der Messwerte in Vol.-% ist aber die Kenntnis der trockenen Dichte des Bodens (ρ_d) erforderlich. Da diese auch bei sorgfältiger Probenahme nur mit einer Genauigkeit von $\pm 2,0-4,0$ % bestimmt werden kann, erhöht sich der gesamte Messfehler der gravimetrischen Methode entsprechend.

Der Einsatz von **Tensiometern** (indirektes Verfahren) bietet sich eigentlich für die vorliegende Aufgabenstellung an. Die Messgenauigkeit ist mit $\pm 1,0$ Vol.-% ausreichend. Jedoch treten bei der Transformation der mit Tensiometern gemessenen Wasserspannung (ψ) in den Wassergehalt (θ) oder in die hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) wegen der Hysterese große Unsicherheiten auf. Auch sind die Instandhaltung und die Kalibrierung der Tensiometer aufwändig. Eine flächendeckende Installation, bei der die gesetzlichen Randbedingungen berücksichtigt werden (Ortgenauigkeit von Leckagen und Verletzungen mineralischer Bauwerke), führt zu nicht darstellbaren Kosten. Dennoch sind Tensiometer für Punktaufnahmen und zur Schaffung von Referenzwerten geeignet.

Radiometrische Verfahren (indirekte Verfahren) haben eine ausreichende Genauigkeit ($\pm 1,0-2,0$ Vol.-%). Ihr Einsatz ist in geschichteten Böden problematisch, da die Tiefenauflösung durch das nicht klar begrenzte Messvolumen nicht ausreichend ist. Mit diesen Sonden sind nur Punktaufnahmen möglich (Tiefenprofile), für eine flächendeckende Überwachung sind viele Messstellen erforderlich, was die Wirtschaftlichkeit stark einschränkt. Eine automatische Erfassung wird nicht angeboten. Außerdem sei an die strahlenschutzrechtlichen Auflagen und die aufwändige Entsorgung erinnert.

Elektrische Verfahren (indirekte Verfahren) sind mit einer Genauigkeit von ± 5 Vol.-% nicht geeignet. Die Tiefenauflösung ist nicht möglich, weil entlang einer Messstrecke nur der integrale Wert ermittelt wird.

Das Verfahren der Detektion von Feuchtefronten durch **faseroptische Ortung** mittels Heat-Pulse-Methode ist nach Angabe des Herstellers ausreichend genau. Es ist sehr gut geeignet, Leckagen zu detektieren und zu orten. Bei Wasserbewegungen in mineralischen Dichtungselementen und den daraus resultierenden Änderungen des Materialwassergehaltes wird der Berechnungsweg über die konduktive Wärmeleitfähigkeit keine brauchbaren Ergebnisse liefern, da die Flüsse zu gering sind. Kleine Störungen (z.B. Inhomogenitäten entlang des Sensors) führen zu nicht eindeutigen Aussagen.

Elektromagnetische Verfahren (indirekte Verfahren) haben mit $\pm 1,0$ Vol.-% eine ausreichend gute Genauigkeit. Die Kabel sind beliebig eng und in mehreren Schichten übereinander verlegbar, d.h. sowohl in der Fläche als auch in der Tiefe erhält man eine gute Auflösung. Durch die Bestimmung des Wassergehaltes θ über die Dielektrizitätszahl kann man den Einfluss der Hysterese bei der Transformation zum k_f -Wert nahezu vernachlässigen. Die Kenntnis der flächigen Verteilung des Wassergehalts in tonmineralischen Dichtungen ist zur Erklärung von Schwind- und Schrumpfprozessen notwendig. Das Verfahren ist preiswert und es kann automatisch betrieben werden. Die Messergebnisse sind reproduzierbar.

Gewählt wird das elektromagnetische Verfahren. Neben einer ausreichenden Messgenauigkeit und der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bietet das Verfahren eine flächenhafte Auflösung, einen automatisierten Messablauf und ist günstig in den Kosten (Herstellung und Betrieb der Messeinrichtung) (*Mallants, 121*).

3.2. Beschreibung des gewählten Verfahrens

Das gewählte elektromagnetische Verfahren wird im Folgenden vertieft beschrieben und seine spezielle Anwendung zur Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung dargestellt.

3.2.1. Grundsätzliche Funktion

Fließt ein Strom (Wechselstrom) durch ein leitendes Medium, so erzeugt er ein magnetisches Feld, das wiederum den Stromfluss beeinflusst. Auch Nichtleiter werden von elektrischen Feldern beeinflusst. Wird in das bestehende elektrische Feld zwischen zwei Platten eines geladenen Kondensators ein apolarer Stoff gegeben, so wird die Kapazität C des Kondensators um das ϵ -fache gegenüber der des Vakuums (C_0) erhöht:

$$C = \epsilon \cdot C_0 \quad (3.2.1.)$$

Die Einwirkung eines elektrischen Feldes auf den Stoff bedingt die Auslenkung geladener Teilchen aus ihrer Gleichgewichtslage. Die zu untersuchenden Böden sind Nichtleiter im eigentlichen Sinne. Bei diesen verschieben sich die freien Ladungsträger nur soweit, bis die rüctreibende Kraft im Körper gleich ist der Kraft, die durch das elektrische Feld erzeugt wird. Dabei entstehen durch die entgegengesetzte Auslenkung positiver und negativer Teilchen elektrische Dipole, das Material wird elektrisch polarisiert. Überträgt man diesen Vorgang auf das Kondensatormodell, so bedeutet das, dass die Ladung an den Platten teilweise kompensiert wird. Damit wird die Feldstärke erniedrigt und die Kapazität in gleichem Maße erhöht. Die DZ ist also ein Maß für die Menge an elektrischer Energie, die gespeichert, absorbiert und durch das Material geleitet wird.

Dabei ist die genannte dielektrische Polarisation von grundlegender Bedeutung. Wasser besitzt permanente Dipolmomente, die über den Raum statistisch verteilt sind. Durch ein elektrisches Feld wird eine Orientierung der Dipole bewirkt (Orientierungspolarisation). Andere Arten der Polarisation, wie Ionenpolarisation und Verschiebungspolarisation spielen bei Messungen in Böden nur eine untergeordnete Rolle. Diese Polarisationsmechanismen sind frequenzabhängig (Dispersion). Das

bedeutet, dass die einzelnen Polarisationsarten je nach Frequenz einen unterschiedlichen Beitrag zur DZ liefern.

Bei der Orientierung der Dipole verrichtet das elektrische Feld Arbeit, es wird Energie zugeführt und im Bodenmaterial gespeichert. Durch die innere Reibung geht ein Teil der Energie als Wärme verloren. Die durch die Wechselfeldspannung verursachte Bewegung der Ladung erzeugt einen Stromfluss. Sie ist eine Funktion der Zeit. Dabei eilt der Ladestrom der Spannung um 90° voraus. Diese Phasenverschiebung ist eine Funktion der Kreisfrequenz ω . Zur Beschreibung der DZ im gesamten Frequenzbereich gilt:

$$\varepsilon = \varepsilon'(\omega) - \sqrt{-1} \cdot \varepsilon''(\omega) \quad (3.2.2.)$$

Dabei ist $\varepsilon'(\omega)$ der Realteil der komplexen DZ und beschreibt den Wassergehalt im Boden. Mit dem Imaginärteil $\varepsilon''(\omega)$ wird die elektrische Leitfähigkeit des Bodens bestimmt (Seher, 195). Die DZ wird z.B. mit der Zeit-Bereichs-Reflektometrie (englisch **T**ime **D**omain **R**eflektometrie, TDR-Verfahren) bestimmt (Dong Wang et al., 48, Neusch, 146, Ren et al., 165, Rook et al., 175, Stacheder, 200, White et al., 227). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c einer elektromagnetischen Welle ist eine Funktion der DZ:

$$\sqrt{\varepsilon'(\omega)} = \frac{c_0}{c} \quad (3.2.3.)$$

Daraus folgt, dass zur Berechnung der DZ nur die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle zu messen ist, da c_0 (Lichtgeschwindigkeit) eine Konstante ist. Ein Pulsgenerator (Cassel et al., 37, Starr et al., 204) sendet einen steilflankigen elektrischen Impuls aus, der sich entlang des Koaxialkabels ausbreitet (siehe Bild 3.2.1.). Ein Teil dieses Impulses wird am Wellenwiderstandssprung (Punkt 2) reflektiert. Der durchgehende Teil des Impulses läuft bis zum offenen Ende der Lecherleitung (siehe Bild 3.2.1., Punkt 3) und wird dort total reflektiert.

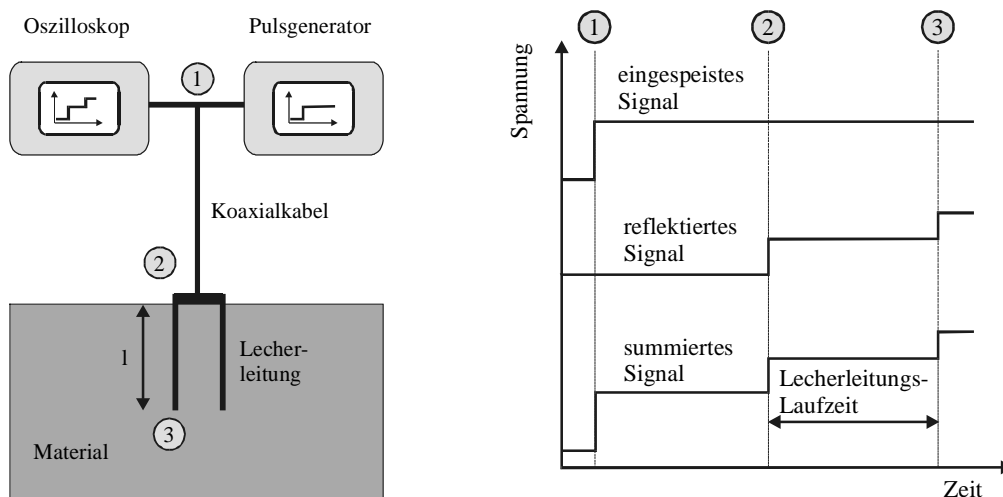


Bild 3.2.1.: elektromagnetische Messung

Ein Oszilloskop zeichnet die Summenspannungen der vor- und rücklaufenden Wellen auf dem Koaxialkabel auf (Punkt 1). Der Verlauf der Summenspannungen über der Zeit ist in Bild 3.2.1. idealisiert dargestellt. Aus dem Spannungsverlauf kann auf die DZ des um die Lecherleitung befindlichen Bodens geschlossen werden. Der Stand der Technik ist heute für das Messverfahren wie folgt definiert:

- Die DZ kann bei einem homogenen, verlustfreien und nichtdispersiven Medium direkt aus der Lecherleitungslaufzeit bestimmt werden (Reece, 164). Wählt man die Anstiegszeit des Impulses und die Länge der Leitung so, dass die maßgebenden Frequenzanteile in dem wenig dispersiven und verlustarmen Bereich zwischen 200 MHz und 1 GHz liegen, so ist das Verfahren zur Bestimmung der Bodenfeuchte geeignet.
- Bei nicht homogenem Boden oder deutlich differierendem Wassergehalt entlang der Lecherleitung funktioniert das Verfahren nicht. Stand der derzeitigen Entwicklung ist es, mit einem Berechnungsalgorithmus ortsabhängig die dielektrischen Eigenschaften aus Reflexionsmessungen zu rekonstruieren (Schläger, 187 und 187a).

Das folgende Bild 3.2.2. zeigt die graphische Oberfläche des Steuerprogramms. Beispielhaft wird hier die Messung an einer als Gabel ausgebildeten Lecherleitung dargestellt (Hübner, 97 und 98).

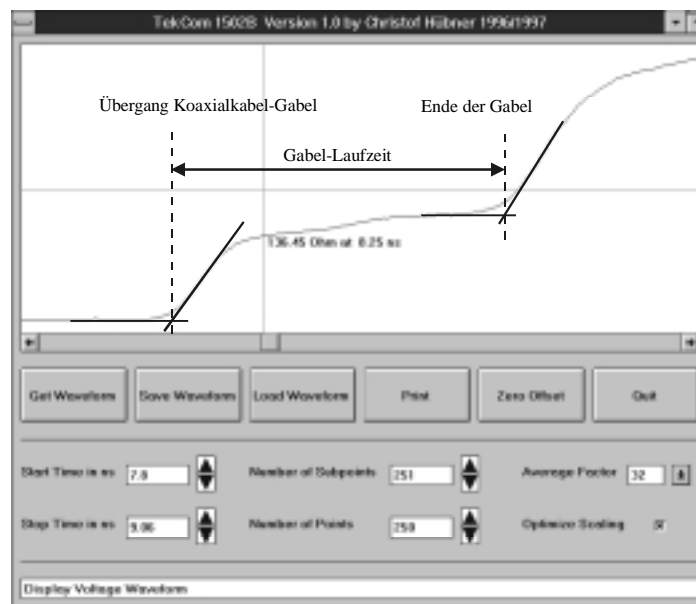


Bild 3.2.2.: graphische Oberfläche des Steuerprogramms (Hübner, 97)

Konventionelle TDR-Messgeräte haben Gabellängen (entspricht der Länge der Lecherleitung) von 5 bis 50 cm. Damit sind nur Punktaufnahmen oder Messungen im Labormaßstab möglich. Bei der Kontrolle von Deponieoberflächenabdichtungen (Kosciankowski, 110, Schwarzmüller, 192 mit einer Kryosonde) ist man jedoch wie bei zahlreichen anderen Anwendungen an der Kenntnis einer großflächigen Verteilung der Bodenfeuchte oder ihrem Mittelwert interessiert. Auch ist eine kontinuierliche Feuchteüberwachung von Flächen mit herkömmlichen TDR-Sensoren nur mit unverhältnismäßig hohem gerätetechnischem und finanziellem Aufwand möglich.

3.2.2. TAUPE-Verfahren

Zur Lösung dieser Problemstellung (Brandelik, 23 bis 26) wird ein patentiertes Verfahren (TAUPE-System, „Taupe“, aus dem Lateinischen, bedeutet Maulwurf) eingesetzt, das aus einem Flachband-Kabelsensor (Bild 3.2.3.) und einer Auswerteeinheit (Bild 3.2.4.) besteht. Der Kabelsensor besteht aus Lecherleitungen (entspricht

der Gabel des TDR-Sensors), die mit Kunststoff isoliert sind. Die Kabelsensoren werden in dem zu untersuchenden Material verlegt und mit hochfrequenten Pulsen angeregt. In Abhängigkeit des Wassergehalts des umgebenden Bodens kommt es zu einer Veränderung der Ausbreitungseigenschaften der auf der Leitung laufenden elektromagnetischen Wellen. Aus der Messung dieser Änderung wird auf die dielektrischen Eigenschaften des umgebenden Mediums geschlossen. Die Ergebnisse sind je nach messtechnischem Aufwand integrale Feuchtwerte entlang des gesamten Kabelsensors oder auch Feuchteverteilungen. Dabei muss die DZ über eine Kalibrierung (*Mallants et al., 120, Yu et al., 236*) mit der Bodenfeuchte gekoppelt werden. Bei der Anpassung der Kabelsensoren an die Aufgabenstellung ist neben den bodenspezifischen Aspekten das gewünschte Messvolumen zu berücksichtigen.



Bild 3.2.3.: Flachbandsensor

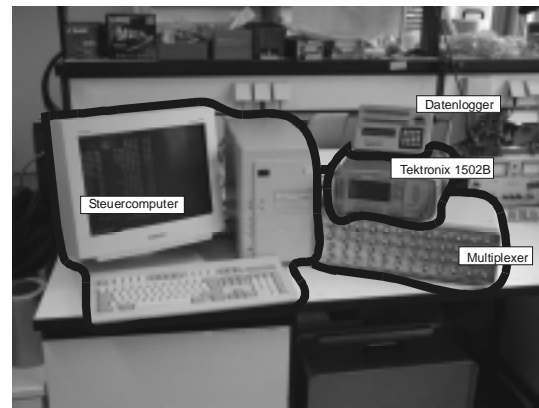


Bild 3.2.4.: Mess- und Steuereinheit

Der Flachbandsensor (auch Kabelsensor oder Sensorkabel genannt) wurde am Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) der Universität Karlsruhe entwickelt. Setzt man klassische TDR-Messgabeln ein, so wird bei den hier gebräuchlichen, verlustbehafteten Materialien (Bodenmaterial, siehe auch *Tomer et al., 209*) der Impuls gedämpft. Um Leitungslängen über einen Meter hinaus einsetzen zu können, muss der Dämpfung des Impulses (*Halm et al., 77*), wofür der Wassergehalt im Boden und die Leitfähigkeit des Bodenwassers verantwortlich sind, entgegengewirkt werden. Das erfolgt mit einer Kunststoffbeschichtung. Die Leitungsdämpfung wird damit reduziert. Leitungslängen von mehr als 30 Metern in sandigem Material sind somit möglich. Die Beschichtung hat aber Auswirkung auf die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen längs des Flachbandsensors. Bei der Auswertung der Messungen sind die Einflüsse der Isolierung zu berücksichtigen. Die Sensoren sind biegsam. Sie können beim Bau, etwa bei Deponieoberflächenabdichtungen, parallel mit dem Baufortschritt in die zu überwachende Schicht eingelegt werden. Die Sensoren werden im weiteren Aufbau sehr gut vom Material umschlossen. Störungen, wie beim nachträglichen Einbringen von TDR-Stäben, werden vermieden. Die Sensoren sind auch unempfindlich gegen die im Deponiebau auftretenden Setzungen.

3.2.3. Auswertung der Messsignale

Zur Berechnung der Bodenfeuchte wird ein TDR-Sensor so installiert, dass der umgebende Boden das dielektrische Material entlang der Transmissionsstrecke bildet. Bestimmt wird dann die „dielectric permittivity“ K des Bodens:

$$K = [(c_0 \cdot \Delta t_s) / (2L)]^2 \quad (\text{Gl. 3.2.1.})$$

mit: c_0 Lichtgeschwindigkeit ($\sim 3,0 \times 10^8$ m/sec)
 Δt_s Laufzeit des TDR-Impulses im Boden (10^{-9} sec, entspr. ns)
 L Länge des Sensors im Boden (m)

Nach der empirischen Gleichung von Topp (1980) kann daraus der volumetrische Bodenwassergehalt (siehe auch *Drnevich et al., 50*) wie folgt bestimmt werden:

$$\Theta = (-530 + 292K - 5,5K^2 + 0,043K^3) / 10^4 \quad (\text{Gl. 3.2.2.})$$

Zur Messung werden Kabeltester (hier TEKTRONIX 1502B, siehe Bild 3.2.4.) verwendet mit den entsprechenden Schnittstellen zu einem PC, der die Steuerung der Impulssignale und die Aufzeichnung der reflektierten Signale übernimmt (*Cassel et al., 237*). Um mehrere Sensoren gleichzeitig ansteuern zu können, wird ein Multiplexer erforderlich, hier im Bild 3.2.5. mit 36 Ausgängen (das hier verwendete Gerät hat 47 Ausgänge). Ein steilflankiger Impuls wird vom Kabeltester ausgesendet, an den oben beschriebenen Stellen (Übergang des Koaxialkabels in das Sensorkabel und Ende des Sensorkabels) reflektiert und aufgezeichnet. Eine charakteristische Reflexionskurve ist in Bild 3.2.6. dargestellt. Zur Auswertung ist die

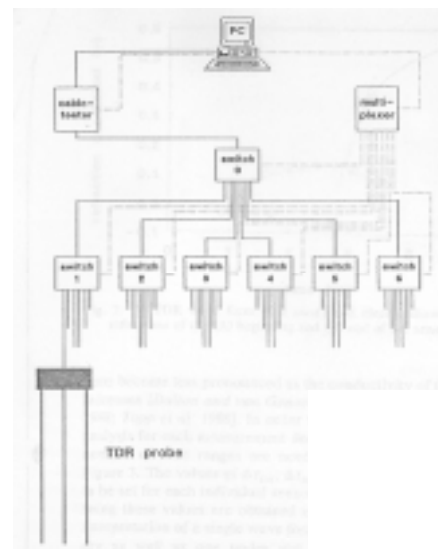


Bild 3.2.5. Messanordnung

charakteristische Reflexionskurve ist in Bild 3.2.6. dargestellt. Zur Auswertung ist die

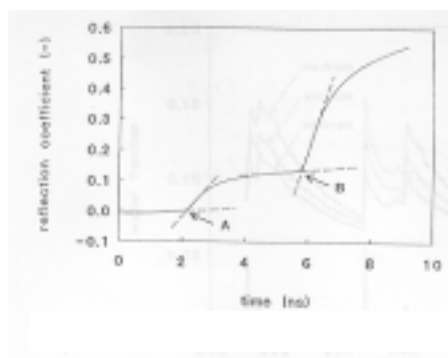


Bild 3.2.6.: Charakteristischer Impulsverlauf

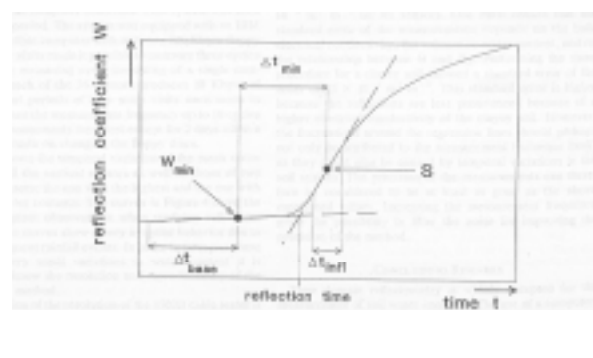


Bild 3.2.7.: Ermittlung der Impulslaufzeit

Analyse der Wellenform notwendig. Je nach Gestaltung des Sensorkabels hat die Kurve einen unterschiedlichen Verlauf, hier z.B. mit einem offenen Ende (die Spannung steigt auf unendlich an). Bestimmt werden soll daraus die Sensorlaufzeit Δt_s . Dazu ist die Kenntnis der Lage der beiden Punkte A (Anfangs-) und B (Endpunkt der Impulskurve) erforderlich (Bild 3.2.6.). Die Umgebung der Punkte A bzw. B wird

vergrößert dargestellt (Bild 3.2.7., schematisch). Um die Punkte auffinden zu können, wird die Impulskurve über 251 Einzelwerte (die Anzahl hat sich über die Gerätecharakteristik als vorteilhaft ergeben) aufgenommen (Werte W). In jedem Punkt W wird die Steigung der Kurve ermittelt (erste Ableitung). Bei starken Änderungen der Steigung bei benachbarten Werten (Punkt W_{\min}) werden die Tangenten (besser Regressionsgeraden an einen bestimmten Kurvenbereich) an die Kurve (Punkte W_{\min} und S , auch Wendepunkt der Impulskurve) berechnet, und der Schnittpunkt der Tangenten (oder Regressionsgeraden) als Lage des gesuchten Anfangs- oder Endpunktes der Impulskurve wird bestimmt. Bei der Entwicklung eines entsprechenden Auswertalgorithmus' wurden die spezifischen Besonderheiten, beispielsweise die Überlagerung der Impulskurve mit Rauschen, berücksichtigt.

Als Ergebnis erhält man einen Wert der Impulslaufzeit, der mit Gleichung 3.2.1. und 3.2.2. in den volumetrischen Wassergehalt umgerechnet werden kann. Misst man über einen längeren Zeitraum (hier beispielsweise drei Monate), so erhält man die nebenstehende Wassergehaltsganglinie.

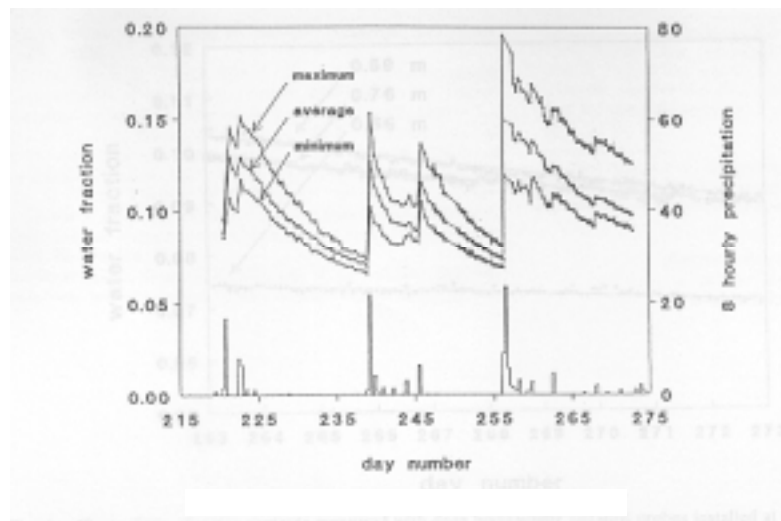


Bild 3.2.8.: Wassergehaltsganglinie (Beispiel)

Die Fehlerempfindlichkeit der Messeinrichtung muss natürlich noch abgeschätzt werden. Bei Verwendung eines TEKTRONIX 1502B Kabeltesters kann davon ausgegangen werden, dass die Fehlergröße, verursacht durch den Kabeltester, um eine Zehnerpotenz geringer ist als die, die durch die Veränderung im Sensorumfeld verursacht wird. Zu beachten ist, dass bei kurzen Sensoren die Fehler, die durch den Kabeltester verursacht werden, größeren Einfluss bekommen. Quantifiziert man den Fehler, so erhält man eine Größenordnung von 0,05 Vol.-% bei Sand bis zu 0,25 Vol.-% bei Lehm (abhängig von der hier höheren elektrischen Leitfähigkeit). Auf die Auswertung bei der vorliegenden Problemstellung wird später noch vertieft eingegangen.

4. Bodenmodell

Analytische Modelle haben die Aufgabe, komplexe Sachverhalte (z.B. die Wasserbewegung im Boden) in definierte Einzelvorgänge aufzuspalten und die Sachverhalte beschreibbar zu machen. Dabei ist zu beachten, dass die Größenordnungen (Skalen) der Einzelvorgänge richtig abgebildet werden. Im vorliegenden Fall sind die Verknüpfungen von der Mikroskala (bodenphysikalische Parameter) und Makroskala (Messdaten) wesentlich. Diese Verknüpfung wird nach der abschließenden Definition der Parameter erläutert werden.

Im folgenden soll dargestellt werden, unter welchen Randbedingungen es möglich ist, den Durchfluss durch eine Bodenschicht allein aus der Messung ihres Wassergehaltes zu bestimmen. Die Möglichkeit, vom gemessenen Bodenwassergehalt direkt auf den Durchfluss zu schließen, ist nur dann gegeben, wenn durch definierte Randbedingungen die Anzahl der unbekanntes Größen verringert werden kann.

4.1. Modell mit Einflussgrößen

Die Bewegung von Wasser in der ungesättigten Bodenzone ist analytisch durch die Beziehung von Darcy/Buckingham (Gl. 2.2.2.) und die Gleichung von Richards (Gl. 2.2.4.) beschrieben. U.a. werden in beiden Beziehungen die Parameter auf drei Koordinatenrichtungen bezogen. Bei der Rechnung vom Ausgangsquerschnitt zu dem darunter liegenden Querschnitt wird die Anzahl der zusätzlichen Unbekannten jeweils größer sein, als die Anzahl der zusätzlichen Erkenntnisse. Daher sind Vereinfachungen durch die Definition von Randbedingungen erforderlich.

- Es werden nur vertikal-ebene Beziehungen betrachtet, d.h. die Komponenten der y-Richtung fallen weg. Das ist zulässig, da im vorliegenden Fall die Fläche in Streifen der Einheitsbreite $B = 1$ unterteilt wird. Die Anisotropie des Bodenmaterials in y-Richtung wird als vernachlässigbarer Parameter (kein geometrisches oder hydraulisches Gefälle in y-Richtung) angenommen (**geometrische Vereinfachung**).
- Findet an der Schichtgrenze kein Aufstau statt (keine Ausbildung einer Kapillarsperre), so kann für $\theta < 0,9 \times \theta_s$ (Wert der Wassersättigung im Boden bei Wiederbewässerung) auch die Komponente in x-Richtung vernachlässigt werden, es findet **kein lateraler Abfluss** statt.

Somit bleiben nur die zur Bildebene parallelen Komponenten der Wasserbewegung erhalten, d.h. die Bewegung in z-Richtung ist ungleich Null. Im folgenden Bild 4.1.1. sind die möglichen Beiträge der Wasserbewegung im Boden (hier in einem gegliederten Bodenquerschnitt) dargestellt. Es bedeuten:

- Z_i **Zufluss** zur jeweiligen Schicht aus der darüber liegenden Schicht
- S_i **Speicherung** in der jeweiligen Schicht
- A_i **Aufstieg** aus der jeweiligen Schicht in die darüber liegende Schicht

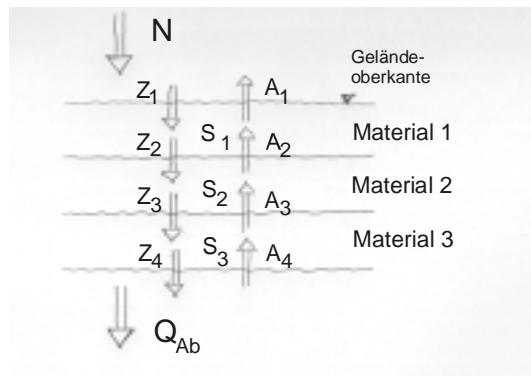


Bild 4.1.1.: Definition der Variablen

Es wird folgendes Gleichungssystem aufgestellt:

$$(1) \quad Z_1 - A_1 - Z_2 + A_2 - S_1 = 0$$

$$(2) \quad Z_2 - A_2 - Z_3 + A_3 - S_2 = 0$$

$$(3) \quad Z_3 - A_3 - Z_4 + A_4 - S_3 = 0$$

$$(1) + (2) \quad Z_1 - A_1 - Z_3 + A_3 - S_1 - S_2 = 0$$

$$(2) + (3) \quad Z_2 - A_2 - Z_4 + A_4 - S_2 - S_3 = 0$$

Bekannt sind die Bodenparameter θ_s (Sättigungswassergehalt) und θ_r (Residualwassergehalt), ebenso sind die Bodencharakteristika ψ - θ (pF-WG-Kurve), k_f - θ und k_f - ψ bekannt. Die geometrischen Werte (z.B. Schichtdicke (d) und Gefälle (J)) sind bestimmt, ebenso beeinflussende Parameter wie die Temperatur. Gemessen wird der aktuelle Wassergehalt θ . Die Bewegung des Wassers wird mit folgenden Gleichungen beschrieben (s.o., die Komponenten in x- und y-Richtung sind = 0):

Darcy/Buckingham:
$$v_z = -k_{fz}(\theta) * \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (4.1.1.)$$

Richards:
$$\frac{\partial \psi}{\partial t} * C + S = \frac{\partial}{\partial z} * \left(k_{fz}(\theta) * \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (4.1.2.)$$

Darin sind die Beziehungen ψ - θ (der Wassergehalt ist nur indirekt über die Saugspannung enthalten, die Beziehung weist eine starke Hysterese auf) und k_f - θ (eine Beziehung, die nach der Literatur nur eine geringe Hysterese aufweist) enthalten. Mit der Richards-Gleichung ist das Gleichungssystem nicht geschlossen lösbar. Es werden folgende weitere Randbedingungen vereinbart:

- Der Luftraum über der Schicht 1 ist gegen die Atmosphäre isoliert. Die Luftfeuchtigkeit im Luftraum liegt bei 100%, eine Verdunstung aus der Schicht ist somit ausgeschlossen. Das ergibt die **obere** Randbedingung: $A_1 \cong 0$ (das gleiche gilt für den Fall ohne Isolation bei Regen).
- Der Untergrund ist wasserundurchlässig (Abdichtung mit einer Folie). Das in der untersten Schicht anfallende Wasser wird über einen definierten Ablauf vollständig abgeführt ($Z_4 = Q_{Ab}$). Ist die Folie unbeschädigt, so gilt die **untere** Randbedingung: $A_4 \cong 0$.

- o Weiter gilt für die Schicht 3, dass ihre hydraulische Leitfähigkeit bei Residualsättigung größer ist als die hydraulische Leitfähigkeit der darüber liegenden Schicht 2 bei Sättigung

$$(k_f(\theta_r)_{\text{Schicht 3}} > k_f(\theta_s)_{\text{Schicht 2}}). \quad (4.1.3.)$$

Der Zufluss Z_3 kann somit ohne messbare Erhöhung des Wassergehaltes ($W_3 = \theta_{\text{res}}$) in der Schicht 3 abgeführt werden. Außerdem wird ein Einstau in der Schicht 3 verhindert (der Ablauf ist funktionsfähig). Dann gilt: $S_3 \equiv 0$ (**bodenmechanische** Randbedingung).

- o Als weitere **bodenmechanische** Randbedingung gilt: es ist kein kapillarer Aufstieg aus der Schicht 3 in die darüber liegende Schicht 2 möglich, $A_3 \equiv 0$. Das ist dann gewährleistet, wenn die kapillare Aufstiegshöhe in der Schicht 3 geringer ist als ihre Schichtdicke (z.B. bei Kies oder Kiessand).

Zusammengefasst gilt aus den Randbedingungen:

$$A_1 = A_3 = A_4 = S_3 = 0 \quad (4.1.4.)$$

Das Modell in Bild 4.1.1. kann mit diesen Randbedingungen wie folgt vereinfacht werden: (W_i bezeichnet den Wassergehalt der jeweiligen Bodenschicht)

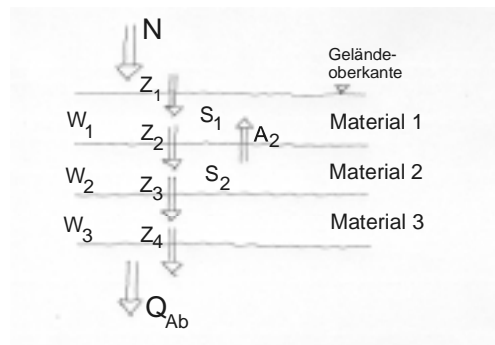


Bild 4.1.2.: Vereinfachungen aus den Randbedingungen

Somit wird das Gleichungssystem vereinfacht zu:

$$(1) \quad Z_1 - 0 - Z_2 + A_2 - S_1 = 0$$

$$(2) \quad Z_2 - A_2 - Z_3 + 0 - S_2 = 0$$

$$(3) \quad Z_3 - 0 - Z_4 + 0 - 0 = 0$$

$$(1) + (2) \quad Z_1 - Z_3 - S_1 - S_2 = 0 \quad (I)$$

$$(2) + (3) \quad Z_2 - A_2 - Z_4 - S_2 = 0 \quad (II)$$

$$(1) + (2) + (3) \quad Z_1 - Z_4 - S_1 - S_2 = 0 \quad (III)$$

Gemessen werden die Wassergehalte W_1, W_2, W_3 (Bild 4.1.2.), wobei W_3 i.d.R. dem Residualwassergehalt der Schicht 3 entspricht (s.o.) und W_1 und W_2 bei Wasserfluss größer als die Residualsättigung der jeweiligen Schicht sind.

Dazu wird angenommen, dass die Wassergehalte für die jeweiligen Schichten insgesamt repräsentativ sind (**Homogenität**). So sind die durch den Zufluss zur Schicht und den Abfluss aus der Schicht verursachten Änderungen des Wasser-

gehalten in der Änderung des Wassergehaltes der Bodenschicht (S_i) enthalten. Eine eindeutige Anfangsbedingung ist hilfreich, d.h. der Beginn der Beobachtung erfolgt bei Residualsättigung des Bodens oder parallel zur In-situ-Bestimmung der Wassergehalte zur Kalibrierung der Beobachtungen.

Die Grenzfläche auf dem Horizont über der Schicht 3 ist filtersicher zum darüber und darunter liegenden Material. Durch die Verhältnisse der hydraulischen Leitfähigkeiten der beiden unteren Schichten ist an der Schichtgrenze die Ausbildung eines Kapillarsaumes wahrscheinlich. Die Messung des Wassergehaltes in der Schicht 2 muss also in einer ausreichenden Höhe über der Schichtgrenze erfolgen, um repräsentative Ergebnisse für die Schicht zu erhalten.

Weiterhin gilt:

- Die Beziehung k_f - θ ist eindeutig, d.h. der Einfluss der Hysterese ist vernachlässigbar (siehe Abschnitt 2.5.).
- Betrachtet wird der senkrechte Durchfluss (z-Richtung) durch einen Kontrollquerschnitt. Das Material dieses Kontrollquerschnitts muss eine höhere hydraulische Leitfähigkeit besitzen als das zu kontrollierende Material. Damit kann aus der k_f - θ -Beziehung auch ein höherer k_f - θ -Wert gemessen werden, als das zu kontrollierende Material hat, was dann auf die zumindest partielle Zerstörung (Makroporen, Klüfte, Schrumpfrisse o.ä.) des Materials hindeutet. Dabei ist darauf zu achten, dass mit dem Kontrollmaterial auch der k_f -Wert des zu kontrollierenden Materials dargestellt werden kann (so ist dem gemessenen WG in Schicht 3 ($\approx \theta_r$) eine hydraulische Leitfähigkeit zuzuordnen, die den maximalen Durchfluss aus den oberen Schichten abbilden kann. D.h. der WG erhöht sich bei Zufluss von oben nur dann, wenn etwa durch Klüfte ein hydraulischer Kurzschluss entsteht. Sonst erhöht sich der WG nur bei einem Einstau in die Schicht).

Mit diesen Vereinfachungen ergibt sich der Durchfluss nach Richards (Gl. 4.1.2.) zu:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} * C + S = \frac{\partial \theta}{\partial t} + S = \frac{\partial}{\partial z} * \left(k_z(\theta) * \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (4.1.5.)$$

Multipliziert man beide Seiten mit dem Volumen (V), so erhält man auf der linken Seite im Bodenelement $\Delta Q = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} * V$ (S ist ein Quellen-/Senkenterm und wird hier = 0). Auf der rechten Seite erhält man mit der Potenzialänderung in Fließrichtung ($\frac{\partial \psi}{\partial z} = i$) und mit der durchströmten Fläche $F = \frac{V}{\Delta z}$: $Q_z = F * k_z(\theta) * i$. Es gilt also:

$$Q_z \text{ proportional zu } k_z(\theta) \quad (4.1.6.)$$

Das heißt, der Fluss in z-Richtung ist proportional zur hydraulischen Leitfähigkeit, die eine Funktion des Bodenwassergehalts ist (siehe auch Darcy/Buckingham, Gl. 2.2.2).

Für den Wassergehalt gilt:

$$\theta_{\text{residual}} < \theta_{\text{aktuell}} < \theta_{\text{sättigung}}$$

Verkleinert man nun den Skalenbereich des Modells, so sind die folgenden Fälle im Bodenelement zu unterscheiden. Der Fluss hat die Einheit m^2 , er ist bezogen auf die Tiefe des betrachteten Bodenelementes.

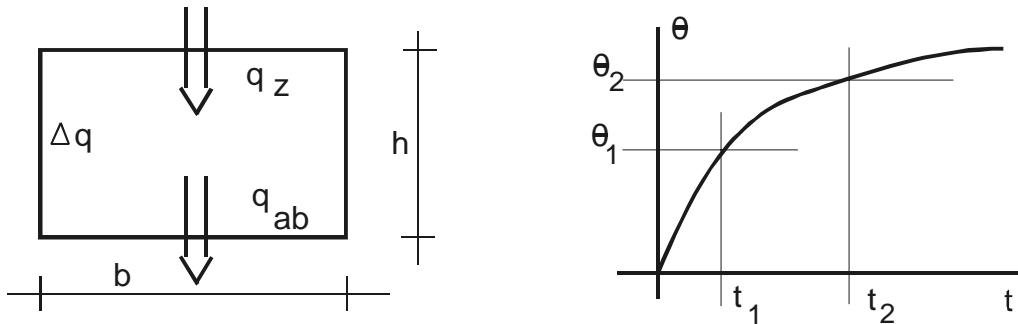


Bild 4.1.3.: Definition der Bezeichnungen am Bodenelement, q hat die Einheit $[m^3/sec * sec/m=m^2]$

Fall 1: $\theta_2 > \theta_1 > \theta_r$ oder $\theta_2 > \theta_1 = \theta_r$

In das Bodenelement fließt mehr Wasser zu, als über $q_{ab} = f(k_f(\theta_1))$ nach unten abgeführt werden kann. Dadurch steigt θ im Element an, damit die hydraulische Leitfähigkeit und damit auch das Potenzial. Über den Zeitraum $\Delta t = t_2 - t_1$ ergibt sich: $q_z = q_{ab} + \Delta q$ mit $q_{ab} \cong k_f(\theta_{2-1}) * b * \Delta t$ und $\Delta q = \Delta \theta * b * h$, wobei für kleine Zeiträume Δt für die Bestimmung der hydraulische Leitfähigkeit k_f mit (θ_{2-1}) näherungsweise der Mittelwert der Wassergehalte eingesetzt werden kann.

Fall 2: $\theta_2 = \theta_1 \neq \theta_r$

Bleibt über den Beobachtungszeitraum der Wassergehalt konstant, so wird im Bodenelement eine konstante Wassermenge gespeichert, es gilt: $\Delta q = 0$. Die Durchflussbilanz ist für $\theta_2 = \theta_1 > \theta_r$ eine Funktion von θ , d.h. $q_{ab} \cong k_f(\theta_{1=2}) * b * \Delta t = q_z$.

Fall 3: $\theta_2 = \theta_1 = \theta_r$

Herrscht zu Beginn und zum Ende des kleinen Beobachtungszeitraumes im Bodenelement der Residualwassergehalt, so findet gemäß Definition kein Fluss statt. Es gilt: $q_{zu} = q_{ab} = \Delta q = 0$.

Fall 4: $\theta_1 > \theta_2 > \theta_r$ oder $\theta_1 > \theta_2 = \theta_r$

Aus dem Bodenelement fließt mehr Wasser ab, der Wassergehalt nimmt über den Beobachtungszeitraum ab. Zur Wahrung der Kontinuität wird die Speicherung negativ. Der Abfluss wird durch $k_f(\theta_{2-1})$ bestimmt. Es gilt: $\Delta q = \Delta \theta * b * h$ und $q_{ab} \cong k_f(\theta_{2-1}) * b * \Delta t$ und $q_z = q_{ab} - \Delta q$.

Beispiel: Das Bodenmaterial wird trocken (θ_r) eingebaut. Die hydraulische Leitfähigkeit ist dabei so gering, dass der zu detektierende Durchfluss eine Erhöhung des Wassergehaltes bedingt (parallel zur Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit k_f), es liegt der Fall 1 vor.

$$(Q_{ab}) = F * [k_f(\theta) - k_f(\theta_r)] \quad (4.1.7.)$$

mit $k_f(\theta_r) \ll k_f(\theta)$ folgt daraus: $(Q_{ab}) = F * k_f(\theta)$

Betrachtet man die Gleichung (1) (siehe oben, Bezeichnungen in Bild 4.1.2.),

$$Z_1 - Z_2 + A_2 - S_1 = 0$$

so gilt: ist die Änderung der Wasserspeicherung S_1 kleiner als der Zufluss Z_1 , so ist A_2 in Z_2 enthalten und kann somit zu 0 gesetzt werden. Die Flüsse in der Schicht (Z_1 , Z_2) können wie oben gezeigt mit bodenhydraulischen Parametern berechnet werden. Daraus folgt:

$$Z_1 - F_1 * k_f(\theta_1) + 0 - V_1 * (\Delta\theta_1) = 0 \quad (4.1.8.)$$

$$Z_1 = F_1 * k_f(\theta_1) + V_1 * (\Delta\theta_1) \quad (4.1.9.)$$

Mit $\Delta\theta_1$ wird die Differenz des Bodenwassergehaltes zwischen den beiden Beobachtungszeitpunkten beschrieben. Weiterhin gilt, dass Z_2 in die darunter liegenden Schicht ohne Rückstau abgeführt wird. Die Parameter F_1 und V_1 sind aus der Geometrie bestimmte Parameter. Der Bodenwassergehalt wird gemessen und die hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des Bodenwassergehaltes bestimmt. Die Terme der Gleichung sind somit alle eindeutig bestimmbar.

Der gesetzliche Überwachungsparameter für die mineralische Abdichtung ist die hydraulische Leitfähigkeit. Diese ist aus dem gemessenen Bodenwassergehalt direkt bestimmbar (bei vernachlässigbarem Einfluss der Hysterese). Nach TASI ist die hydraulische Leitfähigkeit das Maß zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit der mineralischen Abdichtung. Wird der Genehmigungswert überschritten, so ist die mineralische Abdichtung zu reparieren. Ein Maß zur Beurteilung der Notwendigkeit von Maßnahmen (Sanierungen) ist aber nicht die hydraulische Leitfähigkeit, sondern der Durchfluss (*Gartung et al., 68*). Zu klären wird im Einzelfall (abhängig von der Abfallzusammensetzung, dem Abfallalter und den hydrogeologischen Randbedingungen) sein, welche Wassermenge gesamt und punktuell der Deponie zugemutet werden kann.

Auf der trockenen Seite ist auch der Wassergehalt der Bodenschicht ein wesentlicher Parameter zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit. Trocknet die mineralische Abdichtung soweit aus, dass ihre Schrumpfgrenze unterschritten wird, erhöhen die dabei auftretenden Risse die Durchlässigkeit der Schicht wesentlich, ohne die hydraulische Leitfähigkeit neben den Rissen messbar zu beeinflussen. Das Material im Überwachungsquerschnitt muss geeignet gewählt werden. Eine geringe Änderung des Wassergehalts kann z.B. bei Kies oder kiesigem Sand eine große Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit bewirken (flacher Verlauf der k_f - θ -Kurve). Es müssen der Gültigkeitsbereich und die Messgrenzen, abgestimmt auf die aktuelle Überwachungsaufgabe, festgelegt werden.

4.2. Abgleich der Modellbedingungen mit Abdichtungssystemen

Das Regierungs-Präsidium Karlsruhe hat mit seinem Erlass vom 07. Juni 2000 die Entsorgungsbetriebe und Abfallrechtsbehörden über mögliche Abdichtungssysteme für Oberflächenabdichtungen informiert. Grundlage waren die von einer ATA-ad-hoc-AG erarbeiteten Papiere, die die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) in ihrer

74. Sitzung am 08./09. Februar 2000 gebilligt hat. Insgesamt acht Systeme bzw. Materialvarianten sind verbindlich und werden im folgenden untersucht.

4.2.1. Vorstellung der Deponieoberflächenabdichtungssysteme (DOA)

a. Einsatz von Bentokies

Bentokies wird dann eingesetzt, wenn feinkörniges Material nicht oder nicht in einer wirtschaftlichen Entfernung zur Verfügung steht. Bentokies wird als mineralische Abdichtung gemäß Ziffer 10.4.1.4. TA-Si eingesetzt. Die mineralische Dichtung besteht dann aus anstehenden Sanden/Kiessanden/Kiesen, gemischt mit Tonmehlen. Das Gemisch ist verdichtungsfähig, der Einbau hat in mindestens zwei Lagen zu erfolgen, die Dicke ist größer als 30 cm zu wählen. Die Barriere ist schrumpfungsunempfindlich und bis zu einer Böschungsneigung von 1 : 1,6 stand-sicher baubar. Die Abdichtung erfüllt die Anforderungen an ein DOA für DK I und die an die mineralische Komponente der DK II. Gemäß TA-Si Ziffer 11.2.1. kann bei ihrem Einsatz bei Altdeponien auf eine KDB verzichtet werden.

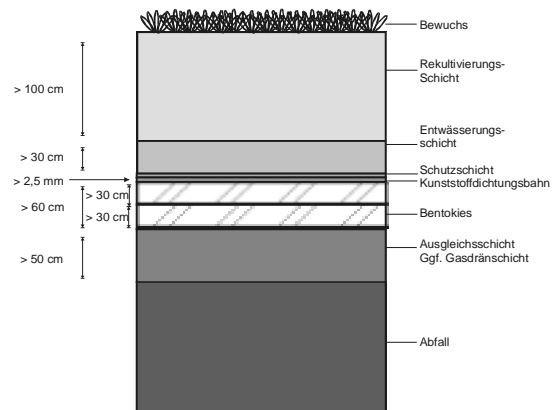


Bild 4.2.1.: Abdichtung mit Bentokies

b. Einsatz von Bentonitmatten

Bentonitmatten eignen sich für DOA und Oberflächenabdeckungen (OA). Sie ersetzt im Regelfall darin die mineralische Komponente. Einschränkungen der Dauerhaftigkeit liegen in der Umwandlung von Na- in Ca-Bentonit (die Durchlässigkeit steigt um eine Zehnerpotenz an, 55a), der Gefährdung durch Frost, Austrocknung und Durchwurzelung. Diesen Gefährdungen ist bautechnisch und konstruktiv (z.B. Erhöhung der überdeckenden Rekultivierungsschicht) vorzubeugen. Beim Altern der geotextilen Bestandteile der Bentonitmatte vermindert sich die Scherfestigkeit, es besteht dann die Gefahr des Abrutschens der Deponieböschung. Die Vorteile liegen darin, dass zum einen die Bentonitmatte Setzungen ohne Beeinträchtigung der Dichtungseigenschaften folgen kann, zum anderen durch ihre geringe Mächtigkeit Deponievolumen eingespart werden kann.

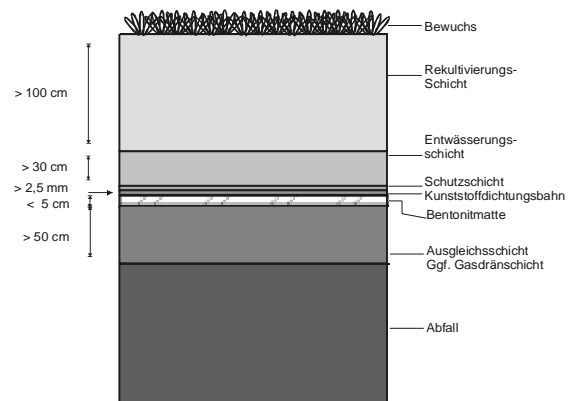


Bild 4.2.2.: Abdichtung mit Bentonitmatten

Zusätzlich eignen sich Bentonitmatten für die Abdichtung von Altdeponien (TA-Si Ziffer 11.2.1.h), wobei auf eine ausreichende Überdeckung zu achten ist. Sie ersetzt die mineralischen Bauelemente für DK I (TA-Si Ziffer 10.4.1.4.) und ist bei flachgeneigten Deponien der Klasse II mit geringem Gefährdungspotenzial einsetzbar. Vor allem eignen sich Bentonitmatten für temporäre OA.

c. Einsatz von wasserglasvergüteten Mineralgemischen (WMG)

Alkalisilikate, gewonnen in einem thermischen Prozess ($T > 1500^{\circ}\text{C}$) aus Quarzsand und Soda, werden als Gläser, Pulver und Lösungen angeboten. Bei deren Lösung in Wasser entstehen niedermolekulare Kieselsäuren, die gemischt mit der Matrix harte oder weiche Gele bilden. WMG zeichnen sich durch eine hohe Dichtigkeit und hohe Resistenz gegen den Angriff organischer und anorganischer Stoffe aus. Zunehmend werden mineralische Produktionsreste damit vergütet. Bei den bekannten Systemen wird die vergütete Schicht mit einem Geotextil bewehrt (Rissesicherheit) und mit einem Infiltrationsboden ($d = 5 \text{ cm}$) überdeckt. Sollten sich Risse bilden, werden Feinteile daraus eingeschlämmt und durch das Geotextil in der vergüteten Schicht zurückgehalten (System Kügler). Beim System DynagROUT wird ein schrumpffarmes Hydrosilikatgel gebildet. Eingesetzt werden WMG als mineralische Komponenten nach TA-Si. Für DK I und DK II ist jeweils eine Einzelfallgenehmigung nötig, ebenso für Altdeponien nach 11.2.1. TA-Si.

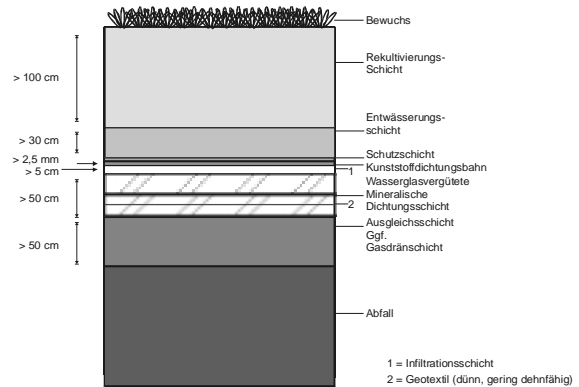


Bild 4.2.3.: Abdichtung mit WMG

d. Einsatz von Asphalt

Die Asphaltabdichtung (*Schwarz Müller, 193*) ist aufgebaut aus einer Tragschicht ($d > 8 \text{ cm}$, Hohlraumgehalt $< 5 \text{ Vol.-%}$) und zwei Dichtungsschichten (jeweils $d > 6 \text{ cm}$, Hohlraumgehalt $< 3 \text{ Vol.-%}$). Die Gesamtstärke liegt bei ca. 20 cm. Diese Dichtungen haben eine hohe Wasser- und Gasdichtigkeit, sind mechanisch hoch belastbar, ausreichend verformbar, sind nicht gefährdet vor Austrocknung und Durchwurzelung und sind sehr standsicher. Böschungen mit Neigungen von 1 : 2,5 und steiler sind möglich. Eingesetzt werden diese Dichtungen als Ersatz der mineralischen Abdichtungen (MA) (DK I, TA-Si 10.4.1.4.) und als Ersatz der Kunststoffdichtungsbahn (DK II) mit

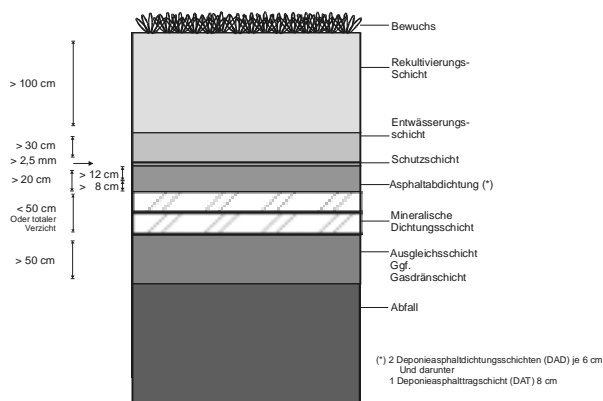


Bild 4.2.4.: Abdichtung mit Asphalt

reduzierter MA, fallweise sogar mit Verzicht auf die mineralisch Komponente. Das gleiche gilt für Altdeponien nach TA-Si 11.2.1.h.

e. Einsatz der Kapillarsperre

Kapillarsperren (Wohnlich, 100, 230, 231, Kämpf et al., 95, 105) bestehen aus einer Kapillarschicht (KS) aus Feinsand, die über einem Kapillarblock (KB) aus Kies hangparallel angeordnet ist. Die beiden Komponenten sind i.d.R. durch ein Geotextil getrennt. Bei Zutritt von Wasser wird der Wassergehalt in der KS größer als der in dem KB, sodass die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit in der KS wesentlich

Fall 1:

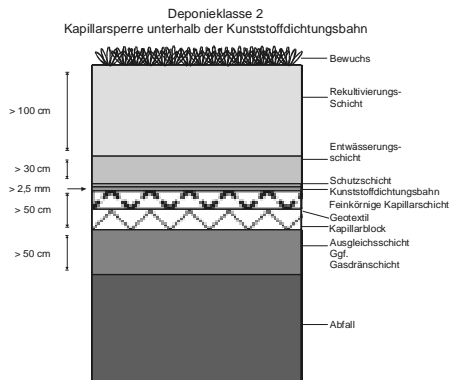


Bild 4.2.5.: Unten liegende Kapillarsperre

Fall 2:

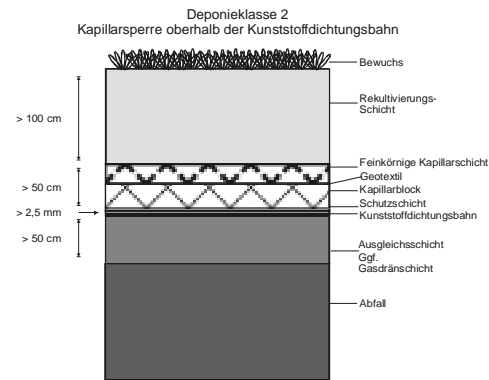


Bild 4.2.6.: Oben liegende Kapillarsperre

höher ist als im KB. Das bewirkt einen lateralen Abfluss in der KS (siehe Abschnitt 2.3.). Die Kapillarsperre ist in einer Neigung von 1 : 2,5 bis 1 : 7,0 einzubauen, mit einer zu einer Wasserhaushaltsschicht modifizierten Rekultivierungsschicht. Die Kapillarsperre dient als Ersatz der MA (DK II) unter (Fall 1) oder über (Fall 2) der KDB (Schwarz Müller, 194, Zischak, 242). Sie ist nicht gasdicht, die Setzungsunempfindlichkeit ist bisher noch nicht ausreichend nachgewiesen. Sie ist sicher gegen Austrocknung und Schrumpfen. Die Zulassung erfolgt nach der Prüfung des Einzelfalls. Sie kann bei DK I als DOA mit Wasserhaushaltsschicht dienen.

f. Einsatz der Kunststoffdichtungsbahn (KDB)

Gemäß den Grundsätzen der TA-Si (Multibarrierenprinzip) sind KDB als alleiniges Dichtungselement nicht ausreichend. KDB sind gegen punktförmige Belastungen zu

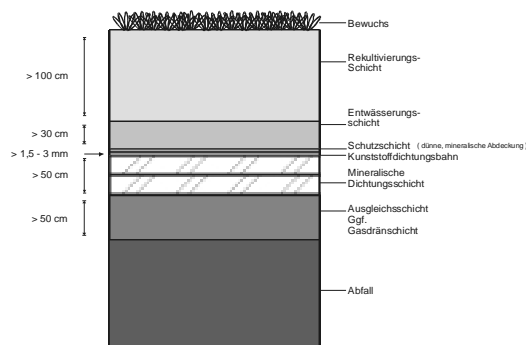


Bild 4.2.7.: Abdichtung mit Kunststoffdichtung

schützen. Bei richtiger Materialauswahl und Einbau behalten sie lange ihre Funktionsfähigkeit, sind jedoch nicht dauerhaft (eine Alterung kann bisher nicht ausgeschlossen werden). KDB sind kontrollierbar und reparierbar. Eingebaut werden sie in einer Dicke von 1,5 mm bis 3,0 mm. Auf Böschungen werden strukturierte Oberflächen eingesetzt. Die Böschungsneigung ist flacher als 1 : 3 auszubilden.

Eingesetzt werden KDB als temporäre OA (TA-Si Ziffer 11.2.1.h), als Ersatz für die DOA bei DK I und bei anderen Deponien mit geringem Gefährdungspotenzial. Der Aufbau des DOA für DK II entspricht dem Regelsystem nach TA-Si.

g. Einsatz von Geodräns

Geodräns (*Saathof, 182*) ersetzen den oberen Kiesflächenfilter des Regelsystems nach TA-Si. Ihre Aufgabe ist der Rückhalt von Feinteilen aus der darüber liegenden Rekultivierungsschicht und das Ableiten des ankommenden Niederschlagswassers. Geodräns werden in Matten oder Rollen verlegt, als Gitter oder Geokomposits aus PE oder PP. Sie müssen nachweislich eine ausreichende Ableitkapazität haben, filterstabil sein und resistent gegen Durchwurzelung, langzeitbeständig und den Anforderungen der Standortsicherheit der Böschung genügen. Eingesetzt werden sie bei temporären Abdeckungen nach TA-Si Ziffer 11.2.1.h, als Entwässerungsschicht bei DK I und II, und bei Altdeponien in Verbindung mit einem reduzierten Kiesfilter.

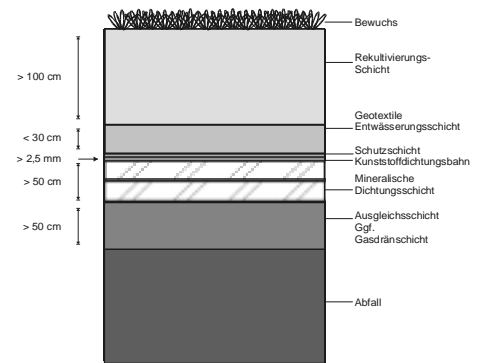


Bild 4.2.8.: Abdichtung mit Geodrän

h. Rekultivierungsschicht (RekS)

Die RekS hat entscheidende Bedeutung für der Langzeitsicherung der Deponien. Sie hat die Aufgabe, die Abdichtungs- und Entwässerungsschichten zu schützen. Anforderungen an sie sind in TA-Si Ziffer 10.4.1.4.d formuliert und werden dort weiter konkretisiert. Wichtig ist ihre Funktion als Wasserhaushaltsschicht. Dazu ist ein Aufbau aus geeigneten Böden notwendig, d.h. die bodenhydraulischen Eigenschaften sollen einen möglichst großen Ausgleich schaffen zwischen Niederschlag, Wasserspeicherung, Evaporation, Evapotranspiration und minimierter Sickerwasserabgabe. Die Standortvoraussetzungen sollen auf den Endzustand der Rekultivierung, das ist i.d.R. Wald, abgestimmt sein. Vorteilhaft sind lehmige, schluffige und tonige Sande sowie sandige Tone und Schluffe (nutzbare Feldkapazität > 200 mm). Die Schichtstärke sollte zwischen 1,50 und 3,00 m betragen, der obere Meter unverdichtet eingebaut werden ($\rho < 1,45 \text{ Mg/m}^3$). Darunter sollte eine wurzelhemmende Schicht eingelegt werden (Vlies oder verdichtete Bodenschicht, z.B. Sande oder steinigtes Material). Es erscheint möglich, bei einer optimal ausgebildeten RekS die Anforderungen an die darunter liegenden Dichtungsschichten abmindern zu können, und sogar im Einzelfall auf Dichtungselemente zu verzichten.

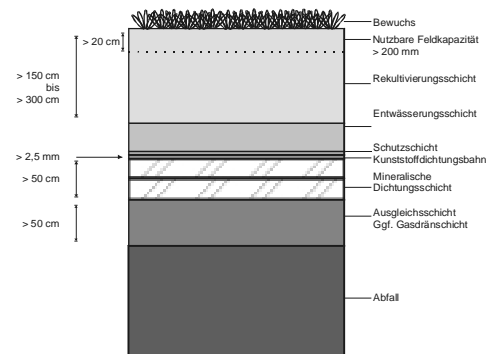


Bild 4.2.9.: Aufbau mit Rekultivierungsschicht

4.2.2. Mess- und Kontrollsystem der Bodenfeuchte

a. Lage des Mess- und Kontrollsystems

Aufgabe des Mess- und Kontrollsystems (MKS) ist es, frühzeitig Änderungen in der Dichtwirkung des DOA zu erkennen und potentielle Leckagestellen zu orten. Die Überwachungsgröße nach TA-Si ist aus historischen Gründen die hydraulische Durchlässigkeit (k_f -Wert) der dichtenden Schichten (der Durchfluss durch die dichtende Schicht wäre der bessere Parameter für die Beurteilung der Güte, der Funktionsfähigkeit und des Alterungszustandes). Es ist daher zweckmäßig, im Regelfall das gesamte Dichtungssystem zu überwachen (*Merkel, 130*), d.h. das MKS liegt unter dem DOA. Für das Regelsystem der TA-Si bedeutet das, dass das MKS in oder unter der MA liegt. Eine Überwachung der KDB separat erscheint nicht notwendig, da eine Leckage darin erst dann zu einem Handlungsbedarf führt, wenn sich der k_f -Wert der MA über den Regelwert der TA-Si erhöht. Die oben genannten acht Varianten bzw. Ausführungsmodifizierungen (a bis h) des Regelsystems der TA-Si können in folgende zwei Varianten aufgeteilt werden:

Variante I: Der Regelaufbau der TA-Si bleibt quasi unverändert (a, b, c, g)

Variante II: Veränderung des Regelaufbaus der TA-Si (d, e, f, h)

Das Regelsystem nach TA-Si und die zulässigen Modifikationen nach **Variante I** werden mit dem Mess- und Kontrollsystem in der MA (Regelsystem, a, g) oder unter der MA (Regelsystem, a, b, c, g) überwacht.

Die möglichen Systeme der **Variante II** werden wie folgt überwacht:

Für die Variante d bietet sich eine Überwachung unter der Asphalttschicht bzw. unter dem gesamten Dichtungssystem an. Eine Messung des Wassergehaltes in der Asphalttschicht ist nicht sinnvoll und auf Grund evtl. Inhomogenitäten der Schicht (Risse) auch nur eingeschränkt repräsentativ möglich.

Bei Variante e sind folgende zwei Möglichkeiten zu unterscheiden: ersetzt die Kapillarsperre im ersten Fall die MA (unter der KDB), so ist nur eine Messung des Wassergehaltes unter dem Dichtungssystem sinnvoll. Eine Messung z.B. in der KS wird auch für deponierelevante Abflüsse keine nennenswerte Erhöhung des KS-Wassergehaltes anzeigen. Im KB ist eine Messung nicht sinnvoll, da bei einem Durchbruch von Sickerwasser das verfügbare Porenvolumen so groß ist, dass die eindringende Wassermenge ebenfalls ohne relevante Erhöhung des Wassergehaltes abgeführt werden kann. Liegt im zweiten Fall die Kapillarsperre über der KDB, so ist das DOA-Überwachungssystem ein Kontrollsystem für eine KDB. Alle Schichten, die darüber liegen, sind für die Kontrolle der Abdichtung unerheblich.

KDB (Variante f) versagen durch punkt- oder linienförmige Fehlstellen oder Verletzungen. Daher sind KDB immer so zu kontrollieren, dass das MKS darunter angeordnet wird, gleich, ob mit dem Einsatz der KDB einzelne Dichtungselemente modifiziert werden oder ganz entfallen. Die Lage des MKS entspricht daher der Variante e, zweiter Fall.

