

Kurzbeschreibung zum FuE-Projekt

Reg.-Nr.: 1136/01

Kurztitel: Geräteanordnung zur Feuchtemessung in salzbelasteten mineralischen Matrices

Laufzeit: 01.09.2001 – 30.06.2003

Name und Anschrift der Forschungsstelle

Kali-Umwelttechnik Sondershausen GmbH (K-UTECH)
Am Petersenschacht 7
99706 Sondershausen

Kurzfassung (Problemstellung, Ergebnis, Schlussfolgerungen/wirtschaftliche Bedeutung)

Das Vorhaben leitet sich aus der Gewährleistung optimaler Wuchsbedingungen für die Begrünung der Abdeckschichten und damit der biologischen Versiegelung von Altlasten, insbesondere der großen Kali-Rückstandshalden in Nordthüringen ab. Dabei spielt der Wassergehalt in den Schichten – üblicherweise als Feuchte bezeichnet – eine entscheidende Rolle.

Gegenstand des FuE-Vorhabens ist die Geräteentwicklung zur bprobungslosen Sofortmessung der Feuchte in verschiedenen Tiefen der Abdeckschichten. Dabei können in den Kulturboden-substraten erhöhte Leitfähigkeiten auftreten, die den Messvorgang beeinflussen.

Es wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- AP 1 Voruntersuchungen
- AP 2 Beschaffung und Aufbau Messtechnik
- AP 3 Klassifizierung Abfallarten
- AP 4 Modellprobenherstellung
- AP 5 Probenvermessung
- AP 6 Kalibrationsmodelle
- AP 7 Modelltest/-validierung
- AP 8 Feldversuchsanlage
- AP 9 Zusammenfassung und Dokumentation

Die Kostenplanung konnte vom Grundsatz her eingehalten werden. Die Zeitplanung wurde aufgrund der Modifizierung der Feldversuchsanordnung (Änderungsbescheid vom 11.10.2002) den neuen Gegebenheiten angepasst (geringfügige Verschiebungen in Bearbeitungszeitraum und Personaleinsatz).

Seitens des Bewilligungsempfängers ist einzuschätzen, dass der erreichte FuE-Stand den Erwartungen entspricht und der Mittelaufwand der Verhältnismäßigkeit entsprach.

Verbundene Industriepartner, Ergebnistransfer in kleinere und mittlere Unternehmen

Beratung und Kauf der Feldmesstechnik bei:

- Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH Dresden (UIT)

Durchführung der Feldversuche 1 und 2 auf der Kalirückstandshalde Bleicherode der:

- NDH-Entsorgungsbetriebe mbH (NDH-E)

Veröffentlichungen/Patente

-

Sondershausen, den 19.12.2003

Dr. Monika Schönau
Projektleiterin

Dr. Marx
Geschäftsführer

Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben:

„Entwicklung einer Geräteanordnung zur kontinuierlichen Feuchtemessung in salzbelasteten Böden sowie in aus Abfällen hergestellten Kulturbodensubstraten“

Reg.-Nr.: 1136/01

Kurztitel: Geräteanordnung zur Feuchtemessung in salzbelasteten mineralischen Matrices

Sondershausen, den 19.12.2003

Dr. Monika Schönau
Projektleiterin

Firmenstempel

Inhaltsverzeichnis

1	Gegenstand des FuE-Vorhabens	4
2	Ergebnisse im Berichtszeitraum	6
2.1	Arbeitspaket 1 - Voruntersuchungen	6
2.2	Arbeitspaket 2 – Beschaffung und Aufbau Messtechnik	7
2.3	Arbeitspaket 3 – Klassifizierung der Abfallarten (Feldversuchsbeantragung).....	9
2.4	Arbeitspaket 4 – Modellprobenherstellung	11
2.5	Arbeitspaket 5 – Probenvermessung.....	11
2.6	Arbeitspaket 6 – Kalibrationsmodelle	12
2.7	Arbeitspaket 7 – Modelltest/-validierung.....	13
2.8	Arbeitspaket 8 – Feldversuchsanlage	13
2.9	Arbeitspaket 9 – Zusammenfassung und Dokumentation.....	14
3	Bewertung der Ergebnisse	15
3.1	Bewertung der Ergebnisse gemessen an den Zielsetzungen des Antrages.....	15
3.2	Einschätzung der Ergebnisse für das Unternehmen in technischer Sicht.....	15
3.3	Einschätzung der Ergebnisse für das Unternehmen in wirtschaftlicher Sicht	15
3.4	Technologietransfer in Anwenderunternehmen und Nutzen für kleine und mittlere Unternehmen	16
3.5	Schutzrechte	16
3.6	Veröffentlichungen.....	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich zwischen der Grundkalibrierung „mineralischer Boden“ und der bodenart-spezifischen Gerätekalibrierung „Boden 1“

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der im Laborversuch zum Einsatz kommenden Messgeräte [3]	8
Tabelle 2:	Übersicht der im Feldversuch 1 zum Einsatz kommenden Messgeräte [3]	8
Tabelle 3:	Übersicht der im Feldversuch 2 zum Einsatz kommenden Messgeräte [3]	8
Tabelle 4:	Aufbau, Zusammensetzung und Eigenschaften der für den Feldversuch 1 ausgewählten Haldenabdeckung.....	9
Tabelle 5:	Aufbau, Zusammensetzung und Eigenschaften der für den Feldversuch 2 ausgewählten Versuchsfläche	10
Tabelle 6:	Bewertung der elektrischen Leitfähigkeit der Gleichgewichtsbodenlösung EL _{GBL}	10