Eine separate Überwachung der ReKS ist auf Grund der Inhomogenität, der Anisotropie, der Mehrmodalität und der immer zahlreich vorhandenen Makroporen

(Boden wird unverdichtet eingebaut, Tiergänge, Wurzelgänge o.ä.) nur eingeschränkt zu empfehlen. Das MKS sollte dann mindestens unter der Entwässerungsschicht, besser unter dem gesamten Dichtungspaket platziert werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass auch bei den Varianten der Klasse II nur die beiden Möglichkeiten der Klasse I sinnvoll sind. So wird das MKS bei den Varianten d, e, f und h unter der untersten Lage des Dichtungssystems platziert oder bei den Varianten d, f und h unter der speziell zu überwachenden Schicht. Es existieren zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

Möglichkeit 1:

Das MKS wird **unter dem Dichtungssystem** angeordnet. Dazu ist eine spezielle Kontrollschicht erforderlich, die in ihren bodenhydraulischen Eigenschaften auf die Größe der zu überwachenden Parameter abgestimmt ist (siehe auch Empfehlungen der BAM (9): Anordnung einer 15 cm mächtigen Schicht mit k_f -Wert $< 10^{-6}$ m/sec). Darin ist das MKS einzulegen.

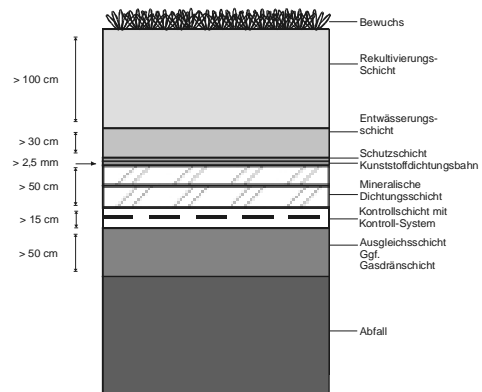


Bild 4.2.10.: Kontrolle unter der Dichtung

Möglichkeit 2:

Das MKS wird **in den unteren Bereich der zu überwachende Schicht** gelegt. Dann liegt es in einer mehr oder weniger stark verdichteten mineralischen Bodenschicht. Liegt das MKS in einer MA, so ist darauf zu achten, dass wegen der elektrischen Signalverluste entlang der Sensorkabel nur geringere Sensorlängen möglich werden können, d.h. das System etwas aufwändiger wird. Grundsätzlich gilt, dass die bodenhydraulischen Eigenschaften der Kontrollschicht die Größe der zu überwachenden Parameter entsprechen müssen. Eine zusätzliche Schicht ist in diesem Fall nicht erforderlich.

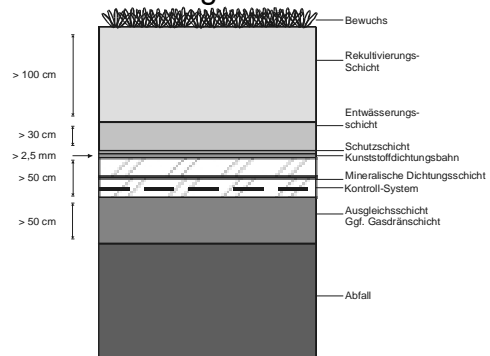


Bild 2.4.11.: Kontrolle in der Dichtung

Bei beiden Möglichkeiten (1 und 2) sind die Verbindungskabel der Bodenfeuchte-Sensoren an die Auswerteeinheit zu führen. Dazu ist das Abdichtungssystem punktuell vertikal zu durchdringen. Diese Stellen sind bautechnisch sorgfältig auszubilden, sodass sich entlang dieser vertikalen Leitungen keine präferentiellen Fließweg einstellen können.

b. Mögliche Messungen mit dem Kontrollsystem

Das MKS soll sowohl punktförmige als auch flächige Störungen detektieren. Da der Wassergehalt der umgebenden Bodenschicht ermittelt wird, werden punktförmige Störungen in ihrer flächigen Auswirkung erfasst.

Als Messkriterium reicht der Wassergehalt der zu überwachenden Schicht oder des Abdichtungssystems nicht aus. Die TA-Si fordert als maßgeblichen Überwachungsparameter die hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert). Dieser wird in der TA-Si als gesättigter k_f -Wert angegeben, meist in der Größenordnung von kleiner als 5×10^{-9} m/sec. Im ungesättigten Zustand wird der k_f -Wert sicher noch einige Zehnerpotenzen geringer liegen. Die Kontrollschicht muss also folgende Voraussetzungen erfüllen:

- o Das Material der Kontrollschicht muss für den Fall der Bewässerung und den Fall der Entwässerung eindeutig bodenhydraulisch beschreibbar sein. Optimal wäre, wenn die Effekte der Hysterese vernachlässigbar wären.
- o Zuflüsse aus der darüber liegenden Schicht oder dem darüber liegenden Dichtungssystem müssen zu einer deutlichen Änderung des Wassergehaltes der Kontrollschicht führen.
- o Den Überwachungsparametern (k_f -Werte) sind eindeutig Werte des Wassergehaltes (ermittelt in Vol.-%) zuzuordnen. Der Durchfluss durch die Kontrollschicht muss den Durchfluss durch das Abdichtungssystem abbilden.
- o In der Kontrollschicht sind die Überwachungsparameter der TA-Si für das jeweilige Abdichtungssystem quantitativ eindeutig zu definieren. Die Werte des MKS zeigen eindeutig den Zustand des Abdichtungssystems an.

Aus Gründen der Messtechnik (der Einflussbereich des elektromagnetischen Feldes um das Sensorkabel hat einen Durchmesser in Abhängigkeit von der Sensorbreite von im Regelfall ca. 10 cm) sollte die Überwachungsschicht eine Stärke von mindestens 15 cm besitzen. Geeignet erscheint ein sandiger Schluff mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von $\sim 10^{-6}$ m/sec. Der Abfall der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Bereich, der über eine messbare Änderung des Wassergehaltes beschreibbar ist, sollte mindestens vier bis fünf Zehnerpotenzen betragen. Der Messbereich liegt somit bei

$$10^{-10} \text{ m/sec bis } 10^{-6} \text{ m/sec.}$$

In der Schicht kann dann jede auf einer Verletzung des zu überwachenden Abdichtungssystems beruhende Wassermenge ohne Rückstau abgeführt werden.

4.2.3. Abgleich der Modellbedingungen

Die MKS sind in den Abdichtungssystemen in bodenhydraulisch definierten Schichten zwingend vorzunehmen. Die obere und untere Randbedingung, d.h. es ist kein Aufstieg von Wasser aus dem System (oben, $A_1 = 0$) und kein Aufstieg von Wasser in das System (unten, $A_4 = 0$) vorhanden, ist über entsprechende Schichten an den Rändern des Kontrollvolumens (Oberer Kiesflächenfilter, Kapillarschicht, Kontrollschicht nach Vorgaben der BAM (9)) zu gewährleisten. Der definierte Fluss im Kontrollvolumen wird über die Anordnung der Schichten ebenfalls sichergestellt. So ist immer eine Schicht unten einzubauen, deren hydraulische Leitfähigkeit bei residualem Wassergehalt größer ist als die der zu kontrollierenden Schicht bei Sättigungswassergehalt. Der kapillare Aufstieg aus dieser Schicht in die zu kontrollierende Schicht ($A_3 = 0$) ist ebenfalls über geometrische Parameter (Schichtdicke) auszuschließen, ebenso die Randbedingung, dass in dieser Schicht kein Wasser gespeichert wird ($S_3 = 0$).

Mit der Größe des Messfeldes werden lokale Beeinflussungen der Messwerte, wie durch Randeinflüsse und Umläufigkeiten, vermieden. Die Homogenität der zu überwachenden Schicht wird mit entsprechendem bautechnischen Aufwand für die Messvolumen (Makroskala) darstellbar sein. Zumindest über die Sensorlänge werden Verhältnisse erreicht werden, die eine für die Fläche repräsentative, integrale Bestimmung des Wassergehaltes zulässt (z.B. Kontrollschicht nach BAM (9), mineralische Abdichtung, Kiesflächenfilter und Kapillarschicht). Mit der Dauer der Messung sind bei tonmineralischen Schichten Alterungsprozesse (Austrocknen) zu berücksichtigen, die aber über den Langzeitverlauf des Wassergehaltes und die bodenmechanischen Kennwerte (Tonanteil, Schrumpfgrenze) bestimmbar sind.

Die Vermeidung von Kapillarsperren im System ist durch die Wahl geeigneter Bodenarten möglich. Der wirtschaftliche Aspekt des Einsatzes lokal verfügbarer Bodenmaterialien ist nicht zu unterschätzen. Zumindest ist zu vermeiden, dass sich an Schichtgrenzen ungewollt gesättigte Verhältnisse ausbilden, was in Abhängigkeit von der Neigung der Deponieböschung lateralen Abfluss über der Schicht mit sich bringt. Findet dieser laterale Abfluss im System statt, so kann auf Grund der fehlenden Messung am Systemrand nicht mehr geschlossen bilanziert werden.

Insgesamt ist nachgewiesen, dass die Modellrandbedingungen in den vorgestellten Deponie-Abdichtungssystemen erfüllt werden. Im Einzelfall ist auf der Basis der spezifisch gewählten Materialien zu untersuchen, ob bodenmechanische Parameter (Hysterese u.ä.) einen relevanten Einfluss gewinnen. Grundsätzlich sind die Verhältnisse des Modells übertragbar.

5. Experimentelle Untersuchungen

Das analytische Boden-Modell aus dem vierten Kapitel soll nun mit dem im dritten Kapitel gewählten Feuchtemesssystem anhand von in-situ Versuchen verifiziert werden. Die Aufgabenstellung, die **Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit der einzelnen Bodenschichten aus der Messung des Wassergehaltes**, soll dabei erweitert werden. Es wird angestrebt zu zeigen, dass auch die Bestimmung des flächigen Durchflusses durch eine Bodenschicht aus der Messung der zeitlichen Änderung des Wassergehaltes möglich ist.

Dazu werden zuerst die Erfahrungen, die die Arbeitsgruppe bei bereits realisierten Testfeldern gewonnen hat, geschildert (Abschnitt 5.1.). Mit diesen Erfahrungen war es möglich, ein abgeschlossenes Testfeld, einen Lysimeter zu bauen. Der Lysimeter wurde auf das Modell (Abschnitt 4.1.) abgestimmt. Die Berücksichtigung und Umsetzung der Randbedingungen wird in Abschnitt 5.2.1. beschrieben. Der Entwurf des Lysimeters mit seinen gewählten Abmessungen wird in Abschnitt 5.2.2. vorgestellt. Die Materialien des Lysimeters waren nach den Vorgaben von 5.2.1. zu wählen. Die Eigenschaften der Materialien und deren Bemessung sind Inhalt von Abschnitt 5.2.3.. Der Bau des Lysimeters wird in Abschnitt 5.2.4. in Bildern dokumentiert.

Die gewählte Messtechnik wird im Abschnitt 5.3. vorgestellt. Es wird in die konventionelle Messtechnik (Abschnitt 5.3.1.) und die Bodenfeuchte-Messtechnik (Abschnitt 5.3.2.) unterschieden. Die Geräte werden gezeigt und die jeweiligen Messanordnungen beschrieben.

Die Erfassung der Daten und deren weitere Verarbeitung und Umrechnung in die Wassergehalte der Bodenschichten werden im nächsten Kapitel (Abschnitt 6.1.) dargestellt. Es stellte sich nämlich heraus, dass die derzeit verfügbaren Auswertalgorithmen hier nicht die gewünschte mathematische Genauigkeit erbrachten und grundlegend modifiziert werden mussten. Erst dann war die Kalibrierung des Lysimeters und der Abgleich der Daten mit Werten aus der Literatur möglich. Die Durchführung des Versuches, die Bilanzierung im Querschnitt, die Bestimmung der bodenhydraulischen Parameter und die Darstellung der Ergebnisse schließen mit den Abschnitten 6.2. und 6.3. das sechste Kapitel ab.

5.1. Vorversuche

Das Bodenfeuchte-Messsystem „TAUPE“ wurde am Institut für Meteorologie und Klimaforschung im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt, um auf möglichst großen Flächen die Feuchte nahe der Bodenoberfläche genau messen zu können. Damit werden die großflächig über Flugzeug oder Satellit aufgenommenen Daten der Atmosphäre kleinräumig kalibriert (siehe auch *Belz, 12*, mit Landsat-Thematic-Mapper-Daten). Mit dieser Kalibrierung wird der Feuchteübergang vom Boden in die Atmosphäre erfasst und damit die Vorhersage meteorologischer Ereignisse (Wolkenbildung, Nebel- und Niederschlagswahrscheinlichkeit) verbessert.

Die Feuchte der Bodenoberfläche ist über Austauschvorgänge mit dem Bodenwassergehalt (Abschnitt 2.1.) gekoppelt. Beispielsweise wird über den Wasservorrat im Boden (nutzbare Feldkapazität) der Pflanzenwuchs und damit die Evapotranspiration wesentlich bestimmt. Die punktförmige Messung des Bodenwassergehaltes ist etwa mittels TDR-Verfahren Stand der Technik. Es ist

möglich, Bodenfeuchteprofile über die Länge der Messgabel (i.d.R. 30 bis 60 cm) aufzunehmen. Für die Aufnahme relevanter Flächen wäre eine Vielzahl von TDR-Geräten erforderlich. Würde mit nur einem Gerät gemessen, wären die Ergebnisse auf Grund der Heterogenität der Bodenoberfläche (die Messung ist nur unzureichend wiederholbar) nicht reproduzierbar. Um diese Problematik zu vermeiden, wurde die Gabel des TDR (starre Metallstäbe) in ein flexibles Flachbandkabel überführt (*Brandelik, 27*). Damit sollte es auch möglich werden, beispielsweise die räumliche Variabilität der Bodenfeuchte aufzunehmen (*Disse, 47*).

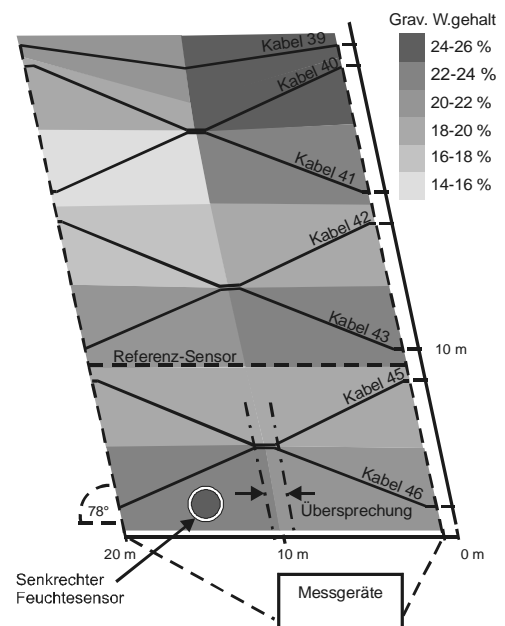
Auf der Karlsruher Mülldeponie-West wurde das Bodenfeuchte-Messsystem in einem 800 m² großen Testfeld in drei Lagen (unmittelbar über der MA, im mittleren Bereich der MA und unterhalb der MA in der Kapillarschicht) eingebaut. Bild 5.1.1. zeigt die Verlegung der oberen Lage der Sensoren.



Bild 5.1.1.: Testfeld in Karlsruhe mit Sensorkabeln

Der Messbetrieb wurde im Juli 1998 aufgenommen. Die Sensormessungen wurden mit den Einbauwassergehalten der MA kalibriert. Um eine weitere Stützstelle für die Kalibrierung zu erhalten, wurden im Oktober 1998 in drei Schürfen Bodenproben aus der MA entnommen. Die ex-situ im Labor bestimmten Wassergehalte stimmten mit den mit dem Bodenfeuchte-Messsystem gemessenen überein. Die Messungen wurden bestätigt. Die flächige Verteilung des Wassergehaltes in der MA ist für Februar 1999 (Messbetrieb nach über 8 Monaten) in Bild 5.1.2. dargestellt.

Bild 5.1.2.: Feuchteverteilung (Februar 1999), das Testfeld ist mit einer Neigung von ca. 1 : 2,6 eingebaut.



Mittels Wasseraufgabe konnte die Sensibilität des Messsystems belegt werden (März 1999). Deutlich ist der Anstieg des Wassergehaltes um den Sensor 42 erkennbar,

während der benachbarte „unbeeinflusste“ Sensor 41 nur geringe Reaktionen zeigt (siehe Bild 5.1.3., Lage der Sensoren siehe Bild 5.1.2.). Die Messungen im Testfeld der Mülldeponie-West werden bis heute weitergeführt und zeigen, dass die MA tendenziell trockener wird. Im Flächenfilter und im Sand sind über die Zeit nahezu konstante Werte zu beobachten, eine punktförmige Leckage, verursacht z.B. durch lokale Setzungen, ist daher bisher auszuschließen. Abgeglichen werden die Messungen mit Referenzmessungen (Hötzl *et al.*, 90), die den Trend einer Austrocknung bestätigen.

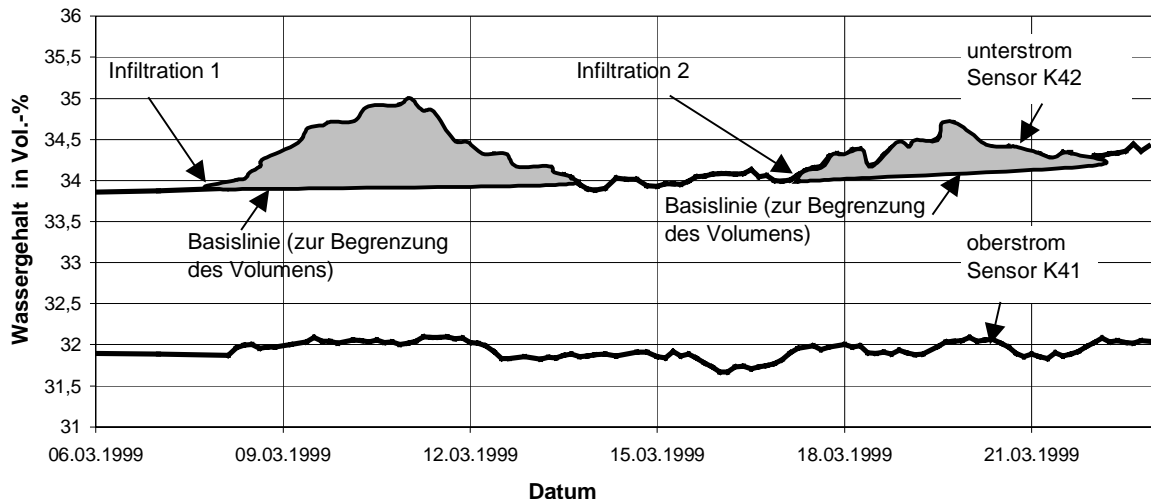


Bild 5.1.3.: Reaktion der Sensoren auf gezielte Wasserzugabe (oberste Lage der Sensoren)

Dieser positive Versuchverlauf ermutigte die Arbeitsgruppe, weitere Testfelder mit den Bodenfeuchte-Sensoren auszustatten. Auf den Deponien Magdeburg („Cracauer Anger“, 2000) und Bochum („Kornharpen“, 2000) wurde in jeweils drei Lagen der Wurzelboden (Rekultivierungsschicht) des Oberflächenabdichtungssystems mit Sensoren versehen. Aufgabe ist es dabei, die Wirksamkeit von verschiedenen Oberflächenwasser-Ableitungssystemen nachzuweisen. Neben der reinen Messung des Niederschlags und des Abflusses im Testfeld sollte die Abflussmenge über die Änderung des Wassergehalts im Wurzelboden verifiziert werden.

Erste Auswertungen zeigen, dass eine integrale Bestimmung der Bodenfeuchte entlang dem Messsensor (Länge jeweils 10 m) durch die Inhomogenitäten im Wurzelboden erschwert wird. Die Auswirkungen der Mischungsregeln (siehe unter 6.1.1.) und des Übergangs von der Mikro- in die Makroskala (z.B. Einfluss der Mehrmodalität der Kornverteilung und des Vorhandenseins von Makroporen etc.) auf die Messgenauigkeit sind hier noch zu lösen.

Ein weiterer Einsatz in einem Testfeld in Norddeutschland sollte zeigen, dass das Messvolumen um einen Sensor durch Abschirmung auf den gewünschten Untersuchungsbereich und auf die gewünschte Abmessung beschränkt werden kann. So ist es z.B. an Schichtgrenzen interessant, den Wassergehalt unmittelbar nur dort zu messen (Kapillarsaum) und nicht einen durch die untenliegende Schicht integral verfälschten Wert. Schlanke Bauelemente, wie Bentonitmatten o.ä., sind mit dem modifizierten Bodenfeuchte-Sensor überwachbar.

Die durchgeführten Feldversuche zeigen, dass neben der Bestimmung des Wassergehaltes im Boden die Übertragung der Messwerte auf bodenphysikalische Parameter das nächste Ziel sein muss. Die Bewertung der Qualität der Messwerte ist nur über kontinuierliche Plausibilitätskontrollen möglich. Das zu zeigen, wurde der im folgenden beschriebene Lysimeter gebaut und betrieben.

5.2. Naturversuch

Zur Überprüfung und Kalibrierung des elektromagnetischen Bodenfeuchte-Messverfahrens ist es erforderlich, einen abgeschlossenen, kontrollierbaren Messkörper zu schaffen. Dessen Abmessungen sind so zu wählen, dass die Modellbedingungen (Abschnitt 4.1.) eingehalten werden können und die geometrischen Abmessungen keine zusätzlichen Fehlerquellen bieten (Randeinflüsse, wie Unstetigkeiten und Umläufigkeiten). Am besten eignen sich dazu Lysimeter (*Maile et al., 119*), die sich in der Bodenkunde und der Hydrologie bewährt haben.

5.2.1. Randbedingungen, Vereinfachungen

Bei der Konstruktion eines Lysimeters sind die Verknüpfung der Skalen (Mikroskala: bodenphysikalische Parameter, Makroskala: Beobachtungsebene = Messwerte) zu beachten (siehe Abschnitt 4.1.). Um diesen Skalenübergang darzustellen, ist der Lysimeterboden zu homogenisieren oder zumindest als homogen zu betrachten. Dabei sind, durch die Messtechnik bedingt, folgende Randbedingungen zu beachten:

- o Das Bodenmaterial wird als isotrop angenommen. Die Kornstruktur und die Korntextur werden in alle Koordinatenrichtungen als gleich vorausgesetzt. Die zu messende DZ ist unabhängig von der Messrichtung.
- o Aus Gründen des Maßstabes (Skala) ist das Größtkorn bei der Bestimmung der Boden-Eichkurve (Zusammenhang zwischen DZ und Wassergehalt) auf 1 mm begrenzt (*Schlaeger, 187a*). Das Überkorn wird abgeseibt. Das Material für den Lysimeter ist so zu wählen, dass bei einer gewünschten hydraulischen Leitfähigkeit durch die Kappung der Sieblinie keine relevante Störung verursacht wird. Der Ungleichförmigkeitsgrad, das Porenvolumen und die Porengeometrie (Porenengstellen und Porenvernetzung) sind für den Fluss relevant und sind in ihrer Struktur zu erhalten.
- o Der Übergang gesättigte/ungesättigte Bodenverhältnisse am Grundwasserspiegel, das ist der Übergang vom 2-Phasen- zum 3-Phasen-Modell, muss berücksichtigt werden. Das kann durch Kalibrierung im gesättigten Bereich erfolgen. Ansonsten ist ein Verlust an Information zu besorgen. Die DZ im Übergangsbereich ist nicht eindeutig bestimmbar oder nicht auf den Wassergehalt beziehbar.

Zusätzlich sind die geometrischen, hydrologischen und hydromechanischen Modellrandbedingungen zu beachten (Bezeichnungen siehe Abschnitt 4.1., Bild 4.1.2.):

- o Am oberen Modellrand gilt: $A_1 = 0$. Dazu wird die Lysimeteroberfläche ohne Bewuchs ausgebildet und abgedeckt. Der Luftraum über der Lysimeteroberfläche wird gegen die Atmosphäre isoliert, sodass dort nahezu gleiche

- Temperatur wie im Lysimeter herrscht und die Luftfeuchte im Bereich der Sättigung liegt. Die Gesamtverdunstung ET_a bestehend aus Pflanzentranspiration PT , Evaporation des Bodens EVA und der Interzeptionsverdunstung $IntV$ (Bezeichnung siehe Bild 2.1.1.) wird vernachlässigbar gering. Ein Aufstieg aus dem Lysimeter an die Oberfläche wird verhindert.
- o Am unteren Modellrand gilt: $A_4 = 0$. Der Lysimeterboden wird dicht ausgebildet, ein Aufstieg von Wasser aus dem Untergrund in den Messbereich ist bei unverletzter Bodenfolie ausgeschlossen.
 - o Aus der untersten Schicht (Kiesfilter) im Lysimeter findet kein kapillarer Aufstieg in die darüber liegenden Schicht statt ($A_3 = 0$). Dazu wird ein Kiessandmaterial gewählt. Dessen kapillare Aufstiegshöhe ist geringer als die Schichtdicke. Es hat kapillarbrechende Funktion.
 - o In der untersten Schicht wird durch die Abflüsse aus der darüber liegenden Schicht der Wassergehalt nicht erhöht, es gilt Gleichung 4.1.3.. Außerdem ist der Ablauf des Lysimeters funktionsfähig, die unterste Schicht wird nicht eingestaut. Es gilt: $S_3 = 0$.
 - o Der Lysimeter wird künstlich beregnet. Diese Wassermenge wird gemessen. Es gilt: $Z_1 = N$ (oberer Rand). Am unteren Rand gilt: $Z_3 = Z_4 = Q_{Ab}$, was ebenfalls gemessen wird.

Vom gewählten Bodenmaterial sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- o Das Material ist mit unimodaler Porenverteilung zu wählen, d.h. es hat ein eindeutiges Porengrößenmaximum. Mehrmodale Böden zeigen in der pF-WG-Beziehung keinen harmonischen Verlauf. Im pF-WG-Diagramm treten Sprünge auf, denen die Porengrößenmaxima zugeordnet werden können. Das linke Bild zeigt die Abweichung bei der Anpassung einer unimodalen pF-WG-Kurve an einen Boden mit bimodalem Porensystem. Die entsprechende unimodale Porengrößenverteilung (links) weicht deutlich von der „richtigen“ bimodalen Porengrößenverteilung (rechts) ab. Entsprechend würde die daraus abgeleitete Beziehung k_f -Wert zu θ den Boden nicht charakterisieren.

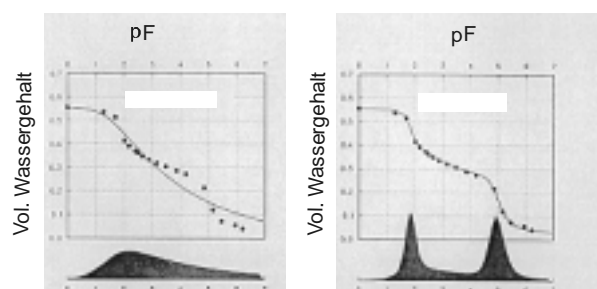


Bild 5.2.1.: pF-WG-Kurve und Porengrößenverteilung eines bimodalen Bodens (Durner, 52)

- o Das Material ist weitgehend homogenisierbar, dadurch auch beim Skalenübergang (Mikro- auf Makroskala) beschreibbar. Seine Anisotropie ist vernachlässigbar, die Betrachtung nur der z-Richtung (Vernachlässigung der x- und y-Richtung) führt zu keinen wesentlichen Informationsverlusten. Außerdem können durch die Homogenisierung und Verdichtung präventielle Fließwege (Makroporen) vermieden werden. Ebenso sind die Phänomene des „Fingerings“ durch die Wahl des Schichtaufbaus zu minimieren.

- o Die Beziehung k_f -Wert zu θ darf durch Hysterese nicht mehrdeutig werden. Für einen schluffigen Sand (Su) oder einen sandigen Schluff (sU) kann nach der Literatur ihr Einfluss vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 2.5.).
- o Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit soll im Bereich 10^{-6} m/sec liegen. Zum einen wird dadurch die Versuchszeit in eine beobachtbare Zeitgröße eingeordnet, zum anderen wird in den Empfehlungen der BAM (9, und Anhang 9.1.) diese hydraulische Leitfähigkeit für Schichten unter Konvektionssperren empfohlen.
- o Es muss dazu die pF-WG-Kurve des Materials im Labor bestimmt werden.

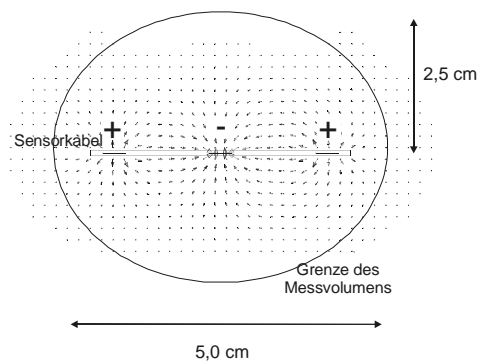
Außerdem sind physikalische Parameter, wie die Temperatur im Lysimeterboden (Korrektur der temperaturabhängigen DZ, Ausschluss eines relevanten vertikalen Temperaturgradienten, der der Schwerkraft entgegen wirkt) und die Saugspannung in mindestens zwei Horizonten (Beleg der Richtung der Potenzialdifferenz) zu erfassen.

Bei aller Sorgfalt wird die Verdichtung im Lysimeter (Dichte des Bodens) als Unsicherheitsfaktor bleiben. Studien (Versuche mit den Großlysimetern „Vegas“ in Stuttgart) haben die Empfehlung erbracht, das Material unverdichtet einzubauen (vor Kopf zu kippen und mit der Schaufel zu planieren) und dann nur die jeweilige Schichtoberfläche mit einer „kleinen“ Rüttelplatte zu verdichten. Die unteren Schichten werden allein durch die Auflast der oberen Schichten nachverdichtet, die oberste, etwas weniger verdichtete Schicht kann als „Verteilungsschicht“ für den Flüssigkeitszutritt dienen. Diese unterschiedlichen Dichten sind bei der Übertragung der DZ in den Wassergehalt zu berücksichtigen.

5.2.2. Planung, Entwurf und Bemessung

Das gewählte Volumen der Messeinrichtung wird an die Skala der Messung (Makroskala) angepasst. Der Messbereich der Sensoren wird durch die Dämpfung des Impulses durch die umgebende Bodenart bestimmt. So sind im Sand Sondenlängen von mindestens 30 Metern möglich (geringe Dämpfung durch den Bodenwassergehalt und dessen Leitfähigkeit), während im Schluff und im Ton wegen der stärkeren Dämpfung nur geringere Längen möglich sind. Das gewählte Bodenmaterial sollte daher ein sandiger Schluff (sU) bis schluffiger Sand (Su) sein, das sicher Sensorlängen bis zu zehn Metern zulässt. Die Sensoren werden mit einem Mindestabstand verlegt, so dass sich ihre elektromagnetischen Felder nicht gegenseitig, z.B. durch Übersprechen, beeinflussen. Das Messfeld um den Sensor hat folgende Form:

Bild 5.2.2.: elektromagnetisches Feld um ein Sensorkabel bei symmetrischer Impulsbeaufschlagung



Das Messvolumen wird mit einer idealisierten elliptische Form über die Länge des Sensorkabels als konstant angenommen. Der Radius des Messvolumens entspricht

näherungsweise dem halben Leiterabstand. Bei einem Leiterabstand von 5 cm (Bild 5.2.2.) ergibt sich ein Messvolumen von ca. 20 cm^3 pro laufendem cm Messstrecke. Der vertikale Abstand der Sensoren sollte größer als der gewählte Leiterabstand sein. Um auf der sicheren Seite zu liegen wird ein Sensorabstand von $8 \times d$ gewählt.

Unter der Voraussetzung einer homogenen Bodenschicht wird der Sensor-Messwert für die gesamte Schicht als repräsentativ angenommen. Die Messwerte der Sensoren (Laufzeiten des Impulses) sind über die gesamte Sensorlänge gemittelt. Da die DZ vom Wassergehalt des umgebenden Mediums (θ) und von dessen Dichte (ρ) abhängig ist, werden lokal stärker verdichtete Bereiche oder ein lokal abweichender θ nur im gemessenen Mittelwert berücksichtigt. Die Auflösung wird dadurch quasi-zweidimensional. Um damit den Querschnitt des Lysimeters beschreiben zu können, wird eine möglichst enge Verteilung der Sensoren gewählt. Der Abgleich benachbarter Sensoren ist hilfreich, Inhomogenitäten zu identifizieren.

Um den Einfluss von unterschiedlichen Verdichtungen bei der Messung zu minimieren, werden die Sensorkabel auf den Schichtgrenzen verlegt. Das Auflager der Sensorkabel und der Untergrund sind zumindest im Messvolumen des Sensors jeweils gleich verdichtet. Das Material der nächsten Schicht (Stärke $d \sim 20 \text{ cm}$) wird im Bereich der Messebene durch Verdichtung an der Oberfläche ebenfalls weitgehend homogen sein.

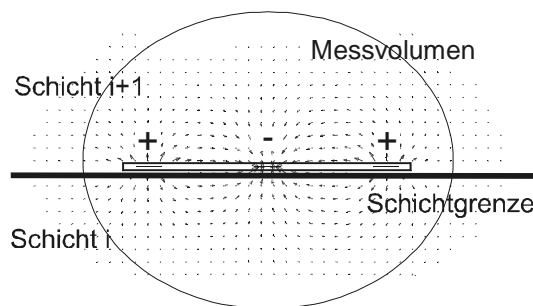


Bild 5.2.3.: Sensorkabel, eingebaut auf der Schichtgrenze (schematisch)

Durch die Verdichtung an der Schichtgrenze mit der Rüttelplatte gilt:

$$\rho_i \geq \rho_{i+1}$$

Das Messfeld des Sensors erfasst beide Schichten mit nahezu gleichem Messvolumen (siehe Bild 5.2.3.). Mit den gewählten geringen Schichtdicken und der Verdichtung mit einer „kleinen“ Rüttelplatte wird die Differenz der beiden Dichten klein, es stellt sich keine hydraulisch definierte Schichtgrenze ein. Zudem ist auf beiden Seiten der Schichtgrenze das gleiche Material eingebaut (gleiche Kornverteilung etc.). Um die notwendigen Randbedingungen aus Abschnitt 5.2.1. zu erfüllen, sind folgende konstruktiven Ausbildungen zu beachten:

- o Der Lysimeter wird abgedeckt ($N=0$) und gedämmt ($ET_a=0$). Der Lysimeter ist damit hydrologisch abgeschlossen und definiert.
- o Der Lysimeter wird in den anstehenden Boden eingegraben (die Temperaturgradienten dT/dz und dT/dt werden minimiert).
- o Die Beregnungswassermenge wird gemessen ($N=Z_1$), ebenso der Ablauf aus dem Lysimeter ($Z_3=Z_4=Q_{ab}$).

Zur Vergleichmäßigung der Infiltration wird die oberste Lage nicht verdichtet, sondern nur planiert und abgezogen. Die lockere Lagerung mit dem größeren Porenvolumen ist hilfreich, eine gleichmäßige Durchsickerung sicherzustellen. Präferentielle Fließwege (Makroporenfluss, Fingering) werden horizontal ausgeglichen (*De Rooij, et al., 45*). Die Oberfläche wird mit einem Geogitter belegt, um eine Rauigkeit auf Dauer zu gewährleisten. Dadurch wird der Oberflächenabfluss verhindert, eine sich einstellende Strömung gebrochen und in den Boden umgeleitet. Die Beregnung wird gleichmäßig über die Fläche verteilt, um lokale Intensitätsunterschiede zu vermeiden.

Die vertikale Begrenzung des Lysimetervolumens (Grenzfläche Lysimetervolumen/Außenwand) ist so zu gestalten, dass Randeinflüsse, wie Umläufigkeiten (hydraulischer Kurzschluss zwischen den einzelnen Schichten) minimiert werden (konstruktive Maßnahmen). Die äußeren Sensorkabel werden daher eng an die Außenbegrenzung (Abstand < 50 cm) eingebaut. Im horizontalen Abgleich können so Umläufigkeiten, die sich in einem höheren Wassergehalt zeigen, detektiert werden.

Gewählt wird ein Messvolumen von 40 m³ Inhalt, mit einer Oberfläche von ca. 30 m² und einer Schichtenhöhe von insgesamt 1,25 m. Die Sensorkabel werden horizontal im Abstand von 75 cm (außen 50 cm), vertikal im Abstand von 20 cm eingelegt. Der Boden wird lagenweise (Schichtdicke = 20 cm) eingebaut.

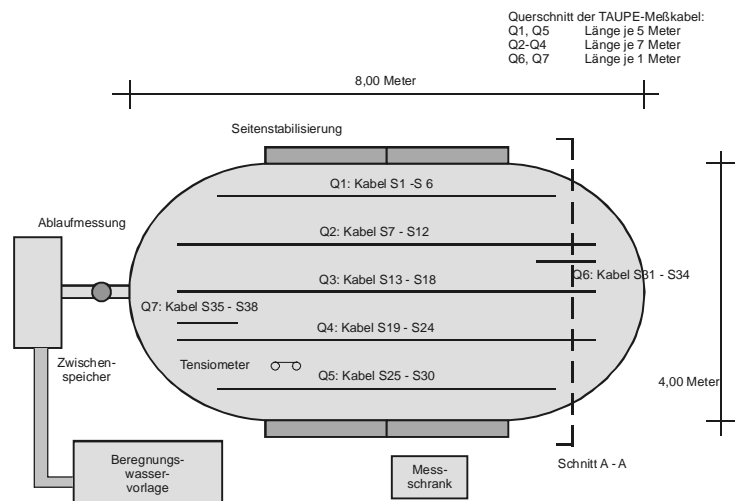


Bild 5.2.4.: Lageplan Lysimeter

Insgesamt sind 38 horizontal verlaufende Sensorkabel installiert, das sind je zwischen 5 und 7 Sensoren in den insgesamt 6 Messebenen.

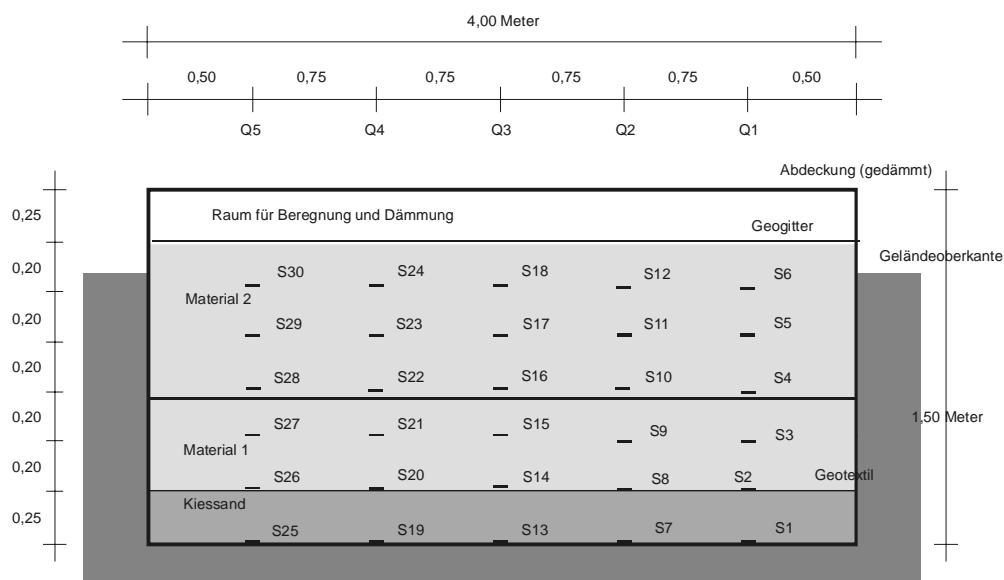


Bild 5.2.5.: Querschnitt des Lysimeters, die Sensoren sind aufsteigend von unten nach oben nummeriert

Durch die Vielzahl der Sensorkabel wird eine räumliche Auflösung der Wassergehaltsverteilung erreicht. Mit den Sensoren S31 bis S38 wird es möglich, die in den Sensoren S1 bis S30 nur integrierend erfolgte Messung des Wassergehaltes über die Länge des Lysimeters aufzulösen.

5.2.3. Wahl und Bemessung der Materialien

Die einzelnen Materialien werden entgegen der Fließrichtung im Lysimeter von unten nach oben beschrieben.

a. Dränageschicht mit Ablauf

Gewählt wird ein Kiessand, der ohne wesentliche Erhöhung seines Wassergehaltes (hier Residualwassergehaltes) den Zufluss aus der Bodenschicht darüber abführen kann. Im Institut für Hydromechanik (IfH) der Universität Karlsruhe wurden seine bodenhydraulischen Kenngrößen bestimmt. Die Probe dazu wurden während der Bauphase aus der eingebauten Kiessandschicht mittels Stechzylinder ($V = 100 \text{ cm}^3$) entnommen. Die Aufsättigung der Probe erfolgte über kapillaren Aufstieg. Die Entwässerung erfolgte in definierten Druckstufen. Sie musste nach der Druckstufe 85 cm Wassersäule abgebrochen werden, da Luft in das System eingesogen wurde. Aus den Entwässerungscharakteristiken wurden mit dem Programm SFIT (inverse Parameterbestimmung) die Bodenparameter nach *van Genuchten* ermittelt (n , α und θ_r). Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (k_s) und der Sättigungswassergehalt (θ_s) wurden unabhängig bestimmt.

| Material | k_s (cm/h) gem. / angep. | θ_s (Vol.-%) | θ_r (Vol.-%) | n (-) | α (1/cm) |
|----------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------|-----------------|
| Kiessand | 32,7 | 28,8 | 30 | 1,21 | 0,112 |

Tabelle 5.2.1.: Bodenparameter der Dränageschicht

Die Entwässerungscharakteristik und die ermittelten Parameter entsprechen eher einem lehmigen Material. Das kann auf eine nicht vollständige Aufsättigung auf Grund des hohen Anteils großer Poren zurückgeführt werden. Die pF-WG-Kurve hat den folgenden Verlauf:

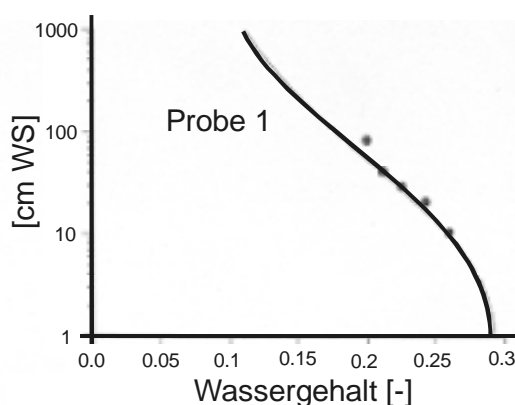


Bild 5.2.6.: Saugspannungs-Wassergehalts-Kurve (pF-WG-Kurve) für den Kiessand

Gleicht man diese Laborwerte mit den Werten der Sieblinie ab, so wird der Verdacht des Inst. für Hydromechanik (IfH) bestätigt. Mit

$$k_s = 0,0116 * U^{-0,21} * (d_{10})^2 \text{ (Gl. 5.2.1.)}$$

ergibt sich k_s zu ca. 0,1 m/sec, was dem ca. 1000-fachen des IfH-Wertes entspricht. Ebenso fällt auf, dass der θ_r auf 0,001 reduziert wurde. Extrapoliert man die pF-WG-Kurve, so wäre sicher ein um mindestens eine Größenordnung höherer θ_r zu erwarten.

Die Kornverteilung hat folgenden Verlauf:

Kiessand 2/22 mit $d_{10} = 3,0$ mm, $d_{30} = 4,7$ mm, $d_{60} = 7,4$ mm, $U = d_{60}/d_{10} = 2,4$

Mineralogisch dominieren Quarze (36,3%), Karbonatgestein (17,1%) und Plutonite, Vulkanite (26,0%). Im Eluat ist der Karbonatgehalt mit 7,0 mg/l erhöht, das Material wäre für Deponien gerade noch geeignet. Der hohe Karbonatgehalt ist dort unerwünscht, da bei der Passage von Deponiegas eine Karbonatisierung eintreten kann und der Filter dadurch seine Eigenschaften verliert. Beim vorliegenden Versuchsaufbau ist der Einsatz unbedenklich.

b. Geotextil

Das Geotextil hat die Aufgabe, die Filterschicht von der Bodenschicht zu trennen. Es soll vermieden werden, dass Feinteile aus dem Bodenmaterial in den Filter eingespült werden. Dazu ist das Geotextil zu bemessen. Der Ablauf der Nachweise für das Geotextil erfolgt nach den Vorgaben des Arbeitskreises 14 „Kunststoffe im Erd- und Wasserbau“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (*Saathoff, 182*). Der Nachweis des Geotextils wird in zwei Schritten durchgeführt:

1. Nachweis der mechanischen Filterfestigkeit (Bodenrückhaltevermögen)
2. Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit (druckverlustarmer Durchfluss)

Filtern ist nach DIN EN 30318 definiert als „das Zurückhalten (auch teilweise) von Boden und anderen Partikeln, die hydraulischen Kräften ausgesetzt sind, während der Durchfluss von Flüssigkeiten ermöglicht wird“. Im folgenden wird die Kornverteilung des aufliegenden Bodens (Material 1, siehe Abschnitt c) als bekannt vorausgesetzt.

Nachweis der mechanischen Filterfestigkeit (Bodenrückhaltevermögen)

Dieser Nachweis gliedert sich in die Beachtung der Filterregeln und der Einzelkornmobilität.

Beachtung der Filterregeln

Die Filterregeln des Arbeitskreises 14 unterscheiden drei Körnungsbereiche (A bis C), die über d_{40} und d_{15} charakterisiert werden. Mit hier vorliegend $d_{40} = 0,13$ mm und $d_{15} = 0,08$ mm wird der Körnungsbereich B maßgeblich.

Beachtung der Einzelkornmobilität

Für das Vorliegen einer hohen Einzelkornmobilität sind folgende Kriterien zu erfüllen:

- Kornfraktion $< 0,06$ mm mit dem Ungleichförmigkeitsgrad $U < 15$:
hier ist $d < 0,06$ mm $\sim d_{10}$, U ist für den Bereich geschätzt > 15
- Der Anteil $0,02 < d < 0,1$ mm $> 50\%$:
hier ist der Anteil $\sim 20\%$, damit $< 50\%$
- Ton-/Schluffanteil $< 0,5$ (=50%):
hier ist das Verhältnis $\sim 0,1$, damit ist zwar das Kriterium erfüllt, wegen des geringen Anteils der Ton-/Schlufffraktion aber zu vernachlässigen.

Alle Kriterien werden somit nicht erfüllt, damit handelt es sich um einen Boden mit geringer Einzelkornmobilität.

Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit

Mit diesen beiden Bodencharakteristiken (Körnungsbereich und Einzelkornmobilität) ergeben sich aus dem Nomogramm des Arbeitskreises 14 folgende Bedingungen, die durch den Vliesstoff erfüllt werden müssen:

- $O_{90,w} < 5 \cdot d_{10} \cdot U^{0,5}$ und $O_{90,w} < 2 \cdot d_{90}$. Hier wird $O_{90,w}$ mit 0,63 mm maßgeblich. Gewählt wird ein Wert $< 0,63$ mm, bei einem Geotextil z.B. SECUTEX® 201-GRK 3 mit 0,12 mm
- Gewünscht ist zwar eine Tiefenfiltration und keine Grenzflächenfiltration. Da der aufliegende Boden jedoch als leicht schluffiger Sand recht grobkörnig ist, wird sich hier keine Filtration im Geotextil einstellen. Mit $d_{10} \sim 0,067$ mm wird alleine vom Korndurchmesser schon ca. 3% der Dicke erreicht. Gefordert wird, dass $d_{\min} > 25 O_{90,w}$ gilt. Hier wäre dieser Nachweis mit 3,0 mm $< 2,3$ mm knapp nicht erfüllt. Das Geotextil kann trotzdem wegen der beschriebenen Randbedingungen zugelassen werden.

Außerdem ist noch nachzuweisen, dass die durch Bodenkontakt abgeminderte Wasserdurchlässigkeit größer ist als die Wasserdurchlässigkeit des Bodens. Zu berechnen ist der Porenanteil und die Porosität des Geotextiles:

$$\text{Porenanteil} \quad n = \{ 1 - (m_A / \rho \cdot d \cdot 10^3) \} = 0,946 \quad (\text{Gl. 5.2.2.})$$

$$\text{Porosität} \quad p = n \cdot d \cdot O_{90,w} = 2,61 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \quad (\text{Gl. 5.2.3.})$$

Gemäß den Vorgaben des Arbeitskreises 14 ist über ein Nomogramm ein Abminderungsfaktor η_v zu bestimmen. Eingangswert ist das über die Porosität normierte Quadrat der vertikalen Filtergeschwindigkeit (k_v):

$$k_v^2 / p = (8,0 \cdot 10^{-3})^2 / 2,61 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 = 245 \quad (\text{Gl. 5.2.4.})$$

Damit ergibt sich ein Abminderungsfaktor von $\eta_v = 0,01$ und damit: $\eta_v \cdot k_v = 8,0 \cdot 10^{-5}$ ist größer als $k_{\text{Boden}} = 4,0 \cdot 10^{-5}$

Damit ist der Nachweis der Filterstabilität für die Körnungslinie des Bodens und das gewählte Geotextil erbracht. Zum Einsatz kommt ein Geotextil der Firma NAUE – Fasertechnik „SECUTEX® 201-GRK 3“.

c. Bodenschicht (Material 1)

Gewählt wird ein schluffiger Sand. Im IfH wurden seine bodenhydraulischen Kenngrößen bestimmt. Die Proben dazu wurden ebenfalls während der Bauphase aus der verdichteten Schicht mittels Stechzylinder ($V = 100 \text{ cm}^3$, 2 Stück) entnommen. Die Aufsättigung der Proben erfolgte über kapillaren Aufstieg. Die Entwässerung erfolgte in definierten Druckstufen. Im Labor wurden aus den Entwässerungscharakteristiken mit dem Programm SFIT die Bodenparameter nach *van Genuchten* ermittelt (n , α und θ_r). Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (k_s) und der Sättigungswassergehalt (θ_s) wurden unabhängig bestimmt.

| Material | k_s (cm/h) gem. / angep. | θ_s (Vol.-%) | θ_r (Vol.-%) | n (-) | α (1/cm) |
|------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------|-----------------|
| Su (Pr. 2) | 0,54 | 0,13 | 30 | 1,2 | 2,24 |
| Su (Pr. 3) | 0,29 | 0,26 | 29 | 1,1 | 2,51 |

Tabelle 5.2.2.: Bodenparameter der Bodenschicht (Material 1)

Die Proben waren in ihrer Textur feinsandig bis sandig. Die pF-WG-Kurve hat den folgenden Verlauf:

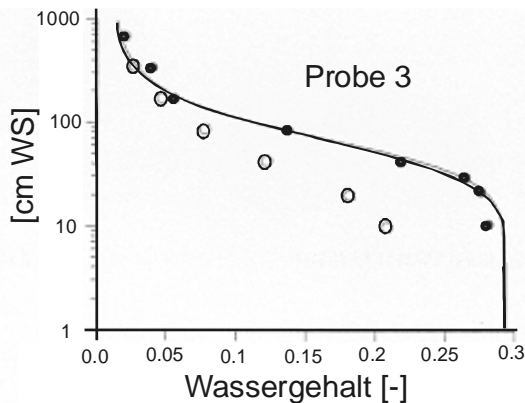


Bild 5.2.7.: Saugspannungs-Wassergehalts-Kurve für Su (Material 1, Probe 3)

Die Kurve zeigt die Entwässerung (Punkte) und die Bewässerung (Ringe) an. Deutlich ist die Hysterese des Materials sichtbar. Gleicht man die Laborwerte (k_s von ca. $8 \cdot 10^{-7}$ m/sec) mit den Werten der Sieblinie (k_s von ca. $4 \cdot 10^{-5}$ m/sec) ab, so ergibt das ca. 50-fachen des Labor-Wertes. Der θ_r liegt bei 1,2 Vol.-%. Die Kornverteilung hat folgenden Verlauf:

Schluffiger Sand (Su) mit $d_{10} = 0,067$ mm, $d_{30} = 0,114$ mm, $d_{60} = 0,235$ mm, $U = 3,5$

Der Unterschied im k_s -Wert rührt aus der Größe des Messvolumens. Mit der Probenahme im recht kleinen 100 cm^3 Stechzylinder ist der feinkiesig/kiesige Anteil beim Glattstreichen der Oberfläche teilweise verloren gegangen. Die VGM-Parameter des lfH werden trotzdem im weiteren als richtig unterstellt.

d. Bodenschicht (Material 2)

Durch ein Verzögerung bei der Fertigstellung des Lysimeters wurde das bereits gelieferte Material für den weiteren Einbau durch Einmischungen von organischem Material unbrauchbar. Auch war die Quelle für Material 1 nicht mehr zugänglich, sodass ein weiteres Bodenmaterial (Material 2) gewählt werden musste. Notwendige Randbedingung für die Materialwahl war, dass das Material 2 dem ersten Material sehr ähnlich ist und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit etwas niedriger liegt. Die Kontrolle für den Durchfluss liegt also im Material 2. Zusätzlich ist dafür gesorgt, dass sich an der Schichtgrenze keine Kapillarsperre ausbildet.

Gewählt wird ebenfalls ein schluffiger Sand. Im lfH wurden seine bodenhydraulischen Kenngrößen bestimmt. Die Proben dazu wurden ebenfalls während der Bauphase aus der verdichteten Sandschicht mittels Stechzylinder ($V = 100 \text{ cm}^3$, 2 Stück) entnommen. Die Aufsättigung der Proben erfolgte über kapillaren Aufstieg. Die Entwässerung erfolgte in definierten Druckstufen. Aus der Entwässerungscharakteristik wurden mit dem Programm SFIT die Bodenparameter nach *van Genuchten* ermittelt (n , α und θ_r). Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (k_s) und der Sättigungswassergehalt (θ_s) wurden unabhängig bestimmt.

| Material | k_s (cm/h) gem. / angep. | | θ_s (Vol.-%) | θ_r (Vol.-%) | n (-) | α (1/cm) |
|------------|----------------------------|------|---------------------|---------------------|---------|-----------------|
| Su (Pr. 4) | 0,25 | 0,25 | 28 | 11 | 2,54 | 0,028 |
| Su (Pr. 5) | 0,47 | 0,06 | 28 | 14 | 2,54 | 0,030 |

Tabelle 5.2.3.: Bodenparameter der Bodenschicht (Material 2)

Die Proben sind in ihrer Textur kiesig-lehmiger Sand. Sie haben gegenüber Probe 2 und 3 (Material 1) einen nennenswerten Kiesanteil. Das könnte auch den relativ hohen θ_r erklären, da ähnlich wie beim Kiessand diese Proben auch nicht vollständig aufgesättigt werden konnten. Die pF-WG-Kurve hat den folgenden Verlauf:

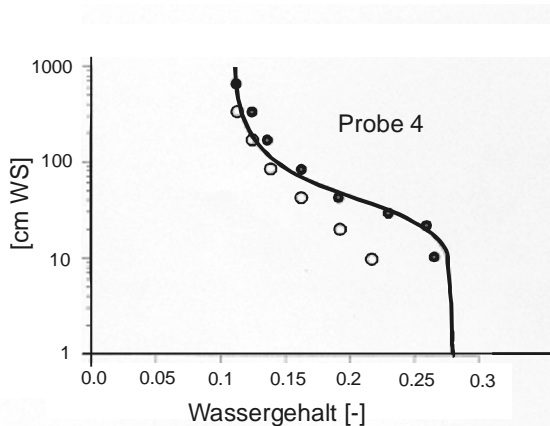


Bild 5.2.8.: Saugspannungs-Wassergehalts-Kurve für Su (Material 2, Probe 4)

Die Kurve zeigt die Entwässerung (Punkte) und die Bewässerung (Ringe). Die Hysterese des Materials ist weniger ausgeprägt. Gleicht man die Laborwerte (k_s von ca. $7 \cdot 10^{-7}$ m/sec) mit den Werten der Sieblinie (k_s von ca. $3,5 \cdot 10^{-5}$ m/sec) ab, so ergibt sich ebenfalls das ca. 50-fachen des Laborwertes. Der θ_r liegt mit 12 Vol.-% 10-Mal so hoch wie bei Material 1. Die Kornverteilung hat folgenden Verlauf:

Schluffiger Sand (Su) mit $d_{10} = 0,065$ mm, $d_{30} = 0,199$ mm, $d_{60} = 0,395$ mm, $U = 6,1$

Der Unterschied im k_s -Wert rührt aus der Größe des Messvolumens. Mit der Probenahme im recht kleinen 100 cm^3 Stechzylinder ist der feinkiesig/kiesige Anteil beim Glattstreichen der Oberfläche teilweise verloren gegangen. Die Ergebnisse des lFH werden trotzdem im weiteren als qualitativ richtig unterstellt.

e. Bewertung der Materialien

Bei der Charakterisierung der Materialien wird deutlich, dass es beim Übergang der Skalen zu deutlichen Abweichungen kommen kann. Der Verlust an „grober“ Fraktion durch das geringe Stechzylindervolumen führt bei der Ermittlung der bodenhydraulischen Parameter im Labor zu Größen, die anhand der im größeren Maßstab ermittelten bodenmechanischen Parameter quantitativ korrigiert werden müssen. Es wird für die weitere Betrachtung festgelegt:

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s wird aus der Kornverteilung ermittelt.

| Material | Kiessand | Material 1 | Material 2 |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| k_s (m/sec) | $1,0 \cdot 10^{-1}$ | $4,0 \cdot 10^{-5}$ | $3,5 \cdot 10^{-5}$ |

Die Residualsättigung wird auf Basis der Textur und im Abgleich mit Literaturwerten (87, 88, 184 und 185) wie folgt festgelegt:

| | | | |
|---------------------|-----------|------------|------------|
| Material | Kiessand | Material 1 | Material 2 |
| θ_r (Vol.-%) | 3,0 – 5,0 | 8,0 – 10,0 | 8,0 – 10,0 |

Das Geotextil (Masse 170 gr/m², Wichte 1,36 gr/cm³) auf der Schichtgrenze Material 1/Kiessand hat folgende hydraulische Eigenschaften:

| | | | |
|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|-------------------|
| $k_{v(\text{vertikal})}$ (m/sec) | $k_{h(\text{horizontal})}$ (m/sec) | $O_{90,w}$ (mm) | Schichtdicke (mm) |
| $8,0 \cdot 10^{-3}$ | $1,7 \cdot 10^{-2}$ | 0,12 | 2,3 |

Da k_v um den Faktor 2 kleiner ist als k_h , wird sich an der Schichtgrenze sicher ein Kapillarsaum ausbilden. Der Bodenwassergehalt wird sich dort nahe der Sättigung einstellen. Die Sensorkabel werden daher ebenfalls nahe der Schichtgrenze verlegt, um diesen Effekt zu detektieren.

Die vom IfH ermittelten Bodenparameter nach *van Genuchten* ermöglichen es, die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_u als Funktion des Wassergehalts darzustellen (siehe Gl. 2.3.5.). Mit der Beziehung (S_e siehe Gl. 2.3.1.)

$$k_u = k_s \cdot S_e^{0,5} \cdot (1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2 \quad (5.2.5.)$$

(gültig für unimodale Böden) kann diese eindeutig beschrieben werden. Die ermittelten pF-WG-Kurven zeigen, dass die Böden unimodal sind (keine Knicke im Kurvenverlauf). Das wird im weiteren auch vorausgesetzt. Der Verlauf der k_u - θ -Beziehung der drei Materialien ist in Bild 5.2.9. dargestellt. Es ist tatsächlich so, dass k_u in der Dränageschicht bei einem Wassergehalt von 10 Vol.-% größer ist als in den beiden Bodenschichten bei nahezu gesättigten Verhältnissen. Weiterhin ist zu sehen, dass k_u von Material 1 (untere Bodenschicht) immer größer ist als k_u von Material 2 (obere Bodenschicht). Die Voraussetzungen für die Gültigkeit der Randbedingungen für das Boden-Modell sind also gegeben.

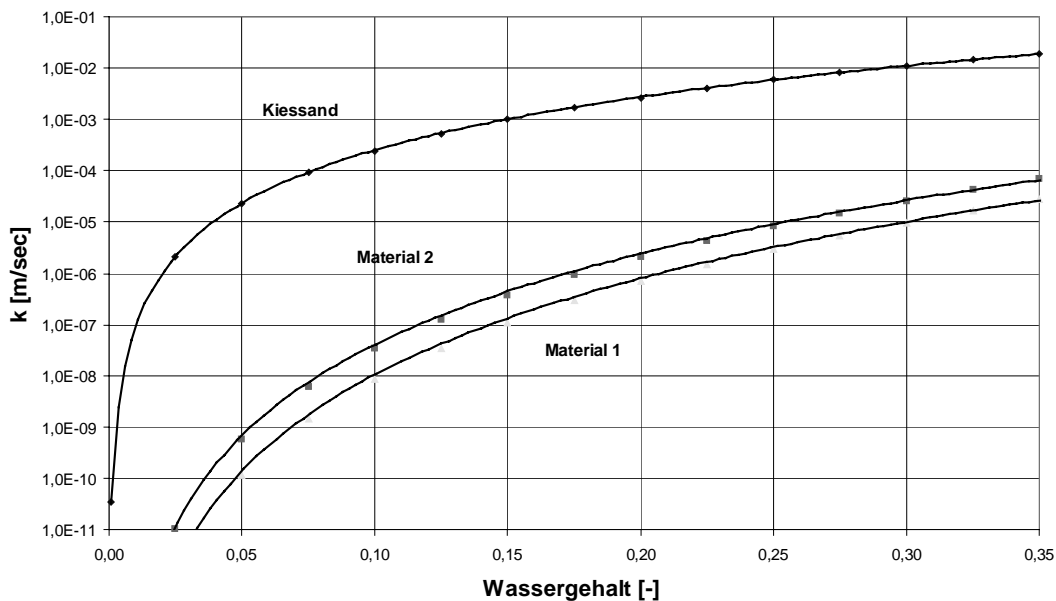


Bild 5.2.9.: Beziehung k_u zu θ für die verwendeten Materialien

Die DZ für das Material 1 (Realteil und Imaginärteil) wurde in Abhängigkeit verschiedener Wassergehalte bestimmt. Dabei wurde die Impulsfrequenz von 100

MHz stufenweise auf 1000 MHz erhöht. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer Frequenz höher als 400 MHz der Imaginärteil der DZ mit 2 konstant und im Verhältnis zum Realteil der DZ mit > 12 vernachlässigbar ist. Bild 5.2.10. zeigt die gemessenen Realteile der DZ in Abhängigkeit der Frequenz und des Wassergehaltes. Der Einfluss der Frequenz auf die DZ ist gering. Die Messeinrichtung ist beschrieben bei *Hübner, 97, und Schlaeger, 187a*.

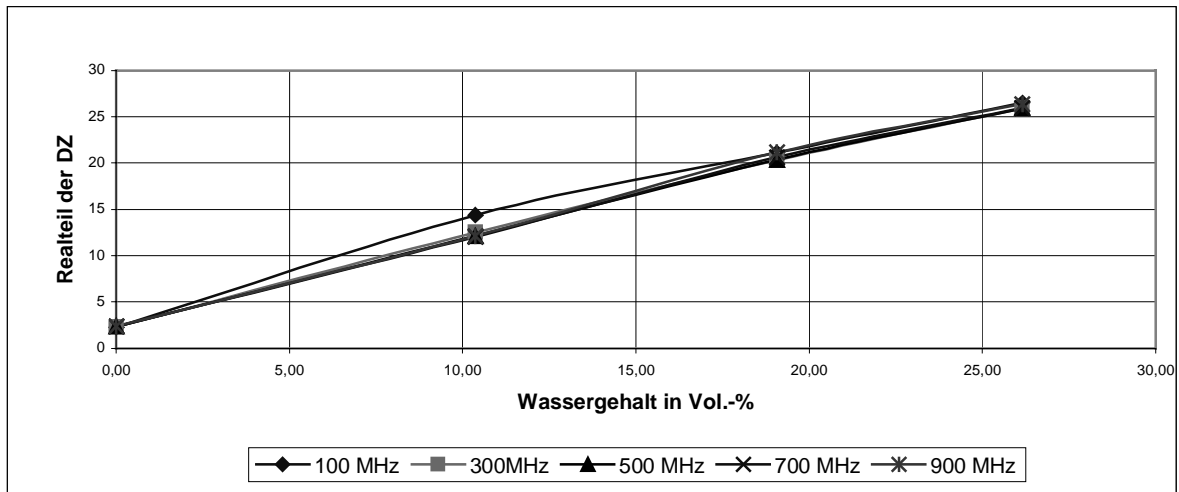


Bild 5.2.10.: Realteil der DZ der Materialien

Die Materialien sind mit dem gewählten Bodenfeuchte-Messverfahren ausreichend genau charakterisierbar. Es sind keine störenden Einflüsse von Inhaltsstoffen (beispielsweise eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit) zu erkennen. Im Bereich des Wassergehaltes von 5 Vol.-% bis 15 Vol.-% weicht die DZ bei 100 MHz nach oben ab. Das ist aber unschädlich, da die Messungen bei einer Frequenz von über 200 MHz durchgeführt werden.

5.2.4. Bau des Lysimeters (Bildokumentation)

Der Bau des Lysimeters auf dem Gelände des Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) erfolgte in zwei Abschnitten. Im August 2000 wurde das Lysimeter-Behältnis gebaut. Aus Gründen der zuverlässigen Dichtigkeit des Lysimeters wurde dazu ein Schwimmbecken gewählt. Anfang Dezember 2000 konnten die Infrastruktureinrichtungen (Ablaufbehälter, Speicherbehälter) geliefert und eingebaut werden. Der Lysimeter wurde mit den Bodenfeuchte-Sensoren ausgestattet und mit den Testböden gefüllt.

Der Bau wurde jeweils so terminiert, dass der Einbau des Bodenmaterials bei geeigneter Witterung erfolgen konnte. Ungünstig auswirken auf den Einbau würde sich z.B. starker Niederschlag, Sonneneinstrahlung oder starker Wind. Es ist weiter erforderlich, das Bodenmaterial frostfrei einzubauen. Die folgenden Bilder geben einen Eindruck vom Bauablauf.

Das Bild 5.2.11. zeigt den zu über der Hälfte im Boden eingegrabene Lysimeter. Davor sind der Messschacht und der Zwischenspeicher angeliefert. In Bild 5.2.12. wird der Bau des Leitungsgrabens zur Versorgung der Geräte und der Pumpen mit elektrischer Energie und zur Übertragung der gewonnenen Daten zum PC gezeigt.



Bild 5.2.11.: Lysimeters (Bauphase), Gefälle nach links



Bild 5.2.12.: Bau des Leitungsgrabens

Die zweite Lage der Bodenfeuchte-Sensoren ist im Bild 5.2.13. dargestellt. Zu sehen sind die fünf Sensoren, die den Lysimeter in Längsrichtung durchziehen, und der kurze (ein Meter) Sensor nahe dem Tiefpunkt. Ein weiterer kurzer Sensor ist, hier durch die Lysimeterwand verdeckt, nahe dem Hochpunkt angeordnet. Im Bild 5.2.14. ist dargestellt, wie das Bodenmaterial eingebracht wird. Auf Grund der Witterung war das Material ausreichend feucht, sodass eine Entmischung nicht zu besorgen war. Das Material wurde mittels Bagger in den Lysimeter eingegeben und dann von Hand verteilt und planiert. Die einzelnen Lagen (Dicke jeweils ca. 20 cm) wurden nach dem Planieren mit einer kleinen Rüttelplatte verdichtet. Insgesamt wurden sechs Lagen (unterste Lage Kiesfilter, Lage 2 und 3 aus Material 1, die Lagen 4 bis 6 aus Material 2) eingebaut. Die oberste Lage wurde nur abgezogen und nicht verdichtet, um später bei der Beregnung genügend Rauigkeit der Oberfläche zu gewährleisten, damit das Wasser nicht oberflächlich abläuft, sondern großflächig versickert.

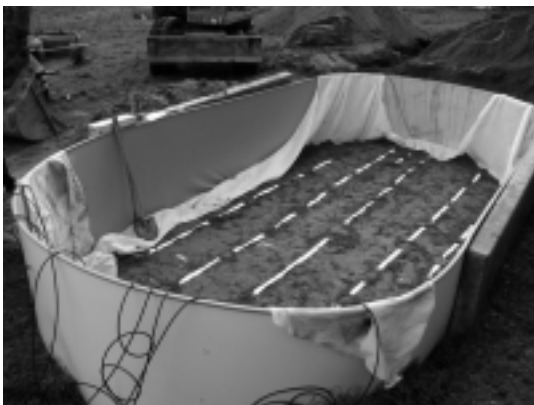


Bild 5.2.13.: Lage der TAUPE-Sensoren

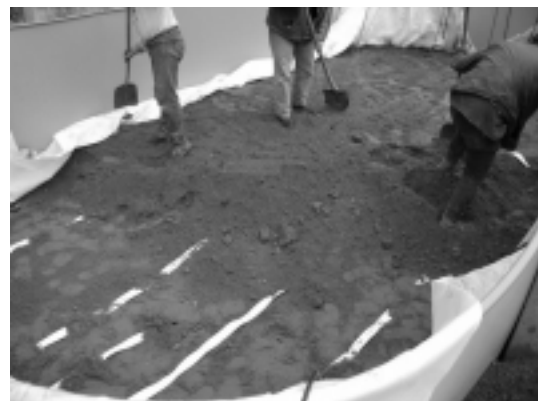


Bild 5.2.14.: Einbringen des Bodenmaterials

Die oberste Schicht trägt damit zu einer Vergleichmäßigung der Versickerung in die darunter liegenden Schichten bei. Dieser Effekt kann mit der oberen Lage der Bodenfeuchte-Sensoren auch gemessen werden.

Das Bild 5.2.15. zeigt den Einbau des Messschachtes und des Pufferbehälters. Im Messschacht wird über eine Wasseruhr der Lysimeterablauf gemessen und in einem 800 Liter großen Zwischenspeicher gepuffert.



Bild 5.2.15.: Einbau des Messschachtes



Bild 5.2.16.: Fertiggestellter Lysimeter

Das Wasser wird von dort in den Vorlagebehälter für das Beregnungswasser gepumpt. Die Beregnungswassermenge wird ebenfalls mit einer Wasseruhr gemessen. Die Menge wird mittels Membranventil und Schwimmkörper-Durchflussmesser geregelt. Die Koaxialkabel, die die Bodenfeuchte-Sensoren mit der Relaisbox verbinden, wurden an der Lysimeterwand im Hochpunkt senkrecht hochgeführt, um Effekte, wie Randumläufigkeit zu minimieren. Nach Abschluss der Baumassnahme erfolgte bis Ende Januar die Installation der Messgeräte. Der fertiggestellte Lysimeter ist in Bild 5.2.16. dargestellt.

5.3. Messtechnik

Ein Überblick über die eingebaute Messtechnik wird in Bild 5.3.1. gegeben.

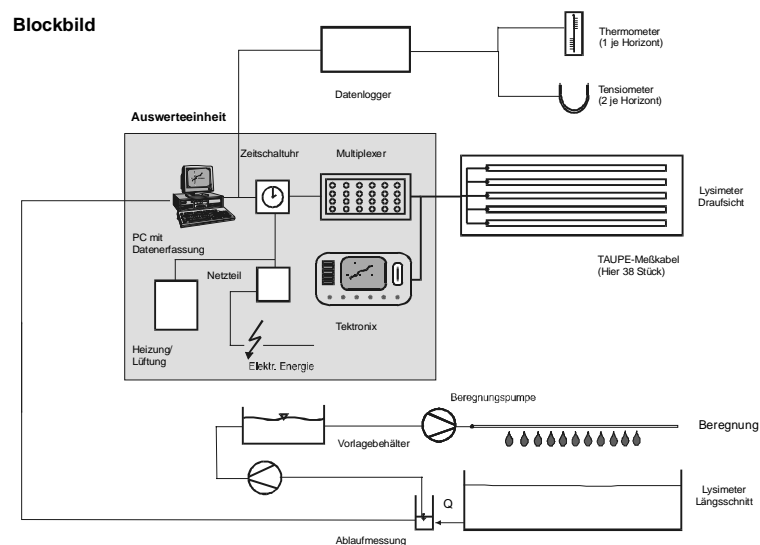


Bild 5.3.1.: Messtechnik im Lysimeter

Es sind die Gruppe der konventionellen Messtechnik (Tensiometer, Thermometer, Hygrometer, Durchflussmesser) und die Messung mit den Bodenfeuchte-Sensoren zu unterscheiden.

5.3.1. Konventionelle Messtechnik

Die Aufgabe der konventionellen Messtechnik ist die Verifizierung von Modellrandbedingungen. So wird der Luftraum über der obersten Bodenschicht mittels Hygrometer und Thermometer überwacht, um die Qualität der Dämmung gegen die Atmosphäre zu kontrollieren. Bei einer Luftfeuchte nahe der Sättigung wird aus dem Boden keine nennenswerte Wassermenge verdunsten, es gilt: $A_1 = 0$.

Mittels Tensiometer in zwei Profilen ($t = 20 \text{ cm}$ und $t = 70 \text{ cm}$) werden die Potenzialverhältnisse im Boden überwacht. Bei weitgehend homogenisiertem Bodenmaterial wird sich ohne Verdunstung und Pflanzenentzug immer ein Gradient in Richtung der Schwerkraft einstellen. Der Fluss ist also immer nach unten gerichtet. Weiter ist es erforderlich, die Bodentemperatur ebenfalls in zwei Profilen zu messen. Sie dient als Korrekturwert für die DZ des Bodens und zeigt auf, dass über den Querschnitt kein Temperaturgradient auftritt. Die Korrelation der Bodentemperatur mit der Luftraumtemperatur wird möglich.

Die Bodenoberfläche wird künstlich beregnet, d.h. die Modellrandbedingung $Z_1 = N$, wobei N gemessen wird, wird erfüllt. Ebenso wird der Ablauf aus dem Lysimeter gemessen, $Q_{ab} = Z_4$ wird sichergestellt.

Die Messsignale werden im Datenlogger in die Messwerte transformiert und auf PC in Tabellen abgespeichert und graphisch dargestellt. Die Messwerte werden alle zehn Minuten erfasst.

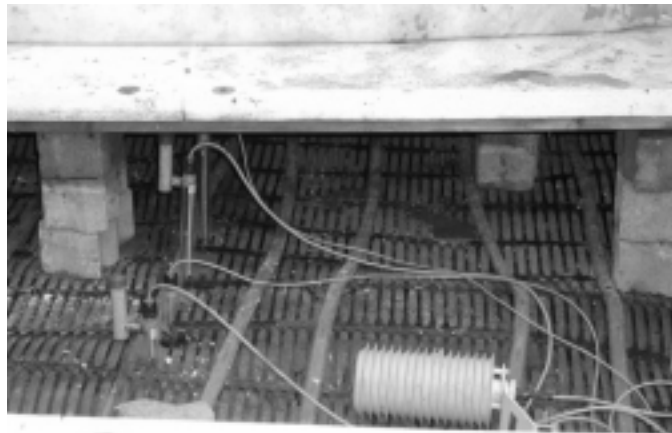


Bild 5.3.2.: Konventionelle Messtechnik im Lysimeter

Im Bild 5.3.2. wird ein Blick auf (v.l.n.r.) die Tensiometer (4 Stück) mit integriertem Thermometer, die Beregnungsschläuche und das Messgerät für die Lufttemperatur und die Luftfeuchte gegeben. Die Abdeckung der Oberfläche mittels Geogitter als Erosionsschutz ist ebenfalls sichtbar. Am oberen Bildrand ist die Dämmung des Lysimeters mittels 5 cm starker Styroporplatten zu erkennen. Diese werden noch mit einem Geotextil und einer Folie geschützt und abgedeckt.

5.3.2. Bodenfeuchte-Messsystem

Wie in Abschnitt 5.2.2. beschrieben, werden die Bodenfeuchte-Sensoren in einem engen vertikalen und horizontalen Raster verlegt. Der vertikale Abstand wurde mit 20 cm, der horizontale Abstand mit 50 cm (Randabstand) und 75 cm (Feldabstand) festgelegt. Die Sensoren werden an ihren Enden mit einem Koaxialkabel verbunden. Über das Koaxialkabel wird der aufgegebene Impuls zum Sensor geleitet und die Reflexionen zum Messgerät wieder zurückgeleitet. Um einen möglichst hohen Automatisierungsgrad zu erreichen, wurde ein „Multiplexer“ entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Sensoren automatisch nacheinander anzusteuern. Der Multiplexer besteht aus einer Steuereinheit und mehreren Schaltrelais. Impulslieferant ist ein handelsüblicher Kabeltester vom Typ Tektronix 1502 B. Die Geräte sind in Bild 3.2.4. und 5.3.4. abgebildet.

Die Dauer der Messung aller 38 Sensoren beträgt ca. 60 Minuten. Die Laufzeit des Impulses in den Sensoren wird acht Mal am Tag, d.h. alle drei Stunden gemessen. Die Daten (Verlauf der Impulskurven) werden abgespeichert. Mittels eines speziellen Auswerteprogramms wird aus den gemessenen Impulskurven die Impulslaufzeit ermittelt. Diese „Sensorlaufzeit“ kann dann nach den in Abschnitt 3.2.3. dargestellten Algorithmen in den Bodenwassergehalt (Vol.-%) umgerechnet werden (*Drnevich, 50, Heimovaara, 83 – 85*).

Der Steuercomputer wurde vom Kabeltester räumlich getrennt, um Erfahrungen sammeln zu können, wie in der Praxisanwendung die Geräte auf dem Feld untergebracht werden können. Vor Ort verbleiben der Kabeltester mit dem Multiplexer. Diese sind in einer mobilen Aluminiumbox untergebracht (siehe Bild 5.3.3. und 5.3.4.). In Bild 5.3.4. sind v.l.n.r. zu erkennen: Tektronix 1502 B Kabeltester, Batterie mit Netzgerät zur Spannungsnotversorgung, Datenlogger mit Speicherelement auf dem Multiplexer. Der Multiplexer wurde in die Wand der Box eingebaut, um die aufwändige Kabeldurchführungen zu ersparen (Bild 5.3.3., rechte Seite: Anschluss der Koaxialkabel an den Multiplexer).



Bild 5.3.3.: Messbox mit Anschluss der Sensoren



Bild 5.3.4.: Messgeräte in der Messbox

Die Box muss temperiert werden (Heizung an der Vorderseite, sichtbar in Bild 5.3.4.), da die Geräte nur einen zulässigen Temperaturbereich von 0°C bis 40°C haben. Das erfordert auch einen Sonnenschutz für den Sommer (siehe Zelt im Bild 5.2.16.). Der Steuer-PC wurde in ca. 30 m Entfernung in einer Garage untergebracht. Die Steuerung des Multiplexer erfolgt von dort, ebenso die Datenspeicherung, bisher

problemlos. Über die Distanz sind keine Verlust in der Auflösung der Impulskurven festzustellen.

Die Daten werden wöchentlich aufbereitet und abgeglichen, sodass Auffälligkeiten sehr schnell nachgegangen werden kann. Die Daten werden ebenfalls in Tabellen abgespeichert und graphisch dargestellt.

6. Verifizierung des Modells

Die Erfassung, die Aufbereitung und die Auswertung der aus dem Lysimeter gewonnenen Daten wird hier dargestellt. Im Abschnitt 6.1. werden die Grundlagen der Datenaufbereitung behandelt. Dazu gehört die Herleitung des Zusammenhangs der DZ mit der Laufzeit des Impulses durch den Sensor und die mathematische Beschreibung der gewonnenen Impulskurven (Abschnitt 6.1.1.). Ebenso wird in einer Analyse die Sensibilität der Ergebnisse auf die Variation der Parameter der Gleichung von Topp (Gl. 3.2.2.) untersucht, wie auch der Einfluss unterschiedlicher Differenzen der Impulslaufzeiten auf Sensorkabeln unterschiedlicher Länge (Abschnitt 6.1.2.). Die Aufbereitung der Daten aus den Referenzmessgeräten (Wasserspannung, Bodentemperatur, Lufttemperatur und Luftfeuchte) wird in Abschnitt 6.1.3. vorgestellt. Die Daten werden anhand von definierten Ereignissen qualitativ und quantitativ verifiziert. Die Erfassung der Daten aus den Feuchtesensoren wird im Abschnitt 6.1.4. geschildert. Die Sensoren werden kalibriert und die Übereinstimmung mit den definierten Ereignissen mit den Referenzmessungen abgeglichen.

In Abschnitt 6.2. wird die Durchführung des Versuches beschrieben. Anhand von Beregnungsereignissen wird der Durchfluss durch den Lysimeter bilanziert, um daraus die zeitlich veränderlichen Bodenparameter (Wassergehalt, hydraulische Leitfähigkeit) bestimmen zu können. Diese werden mit den aus der Messung des Wassergehalts mittels der Sensoren ermittelten Werten abgeglichen.

Im Abschnitt 6.3. werden die Versuchsergebnisse dargestellt und der weitere Untersuchungsbedarf definiert. Da die hydraulische Leitfähigkeit und der Durchfluss von den Modellrandbedingungen abhängig sind, wird geprüft, welchen quantitativen Einfluss jede dieser Randbedingungen auf die Ergebnisse hat und unter welchen Voraussetzungen auf die Kenntnis dieser Randbedingungen verzichtet werden kann.

6.1. Aufbereitung der Daten

Grundlage für die Aufbereitung der Daten ist die Darstellung der elektrophysikalischen Zusammenhänge der Impulsausbreitung in einem Leiter mit dem umgebenden Medium. Die erhaltenen „Impulskurven“ sind mathematisch zu analysieren, um aus ihrem Verlauf die exakte Laufzeit des aufgegebenen Impulses zu ermitteln. Die dazu erforderlichen Grundlagen werden dargestellt.

6.1.1. Grundlagen der Datenaufbereitung

Fließt ein Strom durch einen Leiter, so verändern sich sowohl die Stromstärke (I in [Ampère = A]), als auch die Spannung (U in [Volt = V]) über die Länge der Leitung. Betrachtet man ein Leiterelement der Länge dx , so kann man es im folgenden Ersatzschaltbild (Bild 6.1.1.) darstellen. Darin bedeuten:

- G Ableitungsstrom (S/m), der auf den anderen Leiter übergeht
- C Kapazitätsbelag (F/m), verursacht durch das elektrische Feld zwischen den beiden Leitern
- L Induktivitätsbelag (H/m), verursacht durch das elektrische Feld im Leiter
- R Widerstandsbelag (Ω/m) in Längsrichtung des Leiters

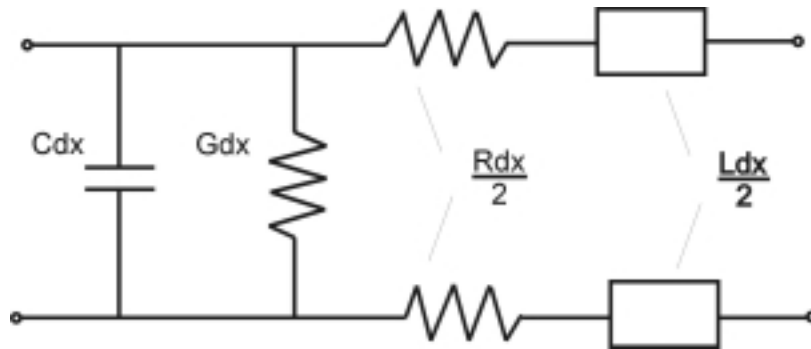


Bild 6.1.1.: Ersatzschaltbild eines Leiterelementes der Länge dx

Mit dem Ohmschen Gesetz und dem Kirchhoffschen Gesetz werden für die Spannung und die Stromstärke folgende Zusammenhänge aufgestellt:

$$-\frac{dU}{dx} = I * R + j * \omega * L * I = I * (R + j * \omega * L) \quad (\text{Gl. 6.1.1.})$$

$$-\frac{dI}{dx} = U * G + j * \omega * C * U = U * (G + j * \omega * C) \quad (\text{Gl. 6.1.2.})$$

mit dem imaginären Anteil (j) und der Frequenz (ω). Betrachtet man einen idealen Leiter, dessen Isolierung vollkommen ist und der selbst unendlich gut elektrisch leitet, so gilt:

$$G = 0 \quad \text{und} \quad R = 0,$$

und die Gleichungen 6.1.1. und 6.1.2. vereinfachen sich entsprechend. Zur Beschreibung der Fortpflanzung eines Impulses werden folgende Faktoren definiert:

| | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| Fortpflanzungsfaktor der Welle | $\gamma = \alpha + j \times \beta$ |
| realen Komponente (Dämpfungsfaktor) | α |
| imaginären Komponente (Winkelmaß) | β |

Im idealen Leiter wird die Dämpfung α zu 0. Das Winkelmaß β errechnet sich aus der Wellenlänge der Leitungswelle:

$$\frac{2 * \pi * c}{\omega} = \frac{2 * \pi}{\beta} \quad \text{mit} \quad \beta = \omega \sqrt{L * C} \quad \text{ergibt sich:}$$

$$c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L * C}} \quad (\text{Gl. 6.1.3.})$$

Beim idealen Leiter breiten sich die Wellen mit Lichtgeschwindigkeit ($c_0 \cong 3 * 10^8 \text{ m/s}$) im Leiter aus. Der Wellenwiderstand (Z) im idealen Leiter berechnet sich wie jeder Widerstand aus (Gl. 6.1.1. und Gl. 6.1.2.)

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{Gl. 6.1.4.})$$

Gl. 6.1.3. und Gl. 6.1.4. zeigen weiter, dass die Geschwindigkeit des Impulses (v) und der Wellenwiderstand (Z) des Leiters unabhängig sind von der Frequenz (ω). Spannungs- und Stromwelle sind in der gleichen Phase. In einem Zwei-Leiter-Sensor

mit dem Leiterabstand d und dem Leiterradius r gilt bei der geometrischen Voraussetzung $5 \cdot r < d$:

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{d}{r}} \quad (\text{Gl. 6.1.5.})$$

Dabei ist ϵ die Dielektrizitätszahl (DZ) des Mediums zwischen den beiden Leitern.

Mit dem Kabeltester Tektronix 1502B wird die Laufzeit eines auf einen Leiter aufgegebenen Impulses gemessen. Am Anfang des Sensors, dem Übergang des verbindenden Koaxialkabels auf den Sensor, entsteht ein Spannungssprung. Ebenso am Ende des Sensors, gleichgültig, ob der Sensor offen endet oder ob ein weiteres Koaxialkabel angeschlossen ist. Diese Charakteristik wird wie folgt abgebildet:

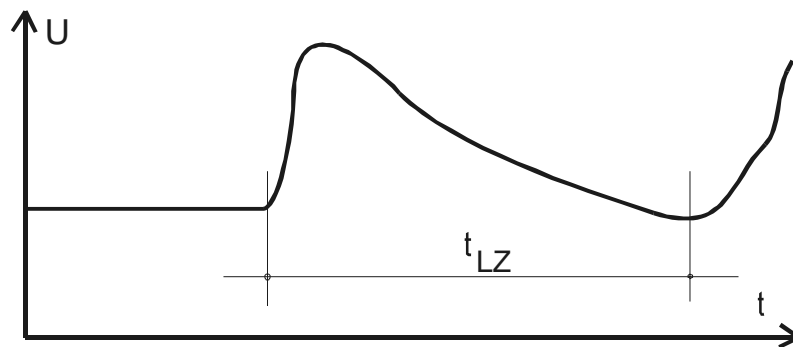


Bild 6.1.2.: Spannungsverlauf (schematisch) eines Impulses auf einem Sensorkabel

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit (c) ist nur im idealen Leiter gleich der Lichtgeschwindigkeit (c_0). Sonst ist sie vom Material (z.B. der Luft zwischen Mittelleiter und Abschirmung im Koaxialkabel) abhängig. Da die Länge des Sensors (l_{geo}) bekannt ist und die Laufzeit des Impulses (t_{LZ}) aus dem Diagramm (Bild 6.1.2.) bestimmt werden kann, errechnet sich die tatsächliche Geschwindigkeit ($c_{phys.}$) zu

$$c_{phys.} = \frac{l_{geo}}{t_{LZ}} \quad (\text{Gl. 6.1.6.})$$

Die Impedanz des Sensorkabels (entspricht dem Wellenwiderstand Z) lässt sich messtechnisch bestimmen. Wird ein Impuls aufgegeben, so ist ein Potentiometer am Sensorende so einzustellen, dass der Impuls gerade nicht mehr messbar ist. Der dabei eingestellte Wert am Potentiometer entspricht dem Wellenwiderstand. Zur Bestimmung der Eigenschaften des umgebenden Materials ist noch die Kapazität des Sensors zu bestimmen. Diese lässt sich mit Hilfe des folgenden Ersatzschaltbildes bestimmen.

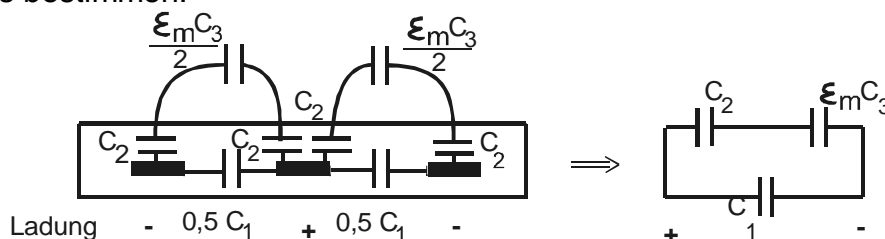


Bild 6.1.3.: Ersatzschaltbild eines Sensorkabels

Die Gesamtkapazität des Sensors (C_m) setzt sich zusammen aus der Kapazität im Isolator (C_1) auf dem direkten Verbindungsweg der Leiter, der Kapazität im Isolator (C_2) auf dem indirekten Weg über das Medium und der Kapazität des Mediums ($\epsilon_m \times C_3$) auf dem selben indirekten Weg. Die Kapazitäten sind in Serie geschaltet. Es ergibt sich die gesuchte C_m zu:

$$C_m = C_1 + \frac{C_2 * \epsilon_m * C_3}{C_2 + \epsilon_m * C_3} \quad (\text{Gl. 6.1.7.})$$

Die einzelnen Kapazitäten (C_1, C_2, C_3) werden aus Messungen in drei unterschiedlichen Medien mit jeweils bekannter DZ bestimmt. Dabei wird ausgenutzt, dass die DZ in Wasser ca. 80 beträgt, in Glasperlen ca. 2,5 und in Luft ca. 1. Es ist zu beachten, dass die DZ temperaturabhängig ist. Gemessen wird jeweils die Sensorlaufzeit t_{LZ} im Sensor, dessen Länge bekannt ist. Mittels Gl. 6.1.3. lässt sich über die Ausbreitungsgeschwindigkeit (c) die Materialkapazität C_m bestimmen. Die repräsentativen Kapazitäten ($C_{m,Wasser}, C_{m,Luft}$ und $C_{m,Glasperlen}$) sind Konstante. Mit den bekannten Kapazitäten kann Gl. 6.1.7. nach ϵ_m aufgelöst und ϵ_m berechnet werden:

$$\epsilon_m = \frac{(C_m - C_1) * C_2}{C_3 * (C_2 - C_m + C_1)} \quad (\text{Gl. 6.1.8.})$$

Der letzte Schritt ist nun die Bestimmung des Wassergehaltes θ aus der berechneten DZ. Dazu wird der Boden als ein Körper, der aus den drei Bestandteilen, nämlich Boden ($s = \text{soil}$), Wasser ($w = \text{water}$) und Luft ($a = \text{air}$) aufgebaut ist (3-Phasen-Modell), betrachtet. Es gilt:

$$s + w + a = 1 \quad (\text{Gl. 6.1.9.})$$

Das Volumen wird dabei als konstant angenommen, d.h. Schrumpfen und Quellen des Bodens wird vernachlässigt. Legt man einen 3-Phasen-Körper zwischen die Platten eines Kondensators, so errechnet sich dessen Kapazität wie folgt zu

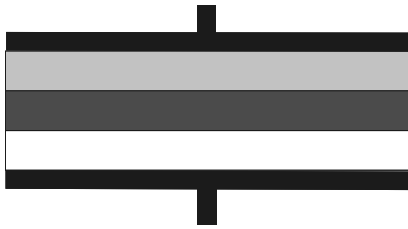
$$C = \epsilon * \frac{A}{d} \quad (\text{Gl. 6.1.10.})$$

mit $A =$ Fläche des Kondensators, $d =$ Abstand der Kondensatorplatten. Die DZ des Materials zwischen den Kondensatorplatten lässt sich aus den Anteilen der Einzelbestandteile berechnen:

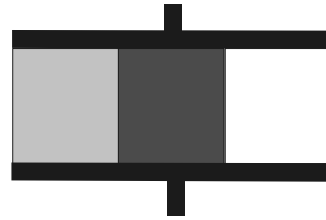
$$\epsilon^k = s * \epsilon_s^k + w * \epsilon_w^k + a * \epsilon_a^k \quad (\text{Gl. 6.1.11.})$$

Beim Einbau der Materialien zwischen die Kondensatorplatten können die beiden Extremfälle (Komponenten geschichtet und Komponenten parallel) unterschieden werden.

Fall 1: Komponenten geschichtet



Fall 2: Komponenten parallel



Ersatzschaltbild

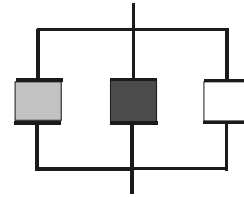


Bild 6.1.3.a.: idealisierte Anordnung der Bodenkomponenten im Kondensator mit Ersatzschaltbild

Im Fall 1 (Hintereinanderschaltung) wird der Exponent $k = -1$, im Fall 2 (Parallelschaltung) wird $k = 1$. Auswertungen von *Hübner (97)* haben gezeigt, dass, basierend auf den Untersuchungen von *Birchak* für Böden (Prinzip der ebenen Welle) der Exponent zu 0,5 zu wählen ist. Gleichung 6.1.11. erhält damit folgende Form:

$$\sqrt{\varepsilon} = s * \sqrt{\varepsilon_s} + w * \sqrt{\varepsilon_w} + a * \sqrt{\varepsilon_a} \quad (\text{Gl. 6.1.12.})$$

Die DZ von Luft ist mit ausreichender Genauigkeit = 1. Mit Gl. 6.1.9. kann Gl. 6.1.12. umgeformt werden zu:

$$\sqrt{\varepsilon_m} = s * (\sqrt{\varepsilon_s} - 1) + w * (\sqrt{\varepsilon_w} - 1) + 1 \quad (\text{Gl. 6.1.13.})$$

Gl. 6.1.13. lässt sich nach dem gesuchten Wassergehalt (w) auflösen. Da der erste Term ($s * (\sqrt{\varepsilon_s} - 1)$) gemäss Definition konstant ist und die DZ von Wasser nur von der Temperatur abhängig ist, lässt sich w eindeutig berechnen. Die DZ des Mediums ist der Messwert auf dem Sensorkabel. Bei unbekannter DZ des Bodens lässt sich diese durch mehrfache Messungen in Medien mit bekannter DZ bestimmen. Dieses Vorgehen wird auch für die Kalibrierung der Messeinrichtung benutzt.

Misst man die DZ in Abhängigkeit der Bodenfeuchte (θ) im Sand bei einer Frequenz von 500 MHz (der Imaginärteil der komplexen DZ verschwindet bei hohen Frequenzen), ergibt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den beiden Parametern. Es gilt:

$$\theta = f(\text{DZ}) = f(t_{LZ})$$

Graphisch aufgetragen ergibt sich Bild 6.1.4.:

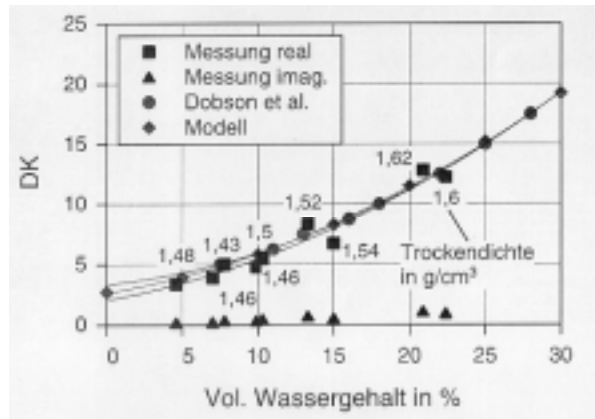


Bild 6.1.4.: Zusammenhang zwischen DZ und θ in Sand ($f = 500$ MHz)

Aus Gl. 6.1.3. und Gl. 6.1.6. ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Kapazität (C_m) und der Geschwindigkeit des Impulses auf dem Sensor. Die sensorcharakteristischen Einzelkapazitäten (C_1 , C_2 , C_3) sind bestimmt und bleiben konstant. Analog zu Bild 6.1.4. kann daraus die „Kennlinie“ des Sensorkabels berechnet werden. Dabei ist die DZ eine Funktion der Impulslaufzeit t_{LZ} .

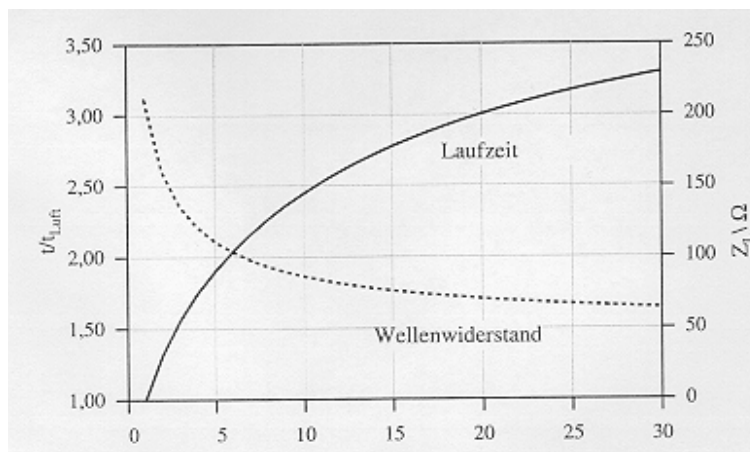


Bild 6.1.5.: „Kennlinie“ des Sensorkabels (Hübner,97)

Die Kurve in Bild 6.1.5. lässt sich durch ein Polynom dritten Grades annähern (Gl. 3.2.2. nach *Topp*). Wie in Kapitel 3 (siehe Seite 44, „Auswertung der Messsignale“) gezeigt, ist dieses Polynom nur noch von der Laufzeit des Impulses auf dem Kabelsensor abhängig. Die Auswertung erfolgt wie dort beschrieben über die mathematische Ermittlung der Laufzeit aus der aufgezeichneten Zeit-Spannungskurve (siehe auch schematisch in Bild 6.1.2.).

Diese Auswertung ist nicht trivial, da der Verlauf der Kurven nicht ideal glatt ist. Das Ende des Sensorkabels, das geometrisch mit dem Minimum der Spannung der Impulskurve zusammenfällt, ist nur mit aufwändigen mathematischen Operationen festzustellen. Während der Versuchsdurchführung konnten einige Unschärfen des mathematischen Algorithmus (linearer Versatz bzw. Streckung des Signals bei ungleichem Startpunkt der mathematischen Kurvenanalyse, unscharfe Bestimmung des Kurvenendpunktes bei „flachem“ Endknick in der Impulskurve, was zu

mehrdeutigen Ergebnissen führt, Abhängigkeit der Bestimmungsschärfe von der Sensorlänge, etc.) erkannt und der Algorithmus verbessert werden.

Abschließend soll noch geschildert werden, wie sich die DZ bei sehr geringen Wassergehalten verhält. Restwassergehalte (< 2 Vol.-%) werden näherungsweise dem „gebundenen“ Wasser gleichgesetzt.

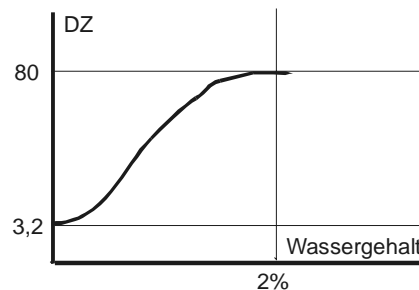


Bild 6.1.6.: Abhängigkeit der DZ von geringen Wassergehalten ($T = 20^{\circ}\text{C}$), Abstand von der Partikeloberfläche < 10 Moleküldurchmesser

Die DZ von Wasser steigt in diesem Bereich von ca. 3,2 stetig auf 80 an. Das bedeutet, dass sich die DZ von Wasser für $\theta \Rightarrow 0$ nicht wesentlich von der DZ des Bodens unterscheidet. Eine eindeutige Bestimmung des Wassergehaltes ist nicht möglich. Diese geringen Wassergehalte liegen i.d.R. unter dem Residualwassergehalt und deren Bestimmung ist für die vorliegende Betrachtung nicht weiter relevant.

6.1.2. Sensitivitätsbetrachtungen

Es werden folgende Einflussfaktoren betrachtet:

- o Einfluss der **Bodenparameter** (Kalibrierparameter aus der Bestimmung der Dielektrizitätszahl (DZ) in Abhängigkeit des Bodenwassergehaltes (WG))
- o Einfluss der **Impulslaufzeit** im Sensor auf die Wassergehaltbestimmung bei verschiedenen Sensorlängen

a. Einfluss der Bodenparameter

Im Labor wird die Abhängigkeit der DZ vom Feuchtegehalt des zu untersuchenden Materials ermittelt. Dazu wird bei verschiedenen WG die DZ einer Bodenprobe in einer speziellen Testapparatur (das den Sensor umgebende Material bildet darin das dielektrische Material entlang der Transmissionsstrecke) gemessen. Die DZ wird aus der Laufzeit eines aufgegebenen Impulses in einem Testsensor ermittelt. Diese Impulslaufzeit (LZ) im Sensor wird auf die Laufzeit des Impulses im Sensor in Luft bezogen. Mit dieser relativen LZ und den dazugehörigen Materialfeuchten werden in einer Kurve dritter Ordnung die Bodenparameter bestimmt (*Topp, Heimovaara*).

$$WG (\text{Vol.} - \%) = a1 * K^3 + a2 * K^2 + a3 * K + a4 \quad (\text{Gl. 6.1.14.})$$

Mit den Kalibrierparametern ($a1$, $a2$, $a3$ und $a4$) werden für Böden einer Klasse (z.B.

Sand) immer ähnliche Kurven beschrieben. $K = \frac{LZ_{\text{Sensor,Medium}}}{LZ_{\text{Sensor,Luft}}}$ stellt die relative

Sensorlaufzeit dar. Die Einflüsse der einzelnen Parameter werden an den

Messwerten des Sensors 3 im Lysimeter (Zeitraum: Februar bis September 2001) dargestellt.

Die Bodenkurve für das Lysimetermaterial wird so variiert, dass im ersten Fall die Parameter im oberen Bereich (hoher WG, hohe relative LZ) um bis zu 10% abgesenkt und im zweiten Fall im unteren Bereich (geringer WG, geringe relative LZ) um bis zu 10% angehoben werden. Das simuliert mögliche Fehler beim Messen der DZ bei extremen Bodenfeuchten (nass, trocken).

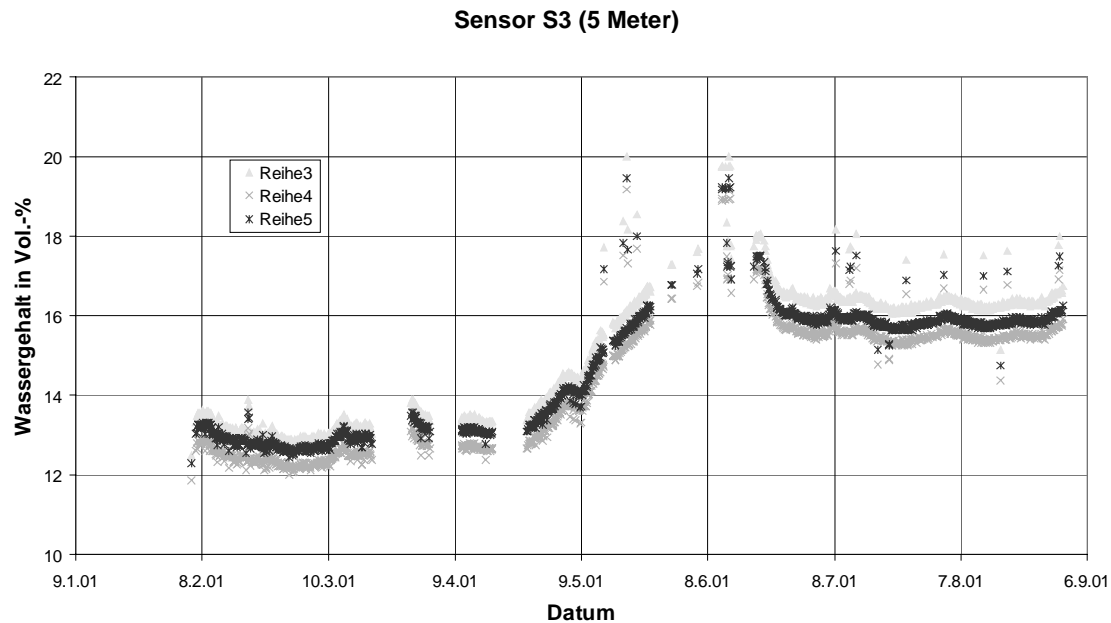


Bild 6.1.7.: Einfluss der Kalibrierkurvenform

Im ersten Fall (nass) wird der WG gegenüber dem der Ausgangsganglinie (Reihe 5) um weniger als 1 Vol.-% angehoben (Reihe 3), im zweiten Fall (trocken) um weniger als 1 Vol.-% abgesenkt (Reihe 4). Diese Abweichung ist unabhängig von der Sensorenlänge und vom Betrag des Ausgangs-WG. Das führt zu der Erkenntnis, dass aus einer veränderten, im Verlauf jedoch ähnlichen Eichkurve sich nur vernachlässigbar geringe Abweichungen im WG ergeben. Der Fehler im WG mit < 1 Vol.-%, der dazu noch systematischen Charakter hat und durch eine Nachkalibrierung mittels gemessener WG kompensiert werden kann, ist somit vernachlässigbar.

In Abhängigkeit von der Sensorenlänge hat die Parametervariation (die Koeffizienten a_1 bis a_4 wurden einzeln um jeweils 10% vermindert, abschließend (unterste Kurve) alle um 10% vermindert) auf den WG den in Bild 6.1.8. dargestellten Einfluss.

Die absolute Änderung des WG ist bei der Variation nur eines Parameters von der Sensorenlänge unabhängig. Auch ist sie nahezu unabhängig von der Größe des Ausgangs-WG. Das ist so zu erwarten, da in den vorliegenden WG-Bereichen die relative LZ in der gleichen Größenordnung liegt und die Kalibrierparameter linear eingehen. Vermindert man dagegen alle vier Parameter gleichzeitig, so ist ebenfalls eine Unabhängigkeit vom Ausgangs-WG zu erkennen, jedoch fällt die Abhängigkeit des Betrages der Änderung von der Sensorenlänge auf (Tabelle 6.1.1.). Bei längeren Sensoren nähert sich die Abweichung der maximalen Abweichung der Variation eines einzelnen Parameters, was auch aus der Form und dem Grad von Gl. 6.1.14. abzuleiten ist.

Sensor S3 (5 Meter)

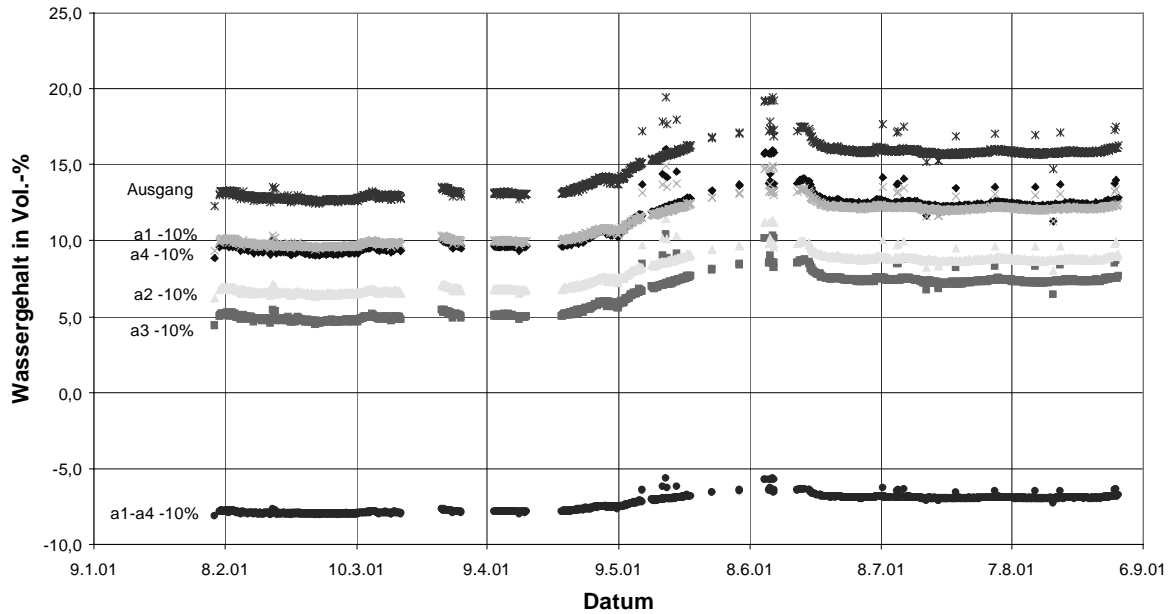


Bild 6.1.8.: Einfluss der Kalibrierparameter (a1 bis a4)

Folglich sind die Kalibrierparameter auf mindestens zwei Dezimalen genau anzugeben, sodass sich durch unbeabsichtigtes Runden keine nennenswerten Abweichungen ergeben.

| Sensorlänge | Kalibrierparameter | | | | | Ausg.- |
|------------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----------|--------|
| | a1 | a2 | a3 | a4 | a1 bis a4 | WG |
| | WG-Differenz | | | | | |
| 1 Meter | -5% | -8% | -9% | -4% | -44% | 20% |
| 5 Meter | -4% | -7% | -8% | -3% | -21% | 13% |
| 7 Meter | -5% | -8% | -9% | -4% | -11% | 17% |
| (alle Werte in Vol.-%) | | | | | | |

Tabelle 6.1.1.: WG-Differenz bei um 10% reduzierten Kalibrierparametern

Eine auch nur zufällige Varianz einzelner Parameter hat einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Dieser Fall stellt nur eine theoretische Fehlerquelle dar (Schreib- oder Übertragungsfehler) und wird weiter nicht verfolgt.

b. Einfluss der Impulslaufzeit im Sensor bei verschiedener Sensorlänge

Die Sensorlaufzeit wird über einen mathematischen Algorithmus (siehe *Heimovaara u. Bouten*, Gl. 3.2.2.) bestimmt. Dabei wird die Spannungskurve eines Impulses im Sensor analysiert. Diese hat folgenden Verlauf (siehe auch Bild 6.1.2):

Sensor S3

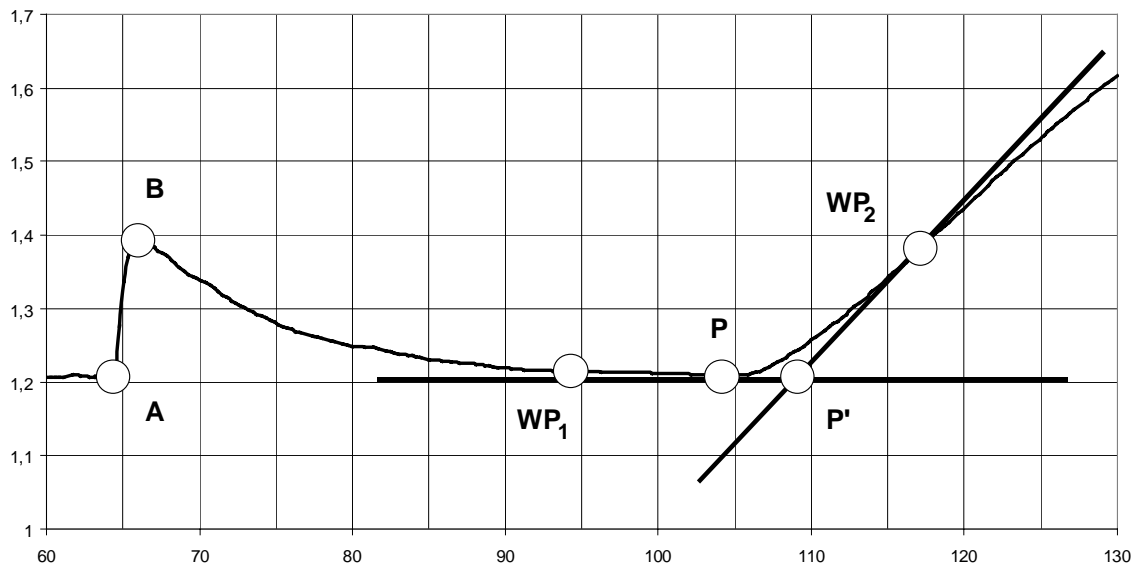


Bild 6.1.9.: Verlauf der Impulskurve im Sensor S3

Zu erkennen ist ein erster Spannungsanstieg zwischen einer LZ von 60 und 70 ns (Punkt A). An dieser Stelle mündet das Koaxialkabel (Verbindung des Sensorkabels mit der Steuereinheit) über ein Verbindungselement (Verbindung Koaxialkabel mit dem Sensorkabel, Punkt B) in das Sensorkabel. Danach fällt die Spannung ab (Abbau durch die Kapazität des Bodenmaterials) bis sie ab einer LZ von etwa 110 ns (Punkt P) wieder ansteigt. Hier endet das Sensorkabel offen. Im vorliegenden Fall liegt die LZ des Sensors bei

$$LZ (\text{Sensor S3}) = LZ (\text{gesamt}, P) - LZ (\text{Koaxialkabel}, A) - LZ (\text{Verbindungselement}, B)$$

$$LZ (\text{Sensor S3}) = \text{ca. } 108 \text{ ns} - \text{ca. } 66 \text{ ns} - < 1 \text{ ns} = \text{ca. } 41 \text{ ns}$$

Zur mathematischen Bestimmung der LZ (gesamt) wird entlang der Spannungskurve der Punkt P gesucht. Dieser liegt in einem lokalen Minimum, d.h. die Ableitung der Funktion (Steigung der Funktion) wird Null (waagrechte Tangente) und die zweite Ableitung ist positiv. Um den so nur grob bestimmten Punkt P werden rechts und links die Wendepunkte (WP_1 , WP_2) der Impulskurve bestimmt. Die Tangenten in den Wendepunkten schneiden sich im Punkt P', dessen Lage überschlägig gleich P gesetzt wird. Die Abszisse von P (bzw. P') ist die Gesamtlaufzeit des Impulses. Davon ist jetzt noch die LZ im Koaxialkabel und im Verbindungselement abzuziehen. Die LZ im Koaxialkabel wird hier als konstant angenommen, die LZ im Verbindungselement kann i.d.R. vernachlässigt werden und wird der LZ im Koaxialkabel zugerechnet.

In Abhängigkeit der Ausbildung des Knicks der Impulskurve am Sensorkabelende, wird P' mit einer mehr oder weniger starken Abweichung vom „echten“ Sensorkabelende bestimmt. Ist der Knick sehr flach, so wird die berechnete LZ höher als die tatsächliche LZ, d.h. der Punkt P' liegt zu weit rechts. Dieser Fehler hat einen systematischen Charakter, konnte bisher dennoch vernachlässigt werden, da die Sensoren lang waren (> 10 Meter). Es interessierte nur der relative Verlauf, da durch

Kalibrierung über gemessene Bodenwassergehalte eine parallele Verschiebung in vertikaler Richtung der WG-LZ-Kurven erfolgte.

Im vorliegenden Fall sind kurze Sensoren unterschiedlicher Länge (ein bis sieben Meter) im Lysimeter eingebaut. Außerdem ist nicht nur der qualitative Verlauf des Boden-WG gesucht, sondern seine exakte quantitative Bestimmung gefordert. Im maßgeblichen Beobachtungsbereich ist auf Grund der Bodencharakteristik bei einer nur geringen Änderung der Boden-WG eine deutlich Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit zu erwarten.

Es wird überschlägig abgeschätzt, wie sich Fehler aus einer geometrisch nicht exakten Bestimmung der Impulslaufzeit im Sensorkabel auf die Berechnung des Wassergehaltes (über die DZ) des den Sensor umgebenden Mediums auswirken. Setzt man voraus, dass gilt:

$$\langle (x - \bar{x})(y - \bar{y}) \rangle = 0 \quad (\text{Gl. 6.1.15.})$$

so werden die gemischten Terme im Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz = 0. Die Größe des Fehlers Δf wird zu (allgemeine Formel)

$$\Delta f(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta y\right)^2} \quad (\text{Gl. 6.1.16.})$$

In der Verknüpfung der DZ mit dem WG ($\theta(t) \approx \varepsilon(t)f(t)$) existiert nur eine Variable (=t). Damit kann die allgemeine Formel (Gl. 6.1.16.) verkürzt werden auf:

$$\Delta f(x) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2} = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right) \quad \text{mit} \quad x = t \quad (\text{Gl. 6.1.17.})$$

Im vorliegenden Fall gilt für die Funktion:

Aus $v = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon}}$ folgt $\sqrt{\varepsilon} = \frac{c_0}{c}$ (mit c = Ausbreitungsgeschwindigkeit des Impulses im

Sensor, c_0 = Lichtgeschwindigkeit). Mit $v \propto \frac{1}{t}$ folgt $\sqrt{\varepsilon} \propto \frac{t}{t_0}$ und $\varepsilon \propto \frac{t^2}{t_0^2}$.

Eingesetzt in $\Delta f(x)$ erhält man den relativen Fehler zu:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{t_0^2} \sqrt{(2t \Delta t)^2} \frac{t_0^2}{t^2} = \frac{2\Delta t}{t} \quad (\text{Gl. 6.1.18.})$$

was einer Funktion erster Ordnung entspricht. Der relative Fehler verhält sich somit in seiner Größe linear zur Impulslaufzeit (t) und damit zur Sensorlänge (L).

Eine weitere Fehlerquelle steckt in der LZ in den Koaxialkabeln, die im Auswertalgorithmus konstant gesetzt werden. Durch Temperaturunterschiede (z.B. direkte Sonneneinstrahlung) können in den auf der Bodenoberfläche liegenden Koaxialkabeln Dehnungen entstehen, die LZ-Verlängerungen bis zu 3 % (entspricht bei der hier vorliegenden Länge ca. 2 ns) verursachen. Im Algorithmus ist lediglich eine

Änderung der Koaxial-LZ als Korrektur möglich. Daher wird im folgenden diese LZ zur Korrektur-LZ definiert. Somit können Abweichungen (z.B. Kalibrierung des Lysimeters mit Wassergehalten aus Beprobungen) über diesen Faktor in die weitere Berechnung eingespeist werden.

Die Variation der Koaxial-LZ hat folgende Auswirkung:

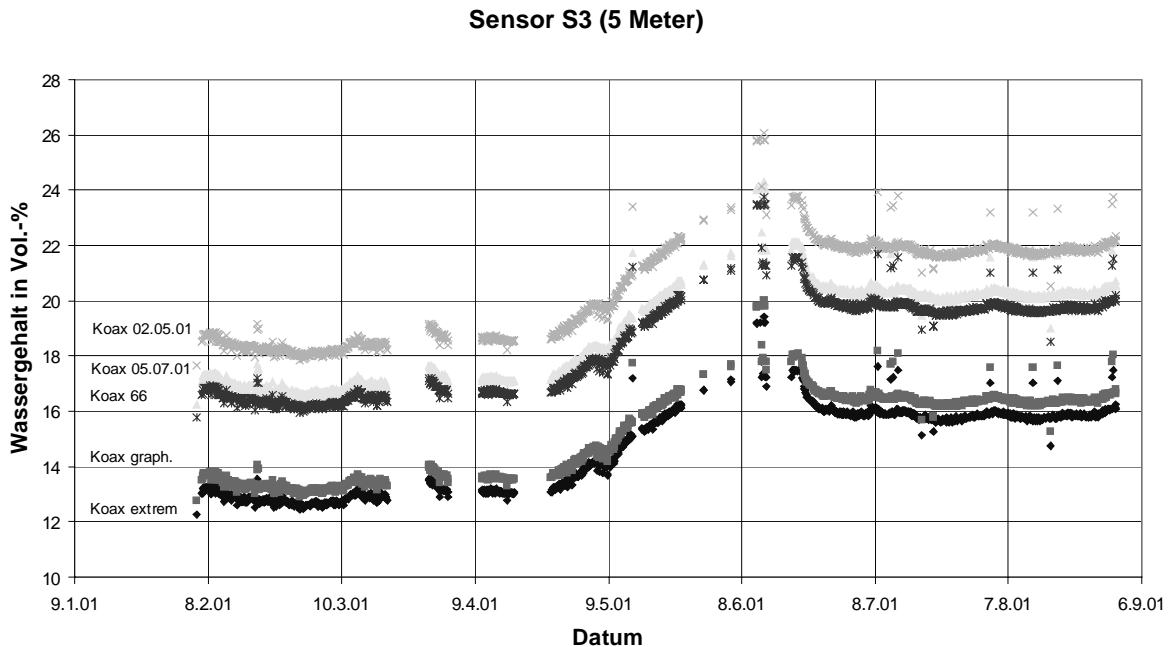


Bild 6.1.10.: Variation der Koaxialkabel-Laufzeit (abgestimmt auf verschiedene Ereignisse)

Die WG-Ganglinien laufen parallel, d.h. wie oben gezeigt bewirkt die Variation der Koaxial-LZ eine parallele Verschiebung. Die LZ-Differenz hat auf die WG-Berechnung folgende Auswirkung:

| Sensorlänge | Laufzeit | LZ-Differenz in ns | | | | | | | | | | | |
|--|----------|--------------------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|------|--|
| | | 1,1 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,9 | 2,1 | 4,1 | 4,5 | 5,5 | 10,1 | |
| 1 Meter | 7 ns | 8,1 | - | - | - | 11,1 | 12,8 | 14,2 | - | - | - | - | |
| 5 Meter | 38 ns | - | 1,4 | 2,1 | - | - | - | - | 5,0 | 5,6 | - | - | |
| 7 Meter | 58 ns | - | - | - | 1,6 | - | - | 2,3 | - | - | 5,9 | 10,5 | |
| Veränderung des berechneten Wassergehalts in Vol.-% | | | | | | | | | | | | | |

Tabelle 6.1.2.: Veränderung des berechneten WG in Abhängigkeit von Sensorlänge und LZ-Differenz

Bezieht man die Änderung des volumetrischen WG des Bodens auf die LZ-Differenz, erhält man die für die Sensorlänge „charakteristische Konstante“. Die „charakteristischen Konstanten“ (Tabelle 6.1.3.) sind umgekehrt proportional zur Sensorkabel-Länge. Diese Erkenntnis führt zur Definition einer Mindestsensorkabel-Länge bei automatischer Auswertung mit konstanter Koaxial-LZ. Variiert man nämlich die Geometrie der Impulsverlaufskurve im Punkt P (siehe Bild 6.1.9.), so erhält man bei „flacher“ Anstiegskurve eine maximale Abweichung der geometrischen zur mathematischen Bestimmung des Sensorkabelendes (Lage von P) von

< 7 ns.

Je ausgeprägter der „Knick“ an der Stelle P ist, desto geringer wird die Abweichung.

| Sensordlänge | charakt. Konst. (Vol.-%/ns) | Varianzbereich |
|--------------|--------------------------------|----------------|
| 1 Meter | 6,85 | +4%/-3% |
| 5 Meter | 1,22 | +13%/-15% |
| 7 Meter | 1,06 | +2%/-3% |

Tabelle 6.1.3.: „Charakteristische Konstante“ in Abhängigkeit der Sensordlänge

Die Ausprägung des „Knicks“ ist auch von der Sensorkabellänge abhängig, i.a. gilt: Je kürzer der Sensor, desto ausgeprägter der „Knick“.

c. Zusammenfassung

Wird bei der Kalibrierung des Bodenmaterials ($DZ = f(WG)$) im Labor die Kurve genau genug beschrieben (wichtig ist dabei der Verlauf in der Kurvenmitte), so sind die Messfehler im Randbereich für die weitere WG-Bestimmung nahezu unerheblich. Da Böden ähnlicher Textur (Sande, Tone, Bentonite) ähnliche Kalibrierkurven haben, kann aus den Kalibrierparametern nur ein vernachlässigbarer Fehler, der sich im übrigen durch eine Nachkalibrierung über in-situ gemessene WG korrigieren lässt, resultieren.

Dagegen bringt eine nur kleine Variation der einzelnen Kalibrierparameter (bei festgehaltenen anderen Kalibrierparametern) hohe, von der Sensordlänge unabhängige, Änderung des berechneten WG. Die absolute Änderung des WG ist unabhängig von der Größe des Ausgangs-WG. Die Variation diente zur Abschätzung von Fehlern, die auf Grund von mangelhafter Datenübertragung entstehen können. Sie haben keine bodenmechanische oder elektrotechnische Begründung.

Der wichtigste Fall für die Messpraxis ist die Varianz der Sensor-LZ. Die berechnete Sensor-LZ kann von der „echten“ abweichen auf Grund einer unzureichenden mathematischen Bestimmung des Impulsendpunktes und der Festlegung des Sensoranfangs mit einer konstanten LZ des Impulses im Koaxialkabel. Es konnte gezeigt werden, dass bei kurzen Sensoren (< 10 Meter Sensordlänge) die Sensor-LZ sehr genau bestimmt werden muss, da ansonsten große Fehler (proportional zur Sensordlänge) auftreten. Durch Temperatureinfluss kann die LZ im Koaxialkabel um mehrere ns variieren. Die Koaxialkabel sind daher entsprechend geschützt zu verlegen.

Insgesamt ergab sich der Bedarf, den mathematischen Algorithmus zur Bestimmung der Sensor-LZ zu verbessern. Sowohl Sensoranfang als auch Sensorende werden mit hoher Genauigkeit bestimmt, um definierte Randbedingungen zur Berechnung der WG zu erhalten. Auch bei der Kalibrierung der Messfelder sind vertrauenswürdige, nur vom Bodenmaterial beeinflusste Messwerte notwendig, um bodenmechanisch und elektrotechnisch belastbare Anpassungen durchführen zu können.

6.1.3. Referenzmessungen

Mit konventioneller Messtechnik werden folgende Einflussgrößen im Lysimeter überwacht:

- Luftraum zwischen dem Lysimetermaterial und der Dämmung/Abdeckung (Lufttemperatur und Luftfeuchte)
- Das Lysimetermaterial selbst (Bodentemperatur und Saugspannung in zwei Horizonten)
- Zulauf (Beregnung) und Ablauf, jeweils mittels Wasseruhr

a. Luftraum über dem Lysimetermaterial

Die Ganglinie der Lufttemperatur zeigt, dass die Wärmedämmung an der Oberfläche (5 cm Styropor) wirksam und ausreichend ist. Selbst im Sommer bei starker Sonneneinstrahlung lag die Temperaturdifferenz zwischen dem Tagesmaximum am Nachmittag und dem Minimum in der Nacht bei weniger als 5°C. Deutlich sind die höheren Temperaturdifferenzen im Februar 2001 (Lysimeter war nicht abgedeckt, ΔT liegt bei bis zu 20°C) und am 20. April 2001 (Lysimeter wurde aufgedeckt, um die Beregnungsanlage zu installieren) zu erkennen.

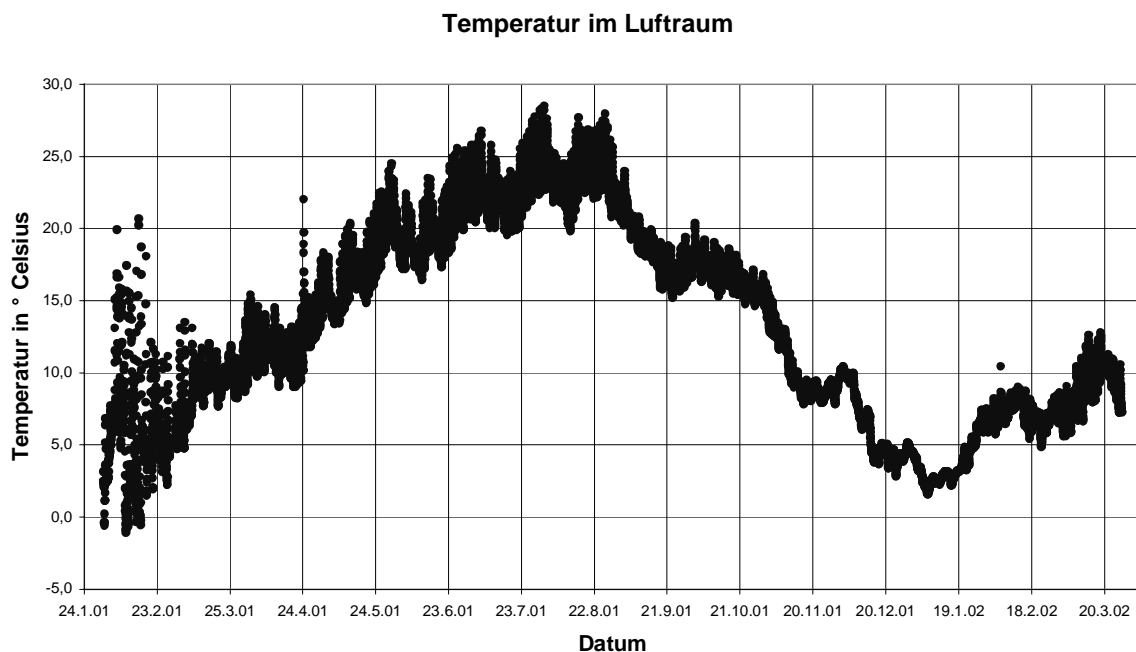


Bild 6.1.11.: Ganglinie der Lufttemperatur im Luftraum über dem Lysimetermaterial

Parallel liegt die Feuchtesättigung der Luft in diesem Luftraum bei > 90%, d.h. in Abhängigkeit der höheren Temperatur am Nachmittag sinkt die relative Feuchte leicht ab, um dann bei sinkender Temperatur in der Nacht wieder auf 100% zu steigen. Die Einflüsse im Februar (keine Abdeckung) und am 20. April (Installation der Beregnung) sind ebenfalls deutlich zu erkennen. Seit Anfang September 2001 fallen die täglichen Schwankungen geringer aus, was mit einer veränderten Lage des Hygrometers zusammenhängt. Die erkennbare Drift (die Sättigung steigt von anfangs 98% auf über 101% an) über den Zeitraum ist für die Interpretation unerheblich.

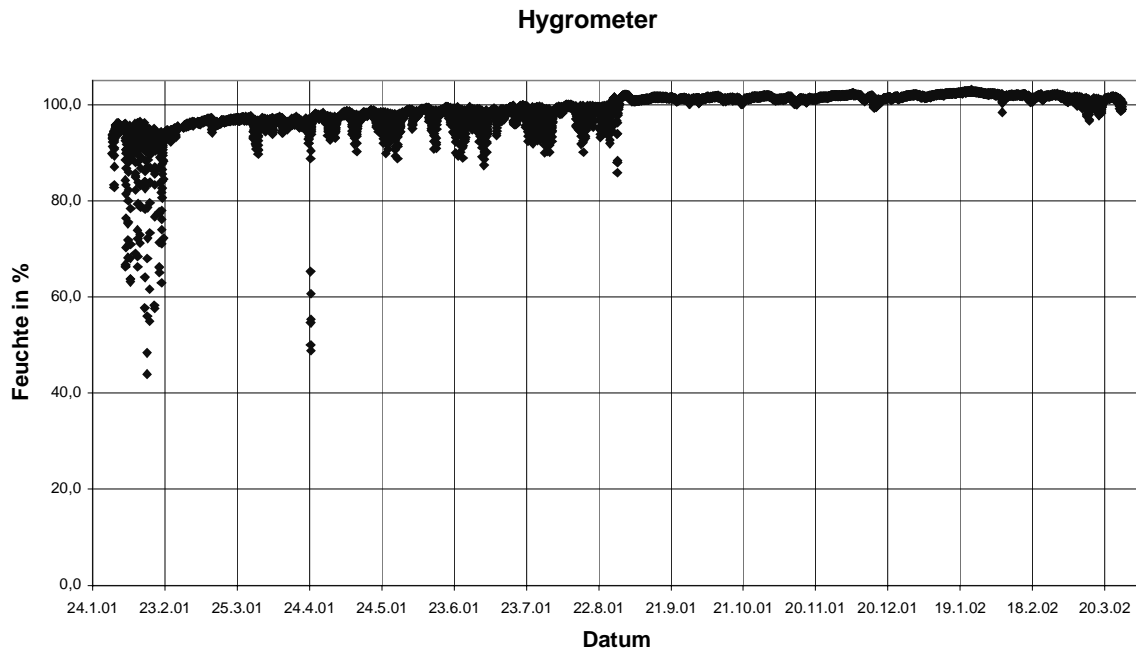


Bild 6.1.12: Verlauf der Luftfeuchte im Luftraum über dem Lysimetermaterial

Insgesamt gilt:

- Die Abdeckung des Lysimeters ist ausreichend dicht und dämmt ausreichend (geringe tägliche Temperatur- und Luftfeuchtedifferenzen).
- Die relative Luftfeuchte liegt im Bereich der Sättigung, d.h. eine Verdunstung aus der Lysimeteroberfläche in den Luftraum ist auszuschließen. Die bei der Beregnung aufgebrauchte Wassermenge dringt in den Lysimeter ein und wird vollständig nach unten abgegeben.
- Mit der Lufttemperatur besteht eine Referenzgröße für die Verifizierung der gemessenen Bodentemperatur.

b. Überwachung des Lysimetermaterials

Die Temperatur im Lysimetermaterial wird in zwei Horizonten gemessen, und zwar 20 cm (THL1) und 70 cm unter der Oberfläche (THL2). Der THL1 zeigt einen nur geringen Tagesgang in der Zeit starker Sonneneinstrahlung (Mai/Juni und Ende Juli), wobei die maximale Temperaturdifferenz (Tag-Nacht) bei $\Delta T < 0,2^\circ\text{C}$ liegt. Dieser Gang korrespondiert etwas zeitversetzt mit dem Verlauf der Temperatur im Lysimeterluftraum. Der Graph von THL1 bildet außerdem den unteren Abschluss der Kurve der Luftraumtemperatur, lediglich ab September ist die Bodentemperatur wegen der verzögerten Reaktionszeit nachts etwas höher als die Luftraumtemperatur. Auch in 70 cm Tiefe wird der Verlauf der Luftraumtemperatur etwas zeitverzögert wiedergegeben. Die Spitzen und Senken sind wegen der verstärkten Pufferung im Material, der verstärkten Trägheit des Systems, weniger stark ausgebildet. So ist es zu erklären, dass die Kurve von THL2 ab September über der von THL1 liegt. Die in dieser Tiefe gespeicherte Wärme muss über die Oberfläche (Ausbildung eines Gradienten) oder das angrenzende Erdreich abgegeben werden. Der Temperaturgradient ist gegenüber Frühjahr/Sommer umgekehrt gerichtet.