1 Gegenstand des FuE-Vorhabens

Mit dem Aufbringen von Abdeckschichten bei der biologischen Versiegelung von Altlasten oder der Deponie- und Haldenrekultivierung ist bei entsprechender wasserzehrender Begrünung eine Verminderung des Eindringens von Niederschlagswässern in unterlagernde Schichten verbunden. Bei der biologischen Versiegelung der großen Kali-Rückstandshalden in Nordthüringen wurde daher die Verwertung von Abfällen bei der Herstellung der Abdeckschichten gemäß der Kali-Haldenrichtlinie [1] zugelassen. Die Abdeckung erfolgt kommerziell, so dass die Minimierung der ökologischen Folgen eine wirtschaftliche Basis hat.

Im Rahmen umfangreicher Lysimeteruntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass durch einen entsprechenden Schichtenaufbau auf dem Haldenkörper eine Versickerungsverminderung um 80 % erreichbar sein dürfte. Bei diesen Untersuchungen ist messprinzip-/ausrüstungstechnisch bedingt die Wirkung der Abdeckschicht als Gesamtheit gemessen worden. Ausgehend von diesen Untersuchungen und den Erfahrungen aus der langjährigen Praxis der Herstellung von Abdeckschichten aus Abfällen ist ein Verfahren zur Sofortmessung der Feuchte in frei wählbaren Tiefen ohne Entnahme von Proben zur Spezifikation der Eigenschaften von Abdeckschichten eine Notwendigkeit, wobei inhaltsstoffliche Eigenschaften zu beachten sind.

Für die Erfüllung standsicherheitlicher Anforderungen, die Gewährleistung optimaler Wuchsbedingungen für die Begrünung und die Ausbildung einer Mikroflora und -fauna spielt der Wasserhaushalt in der Abdeckschicht eine entscheidende Rolle. Auch wenn für den Wasserhaushalt von Deponie- und Haldenabdeckungen entsprechende Bilanzmodelle entwickelt und angewendet werden, ist zur Ermittlung der Randbedingungen bzw. lokalen Transportphänomene eine experimentelle Bestimmung von Wassergehalten und deren Zeitvarianz unerlässlich. In Abdeckschichten treten Wassersättigungen nicht auf und werden durch geotechnische Maßnahmen ausgeschlossen.

Als den Wasserhaushalt von Böden kennzeichnender Parameter wird der Wassergehalt, üblicherweise auch als Feuchte bezeichnet, verwendet. Allgemein tritt Wasser im Boden als immobiles und mobiles Porenwasser auf. In der Deponierekultivierung sind entsprechende zerstörungsfreie Messverfahren verbreitet, wobei in der Regel Böden natürlicher Herkunft zu vermessen sind. Das Aufkommen derartiger Böden ist sehr begrenzt.

Allein in Nordthüringen werden zurzeit etwa 1,5 Millionen Tonnen Abfälle jährlich für die Herstellung der Abdeckschichten verwertet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Materialien je nach Aufkommen und Abfallart sowohl Kleinstchargen als auch großtonnagige Mengen umfassen können, die zudem noch einmalig oder kontinuierlich anfallen. Daher ist eine Herstellung von Einmischungen unumgänglich.

1 Richtlinie für die Abdeckung und Begrünung von Kallhalden im Freistaat Thüringen – Kali-Haldenrichtlinie.– Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt Erfurt, 18.04.2002

Für den Aufbau der böschungsangleichenden Schichten für Kali-Rückstandshalden, d. h. der konturgebenden Schicht, kommen folgende Abfallgruppen zum Einsatz:

- Bodenaushub,
- Sandfanggüter,
- Sande,
- Gips-/Anhydritabfälle,
- industrielle Schlämme,
- Aluminiumhydroxid.

In der Begrünungsschicht selbst finden zusätzlich Kulturbodensubstrate Verwendung, die aus Klärschlämmen, mineralischen Stoffen, Stoffen mit puzzolanischen Eigenschaften und biogenen Materialien hergestellt werden.

Bei den Abfällen können Salzgehalte und Gehalte an basischen Verbindungen, die aus der Genese zu erklären sind, zu erhöhten Leitfähigkeiten führen. Durch die von natürlichen Böden stark abweichende chemische und physikalische Struktur sind bei energie- und stoffwandelnden Vorgängen dissoziierbare Stoffe mobilisierbar. Die erhöhten Leitfähigkeiten (im Eluat bis 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sind bei der Feuchtemessung zu berücksichtigen. Des Weiteren ist es möglich, dass in der Übergangsschicht zum Haldenmaterial durch Kapillarwirkungen erhöhte Salzgehalte auftreten. Gerade in dieser Schicht ist eine Feuchtemessung besonders interessant, da hier auch Wässer aus der Abdeckschicht in den Haldenkörper übertreten können. Zusätzlich ist zu beachten, dass die konsistenten und mineralischen Parameter von Abfällen sich z. T. deutlich von denen von Bodenmatrices unterscheiden.