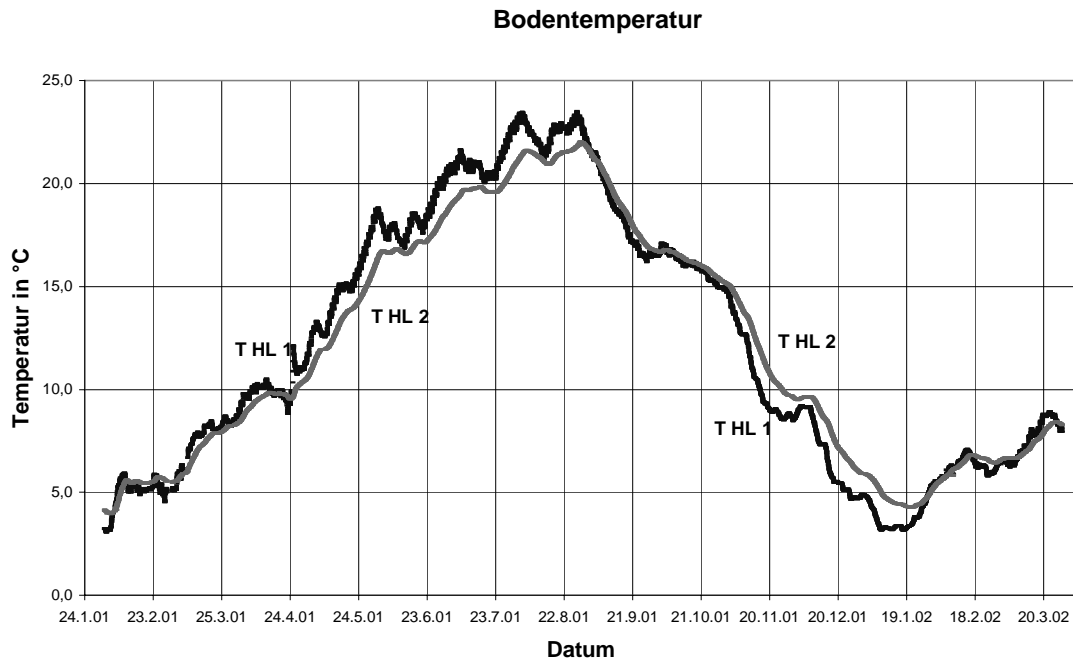


Bild 6.1.13.: Bodentemperatur in zwei Horizonten (Tiefe 20 cm (THL1) und 90 cm (THL2))

Die maximale Temperaturdifferenz (Februar/August) liegt bei THL1 bei ca. 21°C und bei THL2 bei ca. 18°C. Dieser Temperatureinfluss ist bei der Darstellung der Saugspannungen als Korrekturglied einzusetzen. Insgesamt zeigen die beiden Kurvenverläufe die erwarteten Größenordnungen. Die ausreichende Dämmung des Lysimeters wird daraus bestätigt. Der Wärmeaustausch erfolgt über die ungedämmten Seitenwände zum anstehenden Boden hin und natürlich über die Dämmung bei gekappten Tagesspitzen..

Die Tensiometer sind in den beiden Profilen jeweils doppelt angeordnet. Die beiden „oberen“ Tensiometer (T1 und T3) sind ca. 20 cm unter der Geländeoberkante, die beiden „unteren“ Tensiometer (T2 und T4) ca. 70 cm unter Geländeoberkante eingebaut. Jeweils ein Tensiometer je Profil ist mit den oben schon erwähnten Temperaturfühlern bestückt. Der Verlauf der beiden Tensiometer in gleicher Tiefe ist über den gesamten Beobachtungszeitraum nahezu identisch. Die Messwerte sind vertrauenswürdig. Auch die absolute Einbauhöhe von ca. 40 cm bzw. ca. 90 cm über dem dichten Lysimeterboden wird mit der maximalen (temperaturbereinigten) Saugspannung von 40 hPa bzw. 90 hPa bestätigt. Die Tensiometer arbeiten plausibel. Der Temperatureinfluss ist in der Zeit Juli/August sichtbar. Bei konstanter Bodenfeuchte steigen die Saugspannungen in den beiden Querschnitten jeweils um ca. 3 hPa an (>40 hPa bzw. > 90 hPa).

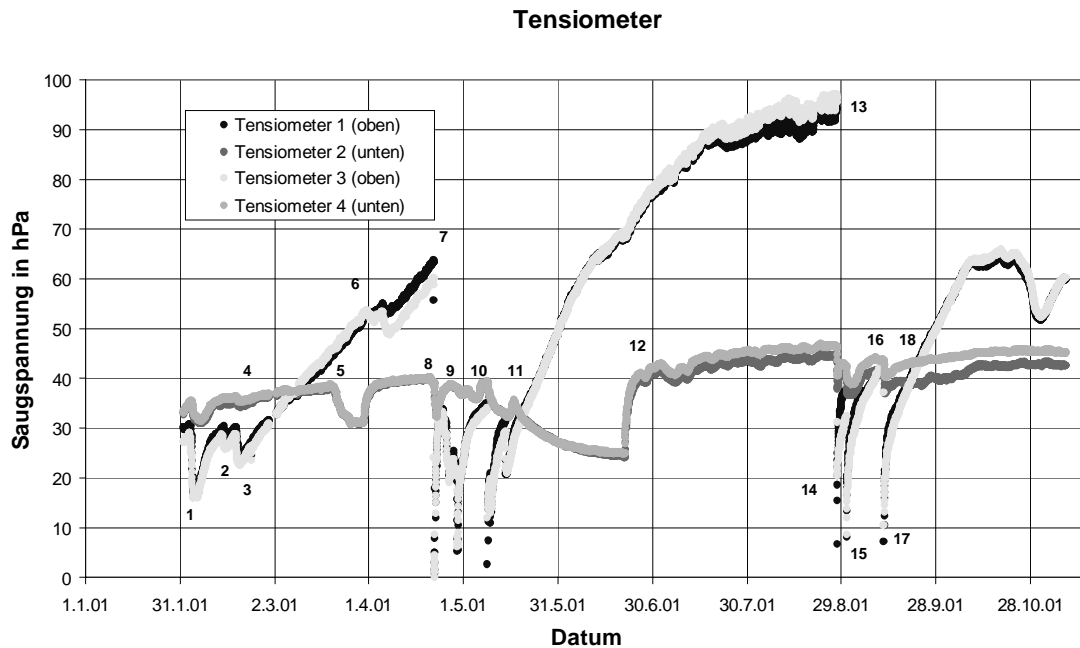


Bild 6.1.14.: Verlauf der Saugspannungen im Lysimeter (Tensiometer 1 bis 4)

Die folgenden Ereignisse spiegeln sich in der Tensiometerganglinie wieder:

| Lf.-Nr. | Datum | Ereignis |
|---------|------------|---|
| 1 | 03.02.2001 | Lysimeter nicht abgedeckt, Regenereignis |
| 2 | 13.02.2001 | Lysimeter nicht abgedeckt, Regenereignis |
| 3 | 17.02.2001 | Lysimeter nicht abgedeckt, Regenereignis |
| 4 | 22.02.2001 | Lysimeter abgedeckt mit Plane |
| 5 | 20.03.2001 | Testfeld offen, Einbau der Dämmung, evtl. Wasser von der Plane bei Tensiometer 2 und 4 versickert, oder Manipulation am Tensiometerkopf (Tensiometer 1 und 3 sind völlig unbeeinflusst) |
| 6 | 05.04.2001 | ? evtl. Regenwasserzutritt durch die Plane |
| 7 | 21.04.2001 | Reaktion auf die Installation der Beregnung am 20.04.01 |
| 8 | 27.04.2001 | Probelauf Beregnung (geschätzt ca. 300 Liter) |
| 9 | 08.05.2001 | Beregnung über 90 Minuten (311 Liter über Wasseruhr) |
| 10 | 09.05.2001 | Beregnung über 45 Minuten (102 Liter über Wasseruhr) |
| 11 | 14.05.2001 | Beregnung über 30 Minuten (105 Liter über Wasseruhr) |
| 12 | 21.06.2001 | Ablauf-Wasseruhr zeigt um 9:20 und 10:00 Uhr je 10 Impulse (je 100 Liter fließen konzentriert ab) |
| 13 | 24.08.2001 | Der Lysimeter ist nahezu ausgetrocknet |
| 14 | 27.08.2001 | Erneute Beregnung (gesamt ca. 300 Liter über Wasseruhr) |
| 15 | 30.08.2001 | Beregnung mit insgesamt ca. 200 Liter |
| 16 | 07.09.2001 | ca. 150 Liter aus Vorlage abgepumpt, Ablauf tropft ohne Anzeige |
| 17 | 11.09.2001 | Filter der Tensiometer gewechselt, Lysimeter für 30 min. offen, Beregnung 200 Liter |
| 18 | 21.09.2001 | Ablauf leergepumpt (h=45,5cm auf h=18,5cm, ca. 180 Liter) |

Tabelle 6.1.4.: Ereignistabelle der Tensiometermessungen (vgl. Bild 6.1.14.)

Die gemessene Saugspannung ist außerdem Referenzparameter zum Abgleich der gemessenen Materialfeuchte mit den im Labor ermittelten pF-WG-Kurven. Hiermit können diese Kurven bestätigt oder korrigiert werden und mittels der van-Genuchten/Mualem-Parameter (VGM) kann die jeweils gesuchte ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) ermittelt werden.

c. Zulauf- und Ablaufwassermenge

Der Zulauf (Wasseruhr mit 1 Impuls je 100 Liter Durchfluss) ist einfach zu messen. Da zur Berechnung des Lysimeters die Pumpen eingeschaltet werden müssen, kann die Wassermenge parallel zur Aufzeichnung über den Datenlogger auch direkt abgelesen werden. Schwieriger stellt sich die Messung der Ablaufwassermenge dar. Nachdem der anfangs vorhandene hydraulische Kurzschluss (Heberleitung) zwischen den beiden Vorlagebehältern beseitigt war, wurde erkannt, dass die Ablaufmenge für die gewählte Wasseruhr (1 Impuls je 10 Liter Durchfluss) zu gering ist. Da die Durchsickerung durch den Lysimeter offensichtlich gleichmäßig erfolgt, d.h. es sind keine nennenswerten Rundumläufigkeiten feststellbar, resultiert daraus eine verzögerte Wasserabgabe über einen langen Zeitraum. Die Wasseruhr zeigt ihre Funktion dann, wenn nach einem Einstau des Kiesfilters im Lysimeter der Vorlagebehälter leergespült wurde und in sehr kurzer Zeit die gesamte Wassermenge ausfloss (siehe auch Ereignis Nr. 12, Nr. 16 und Nr. 18 der Tensiometerkurve). Sonst wurde der Ablauf von Zeit zu Zeit Literweise gemessen (Punktaufnahme) und der Wasserstand im Vorlagebehälter mittels Lattenpegel registriert. Es konnte festgestellt werden, dass bis Mitte Oktober die gesamte aufgegebene Wassermenge (Berechnung) den Lysimeter passiert hatte. Das ist zur Bilanzierung bisher ausreichend.

6.1.4. Wassergehalts-Messungen

Mit den eingelegten Feuchtesensoren (insgesamt 38 waagrechte Sensoren) werden mit einer hohen Auflösung im Lysimeterkörper die jeweiligen Wassergehalte gemessen. Hier werden die Messergebnisse vom 01. Februar 2001 bis zum Oktober 2001 interpretiert und auf Plausibilität geprüft.

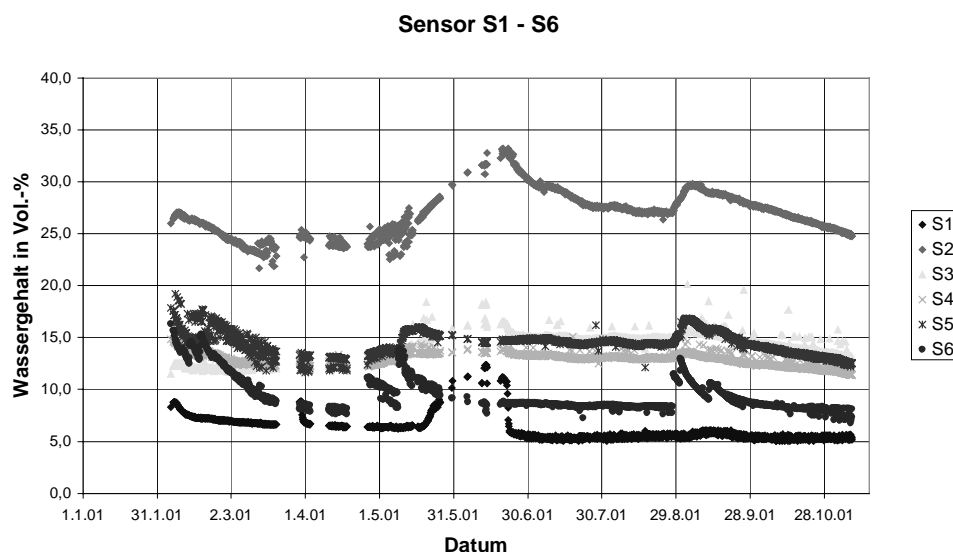


Bild 6.1.15.: Verlauf der Bodenwassergehalte im senkrechten Schnitt (Sensorlänge 5 Meter)

Im Bild 6.1.15. ist ein senkrechter Schnitt am westlichen Rand des Lysimeter dargestellt. Die Wassergehalte werden von unten nach oben (von Sensor S1 bis Sensor S6) betrachtet. Die Absolutwerte der Wassergehalte sind nicht kalibriert.

Der Sensor S1 zeigt nach einer Entwässerung im Februar (Leerlaufkurve des feucht eingebauten Kiesfiltermaterials) einen konstanten Verlauf bei 6 bis 7 Vol.-% Wassergehalt, was dem Residualwassergehalt entspricht. Im Mai/Juni ist ein starker Anstieg auf bis zu 13 Vol.-% erkennbar. In dieser Zeit war der Vorlagebehälter nach dem Ablauf gefüllt und hat so in den Kiesfilter zurückgestaut. Nachdem der Vorlagebehälter am 21. Juni 2001 leergepumpt wurde, ist das rückgestaute Wasser schnell abgeflossen und der Wassergehalt ist innerhalb kürzester Zeit wieder auf den Ausgangswert abgesunken. Seither blieb der Wassergehalt konstant bei ca. 6 Vol.-%. Beregnungen führen in der Kiesschicht nicht zu einer Erhöhung des Wassergehaltes, d.h. die ankommende Wassermenge kann mit der hydraulischen Durchlässigkeit des Residualwassergehaltes abgeführt werden.

Der Sensor S2 zeigt, dass sich zwischen der unteren Bodenschicht und dem darunter liegenden Kiesfilter ein Kapillarsaum ausgebildet hat. Der Wassergehalt liegt sehr hoch (>25 Vol.-%) und zeigt sich von den Beregnungen nur wenig beeinflusst. Der Einstau in den Kiesfilter vom Mai/Juni spiegelt sich auch hier im Verlauf wieder. Der Wassergehalt stieg um 10 Vol.-% auf über 35 Vol.-% an, was nahe dem Sättigungswassergehalt liegt. Offensichtlich ist das Geotextil, das zwischen dem Kiesfilter und der unteren Bodenschicht eingelegt wurde, mit dem Geotextil am Rand und auf dem Boden des Lysimeters in Verbindung. Darüber ist eine kapillare Verbindung vorstellbar. Die Beregnung im September führt zur deutlichen Erhöhung des Wassergehaltes. Vorstellbar ist, dass durch ein Einschwemmen von Feinstteilen in das Geotextil sich die bodenhydraulischen Eigenschaften (höhere aufbaubare Saugspannung) leicht geändert haben. Dieser Querschnitt ist zur Bestimmung des Durchflusses ebenfalls ungeeignet.

Die Sensoren S3 bis S5 geben die Beregnungsereignisse jeweils gedämpft wieder. Nach einer Leerlaufphase im März sind die einzelnen Beregnungen deutlich zu erkennen. Mit der Erhöhung des Wassergehaltes erhöht sich auch die hydraulische Leitfähigkeit, das anfallende Wasser kann ohne Rückstau nach unten abgeführt werden. Am Ende der Ereignisse (Durchfluss der gesamten Wassermenge) sinkt der Wassergehalt dann wieder auf das Ausgangsniveau (ca. 15 Vol.-%) ab.

Die oberen 20 cm des Lysimeters über Sensor S6 wurden weniger verdichtet. Das aufgegebene Wasser sickert sehr schnell zum Sensorhorizont (ca. 20 cm unter der Lysimeteroberfläche) ab. Nach einer Spitze der Bodenfeuchte, die i.d.R. 5 bis 6 % über dem Ausgangsniveau liegt, sinkt der Bodenwassergehalt in einer charakteristischen Auslaufkurve wieder auf das Ausgangsniveau ab (ca. 9 Vol.-%). Diese Bodenfeuchte entspricht dem Residualwassergehalt.

Alle Kurven korrespondieren sehr gut mit den bodenhydraulischen Zuständen, die aus dem Verlauf der Saugspannungen interpretiert werden. Zudem stimmt der qualitative Verlauf der Bodenwassergehalte der Sensoren S1 bis S6 (Sensorlänge 5 Meter, Bild 6.1.15.) mit dem der Sensoren S7 bis S12 (Sensorlänge 7 Meter, Bild 6.1.16.) überein.

Sensor S7 - S12

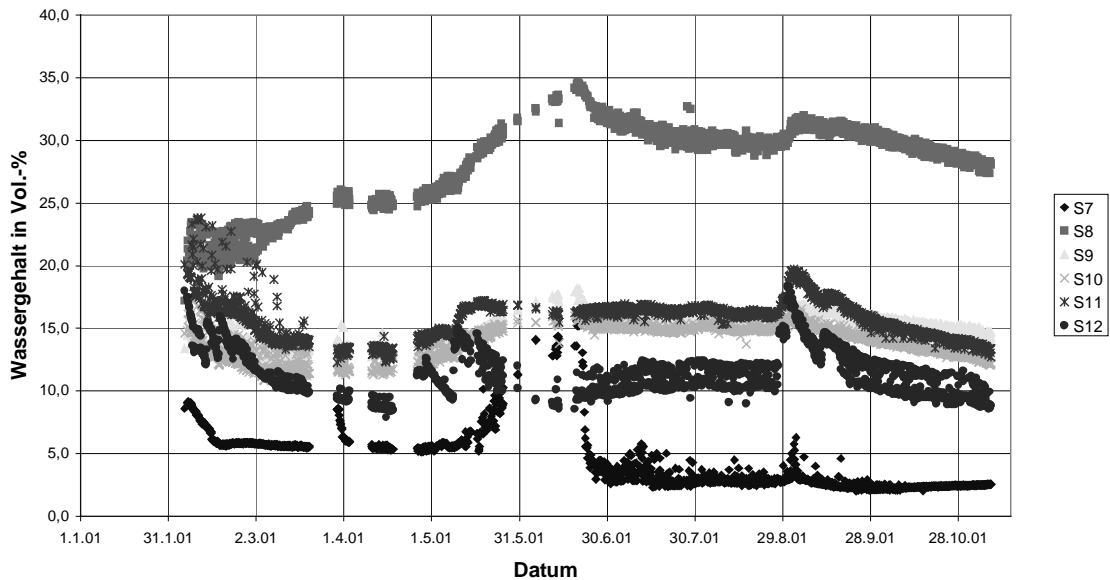


Bild 6.1.16.: Verlauf der Wassergehalte im senkrechten Schnitt (Sensorlänge 7 Meter)

Auch quantitativ wird in den einzelnen Horizonten (hier in Bild 6.1.17. beispielhaft am zweiten Horizont, ca. 40 cm unter der Lysimeteroberfläche, dargestellt) jeweils ein ähnlicher Wert gemessen (vergleiche Sensor S11, dessen Verlauf in beiden Bildern sichtbar ist). Die Niederschlagsereignisse sind noch deutlich, aber durch die Passage durch ca. 40 cm Boden doch etwas gedämpft, sichtbar.

Horizontalschnitt e

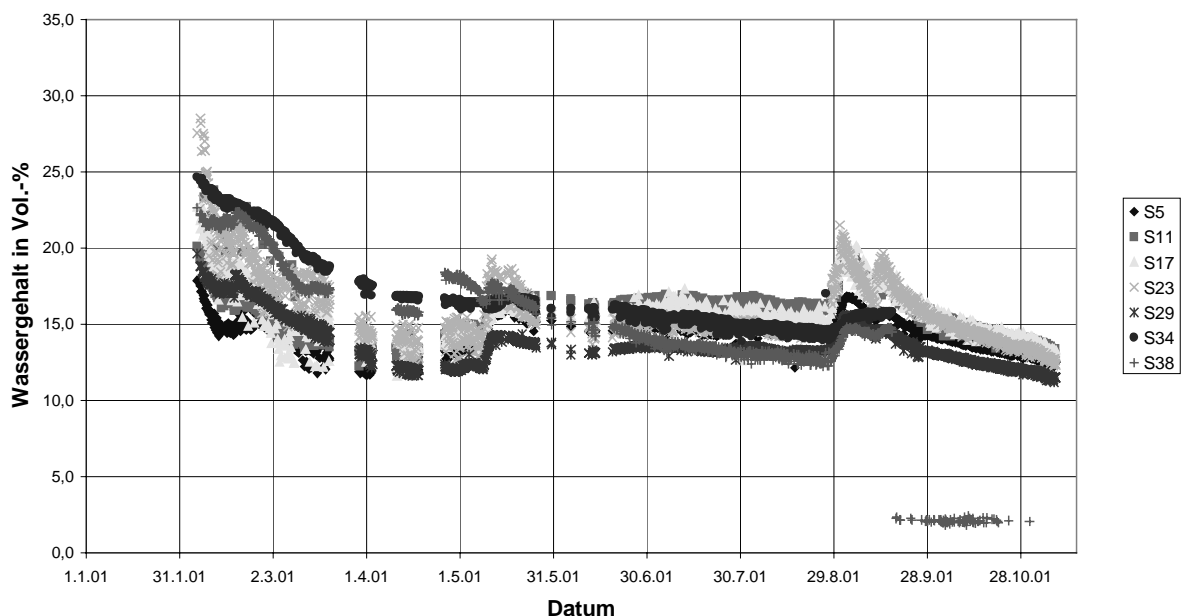


Bild 6.1.17.: Verlauf der Wassergehalte im zweiten horizontalen Querschnitt von oben (Schnitt e)

Die Sensoren S34 und S38 (Sensorlänge ein Meter, S34 im Lysimetertiefpunkt und S38 im Lysimeterhochpunkt) weisen seit dem 16. September Fehlmessungen auf, deren Ursache im Ausfall eines elektronischen Bauteils im Multiplexer liegt.

Die abschließende Plausibilitätskontrolle erfolgt mit dem Abgleich der gemessenen Bodenwassergehalte mit der gemessenen Saugspannung im entsprechenden Bodenquerschnitt. Betrachtet man das Bild 6.1.18., so wird deutlich, dass jede Zunahme des Wassergehaltes mit einer Abnahme der Saugspannung einhergeht. Die einzelnen Ereignisse sind in Tabelle 6.1.3. beschrieben.

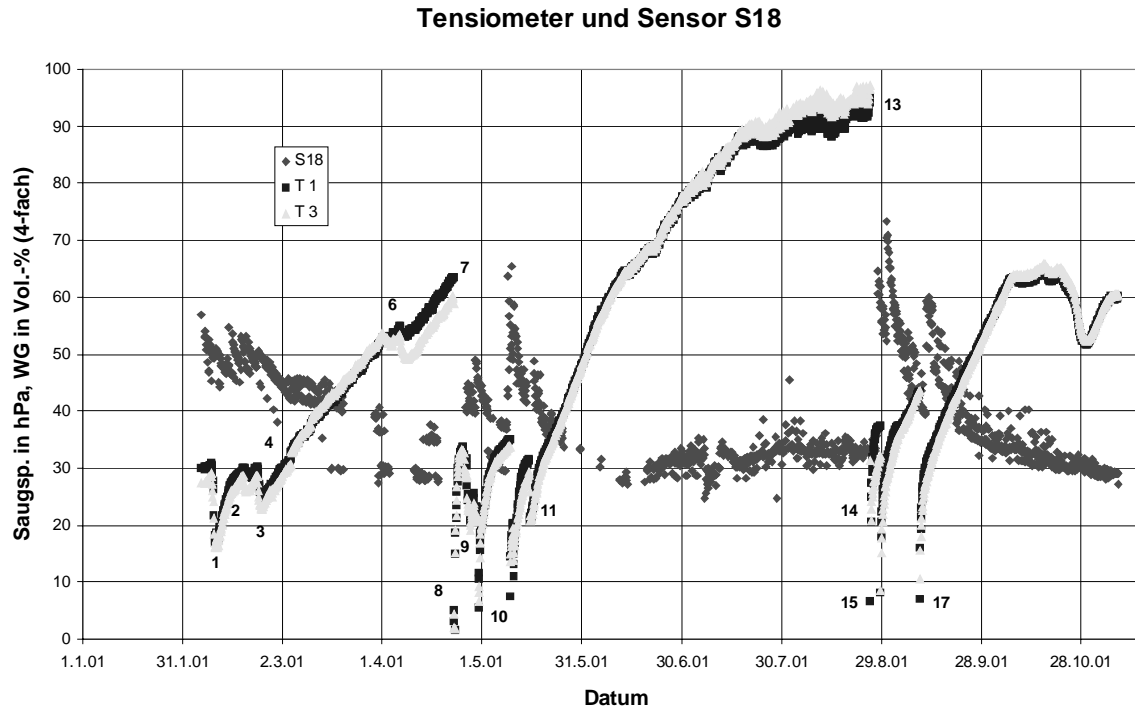


Bild 6.1.18.: Abgleich der Bodenwassergehalte mit der Saugspannung (Tensiometer T1 und T3, Sensorkabel S18)

Alle bisher gewonnenen Messwerte sind durchweg plausibel und qualitativ bestätigt. Die quantitative Bestätigung erfolgte durch Probennahme mit Wassergehaltsbestimmung sowie dem Abgleich mit den im Labor bestimmten materialspezifischen pF-WG-Kurven.

6.2. Versuchsdurchführung, Bilanzierung

6.2.1. Inbetriebnahme des Lysimeters

Nach der Fertigstellung des Lysimeters im Januar 2001 wurde ab 01. Februar 2001 die Messung in Betrieb genommen. Die „konventionellen“ Messwerte (siehe Abschnitt 6.1.3. Referenzmessungen) werden alle 10 Minuten aufgenommen. Diese sehr hohe Auflösung ist beispielsweise dann notwendig, wenn durch Leckagen in der Abdeckung des Lysimeters unkontrolliert Niederschlagswasser Zutritt. Manipulationen an der Abdeckung werden so detektiert und auch quantifiziert. Für die Bewegung einer Feuchtefront im Lysimeterkörper reicht eine weniger hohe Auflösung (z.B. Stundenwerte) aus.

Die Laufzeiten der Impulse auf den Bodenfeuchte-Sensoren werden ebenfalls seit 01. Februar 2001 fortlaufend aufgezeichnet. Es ist ausreichend, acht Mal am Tag, d.h. alle drei Stunden, eine Aufnahme zu machen, da die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bodenmaterials maximal im Bereich $k_f < 10^{-5}$ m/sec liegt. Bei gesättigten Verhältnissen würde eine Feuchtefront zwischen zwei Messungen um

gerade ca. 10 cm wandern. Bei der gewählten Auflösung wird im vorliegenden ungesättigten Bereich mit wesentlich geringerer hydraulischer Leitfähigkeit eine Änderung des Wassergehaltes um den Sensor sicher festgestellt.

Anfangs wurde der Lysimeter nicht abgedeckt (siehe auch Bild 6.1.14., Verlauf der Saugspannung und Bild 6.1.15., Verlauf der Wassergehalte), um das eingebaute Bodenmaterial durch den auftretenden Niederschlag zu bewässern. Nach dem natürlichen Niederschlagsereignis konnte der Betrag und die zeitliche Verzögerung der Reaktion der Messeinrichtungen beobachtet werden. Deutlich erkennbar ist die Entwässerung des Bodenmaterials nach dem Regenereignis. Dadurch wird der Gefügestand des Bodenmaterials stabilisiert, d.h. evtl. Inhomogenitäten konnten sich durch den Fluss und parallel Transporte von Feinteilen ausgleichen. Gleichzeitig war das Bodenmaterial dann nicht mehr hydraulisch unvorbelastet, was bedeutet, dass im pF-WG-Diagramm die Einhüllenden der Erstbe- und Erstentwässerung gerade nicht mehr erreicht werden (siehe Abschnitt 2.3., Bild 2.3.5.). Die vom Wassergehalt abhängige Saugspannung wird sich auf den zwischen den beiden Extremen liegenden Verbindenden einstellen, die Hysterese wird hier schwächer ausgeprägt sein. Da in der Abhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit als Funktion des Wassergehaltes ohnehin nur eine schwache Hysterese zu beobachten ist (siehe Abschnitt 2.5.), wird dieser unbedeutende Einfluss noch weiter reduziert.

Ab dem 22. Februar 2001 wurde der Lysimeter abgedeckt. Die Funktion der Abdeckung zeigt sich im „Leerlaufen“ des Lysimeters (Bild 6.2.1.) und in den geringen Schwankungen der Temperatur und der Feuchte im Luftraum unter der Abdeckung (siehe Bilder 6.1.14. und 6.1.15.). Bis Mitte April 2001 legten sich die Wassergehaltskurven aller Sensoren waagrecht an eine Asymptote (Bild 6.2.1.), welche dem Residualwassergehalt entspricht, an.

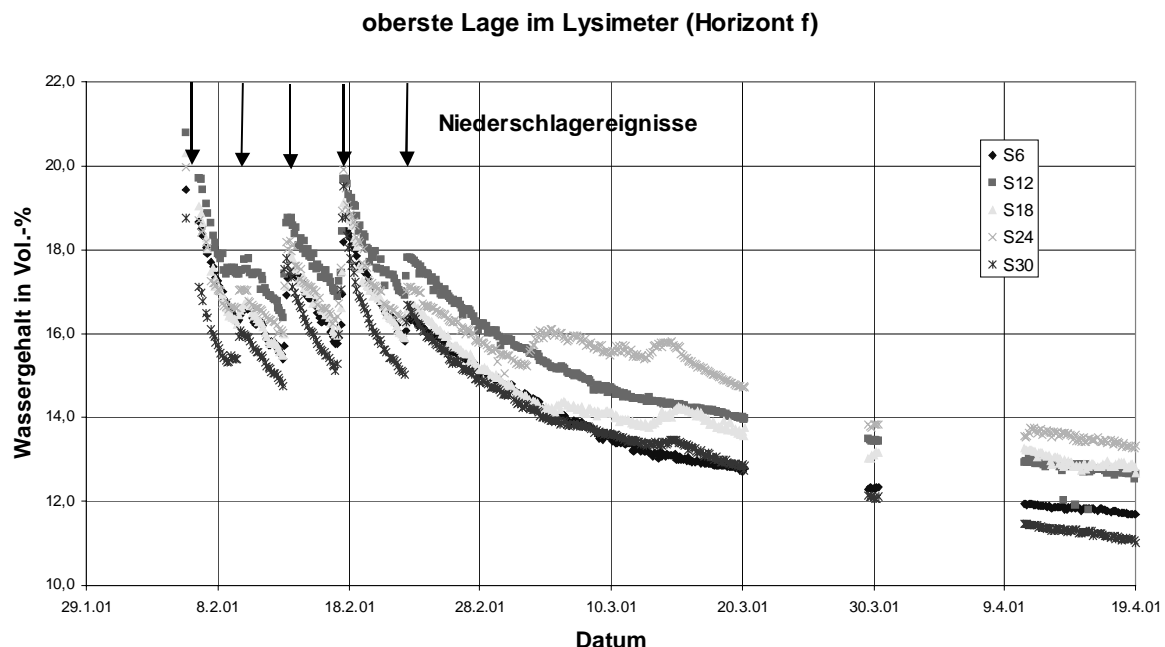


Bild 6.2.1.: Wassergehalt im Lysimeter in der ersten Beobachtungsphase

Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit war, ermittelt mit den Bodenparametern nach van Genuchten (siehe Abschnitt 5.2.3.), um mindestens drei bis vier Zehnerpotenzen geringer geworden. Damit war der Zeitpunkt erreicht, zur

Bilanzierung des Wasserhaushaltes im Lysimeter künstliche Regenereignisse aufzubringen. Der Lysimeter war „dicht“ genug, um das Voranschreiten einer Feuchtefront ausreichend genau zu erfassen.

Deutlich sind in Bild 6.2.1. fünf Regenereignisse bis zum 22. Februar erkennbar. Nach der Abdeckung des Lysimeters schließt sich dann die Leerlaufkurve des Lysimeters an. Diese hat eine für das Bodenmaterial charakteristische Form und nähert sich asymptotisch dem Residualwassergehalt an. Die fünf Sensoren im obersten Horizont liefern sehr einheitliche Ergebnisse.

Anfang März weicht Sensor S24 von der Stetigkeit ab, wobei ihm um den 15. März Sensor S18 und Sensor S30 in der Bewegung folgen. Grund dafür war die noch unzureichende Abdeckung, die es zuließ, dass sich an einigen Stellen auf der Abdeckfolie Wasserpfützen bildeten, die durch Verletzungen in der Folie in den Lysimeter absickerten. Die Folie wurde daraufhin (20. März 2001) neu verlegt und repariert. Dabei wurde auch die Dämmung eingebaut. Der Effekt der Dämmung ist aus Bild 6.1.11. ersichtlich. Die Schwankungen der Temperatur über den Tagesverlauf sind ab diesem Zeitpunkt wesentlich stärker gedämpft.

Vom 21. März bis 29. März und vom 01. April bis zum 10. April 2001 wurden keine Daten aufgezeichnet. In dieser Zeit wurde die Ansteuerung der Sensoren und die Archivierung der Daten automatisiert und getestet. Am Verlauf der Kurven in den registrierten Zeiten ist zu erkennen, dass der Leerlauf des Bodenmaterials ungestört weiter erfolgen konnte. Diese Tendenz zeigt sich in allen sechs Sensorhorizonten und auch der Kiesfilter am Lysimeterboden (siehe Bild 6.1.15., Sensor S1) entwässerte weiter.

Der Lysimeter war nun soweit vorbereitet und untersucht, sodass das erste simulierte Regenereignis terminiert und durchgeführt werden konnte. Die Beregnung wurde am 20. April 2001 installiert und am 27. April 2001 mit einer Beregnungswassermenge von 300 l (entspricht ca. 10 Liter/m²) beaufschlagt. Dieses Ereignis schlägt sich deutlich in dem Anstieg der Bodenfeuchte (Bild 6.1.15., Sensor S6) und dem rapiden Abfall der Saugspannung im oberen Tensiometerhorizont (Bild 6.1.14., Stelle 8) in den Datenreihen nieder. Die eigentliche Beregnung wurde dann vom 08. Mai bis zum 14. Mai 2001 durchgeführt. Bis zum 07. Mai 2001 waren die Effekte der Probeberegnung weitgehend abgeklungen. Die aufgegeben 300 Liter waren fast vollständig in dem Auffangbehälter nach dem Ablauf erschienen.

Es wurden folgende Beregnungswassermengen aufgegeben:

| | | | |
|--------------|-------------------------|-------------|--------------------------|
| 08. Mai 2001 | 311 Liter in 90 Minuten | Intensität: | ca. 7 l/h*m ² |
| 09. Mai 2001 | 102 Liter in 45 Minuten | Intensität: | ca. 5 l/h*m ² |
| 14. Mai 2001 | 105 Liter in 30 Minuten | Intensität: | ca. 7 l/h*m ² |

Die Gesamtmenge von 508 Litern entspricht einer Regenspende von ca. 17 l/m². Bis zum 14. Mai konnte im Vorlagebehälter ein Ablauf beobachtet werden. Der Vorlagebehälter wurde nicht leer gepumpt, in der Folge wurde der Kiesfilter im Lysimeter eingestaut. Das kann sehr gut im Bild 6.1.14. nachvollzogen werden. Die Saugspannung im unteren Tensiometerprofil fällt mit steigendem Einstau ab. Bemerkbar macht sich der Einstau auch bei den Sensoren im Kiesfilter. Hier steigt der Wassergehalt deutlich an. Die Regenereignisse werden mit der erwarteten,

notwendigen Erhöhung des Wassergehaltes abgeführt. Bei weit höherem Wassergehalt ist die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Kiesfilter auch nahe dem Residualwassergehalt höher als die hydraulische Leitfähigkeit im Bodenmaterial.

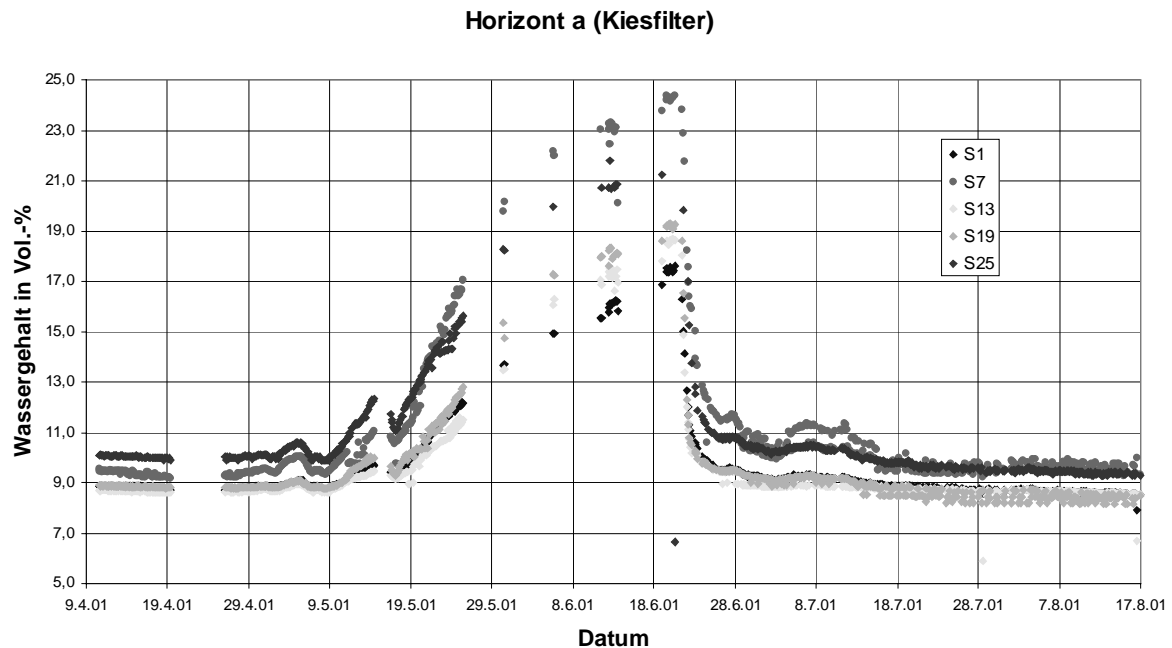


Bild 6.2.2.: Wassergehaltsverlauf während des Einstaus des Kiesfilters des Lysimeters

Nachdem die Vorlage am 21. Juni 2001 leergepumpt wurde, floss das im Kiesfilter gestaute Wasser sehr schnell ab. Der Wassergehalt der Kiesschicht ging auf den Ausgangswassergehalt zurück. Die Tensiometer (Bild 6.1.14.) zeigen die gleiche Saugspannung wie vor dem Einstau an.

Dieses Ereignis ergibt folgendes erste Ergebnis der Versuchsreihe:

In rolligen Böden (Kiessanden und Kiesen) ist die Messung des Wassergehaltes als Indikator für einen Wasserfluss nur dann angebracht, wenn der Wassergehalt nicht über den (i.d.R. geringen) Durchfluss, sondern über einen funktionsfähigen Ablauf bestimmt wird. Damit wird eine Quantifizierung eines Abflusses in einem Kiesfilter (Kapillarblock) über den Wassergehalt nicht möglich sein. Mit Bild 5.2.9. wird außerdem deutlich, dass eine Erhöhung des Wassergehaltes im Kiesfilter von ca. 9 Vol.-% auf 11 Vol.-% mehr als eine Verdoppelung der hydraulischen Leitfähigkeit bedingt. Dieser Wert der hydraulische Leitfähigkeit wird im aufliegenden Bodenmaterial erst ab einem Wassergehalt > 35 Vol.-% erreicht.

6.2.2. Abgleich der gemessenen Wassergehalte mit Referenzwerten

Mit diesem Regenereignis war es weiterhin möglich, den Lysimeter zu kalibrieren. Die erste Phase der Beregnung erfolgt am 08. und 09. Mai 2001 mit insgesamt 413 Litern (14,3 l/m²). Der Zustand im Profil c ist nicht eindeutig definiert. Die Feuchtefront rückt erst zu diesem Profil vor, es herrscht ein Zustand zwischen Be- und Entwässerung. Bis zu diesem Zeitpunkt war die Entwässerung noch dominant. Im pF-WG-Schaubild ist das so zu interpretieren, dass die Einhüllende (Hauptbewässerungskurve) noch nicht erreicht wird. Das untere Tensiometerprofil

zeigte eine Saugspannung von ca. 37 hPa, was bei einer Bodentemperatur von 12,0 °C in der pF-WG-Kurve einem Wassergehalt von 16 – 17 Vol.-% entspricht. Die entsprechenden Messungen im Horizont c (ca. 45 cm über dem Lysimeterboden) ergaben über die Bodenfeuchte-Sensoren Werte von 15,4 – 17,8 Vol.-% (Sensoren S3, S9, S15, S21 und S27).

Im oberen Profil (ca. 95 cm über dem Lysimeterboden) stellten sich folgende Werte ein. Die Saugspannung betrug 17 hPa, was bei dem Bodenzustand „Bewässerung“ und einer Bodentemperatur von 13,1 °C einem Wassergehalt von 18,0 – 19,0 Vol.-% entspricht. Die Bodenfeuchte-Sensoren zeigten 17,4 – 18,2 Vol.-% (Sensoren S11, S17 und S23). Am Rand des Lysimeters liegen die gemessenen Bodenfeuchten um 15,0 Vol.-% (Sensor S5 und S29), damit um 2 – 3 Vol.-% geringer als in der Mitte des Lysimeters. Diese Differenz der Bodenfeuchte entsteht durch eine in der Mitte des Lysimeters dominierte Beregnung. Während der Bodenpassage nach unten gleichen sich die Bodenwassergehalte nahezu aus.

| Profil | Tensiometer | | | TDR-Messung | | $\Delta\theta$ |
|-------------|--------------|------------|-------------------|--------------|-------------------|----------------|
| | ψ [hPa] | Temperatur | θ [Vol.-%] | Sensor-Nr. | θ [Vol.-%] | Vol.-% |
| Unten (c) | 37 | 12,0 | 16,0-17,0 | 3,9,15,21,27 | 15,4-17,8 | Max. 0,8 |
| Oben (e) | 17 | 13,1 | 18,0-19,0 | 11,17,23 | 17,4-18,2 | Max. 0,6 |

Tabelle 6.2.1.: Abgleich der Wassergehalte (Bewässerung)

Die Differenz der Wassergehalte von $\Delta\theta < 0,8$ Vol.-% liegt im Rahmen der Messgenauigkeit der Bodenfeuchte-Sensoren von 1,0 Vol.-%. Berücksichtigt man weiterhin, dass die Wassergehalte auf verschiedenen Skalen ermittelt werden (die pF-WG-Kurve liegt auf der Mikroskala, die Bodenfeuchte-Sensoren und die Tensiometer liegen auf der Beobachtungsskala), so ist die Übereinstimmung gut. Für den Bewässerungsfall ist die Stimmigkeit der Messungen damit belegt.

Für den Nachweis der Bodenfeuchte im Entwässerungsfall wurde nach einer längeren Austrocknungsphase der 24. August 2001 ausgewählt.

| Profil | Tensiometer | | | TDR-Messung | | $\Delta\theta$ |
|-------------|--------------|------------|-------------------|-------------|-------------------|----------------|
| | ψ [hPa] | Temperatur | θ [Vol.-%] | Sensor-Nr. | θ [Vol.-%] | Vol.-% |
| Unten (c) | 44 | 21,6 | 20,0-22,0 | 9,15,21 | 18,3-20,5 | Max. 1,7 |
| Oben (e) | 95 | 22,8 | 14,0-16,0 | 11,17,23 | 17,1-19,6 | Max. 3,6 |
| Oben (f) | 95 | 22,8 | 14,0-16,0 | 12,18,24 | 9,6-10,6 | Max. -4,4 |

Tabelle 6.2.2.: Abgleich der Wassergehalte (Entwässerung)

Die Abweichungen fallen wesentlich höher aus als beim Bewässerungsfall. Im Profil c wird eine zufriedenstellende Übereinstimmung erzielt. Die oberen Profile zeigen eine starke Abweichung, die über die Lage des Tensiometerprofils erklärt werden kann. Das obere Tensiometerprofil liegt etwa mittig zwischen den Profilen e und f. Würde man vereinfacht die Werte der Profile arithmetisch mitteln, so ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung ($\Delta\theta < 0,7$ Vol.-%). Das ist aber nicht zulässig, da die Dichte in der obersten Schicht (Profil f) geringer ist, als die in den Schichten darunter. Daher muss hier der volumetrische Wassergehalt auch immer geringer sein als in den anderen Profilen. Eine bessere Übereinstimmung ist über eine Kalibrierung nur sehr aufwändig zu erreichen, da in diesem Profil die Korrektur jeweils als Funktion des

aktuellen Wassergehaltes erfolgen muss (Iteration). Für die Bilanzierung jedoch ist diese Angleichung nicht erforderlich, da hier über die Dichte (i.d.R. höhere Porosität bei geringerer Verdichtung) ein Ausgleichsfaktor besteht.

Die Wassergehalte am Lysimeterrand sind bei der Entwässerung ebenfalls geringer als in der Lysimetermitte. Beeinflusst wird dieses dadurch, dass die Sensoren am Rand nur fünf Meter lang sind, während die Sensoren im Innern sieben Meter lang sind. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse (Abschnitt 6.1.2., Tabelle 6.1.3.) konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Sensorlänge auf die Laufzeitermittlung vorhanden ist. Dieser ist beim 5-Meter-Sensor größer als beim 7-Meter-Sensor. Außerdem ist beim 5-Meter-Sensor der Varianzbereich wesentlich größer (Faktor 3), d.h. die Werte haben eine stärkere Streuung.

6.2.3. Abgleich der Sensor-Wassergehalte mit Bodenproben

Um das Phänomen der ungleichen Feuchteverteilung vom Lysimeterinneren zum Lysimeterrand zu ergründen, wurden am 05. Juli 2001 Bodenproben entnommen und deren Wassergehalte gravimetrisch bestimmt.

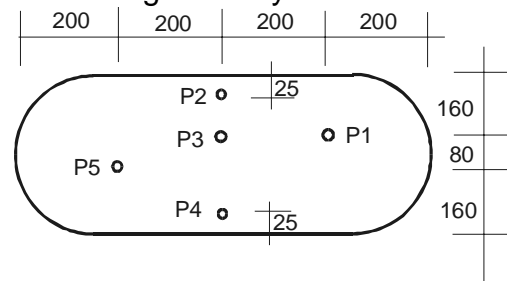


Bild 6.2.3.: Lage der Probenahmestellen im Lysimeter

Die Proben wurden in einer Tiefe von ca. 70 cm entnommen, das ist zwischen den Horizonten c und d. Leider wurden bei der Aktion die Sensoren S29 und S30 beschädigt, sodass diese seit dieser Zeit keine brauchbaren Ergebnisse mehr liefern. Es wurden folgende, auf den Boden bezogene, Werte ermittelt:

| Probe-Nr. | WG (grav.) [Gew.-%] | Boden-Dichte [gr/cm ³] | WG (vol.) [Vol.-%] | benachbarte Sensoren |
|-----------|------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 9,1 | 1,8 | 16,6 | S3, S4 |
| 2 | 8,6 | 1,8 | 15,6 | S9, S10 |
| 3 | 8,5 | 1,8 | 15,6 | S21, S22 |
| 4 | 8,8 | 1,8 | 16,0 | S27, S28 |
| 5 | 7,9 | 1,8 | 14,4 | S32, S33 |
| 6=1 | 9,1 | 1,8 | 16,6 | S36, S37 |

Tabelle 6.2.3.: Wassergehalte der Bodenproben vom 05. Juli 2001

Zum gleichen Zeitpunkt wurden mit den Bodenfeuchte-Sensoren folgende Wassergehalte ermittelt:

| Profil | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | |
|----------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | S | WG | S | WG | S | WG | S | WG | S | WG | S | WG |
| c | 3 | 16,4 | 9 | 21,4 | 21 | 19,2 | 27 | 18,0 | 32 | 13,4 | 36 | 19,4 |
| d | 4 | 15,6 | 10 | 19,5 | 22 | 17,0 | 28 | 15,5 | 33 | 13,6 | 37 | 14,8 |
| Mittelw. | 3,4 | 16,0 | 9,10 | 20,5 | 21,22 | 18,1 | 27,28 | 16,7 | 32,33 | 13,5 | 36,37 | 17,1 |
| Länge | 5 Meter | | 7 Meter | | 7 Meter | | 5 Meter | | 1 Meter | | 1 Meter | |

Tabelle 6.2.4.: Wassergehalte der Bodenfeuchte-Sensoren vom 05. Juli 2001 (S = Sensornummer, WG in Vol.-%), alter Auswerte-Algorithmus

Gleicht man die WG aus den Tabellen 6.2.3. und 6.2.4. miteinander ab (Tab. 6.2.5.), so ist zu erkennen, dass hier die Differenzen von ΔWG bei < 5 Vol.-% liegen.

| | Sens.3,4 | Sens.9,10 | Sens.21,22 | Sens.27,28 | Sens.32,33 | Sens.36,37 |
|-------------|----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Probe-Nr. | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6=P1 |
| WG-Pr. | 16,6 | 15,6 | 15,6 | 16,0 | 14,4 | 16,6 |
| WG-Sens | 16,0 | 20,5 | 18,1 | 16,7 | 13,5 | 17,1 |
| ΔWG | -0,6 | +4,9 | +2,5 | +0,7 | -0,9 | +0,5 |

Tabelle 6.2.5.: Abgleich der Wassergehalte (alter Auswerte-Algorithmus), (WG-Pr. aus gravimetrischem WG der Bodenprobe ermittelt)

Der Einfluss des Fehlers bei der Ermittlung der Dichte des Bodenmaterials (siehe Abschnitt 3.1.1. u. 3.1.3.) liegt hier sicher bei ca. 5 %. Addiert man dazu noch die Messgenauigkeit der Bodenfeuchte-Sensoren mit ± 1 Vol.-%, so liegt die zulässige Abweichung nicht in dieser Größenordnung. Der Abgleich bringt nicht ganz befriedigende Ergebnisse, da die Werte der Bodenfeuchte-Sensoren noch zu sehr streuen.

Die in der Sensitivitätsbetrachtung (Abschnitt 6.1.2.) festgestellten Differenzen bei der Ermittlung der Sensorlaufzeiten in Abhängigkeit der Sensorlänge werden damit bestätigt. Der wesentlich flacher ausgeprägt „Knick“ am Ende der 7-Meter-Sensoren bringt eine Unschärfe mit sich. Die Messwerte werden als zu „feucht“ interpretiert. Dieser Fehler konnte durch einen der Impulskurvenform angepassten mathematischen Algorithmus verringert werden, der das Ende der Impulskurve (Beispiel siehe Bild 6.1.9., Lage von Punkt C) als lokales Minimum bestimmt. Mit diesem Algorithmus verbesserten sich die Werte aus Tabelle 6.2.4. wie folgt:

| Profil | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | |
|--------------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | S | WG | S | WG | S | WG | S | WG | S | WG | S | WG |
| c | 3 | 19,8 | 9 | 19,6 | 21 | 18,6 | 27 | 19,1 | 32 | 13,0 | 36 | 18,7 |
| d | 4 | 15,8 | 10 | 17,2 | 22 | 16,6 | 28 | 14,2 | 33 | 12,9 | 37 | 14,4 |
| Mittelw. | 3,4 | 17,8 | 9,10 | 18,4 | 21,22 | 17,6 | 27,28 | 16,7 | 32,33 | 13,0 | 36,37 | 16,4 |
| Sensor-Länge | 5 Meter | | 7 Meter | | 7 Meter | | 5 Meter | | 1 Meter | | 1 Meter | |

Tabelle 6.2.6.: Wassergehalte der verschiedenen langen Bodenfeuchte-Sensoren vom 05. Juli 2001 (S = Sensornummer, WG in Vol.-%), neuer Auswerte-Algorithmus

Gleicht man die WG aus den Tabellen 6.2.3. und 6.2.6. miteinander ab (Tab. 6.2.7.), so ist zu erkennen, dass jetzt die Differenzen von ΔWG bei < 3 Vol.-% liegen.

| | Sens.3,4 | Sens.9,10 | Sens.21,22 | Sens.27,28 | Sens.32,33 | Sens.36,37 |
|-------------|----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Probe-Nr. | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6=P1 |
| WG-Pr. | 16,6 | 15,6 | 15,6 | 16,0 | 14,4 | 16,6 |
| WG-Sens | 17,8 | 18,4 | 17,6 | 16,7 | 13,0 | 16,4 |
| ΔWG | +1,2 | +2,8 | +2,0 | +0,7 | -1,4 | -0,2 |

Tabelle 6.2.7.: Abgleich der Wassergehalte (neuer Auswerte-Algorithmus), (WG-Pr. aus gravimetrischem WG der Bodenprobe ermittelt)

Die Messwerte werden stark vom mathematischen Auswerteverfahren beeinflusst. Das jetzt verbesserte Verfahren verringert den Fehler bei den langen Sensoren auf Kosten der erreichten Genauigkeit bei den kurzen (ein Meter) Sensoren. Da der Lysimeterboden aber hauptsächlich über die langen Sensoren beschrieben wird, sind

die Werte des neuen Algorithmus bestätigt. Nach der Kalibrierung der Sensoren ergibt sich am Tag der Probenahme im Lysimeter folgende Verteilung der Feuchte:

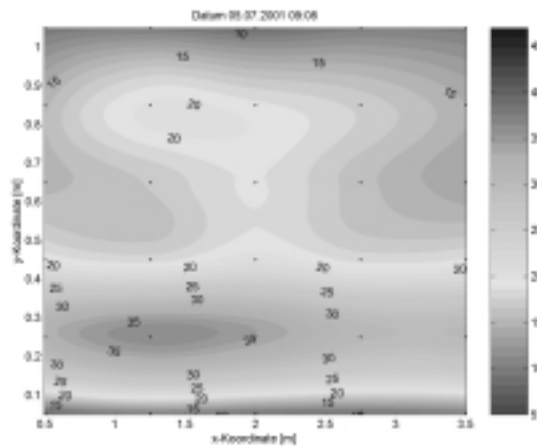


Bild 6.2.4.: Verteilung der Feuchte im Lysimeter am 05. Juli 2001

Deutlich ist erkennbar, dass der WG zum Rand hin leicht geringer wird und sich im Horizont b eine Kapillarsperre (hohe Feuchte) ausgebildet hat. Da im Profil b der WG weit unter der Sättigung liegt, findet weder ein lateraler Abfluss noch ein Durchbruch in den Kiesfilter (Kapillarblock) statt. Der geringe bindige Anteil im Bodenmaterial (Schluffanteil < 10 Gew.-%) lässt auch keinen kapillaren Aufstieg über das Profil c hinaus zu ($\Delta h < 20$ cm). Der Kiesfilter am Lysimeterboden ist mit seinem geringen WG ($\sim \theta_r$) ebenfalls erkennbar. Die Bilder 6.1.15. bis 6.1.17. und 6.2.1. bis 6.2.2. sind nach dem „alten“ Algorithmus erstellt. Sie wurden so belassen, da der „neue“ Algorithmus qualitativ an der Aussage nichts ändert.

6.2.4. Bilanzierung von Beregnungsereignissen

Es werden im Folgenden zwei Ereignisse bilanziert. Das erste Ereignis (24.04. bis 07.05.2001) wird vereinfacht ohne Fluss bilanziert, um die Größenordnungen der Änderung der Feuchteverteilung abzuschätzen. Das Ereignis vom 27.08. bis 07.09.2001 wird gemäß dem bodenhydraulischen Modell bilanziert.

a. vereinfachte Bilanzierung

Die Reaktion der Bodenfeuchte-Sensoren auf das Regenereignis ist in Tab. 6.2.8. dargestellt.

| Sens. Nr. | Wassergehalt | | | Bezugsvolumen | | | Q [Liter] |
|--------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------|------------------------------|--------------|
| | 26.04. [Vol.-%] | 07.05. [Vol.-%] | Δ WG [Vol.-%] | Fläche [m ²] | Höhe [m] | Volumen [m ³] | |
| 1 | 7,29 | 7,30 | +0,01 | 5,3 | 0,25 | 1,32 | 0,13 |
| 2 | 24,66 | 25,87 | +1,21 | 5,3 | 0,20 | 1,06 | 12,8 |
| 3 | 16,96 | 17,95 | +0,99 | 5,3 | 0,20 | 1,06 | 10,5 |
| 4 | 13,95 | 14,80 | +0,85 | 5,3 | 0,20 | 1,06 | 9,0 |
| 5 | 13,73 | 13,87 | +0,14 | 5,3 | 0,20 | 1,06 | 1,5 |
| 6 | 11,48 | 10,27 | -1,21 | 5,3 | 0,20 | 1,06 | -12,8 |
| Σ | - | - | - | - | - | - | 21,1 |

Tabelle 6.2.8.: Änderung der Wassergehalte in Folge der Beregnung vom 26.04.2001 (Q = im Querschnitt gespeicherte(+)/abgegebene(-) Wassermenge)

Die Beregnungsmenge betrug 300 Liter. Bis zum 07.05.2001 wurden in den oberen Bodenschichten die Wassergehalte vor der Beregnung wieder erreicht. Die Beregnungsmenge hat die oberen Bodenschichten passiert und den Lysimeter teilweise schon verlassen. Die Speicherung wird im beispielhaft gewählten senkrechten Schnitt durch den Lysimeter dargestellt. Bei dieser vereinfachten Darstellung ist eine Kalibrierung der Bodenfeuchte-Sensoren nicht erforderlich. Die Kalibrierung bewirkt nur eine Parallelverschiebung der Sensorwerte (siehe Abschnitt 6.1.2.). Die Differenzen der einzelnen Wassergehalte bleiben nahezu konstant. Die weiteren vier senkrechten Profile wurden analog Tabelle 6.2.8. bilanziert. Insgesamt sind im Lysimeter am 07.05.2001 noch 74 Liter der Beregnungswassermenge gespeichert. Die Feuchtefront hat sich am 07.05.2001 schon deutlich nach unten bewegt und ein Großteil der aufgegebenen Wassermenge hat den Lysimeter schon wieder verlassen (gemessener Abfluss $Q_{ab} \sim 220$ Liter). Mit dieser vereinfachten Bilanzierung wird die Größenordnung der Wassermengen des Ereignisses bestätigt.

b. Bilanzierung mit Hilfe des bodenhydraulischen Modells

Der Verlauf der Bodenwassergehalte wird für das Ereignis (27.08. bis 07.09.2001) exemplarisch in einem mittleren Querschnitt (Sensor S13 bis S18) dargestellt.

Zum Zeitpunkt T1, nach einer Trockenperiode, liegt im Sensor S18 (Horizont f) nahezu der Residualwassergehalt ($\theta_r=8-10$ Vol.-%) vor. Es wird dann mit 300 Litern beregnet (T1 bis T2). Nach 75 Stunden werden weitere 200 Liter aufgegeben (T3 bis T4). Der Verlauf des Wassergehaltes von Sensor S18 erreicht etwa am 07.09.2001 eine waagrechte Asymptote, die allerdings noch etwas höher liegt als θ_r (T5). Aus den pF-WG-Kurven wird ersichtlich, dass zur Restentwässerung auf θ_r eine hohe Saugspannung aufgebaut werden muss. Mit dem 07.09.2001 ist der Versuch beendet. Der Abgleich mit dem Bodenmodell (Abschnitt 4.1.) erfolgt in Tabelle 6.2.9..

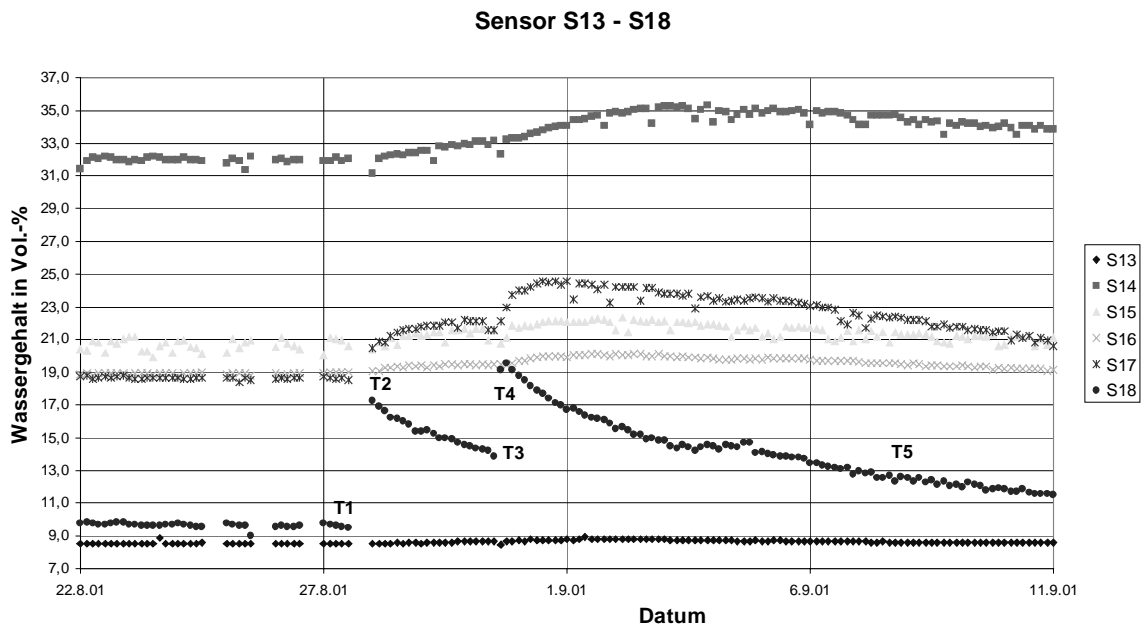


Bild 6.2.5.: Wassergehalte der Beregnung vom 26.08. bis 07.09.2001

| Zeitraum | | θ_{tA} | θ_{tB} | θ -Beziehung | Bodenmodell | Bezeichnung |
|----------|-------|-----------------------|---------------|----------------------------------|-------------|--------------|
| t_A | t_E | | | | | |
| T1 | T2 | $\theta_1 = \theta_r$ | θ_2 | $\theta_2 > \theta_1 = \theta_r$ | Fall 1 | Bewässerung |
| T2 | T3 | θ_2 | θ_3 | $\theta_r < \theta_3 < \theta_2$ | Fall 4 | Entwässerung |
| T3 | T4 | θ_3 | θ_4 | $\theta_r < \theta_3 < \theta_4$ | Fall 1 | Bewässerung |
| T4 | T5 | θ_4 | θ_5 | $\theta_r < \theta_5 < \theta_4$ | Fall 4 | Entwässerung |

Tabelle 6.2.9.: Zuordnung des Feuchteverlaufs zum Bodenmodell

Für die hier relevanten Fälle des Bodenmodells gilt (siehe Abschnitt 4.1.):

Fall 1: $q_{ab} = k(\theta_{2-1}) * b * \Delta t$
 $\Delta q = \Delta \theta * b * h$ mit $q_z = q_{ab} + \Delta q$

Fall 4: $q_{ab} = k(\theta_{3-2}) * b * \Delta t$
 $\Delta q = \Delta \theta * b * h$ mit $q_z = q_{ab} - \Delta q$

Die Bilanz erfolgt für den Sensor 18 (q multipliziert mit der Einheitstiefe $t=1$ in Liter).

| Zeitp. | Fall | θ_{18} Vol.-% | $k(\theta)^*$ $\times 10^{-8}$ | Δt h | $F_{\text{maßgeb.}}$ m^2 | q_{ab} Liter | $\Delta \theta$ Vol.-% | Δq Liter | q_z Liter |
|--------|------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|----------------|
| T1 | | 9,2 | | | | | | | |
| T2 | 1 | 16,4 | 0,52 | 27 | 6,0 | 3 | +6,50 | +78 | +81 |
| T3 | 4 | 13,9 | 0,95 | 45 | 6,0 | 9 | -2,19 | -26 | -17 |
| T4 | 1 | 19,1 | 1,40 | 9 | 6,0 | 3 | +5,32 | +63 | +66 |
| T5 | 4 | 13,2 | 0,60 | 159 | 6,0 | 20 | -5,96 | -71 | -51 |
| Gesamt | | | | 213 | | 35 | | +44 | +79 |

Tabelle 6.2.10.: Bilanzierung des Ereignisses vom 26.08. bis 07.09.2001, Sensor 18

Die hydraulische Leitfähigkeit ($k(\theta)^*$) wurde nach der Gl. 5.2.5. ermittelt. Die dazu erforderlichen Parameter wurden vom Institut für Hydromechanik (IfH) der Universität Karlsruhe ermittelt. In gleicher Weise wurden die Sensoren S6, S12 und S24 bilanziert. Näherungsweise wurde für den Sensor S30 der jeweilige Wassergehalt von Sensor S6 eingesetzt. Der Sensor S30 war bei der Boden-Probenahme am 05.07.2001 beschädigt worden.

| Zeitp. | Sensor-Nr. | | | | | ΣQ | |
|--------|------------|-----|-----|-----|-----|------------|------------|
| | S6 | S12 | S18 | S24 | S30 | | |
| T2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 14 | |
| T3 | 4 | 9 | 9 | 11 | 4 | 37 | Abfluss |
| T4 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 11 | Q_{ab} |
| T5 | 12 | 29 | 20 | 53 | 12 | 126 | |
| T2 | 33 | 49 | 78 | 72 | 33 | 265 | |
| T3 | -6 | -2 | -26 | -14 | -6 | -54 | Speicher |
| T4 | 27 | 43 | 64 | 56 | 27 | 217 | ΔQ |
| T5 | -31 | -44 | -71 | -70 | -31 | -247 | |

Tabelle 6.2.11.: Bilanzierung des Ereignisses vom 26.08. bis 07.09.2001, Abfluss und Speicherung (Mengenangaben in Liter)

Die Regenereignisse spiegeln sich in Tab. 6.2.11. deutlich wieder. So wird das erste Ereignis mit einer Beregnungswassermenge von 300 l zum Zeitpunkt T2 mit insgesamt 265 l + 14 l = 279 l wiedergegeben, das zweite Ereignis mit 200 l zum

Zeitpunkt T4 mit $217 \text{ l} + 11 \text{ l} = 228 \text{ l}$. Das erste Ereignis wird um ca. 10 % unterschätzt (geringere hydraulische Leitfähigkeit, d.h. der Abfluss Q_{ab} wird unterschätzt), das zweite Ereignis um ca. 14 % überschätzt (höheres Ansprechen der Wassergehalte, da der Boden schon benetzt war, d.h. es liegt ein geringerer Benetzungswiderstand vor).

Die Feuchteverteilung zu den fünf Untersuchungszeitpunkten zeigt Bild 6.2.6.. Es ist erkennbar, wie die beiden Regenereignisse durch den Lysimeter wandern.

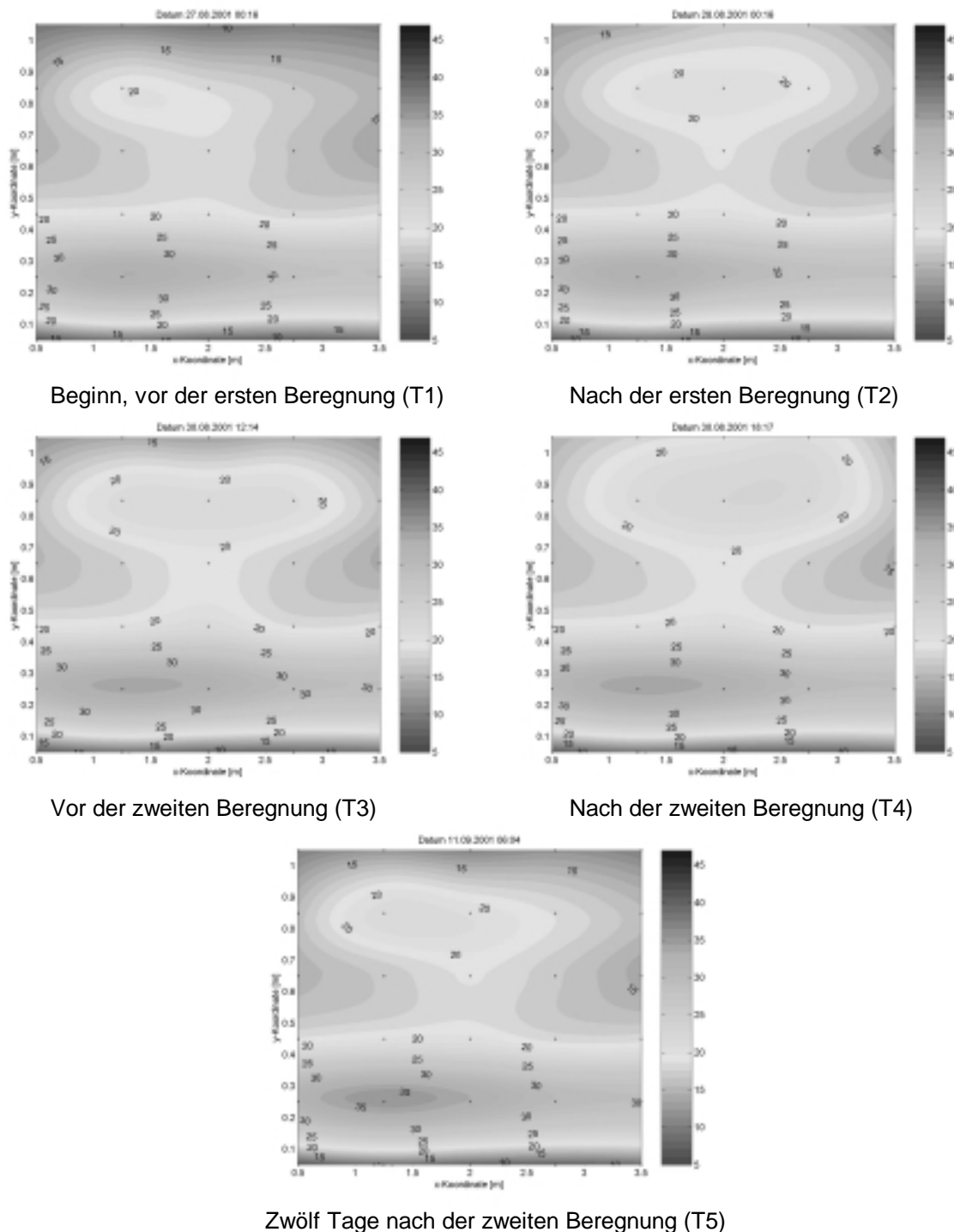


Bild 6.2.6.: Verteilung der Bodenfeuchte im Lysimeter zu den Beobachtungszeitpunkten des Ereignisses vom 26.08. bis 07.09.2001

Der Kapillarsaum wird aufgesättigt (WG von ca. 30 Vol.-% auf über 35 Vol.-%), sodass der hydraulische Gradient ausreicht, das ankommende Wasser vertikal abzuführen. Die Reaktion im Kiesfilter ist sehr schwach ausgeprägt ($\Delta\theta \sim 0,5$ Vol.-%). Sie liegt unter dem Darstellungsmaßstab und wird daher nicht abgebildet. Das Regenereignis ist zum Zeitpunkt T5 noch nicht beendet, es sind noch insgesamt 174 Liter (ca. ein Drittel der Beregnungswassermenge) im Querschnitt gespeichert. Die k_f -Werte werden nach Gl. 5.2.5. aus dem aktuellen WG (θ) und den ermittelten Bodenparametern (n , m , θ_r , θ_s) berechnet. Die Gl. 5.2.5. wird dabei umgeformt zu:

$$k_u(\theta) = k_s * \beta(\theta) \quad (6.2.1.)$$

mit $0 \leq \beta(\theta) \leq 1$, für $\theta = \theta_r$ gilt: $\beta(\theta_r) = 0$ und für $\theta = \theta_s$ gilt: $\beta(\theta_s) = 1$. Exemplarisch wird der Verlauf von S_e und $k_u(\theta)$ im Material der obersten Schicht (Material 2) dargestellt. Es fällt auf, dass $k_u(\theta)$ erst mit hohen Werten der relativen Sättigung S_e stark wächst. Das resultiert in hohem Maße aus dem Benetzungswiderstand im Boden.

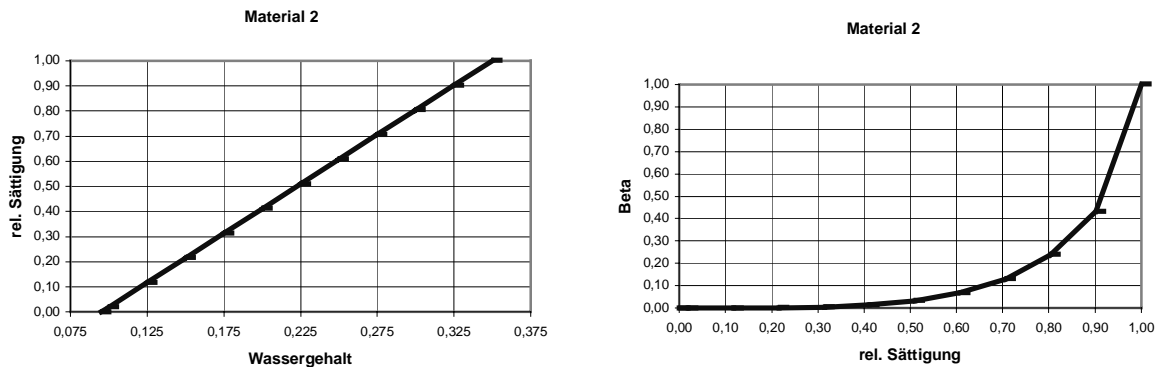


Bild 6.2.7.: Abhängigkeit von k_u vom aktuellen Wassergehalt (θ)

Tabelle 6.2.12. zeigt die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeiten zum Zeitpunkt T1 (trocken vor dem ersten Regenereignis) und T4 (feucht, nach dem zweiten Regenereignis) in einem vertikalen Profil in der Lysimetermitte. Das Profil hat wegen der Homogenität des Bodenmaterials nahezu den gleichen Verlauf wie die Wassergehalte im Bild 6.2.6..

| Sensor- Nummer | θ | θ_s | θ_r | $Se(\theta)$ | n | m | β | k_s cm/h | $k_u(\theta)$ m/sec | |
|-------------------|----------|------------|------------|--------------|------|------|----------|---------------|------------------------|----|
| Zeitp. T1 | | | | | | | | | | |
| S13 | 8,5 | 25,0 | 0,1 | 0,34 | 1,21 | 0,17 | 6,39E-08 | 28,80 | 5,11E-12 | * |
| S14 | 32,0 | 37,0 | 11,0 | 0,81 | 2,35 | 0,57 | 2,15E-01 | 0,20 | 1,20E-07 | ** |
| S15 | 20,1 | 35,0 | 11,0 | 0,38 | 2,35 | 0,57 | 7,56E-03 | 0,20 | 4,20E-09 | |
| S16 | 18,9 | 35,0 | 9,5 | 0,37 | 2,54 | 0,61 | 9,01E-03 | 0,15 | 3,75E-09 | |
| S17 | 18,7 | 35,0 | 9,5 | 0,36 | 2,54 | 0,61 | 8,27E-03 | 0,15 | 3,45E-09 | |
| S18 | 9,8 | 28,0 | 9,5 | 0,02 | 2,54 | 0,61 | 5,83E-08 | 0,15 | 2,43E-14 | |
| Zeitp. T4 | | | | | | | | | | |
| S13 | 8,7 | 25,0 | 0,1 | 0,35 | 1,21 | 0,17 | 8,48E-08 | 28,80 | 6,78E-12 | * |
| S14 | 33,3 | 37,0 | 11,0 | 0,86 | 2,35 | 0,57 | 2,96E-01 | 0,20 | 1,64E-07 | ** |
| S15 | 21,1 | 35,0 | 11,0 | 0,42 | 2,35 | 0,57 | 1,17E-02 | 0,20 | 6,48E-09 | |
| S16 | 19,4 | 35,0 | 9,5 | 0,39 | 2,54 | 0,61 | 1,11E-02 | 0,15 | 4,61E-09 | |
| S17 | 23,0 | 35,0 | 9,5 | 0,53 | 2,54 | 0,61 | 3,85E-02 | 0,15 | 1,60E-08 | |
| S18 | 19,6 | 28,0 | 9,5 | 0,55 | 2,54 | 0,61 | 4,37E-02 | 0,15 | 1,82E-08 | |

| | |
|----|---|
| | |
| * | Die Formel von <i>van Genuchten/Mualem</i> kann hier nicht angewendet werden (Kies mit großem Porenvolumen). Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird um Zehnerpotenzen zu gering ermittelt. |
| ** | Durch die Ausbildung einer Kapillarsperre wird die ermittelte hydraulische Leitfähigkeit nicht wirksam. Zum vertikalen Fluss in den unterliegenden Kiesfilter (=Kapillarblock) ist ein hoher hydraulischer Gradient erforderlich. |

Tab. 6.2.12.: Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit im Lysimeter zum Ereignis vom 26.08. bis 07.09.2001 (Zeitpunkt T1 und T4) im vertikalen Schnitt (Sensor S13 bis S18). β ist der S_e -abhängige Term der Gl. 6.2.1..

6.2.5. Plausibilitätsbetrachtungen

Zu prüfen bleibt noch, ob der gemessene Bodenwassergehalt für die den Sensor umgebende Schicht repräsentativ ist. Außerdem ist die „Stabilität“ der Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem gemessenen Bodenwassergehalt (Gleichung 6.2.1.) zu verifizieren.

Die möglichen Konstruktionen für Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme (DOA) wurden in Kapitel 4.2.2. untersucht. Ergebnis war es, dass alle DOA überwacht werden können, wenn eine Kontrollschicht unter dem DOA angeordnet wird (siehe Bild 4.2.10.). Diese Kontrollschicht wird analog zu der von der BAM definierten Schicht unter einer KDB aufgebaut. Die BAM fordert eine Dicke von $d > 15$ cm mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von $k_s < 10^{-6}$ m/sec. Dafür eignet sich ein sandiger Schluff oder ein schluffiger Sand. Soll nur eine einzelne Schicht im DOA überwacht werden (siehe Bild 4.2.11.), so ist ebenfalls auf die Bodenparameter der Schicht zu achten. Inhomogenitäten um den Sensor lassen zwar noch qualitative Aussagen aus den Messergebnissen zu, Quantifizierungen sind auf Grund der Integration über die gesamte Sensorlänge nicht möglich. Ein Beispiel für ein ungeeignetes Kontrollschichtmaterial ist zum einen Kiessand oder Kies des OKF (siehe Bild 6.2.2), dessen hydraulische Leitfähigkeit zu hoch ist und dessen pF-WG-Kurve im betrachteten Bereich einen zu steilen Verlauf hat, zum anderen sog. Mutterboden der RekS. Die RekS wird gewollt sehr inhomogen aufgebaut und ist von Makroporen durchsetzt.

Kriterien für die Auswahl des Materials für die Kontrollschicht sind:

- möglichst „flache“ Steigung der pF-WG-Kurve im Bereich $1 < pF < 2$, d.h. durch diese Forderung wird der Schluffanteil begrenzt,
- die Residualsättigung sollte im Bereich $5 \text{ Vol.-%} < \theta_r < 10 \text{ Vol.-%}$ liegen, was ebenfalls den Schluffanteil auf < 10 bis 15 Gew.-% begrenzt,
- die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s sollte $< 10^{-6}$ m/sec sein.

Für die Kontrolle von Deponieoberflächenabdichtungen hat sich der Bereich der Bodenfeuchte mit $\theta_r < \theta < 20 \text{ Vol.-%}$ als ausreichend gezeigt. In diesem Bereich ist die θ -Verteilung über die Schichtdicke nahezu konstant. Findet von oben ein Zufluss zur Kontrollschicht statt, so stellt sich auf Grund der geringen Schichtdicke und der relativ hohen hydraulischen Leitfähigkeit eine nur geringe Differenz der Bodenfeuchte oben (θ_o) und unten (θ_u) ein. Versuche haben ergeben, dass die maximale Differenz $\theta_o - \theta_u < 2 \text{ Vol.-%}$ liegt. Nimmt man eine lineare Verteilung der Bodenfeuchte in der Kontrollschicht an, so liegt bei mittiger Messung der Messfehler mit ca. 1 Vol.-% . Das

ist die Größenordnung der Messgenauigkeit des elektrophysikalischen Systems. Darüber hinaus wird durch die gewählte Schichtdicke von $d \approx 15 \text{ cm}$ gewährleistet, dass das Messvolumen um den Sensor für die gesamte Schicht repräsentativ ist (siehe Bild 6.2.7.). Der Sensor erfasst die halbe Schichtdicke. Der Fehler der Messung bleibt also eine Funktion der Dämpfung des Materials entlang dem Sensor und der Auswertegenauigkeit der Impulskurven bei höheren Bodenwassergehalten. Bei maximal 20 Vol.-%, was ca. 60 % der Sättigung entspricht, sind diese Einflüsse jedoch vernachlässigbar gering.

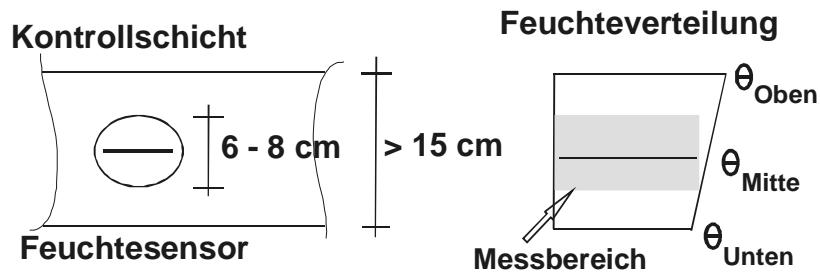


Bild 6.2.8.: Messvolumen in der Kontrollschicht und Verteilung der Bodenfeuchte bei Zufluss von oben

Die „Stabilität“ der Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem gemessenen Bodenwassergehalt (Gleichung 6.2.1.) hängt nun, da die Bodenfeuchte zuverlässig genau gemessen wird, an den Bodenparametern θ_r , θ_s und m (VGM-Parameter, n und $m = f(h_b = f(\lambda))$). Diese Parameter bestimmen die Form der pF-WG-Kurve. Die pF-WG-Kurve ist für das Material der Kontrollschicht im Labor zu ermitteln.

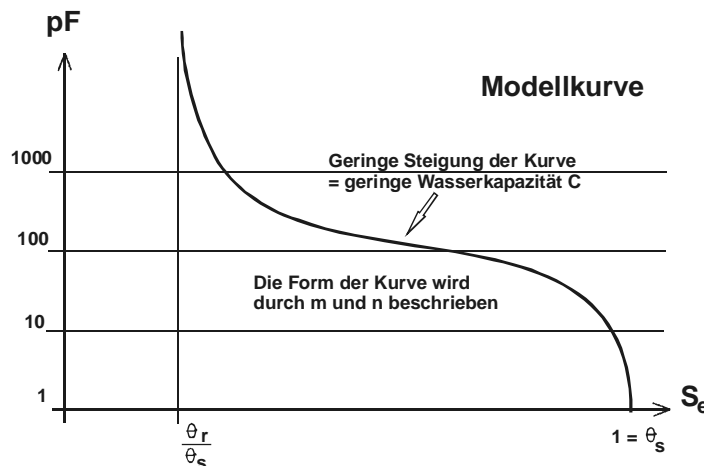


Bild 6.2.9.: Definitionen an der pF-WG-Kurve

Durch Umlagerungen im Gefüge durch die Auflast aus dem aufliegenden Abdichtungssystem können sich diese Parameter ändern. Beispielsweise sinkt bei einer Nachverdichtung der Luftporengehalt und damit θ_s , gleichzeitig kann durch den geringeren Porendurchmesser θ_r ansteigen. Der Parameter m wird ebenfalls durch die Lagerungsdichte und die Porengrößenverteilung bestimmt. Untersuchungen am Institut für Boden- und Felsmechanik (IBF) der Universität Karlsruhe haben ergeben, dass das gewählte Material (S_u) bei verdichtetem Einbau nur noch unerheblich nachverdichtet wird, d.h. die aus den aus der eingebauten Schicht entnommenen Proben bestimmten Parameter sind auch für die weitere Beobachtung repräsentativ.

Mit Hilfe von Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Form der pF-WG-Kurve im betrachteten Bereich ($\theta_r < \theta < 20$ Vol.-%) sehr stabil ist.

Betrachtet man nun abschließend noch die Gleichung 6.2.1., so wird ersichtlich, dass der Graph des Parameters S_e ($=f(\theta_r, \theta_s$ und θ)) einen linearen Verlauf hat (siehe Bild 6.2.7.). Da die Parameter θ_r und θ_s wie gezeigt stabil bleiben, bleibt auch die Funktion stabil. Der Parameter m bestimmt die Form der pF-WG-Kurve. Die o.a. Simulationen am IBF haben gezeigt, dass bei gegebenem θ_r und θ_s der Formparameter ebenfalls stabil bleibt, d.h. die Form der pF-WG-Kurve sich nicht ändert. Damit ist die Güte der absoluten Bestimmung der Bodenfeuchte nur noch abhängig von der Qualität der Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_s . Dieser Wert ist i.d.R. im Labor ermittelt und in der hier vorliegenden Größenordnung vertrauenswürdig ermittelbar.

Zusammengefasst gilt: der von den Bodenparametern abhängige Parameter β (siehe Gl. 6.2.1.) bleibt unter der Voraussetzung nur geringer Nachverdichtungen in der Kontrollschicht stabil. Damit ist die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_u proportional zur im Labor ermittelten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_s . Der absolute Fehler wird damit nicht durch die Bodenparameter bestimmt, sondern durch die Messgenauigkeit des elektrophysikalischen Kontrollsystems (siehe Kapitel 3 und 6).

6.3. Ergebnisse der Versuche

a. Inbetriebnahme des Lysimeters

Mit der Inbetriebnahme des Lysimeters konnten dessen Grundfunktionen geprüft werden. Die natürlichen Regenereignisse werden deutlich sichtbar abgebildet, ebenso das „Leerlaufen“ des Bodenmaterials nach den Regenereignissen in den Trockenperioden. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass „grobes“ Material (z.B. Kiessand oder Kies) zur Überwachung des Durchflusses anhand des Wassergehaltes nicht geeignet ist. Ein auftretender Abfluss aus einer darüber liegenden Bodenschicht kann auch bei einem Wassergehalt nahe der Residualsättigung (θ_r) im Kiessand abgeführt werden, ohne die Bodenfeuchte wesentlich zu erhöhen.

Der Lysimeter konnte mit den Referenzmessungen (aus gemessenen Saugspannungen mittels der pF-WG-Kurve ermittelten Wassergehalte und mit gravimetrisch ermittelten Wassergehalten aus Bodenproben) kalibriert werden. Dabei musste festgestellt werden, dass der bisher verwendete mathematische Auswertalgorithmus die Sensordiagramme nicht mit genügender Genauigkeit beschreibt. Die Sensorlaufzeit wurde als Funktion der Sensorlänge und als Funktion der Bodenfeuchte berechnet. So haben lange Sensoren im feuchten Material einen weniger scharfen Knick am Sensorende als kurze Sensoren im trockenen Material. An diese Problemstellung konnte der mathematische Algorithmus angepasst werden; die Sensorlaufzeiten werden unabhängig von der Ausbildung des Knicks am Sensorende ermittelt. Die Konsistenz der damit ermittelten Wassergehalte ist wesentlich verbessert. Die Phänomene, dass der Lysimeter an seinen Seitenrändern trockener ist als in seiner Mitte werden bestätigt, jedoch nicht mehr mit den ursprünglichen angenommenen Gradienten.

Mit den gravimetrisch ermittelten Wassergehalten konnte der Lysimeter mit dem neuen Algorithmus kalibriert werden. Die Feuchteverteilung im Lysimeter ist in

Abhängigkeit von den Ereignissen (Beregnung, Austrocknung, Wandern der Feuchtefront nach unten) plausibel (siehe Bild 6.2.6.). Es wurde belegt, dass in der k_f - θ -Beziehung nur ein vernachlässigbarer Einfluss der Hysterese liegt. Die Hysterese beschreibt die Zuordnung unterschiedlicher Wassergehalte der gleichen Saugspannung in Abhängigkeit des Be- oder Entwässerungszustandes im Boden. Die hydraulische Leitfähigkeit wird daher direkt nach der Gleichung von *van Genuchten/Mualem* (Gl. 2.3.5. bzw. 5.2.1.) ermittelt.

Werden die Materialeigenschaften der Detektionsschicht bestimmt, so sollte möglichst eine unimodale Bodenmischung gewählt werden. Damit wird die hydraulische Leitfähigkeit eindeutig aus dem Wassergehalt und den Bodenparametern beschreibbar. Der bindige Anteil sollte auch deshalb begrenzt werden, da die schluffigen oder tonigen Bestandteile des Bodens entlang dem Sensor für eine messrelevante Dämpfung sorgen. Diese Dämpfung begrenzt die Sensorlänge. Das Messsignal lässt sich nicht mehr eindeutig auswerten.

b. Bilanzierung und Interpretation der Regenereignisse

Auch die vereinfachte Bilanzierung von Regenereignissen bringt plausible und stabile Ergebnisse. Die aufgegebene Wassermenge von 300 Litern wird durch einen gemessenen Abfluss von 220 Litern und eine Restspeicherung im Bodenmaterial von 74 Litern, insgesamt mit 294 Litern, ausreichend genau beschrieben. Der Fehler liegt mit 6 Litern bei ca. 2 %. Weiterhin wurde Regenereignisse nach den Vorgaben des Bodenmodells bilanziert, das zusätzlich noch den Fluss durch den Bodenkörper berücksichtigt. Das Be- und Entwässerungsverhalten wurde in einzelne Zeitschritte aufgeteilt, die den Randbedingungen des Bodenmodells entsprechen. Tatsächlich konnten die Fälle 1 (Bewässerung) und 4 (Entwässerung) des Bodenmaterials anhand der Wassergehalte identifiziert werden. Auch hier wurden beide Regenereignisse genügend genau quantitativ belegt.

Allgemein gilt: grundsätzlich wird die Homogenität der Detektionsschicht (das ist die Bodenschicht, die die Bodenfeuchte-Sensoren umgibt) vorausgesetzt. Allerdings besteht die Möglichkeit, die Sensoren genau dort zu platzieren, wo Schwachstellen in der Abdichtung planerisch und/oder bautechnisch nicht auszuschließen sind. Außerdem können die Sensoren an gefährdeten Stellen enger verlegt werden. Trotzdem sollten gerade an diesen Stellen zusätzliche Bodenproben genommen werden, um neben der Dichte die für den Fluss relevanten Parameter festzustellen. Sollten nämlich im späteren Betrieb an diesen Stellen Auffälligkeiten auftreten, so könnte deren Ursache über die Materialparameter besser erklärt werden.

Die weiteren Randbedingungen des Bodenmodells sind ebenfalls über die Materialparameter der Detektionsschicht zu erfüllen. Bei dem gewählten schluffigen Sand (Su) mit einer Schichtmächtigkeit > 15 cm (*BAM*, 9) kann ein kapillarer Aufstieg nach oben bei den natürlich auftretenden Saugspannungen sicher vernachlässigt werden. Das Material kann die dazu erforderliche Saugspannung nicht aufbauen. Mit dieser Randbedingung wird die Lage der Detektionsschicht festgelegt. Sie hat außerhalb der Zone, die durch die Evapotranspiration beeinflusst wird, zu liegen, also unterhalb oder im unteren Drittel der Rekultivierungsschicht.

Liegt die Detektionsschicht unter dem oberen Flächenfilter, so ist der kapillare Aufstieg sicher unterbunden. Er kann in der Bilanzierung vernachlässigt werden. Der

Untergrund sollte „dichter“ sein als die Detektionsschicht, da sich sonst an der Schichtgrenze eine Kapillarsperre ausbilden kann. Der Wassergehalt wäre dann nahe der Sättigung (siehe Horizont b im Lysimeter). Ein quantitativer Schluss aus der Änderung des Wassergehaltes auf die hydraulische Leitfähigkeit und den Durchfluss wird nicht möglich. Bei Böschungsneigungen über 5 % stellt sich zudem ein lateraler Abfluss parallel zur Schichtgrenze ein. Die Modellrandbedingungen sind also strikt zu beachten und konstruktiv umzusetzen.

Einsatzgrenzen für das Messverfahren bestehen auch dort, wo über die Detektionsschicht Inhomogenitäten in den darüber liegenden Schichten erfasst werden sollen. Wird die Detektionsschicht selbst beispielsweise durch Pflanzenwurzeln oder Tiergänge perforiert, können die Durchflüsse in diesen präferenziellen Fließwegen nicht detektiert werden. Das Bodenmaterial der Detektionsschicht wird flächig dabei seinen Wassergehalt nicht ändern. Das Material der Detektionsschicht ist so zu wählen, dass Flüsse durch Makroporen im darüber liegenden Material „aufgefangen“ werden. Diese Flüsse führen dann in der Detektionsschicht zu einer Erhöhung des Wassergehaltes, sind quasi als Leckage ortbar und bei genügend eng verlegten Sensoren quantifizierbar.

c. Abgleich mit den Wassergehalten eines Freilandlysimeters

Interessant wird der Abgleich mit den Verhältnissen in einer Rekultivierungsschicht über den Jahresgang. Bild 6.3.1. zeigt, wie die Bodenfeuchte in vier Horizonten eines Lysimeters mit dem Drainageabfluss gekoppelt ist (*Henken-Mellies, 86a*). Grundsätzlich ist bei einer ausreichend dimensionierten Rekultivierungsschicht nur in der Vegetationsruhe mit Drainageabflüssen, das sind die Abflüsse unmittelbar oberhalb der Dichtungsschicht, zu rechnen. Nur bei einer Überschreitung eines kritischen Wassergehaltes im Horizont 1 (ca. 80 cm unter der Oberfläche) kommt es auch zu einer Durchsickerung der Dichtungsschicht. Dieser kritische Wassergehalt ist offenbar eine bodenspezifische Größe. Denn in allen drei beobachteten Jahren findet die Durchsickerung der Dichtungsschicht erst bei einem Wassergehalt > 18 Vol.-% statt.

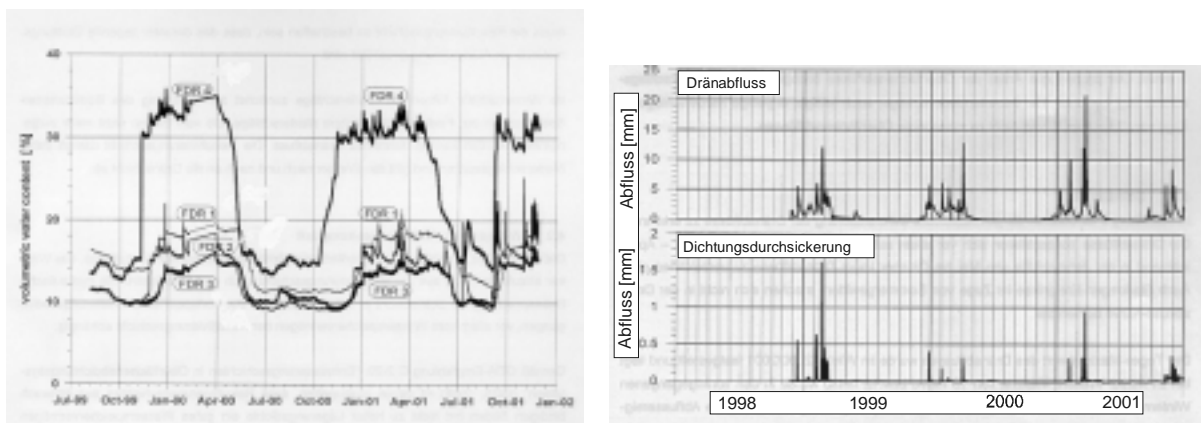


Bild 6.3.1.: Verlauf der Wassergehalte in einem Freilandlysimeter und der Durchsickerung (86a)

Der Durchfluss ist qualitativ sehr gut zu detektieren. Quantitativ ist nicht nur die Höhe des Wassergehaltes bestimmend, sondern auch die Dauer der Überschreitung des kritischen Wassergehaltes. Sehr schön ist in Bild 6.3.1. zu erkennen, dass die Detektionsschicht möglichst nahe der zu überwachenden Schicht liegen soll. Im Profil FDR4 in 20 cm Tiefe steigt der Wassergehalt in der Vegetationsruhe (ca. 35 Vol.-%, das ist ein Wert nahe der Sättigung) weit über den kritischen Wassergehalt im

maßgeblichen Profil (FDR1) an. Die zahlreich auftretenden Spitzen geben keinen Anhalt auf die Durchsickerung der Dichtschicht. Die Bodenfeuchteverläufe in den Schichten dazwischen (FDR2 und FDR3) sind eng mit dem Verlauf in Profil FDR1 korreliert, jedoch ist da ein eindeutiger kritischer Wassergehalt nicht erkennbar. Die unterschiedliche Höhe der Bodenwassergehalte in den einzelnen Profilen ist natürlich auch eine Funktion der Verdichtung der jeweiligen Schicht.

Es ist auch erkennbar, dass es mit dem gewählten Messverfahren nicht möglich ist, in der Vegetationszeit die Wasserbewegung in der Rekultivierungsschicht zu beschreiben. Wegen der unterschiedlichen Richtung des Potenzials und wegen des Flüssigkeitsentzugs durch Pflanzen, sind keine aussagekräftigen Verknüpfungen zum Bodenwassergehalt erkennbar.

d. Prüfkriterien der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)

Die BAM hat eine Empfehlung (9) erarbeitet, die einheitliche Maßstäbe an den Einsatz von Kontrollsystemen für Oberflächenabdichtungen (DKS) stellt. Neben den Vorgaben zur Zertifizierung der Messsysteme sind die wesentlichen Anforderungen die Genauigkeit der Ortung von Schadstellen. Dabei wird in flächige und punktförmige Schadstellen unterschieden. Es gilt:

- Punktförmige Schadstellen (Leckagen in KDB, Einfluss von Makroporen) sind nach folgenden Kriterien zu orten:
 Technische Schwelle: $d_{\text{Leck}} > 5 \text{ mm}$ ($F_{\text{Leck}} > 20 \text{ mm}^2$)
 Ortungsgenauigkeit: auf 20 m^2 genau (entspr. Kreis mit Radius 5 m)
- Flächige Schadstellen (Versagen von MA) sind über den Indikator Wassergehalt zu detektieren.

Hier wird der Bodenwassergehalt als Prüfkriterium zugelassen, entgegen dem gesetzlichen Prüf- und Überwachungsparameter hydraulischer Leitfähigkeit. Für die Festlegung etwaiger Sanierungsmaßnahmen ist es notwendig, über den möglichen Durchfluss die Beeinträchtigung des Wasserhaushaltes der Mülldeponie zu berechnen. Die Ergebnisse aus 6.3.a. bis 6.3.c. lassen es zu, höhere Anforderungen an das DKS zu stellen.

e. Weiterer Handlungsbedarf

Es fällt auf, dass jedes Bodenmaterial offensichtlich einen individuellen kritischen Wassergehalt besitzt, bei dem in Abhängigkeit von seiner geometrischen Lage und weiterer geometrischer Parameter wie Hangneigung und Hanglänge, ein Durchfluss möglich wird. Dieser kritische Wassergehalt liegt bei schluffigem Sand (Su) mit ca. 12 bis 15 Vol.-% über dem Residualwassergehalt. Dabei spielen die gegenseitige Beeinflussung aufeinander liegender Bodenschichten und deren jeweilige Verdichtung eine entscheidende Rolle. Auch sollte die „nasse“ Seite (nahezu gesättigte Verhältnisse) untersucht werden. Misst man die Bodenfeuchte in der Natur nahe der Bodenoberfläche, so sind dort nach Regenereignissen, die mengenmäßig für den Fluss relevant werden, nahezu gesättigte Verhältnisse im Boden festzustellen. Untersucht wurde bisher nur die „trockene“ Seite, d.h. Wassergehalte zwischen der Residualsättigung und ca. 25 Vol.-%. Die „nasse“ Seite (Wassergehalte über 25 Vol.-% bis zur Sättigung) soll im Rahmen eines weiteren Projektes untersucht werden. Ebenso ist der Einfluss z.B. des Wasserentzugs von Pflanzen auf die Richtung der Wasserbewegung noch ungeklärt.

7. Numerische Verfahren

Zur Beschreibung des Wasserhaushaltes von Mülldeponien oder von deren Oberflächenabdichtungen sind eine Vielzahl numerischer Verfahren auf dem Markt. Mit Hilfe dieser Verfahren ist es möglich, über die Bilanzierung der relevanten wasserwirtschaftlichen Einflussfaktoren bestehende Oberflächenabdichtungen zu bewerten. Dabei werden regionale Besonderheiten (Meteorologie, Orographie, Exposition, Pflanzensoziologie und -wachstum) ebenso berücksichtigt wie die Zusammensetzung der abgelagerten Abfälle. Aus der Bewertung der Oberflächenabdichtung erhält man ein Instrument zur Planung und Festlegung von Sanierungsmaßnahmen oder von lokalen Reparaturen. Ebenso wird es möglich, die Wirkung planerischer Modifikationen von Abdichtungssystemen zu prognostizieren und hinsichtlich ihrer Tauglichkeit zu bewerten. Auch neue Abdichtungssysteme können so simuliert werden und mit der Bewertung der Wirkung einzelner Komponenten optimiert werden.

7.1. Vorstellung von numerische Verfahren

Die numerischen Verfahren beschreiben den Fluss in der ungesättigten Bodenzone und die Verdunstung aus dem Boden heraus. Die Quelle der Verfahren liegt in der Modellierung von Grundwasserströmungen. Mit Hilfe von Finite-Elemente-Verfahren war es schon in den 70er Jahren möglich, vertikal-ebene Probleme (z.B. Durchsickerung eines Hochwasserdammes) oder horizontal-ebene Problemstellungen (z.B. Veränderung des Grundwasserspiegels eines Einzugsgebietes bei Entnahme von Wasser) zu lösen (*Kaleris, 107*). Der Rechenaufwand war in Abhängigkeit vom Diskretisierungsaufwand recht hoch. Die Kalibrierung dieser Modelle war aufwändig, da oftmals die Modellrandbedingungen angepasst werden mussten. Mit den Arbeiten von *Montenegro* und *Herrling (134, 135)* fanden diese Arbeiten mit Beginn der 90er Jahre ihren Abschluss. Es war möglich, damit bodenhydraulische Parameter zu ermitteln und die Sickerwasserbewegung zu simulieren.

Die Modellierung der Wasserbewegung in Hängen erfolgt mit dem Hangmodell „Hillflow“ (*Bronstert et al., 29, 30, 31, 32, Zischak, 242*). Das Modell hat seinen Schwerpunkt in der Modellierung der Verdunstung und der Evaporation. *Zischak (242)* beschreibt die Simulation des Wasserhaushaltes in einem Großlysimeter auf der Mülldeponie Karlsruhe-West. In einem vertikalen Schnitt wird die Wasserbilanz aufgestellt. Der Inputgröße Niederschlag entspricht die Summe aus den Abflüssen (lateral, vertikal), der Speicherung im Boden und der Evapotranspiration. Alle Größen sind messbar, somit ist das Modell kalibrierbar. Die gemessenen Werte werden mit dem Modell auch gut reproduziert. Der Abfluss im Kiesfilter über der mineralischen Abdichtung konnte zuerst nicht modelliert werden. Das Potenzialkonzept hat wegen der hohen Porosität nicht gegriffen. Die Makroporen wurden dann über eine hohe gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und eine Anisotropie von fünf angenähert. Damit konnte die hohe laterale Abflusskapazität beschrieben werden. Das Modell gibt nach der Aussage seiner Verfasser nur Hilfestellung zur Dimensionierung der einzelnen Abdichtungselemente. Es findet seine Grenzen dort, wo nur geringe Abflüsse auftreten, also bei Oberflächenabfluss und Abfluss im Kapillarblock. Für die Prognose von Auswirkungen veränderter Abdichtungselemente ist das Modell wenig geeignet. Bei der Verlängerung des Prognosezeitraumes von neun auf 31 Monate verschlechtert sich die Homogenität der Ergebnisse um den Faktor 27. Das Modell

gibt als Output die vertikale Verteilung des Wassergehaltes über den gesamten Dichtungsquerschnitt und die Abflüsse in den einzelnen Schichten an.

Aufbauend auf „Hillflow“ wurde für die Betrachtung eines gesamten Einzugsgebietes das Programm „Catflow“ entwickelt (Zehe, 237, 238). Problematisiert wird dabei die Regionalisierung von lokal gemessenen Parametern. Da eine Mülldeponie i.a. ein Bauwerk von begrenzten Abmessungen ist, ist hier lediglich die Exposition der Böschungen zu berücksichtigen. Die Exposition und der Einfluss kleinräumiger meteorologischer Phänomene (Steig- und Fallwinde, Kaltluftabfluss aus der Müllschüttung, etc.) ist jedoch nur für die Verbesserung der Vorhersage der Evapotranspiration von Belang. Im übrigen gelten die zu „Hillflow“ gemachten Bemerkungen.

Weitere Modelle werden von Berger (15) genannt. Hier wird nur noch auf die gängigen Verfahren eingegangen. An der Universität Freiberg wurde das Deponie- und Halden-Wasserhaushalts-Modell BOWAHALD entwickelt (Dunger, 51, und Beitrag beim Seminar „Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten“ an der Universität Karlsruhe, 2001). Es ist ein konzeptionelles Boxmodell, das den Wasserhaushalt einer Halde zweidimensional simuliert. Dazu ist die Halde horizontal in sog. Hydrotope, das sind Flächen mit gleichen hydrologischen Bedingungen, aufzuteilen. Inputgrößen sind neben den meteorologischen Parametern die Bodenparameter (k_s , θ_s , Feldkapazität, Welkepunkt, kapillare Steighöhe, Schichtenfolge) und die Geometrie der Halde. Das Programm erkennt selbständig, welche Aufgabe der einzelnen Schicht zugeordnet ist (Perkolationsschicht, Dichtschicht). Der Schichttyp muss nicht vorab definiert werden. Die Sickerung wird nach dem Darcy-Gesetz berechnet. Als Ergebnis erhält man u.a. die Bodenfeuchte-Verteilung in allen Schichten und vertikale Feuchteprofile. Mit dem Programm sind Kapillarsperren nicht zu modellieren. Makroporen im Bodenmaterial sind nicht darstellbar. Es berechnet die Flüsse in den Bodenschichten auf der Basis gesättigter Verhältnisse. Die Restdurchsickerung ergibt sich aus der Niederschlagsmenge abzüglich der Verdunstung und der Speicherung im Bodenmaterial. Das Modell „BOWAHALD“ ist per Erlass des zuständigen sächsischen Ministeriums zur Simulation des Wasserhaushaltes in Sachsen empfohlen und eingeführt.

Unter der Regie von *van Genuchten* entwickelten *Vogel und Gehrke* (220), aufbauend auf den Untersuchungen von *Zhang* (240, 241), ein Modell, mit dem der Fluss und der Transport im Boden zweidimensional bei räumlich variablen hydraulischen Parametern berechnet werden kann. Die Basis dazu waren grundlegende Studien der Bestimmung der bodenhydraulischen Parameter, beispielsweise aus Infiltrationsversuchen. Der Schwerpunkt liegt auf der Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Das Modell ist für den Einsatz zur Wasserhaushaltsberechnung von Deponie-Abdichtungen noch nicht geeignet. Allerdings berücksichtigt es die Mechanismen in der ungesättigten Bodenzone.

Diersch (46) hat im Internet sein Programm FEFLOW 4.7 vorgestellt. Er bietet damit an, ungesättigte Strömungs- und Transportprozesse zu modellieren. *Ruan* (181) optimiert auf der Basis vertikaler Infiltration die Vorhersage der Saugspannungen in sandigen Böden. Mit der Zielsetzung, für die Landwirtschaft verbesserte Prognosen für die Dosierung der Beregnungswassermenge zu schaffen, verwendet er das Modell von *Mualem*, das den Bodenwassergehalt aus den vorhergesagten Saugspannungen ableitet (pF-WG-Kurve). Der Wassergehalt des Bodens ist der

Inputparameter für die Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Dabei sind die Effekte der Hysterese (siehe Abschnitt 2.5.) zu beachten. *Musters et al.* (144) bietet eine Simulation an, die die Wasserverteilung im Boden zum Ergebnis hat. Allen diesen Modellen ist gemein, dass sie für die Simulation des Wasserhaushaltes einer Mülldeponie nicht geeignet sind, da sie auch unter anderen Zielsetzungen entstanden sind.

7.2. Das numerische Modell „HELP“

Eingeführt zur Berechnung und Prognose des Wasserhaushaltes von Abdichtungen und Abdeckungen von Mülldeponien ist das Simulations-Programm HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance). Die Arbeitsweise des Programms wird bei *Berger* (13, 14, 15, 16), *Markwardt et al.* (123, 124) und *Reuter et al.* (166, 167) vorgestellt. Über die Empfehlungen der GDA (E2-30) ist das Verfahren bundesweit eingeführt. Es hat einen sehr hohen Validierungsstandard und ist auch von den Aufsichtsbehörden als Prognose- oder Beurteilungsinstrument anerkannt. HELP modelliert einen geschichteten Oberflächenaufbau, wobei die Funktion der einzelnen Schicht (Perkolation, Entwässerung, Dichtung) im voraus zugeordnet werden muss. Inputparameter für die Infiltration sind die gängigen Bodenparameter, wie gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, Porenvolumen, Feldkapazität. In der Dichtschicht werden wassergesättigte Verhältnisse angesetzt. In der Perkolationsschicht (= Wurzelboden oder Rekultivierungsschicht) wird die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit abgemindert, da die einlagerte Luft den wasserleitenden Querschnitt verengt. Weiterhin wird angenommen, dass der Anteil des Niederschlags, der den verdunstungsbeeinflussten Bodenbereich verlassen hat, nicht mehr pflanzenverfügbar ist und somit der Verdunstung nicht mehr zur Verfügung steht. Es findet keine aufwärts gerichtete Wasserbewegung statt. Dieser Anteil des Niederschlags gilt als versickert. Makroporen sind mit HELP nicht darstellbar, ebenso können Kapillarsperren nicht simuliert werden. Der laterale Abfluss in der Dränageschicht wird nach Boussinesq berechnet und stellt nach Untersuchungen von *Zischak* (245) die unterste Grenze der Leistungsfähigkeit dar. Für die Berechnung der Evapotranspiration spielt der Anfangswassergehalt im Boden eine entscheidende Rolle. Im Output bietet HELP keine vertikalen Feuchteprofile.

HELP ist das einzige gängige und validierte Simulationsprogramm, das in der Perkolationsschicht ungesättigte boden-hydraulische Verhältnisse berücksichtigt. *Kausch et al.* (106) und *Weiss et al.* (226) haben die praktische Anwendung von HELP beschrieben. Dabei konnten die Grenzen von HELP (siehe auch *Berger*, 14) herausgearbeitet werden. Es gilt:

- Die Bodenart der Rekultivierungsschicht hat keinen relevanten Einfluss auf die Höhe der Evapotranspiration (Sand = 420 mm/a, Ton = 490 mm/a)
- Der Einfluss des Bewuchses wird unterschätzt (Blattflächenindex = 0 → Verdunstung = 420 mm, Blattflächenindex = 10 → 480 mm)
- Das „Altern“ von Bodenschichten, das ist die zunehmende Durchwurzelung, Nachverdichtung oder Auflockerung durch Setzungen oder Verschlammungen, kapillare Austrocknung, wird nicht berücksichtigt.
- Eine Dränmatte unter der Rekultivierungsschicht kann nicht modelliert werden (detektierter Verfahrensfehler im Programm)
- Allgemein setzt HELP in Dränschichten laminares fließen voraus. Bei k_f -Werten größer 10^{-2} m/sec bildet sich jedoch schon eine turbulente Strömung

im Kiesfilter aus. Damit kann HELP die hydraulische Leitfähigkeit überschätzen. Zischak (s.o., 242) sieht hier gerade ein Unterschätzen der Leistungsfähigkeit.

- Wird die Rekultivierungsschicht zweilagig mit verdichteter unterer Schicht eingebaut, so soll diese unter feuchten klimatischen Verhältnissen nicht als Perkolationsschicht, sondern als Dichtschicht definiert werden (detektierter Verfahrensfehler im Programm). Nur bei sehr feuchten Verhältnissen hat der verdichtete Untergrund überhaupt einen Einfluss auf die Höhe der Evapotranspiration.
- Dabei wird der Wasserstress, der durch den Aufstau in den Wurzelboden durch die verdichtete untenliegende Schicht erfolgt, im Programm nicht berücksichtigt.

HELP hat sicher seine Stärken in der sehr detaillierten Modellierung der Evapotranspiration, seine Schwächen in der Modellierung des Flusses in der ungesättigten Bodenzone. Sehr überzeugend ist die Berücksichtigung von Konvektionssperren (Kunststoffdichtungsbahnen), bei denen die Verlegequalität berücksichtigt wird (Anzahl der Fehlstellen, d.h. Löcher je Hektar). Dabei wird der Durchmesser eines Loches in Abweichung von den Empfehlungen der BAM mit 1,0 cm anstatt mit 0,5 cm angegeben.

HELP arbeitet als Prognose-Programm in Monats- und Jahresschritten. Kurzzeitige Ereignisse, wie einzelne Regenereignisse auf einen Lysimeter, lassen sich dadurch natürlich nicht darstellen. Trotzdem wurde der Wasserhaushalt im Lysimeter mit HELP simuliert. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der Lysimeter nicht abgedeckt ist, also den HELP-implizierten Regenereignissen (abgeglichen auf die örtlichen Verhältnisse) zugänglich ist. Außerdem wurden die einzelnen Schichten im Lysimeter analog einer Oberflächenabdichtung definiert. Es ist interessant, dass bei dem gewählten Boden nur 25 % des Niederschlags (170,9 mm von insgesamt 701,8 mm) den Lysimeter vertikal passiert haben, also in den gedachten Müllkörper eingedrungen wäre. Es ergab sich folgende Bilanz:

| Bezeichnung | Jahr 1 | Jahr 2 | Jahr 3 | Jahr 4 | Jahr 5 | Durchschnitt |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| Niederschlag | 689,2 | 739,6 | 673,1 | 696,2 | 711,0 | 701,8 |
| Oberfl. Abfl. | 0,7 | 27,4 | 0,4 | 11,2 | 1,9 | 8,3 |
| Evapotransp. | 521,3 | 515,9 | 548,3 | 494,5 | 528,1 | 521,7 |
| Drän. Abfl. | 167,3 | 194,8 | 160,9 | 153,6 | 178,3 | 170,9 |
| WG Anfang | 294,9 | 294,7 | 296,2 | 258,0 | 296,1 | - |
| WG Ende | 294,7 | 296,2 | 298,0 | 296,1 | 298,8 | - |

Tabelle 7.2.1.: Simulation des Wasserhaushaltes des Lysimeters mit HELP (Angaben in mm/a)

Die Bilanzierung lässt sich noch in Monatswerte aufschlüsseln. Das führt hier aber nicht zu einer Verbesserung der Genauigkeit.

Das elektromagnetische Verfahren zur Messung des aktuellen Bodenwassergehaltes kann hier einen Beitrag zur Optimierung der Kalibrierung leisten. Da i.a. die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach dem Modellansatz von Campbell berechnet wird, ist die Bodenfeuchte der wesentliche Bestimmungsparameter. Die Campbell-Formel ist von der Form

$$y = a x^b \quad (7.2.1.)$$

wobei im Exponenten b ein Formparameter der Kornverteilung (λ) steht und für a die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit eingesetzt wird. Der aktuelle Wassergehalt geht in den Faktor x als einzige Variable ein (x wird hier für die relative Sättigung S_e gesetzt). Wie in Abschnitt 6.2., Bild 6.2.7. aufgezeigt, ist S_e linear vom aktuellen Wassergehalt (θ) abhängig. Der Verlauf von y ähnelt ebenfalls dem Verlauf des Koeffizienten β (Bild 6.2.7.). Das heißt, der aktuelle Wassergehalt wird die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit erst ab einem Sättigungsgrad von 50 % und mehr auf relevante Größen steigen lassen.

Der Fluss in der ungesättigten Bodenzone beeinflusst in hohem Maße die Speichereigenschaften der Schicht. Wird der Fluss überschätzt, so steht zu wenig Wasser den Pflanzen und damit der Verdunstung zur Verfügung. Eine Kalibrierung des Oberbodens (Rekultivierungsschicht) ist zur Verbesserung der Bilanzschärfe notwendig.

7.3. Kalibrierung der numerischen Verfahren

Die vorgestellten numerischen Verfahren legen alle ihren Schwerpunkt auf die Berechnung der Evapotranspiration. Dazu ist es aber notwendig, den aktuellen Wasservorrat in der Rekultivierungsschicht zu kennen. Wird dieser Wasserspeicher zu gering angenommen, kann gerade in der Vegetationszeit nur eine zu geringe Wassermenge den Pflanzen zur Verfügung gestellt werden. Auch ist die Speicherfähigkeit des Bodens für die Bilanzierung wichtig. So können kleinräumige Inhomogenitäten (horizontale Abfolge unterschiedlicher Bodenschichten) dazu führen, dass sich lokal Kapillarsperren ausbilden, die eine wesentliche erhöhte Wasserspeicherkapazität haben. Das ist gerade in flachen Deponiebereichen für die Wasserbilanz entscheidend, weil hier ansonsten ein hohes Maß an Versickerung angesetzt wird.

Mit der kontinuierlichen Messung der Bodenwassergehaltes hat man eine Möglichkeit, den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht besser quantitativ zu verstehen. Mit einem Messhorizont direkt unter der Rekultivierungsschicht lässt sich der Fluss in die Dränageschicht quantifizieren. Die Bilanzierung kann besser geschlossen werden, die Unsicherheiten aus den Berechnungsansätzen der Evapotranspiration haben weniger Einfluss auf die Interpretation der Messwerte. Zudem ist es mit dem Bodenfeuchte-Messsystem möglich, über einen langen Zeitraum die Prognose-Werte der numerischen Verfahren zu belegen. Nachkalibrierungen zur Berücksichtigung von Änderungen im Bodengefüge („Alterung“), der veränderten Wurzelmenge im Boden oder des Auftretens von Makroporen (Wurzel- und Tiergänge), sollen jederzeit möglich sein.

Diese Möglichkeiten werden erstmals auf einer Deponie in Baden-Württemberg in der Praxis erprobt. Dabei ist es die Grundaufgabe, die Funktion und die Wirksamkeit eines alternativen Oberflächenabdichtungssystems über einen langen Zeitraum nachzuweisen und zeitlich aufgelöst zu belegen. Gleichzeitig ist es auch möglich, die Bedeutung der Rekultivierungsschicht für den lokalen Wasserhaushalt darzustellen. Dabei sollen auch die Möglichkeiten genutzt werden, die das Bodenfeuchte-Messsystem zur Kalibrierung numerischer Modelle bietet. Besonders sind die Ansätze von *Bronstert, Merkel und Zischak* interessant, die einen vertikalen Schnitt durch einen Hang modellierten und in einem vertikalen Schnitt den Wassergehalt in den einzelnen Bodenschichten darstellten.

8. Anwendungen der Feuchtemessung

Die Feuchtemesstechnik ist in vielfältigen Anwendungen gefragt. Im Anhang 9.2. sind einige Beispiele thematisch geordnet dargestellt. Natürlich lässt sich das Spektrum beliebig erweitern, denkt man nur an die Überwachung der Reinheit von Kraftstoffen bei der Optimierung des Verbrauchs in Verbrennungsmotoren, der genauen Dosierung von pharmazeutischen Produkten oder der Prognose des Wasservorrats im Schnee (*Henigin, 86*) zur Optimierung der Talsperrenbewirtschaftung zum Hochwasserschutz und zur Energiegewinnung. Die folgenden drei Beispiele werden sich auf das Grundthema, nämlich die Abfallwirtschaft beschränken. Es wird gezeigt, dass es auch kleinräumig möglich sein wird, Durchflüsse zu lokalisieren (Ortung von Leckagen in synthetischen Abdichtungselementen, den Konvektionssperren). Weiterhin ist es möglich, über das Monitoring von Deponien deren Schwachstellen unmittelbar zu erkennen und zu bewerten, und schließlich kann der Bau gefährdeter Dichtungselemente (im wesentlichen mineralische Elemente) begleitet und flächenmäßig kontrolliert werden.

8.1. Leckageortung in Konvektionssperren

Konvektionssperren in Abdichtungssystemen haben die Aufgabe, unmittelbar nach ihrem Aufbringen den Transport von Flüssigkeiten in die Deponie zu unterbinden. Außerdem werden gasförmige Emissionen aus einer biologisch noch aktiven Mülldeponie verhindert. Verwendet werden dazu Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) aus HD-PE. Die Mechanismen des Stofftransportes durch eine KDB und Kriterien für die Qualität der KDB nach deren Verlegung sind bei *Müller (142, 143)* umfassend beschrieben.

Für die Qualität der Ortung von Fehlstellen (Leckagen) in Konvektionssperren hat die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) spezielle Empfehlungen erlassen (9):

- Technische Nachweisschwelle:
„Leckagen aufgrund von kreisförmigen Löchern ab 5 mm Durchmesser (entsprechend einer Fläche je Leckagestelle ab 20 mm²) müssen nachgewiesen werden.“
- Ortungsgenauigkeit:
„Die von einem Dichtungskontrollsystem angezeigte Position einer Leckage muss innerhalb eines Kreises mit Radius ~ 2,5 m (entsprechend einer Fläche von 20 m²) um die tatsächliche Position der Leckage liegen.“
- Anforderung an das Auflager der Kunststoff-Dichtungs-Bahn (KDB):
„ k_f -Wert $\leq 10^{-6}$ m/s, Dicke $\geq 0,15$ m zur Limitierung der durch Schadstellen dringenden Flüssigkeitsmenge.“

Dazu ist eine Funktionsprüfung durchzuführen. Dabei werden Testleckagen in die KDB eingebracht, deren Detektion von einem behördlich bestellten „Fremd“-Überwacher (FÜ) überwacht und protokolliert werden. Die Ortung der Leckagen hat daher innerhalb einer kurzen Zeitspanne zu erfolgen. Z. Zt. einsetzbare Leckage-Ortungssysteme detektieren eine Änderung des elektrischen Potentials um eine Leckage (*Rödel et al., 171, 172, 173*). Dabei kann aber nicht unterschieden werden, ob die detektierte Fehlstelle relevant wird für den Wasserhaushalt der Deponie oder nicht.

Wehry (225) hat auf Basis seines physikalischen Modells (siehe Bild 8.1.1.) ein analytisches Modell entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, den Wasserdurchtritt durch eine Fehlstelle in einer KDB in Abhängigkeit von den bodenmechanischen Eigenschaften der umgebenden Materialien zu quantifizieren.

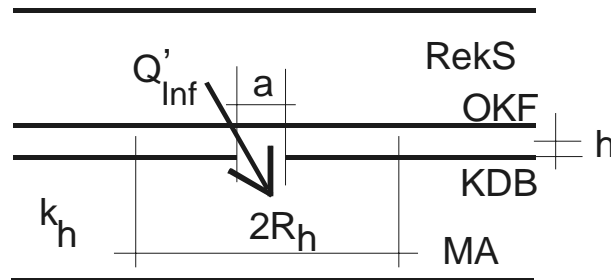


Bild 8.1.1.: Physikalisches Leckage-Modell nach Wehry (225)

Im ungesättigten Bereich definiert er einen Radius (R_h), in dem die einsickernde Wassermenge das Bodenmaterial benetzt. Dieser Radius ist eine Funktion des Durchmessers der Fehlstelle (a), des hydrostatischen Druckes im Niveau der Fehlstelle (h) und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit nach VGM (k_{VGM}) (siehe Gl. 5.2.5.). Die Infiltrationswassermenge ergibt sich zu:

$$Q'_{inf.} = 2 * \pi * R_h^2 * k_{VGM} \quad (\text{Gl. 8.1.1.})$$

mit

$$R_h = 0,26 * a^{0,05} * h^{0,45} * k_{VGM}^{-0,13} \quad (\text{Gl. 8.1.2.})$$

Die Struktur der Formel findet sich auch in den Untersuchungen von *Giruod und Bonaparte (1989, „Leakage through liners constucted with geomembranes“)* wieder. Für hydraulische Leitfähigkeiten $< 10^{-6}$ m/sec hat Wehry Nomogramme entwickelt, aus denen direkt die Abmessung des benetzten Querschnitts (R_h) in Abhängigkeit vom Durchmesser der Fehlstelle und der hydrostatischen Druckhöhe abgegriffen werden kann (siehe auch *Walton et al., 222*).

Grundsätzlich sind auch die vorgestellten Bodenfeuchte-Sensoren in der Lage, Testleckagen zu detektieren. Bei planmäßigem Einsatz der Sensoren in einem wirtschaftlichen Regelabstand von > 5 m kann die Detektion der Testleckagen im ungünstigen Fall jedoch erst nach einigen hundert Tagen erfolgen. Diese Zeit benötigt die Leckageflüssigkeit, um durch die MA bis zum Sensorkabel zu gelangen. Folglich ist es das Ziel:

Die Reaktion des Systems hat innerhalb eines Tages zu erfolgen.

Dazu ist ein Fließweg zu schaffen, mit dessen Hilfe die Sensoren schneller ansprechen. Der Ansatz führt zu der Vorgabe der BAM, unter einer KDB ein spezielles Auflager einzurichten. In diese Schicht sind die Materialien, die den direkten Fließweg sicherstellen, integrierbar.

Zur Erprobung von Materialien wurde eine Messeinrichtung gefertigt. Damit werden folgende Materialeigenschaften getestet:

- o Wasserleitfähigkeit, d.h. wie schnell wird das Wasser im Material geleitet,

- o Wasseraufnahmefähigkeit, d.h. welche Flüssigkeitsmenge nimmt das Prüfmaterial auf, um es eine bestimmte Strecke weit zu transportieren.

Die Messeinrichtung ist wie folgt aufgebaut:

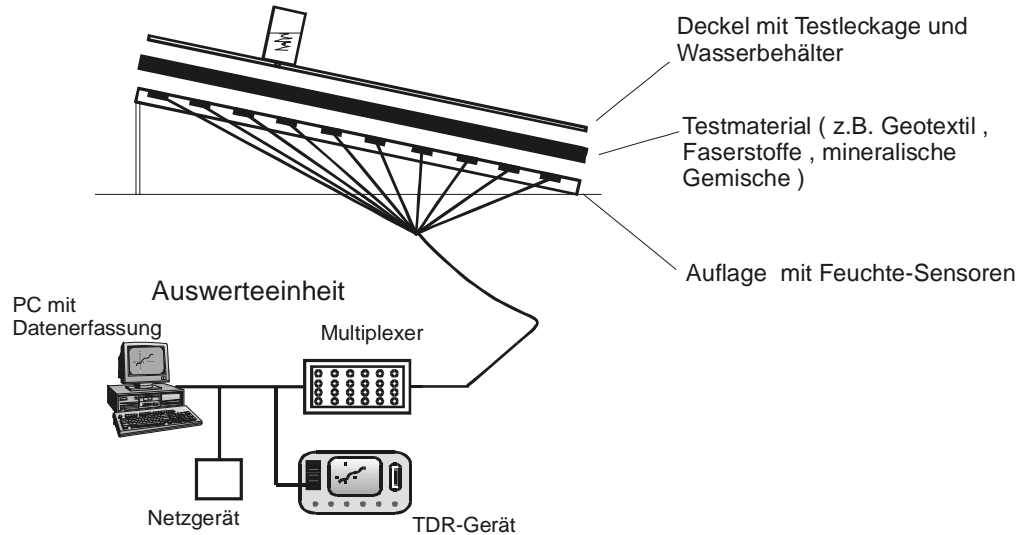


Bild 8.1.2.: Aufbau der Testeinrichtung zur Detektion von Leckagen

Zunächst wurde die Funktion der Messeinrichtung erprobt. Die Messeinrichtung ist aus Plexiglas, sodass das Vordringen der Flüssigkeit nicht nur mittels der eingebauten Feuchtesensoren detektiert werden kann, sondern auch optisch mittels Kamera zur Kontrolle. Bild 8.1.3. zeigt die Ausbreitung der Flüssigkeit kurz nach deren Aufgabe, Bild 8.1.4. ist ca. ein Stunde später aufgenommen.



Bild 8.1.3.: Bewässerung nach 15 Minuten (9:28 Uhr)

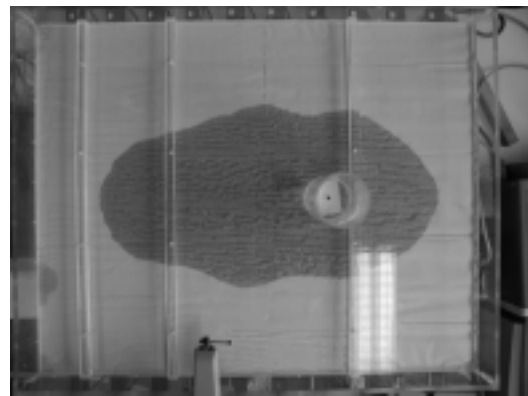


Bild 8.1.4.: Bewässerung nach 70 Minuten (10:29 Uhr)

Das Messsignal von Sensor-Nr. 3 (platziert an der zweiten Querstrebe von links) ist in Bild 8.1.5. dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Feuchtefront zwischen 10:17 Uhr und 10:29 Uhr den Messsensor erreicht hat. Während bei den drei Messungen vorher die Dielektrizitätszahl des trockenen Papiers die Sensorlaufzeit bestimmt hat, bestimmt in den folgenden beiden Messungen die Dielektrizitätszahl des Wassers die Sensorlaufzeit.