Elektrotechnische Verfahren wie TDR (Time Domain Reflectometry) und FDR (Frequency Domain Reflectometry) haben in den letzten Jahren eine breite Anwendung in der direkten Feuchtemessung in Schüttgütern aller Art und Böden gefunden. Wesentliche Einflussgrößen auf die Genauigkeit sind die Bodenart/-matrix und die Leitfähigkeit des Messgutes. Eine Quantifizierung dieser Einflussgrößen ist nur durch eine spezifische Eichung bzw. Anpassung an die Einsatzumgebung möglich. Der wissenschaftliche und ingenieurtechnische Ansatz des FuE-Vorhabens leitet sich hiervon ab.

Für Abfälle, die zur Herstellung von Abdeckschichten verwertet werden, und in den Abdeckschichten selbst ist vorgesehen, eine Geräteanordnung zur Feuchtemessung zu entwickeln, die mobil und auch stationär einsetzbar ist. Grundlage sind bereits entwickelte Messsysteme, die in einer neuartigen Applikation eingesetzt werden sollen. Damit könnte den Herstellern der Abdeckschichten, den zuständigen Fachbehörden sowie den maßnahmebegleitenden Ingenieurbüros ein Messverfahren zur kostengünstigen Wasserhaushaltsbestimmung in Abdeckschichten zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus kann die Anwendungsbreite bestehender Feuchtemessverfahren wesentlich erweitert werden. Mit der hier vorgegebenen Geräteanordnungsentwicklung soll ein innovativer Beitrag für die Feuchtemessung in den bezeichneten Abdeck-

schichten aus Abfällen vermarktungsfähig und wirtschaftlich anwendbar geschaffen werden. Damit kann gleichzeitig den Anforderungen des Abf-/KrWG zur Verwertung von Abfällen in hohem Maße entsprochen werden.

2 Ergebnisse im Berichtszeitraum

2.1 Arbeitspaket 1 - Voruntersuchungen

Von SCHERZER [2] wurden bereits nach der TDR- und FDR-Methode arbeitende Messgeräte hinsichtlich ihrer Eignung bei erhöhten elektrischen Leitfähigkeiten überprüft. Die hierfür verwendeten TDR- und FDR-Sonden sind vom Hersteller für Leitfähigkeitsbereiche von 0 bis 9 mS/cm bzw. 0 bis 1 mS/cm ausgelegt. Die Untersuchung ergab u. a., dass diese Toleranzgrenzen für standardkalibrierte Sonden eingehalten werden. Der Einsatzbereich der im Rahmen dieses Forschungsthemas eingesetzten TDR-Sonde entspricht dem der in der Arbeit von SCHERZER verwendeten TDR-Sonde. Demgegenüber sind für die zur Anwendung gekommenen nach dem FDR-Prinzip arbeitenden Messgeräte deutlich höhere Leitfähigkeitstoleranzen angegeben. Es ist daher zu vermuten, dass diese Sonden für den Einsatz von stark salzbelasteten Böden bzw. Bodenersatzstoffen geeignet sind. Die Auswertung bezüglich der Leitfähigkeitsmessung ist in Kapitel 3.1.3.4 des Abschlussberichtes [3] nachzulesen. Die technischen Daten der in dieser Arbeit verwendeten Sonden enthalten die Kapitel 4.1.3.2.2 und 4.1.3.2.3 [3].

Die Auswahl der geeigneten Abfälle für den Einsatz als Testmedien richtete sich sowohl nach der Verfügbarkeit der Materialien als auch nach deren Leitfähigkeiten. Für die Felduntersuchungen waren zudem geeignete Flächen zu finden. Hierzu erfolgte im Vorfeld eine Recherche zu den Leitfähigkeiten und den Salzgehalten verschiedener Abfallstoffe. Die Ergebnisse sind im Kapitel 3.3.2 des Abschlussberichtes [3] zusammengetragen. Die für die Feuchtemessungen in Frage kommenden, vorausgewählten Materialien wurden hinsichtlich ihrer Leitfähigkeiten und Salzgehalte überprüft (Kapitel 2.3).

Die Herausarbeitung der Extrema der Feuchte erfolgte im Zusammenhang mit der Kalibrierung der Messgeräte im Vorversuch. Hierzu wurden sowohl bei 105 °C getrocknete als auch mit Wasser gesättigte (100 % Feuchte) Probenkörper bemessen. Das Ziel dieses Versuches war es, die Zuverlässigkeit der Feuchtemesssonden unter diesen extremen Bedingungen zu testen. Die Ergebnisse dieser Überprüfung sind im Kapitel 3.2.2.1 des Abschlussberichtes [3] enthalten.

-
- 2 SCHERZER, J.; SCHAAF, W.; HÜTTL, R.F. (1996): Eignung von FDR- und TDR-Sonden zur Erfassung der Bodenfeuchte in Kippsubstraten mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit. –In: Mitteilungen der Deutschen bodenkundlichen Gesellschaft. – 80(1996). – S. 279-282; Sonderdruck
 - 3 Entwicklung einer Geräteanordnung zur kontinuierlichen Feuchtemessung in salzbelasteten Böden sowie aus Abfällen hergestellten Kulturbodensubstraten. -Sondershausen: K-UTEC, 19.12.2003 (unveröffentl.)