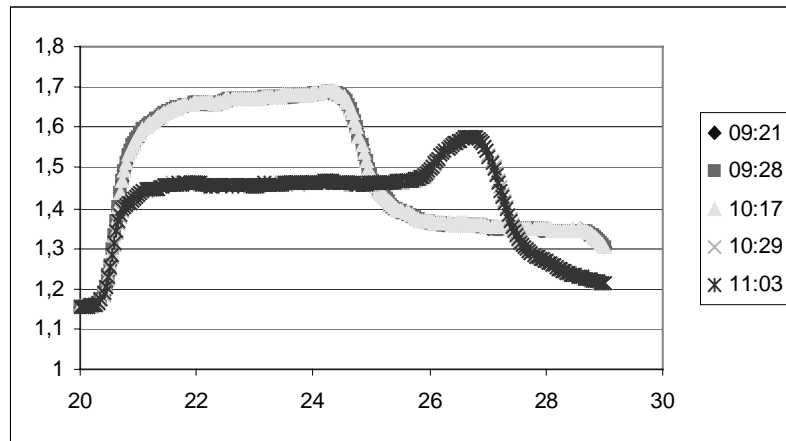


Bild 8.1.5.: Verlauf der Spannungskurven in den Feuchtesensoren (Sensor 3)

Da hier nur der qualitative Effekt gefragt ist, ist diese Aussage über das Vorhandensein einer Leckage ausreichend. Nachdem damit die prinzipielle Funktion der Leckagedetektion nachgewiesen werden konnte, bleibt noch die Aufgabe, unterschiedliche Materialien (mineralische und synthetische) auf ihre Geeignetheit zu prüfen. Die laterale hydraulische Leitfähigkeit oder der laterale Abfluss in einer Kapillarsperre sind die maßgeblichen Größen. Wie aus dem Lysimeterversuch (Kapitel 5 und 6) ersichtlich wurde, könnte auch die Einlage eines synthetischen Dräns (Geotextil mit hoher horizontaler hydraulischer Leitfähigkeit oder eine Dränmatte) ohne Wasserhaltefähigkeit die Detektionsgeschwindigkeit und Auflösung wesentlich erhöhen.

Diese Detektion einer Leckage in einer Schicht ist durch die Änderung der Impulslaufcharakteristik übertragbar auf die Detektion von Inhomogenitäten in Böden. Wird eine Kontrollschicht nach den Vorgaben der BAM beispielsweise unter der Rekultivierungsschicht eingebaut, können mittels der Feuchtesensoren Flüsse über präferenzielle Fließwege (Makroporen) detektiert werden. Um diese Flüsse zu quantifizieren ist es erforderlich, die Änderung des Wassergehaltes in der Schicht mit deren hydraulischer Leitfähigkeit zu verknüpfen. Es ist dann nur noch die geometrische Lage der Sensoren an die gewünschte Auflösung anzupassen.

8.2. Monitoring (Deponie-Jahrbuch)

Im Anhang 9.1. wurden die gesetzlichen und rechtlichen Grundlagen für die Abfallwirtschaft dargestellt. Es wird ein starkes Gewicht auf die Überwachung der Mülldeponien gelegt. Dazu wurde mustergültig für die Beschreibung des Verhaltens der Abfallablagerungen bei der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) in Baden-Württemberg ein Leitfaden entwickelt. Neben der Überwachung der Emissionen (Deponiegas, Deponiesickerwasser, etc.) ist die Überwachung des Bauwerks Deponie gefordert.

Das Eindringen von Niederschlagswasser in den Deponiekörper ist zu minimieren. Dazu ist es erforderlich, den Wasserhaushalt der Deponie zu beschreiben. Gängige numerische Verfahren (siehe Kapitel 7) haben ihre Unschärfen und bedürfen genau ermittelter Eingangsparameter. Sind beispielsweise die hydraulischen Leitfähigkeiten in den feuchtekontrollierenden Schichten verteilt über die Deponie bekannt, können

die numerischen Modell kalibriert werden und die Unsicherheiten der Größe der Evapotranspiration auf den Wasserhaushalt vernachlässigt werden.

Außerdem wird das „Bild“ der Deponie vervollständigt. Da alle Überwachungsdaten in einem Deponie-Jahrbuch zusammenfließen, wird es für die auswertende Institution leichter werden, Zusammenhänge zu erkennen und nicht nur über Vermutungen den Handlungsbedarf im Schadensfall zu definieren. Ein weiterer Aspekt ist die Möglichkeit, flächige Bauteile längerfristig zu kontrollieren und so zerstörungsfrei die mängelfreie Erstellung der Bauwerke zu dokumentieren (*Schosser, 189*). Das Dilemma, bis zum Ablauf der Gewährleistung keine Belege für die uneingeschränkte Funktionsfähigkeit für das Bauwerk in der Hand zu haben, kann mittels flächiger Darstellung der hydraulischen Leitfähigkeiten gelöst werden. Leckagen oder andere Schwachstellen werden sichtbar und können gezielt von der haftenden Stelle beseitigt werden.

Ein weiterer Vorteil der flächigen Dokumentation der Deponieoberfläche liegt darin, dass über die gesammelten Erfahrungen die Technologie weiter entwickelt werden kann. Es werden zweifelhafte Investitionen vermieden und der Stand der Technik an den Bedarf angepasst. Es ist durchaus vorstellbar, dass auf Grund fehlender Information über den Wasserhaushalt der Deponien zu aufwändige Abdichtungssysteme gebaut werden.

8.3. Wasserhaushalt – Hanglänge

Nach den Vorgaben der TA-Si (49) ist der Einsatz von mineralischen Dichtungselementen als sog. „long-term“-Elemente zur Abkapselung von Abfalldeponien verbindlich gefordert (Regelabdichtung, siehe Kapitel 2.1.). Zur Erfüllung ihrer Aufgaben (Abdichtung gegen Flüssigkeitszutritt, Ausgleich von Setzungen, Sorption von Schadstoffen, Sicherstellung der Dichtigkeit gegen Deponiegas und Auflager für weitere Dichtungselemente) wird die MA mit reglementierten Parametern, wie Sieblinie, Wassergehalt, Proktordichte und hydraulischer Leitfähigkeit eingebaut. Diese optimalen Bedingungen sind über die gesamte Zeit der Abkapselung aufrecht zu erhalten.

Durch Setzungen im Müll und durch eine Veränderung des Wassergehaltes kann die MA geschädigt werden. Während materialabhängig bestimmte Einflüsse ausgeglichen werden können, kommt es bei der Unterschreitung eines kritischen Wassergehaltes (Schrumpfgrenze) zum unvermittelten Versagen der MA (*Pan, 150, Schuhmann, 190*). Sollte die Austrocknung der MA auf geneigten Hangflächen schon kurzzeitig erfolgen, so ist bei dem nicht unwesentlichen Investitionsbedarf das gesamte Element in Frage zu stellen.

Der Deponieraum wird möglichst optimiert ausgenutzt. Das führt dazu, dass auf geringer Fläche ein landschaftsökologisch maximal vertretbares Volumen untergebracht werden wird. In Teilbereichen der Deponie sind daher steile Böschungen anzulegen. Dabei soll die maximale Böschungsneigung 1 : 3 betragen.

Untersuchungen in einem Lysimeter auf einer Mülldeponie haben gezeigt, dass das Absinken des Wassergehaltes in der MA im oberen Bereich der Böschung schneller und stärker auftritt als in den unteren Bereichen der Böschung. Den Wasserhaushalt bestimmen dabei die folgenden Faktoren:

- o meteorologische Ereignisse
- o topographische Randbedingungen
- o botanische und pflanzensoziologische Einflüsse
- o bodenmechanische und bodenhydraulische Parameter
- o Störungen in der MA (Gasbrunnen, Setzungspegel, weitere Kontrollelemente)

Einen wichtigen Einfluss hat der Oberboden. Es ist leicht vorstellbar, dass auf steilen Böschungen der laterale Abfluss in der Rekultivierungsschicht (RekS) nicht unerheblich ist (siehe auch bei *Schramm, 188*). Das bedeutet, dass überschüssiges Niederschlagswasser das Niveau der MA oder des Kiesfilters (OKF) nicht erreichen wird. Erst nach einer von den o.a. Parametern abhängigen Abschlagslänge wird der MA saisonal (d.i. in der Vegetationsruhe) Feuchtigkeit angeboten.

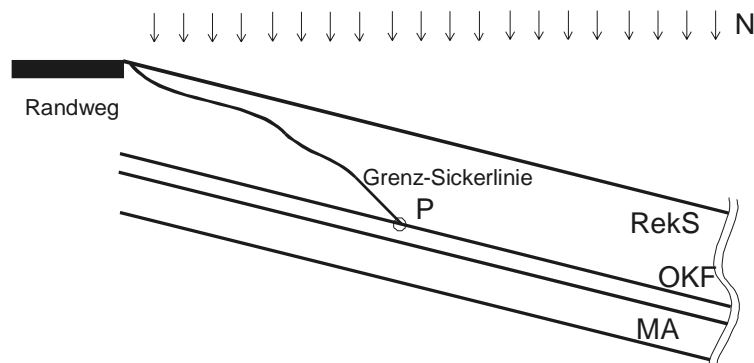


Bild 8.3.1.: Grenzlinie der Einsickerung in die Rekultivierungsschicht in der Vegetationsruhe (schematisch)

Oberhalb dieses geometrischen Punktes P (siehe Bild 8.3.1.), bei dem sich die „Grenz-Sickerlinie“ in der RekS an den OKF anschmiegt, wird die MA andauernd Feuchte verlieren (u.a. auch durch temperaturinduzierte Wasserbewegung, *Gottheil, Brauns, 75*) und austrocknen (*Bronstert, 31*).

Dieser Effekt wurde bisher noch nicht abschließend untersucht. Es stellt sich von der wirtschaftlichen Seite her natürlich die Frage, ob es gerechtfertigt ist, ein finanziell aufwändiges Dichtungselement zu bauen, wohl wissend, dass es schon in kurzer Zeit seine gewünschten Fähigkeiten verlieren wird. Denkbar wäre beispielsweise, in einem von den o.a. Parametern definierten Bereich ganz auf die MA zu verzichten, da die hydraulische Beanspruchung in dem oberen Bereich ohnehin nur gering sein wird. Ersatzweise könnte dort ein „trockenmineralisches“ Element installiert werden.

Dieser Effekt kann mit dem vorgestellten Sensorsystem überwacht werden. Die Sensoren sind dazu quer zur Falllinie einzubauen.

9.0 Schlussbetrachtung

Der Deponiebetreiber ist zur Überprüfung der Wirksamkeit von Deponie-Oberflächenabdichtungen (DOA) verpflichtet. Die DOA hat die Aufgabe, zu verhindern, dass Niederschlagswasser in den Müllkörper einsickert (Immission), und Sickerwässer und Deponiegas den Müllkörper nur über die dafür vorgesehenen Drainageeinrichtungen verlassen (Emission). Diese Wirkung entspricht der Wirkung einer Barriere, die in ihrer Funktion über einen langen Zeitraum aufrecht erhalten werden muss. Die Überwachung der Funktion der Barriere erfolgt indirekt, d.h. an Hand des Maßes der Emissionen in das anstehende Grundwasser oder in die Atmosphäre. Daraus wird der Zustand der Barriere bestimmt.

Die gesetzliche Forderung der Kontrolle der Barriere konnte bisher nur unzureichend umgesetzt werden. Entsprechende Messverfahren und Messeinrichtungen liegen bisher noch nicht vor. Zudem hat der Gesetzgeber in der gültigen Verwaltungsvorschrift zum Abfallbeseitigungsgesetz (TA-Si, 1993) die hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) als Überwachungsparameter bestimmt. Die Wirkung der mineralischen Komponente eines Abdichtungssystems wird über einen k_f -Wert $< 5 \times 10^{-9}$ m/sec definiert. Da die mineralische Komponente als sogenanntes „long-term“-Element die Wirksamkeit des gesamten Abdichtungssystems definiert, steht die hydraulische Leitfähigkeit tatsächlich im Zentrum des Interesses.

Die bisherigen Verfahren, welche den k_f -Wert bestimmen, sind i.d.R. destruktiv (durch die Entnahme einer Bodenprobe) und geben nur eine Momentaufnahme wider. Die Ergebnisse sind i.a. nicht reproduzierbar. Eine direkte Bestimmung ist nicht möglich. Daher ist es notwendig, indirekte Verfahren heranzuziehen. Mit dem Ziel, zeitaufgelöst messen zu können, werden bisher Tensiometer eingesetzt. Diese messen die Wasser- oder Saugspannung im Boden, welche vereinfachend dem Potenzial gleichgesetzt werden. Die gemessene Saugspannung (Ψ) wird im Labor aus Bodenproben ermittelt und in den Bodenwassergehalt (θ) oder den k_f -Wert umgerechnet. Die Ermittlung dieser Materialbeziehung (i.a. die pF-WG-Kurve, die der θ - Ψ -Kurve entspricht) erfolgt im Labor auf einer anderen Skala als die späteren in-situ Messungen. Diese Unsicherheiten sind bei ihrer Übertragbarkeit zu beachten. Weiterhin unterliegen die bodenspezifischen Beziehungen der Hysterese. D.h., der einer gemessenen Saugspannung zugehörige θ -Wert oder k_f -Wert ist nicht eindeutig definiert. Zu ihrer Bestimmung ist zusätzlich die Kenntnis des aktuellen Be- oder Entwässerungszustandes im Bodenelement erforderlich. Beispielsweise variieren die Bodenfeuchte-Werte als Funktion von Ψ zwischen dem Be- und Entwässerungszustand um den Faktor 3 und die der hydraulischen Leitfähigkeit um den Faktor 200. Mit Berücksichtigung dieses Phänomens ist die Verifizierung des o.a. Überwachungswertes (5×10^{-9} m/sec) und des Wasserhaushaltes des Abdichtungssystems nicht möglich.

Da die Bestimmung des aktuellen k_f -wertes für zahlreiche Anwendungen eine zentrale Bedeutung hat (Bewässerung in der Landwirtschaft, Förderung von Grundwasser, Uferfiltration, Sicherheit von Dämmen und Talsperren), wurden umfassende Untersuchungen durchgeführt. Böden sollten hinsichtlich ihres k_f -wertes klassifiziert und eindeutig beschrieben werden. Beginnend in den 50er Jahren bis Mitte der 80er Jahre führte die Forschung zur Berechnungsformel nach *van Genuchten/Mualem*. Der k_f -wert wird alleine aus den Bodenparametern (Residualer Wassergehalt (θ_r), Sättigungswassergehalt (θ_s) und einem Formfaktor der

Kornverteilung (m) und dem aktuellen Wassergehalt berechnet. Diese Berechnungsformel ist auch Grundlage zahlreicher numerischer Simulationsverfahren. Daraus ergibt sich die Grundaufgabe, den Bodenwassergehalt zuverlässig zu bestimmen.

Die Untersuchungen zur Ermittlung der Bodenkennlinie (pF-WG-Kurve) führten außerdem zum Ergebnis, dass der Faktor der Hysterese in der k_f - θ -Beziehung nur bei 0,4 liegt, damit um den Faktor 500 eindeutiger ist als in der k_f - Ψ -Beziehung. Dass diese Aussage nicht nur eine These ist, konnte an Hand einer umfangreichen Literaturstudie bestätigt werden. Insbesondere hat sich aus dem Vergleich zahlreicher Bodenuntersuchungen gezeigt, dass leicht schluffige Sande (S_u) eine nur untergeordnete Hysterese zeigen, und somit als „Kontrollboden“ besonders geeignet sind. Die Notwendigkeit, den Bodenwassergehalt zu bestimmen, wird damit weiter bestätigt.

Zur Überwachung von Barrieren sind Verfahren, die destruktiv sind, oder die nur Momentaufnahmen zulassen, nicht geeignet. Gefordert sind Verfahren, die mit einer hoher Genauigkeit, kontinuierlich und flächig messen können. Es bestehen hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit, da Fehlmessungen oder Fehlinterpretationen von Daten zu hohen unnötigen Investitionen für Sanierungen und/oder Reparaturen führen können. Die bekannten marktgängigen Verfahren wurden vergleichend bewertet und es konnte heraus gearbeitet werden, dass die elektromagnetischen Verfahren die geforderten Voraussetzungen am besten erfüllen.

Elektromagnetische Verfahren messen den Wassergehalt indirekt über die Dielektrizitätszahl (DZ) des Bodens. Dabei besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen der DZ des Bodens und seinem volumetrischen Wassergehalt. Die DZ von Wasser (~ 80) unterscheidet sich deutlich von der DZ des Bodenmaterials (3 bis 8) und von Luft (=1), dominiert also die DZ des Gemisches. Wird nun ein Impuls entlang eines Sensors durch das Gemisch geleitet, so ist die Laufzeit des Impulses eindeutig dem Wassergehalt des Gemisches zugeordnet. Die Genauigkeit der Messung liegt bei ± 1 Vol.-%. Da die Sensoren im Bodengemisch verlegt sind, sind die Messungen jederzeit durchführbar und die Messergebnisse sind reproduzierbar. Die Sensoren werden baubegleitend in einer Kontrollschicht in das Oberflächenabdichtungssystem integriert. Die Eigenschaften der Kontrollschicht ergeben sich aus dem Ziel, die Hysterese zu minimieren und die gesetzlichen Vorgaben (Definition in den Empfehlungen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM, mit einer Mindestdicke von 15 cm und einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von $< 10^{-6}$ m/sec) zu erfüllen. Optimal wird die Kontrollschicht unter die zu überwachende Schicht platziert oder unter dem gesamten Dichtungssystem verlegt. Im Regelfall reicht eine Lage der Kontrollschicht aus. In Lysimetern sind zur Beschreibung der Bewegung von Feuchtefronten mehrere Lagen erforderlich.

Die BAM hat außerdem Kriterien für die Qualität der Überwachung von Dichtungssystemen definiert. So sind für die Funktion mineralischer Dichtelemente Wassergehaltsänderungen von ± 5 Vol.-% in der Schicht mit einer Ortungsgenauigkeit von 100 m^2 zu detektieren. Leckagen in Konvektionssperren (Kunststoffdichtungsbahnen, KDB) sind auf 20 m^2 genau zu lokalisieren, wobei die Leckage selbst einen Durchmesser von maximal 5 mm haben darf.

Zum Nachweis der Funktion des gewählten Verfahrens wurde ein Lysimeter nach den Vorgaben eines entwickelten bodenhydraulischen Modells gebaut. Um die Identifizierung von vorrückenden Feuchtefronten nach Regenereignissen und die Bilanzierung dieser Ereignisse nicht zu erschweren, wurde der Lysimeter abgedeckt und gedämmt (Ausschluss der nicht genau genug ermittelbaren Verdunstung aus dem Bodenmaterial). Die Wirksamkeit der Abdichtung wurde über die Luftfeuchte (Vorhandensein einer ständigen Feuchte-Sättigung) und der Lufttemperatur (geringe Temperaturschwankungen im Tagesgang) im Luftraum unter der Abdeckung verifiziert. Mittels einer einfachen Berechnungsanlage war es möglich, genau dosiert Wassermengen aufzugeben. Der Lysimeter wurde mit einem engen Raster von Bodenfeuchte-Sensoren und zusätzlich mit Tensiometern (Verifizierung der Wassergehalte über die pF-WG-Kurve) sowie Thermometern (Ausschluss einer thermisch bedingten Wasserbewegung und Korrektur der temperaturabhängigen DZ) überwacht.

Die beiden Hauptfälle des bodenhydraulischen Modells, die Bewässerung (Fall 1) und die Entwässerung (Fall 4) im Beobachtungsquerschnitt, konnten im Lysimeter eindeutig identifiziert werden. Der Abgleich der Modellbedingungen mit der ganzen Palette der empfohlenen Abdichtungssysteme ergab, dass die Kontrollschicht sinnvoll in alle Systeme integrierbar ist. Damit ist auch die wirtschaftliche Umsetzbarkeit des Modells bestätigt.

Über den Beobachtungszeitraum von nahezu 18 Monaten konnte der Lysimeter zunächst mit den Werten aus den Referenzmessungen kalibriert werden. Dabei ist aufgefallen, dass der Auswertalgorithmus an die Geometrie der Impulskurve besser angepasst werden musste. Nach der Lösung dieses mathematischen Problems konnte die Kalibrierung mittels Wassergehalten aus Bodenproben bestätigt werden. Anschließend wurden mehrere definierte „Regenereignisse“ auf den Lysimeter aufgegeben. Das Vordringen der Feuchtefront wurde eindeutig detektiert. Deutlich war erkennbar, dass sich zwischen der Bodenschicht und der unten liegenden Entwässerungsschicht des Lysimeters eine Kapillarsperre einstellte. Der Abfluss nach unten war nur nach einer Aufsättigung der Schicht möglich oder über einen lateralen Abfluss bis zur Lysimeterwand. Das Material bot mit einem Kornanteil von Durchmesser $< 0,06$ mm mit weniger als 10 Gew.-% den Vorteil, dass ein kapillarer Aufstieg in weitere Schichten nicht zu beobachten war.

Über die gemessenen Wassergehalte und die daraus berechneten k_f -Werte war es möglich, die „Regenereignisse“ zu bilanzieren und die Wasserbewegung vertikal durch den Lysimeter zu beschreiben. Die Abweichung des berechneten Flusses zur aufgegebenen Wassermenge liegt mit < 20 % in einer vertretbaren Größenordnung. Die ursprüngliche Unsicherheit, die sich alleine aus der Berechnung des k_f -Wertes ergab, hatte einen Faktor 200.

Anwendung findet das Verfahren zum einen in der Überwachung von Dichtungssystemen, zum andern in der Kalibrierung von numerischen Simulationen des Wasserhaushaltes von Dichtungssystemen. Diese Simulationen bieten als Ergebnis neben den Flüssen durch die Dichtungssysteme auch die Wassergehalte in den einzelnen Beobachtungsquerschnitten. Die berechneten Wassergehalte lassen sich mit den gemessenen kalibrieren. Mit dieser Kalibrierung wird es möglich, die Fehler in der Berechnung der Evapotranspiration zu minimieren und den Boden laufend an die tatsächlichen örtlichen Verhältnisse anzupassen. Mit den berechneten k_f -Werten

kann die Kalibrierung über den Abgleich der Durchflüsse oder Schichtabflüsse validiert werden. Die Ortung von Fehlstellen (Leckagen in KDB, Makroporen im aufliegenden Bodensystem) wird ebenfalls möglich.

Die Beschreibung des Wasserhaushaltes der Abdeckschichten wird dazu beitragen, Diskussionen über das mittelfristige Verhalten mineralischer Dichtelemente mit Fakten zu unterstützen. Es wird möglich, kritische Bereiche (z.B. am Hangtop) gezielter zu untersuchen, und individuell an die Örtlichkeit angepasste Systeme zu entwickeln. Offen ist noch die Untersuchung der Gültigkeit der These auf der „nassen“ Seite, d.h. bei Wassergehalten zwischen 20 Vol.-% und der Sättigung. Da aber die „trockene“ Seite bodenhydraulisch kritischer zu bewerten ist, wurde diese Untersuchung ausgeklammert.

Es konnte gezeigt werden, dass der Wassergehalt in den Bodenschichten bei Beachtung der Randbedingungen des bodenhydraulischen Modells zuverlässig gemessen werden kann. Die Kalibrierung des Messsystems über Referenzmessungen ist jederzeit möglich. Belegt werden konnte auf der Basis einer umfassenden Literaturrecherche, dass die hydraulische Leitfähigkeit genügend genau aus dem gemessenen aktuellen Wassergehalt berechnet werden kann. Das Phänomen der Hysterese ist in der k_f - θ -Beziehung nur vernachlässigbar enthalten. Die Online-Kontrolle von Barrieren eröffnet positive Perspektiven für die Entwicklung örtlich angepasster Abdichtungssysteme und bietet mineralischen Dichtungselementen gute Zukunftschancen.

Anhang 10.1.

1. Rechtliche Grundlagen

Die gesellschaftliche Entwicklung bringt es mit sich, dass mit steigendem Wohlstand der individuelle Anspruch an Konsumgüter steigt. Eine immer größer werdende Menge an Gegenständen wird unmodern oder technisch überholt, wird ausgemustert und damit vom bisherigen Nutzer subjektiv zum Abfall erklärt. Die Geschichte der Abfallwirtschaft, bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts sehr eng verknüpft mit der Abwasserwirtschaft, ist geprägt von Anstrengungen der Administration, steigende Anforderungen an die Volkshygiene zu erfüllen. Werden in weniger entwickelten Gegenden die Abfälle auf die Straße geworfen, wo dann noch Brauchbares ausgelesen oder Organisches von Tieren gefressen wird, so erfordert das engere Zusammenleben der Menschen in Städten zumindest eine geregelte Abfuhr der Abfälle. Im Regelfalle werden die Abfälle auf Halden, meist etwas außerhalb der Siedlungsgebiete, abgeladen. Verwertbares wird herausgesammelt, der Rest wird sich selbst überlassen.

Bis in die Fünfzigerjahre des 20. Jahrhunderts funktionierte die Müllentsorgung in Deutschland ähnlich. Die Abfälle wurden in den Siedlungen mehr oder weniger regelmäßig gesammelt und dann zu den von der Kommune als dafür geeignet benannten Abladestellen transportiert (N.N., 245). Dort wurden die Abfälle abgeladen. Sie dienten dann noch solchen Zwecken wie Auffüllung von Gelände, Verbesserung der Bodenqualität (hauptsächlich der aschearme „Sommermüll“ mit hohem organischen Anteil wurde zur Melioration der Böden eingesetzt) und Schaffung von bebaubarem Gelände in sogenanntem Unland. Diese „Deponien“ wurden von den Kommunen zum Betrieb an Altstoffhändler verpachtet, die Altmetalle, Lumpen, Altpapier und Kartonagen auslasen und den Rest von Zeit zu Zeit abbrannten. Qualitativ bestand der Abfall neben den genannten Wertstoffen hauptsächlich aus Aschen vom Hausbrand und organischen Resten aus Küche und Garten. Die Folge dieser Verfahrensweise war, dass jede Siedlung zumindest eine, oft sogar mehrere Ablagerstellen für Abfälle hatte (N.N., 245).

Mit Beginn der Sechzigerjahre des 20. Jahrhunderts wurde als Gutachter für die Ablagerung der Abfälle bezeichnenderweise das Bundesgesundheitsamt zuständig. Von dort wurden erstmals verbindliche Standards zur Lagerung (der verdichtete Einbau mit einer Planierdraht, auch der Einsatz von Verdichtungsgeräten, wie Kompaktoren, wurden schon genannt) und Betrieb (Einzäunen des Betriebsgeländes, Arbeitsschutz) vorgegeben.

Ende der Sechzigerjahre veränderte sich innerhalb kurzer Zeit die Qualität des Abfalls grundlegend. Es fand der Siegeszug der Plastiktüte über die Einkaufstasche und der Einzug der Kunststoffe in viele Lebensbereiche statt. Dazu kam der immer stärkere Einsatz von Chemikalien und weiteren, die Umwelt belastenden Stoffen, in Produktion und Haushalt. Damit wandelten sich die bisher recht unauffälligen Halden in umweltschädliche „Zeitbomben“. Die Deponietechnik musste gemäß der Erkenntnis dieser Tatsachen angepasst und weiterentwickelt werden.

Die formalrechtliche Grundlage zur gesetzlichen Regelung in der Abfallwirtschaft geht auf das Grundgesetz zurück. Im Artikel 72 wird die konkurrierende Gesetzgebung definiert, nach der der Bund die Regelungskompetenz bis in

Einzelheiten besitzt. D.h., die Länder regeln gesetzlich (*LabfG*, 72) nur solange und soweit der Bund nicht von seiner Regelungskompetenz gebrauch macht. Explizit wird dazu in Artikel 74, Nr. 24 die Abfallwirtschaft genannt. Die gesetzlichen Regelungen (*KrW-/AbfG*, 74) werden durch Rechtsverordnungen (Ermächtigung für den Bund in Artikel 80 des Grundgesetzes) und Verwaltungsvorschriften umgesetzt. Überschneidungen mit dem Immissionsschutz (*BImSchG*, 73, 4. *BImSchV*, 219) und dem Bodenschutz werden durch Verfahrensregelungen vermieden.

Die technischen Standards, die seit Ende der 70er Jahre für die Entsorgung der Abfälle entwickelt wurden, bezogen sich zunächst auf die bereits vorhandenen Anlagen. Diese sollten nachgerüstet oder, falls das nicht möglich war, geschlossen werden. Für die Anlage neuer Deponien oder neuer Schüttabschnitte bestehender Deponien sind die Anforderungen an die Herstellung und Überwachung der Abschlüsse nach unten (zum Boden, Grundwasser \Rightarrow Basisabdichtung) oder nach oben (zur Luft \Rightarrow Oberflächenabdichtung) stetig erhöht worden. Es war zunächst ausreichend, die Basisabdichtung der Deponie durch Umlagern und Verdichten des anstehenden, bindigen Bodens herzustellen (Merkblatt M3 der Zentralstelle für Abfallbeseitigung (ZfA) beim Bundesgesundheitsamt 1969 „Die geordnete Ablagerung (Deponie) fester und schlammiger Abfälle aus Siedlung und Industrie“ (239) und Merkblatt der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 1979, Deponiemerkblatt (115b)).

Das wesentliche Kriterium für die Qualität einer Deponie-**Basis**abdichtung, und damit für jede Deponiedichtung schlechthin, ist neben der Dicke der Abdichtung ihr Durchsickerungswiderstand, beschrieben durch den Kehrwert der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert). Der ersten verbindlichen Wert mit $k_f = 10^{-8}$ m/sec wurde 1981 mit dem Erlass des Deponiemerkblatts festgelegt. Dringt der durchschnittlichen Niederschlag in Deutschland von 800 mm/Jahr bis zur Basisabdichtung vor, entspricht dieser k_f -Wert einem theoretischen Durchfluss durch die Dichtung von ca. 310 Litern pro Jahr und m^2 Dichtungsfläche (bei gesättigten Verhältnissen und ohne Verdunstung). Somit hat man theoretisch 40% des Niederschlags für eine Durchsickerung zugelassen. „Hoffnung“ war, dass in der Vegetationszeit durch die Pflanzen in der Rekultivierungsschicht und im Müll selbst durch die biologischen Umsetzungen einiges an Wasser verbraucht wird. Der Rest soll über eine auf der Basisabdichtung aufgelegte Flächendränage weitestgehend abgeführt werden.

Qualitätsmerkmale für den Bau einer Oberflächenabdichtung waren anfangs nicht vorgegeben. Standard war eine wie auch immer geartete Abdeckung mit „Erde“, also mit mineralischem Material, das gerade zur Verfügung stand. Eine möglichst rasche Rekultivierung, d.h. die Aufbringung einer Bodenschicht, die in kurzer Zeit einen starken Bewuchs zuließ, war das Ziel. Damit wurde zumindest in der Vegetationszeit die Abgabe von Wasser über die Pflanzen (Evapotranspiration) in die Atmosphäre maximiert. Mit einer starken Durchwurzelung des Oberbodens konnten parallel Erosionen auf den Deponiehängen weitgehend vermieden werden. Der vorrangige Grund für die Anlage dieser Oberflächenabdeckungen war nicht etwa eine Beeinflussung des Wasserhaushaltes der Deponie, sondern die Verhinderung von Papierflug, die Reduzierung der Attraktivität des Standortes für Schädlinge (Nager, Insekten, aber auch Vögel) und eine Verbesserung des Anblicks.

Es ist heute gesetzlich gefordert, mehrlagige qualifizierte Basisabdichtungssysteme zu bauen (Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz vom 14. Mai 1993 – TA-Si, 49). Dasselbe gilt für den oberen Abschluss der Deponien. Mehrlagige Abdichtungssysteme, zusätzlich undurchlässig für Deponiegas und unempfindlich gegenüber den zu erwartenden Setzungen, sollen die Deponien abkapseln. Mit der TA-Si (1993, 49) wurden verbindliche Standards für den Abschluss der Deponien an der Oberfläche eingeführt. Für die hier weiter zu betrachtenden herkömmlichen Hausmülldeponien, das sind die Deponien der Klasse II, wurden folgende Mindeststandards für die Oberflächenabdichtungen vorgegeben:

- Mindestneigung der Oberfläche $> 5\%$ (auch nach Abschluss der zu erwartenden Setzungen zu gewährleisten)
- Regelaufbau, bestehend aus (von oben nach unten):
 - Wurzelboden (Dicke $> 100\text{ cm}$)
 - Flächendränge (Dicke $> 30\text{ cm}$, k_f -Wert = 10^{-3} m/sec)
 - Kunststoffdichtungsbahn
 - Mineralische Abdichtung (Dicke $> 50\text{ cm}$, k_f -Wert $< 5 \times 10^{-9}\text{ m/sec}$)
 - Stütz- und Ausgleichsschicht (Dicke $> 30\text{ cm}$)
- Verbindlicher Qualitätssicherungsplan für die Herstellung des „Bauwerkes“ mit der Einschaltung von Fremdüberwachern, die von der Aufsichtsbehörde zu benennen sind.

Mit dieser Neudefinition des Standards wurde die ehemals für die Deponiebasis tolerierte Durchsickerung halbiert. Auf die Deponieoberfläche übertragen (k_f -Wert von $5 \times 10^{-9}\text{ m/sec}$) entspricht das einem Durchfluss unter den o.a. Kriterien von ca. 150 Litern pro Jahr, was noch ca. 20% des Jahresniederschlages ausmacht. Außerdem liegt die mineralische Abdichtung im „Regelsystem“ unter einer quasi undurchlässigen Kunststoffdichtungsbahn und übernimmt also nur dann eine Funktion, wenn die aufliegende Kunststoffbarriere örtlich versagen sollte. Somit wurde die Nullimmission definiert, aus der die viel wichtigere Nullemission resultieren sollte.

Gleichzeitig wurden Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Abdichtungssysteme erarbeitet (siehe z.B. TA-Si Nr. 10.4.1.2 – Qualitätssicherungsplan), die aber hauptsächlich deren Herstellung begleiten.

Ein Deponie-Abdichtungssystem stellt ein komplexes Bauwerk dar. Es soll lückenlos überwacht werden. Bisher jedoch gibt es für die Langzeitüberwachung der Abdichtungssysteme nur indirekt arbeitende Methoden und Instrumente. Die gültige und rechtsverbindliche TA-Siedlungsabfall (siehe z.B. Ta-Si Nr. 10.7.1.c – Feststellung der Funktionstüchtigkeit der Deponie-Abdichtungssysteme bei der Schlussabnahme) fordert dennoch eine schlüssige Dokumentation der Abdichtungssysteme über die gesamte Nachsorgezeit (Anhang G zur TA-Abfall Nr. 3.2.1 – regelmäßige Kontrolle der Funktionstüchtigkeit des Oberflächen-Abdichtungssystems in der Nachsorgephase). Die Nachsorgezeit ist der Überwachungszeitraum nach Abschluss der Deponie (i.d.R. 30 Jahre).

Heute gilt in der Abfallwirtschaft als Kriterium für den Einsatz von Verfahren oder Bauweisen der „Stand der Technik“. Dieser wird in der Ta-Si im Abschnitt 2, dort im Kapitel 2.1., explizit wie folgt definiert: *„Stand der Technik im Sinne dieser Technischen Anleitung ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme für*

umweltverträgliche Abfallentsorgung gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare geeignete Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind.“

Im Abschnitt 10 „Besondere Anforderungen an Deponien“, dort im Kapitel 10.1 „Grundsatz“ wird ausgeführt: *„Deponien sind so zu planen, zu errichten und zu betreiben, dass*

- a.) *durch geologisch und hydrogeologisch geeignete Standorte,*
- b.) *durch geeignete Deponiedichtungssysteme,*
- c.) *durch geeignete Einbautechnik für die Abfälle,*
- d.) *durch Einhaltung der Zuordnungswerte nach Anhang B*

*mehrere weitgehend voneinander unabhängig wirksame Barrieren geschaffen werden und die Freisetzung und Ausbreitung von Schadstoffen nach dem **Stand der Technik** verhindert wird....“*

Des Weiteren sind gemäß 10.6.6.2 *„Messeinrichtungen zur Erfassung der Wassermengen, die zur Aufstellung von Wasserbilanzen erforderlich sind“* zu installieren. Nach 10.7.1.c muss nach Stilllegung der Deponie *„die Funktionstüchtigkeit der Deponieabdichtungssysteme...“* in einer Schlussabnahme der zuständigen Behörde nachgewiesen werden. Während der Nachsorgephase sind die Kontrollen nach 10.6.6 und nach Anhang G der TA Abfall durchzuführen.

Die Veröffentlichung der „EU-TA-Siedlungsabfall“ im Jahre 1999 („Richtlinie 1999/31/EG“ des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien, 5 und 70) hat die entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften verunsichert. Während in Deutschland für die klassische Hausmülldeponie eine Kombinationsabdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und mineralischer Abdichtung (MA) gefordert wird, verzichtet die Vorschrift der EU in diesem Fall auf die KDB.

In der „EU TA-Si“ wird der technische Standard nicht explizit definiert. Bekräftigt wird auch hier das **Vorsorgeprinzip** herangezogen (Artikel 1, Satz 1: *„... ist es Ziel der vorliegenden Richtlinie, (dass) durch die Festlegung **strenger** betriebsbezogener und technischer Anforderungen ... während des gesamten Bestehens der Deponie negative Auswirkungen auf die Umwelt weitestgehend vermieden oder vermindert werden.“*). In Satz 2 wird wie folgt ausgeführt: *„...so enthält diese Richtlinie für...Deponien die einschlägigen technischen Anforderungen...“*.

Vor diesem formalrechtlichen Hintergrund und weil die Abfallgebühren mittlerweile in Deutschland so hoch sind, dass eine weitere Steigerung auch politisch den Gebührenzahlern nicht mehr zu vermitteln ist, halten sich die entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften zurück, notwendige und nach deutscher TA-Si geforderte Maßnahmen umzusetzen. Eine bindende Entscheidung der Gesetzgeber über das Anforderungsniveau der Harmonisierung im EU-Bereich ist seit dem 20. Februar 2001 mit Erlass der „Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen...“ (*Abfall-Ablagerungsverordnung*, 216) erfolgt. Die TA-Si hat damit rechtsverbindlichen Charakter erhalten. Damit wird das Oberflächenabdichtungssystem ebenfalls verbindlich (Abschnitt 10.4. TA-Si). Auch die Anforderungen an die Eigenkontrolle während der Betriebsphase (Abschnitt 10.6. TA-Si) und der Nachsorgephase (Abschnitt 10.7. TA-Si, siehe unten) wurden

rechtskräftig. Bei Oberflächenabdichtungen muss die Funktion des Abdichtungssystems bis zur Entlassung aus der Nachsorge überwacht werden.

Mit dem Erlass dieser gesetzlichen Vorgaben war es an der Zeit, Verfahren zur Prüfung und zur Überwachung der Bauwerke (*Gartung et. al., 66 und 67*) zu entwickeln, deren Funktion ja schon rechtsverbindlich vorgeschrieben ist. Verfahren zur Qualitätssicherung während der Bauphase und zur Bauabnahme konnten weitestgehend aus dem Erddamm- und Straßenbau übernommen werden. Probleme machten Nachweise der Funktion des Verbunds der einzelnen Bauteile, z.B. der Kunststoffdichtungsbahn (*Bundesanstalt für Materialprüfung, BAM, 8*) mit der mineralischen Abdichtung (*Czurda, 40*), und Verfahren zur Überwachung der Abdichtungssysteme während der sogenannten Nachsorgezeit (*LAGA-AG, 115*). Die Nachsorgezeit umfasst den Zeitraum, in dem sich nach Verfüllung der Deponie durch weiter laufende Umsetzungsprozesse die Notwendigkeit ergibt, mögliche Emissionen an Deponiesickerwasser und Deponiegas zu erfassen und für die Umwelt schadlos zu behandeln.

Zur Zertifizierung solcher Überwachungs- und Kontrollsysteme sind mittlerweile verbindliche Randbedingungen durch die Empfehlungen der BAM erlassen worden (9). So ist z.B. eine Leckage in der Kunststoffdichtungsbahn zu detektieren (zeitlich und räumlich) und umgekehrt durch das Einbringen von definierten Fehlstellen in die Kunststoffdichtungsbahn die Funktion des Überwachungssystems sicher zu stellen. Daraus sind Einsatz- und Gütekriterien für Überwachungssysteme mineralischer Oberflächenabdichtungen abzuleiten.

Zugelassene und zertifizierte Überwachungs- und Kontrollsysteme werden die Realisierung von umweltgerechten Abdichtungsbauwerken auf Deponien forcieren. Mit der Möglichkeit des Einsatzes solcher Systeme können von der Überwachungsbehörde aus Besorgnisgründen definierte Standards relativiert und evtl. reduziert werden, d.h. für die Betreiber von Deponien können sich nicht unerhebliche Ersparnisse ergeben. Damit kann der bis heute aufgetretene Vollzugsstau, verursacht auch durch die bestehende Unsicherheit über das Niveau der bevorstehenden Harmonisierung der Standards auf der Ebene der Europäischen Union (*Engelmann, 58*), abgebaut werden. Bezahlbare Provisorien, die überwachbar und reparierbar sind, sind politisch durchsetzbar und können von den Vollzugsbehörden angeordnet werden. Sieger werden die Umwelt sein und die Bürgerschaft, aus deren Gebührenbeitrag diese Maßnahmen schließlich finanziert werden.

2. Stand der Realisierung von Oberflächenabdichtungen

Wie oben dargestellt, sind die entsorgungspflichtigen Körperschaften derzeit bei der baulichen Umsetzung der Deponie-Oberflächenabdichtungen noch zurückhaltend. Ist zum einen die Perspektive aus der rechtlichen Situation nicht ganz eindeutig und mit Defiziten auf der Vollzugsseite belegt, so konkurrieren zum anderen auf dem Markt zahlreiche Anbieter mit recht unterschiedlichen Oberflächenabdichtungssystemen. Die Möglichkeit, derzeit „etwas falsch zu machen“, ist solange recht groß, bis zuverlässige Methoden auf dem Markt sein werden, die die einzelnen Systeme objektiv vergleichbar machen. Um den Realisierungsstand „Oberflächenabdichtungen“ in Deutschland zu erfassen, wurde im Jahr 2000 eine entsprechende Umfrage in allen Bundesländern durchgeführt, die 2001 fortgeschrieben und aktualisiert wurde. Befragt wurden die jeweils zuständigen Querschnittsbehörden (Landesanstalten/Landesämter für Umweltschutz, Regierungspräsidien). Dazu wurde wie folgt vorgegangen:

Nach einer Auswertung der zugänglichen Quellen des Internets wurde ein einheitlicher Fragebogen mit Tabelle (siehe Anhang 9.1.) entworfen und nach einem internen Plausibilitätstest und einer Überprüfung des Ausfüllhandlings an 14 Adressaten und das Umweltbundesamt versandt.

Es liegen die gewünschten Daten (Deponieklasse II nach TA-Si) wie folgt vor:

- Baden-Württemberg vollständig durch ausgefüllten Fragebogen (57 Deponien)
- Bayern 2 von 46 Deponien durch Internet (*Wohnlich, 101*)
- Berlin vollständig durch Internet (9 Deponien, alle in Brandenburg gelegen)
- Hessen 2 von 19 Deponien durch Internet
- Mecklenburg-Vorpommern vollständig durch ausgefüllten Fragebogen (10 Deponien)
- Niedersachsen 1 von 42 Deponien durch Internet
- Nordrhein-Westfalen vollständig durch Fax-Antwort (46 Deponien)
- Schleswig-Holstein vollständig durch telefonische Auskunft (11 Deponien)
- Thüringen vollständig durch ausgefüllten Fragebogen (27 Deponien)

Bremen (nur eine Deponie in Betrieb) und Hamburg (keine aktive Deponie mehr in Betrieb) wurden nicht angeschrieben. Das Saarland (drei Deponien in Betrieb) hat die Anfrage zuständigkeitshalber an den Entsorgungsverband (KABV) weitergeleitet. Von dort erfolgte dann keine weitere Information. Aus Niedersachsen wurden per Fax die Adressen der zuständigen Regierungspräsidien mitgeteilt. Die übrigen Bundesländer (Brandenburg, Rheinland-Pfalz, Sachsen und Sachsen-Anhalt) haben nicht geantwortet, noch haben sie entsprechende Daten im Internet.

Somit liegen die Daten von 8 Bundesländern vollständig und von 4 nur teilweise vor. Von insgesamt ca. 360 betriebenen Deponien konnten 167 ausreichend genau erfasst werden. Daraus ergibt sich folgende Situation (Tabelle 9.1.1.):

- 31 Deponien (8,6% von allen, 18,6% der erfassten) sind (provisorisch) zwischengedichtet, davon ca. 3/4 mineralisch und 1/4 mit Kunststoffdichtung.
- 52 Deponien (14,4%/31,1%) haben entweder gar keine Oberflächenabdichtung, oder es liegen dazu keine Angaben vor.

- 84 Deponien (23,4%/50,3%) haben teilweise eine Oberflächenabdichtung. Davon sind 12 (3,3%/7,2%) nach dem Regelsystem der TA-SI ausgeführt, 11 (3,1%/6,6%) haben ein Kunststoffelement, 55 (15,3%/32,9%) nur mineralische Dichtungselemente und 6 (1,7%/3,6%) sonstige Abdichtungselemente, wie Asphaltabdichtung oder Kapillarsperren.

Insgesamt sind bei ca. 19% der Dichtungen Kunststoffdichtungsbahnen eingesetzt, deren hauptsächlicher Einsatz in den „Neuen Bundesländern“ belegt werden konnte.

| Deponieübersicht | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------------|------------|------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|------------|
| Abdichtung | | | | | | | | | | | |
| Lf.Nr. | Bundesland | Depon. | Zwischend. | | Oberflächendichtung, auch teilw. | | | | | K. Abd./ | |
| | | insges. | KDB | Min. | TA-Si | KDB | Min. | Asph. | son. | k. Ang. | Insges. |
| 1 | Baden-Württemberg | 46 | 4 | 3 | 3 | 1 | 30 | 2 | 0 | 14 | 57 |
| 2 | Bayern | 56 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 3 | Berlin-in Brandenburg | 9 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 9 |
| 4 | Brandenburg | 37 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | Bremen | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Hessen | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| 8 | Mecklenb.-Vorpommern | 9 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 | 4 | 10 |
| 9 | Niedersachsen | 41 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | Nordrhein-Westfalen | 38 | 0 | 9 | 2 | 0 | 10 | 0 | 0 | 25 | 46 |
| 11 | Rheinland-Pfalz | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | Saarland | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | Sachsen | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | Sachsen-Anhalt | 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | Schleswig-Holstein | 9 | 4 | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 11 |
| 16 | Thüringen | 21 | 0 | 7 | 5 | 4 | 10 | 0 | 0 | 1 | 27 |
| | | | | | | | | | | | |
| | Insgesamt | 360 | 8 | 23 | 12 | 11 | 55 | 4 | 2 | 52 | 167 |
| | %-Anteil der erfassten: | 46,4 | 4,8 | 13,8 | 7,2 | 6,6 | 32,9 | 2,4 | 1,2 | 31,1 | 100,0 |
| | %-Anteil von allen: | 100 | 2,2 | 6,4 | 3,3 | 3,1 | 15,3 | 1,1 | 0,6 | 14,4 | 46,4 |

Tabelle 9.1.1.: Stand der Realisierung der Deponieoberflächenabdichtungen
(KDB = Kunststoffdichtungsbahn, Min. = mineralische Abdichtung, Asph. = Abdichtung aus Asphalt, son. = sonstige Systeme wie Kapillarsperren, K. Abd./k. Ang. = keine Abdichtung oder keine Angabe)

Über 81% der Dichtungen sind ausschließlich aus mineralischen Elementen aufgebaut. Diese Erkenntnis wird bei der Auswahl der Art des Überwachungssystems Bedeutung erhalten. Mit einem Erfassungsgrad von ca. 46% aller Deponien hat die Umfrage repräsentativen Charakter gewonnen. Antworten liegen sowohl aus den „Neuen“ wie den „Alten“ Bundesländern vor. Auffallend ist, dass der Kenntnisstand über die konkrete Ausführungen der Oberflächenabdichtungen bei den Behörden offensichtlich teilweise nicht ausreichend ist. Bei Nachfragen werden bei den Betreibern erst Erfassungen durchgeführt. Auch im Internet (z.B. Stief, „www.deponie-stief.de“ und 205) sind daher nur fragmentarisch Informationen zum Realisierungsstand der Deponie-Oberflächenabdichtung vorhanden.

Auf Basis der Umfrage ist es auch möglich geworden, die umweltpolitische Relevanz der „offenen“ Deponieflächen abzuschätzen. Die derzeit noch betriebenen 467

Deponien haben ein Gesamtvolumen von hochgerechnet ca. 1,5 Mrd. m³, wovon noch fast 0,5 Mrd. m³ zur Verfüllung abfallrechtlich genehmigt sind und zur Verfügung stehen. Über 1,0 Mrd. m³ Abfälle sind abgelagert und meist nur unzureichend gesichert. Erfreulich ist der hohe Anteil von Deponien mit einem Entgasungssystem und mit Anlagen zur Behandlung des Deponiegases, teilweise mit Energiegewinnung. Das anfallende Deponiegas wird von diesen Entgasungssystemen zu mindestens 50% gefasst. Damit können zumindest die gasförmigen Emissionen reduziert werden.

| Deponieübersicht | | Beschreibung | | | Sonstige Angaben | | | |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|------------|------------|-------------------------|---------------|---------------|--------------|
| Lf.Nr. | Bundesland | Deponien | | | Volumen | Restvolum. | Oberfläche | O./V. |
| | | insges. | in Betr. | n. Stief | Mio cbm | Mio cbm | ha | ha/cbm |
| 1 | Baden-Württemberg | 57 | 46 | 51 | 170,13 | 46,23 | 807,6 | 4,747 |
| 2 | Bayern | 61 | 56 | 56 | 70,05 | 20,98 | 420,3 | 6,000 |
| 3 | Berlin-in Brandenburg | 9 | 9 | 9 | 144,72 | 41,81 | 469,0 | 3,241 |
| 4 | Brandenburg | 40 | 37 | 37 | 250,00 | 45,00 | 1000,0 | 4,000 |
| 5 | Bremen | 1 | 1 | 1 | 4,00 | 1,75 | 20,0 | 5,000 |
| 6 | Hamburg | 3 | 0 | 0 | 15,00 | 0,00 | 75,0 | 5,000 |
| 7 | Hessen | 19 | 17 | 19 | 65,00 | 26,39 | 390,0 | 6,000 |
| 8 | Mecklenb.-Vorpommern | 10 | 9 | 9 | 28,88 | 15,26 | 211,0 | 7,306 |
| 9 | Niedersachsen | 44 | 41 | 41 | 120,00 | 33,15 | 600,0 | 5,000 |
| 10 | Nordrhein-Westfalen | 51 | 38 | 38 | 296,21 | 104,31 | 888,6 | 3,000 |
| 11 | Rheinland-Pfalz | 31 | 24 | 22 | 65,00 | 42,18 | 390,0 | 6,000 |
| 12 | Saarland | 3 | 3 | 3 | 8,00 | 2,93 | 32,0 | 4,000 |
| 13 | Sachsen | 36 | 22 | 22 | 85,00 | 17,20 | 425,0 | 5,000 |
| 14 | Sachsen-Anhalt | 35 | 27 | 30 | 150,00 | 61,76 | 450,0 | 3,000 |
| 15 | Schleswig-Holstein | 11 | 9 | 10 | 40,52 | 11,85 | 202,6 | 5,000 |
| 16 | Thüringen | 27 | 21 | 20 | 50,00 | 14,23 | 308,9 | 6,178 |
| | Insgesamt | 438 | 360 | 368 | 1562,51 | 485,05 | 6690,0 | 4,282 |

Tabelle 9.1.2.: Deponieparameter in Deutschland

(n. Stief = nach den Aufstellungen von Herrn Stief, Internet www.deponie-stief.de, O/V = Verhältnis der Oberfläche zum Volumen als Formfaktor)

Aus den Daten über Deponievolumen und Deponieoberflächen lässt sich für Deutschland eine spezifische Deponieoberfläche von 4,5 ha je 1,0 Mio. m³ Deponievolumen berechnen (Tabelle 9.1.2.). Daraus ergeben sich fast 7.000 ha einer qualifizierten Oberflächenabdichtung. Bei einem Bauaufwand von mindestens 100,- €/m² Oberflächenabdichtung (inklusive der Kosten für die Planung, Mehrwertsteuer und der anteiligen Infrastruktur wie Wegenetz, Entgasung) ergibt sich ein Investitionsaufwand von ca. 8 Mrd. €. Ein Grossteil der Deponien entsprechen auf Grund fehlender Basisabdichtungen oder unzureichender hydrogeologischer Verhältnisse nicht den Vorgaben der TA-Si und können mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nicht nachgerüstet werden. Diese Deponien sind zwischen 2005 und spätestens 2009 zu schließen. Daher wird das Investitionspotenzial in einem sehr kurzen Zeitraum realisiert werden müssen.

Die Erfassung hat weiterhin ergeben, dass Kontrollsysteme für Deponie-Oberflächenabdichtungen bisher vorwiegend in „Testfeldern“ oder lokal stark begrenzt eingebaut wurden. Kontrollsysteme für Oberflächenabdichtungen werden

sowohl für synthetische Elemente (Kunststofffolien), als auch für mineralische Elemente angeboten. Der derzeit gängige Weg ist aber offenbar, die fertig geschütteten Flächen nur mit Bodenmaterial „provisorisch“ abzudecken.

Erfassungsbogen „Deponieumfrage“

Der Realisierungsstand „Oberflächenabdichtungen in Deutschland“ wurde mit einem Fragebogen erfasst. Dazu wurde im Jahre 2000 eine Umfrage in allen Bundesländern durchgeführt. Befragt wurden die jeweils zuständigen Querschnittsbehörden der Bundesländer. Im Jahre 2001 wurde die Umfrage fortgeschrieben und aktualisiert. Mit den Daten des Umweltbundesamtes (Stand: Internet, 2002) wurden die erfassten Daten dann nochmals abgeglichen und auf Plausibilität geprüft.

Anhang 10.2.

Einsatzgebiete und –möglichkeiten für Feuchtesensoren

Die Feuchtemesstechnik hat ein breites Einsatzspektrum. Hier wird in einer nicht abschließenden Liste aufgezeigt, in welchen Bereichen diese Technologie eingesetzt werden kann. Die Bereiche sind grob nach Sparten sortiert.

a. Bautechnik (Überwachung)

1. Flachdächer, Parkdecks, Terrassen und Balkone (Überwachung der Dichtheit und Ortung evtl. Leckagen)
2. Kontrolle von Dämmmaterialien (z.B. im Dachstuhl oder an anderen, schwer zugänglichen Stellen)
3. Schwimmbäder (Dichtheit, Leckage)
4. Wasserbehälter, Klärbecken, Lagerbehälter und Tanks (Dichtheit, Leckage)
5. Straßen- und Brückenbau (Bauwerksüberwachung, z.B. Nachweis von Frost- und Streusalzeinflüssen unter Straßen mit Auswirkung auf die Haltbarkeit)
6. Lager und Silos (Dichtheit)
7. Gleisbettkontrollsensor
8. Bodensanierungsüberwachung (evtl. zusammen mit grabenlos arbeiteten Bohrsystemen)
9. Bentonitmatten allgemein (Feuchtegehalt, Funktionstüchtigkeit)
10. Rohrleitungsüberwachung (Leckage)
11. Überwachung von Oberflächen- und Basisdichtungen von Abfalldeponien
12. Überwachung von Hochwasserdämmen
13. Kontrolle von untertägigen Verschlüssen (Lager für besonders überwachungsbedürftige Abfälle) im Salinar oder in sonstigen Wirtsgesteinen

b. Bautechnik (Baubegleitung)

1. Überwachung der Austrocknung von z.B. Estrichen (evtl. konstruktiv zusammen mit dem Bau von Fußbodenheizungen)
2. Bauwerks- und Maschinenfundamente (Belastungsfreigabe als Funktion des Abbindezustandes)
3. Wannenkonstruktionen (Abdichtung gegen drückendes Wasser)
4. Tunnelbau (Abdichtungen, z.B. mit Bentonitmatten, Überwach. von Stoßfugen)

c. Verfahrenstechnik (Prozesssteuerung, -überwachung)

1. Prozesstechnik (Trocknungsstraßen, Auftauanlagen), speziell auch in der Pharmaindustrie
2. Bügelmaschinen (evtl. Automatisierung, sparsamerer Energieeinsatz)
3. Papierherstellung (z.B. Überwachung der Dichte im Pulper)
4. Bioreaktorkontrollsystem (Feuchtegehalt in Kompostmieten etc.)
5. Füllstands- und Pegelsensoren alle Art in Behältern, Becken und Silos
6. Biofilter (Sicherstellung eines optimalen Feuchtegehalts für die Biocoenose)
7. Holzfeuchte (Erhöhung des Heizwertes bei Verbrennungsanlagen, Feststellung der Verarbeitbarkeit von Rohholz – Vermeidung von Schwinden und Verziehen)
8. Dosierung der Flüssigkeitszugabe bei Mischern und Stofflösern (z.B. Nassvergärungsanlagen)

d. Vorhersage hydrologischer und meteorologischer Ereignisse

1. Verbesserung der Hochwasservorhersage (Abflussbeiwert im Einzugsgebiet als Funktion der Bodenfeuchte, Mächtigkeit der ungesättigten Bodenzone)
2. Lysimeter-Ersatz (Quantifizierung der Grundwasserneubildung, Bewertung der Grundwasserqualität und -verfügbarkeit)
3. Sensor zur Detektion des Bodenzustandes (z.B. Deutscher Wetterdienst, für die Verbesserung der Prognose und zur Kalibrierung satellitengestützter Messungen)
4. Straßenzustand (Detektion von Glätte auf/unter Brücken und an sonstigen Gefahrstellen)
5. Vorhersage von Lawinen
6. Sensor zur Detektion von Vereisungen auf z.B. Flugzeugen

e. Vorsorge, Freizeit und Versorgung

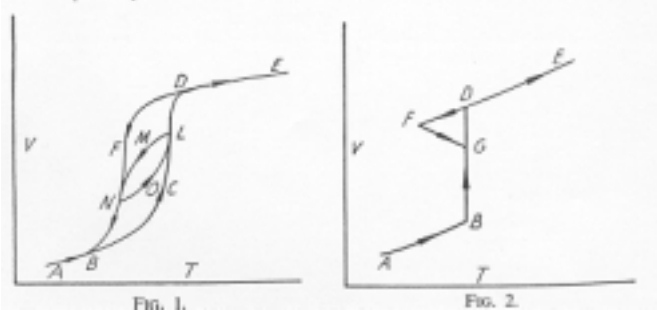
1. Gärtnereien, Landwirtschaft (Bewässerung), besonders in ariden und semiariden Zonen (Steuerung über Bodenfeuchte und nicht über Wasserspannung)
2. Fußball- und Golfplätze (Bewässerungs-, Drainagezustand)
3. Kontrolle von Heu-/Strohlager (Verhinderung der Selbstentzündung)

10.3. Hysterese

I. Allgemeines zum Einfluss der Hysterese.

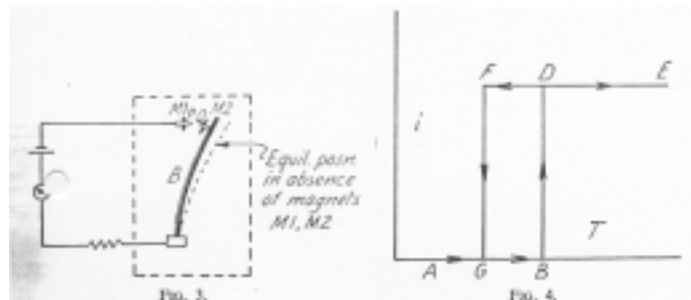
1. "A general approach to hysteresis: 1", Everett, D.H., Whitton, W.I., Trans. faraday society 48, 1952, S. 749-752 (60)

Die Autoren stellen einen Zusammenhang der Phänomene Hysterese und Übersättigung des Bodens anhand eines mechanischen Modells dar. Sie gehen davon aus, dass „*hysteresis is to be attributed in general to the existence in a system of a very large number of independent domains, at least some of which can exist in metastable states.*“ Die beiden folgenden Bilder zeigen den unterschiedlichen Verlauf der Hysterese bei (Fig. 1) Erhitzen und Abkühlen von Ammoniumchlorid und (Fig. 2) Schmelzen und Gefrieren der reinen Substanz. Anschließend werden sieben ver-

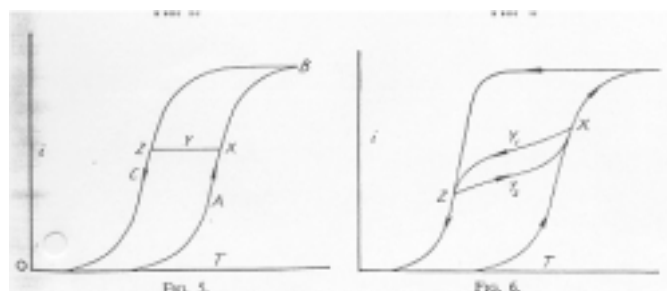


schiedene hysteretisch verlaufende Prozesse (z.B. Magnetisierung von Eisenmagneten, Lösung von H_2 in Pd, Adsorption von Gasen von porösem Gestein, etc.) mit ihren abhängigen und unabhängigen Variablen dargestellt. Der vorliegende Fall, die Be- und Entwässerung von Bodenschichten, wird in Analogie zu ausgewählten

Beispielen gesetzt und mittels mechanischem Modell beschrieben (Fig. 3, Stromkreis mit Bimetallstreifen). Der zugehörige Verlauf der Kurve ist in Fig. 4 dargestellt. Man hat damit ein einfaches Modell, das die Aufgabenstellung komplett beschreibt, bis auf die Tatsache, dass nur die „einhüllenden“ Kurven dargestellt sind. Bei diesem Versuch ist die Temperatur die unabhängige Variable, die abhängige Variable ist der Strom, der im Kreis fließt.



Über die Versuchsführung (Anzahl der Schaltvorgänge in bestimmten Temperaturbereichen) wird der zunächst senkrechte Verlauf der Einhüllenden nach Fig. 5 verändert. Führt man die Versuche nur in einem bestimmten Temperaturintervall durch, so ergibt sich der charakteristische Verlauf nach Fig. 6. Dieser Kurvenverlauf stimmt weitgehend mit dem Verlauf des Hysteresephänomens für Böden überein.



2. "A general approach to hysteresis: 2. development of the domain theory", Everett, D.H., Smith, F.W., Trans. faraday society 50, 1954, S. 187-197 (61)

Aufbauen auf den oben stehenden Erkenntnissen, wird das mechanische Modell weiter verfeinert (Fig. 1). Es wird damit versucht, die Phänomene genauer beschreiben zu können. In Fig. 3 ist der Verlauf der zugehörigen Kurven dargestellt.

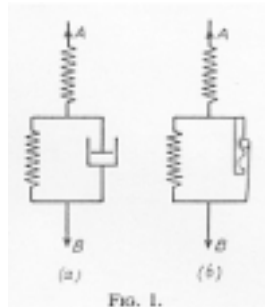


FIG. 1.

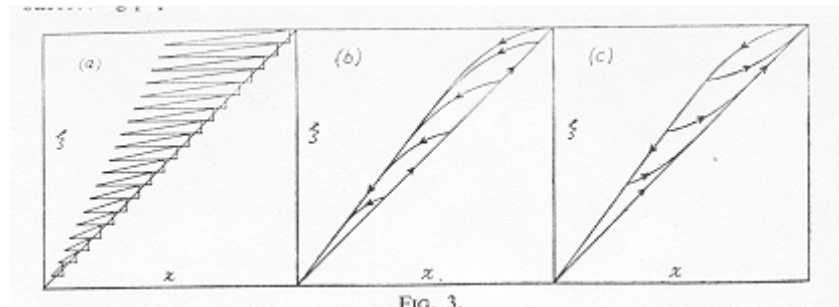


FIG. 3.

Weitere Verfeinerungen führen zu den Darstellungen in Fig. 6. Interessant ist, dass die Experimente immer reversible Ergebnisse liefern, d.h. jeder Punkt der Einhüllenden ist von jedem anderen Punkt aus immer wieder erreichbar.

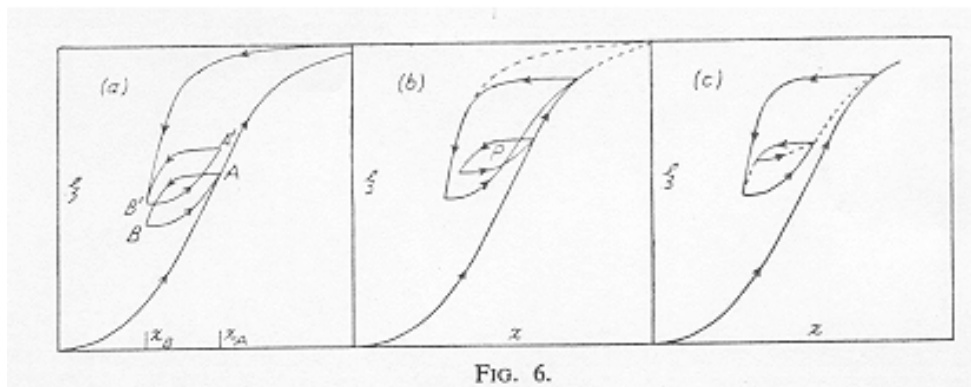


FIG. 6.

Die Autoren vergleichen ihren Modellansatz mit experimentell ermittelten Werten und erhalten eine recht gute Übereinstimmung. Von den insgesamt sieben, die Konstruktion der Be- und Entwässerungskurven betreffenden Annahmen (Theorem 1 bis 7. Z.B. wird in Fig. 3 das Theorem 1 dargestellt, das sagt: Trifft eine primäre Descending-Kurve die Grund-Descending-Kurve (Fig. 3, b), dann wird die primäre Ascending-Kurve die Grund-Ascending-Kurve treffen (Fig. 3, c)) werden vier als allgemeingültig bestätigt, die anderen drei, die die Reproduzierbarkeit jedes Punktes von jedem anderen auf den Kurven beinhalten, sollten als Aufgabe für die Zukunft durch weitere Experimente verifiziert werden.

3. "A general approach to hysteresis: 3. a formal treatment of the independent domain model of hysteresis", Everett, D.H., Trans. faraday society 50, 1954, S. 1077-1096 (62)

Der Autor erläutert hier nochmals seine sieben Annahmen (s.o.) zur Beschreibung des Hysterese-Phänomens. Die Annahmen 1 (Reversibler Verlauf der Verbindungskurven zwischen den Einhüllenden), 3 (Bedingungen der Steigungen der verbindenden Kurven in Abhängigkeit von ihrer Ordnung), 6 (Jeder Punkt innerhalb der hysteretischen Kurve kann auf unendlich viele Wege erreicht werden. Diese We-

ge lassen sich in Wegfamilien einteilen.) und 7 (Die Systeme sind reversibel, und nach unendlich vielen Experimenten wird ein bestimmbarer Grenzwert erreicht, sowohl bei stetiger Zunahme, als auch bei stetiger Abnahme). Die Fig. 1 und 6 stellen weitere Konstruktionsmöglichkeiten für die Kurven dar.

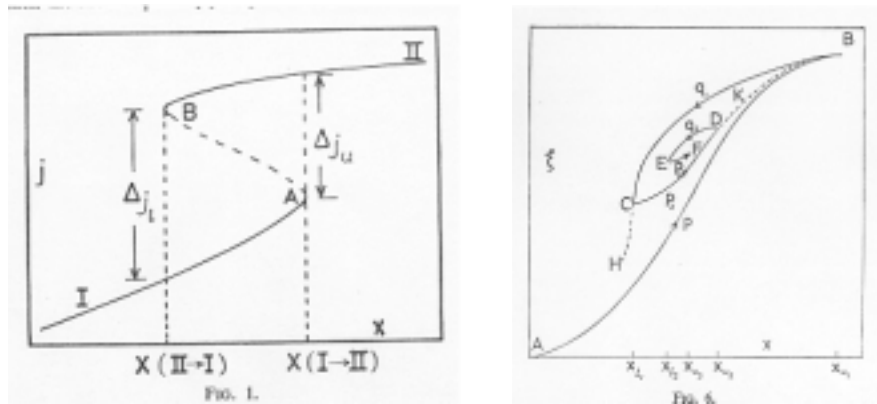
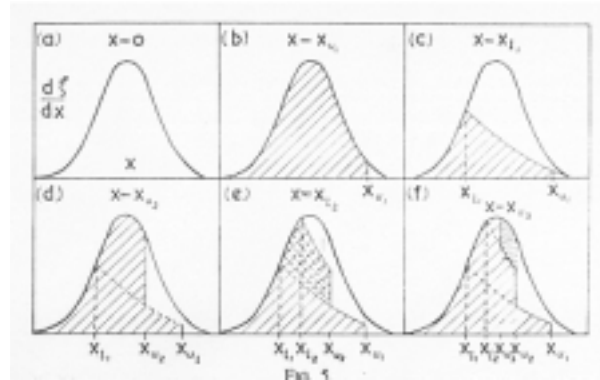


Fig. 4 zeigt den Verlauf eines mit Hysterese behafteten Versuches in verschiedenen Stadien seines Ablaufes.



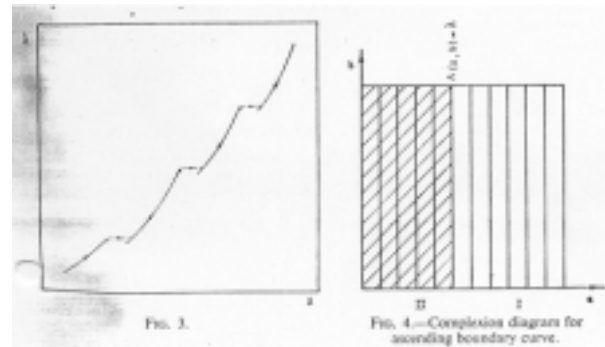
Everett hat mit seinen Ausarbeitungen für die allgemeine Behandlung hysteretischer Prozesse (es sind insgesamt sieben naturwissenschaftliche Prozesse benannt) die Grundlagen für die später darauf aufbauenden Wissenschaftler wie *Poulovassilis* (1969 bis 1974), *Topp* (1966 bis 1971) und *Mualem* (1974 bis 1984) gelegt.

4. "The domain model of hysteresis: 1. Independent domains", Enderby, J.A., *Trans. faraday society* 51, 1955, S. 835-848 (57)

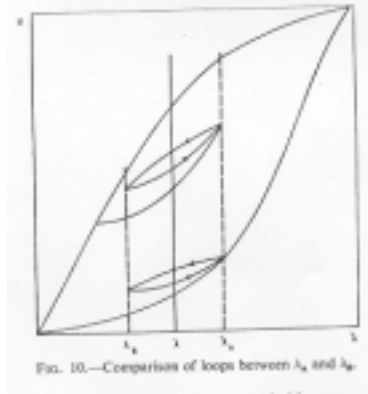
Aufbauend auf den Aufsätzen von Everett (siehe Literaturstelle I/1 und I/2) definierte J.A. Enderby im Jahre 1954 die Grundlagen der „*independent domain theory*“, die die Erklärung des Hystereseeffektes in Böden möglich machte. Ausgehend von der grundlegenden Erkenntnis, dass die Be- und Entwässerungen im Bodensystem irreversible Änderungen erzeugen, führt er aus: „*This means that the thermodynamic curve must show discrete steps on a small scale, where the system changes irreversibly through a series of non-equilibrium states from one metastable state to another metastable state separated from the first by a small, but finite gap. It seems clear, for this, we require some sort of domain structure.*“ Im weiteren belegt er über Gleichgewichtsbetrachtungen in der Thermodynamik, „*we have thus, here, a discrete irreversible process which is the basis of hysteresis*“. Beschreibt man die Hysterese mittels Experimente, so erhält man in Fortgang des Versuches Kurven verschiedener Ordnung. Er führt aus: „*We can therefore describe a hysteresis situation completely*

by defining a standard state and then making measurements to obtain primary, secondary, tertiary, etc. curves as defined above.”

Im weiteren wird dann die erhaltene Gleichung differenziert und man erhält eine Kurve (Fig. 3), die zwar stetig steigt, aber an bestimmten Stellen Unstetigkeiten aufweist. In Fig. 4 ist der Fortschritt des Anstiegs aufgetragen. Jeweils nach der Auffüllung eines Bereiches wird plötzlich der nächste Bereich (Bewegung von links nach rechts) beaufschlagt, was sprunghaft die Unstetigkeiten erzeugt. Wird der Fortschritt der Be-



zw. Entwässerung weiter verfeinert, d.h. werden nicht plötzlich ganze „Zellen“ gefüllt, sondern nur geometrisch definierte Teile davon, und bewegt man sich nicht nur in eine Richtung, so erhält man den in Fig. 10 dargestellten Verlauf. Die beiden



Einhüllenden sind die Hauptkurven der Be- und Entwässerung. Je nach Ausgangspunkt und Richtung kann man alle erdenklichen Kurvenverläufe dazwischen erhalten. Es entstehen bei konsequenter Versuchsführung bzw. Berechnung die oben genannten sekundären, tertiären etc. Kurven. Wichtig dabei ist, dass die Einhüllenden als Bodencharakteristik gelten, wobei die Erstentwässerungskurve auf Grund bodenmechanischer Effekte (z.B. Einschluss von Luft in den Poren) nicht mehr im Versuch reproduziert werden kann.

Enderby kann also belegen, dass innerhalb bestimmter Grenzen, „no domains of this group change state.“ Damit werden auch komplexere Systeme, in denen Hysterese auftritt, beschreibbar.

5. “Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous materials”, Philip, J.R., *Journal of geophysical research* 69, 1964, S. 1553-1562 (153)

J.R. Philip versucht eine mathematische Beschreibung der Verbindungslinien zwischen Hauptbe- und Hauptentwässerungskurve zu formulieren. In seinem Ansatz berücksichtigt er Potenziale (die Hysterese wird über das Be- und Entwässerungspotenzial impliziert) und setzt voraus, dass die Porengröße keinen Einfluss auf die Geometrie der Be- und Entwässerungskurve hat („the whole hysteretic character of the medium from a single boundary curve”).

Mit der Annahme, dass die Wasserspannung (Ψ) eine Funktion des Wassergehaltes (θ) ist, ist die „diffusion analysis“ anwendbar. Dazu wäre aber ein homogener Boden mit einem gleichmäßigen Anfangswassergehalt erforderlich. Da beispielsweise bei einer Infiltration von Wasser in den Boden gleichzeitig Be- und Entwässerung auftritt, ist ein anderes Modell erforderlich, das sogenannte „independent domain model“. *Philip* stellt seinen mathematischen Ansatz vor, vergleicht seine Ergebnisse mit denen von *A. Poulouvasilis* (siehe Literaturstelle II/1, II/2, II/7 und II/10) und kann dabei gute Übereinstimmungen seiner Ergebnisse mit gemessenen Werten feststellen.

Diese Literaturstelle wurde hier aufgenommen, um die Dynamik der Entwicklung von Modellen zur Beschreibung der Be- und Entwässerungsabläufe im Boden darzustellen. Der Autor schließt mit der Aufgabenstellung, durch Abgleiche mit experimentell Ergebnissen das Modell weiter zu verifizieren.

6. "Soil water hysteresis: the domain model theory extended to pore interaction conditions", Topp, G.C., Soil science society american proceedings 35, 1971, S. 219-225 (212)

Topp schildert die Vorgänge im Porengerüst bei der Be- und Entwässerung des Bodens. Dabei stellt er fest, dass zwei Hauptmechanismen (die Blockade gegen den Lufteintritt und die Blockade gegen den Wassereintritt) diese Prozesse beeinflussen. Der Verlauf der Erstverbindungslinien zwischen der Hauptbe- und Hauptentwässerungslinie im pF-WG-Diagramm zeigt für alle porösen Materialien, vom Glasbett bis zum Ton, dass die Blockade gegen Lufteintritt beim Trocknen (bei Beginn der Trocknung liegt der Bodenwassergehalt nahe der Sättigung) und beim Wiederbewässern (Boden ist relativ trocken) die beiden Arten der gegenseitigen Beeinflussung der Poren sind. Betrachtet man den Grad der Porenblockade, so scheint dieser nur vom Wassergehalt des Bodens anhängig zu sein. Mit dieser Kenntnis ist es möglich, für die Konstruktion der weiteren Verbindungslinien im pF-WG-Diagramm zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen.

Vom Grundsatz her stellt *Topp* die bisher anerkannte „*independent domain theory*“ von *Enderby/Everett/Poulovassilis* in Frage. Darin wird nur eine Art der Poreninteraktion zu Grunde gelegt, was dazu führt, dass die Datenmenge unnötig groß wird und für bindige Böden die Ergebnisse unbefriedigend sind. Diese Kritik hat *Poulovassilis* angenommen und schon 1973 die Theorie modifiziert und an die physikalischen Randbedingungen der Hysterese angepasst.

Die Theorie von *Topp* soll hier etwas vertiefter beschrieben werden, da die Vorgänge im Boden gut beschrieben werden. Alle Zustände (definiert als ein Wertepaar aus h ($=\Psi$) und θ) liegen innerhalb zweier bodencharakteristischer Einhüllenden, der Hauptbe- und Hauptentwässerungskurve. Diese beiden Kurven können experimentell an Bodenproben bestimmt werden. Dabei liegt die Hauptentwässerungskurve immer über der Hauptbewässerungskurve, d.h. für konstanten Wassergehalt θ ist h_w (Bewässerung) $<$ h_d (Entwässerung). Zur weiteren Beschreibung wird neben der pF-WG-Kurve ein h_w - h_d -Diagramm genutzt. Darin sind die Wertepaare aller Bodenzustände als Drücke eingetragen.

Als Randbedingungen, die zur Lösung der Gleichung zur Beschreibung der Änderung des Wassergehaltes im Boden bei veränderten Druckbedingungen erforderlich sind, werden die kritischen Höhen für die Be- und Entwässerung eingeführt. Es gilt:

$$h \leq h_{dc} \rightarrow p_d = 1 \quad \text{und} \quad h \geq h_{wc} \rightarrow p_w = 1$$

Darin sind:

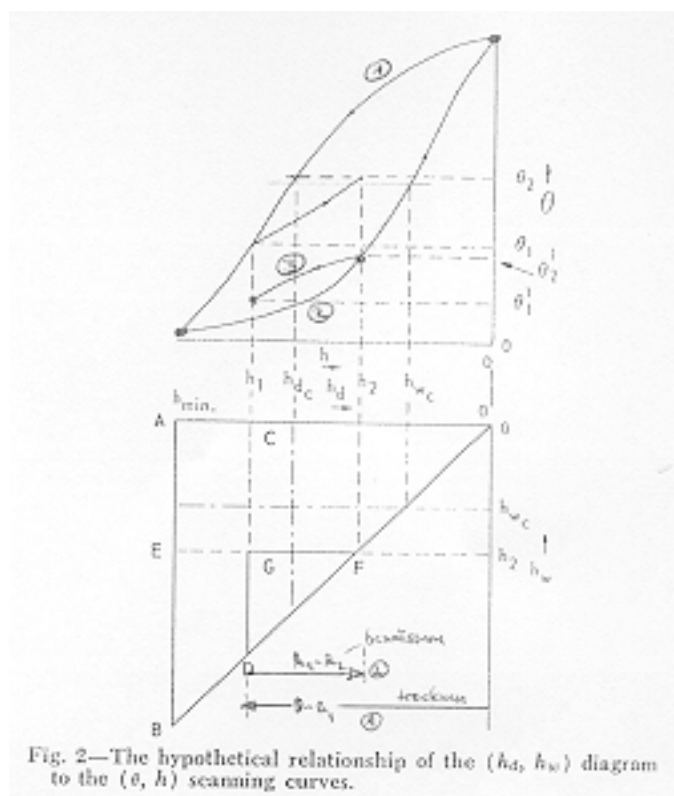
- p Anteil der Poren, die geleert (gefüllt) wurden, im Verhältnis zu denen, die ohne Porenblockade geleert (gefüllt) würden.

- h_{dc} kritische Druckhöhe (Entwässerung), d.h. für $h < h_{dc}$ ist die Entwässerung der Pore vom Entwässerungszustand der benachbarten Pore abhängig, und nicht allein von ihrer spezifischen Druckhöhe h_d .
- h_{wc} kritische Druckhöhe (Bewässerung), d.h. für $h < h_{wc}$ ist die Bewässerung der Pore vom Bewässerungszustand der benachbarten Pore abhängig, und nicht allein von ihrer spezifischen Druckhöhe h_w . Physikalisch bedeutet das, dass die Porenkanäle so eng sind, dass nur Pore für Pore gefüllt werden kann.

Weitere Randbedingungen, wie z.B. Einschluss von Luft bei der Bewässerung oder Einschluss von Wasser bei der Entwässerung, werden im weiteren vernachlässigt. Sie haben nach *Topp* auch nur eine untergeordnete Bedeutung.

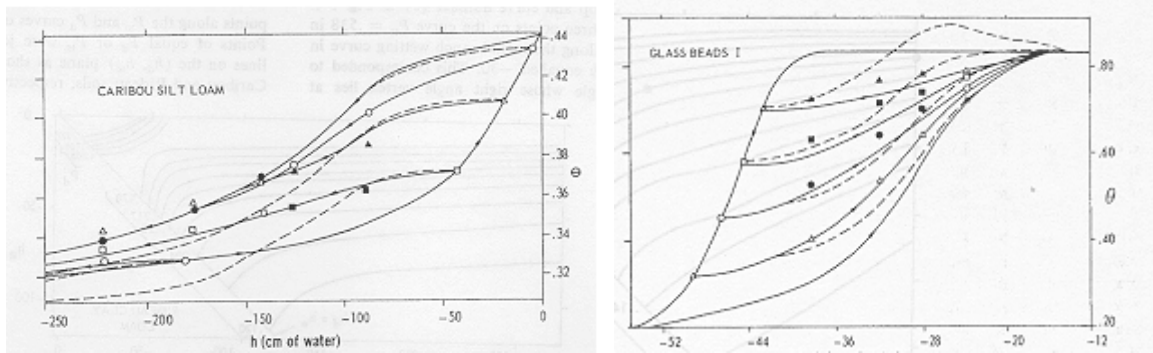
Das ganze wird an einem Beispiel (Fig. 2) dargestellt.

- Kurve 1: 0 ($h_{\text{Sättigung}}$) nach h_{min} ($h_{\text{Residualsättigung}}$), Ersttrocknung, entspricht dem Weg von 0 nach A
- Kurve 2: h_{min} ($h_{\text{Residualsättigung}}$) nach 0 ($h_{\text{Sättigung}}$), Erstbewässerung, entspricht dem Weg von A nach 0
- Kurve 3: Weg von 0 ($h_{\text{Sättigung}}$) über h_{min} ($h_{\text{Residualsättigung}}$) über h_2 ($>h_{wc}$) nach h_1 ($<h_{dc}$), entspricht dem Weg von 0 über A(=B) über F nach D



Mit dieser Darstellung wird es möglich, aus einer bekannten pF-WG-Kurve und einer beliebigen Anzahl von Verbindungslinien ein h_w - h_d -Diagramm zu erstellen, was die Grundlage darstellt, für die einzelnen Bodenarten Vorhersagen des Verlaufes der Verbindungslinien zu erstellen. Dabei ist bemerkenswert, dass bei dem Zwischenschritt der Darstellung von P_d und P_w die Streuung der Punkte mit dem Anteil von bindigen Bestandteilen zunimmt. Das ist ein Zeichen dafür, dass die Beeinflussung der Poren (Grad der Porenblockade) mit weiter werdender Porenverteilung abnimmt.

Der Autor vergleicht seine Ergebnisse mit denen von Messungen und den Vorhersagen nach der „*independent domain theory*“ (siehe Fig. 9 und 10). Dabei fällt auf, dass die Vorhersagen gegenüber der damaligen „*independent domain theory*“ wesentlich genauer sind und die gemessenen Werte genau genug treffen.



Zu beachten ist, dass *Topp* gegenüber der allgemeinen Darstellung in den Grafiken Abszisse und Ordinate vertauscht.

Topp kann hier zeigen, dass physikalische Vorgänge mit vertretbarem Aufwand mathematisch modelliert werden können. Dabei muss aber nicht soweit abstrahiert werden, dass die physikalischen Grundlagen hinter der Mathematik zurücktreten müssen.

7. Watson, K.K., Reginato, R.J., Jackson, R.D., "Soil water hysteresis in a field soil", *Soil science society american proceedings* 39, 1975, S. 242-246 (223)

Watson et. al. stellen in ihrer Abhandlung die bodenhydraulischen Zusammenhänge zwischen dem Wassergehalt (θ) und der Saugspannung ($\Psi = h$) dar. Dabei untersuchen sie das Verhalten der beiden Parameter bei der Be- und Entwässerung einer Bodensäule. Der zeitliche Verlauf von θ und h wird anhand markanter physikalischer Randbedingungen wie folgt erklärt (Fig. 1):

Im Bereich AB infiltriert Wasser in die Bodensäule. Die Feuchtefront wandert zum Beobachtungsquerschnitt (BQ). Dabei findet im BQ keine Be- oder Entwässerung statt, h und θ bleiben konstant.

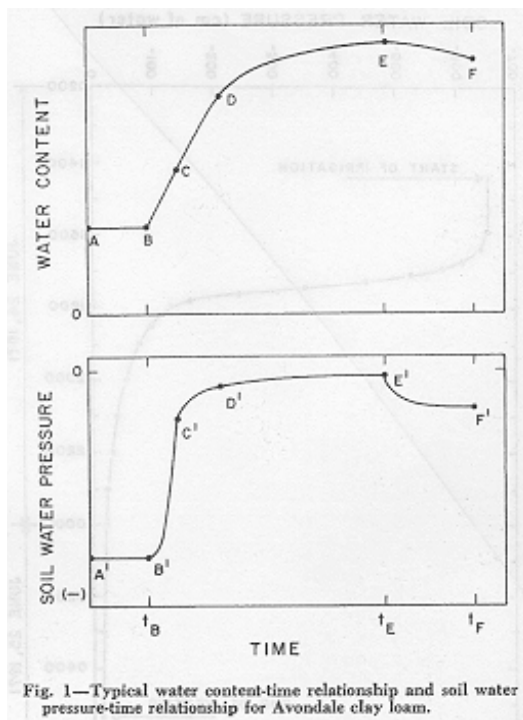
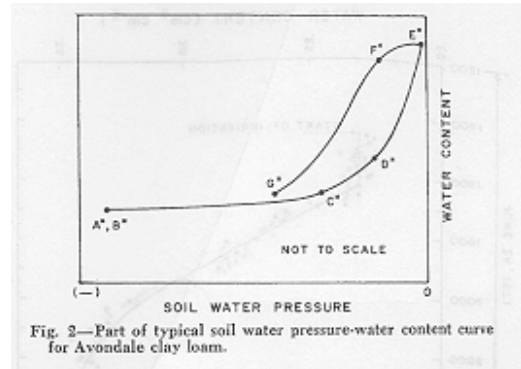


Fig. 1—Typical water content-time relationship and soil water pressure-time relationship for Avondale clay loam.

Im Punkt B ($=t_B$) erreicht die Feuchtefront gerade den BQ. Für $t > t_B$ nimmt θ zu, die Saugspannung (h) nimmt ab. In der Graphik ist h negativ aufgetragen. Im Bereich BC ist die Steigung des Verlaufs von h größer als die von θ , d.h. die Saugspannung nimmt stärker ab als die Bodenfeuchte zunimmt. Zwischen C und D vermindert sich die Steigung von $h(t)$ deutlich. $\theta(t)$ steigt hier noch stärker an, d.h. zwischen C und D wird $d\theta/dt > dh/dt$. Von D nach E ist weiter $d\theta/dt > dh/dt$. E symbolisiert den Wassergehalt, an dem die Entwässerung beginnt. Aus dem Kurvenverlauf ist E' besser zu detektieren, da h hier plötzlich wieder ansteigt, die Kurve in ihrem Verlauf einen deutlichen Knick aufweist. Nach

E ändert $d\theta/dt$ das Vorzeichen, wobei sich θ nur sehr wenig ändert. Die Saugspannung h steigt nun wieder stärker an. Nach t_F steigt h über längere Zeit nahezu konstant an ($dh/dt \approx \text{konst.}$). Der Wassergehalt nimmt auch nahezu linear ab, die Kurve hat aber eine größere Steigung als die von $h(t)$. Aus den beiden Kurven $\theta(t)$ und $h(t)$ lässt sich das bodencharakteristische θ - h -Diagramm (pF -WG-Kurve) mit ihrem hysteretischen Verlauf gewinnen.

Diese Zusammenhänge werden mit "Avondale clay loam" verifiziert. Bei diesem Material konnten die Autoren feststellen „the degree of hysteresissuggests that if a mean $h(\theta)$ curve, drawn through the middle of the hysteresis loop, were used in predictive calculations, the water content error would be of the order of $\pm 0,02 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$ and the soil water pressure error of the order of $\pm 25 \text{ cm}$ of water..... A mean $h(\theta)$ curve would be satisfactory for most field estimates.”

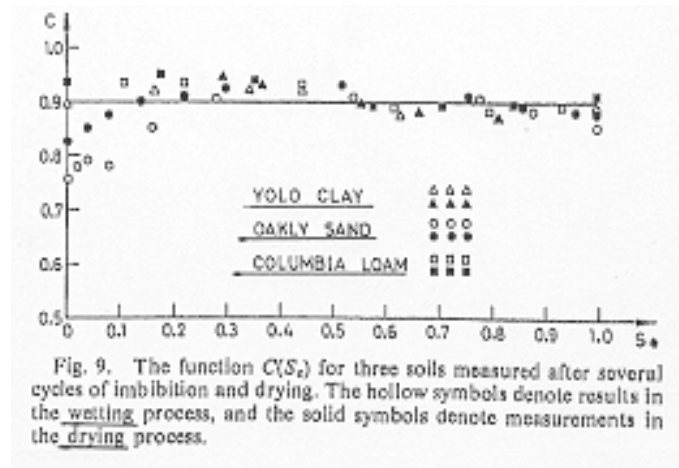


8. "A conceptual model of hysteresis", Mualem, Y., Water resources research 10, 1974, Seite 514-520 (136)

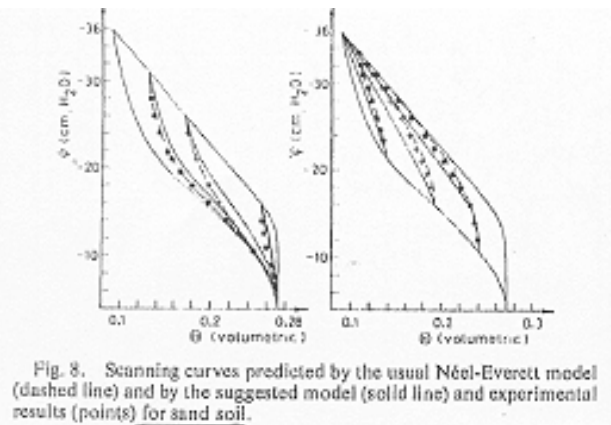
Aufbauend auf der Erkenntnis von Enderby (siehe I/4), die beinhaltet, dass die Basis der Hysterese ein irreversibler Prozess sein muss, können mit dem hier vorgestellten Modell die Erstentwässerungskurve und die Verbindungskurven, die aus ihr hervorgehen, vorhergesagt werden. Nach der Beschreibung der mathematischen Grundlagen und der Modellvorstellungen (Ablauf der Be- und Entwässerung in mehreren Wiederholungen) wird für vier verschiedene Bodenarten (*Sand, Rubicon sandy loam, Caribou silt loam* und *Rideau clay loam*) das Modell verifiziert. Diese Böden wurden schon von anderen Autoren untersucht und in der Literatur ausführlich dargestellt. Sie eignen sich daher und wegen ihres Spektrums (von Sand bis Ton) ideal dafür. Außerdem werden die Randbedingungen für die „independent domain theory“ physikalisch erklärt, ebenso die zeitlichen Abläufe der Bewässerung einer Bodenprobe (Zunahme des Wassergehaltes mit der Zeit bei konstanter Wasserspannung durch das Austreiben von Luft, d.h. der Sättigungswassergehalt nähert sich der Porosität des Bodens). Trägt man dazu für drei weitere Böden (*Oakley sand, Columbia loam, Yolo clay*) die Funktion $c(S_e)$ auf, mit

$$c = V_{\text{wasser}} / (V_{\text{wasser}} + V_{\text{Luft}}) \quad \text{und} \quad S_e = \frac{V_{\text{Wasser}} - V_{\text{Wasser,min}}}{V_{\text{Wasser,max}} - V_{\text{Wasser,min}}} = \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}},$$

so erhält man die Funktion von Fig. 9. Darin ist erkennbar, dass für c keine signifikanten Unterschiede beim Be- und Entwässern auftreten, und c nur um den Mittelwert von 0,90 mit maximal 6% Abweichung schwankt (Ausnahme ist der Bereich $0 < S_e < 0,1$). Daraus lässt sich als weitere Modellrandbedingung ableiten, dass c eine charakteristische Bodenkonstante ist.



Hier sollen jetzt nur noch die erhaltenen Kurven für sandige Böden betrachtet werden (Fig. 8). Eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Modellwerte mit gemessenen Werten und denen des Néel-Everett-Modell ist ersichtlich. Im weiteren werden noch die abweichenden Verläufe der Kurven bei mehrmaligen Be- und Entwässerungszyklen dargestellt. Auch Zwischenzustände, wie Abbrechen der Bewässerung vor der Sättigung und darauf folgende Entwässerung sind aufgezeichnet. Zusammenfassend gilt:



1. Die ψ - θ -Beziehung (pF -WG-Kurve) kann aus der Kenntnis der beiden Grundkurven in ihrem hysteretischen Bereich konstruiert werden.
2. Die Verbindungslinien werden durch definierte Funktionen beschrieben.
3. Die vorhergesagten Verbindungskurven liegen innerhalb des Bereiches, der aus den beiden Grundkurven gebildet wird.
4. Mit dem Modell kann auf einfache Weise eine numerische Lösung des ungesättigten Flusses dargestellt werden.

Der Vorteil des Modells liegt in der sehr einfachen analytischen Beschreibung der pF -WG-Kurve.

9. "Capillary hysteresis and the relationship between drying and wetting curves", Parlange, J.-Y., *Water resources research* 12, 1976, S. 224-228 (151)

Mit der Zielsetzung, das Vorhersagemodell von *Mualem* zu verbessern, das beinhaltet, dass die Steigungen der Be- und Entwässerungskurven sich stetig ändern, legt der Autor eine Lösung mit der Notwendigkeit, nur eine Grundkurve (bei *Mualem* ist die Kenntnis von beiden Grundkurven erforderlich) zu kennen, vor. Der Unterschied ist, dass die Verbindungslinien nicht durch Interpolation, sondern durch Extrapolation von der Grundkurve aus, erhalten werden.

Im weiteren wird die befriedigende Übereinstimmung der mit dem vorgestellten Modell berechneten Kurven mit experimentell bestimmten Kurven für die drei

Bodenarten *Rubicon sandy loam*, *Caribou silt loam* und *sand soil* dargestellt. Die beiden Extreme, der *silt loam* (Fig. 4) und der Sand (Fig. 5) sind hier dargestellt. Aus den pF-WG-Kurven wird deutlich, dass die Differenz der Wasserspannungen der Be- und Entwässerungskurven bei dem *silt loam* deutlich größer sind als bei dem Sand. Außerdem legen sich die Verbindungskurven bei Sand schon bei relativ höheren Wassergehalten tangential an die Hauptkurven an. Interessant ist die Bestätigung, dass bei Sand die pF-WG-Kurve im Bereich des Sättigungswassergehaltes steiler abfällt. Diese beiden Tatsachen bestätigen die Wahl des Materials im Lysimeter (leicht schluffiger Sand). Der Einfluss der Hysterese ist so zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit minimierbar.

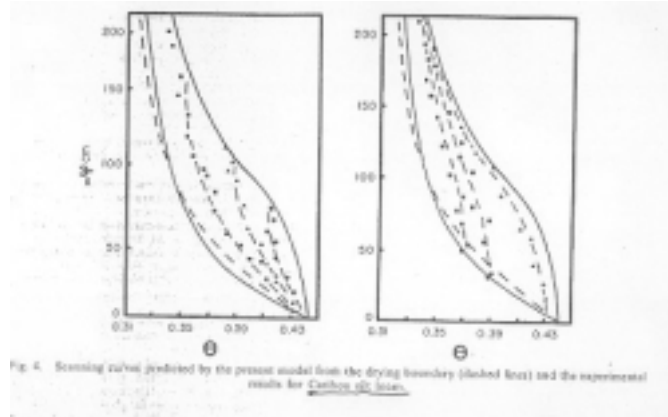


Fig. 4. Scanning curves predicted by the present model from the drying boundary (dashed lines) and the experimental results for *Caribou silt loam*.

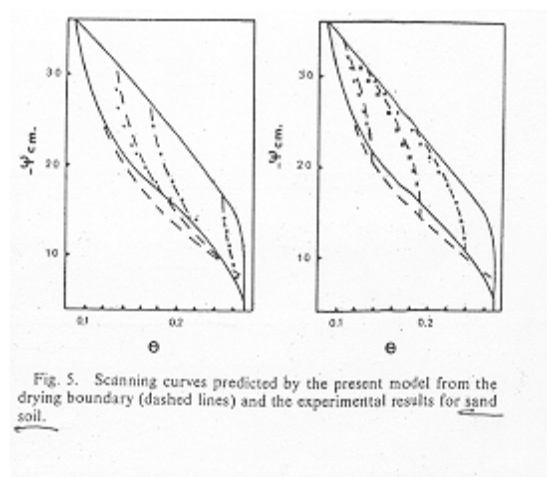


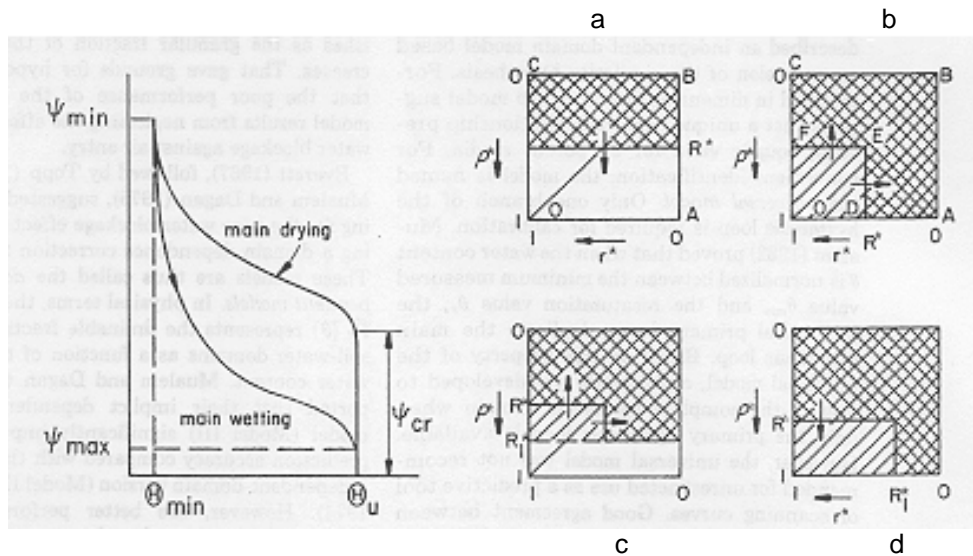
Fig. 5. Scanning curves predicted by the present model from the drying boundary (dashed lines) and the experimental results for *sand soil*.

Der Autor selbst stellt abschließend die Grenzen seines Modells dar. So ist die genaue Kenntnis des Ausgangswassergehaltes als Funktion der Saugspannung erforderlich, da ein kleiner Fehler in der Ableitung (der Steigung der pF-WG-Kurve in diesem Punkt) einen völlig anderen Verlauf der Trocknungs-Verbindungskurve erzeugen würde. Das Modell steht und fällt in seiner Güte folglich mit der Genauigkeit der Darstellung der pF-WG-Kurve. Es ist zu beachten, dass bei der Erstellung der pF-WG-Kurve in den gleichen Skalen gearbeitet wird, wie bei der Modellbetrachtung.

10. "A model dependent domain theory of hysteresis", Mualem, Y., *Soil science* 137, 1984, Seite 283-289 (139)

Mualem stellt hier ein verbessertes Modell zur Beschreibung der Be- und Entwässerungskurven von Böden vor. Verbessert wurde gegenüber seinen vorangehenden Modellen, dass das Modell einfacher ist und für die Kalibrierung weniger Daten benötigt. Mit den pF-WG-Kurven dreier bekannter Materialien (Glaskugeln, Sand und sandigem Lehm), werden die Vorhersageergebnisse des Modells verglichen und eine bessere Übereinstimmung, als mit den „alten“ Modellen belegt.

Das untenstehende Bild zeigt, wie die Hysterese sich schematisch darstellen lässt (Erstbewässerung -a-, Erstentwässerung -b-, erste Wiederbewässerung -c- und erste Wiederentwässerung -d-). Diese bekannten Ansätze werden mathematisch formuliert.

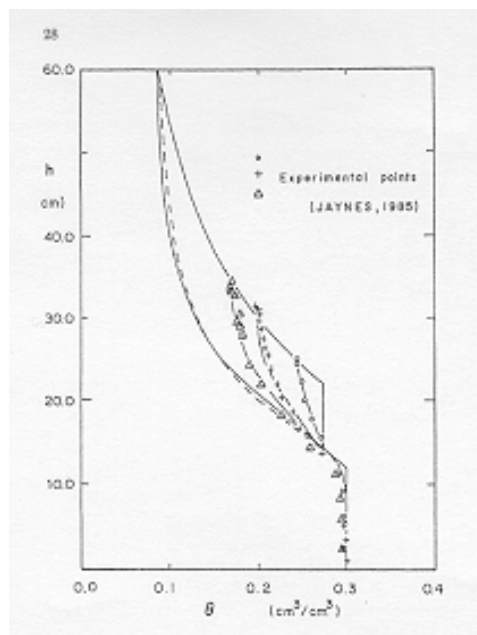


Kern des Modells ist es, dass mittels zweier Faktoren ($P_d(\theta)$) beschreibt die relative Menge der entwässerbaren Poren in Abhängigkeit des aktuellen Wassergehaltes, mit $P_d(\theta) = 1$ bei völlig leeren entwässerbaren Poren und $H(\psi) = \theta_w(\psi)/(\theta_u)^{0.5}$, wobei θ_w der Wassergehalt auf der Hauptbewässerungskurve beschrieben werden, und von diesen alle dazwischen liegenden Kurven abgeleitet werden können. Sind $P_d(\theta)$ und $H(\psi)$ bestimmt, ist das Modell kalibriert.

Für die drei Materialien wird anschließend das Modell verifiziert und mit den Ergebnissen des vorhergehenden Modells abgeglichen. Mit den Materialien ergibt sich eine gute Übereinstimmung, die Verbesserungen im Vergleich zum vorhergehenden Modell deutlich.

11. "Application of a simple soil-water hysteresis model", Hogarth, W.L., Hopmans, J., Parlange, J.-Y., Haverkamp, R., Journal of hydrology 98, 1988, S. 21-29 (91)

Die Autoren stellen ein „lineares“ Modell zur Erstellung der hysteretischen Verbindungs-



kurven zwischen der Hauptbewässerungs- und Hauptentwässerungskurve vor. Sie können zeigen, dass die Genauigkeit des Modells ausreichend ist, die Hauptkurven und die Kurven erster und zweiter Ordnung für einen Bodentyp nach Brooks/Corey für die Be- und Entwässerung zu beschreiben. Auf der Basis von nur vier Parametern kann jede andere Kurve von der entwässernden Kurve aus konstruiert werden, d.h. nur der Ausgangspunkt auf der Kurve ist notwendig. Die erhaltenen mathematischen Ergebnisse werden mit Analysewerten abgeglichen (siehe Bild). Es wird ein hohes Maß an Übereinstimmung erzielt. Die

Entwicklung von Verfahren hat also gezeigt, dass i.d.R. einfache Ansätze ausreichend sind, den Verlauf der Hysterese zu beschreiben (hier für das pF-WG-Diagramm).

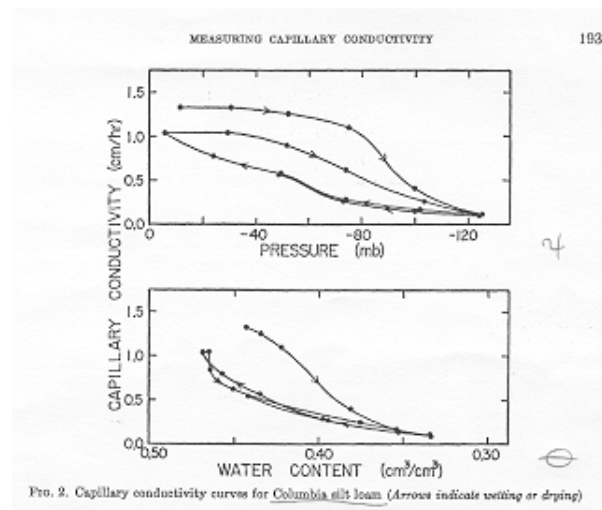
Zusammenfassung:

Die Erkenntnisse werden vorne im Abschnitt 2.5. zusammengefasst. Interessant ist jedenfalls, dass Mitte der 80er Jahre die grundlegende Untersuchung zur Hysterese abgeschlossen war. Die Arbeiten von Mualem und van Genuchten bildeten ca. 1986 den Abschluss einer intensiven Untersuchung seit den früher 50er Jahren.

II. Der Einfluss der Hysterese ist vernachlässigbar

1. „Measuring capillary conductivity“, Nielsen, D.R., Biggar, J.W., Soil science 92, 1961, S. 192-193 (148)

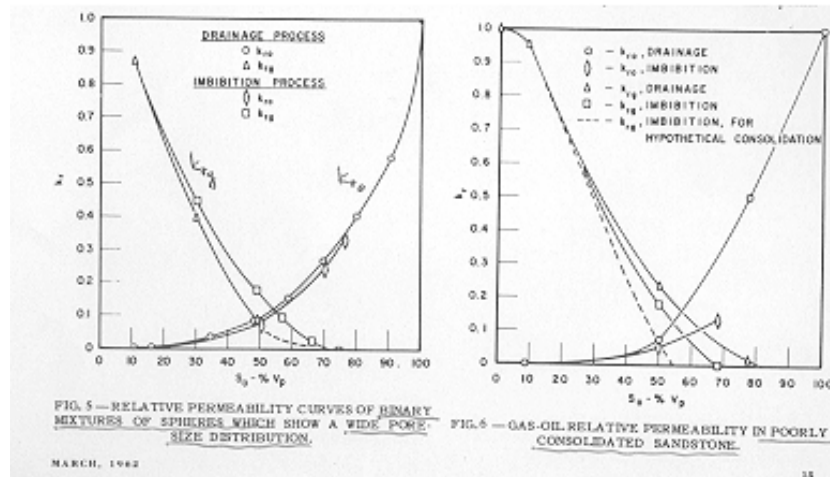
Untersucht wurde „*Columbia silt loam*“. Im Messgerät wurde die Bodenprobe be- und entwässert. Festgestellt wurde, dass die Erstentwässerung der Bodenprobe einen nichtreproduzierbaren Verlauf nimmt (Lufteinschluss, siehe auch I/4 und II/9). Dann stellt sich in der Beziehung Wasserspannung (ψ) zu hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert) der bekannte hysteretische Verlauf ein (Fig. 2, oben). In der Beziehung Wassergehalt (θ) zu k_f -Wert ist für die Erstentwässerung das gleiche Phänomen zu betrachten, im weiteren ist aber für die Be- und Entwässerungen kein Einfluss der Hysterese mehr erkennbar. „*The difference between the first and second drying cycle is caused principally by soil consolidation associated with the applied negative pressure. After the initial consolidation, the hysteresis in the capillary conductivity versus water content curves is much smaller than that in the capillary conductivity versus pressure curves the mathematical assumption that the capillary conductivity may be expressed as a single-valued function of water content*“.



2. „Imbibition and relative permeability in unconsolidated porous media“, Narr, J., Wygal, R.J., Henderson, J.H., American inst. of mineralogical and meteorological engineering trans. (Pet. div.) 225, 1962, S. 12-17 (145)

Untersucht wird der Einfluss des Konsolidierungszustandes und der Porendurchmesser- und -verteilung auf die Beziehung Wassergehalt (θ) zur hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert). Der Einfluss der Hysterese ist gering. Dazu wird belegt, dass die Porengrößenverteilung ein Schlüsselparameter ist, ebenso der Verdichtungsgrad, die auch beide für die Qualität der TAUPE-Messungen ausschlaggebend sind. Dagegen wurde in der Beziehung θ zur Wasserspannung (ψ) die bekannte

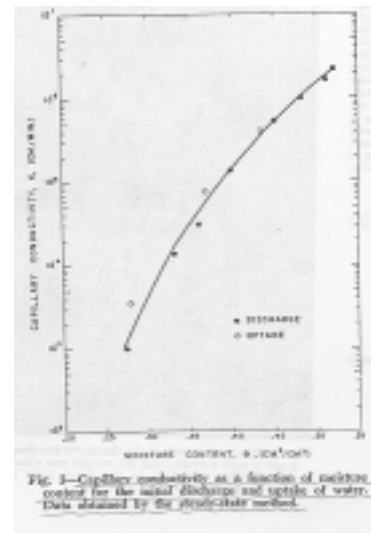
Hysteresese festgestellt, d.h., die entwässernde Kurve liegt über der bewässernden Kurve.



3. „Note on an improved apparatus for soil moisture flow measurements”, Elrick, D.E., Bowman, D.H., Soil science society America Proceedings 28, 1964, S. 450-453. (56)

Untersucht wurde „Guelph loam soil”, der luftgetrocknet und auf 2 mm abgeseibt wurde. Gemessen wurde die Beziehung zwischen Wassergehalt (θ) und Wasserspannung (ψ) bei Be- und Entwässerung. Es wurde festgestellt:

Die Beziehung ψ zu θ ist hysteretisch, die Entwässerungskurve liegt deutlich über der Bewässerungskurve (Abb. 2 im Bericht). Für die Beziehung θ zu k_f -Wert gilt, „as expected, there was **no noticeable hysteresis** in the k - θ -relationship shown in Fig. 3.“



4. „Estimates of field infiltration by numerical solution of the moisture flow equation“, Green, R.E., Hanks, R.J., Larson, W.E., Soil science society America Proceedings 28, 1964, S. 15-19 (76)

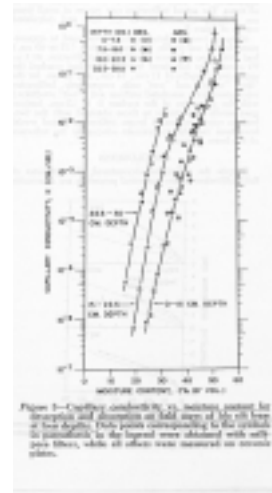
Untersucht wurde „Ida silt loam”, der in verschiedenen Tiefen entnommen wurde. Das Material wurde untersucht (be- und entwässert), um mit den Zuordnungen die Gleichung

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) \right]$$

numerisch lösen zu können. Die Beziehung ψ zu θ ist hysteretisch, die Entwässerungskurve liegt deutlich über der Bewässerungskurve (Abb. 4 des Berichtes). Für die Beziehung θ zu k_f -Wert gilt, „Capillary conductivity values for desorption and adsorption fall approximately on the same curves in fig. 3, especially for the two greater depths (siehe auch I-1). These results indicate a unique K vs. θ

relation at moisture contents $< 45\%$.“
Außerdem wird von den Autoren bekräftigt,

„...the results indicate that moisture flow theory may be used, in combination with limited field measurements, to provide estimates of infiltration for simulated conditions that are of practical interest but which are difficult to establish in the field“. Diesem Mangel soll mit dem Einsatz des TAUPE-Systems abgeholfen werden.



5. „Soil water diffusivity and hysteresis data from radial flow pressure cells“, Klute, A., Whisler, F.D., Scott, E.J., Soil science society America Proceedings 28, 1964, S. 160-164 (109)

Es wurde zwei Materialien untersucht: „Hayden sandy loam“ und „Alvin sandy loam“. Damit wurde der Zusammenhang zwischen Wassergehalt (θ) und Diffusivität (D in cm^2/Tag) dargestellt. Diese Beziehung ist stark hysteretisch, und zwar in Form einer liegenden Acht. Der Verlauf der Kurve ist ähnlich dem der Beziehung zwischen Wassergehalt (θ) und Wasserkapazität (C in $1/\text{cm}$), nur wesentlich flacher im Verlauf. Beide Kurven sind aber im Gegensatz zur Beziehung Wassergehalt (θ) zu Wasserspannung (ψ) nicht geschlossen.

Die Beziehung θ zur hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert) ist dagegen eindeutig und nicht mit Hysterese belegt (Bild 6 des Berichtes).

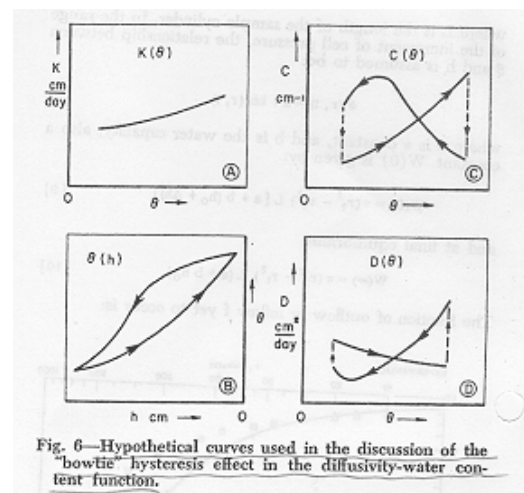


Fig. 6—Hypothetical curves used in the discussion of the “bowtie” hysteresis effect in the diffusivity-water content function.

6. “Proposed outflow method for the determination of the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials”, Collis-George, N., Rosenthal, M.J., Australian journal of soil research 4, 1966, S. 165-180 (38)

Vorangestellt wird die Theorie. Für das Material „Fontainebleau sand“ werden die Be- und Entwässerungskurven dargestellt. In Bild 5 (dargestellt ist Aluminiumoxid) ist zu erkennen, dass der Einfluss der Hysterese bei der Beziehung hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert) zu Wassergehalt (θ) wesentlich geringer ausgeprägt ist wie bei der Beziehung θ zur Diffusivität (cm^2/sec), aber doch vorhanden ist. Im Bild 4 wird gezeigt, dass bei der Beziehung Wasserspannung (ψ) zu θ die Hysterese für den Fontainebleau Sand (rechts) wesentlich geringer ausgeprägt ist als bei Aluminiumoxid (links). Daraus lässt sich schließen, dass die Hysterese in der k_f -Wert/ θ -Beziehung für den Fontainebleau Sand nur sehr gering vorhanden ist. Es werden damit die im I. Kapitel gemachten Aussagen bestätigt. Auf Seite 178 ff. wird

zudem noch die „Ink-bottle-theory“ zur Erklärung der Hysterese beschrieben.

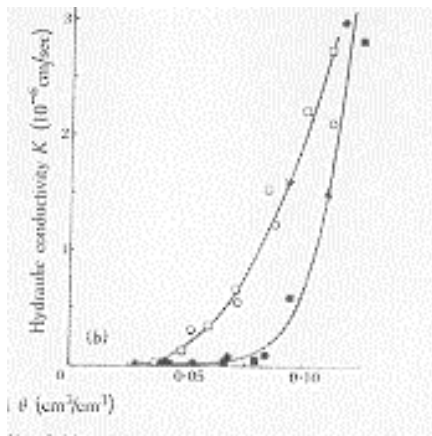


Bild 5

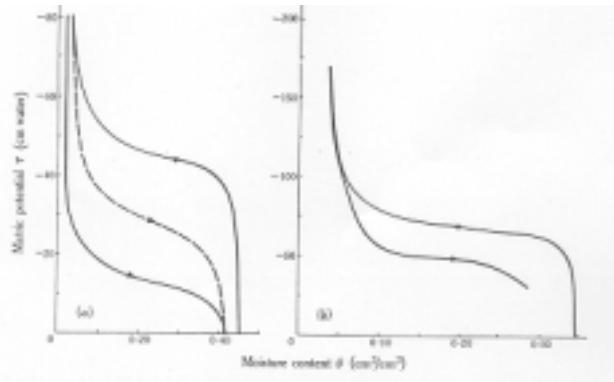


Bild 4

7. “Hysteresis moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media”, Topp, G.C., Miller, E.E., SssA-Proc. 30, 1966, S. 156-162 (213)

Hier wird die Hysterese in den Beziehungen Wasserspannung (ψ) zu hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert) und Wassergehalt (θ) zu ψ untersucht. In einer speziellen Apparatur wird als Testmaterial ein Glasbett verwendet. Die beiden ersten Beziehungen sind immer stark hysteretisch und werden mit der Beziehung θ zu k_f -Wert verglichen. Dabei fällt auf, dass die Hysterese in der dritten Beziehung nahezu verschwindet, und zwar für alle gemessenen Zustände (beispielhaft Fig. 5). Grundlegende Ausführungen sind: *“...aspects of hysteresis which can be discussed in terms of surface tension, contact angle, and pore geometry have received the most study, not only because these effects are an important source of hysteresis in practice, but also because conditions for which these effects are presumable the only source of hysteresis can be achieved in laboratory”*. Weiterhin *“...the observed hysteresis of the (K, S (entspricht θ)) relations was no more than two or three times the experimental uncertainty, the hysteresis seems to be genuine and systematic”*. Und abschließend *“The data obtained were in agreement with general expectations in that there was large hysteresis in both the (S, p (entspricht ψ)) and (K, p) relationships, but relatively little hysteresis in (K, S)”*.

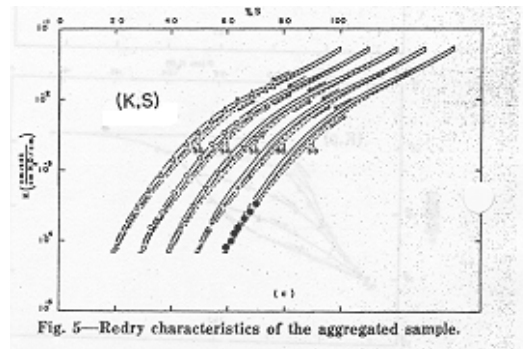


Fig. 5—Redry characteristics of the aggregated sample.

8. “Soil water hysteresis measured in a sandy loam compared with the hysteresis domain model”, Topp, G.C., SssA-Proc. 33, 1969, S. 645-651 (210)

Als Material wird hier “Rubicon sandy loam” (Sand (0,05-2 mm) 65,2%, Schluff (0,002-0,05 mm) 25,9% und Ton (<0,002 mm) 8,9%) eingesetzt. Es wird gezeigt, dass in der Beziehung hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) zu Wassergehalt (θ) nur eine untergeordnete Hysterese auftritt (Fig. 6). Auch bei zehn Be- und Entwässerungszyklen liegen die Punkte im Diagramm nahezu auf einer

Kurve. Dabei wurde eine weite Spanne der Bodenfeuchte von ca. 17 bis 40 Vol.-% durchfahren. Außerdem wird die „Independent domain theory“ erklärt und die Ergebnisse des Labors mit den theoretisch erhaltenen verglichen.

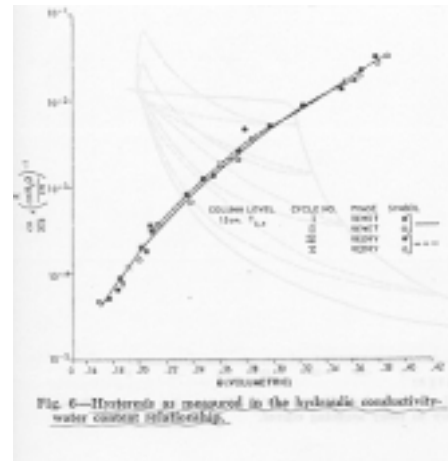
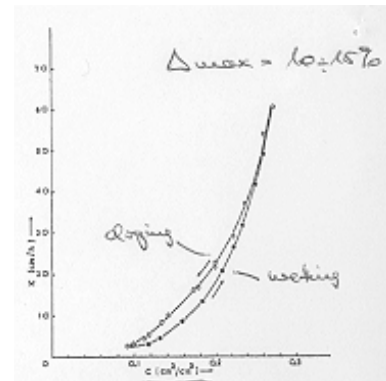


Fig. 6—Hysteresis as measured in the hydraulic conductivity-water content relationship.

9. “Hysteresis of pore water in granular porous bodies”, Poulouvassilis, A., *Soil science* 109, 1970, S. 5-12 (159)

Die Verfügbarkeit von experimentell gewonnenen Daten, die die Anwendbarkeit der „independent domain theory“ im Falle der Hysterese von Porenwasser belegen, war 1970 und ist heute noch sehr gering. Daher werden im vorliegenden Bericht anhand von zwei „porous bodies“, die aus Sand gemischt wurden, die Beziehungen Wassergehalt (θ) zu Saugspannung (ψ) experimentell bestimmt. Die Materialien sind über eine unterschiedliche

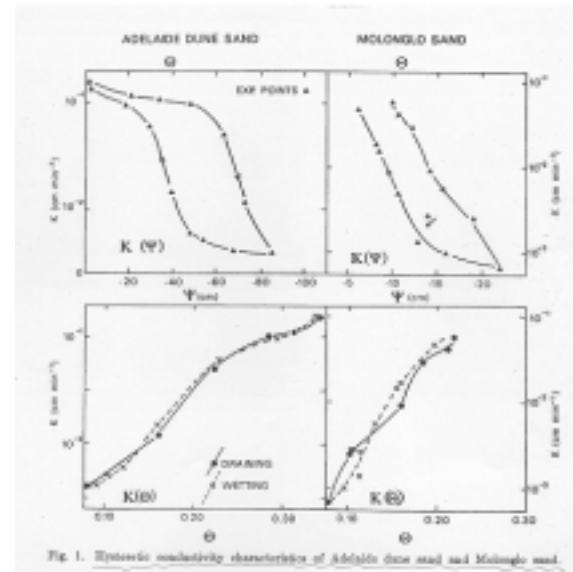


Feinsandverteilung (Bereich von 0,35 bis 1,40 mm) charakterisiert. Die Unterschiede sind allerdings sehr gering. Man erhält eine deutlich ausgeprägte Hysterese in der ψ - θ -Beziehung, mit dem bekannten Effekt der irreversiblen Erstentwässerungskurve (siehe auch I/4 und II/1). In der Beziehung θ zur hydraulischen Leitfähigkeit liegt der entwässernde Ast über dem bewässernden Ast, die maximale Abweichung der Werte liegt mit 10 bis 15% in einem noch hinnehmbaren Rahmen (Abweichung in der ψ - θ -Beziehung bis zu einer Zehnerpotenz). In der Zusammenfassung belegt der Autor nochmals, „...experimental results concerning the hysteresis behavior of granular porous bodies are reported and compared with the predictions of the independent domain concept. A dynamic method is described for the direct determination of the relationships between moisture content and hydraulic conductivity on long vertical columns.“

10. “Hysteresis in two sands and an independent domain model”, Talsma, T., *Water resources research* 6, 1970, S. 964-970 (246)

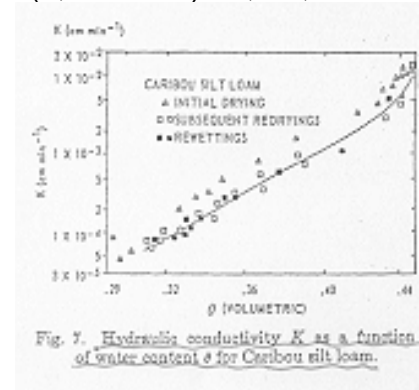
Talsma untersucht hier nochmals grundlegend das Phänomen der Hysterese. Ausführlich wird in der Einleitung die Entwicklung in der Literatur dargestellt. Anhand von „Adelaide dune sand“ und „Molonglo river sand“, die unterschiedliche Sieblinien aufweisen, werden die Beziehungen Wasserspannung (ψ) zu hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert) und Wassergehalt (θ) zu k_f -Wert ermittelt. In beiden Fällen weist die erste Beziehung die bekannte Hysterese auf, in der zweiten Beziehung ist Hysterese nur sehr gering, sogar in vernachlässigbarer Größe, vorhanden

(Fig. 1). Diese Eigenschaften können auch mit dem „*independent domain model*“ nach Enderby, Poulouvassilis und Topp belegt werden. Die Kernaussage lautet: „*Considerable hysteresis occurred in the moisture content – potential and conductivity – potential relationships but little, if any, hysteresis was observed in the moisture content – conductivity relationships*“.



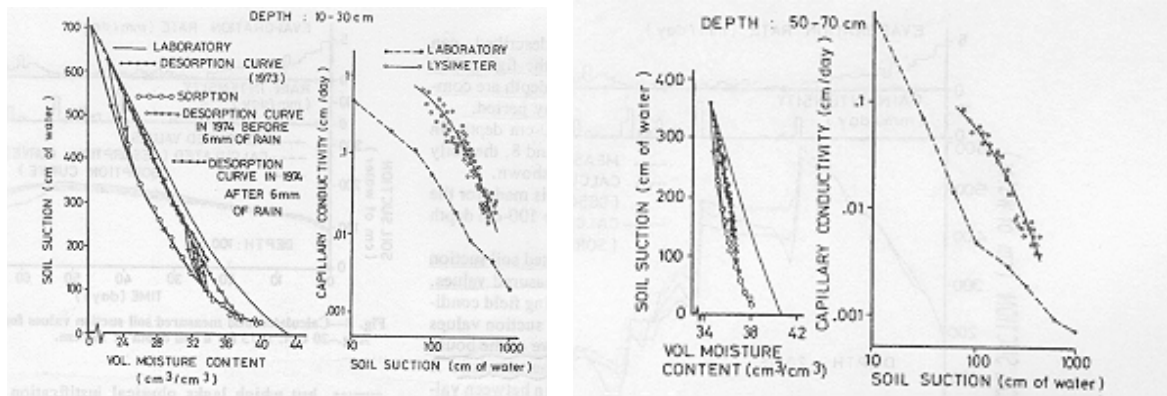
11. “Soil water hysteresis in silt loam and clay loam soils”, Topp, G.C., Water resources research 7, 1971, S. 914-920 (211)

In dieser Literaturstelle werden „*Caribou silt loam*“ (Sand (0,05-2 mm) 29,4%, Schluff (0,002-0,05 mm) 54,4% und Ton (<0,002 mm) 16,2%) und „*Rideau clay loam*“ (Sand (0,05-2 mm) 36,1%, Schluff (0,002-0,05 mm) 29,3% und Ton (<0,002 mm) 34,6%) untersucht. Damit werden hier gezielt feiner strukturierte Böden herangezogen. Die Kernaussage lautet: „*For both soils there was no hysteresis measured in the hydraulic conductivity – water content relationship.*“ Diese Aussage bestätigt die Ergebnisse, die in u.a. in Fig. 7 dargestellt sind.

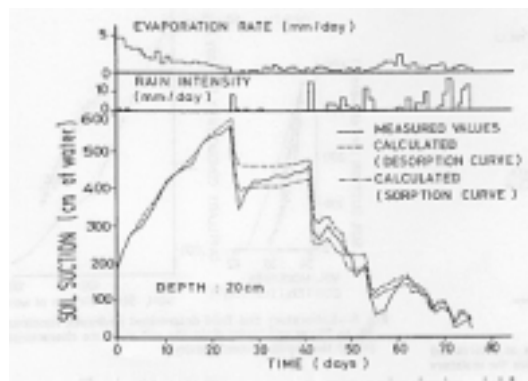


12. “Influence of hysteresis on moisture flow in a undisturbed soil monolith”, Beese, F., van der Ploeg, R.R., Soil science society american journal 40, 1976, S. 480-484 (11)

Die Autoren beschreiben ihre Beobachtungen der Bodenfeuchtedynamik in einem Lysimeter. Dabei werden in zehn Tiefenprofilen die Wasserspannung, der Niederschlag, die Verdunstung und die Lage der Bodenfeuchtenfront täglich über den gesamten Versuchszeitraum von drei Jahren aufgenommen. Aus diesen Daten wurde u.a. die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit bestimmt. Zweck der Untersuchung war es, die Größe des Fehlers zu bestimmen, wenn man die Be- und Entwässerungscharakteristik der Böden nicht berücksichtigt (Hysterese). Indikator für diesen Fehler ist das Maß der Übereinstimmung der gemessenen mit den berechneten Werten der Bodenwasserspannung. In den folgenden beiden Bildern wird deutlich, dass der Einfluss der Hysterese mit zunehmender Tiefe abnimmt. Auf dem Bild links (Tiefe 10 bis 30 cm) ist der horizontale Abstand zwischen der Be- und der Entwässerungskurve wesentlich breiter als auf dem Bild rechts (Tiefe 50 bis 70 cm).



Das dritte Bild zeigt die gewonnene Übereinstimmung der gemessenen Wasserspannungswerte mit den berechneten. Die gemessenen Werte liegen durchweg zwischen den Werten, berechnet aus der Hauptentwässerungskurve (oben) und aus der Hauptbewässerungskurve (unten). Lediglich an den Wasserspannungssprüngen infolge der Bewässerung liegen beide berechneten Kurven zu hoch. Diese punktuelle Nichtübereinstimmung schmälert aber das Gesamtergebnis nur unwesentlich. Für das hier untersuchte Material erscheint es somit ausreichend, die Wasserspannungen auf Basis der Hauptentwässerungskurve zu berechnen. Man liegt damit auf der „sicheren“ Seite, d.h. die berechneten Werte sind immer leicht höher als die gemessenen. Für den geplanten Einsatz der TAUPE-Sensoren wäre nach dieser Literaturstelle eine Berücksichtigung des Einflusses der Hysterese nicht erforderlich.



13. “The measurement of soil water hysteretic relationships on a soil monolith”, Tzimas, E., Journal of soil science 30, 1979, S. 529-534 (214)

Untersucht wurde “*Cambridge greensand*“. Vor dem Einbau in den Probeapparat wurde das Bodenmaterial, wie bei allen Versuchen üblich, getrocknet, gesiebt und dann verdichtet. Zusammenfassend (siehe Fig. 4) ergibt sich...“*Water content, hydraulic conductivity and soil water suction were measured simultaneously on a full cycle starting from saturation, drying to a small water content and then wetting until saturation was reached again. The results showed clearly the hysteretic nature of the relations between water content and suction and between hydraulic conductivity and suction, but not between hydraulic conductivity and water content.*”

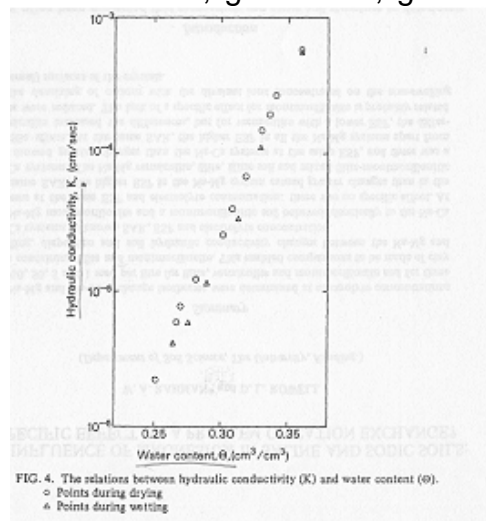


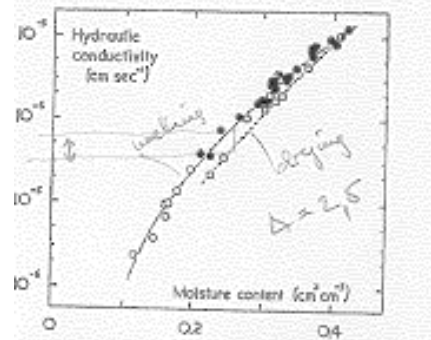
FIG. 4. The relations between hydraulic conductivity (K) and water content (θ).
 ○ Points during drying
 △ Points during wetting

III. Der Einfluss der Hysterese ist vorhanden

1. "An infiltration method of measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", Youngs, E.G., Soil sci. 97, 1964, S. 307-311 (234)

Youngs betrachtet den vertikalen Fluss in einer Bodensäule. Dabei beginnt er seinen Versuch bei einem geringen Wassergehalt und sättigt die Bodensäule bis zum Sättigungswassergehalt auf. Wird die Sättigung an der Oberfläche der Bodensäule erreicht, wird der Gradient der Wasserspannung zu Null und das Feuchteprofil bewegt sich abwärts mit einer konstanten Geschwindigkeit und einer konstanten Form. Da die einzige antreibende Kraft die Erdbeschleunigung verursacht, hängt der Durchfluss nur noch von der hydraulischen Leitfähigkeit (K) ab. Diese kann mit dem vorliegenden Experiment (Zu- bzw. Abfluss sind bekannte, gemessene Größen) bestimmt werden. Nicht nur K bei Wassersättigung ist so bestimmbar, sondern auch K für jeden ungesättigten Zustand.