In den Abdeckschichten kann sich durch verschiedene Umwandlungs- und Umsetzungsreaktionen der Salzgehalt und damit einhergehend die Leitfähigkeit ändern. Prozesse, die zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit führen können sind u.a. die Ettringitbildung aus Bauschutt, die Umsetzungen nach der Kalkung von Klärschlämmen u.a. Die Beschreibung dieser Prozesse erfolgt in Kapitel 2.3.3 des Abschlußberichtes [3].

2.2 Arbeitspaket 2 – Beschaffung und Aufbau Messtechnik

Im Rahmen dieser Arbeit konnten antragsgemäß sowohl nach dem TDR- als auch nach dem FDR-Prinzip arbeitende Feuchtemesssonden angeschafft werden. Für die Untersuchungen mit der TDR-Methode wurde die auf dem verbesserten TRIME-TDR-System basierende TRIME-EZ-Sonde von der Firma IMKO verwendet. Für die Messung mit der FDR-Methode kamen die Theta-Sonde Typ ML2 und zwei PR1-Sonden (PR1-4 und PR1-6) zum Einsatz. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Sonden besteht darin, dass über die ML2-Sonde die Bodenfeuchte in nur einem Tiefenbereich ermittelt werden kann, während bei der PR1-Sonde die Erfassung dieses Parameters in mehreren Horizonten gleichzeitig möglich ist.

Die Beschreibung der beiden Messverfahren sowie nähere Angaben zu den ausgewählten Sonden enthalten die Kapitel 4.1.3.2.2 und 4.1.3.2.3 des Abschlußberichtes [3].

Darüber hinaus erfolgte die Durchführung eines Vergleichstestes zwischen der Theta-Sonde ML2, der Sonde TRIME-EZ und den PR1-Sonden. In Auswertung des Vergleichstestes wurden für die weiteren Arbeiten nur die Theta-Sonde ML2 und die PR1-Sonden genutzt. Diese Sonden wurden einem Langzeitversuch zur Feuchtemessung unterzogen. In Form eines Säulenversuches an Modellproben ohne Beregnung erfolgte der Vergleich von der Theta-Sonde ML2 und der Sonde PR1. Neben der Feuchte wurden zusätzlich die Saugspannung mit einem Equitensiometer und die Bodentemperatur mit einem Bodentemperaturfühler ermittelt (Abschlußbericht [3] Kapitel 4.1.3.3 und 4.1.4). Die Auslesung der Daten erfolgte über den Datenlogger EcoLogF1 bzw. über das Handablese- und Speichergerät ASG1 (Abschlußbericht [3] Kapitel 4.1.5).

In Tabelle 1, in Tabelle 2 und in Tabelle 3 sind die Zusammenstellung der in den jeweiligen Labor- und Feldversuchen zum Einsatz gekommenen Messgeräte einschließlich deren Einbautiefen enthalten. Die Versuchsdurchführung ist im Kapitel 4.2 des Abschlußberichtes [3] genau beschrieben. Die Testmedien wurden entsprechend ihrer Leitfähigkeit ausgewählt (Kapitel 2.3). Die Feldversuchsanordnung teilt sich in zwei Teilversuchsanordnungen (Feldversuch 1 - tief; Feldversuch 2 - flach).

Die Messwerterfassung wurde in folgenden Zeiträumen durchgeführt:

- Laborversuch 26.06.2002 bis 27.01.2003
- Feldversuch 1 31.01.2003 bis 29.09.2003
- Feldversuch 2 05.02.2003 bis 11.11.2003

Tabelle 1: Übersicht der im Laborversuch zum Einsatz kommenden Messgeräte [3]

Messgerät	Parameter	Methode	Messhorizonte
PR1-4 (6013)	Bodenfeuchte	FDR	0,1 m
			0,2 m
			0,3 m
			0,4 m
PR1-4 (6014)	Bodenfeuchte	FDR	0,1 m
			0,2 m
			0,3 m
			0,4 m
ML2	Bodenfeuchte	FDR	0,3-0,4m

Tabelle 2: Übersicht der im Feldversuch 1 zum Einsatz kommenden Messgeräte [3]

Messgerät	Parameter	Methode	Messhorizonte
PR1-6	Bodenfeuchte	FDR	0,1 m
			0,2 m
			0,3 m
			0,4 m
			0,6 m
			1 m
ML2	Bodenfeuchte	FDR	1,5 m
ML2	Bodenfeuchte	FDR	2,0 m
BT	Bodentemperatur	PT 100	1,0 m
BT	Bodentemperatur	PT 100	2,0 m
EQ 15	Wasserspannung	FDR	0,4 m

Tabelle 3: Übersicht der im Feldversuch 2 zum Einsatz kommenden Messgeräte [3]

Messgerät	Parameter	Methode	Messhorizonte
PR1-4	Bodenfeuchte	FDR	0,1 m
			0,2 m
			0,3 m
			0,4 m
BT	Bodentemperatur	PT 100	0,4 m
BT	Bodentemperatur	PT 100	0,2 m

2.3 Arbeitspaket 3 – Klassifizierung der Abfallarten (Feldversuchsbeantragung)

Die Untersuchungen der Feuchte von salzbelasteten Materialien wurden sowohl an Modellproben als auch an Realproben durchgeführt. Die Vorauswahl der für die Versuche geeigneten Materialien und Abdeckschichten erfolgte unter Berücksichtigung der Abfallmengenströme (Kapitel 3.3.1 des Abschlußberichtes [3]) und der auf den Halden gängigen Praxis der Herstellung von Abdeckschichten. Für die tatsächliche Eignung der vorausgewählten Stoffe als Testmedien für die Feuchtemesssonden wurden deren Salzgehalte und Leitfähigkeiten bestimmt. Aus dem Vergleich der EL_{GBL} -Werte mit der Einstufung gemäß dem Handbuch der Bodenuntersuchung [4] ging hervor, dass die elektrischen Leitfähigkeiten aller untersuchten Materialien mit Ausnahme eines Vergleichbodens als extrem hoch zu bewerten sind. Für den Laborversuch mit den Modellproben wurde Gereka (ein Stoffgemisch) herangezogen. Die Durchführung der Feldversuche erfolgte auf dem Plateau der Halde Bleicherode. Bei der Fläche von Feldversuch1 handelt es sich um eine fertig gestellte Abdeckung von hoher Mächtigkeit, die Fläche von Feldversuch 2 wurde für ein Forschungsthema zur Stickstoffuntersuchung von Stoffgemischen [5] angelegt und ist nur von geringer Mächtigkeit. Der Aufbau (Schichtenfolge) und die Zusammensetzung dieser Flächen ist Tabelle 4 und Tabelle 5 zu entnehmen. Eine umfassende Beschreibung der stofflichen Eigenschaften enthält das Kapitel 4.2 des Abschlußberichtes [3].

Das zuständige Bergamt wurde über die Durchführung der Feldversuche informiert.

Tabelle 4: Aufbau, Zusammensetzung und Eigenschaften der für den Feldversuch 1 ausgewählten Haldenabdeckung

Schicht	Zusammensetzung	Mächtigkeit	Organoleptik
Kulturschicht	40 – 50 % Papierschlamm 35 – 45 % Bodenaushub 10 – 20 % Gießereisand	0,5 m	schluffig, braun
konturgebende Schicht	Bodenaushub/Kulturbodensubstrat Gießereisand Bauschutt	8 m	schluffig sandig, kiesig, steinig, bunt

4 Hrsg.: DIN: Handbuch der Bodenuntersuchung (2000): Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter; physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren: gesetzliche Regelwerke. – Berlin; Zürich: Beuth

5 STUDE, J. (2003): Entwicklung von Rezepturen für Bodenersatzstoffe auf der Basis optimaler Nährstoffverfügbarkeit und minimaler Schadstofffreisetzung: Zwischenbericht für den Zeitraum: 01.08.2002 bis 31.12.2002. – Sondershausen: IVUB e.V., 2003
(unveröffentl.)

Tabelle 5: Aufbau, Zusammensetzung und Eigenschaften der für den Feldversuch 2 ausgewählten Versuchsfläche

Schicht	Zusammensetzung	Mächtigkeit	Organoleptik
Kulturschicht	30 – 40 % Papierschlamm 35 – 45 % Bodenaushub 20 – 30 % Gießereisand	0,4 m	Sand schluffig, leicht kiesig, dunkelbraun

Tabelle 6: Bewertung der elektrischen Leitfähigkeit der Gleichgewichtsbodenlösung EL_{GBL}

EL_{GBL} bei 25 °C [mS/cm]	Stufe	Kurzzeichen
< 0,75	sehr gering	EL1
0,75 – 2	gering	EL2
2 – 4	mittel	EL3
4 – 8	hoch	EL4
8 – 15	sehr hoch	EL5
> 15	extrem hoch	EL6

Aus dem Vergleich der EL_{GBL} -Werte mit der Einstufung gemäß Tabelle 6 geht hervor, dass die elektrischen Leitfähigkeiten aller untersuchten Materialien als extrem hoch zu bewerten sind. Daraus lässt sich folgern, dass sich die vorausgewählten Materialien optimal als Testmedien einsetzen lassen.

Die Feldversuche wurden auf Flächen der Halde Bleicherode durchgeführt. Dieser Standort erwies sich aufgrund der langjährigen Erfassung der mikroklimatischen Verhältnisse als besonders geeignet.

Die Messtechnik zur Feuchtemessung wurde im Laborversuch an hochbelasteten, unbegrünbaren Materialien (Gereka) getestet. In den sich anschließenden Feldversuchen wurden die Sonden in weniger salzbelasteten Abdeckschichten unter dem Hintergrund eingesetzt, dass sich aufgrund verschiedenster Ursachen zu einem späteren Zeitpunkt die Belastung noch weiter erhöhen kann (Kapitel 2.3.3.).

2.4 Arbeitspaket 4 – Modellprobenherstellung

Die Ergebnisse sind in Punkt 4.2 des Abschlußberichtes dargestellt.