Die Messwerte sind im nebenstehenden Bild aufgetragen. Die unterschiedliche Kennung der Messpunkte repräsentiert unterschiedliche Methoden der Datengewinnung. Interessant ist, dass die Messwerte bei der Bewässerung über denen der Entwässerung liegen, im Maximum bei einem Wassergehalt von ca. 25% um den Faktor 2,5, also nicht unerheblich. Das Material, ein „Slate dust“ mit einem K -Wert von 10^{-5} m/sec bis 10^{-7} m/sec, liegt im Bereich der für den TAUPE-Einsatz interessanten Materialien.

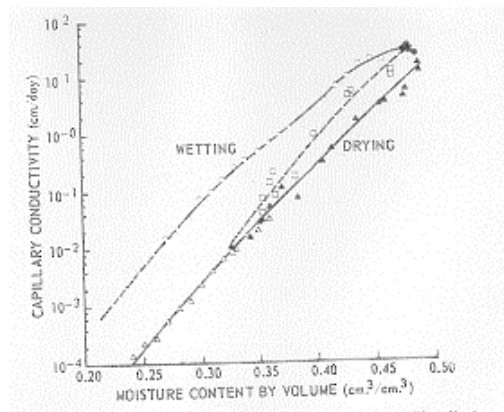


Trotzdem wird das Ergebnis von Youngs nicht überbewertet, da auf Grund der Versuchsrandbedingungen, z.B. konstant gesättigte Verhältnisse an der Bodensäuleroberfläche, sich Unschärfen ergeben. Außerdem zeigt das Bild, dass im Bereich Wassergehalt über 30% die Versuchs- und Referenzergebnisse sich doch stark vermischen, d.h. eine Unterscheidung in Be- und Entwässerung gewagt ist. Unterhalb von einem Wassergehalt von 20% wurden für den entwässernden Ast keine Messwerte mehr ermittelt.

2. "Moisture tension, diffusivity, and conductivity of a loam soil during wetting and drying", Staple, W.J., Can. journal of soil science 45, 1965, S. 78-86 (202)

Untersucht wird das Verhalten von "Grenville silt loam" bei der Trocknung und der Wiederbewässerung. Ausgehend von der Richards-Gleichung (partielle Differenzialgleichung der Wasserbewegung in der ungesättigten Zone) wird der bekannte Zusammenhang zwischen hydraulischer Leitfähigkeit (K) und der Diffusivität (D) dargestellt. Nötig zu dieser Beschreibung ist das pF-WG-Diagramm, die Abhängigkeit des aktuellen Wassergehaltes (θ) des ungesättigten Bodens von der Saugspannung (ψ). Staple untersucht die Bodenprobe hauptsächlich im Bereich eines Wassergehaltes von 30% bis 40%. Von der Feldkapazität (Wasserspannung ca. 330 cm Wassersäule) bis zum Welkepunkt (1500 cm Wassersäule) wurde die Saugspannung mit einer Methode nach Richards gemessen, darunter wurde nach der Methode von Haines gemessen und mit Tensiometern. Das Bodenmaterial wurde wie üblich aufbereitet, d.h. getrocknet und mittels 2-mm-Sieb abgesiebt. Aus der pF-WG-Kurve

und der Beziehung θ zu D wurde die Beziehung θ zu K berechnet. Dadurch wird der Einfluss der Hysterese noch verstärkt. Während bei der θ - D -Beziehung die Bewässerungskurve um den Faktor 5 über der Entwässerungskurve liegt, erhöht sich der Faktor durch den Einfluss der Steigung der Graphen der θ - ψ -Beziehung auf den Faktor 10. Die gemessenen Werte der θ - K -Beziehung liegen für die Entwässerung nahezu auf einer Geraden, sind aber von der Bewässerungszeit abhängig. Das relativiert natürlich den Einfluss der Hysterese.



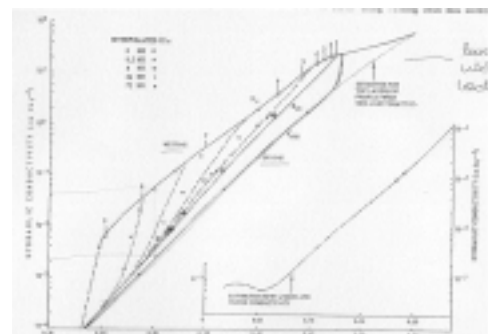
Staple fasst wie folgt zusammen: *“Diffusivities and conductivities on wetting exceeded those on drying in the ratios 5:1 and 10:1 respectively. These data depended on the bulk density and particle size distribution of the soil. The observed wetting to drying ratios of D and K should be representative for fragmented surface soils although lower ratios may occur below plough depth.”*

In Konsequenz bedeutet das für die Festlegung des Messquerschnittes für das TAUPE-Verfahren, dass tiefer liegende Querschnitte zu wählen sind, z.B. unter einer mineralischen Dichtschicht. Damit kann man sich die hier gewonnene Erkenntnis der abnehmenden Fehlergröße zu Nutze machen.

3. “Infiltration and redistribution in vertical columns of loam soil”, Staple, W.J., Soil science society America proceedings 30, 1966, S. 553-558 (203)

In diesem Artikel schildert Staple die Ergebnisse der Fortsetzung seiner Untersuchungen (siehe III/2). Er bestätigt, dass bei der Berechnung der Werte der Beziehung Wassergehalt zu hydraulischer Durchlässigkeit (θ - K -Beziehung) zwischen den Werten des bewässernden und des entwässernden Astes der Faktor 10 liegt. Die Gründe dafür sind in II/2 (siehe vorgehende Zusammenfassung) geschildert. Staple selbst relativiert sein Ergebnisse: *„The difference between wetting and drying conductivities found for Grenville silt loam were greater than those observed by other workers for soils of similar texture.”* Und weiter führt er aus: *“Comparison of moisture profiles...shows that when hysteresis in K only was neglected, the departure from the accepted distribution was less than in Fig. 4, provided the wetting value for conductivity was used. ...Neglect of hysteresis made the moisture content vs. depth curves flatter in each case.”*

Es wird damit bestätigt, dass der Einsatz von bindigem Material für die Bestimmung des Durchflusses mit dem TAUPE-System nicht ideal ist. Der Einfluss der Hysterese ist offenbar nicht zu vernachlässigen, wenn er auch nicht die von Staple beschriebenen Größenordnungen erreicht.



4. "The effect of hysteresis of pore water on the hydraulic conductivity", Poulvassilis, A., Journal of soil science 20, 1969, S. 52-56 (158)

Basierend auf der „Independent domain theory“ wird folgende Aussage gemacht: „...that a fraction of the pore-water constituting a volume ΔV is contained in pores not common to both the wetting and drying states and that the volume in a wetting state is contained in pores whose draining radii are greater than those of the pores containing the water volume ΔV in the drying state. On the above basis it is suggested that hysteresis may affect the hydraulic conductivity... It is concluded,...that the conductivity in the wetting state can be greater, equal, or less than that in the drying state, depending on the particular porous body.“

In Fig. 2 wird der Einfluss der Hysterese dargestellt. Untersucht wurden zwei verschiedene Sande. Bei beiden ist die Abweichung der hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert) bei der Bewässerung von der Entwässerung bei mittleren Wassergehalten am größten („ ΔV constitutes a higher percentage of the

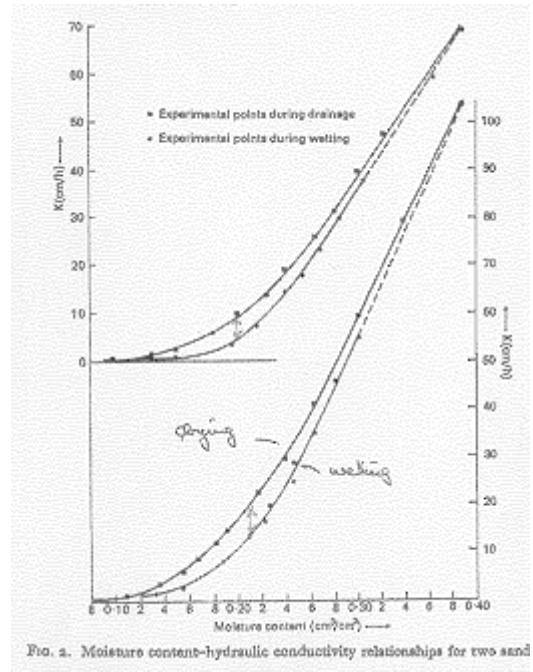


Fig. 2. Moisture content-hydraulic conductivity relationships for two sand

total water volume V). Die Abweichung ist trotzdem relativ gering. Sande sind offenbar für die Untersuchung des Durchflusses durch eine Schicht eher geeignet, zumal die Residualsättigung mit ca. 8% weit niedriger liegt als z.B. bei Schluffen. Das bedeutet, dass nur bei ungewöhnlichen Bewässerungsereignissen oder bei Einstau Wassergehalte von über 20% erreicht werden.

5. "Hysteresis in the moisture characteristics of clay soil", Pavlakis, G., Barden, L., Journal of soil science 23, 1972, S. 350-361 (152)

Es wurden zwei Lehme (*Westwater clay* und *Backwater clay*) verwendet, die den

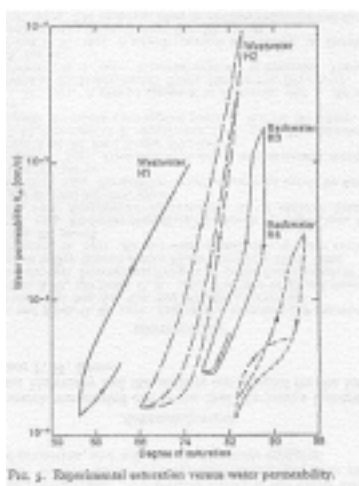


Fig. 5. Hysteresis in the moisture characteristics of clay soil

beiden Versuchsvoraussetzungen (die Saugspannung im verdichteten Lehm darf nicht höher werden, als die der umgebenden Keramik beim Lufttrittspunkt, und der bei optimalem Wassergehalt verdichtete Lehm schrumpft oder quillt bei Entwässerung bzw. Bewässerung nicht) entsprechen. In Fig. 5 werden die Ergebnisse in der Beziehung hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert) zur Wassersättigung der Poren dargestellt. Im Bereich von jeweils ca. 8%

(Sättigungsbereich von z.B. 74% bis 82%) ist ein Einfluss der Hysterese sichtbar (...there can be a marked hysteresis in the S versus k relation). In diesem hoch gesättigten Bereich bei einem bindigen Boden beträgt die gefundene Abweichung des k_f -Wertes (Bewässerung zu Entwässerung) bis zu einer Zehnerpotenz. Danach sind stark bindige Materialien (Tone) zur Kontrolle des Durchflusses nur eingeschränkt geeignet.

6. "The hysteresis in the relationship between hydraulic conductivity and suction", Poulouvalis, A., Tzimas, E., Soil sci. 117, 1974, S. 250-256 (160)

In diesem Bericht wird gezeigt, dass in den Beziehungen Wassergehalt (θ) zu Saugspannung (ψ) und ψ zur hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert) der Effekt der Hysterese stark ausgeprägt sein muss. Die theoretischen Überlegungen dazu werden ausführlich hergeleitet und dargestellt. Die gewonnenen theoretischen Erkenntnisse werden anhand von experimentell gewonnenen Daten belegt. Dabei wurden drei verschiedene poröse Materialien untersucht. Aussagen zur θ - k_f -Wert Beziehung werden nicht getroffen. Aus dem Kontext ist die Aussage gemäß II/1 ableitbar.

7. "Effect of hysteresis on the prediction of infiltration, redistribution and drainage of water in a layered soil", Dane, J.H., Wierenga, P.J., Journal of hydrology 25, 1975, S. 229-242 (43)

Verwendet werden die Materialien "Glendale clay loam" (Sand (0,05-2 mm) 38,8%, Schluff (0,002-0,05 mm) 29,8% und Ton (<0,002 mm) 31,4%) und "River sand" (Sand (0,05-2 mm) 95,6%, Schluff (0,002-0,05 mm) 2,4% und Ton (<0,002 mm) 2,0%). Festgestellt wurde, dass in der Beziehung hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert) zu Wassergehalt (θ) ein Hystereseeffekt sichtbar ist, der bei River Sand nur sehr gering ausgeprägt ist, bei "Glendale clay loam" stärker (Bild 6 und Bild 7). Abschließend kommen die Autoren zu der Erkenntnis, dass...*"Infiltration was accurately predicted using the main wetting curves. However, redistribution and drainage were better predicted when hysteresis was taken into account."*

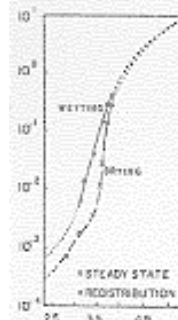


Bild 6

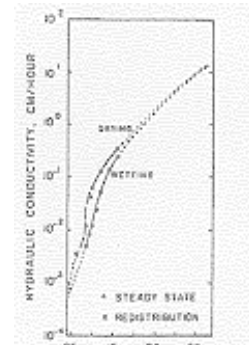


Bild 7

8. "The hysteresis in the relationship between hydraulic conductivity and soil water content", Poulouvalis, A., Tzimas, E., Soil science 120, 1975, S. 327-331 (161)

Es wird folgendes ausgeführt: „...the relationship between the hydraulic conductivity and the water content of a porous body were performed on two inert porous materials packed in long columns....the relationship is hysteretic....results in a closed hysteretic loop. ...It is found that the distribution function for the conductivity elements may be considered as independent of the water content.... The hysteretic paths calculated by means of these diagrams show satisfactory agreement with the experimental paths.

Anhang 10.4.

Literaturverzeichnis

- 1 Ackermann, M., „Hydrogeologische Systemanalyse und Grundwasserhaushalt des Weiherbach-Einzugsgebietes“, Schriftenreihe AGK 53, Dissertation Uni Karlsruhe 1998, (98 DA 221)
- 2 Arndt, M., Ditter, P., Rödel, A., Schumüller, S., „Kontrollierbare Oberflächenabdeckung für die Altablagerung Bemerode“, Müll u. Abfall 1999, Heft 6, Seite 345-362
- 3 Arya, L.M., Leij, F.J., Shouse, P.J., Genuchten, M.Th. van, „Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data“, Soil science society american journal 63, 1999, Seite 510-519
- 4 Arya, L.M., Leij, F.J., Shouse, P.J., Genuchten, M.Th. van, „Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution“, Soil science society american journal 63, 1999, Seite 1063-1070
- 5 Baake, R., „Zukünftige Siedlungsabfallentsorgung in Deutschland“, Rede des Staatssekretärs anlässlich der Mitgliederversammlung der VKE im VKU, Berlin, 10.02.2000
- 6 Bärlund, I., „Simulation des Transportes und der Transformationen von Herbiziden in der ungesättigten Zone des Bodens“, „Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft Nr. 63, 1998 (98 DA 205)
- 7 Ballestro, T.P., McHugh, S.A., Kinner, N.E., „Monitoring of immiscible contaminants in the vadose zone“, in Nielsen, Johnson, „Groundwater and vadose zone monitoring“, S. 25-33, ASTM-STP 1053 (91A 2704)
- 8 BAM, Stand der BAM-Zulassungen für Kunststoffdichtungsbahnen in Kombinationsabdichtungen, Müll & Abfall 1993, Heft 4, (ZE 791)
- 9 BAM, Entwurf: Anforderungen an Dichtungskontrollsysteme in Oberflächenabdichtungen von Deponien, Stand 15.02.2000 und endgültige Fassung, Januar 2001
- 10 Batters, T.W.J., DiCarlo, D.A., Steenhuis, T.S., Parlange, J.-Y., „Soil water content dependent wetting front characteristics in sands“, Journal of hydrology 231-232, 2000, Seite 244-254
- 11 Beese, F., van der Ploeg, R.R., „Influence of hysteresis on moisture flow in a undisturbed soil monolith“, Soil science society american journal 40, 1976, Seite 480-484
- 12 Belz, S., „Nutzung von Landsat Thematic Mapper Daten zur Bestimmung hydrologischer Parameter“, Inst. f. Wasserwirtschaft und Kulturbau Universität Karlsruhe, Dissertation 1999
- 13 Berger, K., „Weiterentwickeltes HELP-Modell 3.50D zur Simulation des Wasserhaushalts von Deponieabdichtungssystemen verfügbar“, Müll u. Abfall 8/2001, Seite 469-472
- 14 Berger, K., „Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung des HELP-Modells“, Müll & Abfall, Heft 2, 2000, S. 65-76
- 15 Berger, K., „Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des WHH...“, BMB+F-Schlussbericht, 1998, (99 A 1332)
- 16 Berger, K., Schneider, W., Miehlich, G., „Validierung des HELP-Modells zur Wasserhaushaltssimulation von Oberflächenabdichtungssystemen“, Wasser und Boden Heft 10, 1999, Seite 20 bis 25 (ZE 791)
- 17 Bergfeld, B., „Lösungs- und Transportprozesse in der ungesättigten Bodenwasserzone...“, Karlsruher geochemische Hefte, Nr. 4, 1994 (94DA 119)
- 18 Bieberstein, A., „Leckageortung bei geotechnischen Dichtungen mittels elektrischem Potentialverfahren“, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsbau Nr. 148, Uni-Karlsruhe 1999 (2000 DA 60)
- 19 Bloemen, G.W., „Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter“, Zeitung für Pflanzenernährung und Bodenkunde 143, 1980, Seite 581-605
- 20 Bohleber, Andreas, „Quantifizierung der Bodenwasserbewegung unter kombiniertem Einsatz von Neutronen- und Gamma-Gamma-Sonde“, Schriftenreihe AGK 18, Dissertation Uni Karlsruhe 1992, (92 DA 206)
- 21 Bohne, K., Zacharias, S., Wessolek, G., „Prüfung von drei Verfahren zur Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit ungesättigter Böden aus Wasserretentionsdaten oder aus der Bodenart“, Journal of plant nutrition and soil science 163, 2000, Heft 1, Seite 7-12 (Abstract aus Internet)
- 22 Bothmann, P., „Anforderungen an kontrollierbare Oberflächenabdichtungssysteme aus behördlicher Sicht“, Umweltpraxis Nr. 9/2001, Seite 18-20
- 23 Brandelik, A., Hübner, C., „Distinguished Problems and Sensors in Soil and Snow Aquametrie“, in Sensors-Update, Vol. 7, Seite 317-340, Edited by Baltes, Göpel, Hesse, Wileyvch 2000, ISBN 1432-2404
- 24 Brandelik, A., Hübner, C., „Long-term monitoring of clay-type barrier materials“, Sardinia 13.10.-17.10.1997, 6. international landfill symposium, Seite 85-91

- 25 Brandelik, A., Hübner, C., „Moisture monitoring with subsurface transmission line“, Vortrag bei der Tagung „Conference on subsurface sensors and applications“, Denver, 07.1999
- 26 Brandelik, A., Förderantrag bei BW-PLUS ab dem 04.2000
- 27 Brandelik, A., BW-Plus-Statusseminar, 1998, „Ausarbeitung und praktische Demonstration eines Meßsystems für die großflächige und langzeitige Kontrolle der Dichtheit von Mülldeponien“, 11 Seiten
- 28 Breh, W., Hötzl, H. „Wasserhaushaltsbetrachtungen in einem alternativen Oberflächenabdichtungssystem....“, Kurzbeschreibung des Forschungsvorhabens im Internet
- 29 Bronstert, A., „Erstellung eines Hangmodells“, Beitrag in Plate „Weiherbach-Projekt“, Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft Nr. 41, 1992 (93 A 1277)
- 30 Bronstert, A., „Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen“, Mitteilungen IHW 46, Dissertation Uni Karlsruhe 1994, (96 A 541)
- 31 Bronstert, A., Merkel, U., Zischak, R., „Strömungsverhältnisse im Hangbereich einer Deponie-Oberflächenabdichtung“, Wasser & Boden, 48. Jahrgang 1996, Heft 12, S. 38-54
- 32 Bronstert, A., Plate, E.J., „Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments“, Journal of Hydrology 198, 1997, Seite 177-195 (Abstract aus Internet)
- 32a Sanierung der Mülldeponie Karlsruhe-West, Broschüre der Stadt Karlsruhe
- 33 Bruggeman, G.A., „The reciprocity principle in flow through heterogeneous porous media“, in: Fundamentals of transport phenomena in porous media, Int. Ass. for hydraulic research, Elsevier publishing 1972, Seite 136-149 (72 A 1625)
- 34 Burkhardt, G., Egloffstein, Th., „Kontrollierbare Oberflächenabdichtungssysteme“, in Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe Nr. 37, 1995
- 35 Campbell, R.G., „Foundations of fluid flow theory“, Addison-Wesley Publishing Company 1973, (73 A 2221)
- 36 Campbell, G.S., „A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data“, Soil science Vol. 117, Nr. 6, 1974, S. 311-314
- 37 Cassel, D.K., Kachanowski, R.G., Topp, G.C., „Practical consideration for using a TDR cable tester“, Soil technology 7, 1994, Seite 113-126
- 38 Collis-George, N., Rosenthal, M.J., „Proposed outflow method for the determination of the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials“, Australian journal of soil research 4, 1966, Seite 165-180
- 39 Czurda, A., „Multimineralische Abdichtungen“, in Burkhardt, G., Egloffstein, Th., „Alternative Dichtungsmaterialien im Deponiebau und in der Altlastensicherung“, Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe Nr. 30, 1994, Seite 1-21 (94A)
- 40 Czurda, K.A., „Mineralische Oberflächenabdichtungen“, Schriftenreihe Angewandte Geologie Nr. 34, 1994, darin: Seite 103-123
- 41 Czurda, K.A., „Bindige mineralische Barrieren“, in Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe Nr. 37, 1995
- 42 Dagan, G., „Some aspects of heat and mass transfer in porous media“, in: Fundamentals of transport phenomena in porous media, Int. Ass. for hydraulic research, Elsevier publishing 1972, Seite 55-64 (72 A 1625)
- 43 Dane, J.H., Wierenga, P.J., „Effect of hysteresis on the prediction of infiltration, redistribution and drainage of water in a layered soil“, Journal of hydrology, 25 (1975), S. 229-242 (ZA 3822-1975)
- 44 David, I., „Grundwasserhydraulik - Strömungs- und Transportvorgänge“, Viehweg-Verlag Braunschweig 1998 (98 A 1552)
- 45 De Rooij, G.H., „Modelling fingered flow of water in soils owing to wetting front instability: a review“, Journal of hydrology 231-232, 2000, Seite 277-294
- 46 Diersch, H.-J.G., „Modellierung ungesättigter Strömungs- und Transportprozesse mit FEFLOW 4.7“, Internet Juli 2000
- 47 Disse, M., „Untersuchung zur Struktur der räumlichen Variabilität der Infiltration in einem kleinen Einzugsgebiet“, Mitteilungen IHW 41, S. 111-129, Uni Karlsruhe 1992 (93 A 1277)
- 48 Dong Wang, Yates, S.R., Ernst, F.F., „Determining soil hydraulic properties using tension infiltrometers, TDR, and tensiometers“, Soil science society american journal 62, 1998, Seite 318-325
- 48a Dornstädter, J., „Neues Verfahren zur Überwachung von Oberflächenabdichtungen“, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Erich Schmidt Verlag, Band 122, 2001, Seite 151-162
- 49 Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA-Siedlungsabfall), vom 14.05.1993

- 50 Drnevich, V.P., Siddiqui, S.I., Lovell, J., Yi, Q., "Water content and density of soil insitu by the purdue TDR method", Civil engineering purdue university, 10 Seiten
- 51 Dunger, V., "Systembeschreibung des Modells BOWAHALD", Internet, Uni Freiberg, Lehrstuhl für Hydrologie
- 52 Durner, W., "Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure", Water resources research Vol. 30, Nr. 2, 02.1994, Seite 211-223
- 53 Durner, W., "Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit strukturierter Böden", Bayreuther bodenkundliche Berichte Band 20, 1991, ISSN 0931-6442 (Uni Dresden SLUB 95-8-4965 zell 6)
- 54 Egloffstein, Th., Burkhardt, G., "Ausführungsvarianten von Oberflächenabdichtungssystemen und Hinweise zu deren Auswahl", Schriftenreihe Angewandte Geologie Nr. 34, 1994, darin: Seite 59 ff.
- 55 Egloffstein, Th., Burkhardt, G., Heidrich, A., "Wasserhaushaltsbetrachtungen bei Oberflächenabdichtungen und – abdeckungen", in Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe Nr. 37, 1995
- 55a Egloffstein, Th., "Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien", Dissertation, 2000 (ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 3)
- 56 Elrick, D.E., Bowman, D.H., „Note on an improved apparatus for soil moisture flow measurements“, Soil science society America proceedings 28, 1964, Seite 450-453
- 57 Enderby, J.A., "The domain model of hysteresis: 1. Independent domains", Trans. faraday society 51, 1955, Seite 835-848
- 58 Engelmann, B., „Stand der Umsetzung bei Oberflächenabdichtungen in Deutschland“, 7. karlsruher Deponie Seminar 1997, aus: Herausgeber Egloffstein/Burkhardt, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd. 103, Erich Schmidt Verlag
- 59 Ernig, M., Collins, H.-J., "In-situ Messungen der Funktionsfähigkeit einer mineralischen Deponiebasisabdichtung", Müll u. Abfall 1999, Heft 10, Seite 621-625
- 60 Everett, D.H., Whitton, W.I., "A general approach to hysteresis: 1", Trans. faraday society 48, 1952, Seite 749-752
- 61 Everett, D.H., Smith, F.W., "A general approach to hysteresis: 2. development of the domain theory", Trans. faraday society 50, 1954, Seite 187-197
- 62 Everett, D.H., "A general approach to hysteresis: 3. a formal treatment of the independent domain model of hysteresis", Trans. faraday society 50, 1954, Seite 1077-1096
- 63 Feddes, R.A., Kabat, P., van Bakel, P.J.T., Bronswijk, J.J.B., Halbertsma, J., „Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone – state of the art“, Elsevier science publishers B.V., 1988, S. 69-111
- 64 Feddes, R.A., Menenti, M., Kabat, P., Bastiaanssen, W.G.M., "Is large-scale inverse modelling of unsaturated flow with areal average evaporation and surface soil moisture as estimated from remote sensing feasible?", Journal of hydrology Nr 143, 1993, Seite 145-152 (ZA 3822-143/1-2)
- 65 Fiedler, F., Kolle, O., „Messung und numerische Simulation der Energie- und Feuchtebilanz der Bodenoberfläche“, Mitteilungen IHW 41, S. 131-156, Uni Karlsruhe 1992 (93 A 1277) dto. in Plate, Schlussbericht Weiherbachprojekt 1998 (2000 E 175)
- 66 Gartung, E., Neff, H.K., "Empfehlungen des Arbeitskreises Geotechnik der Deponiebauwerke der DGGT", Bautechnik 77 (2000), Heft 9, Seite 615-640
- 67 Gartung, E., Neff, H.K., "Empfehlungen des Arbeitskreises Geotechnik der Deponiebauwerke der DGGT", Bautechnik 76 (1999), Heft 9, Seite 723-746
- 68 Gartung, E., Neff, H.K., „E2-30 – Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien (Entwurf)“, Bautechnik 75, Heft 9, 1998, S. 616-626
- 69 Gehrke, H.H., Genuchten, M.Th. van, „A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media“, Water resources research Vol. 29, Nr. 2, 02.1993, Seite 305-319
- 70 Gemeinsamer Standpunkt (EG) Nr. 49/98 vom 04.06.1998, EU-TASi
- 71 Genuchten, M.Th. van, „A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils“, Soil science society American journal, Nr. 44, 1980, S. 892-898, (ZE 4752)
- 72 Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen und die Behandlung von Altlasten in Baden-Württemberg, LAbfG, vom 15.10.96, zuletzt geändert am 18.10.99
- 73 Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, BImSchG
- 74 Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen, KrW- u. Abf. G

- 75 Gottheil, K.-M., Brauns, J., „Thermische Einflüsse auf die Dichtwirkung von Kombinationsabdichtungen, Messungen an einem Testfeld“, BMBF-Schlußbericht, Teilvorhaben 23, 1995, (96 E 200)
- 76 Green, R.E., Hanks, R.J., Larson, W.E. „Estimates of field infiltration by numerical solution of the moisture flow equation“, Soil science society America proceedings 28, 1964, Seite 15-19
- 77 Halm, D., Gaiser, T., Stahr, K., „Beeinflusst Magnetit Wassergehaltsmessungen mit der TDR?“, Journal of plant nutrition and soil science 162, 1999, Heft 6, Seite 661-665 (Abstract aus Internet)
- 78 Hartge, K.H., „Einführung in die Bodenphysik“, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1978 (78A 931)
- 79 Hartge, K. H., Horn, R., „Die physikalisch Untersuchung von Böden“, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 2. Auflage, 1989 (71A 1442/2)
- 80 Hartmann, G., Disse, M., „Experimentelle Bestimmung der Hysterese der pF-Kurve und ihr Einfluss auf die Bodenwassermodellierung“, Wasser und Boden Heft 2, 1997, Seite 31 bis 37
- 81 Haude, W., „Über die Verwendung verschiedener Klimafaktoren zur Berechnung der potentiellen Evaporation und Evapotranspiration“, Meteorologische Rundschau 11, 1958, S. 96-99
- 82 Hayes, J.P., Tight, D.C., Applying electrical resistance blocks for unsaturated monitoring at arid sites, „Handbook of vadose zone characterization & monitoring“, darin: Seite 387/399
- 83 Heimovaara, T.J., Bouten, W., Verstraten, J.M., „Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms, 2, A four-component complex dielectric mixing model for soils“, Water resources research Nr. 30 (2), 1994, Seite 201-210
- 84 Heimovaara, T.J., „Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms, 1, Measurement of the complex dielectric permittivity of soils“, Water resources research Nr. 30 (2), 1994, Seite 189-200
- 85 Heimovaara, T.J., Bouten, W., „Computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents“, Water resources research Nr. 26 (10), 1990, Seite 2311-2316
- 86 Henigin, P., „Schneesmelze und Wasserabgabe aus der Schneedecke hinsichtlich des Hochwasserabflusses“, Diplomarbeit am Institut für konstruktiven Wasserbau der Uni-Karlsruhe, 1977, unveröffentlicht
- 86a Henken-Mellies, U., „Langzeitverhalten von Dränmatten und Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen – Ergebnis eines Testfeldes...“, Vortrag während der 18. Fachtagung „Die sichere Deponie“, 14.-15.02.2002 in Würzburg
- 87 Hillel, D., „Fundamentals of soil physics“, Academic press Orlando 1980
- 88 Hillel, D., „Applications of soil physics“, Academic press Orlando 1980 (87 A 10)
- 89 Hötzl, H., et. al., „Transport bei inhomogenen Sickerwasserbewegungen“, Beitrag in Plate „Weiherbach-Projekt“, Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft Nr. 41, 1992 (93 A 1277)
- 90 Hötzl, H., Zischak, R., Breh, W., „Messtechnische Überwachung des Testfeld-Lysimeters“, Lehrstuhl für Angewandte Geologie Universität Karlsruhe, 1993/1994, 1997, 1998, 1999
- 91 Hogarth, W.L., Hopmans, J., Parlange, J.-Y., Haverkamp, R., „Application of a simple soil-water hysteresis model“, Journal of hydrology 98, 1988, Seite 21-29
- 92 Hollenbeck, K.J., Jensen, K.H., „Maximum-likelihood estimation of unsaturated hydraulic parameters“, Journal of hydrology 210, 1998, Seite 192-205
- 93 Holzlöhner, U., Schossig, W., Wuttke, W., Ziegler, F., „Langzeitverhalten von Erdstoffschichten in Deponiebasisabdichtungen, Feuchtehaushalt unter Temperatureinwirkung“, BMBF-Verbundvorhaben „Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen“, Teilvorhaben 20, BAM-Berlin
- 94 Horn, A., „In-situ-Dichtigkeitsprüfung von Deponie-Flächendichtungen“, Bautechnik 66, 1989, Seite 16/18 und Bautechnik 76 1999, Heft 9, S. 745-746
- 95 Hude, N. van der, Jelinek, D., Kämpf, M., „Kapillarsperrensysteme für die Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten“, Schriftenreihe Angewandte Geologie Nr. 34, 1994, darin: Seite 125-137
- 96 Hudson, D.B., Wierenga, P.J., Hills, R.G., „Unsaturated hydraulic properties from upward flow into soil cores“, Soil science society american journal 60, 1996, Seite 388-396
- 97 Hübner, C., „Entwicklung hochfrequenter Messverfahren zur Boden- und Schneefeuchtebestimmung“, Dissertation am IMK des FZK, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6329, Juli 1999
- 98 Hübner, C., „Near surface moisture sensing“, Bericht 1999
- 99 Husmann, M., „Inhomogener Sickerwassertransport in der ungesättigten Zone des Weiherbach-Gebietes“, Schriftenreihe angewandte Geologie Nr. 43, Uni-Karlsruhe 1996 (96 DA 184)

- 100 IAAG, Wohnlich, S., Ankündigung des XXXI. Congress 2001 „New approaches to characterizing groundwater flow“, Internet am 10.10.2000, dazu Artikel: „Kapillarsperren als Deponieoberflächenabdichtungen“
- 101 IAAG, Wohnlich, S., Barth, C., Brühl, S., „Demonstration des Grundwasserschutzes bei Altablagerungen – Beispiel Deponie Heinersgrund/Bayreuth“, Artikel aus dem Internet am 20.10.2000, dazu Wohnlich, S., Barth, C., „Proof of effectiveness of a capillary barrier as surface sealing of a sanitary landfill“, Wohnlich, S., Balz, K., Barth, C., „Einzelfallnachweis für alternative Oberflächenabdichtungen am Beispiel der Kapillarsperre“
- 102 Iwata, S., Toshio, T., Warenkin, B.P., „Soil-water interactions, mechanics and applications“, Dekker-Verlag USA (94 A 4487(2))
- 103 Jax, P., „Kontrollierbare und reparierbare Deponieabdichtungen – das LEOS/KRAU-System“, Schriftenreihe Angewandte Geologie Nr. 34, 1994, darin: Seite 243-276
- 104 Jentsch, G., „Bilanzierung des Stoff- und Schadstoffeintrags in das Grundwasser unter besonderer Berücksichtigung der ungesättigten Zone“, Schriftenreihe Angewandte Geologie Nr. 17, 1992 (92DA 190)
- 105 Kämpf, M., Holfelder, T., Montenegro, H., „Bemessungskonzept für Kapillarsperrensysteme“, Internet, Karlsruher Beitrag 1998
- 106 Kausch, J., Iliesiu, A., „Einsatz des HELP-Modells für eine Deponie“, Müll & Abfall, Heft 4, 1998, S. 243-245
- 107 Kaleris, V., „Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebene Grundwassermodellen“, Institut für Wasserbau der Uni-Stuttgart Nr. 62, 1986 (ZA 6004-62)
- 108 Kirda, C., Nielsen, D.R., Biggar, J.W., „The combined effects of infiltration and redistribution on leaching“, Soil science 1974, Vol. 117, Nr. 6, Seite 323-330
- 109 Klute, A., Whisler, F.D., Scott, E.J., „Soil water diffusivity and hysteresis data from radial flow pressure cells“, Soil science society America proceedings 28, 1964, Seite 160-164 (ZE 4752-28.1964)
- 110 Kosciankowski, U., „Untersuchung zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit einer neuartigen Bodenfeuchte-Bodendichtesonde...“, Lehrstuhl f. angew. Geologie der Universität Karlsruhe, Diplomarbeit 09.1995
- 111 Kraemer, C.A., Hankins, J.B., Mohrbacher, C.J., „Selection of single-well hydraulic test methods for monitoring wells“, in Nielsen, Johnson, „Groundwater and vadose zone monitoring“, S. 125-137, ASTM-STP 1053 (91A 2704)
- 112 Kramer, J.H., Cullen, S.J., Everett, L.G., „Vadose Zone Monitoring with the neutron moisture probe“, „Handbook of vadose zone characterization & monitoring“, darin: Seite 291/309
- 113 Kutílek, M., „Non-darcian flow of water in soils – laminar region“, in: Fundamentals of transport phenomena in porous media, Int. Ass. for hydraulic research, Elsevier publishing 1972, Seite 327-340 (72 A 1625)
- 114 Kretzer, L., Ruiz-Rodriguez, E., „Tropfinfiltrimeter für befestigte und unbefestigte Flächen“, Wasser & Boden, 1992, Heft 12, Seite 805-807
- 115 LAGA-Arbeitsgruppe „Stilllegung und Nachsorge von Deponien“
- 115b LAGA-Arbeitsgruppe „Deponie-Merkblatt“, 1979
- 116 Lehmann, W., „Anwendung geostatistischer Verfahren auf die Bodenfeuchte in ländlichen Einzugsgebieten“, Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft Nr. 52, 1995 (95 DA 203)
- 117 LfU-Baden-Württemberg, „Grundwasserhaushalt und Hydraulik: Grundlagen“, Quelle: Internet im Juli 2000
- 118 Maidment, D.R., (Herausgeber) „Handbook of Hydrology“, McGraw-Hill Inc., New York 1992, Auszüge aus einzelnen Kapiteln, wobei die Autoren nicht speziell genannt werden (93 A 594)
- 119 Maile, A., Bidlingmaier, W., „Lysimeterversuche zu Abdichtungssystemen von Landschaftskörpern in NRW“, in: Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe Nr. 37, 1995
- 120 Mallants, D., Vanclooster, M., Toride, N., Vanderborght, J., Genuchten, M.Th. van, Feyen, J., „Comparison of three methods to calibrate TDR for monitoring solute movement in undisturbed soil“, Soil science society american journal 60, 1996, Seite 747-754
- 121 Mallants, D., Jacques, D., Tseng, P.-H., van Genuchten, M.Th., Feyen, J., „Comparison of three hydraulic property measurement methods“, Journal of hydrology 199, 1997, Seite 295-318 (Abstract)
- 122 Mallants, D., Tseng, P.-H., Vanclooster, M., Feyen, J., „Predicted drainage for a sandy loam soil: sensitivity to hydraulic property description“, Journal of hydrology 206, 1998, Seite 136-148
- 123 Markwardt, N., Wohnlich, S., „Verbesserte Simulationsmodelle zur Berechnung des Wasserhaushalts von Deponieoberflächenabdichtungen“, Entsorgungspraxis 1992, Heft 6, S. 420-424
- 124 Markwardt, N., „Modifizierung und Verifizierung des HELP-Modells anhand von Lysimetermessungen“, Müll & Abfall, Heft 8, 1989, S. 415-420

- 125 Matthes, G., Ubell, K., "Lehrbuch der Hydrogeologie-allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt", Gebrüder Bornträger, Berlin 1983
- 126 Mattheß, G., Ubell, K., „Allg. Hydrogeologie GW-Haushalt“, Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 1, 2. Auflage, Gebr. Bornträger Verlag, Berlin-Stuttgart 1990, 498 Seiten, (74 A 708-1)
- 127 Maurer, T., „Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten“, Mitteilungen des IHW 61, Dissertation Uni Karlsruhe 1997, (97 DA 285)
- 128 Melchior, S., Vielhaber, B., Berger, K., Miehlich, G., „Das Austrocknungsverhalten von mineralischen Oberflächenabdichtungen“, Schriftenreihe Angewandte Geologie Nr. 34, 1994, darin: Seite 223-235
- 129 Melchior, S., „Oberflächenabdichtung der Deponie Georgswerder“, Posterpräsentation Fachtagung Altlastensanierung, Hamburg 27./28.09.1999
- 130 Merkel, U., „...zur Untersuchung der Bodenwasserdynamik einer Deponie-Oberflächenabdichtung...“, Inst. f. Hydrologie u. Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Diplomarbeit 01.95
- 131 Merz, B., „Modellierung des Niederschlag-Abfluss-Vorgangs in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität“, Mitteilungen IHW 56, Dissertation Uni Karlsruhe 1996 (96 DA 209)
- 132 Milly, P.C.D., „Advances in modelling of water in the unsaturated zone“, Transp. Porous Media, 3, 1988, Seite 491-514
- 133 Mitchell, R.J., Mayer, A.S., „The significance of hysteresis in modelling solute transport in unsaturated porous media“, Soil science society american journal 62, 1998, Seite 1506-1512
- 134 Montenegro, H., Herrling, B., „Ermittlung bodenhydraulischer Parameter und Modellierung der Sickerwasserbewegung“, Beitrag in Plate „Weiherbach-Projekt“, Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft Nr. 41, 1992 (93 A 1277)
- 135 Montenegro, Hector, „Parameterbestimmung und Modellierung der Wasserbewegung in heterogenen Böden“, Fortschrittberichte VDI, Reihe 15, Nr. 134, 1995, ISBN 3-18-313415-2 (95 DA 44)
- 136 Mualem, Y., „A conceptual model of hysteresis“, Water resources research 10, 1974, Seite 514-520
- 137 Mualem, Y., „A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media“, Water resources research, Vol. 12, Nr. 3, 1976, S. 513-522, (ZE 5423)
- 138 Mualem, Y., „Hysteretical models for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media“, Water resources research, Vol. 12, Nr. 3, 1976, S. 1248-1254, (ZE 5423)
- 139 Mualem, Y., „A model dependent domain theory of hysteresis“, Soil science 137, 1984, Seite 283-289
- 140 Mualem, Y., „Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas“, in: Klute, A., (Hrsg.): „Methods of soil analyses, Part 1, Physical and mineralogical methods“, 2. Auflage 1986, Agronomy Nr. 9, Kap. 31, ISBN 0-89118-088-5
- 141 Mualem, Y., Friedman, S.P., „Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil“, Water resources research Nr. 27 (10), 1991, Seite 2771-2777
- 142 Müller, W., Büttgenbach, B., Tatzky-Gerth, R., August, H., „Stofftransport in Deponieabdichtungssystemen, Teil 2: Permeation in der Kombinationsdichtung“, Bautechnik 74 (1997), Seite 331-344
- 143 Müller, W., „Stofftransport in Deponieabdichtungssystemen – Teil 3: Auswirkungen von Fehlstellen in der Dichtungsbahn, ein Überblick“, Bautechnik 76 (1999), Heft 9, Seite 757-768
- 144 Musters, P.A.D., Bouten, W., „A method for identifying optimum strategies of measuring soil water content for calibrating a root water uptake model“, Journal of hydrology 227, 2000, Seite 273-286
- 145 Narr, J., Wygal, R.J., Henderson, J.H., „Imbibition and relative permeability in unconsolidated porous media“, American institute of mineralogical and meteorological engineering trans. (Pet. div.) 225, 1962, Seite 12-17
- 146 Neusch, T., „Multi-frequency and multi-Polarization synthetic aperture data for hydrological parameter modelling“, Inst. f. Wasserwirtschaft und Kulturbau Universität Karlsruhe, Dissertation 1999
- 147 Nielsen, D.M., „Practical Handbook of Groundwater Monitoring“, Lewis Publishers, Inc., 1991, (94 A 4476)
- 148 Nielsen, D.R., Biggar, J.W., „Measuring capillary conductivity“, Soil science 92, 1961, Seite 192-193
- 149 Nielsen, D.R., Genuchten, M.Th. van, Biggar, J.W., „Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone“, Water resources research Vol. 22, Nr. 9, 08.1986, Seite 89S-108S
- 150 Pan, L., Warrick, A.W., Wierenga, P.J., „Downward water flow through sloping layers in the vadose zone: time-dependence and effect of slope length“, Journal of Hydrology 199, 1997, Seite 36-52

- 151 Parlange, J.-Y., "Capillary hysteresis and the relationship between drying and wetting curves", *Water resources research* 12, 1976, Seite 224-228
- 152 Pavlakis, G., Barden, L., "Hysteresis in the moisture characteristics of clay soil", *Journal of soil science* 23, 1972, Seite 350-361
- 153 Philip, J.R., "Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous materials", *Journal of geophysical research* 69, 1964, Seite 1553-1562 (ZA 4416-69,7/12.1964)
- 154 Philip, J.R., Knight, J.H., "On solving the unsaturated flow equation: 3. new quasi-analytical technique", *Soil science* Vol. 117, Nr.1, 1974, S. 1-13, (ZE 3775)
- 155 Plate, E.J., Schlussbericht zur ersten Phase des Weiherbachprojektes, Mitteilungen IHW 41, Uni Karlsruhe 1992
- 156 Plate, E.J., „Zwischenbericht 1996 Weiherbachprojekt“, Uni Karlsruhe 1996 (2000 E 175), Auszug: Themengruppe Geoökologie (Schäfer, D., „Inverse Identifizierung bodenhydraulischer Eigenschaften“, Schmaland, G., „Makroporen“, Maurer, Th., „Modellierung des Wassertransports: Gebietsmodell CATFLOW“)
- 157 Plate, E., „BMBF-Verbundprojekt Weiherbach“, Grundlagendaten und Vorgehensweisen aus den Internet (Stand 20. September 2000)
- 158 Poulouvasilis, A., "The effect of hysteresis of pore water on the hydraulic conductivity", *Journal of soil science* 20, 1969, Seite 52-56
- 159 Poulouvasilis, A., "The hysteresis of pore water in granular porous bodies", *Soil science* 109, 1970, Seite 5-12
- 160 Poulouvasilis, A., Tzimas, E., "The hysteresis in the relationship between hydraulic conductivity and suction", *Soil science* Vol. 117, Nr. 5, 1974, S. 250-255
- 161 Poulouvasilis, A., Tzimas, E., "The hysteresis in the relationship between hydraulic conductivity and soil water content", *Soil science* 120, 1975, Seite 327-331
- 162 Ramke, H.H., Brauns, J., „Einfluss von Feuchteänderungen auf das Verhalten von feinkörnigen Böden bei Teilsättigung“, Bericht zum DFG-Forschungsvorhaben Nr. 437/15-1, 1999
- 163 Rasmussen, T.C., Rhodes, S.C., Energy-related methods: Psychrometers, „Handbook of vadose zone characterization & monitoring“, darin: Seite 329/341
- 164 Reece, C.F., "Simple method for determining cable length resistance in TDR systems", *Soil science society american journal* 62, 1998, Seite 314-317
- 165 Ren, T., Noborio, K., Horton, R., "Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a Thermo-TDR probe", *Soil science society american journal* 63, 1999, Seite 450-457
- 166 Reuter, E., Lückewille, W., „Anwendungen des HELP-Programms beim Entwurf von Oberflächenabdichtungen“, Fortschritte der Deponietechnik 1991, E.-Schmidt-Verlag, Berlin 1992, Seite 141-173
- 167 Reuter, E., Lückewille, W., „Wasserhaushaltsberechnung für die Oberflächenabdichtung von Deponien mit Hilfe des Simulationsmodells HELP“, *Wasser & Boden* 47, Heft 4, 1995, S. 8-11
- 168 Richards, L. A., "Capillary conduction of liquids through porous mediums", *Physics* Vol. 1, 11/1931, Seite 318-333
- 169 Ritsema, C.J., Dekker, L.W., "Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modelling implications", *Journal of hydrology* 231-232, 2000, Seite 308-319
- 170 Roder, U., Arndt, M., „Deponieoberflächenabdeckungen (-dichtungen) als Betreibermodell“, *Müll u. Abfall* 1999, Heft 7, Seite 419-424
- 171 Rödel, A., „Das System Geologger“, *Schriftenreihe Angewandte Geologie* Nr. 34, 1994, darin: Seite 277-291
- 172 Rödel, A., Hahn, H., „Entwicklung eines Verfahrens zur Dichtheitsüberwachung und Leckortung an Deponiedichtungen“, 2. Arb.tagung BAM 1993, S. 209-216
- 173 Rödel, A., Hahn, H., Becker, I., „Entwicklung eines Verfahrens für die Dichtheitsüberwachung und Leckortung an Deponiedichtungen“, 1. Arb.tagung BAM 1991, S. 223-237
- 174 Roehl, K.E., „Experimentelle Untersuchungen zu Retardation und Bindungsformen von Schwermetallen in tonigen Deponiebarrieren“, *Schriftenreihe angewandte Geologie* Nr. 46, Uni-Karlsruhe 1997 (97 DA 63)
- 175 Rook, R., Melchior, S., Miehlich, G., „Die Time-Domain-Reflectometry (TDR) für die Wassergehaltsmessung im Boden“, *Wasser & Boden*, 1993/4, S. 235-239
- 176 Rosenberg, M., "9. Braunschweiger Deponieseminar 2000, vertikale und horizontale Abdichtungssysteme", *Bautechnik* 77 (2000), Heft 5, Seite 371
- 177 Ross, P.J., "A method of deriving soil hydraulic properties from field water contents for application in water balance studies", *Journal of hydrology* Nr. 144, 1993, Seite 143-153 (ZA 3822-143/1-2)

- 178 Roth, A., „Der Wasserhaushalt in Oberflächenabdeckungen“, in „Sanierung von Altlasten“, Jesberger, Balkema-Rotterdam 1995, S. 171-187
- 179 Roth, J., & Partner, AGK Uni-Karlsruhe, „Dimensionierung des Oberen Kies-Flächenfilters der Oberflächenabdichtung.....-numerische Modellierung“, Gutachten 1998, 9 u. 10 Seiten mit Anlagen
- 180 Rowe, R.K., Quigley, R.M., Booker, J.R., „Clayey barrier systems for waste disposal facilities“, E. & FN. Spon, an imprint of Chapman & Hall, (95E 623)
- 181 Ruan, H., Illangasekare, T.H., „Estimation of relative hydraulic conductivity of sandy soils based on a sheet flow model“, Journal of hydrology 219, 1999, Seite 83-93 (Abstract)
- 182 Saathoff, V., „Geosynthetische Dränsysteme in Oberflächendichtungssystemen“ in Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe Nr. 37, 1995
- 183 Schaap, M.G., Leij, F.J., „Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model“, Soil science society american journal 64, 2000, Seite 843-851
- 184 Scheffer, F., Schachtschabel, P., „Lehrbuch der Bodenkunde“, 10. durchgesehene Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (Freihandleihstelle)
- 185 Scheffer, F., Scheffer/Schachtschabel – Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage, Enke Verlag Stuttgart 1992
- 186 Schiffler, G.R., „Experimentelle Erfassung und Modellierung der Infiltration stärkerer Niederschläge unter realen Feldbedingungen“, Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft Nr. 40, 1992 (96 A 500)
- 187 Schlaeger, S., Hübner, C., Weber, K., „Moisture profile determination with TDR“, Sonderdruck, Seite 341-346
- 187a Schlaeger, S., „Inversion von TDR-Messungen zur Rekonstruktion räumlich verteilter bodenphysikalischer Parameter“, Dissertation Universität-Karlsruhe, 2002
- 188 Schramm, M., „Bestimmung des Bodenabtrags und des Stoffabtrags im Vorfluter eines kleinen Einzugsgebiets“, Beitrag in Plate „Weiherbach-Projekt“, Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft Nr. 41, 1992 (93 A 1277)
- 189 Schosser, T., „Untersuchungen zur Optimierung eines in-situ-Monitoring-Systems für Ton-Dichtungsmaterialien von Deponien“, Fragment einer Diplomarbeit an der Uni-Darmstadt, 1999
- 190 Schuhmann, R., „Mineralische Abdichtungen auf geneigten Flächen – Verlust der Dichteigenschaft durch Austrocknung“, Projektskizze 09.1996 für AGK
- 191 Schultze, B., Zurmühl, T., Durner, W., „Untersuchung der Hysterese hydraulischer Funktionen von Böden mittels inverser Simulation“, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, 80, 1996, Seite 319-322
- 192 Schwarzmüller, H., „Konzeption zur Durchführung eines Tankversuches“, Vorentwurf 1994, 9 Seiten und 2 Anlagen
- 193 Schwarzmüller, H., „Deponieoberflächenabdichtungssysteme“, Vortrag im Rahmen des Vertieferseminars „zeitgemäße Deponietechnik“, Stuttgart 28.-29.03.1995, Seite 3-31
- 194 Schwarzmüller, H., „Oberflächenabdichtungssystem mineralische Abdichtung mit untenliegender Kapillarsperre auf der Hausmüll-Deponie Karlsruhe-West“, Vortrag Workshop Deponiebau, Stuttgart 01.96
- 195 Seher, W., „Messung des komplexen Dielektrizitätskoeffizienten zur Bestimmung der Bodenfeuchte mittels elektromagnetischer Verfahren“, Diplomarbeit am Geophysikalischen Institut 1998, Universität Karlsruhe, unveröffentlicht
- 196 Sheta, H., „Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten“, Institut für Wasserbau der Uni-Stuttgart Heft 100, 12.1999, ISBN 3-933761-03-4
- 197 Si, B., Kachanowski, R.G., Zhang, F., Parkin, G.W., Elrick, D.E., „Measurement of hydraulic properties during constant flux infiltration: field average“, Soil science society american journal 63, 1999, Seite 793-799
- 198 Sisson, J.B., Ferguson, A.H., Genuchten, M.Th. van, „Simple method for predicting drainage from field plots“, Soil science society American journal, Nr. 44, 1980, S. 1147-1152, (ZE 4752)
- 199 Smith, K.A., Mullins, C.E., „Soil analysis – physical methods“, Books in soils, plants, and the environment, 1994
- 200 Stacheder, M., „Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik“, Schriftenreihe Angewandte Geologie Universität Karlsruhe Nr. 40, 1996 (96 DA 84)
- 201 Stannard, D.I., „Tensiometers – theory, construction and use“, in Nielsen, Johnson, „Groundwater and vadose zone monitoring“, S. 34-51, ASTM-STP 1053 (91A 2704)
- 202 Staple, W.J., „Moisture tension, diffusivity, and conductivity of a loam soil during wetting and drying“, Canadian journal of soil science 45, 1965, Seite 78-86

- 203** Staple, W.J., "Infiltration and redistribution in vertical columns of loam soil", Soil science society America proceedings 30, 1966, Seite 553-558
- 204** Starr, G.C., Lowery, B., Cooley, E.T., "Soil water content determination using a network analyser and coaxial probe", Soil science society american journal 64, 2000, Seite 867-872
- 205** Stief, K., "Gedanken zur Zukunft der Abfalldeponie in Deutschland", Vortrag im Rahmen des Seminars „zeitgemäße Deponietechnik“, Stuttgart 2000
- 206** Stoffregen, H., Döll, P., Wessolek, G., Melchior, S., Vielhaber, B., Holzlöhner, U., Horn, R., Baumgartl, T., Gräsle, W., Bohne, K., Schmidt, M., „Rissgefährdung von Kombinationsdichtungen durch temperaturabhängige Austrocknung“, Müll u. Abfall 1999, Heft 1, Seite 29-35
- 207** Stolte, J., Freijer, J.I., Bouten, W., Dirksen, C., Halbertsma, J.M., Van Dam, J.C., Van den Berg, J.A., Veerman, G.J., Wösten, J.H.M., „Comparison of six methods to determine unsaturated soil hydraulic conductivity“, Soil science society american journal 58, 1994, Seite 1596-1603
- 208** Tamari, S., "Relations between pore-space and hydraulic properties in compacted beds of silty-loam aggregates", Soil technology 7, 1994, Seite 57-73
- 209** Tomer, M.D., Clothier, B.E., Vogeler, I., Green, S., "A dielectric-water content relationship for sandy volcanic soils in New Zealand", Soil science society american journal 63, 1999, Seite 777-781
- 210** Topp, G.C., "Soil water hysteresis measured in a sandy loam compared with the hysteresis domain model", Soil science society America proceedings 33, 1969, Seite 645-651
- 211** Topp, G.C., "Soil water hysteresis in silt loam and clay loam soils", Water resources research 7, 1971, Seite 914-920
- 212** Topp, G.C., "Soil water hysteresis: the domain model theory extended to pore interaction conditions", Soil science society american proceedings 35, 1971, Seite 219-225
- 213** Topp, G.C., Miller, E.E., "Hysteresis moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media", Soil science society America proceedings 30, 1966, Seite 156-162
- 214** Tzimas, E., "The measurement of soil water hysteretic relationships on a soil monolith", Journal of soil science 30, 1979, Seite 529-534
- 215** Upmeier, M., „Optimierung mineralischer Deponieabdichtungen durch natürliche Zeolithe und Aktivkohle“, Schriftenreihe Institut für Angewandte Geologie Uni-Karlsruhe Nr. 42, 1996 (96DA117)
- 216** „Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen“, Beschluss des Bundeskabinetts vom 31. Januar 2001, dazu den Entwurf vom September 2000 und den Beschluss des Bundesrates vom 21. Dezember 2000 (Drucksache 596/00) mit den geforderten Änderungen
- 217** Verruijt, A., „Stationary heat transport by plane groundwater movement in a thin or a thick layer“, in: Fundamentals of transport phenomena in porous media, Int. Ass. for hydraulic research, Elsevier publishing 1972, Seite 25-35 (72 A 1625)
- 218** Verruijt, A., Barends, F.B.J., "Flow and transport in porous media", A.A. Balkema/Rotterdam, 1981, proceedings of Euromech 143, Delft, 02.-04. September 1981
- 219** Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 4. BimSchV (genehm.-pfl. Anlagen)
- 220** Vogel, T., Gerke, H.H., Zhang, R., van Genuchten, M.Th., „Modelling flow and transport in a two-dimensional dual-permeability system with spatial variable hydraulic properties“, Journal of hydrology 238, 2000, Seite 78-89
- 221** Vogelsang, D., „Grundwasser“, Springer Verlag (98A 1909)
- 222** Walton, J., Rahman, M., Badu-Tweneboah, K., „Technical note, evaluation of the rate of leakage through composite liners“, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 123 (1997), Seite 534-539
- 223** Watson, K.K., Reginato, R.J., Jackson, R.D., "Soil water hysteresis in a field soil", Soil science society american proceedings 39, 1975, Seite 242-246
- 224** Watter, U., „Untersuchungen zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit des Oberflächenabdichtungssystems der Hausmüll-Deponie Karlsruhe-West“, Lehrstuhl f. angewandte Geologie der Universität Karlsruhe, Diplomarbeit 1994
- 225** Wehry, A., Orlescu, M., Mancia, M., „Determinari experimentale asupra corelatiei dintre umiditatea argilei de etansare si dimensiunile orificiilor accidentale produse in geomembranele acoperisurilor depozitelor de deseuri“, in „Ecotim 2000“, Lucrarile Simpozionului, Seite 187-192, dazu :Löcher entdecken in der KDB bei MD in der Oberflächenabdichtung mit TAUPE, Fragment und empirische Formel
- 226** Weiss, W., Roth, D., Mühlfriedel, F., Günther, R., Knoblauch, S., „Verifikation des HELP-Programms durch Messungen der Lysimeteranlage Großobingen“, Wasser & Boden 50, Heft 10, 1998, S. 51-56

- 227 White, I., Zegelin, S.J., "Electric and dielectric methods for monitoring soil-water content", in: Handbook of vadose zone characterization & monitoring, Seite 343/385
- 228 Whitmore, A.P., Heinen, M., "The effect of hysteresis on microbial activity in computer simulation models", Soil science society american journal 63, 1999, Seite 1101-1105
- 229 Williams, M.A., "Discussion of vadose zone monitoring with the neutron moisture probe", in: Handbook of vadose zone characterization & monitoring, Seite 311/317
- 230 Wohnlich, S., „Kapillarsperren – Versuche und Modellberechnungen“, Schriftenreihe Institut für Angewandte Geologie Uni-Karlsruhe Nr. 15, 1991 (92A5304)
- 231 Wohnlich, S., Barth, C., „Nachweis der Wirksamkeit einer Kapillarsperre als Deponieoberflächenabdichtung“, Projektbeschreibung E54 aus dem Internet (4 Seiten)
- 232 Xu, S., „Comments on integral method for estimating soil hydraulic properties“, und Antwort von Shao, M., Horton. R., Soil science society american journal 63, 1999, Heft1, Seite 253
- 233 Yeh, T.-C.J., Guzman-Guzman, A., "Tensiometry", in: Handbook of vadose zone characterization & monitoring, Seite 319-328
- 234 Youngs, E.G., "An infiltration method of measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", Soil science 97, 1964, Seite 307-311
- 235 Youngs, E.G., Leeds-Harrison, P.B., Elrick, D.E., "The hydraulic conductivity of low permeability wet soils used as landfill and capping material: analysis of pressure infiltrometer measurement", Soil technology 8, 1995, Seite 153-160
- 236 Yu, C., Warrick, A.W., Conklin, M.H., Young, M.H., Zreda, M., „Two- and three-parameter calibrations of time domain reflectometry for soil moisture measurement“, Water resources research Nr. 33 (10), 1997, Seite 2417-2421
- 237 Zehe, E., „Experimentelle Untersuchung und Modellierung des Stofftransports in der ungesättigten Bodenzone auf verschiedenen Skalen“, Uni Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieurwesen, (2000 DA 1)
- 238 Zehe, E., Maurer, T., „CATFLOW-A physically based and distributed hydrological model for continuous simulation of catchment water dynamics – user guide and program documentation“, 12. 1997
- 239 Zentralstelle für Abfallbeseitigung beim Bundesgesundheitsamt „Merkblatt M3 – Die geordnete Ablagerung (Deponie) fester und schlammiger Abfälle aus Siedlung und Industrie“, Bundesgesundheitsblatt, 12. Jahrgang, 1969, Nr. 22, Seite 362-370
- 240 Zhang, R., Genuchten, M.Th. van, „New models for unsaturated soil hydraulic properties“, Soil science 158, Nr. 2, 1994, Seite 77-85
- 241 Zhang, R., "Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer", Soil science society american journal 61, 1997, Seite 1024-1030
- 242 Zischak, R., „Alternatives Oberflächenabdichtungssystem – verstärkte mineralische Abdichtung mit untenliegender Kapillarsperre“, Schriftenreihe Angewandte Geologie Nr. 47, Uni-Karlsruhe 1997
- 243 Zuhse, L., „Einfluss einer temporären Abdeckung auf den Gas- und Wasserhaushalt einer Deponie“, Wasser & Boden 49, Heft 8, 1997, S. 11-16
- 244 Zuidema, P., „Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen“, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie & Glaziologie ETH Zürich, Nr. 79, 1985, (86 DA 1089)
- 245 N.N., "Die Müllabfuhr" und "Das Karlsruher Kernforschungszentrum", Auszüge, Klett-Verlag 1965
- 246 Talsma, T., „Hysteresis in two sands and an independent domain modell“, Water resources research 6, 1970, S. 964-970

10.5. Schlusswort und Dank

Die vorgelegte Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungszentrum Karlsruhe. Die grundlegenden Untersuchungen der Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone und die hydrologischen Randbedingungen ergaben eine sehr enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Franz Nestmann, nicht nur für die Übernahme des Referates. Er hat außerdem diese Arbeit fachlich begleitet und meine Forschungsaktivitäten unterstützt, wo immer ihm das möglich war.

Herrn Prof. Dr. Erich Plate danke ich für die konstruktiven Gespräche und die vielfältigen Anregungen. In gleicher Weise möchte ich Herrn Prof. Dr. Josef Brauns danken, der mir u.a. geholfen hat, den Blick für die wesentlichen bodenmechanischen Zusammenhänge zu schärfen. Herrn Prof. Dr. Rolf Nüesch danke ich für die vielen Tipps und für die Zeit, die er mir in teilweise unendlich langen Diskussionen geschenkt hat. Allen drei Professoren danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Ganz besonders danken möchte ich Herrn Dr. Alexander Brandelik, der mir die Möglichkeit geboten hat, die Grundlagen der Wasserbewegung im Boden und den Einsatz elektrophysikalischer Messmethoden im Rahmen eines vom Land Baden-Württemberg geförderten Projektes zu erforschen. In einer schon über ein Jahrzehnt dauernden, sehr fruchtbaren Zusammenarbeit konnten einige gemeinsame Projekte erfolgreich bearbeitet werden. Seine Geduld, mich in die „Geheimnisse“ der Elektrotechnik einzuführen, ist mir beispielhaft und Verpflichtung.

Weiter danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Franz Fiedler, der mich im Institut für Meteorologie und Klimaforschung im Forschungszentrum aufgenommen hat. Allen Kollegen, die mir bei der Durchführung der oft zermürenden Versuche behilflich waren, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Den Mitgliedern der fachübergreifenden Soil-Moisture-Gruppe an der Universität Karlsruhe danke ich für die sehr freundliche Aufnahme und die Unterstützung der Arbeit nicht nur mit fachlicher Kompetenz, sondern auch mit menschlicher Wärme. Stellvertretend für die zahlreichen „Motivatoren“ möchte ich Herrn Werner Rabl-Lasar namentlich nennen, der meinen Text Korrektur gelesen hat und mich doch einige Male wieder auf „den Pfad der Deutlichkeit“ zurückgeschupst hat.

Last, but not least, danke ich meiner Familie, die gerade in der letzten Phase der Fertigung der Arbeit einige Abstriche an meiner Präsenz machen musste. Ohne die Unterstützung meiner Frau und meiner Tochter wäre für mich, einen Dissertanten in „fortgeschrittenem“ Alter, das Projekt nicht machbar gewesen.

Rainer Schuhmann

10.6. Lebenslauf

Rainer Werner Schuhmann

geboren: 18. April 1955

Geburtsort: Karlsruhe

Familienstand: verheiratet seit 27. Juli 1979 mit
Renate Schuhmann
Tochter Stefanie (geb. 27. Dezember 1982)

Schulbildung: 1962 – 1966 Grundschule
1966 – 1974 Gymnasium
1974 Abschluss: Abitur

Studium: 1974 – 1979 Universität Karlsruhe
Bauingenieurwesen
06.08.1979 Abschluss: Diplom-Ingenieur

Beruf: 1979 Angestellter bei der LfU-Karlsruhe
1980 selbstständige Gutachtertätigkeit

1980 – 1982 Referendar beim Land Baden-Württemberg
1982 Abschluss: Regierungsbaumeister

1982 – 1983 Assessor beim Wasserwirtschaftsamt Freiburg

seit 1983 Stadt Karlsruhe (Tiefbauamt, Amt f. Abfallwirtsch.)
1983 Ernennung zum Baurat
1985 Ernennung zum Oberbaurat
1991 Ernennung zum Baudirektor

seit 2000 delegiert zum Forschungszentrum Karlsruhe
Institut für Meteorologie und Klimaforschung