Für den Laborversuch an einer Modellprobe wurde Gereka, ein für Versuchszwecke hergestelltes Abfallgemisch, herangezogen. Das Gereka-Material⁶ besteht aus Asche, Klärschlamm, Gießereisand, Erdaushub und geringen Mengen geschredderten Holzes. Dieses Gemisch weist aufgrund seiner Inhaltsstoffe stets eine Versalzung auf. Zur Kalibrierung müssen mindestens 5, besser 10 Werte mit einem Probekörper ermittelt werden müssen, dessen gravimetrische Feuchte und Dichte bekannt sind. Daraus können dann erst Abhängigkeiten der gemessenen Spannung von der volumetrischen Feuchte dargestellt und aus der Beziehung

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - a_0}{a_1} \quad [\text{Vol.-%}]$$

die Werte für a_0 und a_1 des jeweiligen Bodentyps ermittelt werden. Dabei ist bei der TRIME-Sonde das Modul SMCAL anzuwenden. Bei den ML2 bzw. PR1 Sonden steht für die jeweilige Sonde eine mathematische Beziehung zur Verfügung:

$$\text{ML2: } \sqrt{\varepsilon} = 1,07 + 6,4V - 6,4V^2 + 4,7V^3$$

$$\text{PR1: } \sqrt{\varepsilon} = 0,65 + 13,6V - 29,9V^2 - 72,5V^3$$

Da aber für ML2 und PR1 Handablesegeräte mit Kalibrierfunktion zur Verfügung standen, wurden die Werte a_0 und a_1 im Handablesegerät berechnet und eine Kurve „Boden 1“ für ein in den Versuchsflächen zu verwendendes Substrat benutzt (Gereka).

2.5 Arbeitspaket 5 – Probenvermessung

Die Ergebnisse der Versuche sind in Punkt 4.2. des Abschlußberichtes dargestellt.

Der Laborversuch mit der Modellprobe diente als Eignungstest für die Messgeräte. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Sonden ausgewählt und die Gerätekonfiguration für die Feldversuche entwickelt. Es wurden ausschließlich die gravimetrische und die volumetrische Feuchte ermittelt, wobei für letztere lediglich nach der FDR-Methode arbeitende Messgeräte zum Einsatz kamen. Die TDR-Sonde TRIME EZ wurde bereits im Vorversuch für die weitere Verwendung ausgeschlossen.

⁶ Gemisch wird z. Z. nicht mehr hergestellt.

Im Laborversuch wurde nach der einmaligen Aufgabe von Wasser in der Nähe der PR1 – Sonde mit der Nr. 6013 die Ausbreitung und Veränderung der Feuchte in einem Modellkörper aus Gereka gemessen. In Anlage 7.1. sind die Feuchteverläufe über einen Zeitraum von ca. 7 Monaten dargestellt. Die Messwerte wurden stündlich gespeichert (Anlage 5.1.) und mittels der Formel aus Kapitel 3.3 in Feuchte umgerechnet (Anlage 6.1.). Das Anliegen dieses Versuches war es, sowohl die ausgewählten Messgeräte hinsichtlich ihrer Langzeiteignung als auch den Datenlogger (EcoLogF1) auf seine Zuverlässigkeit zu testen.

Der Versuch lief vom 26.06.2002 bis 27.01.2003. Über den Datenlogger EcoLogF1 konnten die Messwerte stündlich erfasst werden.

2.6 Arbeitspaket 6 – Kalibrationsmodelle

Die Ergebnisse der Kalibrierungsversuche sind in Punkt 3.3 des Abschlußberichtes dargestellt. Es wurden Kalibrierungen in salzbelasteten Matrices durchgeführt und mit der Werkseinstellung „mineralischer Boden“ verglichen.

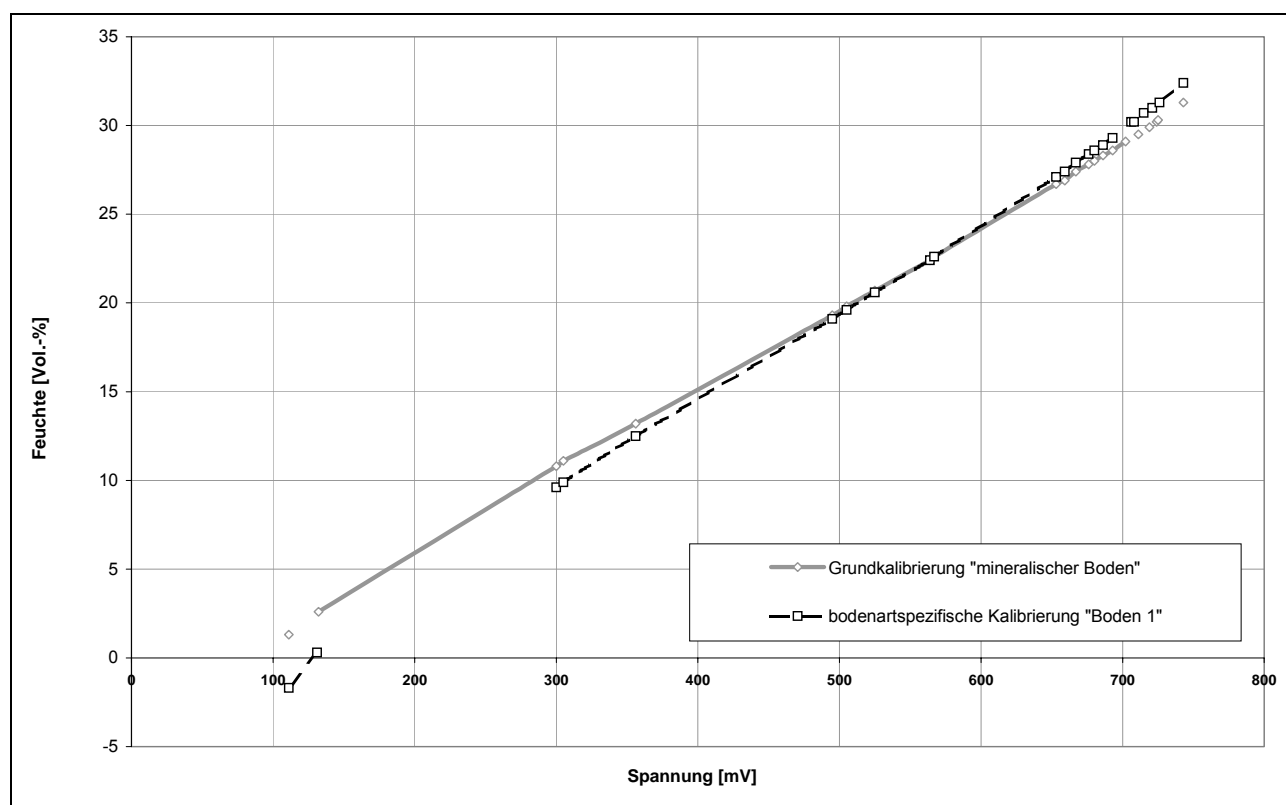


Abbildung 1: Vergleich zwischen der Grundkalibrierung „mineralischer Boden“ und der bodenart-spezifischen Gerätekalibrierung „Boden 1“

Durch die ausreichende Übereinstimmung wurde auf weitere Kalibrierungsversuche verzichtet und mit der Einstellung für mineralischen Boden weitergearbeitet. Die Parameter $a_0 + a_1$ sind hierbei 1,6 und 8,4, so daß sich folgende Berechnungsformeln ergeben:

$$\text{ML2:} \quad \text{Bodenfeuchte (Vol\%)} = \frac{(1,07+6,4V-6,4V^2+4,7V^3) + 1,6}{8,4} \cdot 100$$

$$\text{PR1:} \quad \text{Bodenfeuchte (Vol\%)} = \frac{[0,65+13,6V-29,9V^2+72,5V^3] - 1,6}{8,4} \cdot 100$$

Die ermittelte geeignete Grundkalibrierung wurde an einem ortsübliche Boden (Boden Sondershausen) und an einer Substratkomponente (Asche Mehrum) getestet.

2.7 Arbeitspaket 7 – Modelltest/-validierung

Die Ergebnisse der Versuche sind in Punkt 4.2. des Abschlußberichtes dargestellt.

Die Datenspeicherung mit dem Datenlogger Ecolog F1 mit stündlicher Erfassung funktionierte problemlos. Als ideal handhabbar stellte sich in diesem Versuch die Profilsonde PR1 heraus, die sowohl den unkompliziertesten Einbau als auch die leichteste Auslesemethode (auch mit Handgerät) ermöglicht. Außerdem erlaubt die Profilsonde PR1 durch Einbau verschiedener GfK- Rohre die diskontinuierliche Messung der Bodenfeuchte mit nur einer Sonde und einem Handmessgerät an mehreren Standorten hintereinander. Die Bodenfeuchtesonde ML2 liefert ebenso zuverlässige Werte, ist aber nach einem Einbau in Tiefen unter 0,1 m nur noch durch Aufgrabung zu entnehmen. Messungen an mehreren Standorten sind daher mit der ML2 Sonde nur im obersten Bereich von 0 – 0,1 m möglich. Der Vorteil bei fest installierter ML2 ist die Möglichkeit der Installation mit geringem Mehraufwand in größeren Tiefen als 1 m, welche die Grenztiefe für die PR1 Sonde darstellt.

2.8 Arbeitspaket 8 – Feldversuchsanlage

Bei der für den Feldversuch 1 ausgewählten Fläche handelt es sich um eine nach den Vorgaben der Thüringer Kali-Haldenrichtlinie hergestellte reale Abdeckung des Plateaubereiches der Halde Bleicherode. Die Lage auf dem Plateau der Halde ist insbesondere wegen dem unkomplizierten Versickerungsverhalten – kein Einfluss von Hangwasser - von großem Vorteil.

Diese Abdeckschicht wurde im Sommer 2002 fertig gestellt und mit einer Grasansaat sowie verschiedenen Bäumen und Sträuchern begrünt. Die Mächtigkeit der gesamten Abdeckung beträgt - einschließlich der kapillarbrechenden Schicht von ca. 1 m - maximal 10 m, die in-situ-Messung der Parameter beschränkt sich jedoch nur auf die obersten 2 m.

Alle im Feldversuch 1 verwendeten Messgeräte (Kapitel 2.2) wurden im Zeitraum vom 31.01.2003 bis 29.09.2003 kontinuierlich betrieben. Die stündliche Erfassung der Werte erfolgte über einen Datenlogger.

Parallel zu Versuch 1 auf der länger liegenden Fläche von großer Mächtigkeit wurde ein zweiter Feldversuch auf einer frisch angelegten Fläche von geringerer Mächtigkeit durchgeführt.

Die Versuchsfläche 2 befindet sich ebenfalls auf dem Plateau der Halde, somit ist die Vergleichbarkeit der Werte gegeben. Dieser parallel laufende Versuch dient zur Überprüfung der Messgerätekonfiguration und damit gleichzeitig zur Validierung.

Die Fläche wurde im Rahmen eines Projektes zur Stickstoffuntersuchung von Stoffgemischen angelegt und Ende 2002 fertig gestellt. Sie wurde nicht mit Gras eingesät, es hat sich jedoch nach kurzer Zeit eine Eigenbegrünung, bestehend u. a. aus Tomaten, Zierkürbissen und Quecken, entwickelt. Die Zusammensetzung entspricht einer nach Kali-Haldenrichtlinie hergestellten Kulturschicht und ist darüber hinaus nahezu mit der Kulturschicht der Abdeckung aus Feldversuch 1 identisch.

Die Ermittlung der Werte in der Feldversuchsanlage 2 (Kapitel 2.2) erfolgte im Zeitraum vom 05.02. 2003 bis 11.11.2003 manuell und unregelmäßig mit dem Handablesegerät ASG 1.

Für den Vergleich der gewonnenen Messwerte konnten die Daten der automatischen Wetterstation auf dem Plateau der Halde Bleicherode herangezogen werden. Die Auswertung aller vorhandenen Daten ist im Kapitel 5 des Abschlußberichtes [3] nachzulesen.

2.9 Arbeitspaket 9 – Zusammenfassung und Dokumentation

Die Zusammenstellung der Unterlagen zur Geräteanordnung einschließlich der Kalibrationsmodelle für die zu untersuchenden Materialien erfolgte fristgemäß. Die umfassende Dokumentation zu den im Rahmen dieses Forschungsthemas durchgeführten Arbeiten, der Auswertung der Messwerte und den daraus gezogenen Schlussfolgerungen für die Feuchtemessung in salzbelasteten Matrices enthält der Abschlußbericht [3].

Mit diesem Arbeitspaket wurde im Zeitraum 04/03 – 06/03 begonnen. Es hat sich eine kostenneutrale Verlängerung des Themas zum Abschluss der Dokumentationsarbeiten erforderlich gemacht, da die Feldarbeiten bis zum Ende des Planzeitraumes fortgeführt wurden, um noch einen repräsentativen Zeitraum gewährleisten zu können. Die Feldversuche wurden bis 09.03 weitergeführt.

3 Bewertung der Ergebnisse

3.1 Bewertung der Ergebnisse gemessen an den Zielsetzungen des Antrages

Mit der installierten Feldmesstechnik und der gewählten Aufteilung in zwei Feldversuche

- Feuchtemessung im tieferen Abdeckbereich (0,1 – 2,0 m)
- Feuchtemessung im flacheren Abdeckbereich (0,1 – 0,4 m)

werden die im Antrag formulierten Zielsetzungen des FuE-Vorhabens erfüllt.

3.2 Einschätzung der Ergebnisse für das Unternehmen in technischer Sicht

Die Modifizierung der Feldmessenanlage (Änderungsbescheid vom 11.10.2002) erfolgte auf der Grundlage zusätzlicher apparativer Tests und führte zu einer Verbesserung:

- Neben der im Sachbericht zum Zwischennachweis vom 25.02.2002 dokumentierten Labormessenanlage wurden Mehrfachsonden vom Typ PR1 getestet und im Vergleich zu der bereits getesteten TRIME-Sonde Typ ML2 als im Handling günstiger bewertet. Ein Nachteil der Mehrfachsonden vom Typ PR1 ist die begrenzte Einbautiefe (bis 1m).
- Darüber hinaus wurden Handmessgeräte vom Typ ASG1 (ML2X, BTF, Equitensiometer) und HH2 (PR1) getestet. Die getesteten Geräte stellten sich als vorteilhaft im Hinblick auf Datenverfügbarkeit und Handhabbarkeit dar. Nachteilig könnte sich die gegenüber Datenloggern geringere zu speichernde/auszulesende Datenmenge erweisen.

Der Einsatz der vorgenannten Geräte stellt eine Verbesserung der Versuchsdurchführung in technischer Hinsicht (Handling und Datenverfügbarkeit) dar.

3.3 Einschätzung der Ergebnisse für das Unternehmen in wirtschaftlicher Sicht

Aus den FuE-Ergebnissen lässt sich eine für K-UTEC neuartige Vermarktungsrichtung ableiten (Feuchtemessung für landwirtschaftliche und gartenbauliche Produktionsbetriebe).

3.4 Technologietransfer in Anwenderunternehmen und Nutzen für kleine und mittlere Unternehmen

Mit dem Technologietransfer in Anwenderunternehmen kann erst nach Abschluss des Vorhabens begonnen werden.

Bislang ergaben sich keine Veränderungen hinsichtlich Nutzbarkeit und Nutzen für kleine und mittlere Unternehmen gegenüber den Aussagen im Antrag.

3.5 Schutzrechte

Nach Abschluss des Vorhabens wird eine Beantragung von Schutzrechten geprüft.

3.6 Veröffentlichungen

Die Veröffentlichung der Ergebnisse ist im Internet auf der K-UTEC-Homepage www.kutec.de und in geeigneten Fachzeitschriften geplant.